



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Διαχείριση Κινητικότητας και Υποστήριξη
Απρόσκοπτων Διαπομπών Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο**

Διδακτορική Διατριβή

του

Γεωργίου Α. Λεολέη

**Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διαχείριση Κινητικότητας και Υποστήριξη Απρόσκοπτων Διαπομπών Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο

Διδακτορική Διατριβή

Γεώργιος Α. Λεολέης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιάκωβος, Σ. Βενιέρης, Καθηγητής ΕΜΠ.

Μιχάλης, Ε. Θεολόγου, Καθηγητής ΕΜΠ.

Χρήστος, Ν. Καψάλης, Καθηγητής ΕΜΠ.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχάλης Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Ουζούνoglou
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δήμητρα Κακλαμάνη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Ε.Μ.Π.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Δουληγέρης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστημίου Πειραιώς

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007

.....
Γεώργιος Α. Λεολέης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Α. Λεολέης 2007.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

στους γονείς και την αδελφή μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Έχοντας ολοκληρώσει τη συγγραφή της διατριβής και αναλογιζόμενος πως πλησιάζει η χρονική στιγμή της υποστήριξής της, συνειδητοποιώ ότι παράλληλα κλείνει ένας μεγάλος κύκλος της ζωής μου. Ο κύκλος αυτός αφορά στην πορεία μου στους χώρους του *Πολυτεχνείου*. Πολλές εικόνες έρχονται στο μυαλό μου, όμορφες αλλά και δύσκολες. Το συμπέρασμα είναι ότι η πορεία ήταν μακρά αναμφισβήτητη, το ταξίδι όμως υπέροχο. Έγινε υπέροχο εξαιτίας των δυνατοτήτων και ευκαιριών που μου προσφέρθηκαν. Επιπλέον όμως λόγω των άξιων ανθρώπων με τους οποίους είχα την τιμή και τύχη να συνεργαστώ και να επικοινωνήσω, αλλά και κάποιους που πλαισιώνουν το υπόλοιπο της καθημερινής ζωής μου. Τους ανθρώπους αυτούς θέλω να ευχαριστήσω στη συνέχεια, αναγνωρίζοντας παράλληλα τη συμβολή τους στο αποτέλεσμα.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ιάκωβο Βενιέρη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια που μαθήτευσα δίπλα του και για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να συμμετάσχω σε μία πληθώρα ερευνητικών και εμπορικών προγραμμάτων. Επίσης τον ευχαριστώ για τη διάθεσή του να με διδάξει το επάγγελμα του μηχανικού και για τις συμβουλές του και την έμπνευση που μου μετέδιδε όποτε προέκυπταν προβλήματα που αρχικά φαίνονταν άλυτα. Το κύρος του έθεσε τον πήχη ψηλά, πράγμα το οποίο με ώθησε πολλές φορές, είτε αυτό λεγόταν δημοσιεύσεις, είτε έργο, να ξεπερνάω τα όρια που πίστευα ότι είχα. Αποτέλεσμα ήταν η γνώση και η πρόοδος.

Στην επτάχρονη πλέον παρουσία μου στο εργαστήριο, είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με μία πλειάδα ανθρώπων, από τους οποίους αποκόμισα πολλά οφέλη και εμπειρίες. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω όλους ανεξαιρέτως, αρχαιότερους ή νεότερους μου, και να τονίσω ότι το ταξίδι δεν θα ήταν τόσο όμορφο χωρίς τη συμβολή τους. Ιδιαίτερα όμως θα ήθελα να αναφερθώ σε κάποιους με τους οποίους αναπτύχθηκε ιδιαίτερη σχέση. Ειδικότερα, ο φίλος Σωτήρης Μανιάτης, πάντα πρόθυμος να συμβάλει θετικά, με λόγια μετρημένα και σκέψεις τεκμηριωμένες, με βοήθησε πολύ στο να ωριμάσω επαγγελματικά. Τον ευχαριστώ πολύ γι' αυτό. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Γιώργο Πρεζεράκο, για την άποψη συνεργασία μας στο θέμα των δημοσιεύσεων και για τον παραδειγματικό και υψηλού επιπέδου επαγγελματισμό που επέδειξε στην καθημερινή επαφή μας. Επιπλέον το Γιώργο Λιουδάκη, με τον οποίο ξενυχτήσαμε δουλεύοντας πολλά βράδια τα τελευταία χρόνια, αναλύοντας στα διαλείμματά μας, πολλά μικρά και μεγάλα πράγματα, αλλά και για την άρτια συνεργασία που είχαμε και το Βαγγέλη Κοσμάτο, ο οποίος με μύησε στον κόσμο των προσομοιώσεων. Επιπρόσθετα ευχαριστώ τον πάντα πρόσχαρο και αποτελεσματικό Νίκο Τσελίκια και τις Μαρίες, Στριμπάκου και Χαντζάρα, για τη συναδελφικότητα που ενέπνεαν στο χώρο του εργαστηρίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Λίλα Δημοπούλου για την πάρα πολύ καλή συνεργασία και φιλία που αναπτύξαμε όλα τα χρόνια της θητείας μας ως υποψήφιοι διδάκτορες. Επιπλέον για το, χωρίς υπερβολή, πνεύμα ευγενούς άμιλλας και αλληλεγγύης που καλλιεργήθηκε μεταξύ μας, με στόχο την έρευνα και την πρόοδο μας. Επίσης τους συναδέλφους Κώστα Ιατρόπουλο, Σταύρο Σπανό και Κυριάκο Καμπέρη, για τη φιλία τους και τις ανέμελες στιγμές που χαιρόμαστε από τα

φοιτητικά μας χρόνια μέχρι και σήμερα. Επιπλέον θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την Ανδριανή Πελτσεμή για την πίστη και τη φιλία της από την αρχή του ταξιδιού. Η στάση της με ώθησε να στοχεύω πάντα στο κάτι μεγαλύτερο. Την ευχαριστώ επίσης για την υπομονή, την αγάπη της και για τις ανέμελες στιγμές που μοιραστήκαμε τα τελευταία τρία δυσκολότερα, αλλά συνάμα ομορφότερα χρόνια. Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να δώσω στον αδελφικό φίλο και πολύ καλό μηχανικό, Νίκο Σκέντο. Η ουσιαστική στήριξή του, τόσο στο κομμάτι της έρευνας, λόγω της εμπειριστατωμένης και ευρείας γνώσης του, όσο και σε μικρά ή μεγάλα καθημερινά θέματα, λειτούργησε πολύ ευεργετικά και με βοήθησε πάντα να προχωράω μπροστά.

Κλείνοντας, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ανδρέα και Ελένη, και την αδελφή μου Αφροδίτη, για την αγάπη και συμπαράσταση που μου δίνουν όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Επίσης διότι έδωσαν κι αυτοί τον αγώνα τους και με βοήθησαν να συνεχίσω το ταξίδι, όταν αυτό χρειάστηκε. Η πραγμάτωση της διατριβής και η γενικότερη μέχρι σήμερα πορεία μου, οφείλεται κατά κύριο λόγο στη συνεχή παρουσία και στήριξή τους.

Γιώργος Λεολέης

Αθήνα, 15 Σεπτεμβρίου 2007

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της διαχείρισης κινητικότητας και την υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής και προτείνει ένα μηχανισμό για την αντιμετώπισή του. Η ανάλυσή του πρώτου ξεκινά από την περιγραφή του σύγχρονο τεχνολογικού περιβάλλοντος που στοιχειοθετεί το Κινητό Διαδίκτυο Πολυεκπομπής, όπως αυτό έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια ακολουθεί η λεπτομερής τεχνική περιγραφή του προβλήματος διαχείρισης κινητικότητας τόσο για πηγές όσο και παραλήπτες κίνησης πολυεκπομπής. Η προτεινόμενη λύση του προσεγγίζεται μέσω της προδιαγραφής του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι η χρήση ενδείξεων που προέρχονται από το στρώμα ζεύξης δεδομένων, αναφορικά με την ποιότητα των εγκατεστημένων ζεύξεων, με στόχο την επέκταση του δένδρου διανομής κίνησης πολυεκπομπής πριν τη διαπομπή του τερματικού στο νέο δίκτυο. Επίσης η προώθηση κίνησης από το προηγούμενο σημείο πρόσβασης προς το νέο, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής πολυεκπομπής του τερματικού και η προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής, στο διάστημα που προηγείται της σύνδεσής του στο νέο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η καθυστέρηση της διαπομπής πολυεκπομπής και περιορίζεται σημαντικά η απώλεια πακέτων λόγω της εκτέλεσής της. Η αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον τοπικών ασυρμάτων δικτύων, στο οποίο μοντελοποιήθηκε η τυχαία κίνηση των τερματικό και τα στοχαστικά χαρακτηριστικά του ασύρματου μέσου διάδοσης αναφορικά με την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Η ανάλυση παρουσιάζει συγκριτικά αποτελέσματα του προτεινόμενου μηχανισμού, με εφάμιλλους μηχανισμούς κινητικότητας πολυεκπομπής που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν την υπεροχή του προτεινόμενου σχήματος αναφορικά με την επίδραση μίας διαπομπής στην ποιότητα των εκτελούμενων εφαρμογών πολυεκπομπής. Επίσης αναδεικνύεται μία μικρή αύξηση στην κατανάλωση δικτυακών πόρων για την προώθηση και προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής κατά την εκτέλεση της διαπομπής. Επιπλέον περιγράφεται ο ρόλος που παίζουν οι μηχανισμοί πρόβλεψης και προετοιμασίας της διαπομπής στη συνολική επίδοση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πολυεκπομπή Διαδικτύου, Κινητό Διαδίκτυο, Δίκτυα All-IP, FMIPv6, M-FMIPv6/FTB, Διαχείριση Κινητικότητας, Απρόσκοπτες Διαπομπές, Αξιολόγηση Επίδοσης, Προσομοίωση.

ABSTRACT

The dissertation focuses on the problem of multicast mobility management and seamless multicast handover support and suggests a possible way to deal with it. After describing the technological background of the contemporary Multicast Mobile Internet technologies, special attention is put on the description of the technical dimensions of the issue of multicast mobility support for mobile multicast sources and receivers. The proposed solution is achieved by the specification of the M-FMIPv6/FTB protocol. Its basic characteristics comprise of proactive to handover multicast distribution tree expansion, multicast traffic forwarding and multicast packet buffering. In this way the multicast handover latency is minimized and multicast packet loss is eliminated. The performance evaluation of the proposed mechanism has been carried out through simulation. For this reason a realistic wireless local area network environment has been developed, for which, not only the random movement of the mobile terminals but also the stochastic properties of the wireless medium regarding the electromagnetic signals attenuation, have been modeled. The analysis presents comparative results of the proposed scheme with equivalent multicast mobility management mechanisms available in the literature. Extracted results show that the proposed mechanism performs better regarding the handover's effect to the quality of the executed multicast applications. Moreover, a slight increase in the amount of consumed network resources for the multicast traffic forwarding and packet buffering is recognized. Last but not least, the effect of the supporting mechanisms, for the handover prediction and preparation procedures, to the overall performance is described.

KEYWORDS: IP Multicast, Mobile IP, All-IP Networks, FMIPv6, M-FMIPv6/FTB, Mobility Management, Seamless Handovers, Performance Evaluation, Simulation

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	13
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	17
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	21
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	23
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
1.1 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ.....	26
1.2 ΤΟ ΚΙΝΗΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	28
1.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ	32
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	34
1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	37
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	39
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΟΔΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΤΟ ΚΙΝΗΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	39
2.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ – IP MULTICAST ARCHITECTURE.....	40
2.1.1 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων Παροχής Υπηρεσίας IP Multicast.....	42
2.1.1.1 Source specific multicast (SSM)	43
2.1.2 Έλεγχος Συμμετοχής Χρηστών σε Ομάδες Πολυεκπομπής	44
2.1.3 Μηχανισμοί Δρομολόγησης Πακέτων Πολυεκπομπής	46
2.1.3.1 Τεχνικές Δημιουργίας Δένδρων Διανομής	48
2.1.3.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Πολυεκπομπής.....	50
2.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	52
2.2.1 Γενική Αρχιτεκτονική Ασυρμάτων Δικτύων.....	53
2.2.2 Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας	54
2.2.2.1 Επιθυμητά χαρακτηριστικά μηχανισμών διαχείρισης διαπομπών	59
2.2.3 Ορολογία	60
2.3 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	62
2.3.1 Το Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου – Mobile IP.....	62
2.3.1.1 MIPv4	67
2.3.1.2 MIPv6	69
2.3.1.3 Πλεονεκτήματα & Προβλήματα από τη Χρήση του MIPv6	77
2.3.2 Αλληλεπίδραση στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων – Media Independent Handovers	78
2.3.3 Προηγμένοι Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας στο Διαδίκτυο	81
2.3.3.1 Αισιόδοξη Επισήμανση Διπλότυπης Διεύθυνσης	83
2.3.3.2 Πρόωρες Ανανεώσεις Εγγραφών - Early Binding Updates	84
2.3.3.3 Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management – HMIPv6.....	86
2.3.3.4 Fast Handovers for Mobile IPv6 – FMIPv6	90
2.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ – MOBILE IP MULTICAST	102
2.4.1 Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο	103
2.4.1.1 Οικείες Συμμετοχές (Home Subscriptions)	106
2.4.1.2 Απομακρυσμένες Συμμετοχές (Remote Subscriptions).....	109
2.4.1.3 Πλεονεκτήματα και Προβλήματα που Ανακύπτουν από τη Λειτουργία των Μηχανισμών Mobile IP Multicast.....	113
2.4.2 Προηγμένοι Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο.....	117
2.4.2.1 Παλαιότερες Προτάσεις	118
2.4.2.2 Σύγχρονες Προτάσεις.....	124

2.4.3	Γενικό Πλαίσιο Διαχείρισης Κινητικότητας Υπηρεσιών Πολυεκπομπής Διαδικτύου	143
2.4.3.1	Τεχνική Διατύπωση Προβλήματος Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής	143
2.4.3.2	Λειτουργικές Απαιτήσεις από τους Μηχανισμούς Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής	146
2.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	153

3 ° ΚΕΦΑΛΑΙΟ 159

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΡΟΣΚΟΠΤΩΝ ΔΙΑΠΟΜΠΩΝ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ – Το Πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB 159

3.1	Το ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΑΧΕΩΝ ΔΙΑΠΟΜΠΩΝ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ	160
3.1.1	Ανακάλυψη Νέου Σημείου & Νέου Δρομολογητή Πρόσβασης (AP & AR Discovery)	161
3.1.2	Μηχανισμός Πρόβλεψης Διαπομπών	164
3.1.3	Διεπαφή στρώματος Δικτύου και Ζεύξης Δεδομένων	166
3.2	ΣΤΟΧΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ	167
3.3	Το ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ M-FMIPv6/FTB	170
3.3.1	Βασική λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB	170
3.3.1.1	Προ-δραστική (Predictive) λειτουργία	172
3.3.1.2	Μετα-δραστική (Reactive) λειτουργία	188
3.3.1.3	Απουσία προβλέψεων - λανθασμένες προβλέψεις/μετακινήσεις	192
3.3.1.4	Επεκτάσεις των Μηνυμάτων του FMIPv6 για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής	194
3.3.2	Διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών του M-FMIPv6/FTB	203
3.3.3	Ποιότητα Υπηρεσίας	204
3.3.3.1	Κλιμάκωση	207
3.4	ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ	209
3.4.1	Χρονισμός Διαδικασιών Σηματοδοσίας κατά την Διαπομπή	209
3.4.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	213
3.5	ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ M-FMIPv6/FTB	215
3.5.1	Καθυστέρηση Αποχώρησης Από Ομάδες Πολυεκπομπής (Leave Latency)	215
3.5.2	Απόλυτος Συγχρονισμός Διαπομπών Στρώματος Δικτύου και Ζεύξης Δεδομένων	218
3.6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ M-FMIPv6/FTB ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	221
3.6.1	IEEE 802.11 – WLAN	223
3.6.2	Συστήματα κινητών επικοινωνιών 4 ^{ης} γενιάς	228
3.7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	235

4 ° ΚΕΦΑΛΑΙΟ 239

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ M-FMIPv6/FTB 239

4.1	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	240
4.2	Το ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	242
4.2.1	Μοντελοποίηση Ηλεκτρομαγνητικού Περιβάλλοντος	242
4.2.1.1	Απώλειες Διάδοσης	242
4.2.1.2	Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας – Shadow Fading	244
4.2.2	Μηχανισμοί Ανακάλυψης Νέου Σημείου Πρόσβασης, Πρόβλεψης & Εκτέλεσης Διαπομπών	249
4.2.3	Link Layer Triggers	253
4.2.4	Τοπολογία δικτύου	255
4.3	ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	257
4.3.1	Σενάριο I: Τυχαία Κίνηση Τερματικού - Random Waypoint Mobility	257
4.3.2	Σενάριο II: Κίνηση Τερματικού σε Προκαθορισμένη Διαδρομή - Fixed Trajectories	259
4.3.3	Τυπικές Ρυθμίσεις Προσομοιωτή	260
4.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	262
4.4.1	Σενάριο I	264
4.4.1.1	Επίδραση από τη μεταβολή των ορίων σκανδαλισμού	264
4.4.1.2	Επίδραση της απόστασης μεταξύ των περιοχών δικτύων πρόσβασης	270
4.4.1.3	Επίδραση της χωρητικότητας των προσωρινών καταχωρητών στους δρομολογητές πρόσβασης	272
4.4.1.4	Επίδραση του αριθμού τερματικών	274

4.4.2	Σενάριο II	276
4.4.2.1	Επίδραση της λειτουργίας των βοηθητικών μηχανισμών πρόβλεψης και προετοιμασίας διαπομπής	276
4.4.2.2	Επίδραση της απόστασης μεταξύ των περιοχών δικτύων πρόσβασης	280
4.4.2.3	Επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του τερματικού.....	283
4.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	288
5^ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	291
	ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	291
5.1	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	292
5.2	ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	301
5.3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	304
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	305
	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΙΑΠΟΜΠΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ IPV6	305
A.1	ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗ – ROUTER DISCOVERY	306
A.2	ΡΥΘΜΙΣΗ IPV6 ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ – ADDRESS AUTOCONFIGURATION	307
A.3	ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ – MOVEMENT DETECTION	310
A.4	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ MOBILE IPV6	312
A.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ND	315
A.6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΤΟΥ MIPV6	317
A.7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	321
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	323
	ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 3^{ΗΞ} ΓΕΝΙΑΣ	323
B.1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 3 ^{ΗΞ} ΓΕΝΙΑΣ	324
B.1.1	Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS	324
B.1.2	Παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου στο UMTS – Υπηρεσία GPRS	325
B.1.2.1	Φορείς και Κλάσεις Υπηρεσίας – Ποιότητα Υπηρεσίας στο UMTS	326
B.1.2.2	Μηχανισμοί Διαχείρισης Συνόδων.....	328
B.1.2.3	Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας	328
B.2	ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ IP MULTICAST ΣΤΟ UMTS.....	329
B.2.1	IP Multicast υπερκείμενη προς GPRS βασικής υπηρεσίας.....	329
B.2.2	Η Υπηρεσία MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service).....	330
B.2.2.1	Βασική Αρχιτεκτονική.....	331
B.2.2.2	Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) MBMS φορέων	337
B.2.2.3	Πλαίσια Πληροφορίας Διαχείρισης για την υπηρεσία MBMS	338
B.2.2.4	Διαχείριση Συνόδων Χρηστών Υπηρεσίας MBMS	341
B.2.2.5	Διαχείριση Κινητικότητας Χρηστών Υπηρεσίας MBMS.....	345
B.3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	349
	ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	351
	ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΌΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ	355
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ	357
	ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ	357
	ΣΥΝΕΔΡΙΑ	357
	ΒΙΒΛΙΑ	358

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 - 1. Αρχιτεκτονική Δικτύου All-IP	30
Σχήμα 2 - 1. Τυπική λειτουργία πρωτοκόλλου MIPv4 – triangular routing	69
Σχήμα 2 - 2. Τυπική λειτουργία πρωτοκόλλου MIPv6 - Route Optimization mode.....	71
Σχήμα 2 - 3. Διαδικασία Σηματοδοσίας και Χρονισμός με χρήση του πρωτοκόλλου MIPv6 σε λειτουργία Route Optimization κατά τη διάρκεια διαπομπής στρώματος δικτύου	74
Σχήμα 2 - 4. Υπηρεσίες Υποστήριξης Διαπομπών Ανεξαρτήτως Φυσικού Μέσου – MIH Services	79
Σχήμα 2 - 5. Πρόωρες Ανανεώσεις Εγγραφών – Early MIPv6 Binding Updates.....	85
Σχήμα 2 - 6. Παράδοση πακέτων κίνησης με χρήση του HMIPv6· Intra-MAP Handover	88
Σχήμα 2 - 7. Παράδοση πακέτων κίνησης με χρήση του HMIPv6· Inter-MAP Handover	88
Σχήμα 2 - 8. Σηματοδοσίας κατά την εκτέλεση διαπομπής με χρήση του HMIPv6	89
Σχήμα 2 - 9. Παράδοση πακέτων κίνησης με χρήση του πρωτοκόλλου FMIPv6	91
Σχήμα 2 - 10. Σηματοδοσία FMIPv6 – Predictive Mode	94
Σχήμα 2 - 11. Σηματοδοσία FMIPv6 – Reactive Mode	94
Σχήμα 2 - 12. Χρονισμός διαδικασιών σηματοδοσίας κατά την εκτέλεση διαπομπών με χρήση του πρωτοκόλλου FMIPv6	101
Σχήμα 2 - 13. Λειτουργία μηχανισμού Home Subscriptions κατά την διαπομπή παραλήπτη IP multicast κίνησης.....	107
Σχήμα 2 - 14. Διαδικασία σηματοδοσίας κατά τη διαπομπή κινητού παραλήπτη IP Multicast κίνησης με χρήση του μηχανισμού Home Subscriptions.....	108
Σχήμα 2 - 15. Λειτουργία μηχανισμού Home Subscriptions για την περίπτωση διαπομπής πηγής IP multicast κίνησης	109
Σχήμα 2 - 16. Λειτουργία μηχανισμού Απομακρυσμένων Συμμετοχών κατά διαπομπή παραλήπτη IP multicast κίνησης.....	111
Σχήμα 2 - 17. Λειτουργία μηχανισμού Απομακρυσμένων Συμμετοχών κατά διαπομπή πηγής IP multicast κίνησης.....	112
Σχήμα 2 - 18. Διαδικασία σηματοδοσίας κατά τη λειτουργία του μηχανισμού M-HMIPv6	126
Σχήμα 2 - 19. Σηματοδοσία M-FMIPv6, Predictive Mode	131
Σχήμα 2 - 20. Σηματοδοσία M-FMIPv6, Reactive Mode	131
Σχήμα 2 - 21. Διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής με χρήση του πρωτοκόλλου MSSMv6	140
Σχήμα 2 - 22. Διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής με χρήση του μηχανισμού Tree Morphing	142
Σχήμα 3 - 1. Χρονική αλληλουχία διαδικασιών υποστήριξης διαπομπών στο Περιβάλλον Ταχέων Διαπομπών	164
Σχήμα 3 - 2. Διαδικασία παράδοσης πακέτων πολυεκπομπής κατά τη λειτουργία του M-FMIPv6/FTB.....	171
Σχήμα 3 - 3. Σηματοδοσία κατά την προ-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB	173
Σχήμα 3 - 4. Χρησιμοποιούμενες Δίοδοι IP (IP Tunnels) για την προώθηση και προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής κατά την προ-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB.....	187
Σχήμα 3 - 5. Σηματοδοσία κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB.....	190
Σχήμα 3 - 6. Διαδικασία σηματοδοσίας κατά την Πλήρως Μετα-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB.....	195
Σχήμα 3 - 7. Multicast Router Capability Option	198
Σχήμα 3 - 8. Τροποποιημένο μήνυμα RtSolPr για την υποστήριξης διαπομπών πολυεκπομπής σύμφωνα με το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB.....	199
Σχήμα 3 - 9. Πεδίο ASM Multicast Subscription Option για τη μεταφορά πληροφορίας συμμετοχών πολυεκπομπής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MLDv1	200

Σχήμα 3 - 10. Πεδίο SSM Multicast Subscription Option για τη μεταφορά πληροφορίας συμμετοχών πολυεκπομπής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MLDv2.....	201
Σχήμα 3 - 11. Μορφοποίηση πεδίου Multicast Address Record [7]	202
Σχήμα 3 - 12. Χρονισμός Διαδικασιών Σηματοδοσίας και παράδοσης πακέτων κίνησης κατά την λειτουργία των πρωτοκόλλων M-FMIPv6/FTB, M-FMIPv6, M-HMIPv6 και του μηχανισμού Remote Subscription	212
Σχήμα 3 - 13. Χρονισμός Διαδικασιών Σηματοδοσίας και παράδοσης πακέτων κίνησης κατά την προηγμένη λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB.....	220
Σχήμα 3 - 14. Διαδικασία σηματοδοσίας οριζόντιας διαπομπής IEEE 802.11, με χρήση IEEE 802.21 προτυποποιημένων γεγονότων/σημείων σκανδαλισμού.....	226
Σχήμα 3 - 15. Βασική δομή δικτύου κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G)	230
Σχήμα 3 - 16. Διαδικασία SRNS Relocation κατά τη διαπομπή κινητού τερματικού με ενεργή σύνοδο MBMS	233
Σχήμα 4 - 1. Διάγραμμα ισοϋψών ισχύος (dB) λευκού θορύβου μηδενικής μέσης τιμής και $\sigma_s = 8$ dB για πλέγμα 50×50 σημείων	247
Σχήμα 4 - 2. Διάγραμμα ισοϋψών ισχύος των χωρικά συσχετισμένα στοιχεία σκίασης σε dB ..	248
Σχήμα 4 - 3. Εφαρμογή μεθόδου spline παρεμβολής στο πλέγμα στοιχείων σκίασης	249
Σχήμα 4 - 4. Τοπολογία Δικτύου Προσομοίωσης	256
Σχήμα 4 - 5. Σενάριο προσομοίωσης προκαθορισμένης διαδρομής	260
Σχήμα 4 - 6. Μέσος αριθμός διαπομπών και χρονικό διάστημα αναμονής διαπομπής (για διαπομπές προ-δραστικού τύπου), συναρτήσει του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$	265
Σχήμα 4 - 7. Μέσος αριθμός χαμένων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$	267
Σχήμα 4 - 8. Μέσος αριθμός προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή και μέσος αριθμός προσωρινά αποθηκευόμενων πακέτων στους AR της τοπολογίας, συναρτήσει του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$	269
Σχήμα 4 - 9. Μέσος αριθμός απολεσθέντων και προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της καθυστέρησης D_{WL}	271
Σχήμα 4 - 10. Μέσος αριθμός απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της χωρητικότητας των καταχωρητών προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στους AR...	272
Σχήμα 4 - 11. Μέσος αριθμός προσωρινά αποθηκευμένων πακέτων στους καταχωρητές προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στους AR, συναρτήσει της χωρητικότητας των καταχωρητών	273
Σχήμα 4 - 12. Μέσος αριθμός απολεσθέντων και προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει του αριθμού τερματικών που εκτελούν σχεδόν ταυτόχρονη διαπομπή .	275
Σχήμα 4 - 13. Μέσος αριθμός απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$	278
Σχήμα 4 - 14. Μέσος αριθμός προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$	279
Σχήμα 4 - 15. Μέσος αριθμός απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της καθυστέρησης D_{WL}	281
Σχήμα 4 - 16. Μέσος αριθμός προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της καθυστέρησης D_{WL}	282
Σχήμα 4 - 17. Μέσο πλήθος χαμένων πακέτων ανά διαπομπή κατά τη χρήση του μηχανισμού M-FMIPv6/FT, συναρτήσει της ταχύτητας του τερματικού	284
Σχήμα 4 - 18. Μέσος αριθμός διαπομπών συναρτήσει της μεταβολής της ταχύτητας τερματικού	285
Σχήμα A - 1. Χρονισμός Μηνυμάτων RA και RS σύμφωνα με το πρωτόκολλο Neighbor Discovery for IPv6	306
Σχήμα A - 2. Χρονισμός Διαδικασίας Stateless Address Autoconfiguration	310
Σχήμα A - 3. Σηματοδοσία κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διαπομπής στρώματος δικτύου με χρήση των πρωτοκόλλων Neighbor Discovery for IPv6 και Mobile IPv6	314

Σχήμα Α - 4. Σηματοδότηση κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διαπομπής στρώματος δικτύου με χρήση των ρυθμίσεων του πρωτοκόλλου Mobile IPv6 (συντηρητική προσέγγιση).....	319
Σχήμα Β - 1. Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS - Περιοχές Δικτύου	324
Σχήμα Β - 2. Παροχή υπηρεσίας IP Multicast ως υπερκείμενη της GPRS.....	330
Σχήμα Β - 3. Χρονική αλληλουχία φάσεων εκτέλεσης υπηρεσίας MBMS	334
Σχήμα Β - 4. Αρχιτεκτονική συστήματος για υποστήριξη της υπηρεσίας MBMS	335
Σχήμα Β - 5. Επέκταση Αρχιτεκτονικής Ποιότητας Υπηρεσίας UMTS για υποστήριξη συνδέσεων μεταγωγής πακέτου πολυεκπομπή και σημείου-προς-σημείο	337
Σχήμα Β - 6. Ενεργοποίηση υπηρεσίας MBMS πολυεκπομπής.....	342
Σχήμα Β - 7. Διαδικασία Απενεργοποίησης Υπηρεσίας MBMS πολυεκπομπής	343
Σχήμα Β - 8. Διαδικασία Έναρξης Συνόδου Υπηρεσίας MBMS πολλαπλών Προορισμών	345
Σχήμα Β - 9. Διαδικασία Routeing Area Update για MBMS συνόδους	346
Σχήμα Β - 10 Διαδικασία Inter-SGSN Serving RNC Relocation για MBMS συνόδους	348

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2 - 1. Υποστηριζόμενες υπηρεσίες από τη διεπαφή του στρώματος IEEE 802.21 M/H ..	80
Πίνακας 2 - 2. Διάρκεια περιόδων απόρριψης πακέτων και καθυστέρησης εκτέλεσης διαπομπής κατά τη χρήση πρωτοκόλλων FMIPv6 & MIPv6	101
Πίνακας 3 - 1. Χρησιμοποιούμενη έκδοση πρωτοκόλλου MLD κατά τη διαδικασία υποστήριξης διαπομπών με χρήση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB	197
Πίνακας 3 - 2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κατά τη λειτουργία των Εξεταζόμενων Μηχανισμών Διαχείρισης Κινητικότητας Αποδεκτών Κίνησης Πολυεκπομπής	213
Πίνακας 4 - 1. Τυπικές Ρυθμίσεις Προσομοιωτή	260
Πίνακας 4 - 2. Μεταβλητές παράμετροι κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων	262
Πίνακας A - 1. Καθυστερήσεις στις διαδικασίες που απαρτίζουν την εκτέλεση διαπομπών στρώματος IP, με χρήση των τυπικών ρυθμίσεων των πρωτοκόλλων Neighbor Discovery for IPv6 και MIPv6	319
Πίνακας B - 1. Φάσεις παροχής υπηρεσίας MBMS πολυεκπομπής – multicast mode	332
Πίνακας B - 2. Πλαίσια Πληροφορίας Διαχείρισης υπηρεσίας MBMS (MBMS Information Contexts).....	340

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός μέσα από την εισαγωγή είναι να διατυπωθεί το πρόβλημα που πραγματεύεται η διατριβή, που είναι η διαχείριση κινητικότητας και η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο. Για το λόγο αυτό αρχικά παρουσιάζονται τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών «Πολυεκπομπής Διαδικτύου» και περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του σύγχρονου «Κινητού Διαδικτύου». Επιπλέον περιγράφεται η ανάγκη ανάπτυξης προηγμένων μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που δίνουν την δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών σε ασύρματα συνδεδεμένους κινητούς παραλήπτες ή πηγές πολυεκπομπής. Τέλος, παρουσιάζεται η δομή της διατριβής.

Το Διαδίκτυο (Internet) έχει εξελιχθεί στις μέρες μας σαν ένα κυρίαρχο μέσο επικοινωνίας και έκφρασης. Τα οφέλη, αλλά και τα προβλήματα, που χαρακτηρίζουν τη νέα εποχή είναι ήδη ορατά. Το βέβαιο πάντως είναι ότι η ανάπτυξη και χρήση τεχνολογιών Διαδικτύου αποτελούν στο παρόν και το ορατό μέλλον, το επίκεντρο των εξελίξεων στο χώρο των επικοινωνιών. Ο κυριότερος λόγος είναι η επέκταση των δυνατοτήτων πρόσβασης σε *πληροφορίες* από τους τελικούς χρήστες, είτε αυτό αφορά στη γνώση, είτε στην ενημέρωση, είτε στις συναλλαγές, είτε στη δημιουργία πλούτου. Από την άλλη, σημαντική είναι και η διεύρυνση των δυνατοτήτων *επικοινωνίας*. Το διευρυμένο μοντέλο εκτείνεται προς πολλές κατευθύνσεις. Η βασικότερη είναι η ανάπτυξη των τεχνολογιών πρόσβασης για την αδιάλειπτη και καθολικής έκτασης δικτύωση (always connected). Κυρίαρχο ρόλο σε αυτό το σημείο παίζει η ανάπτυξη της ευρυζωνικότητας αλλά και της πλειάδας τεχνολογιών *ασύρματης* δικτύωσης. Η έννοια της καθολικής δικτύωσης είναι αρκετά ευρεία ώστε να περιλάβει όλα τα *σταθερά* και *κινητά* δίκτυα (προσωπικά, τοπικά, μητροπολιτικά, δορυφορικά, ad-hoc). Ιδίως για τα κινητά, σημαντικό θέμα είναι η παροχή και διατήρηση της *αδιάλειπτης* επικοινωνίας, παρά το ότι οι χρήστες είναι κινούμενοι και μπορούν να συνδέονται κατά τη διάρκεια των συνόδων τους σε διάφορα και ανεξάρτητα μεταξύ τους δίκτυα, *χωρίς να γίνεται αντιληπτό* από τους ίδιους. Μία δεύτερη κατεύθυνση, είναι η παροχή περιεχομένου πολυμεσικού τύπου σε ένα περιβάλλον *ασφαλούς* επικοινωνίας, με διασφαλισμένη *ποιότητα*.

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι η σύγκλιση των δύο παραπάνω κατευθύνσεων για την ενοποιημένη και αδιάλειπτη παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών διασφαλισμένης ποιότητας, μέσω δικτύων διαφορετικών τεχνολογιών. Ο πιο βασικός λόγος είναι ότι τα ετερογενή συστήματα δεν είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους και κατά συνέπεια η διατήρηση της επικοινωνίας είτε δεν υποστηρίζεται είτε δεν είναι ομαλή. Εξίσου σημαντική είναι και η περιορισμένη διαθεσιμότητα των ασύρματων δικτυακών πόρων αλλά και το γεγονός ότι η πυκνότητα των τερματικών συσκευών είναι πλέον τέτοια, ώστε οι απαιτητικές σε εύρος ζώνης πολυμεσικές υπηρεσίες, να είναι δύσκολο να παρασχεθούν, τόσο από την πλευρά των παρόχων, όσο και από τον πυρήνα των δικτύων μεταφοράς.

Η πλειονότητα των εφαρμογών πολυμέσων παρουσιάζει ένα νέο επικοινωνιακό μοντέλο βασικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι ότι η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού ενεργών (πηγών) και παθητικών (παραληπτών) μερών [1]. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών, με υψηλές απαιτήσεις σε δικτυακούς πόρους, που γίνονται περισσότερο δημοφιλείς και ελκυστικές για τους τελικούς χρήστες, είναι η διαδικτυακή τηλεόραση και ραδιόφωνο, η εικονοηλεκφώνια, η διανομή περιεχομένου εικόνας και ήχου κατ' απαίτηση, η εκτέλεση διαδραστικών παιχνιδιών κ.α. Οι υψηλές απαιτήσεις εντοπίζονται κυρίως στο εύρος ζώνης κατά μήκος του μονοπατιού επικοινωνίας, την επεξεργαστική ισχύ στην πλευρά των παρόχων και του δικτύου, την καθυστέρηση μεταφοράς του ρεύματος πληροφορίας προς τους αποδέκτες της [2].

Καταλήγουμε συνεπώς στο συμπέρασμα ότι η παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών στο σύγχρονο Διαδίκτυο είναι ένα πολυδιάστατο ζήτημα. Μία διάσταση αφορά στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των δικτυακών πόρων που απαιτεί η παροχή υπηρεσιών πολυμέσων. Σε αυτόν το

τομέα η χρήση ώριμων πλέον τεχνολογιών *Πολυεκπομπής Διαδικτύου* (IP Multicast) [3] είναι ιδανική, κυρίως εξαιτίας της δυνατότητάς τους να ελαχιστοποιούν το ποσό των πόρων που απαιτούνται για την υποστήριξη του συγκεκριμένου τύπου εφαρμογών. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης συνόδων το οποίο προσφέρει υπηρεσίες *ελέγχου συμμετοχής* των τερματικών χρηστών σε συνόδους παγκοσμίου επιπέδου (στρώμα δικτύου). Επιπρόσθετα, το πλαίσιο παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής είναι ενοποιημένο με ήδη εφαρμοσμένες διαδικτυακές τεχνολογίες *ποιότητας υπηρεσίας* και *ασφάλειας*.

Η δεύτερη διάσταση αφορά στο δικτυακό τοπίο, το οποίο με την ανάπτυξη των διαφόρων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ανομοιογενές [4]. Έχοντας κατά νου τις έννοιες της *καθολικής δικτύωσης* που αναλύθηκαν παραπάνω, οδηγούμαστε στην ανάγκη διασύνδεσης των συστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο [5]. Η διασύνδεση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση μίας κοινής και ευρέως διαδεδομένης τεχνολογίας. Η τεχνολογία αυτή δεν είναι άλλη από *Πρωτόκολλο Διαδικτύου* (*Internet Protocol*, IP). Το IP έχει τη δυνατότητα να προσφέρει μία κοινή πλατφόρμα επικοινωνίας ανεξάρτητα από την τεχνολογία πρόσβασης, πάνω στην οποία μπορεί να προσφερθεί το σύνολο των υπηρεσιών προς το σύνολο των κινητών και σταθερών χρηστών. Ορίζεται έτσι το *Κινητό Διαδίκτυο*, το οποίο διασυνδέει τους κινητούς χρήστες στο παγκόσμιας κλίμακας Διαδίκτυο.

Η τρίτη διάσταση αφορά τον τρόπο με τον οποίο είναι δυνατό να υλοποιηθεί η αποδοτική προσφορά υπηρεσιών πολυεκπομπής στους χρήστες του Κινητού Διαδικτύου. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό ότι οι κινητοί διαδικτυακοί χρήστες, αναμένουν να έχουν πρόσβαση σε εφαρμογές και υπηρεσίες που είναι διαθέσιμες στα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων και των εφαρμογών πολυεκπομπής πολυμέσων. Στις μέρες μας καταβάλλονται πολλές προσπάθειες [6]-[7], ώστε τα ασύρματα δίκτυα να προσφέρουν αποδοτική υποστήριξη υπηρεσιών κινητικότητας και πολυεκπομπής, και να φέρουν τους δύο αυτούς αυτόνομους, μέχρι τώρα, κόσμους, περισσότερο κοντά στη νέα γενιά δικτύων IP. Η συγκεκριμένη διάσταση σχετίζεται με την ανάπτυξη και σύγκλιση των τεχνολογιών διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας πολυεκπομπής, ώστε να καταστεί εφικτή και αποδοτική η παροχή υπηρεσιών πολυμέσων σε κινητούς διαδικτυακούς χρήστες. Η σχεδίαση και η αξιολόγηση της επίδοσης ενός μηχανισμού υποστήριξης απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής, αποτελεί το βασικό αντικείμενο της διατριβής.

Στη συνέχεια αναλύονται οι ιδιαίτερες πτυχές και οι απαιτήσεις των τεχνολογιών που συζητήθηκαν παραπάνω, ώστε να αποσαφηνιστούν τα σημεία στα οποία θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η ζητούμενη σύγκλιση. Αρχικά περιγράφονται τα βασικά συστατικά της *Αρχιτεκτονικής Πολυεκπομπής Διαδικτύου*, ακολουθούμενα από τα χαρακτηριστικά του *Κινητού Διαδικτύου*, που οριοθετεί το περιβάλλον στο οποίο εντοπίζεται το βασικό αντικείμενο της διατριβής. Στη συνέχεια περιγράφεται το γενικό πρόβλημα και διατυπώνεται, μέσα από την περιγραφή της δομής της διατριβής, ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται η προτεινόμενη λύση.

1.1 Υπηρεσίες Πολυεκπομπής Διαδικτύου

Κάνοντας μία αναδρομή στην εξέλιξη των μοντέλων επικοινωνίας σχετικά με τη μετάδοση δεδομένων, φωνής αλλά και εικόνας και ήχου, παρατηρείται ότι, αρχικά μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνιών τα οποία είτε προσέφεραν ως βασική υπηρεσία τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ δύο μόνο τερματικών, είτε παρείχαν υπηρεσίες εκπομπής προς το σύνολο των τερματικών που βρίσκονται συνδεδεμένα σε ένα δίκτυο. Πρόκειται για τα δύο βασικά μοντέλα επικοινωνίας που αφορούν την *σημείου-προς-σημείο* σύνδεση μεταξύ δύο χρηστών (*unicast*), και την *καθολική εκπομπή* (*broadcast*). Η ανάπτυξη των ενσύρματων συστημάτων τηλεπικοινωνιών αλλά και των δικτύων υπολογιστών (με κορύφωση το Διαδίκτυο) ακολούθησε το πρώτο μοντέλο, ενώ για παράδειγμα η μονόδρομη μετάδοση εικόνας και ήχου των δικτύων τηλεόρασης και ραδιοφώνου το δεύτερο. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 παρουσιάστηκε μία νέα αρχιτεκτονική μέσω της οποίας παρέχεται η δυνατότητα σε χρήστες που ανήκουν σε *ομάδες* με σαφώς προσδιορισμένα χαρακτηριστικά να επικοινωνούν μεταξύ τους. Ορίστηκε με αυτόν τον τρόπο ένα εναλλακτικό μοντέλο επικοινωνίας πολλών-προς-πολλούς, που ονομάζεται *πολυεκπομπή*¹ (*multicast*).

Ο βασικότερος στόχος της λειτουργίας του μοντέλου πολυεκπομπής είναι η ελαχιστοποίηση του ποσού των δικτυακών πόρων που απαιτείται για την παράδοση των ρευμάτων κίνησης προς το σύνολο των μελών μίας ομάδας τερματικών. Η συγκεκριμένη βελτιστοποίηση πραγματοποιείται μέσω του εκμηδενισμού των επαναμεταδόσεων του ρεύματος κίνησης για τα κοινά κομμάτια της διαδρομής που ακολουθείται κατά τη μετάδοση από τις πηγές προς τους παραλήπτες. Η υλοποίηση του μοντέλου πολυεκπομπής στα πλαίσια του Διαδικτύου προδιαγράφηκε μέσω μίας σειράς βασικών αρχών [8]-[9], οι οποίες είναι:

- Διαχωρίστηκε ο ρόλος των τερματικών κόμβων *πηγών* κίνησης, από αυτόν των τερματικών κόμβων *παραληπτών*.
- Ορίζεται η έννοια της *ομάδας πολυεκπομπής*, ως το σύνολο των παραληπτών ενός κοινού ρεύματος κίνησης που αποστέλλεται από τις πηγές.
- Δεν υπάρχει περιορισμός αναφορικά με το ποιος κόμβος συμμετέχει σε μία ομάδα. Αυτό σημαίνει ότι ένας κόμβος πηγή έχει τη δυνατότητα να είναι ταυτόχρονα και παραλήπτης (εννοείται του ρεύματος που εκπέμπεται από το σύνολο των πηγών). Η έννοια της *συμμετοχής* σε μία ομάδα αντιστοιχεί στην παράδοση του ρεύματος κίνησης προς τον παραλήπτη.
- Οι παραλήπτες εκδηλώνουν *αυτόβουλα* το ενδιαφέρον τους να συμμετάσχουν σε ή να αποχωρήσουν από ομάδες πολυεκπομπής, προς το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένοι.
- Το δίκτυο είναι υποχρεωμένο, μέσω εσωτερικών μηχανισμών, να παραδώσει το ρεύμα κίνησης πολυεκπομπής στα μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται *δένδρα διανομής* της κίνησης, που συνδέουν τις πηγές (*ρίζα*) με το σύνολο των παραληπτών (*φύλλα*). Τα δένδρα διανομής

¹ Ο αγγλικός όρος *cast* αποδίδεται στην ελληνική ως «ρίχνω/πετώ κάτι (με δύναμη) μπροστά». Στην ελληνική βιβλιογραφία ο όρος *multicast* αποδίδεται εναλλακτικά ως *πολυμετάδοση* ή *πολυδιανομή*. Στα πλαίσια της διατριβής θα χρησιμοποιηθεί ο όρος *πολυεκπομπή* ως πιο ακριβής.

στοιχειοθετούνται ως πίνακες δρομολόγησης στους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου (δρομολογητές), μέσω των οποίων αντιστοιχίζονται οι έξοδοι των δρομολογητών, προς τις οποίες προωθούνται πακέτα κίνησης που καταφθάνουν από διάφορες εισόδους. Στα σύγχρονα πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα δένδρα διανομής κατασκευάζονται και συντηρούνται δυναμικά με βάση τα αιτήματα συμμετοχής και αποχώρησης που εκδίδουν τα μέλη των ομάδων πολυεκπομπής.

- Η δρομολόγηση των πακέτων κίνησης μέσω των δένδρων διανομής είναι βέλτιστη. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με διάφορα κριτήρια (ελάχιστο πλήθος κόμβων που απαρτίζουν το δένδρο, ελάχιστη απόσταση των παραληπτών από τις πηγές κ.α.)
- Η προώθηση των πακέτων κίνησης από τις πηγές μέσω του δένδρου διανομής προϋποθέτει ότι οι δρομολογητές έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν πολλαπλά αντίγραφα των αφικνούμενων πακέτων σε σημεία διακλάδωσης. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται η πολλαπλή αποστολή του ρεύματος από την πηγή και είναι εφικτή η παράδοσή του στο σύνολο των παραληπτών. Στην πράξη, η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται και στην πλειονότητα των μηχανισμών προώθησης κίνησης στο φυσικό μέσο από το στρώμα ζεύξης δεδομένων. Τα πλαίσια πολυεκπομπής μεταδίδονται μία μόνο φορά στο μοιραζόμενο μέσο για το σύνολο των κόμβων που είναι συνδεδεμένα σε αυτό (δηλ. δεν επαναμεταδίδονται για το κάθε μέλος της ομάδας πολυεκπομπής ξεχωριστά).
- Οι πηγές πραγματοποιούν *αυτόβουλα* τη μετάδοση του ρεύματος κίνησης προς μία ομάδα πολυεκπομπής, ανεξάρτητα από τη συμμετοχή τερματικών κόμβων σε αυτή.

Η *Αρχιτεκτονική Πολυεκπομπής Διαδικτύου* (IP Multicast Architecture) ορίζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης ομαδικών συνόδων, δίνει δυνατότητα βέλτιστης και σύγχρονης προώθησης των ρευμάτων κίνησης από τις πηγές προς τους παραλήπτες και ελαχιστοποιεί το ποσό των δικτυακών πόρων (εύρος ζώνης, επεξεργαστική ισχύ στις πηγές και το δίκτυο) που απαιτούνται για την παράδοσή τους. Η παρατήρηση αυτή καθιστά την υπηρεσία πολυεκπομπής ιδανική για τη παροχή υπηρεσιών πολυμέσων που χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις σε δικτυακούς πόρους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών και υπηρεσιών πολυεκπομπής αποτελούν οι υπηρεσίες μονόδρομης μετάδοσης ρευμάτων εικόνων κι ήχου ή γενικά πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο (real-time streaming video/audio), η τηλεδιάσκεψη μεταξύ πολλών μερών, οι υπηρεσίες διανομής ψηφιακού περιεχομένου σε ομάδες χρηστών (αρχεία λογισμικού, ειδήσεις, ανακοινώσεις, τιμές μετοχών χρηματιστηρίου), οι εφαρμογές συγχρονισμού αντιγράφων κατανεμημένων βάσεων δεδομένων (database replication), η εκτέλεση διαδραστικών δικτυακών παιχνιδιών όπου απαιτείται η συνεχής και ταχύτατη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των παικτών, οι εφαρμογές κατανεμημένων προσομοιώσεων όπου απαιτείται η ανταλλαγή ενδιάμεσων αποτελεσμάτων για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, οι υπηρεσίες συλλογής δεδομένων από πολλές πηγές (π.χ. στατιστικά στοιχεία, στοιχεία χρέωσης), οι δημοπρασίες, οι υπηρεσίες διανομής πολυμεσικού περιεχομένου σχεδόν κατ' απαίτηση (jukebox, τα αιτήματα των παραληπτών συγκεντρώνονται σε μία ουρά και ικανοποιούνται μέσω ενός κοινού καναλιού μετάδοσης) και άλλες. [10]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις μέρες μας η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής δεν έχει αντίστοιχη απήχηση σε σχέση με τις υπηρεσίες unicast [11]. Βασική αιτία είναι ότι η χρήση των υπηρεσιών πολυεκπομπής δεν έχει προωθηθεί από την πλευρά των λειτουργών των δικτύων για διάφορους λόγους. Ο πιο σημαντικός είναι ότι η κατασκευή και συντήρηση των δένδρων διανομής είναι εξαιρετικά δύσκολη και έχει μεγάλο κόστος. Επίσης η υπηρεσία πολυεκπομπής δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη χρησιμότητα για τους παραλήπτες κίνησης ώστε να προτιμηθεί σε σχέση με τη unicast (οι παραλήπτες δεν ενδιαφέρονται τόσο τον τρόπο με τον οποίο τους παραδίδεται ένα ρεύμα κίνησης). Επιπρόσθετα, η αρχιτεκτονική πολυεκπομπής παρουσιάζει σημαντικά κενά ασφάλειας στην διαχείριση του ελέγχου πρόσβασης στις ομάδες πολυεκπομπής (οι υπηρεσίες πολυεκπομπής είναι ευάλωτες σε προβλήματα υποκλοπής του μεταδιδόμενου περιεχομένου ή κακόβουλης χρήσης του δικτύου). Οι παρατηρήσεις αυτές οδήγησαν στην καθυστέρηση ανάπτυξης κατάλληλων επιχειρηματικών μοντέλων και πολιτικών χρέωσης ώστε οι υπηρεσίες πολυεκπομπής να καταστούν ελκυστικές τόσο για τους λειτουργούς των δικτύων όσο και για τους τελικούς χρήστες από την άποψη του κέρδους. Εντούτοις, όπως προαναφέρθηκε, η ανάγκη βέλτιστης διαχείρισης των δικτυακών πόρων, η εξέλιξη των τεχνολογιών πολυεκπομπής (βλέπε ενότητα 2.1.1.1) και ασυρμάτων δικτύων και η αύξηση της πυκνότητας των κινητών χρηστών, αναμένεται να δώσουν νέα ώθηση στη χρησιμοποίηση των υπηρεσιών πολυεκπομπής που οδηγεί ήδη στην πιο συχνή παρουσία τους στο τηλεπικοινωνιακό τοπίο.

1.2 Το Κινητό Διαδίκτυο

Παραδοσιακά η ανάπτυξη των δικτύων οδηγήθηκε από το είδος των υπηρεσιών που προσέφερε το καθένα. Για παράδειγμα υπήρχαν δίκτυα τηλεφωνίας, σταθερής (PSTN, ISDN) ή κινητής (GSM), ενσύρματα δίκτυα δεδομένων (WWW, enterprise) ή τηλεόρασης (ασύρματης και καλωδιακής), καθένα από τα οποία χρησιμοποιούσε συγκεκριμένες τεχνολογίες ανάλογα με την υπηρεσία. Στις μέρες μας η κατάσταση έχει αντιστραφεί εντελώς. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών ευρυζωνικότητας και η διείσδυση του Διαδικτύου στην καθημερινότητα οδήγησε στην προσφορά πακέτων υπηρεσιών φωνής, δεδομένων ή και τηλεόρασης (triple play [12]), σε πρώτη φάση στα ενσύρματα δίκτυα. Αντίστοιχη είναι και η κατάσταση στην περίπτωση των ασυρμάτων δικτύων, τόσο για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών (3GPP, 3GPP2), όσο και δίκτυα τοπικής εμβέλειας (IEEE 802.11). Τα μεν πρώτα, αν και ξεκίνησαν από την παροχή υπηρεσιών φωνής, παρουσιάζονται πλέον ως εναλλακτικοί πάροχοι ευρυζωνικών υπηρεσιών Διαδικτύου (UMTS/GPRS, CDMA2000). Τα δεύτερα σε συνδυασμό με τη χρήση της τεχνολογίας DSL αποτελούν την πιο κοινή επιλογή πρόσβασης και διαδικτύωσης σε οικιακούς χρήστες, σε χώρους εργασίας ή σε πολυσύχναστους χώρους. Είναι κατά συνέπεια προφανές ότι σημασία δεν έχει πλέον το δίκτυο και η τεχνολογία μέσω της οποίας παρέχεται η πρόσβαση, αλλά το αν υποστηρίζεται η πρόσβαση σε όλους τους τύπους υπηρεσιών.

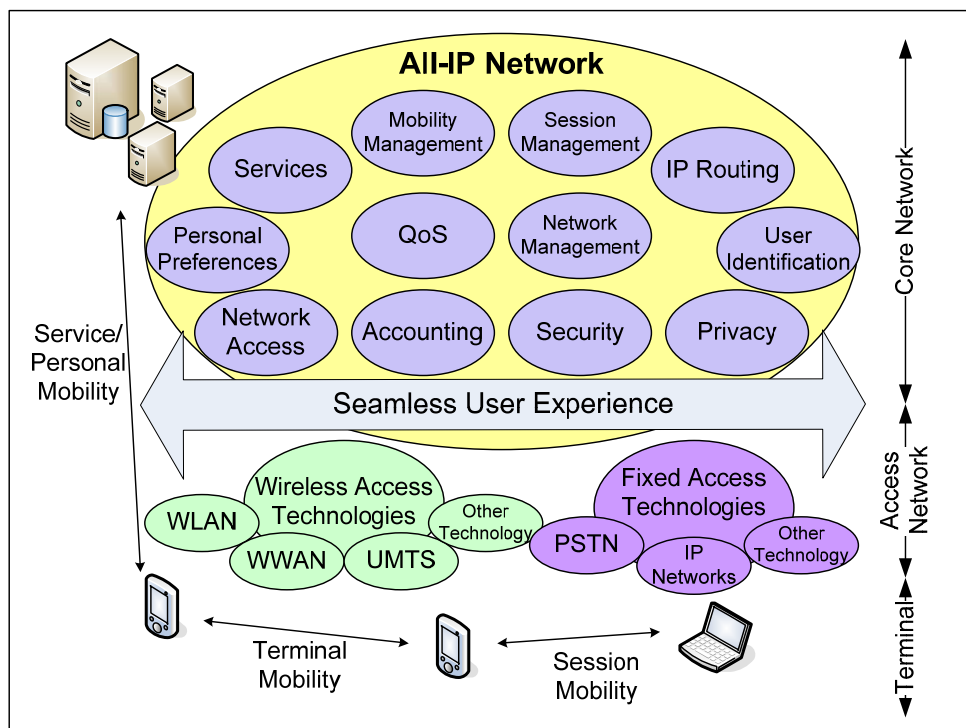
Η εξέλιξη στον τομέα των μικροϋπολογιστών και η εμφάνιση πληθώρας φορητών συσκευών μεγάλης υπολογιστικής ισχύος είχε σαν αποτέλεσμα οι κινητοί χρήστες να επιζητούν πρόσβαση στο σύνολο των υπηρεσιών που τους έχουν προσφερθεί από τα ενσύρματα δίκτυα, *οπουδήποτε* και *οποτεδήποτε*. Το ουσιαστικό πρόβλημα εντούτοις εντοπίζεται στο ότι οι χρήστες είναι πλέον

κινούμενοι και έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται σε διάφορα δίκτυα σαν αποτέλεσμα της κινητικότητάς τους. Κατά συνέπεια η προσφορά του συνόλου των υπηρεσιών, απαιτεί τη διασύνδεση των δικτύων στο επίπεδο των υπηρεσιών ώστε να καταστεί δυνατή η πρόσβαση των χρηστών σε κατάλληλα δεδομένα και πληροφορίες. Από την άλλη, η διασύνδεση είναι απαραίτητη και για τη διατήρηση της επικοινωνίας των τερματικών, τα οποία λόγω της κινητικότητάς τους συνδέονται σε διάφορα δίκτυα, ίδιας ή διαφορετικής τεχνολογίας, με περισσότερες ή λιγότερες δυνατότητες. Επίσης σημαντικό είναι ότι η μετάβαση από το ένα δίκτυο στο άλλο, θα πρέπει να πραγματοποιείται *απρόσκοπτα*, ώστε να μην επηρεάζεται η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας ή εκτελούμενης εφαρμογής. Συνοψίζοντας συνεπώς, η διασύνδεση θα πρέπει να καλύψει τα εξής ζητήματα:

- *Κινητικότητα υπηρεσιών*: ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει το ίδιο σύνολο υπηρεσιών ανεξάρτητα από το δίκτυο μέσω του οποίου αποκτά πρόσβαση και του τερματικού που χρησιμοποιεί.
- *Κινητικότητα προσώπου*: ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διατηρεί τις προσωπικές του επιλογές και προτιμήσεις για τον τρόπο με τον οποίο του προσφέρεται η υπηρεσία ανεξάρτητα από το δίκτυο πρόσβασης και το τερματικό που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα έχει πρόσβαση στον προσωπικό του κατάλογο για μία υπηρεσία φωνής από ένα σύστημα UMTS ή μία υπηρεσία VoIP από τον φορητό υπολογιστή του.
- *Κινητικότητα συνόδου*: ο χρήστης έχει τη δυνατότητα μεταφοράς των ενεργών συνόδων του όταν, μετά από επιλογή του, αλλάζει τερματική συσκευή και ίσως και δίκτυο πρόσβασης.
- *Κινητικότητα τερματικού*: ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διατηρεί ενεργές τις συνόδους στις οποίες συμμετέχει καθώς διαπέμπεται σε διάφορα δίκτυα σαν αποτέλεσμα της κινητικότητάς του. Η διατήρηση της επικοινωνίας θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να μη γίνει αντιληπτή από το χρήστη, δηλαδή η επίδραση στην προσφερόμενη υπηρεσία να είναι μηδενική ή κατά το δυνατό ελάχιστη.

Έχοντας ως δεδομένη την ανάγκη διασύνδεσης των συστημάτων, τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι αφενός ποιο είναι το σημείο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί αυτή, και αφετέρου με ποιο τρόπο. Μια πρώτη επιλογή θα ήταν να πραγματοποιηθεί μεταξύ των δικτύων πρόσβασης. Εντούτοις κάτι τέτοιο είναι αρκετά απαιτητικό στην υλοποίηση, εφόσον απαιτεί προσαρμογή (γεφύρωση) των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται σε κάθε δίκτυο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διασύνδεση των συστημάτων UMTS και IEEE 802.11, η οποία κατέληξε στην ανάπτυξη μίας νέας αρχιτεκτονικής λειτουργικών κόμβων για αυτό το σκοπό. Αντίστοιχα για τη διασύνδεση στο επίπεδο των υπηρεσιών, απαιτείται η εγκατάσταση κόμβων πυλών μεταξύ των δικτύων για τη μετάφραση της σηματοδοσίας ενώ είναι αμφίβολο το κατά πόσο θα είναι αποδοτική η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών κατά τη φάση μετάβασης από το ένα δίκτυο στο άλλο. Καταλήγουμε συνεπώς στο συμπέρασμα ότι, με στόχο την υποστήριξη όλων των τύπων κινητικότητας που περιγράφηκαν παραπάνω, απαιτείται η διασύνδεση σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο.

Το πρωτόκολλο IP, όντας υπερκείμενο των τεχνολογιών πρόσβασης, έχει τη δυνατότητα να προσφέρει την απαιτούμενη διαλειτουργικότητα σε παγκόσμιο επίπεδο. Είναι ανεξάρτητο από την τεχνολογία πρόσβασης, πράγμα το οποίο δίνει τη δυνατότητα αυτόνομης ανάπτυξης των υποκείμενων μηχανισμών στρώματος ζεύξης, ενώ πλέον είναι σε θέση να προσφέρει όλων των ειδών της υπηρεσίες (πέρα δηλαδή από τις υπηρεσίες δεδομένων από τις οποίες ξεκίνησε). Στις μέρες μας είναι ευρέως αποδεκτό πλέον, ότι η διασύνδεση των επιμέρους ετερογενών ασύρματων τεχνολογιών μπορεί να επιτευχθεί στον πυρήνα των δικτύων με χρήση μηχανισμών και διαδικασιών που προέρχονται από το χώρο του Διαδικτύου, προδιαγράφονται δηλαδή από τον οργανισμό IETF. Αποτέλεσμα της ενοποίησης είναι η δημιουργία δικτύων πυρήνα βασισμένων αποκλειστικά στο πρωτόκολλο IP. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται All-IP δίκτυα (All-IP Networks, AIPN) [4]. Τα All-IP δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν όλων των τύπων κινητικότητας που περιγράφηκαν παραπάνω, χρησιμοποιώντας ήδη ανεπτυγμένους μηχανισμούς για τη μεταφορά των πακέτων κίνησης, τη διαχείριση συνόδων και σηματοδότηση σε επίπεδο υπηρεσιών, τη διασφάλιση της ποιότητας των προσφερομένων υπηρεσιών, την ασφάλεια και τον έλεγχο πρόσβασης στο δίκτυο, τη χρέωση κ.α. Το Σχήμα 1 - 1 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική των δικτύων All-IP, που προβλέπεται ότι θα εφαρμοστεί στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η διασύνδεση στο επίπεδο των υπηρεσιών προσφέρεται από το ενοποιημένο δίκτυο κορμού στο οποίο αυτές εκτελούνται. Αντίστοιχα, η διασύνδεση στο επίπεδο της πρόσβασης, πραγματοποιείται από το πρωτόκολλο IP και τους άλλους μηχανισμούς στρώματος δικτύου, μέσω των οποίων καθίσταται εφικτή η επικοινωνία των τερματικών στο Διαδίκτυο.



Σχήμα 1 - 1. Αρχιτεκτονική Δικτύου All-IP

Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα All-IP δίκτυα, είναι σε θέση να υποστηρίξουν την κινητικότητα τερματικού σε παγκόσμιο επίπεδο. Η συγκεκριμένη δυνατότητα

προδιαγράφεται από το *Πρωτόκολλο Κινητού Διαδικτύου* (Mobile IP, MIP), το οποίο, για την νέα έκδοση του IP (IP version 6), είναι ενοποιημένο στη λειτουργία του στρώματος δικτύου. Η διαχείριση κινητικότητας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες για την διατήρηση της επικοινωνίας κινούμενων τερματικών που συνδέονται σε διάφορα δίκτυα, ανεξαρτήτως τεχνολογίας πρόσβασης και κλίμακας. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια ο οργανισμός IETF έχει προχωρήσει στην προδιαγραφή προηγμένων μηχανισμών (βελτιστοποίησης της λειτουργίας του MIP), που δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών με ελάχιστη επίδραση στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών. Συνοψίζοντας λοιπόν, καταλήγουμε στον ορισμό του *Κινητού Διαδικτύου* (*Mobile Internet*), ως το σύστημα το οποίο προσφέρει τη διασύνδεση στο επίπεδο δικτύου και το επίπεδο υπηρεσιών, με τον τρόπο που περιγράφηκε για τα All-IP δίκτυα και στη βάση της αρχιτεκτονικής του προδιαγράφεται από το MIP.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας που θεωρούνται στα πλαίσια του *Κινητού Διαδικτύου*, δεν επηρεάζουν τους αντίστοιχους μηχανισμούς υποστήριξης διαπομπών που χρησιμοποιούνται από τα επιμέρους δίκτυα πρόσβασης. Η πλειονότητα των ασύρματων δικτύων στις μέρες μας χρησιμοποιεί αυτόνομους μηχανισμούς που δίνουν τη δυνατότητα σε κινητούς χρήστες να συνδέονται μεταξύ σημείων πρόσβασης της ίδιας τεχνολογίας, τα οποία συνήθως ανήκουν διοικητικά στην ίδια περιοχή δικτύου. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί, η λειτουργία των οποίων θεωρείται στο στρώμα ζεύξης με βάση το πρότυπο OSI, ουσιαστικά παρακολουθούν την ποιότητα των εγκατεστημένων ζεύξεων και διαχειρίζονται τις διαδικασίες εγκατάστασης νέων εφόσον είναι απαραίτητο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το σύστημα UMTS και τα τοπικά ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11.

Σημείο κλειδί εντούτοις, αποτελεί το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί δεν μπορούν να υποστηρίξουν διαπομπές μεταξύ διαφορετικών δικτύων ίδιας τεχνολογίας που ανήκουν σε άλλο πάροχο (inter-domain), ή διαπομπές μεταξύ δικτύων διαφορετικής τεχνολογίας πρόσβασης (inter-technology). Το *Κινητό Διαδίκτυο* έρχεται να καλύψει αυτό το κενό, παρουσιάζοντας, μέσω της αρχιτεκτονικής που εισάγει το MIP, έναν μηχανισμό στρώματος δικτύου, που προσφέρει τη δυνατότητα διαχείριση διαπομπών ανεξαρτήτως τεχνολογίας και περιοχής δικτύου. Σε καμία περίπτωση πάντως δε θα πρέπει να θεωρηθεί ότι το MIP θα αντικαταστήσει τους εγγενείς μηχανισμούς κινητικότητας που χρησιμοποιούνται από κάθε δίκτυο ασύρματης πρόσβασης για την υποστήριξη intra-technology διαπομπών. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση σε σχέση με το MIP, επειδή ακριβώς έχουν να επιτελέσουν ένα πολύ απλούστερο έργο, που είναι η διαχείριση της διαπομπής στο τοπικό επίπεδο της πρόσβασης (στρώμα ζεύξης). Στα πλαίσια του *Κινητού Διαδικτύου*, η διαχείριση διαπομπών ασχολείται με την αποκατάσταση της επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο (στρώμα δικτύου), όταν δηλαδή το τερματικό διαπέμπεται σε ένα νέο αυτόνομο σύστημα ενώ είναι υποχρέωση των μηχανισμών του στρώματος ζεύξης να ασχοληθούν με την εγκατάσταση της σύνδεσης του τερματικού με το εκάστοτε δίκτυο. Είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη διαδικασία είναι περισσότερο πολύπλοκη όταν απαιτείται να γίνεται απρόσκοπτα μεταξύ ετερογενών δικτύων.

1.3 Διατύπωση του Προβλήματος Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής

Το βασικό αντικείμενο της διατριβής είναι η σύζευξη των τεχνολογιών *Πολυεκπομπής Διαδικτύου* και *Κινητού Διαδικτύου*, που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, ορίζοντας πλέον το περιβάλλον *Κινητού Διαδικτύου Πολυεκπομπής (Multicast Mobile Internet)*. Δίνοντας έμφαση στη διαχείριση κινητικότητας, η διατριβή εστιάζει στην ανάπτυξη ενός μηχανισμού που εξασφαλίζει τη διατήρηση ενεργών συνόδων πολυεκπομπής, σε κινητούς χρήστες που διαπέμπονται μεταξύ αυτόνομων ασύρματων δικτύων IP. Επιπλέον ιδιαίτερο βάρος δίδεται στη μελέτη προηγμένων μηχανισμών κινητικότητας πολυεκπομπής, οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών, που δεν γίνονται αντιληπτές από το χρήστη.

Η λειτουργία των μηχανισμών διαχείριση κινητικότητας στο *Κινητό Διαδίκτυο*, ουσιαστικά προσπαθεί να αντιμετωπίσει δύο προβλήματα: το πρώτο αφορά στη δυνατότητα διατήρησης ενεργών των συνόδων στις οποίες συμμετέχει ένας κινητός χρήστης. Το πρόβλημα προκαλείται από την ανάγκη αλλαγής της IP διεύθυνσής του, σαν αποτέλεσμα της σύνδεσής του σε ένα νέο δίκτυο. Το δεύτερο σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος που περνά μέχρι ο κινητός κόμβος να είναι σε θέση να στείλει ή να λάβει κίνηση από τη νέα θέση του. Βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης που μπορεί να έχει η εκτέλεση της διαπομπής στην ποιότητα των προσφερόμενων στο κινητό υπηρεσιών, η οποία προκαλείται από την απώλεια ή την καθυστέρηση των πακέτων κίνησης που ξεκινούν ή καταλήγουν σε αυτό. Όπως και στην περίπτωση της unicast κινητικότητας, η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής αντιμετωπίζει και τα δύο προβλήματα.

Ειδικότερα, η αρχιτεκτονική *Πολυεκπομπής Διαδικτύου* στηρίζεται στην κατασκευή ανά σύνοδο δένδρων διανομής της κίνησης, μεταξύ των ενδιαμέσων δρομολογητών του δικτύου. Τα δένδρα προσφέρουν τη δυνατότητα βέλτιστης προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής από τις πηγές προς τους παραλήπτες και η δημιουργία τους βασίζεται στην εγκατάσταση πληροφορίας δρομολόγησης, μέσω της οποίας αντιστοιχίζονται οι είσοδοι, από τις οποίες καταφθάνει η κίνηση στους δρομολογητές του δικτύου, προς τις εξόδους στις οποίες θα πρέπει να προωθηθεί ώστε να φτάσει στους παραλήπτες. Συνεπώς, για την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε κινητούς χρήστες, απαιτείται η ανακατασκευή του δένδρου διανομής, ώστε να συμπεριληφθούν σε αυτό οι νέες θέσεις των τερματικών και να αποκοπούν τα κομμάτια του δένδρου τα οποία δεν οδηγούν σε κάποιο παραλήπτη ή από τα οποία δεν εκπέμπει κάποια πηγή. Εντούτοις, με βάση τις πολύπλοκες διαδικασίες δρομολόγησης πολυεκπομπής (τοπολογία δένδρων, πρωτόκολλα δρομολόγησης), η ανακατασκευή των δένδρων μπορεί να διαρκέσει αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα της τάξης των δευτερολέπτων ή ακόμη και των λεπτών της ώρας. Αυτό είναι μη αποδεκτό κατά την εκτέλεση διαδραστικών εφαρμογών ή των εφαρμογών πολυμέσων πραγματικού χρόνου. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής απαιτείται να προσφέρουν την δυνατότητα ελαχιστοποίησης του χρόνου που απαιτείται για τη σύγκλιση των πρωτόκολλων δρομολόγησης πολυεκπομπής. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην περίπτωση κατά την οποία το τερματικό διαπέμπεται πολύ γρήγορα μεταξύ των

διαφόρων δικτύων πρόσβασης, δηλαδή ενώ δεν έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του νέου δένδρου διανομής, ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα κλιμάκωσης.

Η μεταβολή της διεύθυνσης ενός τερματικού λόγω της κινητικότητάς του επηρεάζει και την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής. Στην περίπτωση των κινητών παραληπτών κίνησης το πρόβλημα περιορίζεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη ρύθμιση της νέας διεύθυνσης του κινητού. Το βασικό πρόβλημα εντούτοις εντοπίζεται στην περίπτωση που αλλάζει η διεύθυνση μίας πηγής πολυεκπομπής. Πρώτον, η IP διεύθυνση της πηγής πολυεκπομπής χρησιμοποιείται, σε συνδυασμό με το αναγνωριστικό της ομάδας πολυεκπομπής, από τις εφαρμογές πολυεκπομπής για την ταυτοποίηση της συνόδου πολυεκπομπής. Κατά συνέπεια η αλλαγή της πρώτης στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτεί την εκ νέου αρχικοποίηση της τελευταίας. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να ενημερωθούν όλα τα μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής για το συμβάν της αλλαγής της διεύθυνσης της πηγής, ώστε να προβούν στις κατάλληλες ενέργειες. Δεύτερον, οι πολύπλοκοι αλγόριθμοι δρομολόγησης πολυεκπομπής χρησιμοποιούν τη διεύθυνση της εκάστοτε πηγής για την κατασκευή βέλτιστων δένδρων διανομής από τις πηγές προς τους παραλήπτες. Άρα η αλλαγή της απαιτεί επίσης την πλήρη ανακατασκευή του δένδρου διανομής. Εντούτοις, οι διαδικασίες αρχικοποίησης μίας συνόδου πολυεκπομπής και ανακατασκευής του δένδρου διανομής είναι χρονοβόρες και κοστοβόρες (υψηλό φορτίο σηματοδοσίας). Σαν αποτέλεσμα εισάγουν επιπλέον καθυστερήσεις στην φάση αποκατάστασης της επικοινωνίας.

Η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής προϋποθέτει τη λειτουργία συγκεκριμένων μηχανισμών που προέρχονται τόσο από την περιοχή του *Κινητού Διαδικτύου* όσο και από την περιοχή της παροχής υπηρεσιών *Πολυεκπομπής Διαδικτύου*. Ως εκ τούτου, κάθε πιθανή λύση του προβλήματος κινητικότητας πολυεκπομπής θα πρέπει να λάβει υπόψη της τις ιδιαιτερότητες που κληρονομούνται και από τις δυο. Σε αυτό το πλαίσιο ένας μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής θα πρέπει επιπλέον να ικανοποιεί τις παρακάτω βασικές απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να μην καταστρατηγούνται τα πλέον σημαντικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής Πολυεκπομπής Διαδικτύου, αναφορικά με τη δρομολόγηση και τις διαδικασίες συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής, ώστε να πραγματοποιείται βέλτιστη διαχείριση δικτυακών πόρων και να είναι εύκολη η εφαρμογή (deployment) του μηχανισμού στο περιβάλλον *Κινητού Διαδικτύου Πολυεκπομπής*.
- Θα πρέπει να υποστηρίζει εκτέλεση διαπομπών ανά ροή κίνησης, εφόσον τα χαρακτηριστικά της καθεμίας ροής ενδέχεται να είναι διαφορετικά (ποιότητα, ασφάλεια).
- Θα πρέπει να είναι ενοποιημένος, στο βαθμό που είναι εφικτό, με τους μηχανισμούς διαχείρισης unicast κινητικότητας, που έχουν επικρατήσει στο *Κινητό Διαδίκτυο*. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η λειτουργία ενός μοναδικού μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας για unicast και multicast εφαρμογές, ο οποίος θα δώσει τη δυνατότητα απλούστερης εφαρμογής του σε πραγματικά συστήματα και θα ελαχιστοποιήσει το κόστος που προέρχεται από την υποστήριξη κοινών διαδικασιών (π.χ. ρύθμιση νέας IP διεύθυνσης).

- Θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών (δηλαδή αδιάλειπτων και με ελάχιστες απώλειες σε πακέτα κίνησης), τόσο σε πηγές όσο και σε παραλήπτες πολυεκπομπής. Η ενοποιημένη προσέγγιση είναι απαραίτητη εφόσον για πολλές εφαρμογές πολυεκπομπής ένας τερματικός κόμβος μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως πηγή και ως παραλήπτης κίνησης. Στην αρχιτεκτονική *Πολυεκπομπής Διαδικτύου*, οι ρόλοι των πηγών και των παραληπτών είναι μη συμμετρικοί, οπότε είναι θεμιτό η κινητικότητα τους να αντιμετωπίζεται με διαφορετικό τρόπο.

1.4 Δομή της Διατριβής

Το πρώτο κεφάλαιο της διατριβής είναι το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο. Σκοπός μέσα από την εισαγωγή είναι να περιγραφεί το τεχνολογικό περιβάλλον το οποίο θεωρείται και το πρόβλημα το οποίο πραγματεύεται η διατριβή. Για το λόγο αυτό, αρχικά παρουσιάζονται τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών *Πολυεκπομπής Διαδικτύου* και σκιαγραφείται το τοπίο που χαρακτηρίζει το σύγχρονο *Κινητό Διαδίκτυο*. Επιπλέον περιγράφεται η ανάγκη ανάπτυξης προηγμένων μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που δίνουν την δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών σε ασύρματα συνδεδεμένους κινητούς παραλήπτες ή πηγές πολυεκπομπής. Τέλος διατυπώνεται με γενικούς όρους το πρόβλημα που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι τεχνικές διαστάσεις του προβλήματος κινητικότητας πολυεκπομπής στο *Κινητό Διαδίκτυο*. Αρχικά παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής Πολυεκπομπής Διαδικτύου, μέσω των μηχανισμών (πρωτοκόλλων, διαδικασιών) που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση των συνόδων πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο. Στη συνέχεια μελετάται η λειτουργία των πιο διαδεδομένων μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας Διαδικτύου, που καθιστούν εφικτή τη διαπομπή χρηστών που συμμετέχουν σε συνόδους πολυεκπομπής, όπως αυτοί έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία. Η ανάλυση ξεκινά από την περίπτωση της unicast κινητικότητας και προχωρά στην περίπτωση των μηχανισμών πολυεκπομπής. Ακολουθώς απαριθμούνται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα προβλήματα που ανακύπτουν από τη λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας πολυεκπομπής Διαδικτύου και προσδιορίζονται οι βασικές αιτίες που τα προκαλούν. Έχοντας περιγράψει το συνολικό τεχνολογικό περιβάλλον και με στόχο τη σχεδίαση ενός νέου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής στο επόμενο κεφάλαιο, στο τέλος του κεφαλαίου συνοψίζεται το τεχνικό πλαίσιο εντός του οποίου θεωρείται η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής Διαδικτύου στις μέρες μας.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί το βασικό πυρήνα της διατριβής, παρουσιάζοντας τη σχεδίαση και τη λειτουργία του προτεινόμενου από τη διατριβή μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Ο μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης ταχέων και με μικρές απώλειες διαπομπών, ελαχιστοποιώντας την επίδραση που έχουν αυτές στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών πολυεκπομπής. Βασικά χαρακτηριστικά του μηχανισμού αποτελούν η δυνατότητα προώθησης των πακέτων ανά ροή πληροφορίας πολυεκπομπής, κατ' απαίτηση του χρήστη και με βάση τη διαθεσιμότητά τους στο νέο δίκτυο στο οποίο διαπέμπεται το κινητό, πριν τη

σύνδεση του τερματικού στο νέο δίκτυο. Επίσης προσφέρεται η δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των πακέτων πολυεκπομπής κατά τη διάρκεια της περιόδου στην οποία το κινητό δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί με το δίκτυο, λόγω της εκτέλεσης των υποστηρικτικών διαδικασιών στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Η ανάλυση περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που αφορούν στην υλοποίηση του προτεινόμενου μηχανισμού, ενώ περιγράφονται όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν στην επίδοσή του. Επιπλέον προτείνονται τρόποι με τους οποίους είναι εφικτή η εκτέλεση διαπομπών πολυεκπομπής με μηδενικές απώλειες. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση προτάσεων εφαρμογής του μηχανισμού σε σύγχρονα και μελλοντικά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών όπως το IEEE 802.11 και τα συστήματα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αξιολογείται η επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού μέσω προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί δύο σενάρια κινητικότητας. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην υλοποίηση ενός ρεαλιστικού περιβάλλοντος προσομοίωσης, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη τόσο η κινητικότητα του τερματικού (κατεύθυνση, μέτρο ταχύτητας), όσο και η τυχαία φύση του ασύρματου μέσου διάδοσης. Με στόχο την καλύτερη αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού, παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για την επίδοση εφάμιλλων μηχανισμών κινητικότητας πολυεκπομπής που έχουν παρουσιαστεί στο δεύτερο κεφάλαιο. Η επίδοση μελετάται ως προς σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία των μηχανισμών κινητικότητας αλλά και την τοπολογία που έχει θεωρηθεί, καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο ένα μεγάλο φάσμα περιπτώσεων που συναντώνται σε πραγματικά συστήματα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την υπεροχή του προτεινόμενου μηχανισμού σε σχέση με τους υπόλοιπους, αναφορικά με την επίδραση που έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας. Επίσης εντοπίζουν την αύξηση του κόστους που επιβάλλει η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπής, αναφορικά με την κατανάλωση δικτυακών πόρων για την προώθηση και την προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη διατριβή ενώ παράλληλα δίνονται κατευθύνσεις για μελλοντικά πεδία έρευνας.

Εκτός από τα πέντε κεφάλαια και με στόχο την πληρέστερη περιγραφή των τεχνολογιών που πραγματεύεται, η διατριβή περιλαμβάνει επιπλέον δύο παραρτήματα. Στο πρώτο περιγράφονται λεπτομερώς οι διαδικασίες που εκτελούνται κατά την διάρκεια μίας διαπομπής στρώματος δικτύου, μεταξύ συστημάτων που βασίζονται στο πρωτόκολλο IPv6. Ειδικότερα αναλύονται οι λειτουργίες που προβλέπονται από τα πρωτόκολλα *Neighbor Discovery for IPv6* και *Mobile IPv6*. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην περιγραφή των πηγών καθυστέρησης των διαδικασιών διαχείρισης κινητικότητας που προέρχονται από τις βασικές διαδικασίες που έχουν προδιαγραφεί από το πρωτόκολλο *Neighbor Discovery*, όπως η *Ανακάλυψη Δρομολογητή*, η *Ρύθμιση Διεύθυνσης* και η *Επισήμανση Μετακίνησης*. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ταχύτητα εκτέλεσης της διαπομπής και επηρεάζουν κυρίως την ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Επίσης αναλύονται οι διάφορες πηγές καθυστέρησης που προέρχονται από την εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* και *Εγγραφής Ανταποκριτών*, που προδιαγράφονται από το MIPv6.

Το δεύτερο παράρτημα περιγράφει τη λειτουργία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς με έμφαση στο σύστημα UMTS, όπως αυτό παρουσιάζεται στα πρότυπα που εκδίδονται από τον οργανισμό 3GPP. Στόχος είναι η παρουσίαση της τρέχουσας κατάστασης στον τομέα των δικτύων κινητών επικοινωνιών αναφορικά με την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περιοχή μεταγωγής πακέτου, όπως αυτή ορίζεται στα πλαίσια της υπηρεσίας GPRS. Επίσης παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service), που αφορά στην υποστήριξη υπηρεσιών πολυεκπομπής για την περιοχή μεταγωγής πακέτου του UMTS. Η υπηρεσία MBMS προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής, καλύπτοντας, μεταξύ άλλων, τους τομείς διαχείρισης συνόδων και διαχείρισης κινητικότητας. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται μία εφάμιλλη της IP Multicast υπηρεσία για τα δίκτυα UMTS.

1.5 Βιβλιογραφία

- [1] C. Jelger, T. Noel, "Multicast for mobile hosts in IP networks: progress and challenges," IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 5, pp. 58-64, October 2002
- [2] T. Schmidt, M. Waehlich, "Multicast Mobility in MIPv6: Problem Statement", IRTF Internet Draft, (MobOpts research Group), draft-irtf-mobopts-mmcastv6-ps-02.txt, March 2007, Work in progress
- [3] B. Williamson, "Developing IP Multicast Networks, Volume I", CISCO Press, ISBN 1-57870-077-9, 2000
- [4] N. Nasser, A. Hasswa, H. Hassanein, "Handoffs in Fourth Generation Heterogeneous Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 44, No. 10, pp. 96-103, October 2006
- [5] Α. Δημοπούλου, «Διαχείριση Κινητικότητας και Υποστήριξη Απρόσκοπτων Διαπομπών σε Κινητά Δίκτυα IP 4^{ης} Γενιάς», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Ιούλιος 2006
- [6] IRTF MOBOPTS Working Group, <http://www.irtf.org/charter?gtype=rg&group=mobopts>
- [7] IETF MULTIMOB Working Group
- [8] S. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting", IETF RFC 1112, August 1989
- [9] S. Deering, D. Cheriton, "Multicast Routing in Datagram Internetworks and Extended LANs," ACM Transactions on Computer Systems, Vol. 8, No. 2, Pages 85-110, May 1990
- [10] B. Quinn, K. Almeroth, "IP Multicast Applications: Challenges and Solutions", IETF RFC 3170, September 2001
- [11] C. Diot, B. Levine, B. Lyles, H. Kassem, D. Balensiefen, "Deployment issues for the IP multicast service and architecture", IEEE Network, Vol. 14, No. 1, pp. 78-88, Jan/Feb 2000
- [12] Wikipedia contributors, "Triple play (telecommunications)," Wikipedia, The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Triple_play_%28telecommunications%29&oldid=154768548
- [13] U. Varshney, "Multicast Over Wireless Networks", Communications of The ACM, Vol. 45, No. 12, pp. 31-37, December 2002
- [14] B. Levine, J. Crowcroft, C. Diot, J. Aceves, J. Kurose, "Consideration of Receiver Interest in Delivery of IP Multicast", in proc. of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000), Vol. 2, pp. 470-479, Tel-Aviv, March 2000

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΟΔΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΤΟ ΚΙΝΗΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται οι διαστάσεις του προβλήματος διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής στο σύγχρονο Διαδίκτυο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η "παραγωγική" μέθοδος· αρχικά περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής Πολυεκπομπής Διαδικτύου, μέσω των μηχανισμών (πρωτοκόλλων, διαδικασιών) εγκατάστασης συνόδων πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο. Στη συνέχεια μελετάται η λειτουργία των πιο διαδεδομένων μηχανισμών κινητικότητας Διαδικτύου, όπως αυτοί έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία, που προσφέρουν τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών. Η ανάλυση ξεκινά από την περίπτωση της unicast κινητικότητας και προχωρά στους μηχανισμούς πολυεκπομπής. Ακολουθώς απαριθμούνται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα προβλήματα που ανακύπτουν από τη λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας πολυεκπομπής Διαδικτύου και προσδιορίζονται οι βασικές αιτίες που τα προκαλούν. Έχοντας περιγράψει το συνολικό τεχνολογικό περιβάλλον και με στόχο τη σχεδίαση ενός νέου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής στο επόμενο κεφάλαιο, στο τέλος του κεφαλαίου συνοψίζεται το τεχνικό πλαίσιο εντός του οποίου θεωρείται η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής Διαδικτύου στις μέρες μας.

2.1 Αρχιτεκτονική Παροχής Υπηρεσιών Πολυεκπομπής Διαδικτύου – IP Multicast Architecture

Η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε συστήματα βασισμένα στο πρωτόκολλο Διαδικτύου έχει προσδιοριστεί στα πλαίσια της γενικευμένης *Αρχιτεκτονικής Υπηρεσιών Πολυεκπομπής Διαδικτύου* (IP Multicast Architecture, IPMA). Η Αρχιτεκτονική στηρίζεται σε ένα σύνολο από βασικές αρχές [1]-[4], που διαχωρίζουν και καθιστούν ανεξάρτητες μεταξύ τους τις έννοιες της *συνόδου πολυεκπομπής*, των *αποστολέων* και *αποδεκτών* της κίνησης, των *διαδικασιών εγκατάστασης/κατάλυσης* των από άκρο σε άκρα συνόδων και της *διαδικασίας προώθησης των πακέτων* κατά μήκος του δικτύου διανομής. Όπως και στην περίπτωση της σημείου-προς-σημείο επικοινωνίας, η υπηρεσία πολυεκπομπής ορίζεται σαν μία μη εγγυημένης παράδοσης (βέλτιστης προσπάθειας) υπηρεσία στρώματος δικτύου. Οι αρχές της IPMA, που διατυπώθηκαν συνοπτικά στην ενότητα 1.1, εντοπίζονται στην ακόλουθη λίστα:

1. Ορίζονται *ομάδες πολυεκπομπής* (multicast group) ως σύνολα τερματικών σταθμών που είναι αποδέκτες της κίνησης που αποστέλλουν πηγές κίνησης²: οι πηγές δεν είναι κατ' ανάγκη μέλη των ομάδων. Τα μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής (τερματικοί σταθμοί) είναι δυνητικά αποδέκτες όλων² των πακέτων κίνησης που αποστέλλεται από το σύνολο των πηγών, ανεξάρτητα από τη θέση τους στο δίκτυο και τη θέση των πηγών της κίνησης.
2. Οι τερματικοί σταθμοί εκδηλώνουν αυτόβουλα το ενδιαφέρον τους να συμμετάσχουν σε μία ομάδα πολυεκπομπής, κάνοντας χρήση κατάλληλων μηνυμάτων σηματοδότησης. Για το σκοπό αυτό οι *Εντεταλμένοι Δρομολογητές Πολυεκπομπής* (Multicast Designated Routers, MDR), ενημερώνονται αν υπάρχουν ή όχι παραλήπτες κίνησης για κάποια ομάδα πολυεκπομπής. Κάθε MDR συλλέγει στοιχεία που αφορούν στη συμμετοχή τερματικών σταθμών που είναι συνδεδεμένοι στο κάθε υποδίκτυο στο οποίο προσφέρει την υπηρεσία πολυεκπομπής. Οι τερματικοί σταθμοί μπορούν να καταστούν μέλη της ομάδας πολυεκπομπής ανεξάρτητα με το αν κάποια πηγή μεταδίδει πακέτα κίνησης ή όχι, τη στιγμή που αιτούνται τη συμμετοχή τους σε αυτή (δηλ. η εγκατάσταση της συνόδου είναι ανεξάρτητη από την παράδοση των πακέτων κίνησης).
3. Σαν αποτέλεσμα της λήψης αιτημάτων συμμετοχής για μία ομάδα πολυεκπομπής, οι MDR, σε συνεργασία με τους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου κορμού, κατασκευάζουν ένα *δένδρο διανομής* της κίνησης για καθεμία ομάδα πολυεκπομπής, κάνοντας χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Το δένδρο διανομής (multicast distribution tree) χρησιμοποιείται για την προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής από τους δρομολογητές. Ουσιαστικά υποδεικνύει στον καθένα δρομολογητή την έξοδο (ή τις εξόδους) προς την οποία (ή τις οποίες) θα πρέπει να προωθούνται τα πακέτα πολυεκπομπής που καταφθάνουν από τις διάφορες εισόδους του. Στην περίπτωση που ένας δρομολογητής αποτελεί σημείο διακλάδωσης, τότε ο δρομολογητής δημιουργεί ένα πιστό αντίγραφο του αφιχθέντος πακέτου και το προωθεί σε καθεμία διεπαφή που έχει προς το αντίστοιχο υποδίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται (σύγχρονη) προώθηση/δρομολόγηση των πακέτων από

² δεδομένου του ότι πρόκειται για υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας

τις πηγές προς τα μέλη της ομάδας μέσω της κοινής, μοιραζόμενης δικτυακής υποδομής που τους συνδέει.

4. Οι πηγές προωθούν τα πακέτα της κίνησης πολυεκπομπής προς τον MDR του υποδικτύου στο οποίο ανήκουν, ανεξάρτητα με το αν κάποιο τερματικό είναι μέλος της ομάδας πολυεκπομπής. Είναι δυνατό πολλές πηγές να μεταδίδουν πακέτα κίνησης προς την ίδια ομάδα πολυεκπομπής. Με αυτόν τον τρόπο αναπτύσσεται ένα $M : N$ μοντέλο επικοινωνίας μεταξύ των M πηγών και των N παραληπτών. Δεδομένης της συμμετοχής των τελικών αποδεκτών της κίνησης και της κατασκευής (ή όχι) των δένδρων διανομής, τα πακέτα πολυεκπομπής προωθούνται από τους MDR των πηγών προς τους τελικούς παραλήπτες τους (ή απορρίπτονται στον MDR αντίστοιχα).
5. Για την λειτουργία της υπηρεσίας πολυεκπομπής στρώματος δικτύου, το υποκείμενο Στρώμα Σύνδεσης Δεδομένων (Data Link Layer) θεωρείται ότι προσφέρει συνδεσιμότητα με όλους τους κόμβους που μοιράζονται το κοινό φυσικό μέσο, που υλοποιεί τη δικτύωση και ορίζει το τοπικό δίκτυο, και φροντίζει για την βέλτιστη από πλευράς χρησιμοποίησης πόρων μετάδοση των πολυεκπεμπόμενων πλαισίων πληροφορίας που προωθούνται σε αυτό. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι από την πλευρά του στρώματος IP, η προώθηση ενός πακέτου πολυεκπομπής έχει σαν αποτέλεσμα όλοι οι ενδιαφερόμενοι γι' αυτό κόμβοι να το λάβουν εφόσον το πακέτο θα μεταδοθεί σε ένα κοινό/μοιραζόμενο φυσικό μέσο. Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτείται επαναμετάδοση των πλαισίων για κάθε τερματικό κόμβο ξεχωριστά που βρίσκεται συνδεδεμένος στο ίδιο φυσικό υποδίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης δικτυακών πόρων (εύρος ζώνης, αποθηκευτικούς χώρους στους προσωρινούς καταχωρητές αποθήκευσης - buffers) και τη σύγχρονη μετάδοση του πλαισίου προς το σύνολο των μελών της ομάδας πολυεκπομπής που υπάρχουν στο υποδίκτυο.

Σύμφωνα με την IPMA, κάθε ομάδα πολυεκπομπής ταυτοποιείται από ένα αναγνωριστικό, μοναδικό στο δίκτυο ορισμού της ομάδας. Το συγκεκριμένο αναγνωριστικό χρησιμοποιείται ως διεύθυνση προορισμού στα πακέτα στρώματος δικτύου (*δεδομενογράμματα*, datagrams) που μεταφέρουν την πληροφορία από τις πηγές προς τους παραλήπτες. Οι συγκεκριμένες διευθύνσεις ακολουθούν συγκεκριμένο φορμάρισμα, με βάση ισχύουσες διεθνείς προδιαγραφές [5], [6], που αποκαλύπτει εκτός από την ταυτοποίηση της ομάδας επιπλέον και το εύρος του δικτύου (εμβέλεια, score) στο οποίο αυτή ορίζεται κι έχει ισχύ, πχ. υποδίκτυο, αυτόνομο σύστημα, Διαδίκτυο. Με βάση την υλοποίηση των μηχανισμών προώθησης των πακέτων πολυεκπομπής, οι δρομολογητές που βρίσκονται στα όρια των διάφορων περιοχών του δικτύου δεν προωθούν τα πακέτα πολυεκπομπής εκτός της περιοχής που αντιστοιχεί στην εμβέλειά τους. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για την δρομολόγηση των πακέτων πολυεκπομπής από τους αποστολείς προς τα μέλη της ομάδας προορισμών δεν επαρκεί η γνώση μόνο της διεύθυνσης προορισμού (όπως στην περίπτωση της unicast επικοινωνίας), αλλά αντίθετα απαιτείται κι η χρήση της διεύθυνσης του αποστολέα, δεδομένου ότι δημιουργούνται ανά πηγή ανεξάρτητα ελάχιστου κόστους και χωρίς βρόχους δένδρα δρομολόγησης. Το εύρος των διευθύνσεων για

IPv4 συμβατά συστήματα είναι από 224.0.0.0 μέχρι 239.255.255.255, ενώ στην περίπτωση του IPv6, όλες οι FF::/8 διευθύνσεις [7], [8].

Η λειτουργία των μηχανισμών IP multicast για τις δύο εκδόσεις του πρωτοκόλλου Διαδικτύου, την ευρέως χρησιμοποιούμενη σήμερα (IPv4) και τη νεότερη (IPv6), είναι ουσιαστικά ίδια. Πέρα από τις ιδιαιτερότητες που αφορούν στην υλοποίηση των πρωτοκόλλων (όπως και στην περίπτωση της σημείου-προς-σημείο επικοινωνίας) οι αρχές που ακολουθούνται είναι κοινές και για τις δύο περιπτώσεις πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Στα επόμενα, θα παρουσιαστούν τα κύρια σημεία που αφορούν στη λειτουργία της IP multicast σαν υπηρεσία επιπέδου δικτύου, τις ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με τους μηχανισμούς εγκατάστασης συνόδων πολυεκπομπής και τα χρησιμοποιούμενα γι' αυτό το σκοπό πρωτόκολλα από τους διάφορους κόμβους του δικτύου.

2.1.1 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων Παροχής Υπηρεσίας IP Multicast

Η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται η IPMA, διαχωρίζει τις διαδικασίες που σχετίζονται με τον έλεγχο συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής από αυτές που αφορούν τη δρομολόγηση των πακέτων πολυεκπομπής εντός του δικτύου κορμού. Η δεύτερη επιτελείται τους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου. Αντίθετα η πρώτη αφορά τους τερματικούς κόμβους και τους MDR που τους εξυπηρετούν.

Η διαδικασία δυναμικής δημιουργίας ή εγκατάστασης των δένδρων δρομολόγησης ή κομματιών τους αντίστοιχα, ξεκινά από τα σημεία του δικτύου πρόσβασης από τα οποία προέρχονται οι αιτήσεις συμμετοχής ή αποχώρησης από την ομάδα πολλαπλών αποδεκτών. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα πρωτόκολλα τα οποία ομαδοποιούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) τα πρωτόκολλα *ελέγχου συμμετοχής χρηστών* σε ομάδες πολυεκπομπής (Host Membership Protocols) [9]-[10], που έχουν σαν στόχο την συλλογή απαραίτητων πληροφοριών αναφορικά με τη συμμετοχή των τελικών χρηστών σε ομάδες πολυεκπομπής και (β) τα πρωτόκολλα *δρομολόγησης* πολυεκπομπής (Multicast Routing Protocols) [11], [12], [13], τα οποία προσδιορίζουν τις *διαδικασίες δρομολόγησης και προώθησης πακέτων πολυεκπομπής* εντός του δικτύου πυρήνα και μεταξύ των διαφόρων αυτόνομων περιοχών του Διαδικτύου. Η λειτουργία τους έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία και δυναμική ανανέωση των *δένδρων διανομής* που εκτείνονται κατά μήκος του δικτύου κορμού και μεταξύ των αυτόνομων συστημάτων που απαρτίζουν το Διαδίκτυο.

Η αρχική προδιαγραφή της αρχιτεκτονικής IP Multicast δεν θέτει κανένα απολύτως περιορισμό αναφορικά με το ποιος κόμβος είναι σε θέση να αποστείλει κίνηση προς μία ομάδα πολυεκπομπής. Αντίθετα θεωρείται ότι κάθε κόμβος του Διαδικτύου μπορεί να λειτουργεί σαν πηγή οποιασδήποτε ομάδας πολυεκπομπής. Βασική απαίτηση είναι μόνο η έκδοση του κατάλληλου αιτήματος λήψης της κίνησης που απευθύνεται προς μία συγκεκριμένη ομάδα πολυεκπομπής. Αν και η συγκεκριμένη επιλογή απλοποιεί εξαιρετικά τις διαδικασίες που εκτελούνται κατά την εγκατάσταση συνόδων πολυεκπομπής, στην πράξη, όπως αποδείχθηκε με βάση την ανάπτυξη κι εμπορική εκμετάλλευση εφαρμογών πολυεκπομπής, λειτουργήσε ανασταλτικά από την πλευρά των παρόχων υπηρεσιών και λειτουργών δικτύων, εφόσον το βασικό μοντέλο της υπηρεσίας δεν παρέχει τα εχέγγυα που απαιτούνται για τον έλεγχο των

υπηρεσιών από την πλευρά του δικτύου (πχ. δεν υπάρχει ασφαλής τρόπος μέσω του οποίου να ελέγχεται ποιος ακριβώς κόμβος έχει το δικαίωμα να αποστείλει κίνηση προς μία συγκεκριμένη ομάδα πολυεκπομπής ή αντίστοιχα να αποτρέπεται η κακόβουλη αποστολή πακέτων κίνησης προς τα μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής). Για το λόγο αυτό, στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η αρχιτεκτονική IP Multicast επεκτάθηκε δίνοντας πλέον τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής από συγκεκριμένες πηγές, επονομαζόμενη ως *Πολυεκπομπή Συγκεκριμένης Πηγής* (Source Specific Multicast, SSM). Θα πρέπει να τονιστεί ότι η βασική υπηρεσία πολυεκπομπής, κατ' αντιστοιχία επονομαζόμενη ως *Πολυεκπομπή Ανεξαρτήτως Πηγής* (Any Source Multicast, ASM), δεν επηρεάστηκε καθόλου διατηρώντας όλα τα χαρακτηριστικά της αναλλοίωτα, όπως περιγράφονται παραπάνω.

2.1.1.1 Source specific multicast (SSM)

Σε αντίθεση με το ASM μοντέλο, σύμφωνα με το SSM μοντέλο [14], κάθε τερματικός κόμβος ο οποίος επιθυμεί τη συμμετοχή του σε μία SSM ομάδα πολυεκπομπής G, είναι υποχρεωμένος να ενημερώσει τον MDR του, αναφορικά και με την διεύθυνση της πηγής S, από την οποία επιθυμεί να λάβει την κίνηση πολυεκπομπής. Ορίζεται με αυτόν τον τρόπο η έννοια του «καναλιού» πολυεκπομπής, που ταυτοποιείται από το ζευγάρι (S,G). Το κανάλι (S,G) αντιπροσωπεύει την συσχέτιση μίας μοναδικής πηγής κίνησης πολυεκπομπής με μία ομάδα παραληπτών κίνησης. Οι δρομολογητές του δικτύου κορμού είναι υποχρεωμένοι να αναπτύσσουν δένδρα δρομολόγησης για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Τα συγκεκριμένα δένδρα δίνουν τη δυνατότητα προώθησης πακέτων πολυεκπομπής που προέρχονται από συγκεκριμένες πηγές και μόνο, απορρίπτοντας αυτά για τα οποία δεν έχουν κατάλληλες εγγραφές με βάση τον ορισμό του καναλιού.

Με στόχο την ταυτόχρονη υποστήριξη τόσο του προϋπάρχοντος μοντέλου ASM όσο και του νεότερου SSM, η διεθνής *Αρχή Αριθμοδότησης Διαδικτύου* (Internet Assigned Numbers Authority, IANA) έχει ορίσει ένα συγκεκριμένο εύρος διευθύνσεων IP, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιούνται για την παροχή SSM υπηρεσιών. Το σύνολο αυτό αντιστοιχεί στο εύρος 232.0.0.0/8 για την IPv4 διευθυνσιοδότηση και το FF3x::/96 για την IPv6 (το δεκαεξαδικό ψηφίο x αφορά την εμβέλεια της διεύθυνσης) [6].

Βασικό πλεονέκτημα της δρομολόγησης SSM αποτελεί η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της ίδιας IP multicast διεύθυνσης προορισμού από διαφορετικές ομάδες τερματικών χρηστών δεδομένου ότι η πηγή κίνησης είναι διαφορετική. Επίσης με βάση την γενικευμένη υλοποίηση των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής που αναλύονται στη συνέχεια, παρέχεται και η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής με την επιλογή φιλτραρίσματος των πηγών κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένων των χαρακτηριστικών *Include* και *Exclude* των πρωτοκόλλων IGMPv3 [15] και MLDv2 [16], ένας τερματικός κόμβος έχει τη δυνατότητα να ορίσει ένα σύνολο διευθύνσεων από τις οποίες επιθυμεί να λαμβάνει ή επιθυμεί να μην λαμβάνει multicast κίνηση. Σαν αποτέλεσμα, εκτός από τις δυνατότητες ορισμού της λίστας των αποδεκτών διευθύνσεων πηγών (SSM μοντέλο), προσφέρεται και η δυνατότητα ορισμού ενός καναλιού από το οποίο έχουν εξαιρεθεί συγκεκριμένες πηγές. Η περίπτωση στην οποία δεν εξαιρείται κανένας κόμβος αντιστοιχεί σε αυτήν που ακολουθείται από το ASM μοντέλο.

2.1.2 Έλεγχος Συμμετοχής Χρηστών σε Ομάδες Πολυεκπομπής

Τα πρωτόκολλα IGMP [9], [15] και MLD [10], [16] υλοποιούν το μηχανισμό *ελέγχου συμμετοχής* τελικών χρηστών σε ομάδες πολυεκπομπής. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των παραληπτών κίνησης και των εντεταλμένων δρομολογητών πολυεκπομπής (MDR) που εξυπηρετούν κάθε φυσικό υποδίκτυο με απώτερο στόχο τη συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών από τους τελευταίους αναφορικά με τη συμμετοχή των πρώτων σε ομάδες (ASM) ή κανάλια (SSM) πολυεκπομπής. Οι προδιαγραφές των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων προβλέπουν διαφορετική λειτουργικότητα για τους δρομολογητές και τους τερματικούς σταθμούς που αποτελούν αποδέκτες της κίνησης πολυεκπομπής. Οι μεν πρώτοι είναι αυτοί που πρέπει να ενημερωθούν αναφορικά με τις συμμετοχές σε ομάδες πολυεκπομπής (οπότε εκδίδουν ερωτήματα) ενώ οι δεύτεροι είναι αυτοί που εκδηλώνουν το ενδιαφέρον τους για συμμετοχή τους σε ομάδες πολυεκπομπής (οπότε αναφέρουν στους πρώτους). Βασικό χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής αποτελεί το γεγονός ότι η κατά τη λειτουργία τους πραγματοποιείται συγκέντρωση μόνο της απαραίτητης πληροφορίας αναφορικά με τις ομάδες ή τα κανάλια πολυεκπομπής κι όχι της ακριβούς (λεπτομερούς) λίστας με τους συμμετέχοντες στην ομάδα. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται σημαντικό ο όγκος της πληροφορίας που απαιτείται να συντηρεί ο εκάστοτε δρομολογητής, διευρύνοντας αντίστοιχα τις δυνατότητες κλιμάκωσης (scalability) των πρωτοκόλλων σε μεγάλης έκτασης δίκτυα. Επίσης σπουδαίο χαρακτηριστικό αποτελεί η απαίτηση για *περιοδική ανανέωση* της πληροφορίας που αφορά στη συμμετοχή των τερματικών στις ομάδες πολυεκπομπής, πράγμα το οποίο έχει σαν στόχο την υλοποίηση ενός εύρωστου μηχανισμού διαχείρισης συνόδων πολυεκπομπής και την αποφυγή άσκοπης προώθησης πακέτων πολυεκπομπής σε περιπτώσεις απώλειας των μηνυμάτων σηματοδοσίας. Αμφότερες οι τελευταίες δυνατότητες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Σύμφωνα με την προδιαγραφή των πρωτοκόλλων IGMP και MLD, ο κάθε MDR στέλνει περιοδικά, προς το σύνολο³ των κόμβων του τοπικού δικτύου, ένα μήνυμα *Ερώτησης Συμμετοχής (Membership Query)* με στόχο να ενημερωθεί σχετικά με το αν υπάρχει κάποιος τερματικός κόμβος ο οποίος είναι ή επιθυμεί να καταστεί μέλος μίας ομάδας πολυεκπομπής. Στην θετική περίπτωση, ένας τερματικός κόμβος υποχρεούται να απαντήσει εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος με ένα μήνυμα *Αναφοράς Συμμετοχής (Membership Report)*, δηλώνοντας την multicast διεύθυνση της αντίστοιχης ομάδας πολυεκπομπής. Εναλλακτικά, οι τερματικοί κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να αποστείλουν αυτόβουλα (unsolicited) το μήνυμα Αναφοράς, όχι δηλαδή σαν απάντηση σε ένα μήνυμα ερώτησης. Με αυτόν τον τρόπο, παρέχεται η δυνατότητα αποστολής αιτήσεων ανεξάρτητα από τη λήψη των μηνυμάτων ερώτησης, τα οποία εκπέμπονται με σχετικά μικρή συχνότητα (1/125 Hz, με βάση τις τυπικές ρυθμίσεις των IGMP και MLD). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αμφότερα τα πρωτόκολλα IGMP και MLD προβλέπουν ότι η κατάσταση αναφορικά με τη συμμετοχή ενός MDR σε μία ομάδα πολυεκπομπής θα πρέπει να ανανεώνεται περιοδικά. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο

³ Το μήνυμα «πολύ-εκπέμπεται» υπό την έννοια ότι προωθείται στο υποδίκτυο και το λαμβάνουν όλοι οι κόμβοι που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό (δεν αποστέλλεται προς τον κάθε κόμβο ξεχωριστά).

τρόπους: είτε με την αυτόβουλη αποστολή μηνυμάτων Αναφοράς Συμμετοχής από την πλευρά των τερματικών είτε με την αποστολή μηνυμάτων Ερώτησης Συμμετοχής (Membership Queries) από την πλευρά των MDR.

Η λήψη του μηνύματος *Αναφοράς Συμμετοχής* από τον MDR, οδηγεί στη δημιουργία της συσχέτισης «IP multicast διεύθυνση – αναγνωριστικό διεπαφής φυσικού δικτύου» από αυτόν. Αυτό σημαίνει ότι τα πακέτα που καταφθάνουν στο συγκεκριμένο δρομολογητή πολυεκπομπής για την συγκεκριμένη multicast διεύθυνση, θα πρέπει να προωθούνται προς το υποδίκτυο που αντιστοιχεί στο αποθηκευμένο αναγνωριστικό. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η ταυτοποίηση του εκάστοτε υποδικτύου πραγματοποιείται μέσω του αναγνωριστικού της διεπαφής μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα συμμετοχής σε ομάδες ανεξάρτητα από τις τεχνολογίες ή ακόμη και την ύπαρξη φυσικών δικτύων. Το τελευταίο καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας που θα διερευνηθούν στη συνέχεια, εφόσον επιτρέπει σε κινητούς κόμβους να εκτελούν διαπομπές στρώματος δικτύου μεταξύ ετερογενών δικτύων. Επιπρόσθετα παρέχεται η δυνατότητα τόσο στους κινητούς κόμβους όσο και στους δρομολογητές του ενσύρματου δικτύου να χρησιμοποιούν τις «ιδεατές διεπαφές» που ταυτοποιούν δίκτυα που κατασκευάζονται μέσω διόδων IP (δηλ. μέσω του εγγενούς IP μηχανισμού ενθυλάκωσης πακέτων IP σε νέα πακέτα IP). Η πληροφορία αντιστοίχισης της διεπαφής του υποδικτύου με την εκάστοτε ομάδα πολυεκπομπής, χρησιμοποιείται και από το πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής για την εκκίνηση όλων των απαραίτητων διαδικασιών σηματοδότησης που θα καταστήσουν τον MDR μέλος του δένδρου διανομής της κίνησης της συγκεκριμένη ομάδας πολυεκπομπής (στην περίπτωση που ο MDR δεν συμπεριλαμβάνεται σε αυτό) αλλά και για την προώθηση των πακέτων προς το συγκεκριμένο υποδίκτυο.

Κατά την αποχώρηση ενός μέλους μίας ομάδας πολυεκπομπής από την ομάδα, οι προδιαγραφές προβλέπουν ότι θα πρέπει να ενημερωθεί ο MDR που εξυπηρετεί το υποδίκτυο. Αυτό πραγματοποιείται από τον αποχωρούντα κόμβο με δύο τρόπους: είτε με την αποστολή ενός συγκεκριμένου μηνύματος *αποχώρησης* που σηματοδοτεί στον MDR ότι ένας τερματικός κόμβος αποχωρεί από μια συγκεκριμένη ομάδα, είτε με την *μη ανανέωση* της κατάστασης του MDR με την αποστολή των απαραίτητων περιοδικών μηνυμάτων Αναφοράς Συμμετοχής για το σκοπό αυτό. Με βάση την προδιαγραφή των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής, ο MDR δεν κρατά πληροφορίες σχετικά με το ποιοι κόμβοι είναι μέλη ποιας ομάδας. Κατά συνέπεια προτού προβεί στη διακοπή της προώθησης των πακέτων προς το υποδίκτυο είναι υποχρεωμένος να αποστείλει ένα σχετικό μήνυμα ερώτησης μέσω του οποίου επιβάλλει στα μέλη της συγκεκριμένης ομάδας να τον ενημερώσουν συγκεκριμένα για την κατάσταση της συμμετοχής τους στην εν λόγω ομάδα πολυεκπομπής. Η απουσία λήψης ενός απαντητικού μηνύματος αναφοράς, εντός ενός μικρού χρονικού διαστήματος, σηματοδοτεί τη διακοπή της προώθησης των πακέτων κίνησης πολυεκπομπής από τον MDR. Αντίστοιχα η λήψη του σημαίνει την ανανέωση της αποθηκευμένης πληροφορίας κατάστασης σε αυτόν και οδηγεί στην συνέχιση της προώθησης των πακέτων πολυεκπομπής. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει άλλος κόμβος στο συγκεκριμένο υποδίκτυο που να είναι επίσης μέλος της ίδιας ομάδας πολυεκπομπής, ο MDR σταματά να προωθεί τα πακέτα προς

το συγκεκριμένο υποδίκτυο και επίσης ενημερώνει το αντίστοιχο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής ώστε να αποχωρήσει από το αντίστοιχο δένδρο διανομής της συγκεκριμένης ομάδας πολυεκπομπής εφόσον δεν εξυπηρετούνται άλλα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής από το δρομολογητή (σε άλλα υποδίκτυα που αυτός μπορεί να εξυπηρετεί).

Στην περίπτωση που έχει ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός SSM ο δρομολογητής είναι υποχρεωμένος να συλλέγει πληροφορίες αναφορικά με τα «κανάλια» πολυεκπομπής και τις πηγές κίνησης μέσω των οποίων ορίζονται. Οι νεότερες εκδόσεις των πρωτοκόλλων (δηλ. οι IGMPv3 και MLDv2) ακολουθούν την ίδια τεχνοτροπία με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω και υλοποιούν και τη λειτουργικότητα φιλτραρίσματος των πηγών πολυεκπομπής με χρήση των χαρακτηριστικών *Include* και *Exclude* για τις λίστες των πηγών κίνησης πολυεκπομπής. Δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες τεχνικές λεπτομέρειες είναι εκτός του βασικού αντικειμένου της διατριβής δε θα αναλυθούν περισσότερο. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στα [15] και [16].

Τα πρωτόκολλα ελέγχου συμμετοχής σε ομάδες ή κανάλια πολυεκπομπής IGMP/MLD είναι *μη συμμετρικά*, προβλέποντας διαφορετική λειτουργικότητα για τους τερματικούς κόμβους που είναι παραλήπτες της κίνησης πολυεκπομπής και για τους δρομολογητές που συμμετέχουν στα δένδρα διανομής. Με στόχο το διαχωρισμό της λειτουργικότητας του πρωτοκόλλου, η υλοποίησή τους αποτελείται από δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους μέρη: το «μέρος δρομολογητή» (router part) και το «μέρος τερματικού» (host part). Για το μεν πρώτο προδιαγράφονται τα μηνύματα ερώτησης Query που θα πρέπει να αποστέλλει ένα δρομολογητής ώστε να ενημερώνει τους τοπικούς πίνακες προώθησης κίνησης πολυεκπομπής. Για το δεύτερο περιγράφεται ο τρόπος μέσω του οποίου ένας κόμβος μπορεί αιτηθεί τη συμμετοχή του ή την αποχώρησή του κατ' απαίτηση όπως έχει αναλυθεί. Τέλος σημειώνεται ότι με βάση την προδιαγραφή της πρώτης έκδοσης του IGMP το «μέρος τερματικού» προβλέπεται ότι υλοποιείται από τους τερματικούς κόμβους αποκλειστικά ενώ το μέρος δρομολογητή από τους MDR αντίστοιχα. Αντίθετα στην δεύτερη και τρίτη έκδοση του IGMP όπως και για τις δύο εκδόσεις του MLD προβλέπεται ότι οι δρομολογητές μπορούν να υλοποιούν και τα δύο μέρη. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν επιπλέον να καθίστανται οι ίδιοι μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής (λόγω της λειτουργίας του μέρους τερματικού). Παράλληλα μπορούν να χειρίζονται αμφότερους τους τύπους μηνυμάτων σηματοδότησης (δηλ. *Ερωτήματα* και *Αναφορές*), και ως εκ τούτου να αποστέλλουν "αυτοεπιστρεφόμενα" μηνύματα (δηλ. μηνύματα τα οποία να ξεκινούν από το ένα μέρος τους και να καταλήγουν στο άλλο) προς τους εαυτούς τους.

2.1.3 Μηχανισμοί Δρομολόγησης Πακέτων Πολυεκπομπής

Η *Αρχιτεκτονική Παροχής Υπηρεσιών Πολυεκπομπής Διαδικτύου*, στηρίζεται στη βασική αρχή ότι η μετάδοση των πακέτων πληροφορίας από τους αποστολείς προς τους παραλήπτες πραγματοποιείται με βέλτιστο τρόπο. Η συγκεκριμένη αρχή οδηγεί στην απαίτηση για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης δικτυακών πόρων στα κοινά κομμάτια των διαδρομών τις οποίες θα πρέπει να ακολουθήσουν τα πακέτα πληροφορίας από τις αποστολείς προς τους παραλήπτες σε όλα τα στρώματα δικτύωσης και έχει δύο προεκτάσεις: από τη μία η μετάδοση

στο κοινό/μοιραζόμενο φυσικό μέσο θα πρέπει να πραγματοποιείται μία μοναδική φορά ανεξάρτητα από το πόσοι αποδέκτες των πλαισίων πληροφορίας είναι συνδεδεμένοι σε αυτό· εφόσον όλοι οι τερματικοί κόμβοι μοιράζονται το ίδιο κοινό φυσικό μέσο, η λήψη των πλαισίων πληροφορίας είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα από όλους τους παραλήπτες χωρίς να υπάρχει ανάγκη μετάδοσης προς τον καθένα ξεχωριστά⁴. Από την άλλη, η διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα στρώματος δικτύου θα πρέπει να είναι βέλτιστη, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η επιλογή των κόμβων που την απαρτίζουν θα πρέπει να ελαχιστοποιεί μία συνάρτηση κόστους που ορίζεται με βάση κάποιο κριτήριο (πχ. ελάχιστο μονοπάτι, ελάχιστη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, ελάχιστο αριθμό κόμβων που εμπλέκονται σε ένα δένδρο διανομής), να μην περιέχει βρόχους μεταξύ των κόμβων και να μην οδηγεί σε άσκοπες μεταδόσεις των πακέτων πληροφορίας (πχ. προς περιοχές δικτύου στις οποίες δεν υπάρχουν παραλήπτες της κίνησης).

Το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου δένδρου IP multicast δρομολόγησης, αντιστοιχεί στην επιλογή του υποσυνόλου των κόμβων ενός δικτύου και των ζεύξεων που τους συνδέουν από το σύνολο των διαθέσιμων κόμβων και συνδέσεων αντίστοιχα. Έχει αποδειχθεί [11] πως το συγκεκριμένο πρόβλημα, γνωστό κι ως Steiner tree problem, είναι NP-complete [17] και έχει πολυπλοκότητα $O(N^2 2^{N-T})$, όπου N είναι το πλήθος των κόμβων του δικτύου και T το πλήθος των μελών της ομάδας πολυεκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό του (προσδιορισμός των κόμβων που το απαρτίζουν και των ζεύξεων μεταξύ τους) δεν μπορεί να βρεθεί λύση σε εύλογο χρονικό διάστημα (ο χρόνος εύρεσης βέλτιστης λύσης αυξάνει εκθετικά, πράγμα το οποίο ουσιαστικά σημαίνει ότι η εκτέλεση του αλγορίθμου εύρεσης του Steiner tree δεν μπορεί να δώσει αποτέλεσμα σε εύλογο και πρακτικά χρησιμοποιήσιμο χρονικό διάστημα). Για το λόγο αυτό, για την δημιουργία ή την τροποποίηση (επέκταση/περιορισμό) των δένδρων διανομής της IP multicast κίνησης στο Διαδίκτυο, έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από *ευρετικές* τεχνικές (heuristics⁵), που έχουν σαν στόχο την εύρεση ενός «σχεδόν» βέλτιστου δένδρου διανομής. Οι συγκεκριμένες τεχνικές, δεδομένων των περιορισμών και της γενικότερης φύσης του προβλήματος που ορίζεται στην Αρχιτεκτονική IP Multicast, δίνουν αξιόπιστες λύσεις σε πολύ μικρό και πρακτικά χρησιμοποιήσιμο χρονικό διάστημα. Η υλοποίηση των εν λόγω τεχνικών πραγματοποιείται από διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολυεκπομπής [11], [12], [13], τα οποία εκτός από το πρόβλημα της *εύρεσης/υπολογισμού* του δένδρου διανομής, θεωρούν κι άλλες σημαντικές για τη δρομολόγηση πολυεκπομπής παραμέτρους, όπως η ελαχιστοποίηση της αποθηκευμένης στους κόμβους του δικτύου πληροφορίας (κλιμάκωση), η δυνατότητα προσαρμογής σε καταστάσεις βλαβών ή προσωρινής ανεπάρκειας κόμβων ή ζεύξεων του δικτύου (ευρωστία), στην δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής με βάση τόσο τα αιτήματα συμμετοχής και αποχώρησης από τους παραλήπτες όσο και το γεγονός ότι πολλαπλές πηγές έχουν τη δυνατότητα να αποστέλλουν κίνηση σε μία ομάδα προορισμού και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις ακόμη και θέματα ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας (QoS). Στην συνέχεια

⁴ Το συγκεκριμένο ζήτημα αφορά την υλοποίηση των μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης στο κοινό μέσο (Medium Access Control, MAC) του επιπέδου ζεύξης δεδομένων και δεν θα αναλυθεί περεταίρω.

⁵ Μέθοδοι ενεργειών με βάση κτηθείσες εμπειρίες

αναλύονται επιγραμματικά οι συγκεκριμένες τεχνικές και περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία των περισσότερο διαδεδομένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης IP Multicast.

2.1.3.1 Τεχνικές Δημιουργίας Δένδρων Διανομής

Στη βιβλιογραφία [11] απαντώνται τριών ειδών τεχνικές για τη δημιουργία και την ανάπτυξη δένδρων διανομής.

Απλοϊκές Τεχνικές

Σε αυτήν τη κατηγορία τεχνικών ανήκουν η *πλημμύρα* κι η ανάπτυξη *ανοιγόμενων δένδρων*. Στην πρώτη περίπτωση, κάθε multicast δρομολογητής, προωθεί τα αφικνούμενα IP multicast πακέτα προς όλες τις εξόδους του με εξαίρεση αυτή από την οποία φτάνει το καθένα. Με αυτόν τον τρόπο τα πακέτα πολυεκπομπής παραδίδονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Είναι προφανές εντούτοις ότι με βάση την τεχνική της πλημμύρας, ένας κόμβος μπορεί να λάβει ένα πακέτο περισσότερες από μία φορές στην περίπτωση που έχει σχηματιστεί ένας βρόχος μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Γενικότερα πάντως, το αποτέλεσμα είναι ότι σπαταλούνται πάρα πολλοί πόροι (εύρος ζώνης αλλά και υπολογιστική ισχύς) για την προώθηση των πακέτων, εφόσον τα πακέτα πολυεκπομπής προωθούνται προς περιοχές του δικτύου που δεν υπάρχουν αποδέκτες.

Η τεχνική της ανάπτυξης *ανοιγόμενων δένδρων* (*spanning tree*) βασίζεται στην εκ των προτέρων επιλογή των κόμβων ενός δικτύου που σχηματίζουν ένα δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής ανεξάρτητα από την θέση των πηγών και των παραληπτών της κίνησης. Όπως και στην περίπτωση της τεχνικής της *πλημμύρας*, η τεχνική της ανάπτυξης *ανοιγόμενων δένδρων*, δεδομένου του ότι δεν συνυπολογίζει τη θέση της κάθε πηγής και τη συμμετοχή των τερματικών στις ομάδες πολυεκπομπής, πραγματοποιεί κακή χρήση των δικτυακών πόρων, εφόσον οδηγεί στην μετάδοση των πακέτων πολυεκπομπής σε όλη την έκταση του δένδρου, ανεξάρτητα με το αν σε κάποια κομμάτια του υπάρχουν ή όχι ενεργές πηγές ή ενεργοί παραλήπτες της κίνησης.

Τεχνικές ανάπτυξης δένδρων δρομολόγησης με βάση τη θέση των πηγών κίνησης

Η χρήση των συγκεκριμένων τεχνικών οδηγεί στην κατασκευή δένδρων διανομής με ρίζα την κάθε πηγή κίνησης και φύλλα τους παραλήπτες της. Τα μονοπάτια που συνδέουν τους τελευταίους με την καθεμία πηγή, είναι βέλτιστα από άποψη μήκους του διανυόμενου μονοπατιού. Εντούτοις ο αριθμός των κόμβων του δικτύου που τα απαρτίζουν ενδέχεται να μην είναι ελάχιστος. Η ανάπτυξη τους βασίζεται στη χρήση της τεχνικής *Reverse-Path Broadcasting*. Σύμφωνα με αυτή κάθε δρομολογητής επαναμεταδίδει κάθε αφικνούμενο multicast πακέτο προς όλες τις εξόδους του, εξαιρώντας αυτή από την οποία έφτασε και μόνο στην περίπτωση όπου το πακέτο έφτασε από την είσοδο που αντιστοιχεί στο μονοπάτι με το μικρότερο κόστος προς την πηγή. Προϋπόθεση λειτουργίας της τεχνικής είναι προφανώς η διαθεσιμότητα της πληροφορίας σχετικά με το κόστος της μετάδοσης των πακέτων από και προς όλους τους κόμβους του δικτύου. Επίσης θεωρείται ότι οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων έχουν το ίδιο κόστος και προς τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης. Από την άλλη δεν λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι μπορεί σε κάποιο υποδίκτυο του συστήματος να μην υπάρχουν παραλήπτες της κίνησης. Η τεχνική

Truncated reverse-Path Broadcasting αντιμετωπίζει το τελευταίο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, η πληροφορία ελέγχου συμμετοχών διανέμεται με χρήση κατάλληλης σηματοδότησης εντός του δικτύου ώστε να μην μεταδίδονται πακέτα IP multicast κίνησης σε μονοπάτια που δεν καταλήγουν σε κάποιο από μέλη της ομάδας πολυεκπομπής.

Η τεχνική *Reverse-Path Multicasting* δεν κάνει χρήση της πληροφορίας ελέγχου συμμετοχής αλλά αντίθετα κάθε δρομολογητής απαιτείται να ενημερώσει (αποστέλλοντας ένα συγκεκριμένο μήνυμα κλαδέματος από το δένδρο – prune) τους γειτονικούς δρομολογητές του από τους οποίους λαμβάνει πακέτα IP multicast κίνησης μηνύματα ότι επιθυμεί την προσωρινή διακοπή λήψης των πακέτων (με το πέρας μιας χρονικής περιόδου τα αφικνούμενα πακέτα επαναμεταδίδονται προς το σύνολο των δρομολογητών που είχαν εκδηλώσει τη συγκεκριμένη επιθυμία άρνησης λήψης τους). Αυτό γίνεται εφόσον κανένας από τους δρομολογητές με τους οποίους είναι συνδεδεμένος ο εν λόγω δρομολογητής, δεν επιθυμεί τη λήψη ή εφόσον δεν έχει τελικούς αποδέκτες της κίνησης. Με τον τρόπο αυτό (flood and prune) οι δρομολογητές συντηρούν μια κατάσταση με αυτούς οι οποίοι επιθυμούν να λάβουν τα πακέτα κίνησης κατασκευάζοντας με αυτόν τον τρόπο δένδρα ελάχιστου μονοπατιού από τις πηγές προς τους παραλήπτες.

Στο ίδιο πλαίσιο κινείται και ο αλγόριθμος *Reverse Path Forwarding* (RPF) [18], [19] με τον οποίο είναι εφικτή η κατασκευή δένδρων διανομής ελάχιστου μονοπατιού (Shortest Path Trees, SPT) προς τις πηγές. Η εκτέλεση του αλγορίθμου RPF επιβάλλει σε κάθε δρομολογητή πολυεκπομπής να προωθεί ένα πακέτο πολυεκπομπής που καταφθάνει σε αυτόν προς τις κατάλληλες εξόδους του (εξαιρώντας αυτή από την οποία ήρθε), μόνο εφόσον το πακέτο κατέφθασε από το ελάχιστο μονοπάτι που τον συνδέει με την πηγή. Σε κάθε άλλη περίπτωση το πακέτο απορρίπτεται με στόχο την αποφυγή δημιουργίας βρόχων μετάδοσης πακέτων εντός του δικτύου. Βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου RPF είναι ότι είναι εξαιρετικά απλός και οδηγεί στη ταχεία κατασκευή SPT δένδρων. Από την άλλη αρνητικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι στηρίζεται κατά βάση στην εγκυρότητα των δεδομένων που περιέχονται στον πίνακα unicast δρομολόγησης για τον προσδιορισμό του ελάχιστου μονοπατιού προς τις πηγές. Ο συγκεκριμένος πίνακας περιέχει την εικόνα που έχει ο συγκεκριμένος δρομολογητής για το μονοπάτι προς τις πηγές κι όχι για το μονοπάτι από τις πηγές. Στην πράξη η συγκεκριμένη διαφορά δεν είναι τόσο σπουδαία, δεδομένου ότι στην πλειονότητά τους οι συνδέσεις είναι αμφίδρομες. Εντούτοις, έχει αποδειχθεί ότι η κατασκευής δένδρων μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα εξαιτίας της παραπάνω διαφοράς.

Τεχνικές ανάπτυξης μοιραζόμενων δένδρων

Στην περίπτωση αυτή κατασκευάζονται δένδρα τα οποία δεν είναι έχουν ρίζα τους κόμβους πηγές, αλλά είναι μοιραζόμενα από το σύνολο των πηγών (shared trees). Τα δένδρα κατασκευάζονται από κόμβους του δικτύου κορμού και στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν για ρίζα έναν συγκεκριμένο δρομολογητή (επονομαζόμενο ως πυρήνα ή σημείο συνάντησης) τοποθετημένο σε κάποιο κεντρικό σημείο του δικτύου πυρήνα. Από τον κόμβο αυτόν ξεκινά η κατασκευή δένδρων ελάχιστου μονοπατιού προς τους αποδέκτες. Οι πηγές (πιο ορθά οι multicast designated routers που εξυπηρετούν την καθεμία) αποστέλλουν τα πακέτα multicast

κίνησης προς τους κόμβους πυρήνα από τους οποίους πραγματοποιείται η διανομή των πακέτων προς τους παραλήπτες. Από την άλλη οι δρομολογητές που εξυπηρετούν αποδέκτες της multicast κίνησης, δεδομένης της κατάστασης που έχουν αναφορικά με τη συμμετοχή των χρηστών σε ομάδες πολυεκπομπής, στέλνουν κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης προς τον κόμβο πυρήνα που εξυπηρετεί το δίκτυο στο οποίο ανήκουν που έχουν σκοπό την επέκταση του δένδρου διανομής προς την πλευρά τους και την τελική συμμετοχή τους σε αυτό. Η μετάδοση των συγκεκριμένων μηνυμάτων γίνεται με χρήση στο βέλτιστο μονοπάτι από τον MDR προς τον κόμβο πυρήνα. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μεταξύ του κόμβου πυρήνα και του εκάστοτε MDR, επεξεργάζονται τα συγκεκριμένα μηνύματα και αποθηκεύουν την πληροφορία αναφορικά με την προώθηση πακέτων για τις συγκεκριμένες ομάδες πολυεκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι μόλις το μήνυμα φτάσει τελικά στον κόμβο πυρήνα το μονοπάτι προς τους τελικούς αποδέκτες είναι ήδη κατασκευασμένο. Επιπλέον αν το μήνυμα περάσει από έναν κόμβο ο οποίος είναι ήδη μέλος του δένδρου διανομής, δεν απαιτείται η μετάδοση μέχρι τον κόμβο πυρήνα. Βασικό πλεονέκτημα από τη χρήση του μηχανισμού μοιραζόμενων δένδρων είναι ο καλύτερος έλεγχος της IP Multicast κίνησης από την πλευρά του δικτύου και το γεγονός ότι το δένδρο δρομολόγησης είναι μοναδικό για όλες τις πηγές κίνησης. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν κατασκευάζονται ελάχιστα μονοπάτια από τις πηγές προς τους παραλήπτες κι ότι η παροχή της υπηρεσίας IP Multicast καθίσταται εξαρτημένη της διαθεσιμότητας του κόμβου πυρήνα (single point of failure).

2.1.3.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Πολυεκπομπής

Η λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης δίνει τη δυνατότητα κατασκευής δένδρων διανομής της IP multicast κίνησης μεταξύ των δρομολογητών του δικτύου κορμού και μεταξύ των συνοριακών δρομολογητών που συνδέουν τα αυτόνομα συστήματα των διαφόρων παρόχων υπηρεσιών διαδικτύου [20], [21]. Η δημιουργία και συντήρηση των δένδρων διανομής πραγματοποιείται μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων που αποκαλύπτει εάν επιθυμείται η λήψη πακέτων που προορίζονται για ομάδες πολλαπλών προορισμών. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται περιληπτικά τα ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολυεκπομπής για χάριν πληρότητας.

Ιστορικά το DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) [22], ήταν το πρώτο πρωτόκολλο IP multicast δρομολόγησης που αναπτύχθηκε κι εφαρμόστηκε στο MBone (Multicast Backbone). Η λειτουργία του στηρίζεται στο πρωτόκολλο RIP για την κατασκευή πινάκων unicast δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου *Reverse Path Multicasting* που περιγράφηκε νωρίτερα. Πλεονέκτημα του DVMRP αποτελεί το εγγενές χαρακτηριστικό του να συνδέει με χρήση unicast διόδων (tunnels) περιοχές του δικτύου ή του Διαδικτύου που δεν υποστηρίζεται η δρομολόγηση IP Multicast. Από την άλλη αρνητικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι τα πακέτα πολυεκπομπής πλημμυρίζουν περιοδικά όλες τις περιοχές του δικτύου και για όσο χρόνο απαιτείται μέχρις ότου διαδοθούν τα μηνύματα prune. Το πρωτόκολλο MOSFP (Multicast Extensions to Open Shortest Path First) [23], αντίστοιχα χρησιμοποιεί την διαθέσιμη από το OSPF (Open Shortest Path First) πληροφορία, σχετικά με την κατάσταση των συνδέσεων μεταξύ των διαφόρων δρομολογητών ενός αυτόνομου συστήματος,

για την κατασκευή δένδρων διανομής με ρίζα τις διάφορες πηγές multicast κίνησης. Η διαφορά από το DVMRP είναι ότι πλέον το ελάχιστο μονοπάτι κατασκευάζεται με βάση την OSPF πληροφορία (κι όχι την RIP) και τα πακέτα της multicast κίνησης δεν πλημμυρίζουν περιοδικά το σύστημα. Εντούτοις αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποτελέσει και μειονέκτημα στη λειτουργία του πρωτοκόλλου σε περιπτώσεις όπου οι παραλήπτες ενός μεγάλου μεγέθους συστήματος είναι αραιά κατανεμημένοι σε αυτό δεδομένου ότι το φορτίο σηματοδοσίας αυξάνει αρκετά.

Τα δύο παραπάνω πρωτόκολλα δρομολόγησης στηρίζεται τη λειτουργία του σε πληροφορία που διατίθεται από μηχανισμούς δύο πολύ συγκεκριμένων σημείου-προς-σημείο πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο PIM (Protocol Independent Multicast) δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ένα δένδρου διανομής ανεξαρτήτως του unicast πρωτοκόλλου δρομολόγησης του συστήματος. Το PIM έχει δύο τρόπους λειτουργίας καθένας από τους οποίους ενδείκνυται ανάλογα με το αν η πυκνότητα κατανομής των παραληπτών κίνησης στο δίκτυο είναι μικρή ή μεγάλη. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο PIM-SM (αραιού τύπου, PIM-Sparse Mode, [24]), ενώ στη δεύτερη το PIM-DM (πυκνού τύπου, PIM-Dense Mode, [25]). Η λειτουργία του PIM-DM είναι παρόμοια με αυτή του DVMRP οπότε κατασκευάζονται δένδρα διανομής από τις πηγές προς τους παραλήπτες της κίνησης. Αντίθετα στο PIM-SM επιλέγεται ένας κόμβος του δικτύου κορμού (πυρήνας) ο οποίος παίζει το ρόλο του *Σημείου Συνάντησης* (Rendezvous Point, RP). Όλες οι πηγές αποστέλλουν τα πακέτα της IP multicast κίνησης προς τον κόμβο RP, από τον οποίο ξεκινά η κατασκευή του μοιραζόμενου δένδρου διανομής για κάθε ομάδα πολλαπλών προορισμών. Επιπρόσθετα, το πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα, κατόπιν της εγκατάστασης του μοιραζόμενου δένδρου, να ακολουθήσει η εγκατάσταση δένδρου διανομής με ρίζα την κάθε πηγή κίνησης που συνδέει την τελευταία με ελάχιστα μονοπάτια με τους παραλήπτες, εφόσον ικανοποιούνται κάποια κριτήρια που σχετίζονται με τη χρήση των δικτυακών πόρων. Τέλος, το πρωτόκολλο CBT (Core-Based Tree Protocol, [26]), οδηγεί στην εγκατάσταση επίσης μοιραζόμενων δένδρων μεταξύ των πολλαπλών αποστολέων και παραληπτών. Η προώθηση των πακέτων κίνησης πολυεκπομπής πραγματοποιείται διαμέσου ενός επίσης κεντρικά τοποθετημένου κόμβου του δικτύου, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο τη χρήση του πρωτοκόλλου έτσι ιδανική κι εξαιρετικά αποδοτική για περιπτώσεις δρομολόγησης που αφορούν μεγάλης κλίμακας δίκτυα, με πολλά μέλη.

Για τη δρομολόγηση πακέτων IP multicast κίνησης σε ολόκληρο το Διαδίκτυο, δηλαδή μεταξύ διαφορετικών *περιοχών* (domain) του, που ανήκουν σε διαφορετικούς λειτουργούς, απαιτείται η εκτέλεση ξεχωριστών πρωτοκόλλων (δια-τομεακή δρομολόγηση πολυεκπομπής, inter-domain multicast routing protocols). Το πρωτόκολλο BGMP (Border Gateway Multicast Protocol) [27] δίνει τη δυνατότητα ένωσης δύο δένδρων δρομολόγησης που ανήκουν σε διαφορετικές περιοχές του δικτύου. Η εκτέλεση του πρωτοκόλλου πραγματοποιείται στους συνοριακούς δρομολογητές που ενώνουν τις περιοχές (gateway routers). Σε αυτούς εκτελούνται οι διεργασίες που αφορούν στην λειτουργία ενός ενδο-τομεακού (intra-domain) πρωτοκόλλου IP Multicast δρομολόγησης, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο εφικτή την δρομολόγηση πακέτων πολυεκπομπής σε όλο το Διαδίκτυο. Σε αυτό το πλαίσιο, το πρωτόκολλο MSDP (Multicast Source Discovery Protocol) [28] δίνει τη δυνατότητα σε κάθε περιοχή του δικτύου να ενημερώνεται για τις πηγές IP multicast

κίνησης που είναι ενεργές στις περιοχές όπου έχει ομότιμους αντιπροσώπους του πρωτοκόλλου (protocol peers). Για τη συνεργασία μεταξύ των συστημάτων προϋπόθεση είναι η χρήση του πρωτοκόλλου PIM-SM για την δρομολόγηση των πακέτων εντός κάθε συστήματος, οπότε κάθε αντιπρόσωπος ενημερώνεται από το κάθε σημείο συνάντησης για την δραστηριότητα πηγών πολυεκπομπής σε καθεμία περιοχή. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν επιπλέον προτάσεις που αφορούν στην υποστήριξη δια-τομεακής δρομολόγησης πολυεκπομπής. Δεδομένου ότι δεν αποτελούν βασικό αντικείμενο της διατριβής δεν αναλύονται περαιτέρω.

2.2 Διαχείριση Κινητικότητας

Σε πρώτη φάση η έννοια της ασύρματης δικτύωσης ήταν αποκλειστικά συνδεδεμένη με την έλλειψη καλωδίωσης σε ότι αφορά την εγκατάσταση συνδέσεων μεταξύ των τερματικών και του υπολοίπου δικτύου και παρείχε τη δυνατότητα σε τερματικά να διατηρούν ενεργές συνόδους εφόσον παρέμεναν εντός της περιοχής κάλυψης των σταθμών βάσης. Την τελευταία δεκαεπταετία, με την ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων επικοινωνιών και γενικότερα την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων σε ευρεία κλίμακα προσφέρθηκε η δυνατότητα στους τερματικούς σταθμούς να διαπέμπονται μεταξύ των σταθμών βάσης και να διατηρούν ενεργές τις εγκατεστημένες συνόδους τους ανεξάρτητα από την κίνησή τους εφόσον βρίσκονταν εντός της περιοχής κάλυψης ενός σταθμού βάσης. Σαν αποτέλεσμα τα σύγχρονα συστήματα χαρακτηρίζονται από τη λειτουργία προηγμένων μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας χρηστών. Η παροχή υπηρεσιών διαχείρισης κινητικότητας ορίζεται ως η δυνατότητα μεταφοράς και επανεγκατάστασης συνδέσεων μεταξύ του τερματικού και του δικτύου εξαιτίας του γεγονότος ότι το τερματικό περνά από την περιοχή κάλυψης του τρέχοντος AP του, στην περιοχή κάλυψης ενός γειτονικού AP. Στην πράξη η συγκεκριμένη μετάβαση είναι μία αρκετά σύνθετη διαδικασία εφόσον δεν περιλαμβάνει μόνο τη δυνατότητα απεγκατάστασης της τρέχουσας σύνδεσης και την εγκατάσταση μίας νέας. Οι σύγχρονοι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος εντός του οποίου κινείται το τερματικό, την επιλογή ενός νέου με βάση τα χαρακτηριστικά κινητικότητας του χρήστη, την ομαλή και ταχεία μεταφορά όλων των απαραίτητων πληροφοριών που καθιστούν εφικτή την επικοινωνία του τερματικού από τη νέα θέση του με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά ποιότητας και τον περιορισμό της επίδρασης της ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας κατά τη διάρκεια της διαπομπής.

Η διαχείριση κινητικότητας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις εμπλέκει πολλές οντότητες κι επηρεάζει τη λειτουργία πολλών στρωμάτων δικτύωσης και διεργασιών κατά την φάση αποκατάστασης της επικοινωνίας [29]. Στη βιβλιογραφία απαντώνται διάφοροι τύποι κινητικότητας όπως:

- *Κινητικότητα Υπηρεσίας (Περιοαγωγή)*: Αφορά κυρίως τις δυνατότητες που έχει ένα τερματικό και το δίκτυο πρόσβασης να απολαμβάνει το ίδιο σύνολο υπηρεσιών μετά την σύνδεσή του σε ένα σύστημα. Η κινητικότητα υπηρεσίας αφορά κυρίως τις δυνατότητες πρόσβασης σε δεδομένα και υπηρεσίες από σημεία που δεν ανήκουν στο δίκτυο με το οποίο το τερματικό έχει συνάψει μία σύμβαση παροχής υπηρεσιών.

- *Προσωπική Κινητικότητα*: Αναφέρεται στην δυνατότητα που μπορεί να έχουν οι χρήστες ώστε να απολαμβάνουν υπηρεσίες και δεδομένα μορφοποιημένα με βάση τις προσωπικές προτιμήσεις τους ανεξάρτητα του δικτύου που χρησιμοποιούν για την λήψη των στοιχείων της υπηρεσίας αλλά και ανεξάρτητα της συσκευής μέσω της οποίας αποκτούν πρόσβαση στην υπηρεσία. Για παράδειγμα ένας χρήστης μπορεί να κάνει χρήση μίας υπηρεσίας φωνής με χρήση μίας ενός κοινού κινητού τηλεφώνου μέσω ενός συστήματος UMTS ή μέσω μίας VoIP υπηρεσίας μέσω ενός WLAN δικτύου. Η προσωπική κινητικότητα του επιτρέπει να έχει για παράδειγμα πρόσβαση στον προσωπικό τηλεφωνικό του κατάλογο με τον τρόπο που ο ίδιος έχει επιλέξει ανεξάρτητα από την τεχνολογία που χρησιμοποιεί για την λήψη της υπηρεσίας.
- *Κινητικότητα Συνόδου*: Αναφέρεται στη δυνατότητα που μπορεί μεταφοράς μίας ενεργή σύνοδο από ένα τερματικό σε ένα άλλο κατόπιν παρέμβασης του χρήστη. Το πιο σύνηθες παράδειγμα αυτού του τύπου κινητικότητας είναι η μεταφορά μίας συνόδου τηλεφωνίας VoIP (που εκτελείται στον προσωπικό υπολογιστή του) στο κινητό του τηλέφωνο.
- *Κινητικότητα Τερματικού*: αναφέρεται στις κλασικές περιπτώσεις κινητικότητας στις οποίες ένας κινητός χρήστης διαπέμπεται από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο κι αφορά κυρίως τις διαδικασίες που απαιτείται να εκτελεστούν για την αποκατάσταση της επικοινωνίας του, αφού προσδεθεί στο νέο σημείο πρόσβασης. Η έννοια της αποκατάστασης της επικοινωνίας ορίζεται ως η «*αναδρομολόγηση*» του ρεύματος κίνησης (πακέτων πληροφορίας) από και προς το νέο σημείο πρόσδεσης του κινητού σταθμού. Επιπλέον ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας τερματικού μπορεί να εκτελείται πριν, κατά τη διάρκεια ή μετά την πρόσδεση του τερματικού στο νέο δίκτυο.

Στα πλαίσια της διατριβής επικεντρωθήκαμε στο τελευταίο είδος διαπομπής που σχετίζεται με τις κατανεμημένες, μεταξύ του τερματικού και του δικτύου, διαδικασίες που εκτελούνται με στόχο την αποκατάσταση της επικοινωνίας του πρώτου αμέσως μετά την πρόσδεσή του σε ένα νέο δίκτυο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία για τη γενική αρχιτεκτονική ασυρμάτων δικτύων που έχει επικρατήσει στις μέρες μας και εντός της οποίας θεωρείται η γενική λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας που ακολουθεί.

2.2.1 Γενική Αρχιτεκτονική Ασυρμάτων Δικτύων

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης, έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε την τελευταία εικοσαετία. Μέχρι πρότινος, η δικτυακή κίνηση μεταφέρονταν αποκλειστικά μέσω της ενσύρματης υποδομής, από και προς επίσης ενσύρματα συνδεδεμένους τερματικούς κόμβους. Στις μέρες μας, όλο και μεγαλύτερο κομμάτι κίνησης αφορά ασύρματα συνδεδεμένους σε επίγεια συστήματα επικοινωνιών κόμβους, παρέχοντας τη δυνατότητα αδιάλειπτης πρόσβασης σε υπηρεσίες και πληροφορίες ανεξάρτητα από τον τόπο, το χρόνο και το γεγονός ότι οι τερματικοί κόμβοι είναι πλέον κινούμενοι. Με αναφορά στο πρότυπο OSI για τη διασύνδεση ανοικτών συστημάτων, η λειτουργία της ασύρματης δικτύωσης εκτελείται αποκλειστικά στο *Στρώμα Σύνδεσης Δεδομένων (Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο, Medium Access Control, MAC)* και το *Φυσικό Στρώμα (Physical Layer, PHY)*. Με βάση την περισσότερο

διαδεδομένη⁶ αρχιτεκτονική τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης, κάθε τερματικός κόμβος αποκτά πρόσβαση στην ενσύρματη δικτυακή υποδομή μέσω ενός σταθερού Σταθμού Βάσης, ή αλλιώς *Σημείου Πρόσβασης* (Access Point, AP), κάνοντας χρήση ενός πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης στον ασύρματο ραδιοδίαυλο. Η επικοινωνία ενός ασύρματου συνδεδεμένου κόμβου με το υπόλοιπο δίκτυο, πραγματοποιείται μέσω του AP και μόνο, ακόμη κι αν αυτό αφορά επικοινωνία κόμβων που μοιράζονται τον (ή πιο αυστηρά, ανταγωνίζονται να αποκτήσουν πρόσβαση στον) ίδιο ραδιοδίαυλο.

Στη γενική περίπτωση, η λειτουργικότητα που υποστηρίζουν οι κόμβοι AP, δεν περιλαμβάνει λειτουργίες στρώματος δικτύου, αλλά περιορίζεται σε αυτές του στρώματος σύνδεσης. Αυτό αφορά τόσο το μέρος της ασύρματης ζεύξης όσο και τη διασύνδεση με την υπόλοιπη δικτυακή υποδομή. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, που καλύπτουν ευρείες γεωγραφικές περιοχές, ενώ παράλληλα παρέχεται απεριόριστη ευελιξία αναφορικά με τις αναπτυσσόμενες τοπολογίες δικτύων. Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από μία πλειάδα σταθμών βάσης, διασυνδεδεμένων μεταξύ τους και με το υπόλοιπο δίκτυο κορμού συνήθως με χρήση κάποιας ενσύρματης τεχνολογίας δευτέρου στρώματος. Τα αναπτυσσόμενα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης μπορεί να ανήκουν (διοικητικά) στο ίδιο ή σε διαφορετικά δίκτυα (με αναφορά στο στρώμα δικτύου), αν και οι κόμβοι που ανήκουν σε αυτά μπορεί να μοιράζονται ή όχι τον ίδιο φυσικό ραδιοδίαυλο. Επιπρόσθετα, η χρήση διαφορετικών κι ετερογενών μεταξύ τους τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας, τόσο για τα επιμέρους χαρακτηριστικά των ραδιοδιαύλων (πχ. συχνότητα φερόντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) όσο και για τις τεχνολογίες πρόσβασης στο μοιραζόμενο μέσο (πχ. CDMA), καθώς και η ανάπτυξη των τεχνολογιών κυψελωτών συστημάτων, που επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, προσφέρουν επιπρόσθετη ευελιξία στην ανάπτυξη ασύρματων δικτύων σε κοινές ή επικαλυπτόμενες γεωγραφικές περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο προσφέρεται η δυνατότητα σε τερματικούς κόμβους να συνδέονται κατ' απαίτηση σε ένα ή περισσότερα ασύρματα δίκτυα ανάλογα με το είδος, το κόστος και την ποιότητα των προσφερόμενων από το καθένα υπηρεσιών.

2.2.2 Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας

Η βασικότερη πρόκληση κατά τη χρήση τεχνολογιών ασύρματων δικτύων είναι η δυνατότητα διατήρησης της επικοινωνίας, ανεξάρτητα από αν ο κινητός σταθμός μπορεί, λόγω της μετακίνησής του, να συνδέεται σε διαφορετικά σημεία πρόσβασης κατά τη διάρκεια μίας συνόδου (στέλνει ή/και λαμβάνει κίνηση). Η έννοια της *διαπομπής* ενός τερματικού κόμβου από ένα σημείο σε ένα άλλο, με *αναφορά* σε ένα συγκεκριμένο στρώμα δικτύωσης (πχ. ζεύξης, δικτύου, μεταφοράς, συνόδου, εφαρμογής), περιλαμβάνει την εκτέλεση των απαραίτητων διαδικασιών που καθιστούν εφικτή την αποσύνδεση και σύνδεση⁷ του κόμβου από το ένα σημείο

⁶ Τα τελευταία χρόνια επίσης αναπτύσσονται τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης χωρίς υποδομή (ad-hoc), στις οποίες δεν υπάρχει κάποια σταθερή υποδομή δηλ. ένας κεντρικός σταθμός βάσης (AP), που να υποστηρίζει την δια-δίκτυωση. Η επικοινωνία μεταξύ των γειτονικών κόμβων να πραγματοποιείται με την εγκατάσταση απ' ευθείας συνδέσεων μεταξύ τους, με χρήση επίσης ενός κοινού πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης στον μοιραζόμενο ραδιοδίαυλο. Οι τεχνολογίες ad-hoc δεν αποτελούν αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια της διατριβής και δεν θα αναλυθούν περισσότερο.

⁷ Η έννοια της σύνδεσης αφορά την συσχέτιση μεταξύ δύο ομότιμων οντοτήτων σε ένα επίπεδο δικτύωσης.

στο άλλο. Βασική αιτία εκτέλεσης μίας διαπομπής αποτελεί η αδυναμία επικοινωνίας μεταξύ των ομότιμων οντοτήτων πρωτοκόλλων του ιδίου στρώματος που βρίσκονται σε διαφορετικούς φυσικούς κόμβους, σαν αποτέλεσμα της φυσικής μετακίνησής του ενός. Στη γενική περίπτωση μία διαπομπή μπορεί να είναι αποτέλεσμα της εκτέλεσης περισσότερων κριτηρίων, όπως για παράδειγμα η ποιότητα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της σύνδεσης, η χρέωση, το είδος των προσφερομένων υπηρεσιών κ.α. Με αυτόν τον τρόπο ορίζονται και τα διάφορα είδη κινητικότητας που αναλύθηκαν νωρίτερα (υπηρεσίας, προσώπου, τερματικού). Στα πλαίσια της διατριβής η ανάλυση επικεντρώνεται στην *κινητικότητα τερματικού*. Ως εκ τούτου, μία διαπομπή αφορά κάποιο συγκεκριμένο στρώμα δικτύωσης και στη γενική περίπτωση έχει σαν αποτέλεσμα τη διακοπή της σύνδεσης του τερματικού στο στρώμα αναφοράς για κάποιο χρονικό διάστημα.

Μία διαπομπή ορίζεται με αναφορά στο στρώμα στο οποίο εκτελείται. Αντίστοιχα, η εκτέλεσή της προϋποθέτει την εκτέλεση διαπομπής στο υποκείμενο στρώμα. Το αντίστροφο δεν είναι απαραίτητο. Η φυσική μετακίνηση ενός κόμβου και η αλλαγή του σημείου πρόσδεσης του σε ένα δίκτυο, ενδέχεται να οδηγήσει στη σύνδεσή του σε ένα τελείως διαφορετικό δίκτυο ή όχι. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μην έχει καμία επίπτωση στη λειτουργία του στρώματος δικτύου (δηλ. να εκτελείται διαφανώς προς αυτό). Στην πρώτη περίπτωση, για την αποκατάσταση της επικοινωνίας και τη διατήρηση μίας ήδη εγκατεστημένης συνόδου, απαιτείται η προώθηση της κίνηση από διαφορετικούς κόμβους του δικτύου κορμού. Στη δεύτερη, δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη ενέργεια αναφορικά με την επανεγκατάσταση της συνόδου στρώματος δικτύου και πάνω, εφόσον η διαπομπή δεν επηρεάζει τη λειτουργία του (ένας δρομολογητής συνεχίζει να προωθεί τα πακέτα προς το ίδιο φυσικό υποδίκτυο).

Στην πράξη, σε όσα αφορούν την *κινητικότητα τερματικού*, μία διαπομπή ξεκινά από την αδυναμία επικοινωνίας ενός κινητού κόμβου με τον σταθμό βάσης με τον οποίο έχει εγκατεστημένη μία σύνδεση (επιπέδου ζεύξης δεδομένων) λόγω της εξασθένησης που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα εξαιτίας κυρίως της απομάκρυνσης του πρώτου από το δεύτερο. Η συγκεκριμένη αδυναμία έχει σαν αποτέλεσμα το σκανδαλισμό των διαδικασιών που θα οδηγήσουν στην εγκατάσταση μίας νέας σύνδεσης με ένα γειτονικό σταθμό βάσης, εφόσον είναι εφικτό. Στη συνέχεια εκτελούνται οι διαδικασίες που θα οδηγήσουν στην αποκατάσταση της επικοινωνίας στο στρώμα δικτύου. Ο κινητός κόμβος χρειάζεται να αποκτήσει ένα νέο αναγνωριστικό στρώματος δικτύου το οποίο να αποκαλύπτει τη νέα θέση του στο δίκτυο, ώστε καταστεί δυνατή η προώθηση των πακέτων της κίνησης προς και από το νέο σημείο στο οποίο συνδέθηκε. Το ίδιο ισχύει και για τα παραπάνω στρώματα δικτύωσης, που φροντίζουν για την από άκρο-σε-άκρο επικοινωνία μεταξύ του κινητού και των κόμβων με τους οποίους επικοινωνεί. Στην περίπτωση που η εκτέλεση μίας διαπομπής δεν έχει καμία επίδραση στην λειτουργία ενός στρώματος, δηλαδή εκτελείται διαφανώς προς αυτό, ο χειρισμός όλων των διαδικασιών εκτελείται στο υποκείμενα στρώματα.

Όπως προαναφέρθηκε, η διαχείριση των διαδικασιών που απαιτείται να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια μίας διαπομπής, πραγματοποιείται από ειδικά ανεπτυγμένους γι' αυτό το σκοπό μηχανισμούς. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί αποτελούν μέρος της λειτουργικότητας που προσφέρεται από το στρώμα *αναφοράς* της διαπομπής. Οι επονομαζόμενοι ως *Μηχανισμοί*

*Διαχείρισης Κινητικότητα*ς (Mobility Management, MM) φροντίζουν για την εκτέλεση κατάλληλων διαδικασιών σηματοδότησης και την ανταλλαγή απαραίτητων πληροφοριών μεταξύ των δικτυακών οντοτήτων που υποστηρίζουν τη διαδικασία, με απώτερο στόχο την αποκατάσταση της επικοινωνίας του τερματικού. Η εκτέλεση μίας διαπομπής έχει σαν αποτέλεσμα την κατάλυση της εγκατεστημένης σύνδεσης στο επίπεδο εκτέλεσης της διαπομπής και την εγκατάσταση μίας νέας προς το νέο σημείο σύνδεσης. Ο απόλυτος στόχος από τη λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητα είναι η διαφανής ως προς το στρώμα εφαρμογής εκτέλεση της διαπομπής και η ελαχιστοποίηση της όποιας επίδρασης μπορεί αυτή να έχει στην ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών στον τελικό χρήστη. Προηγμένοι μηχανισμοί MM δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης *απρόσκοπτων διαπομπών* (*seamless handover*), οι οποίοι πραγματοποιούν ελαχιστοποίηση της επίδρασης που έχει η διαπομπή, τόσο στο τερματικό και τις εκτελούμενες υπηρεσίες σε αυτό, όσο και στο δίκτυο ή δίκτυα που καλούνται τις υποστηρίζουν. Σημείο εκκίνησης για τη λειτουργία ενός μηχανισμού MM, αποτελεί η πιστοποίηση της αδυναμίας επικοινωνίας μεταξύ δύο ομότιμων οντοτήτων ή η συλλογή επαρκών ενδείξεων που μεταφράζονται σε βεβαιότητα για επικείμενη αδυναμία επικοινωνίας. Στη συνέχεια αναλύονται οι σημαντικές λεπτομέρειες που αφορούν στη λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητα, και περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες που αφορούν συστήματα που βασίζονται στο πρωτόκολλο Διαδικτύου.

Η βασική απαίτηση για διατήρηση επικοινωνίας σε ένα ασύρματο δίκτυο, ξεκινά από το πρωταρχικό αίτημα για διατήρηση των συνδέσεων μεταξύ των τερματικών κόμβων και των σταθμών βάσης στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Στη γενική περίπτωση μία σύνδεση καταλύεται στην περίπτωση κατά την οποία χειροτερεύει η ποιότητά της σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην ικανοποιούνται κάποια πολύ συγκεκριμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά της, όπως για παράδειγμα το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος, το επίπεδο του σηματοθορυβικού λόγου (*Signal to Noise Ratio*, SNR) ή του ρυθμού εμφάνισης λαθών στα μεταδιδόμενα πλαίσια πληροφορίας (π.χ. Bit Error Rate – BER, Packet Error Rate – PER) κ.α. Στην πράξη από τη στιγμή που διαπιστώνεται ότι η ποιότητα μίας ζεύξης έχει χειροτερεύσει αρκετά (π.χ. η τιμή της λαμβανόμενης ισχύος είναι μικρότερη ενός προκαθορισμένου κατωφλίου), απαιτείται η εκτέλεση ενός αλγορίθμου ο οποίος θα καταστήσει δυνατή την επιλογή ενός νέου σταθμού βάσης. Η αλλαγή του σταθμού βάσης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του ευρύτερου δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί τελικά το τερματικό. Όταν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, η διαπομπή απλά περιλαμβάνει μόνο την εγκατάσταση της νέας σύνδεσης στρώματος ζεύξης δεδομένων. Αυτή είναι μία λειτουργία που εκτελείται αποκλειστικά από το στρώμα σύνδεσης δεδομένων. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η διαπομπή οδηγεί στην αλλαγή του δικτύου στο οποίο συνδέεται το κινητό, για την αποκατάσταση της επικοινωνίας απαιτείται η συνδρομή των λειτουργικών οντοτήτων που ανήκουν στο στρώμα δικτύου. Αυτές οι περιπτώσεις περιλαμβάνουν περιληπτικά την επιβεβαίωση της μετακίνησης του τερματικού σε ένα νέο δίκτυο, την εύρεση του νέου δρομολογητή μέσω του οποίου το τερματικό θα αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο, τη ρύθμιση της νέας διεύθυνσης από την πλευρά του τερματικού που θα καταστήσει δυνατή την ταυτοποίηση της νέας θέσης του στο ευρύτερο δίκτυο και την αποκατάσταση της επικοινωνίας του με τους

κόμβους με τους οποίους επικοινωνούσε πριν τη διαπομπή. Επιπλέον θα πρέπει να ελεγχθούν τα δικαιώματα του κινητού στο νέο δίκτυο δηλαδή να εκτελεστούν οι απαιτούμενες διαδικασίες που σχετίζονται με την *Αυθεντικοποίησή* του, την *Πιστοποίηση* της ταυτότητάς του, την *Εξουσιοδότηση Πρόσβασης* και τέλος να ρυθμιστούν οι παράμετροι που αφορούν τη Χρέωσή του (*Authentication, Authorization, Accounting, AAA*).

Σε ένα σύστημα μεταγωγής πακέτου όπως το Διαδίκτυο, βασική απαίτηση για την αδιάλειπτη εκτέλεση δικτυακών εφαρμογών είναι η μη μεταβολή των εγκατεστημένων *συνόδων*, μεταξύ των επικοινωνούντων τερματικών κόμβων. Μία σύνοδος ορίζεται από τα *άκρα* της, δηλαδή τους τερματικούς κόμβους που συμμετέχουν σε αυτή, και από τις *συνδέσεις* στρώματος μεταφοράς δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των πρώτων. Για την διατήρηση της επικοινωνίας στο στρώμα εφαρμογής είναι απαραίτητο να μην μεταβάλλεται η εικόνα που έχει αυτό για τη σύνοδο. Στην πράξη αυτό μεταφράζεται στην απαίτηση μη μεταβολή της ταυτοποίησης των άκρων της συνόδου, παρά το γεγονός ότι οι συνδέσεις μεταξύ τους μπορεί να αλλάζουν.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που λειτουργεί στο επίπεδο συνόδου αποτελεί το *Πρωτόκολλο Αρχικοποίησης Συνόδων* (*Session Initiation Protocol, SIP*) [30], [31] για υπηρεσίες πολυμέσων πραγματικού χρόνου. Το SIP πραγματοποιεί από τη μία ταυτοποίηση των άκρων με ένα μοναδικό αναγνωριστικό παγκόσμιας εμβέλειας και από την άλλη διαχειρίζεται τη απεγκατάσταση και εγκατάσταση συνδέσεων του στρώματος μεταφοράς, ανάλογα με τις μεταβολές της διεύθυνσης του κινητού σαν αποτέλεσμα της σύνδεσής του σε διάφορα δίκτυα. Το στρώμα μεταφοράς δεδομένων δεν θέτει κάποιο αυστηρό περιορισμό για την υποστήριξη κινητικότητας, δεδομένου ότι η ταυτοποίηση των άκρων⁸ κάθε σύνδεσης σε κάθε κόμβο εξαρτάται από τις ρυθμίσεις που επιλέγονται από το στρώμα συνόδου. Κατά συνέπεια εφόσον δεν προκαλείται αλλαγή των άκρων της συνόδου λόγω της διαπομπής, δεν τίθεται κάποιος περιορισμός στην λειτουργία ενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας στο στρώμα μεταφοράς δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υποστήριξης κινητικότητας σε αυτό το στρώμα αποτελεί το *Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης Ρεύματος* (*Stream Control Transmission Protocol, SCTP*) [32]-[35]. Σύμφωνα με αυτό, δύο συσχετισμένοι (συνδεδεμένοι) κόμβοι, μπορούν να επικοινωνούν εγκαθιστώντας δυναμικά συνδέσεις στρώματος μεταφοράς μεταξύ τους, κατ' απαίτηση και με βάση τη διαθεσιμότητα των προσφερόμενων από το στρώμα δικτύου υπηρεσιών. Στην περίπτωση που μία εγκατεστημένη σύνδεση καταλύεται λόγω μετακίνησης ενός κόμβου από ένα δίκτυο σε ένα άλλο, οι ακραίοι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να κατασκευής μία νέας, διαφανώς προς το στρώμα συνόδου, μέσω της οποίας μπορούν να συνεχίσουν να επικοινωνούν. Εντούτοις η τελευταία δυνατότητα δεν είναι διαθέσιμη στα ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα του στρώματος μεταφοράς δεδομένων. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του πρωτοκόλλου TCP, η μεταβολή της διεύθυνσης ενός κόμβου δεν είναι αποδεκτή για ενεργές συνδέσεις μεταξύ τερματικών κόμβων. Έτσι, στην περίπτωση αλλαγής της διεύθυνσης ενός κινητού κόμβου λόγω της διαπομπής του από ένα δίκτυο σε ένα άλλο, απαιτείται κατάλυση των υπάρχουσών συνδέσεων και την εγκατάσταση νέων από την αρχή. Η

⁸ Ως άκρα εννοούνται τα port numbers που χρησιμοποιούνται από τα πρωτόκολλα TCP, UDP και το νεότερο SCTP.

παρατήρηση αυτή θέτει πολύ σοβαρούς περιορισμούς στη λειτουργία των μηχανισμών υποστήριξης κινητικότητας τόσο του στρώματος δικτύου όσο και του στρώματος μεταφοράς δεδομένων.

Η εφαρμογή ενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας σε ένα σύστημα θα πρέπει να συνυπολογίζει όλες οι ιδιαιτερότητες της αρχιτεκτονικής του συστήματος και να εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες που έχει αυτό. Στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών, η διαχείριση κινητικότητας τερματικού προσεγγίζεται μέσω της συνδυασμένης, και κατά το δυνατό συγχρονισμένης, λειτουργίας δύο ανεξάρτητων υπο-μηχανισμών οι οποίοι εντοπίζονται στο στρώμα ζεύξης και το στρώμα δικτύου. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η μεν πρώτη αφορά στην διαχείριση κινητικότητας εντός ενός αυτόνομου φυσικού δικτύου πρόσβασης, μέσω του οποίου ο κάθε κόμβος αποκτά πρόσβαση στο υπόλοιπο Διαδίκτυο, ενώ η δεύτερη προσεγγίζει την κινητικότητα από τη σκοπιά του στρώματος δικτύου, ανεξάρτητα δηλαδή από το εκάστοτε δίκτυο στο οποίο ενδέχεται να συνδεθεί ένας κινητός κόμβος καθώς κινείται.

Στην πρώτη περίπτωση εκτελούνται οι διαδικασίες που απαιτούνται για τη διαπομπή ενός κινητού τερματικού μεταξύ δύο σταθμών βάσης. Το αποτέλεσμα είναι η εγκατάσταση μία νέας σύνδεσης στρώματος ζεύξης δεδομένων για την περαιτέρω επικοινωνία του τερματικού με το δίκτυο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προσέγγισης αποτελεί το σύστημα UMTS, με έμφαση στην περιοχή μεταγωγής πακέτου και την λειτουργία της υπηρεσίας GPRS⁹ [36]. Με βάση αυτή, το σύστημα αντιμετωπίζεται σαν ένα δίκτυο επιπέδου 2 προς τα εξωτερικά δίκτυα, και το Διαδίκτυο. Οι κινητοί χρήστες διαπέμπονται μεταξύ των σημείων πρόσβασης κάνοντας χρήση ενός προηγμένου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας ο οποίος λειτουργεί κατανεμημένα στο τερματικό, στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού. Ο μηχανισμός ανήκει αποκλειστικά στο στρώμα ζεύξης δεδομένων και δεν επηρεάζει καθόλου την επικοινωνία στο στρώμα δικτύου με αναφορά στο πρότυπο OSI. Για την υποστήριξη των διαδικασιών προώθησης των πακέτων κίνησης από και προς τα κινητά τερματικά εντούτοις, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μίας διαπομπής, έχει αναπτυχθεί ένας ξεχωριστός μηχανισμός ο οποίος δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών (ταχέων και χωρίς απώλεια πακέτων) ανάλογα με το είδος των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Παρόμοια αρχιτεκτονική, με λιγότερες δυνατότητες εντούτοις, έχει υιοθετηθεί και στα ασύρματα συστήματα τοπικής αλλά και ευρείας περιοχής, τα οποία βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.11 [37] και IEEE 802.16 [38]. Σύμφωνα με αυτά, οι κινητοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να *συσχετίζονται* με έναν σταθμό βάσης, υπό την έννοια ότι συντονίζουν τους πομποδέκτες τους σε μία συγκεκριμένη μπάντα και ανταλλάσσουν πληροφορίες με τους σταθμούς βάσης, ώστε να είναι εφικτή η εγκατάσταση συνδέσεων στρώματος ζεύξης με αυτούς. Επιπρόσθετα, εφόσον δεν ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας, έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν σταθμούς βάσης. Η διαδικασία αλλαγής σταθμού βάσης σκανδαλίζεται από διεργασίες που παρακολουθούν την ποιότητα της ζεύξης που έχει ο κάθε σταθμός βάσης με το εκάστοτε τερματικό. Αν και η βασική έκδοση των προτύπων δεν προβλέπει την εφαρμογή κάποιου προηγμένου αλγορίθμου μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επιλογή του σταθμού βάσης, στις μέρες αναπτύσσονται

⁹ Συνοπτική περιγραφή της λειτουργία των μηχανισμών κινητικότητας του UMTS, παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

μηχανισμοί με τη μορφή αυτόνομων πρωτοκόλλων, όπως το Πρωτόκολλο Διασυνεργασίας μεταξύ Σταθμών Πρόσβασης (Inter-Access Point Protocol, IAPP) [39], οι οποίοι εκτελούνται κατανεμημένα στο κινητό και τους σταθμούς βάσης για αυτό το σκοπό. Σύμφωνα με το IAPP, οι σταθμοί βάσης συμμετέχουν ενεργά στη διαδικασία διαχείρισης της διαπομπής του κινητού, με στόχο την καλύτερη οργάνωση και συγχρονισμό των διαδικασιών που πρέπει να εκτελεστούν (πχ. αύξηση της ταχύτητας εκτέλεσης της διαπομπής, προσωρινή αποθήκευση κίνησης σε κόμβους του δικτύου υποδομής ή/και σταθμούς βάσης) και επιπλέον τη μείωση της επίδρασης που μπορεί να έχει μία διαπομπή στην ποιότητα της εκτελούμενης υπηρεσίας.

Το δεύτερο επίπεδο, που αντιμετωπίζει την κινητικότητα από τη σκοπιά του δικτύου, προσφέρει τη δυνατότητα σε κινητά τερματικά, εφόσον αποκτήσουν πρόσβαση σε ένα ασύρματο δίκτυο, να αποκαταστήσουν την επικοινωνία τους στο στρώμα δικτύου. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Διαδικτύου, η διαπομπή έχει παγκόσμια εμβέλεια και μπορεί να υποστηριχθεί, υπό τις συνθήκες που αναλύονται παρακάτω, από οποιαδήποτε σύστημα βασίζεται στο IP. Η βασική λειτουργία του *Πρωτοκόλλου Κινητού Διαδικτύου (Mobile IP, MIP)* [43]-[44], δίνει τη δυνατότητα σε έναν κόμβο να είναι «προσβάσιμος» σε παγκόσμιο επίπεδο, ανεξάρτητα από το φυσικό δίκτυο στο οποίο συνδέεται, εφόσον δεν πραγματοποιείται καμία υπόθεση για το υποκείμενο αλλά ανεξάρτητο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Η λειτουργία του MIP απαιτεί την επικοινωνία του τερματικού με τους κόμβους που υποστηρίζουν τη διαπομπή του μόνο στο επίπεδο δικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύσσονται προηγμένοι μηχανισμοί οι οποίοι πραγματοποιούν χρήση ενδείξεων αναφορικά με την ποιότητα των εγκατεστημένων ζεύξεων και την πρόοδο των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο στρώμα ζεύξης. Βασικός στόχος είναι ο καλύτερος συγχρονισμός των διαδικασιών και η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης λόγω της διαπομπής. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, οι συγκεκριμένες ενδείξεις και πληροφορίες δεν αφορούν μόνο την εικόνα που έχει ένας κόμβος για την ποιότητα των εγκατεστημένων ζεύξεων του, αλλά παρέχεται η δυνατότητα εκτέλεσης κατανεμημένου ελέγχου των σχετικών διαδικασιών από το δίκτυο μέσω ενός κατάλληλου γι' αυτό το σκοπό πρωτοκόλλου. Στις μέρες μας, η προδιαγραφή του παραπάνω μηχανισμού, που περιγράφεται στην ενότητα 2.3.2, αποτελεί αντικείμενο της ομάδας IEEE 802.21 [40]. Η ομάδα ασχολείται με την ανάπτυξη προτύπων για παροχή υπηρεσιών που θα καταστήσουν δυνατή την εκτέλεση διαπομπών κινητών χρηστών και την διασυνεργασία μεταξύ ομοιογενών ή ετερογενών συστημάτων που προέρχονται ή όχι από την οικογένεια των συστημάτων IEEE 802 [41].

2.2.2.1 Επιθυμητά χαρακτηριστικά μηχανισμών διαχείρισης διαπομπών

Αξιοπιστία: Η αξιοπιστία ενός μηχανισμού διαχείρισης μίας διαπομπής εκφράζεται από το αποτέλεσμα της διαπομπής. Εν γένει ένας μηχανισμός υποστήριξης διαπομπών θα πρέπει να παρέχει τουλάχιστο τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να συνεχίζουν να λαμβάνουν το ίδιο σύνολο υπηρεσιών αφότου έχει ολοκληρωθεί η διαπομπή, χωρίς καμία επίδραση στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών ή τη σταθερότητα του δικτύου. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ποιότητα των προσφερομένων υπηρεσιών και η σταθερότητα στο νέο δίκτυο εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δικτυακών πόρων στο ασύρματο μέσο. Αυτό σημαίνει ότι για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας του μηχανισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράμετροι όπως ο

σηματοθορυβικός λόγος, ο λόγος σήματος προς παρεμβολές, το επίπεδο ισχύος των λαμβανόμενων ηλεκτρομαγνητικών σημάτων ή ο ρυθμός λαθών.

Δυνατότητα Εκτέλεσης Απρόσκοπτων Διαπομπών: Ένας αλγόριθμος ελέγχου μίας διαπομπής θα πρέπει αφενός να υποστηρίζει την ταχύτατη εκτέλεση των απαραίτητων διαδικασιών κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής και αφετέρου να εξασφαλίζει ότι η εκτέλεση της διαπομπής δεν θα έχει καθόλου ή θα έχει ελάχιστη επίδραση στην ποιότητα των ήδη εκτελούμενων υπηρεσιών στην πλευρά του τερματικού.

Εξισορρόπηση Φορτίου Δικτύου: Εν γένει ένας μηχανισμός ελέγχου και υποστήριξης διαπομπών θα πρέπει να έχει την ευφυΐα ώστε να επιτυγχάνει καταμερισμό του συνολικού φορτίου που αντιστοιχεί στην περιοχή κάλυψης μίας ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής με ομοιόμορφο τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η πιθανότητα απόρριψης κλήσεων αμέσως μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής, σαν αποτέλεσμα της έλλειψης δικτυακών πόρων στην περιοχή προς την οποία προορίζεται ο κινητός κόμβος.

Βελτιστοποίηση Διαδικασίας Απόφασης Εκτέλεσης Διαπομπής – Ελαχιστοποίηση Πλήθους Εκτελούμενων Διαπομπών: Ο αριθμός των εκτελούμενων διαπομπών στη μονάδα του χρόνου θα πρέπει να ελαχιστοποιείται. Η αύξηση του συγκεκριμένου αριθμού (ανεξάρτητα από το αν η διαπομπή είναι οριζόντια ή κατακόρυφη), έχει σαν αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση των απαιτήσεων σε επεξεργαστική ισχύ, που με τη σειρά της οδηγεί σε χειροτέρευση της ποιότητας υπηρεσίας για τον τελικό χρήστη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που επιχειρείται η εκτέλεση πολλών διαπομπών σε μικρό χρονικό διάστημα από ένα κινητό τερματικό, αυξάνει η πιθανότητα συγκρούσεων στο στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο φυσικό μέσο και κατά συνέπεια αυξάνει και ο ρυθμός απόρριψης εισερχομένων από διαπεμπόμενους χρήστες κλήσεων. Αντίστοιχα αυξάνει και το φορτίο σηματοδοσίας επιβαρύνοντας όχι μόνο τον κινητό χρήστη αλλά και το δίκτυο γενικότερα σαν αποτέλεσμα των άσκοπων (αχρείαστων) μετακινήσεων του πρώτου μεταξύ των διαφόρων περιοχών κάλυψης.

Εν γένει η απόφαση για την εκτέλεση οριζοντίων διαπομπών εξαρτάται από την ποιότητα των λαμβανόμενων σημάτων και για την πλειονότητα των συστημάτων σήμερα (με την εξαίρεση των συστημάτων κινητών επικοινωνιών) από το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος στους δέκτες. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ένδειξη χαμηλού λαμβανόμενου σήματος από ένα σταθμό βάσης με ταυτόχρονη ένδειξη για σήμα υψηλότερης ισχύος από ένα γειτονικό είναι επαρκείς ώστε να δικαιολογήσει την άμεση εκτέλεση μίας διαπομπής (δεδομένου ότι ικανοποιούνται επίσης κάποια ποσοτικά κριτήρια). Από την άλλη στην περίπτωση των κατακόρυφων διαπομπών είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθούν πολλά περισσότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως επιπλέον χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας (ρυθμός μετάδοσης, ρυθμός λαθών μετάδοσης), κόστος υπηρεσίας, ασφάλεια, ταχύτητα κινητού κόμβου (μείωση ρυθμού εκτέλεσης διαπομπών).

2.2.3 Ορολογία

Στη συνέχεια δίδονται οι ορισμοί μερικών πολύ σημαντικών εννοιών που αφορούν τους διάφορους τύπους διαπομπών, έχουν επικρατήσει στη διεθνή βιβλιογραφία [42] και χρησιμοποιούνται εκτενώς στα πλαίσια της διατριβής:

- *Διαπομπή (Handover)*: Διαδικασία μέσω της οποίας ένα κινητό τερματικό με ενεργές συνδέσεις (δηλ. συνδέσεις μέσω των οποίων μεταφέρονται δεδομένα), είναι σε θέση να αλλάξει το σημείο πρόσδεσής του στο δίκτυο χωρίς αυτό απαραίτητα να απαιτεί την αρχικοποίηση των εκτελούμενων εφαρμογών στην πλευρά του κινητού.
- *Περιοδική (Roaming)*: Πρόκειται για την περιγραφή των συμβάσεων μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών των δικτύων σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να καταστεί εφικτή η πρόσδεση ενός τερματικού στα διάφορα δίκτυα εξαιτίας της κινητικότητάς του. Οι συμβάσεις περιοδικής χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση των διαπομπών για τη ρύθμιση των απαραίτητων παραμέτρων για την πρόσδεση του τερματικού.
- *Διαπομπή Στρώματος Ζεύξης – Στρώματος 2 (Link Layer Handover – Layer 2)*: Διαδικασία μέσω της οποίας το τερματικό αποκαθιστά την επικοινωνία του στο φυσικό υποδίκτυο στο οποίο ανήκει πράγμα το οποίο αφορά κατά βάση το στρώμα ζεύξης δεδομένων. Η διαπομπή στην ουσία προκαλεί αλλαγή του χρησιμοποιούμενου από το τερματικό σημείο πρόσβασης και απαιτεί τον επανασυσχετισμό του τερματικού με ένα σημείο πρόσβασης ενός νέου φυσικού υποδικτύου.
- *Διαπομπή Στρώματος Δικτύου – Στρώματος 3 (Network Layer Handover)*: Διαδικασία μέσω της οποίας το τερματικό αποκαθιστά την επικοινωνία του στο στρώμα δικτύου λόγω αλλαγής του αυτόνομου συστήματος, και κατ' επέκταση της IP διεύθυνσης, που έχει ανατεθεί στο τερματικό.
- *Διαπομπή Ίδιας Τεχνολογίας (Intra-Technology Handover)*: Διαπομπή μεταξύ συστημάτων που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία/πρότυπο ασύρματης δικτύωσης πχ. WLAN προς WLAN ή UMTS προς UMTS
- *Διαπομπή Διαφορετικής Τεχνολογίας (Inter-Technology Handover)*: Διαπομπή μεταξύ συστημάτων διαφορετικής τεχνολογίας ασύρματης δικτύωσης πχ. WLAN προς UMTS.
- *Οριζόντια Διαπομπή (Horizontal Handover)*: Διαπομπή Ίδιας Τεχνολογίας
- *Κατακόρυφη Διαπομπή (Vertical Handover)*: Διαπομπή Διαφορετικής Τεχνολογίας
- *Οξεία Διαπομπή (Hard Handover)*: Αφορά κυρίως διαπομπή στρώματος ζεύξης κατά την οποία πρώτα καταλύεται η σύνδεση με το τρέχοντα σταθμό βάσης και στην συνέχεια εγκαθίσταται η σύνδεση με το νέο σταθμό βάσης.
- *Αμβλεία Διαπομπή (Soft Handover)*: Αφορά κυρίως διαπομπή στρώματος ζεύξης κατά την οποία η τεχνολογία επιτρέπει στο τερματικό να έχει εγκατεστημένες συνδέσεις με τον τρέχοντα και το νέο σταθμό βάσης ταυτόχρονα. Η νέα σύνδεση εγκαθίσταται πριν την κατάλυση της τρέχουσας.
- *Προ-δραστική Διαπομπή (Predictive Handover)*: Αφορά κυρίως διαπομπές στρώματος δικτύου κατά της οποίες σημαντικό μέρος των διαδικασιών πραγματοποιούνται πριν την αποσύνδεση του τερματικού από το παλαιό.
- *Μετα-δραστική Διαπομπή (Reactive Handover)*: Διαπομπή κατά την οποία όλες οι απαιτούμενες διαδικασίες πραγματοποιούνται μετά την παγίωση της σύνδεσής του στο νέο δίκτυο.

- *Ταχεία Διαπομπή (Fast Handover)*: Διαπομπή κατά την οποία κύριο μέλημα είναι η ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο ο τερματικός κόμβος δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί από τη νέα θέση του.
- *Διαπομπή Χωρίς Απώλειες (Lossless Handover)*: Διαπομπή κατά την οποία κύριο μέλημα αποτελεί η ελαχιστοποίηση ή ο εκμηδενισμός της απώλειας πακέτων που προκαλείται από την αλλαγή του σημείου πρόσβασης του τερματικού.
- *Απρόσκοπτη Διαπομπή (Seamless Handover)*: Ταχεία και χωρίς απώλειες διαπομπή. Στις μέρες μας ο όρος απρόσκοπτη διαπομπή είναι μάλλον συγκεχυμένος υπό την έννοια ότι δεν υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές σύμφωνα με τις οποίες μία διαπομπή να θεωρείται απρόσκοπτη. Στην πράξη ο όρος απρόσκοπτη διαπομπή μπορεί να οριστεί με βάση το είδος ή τον τύπο της προσφερόμενης υπηρεσίας κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής και την εικόνα που έχει ο χρήστης για την ποιότητα στην οποία αυτή προσφέρεται. Υπό αυτή την έννοια μία διαπομπή χαρακτηρίζεται ως απρόσκοπτη όταν ο χρήστης δεν αντιλαμβάνεται, μέσω της εκτελούμενης υπηρεσίας στο τερματικό του, ότι έχει λάβει χώρα. Πιο συγκεκριμένα, μία διαπομπή υπηρεσίας τηλεφωνίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως απρόσκοπτη εφόσον είναι αρκετά ταχεία ώστε τα πακέτα φωνής να μην καθυστερούν περισσότερο από το επιτρεπτό με βάση τις προδιαγραφές ποιότητας της υπηρεσίας (δηλ. της τάξης των 100 msec). Αντίστοιχα για μία υπηρεσία πλοήγησης σε σελίδες του Διαδικτύου, η εκτέλεση μίας απρόσκοπτης διαπομπής θα επέβαλε τον εκμηδενισμό της απώλειας ενώ μία μικρή καθυστέρηση μπορεί να είναι ανεκτή.

2.3 Διαχείριση Κινητικότητας στο Διαδίκτυο

2.3.1 Το Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου – Mobile IP

Κάθε κόμβος στο Διαδίκτυο, για να επικοινωνήσει με έναν άλλο, υποχρεωτικά θα πρέπει να χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αναγνωριστικό το οποίο να τον ταυτοποιεί στο δίκτυο των ενδιάμεσων κόμβων που τους συνδέει. Η χρήση του συγκεκριμένου αναγνωριστικού επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα δρομολόγησης των πακέτων προς την τρέχουσα θέση του. Το συγκεκριμένο αναγνωριστικό χρησιμοποιείται ως διεύθυνση του στρώματος δικτύου (IP διεύθυνση). Από την άλλη, όπως προαναφέρθηκε η λειτουργία των μηχανισμών του στρώματος μεταφοράς δεδομένων, κι ιδίως αυτών που παρέχουν εγγυημένη μεταφορά δεδομένων όπως το TCP, προϋποθέτει ότι η χρησιμοποιούμενη IP διεύθυνση δεν μεταβάλλεται καθ' όλη τη διάρκεια της εγκατεστημένης (TCP) από άκρο σε άκρο σύνδεσης. Επιπλέον δεν υποστηρίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις η (επαν-)αρχικοποίηση των συγκεκριμένων συνδέσεων κατά τη διάρκεια της ζωής τους (δηλ. οι TCP συνδέσεις δεν είναι IP address unaware). Ως εκ τούτου, στην περίπτωση αλλαγής της διεύθυνσης προκαλείται διακοπή της σύνδεσης, και προφανώς της συνόδου που βρίσκεται σε εξέλιξη. Εντούτοις, στην περίπτωση κατά την οποία ένας τερματικός κόμβος κινείται και διαπέμπεται μεταξύ διαφορετικών δικτύων, η αλλαγή της διεύθυνσης στρώματος δικτύου είναι αναπόφευκτη εφόσον μόνο με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η δρομολόγηση των πακέτων από και προς τον τερματικό κόμβο. Για τη διατήρηση της

επικοινωνίας συνεπώς απαιτείται η εγκατάσταση μίας νέας σύνδεσης στρώματος μεταφοράς δεδομένων στην οποία θα χρησιμοποιείται η νέα διεύθυνση. Στη γενική περίπτωση, η επανεκκίνηση της εφαρμογής από το σημείο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η διακοπή δεν είναι εφικτή, δεδομένου ότι η πληροφορία παράδοσης των πακέτων κρατείται εσωτερικά στο στρώμα μεταφοράς και αφορά την εκάστοτε σύνδεση κι όχι την χρήση της τελευταίας από τα παραπάνω επίπεδα. Έτσι για παράδειγμα σε μία εφαρμογή μεταφοράς αρχείου θα απαιτούνταν η μεταφορά του αρχείου από την αρχή και η απόρριψη του μέρους του το οποίο έχει ήδη παραδοθεί. Αντίστοιχα για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου θα απαιτούνταν αφενός η ανάπτυξη ενός μηχανισμού που να πραγματοποιεί δυναμική διαχείριση των συνδέσεων κι αφ' ετέρου θα απαιτούνταν η ανταλλαγή σηματοδosis για την εγκατάσταση την ενημέρωση των συμμετεχόντων στη σύνδεση για την αλλαγή των παραμέτρων της. Αυτό σημαίνει αύξησης της πολυπλοκότητας, του φορτίου σηματοδosis, και απώλεια πακέτων κατά τη διάρκεια της περιόδου κατά την οποία ανταλλάσσονται τα μηνύματα.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αποτέλεσαν εφελκτήριο για την προδιαγραφή ενός μηχανισμού υποστήριξης κινητικότητας στο επίπεδο δικτύου, ο οποίος θα δίνει την δυνατότητα εκτέλεσης διαφανών διαπομπών πάνω από το στρώμα δικτύου. Η ανάπτυξη του *Πρωτοκόλλου Διαδικτύου για Κινητούς Χρήστες* ή αλλιώς του *Κινητού Πρωτοκόλλου Διαδικτύου* (Mobile IP, MIP) [43], [44] από τον οργανισμό IETF, έδωσε τη δυνατότητα σε κινητούς χρήστες να εκτελούν διαπομπές μεταξύ δικτύων, και να διατηρούν την επικοινωνία με τους τερματικούς κόμβους. Οι σχεδιαστικοί στόχοι που κάλυψε το πρωτόκολλο MIP, είναι:

1. Υποστηρίζει *Κινητικότητα Τερματικού* στο στρώμα δικτύου· δεν υπάρχει περιορισμός αναφορικά με την κινητικότητα των τερματικών, των υπηρεσιών ή των προσωπικών επιλογών παρουσίασης πληροφορίας που θέτουν οι χρήστες. Η συμμόρφωση με τη συγκεκριμένη απαίτηση δίνει τη δυνατότητα σε κινητούς χρήστες να απολαμβάνουν το σύνολο των υπηρεσιών που επιθυμούν ανεξάρτητα από τη θέση τους, τα δίκτυα στα οποία αποκτούν πρόσβαση και τις συσκευές που χρησιμοποιούν για την πρόσβασης στις υπηρεσίες καθ' αυτές. Για την υποστήριξη της κινητικότητας υπηρεσιών και την προσωποποιημένη κινητικότητα, δεν τίθεται κάποιος ιδιαίτερος περιορισμός, δεδομένου ότι η για την υποστήριξή τους απαιτείται η λειτουργία ενός μηχανισμού προσαρμογής σε κάποιο ανώτερο επίπεδο από αυτό στο οποίο λειτουργεί το πρωτόκολλο MIP.
2. Υποστηρίζεται η διαπομπή και η περιαγωγή (roaming) των κινητών τερματικών σε παγκόσμιο επίπεδο ανεξάρτητα από την υποκείμενη ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την πρόσβαση στα δίκτυα κορμού. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχουν συμβάσεις περιαγωγής μεταξύ του τερματικού και του νέου δικτύου στο οποίο αυτό εισέρχεται, ώστε να είναι επιτρεπτή η πρόσδεσή του σε αυτό. Κατά τη διαπομπή οι σύνοδοι δεν διακόπτονται και το κινητό είναι σε θέση, έστω και μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος να συνεχίσει να επικοινωνεί όπως και πριν τη διαπομπή. Ο μηχανισμός δηλαδή δίνει στο τερματικό τη δυνατότητα αποκατάστασης της επικοινωνίας στο στρώμα δικτύου όπως ακριβώς ισχύει και για την περίπτωση που ο κόμβος ήταν σταθερά συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο.

3. Υποστηρίζονται όλων των ειδών οι υπηρεσίες ανεξάρτητα από το αν είναι πραγματικού χρόνου ή όχι. Ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας να προσφέρει τη δυνατότητα διασυνεργασίας με άλλους μηχανισμούς που διαχειρίζονται λειτουργίες διαχείρισης ποιότητας υπηρεσίας και ασφάλειας που επίσης θα πρέπει να συμμετέχουν στην διαδικασία επανεγκατάστασης της επικοινωνίας κατά τη διάρκεια της διαπομπής.
4. Υποστηρίζονται διαφανώς οι λειτουργίες του στρώματος μεταφοράς, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο διαφανή εκτέλεση και προς τα ανώτερα στρώματα (δηλ. συνόδου, παρουσίασης, εφαρμογής)
5. Δεν υπάρχει περιορισμός αναφορικά με τον αριθμό των χρηστών που συμμετέχουν σε μία σύνοδο. Με άλλα λόγια υποστηρίζονται τόσο σύνοδοι δύο μερών (unicast) όσο και σύνοδοι πολυεκπομπής (multicast) και καθολικής εκπομπής (broadcast).
6. Η υποστήριξη κινητικότητας ενός κινητού κόμβου δε θέτει επιπλέον απαιτήσεις στη λειτουργία των κόμβων με τους οποίους επικοινωνεί. Αυτό σημαίνει ότι ένας κινητός κόμβος θα πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνεί με το σύνολο των κόμβων του Διαδικτύου όπως ακριβώς και οι σταθεροί κόμβοι.

Η σχεδίαση του μηχανισμού που υλοποιεί το πρωτόκολλο Mobile IP, στηρίχθηκε σε δύο βασικές αρχές. Αυτές είναι: (α) αποσυσχετίζεται η έννοια της ταυτοποίησης του τερματικού κόμβου από αυτήν της θέσης του στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές διευθύνσεις/αναγνωριστικά αντίστοιχα. Η πρώτη είναι μόνιμη και ταυτοποιεί τον κόμβο σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους στο Διαδίκτυο. Η δεύτερη είναι προσωρινή και ταυτοποιεί την ακριβή (τρέχουσα) θέση του κόμβου στο Διαδίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο η παράδοση των πακέτων στην τρέχουσα θέση γίνεται με χρήση της δεύτερης διεύθυνσης ενώ για την υποστήριξη των διαφανών διαπομπών προς τα ανώτερα στρώματα χρησιμοποιείται η πρώτη. (β) Ένας κινητός κόμβος θα μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε κόμβο στο Διαδίκτυο εφόσον ενημερώνει έναν σταθερό (γνωστό εκ των προτέρων) κόμβο *Αντιπρόσωπο* (Agent), ο οποίος παρέχει στο κινητό την υπηρεσία Κινητικότητας IP, αναφορικά με την τρέχουσα διεύθυνσή του. Με αυτόν τον τρόπο απαλείφεται η ανάγκη εγκατάστασης ειδικών εγγραφών για κάθε κινητό κόμβο στους δρομολογητές του δικτύου που τον συνδέουν με οποιοδήποτε άλλο κόμβο του Διαδικτύου ενώ πλέον ο *Αντιπρόσωπος* είναι υποχρεωμένος να δρομολογεί τα πακέτα της κίνησης που προορίζονται προς τον κινητό κόμβο προς την τρέχουσα θέση του.

Βασικό σημείο στην αρχιτεκτονική που εισάγει το MIP είναι ο ορισμός των εννοιών *Οικείο* (Home Network) και *Ξένο/Επισκεπτόμενο* Δίκτυο (Foreign/Visited Network). Με βάση αυτόν κάθε κόμβος ο οποίος επιθυμεί την υποστήριξη της κινητικότητάς του με χρήση του MIP σε παγκόσμιο επίπεδο, θα πρέπει να είναι συμβεβλημένος με ένα δίκτυο, το *Οικείο*, το οποίο παρέχει την υπηρεσία κινητικότητας. Σαν αποτέλεσμα της κινητικότητάς του, ο κόμβος μπορεί (εφόσον δεν υπάρχουν θέματα συμβάσεων μεταξύ των λειτουργιών των δικτύων) να συνδεθεί σε ένα οποιοδήποτε άλλο δίκτυο, το *Ξένο*, το οποίο του παρέχει τη δυνατότητα *πρόσβασης* πλέον στο παγκόσμιο Διαδίκτυο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συμβάσεις περιαγωγής πραγματοποιούνται μεταξύ του τερματικού και του Οικείου Δικτύου σαν μέρος της προσφερόμενης υπηρεσίας κινητικότητας.

Στην αρχιτεκτονική του MIP θεωρείται η λειτουργία ειδικών κόμβων, των λεγόμενων *Αντιπροσώπων Κινητικότητας (Mobility Agents)*, οι οποίοι είναι επιφορτισμένοι με λειτουργίες υποστήριξης/διαχείρισης κινητικότητας τερματικών. Για αυτό το σκοπό ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης με τα τελευταία. Στην περίπτωση που ο *Αντιπρόσωπος* βρίσκεται στο *Οικείο Δίκτυο* ονομάζεται *Οικείος Αντιπρόσωπος (Home Agent, HA)*. Για την περίπτωση των συστημάτων που βασίζονται στην έκδοση 4 του πρωτοκόλλου IP, προβλέπεται η λειτουργία *Αντιπροσώπων* στα *Ξένα Δίκτυα*, που ονομάζονται *Ξένοι Αντιπρόσωποι (Foreign Agent, FA)*. Στην πράξη οι *Αντιπρόσωποι Κινητικότητας* είναι δρομολογητές κοινού τύπου, στους οποίους καταλήγουν τα πακέτα που προέρχονται ή καταλήγουν από ή σε κινητούς χρήστες αντίστοιχα. Επιπλέον είναι επιφορτισμένοι να επεξεργάζονται αιτήσεις εγγραφής ή ανανέωσης που αποστέλλουν οι κινητοί χρήστες, σχετικά με τη θέση τους.

Όπως προαναφέρθηκε, στο πλαίσιο του MIP θεωρείται η συνδυασμένη χρήση δύο διαφορετικών διευθύνσεων από κάθε τερματικό. Αυτές είναι η *Οικεία Διεύθυνση (Home Address, HoA)* και η *Προσωρινή Διεύθυνση (Care-of Address, CoA)*. Η πρώτη χρησιμοποιείται για την καθολική ταυτοποίηση του κινητού χρήστη σε όλη την έκταση του Διαδικτύου (σαν να ήταν ακίνητος), παραμένει σταθερή και είναι αυτή που χρησιμοποιείται από το στρώμα μεταφοράς δεδομένων του *Κινητού Κόμβου (Mobile Node, MN)* για την εγκατάσταση συνόδων με τερματικούς κόμβους με τους οποίους αυτός επικοινωνεί. Η HoA αντιστοιχεί σε κάποιο υποδίκτυο στο οποίο είναι φυσικά προσαρτημένος ο κόμβος HA. Αυτό σημαίνει ότι ο HA θα παρεμβάλλεται στην παράδοση ενός πακέτου προς το MN, που έχει σαν διεύθυνση προορισμού την HoA. Η CoA χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση των πακέτων του MN από και προς το επισκεπτόμενο δίκτυο.

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου MIP προβλέπει ότι κάθε *Κόμβος Ανταποκριτής (Correspondent Node, CN)* με τον οποίο επικοινωνεί ο MN, θεωρεί στο στρώμα εφαρμογής ότι ο τελευταίος βρίσκεται στο *Οικείο* του *Δίκτυο*. Σαν αποτέλεσμα όλα τα πακέτα που αναχωρούν από τον CN να χρησιμοποιούν την HoA στο πεδίο 'διεύθυνση προορισμού'. Στην περίπτωση που το κινητό βρίσκεται στο *Οικείο Δίκτυο*, ο μηχανισμός υποστήριξης της κινητικότητας δεν ενεργοποιείται εφόσον η χρήση της HoA και της διεύθυνσης του CN είναι αρκετή για την επικοινωνία μεταξύ τους. Όταν το MN συνδεθεί σε ένα διαφορετικό δίκτυο (*Επισκεπτόμενο*), υποχρέωση του *Οικείου Δικτύου*, που προσφέρει την υπηρεσία κινητικότητας, είναι η προώθηση των πακέτων που προορίζονται για το συγκεκριμένο MN, προς την τρέχουσα θέση που αυτό έχει. Η προώθηση πραγματοποιείται με χρήση του γενικού μηχανισμού Διαδικτύου για την ενθυλάκωση πακέτων (IP packet encapsulation) [45], [46], [47] και πραγματοποιείται από τον HA. Η λειτουργία του μηχανισμού ενθυλάκωσης έχει σαν αποτέλεσμα την εγκατάσταση μίας *Διόδου Επικοινωνίας Επιπέδου IP* ή απλά *Διόδου IP*¹⁰ (IP tunnel), τα άκρα της οποίας είναι η διεύθυνση του HA και η τρέχουσα CoA του MN. Η χρήση της διόδου επιτρέπει στον HA να ενθυλακώνει τα πακέτα που περνούν από αυτόν κι έχουν σαν διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση HoA, σε πακέτα που προορίζονται προς την τρέχουσα CoA του MN. Τα αφικνούμενα στο *Ξένο Δίκτυο* ενθυλακωμένα

¹⁰ Οι μηχανισμοί ενθυλάκωσης επιτυγχάνουν την προώθηση ενός ρεύματος κίνησης από ένα σημείο του δικτύου σε ένα άλλο, δηλ. μεταξύ των *Άκρων της Διόδου IP*. Η προώθηση πραγματοποιείται ενθυλακώνοντας τα πακέτα της αρχικής ροής σε πακέτα που έχουν διεύθυνση αποστολέα και προορισμού τις διευθύνσεις των *Άκρων της Διόδου* (δηλ. προσθέτοντας σε αυτά μία επιπρόσθετη επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου IP και θέτοντας ως φορτίο του νέου datagram το αρχικό datagram).

πακέτα, αποθυλακώνονται (από το κινητό ή τον FA, βλέπε στις ενότητες που ακολουθούν) με χρήση της αντίστροφης διαδικασίας, οπότε και ανακτώνται τα γνήσια πακέτα που εστάλησαν από τον CN. Τα πακέτα αυτά παραδίδονται στο στρώμα μεταφοράς ακριβώς όπως συμβαίνει στην περίπτωση που το MN είναι συνδεδεμένο στο *Οικείο Δίκτυο* ή στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται το MIP. Για την αποστολή ενός πακέτου από ένα κινητό που βρίσκεται σε ένα *Ξένο Δίκτυο* προς έναν οποιοδήποτε κόμβο στο διαδίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η HoA σαν διεύθυνση αποστολέα, οπότε τα πακέτα δρομολογούνται απ' ευθείας από τη την τρέχουσα θέση του MN προς τον εκάστοτε CN. Εντούτοις για λόγους ασφαλείας, οι περισσότεροι δρομολογητές πύλης (gateway routers), δεν επιτρέπουν τη δρομολόγηση εκτός του δικτύου, πακέτων των οποίων η διεύθυνση αποστολέα δεν ανήκει στο εύρος διευθύνσεων που αντιστοιχεί σε ένα δίκτυο (Μηχανισμοί Ingress Filtering), πράγμα το οποίο ισχύει στην τελευταία περίπτωση. Για το λόγο αυτό το πρωτόκολλο MIP προβλέπει ότι ένα MN μπορεί να επικοινωνεί με τους CN μέσω του *Οικείου Αντιπροσώπου* του, χρησιμοποιώντας γι αυτό το σκοπό έναν αντίστοιχο μηχανισμό *Αντίστροφης Διόδευσης (Reverse Tunneling)* των εξερχόμενων από το ίδιο πακέτων, δηλαδή πραγματοποιώντας την αντίστροφη διαδικασία που περιγράφηκε νωρίτερα. Στην πράξη η επικοινωνία μεταξύ MN και HA πραγματοποιείται με την εγκατάσταση μίας επονομαζόμενης *Αμφίδρομης Διόδου (Bi-directional Tunnel)* η οποία ουσιαστικά κατασκευάζεται από την συνδυασμένη λειτουργία των δύο παραπάνω *μονόδρομων* διόδων.

Ο σχεδιασμός του πρωτοκόλλου Mobile IP είναι αρκετά γενικός και αυτόνομος, ούτως ώστε να μην θέτει κανένα περιορισμό αναφορικά με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται από το υποκείμενο στρώμα δικτύου για την εγκατάσταση συνδέσεων του κινητού με το δίκτυο. Για παράδειγμα ο μηχανισμός θα χρησιμοποιηθεί ακόμη και στην περίπτωση που το καλώδιο μέσω του οποίου συνδέεται ένας σταθερός κόμβος σε ένα δίκτυο μετακινηθεί σε μία διαφορετική υποδοχή. Η επιλογή αυτή αν και προσφέρει το πολύ θετικό πλεονέκτημα ότι το πρωτόκολλο και τα οφέλη του μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς περιορισμό για την υποστήριξη της κινητικότητας, έχει το αρνητικό ότι από τη μία δεν υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που μπορεί να έχει κάθε ασύρματη τεχνολογία αναφορικά με την εκτέλεση διαπομπών. Επιπλέον συγκεντρώνει όλη την απαιτούμενη λειτουργικότητα κι ευφυΐα αναφορικά με την εκτέλεση των διαπομπών, σε πληροφορία που συγκεντρώνεται και διαχειρίζεται αποκλειστικά στο στρώμα δικτύου.

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου MIP βασίζεται στη εκτέλεση ξεχωριστών διαδικασιών της στοίβας TCP/IP, που έχουν σαν στόχο στη σταδιακή συγκέντρωση πληροφοριών αναφορικά με την πρόοδο των διαπομπών στρώματος δικτύου. Οι διαδικασίες αυτές είναι:

- *Επισήμανση Μετακίνησης (Movement Detection)* και *Αναζήτηση Δρομολογητών/Αντιπροσώπων (Router/ Mobility Agent Discovery)*· κατά τη φάση αυτή εκτελούνται οι διαδικασίες μέσω των οποίων ένας κινητός κόμβος επιβεβαιώνει ότι έχει εκτελέσει μία διαπομπή στρώματος δικτύου και έρχεται σε επαφή με τον *Δρομολογητή Πρόσβασης (Access Router, AN)* ή τον *Αντιπρόσωπο Κινητικότητας* του δικτύου στο οποίο συνδέθηκε. Σημειώνεται ότι, η εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων δεν οδηγεί πάντοτε σε εκτέλεση διαπομπής στρώματος δικτύου.

- *Ρύθμιση Νέας Διεύθυνσης* (Address Configuration)· αφορά τη διαδικασία ανάθεσης ή απόκτησης νέας διεύθυνσης από το κινητό. Στα συστήματα βασισμένα στο IPv4, η διαδικασία εμπλέκει την επικοινωνία του κινητού με έναν ειδικό εξυπηρετητή γι αυτό το σκοπό, που δίνει τη δυνατότητα ανάθεσης διεύθυνσης στο κινητό μέσω μίας *statefull* διαδικασίας (ειδικός DHCP εξυπηρετητής που διατηρεί κατάσταση του υποδικτύου αναφορικά με το σε ποιόν κόμβο έχει ανατεθεί η συγκεκριμένη διεύθυνση). Στην περίπτωση του IPv6, εκτός από την *statefull*, υποστηρίζεται και μία *stateless* διαδικασία, για την αυτόματη ρύθμιση της διεύθυνσης, κατά τη διάρκεια της οποίας δεν απαιτείται η επικοινωνία του κινητού με κάποιο εξυπηρετητή, αλλά όλη η επικοινωνία εκτελείται μεταξύ του κινητού και του δρομολογητή πρόσβασης του υποδικτύου στο οποίο προσδέθηκε το κινητό μετά τη διαπομπή του. Ο εν λόγω μηχανισμός αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του βασικού μηχανισμού *Αναζήτησης Γείτονα* (*Neighbor Discovery*, ND) που προβλέπεται για την λειτουργία των δικτύων βασισμένων στο IPv6 (βλέπε Παράρτημα Α).
- *Ενημέρωση Αντιπροσώπων και Ανανέωση Εγγραφών* (Binding Update)· στη φάση αυτή το κινητό έχει ουσιαστικά ολοκληρώσει τη διαδικασία πρόσδεσής του στο νέο δίκτυο, οπότε είναι υποχρεωμένο να επικοινωνήσει με τους Αντιπροσώπους Κινητικότητας που προβλέπονται κατά στην αρχιτεκτονική του MIP. Στη φάση αυτή πραγματοποιείται ανανέωση ή εγκατάσταση των εγγραφών στους Αντιπροσώπους Κινητικότητας και καθίσταται δυνατή η προώθηση των πακέτων της κίνησης που προορίζεται προς αυτούς, προς τη νέα, τρέχουσα, θέση τους.

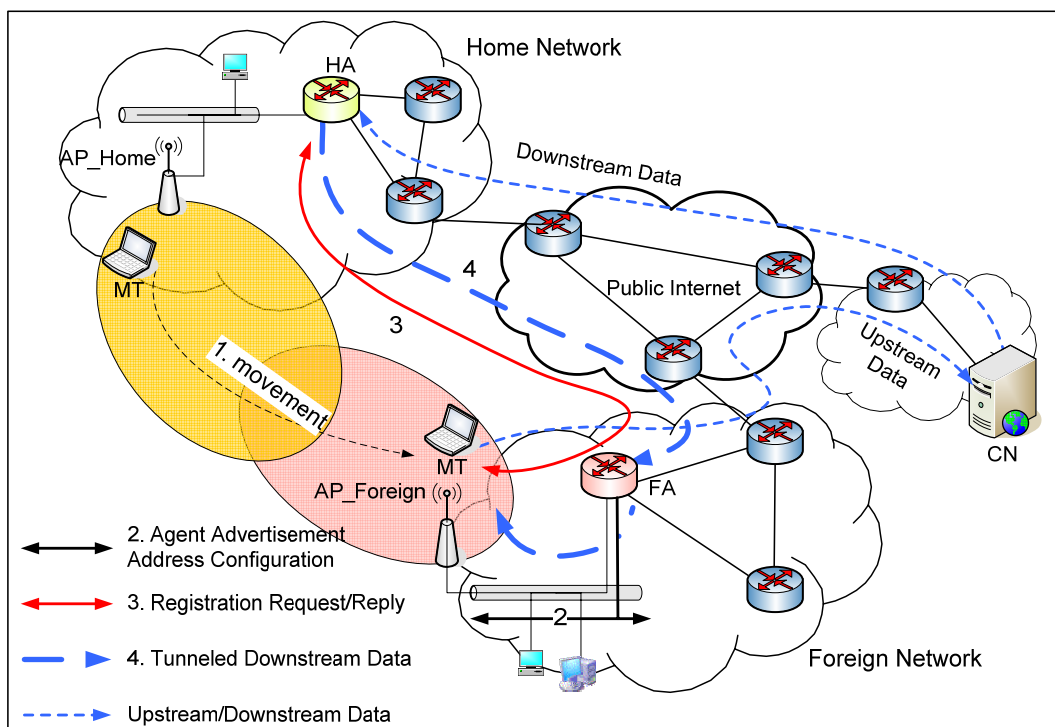
2.3.1.1 MIPv4

Στην αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου Mobile IPv4 (MIPv4) [43], θεωρείται η λειτουργία ενός επιπλέον κόμβου στα επισκεπτόμενα δίκτυα, του επονομαζόμενου *Ξένου Αντιπροσώπου* (Foreign Agent, FA). Ο FA ουσιαστικά παρέχει υπηρεσίες ελέγχου πρόσβασης στο *Ξένο Δίκτυο* και ρύθμισης της διεύθυνσης CoA στον κινητό χρήστη. Κατά λειτουργία του MIPv4 ένας κινητός χρήστης μπορεί να αποκτήσει την απαραίτητη CoA, με δυο ξεχωριστούς τρόπους· ο πρώτος καθορίζει ότι ο FA αναθέτει μία διεύθυνση στο κάθε κινητό η οποία ταυτίζεται με μία από τις διαθέσιμες διευθύνσεις του ιδίου (FA CoA). Ο δεύτερος προτείνει τη χρήση ενός μηχανισμού δυναμικής ανάθεσης διεύθυνσης (πχ. DHCP) απ' ευθείας από το κινητό (*co-located CoA*). Στην πρώτη περίπτωση τα ενθυλακωμένα πακέτα που καταφθάνουν μέσω της διόδου IP από τον HA, αποθυλακώνονται από τον FA και παραδίδονται απ' ευθείας στον κινητό κόμβο. Τα αρχικά πακέτα, που έχουν διεύθυνση προορισμού την HoA (που εστάλησαν από τον εκάστοτε CN), προωθούνται από τον FA άμεσα στο στρώμα ζεύξης, όπως ακριβώς συμβαίνει για έναν σταθερό κόμβο συνδεδεμένο στο υποδίκτυο του FA (δηλ. παρά το γεγονός ότι τα συγκεκριμένα πακέτα έχουν στο πεδίο διεύθυνσης προορισμού την HoA), και μέσω αυτού μεταδίδονται προς τον κινητό κόμβο. Στην δεύτερη περίπτωση, τα ενθυλακωμένα πακέτα προωθούνται απ' ευθείας στον κινητό σταθμό. Ο τελευταίος, αφού αφαιρέσει την επιπρόσθετη επικεφαλίδα της διόδου, προχωρά στην τυπική επεξεργασία του γνήσιου IP datagram που απέστειλε ο CN με τον οποίο επικοινωνεί.

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv4 επιτελείται σε τρεις φάσεις. Αυτές είναι: *Εύρεση Αντιπροσώπου, Εγγραφή και Δρομολόγηση/Προώθηση* των πακέτων κίνησης. Στη πρώτη φάση το τερματικό ενημερώνεται σχετικά με τη μετακίνησή του μεταξύ των διαφόρων υποδικτύων πρόσβασης στα οποία συνδέεται. Για το σκοπό αυτό το πρωτόκολλο προβλέπει την περιοδική αποστολή από τους HA και FA, μηνυμάτων *Ανακοίνωσης Αντιπροσώπων* (Agent Advertisements), που περιέχουν ουσιαστικά την ταυτότητα και την διεύθυνσή τους, και δίνουν τη δυνατότητα στους κινητούς χρήστες να αντιληφθούν ανεξάρτητα από τη λειτουργία των διεργασιών του στρώματος σύνδεσης, ότι έχουν συνδεθεί σε ένα διαφορετικό δίκτυο (με άλλα λόγια έχει εκτελεστεί διαπομπή επιπέδου δικτύου). Επιπρόσθετα, μέσω αυτών των μηνυμάτων, το κινητό αποκτά όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που θα το οδηγήσουν στην απόκτηση της νέας CoA. Σαν αποτέλεσμα το κινητό είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει μία διεύθυνση του FA που περιέχεται στο μήνυμα Agent Advertisement που έλαβε, ή να εκκινήσει τη διαδικασία αυτόματης ρύθμισης διεύθυνσης μέσω ενός DHCP εξυπηρετητή που είναι επίσης συνδεδεμένος στο υποδίκτυο. Κατά τη φάση της *Εγγραφής*, το κινητό τερματικό επικοινωνεί στον HA την νέα CoA του, ώστε να καταστεί δυνατή η προώθηση των πακέτων που προορίζονται προς αυτό, προς το νέο σημείο πρόσβασης στο οποίο βρίσκεται. Η προώθηση των συγκεκριμένων πακέτων πραγματοποιείται μέσω του IP Tunnel που εγκαθίσταται γι' αυτό το σκοπό. Για την υλοποίηση της διαδικασίας *Εγγραφής*, το κινητό αρχικά αποστέλλει προς τον HA το μήνυμα *Ανανέωσης Εγγραφής* (Binding Update, BU). Ο HA σαν απάντηση επιστρέφει ένα μήνυμα *Επιβεβαίωσης Εγγραφής* (Binding Acknowledge, Back). Κατά της ανταλλαγή των συγκεκριμένων μηνυμάτων μπορεί να συμμετέχει κι ο FA εφόσον χρησιμοποιείται η FA CoA, οπότε προστίθενται και οι απαραίτητες διαδικασίες και πληροφορίες ασφάλειας (κρυπτογράφηση κλπ.). Στην περίπτωση που το τερματικό επιστρέψει στο *Οικείο Δίκτυο*, απαιτείται η αποστολή ενός μηνύματος που να αναιρεί την εγκατεστημένη εγγραφή αναφορικά με την προηγούμενη CoA κι να ενημερώνει τον HA για την επανασύνδεσή του σε αυτό. Κατά τη φάση της *Δρομολόγησης* των πακέτων, τα πακέτα που έχουν ως προορισμό το κινητό παραδίδονται στο ίδιο ή στον FA που το εξυπηρετεί (χρήση διόδου από τον HA προς τον FA ή το τερματικό ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του πρωτοκόλλου). Η διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 2 - 1.

Το μεγάλο πλεονέκτημα που προκύπτει από τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv4 είναι το ότι δίνει τη δυνατότητα σε έναν κινητό χρήστη να δέχεται το ίδιο σύνολο υπηρεσιών που έχει κι ένας σταθερός, ανεξάρτητα από την τεχνολογία πρόσβασης στο ασύρματο μέσο που χρησιμοποιείται στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων, και αυτό χωρίς να απαιτείται κάποια αλλαγή τόσο στους τερματικούς κόμβους με τους οποίους επικοινωνεί όσο και στο σύνολο των δρομολογητών του δικτύου κορμού από τους οποίους περνούν τα πακέτα. Όλη η λειτουργικότητα του πρωτοκόλλου είναι συγκεντρωμένη στους *Αντιπρόσωπους Κινητικότητας* που ορίζονται από την αρχιτεκτονική και στα κινητά τερματικά τα οποία είναι ουσιαστικά οι χρήστες της υπηρεσίας κινητικότητας. Εντούτοις, πολύ βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η δρομολόγηση των πακέτων από και προς τον κινητό χρήστη (ακόμη και στην περίπτωση όπου τα αποστέλλόμενα πακέτα έχουν την CoA ως διεύθυνση αποστολέα) δεν είναι βέλτιστη, δηλαδή τα πακέτα από τους CN προς το κινητό δεν ακολουθούν το ελάχιστο μονοπάτι αλλά

προωθούνται μέσω του HA. Στη βιβλιογραφία το συγκεκριμένο πρόβλημα απαντάται με τον όρο «*τριγωνική δρομολόγηση*» (*triangular routing*). Επίσης αρνητικό στοιχείο αποτελεί και το ότι το χρονικό διάστημα της διαπομπής (που περιλαμβάνει και την εκτέλεση των διαδικασιών του στρώματος σύνδεσης στην οποία το κινητό δεν είναι συνδεδεμένο με τα σημεία πρόσβασης) επιμηκύνεται πάρα πολύ εφόσον προστίθεται σε αυτό και το χρονικό διάστημα που απαιτείται τόσο για την εκτέλεση της φάσεων *Αναζήτησης Αντιπροσώπων* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης* όσο και για την ολοκλήρωση της φάσης *Ανανέωσης Εγγραφών*. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια εκτέλεσης αυτών των διαδικασιών το κινητό τερματικό δεν μπορεί να στείλει ή να λάβει πακέτα από τον HA διότι, για τη κατεύθυνση από τον HA προς το κινητό τα πακέτα κατευθύνονται προς το παλαιό σημείο πρόσβασης μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Εγγραφής*, ενώ αντίστοιχα στη κατεύθυνση προς τους CN θα πρέπει να ολοκληρωθεί η ρύθμιση της νέας διεύθυνσης ώστε να καταστεί εφικτή η δρομολόγηση των πακέτων.



Σχήμα 2 - 1. Τυπική λειτουργία πρωτόκολλου MIPv4 – triangular routing

2.3.1.2 MIPv6

Η υποστήριξη κινητικότητας στην περίπτωση συστημάτων που βασίζονται στη νεότερη έκδοση του Πρωτοκόλλου Διαδικτύου IPv6, προδιαγράφεται από το πρωτόκολλο Mobile IPv6 (MIPv6) [44] και ακολουθεί τις ίδιες αρχές με αυτές των συστημάτων IPv4 που περιγράφηκαν παραπάνω. Σε αυτό το πλαίσιο, η διαχείριση κινητικότητας βασίζεται στην λειτουργία ανεξάρτητων και γενικευμένων μηχανισμών του IPv6, όπως για παράδειγμα του μηχανισμού επέκτασης της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου IPv6 [48] για την μεταφορά μηνυμάτων σηματοδότησης σε ανταλλασσόμενα πακέτα μεταξύ επικοινωνούντων κόμβων, των μηχανισμών *Αναζήτησης Δρομολογητή* και *Γειτονικού Κόμβου* (Router Discovery και Neighbor Discovery)

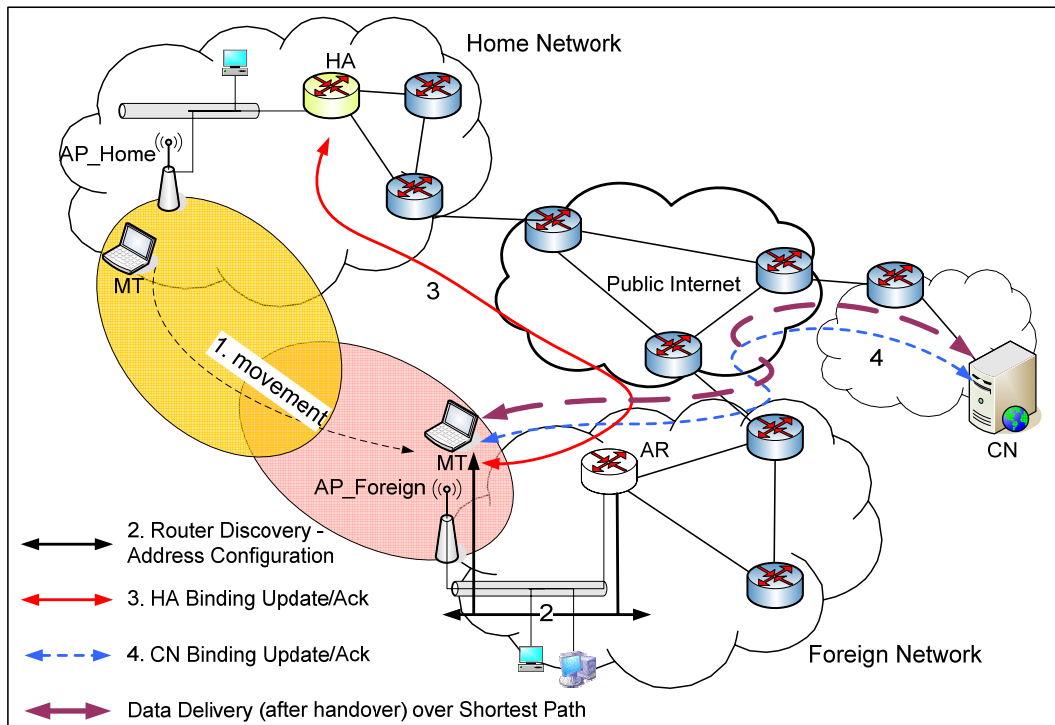
[49]¹¹, ή του μηχανισμού *Αυτόματης Ρύθμισης Διεύθυνσης* (Address Autoconfiguration [51]). Ο μηχανισμός που εισάγει το MIPv6 θεωρείται κομμάτι της βασικής λειτουργικότητας που προσφέρεται από το πρωτόκολλο IPv6 και για το λόγο αυτόν προσφέρει αυξημένες δυνατότητες σε σχέση με τον αντίστοιχο της έκδοσης MIPv4. Η αρχιτεκτονική του δεν απαιτεί, όπως στην περίπτωση του MIPv4, τη χρήση κάποιου *Απομακρυσμένου Αντιπροσώπου* (*Foreign Agent*) στο επισκεπτόμενο δίκτυο· όλη η λειτουργικότητα του τελευταίου προσφέρεται σαν μέρος της βασικής λειτουργικότητας των δρομολογητών πρόσβασης στο *Ξένο Δίκτυο* (Access Routers, AR). Η λειτουργία του *Οικείου Αντιπροσώπου* (Home Agent) όπως κι η σημασιολογία των διευθύνσεων HoA και CoA διατηρούνται अपαράλλακτες.

Η τυπική λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας που υποστηρίζονται σε συστήματα IPv6, προβλέπει δύο ξεχωριστούς τρόπους για την επικοινωνία ενός *Κινητού Κόμβου* (Mobile Node, MN) με έναν *Κόμβο Ανταποκριτή* (Correspondent Node, CN) μεταξύ των οποίων είναι εγκατεστημένη μία σύνδοος. Ο πρώτος επιτρέπει τη χρήση της HoA από τον CN στο πεδίο διεύθυνση προορισμού των IPv6 datagrams που στέλνει στο MN, και αντίστοιχα τη χρήση μίας *Αμφίδρομης Δόδου IP* μεταξύ του *Οικείου Αντιπροσώπου* HA και του MN μέσω της οποίας πραγματοποιείται προώθηση των datagrams προς την εκάστοτε θέση του τελευταίου (δηλ. προς την τρέχουσα CoA). Αντίστοιχα η επικοινωνία του MN με τον CN πραγματοποιείται μέσω του αντίστροφου μονοπατιού, δηλαδή μέσω της IP Δόδου μέχρι τον HA, και με χρήση τυπικής δρομολόγησης IP από τον HA μέχρι τον CN. Υπενθυμίζεται ότι η διεύθυνση HoA τοπολογικά αντιστοιχεί σε ένα φυσικό υποδίκτυο του HA.

Ο δεύτερος τρόπος προβλέπει τη χρήση ενός μηχανισμού *Βελτιστοποίησης Διαδρομής* (*Route Optimization*), ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα απ' ευθείας επικοινωνίας μεταξύ του MN και του CN. Ο μηχανισμός επιτρέπει την άμεση χρήση της τρέχουσας CoA που αποκτά το MN κάθε φορά που συνδέεται σε ένα *Ξένο Δίκτυο*, στα πεδία *διεύθυνση αποστολέα* και *προορισμού* των διακινούμενων datagrams. Η υλοποίηση του μηχανισμού πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλων μηνυμάτων σηματοδότησης. Το Σχήμα 2 - 2 απεικονίζει τη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Route Optimization*. Η επιλογή του ενός μηχανισμού έναντι του άλλου σχετίζεται με το αν οι κόμβοι CN με τους οποίους επικοινωνεί το κινητό είναι σε θέση να τον υποστηρίξουν. Εξαρτάται δηλαδή από το αν ο εκάστοτε CN υποστηρίζει τις αλλαγές που εισήγαγε το πρωτόκολλο MIPv6, εφόσον για την εκτέλεσή του απαιτείται η ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ των CN και του MN. Σημειώνεται ότι τα ανταλλασσόμενα μεταξύ των κόμβων MN και CN datagrams στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Route Optimization*, μεταφέρουν, σε ένα κατάλληλο πεδίο, τη διεύθυνση HoA του MN. Με αυτόν τον τρόπο η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την τοπική (στους κόμβους MN και CN) παράδοση των datagrams από το στρώμα δικτύου στο στρώμα μεταφοράς. Με αυτόν τον τρόπο επίσης περιορίζεται και η επιβάρυνση που προκαλείται

¹¹ Κατά την περίοδο της συγγραφής, πραγματοποιούνταν ανανέωση του πρωτοκόλλου Neighbor Discovery for IPv6 στα πλαίσια του οργανισμού IETF. Δεδομένου ότι η νέα έκδοση [49] εισάγει κάποιους νέους περιορισμούς που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία των μηχανισμών που πραγματεύεται η διατριβή, κάθε αναφορά στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο γίνεται με βάση τη νεότερη έκδοσή του. Το ίδιο ισχύει και για το μηχανισμό *IPv6 Stateless Address Autoconfiguration* που περιγράφεται στο [50] και θα αναλυθεί στη συνέχεια, ενώ η αρχική έκδοσή του στο [52].

κατά τη δρομολόγηση των πακέτων, από την επιπλέον επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου IP όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός ενθυλάκωσης πακέτων.



Σχήμα 2 - 2. Τυπική λειτουργία πρωτοκόλλου MIPv6 - Route Optimization mode

Όπως προαναφέρθηκε, η διαχείριση κινητικότητας ενός κόμβου με βάση το πρωτόκολλο MIP, επιτελείται σε 3 διαφορετικές φάσεις: *Επισήμανσης Μετακίνησης/Αναζήτηση Δρομολογητή, Ρύθμισης Διεύθυνσης, και Ανανέωσης Εγγραφών*. Με την εξαίρεση της τελευταίας που αφορά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MIP αποκλειστικά, στα συστήματα που βασίζονται στο πρωτόκολλο IPv6, οι δύο πρώτες αποτελούν μέρος της βασικής λειτουργικότητας που προσφέρεται από το πρωτόκολλο Neighbor Discovery for IPv6 (ND) [49], [50]. Στην πράξη, βασική απαίτηση για την εγκατάσταση μίας συνόδου είναι η χρήση μίας μοναδικής παγκοσμίως διεύθυνσης, που καθιστά εφικτή τη δρομολόγηση των πακέτων προς έναν τερματικό κόμβο. Οι διαδικασίες *Ρύθμισης Διεύθυνσης* όσο και η *Ανανέωσης Εγγραφών*, εκτελούνται μόνο στην περίπτωση κατά την οποία ένας κόμβος έχει αλλάξει φυσικό υποδίκτυο, κι όχι στις περιπτώσεις που για κάποιο λόγο (πχ. λόγω αδυναμίας επικοινωνίας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων) ο κόμβος αποσυνδέεται και ξανασυνδέεται στο ίδιο δίκτυο (δρομολογητή). Με άλλα λόγια ο κινητός κόμβος δεν αποκτά νέα διεύθυνση εφόσον συνδέεται σε ένα νέο φυσικό υποδίκτυο το οποίο θα εξυπηρετείται από την ίδια διεπαφή του ίδιου δρομολογητή. Είναι προφανές ότι για τον AR, ο κινητός κόμβος παραμένει συνδεδεμένος στο ίδιο φυσικό υποδίκτυο το οποίο ταυτοποιείται από την ίδια διεπαφή του. Με στόχο την αποσαφήνιση όλων αυτών των περιπτώσεων, χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Επισήμανσης Μετακίνησης* πριν τη φάση απόδοσης διεύθυνσης. Στην περίπτωση που επιβεβαιωθεί η μετακίνηση του τερματικού ακολουθεί η απόδοση νέας διεύθυνσης σε αυτό μέσω της διαδικασίας *Ρύθμισης Διεύθυνσης*. Στη συνέχεια εκτελούνται οι διαδικασίες που σχετίζονται με την αποκατάσταση της επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο όπως προβλέπει το πρωτόκολλο MIP. Η λειτουργία τόσο των μηχανισμών του πρωτοκόλλου ND όσο και των μηχανισμών που

προβλέπει το MIPv6 για την αποκατάσταση της επικοινωνίας περιγράφονται λεπτομερώς στο Παράρτημα Α. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία συνοπτική περιγραφή για χάρη πληρότητας και για τη διατήρηση της νοηματικής συνέχειας με το υπόλοιπο της διατριβής. Οι αναγνώστες προτρέπονται να ανατρέξουν στο συγκεκριμένο εδάφιο της διατριβής για περισσότερες λεπτομέρειες και πληροφορίες σχετικά με το χρονισμό των διαδικασιών που εκτελούνται κατά την εκτέλεση διαπομπών με χρήση του πρωτοκόλλου MIPv6.

Η γενική αρχιτεκτονική διευθυνσιοδότησης στα συστήματα IPv6 [51], προβλέπει ότι μία unicast IPv6 διεύθυνση συντίθεται από ένα *πρόθημα* (*prefix*) κι ένα *επίθημα* (*suffix*). Το *πρόθημα* χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση του φυσικού υποδικτύου στο οποίο συνδέονται τερματικοί κόμβοι που έχουν διευθύνσεις που ξεκινούν από το πρώτο. Το *επίθημα* ταυτοποιεί μία φυσική διεπαφή κάθε κόμβου προς ένα συγκεκριμένο και μοναδικό φυσικό υποδίκτυο. Σημειώνεται ότι ένας κόμβος είναι δυνατό να έχει περισσότερες από μία φυσικές ή ιδεατές (*virtual*, στην περίπτωση ιδεατών δικτύων που σχηματίζονται με τη χρήση Διόδων IP) διεπαφές προς ένα ή περισσότερα φυσικά ή ιδεατά υποδίκτυα IP αντίστοιχα. Το *επίθημα* ονομάζεται επίσης και *Αναγνωριστικό Διεπαφής* (*Interface Identifier/ID*). Η διαδικασία *Ρύθμισης Διεύθυνσης* σε ένα σύστημα IPv6 έχει σαν αποτέλεσμα την ανάθεση μίας μοναδικής παγκοσμίως διεύθυνσης σε κάθε διεπαφή καθενός κόμβου που είναι προσαρτημένος σε αυτό. Για την απόδοση μίας διεύθυνσης σε έναν κόμβο απαιτείται η ρύθμιση τόσο του *προθήματος* όσο και του *επιθήματος*. Δεδομένου ότι η ρύθμιση του *προθήματος* αφορά την ταυτοποίηση του καθενός υποδικτύου, για την ικανοποίηση της μοναδικότητας σε παγκόσμιο επίπεδο απαιτείται η παρέμβαση του διαχειριστή του δικτύου ώστε να χρησιμοποιηθεί το *πρόθημα* που έχει ανατεθεί στο συγκεκριμένο δίκτυο (από την εξουσιοδοτημένη για αυτό το σκοπό αρχή). Για τη ρύθμιση του *επιθήματος* αρκεί η ανάθεση ενός αναγνωριστικού που επιτυγχάνει την πιστοποίηση της μοναδικότητάς του στο συγκεκριμένο υποδίκτυο.

Στα πλαίσια των συστημάτων που βασίζονται στο IPv6 υπάρχουν δύο ξεχωριστοί μηχανισμοί που υλοποιούν την τελευταία διαδικασία. Ο πρώτος, επονομαζόμενος ως *Αυτόματη Ρύθμιση Διεύθυνσης Με Χρήση Υπάρχουσας Κατάστασης* (*Statefull Address Autoconfiguration*), θεωρεί τη λειτουργία ενός ειδικού εξυπηρετητή, ο οποίος ελέγχει την ανάθεση και χρήση διευθύνσεων στο υποδίκτυο. Σύμφωνα με αυτόν, ο κάθε κόμβος επικοινωνεί με έναν εξυπηρετητή του πρωτοκόλλου Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6) [53], ο οποίος του επιστρέφει, με βάση την τηρούμενη στα αρχεία του κατάσταση σχετικά με την ανάθεση διευθύνσεων, μία μοναδική για το υποδίκτυο IPv6 διεύθυνση. Ο δεύτερος προβλέπει ότι κάθε τερματικός κόμβος μπορεί μέσω της διαδικασίας *Αυτόματη Ρύθμιση Διεύθυνσης Χωρίς Χρήση Υπάρχουσας Κατάστασης* (*Stateless Address Autoconfiguration*), να ρυθμίσει τη διεύθυνσή του αυτόνομα (χωρίς να τηρείται κάπου κεντρικά η υπάρχουσα κατάσταση στο υποδίκτυο), απαιτώντας απλά την επιλογή ενός επιθήματος με αυθαίρετο τρόπο (τυχαία ή με χρήση ενός αλγορίθμου που χρησιμοποιεί το αναγνωριστικό που χρησιμοποιείται ως διεύθυνση στο στρώμα ζεύξης δεδομένων). Σε κάθε περίπτωση το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι ο κάθε κόμβος θα πρέπει να επιβεβαιώσει την μοναδικότητα του επιθήματος στο συγκεκριμένο υποδίκτυο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Duplicate Address Detection* (DAD) που περιγράφεται

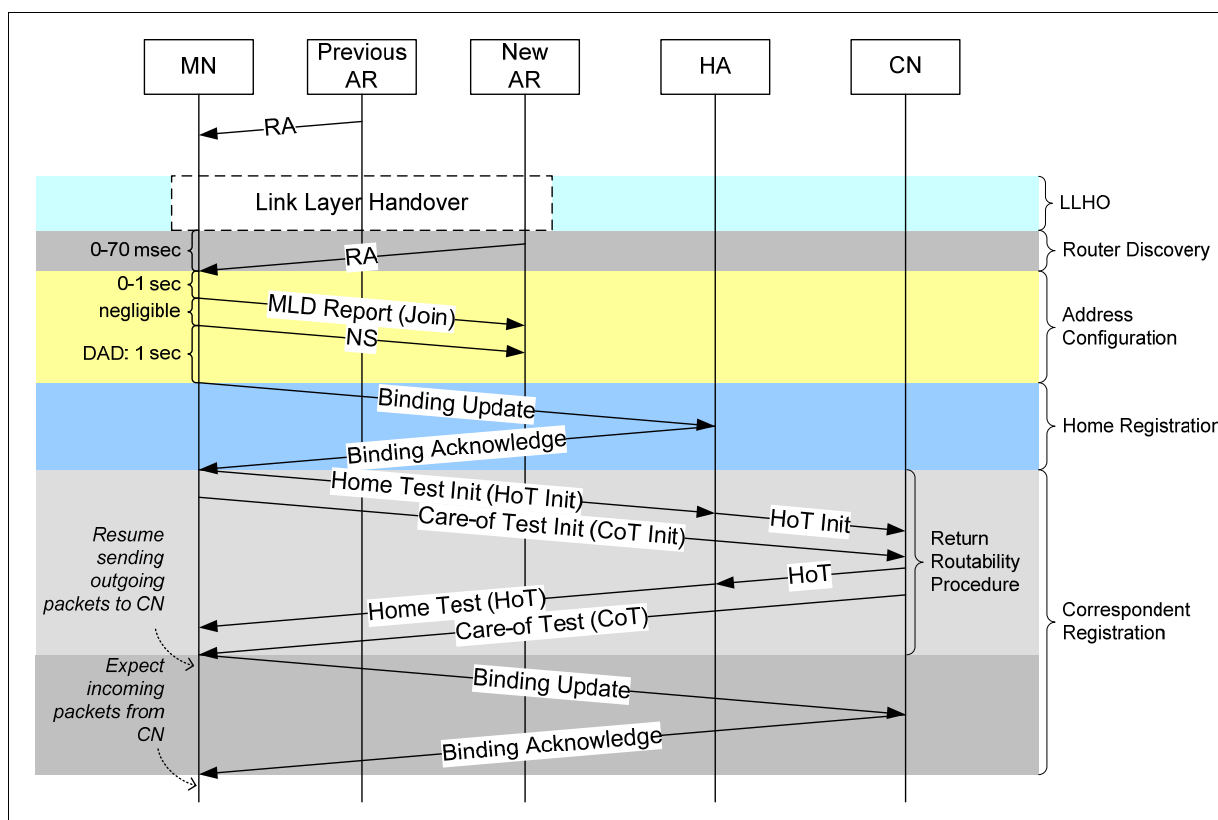
στο [51]. Η λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού εξασφαλίζει την μη ύπαρξη/χρήση μίας IPv6 διεύθυνσης σε ένα υποδίκτυο, κάνοντας χρήση μηνυμάτων σηματοδοσίας του πρωτοκόλλου ND, και δίνει τη δυνατότητα σε ένα κόμβο να ελέγξει αν υπάρχει κάποιος άλλος κόμβος στο ίδιο υποδίκτυο, ο οποίος να χρησιμοποιεί μία IPv6 διεύθυνση link-local εμβέλειας, την οποία προτίθεται να χρησιμοποιήσει. Στην θετική περίπτωση ο κόμβος είναι υποχρεωμένος είτε να επιλέξει άλλο επίθημα είτε να χρησιμοποιήσει τον statefull μηχανισμό που αναλύθηκε παραπάνω. Ο μηχανισμός DAD περιγράφεται στο εδάφιο A.2.

Το πρωτόκολλο ND επίσης προβλέπει ότι κάθε δρομολογητής είναι υποχρεωμένος να αποστέλλει σε τακτά χρονικά διαστήματα μηνύματα, επονομαζόμενα ως *Ανακοίνωση Δρομολογητή (Router Advertisement, RA)*, μέσω των οποίων κοινοποιεί στο υποδίκτυο την ύπαρξή και λειτουργία του, και αποκαλύπτει το *πρόθημα* διευθύνσεων που μπορεί να χρησιμοποιείται σε αυτό. Το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι ένας δρομολογητής θα πρέπει να στέλνει ένα μήνυμα RA κάθε *RtAdv_Interval* sec, με το *RtAdv_Interval* ομοιόμορφα κατανεμημένο μεταξύ μίας ελάχιστης και μίας μέγιστης τιμής της τάξης των 3-4 sec το ελάχιστο, μέχρι 1350-1800 sec το μέγιστο αντίστοιχα. Ένας κόμβος, θα πρέπει να παρακολουθεί την άφιξη των μηνυμάτων RA αναφορικά τόσο με τη συχνότητα άφιξής τους, όσο και σε σχέση με το περιεχόμενο σε αυτά *πρόθημα* διεύθυνσης υποδικτύου. Για το σκοπό αυτό, η διαδικασία *Επισήμανση Μετακίνησης (Movement Detection)* προσφέρει τη δυνατότητα επιβεβαίωσης εκτέλεσης μίας διαπομπής στρώματος δικτύου. Σύμφωνα με αυτή,¹² ένας κόμβος μπορεί να επιβεβαιώσει την αδυναμία του να επικοινωνήσει με τον default (με βάση τις ρυθμίσεις που έχει) δρομολογητή πρόσβασης. Αυτή η επισήμανση οδηγεί στην ανάγκη ρύθμισης νέου default δρομολογητή πρόσβασης. Επίσης, δεδομένου ότι ο κόμβος πλέον θεωρεί βέβαιο ότι έχει μετακινηθεί σε ένα νέο δίκτυο, θα πρέπει να προβεί στην εκτέλεση των διαδικασιών που καθιστούν εφικτή τη ρύθμιση μίας νέας, *τοπολογικά* έγκυρης διεύθυνσης IP. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιεί το πρόθημα των διευθύνσεων που περιέχεται στα μηνύματα RA που καταφθάνουν σε αυτόν. Επιπλέον το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι ένας κόμβος μπορεί να ακολουθήσει μία πιο ενεργητική στάση αναφορικά με τη λήψη μηνυμάτων RA, μέσω της διαδικασίας *Ανακάλυψη Δρομολογητή (Router Discovery)*. Η τελευταία παρέχει τη δυνατότητα αποστολής μηνυμάτων *Πρόσκληση Δρομολογητή για Αποστολή Ανακοίνωσης (Router Solicitation, RS)*, μέσω των οποίων μπορεί να υποχρεώσει το δρομολογητή ενός υποδικτύου να αποστείλει ένα μήνυμα RA.

Όπως αναλύεται στο Παράρτημα A, αν και ο συνδυασμός των διαδικασιών *Ανακάλυψη Δρομολογητή* και *Επισήμανση Μετακίνησης* δίνει τη δυνατότητα επιβεβαίωσης της εκτέλεσης μίας διαπομπής και μπορεί να οδηγήσει στον σκανδαλισμό της διαδικασίας *Ρύθμιση Νέας Διεύθυνσης*, εντούτοις μπορεί να διαρκέσει αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα το ελάχιστο του οποίου είναι της τάξης των 10 sec κατά μέσο όρο. Η εν λόγω καθυστερήσεις εισάγονται τόσο από τις εκτελούμενες διαδικασίες σηματοδοσίας που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και από το γεγονός ότι με βάση την προδιαγραφή του ND ένας δρομολογητής θα πρέπει να περιορίζει το ρυθμό με τον οποίο αποστέλλει τα μηνύματα RA σε ένα μήνυμα κάθε 3 sec το ελάχιστο. Με

¹² Ουσιαστικά μέσω της διαδικασίας *Επισήμανση Αδυναμίας Επικοινωνίας με Γειτονικό Κόμβο (Neighbor Unreachability Detection, NUD)* η οποία αποτελεί μέρος της διαδικασίας *Επισήμανση Μετακίνησης* (βλέπε ενότητα A.3)

στόχο την ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την εκτέλεση των συγκεκριμένων διαδικασιών, η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου MIPv6, χαλάρωσε την απαίτηση για το ελάχιστο διάστημα στο οποίο μπορεί να πραγματοποιείται η μετάδοση των μηνυμάτων RA στο διάστημα $[0.030, 0.070]$ sec. Παράλληλα έδωσε τη δυνατότητα ενημέρωσης των κινητών τερματικών αναφορικά με το πότε θα πρέπει να αναμένεται το επόμενο μήνυμα RA, ούτως ώστε να είναι σε θέση να αντιληφθούν την απομάκρυνσή τους από ένα υποδίκτυο χωρίς να είναι απαραίτητη η απουσία τριών μηνυμάτων RA όπως προαναφέρθηκε. Η τελευταία δυνατότητα προσφέρεται πλέον με τη εισαγωγή ενός νέου πεδίου στα μηνύματα RA, ενονομαζόμενου ως *Διάστημα Ανακοίνωσης (Advertisement Interval)*, που περιέχει το μέγιστο χρονικό διάστημα πέρα από το οποίο πιστοποιείται η μετακίνηση ενός κόμβου από το υποδίκτυο στο οποίο βρίσκονταν συνδεδεμένος. Το Σχήμα 2 - 3 που ακολουθεί, παρουσιάζει τα μηνύματα που ανταλλάσσονται και το χρονισμό της διαδικασίας σηματοδότησης που εκτελείται κατά τη διαπομπή ενός κινητού κόμβου με χρήση του πρωτοκόλλου MIPv6, με βάση τις τυπικές ρυθμίσεις που εισάγει το MIPv6, όπως προδιαγράφονται στο [44].



Σχήμα 2 - 3. Διαδικασία Σηματοδότησης και Χρονισμός με χρήση του πρωτοκόλλου MIPv6 σε λειτουργία Route Optimization κατά τη διάρκεια διαπομπής στρώματος δικτύου

Η διαδικασία ξεκινά με την εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, κατά την οποία ο κινητός κόμβος αποσυνδέεται από το προηγούμενο σημείο πρόσβασης και συνδέεται σε ένα νέο, εξαιτίας της χειροτέρευσης της ποιότητας της σύνδεσής του με το τρέχον σημείο πρόσβασης. Η πρόσδεση του MN στο νέο υποδίκτυο, έχει σαν αποτέλεσμα τη λήψη μηνυμάτων RA από τον δρομολογητή πρόσβασης (Access Router, AR) που το υποστηρίζει, τα οποία περιέχουν το *πρόθλημα* διευθύνσεων του νέου υποδικτύου. Δεδομένου ότι η τυπική τιμή του

πεδίου *Advertisement Interval* είναι της τάξης των 90 msec, ο MN είναι σε θέση να αντιληφθεί την διαπομπή του στο νέο υποδίκτυο (η διαδικασία διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων συμπεριλαμβάνεται σε αυτό το διάστημα) και να προχωρήσει στην διαδικασία *Ρύθμισης Διεύθυνσης* και επιβεβαίωσης της μοναδικότητας του χρησιμοποιούμενου *επιθήματος* διεύθυνσής του μέσω της διαδικασίας DAD. Για την εκτέλεση της τελευταίας ο MN υποχρεούται να καταστεί μέλος της ομάδας πολυεκπομπής *solicited-node-multicast-address* αφού όμως καθυστερήσει την αποστολή του κατάλληλου MLD μηνύματος κατά ένα τυχαίο χρονικό διάστημα ομοιόμορφα καταμετρημένο στο διάστημα $[0, 1]$ sec. Κατόπιν αποστέλλει ένα μήνυμα *Neighbor Solicitation* με στόχο να σκανδαλίσει τη λήψη ενός μηνύματος *Neighbor Advertisement* στην περίπτωση που κάποιος άλλος συνδεδεμένος στο ίδιο υποδίκτυο κόμβος χρησιμοποιεί το ίδιο επίθημα. Εφόσον δεν λάβει το συγκεκριμένο μήνυμα σε χρονικό διάστημα ίσο με 1 sec, ο MN θεωρεί την διεύθυνση έγκυρη οπότε και είναι σε θέση πλέον να συνεχίσει με την διαδικασία σηματοδότησης του πρωτοκόλλου MIPv6 και των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής (Home Registration)* κι *Εγγραφής Ανταποκριτών (Correspondent Registration)* μέσω των οποίων ουσιαστικά ενημερώνονται ο HA και οι CN με τους οποίους επικοινωνεί για την αλλαγή της τρέχουσας διεύθυνσής του.

Σύμφωνα με την προδιαγραφή του MIPv6, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας *Οικείας Εγγραφής*, ο MN επικοινωνεί στον HA του τη νέα CoA του και ανανεώνει την εγγραφή του τελευταίου αναφορικά με την αντιστοιχία HoA-CoA. Για το λόγο αυτό ανταλλάσσονται τα μηνύματα *Ανανέωση Εγγραφής (Binding Update, BU)* και *Επιβεβαίωσης Ανανέωσης Εγγραφής (Binding Acknowledge, BAck)*. Με στόχο τη διασφάλιση του απορρήτου της επικοινωνίας μεταξύ του MN και του HA, η ανταλλαγή των μηνυμάτων πραγματοποιείται με χρήση του εγγενούς μηχανισμού IPsec του IPv6 για κρυπτογράφηση των περιεχομένων των datagrams, πραγματοποιώντας χρήση των διαθέσιμων πιστοποιητικών ασφάλειας. Με τη λήψη του μηνύματος BU, ο HA είναι σε θέση να ανανεώσει τις εγγραφές στους αντίστοιχους πίνακές του (*Binding Cache*), κι επίσης να αλλάξει το σημείο εξόδου της Διόδου IP που χρησιμοποιεί για την προώθηση των πακέτων που καταφθάνουν σε αυτόν κι έχουν διεύθυνση προορισμού την HoA του MN.

Κατά τη εκτέλεση της διαδικασίας *Εγγραφής Ανταποκριτών*, ο MN ενημερώνει τους κόμβους CN αναφορικά με την αλλαγή της τρέχουσας διεύθυνσής του (CoA), ώστε οι τελευταίοι αντίστοιχα να αρχίσουν να τη χρησιμοποιούν πλέον στο πεδίο διεύθυνση προορισμού των datagrams που αποστέλλονται προς τον MN. Η διαδικασία υλοποιείται επίσης με χρήση δύο αντίστοιχων μηνυμάτων BU και BAck. Κάθε κόμβος ο οποίος υποστηρίζει το μηχανισμό *Route Optimization* για την επικοινωνία του με κινητούς κόμβους, θα πρέπει να διατηρεί έναν πίνακα με αντιστοιχήσεις μεταξύ της HoA και της CoA του καθενός κινητού, όπως ακριβώς και ο κόμβος HA. Η ανταλλαγή των μηνυμάτων BU και Back έχει σαν αποτέλεσμα την ανανέωση των εγγραφών που συντηρεί ο CN. Αντίστοιχα με στόχο τη διασφάλιση του απορρήτου της επικοινωνίας στην επικοινωνία μεταξύ του MN και του εκάστοτε CN, οι σχεδιαστές του MIPv6 έχουν προδιαγράψει τη διαδικασία *Return Routability* μέσω της οποίας ανταλλάσσονται τα απαραίτητα πιστοποιητικά ασφάλειας για την αυθεντικοποίηση των κόμβων MN και CN μεταξύ

τους, και την κρυπτογράφηση των μηνυμάτων που προβλέπει η διαδικασία *Εγγραφής Ανταποκριτών*. Για την υλοποίησή της ο MN αποστέλλει δύο μηνύματα προς τον CN: ένα μέσω του HA (*Home Test Init*) διαμέσου της Διόδου IP, κι ένα απ' ευθείας (*Care-of Test Init*). Η λήψη αμφοτέρων των μηνυμάτων από τον CN επιβεβαιώνει ότι ο MN ο οποίος ταυτοποιείται από την HoA είναι σε θέση να χρησιμοποιεί την νέα CoA όπως ισχυρίζεται. Υπενθυμίζεται ότι η επικοινωνία MN-HA είναι διασφαλισμένη με χρήση του μηχανισμού IPsec όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια ο CN απαντάει σε καθένα από τα μηνύματα που έλαβε, αποστέλλοντας τα μηνύματα *Home Test* και *Care-of Test*. Σε καθένα από τα μηνύματα εισάγει ένα κλειδί το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από τον MN για την διασφάλιση της διαδικασίας *Correspondent Registration*.

Η προδιαγραφή του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που παρουσιάζει το MIPv6 επιτρέπει τη εφαρμογή δύο τρόπων λειτουργίας (operation modes): ενός «συντηρητικού» κι ενός «προοδευτικού». Στον συντηρητικό τρόπο η εκτέλεση της διαδικασίας *Εγγραφής Ανταποκριτών* απαιτείται να πραγματοποιηθεί αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία *Οικείας Εγγραφής*. Κατά τον προοδευτικό, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την ανταλλαγή των μηνυμάτων, επιτρέπεται η εκκίνηση της διαδικασίας *Εγγραφής Ανταποκριτών* (δηλ. περιλαμβανομένης και της *Return Routability*) παράλληλα με την διαδικασία *Οικείας Εγγραφής*, δηλαδή αμέσως μετά την αποστολή του μηνύματος BU από τον MN προς τον HA. Περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τις λεπτομέρειες του συντηρητικού και το προοδευτικού τρόπου λειτουργίας παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Κατά την εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος δικτύου που υποστηρίζεται από το MIPv6, ο κινητός κόμβος θεωρείται πως εκτελεί οξείες διαπομπές (hard handover) μεταξύ των σταθμών βάσης. Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση του MN με το προηγούμενο δίκτυο χάνεται τη στιγμή που ξεκινά η διαπομπή στρώματος ζεύξης δεδομένων. Από αυτό το χρονικό σημείο και μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Εγγραφής Αντιπροσώπων* ο κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να λάβει ή να στείλει πακέτα από ή προς αντίστοιχα τον εκάστοτε CN. Τούτο συμβαίνει για τους εξής λόγους: στην πλειοψηφία τους οι ασύρματες τεχνολογίες στρώματος ζεύξης δεδομένων δεν επιτρέπουν την προώθηση προς το στρώμα ζεύξης δεδομένων πακέτων ανώτερων στρωμάτων κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Στη φάση αυτή το στρώμα ζεύξης δεδομένων θεωρείται μη διαθέσιμο. Επιπλέον, κατά την διάρκεια εκτέλεσης μίας διαπομπής στρώματος δικτύου και πιο συγκεκριμένα κατά το χρονικό διάστημα από την αρχή της μέχρι και την ολοκλήρωση των διαδικασιών *Εγγραφής* (με HA και CN), η παράδοση των πακέτων κίνησης προς τον κινητό κόμβο (κατεύθυνση downstream) είναι αδύνατη δεδομένου ότι οι κόμβοι HA και CN δεν έχουν ενημερωθεί για την αλλαγή στη διεύθυνση CoA του κινητού. Από την άλλη, στην αντίστροφη κατεύθυνση (upstream), αν κι ο MN μπορεί να αρχίσει να χρησιμοποιεί τη νέα CoA αφότου ολοκληρωθεί η διαδικασία ρύθμισής της, δεν μπορεί να ξεκινήσει να αποστέλλει πακέτα προς τον HA ή τον CN εφόσον δεν έχουν ολοκληρωθεί οι διαδικασίες *Εγγραφής*. Το πρωτόκολλο MIPv6 θέτει πολύ σοβαρούς περιορισμούς αναφορικά με την επιτυχή εκτέλεση των τελευταίων, που επιβάλλουν την απόρριψη των αφικνούμενων πακέτων στους HA και CN εφόσον δεν υπάρχει στους πίνακές τους η κατάλληλη αντιστοίχιση

μεταξύ της HoA και της CoA. Στην περίπτωση που θεωρείται η «προοδευτική» λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv6 που αναλύθηκε παραπάνω, επιτρέπεται η χρήση της νέας CoA από το MN αμέσως μετά την αποστολή του μηνύματος BU προς τον εκάστοτε CN, δηλαδή μετά το πέρας της διαδικασίας *Return Routability*. Αυτό σημαίνει ότι ο MN είναι σε θέση να στέλνει απ' ευθείας πακέτα προς τον CN αφού αποστείλει το συγκεκριμένο μήνυμα εφόσον θεωρητικά το μήνυμα BU θα παραδοθεί πριν την παράδοση των πακέτων κίνησης.

2.3.1.3 Πλεονεκτήματα & Προβλήματα από τη Χρήση του MIPv6

Όπως και στην περίπτωση του MIPv4, το πρωτόκολλο MIPv6 έδωσε τη δυνατότητα σε κινητούς χρήστες να απολαμβάνουν το «σύνολο» των υπηρεσιών στρώματος δικτύου, όπως ακριβώς και οι χρήστες που είναι σταθερά συνδεδεμένοι σε ένα ενσύρματο δίκτυο. Η δυνατότητα αυτή θεωρείται θεμελιώδης για κάθε κινητό χρήστη δεδομένου ότι το πρωτόκολλο δεν θέτει κανένα περιορισμό αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες της συσκευής που χρησιμοποιείται ή τις εφαρμογές εκτελούνται. Επιπλέον το MIPv6 έλυσε και το πρόβλημα της «τριγωνικής δρομολόγησης» στην περίπτωση που οι *Κόμβοι Ανταποκριτές* είναι σε θέση να επεξεργαστούν τα μηνύματα σηματοδότησης όπως προαναφέρθηκε. Το πρωτόκολλο έδωσε τη δυνατότητα να αποσυμφορηθεί η περιοχή του δικτύου κοντά στους κόμβους HA, οι οποίοι εν γένει είναι μόνο υποχρεωμένοι να διαχειρίζονται ως επί το πλείστον τα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσουν με τους MN κι όχι πακέτα κίνησης στη μόνιμη κατάσταση (δηλ. εκτός από τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής). Τέλος σημαντικό σημείο αποτελεί και το γεγονός ότι οι μηχανισμοί ενθυλάκωσης πακέτων χρησιμοποιούνται στο ελάχιστο και μόνο στην περίπτωση που δεν υποστηρίζεται ο μηχανισμός *Route Optimization*. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται βέλτιστη χρήση στο διαθέσιμο εύρος ζώνης, το οποίο θα πρέπει να σημειωθεί ότι ιδίως για τις ασύρματες ζεύξεις δεν υπάρχει σε τόση αφθονία όπως στην περίπτωση των ενσύρματων ζεύξεων.

Από την άλλη, αν και η λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv6 λύνει το λειτουργικό/διαδικαστικό (functional) πρόβλημα αναφορικά με την διαχείριση κινητικότητας σε παγκόσμιο επίπεδο, παρέχοντας ένα γενικό πλαίσιο υποστήριξης διαπομπών στρώματος δικτύου ανεξάρτητα τόσο από την τεχνολογία του χρησιμοποιούμενου στρώματος ζεύξης δεδομένων όσο και από τα υπερκείμενα στρώματα μεταφοράς κι εφαρμογής, αφήνει πάρα πολλά κενά αναφορικά με την επίδραση που μπορεί να έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στις εκτελούμενες κατά τη διάρκεια της εφαρμογές. Όπως αναλύεται και στο Παράρτημα Α, ακόμη κι όταν χρησιμοποιούνται οι βελτιστοποιημένες ρυθμίσεις του πρωτοκόλλου ND που εισάγει η προδιαγραφή του MIPv6, κατά την εκτέλεση μίας οξείας διαπομπής, η ελάχιστη *καθυστέρηση διαπομπής* (*handover latency*, δηλαδή ο χρόνος κατά τον οποίο ένας κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να στέλνει ή να λαμβάνει πακέτα) δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 1.525 sec κατά μέσο όρο, συν το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* κι *Εγγραφής Ανταποκριτών*, συν το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι κατά την εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος δικτύου ένα κινητό δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί με το δίκτυο τουλάχιστο για μερικά δευτερόλεπτα, ενώ όλα τα πακέτα που αποστέλλονται σε αυτό το διάστημα προς το κινητό χάνονται. Το κινητό επίσης δεν

είναι σε θέση να συνεχίσει να αποστέλλει πακέτα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης αυτών των διαδικασιών. Οι τελευταίες παρατηρήσεις είναι αρκετά σημαντικές τόσο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου οι οποίες χαρακτηρίζονται ως αρκετά απαιτητικές αναφορικά με την καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων (της τάξης των 100 msec) όσο και για υπηρεσίες εγγυημένης παράδοσης πακέτων. Ιδίως για τις τελευταίες, η εκτέλεση μίας διαπομπής έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων εφαρμογής λόγω είτε της απώλειας των πακέτων κίνησης ή των μηνυμάτων επιβεβαίωσης είτε της λειτουργίας του μηχανισμού αποφυγής συμφόρησης του TCP εφόσον αναγκαστικά μετά την αποκατάσταση της επικοινωνίας ακολουθεί επαναμετάδοση των μη παραδοθέντων πακέτων.

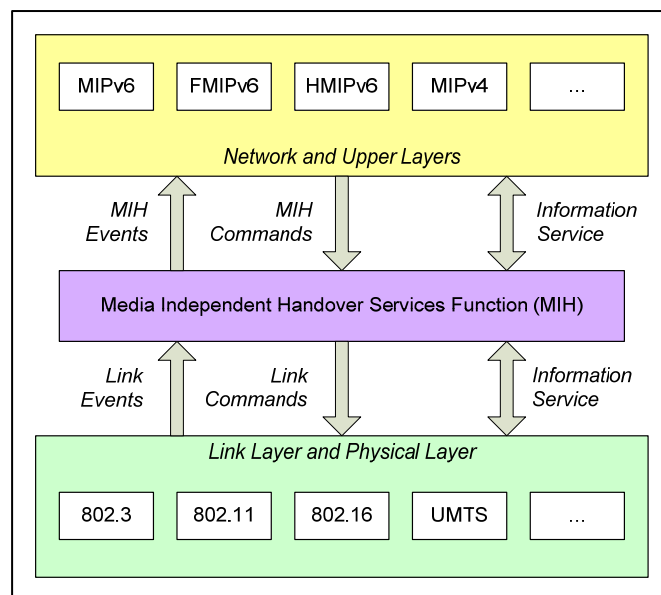
2.3.2 Αλληλεπίδραση στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων – Media Independent Handovers

Με βάση τις αρχές της διαστρωμάτωσης που εισήγαγε το πρότυπο OSI, ο διαχωρισμός μεταξύ των υπηρεσιών που παρέχει το κάθε στρώμα δικτύωσης έδωσε την δυνατότητα αυτόνομης ανάπτυξης του καθενός. Εντούτοις για την περίπτωση της κινητικότητας αυτή η αυστηρή προσέγγιση λειτούργησε ανασταλτικά σε ότι αφορά το συγχρονισμό μεταξύ των μηχανισμών που λειτουργούν στα στρώματα ζεύξης δεδομένων και δικτύου. Στην περίπτωση των συστημάτων που βασίζονται στο πρωτόκολλο Διαδικτύου, η υποστήριξη μίας διαπομπής στρώματος δικτύου βασίζεται αποκλειστικά σε πληροφορίες που συλλέγεται από πρωτόκολλα που λειτουργούν αποκλειστικά σε αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή επιπρόσθετης καθυστέρησης στην διαδικασία αποκατάστασης της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η αλλαγή της IPv6 συνδεσιμότητας επισημαίνεται στην τυπική περίπτωση, με χρήση ενός «παθητικού», από την πλευρά του κινητού, μηχανισμού, που προδιαγράφεται από το πρωτόκολλο Neighbor Discovery for IPv6 (ND). Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι σε αντίθεση με το ότι η πρωτογενής πληροφορία, που αφορά στην εκτέλεση της διαπομπής, είναι ήδη διαθέσιμη στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Με άλλα λόγια, το στρώμα δικτύου θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει την διαθέσιμη από το στρώμα ζεύξης πληροφορία ώστε να ακολουθήσει μία πιο «ενεργητική» στάση απέναντι στη διαχείριση της διαπομπής, εφόσον ο σκανδαλισμός της διαδικασίας *Επισήμανσης Μετακίνησης* του στρώματος δικτύου είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί σύγχρονα με αυτόν που λειτουργεί στο στρώμα ζεύξης και να περιοριστεί η καθυστέρηση που εισάγεται από την ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδότησης του ND.

Με στόχο την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών, την σχεδίαση και ανάπτυξη προηγμένων μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας και τον περιορισμό φαινομένων που επιμηκύνουν την *καθυστέρηση διαπομπής (handover latency)* ή συντείνουν στην αύξηση της απώλειας πακέτων, η ομάδα 802.21 του οργανισμού IEEE [40], ασχολείται με τη προτυποποίηση μίας γενικευμένης διεπαφής που έχει ως στόχο την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων που θα χρησιμοποιούνται κατά τη φάση εκτέλεσης μίας διαπομπής. Η διεπαφή αυτή ορίζει ένα ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ των στρωμάτων ζεύξης δεδομένων και δικτύου, και θα προσφέρει στο δεύτερο *Υπηρεσίες Υποστήριξης Διαπομπών Ανεξαρτήτως Φυσικού Μέσου (Media Independent Handover Services, MIH)* [54], [55]. Το Σχήμα 2 - 4

απεικονίζει την λειτουργική τοποθέτηση της υπηρεσίας MIH στη στοίβα του OSI. Η υπηρεσία MIH ορίζει τρία διαφορετικά σύνολα υπηρεσιών:

- *Υπηρεσίες γεγονότων (events) ή σημεία σκανδαλισμού (triggers)*: αφορά παράδοση πληροφοριών (ενδείξεων) σχετικά με την πρόοδο εκτέλεσης διαπομπών στρώματος ζεύξης δεδομένων προς στα υπερκείμενα του στρώματος ζεύξης στρώματα.
- *Υπηρεσίες εντολών (commands)*: παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου και διαχείρισης της προόδου εκτέλεσης διαπομπών του στρώματος ζεύξης δεδομένων, σε πρωτόκολλα και μηχανισμούς του στρώματος δικτύου (ή ανώτερου)
- *Υπηρεσίες πληροφοριών (Information Services)*: αφορά την δυνατότητα ενημέρωση ενός κόμβου αναφορικά με την λειτουργία του μηχανισμού που εισάγει η υπηρεσία MIH, σε γειτονικούς κόμβους του ίδιου ή διαφορετικών δικτύων. Μέσω των υπηρεσιών πληροφοριών η εκτέλεση της διαπομπής ενός κόμβου, μπορεί να ελέγχεται από έναν δεύτερο κόμβο μέσω του πρωτοκόλλου που ορίζεται για αυτό το σκοπό.



Σχήμα 2 - 4. Υπηρεσίες Υποστήριξης Διαπομπών Ανεξαρτήτως Φυσικού Μέσου – MIH Services

Πρωταρχικός στόχος από την λειτουργία της υπηρεσίας MIH είναι η χρήση μίας διεπαφής μέσω της οποίας αφενός θα καθοριστεί το σύνολο των δυνατοτήτων που θα προσφέρεται από το στρώμα ζεύξης δεδομένων (ανεξάρτητα από την εκάστοτε τεχνολογία) και αφετέρου θα καταστεί δυνατός ο έλεγχος από το στρώμα δικτύου, των διαδικασιών που εκτελούνται αυτόνομα στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο τον συγχρονισμό των διαδικασιών που εκτελούνται σε αυτά. Η υπηρεσία MIH φροντίζει για την προσαρμογή της πληροφορίας που προέρχεται από κάθε διαθέσιμη/χρησιμοποιούμενη τεχνολογία στρώματος ζεύξης δεδομένων (πχ. Ethernet, WLAN, WiMax, UMTS), με ομοιόμορφο τρόπο προς τους μηχανισμούς διαχείρισης κινητικότητας. Επιπλέον φροντίζει για τη μετάφραση των εντολών από τους τελευταίους στις κατάλληλες πρωτογενείς εντολές που προβλέπονται από το ετερογενές σύνολο των ασύρματων τεχνολογιών των υποκείμενων στρωμάτων. Σαν αποτέλεσμα, η

υπηρεσία ΜΙΗ εκθέτει τις δυνατότητες του στρώματος ζεύξης δεδομένων με ένα αφηρημένο (abstract) τρόπο και παρέχοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης «ευφυών» διαπομπών προς όφελος του τερματικού (δηλαδή διαπομπών όπου χρησιμοποιούνται προηγμένα κριτήρια κατά τις κρίσιμες αποφάσεις). Ο Πίνακας 2 – 1 συνοψίζει¹³ τις προσφερόμενες υπηρεσίες από το στρώμα ΜΙΗ.

Η βασική λειτουργία των υπηρεσιών ΜΙΗ, δίνει τη δυνατότητα στο στρώμα δικτύου ενός κινητού κόμβου να παρακολουθεί την παράδοση γεγονότων (πχ. *Link UP*), ώστε να μπορεί να αντιδρά γρήγορα, (πχ. για να σκανδαλιστεί έγκαιρα η διαδικασία *Επισήμανση Μετακίνησης*), κάθε φορά που κάποιο σπουδαίο για την πρόοδο της διαπομπής έχει λάβει χώρα (πχ. έχει εγκατασταθεί μία νέα σύνδεση στο στρώμα ζεύξης δεδομένων). Στο ίδιο πλαίσιο, όπως θα φανεί στη συνέχεια (βλέπε ενότητα 2.3.3.4), οι προσφερόμενες υπηρεσίες δίνουν σε ένα κόμβο, μέσω της χρήσης των γεγονότων *Link Handoff Imminent* και *Link Going Down*, τη δυνατότητα να προετοιμάσει την επικείμενη εκτέλεση μίας διαπομπής με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο η επικοινωνία του κόμβου δεν είναι εφικτή. Πιο ακριβής περιγραφή της χρησιμότητας και χρηστικότητας των γεγονότων και εντολών που προσφέρει η υπηρεσία αναλύονται στη συνέχεια. Επίσης εκτενής ανάλυση παρέχεται στο [56].

Πίνακας 2 - 1. Υποστηριζόμενες υπηρεσίες από τη διεπαφή του στρώματος IEEE 802.21 ΜΙΗ

ΜΙΗ Serv.	Τύπος	Event/Comm./Inf.Serv	Σημασιολογία
Events	State Change	Link Up	Εγκατάσταση νέας σύνδεσης
	State Change	Link Down	Κατάλυση υπάρχουσας σύνδεσης
	Predictive	Link Going Down	Χειροτέρευση της ποιότητας μίας σύνδεσης – κάτω από ένα συγκεκριμένο ποιοτικό κατώφλι
	State Change	Link Detected	Επισήμανση εύρεσης νέας σύνδεσης
	State Change	Link Parameters Change	Μεταβολή χαρακτηριστικών παραμέτρων (ποιότητας) σύνδεσης
	Administr. Link Transm.	Link Event Rollback Link SDU Transmit Success	Ακύρωση ισχύος γεγονότος Επιτυχής μετάδοση πλαισίου
	Link Transm.	Link SDU Transmit Failure	Αποτυχημένη μετάδοση πλαισίου
	Link Synch.	Link Handoff Imminent/ Link Quality Crosses Threshold	Επικείμενη εκτέλεση Διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων (λόγω χειροτέρευσης της ποιότητας της εγκατεστημένης ζεύξης)
	Link Synch.	Link Handoff Proceeding	Εκτέλεση Διαπομπής στρώματος ζεύξης
	Link Synch.	Link Handoff Complete	Ολοκλήρωση Διαπομπής στρώματος ζεύξης

¹³ Η λίστα που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2 – 1, είναι ενδεικτική (αλλά σχεδόν πλήρης). Κατά τη διάρκεια της συγγραφής, η προδιαγραφή της υπηρεσίας ΜΙΗ είναι σε στάδιο προετοιμασίας από την ομάδα εργασίας IEEE 802.21 [40].

MIH Serv.	Τύπος	Event/Comm./Inf.Serv	Σημασιολογία
Commands	Στον τοπικό κόμβο	MIH Poll	Διερεύνηση της διαθεσιμότητας συνδέσεων στο στρώμα ζεύξης δεδομένων
		MIH Switch	Αλλαγή σύνδεσης στρώματος ζεύξης δεδομένων (μεταξύ διαφορετικών AP)
		MIH Configure	Ρύθμιση παραμέτρων σύνδεσης
		MIH Scan	Εξέταση του φυσικού μέσου για ανεύρεση διαθέσιμων ασύρματων ζεύξεων
	Σε απομακρυσμένο κόμβο	MIH Handover Initiate	Αρχικοποίηση διαδικασίας εκτέλεσης Διαπομπής (αποστολή λίστας με διαθέσιμα AP)
		MIH Handover Prepare Network	Παρέχει τη δυνατότητα σε έναν κόμβο να ενημερωθεί για τις δυνατότητες ενός απομακρυσμένου κόμβου στον οποίο ενδέχεται να διαπεμφθεί και παράλληλα αποστέλλεται αίτημα διαπομπής σε αυτό.
		MIH Handover Commit	Αποκαλύπτει τη δέσμευση ενός κινητού κόμβου να διαπεμφθεί σε ένα νέο AP
		MIH Handover Complete	Ενημέρωση νέου AP προς το προηγούμενο AP ότι έχει εκτελεστεί διαπομπή και μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία υποστήριξης της (πχ. προώθηση πακέτων)
		MIH Network Address Information	Αποστολή αιτήματος προς ένα AP με στόχο την επιστροφή πληροφοριών στρώματος δικτύου (IP διεύθυνση) πριν την εκτέλεση μίας επικείμενης διαπομπής
Information Services		IMS Access (MMS, SMS, Presence, Instant Messg.)	Ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την υποστήριξη των συγκεκριμένων υπηρεσιών
		ISP Supported Internet	Ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την ταυτοποίηση του παρόχου υπηρεσιών Διαδικτύου σε ένα δίκτυο
		Location based services	Αποκαλύπτει τη διαθεσιμότητα υπηρεσιών τοποθεσίας στο δίκτυο ή μία γεωγραφική περιοχή
		VPN Supported	Αποκαλύπτει τη διαθεσιμότητα υπηρεσίας VPN
		MIP Supported	Αποκαλύπτει τη διαθεσιμότητα υπηρεσίας MIP
		Use of NAT	Αποκαλύπτει τη χρήση υπηρεσίας NAT

2.3.3 Προηγμένοι Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας στο Διαδίκτυο

Το πρωτόκολλο MIPv6 δίνει λύση στο γενικό λειτουργικό πρόβλημα της διαχείρισης κινητικότητας, προδιαγράφοντας έναν μηχανισμό με τη χρήση του οποίου ένας κινητός κόμβος αποκτά τη δυνατότητα αποκατάστασης της επικοινωνίας του στο Διαδίκτυο, ανεξάρτητα από τα IPv6 δίκτυα στα οποία συνδέεται σαν αποτέλεσμα της κινητικότητάς του. Επίσης, μέσω του μηχανισμού *Route Optimization*, παρέχει τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης

δικτυακών πόρων, εφόσον αποφεύγεται επιμελώς η μόνιμη χρήση των μηχανισμών ενθυλάκωσης πακέτων και η δρομολόγηση των πακέτων που ανταλλάσσουν οι επικοινωνούντες κόμβοι πραγματοποιείται μέσω των ελάχιστων μονοπατιών. Σε αυτό το πλαίσιο εντούτοις, το MIPv6 παρουσιάζει πολλές αδυναμίες που σχετίζονται με το γεγονός ότι η κινητικότητα υποστηρίζεται από έναν μοναδικό κόμβο, τον HA, πράγμα το οποίο προκαλεί ποικίλα προβλήματα. Το πιο σοβαρό εντοπίζεται στην απαίτηση για επικοινωνία με αυτόν κάθε φορά που εκτελείται μία διαπομπή συν το γεγονός ότι μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία σηματοδότησης, η επικοινωνία του κινητού διακόπτεται. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και συνυπολογίζοντας ότι κατευθυνόμαστε προς σύγκλιση των τεχνολογιών δικτύωσης κάτω από την ομπρέλα του πρωτοκόλλου IP, καθίσταται σαφές ότι υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας με περισσότερες δυνατότητες, που θα δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών για όλα τα είδη υπηρεσιών και ανεξάρτητα από την εκάστοτε τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιείται στο στρώμα ζεύξης.

Παρά τα προβλήματα, η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου MIPv6 αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται στις μέρες μας η διαχείριση της κινητικότητας στα πλαίσια του Διαδικτύου αλλά και στα All-IP συστήματα ασύρματων/κινητών επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό, στην πλειονότητά τους οι ερευνητικές προσπάθειες σήμερα, εστιάζονται στην εύρεση λύσεων και την ανάπτυξη *προηγμένων* μηχανισμών, οι οποίοι από τη μία να στηρίζονται στο βασικό πλαίσιο κινητικότητας που παρουσιάζει το MIPv6 για την διαχείριση κινητικότητας σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά από την άλλη να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που αυτό παρουσιάζει στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Σε αυτό το πλαίσιο, στον οργανισμό IETF αναπτύσσονται μηχανισμοί οι οποίοι προσπαθούν να περιορίσουν την καθυστέρηση που υπεισέρχεται στην διαδικασία αποκατάστασης της επικοινωνίας που ακολουθεί μία διαπομπή. Στην παρούσα ενότητα συζητούνται οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί, οι στόχοι που καλούνται να καλύψουν, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Βασικός σκοπός της παρουσίασης των συγκεκριμένων μηχανισμών είναι η αποσαφήνιση των απαιτήσεων που επιβάλλονται σε αυτές και η περιγραφή του πλαισίου μέσα στο οποίο αναπτύσσονται οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, ως βασικό αντικείμενο της διατριβής, που θα ακολουθήσει (ενότητα 2.4 - Διαχείριση Κινητικότητας Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο – Mobile IP Multicast).

Εν γένει η σχεδίαση του MIPv6 (αλλά και του MIPv4) έγινε με στόχο την επίλυση του προβλήματος της *μάκρο-κινητικότητας* (*macro-mobility*), το οποίο όπως προαναφέρθηκε σχετίζεται με το γεγονός ότι η προτεινόμενη λύση είναι παγκόσμιας εμβέλειας, όπως ακριβώς και το Διαδίκτυο. Τόσο στη βιβλιογραφία όσο και στον οργανισμό IETF έχουν παρουσιαστεί, σχεδόν αμέσως μετά την εμφάνιση του πρωτοκόλλου MIPv6, ιεραρχικοί μηχανισμοί οι οποίοι αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της κινητικότητας από τη σκοπιά της *μίκρο-κινητικότητας* (*micro-mobility*). Σύμφωνα με αυτούς η κινητικότητα ενός κόμβου αντιμετωπίζεται σε δύο επίπεδα: αρχικά ως τοπικό φαινόμενο εμπλεκοντας, εφόσον αυτό είναι εφικτό, μόνο τους κόμβους της περιοχής δικτύου (*network domain*, όχι γεωγραφικής περιοχής απαραίτητα) στην οποία συνδέεται ο κινητός κόμβος. Ακόλουθα κι εφόσον η διαπομπή έχει σαν αποτέλεσμα ο κινητός κόμβος να συνδεθεί σε ένα διαφορετικό δίκτυο ευρείας περιοχής (νέα διοικητική περιοχή), η

διαπομπή αντιμετωπίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο με χρήση του MIPv6 όπως αναλύθηκε νωρίτερα. Η διαχείριση μικρο-κινητικότητας δεν σχετίζεται με την εκτέλεση των μηχανισμών υποστήριξης διαπομπής του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Βασικό μέλημα των εν λόγω μηχανισμών αποτελεί η διαχείριση της κινητικότητας σε κάθε αυτόνομο σύστημα, αποκρύπτοντας την εκτέλεση διαπομπών από την υποδομή του MIPv6, κι ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την καθυστέρηση που εισάγει η διαδικασία σηματοδότησης του τελευταίου. Αν και στη βιβλιογραφία έχει παρουσιαστεί πλειάδα μηχανισμών μικρο-κινητικότητας [57], στα πλαίσια της διατριβής αναλύεται ο κυρίαρχος εκπρόσωπός αυτής της κατηγορίας μηχανισμός μέσω του πρωτοκόλλου *Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management* (HMIPv6).

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2.2, στο δεύτερο μισό της τελευταίας δεκαετίας παρουσιάστηκαν στη βιβλιογραφία μηχανισμοί εκτέλεσης «περισσότερο» απρόσκοπτων διαπομπών. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί χρησιμοποιούν αλγόριθμους πρόγνωσης αναφορικά με την εκτέλεση διαπομπών, με στόχο την προετοιμασία της διαπομπής, υπό την έννοια ότι πραγματοποιούν προ-εγκατάσταση της απαιτούμενης πληροφορίας στο δίκτυο, και επιχειρούν την ελαχιστοποίηση των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία το κινητό δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί. Ως μεγαλύτερο βήμα εντούτοις στην ανάπτυξη μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας στις μέρες, αποτελεί η ανάπτυξη ενός μηχανισμού ο οποίος να δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης της πληροφορίας που αφορά την εκτέλεση διαπομπών στρώματος ζεύξης, και τη δια-συνεργασία των μηχανισμών των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύσσεται μία διεπαφή λογισμικού μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων, η λειτουργία του οποίου δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης προβλέψεων αναφορικά με την εκτέλεση επικείμενων διαπομπών. Με αυτόν τον τρόπο επίσης καθίσταται δυνατή η προετοιμασία του κόμβου που εκτελεί τη διαπομπή αλλά και των κόμβων του δικτύου οι οποίοι συμμετέχουν στην υποστήριξή της· για παράδειγμα προετοιμασία των HA και CN για την επικείμενη αλλαγή της CoA, ή προετοιμασία των δρομολογητών πρόσβασης για την υποδοχή ενός κόμβου ο οποίος επικοινωνεί σε κάποιο γειτονικό δίκτυο. Για το δεύτερο τρόπο σημαντικότερος αντιπρόσωπος αποτελεί η λειτουργία του πρωτοκόλλου *Fast Handovers for Mobile IPv6* (FMIPv6). Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι περισσότερο σημαντικοί μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας ή επεκτάσεις των διάφορων υπο-μηχανισμών που περιγράφηκαν νωρίτερα και εκτελούνται παράλληλα με μία διαπομπή στρώματος δικτύου. Η περιγραφή περιορίζεται στους περισσότερο σημαντικούς μηχανισμούς που απαντώνται σήμερα στη βιβλιογραφία οι οποίοι έχουν φτάσει στις μέρες μας στο επίπεδο της ανάπτυξης προτύπων στα πλαίσια του οργανισμού IETF.

2.3.3.1 Αισιόδοξη Επισήμανση Διπλότυπης Διεύθυνσης

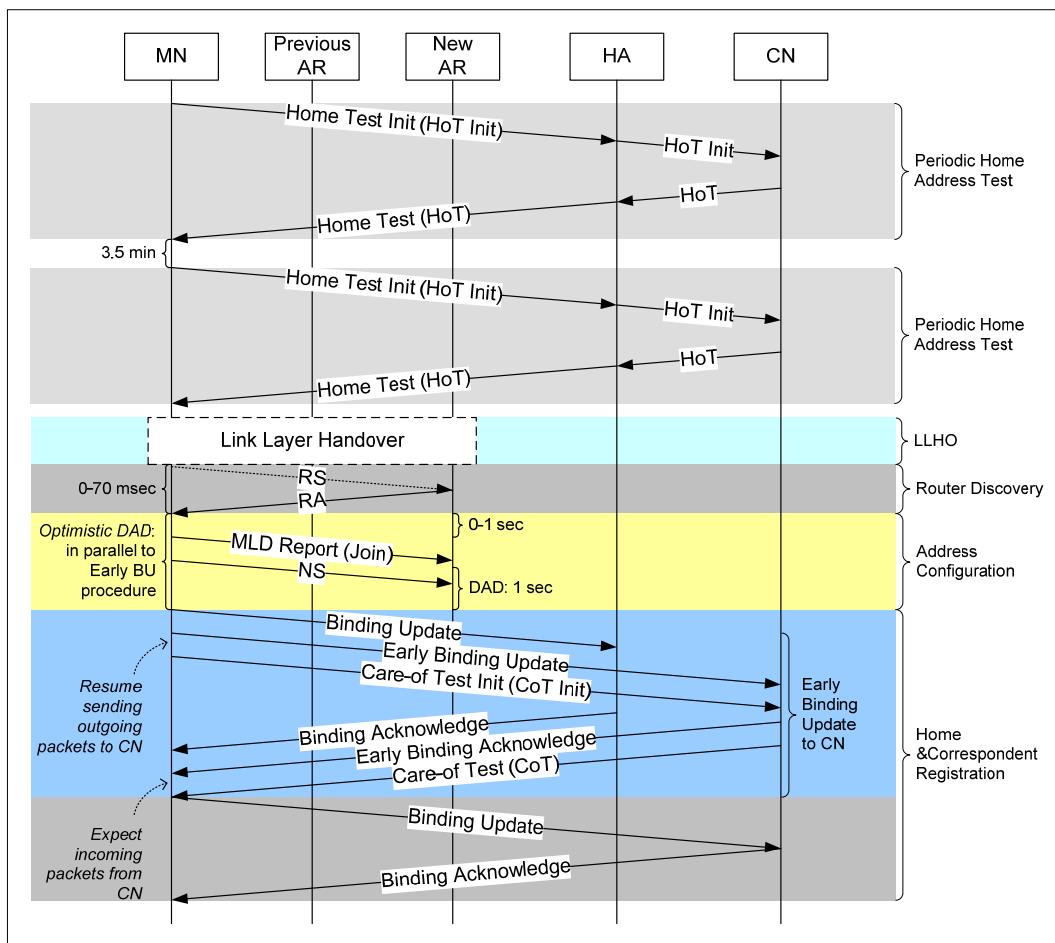
Δεδομένης της καθυστέρησης που εισάγει στη λειτουργία του μηχανισμού *Stateless Address Autoconfiguration*, η διαδικασία *Duplicate Address Detection* (DAD, βλέπε ενότητα A.2), η ομάδα εργασίας IPv6 του οργανισμού IETF πρόσφατα εξέδωσε το RFC 4429 [58], στο οποίο προδιαγράφεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης μίας IPv6 διεύθυνσης από έναν κόμβο, ακόμη κι αν δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία DAD, δηλαδή στην περίπτωση που δεν έχει επιβεβαιωθεί η μοναδικότητά της. Σύμφωνα με τον νέο μηχανισμό, επονομαζόμενο ως *Αισιόδοξη Επισήμανση*

Διπλότυπης Διεύθυνσης (Optimistic Duplicate Address Detection, ODAD), επιτρέπεται η περιορισμένη χρήση μίας διεύθυνσης (*Optimistic Address*), εφόσον η πιθανότητα δημιουργίας μίας ήδη χρησιμοποιούμενης διεύθυνσης με βάση τον μηχανισμό *Stateless Address Autoconfiguration* είναι μικρή, και εφόσον τηρούνται κάποιοι στοιχειώδεις περιορισμοί για την απ' ευθείας επικοινωνία του κόμβου με έναν οποιοδήποτε άλλο άμεσα (δηλαδή προτού επιβεβαιωθεί η μοναδικότητα της διεύθυνσης). Η χρήση του μηχανισμού ODAD έχει σαν αποτέλεσμα τον εκμηδενισμό της καθυστέρησης που εισάγει η διαδικασία *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, αφού εξαλείφεται τόσο η ανάγκη αναμονής τόσο για την αποστολή του μηνύματος MLD, μέσω του οποίου καθίσταται εφικτή η συμμετοχή του κόμβου στην ομάδα *solicited_node_multicast_address* (η καθυστέρηση που επιβάλλεται στην αποστολή του μηνύματος *Neighbor Solicitation* μέσω του οποίου υλοποιείται η διαδικασία DAD), όσο και αναμονή για την περίοδο του 1 sec η οποία πρέπει να παρέλθει προτού ένας κόμβος θεωρήσει την προτεινόμενη διεύθυνση ως μοναδική στο υποδίκτυο. Σημειώνεται ότι η προδιαγραφή του ODAD, προβλέπει ότι ένας κόμβος είναι υποχρεωμένος να ελέγξει τη μοναδικότητα μίας optimistic διεύθυνσης μέσω του μηχανισμού DAD. Απλά επιπλέον επιτρέπει την χρήση της optimistic διεύθυνσης κατά τη διάρκεια εκτέλεσής του μηχανισμού DAD.

2.3.3.2 Πρόωρες Ανανεώσεις Εγγραφών - Early Binding Updates

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Route Optimization* του IPv6, η αποκατάσταση της επικοινωνίας μεταξύ ενός κινητού κι ενός οποιουδήποτε άλλου κόμβου με σταθερή διεύθυνση στο Διαδίκτυο πραγματοποιείται μόνο εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία σηματοδότησης μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από τις φάσεις *Αναζήτησης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, οι δύο κόμβοι δεν είναι σε θέση να επικοινωνήσουν (στείλουν ή λάβουν πακέτα κίνησης) κατά την διάρκεια εκτέλεσης των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* και *Εγγραφής Ανταποκριτών*. Η τελευταία συμπεριλαμβάνει και τη διαδικασία *Return Routability*. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η *προοδευτική* προσέγγιση στην IPv6 σηματοδότηση, σύμφωνα με την οποία επιτρέπεται η παράλληλη εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* και *Return Routability* (ανταλλαγή των μηνυμάτων HoT-HoT Init και CoT-CoT Init αμέσως μετά την αποστολή του μηνύματος *Binding Update* στον HA, βλέπε ενότητα A6), το σημαντικότερο κομμάτι καθυστέρησης αφορά τους χρόνους πλήρους διαδρομής για τα απευθείας και μέσω του HA μονοπάτια που συνδέουν τον MN με τον CN. Με στόχο τη μείωση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο ο MN δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί με έναν CN, έχει προταθεί ο μηχανισμός *Πρόωρων Ανανεώσεων Εγγραφών (Early Binding Updates, EBU)* [59], [60]. Σύμφωνα με αυτόν, προτείνεται η εκτέλεση μέρους της σηματοδότησης που υλοποιεί τη διαδικασία *Return Routability* πριν την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Επιπλέον προτείνεται η τροποποίηση της διαδικασίας *Απομακρυσμένης Εγγραφής*, με στόχο την ανανέωση των αποθηκευμένων στον CN εγγραφών, πιο σύντομα. Βασικό σημείο στη λειτουργία του βελτιστοποιημένου μηχανισμού θεωρείται η χρήση της διαδικασίας *Αισιόδοξης Επισημάνσης Διπλότυπης Διεύθυνσης* που αναλύθηκε νωρίτερα. Η διαδικασία *Πρόωρων Ανανεώσεων Εγγραφών* απεικονίζεται λεπτομερώς στο Σχήμα 2 - 5.

Βασική αρχή της διαδικασίας *Πρώρων Ανανεώσεων Εγγραφών* αποτελεί το γεγονός ότι ένας κινητός κόμβος είναι σε θέση να ανανεώνει την εγκυρότητα των κλειδιών ασφαλείας με τον εκάστοτε CN, διαμέσου της διαδικασίας Home-Address Test, ανεξάρτητα από την εκτέλεση μίας διαπομπής (με βάση την προδιαγραφή του MIPv6, τα κλειδιά είναι έγκυρα για 7 min). Αυτό σημαίνει ότι ο κόμβος μπορεί να διατηρεί συνεχώς έγκυρα κλειδιά ασφαλείας εάν κι εφόσον ανταλλάσσει περιοδικά μηνύματα με τον CN. Κατά τη φάση εκτέλεσης μιας διαπομπής, μετά την εκτέλεση των διαδικασιών *Ανακάλυψης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης* μέσω της διαδικασίας *Optimistic DAD*, ο κόμβος είναι σε θέση να θεωρήσει ότι έχει ήδη έγκυρα κλειδιά ασφαλείας. Κατά συνέπεια μπορεί να ανανεώσει άμεσα και χωρίς καθυστέρηση τις αντιστοιχίσεις μεταξύ της HoA και της νέας CoA του στους HA και CN χωρίς να χρειάζεται να περιμένει την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της διαδικασίας *Return Routability*.



Σχήμα 2 - 5. Πρώρες Ανανεώσεις Εγγραφών – Early MIPv6 Binding Updates

Για να καταστεί αυτό δυνατό αποστέλλει ένα μήνυμα BU στον HA για την υλοποίηση της διαδικασίας *Οικείας Εγγραφής* κι ένα νέο μήνυμα, επονομαζόμενο ως *Early Binding Update* (EBU), στον CN για την υλοποίηση της διαδικασίας *Εγγραφής Ανταποκριτών*. Το δεύτερο δίνει τη δυνατότητα σε έναν CN να θεωρεί *έγκυρη* τη νέα CoA του κινητού για χρονικό διάστημα 10 sec μετά τη λήψη του. Για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ο κινητός κόμβος μπορεί να επικοινωνεί με τον CN χρησιμοποιώντας την «ανεπιβεβίαιτη» CoA, παρά το γεγονός ότι η διαδικασία *Εγγραφής Ανταποκριτών* δεν έχει ολοκληρωθεί. Μετά την αποστολή του μηνύματος

EBU, το κινητό θα πρέπει να προχωρήσει στην ολοκλήρωση της διαδικασίας *Return Routability* μέσω της οποίας θα πιστοποιηθεί η χρήση της νέας CoA στον CN, ενώ θα του επιστραφεί και το κατάλληλο κλειδί ασφαλείας για τη διασφάλιση των μηνυμάτων BU/BAck που θα ακολουθήσει. Η επιβεβαίωση της προσωρινής χρήσης της νέας CoA από τον CN, πραγματοποιείται μέσω του μηνύματος Early Binding Acknowledge (EBAck). Η εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας δίνει τη δυνατότητα περιορισμού του χρονικού διαστήματος στο οποίο ένας κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί, μόνο κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Αναζήτησης Δρομολογητή* ουσιαστικά¹⁴.

Στο ίδιο πλαίσιο και σε συνδυασμό με την υπηρεσία MIP (βλέπε ενότητα 2.3.2) αναφορικά με τη δυνατότητα παράδοσης ενδείξεων σχετικά με την εκτέλεση μίας επικείμενης διαπομπής του κινητού σε ένα γειτονικό δίκτυο, προτείνεται επιπλέον η ανταλλαγή των μηνυμάτων BU/BAck με τον HA αλλά των μηνυμάτων EBU/EBAck με τον CN πριν την εκτέλεση της διαπομπής (προδραστικά, *proactively*). Το κινητό εντούτοις, απαιτείται μετά την εκτέλεση της διαπομπής να ολοκληρώσει τη διαδικασία *Return Routability* (ανταλλάσσοντας τα μηνύματα Care-of Test Init/Care-of Test) και την διαδικασία *Εγγραφής Ανταποκριτών* (μέσω των μηνυμάτων BU/BAck), ενώ η προώθηση των πακέτων προς τη νέα θέση του έχει ξεκινήσει νωρίτερα. Αντίστοιχα το κινητό μπορεί αμέσως να ξεκινήσει την αποστολή των πακέτων προς τον CN. Αρνητικό σημείο στη λειτουργία του μηχανισμού *Πρόωρων Ανανεώσεων Εγγραφών* αποτελεί το γεγονός ότι για την υλοποίησή του απαιτείται εφαρμογή επιπλέον αλλαγών στη λειτουργία του εκάστοτε CN καθώς επίσης και το ότι χρησιμοποιούνται επιπλέον μηνύματα πράγμα το οποίο μπορεί να λειτουργεί ανασταλτικά δεδομένου αυξάνει το φορτίο σηματοδότησης.

2.3.3.3 Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management – HMIPv6

Το πρωτόκολλο HMIPv6 (*Ιεραρχικό Πρωτόκολλο Κινητού Διαδικτύου έκδοσης 6*) [61], αντιμετωπίζει την κινητικότητα ενός κόμβου με χρήση ενός ιεραρχικού μοντέλου, η λειτουργία του οποίο θεωρείται σε δύο ξεχωριστά μεταξύ τους επίπεδα: του τοπικού και του παγκόσμιου. Βασική αρχή του προτεινόμενου σχήματος αποτελεί η θεώρηση ότι εφόσον η κινητικότητα μπορεί να αντιμετωπιστεί στο τοπικό επίπεδο δεν υπάρχει λόγος να υπάρχει διαμεσολάβηση του ανώτερου (παγκόσμιου) επιπέδου, στο οποίο η εκτέλεση διαπομπών θα πρέπει να παραμένει διαφανής. Με αυτόν τον τρόπο εξαιρείται η ανάγκη ανταλλαγής χρονοβόρας σηματοδότησης από άκρο-σε-άκρο (δηλ. μεταξύ του MN και των CN ή HA) κατά την εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* κι *Εγγραφής Ανταποκριτών*. Η υλοποίηση του μηχανισμού που αφορά το τοπικό επίπεδο κινητικότητας αποτελεί μία μικρογραφία του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που προδιαγράφει το MIPv6, εισάγοντας γι' αυτό το σκοπό έναν νέο λειτουργικό κόμβο, επονομαζόμενο ως *Σημείο Πρόσδεσης Κινητικότητας (Mobility Anchor Point, MAP)*. Ο κόμβος MAP παίζει για το τοπικό επίπεδο τον ίδιο ρόλο τον οποίο παίζει ο κόμβος HA για το παγκόσμιο. Ο κόμβος MAP είναι ένας δρομολογητής ο οποίος διαμεσολαβεί στην προώθηση των πακέτων κίνησης που κατευθύνονται ή ξεκινούν από κινητούς κόμβους που δραστηριοποιούνται στην περιοχή ευθύνης του. Η εν λόγω προώθηση πραγματοποιείται με χρήση μίας αμφίδρομης

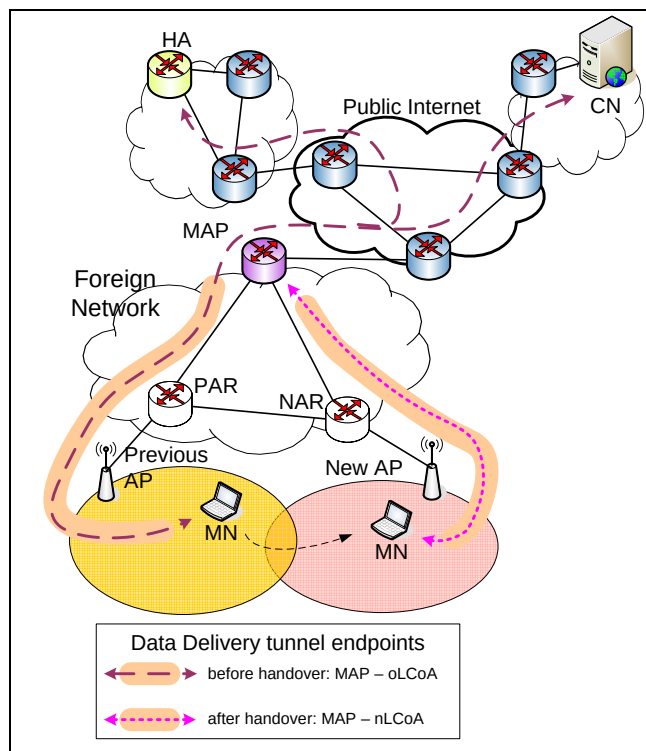
¹⁴ Στην περίπτωση που αποστέλλεται το μήνυμα RS μπορεί να περιοριστεί στο ελάχιστο, συν το χρόνο Πλήρους Διαδρομής (round trip time) μεταξύ του MN και του CN.

διόδου IP η οποία εγκαθίσταται μεταξύ του MAP και του εκάστοτε MN στην τρέχουσα θέση του εντός της περιοχής ευθύνης του, όπως ακριβώς ισχύει και στην περίπτωση του κλασικού MIPv6 για την επικοινωνία του MN με τον HA. Η εγκατάσταση της διόδου πραγματοποιείται με ανταλλαγή σηματοδοσίας μεταξύ του MN και του κόμβου MAP που εξυπηρετεί την περιοχή. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση εκτέλεσης διαπομπής εντός της περιοχής ευθύνης ενός MAP (τοπικό επίπεδο), βασική απαίτηση αποτελεί η ανανέωση της εγγραφής που τηρεί ο τελευταίος για τον κάθε MN. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται τόσο η ανάγκη επικοινωνίας από άκρο-σε-άκρο, όσο και το φορτίο σηματοδοσίας που ανταλλάσσεται για την υποστήριξη της διαπομπής. Από την άλλη, αν η διαπομπή έχει σαν αποτέλεσμα ο κινητός κόμβος να προσαρτηθεί σε ένα φυσικό υποδίκτυο το οποίο εξυπηρετείται από έναν διαφορετικό κόμβο MAP, τότε πέρα από την εγγραφή του πρώτου στον δεύτερο, απαιτείται και η χρήση του MIPv6 για την ενημέρωση των HA και CN μέσω των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* και *Εγγραφής Ανταποκριτών*.

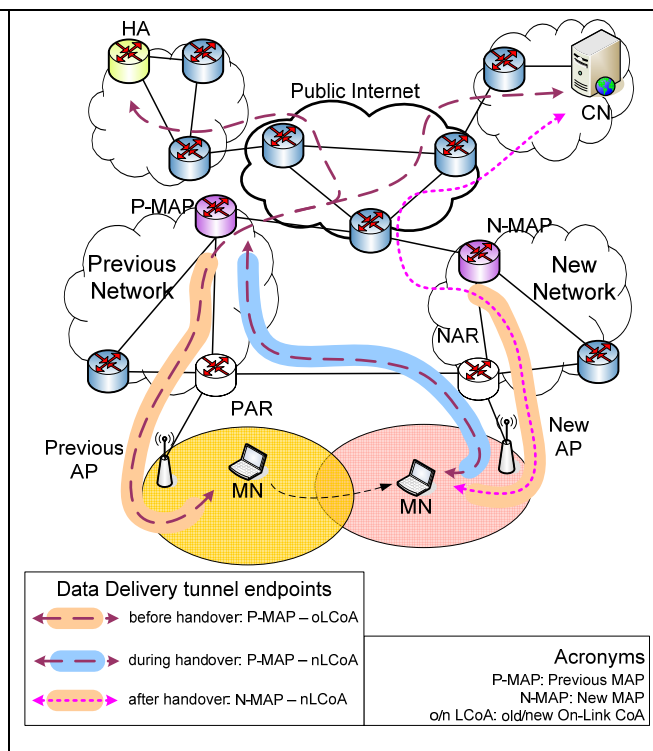
Βασικό σημείο στην αρχιτεκτονική του μηχανισμού HMIPv6 αποτελεί το γεγονός ότι η ταυτοποίηση ενός κινητού κόμβου πραγματοποιείται σε καθένα επίπεδο με χρήση διαφορετικών διευθύνσεων, διευρύνοντας με αυτόν τον τρόπο την έννοια της τρέχουσας CoA που εισήγαγε το MIPv6. Για το σκοπό αυτό ορίζονται δύο τύποι διευθύνσεων: η διεύθυνση στο επίπεδο ζεύξης (on-Link Care-of Address, LCoA), και η διεύθυνση στο επίπεδο περιοχής/περιφέρειας (regional Care-of Address, RCoA). Η πρώτη ταυτοποιεί τον MN στην περιοχή ευθύνης του εκάστοτε MAP, αντιστοιχεί στη τρέχουσα θέση του κινητού και αναγνωρίζει το φυσικό υποδίκτυο στο οποίο είναι προσδεμένο. Η δεύτερη αντιστοιχεί στην CoA όπως αυτή έχει οριστεί στα πλαίσια του MIPv6 οπότε ταυτοποιεί τον MN σε παγκόσμιο επίπεδο και αναγνωρίζει την αυτόνομη περιοχή δικτύου πρόσβασης στην οποία βρίσκεται. Ουσιαστικά ο ορισμός της RCoA στο πλαίσιο του HMIPv6 και της CoA στο γενικό πλαίσιο του MIPv6, είναι ταυτόσημος.

Το Σχήμα 2 - 6 και το Σχήμα 2 - 7 παρουσιάζουν τη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα κίνησης κατά την εκτέλεση διαπομπών στην περίπτωση κατά την οποία η διαπομπή προκαλεί τη μετακίνηση ενός κόμβου εντός της περιοχής ευθύνης ενός κόμβου MAP (διαπομπή Intra-MAP) ή από την άλλη έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση σε μία περιοχή που βρίσκεται υπό την ευθύνη ενός διαφορετικού νέου MAP (διαπομπή Inter-MAP). Η επικοινωνία ενός κινητού κόμβου με έναν οποιοδήποτε κόμβο του Διαδικτύου πραγματοποιείται με χρήση της RCoA. Όπως προαναφέρθηκε η προώθηση των πακέτων κίνησης πραγματοποιείται με χρήση μίας αμφίδρομης Διόδου IP. Η Δίοδος έχει σαν άκρα την διεύθυνση του MAP και την εκάστοτε LCoA του κινητού κόμβου. Κατά την πρόσδεση ενός MN σε ένα δίκτυο στο οποίο υποστηρίζεται το πρωτόκολλο HMIPv6, θα πρέπει να καθοριστούν τόσο η LCoA όσο και η RCoA. Η πρώτη ρυθμίζεται διαμέσου της λειτουργίας των μηχανισμών του πρωτοκόλλου Neighbor Discovery for IPv6 και με βάση τα περιεχόμενα προθήματα διευθύνσεων (address prefixes) των τυπικών μηνυμάτων Router Advertisement που εκπέμπονται στο φυσικό δίκτυο στο οποίο συνδέεται ο MN από τον εκάστοτε *Δρομολογητή Πρόσβασης* AR. Για τη ρύθμιση της RCoA το πρωτόκολλο HMIPv6 προτείνει την επέκταση των παραπάνω μηνυμάτων RA (Router Advertisement), ώστε να περιλάβουν πληροφορία αναφορικά με την λειτουργία κόμβων MAP στην περιοχή δικτύου στην οποία αντιστοιχούν. Στα μηνύματα περιέχεται πλέον η διεύθυνση του κόμβου MAP, αλλά και το

πρόβλημα μέσω του οποίου ο MN μπορεί να *αυτο-ρυθμίσει* την RCoA του. Κατά την εκτέλεση μίας διαπομπής εντός της περιοχής ευθύνης ενός MAP, η μόνη απαίτηση για την διατήρηση του μονοπατιού επικοινωνίας είναι η αλλαγή της διεύθυνσης LCoA από την πλευρά του MN που ταυτοποιεί την θέση του κινητού στην περιοχή του MAP, και η ανανέωση της εγγραφής που είναι αποθηκευμένη στον αντίστοιχο MAP που εξυπηρετεί το κινητό. Η τελευταία διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του εκάστοτε άκρου της διόδου IP μέσω της οποίας προωθείται η κίνηση από και προς τον κινητό.



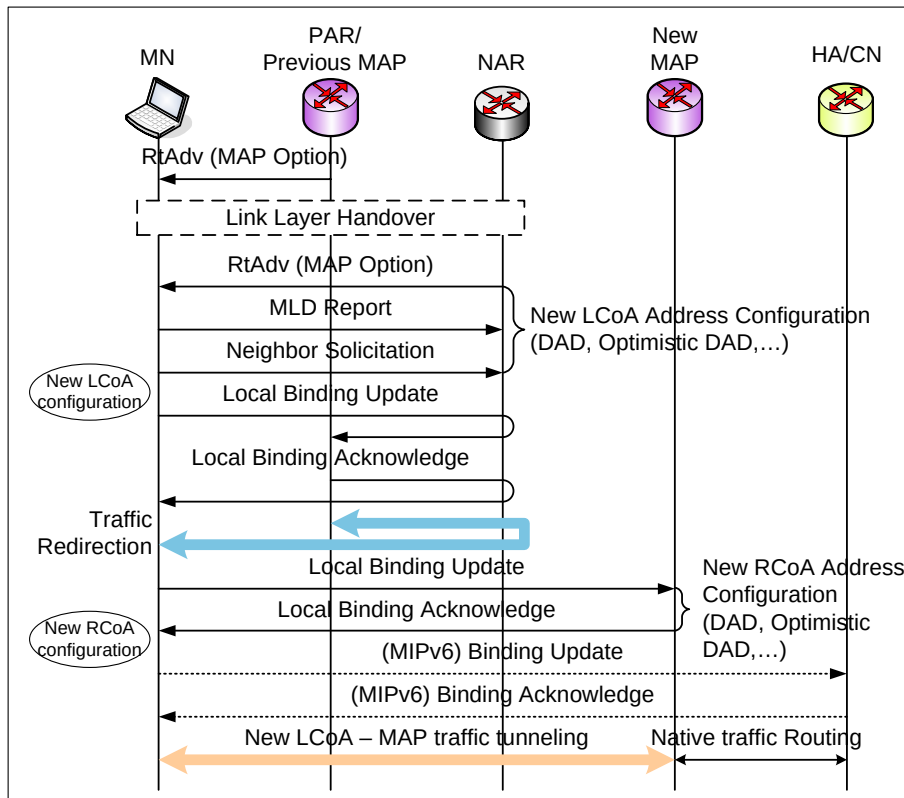
Σχήμα 2 - 6. Παράδοση πακέτων κίνησης με χρήση του HMIPv6· Intra-MAP Handover



Σχήμα 2 - 7. Παράδοση πακέτων κίνησης με χρήση του HMIPv6· Inter-MAP Handover

Για την εκτέλεση της διαδικασίας σηματοδότησης, η οποία ονομάζεται *Τοπική Ανανέωση Εγγραφών* (*Local Binding Update, LBU*), χρησιμοποιούνται τα μηνύματα *Ανανέωσης Τοπικής Εγγραφής* (*Local Binding Update, LBU*) και *Επιβεβαίωσης Ανανέωσης Τοπικής Εγγραφής* (*Local Binding Acknowledge, LBAck*). Τα μηνύματα αυτά είναι αντίστοιχα των μηνυμάτων BU και BAck του MIPv6. Το Σχήμα 2 - 8 παρουσιάζει τη διαδικασία σηματοδότησης στην περίπτωση που η εκτελούμενη διαπομπή έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του κόμβου MAP. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η διαδικασία ξεκινά από το σημείο στο οποίο ένας κινητός κόμβος αντιλαμβάνεται μέσω των τυπικών διαδικασιών του IPv6 (*Αναζήτησης Δρομολογητή, Επισήμανσης Μετακίνησης*) ότι έχει διαπεμφθεί σε ένα νέο δίκτυο, μέσω της λήψης ενός μηνύματος RA. Το συγκεκριμένο μήνυμα είναι πλέον εμπλουτισμένο με την πληροφορία που αφορά και την ταυτοποίηση του κόμβου MAP (MAP Option) που αφορά την περιοχή του δικτύου στην οποία κινείται. Μετά την επιβεβαίωση της μετακίνησης του MN στο νέο υποδίκτυο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η *Ρύθμιση της Νέας Διεύθυνσης LCoA*. Αυτή πραγματοποιείται μέσω της τυπικής διαδικασίας *Stateless Address Autoconfiguration* και περιλαμβάνει, είτε την εκτέλεση του μηχανισμού DAD

είτε του μηχανισμού Optimistic DAD που αναλύθηκε νωρίτερα. Κατόπιν της *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, το κινητό είναι υποχρεωμένο να επικοινωνήσει, μέσω του μηνύματος LBU, στον τρέχοντα κόμβο MAP που το εξυπηρετεί, τη νέα LCoA του, ώστε ο τελευταίος να πραγματοποιήσει την κατάλληλη δρομολόγηση των πακέτων που καταφθάνουν για την RCoA του κινητού, προς τη νέα θέση του. Στην περίπτωση που η εκτελούμενη διαπομπή δεν είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του κόμβου MAP, η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη λήψη του LBAck.



Σχήμα 2 - 8. Σηματοδοσίας κατά την εκτέλεση διαπομπής με χρήση του HMIPv6

Στην περίπτωση που η διαπομπή έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του κόμβου MAP, εκτός από την LCoA θα πρέπει να αλλάξει η διεύθυνση RCoA του κινητού. Αυτό σημαίνει ότι αφ' ενός θα πρέπει να ενημερωθεί ο νέος κόμβος MAP για την αντιστοίχιση των νέων διευθύνσεων LCoA και RCoA, ενώ επίσης απαιτείται και η ενημέρωση τόσο του HA όσο και των CN με τους οποίους επικοινωνεί το κινητό για την διαπομπή. Για το σκοπό αυτό το κινητό, έχοντας ρυθμίσει από τα προηγούμενα την διεύθυνση LCoA προχωρά στη ρύθμιση της διεύθυνσης RCoA συνδυάζοντας το επίθημα που χρησιμοποίησε στην LCoA και το πρόθημα που του έγινε γνωστό μέσω του πεδίου MAP Option του μηνύματος RA που έλαβε μετά τη πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο. Στη συνέχεια ο MN κατασκευάζει ένα μήνυμα LBU το οποίο και αποστέλλει προς το νέο MAP που τον εξυπηρετεί, στο οποίο εισάγει τόσο την τρέχουσα διεύθυνση LCoA όσο και την προτεινόμενη διεύθυνση RCoA. Ο MAP αφού επιβεβαιώσει τη μοναδικότητα της προτεινόμενης RCoA επιστρέφει στο MN το μήνυμα LBAck μέσω του οποίου το ενημερώνει για την επιτυχή αντιστοίχιση της τοπικής διεύθυνσης με την παγκόσμια. Στη συνέχεια ακολουθεί η εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* κι *Εγγραφής Ανταποκριτών* όπως ακριβώς προβλέπει το MIPv6.

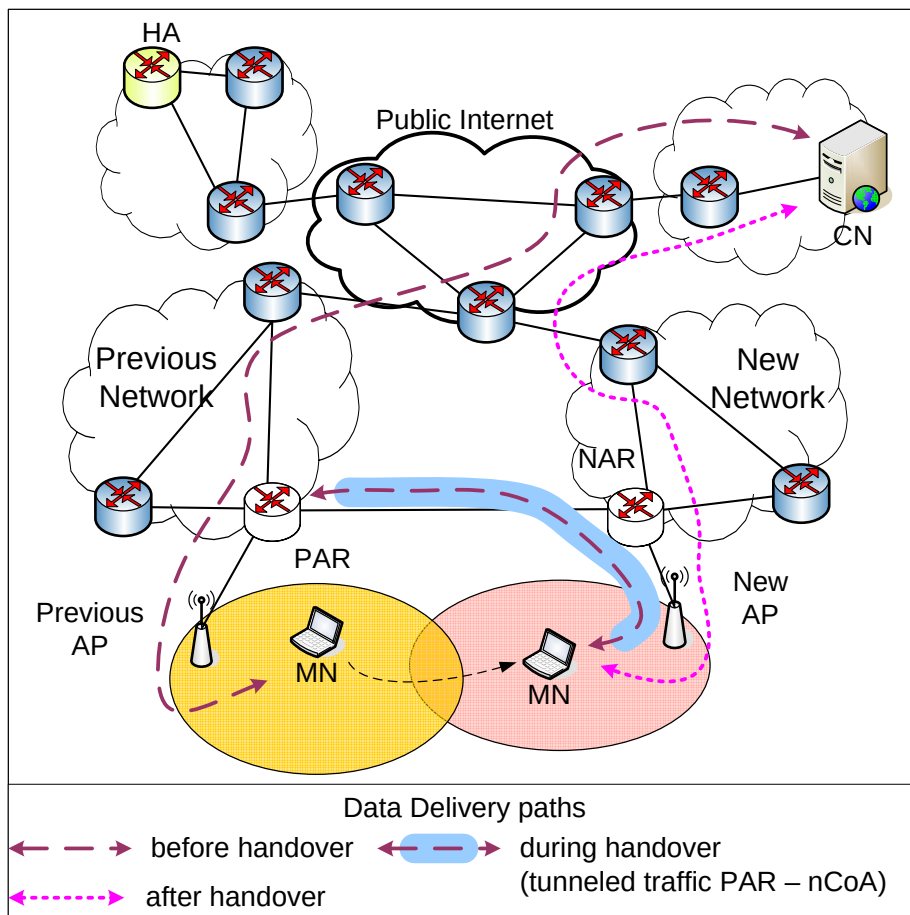
Το βασικό πλεονέκτημα από τη λειτουργία του μηχανισμού HMIPv6 απορρέει από το γεγονός μέσω της εφαρμογής του παρέχεται η δυνατότητα αντιμετώπισης της κινητικότητας ως επί το πλείστον σε τοπικό επίπεδο. Σαν αποτέλεσμα ελαχιστοποιείται η ανάγκη ανταλλαγής μηνυμάτων σηματοδότησης από άκρο σε άκρο πράγμα το οποίο αποτελεί σημαντική πηγή καθυστέρησης στην όλη διαδικασία. Από την άλλη αρνητικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι για την υποστήριξη της απαιτείται η ανάπτυξη ιεραρχικών δικτύων (αν και το πρωτόκολλο προβλέπει τη εφαρμογή του και σε μη ιεραρχικές τοπολογίες δικτύων), στα οποία η λειτουργία του κόμβου MAP αποτελεί νευραλγικό σημείο γύρω από το οποίο όχι μόνο συγκεντρώνεται η κίνηση, αλλά επίσης αυξάνει και η εξάρτηση σε περιπτώσεις βλαβών και αδυναμίας παροχής υπηρεσίας (single point of failure). Επιπρόσθετα σημαντικό είναι και το γεγονός ότι ο μηχανισμός αν και αντιμετωπίζει την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση (για την πλειάδα των περιπτώσεων) δεν λαμβάνει καμία πρόνοια αναφορικά με την εκτέλεση των τοπικών διαδικασιών για την εκτέλεση των διαδικασιών *Αναζήτησης Δρομολογητή, Επισήμανσης Μετακίνησης και Ρύθμισης Διεύθυνσης*. Συνεπώς για την εύρυθμη λειτουργία του απαιτεί την χρήση των προηγμένων μηχανισμών τουλάχιστο για την τελευταία (δεδομένου ότι για τις πρώτες οι ρυθμίσεις του πρωτοκόλλου MIPv6 είναι επαρκείς) ώστε να εξαλειφθεί η καθυστέρηση που εισάγει η εκτέλεση της διαδικασίας DAD τουλάχιστο.

Αρχιτεκτονικά το πρωτόκολλο HMIPv6 παρουσιάζει ένα μηχανισμό ο οποίος λειτουργεί μεταδραστικά ως προς την εκτέλεση της διαπομπής, δηλαδή προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την επίδραση που η διαπομπή μπορεί να έχει στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας αφού ήδη έχει εκτελεστεί. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης και το γεγονός ότι η λειτουργία του HMIPv6 στηρίζεται στην χρήση ενός μόνιμου μηχανισμού προώθησης κίνησης μέσω της διόδου IP, η οποία αν και για το ενσύρματο κομμάτι του δικτύου μπορεί να είναι αμελητέα για το ασύρματο μπορεί να λειτουργήσει ανασταλτικά δεδομένης της αύξησης της επιπρόσθετη μεταφερόμενης πληροφορίας (overhead). Ποσοτικά αυτό αντιστοιχεί στη μείωση της χωρητικότητας ενός ασύρματου δικτύου ή στην χειροτέρευση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Για παράδειγμα για την περίπτωση μίας εφαρμογής VoIP με ρυθμό 12kbps στο επίπεδο εφαρμογής, η αύξηση του μεταφερόμενου φορτίου στο επίπεδο δικτύου είναι της τάξης του 20% περίπου, ενώ για μία εφαρμογή streaming video με φορτίο 400kbps (35 frames per sec) σε ένα σύστημα WLAN η αύξηση είναι της τάξης του 4-5%.

2.3.3.4 Fast Handovers for Mobile IPv6 – FMIPv6

Οι προηγμένοι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, έδωσαν τη δυνατότητα βελτίωσης της επίδοσης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μίας διαπομπής, και της άμβλυνσης του χαρακτηριστικού «μάκρο-κινητικότητας» του MIPv6. Εντούτοις κανείς από τους μηχανισμούς δεν καθιστά δυνατή την εκτέλεση *απρόσκοπτων* διαπομπών με την αυστηρή έννοια, δηλαδή διαπομπών οι οποίες να εκτελούνται με μεγάλη ταχύτητα και παρουσιάζουν μηδενική απώλεια πακέτων. Η ομάδα εργασίας MIPSHOP (MIPv6 Signaling and Handoff Optimization [62]) του οργανισμού IETF, ασχολείται μεταξύ άλλων και με την προτυποποίηση ενός εξελιγμένου μηχανισμού, ο οποίος θα καταστήσει εφικτή τη διαπομπή ενός κόμβου με τέτοιο τρόπο να περιορίζεται στο ελάχιστο η επίδραση που μπορεί να έχουν οι διάφορες πηγές

καθυστερήσης που σχετίζονται με τις βασικές διαδικασίες του IPv6 που συζητήθηκαν νωρίτερα. Με άλλα λόγια περιορίζεται η εξάρτηση του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας από την εκτέλεση τόσο των IPv6 διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατόπιν της διαπομπής (*Επισήμανση Μετακίνησης, Ανακάλυψη Δρομολογητή και Ρύθμιση Διεύθυνσης*), κι επίσης από τη βραχυπρόθεσμη πρόοδο εκτέλεσης των διαδικασιών σηματοδότησης του MIPv6 (*Οικεία Εγγραφή και Εγγραφή Ανταποκριτών*). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός υλοποιείται μέσω του λεγόμενου *Κινητού Πρωτοκόλλου Διαδικτύου έκδοσης 6 για υποστήριξη Ταχέων Διαπομπών* (*Fast Handovers for MIPv6, FMIPv6*) και περιγράφεται στο RFC 4068 [63]. Σύμφωνα με αυτόν, ένα κινητός κόμβος είναι σε θέση, εκμεταλλευόμενος πληροφορία που σχετίζεται με την πρόοδο/εξέλιξη μίας διαπομπής στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, να ενεργήσει «προ-δραστικά» (*proactively*) σε σχέση με αυτή, δηλαδή να ξεκινήσει την προετοιμασία της πριν την εκτέλεσή της, σε ό,τι αφορά στην εκτέλεση των βοηθητικών διαδικασιών του IPv6, να προ-εγκαταστήσει την απαιτούμενη πληροφορία στο δίκτυο, να εκμεταλλευτεί διαθέσιμη πληροφορία από το στρώμα ζεύξης δεδομένων αναφορικά με την πρόσδεση σε ένα νέο δίκτυο και να εξαλείψει κάθε φαινόμενο αδυναμίας επικοινωνίας κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής των μηνυμάτων σηματοδότησης του MIPv6 που ακολουθεί.



Σχήμα 2 - 9. Παράδοση πακέτων κίνησης με χρήση του πρωτοκόλλου FMIPv6

Το Σχήμα 2 - 9 παρουσιάζει τη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα προς ένα κινητό κόμβο πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης, όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο FMIPv6. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, κατά τη διάρκεια

εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος δικτύου, εγκαθίσταται μία δίοδος IP (IP tunnel), διαμέσου της οποίας μεταφέρονται όλα τα πακέτα που καταφθάνουν ή αναχωρούν στον ή από το διαπεμπόμενο κινητό κόμβο αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο ο τελευταίος είναι σε θέση να επικοινωνεί με τους *Κόμβους Ανταποκριτές* CN, μέχρις ότου ολοκληρωθεί η εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* και *Εγγραφής Ανταποκριτών* του MIPv6. Όλες αυτές οι δραστηριότητες υλοποιούνται με τη ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ του κινητού και τον δρομολογητών πρόσβασης των ασύρματων δικτύων στα οποία συνδέεται.

Πιο συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο FMIPv6 έρχεται να καλύψει από τη μία το κενό της αδυναμίας άμεσης ρύθμισης διεύθυνσης από ένα κινητό κόμβο, λόγω της εκτέλεσης τόσο των μηχανισμών *Ανακάλυψης Δρομολογητή* και *Επισήμανσης Μετακίνησης*, και από την άλλη την αδυναμία επικοινωνίας του κόμβου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος δικτύου, λόγω των περιορισμών στη λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv6¹⁵. Η λειτουργία του FMIPv6 θεωρεί δεδομένη την παράδοση ενδείξεων αναφορικά με την πρόοδο της εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας ενός ευφυούς μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας. Εντούτοις βασική προϋπόθεση αποτελεί η πραγματοποίηση προβλέψεων αναφορικά με την εκτέλεση διαπομπών στο εγγύς μέλλον. Επιπλέον το πρωτόκολλο προβλέπει τη χρήση ενός μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης και προώθησης πακέτων (με χρήση του τυπικού μηχανισμού ενθυλάκωσης πακέτων του IPv6, IP tunnel) για τα ρεύματα κίνησης που ξεκινούν ή καταλήγουν στον κινητό κόμβο που εκτελεί τη διαπομπή, για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο επιτελείται η ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδότησης του MIPv6 στο οποίο όπως προαναφέρθηκε δεν είναι εφικτή η επικοινωνία.

Το FMIPv6 χρησιμοποιείται επικουρικά ως προς το βασικό MIPv6 λύνοντας το σύνολο των προβλημάτων του, με στόχο την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών με την αυστηρή έννοια. Στο πλαίσιο αυτό η λειτουργία του επιτελείται σε δύο φάσεις· αρχικά αντιμετωπίζεται το πρόβλημα *μίκρο*- κινητικότητας, το οποίο σχετίζεται με την διατήρηση της επικοινωνίας στο τοπικό επίπεδο και εμπλέκει τους κόμβους που συμμετέχουν στην υποστήριξη της διαπομπής. Στη συνέχεια αποκαθίσταται η επικοινωνία με βάση τους περιορισμούς της *μάκρο*- διάστασης του προβλήματος, όπως ακριβώς επιβάλλει το πρωτόκολλο MIPv6. Με βάση την σχεδίαση του FMIPv6, όλη η λειτουργικότητα είναι συγκεντρωμένη στον κινητό κόμβο (Mobile Node, MN) και στους *Δρομολογητές Πρόσβασης* (Access Router, AR) που εμπλέκονται στην διαδικασία, δηλαδή τον AR που εξυπηρετούσε το κινητό πριν τη διαπομπή (Previous AR, PAR) και τον AR που αναμένεται να τον υποδεχθεί στο νέο δίκτυο (New AR, NAR). Ιδιαίτερα για τους AR προβλέπεται διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με το αν ο εκάστοτε AR που εμπλέκεται στις διαδικασίες είναι ο προηγούμενος της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων ή ο νέος. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η ανάγκη εγκατάστασης επιπλέον υποδομής σε υλικό και λογισμικό για τη διαχείριση της κινητικότητας, όπως για παράδειγμα απαιτεί η δημιουργία μίας ιεραρχικής τοπολογίας που προτείνεται από το πρωτόκολλο HMIPv6. Επιπρόσθετα παρέχεται η δυνατότητα

¹⁵ Ο κινητός κόμβος δεν μπορεί να επικοινωνήσει με τους HA και CN εάν δεν έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση των διαδικασιών *Εγγραφής* του MIPv6 (βλέπε ενότητα 2.3.1.2). Τόσο ο HA όσο και οι CN απορρίπτουν τα πακέτα για τα οποία δεν βρίσκουν μία έγκυρη εγγραφή στους πίνακες αντιστοίχισης (Binding Caches) που συντηρούν, ενώ επιπλέον στην κατεύθυνση προς το κινητό συνεχίζουν να αποστέλλουν τα πακέτα προς την προηγούμενης της διαπομπής διεύθυνση.

αντιμετώπισης της διαπομπής σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή ακριβώς στην περιοχή του δικτύου που υποδέχεται και από την οποία αποχωρεί ο κινητός κόμβος, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη εμπλοκής επιπλέον κόμβων στη διαδικασία.

Με βάση τη σημασιολογία που ακολουθείται στο [63] και την ορολογία που παρουσιάζεται στο [42], στα πλαίσια της διατριβής μία διαπομπή στρώματος δικτύου θα χαρακτηρίζεται ως *προ-δραστική* (predictive) ή αλλιώς *προγιγνωσκομένη*, στην περίπτωση κατά την οποία επιτελείται προετοιμασία της πριν την εκτέλεση της αντίστοιχης διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Η έννοια της προετοιμασίας αφορά κυρίως την εκτέλεση ενός καταναμεημένου στο δίκτυο αλγορίθμου, μέσω του οποίου πραγματοποιείται πρόγνωση σχετικά με το ενδεχόμενο εκτέλεσης μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης στο εγγύς μέλλον (της τάξης των δεκάτων του sec). Επιπλέον πραγματοποιείται ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης και προ-εγκατάσταση πληροφορίας στους κόμβους του δικτύου. Ο συγχρονισμός των εκτελούμενων διαδικασιών θεωρεί τη λειτουργία ενός μηχανισμού ανταλλαγής πληροφοριών-ενδείξεων (γεγονότων/triggers) μεταξύ του στρώματος δικτύου στο οποίο ουσιαστικά λειτουργεί το FMIPv6, και του στρώματος ζεύξης δεδομένων το οποίο διαχειρίζεται την εκτέλεση της αντίστοιχης διαπομπής. Οι ανταλλασσόμενες πληροφορίες αφορούν κατά βάση τη μεταβολή της ποιότητας των εγκατεστημένων συνδέσεων στρώματος ζεύξης, αντίστοιχα με όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.3.2 (Αλληλεπίδραση στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων – Media Independent Handovers). Στα πλαίσια της διατριβής και χωρίς βλάβη της γενικότητας¹⁶ η λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 θεωρεί δεδομένη την λειτουργία του προσφερόμενου από το πρωτόκολλο IEEE 802.21 μηχανισμού για την παράδοση πληροφοριών σε σχέση με την (επικείμενη) εκτέλεση διαπομπών στρώματος ζεύξης δεδομένων.

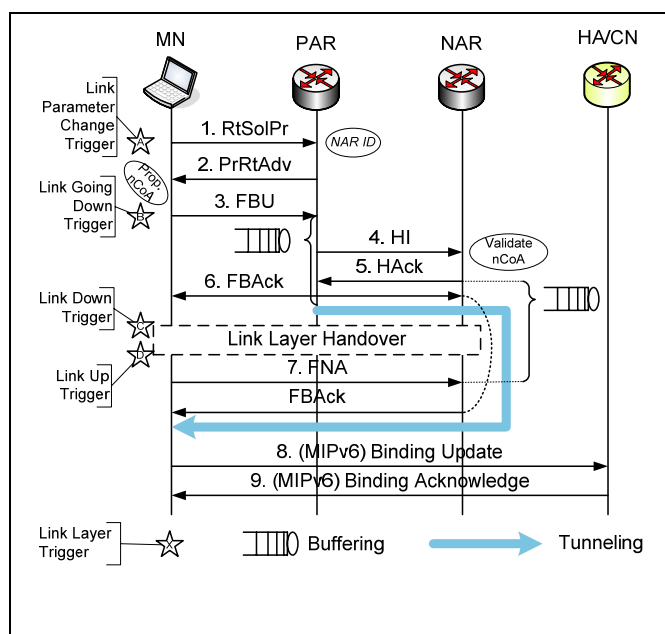
Εξαιτίας της αδυναμίας των προαναφερθέντων αλγορίθμων να εκτιμήσουν στο ακέραιο την κατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το τερματικό, η εγκυρότητα των προβλέψεων αναφορικά με την εκτέλεση διαπομπών δεν είναι απόλυτα εγγυημένη. Για την περίπτωση κατά την οποία η διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής στρώματος δικτύου δεν πραγματοποιείται ή ολοκληρώνεται επιτυχώς πριν την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, το πρωτόκολλο FMIPv6 μπορεί να λειτουργήσει *μετα-δραστικά* (reactive). Κατά τη μετα-δραστική λειτουργία όλες οι διαδικασίες που αφορούν τη Ρύθμιση Διεύθυνσης και την προώθηση της κίνησης προς και από αυτό, πραγματοποιούνται μετά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημαντικό όφελος κατά τη λειτουργία του FMIPv6 αποκομίζεται κατά την προ-δραστική λειτουργία του. Η μετα-δραστική εφαρμόζεται υποστηρικτικά λόγω της αδυναμίας εκτέλεσης της διαδικασίας σηματοδότησης στο σύνολο των περιπτώσεων. Τα ακόλουθα σχήματα, Σχήμα 2 - 10 και Σχήμα 2 - 11, παρουσιάζουν την σηματοδότηση όταν εφαρμόζεται ο *προ-δραστικός* και *μετα-δραστικός* τρόπος λειτουργίας του FMIPv6 αντίστοιχα.

Η λειτουργία του μηχανισμού που υλοποιεί το πρωτόκολλο FMIPv6 στηρίζεται σε δύο βασικές παραδοχές: πρώτον, πριν την εκτέλεση οποιασδήποτε πράξης για την υποστήριξη μίας

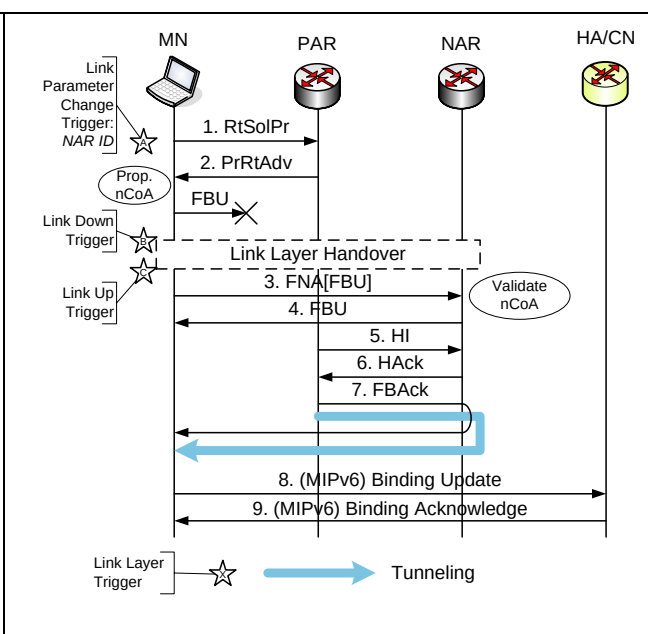
¹⁶ Η σχεδίαση της διεπαφής και του πρωτοκόλλου MIP είναι αρκετά γενική. Σημειώνεται επίσης ότι η διαδικασία προτυποποίησής της έχει προχωρήσει αρκετά ώστε η χρήση της στα πλαίσια της διατριβής να θεωρείται αρκετά ασφαλής.

επικείμενης διαπομπής ενός κινητού σε ένα γειτονικό δίκτυο, θα πρέπει να υπάρχει αφενός επαρκής βεβαιότητα αναφορικά με την εκτέλεσή της κι αφετέρου επαρκής πληροφορία που σχετίζεται με το δίκτυο στο οποίο επίκειται να διαπεμφθεί το κινητό. Δεύτερον κάθε πράξη αναφορικά με την προετοιμασία και εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος δικτύου είναι απολύτως ανεξάρτητη από αυτές που εκτελούνται σε άλλα στρώματα (δηλ. ΜΙΗ ή στρώμα ζεύξης). Με αυτόν τον τρόπο το πρωτόκολλο μπορεί να επανα-συγχρονίζει τις διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου με βάση τον προ-δραστικό τρόπο μπορεί να χωριστεί στις εξής φάσεις:

1. Συλλογή πληροφοριών αναφορικά με γειτονικά δίκτυα
2. Προετοιμασία διαπομπής στρώματος δικτύου (ρύθμιση διεύθυνσης, προώθηση κίνησης)
3. Εκτέλεση διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων
4. Πρόσδεση στο νέο δίκτυο (αποκατάσταση επικοινωνίας σε τοπικό επίπεδο)
5. Σηματοδότηση ΜΙΡv6 (αποκατάσταση επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο, δηλ. με ΗΑ και CN)



Σχήμα 2 - 10. Σηματοδότηση FMIPv6 – Predictive Mode



Σχήμα 2 - 11. Σηματοδότηση FMIPv6 – Reactive Mode

Όπως προαναφέρθηκε, για την προετοιμασία της διαδικασίας υποστήριξης μίας διαπομπής με χρήση του FMIPv6, ένας κινητός κόμβος είναι υποχρεωμένος να έχει πληροφορίες αναφορικά με τη λειτουργία γειτονικών δικτύων, στη γεωγραφική περιοχή που κινείται. Οι εν λόγω πληροφορίες αφορούν την ταυτοποίηση των δικτύων στο στρώμα ζεύξης δεδομένων και το στρώμα δικτύου, και συλλέγονται από τον κινητό κόμβο πριν την εκτέλεση οποιασδήποτε διαδικασίας που αφορά την προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου από το FMIPv6. Βασική προϋπόθεση για την λειτουργία του FMIPv6 αποτελεί η κατασκευή και συνεχής ανανέωση ενός πίνακα αντιστοίχισης ο οποίος περιέχει τα αναγνωριστικά των στρωμάτων ζεύξης δεδομένων και δικτύου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συντήρηση της συγκεκριμένης

πληροφορίας δεν είναι εν γένει διαθέσιμη από κάποιο ήδη υπάρχοντα μηχανισμό του IPv6. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ότι χρησιμοποιείται ένας ανεξάρτητος μηχανισμός του στρώματος ζεύξης δεδομένων, επονομαζόμενος στα πλαίσια της διατριβής ως μηχανισμός *Ανακάλυψης Σημείων Πρόσβασης* (*Access Point Discovery*). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα συλλογής των αναγνωριστικών των ασύρματων δικτύων στα οποία συνδέονται οι κινητοί κόμβοι κι επιστρέφει κατάλληλα γι' αυτό το σκοπό αναγνωριστικά των δικτύων. Ως αναγνωριστικά χρησιμοποιούνται οι διευθύνσεις στρώματος ζεύξης δεδομένων και αντίστοιχα η IP διεύθυνση του AR που το εξυπηρετεί. Συνάμα είναι δυνατό να επιστρέφονται πληροφορίες αναφορικά με την ποιότητα των συνδέσεων που μπορούν να εγκατασταθούν με το εκάστοτε AP. Η εκτέλεση της διαδικασίας AP Discovery σε πολλές περιπτώσεις ενδέχεται να προκαλέσει αδυναμία επικοινωνίας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, εφόσον πραγματοποιείται σάρωση της περιοχής του ραδιοφάσματος ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση των ασύρματων τοπικών δικτύων με χρήση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 [37]. Για το λόγο αυτό ο σκανδαλισμός για την εκτέλεσή της θα πρέπει να πραγματοποιείται μόνο στις περιπτώσεις στις οποίες υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις με βάση κάποια αυστηρά ποιοτικά κριτήρια (π.χ. η χειροτέρευση της ποιότητας της εγκατεστημένης σύνδεσης).

Με βάση τον ορισμό της υπηρεσίας MIH (βλέπε ενότητα 2.3.2 και [54], [55]), η έκδοση του γεγονότος *Parameter Link Change*, αποκαλύπτει στο στρώμα δικτύου ότι η ποιότητα της εγκατεστημένης σύνδεσης έχει χειροτερεύσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να δικαιολογείται η έναρξη της διαδικασίας προετοιμασίας μίας επικείμενης διαπομπής. Για να πραγματοποιηθεί αυτό εντούτοις θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση της διαδικασίας *Ανακάλυψης Σημείων Πρόσβασης* όπως αναλύθηκε νωρίτερα. Στην πράξη, ένας κινητός κόμβος είναι απαραίτητο να ενημερωθεί αναφορικά με το αν η διαπομπή του σε έναν γειτονικό σταθμό βάσης, θα προκαλέσει ή όχι την εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος δικτύου, οπότε στην θετική περίπτωση να σκανδαλίσει τη διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής. Στην αρνητική περίπτωση δεν απαιτείται η ανάληψη κάποιας επιπλέον δράσης, εφόσον ο μηχανισμός στρώματος ζεύξης δεδομένων θα είναι σε θέση να υποστηρίξει τη διαπομπή του τερματικού. Το πρωτόκολλο FMIPv6 προβλέπει τη χρήση ενός μηχανισμού *πληρεξουσιοδότησης* (proxy) των AR, μέσω του οποίου επιτελούνται όλες οι απαιτούμενες διαδικασίες προετοιμασίας της διαπομπής στρώματος δικτύου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συλλογή πληροφοριών για τα γειτονικά δίκτυα, μπορεί να εκτελεστεί και με τη συνδρομή διαφορετικών πρωτοκόλλων, όπως το CARD (Candidate Access Router Discovery) [64].

Η πρώτη φάση της λειτουργίας του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που προδιαγράφεται από το FMIPv6 μέσω του μηχανισμού *πληρεξουσιοδότησης*, υλοποιείται με χρήση δύο μηνυμάτων· του μηνύματος *Router Solicitation for Proxy* (RtSolPr) και του *Proxy Router Advertisement* (PrRtAdv). Αρχικά ένας MN αποστέλλει το μήνυμα RtSolPr μέσω του οποίου ζητά από τον default AR που τον εξυπηρετεί, πληροφορίες αναφορικά με τη λειτουργία ενός *υποψήφιου* προς διαπομπή στο εγγύς μέλλον δρομολογητή (candidate AR). Το μήνυμα περιέχει ένα κατάλληλο αναγνωριστικό στρώματος ζεύξης δεδομένων (link layer identifier) που ταυτοποιεί το σημείο πρόσβασης AP στο οποίο προτίθεται να συνδεθεί ο MN. Ο προσδιορισμός

του συγκεκριμένου AP έχει πραγματοποιηθεί από την εκτέλεση της διαδικασίας AP Discovery που προηγήθηκε. Η λήψη του μηνύματος RtSolPr από τον εκάστοτε AR, και η επεξεργασία του αναγνωριστικού στρώματος ζεύξης δεδομένων που περιέχεται σε αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την άμεση (χωρίς καθυστέρηση) αποστολή ενός μηνύματος PrRtAdv σαν απάντηση. Στο τελευταίο περιέχονται μεταξύ άλλων η IPv6 διεύθυνση του AR που εξυπηρετεί το νέο ασύρματο δίκτυο, και ένα πρόθημα διευθύνσεων IPv6 το οποίο αντιστοιχεί στο νέο δίκτυο και μέσω του οποίου ο MN θα μπορέσει να σχηματίσει μία νέα, έγκυρη, παγκόσμια IPv6 διεύθυνση (nCoA). Τόσο το μήνυμα RtSolPr όσο και το PrRtAdv ενδέχεται να περιέχουν αναγνωριστικά για περισσότερα από ένα δίκτυα τα οποία ο MN έχει ανακαλύψει μέσω της διαδικασίας AP Discovery. Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε, που ονομάζεται διαδικασία *Ανακάλυψης Νέου Δρομολογητή Πρόσβασης (NAR Discovery)* [65], ουσιαστικά λειτουργεί επικουρικά ως προς τη διαδικασία *Ανακάλυψης Δρομολογητή* και Ρύθμισης Διεύθυνσης. Βασικός σκοπός της σχεδίασης του πρωτοκόλλου FMIPv6 είναι η εξάλειψη της καθυστέρησης που εισάγουν οι συγκεκριμένες διαδικασίες, με χρήση πληροφορίας που προέρχεται για τη μεν πρώτη από τη λειτουργία του στρώματος ζεύξης δεδομένων και για τη δε δεύτερη από το μηχανισμό πληρεξουσιοδότησης που περιγράφηκε (ουσιαστικά ο default AR αποστέλλει ένα μήνυμα Router Advertisement, όπως αυτό προδιαγράφεται από το πρωτόκολλο ND, για λογαριασμό του υποψήφιου νέου δρομολογητή). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πρωτόκολλο δεν προκαθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ρυθμίζεται ή ανανεώνεται η πληροφορία αντιστοίχισης που αποστέλλεται μέσω των μηνυμάτων PrRtAdv. Στη γενική περίπτωση η συγκεκριμένη πληροφορία μπορεί να είναι στατική (ρυθμισμένη από το διαχειριστή) ή δυναμικά ανανεώσιμη μέσω ενός κατάλληλου γι' αυτό το σκοπό πρωτοκόλλου όπως το CARD [64].

Η φάση προετοιμασίας μίας διαπομπής στρώματος δικτύου που ακολουθεί, προϋποθέτει ότι ένας κινητός κόμβος έχει από τη μία επαρκείς πληροφορίες για ένα δίκτυο στο οποίο πρόκειται να διαπεμφθεί, και από την άλλη έχει στη διάθεσή του σοβαρές ενδείξεις που υποδεικνύουν την εκτέλεση της διαπομπής προς το συγκεκριμένο δίκτυο στο άμεσο μέλλον. Η πρώτη απαίτηση καλύπτεται από την ανταλλαγή των μηνυμάτων RtSolPr και PrRtAdv. Για την δεύτερη χρειάζεται η συνδρομή των υποκείμενων στρωμάτων πράγμα που επιβάλλει την παράδοση στο στρώμα δικτύου ενός γεγονότος, σύμφωνα με το οποίο βεβαιώνεται πως ο κινητός κόμβος επίκειται να διαπεμφθεί σε ένα γειτονικό δίκτυο άμεσα. Με βάση την ορολογία του πρωτοκόλλου MIH, η τελευταία απαίτηση καλύπτεται από την παράδοση του γεγονότος *Link Going Down*. Εφόσον αμφότερες οι απαιτήσεις ικανοποιούνται ο MN αποστέλλει στον AR που τον εξυπηρετεί το μήνυμα *Fast Binding Update* (FBU). Το μήνυμα αυτό υποδεικνύει στον AR ότι ο MN επιθυμεί, με βάση τις πληροφορίες που περιέχονται στο μήνυμα (δηλ. IP διεύθυνση του NAR), την υποστήριξη της επικείμενης διαπομπής του στον NAR. Το μήνυμα επίσης περιέχει και μία προτεινόμενη από τον MN IPv6 διεύθυνση, την οποία ο τελευταίος προτίθεται να χρησιμοποιήσει αφού συνδεθεί στο νέο δίκτυο. Η διεύθυνση αυτή κατασκευάζεται συνδυάζοντας το πρόθημα που επιστράφηκε από το μήνυμα PrRtAdv, και ένα επίθημα που επιλέγει ο MN όπως ακριβώς συμβαίνει κατά τη λειτουργία του μηχανισμού *Stateless Address Autoconfiguration* [52].

Ένας επιπλέον στόχος του πρωτοκόλλου FMIPv6 είναι η εξάλειψη της καθυστέρησης που εισάγει η διαδικασία Ρύθμισης Διεύθυνσης. Δεδομένου ότι ο μόνος κόμβος ο οποίος μπορεί να αποφανθεί για την μοναδικότητά της είναι ο NAR, ο PAR, μετά την λήψη του μηνύματος FBU, αποστέλλει προς αυτόν το μήνυμα *Handover Initiate* (HI). Το μήνυμα περιέχει την προτεινόμενη από το κινητό IPv6 διεύθυνση και μέσω αυτού εκδηλώνεται στον NAR το αίτημα για υποστήριξη της επικείμενης διαπομπής του κινητού. Η λήψη του μηνύματος HI έχει διπλή σημασία: πρώτον ο NAR με βάση τα περιεχόμενα του πίνακα *Neighbor Cache* του, αποφαινεται για την μοναδικότητα της προτεινόμενης διεύθυνσης. Στην περίπτωση που η προτεινόμενη διεύθυνση χρησιμοποιείται, στα επόμενα αναφερόμενη ως νέα CoA (new CoA, nCoA), ο NAR είναι υποχρεωμένος να επιλέξει μία διαφορετική την οποία και θα πρέπει να επιστρέψει μέσω του μηνύματος *Handover Acknowledge* (HACK) που ακολουθεί. Δεύτερον με βάση την επιλεχθείσα nCoA, ο NAR ενημερώνει τον πίνακα *Neighbor Cache* του ώστε να μην υπάρχει ανάγκη εκτεταμένων ελέγχων τη στιγμή κατά την οποία θα προσδεθεί σε αυτόν το κινητό. Επιπλέον με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται και η ικανότητα προσωρινής αποθήκευσης όλων των πακέτων που ενδέχεται να καταφθάσουν στο NAR κι έχουν διεύθυνση προορισμού την έγκυρη πλέον nCoA. Όταν πραγματοποιηθούν όλα τα παραπάνω ο NAR αποστέλλει το μήνυμα HACK προς τον PAR με τον οποίο επιβεβαιώνεται ότι είναι πλέον έτοιμος να υποστηρίξει τη διαπομπή του MN με βάση το πρωτόκολλο FMIPv6.

Η λήψη του μηνύματος HACK από τον PAR, σηματοδοτεί, στο προηγούμενο της διαπομπής δίκτυο, το αποτέλεσμα της διαδικασίας προετοιμασίας της διαπομπής στον NAR. Στην περίπτωση που τα περιεχόμενα του HACK υποδεικνύουν τη θετική εξέλιξη της διαδικασίας προετοιμασίας, ο PAR ενεργοποιεί μία αμφίδρομη δίοδο IP, που έχει άκρα την διεύθυνση του PAR και την nCoA. Η συγκεκριμένη δίοδος θα χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά τόσο των πακέτων που καταφθάνουν στον PAR κι έχουν διεύθυνση προορισμού την pCoA, όσο και των πακέτων που ξεκινούν από το MN και θα πρέπει να αποσταλούν προς τους CN. Η συγκεκριμένη δίοδος IP θα πρέπει να διατηρηθεί ενεργή για όσο χρόνο απαιτείται μέχρις να ολοκληρωθεί η εκτέλεση των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* κι *Εγγραφής Ανταποκριτών* του MIPv6. Μετά τη λήψη του μηνύματος HACK, ο PAR δημιουργεί το μήνυμα *Fast Binding Acknowledge* (FBack) το οποίο αποστέλλει ως απάντηση του μηνύματος FBU στον MN. Μέσω του μηνύματος FBack επιβεβαιώνεται στον MN η εγκατάσταση της απαραίτητης πληροφορίας στο δίκτυο (πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η προετοιμασία της διαπομπής έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς) και επικοινωνείται σε αυτόν η IPv6 διεύθυνση που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο. Δεδομένου ότι τη στιγμή κατά την οποία αποστέλλεται το μήνυμα FBack ο MN ενδέχεται να έχει αποσυνδεθεί από το δίκτυο του PAR, το μήνυμα αποστέλλεται σε δύο αντίτυπα, προς το παλαιό και προς το νέο δίκτυο· αντίστοιχα ένα με διεύθυνση προορισμού την pCoA κι ένα με την nCoA. Στην περίπτωση του προ-δραστικού (predictive) τρόπου λειτουργίας υποτίθεται ότι ο κινητός κόμβος είναι σε θέση να λάβει το μήνυμα FBack στο προηγούμενο της διαπομπής δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος που μεσολάβησε από την αποστολή του μηνύματος FBU μέχρι την λήψη του FBack στο προηγούμενο δίκτυο ήταν επαρκής. Μετά τη λήψη του τελευταίου και δεδομένης της παράδοσης του trigger *Link Going Down* που προηγήθηκε, ακολουθεί η εκτέλεση της

διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Η εκκίνησή της σηματοδοτείται στο κινητό με την παράδοση του trigger *Link Down* ενώ το πέρας της με αυτήν του *Link Up*.

Στη συνέχεια εκτελείται η φάση *Πρόσδεσης* του κινητού στο νέο δίκτυο η οποία υλοποιείται με χρήση του μηνύματος *Fast Neighbor Advertisement* (FNA). Το FNA αποστέλλεται από τον MN προς το NAR και σηματοδοτεί στον τελευταίο την πρόσδεση του πρώτου στο δίκτυό του. Στην πράξη η παράδοση του μηνύματος επιβεβαιώνει στον NAR την ορθότητα της αρχικής πρόβλεψης κι έχει σαν αποτέλεσμα την πραγματοποίηση μίας τελικής ρύθμισης στην Neighbor Cache του NAR (αλλαγή της κατάστασης που αντιστοιχεί στην διεύθυνση nCoA από proxy σε reachable). Από τη στιγμή αυτή και μετά ο MN είναι σε θέση να επικοινωνεί από τη νέα θέση του χωρίς κανένα απολύτως πρόβλημα αναφορικά με τη χρήση της nCoA, εφόσον όλη η απαιτούμενη πληροφορία είναι ήδη εγκατεστημένη σε αυτό.

Με βάση την προδιαγραφή του MIPv6 το κινητό δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει την nCoA εφόσον δεν έχουν ολοκληρωθεί οι διαδικασίες *Οικείας Εγγραφής* κι *Εγγραφής Ανταποκριτών* του MIPv6 (Binding Update) οι οποίες εκτελούνται στη συνέχεια. Εντούτοις με στόχο την διατήρηση της δυνατότητας επικοινωνίας κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της σηματοδότησης του MIPv6, το πρωτόκολλο FMIPv6 δίνει τη δυνατότητα στον κινητό κόμβο να επικοινωνεί χρησιμοποιώντας την pCoA όπως ακριβώς ίσχυε πριν την εκτέλεση της διαπομπής, μέσω της διόδου IP που αναφέρθηκε νωρίτερα. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα εξερχόμενα πακέτα από τον κινητό κόμβο αποστέλλονται προς τους προορισμούς τους διαμέσου του PAR. Για το λόγο αυτό ενθυλακώνονται σε νέα IP datagrams τα οποία έχουν σαν διεύθυνση αποστολέα την nCoA και σαν διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση του PAR. Ο τελευταίος είναι υποχρεωμένος αφού αφαιρέσει την επιπλέον IP επικεφαλίδα να τα προωθήσει σαν να είχαν προέλθει από έναν κόμβο φυσικά προσαρτημένο σε κάποιο από τα υποδίκτυά του. Όπως έχει προαναφερθεί η αντίστροφη διαδικασία ακολουθείται για τα πακέτα που αφικνούνται στον PAR καθ' όλη τη διάρκεια της διαπομπής στρώματος δικτύου (δηλ. από την αποστολή του μηνύματος FBACk μέχρι και την ολοκλήρωση των διαδικασιών Binding Update του MIPv6).

Σημαντικό σημείο του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που εισάγει το FMIPv6 αποτελεί η δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των πακέτων που κατευθύνονται προς τον κινητό κόμβο κατά τη διάρκεια μιας προ-δραστηκής διαπομπής. Με βάση αυτόν προβλέπεται ότι τόσο ο κόμβος PAR όσο και ο κόμβος NAR είναι υποχρεωμένοι να αποθηκεύουν προσωρινά τα πακέτα που καταφθάνουν σε αυτούς κι έχουν σαν διεύθυνση προορισμού τις διευθύνσεις pCoA και nCoA αντίστοιχα. Η προσωρινή αποθήκευση ξεκινά με την λήψη των μηνυμάτων FBU και HI και σταματά με τη λήψη των μηνυμάτων HAcK και FNA αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 - 10, η διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης συνδυάζεται με τον μηχανισμό προώθησης της διόδου IP των πακέτων από τον PAR προς το κινητό στη νέα θέση του nCoA, με αποτέλεσμα την θεωρητικά μηδενική απώλεια πακέτων εφόσον δεν πραγματοποιείται υπερχείλιση στους προσωρινούς καταχωρητές (buffer) των AR. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο PAR μετά την λήψη του μηνύματος HAcK σταματά να προωθεί τα αφικνούμενα πακέτα για τον MN στο υποδίκτυό του αλλά αντίθετα τα προωθεί προς το νέο δίκτυο διαμέσου της εγκατεστημένης γι αυτό το σκοπό διόδου IP. Επιπρόσθετα, η διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης μπορεί να ενεργοποιηθεί

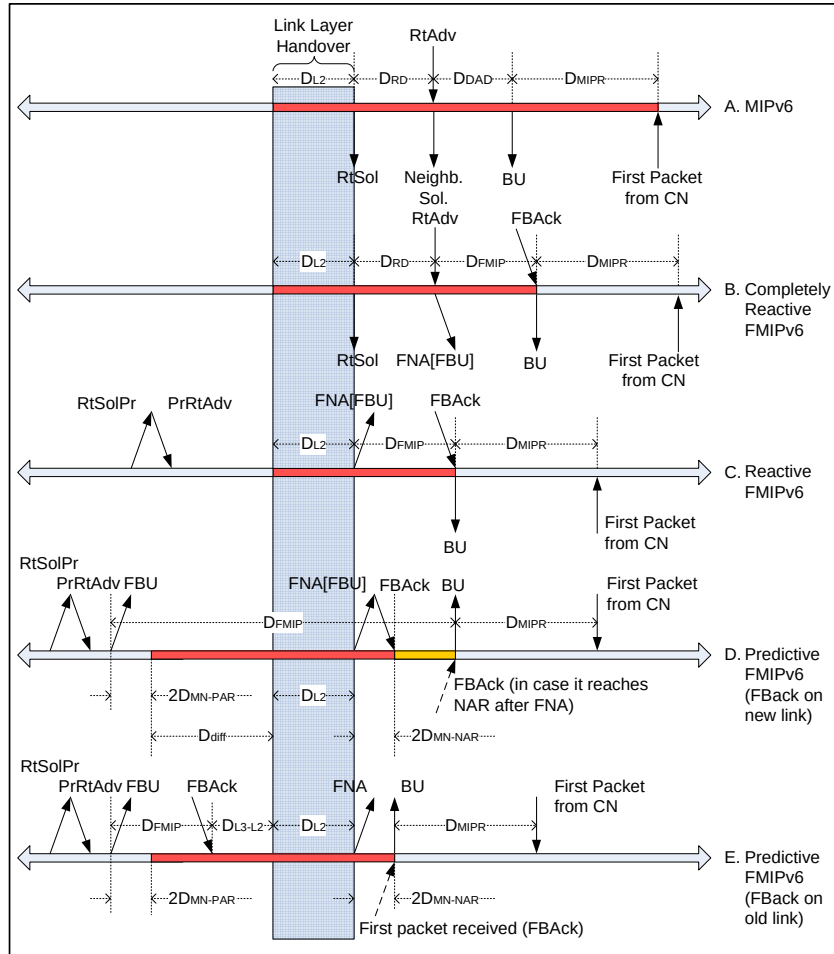
μετά τη λήψη του μηνύματος RtSolPr. Στην περίπτωση αυτή εντούτοις και μέχρι τη λήψη του μηνύματος FBU ο PAR είναι υποχρεωμένος να προωθεί τα πακέτα προς την rCoA κανονικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον η παράδοση των μηνυμάτων του FMIPv6 δεν είναι εγγυημένη (δεν χρησιμοποιείται κάποιος σχετικός μηχανισμός ή πρωτόκολλο), το πρότυπο προβλέπει την επαναμετάδοση των μηνυμάτων RtSolPr, FBU και HI στις περιπτώσεις που δεν επιστραφούν, σε εύλογο χρονικό διάστημα, αντίστοιχα τα PrRtAdv, FBack και HAck.

Όπως προαναφέρθηκε, το πρωτόκολλο FMIPv6 δίνει τη δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας ακόμη και στην περίπτωση που οι περιορισμοί για την εκτέλεση προ-δραστικών διαπομπών δεν ικανοποιούνται· δηλαδή στις περιπτώσεις όπου είτε δεν είναι εφικτός ο συγχρονισμός των διαδικασιών πρόβλεψης μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων και σηματοδοσίας του FMIPv6, είτε από την άλλη, η ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδοσίας δεν ολοκληρώνεται επιτυχώς λόγω σφαλμάτων στη μετάδοσή τους. Το Σχήμα 2 - 11 παρουσιάζει τον μετα-δραστικό τρόπο λειτουργίας του FMIPv6, στον οποίο θεωρείται ότι κατά τη φάση της πρόσδεσης του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο, ο NAR δεν είναι ήδη ενήμερος ώστε να υποδεχθεί τον κινητό κόμβο χωρίς καθυστέρηση (δηλαδή δεν έχει μία έγκυρη εγγραφή στον πίνακα Neighbor Cache για την nCoA). Αντίστοιχα ο κινητός κόμβος δεν έχει λάβει το μήνυμα FBack. Στην περίπτωση αυτή, το FMIPv6 δίνει τη δυνατότητα σε έναν κινητό κόμβο να «παραγγείλει» στον PAR του, την εγκατάσταση μίας προσωρινής εγγραφής/αντιστοίχισης μεταξύ της rCoA και της nCoA του, όπως και στην τυπική προ-δραστική περίπτωση. Γι αυτό το λόγο μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο, εκτός από το μήνυμα FNA, ο κινητός κόμβος δημιουργεί επίσης ένα μήνυμα FBU, το οποίο ενθυλακώνει στο πακέτο που μεταφέρει το πρώτο και τα αποστέλλει μονομιάς προς τον NAR. Ο τελευταίος, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα αναφορικά με την εγκυρότητα της περιεχόμενης/προτεινόμενης nCoA στο μήνυμα διεύθυνσης του MN, αποσπά το μήνυμα FBU και το προωθεί κανονικά προς τον PAR. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του FMIPv6, η ανταλλαγή των μηνυμάτων PrSolPr και PrRtAdv έχει εκτελεστεί κανονικά πριν την διαπομπή του κινητού. Αυτό σημαίνει ότι ο MN καταλήγει σε ένα δίκτυο για το οποίο γνωρίζει εκ των προτέρων το χρησιμοποιούμενο πρόθημα διευθύνσεων και κατά συνέπεια είναι σε θέση να δημιουργήσει την κατάλληλη nCoA χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση της διαδικασίας *Ανακάλυψης Δρομολογητή* του ND.

Η υπόλοιπη διαδικασία είναι ακριβώς ίδια με αυτήν που περιγράφηκε κατά τον προ-δραστικό τρόπο λειτουργίας με τη μόνη διαφορά ότι το μήνυμα FBack επιστρέφεται στην νέα θέση του κινητού και μόνο. Επίσης, η βεβαίωση την μοναδικότητας της προτεινόμενης από τον NAR nCoA του κινητού πραγματοποιείται κατά την λήψη του FNA κι όχι κατά την λήψη του HI. Η αποστολή του μηνύματος FBack στο κινητό στη νέα θέση του επιβεβαιώνει την ορθή αντιστοίχιση της rCoA με την nCoA στον PAR, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι όλη η κίνηση που καταφθάνει στον τελευταίο για τον MN θα ενθυλακώνεται σε πακέτα με διεύθυνση προορισμού την nCoA. Αντίστοιχα, μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας σηματοδοσίας του FMIPv6 (λήψη μηνύματος FBack από το MN) ο κινητός κόμβος μπορεί να χρησιμοποιεί την αντίστροφη δίοδο IP μέσω της οποίας μπορεί, όπως και κατά την προ-δραστική λειτουργία, να επικοινωνεί με οποιοδήποτε κόμβο σαν να ήταν προσδεμένος σε ένα φυσικό υποδίκτυο του PAR.

Συνοψίζοντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του FMIPv6, είναι προφανές ότι η χρήση του προσφέρει τη δυνατότητα εκτέλεσης διαπομπών μεγάλης ταχύτητας, με μηδενική καθυστέρηση σε ότι αφορά τις λειτουργίες του στρώματος δικτύου (*Επισήμανση Μετακίνησης, Ανακάλυψη Δρομολογητή και Ρύθμιση Διεύθυνσης*), στο κρίσιμο χρονικό διάστημα που έπεται της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, κατά το οποίο επιχειρείται η άμεση αποκατάσταση της επικοινωνίας. Επίσης εξαλείφει όχι μόνο τις καθυστερήσεις που εισάγονται κατά τη λειτουργία του κλασικού MIPv6, αλλά επιπλέον και την επίδραση που μπορεί να έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας στο κινητό κόμβο δεδομένου ότι παρέχει τη δυνατότητα προσωρινής αποθήκευση των διακινούμενων πακέτων στους κατάλληλους για αυτό το σκοπό καταχωρητές του διαπεμπόμενου MN. Με στόχο την αποσαφήνιση του χρονισμού που ακολουθείται κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδότησης αλλά και τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία ένας κινητός κόμβος δεν είναι λόγω της εκτέλεσης της διαπομπής του, σε θέση να επικοινωνεί με άλλους κόμβους σε στρώματα ανώτερα του στρώματος δικτύου, το [66] παρουσιάζει τις διάφορες καθυστερήσεις που εισάγει κάθε διαδικασία για τις διάφορους τρόπους λειτουργίας του πρωτοκόλλου FMIPv6. Αντίστοιχα ο Πίνακας 2 – 2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά όσα αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με χρονική διάρκεια της διαπομπής στρώματος δικτύου (δηλ. το διάστημα κατά το οποίο ο κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί στο στρώμα δικτύου) αλλά και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο όσα πακέτα καταφθάνουν στον PAR απορρίπτονται λόγω αδυναμίας του μηχανισμού κινητικότητας να τα προωθήσει προς τον MN. Περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με την επίδοση του FMIPv6 μπορεί να αναζητηθεί στα [67]-[71].

Με βάση τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Πίνακας 2 – 2, θα πρέπει να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις: είναι προφανές ότι στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών, η καθυστέρηση διαπομπής επηρεάζεται από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ του πέρατος της φάσης προετοιμασίας (παράδοση μηνύματος FBack στον MN στον προηγούμενο της διαπομπής δίκτυο) και της στιγμής κατά την οποία ξεκινά ουσιαστικά η διαπομπή στρώματος ζεύξης δεδομένων (Link Down trigger). Στο χρονικό αυτό διάστημα ο PAR προωθεί μέσω της διόδου IP τα πακέτα του MN προς το νέο δίκτυο στο οποίο εντούτοις ο δεύτερος δεν έχει ακόμη προσδεθεί. Αντίστοιχα σημαντικό στοιχείο αποτελεί και το γεγονός ότι με βάση τη σχεδίαση του πρωτοκόλλου FMIPv6, δεν επιχειρείται έλεγχος της διαπομπής στρώματος ζεύξης από αυτό. Αντίθετα η διαδικασία του στρώματος δικτύου προσπαθεί να προσαρμοστεί στη χρονική αλληλουχία των γεγονότων που εκτελούνται στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Με στόχο την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων προβλημάτων, στη βιβλιογραφία προτείνεται ο περεταίρω συγχρονισμός των διαδικασιών που εκτελούνται στα στρώματα δικτύου και ζεύξης δεδομένων. Για παράδειγμα στο [56] προτείνεται μεταξύ άλλων η παραμονή του MN στο προηγούμενο δίκτυο μέχρις ότου είναι δυνατή η ολοκλήρωση της predictive λειτουργίας του FMIPv6. Με άλλα λόγια ο κινητός κόμβος θα πρέπει να είναι σε θέση να καθυστερήσει την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων τουλάχιστο για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται για να του επιστραφεί το μήνυμα FBack στο παλιό δίκτυο, εφόσον η ποιότητα της σύνδεσης του στρώματος ζεύξης δεν έχει ξεπεράσει το κατώτατο όριο ποιότητας (ευαισθησία πομποδέκτη).



Επεξήγηση συμβολισμών στο Σχήμα 2 - 12 και στον Πίνακα 2 - 2

D_{L2}	Χρόνος εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων
D_{DAD}	Χρόνος εκτέλεσης διαδικασίας DAD
D_{RD}	Χρόνος εκτέλεσης διαδικασίας Router Discovery
D_{MN-CN}	Χρόνος μετάδοσης πακέτων στη διαδρομή από τον MN στον CN
D_{MIPR}	Χρόνος εκτέλεσης διαδικασίας Οικείας Εγγραφής/Εγγραφής Ανταποκριτών του MIP
D_{CN-PAR}	Χρόνος μετάδοσης πακέτων στη διαδρομή από τον CN στον PAR
D_{MN-PAR}	Απαιτούμενος χρόνος για τη λήψη του μηνύματος FBU από τον PAR, όταν στέλνεται μετά τη διαπομπή του κινητού στο νέο δίκτυο
D_{FMIP}	Απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση των διαδικασιών του FMIPv6 (από τη στιγμή που μεταδίδεται το μήνυμα FBU – ενθυλακωμένο σε ένα μήνυμα FNA αν μεταδίδεται από το νέο δίκτυο – μέχρι τη λήψη του μηνύματος FBack από το MN)
D_{L3-L2}	Χρονικό διάστημα μεταξύ της ολοκλήρωσης μίας προ-δραστικής διαπομπής στρώματος δικτύου (λήψη μηνύματος FBack από τον MN) μέχρι την εκκίνηση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων (δηλ. στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει καλός συγχρονισμός μεταξύ των μηχανισμών επιπέδου 2 και 3). Ενδέχεται να είναι και ίσος με μηδέν.
D_{MN-NAR}	Απαιτούμενος χρόνος για τη λήψη του μηνύματος FNA από το NAR
D_{diff}	Χρόνος μεταξύ λήψης του τελευταίου πακέτου από το MN στο παλιό δίκτυο (εξαιτίας της προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στον PAR κατόπιν της λήψης του μηνύματος FBU) και της εκκίνησης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων

Σχήμα 2 - 12. Χρονισμός διαδικασιών σηματοδότησης κατά την εκτέλεση διαπομπών με χρήση του πρωτοκόλλου FMIPv6

Πίνακας 2 - 2. Διάρκεια περιόδων απόρριψης πακέτων και καθυστέρησης εκτέλεσης διαπομπής κατά τη χρήση πρωτοκόλλων FMIPv6 & MIPv6

Μηχανισμός Διαχείρισης Κινητικότητας		Χρονική περίοδος απόρριψης πακέτων στον PAR	Καθυστέρηση Διαπομπής
MIPv6	A. Standard	$D_{L2} + D_{DAD} + D_{RD} + D_{MN-CN} + D_{CN-PAR}$	$D_{L2} + D_{DAD} + D_{RD} + D_{MIPR}$
	B. Completely Reactive	$D_{L2} + D_{RD} + D_{MN-PAR}$	$D_{L2} + D_{RD} + D_{FMIP}$
FMIPv6	C. Reactive	$D_{L2} + D_{MN-PAR}$	$D_{L2} + D_{FMIP}$
	D. Predictive (FBack on new link)	Καμία απώλεια εφόσον δεν πραγματοποιείται υπερχείλιση των καταχωρητών προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στους PAR ή NAR	$\max(D_{FMIP} - 2D_{MN-PAR}, D_{diff} + D_{L2} + 2D_{MN-NAR})$
	E. Predictive (FBack on previous link)		$(D_{FMIP} - 2D_{MN-PAR}) + D_{L3-L2} + D_{L2} + 2D_{MN-NAR}$

Αντίστοιχη είναι και η πρόταση που παρουσιάζεται στο [56], όπου η εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων προτείνεται να γίνει αμέσως μετά την παράδοση του μηνύματος FBack, πάντα με βάση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης του MN με τον προηγούμενο σταθμό βάσης. Υπενθυμίζεται πάντως ότι για την τελευταία πρόταση, η εκτέλεση της διαπομπής αμέσως μετά την λήψη του μηνύματος FBack δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα εφόσον αφενός έχει ήδη παραδοθεί το *trigger Link Going Down*, που σημαίνει ότι έτσι κι αλλιώς η εκτέλεση της διαπομπής επίκειται, κι αφετέρου επιπλέον έλεγχοι μπορούν να γίνουν αναφορικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης ούτως ώστε η εκκίνηση της διαπομπής να ακυρωθεί (στην περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί βελτίωση της ποιότητας) ή να επιταχυνθεί εφόσον για παράδειγμα ικανοποιείται ακόμη το κριτήριο που επιβάλλει την παράδοση του *trigger Link Going Down*. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο καλύτερος συγχρονισμός των διαδικασιών διαχείρισης κινητικότητας αν και θέτει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε επίπεδο υλοποίησης, αναμένεται να μειώσει περεταίρω τις απαιτήσεις από την πλευρά των χρησιμοποιούμενων πόρων για την υποστήριξη της διαπομπής εφόσον όχι μόνο ελαχιστοποιείται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο πραγματοποιείται η προώθηση μέσω της Διόδου IP που προτείνει το FMIPv6, αλλά κι επειδή ελαχιστοποιεί τις ανάγκες για προσωρινή αποθήκευση πακέτων στους δρομολογητές πρόσβασης.

2.4 Διαχείριση Κινητικότητας Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο – Mobile IP Multicast

Η IP multicast μεταγωγή πακέτων είναι ανεξάρτητη από το αν οι συνδέσεις μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων είναι ενσύρματες ή ασύρματες. Αυτό, παρά το γεγονός ότι δίνει τη δυνατότητα σε τελικούς χρήστες να απολαμβάνουν το ίδιο σύνολο υπηρεσιών ανεξάρτητα από τις τεχνολογίες πρόσβασης που χρησιμοποιούν, δημιουργεί πολύ σοβαρά μειονεκτήματα σε θέματα που αφορούν στο επίπεδο της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών, ιδιαίτερα τη χρονική περίοδο όπου πραγματοποιείται η διαπομπή κινητών χρηστών μεταξύ των διαφόρων σημείων σύνδεσης. Όπως αναλύθηκε νωρίτερα, η διαπομπή ενός χρήστη μεταξύ σταθμών βάσης που ανήκουν σε δίκτυα τα οποία βασίζονται στο πρωτόκολλο Διαδικτύου, εκτελείται σε δύο φάσεις: στην πρώτη εκτελούνται οι διαδικασίες του στρώματος ζεύξης δεδομένων, ενώ στην δεύτερη ο χρήστης επανεγκαθιστά την επικοινωνία του στο στρώμα δικτύου. Η τελευταία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την απόκτηση νέας διεύθυνσης IP για την ταυτοποίησή του τερματικού στο νέο επισκεπτόμενο δίκτυο και την δρομολόγηση των πακέτων του προς αυτό. Για την υποστήριξη κινητικότητας χρηστών στο στρώμα σύνδεσης χρησιμοποιούνται ειδικοί μηχανισμοί που προσπαθούν να διασφαλίσουν τη συσχέτιση του κινητού κόμβου με το νέο δίκτυο και την εγκατάσταση των επιθυμητών συνδέσεων με αυτό, και, στην περίπτωση των πιο προηγμένων μηχανισμών, να εξασφαλίσουν ότι η επικοινωνία μπορεί να συνεχιστεί στο ίδιο επίπεδο ποιότητας (πχ. εγκατάσταση συνδέσεων με τουλάχιστο όχι χειρότερα χαρακτηριστικά ποιότητας).

Δεδομένου ότι η παροχή υπηρεσιών IP Multicast αποτελεί μία υπηρεσία που προσφέρεται από το στρώμα δικτύου, η διαχείριση κινητικότητας κινητών χρηστών με ενεργές συνόδους

πολυεκπομπής είναι ένα ζήτημα το οποίο αφορά κυρίως την προσαρμογή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της πρώτης στο πλαίσιο κινητικότητας που ορίζεται στο στρώμα δικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο, οι απαιτήσεις από το στρώμα ζεύξης δεδομένων δεν είναι τόσο κρίσιμες εφόσον δεν υπάρχει γνώση για το ποιος κόμβος λειτουργεί ως παραλήπτης ή αποστολέας της κίνησης πολυεκπομπής. Έτσι ακόμη κι αν κάποιος προσπαθούσε να αναπτύξει ένα μηχανισμό διαχείρισης κινητικότητας για κίνηση πολυεκπομπής στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, θα ερχόταν αντιμέτωπος με το πρόβλημα της διαχείρισης πληροφοριών που υπάρχουν αποκλειστικά στο στρώμα δικτύου πράγμα το οποίο θα οδηγούσε στην απαίτηση για διασυνεργασία μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατό να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός υποστήριξης διαπομπών πολυεκπομπής στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, εφόσον η απαραίτητη πληροφορία και η ανταλλασσόμενη σηματοδότηση διαχείρισης συνόδων πολυεκπομπής αποτελεί καθήκον των εκτελούμενων μηχανισμών του στρώματος δικτύου. Εν γένει το στρώμα ζεύξης ασχολείται με την εγκατάσταση επικοινωνίας ενός κόμβου (δρομολογητή ή τερματικού) με το υπόλοιπο δίκτυο, ενώ η υπηρεσία IP multicast αφορά τη διαδικασία προώθησης πακέτων προς ομάδες τερματικών και τον έλεγχο συμμετοχής στις συγκεκριμένες ομάδες. [72]–[87]

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά της συνδυασμένης χρήσης υπηρεσιών κινητικότητας σε συστήματα που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Διαδικτύου με στόχο την αποσαφήνιση όλων των ιδιαιτεροτήτων και των προβλημάτων που καλούνται να αντιμετωπιστούν για την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε ασύρματα συστήματα και κινητούς χρήστες. Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία των μηχανισμών υποστήριξης κινητικότητας για δίκτυα μεταγωγής πακέτου που στηρίζονται στα πρωτόκολλα IPv4 και IPv6 και παρουσιάζεται η λειτουργία των μηχανισμών για την παροχή υπηρεσιών IP multicast σε κινητούς χρήστες με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη λειτουργία τους. Ακολούθως θα περιγραφεί μία σειρά από μηχανισμούς που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία και βελτιώνουν της επιδόσεις των μηχανισμών του MIP για IP multicast εφαρμογές.

2.4.1 Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο

Το πρωτόκολλο Mobile IP¹⁷ (MIPv4 και MIPv6) δίνει τη δυνατότητα σε κινητούς χρήστες να απολαμβάνουν το σύνολο των υπηρεσιών στρώματος δικτύου που τους παρέχονται όταν είναι συνδεδεμένοι στο *Οικείο Δίκτυό* τους, παρά το γεγονός ότι λόγω της κινητικότητάς τους μπορεί να συνδέονται σε διάφορα, *Ξένα Δίκτυα*. Αυτό πραγματοποιείται χωρίς να απαιτείται επανεγκατάσταση των συνόδων μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής από ένα δίκτυο σε ένα άλλο. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για την περίπτωση κατά την οποία ο κινητός κόμβος συμμετέχει σε συνόδους πολυεκπομπής κατά τις οποίες λειτουργεί ο ίδιος ως πηγή ή ως αποδέκτης κίνησης για μία ή περισσότερες ομάδες πολυεκπομπής. Βασική προϋπόθεση για την υλοποίηση της συγκεκριμένης λειτουργικότητας, αποτελεί η διασυνεργασία μεταξύ του μηχανισμού διαχείρισης

¹⁷ Η υποστήριξη υπηρεσιών κινητικότητας αντιμετωπίζεται με ενιαίο τρόπο από αμφότερες τις εκδόσεις του Πρωτοκόλλου Κινητού Διαδικτύου (MIPv4 και MIPv6). Στα πλαίσια της διατριβής αναλύονται οι διαδικασίες που αφορούν στη λειτουργία συστημάτων που βασίζονται στη νεότερη έκδοση των πρωτοκόλλων IP και MIP, ήτοι τα IPv6 και MIPv6.

κινητικότητας που εισάγει το MIP, με αυτόν που διαχειρίζεται τις συνόδους πολυεκπομπής Διαδικτύου, τόσο για τον έλεγχο συμμετοχών στις ομάδες πολυεκπομπής (μέσω των πρωτοκόλλων IGMP και MLD) όσο και για τη δρομολόγηση πακέτων πολυεκπομπής (πχ. PIM, DVMRP).

Η διαχείριση κινητικότητας στο Διαδίκτυο αφορά πρωτίστως την *εξασφάλιση* της δυνατότητας επικοινωνίας και στη συνέχεια στην ανάπτυξη μηχανισμών βελτιστοποίησης (π.χ. του μηχανισμού *Route Optimization*, βλέπε ενότητα 2.3.1.2). Στο ίδιο πλαίσιο, η προσέγγιση που παρουσιάζει το MIP για την διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής Διαδικτύου, διαχωρίζει τη λειτουργία των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας και συνόδων, πράγμα εξαιρετικά επιθυμητό εφόσον εξαλείφεται η απαίτηση ανάπτυξης μηχανισμών κινητικότητας ειδικά για την περίπτωση υπηρεσιών κι εφαρμογών πολυεκπομπής, επιτρέποντας δηλαδή τη χρήση ενός μηχανισμού για αμφότερες τις υπηρεσίες unicast και multicast. Εντούτοις η γενικότητα στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής διαχείρισης κινητικότητας, αφήνει σε δεύτερη μοίρα τις ιδιαιτερότητες που εισάγει η δρομολόγηση IP Multicast κίνησης. Με άλλα λόγια αν και βασικό μέλημα των σχεδιαστών του πρωτοκόλλου MIP ήταν η προδιαγραφή ενός απλού και λειτουργικού μηχανισμού, ο οποίος δεν θα θέτει σχεδόν καμία επιπλέον απαίτηση σε ότι αφορά την υποστήριξη υπηρεσιών πολυεκπομπής (πέρα από την αυτόνομη υποστήριξη των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής και δρομολόγησης πολυεκπομπής), όπως θα φανεί στη συνέχεια, οι προτεινόμενοι από το MIP μηχανισμοί διαχείρισης IP multicast κινητικότητας αποτελούν αιτία πλειάδας προβλημάτων τα οποία καθιστούν την παροχή των υπηρεσιών πολυεκπομπή σε κινητούς χρήστες, ασύμφορη στην πράξη. Οι συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες σχετίζονται με τη λειτουργία των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής και δρομολόγησης πολυεκπομπής.

Όπως και στην περίπτωση της unicast κινητικότητας, οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής αντιμετωπίζουν το πρόβλημα σταδιακά. Το ζήτημα της από άκρο-σε-άκρο πλέον επανεγκατάστασης μίας συνόδου πολυεκπομπής, αντιμετωπίζεται στην τελική φάση, κατά την οποία ο κινητός κόμβος έχει επιλύσει τα προβλήματα που αφορούν στην τοπική πρόσβασή του στο νέο φυσικό δίκτυο και τη δυνατότητα επικοινωνίας του στο στρώμα δικτύου (ταυτοποίηση του κόμβου, απόδοση νέας διεύθυνσης στο στρώμα δικτύου). Στην τελική φάση, η βασική απαίτηση από το μηχανισμό κινητικότητας είναι η αποκατάσταση της επικοινωνίας από το νέο σημείο σε παγκόσμιο επίπεδο, πράγμα που για την περίπτωση της IP Multicast κίνησης αντιστοιχεί στην επέκταση του μονοπατιού διανομής κίνησης πολυεκπομπής, από και προς τη νέα θέση του κινητού κόμβου.

Κατά τη συμμετοχή ενός νέου χρήστη σε μία ομάδα πολυεκπομπής απαιτείται η ανταλλαγή σηματοδότησης τόσο για τη συμμετοχή όσο και για την ενημέρωση των ενδιάμεσων δρομολογητών ώστε να συμπεριληφθεί το νέο κομμάτι του δικτύου στο δένδρο διανομής. Η διαχείριση IP Multicast κινητικότητας αφορά στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που ανακύπτουν στη φάση αποκατάστασης των μονοπατιών που συνδέουν τις πηγές με τους αποδέκτες κίνησης πολυεκπομπής, εξαιτίας των ιδιαιτεροτήτων που εισάγει ή το γεγονός ότι τα πακέτα αποστέλλονται προς ομάδες πολλαπλών παραληπτών κι όχι προς μοναδικούς

παραλήπτες. Στο σημείο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι όμως αντιμετωπίζουν το πρόβλημα στη μακροπρόθεσμη βάση του (δηλαδή σε αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την εκτέλεση της διαπομπής). Όπως προαναφέρθηκε εντούτοις, αφήνουν πολλά κενά που αφορούν τόσο τη διαχείριση πόρων όσο και την επίδραση της εκτέλεσης διαπομπών στο επίπεδο της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Στα πλαίσια του πρωτοκόλλου MIP [43]-[44], η υποστήριξη IP Multicast διαπομπών προσεγγίζεται μέσω δύο διαφορετικών μηχανισμών. Ο πρώτος ονομάζεται *Οικείες Συμμετοχές (Home Subscriptions)* και προτείνει την στο έπακρο χρήση της υποδομής υλικού και λογισμικού που εισάγει το ο μηχανισμός διαχείρισης unicast κινητικότητας του MIP και για την περίπτωση των ροών κίνησης πολυεκπομπής. Ο δεύτερος ονομάζεται *Απομακρυσμένες Συμμετοχές (Remote Subscription)* και προτείνει την επανεκκίνηση της κλασικής διαδικασίας συμμετοχής σε μία ομάδα πολυεκπομπής (εγκατάστασης συνόδου) από τον κινητό χρήστη, από το νέο δίκτυο στο οποίο κατέληξε μετά την εκτέλεση της διαπομπής του σε αυτό. Στην πράξη δηλαδή, δεν προτείνεται η χρήση κάποιου εξειδικευμένου μηχανισμού κινητικότητας δεδομένου ότι η λειτουργία των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχών σε ομάδες πολυεκπομπής και δρομολόγησης πολυεκπομπής είναι σε θέση να αποκαταστήσουν «μεσοπρόθεσμα» την επικοινωνία ενός κόμβου στο επίπεδο δικτύου, τουλάχιστο για τους παραλήπτες της κίνησης. Για τις πηγές, αν και θεωρητικά δεν θα έπρεπε να υπάρχει πρόβλημα, χρειάζεται η επανεγκατάσταση της συνόδου πολυεκπομπής μέσω ενός μηχανισμού που λειτουργεί στο στρώμα εφαρμογής. Η αλλαγή της διεύθυνσης μίας πηγής, απαιτεί την εκ νέου ρύθμιση της συνόδου και την επανεγκατάσταση των πληροφοριών δρομολόγησης σε όλο το εύρος του δένδρου διανομής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της λειτουργίας του κάθε μηχανισμού ακολουθούμενες από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που σχετίζονται με αυτή.

Η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής έχει διαφορετικές διαστάσεις σε ότι αφορά την κινητικότητα των πηγών και αποδεκτών της κίνησης πολυεκπομπής. Ο κύριος λόγος για τον οποίο ισχύει αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι εν γίνεται η υπηρεσία πολυεκπομπής Διαδικτύου δεν είναι συμμετρική όπως η υπηρεσία unicast, αλλά αντίθετα προβλέπει άλλη συμπεριφορά για τις πηγές τους αποδέκτες. Όπως προαναφέρθηκε σύμφωνα με την Αρχιτεκτονική IP Multicast, οι αποδέκτες εκδηλώνουν το ενδιαφέρον τους για συμμετοχή σε ομάδες πολυεκπομπής οπότε με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται τα δένδρα διανομής της κίνησης που καταλήγουν σε αυτούς. Είναι προφανές ότι η αλλαγή του σημείου πρόσβασης ενός αποδέκτη θέτει σαν απαίτηση την επέκταση του εκάστοτε κλαδιού του δένδρου προς τη νέα θέση του τερματικού. Από την άλλη, η περίπτωση των πηγών είναι περισσότερο σύνθετη, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται δένδρα διανομής με ρίζα τον κόμβο πηγή, εφόσον η αλλαγή της θέσης της πηγής επιβάλλει την ανανέωση ενός μεγάλου κομματιού του δένδρου διανομής σε ότι αφορά τους κόμβους από τους οποίους συντίθεται. Η παρατήρηση αυτή καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική αν αναλογιστούμε ότι τα σύγχρονα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολυεκπομπής χρησιμοποιούν τη διεύθυνση της πηγής για την κατασκευή του δένδρου πράγμα το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται η ανανέωση της εγκατεστημένης πληροφορίας στο σύνολο των κόμβων που απαρτίζουν το δένδρο διανομής. Όλα τα παραπάνω θέματα μελετώνται διεξοδικά στη συνέχεια.

2.4.1.1 Οικείες Συμμετοχές (Home Subscriptions)

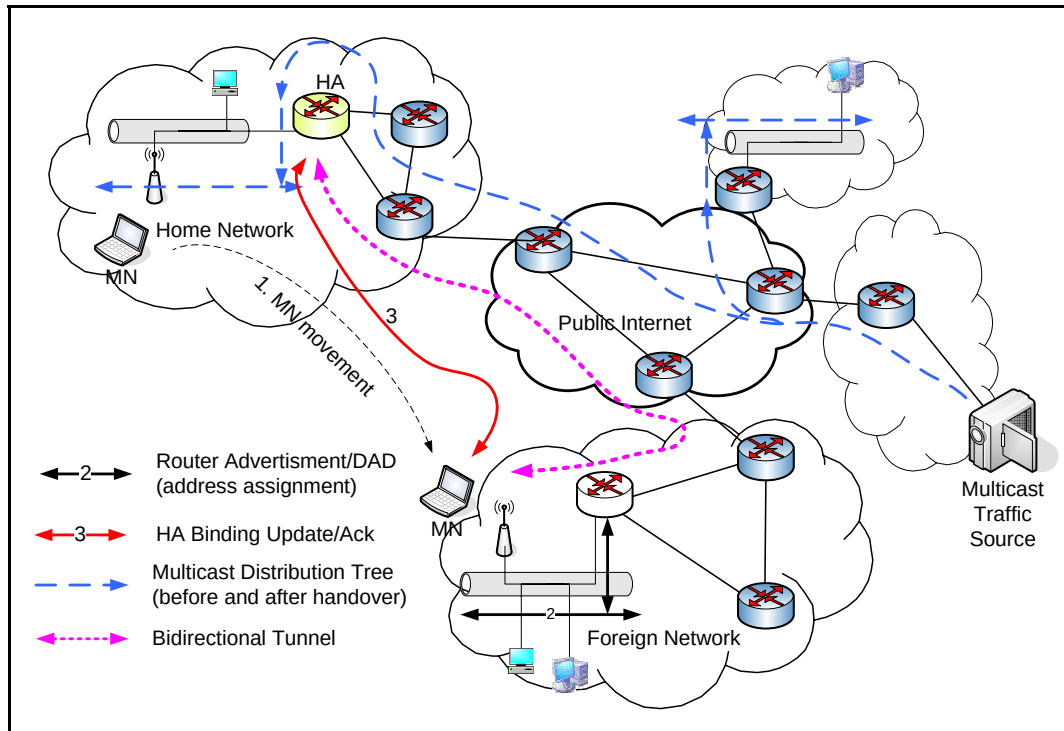
Όπως και στην περίπτωση της σημείου-προς-σημείο επικοινωνίας, το πρωτόκολλο MIP καθιστά δυνατή την παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου πολυεκπομπής καθιστώντας τον κόμβο HA ως το σημείο πρόσβασης στην υπηρεσία IP multicast για τους κινητούς κόμβους όταν αυτοί βρίσκονται σε ένα Ξένο Δίκτυο. Σύμφωνα με το μηχανισμό *Οικείων Συμμετοχών*, η μεταφορά των πακέτων κίνησης πολυεκπομπής πραγματοποιείται διαμέσου του *Οικείου Δικτύου* με χρήση της αμφίδρομης διόδου IP που εγκαθίσταται μεταξύ του κινητού και του κόμβου HA για την unicast επικοινωνία. Οι μόνες υποχρεώσεις του κινητού κόμβου είναι να αιτηθεί αρχικά στον HA τη συμμετοχή του στην κατάλληλη ομάδα πολυεκπομπής. Ο τελευταίος υποχρεούται να καταστεί μέλος του κατάλληλου δένδρου διανομής και στη συνέχεια απλά να ανανεώνει την εγγραφή σχετικά με την τρέχουσα nCoA (όπως ακριβώς προβλέπεται από το MIP για τις unicast διαπομπές). Με αυτόν τον τρόπο δεν πραγματοποιείται μεταβολή στο δένδρο διανομής κίνησης πολυεκπομπής που έχει συσταθεί για κάθε ομάδα σαν αποτέλεσμα της διαπομπής, αλλά αντίθετα μεταβάλλεται μόνο το αντίστοιχο μονοπάτι που συνδέει τον HA με το κινητό. Το συγκεκριμένο μονοπάτι εντούτοις δεν μπορεί να θεωρηθεί κομμάτι του δένδρου διανομής με την αυστηρή έννοια ορισμού του δένδρου. Είναι προφανές ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός καθιστά τη διαδικασία υποστήριξης της διαπομπής εντελώς ανεξάρτητη από τη λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης κίνησης πολυεκπομπής. Στην συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους λεπτομέρειες που αφορούν στην υλοποίηση του μηχανισμού *Home Subscriptions* για την περίπτωση που ο κινητός χρήστης λειτουργεί ως αποδέκτης ή ως πηγή της κίνησης πολυεκπομπής.

2.4.1.1.1 Κινητικότητα Αποδεκτών Κίνησης

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο MIP, στην περίπτωση που οι κινητοί χρήστες είναι αποδέκτες της κίνησης θα πρέπει να αιτηθούν τη συμμετοχή τους στις διάφορες ομάδες πολυεκπομπής διαμέσου του *Αντιπροσώπου Κινητικότητας* που τους εξυπηρετεί από το *Οικείο* τους Δίκτυο, δηλαδή του κόμβου HA. Η υποβολή της συγκεκριμένης αίτησης αλλά και ο έλεγχος συμμετοχής στις ομάδες πολυεκπομπής πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα καθ' ύλην αρμόδια γι' αυτό το σκοπό πρωτόκολλα IGMP/MLD. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεν απαιτεί την ανάπτυξη ενός ξεχωριστού, εξειδικευμένου μηχανισμού για την διαχείριση εγκατάστασης και κατάλυσης συνόδων πολυεκπομπής σε κινητούς χρήστες. Αντίθετα πραγματοποιεί ολοκλήρωση της λειτουργίας του υπάρχοντος μηχανισμού κινητικότητας του MIP με την ήδη υπάρχουσα υποδομή της αρχιτεκτονικής IP Multicast. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 2 - 13 και Σχήμα 2 - 14), απεικονίζεται η διαδικασία υποστήριξης διαπομπής πολυεκπομπής με χρήση του μηχανισμού Home Subscriptions. Στα σχήματα απεικονίζεται τόσο η διαδικασία σηματοδότησης όσο και το μονοπάτι που ακολουθούν τα πακέτα κίνησης στην περίπτωση που ο κινητός κόμβος είναι αποδέκτης ή πηγή της κίνησης πολυεκπομπής.

Ένας κινητός κόμβος συνδεδεμένος σε ένα Ξένο φυσικό δίκτυο, βρίσκεται στο ίδιο «ιδεατό» (virtual) δίκτυο με τον HA που τον εξυπηρετεί. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου *ιδεατού* δικτύου υλοποιείται με τη χρήση του εγγενούς μηχανισμού ενθυλάκωσης πακέτων IP, δηλαδή της

αμφίδρομης δίοδου IP, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ανταλλαγή πακέτων κίνησης μεταξύ

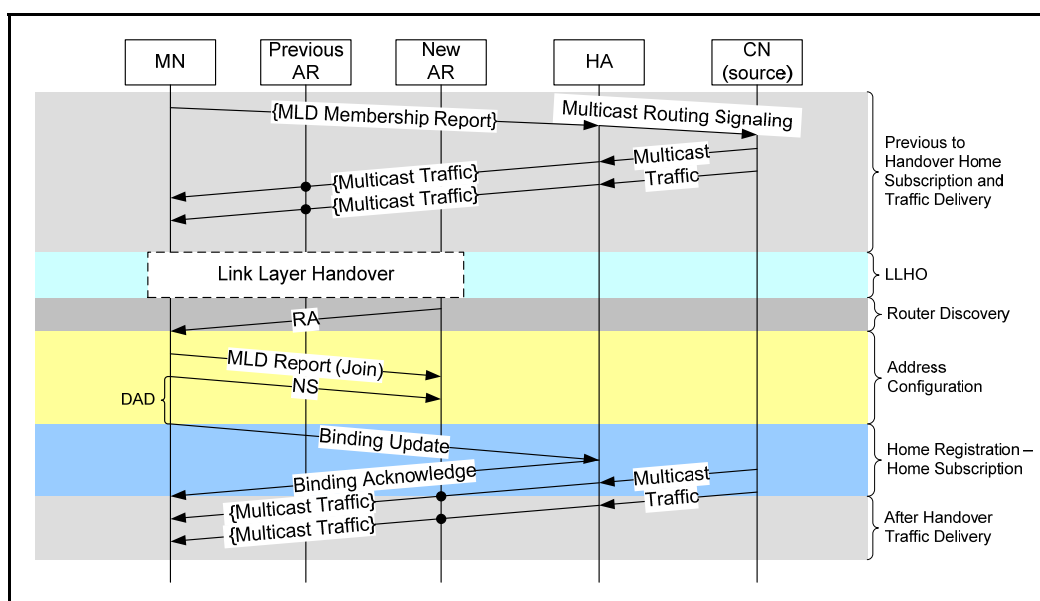


Σχήμα 2 - 13. Λειτουργία μηχανισμού Home Subscriptions κατά την διαπομπή παραλήπτη IP multicast κίνησης

του HA και του κινητού (βλέπε ενότητα 2.1.2). Η δημιουργία του συγκεκριμένου *ιδεατού* δικτύου παρέχει τη δυνατότητα σε καθένα από τους κόμβους που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό (δηλ. τον HA και το MN) να λειτουργούν σαν να είναι συνδεδεμένοι σε ένα πραγματικό υποδίκτυο IP, ανεξάρτητα από το ότι για τη σύνδεσή τους παρεμβάλλεται μία πλειάδα κόμβων και φυσικών συνδέσεων από τους οποίους διέρχονται τα πακέτα. Για τη διαχείριση της IP Multicast κινητικότητας πρέπει να αντιμετωπιστούν δύο προβλήματα: (α) πώς θα καταστεί δυνατή η παράδοση των πακέτων πολυεκπομπής στο κινητό όταν αυτό είναι συνδεδεμένο σε ένα *Ξένο Δίκτυο* και (β) πώς θα καθίσταται το (α) δυνατό όταν ο κινητός κόμβος αλλάζει δίκτυο πρόσβασης. Η λύση του πρώτου προβλήματος είναι απλή αναλογιζόμενοι ότι ο κινητός κόμβος και ο HA είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο *ιδεατό* υποδίκτυο. Με βάση την λειτουργία των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής IGMP/MLD, ένας τερματικός κόμβος μπορεί να καταστεί μέλος μίας ομάδας πολυεκπομπής εφόσον εκδηλώσει την επιθυμία του στον «εντεταλμένο δρομολογητή πολυεκπομπής» (multicast designated router) που εξυπηρετεί το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένοι και οι δύο. Κατά συνέπεια, μοναδική απαίτηση παραμένει η έκδοση ενός αιτήματος συμμετοχής προς τον κόμβο HA. Εφόσον ο κινητός κόμβος και ο HA βρίσκονται στο ίδιο *ιδεατό* δίκτυο η υποβολή του αιτήματος είναι εξαιρετικά απλή και υλοποιείται με την αποστολή ενός μηνύματος αναφοράς IGMP/MLD διαμέσου αυτού του δικτύου. Υπενθυμίζεται ότι εφόσον έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση της διαδικασίας *Οικείας Εγγραφής* του MIP, έχει κατασκευαστεί η αμφίδρομη δίοδος IP μεταξύ του κινητού και του HA. Από το σημείο αυτό και μετά το μόνο που απομένει είναι η έκδοση ενός αιτήματος διαμέσου των IGMP/MLD, από το

κινητό προς τον HA, μέσω του οποίου εκδηλώνεται το ενδιαφέρον για συμμετοχή σε ομάδες πολυεκπομπής.

Η βασική λειτουργία του πρωτοκόλλου IGMP/MLD θα έχει σαν αποτέλεσμα την κατασκευή ενός μηνύματος *Αναφοράς* (Membership Report – Join) το οποίο θα προωθηθεί προς το *ιδεατό* δίκτυο. Στην πράξη το πακέτο IP που θα περιέχει το συγκεκριμένο μήνυμα θα ενθυλακωθεί σε ένα άλλο IP πακέτο το οποίο και θα διατρέξει όλο το μονοπάτι που συνδέει τον κινητό κόμβο και το HA. Κατά την παράδοση του μηνύματος στον HA θα ακολουθηθεί η αντίστροφη διαδικασία οπότε το γνήσιο IGMP/MLD μήνυμα θα παραδοθεί κανονικά στην ομότιμη οντότητα του πρωτοκόλλου που λειτουργεί στον εντεταλμένο δρομολογητή πολυεκπομπής του ιδεατού υποδικτύου, δηλαδή το HA. Σαν αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διαδικασίας ο HA είναι υποχρεωμένος να καταστεί μέλος του δένδρου διανομής πολυεκπομπής. Μόλις αρχίσουν να καταφθάνουν σε αυτόν τα πακέτα πολυεκπομπής θα πρέπει να αρχίσει να τα προωθεί προς το *ιδεατό* υποδίκτυό του. Αυτό σημαίνει ότι τα αφικνούμενα στον HA πακέτα πολυεκπομπής για τα οποία ενδιαφέρεται ο MN θα αρχίσουν να ενθυλακώνονται σε νέα IP datagrams, που θα έχουν σαν διεύθυνση προορισμού την τρέχουσα διεύθυνση του κινητού nCoa, και θα προωθούνται από τον HA προς αυτό.

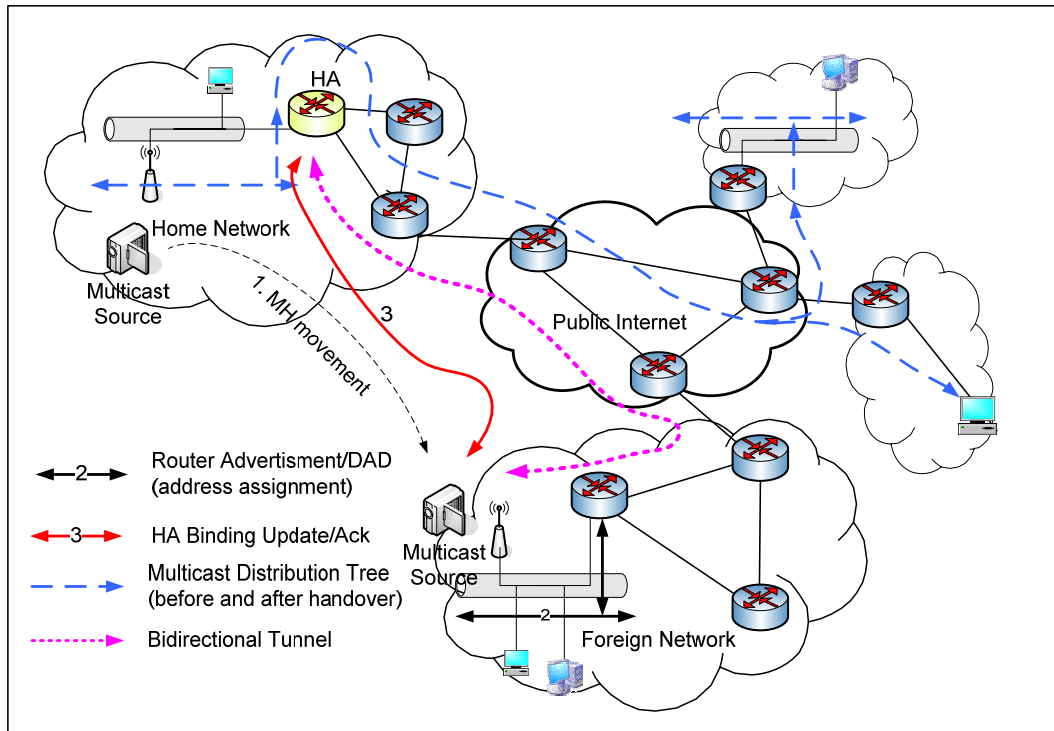


Σχήμα 2 - 14. Διαδικασία σηματοδότησης κατά τη διαπομπή κινητού παραλήπτη IP Multicast κίνησης με χρήση του μηχανισμού Home Subscriptions

2.4.1.1.2 Κινητικότητα Πηγών Κίνησης

Στην περίπτωση που το κινητό τερματικό λειτουργεί ως πηγή IP multicast κίνησης, ο HA παίζει το ρόλο του IP εντεταλμένου δρομολογητή πολυεκπομπής (Multicast Designated Router, MDR) από τον οποίο ξεκινά η διανομή της κίνησης προς το εγκατεστημένο δένδρο διανομής. Δεδομένου ότι ένας κινητός κόμβος είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει την νέα CoA του μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Οικείας Εγγραφής* του MIP, η αποστολή της κίνησης πολυεκπομπής προς τον HA και διαμέσου της αμφίδρομης διόδου IP του MIP, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εφόσον ο κινητός κόμβος έχει ήδη αποστείλει το μήνυμα *Binding Update* στον HA. Όπως

περιγράφεται και στην ενότητα 2.1, για την εκκίνηση της διαδικασίας αποστολής κίνησης με βάση την αρχιτεκτονική IP Multicast, δεν απαιτείται ανταλλαγή σηματοδοσίας μεταξύ του κόμβου αποστολέα και του MDR που εξυπηρετεί το υποδίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος. Εντούτοις παραμένει η απαίτηση ο κόμβος αποστολής να έχει μία έγκυρη διεύθυνση για το δίκτυο στο οποίο ανήκει.



Σχήμα 2 - 15. Λειτουργία μηχανισμού Home Subscriptions για την περίπτωση διαπομπής πηγής IP multicast κίνησης

Μεγάλο πλεονέκτημα από τη λειτουργία του μηχανισμού *Οικείων Συμμετοχών*, είναι η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε κινητούς χρήστες οι οποίοι συνδέονται σε κάποιο δίκτυο στο οποίο δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση συνόδων πολυεκπομπής και βέβαια το γεγονός ότι κατά την εκτέλεση διαπομπών δεν προκαλείται μεταβολή του δένδρου διανομής εφόσον αυτό έχει σταθερά ρίζα στον κόμβο HA. Θα πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι το τερματικό πηγή χρησιμοποιεί τη διεύθυνση HoA στο πεδίου διεύθυνση αποστολέα των datagrams που αποστέλλει προς τα μέλη της αντίστοιχης ομάδας πολυεκπομπής. τα συγκεκριμένα πακέτα ενθυλακώνονται σε νέα IP datagrams και αποστέλλονται αρχικά προς τον HA όπου αποθηκεύονται και εισέρχονται στο δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η διαπομπή να μην έχει καμία επίπτωση στη λειτουργία της εκτελούμενης εφαρμογής με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Εντούτοις αρνητικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι ουσιαστικά τα πακέτα κίνησης δεν ακολουθούν το βέλτιστο μονοπάτι προς το δένδρο διανομής και υφίστανται επιπρόσθετη καθυστέρηση.

2.4.1.2 Απομακρυσμένες Συμμετοχές (Remote Subscriptions)

Ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* (*Remote Subscriptions*, RS), προβλέπει ότι κάθε κινητός χρήστης που έχει ενεργές συνόδους πολυεκπομπής, μετά την ολοκλήρωση των

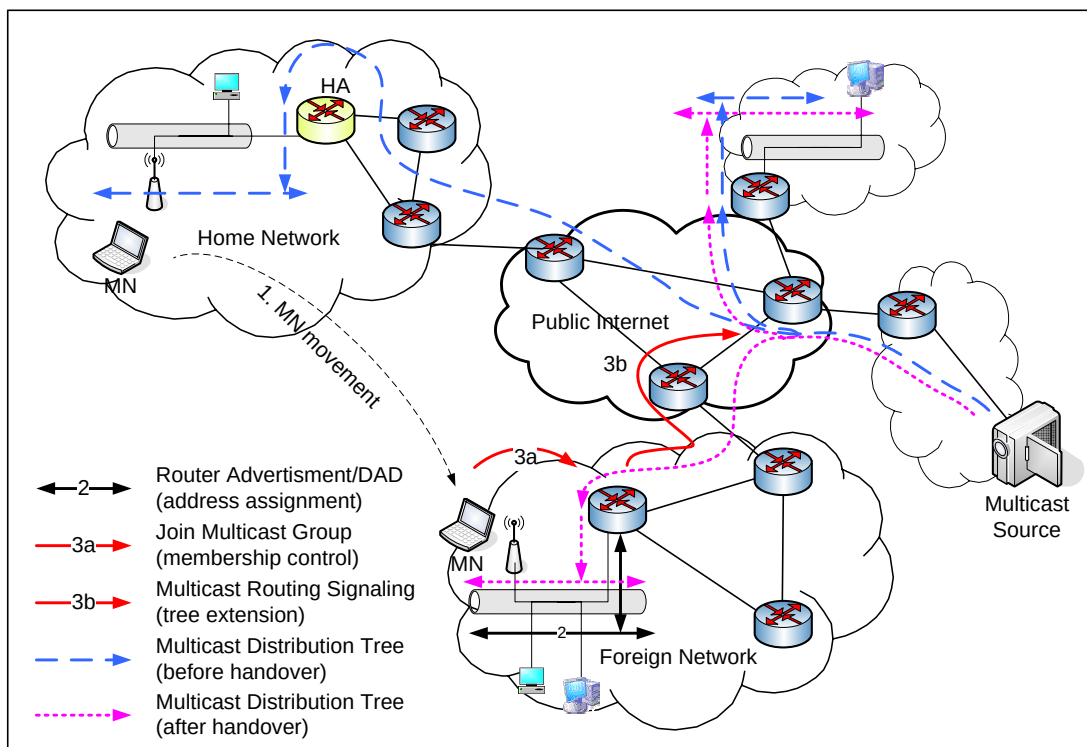
διαδικασιών που αφορούν την πρόσδεσή του σε ένα νέο *Ξένο Δίκτυο*, έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει αυτόνομα τις διαδικασίες για την αποκατάσταση της επικοινωνίας στο στρώμα δικτύου. Στην περίπτωση που είναι αποδέκτης κίνησης θα πρέπει να αποστείλει ένα μήνυμα *Αίτησης Συμμετοχής* για την κατάλληλη ομάδα πολυεκπομπής, προς τον *εντεταλμένο δρομολογητή πολυεκπομπής* που εξυπηρετεί το υποδίκτυο στο οποίο έχει συνδεθεί. Στην περίπτωση που είναι αποστολέας, η διαδικασία προβλέπει την μετάδοση των πακέτων προς την ομάδα πολλαπλών προορισμών μέσω του νέου δρομολογητή πρόσβασης (Access Router, AR) ο οποίος εξυπηρετεί υποδίκτυο χρησιμοποιώντας τη νέα διεύθυνση IP (nCoA) στο πεδίο διεύθυνση πηγής των datagrams που αποστέλλει. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται η ανακατασκευή του δένδρου διανομής κίνησης πολυεκπομπής την οποία αναλαμβάνουν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολυεκπομπής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η λειτουργία του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* θα μπορούσε να θεωρηθεί εντελώς ανεξάρτητη από το μηχανισμό κινητικότητας που ορίζει το πρωτόκολλο MIP, εφόσον στην πράξη δε χρησιμοποιείται κάποια επιπλέον τεχνική διαχείρισης κινητικότητας για την αποκατάσταση της επικοινωνίας. Εντούτοις δεδομένου ότι ένας κινητός κόμβος θεωρητικά χρησιμοποιεί τις ρυθμίσεις που εισάγει το MIP για την εκτέλεση των προπαρασκευαστικών διαδικασιών που προηγούνται της σηματοδότησης του MIP (δηλ. *Αναζήτηση Δρομολογητή* και *Επισήμανση Μετακίνησης*), στα πλαίσια της διατριβής οι *Απομακρυσμένες Συμμετοχές* θεωρούνται ολοκληρωμένες στο πλαίσιο κινητικότητας που χρησιμοποιείται στο Διαδίκτυο και ορίζεται από το MIP. Σημειώνεται ότι η απόκτηση της IP διεύθυνσης παρέχεται από τις διαδικασίες stateless/statefull address autoconfiguration που ορίζονται στα πλαίσια της λειτουργίας των μηχανισμών Neighbor/Router Discovery που προβλέπονται από το πρωτόκολλο ND (που θεωρείται αναπόσπαστο κομμάτι της λειτουργικότητας που παρέχεται στο επίπεδο δικτύου). Στην περίπτωση του MIPv4 από την άλλη, η ανάθεση της διεύθυνσης είναι αναπόσπαστο κομμάτι της όλης διαδικασίας. Το Σχήμα 2 - 16 που ακολουθεί παρουσιάζει τη διαδικασία για την περίπτωση που ο κινητός χρήστης είναι αποδέκτης της κίνησης, ενώ το Σχήμα 2 - 17 την περίπτωση που είναι αποστολέας.

2.4.1.2.1 Κινητικότητα Αποδεκτών Κίνησης

Όπως προαναφέρθηκε, η αποκατάσταση της επικοινωνίας μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής ενός κινητού κόμβου σε ένα *Ξένο Δίκτυο*, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με χρήση των βασικών πρωτοκόλλων IP όπως ακριβώς συμβαίνει κατά την αρχικοποίηση ενός τερματικού κόμβου σε ένα τυπικό δίκτυο IP (όπως και το *Οικείο* του *Δίκτυο*). Πιο συγκεκριμένα, με βάση την προδιαγραφή του πρωτοκόλλου Neighbor Discovery ένας κινητός κόμβος αμέσως μετά τη διαπομπή του είναι υποχρεωμένος να εκτελέσει τις διαδικασίες *Επισήμανσης Μετακίνησης*, *Ανακάλυψης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης* ώστε να ταυτοποιηθεί στο νέο δίκτυο και να αποκτήσει μία έγκυρη διεύθυνση σε αυτό. Εφόσον ολοκληρωθεί η εκτέλεση των συγκεκριμένων διαδικασιών, ο κινητός κόμβος μπορεί να προχωρήσει στην αποκατάσταση της επικοινωνίας στο επίπεδο της συνόδου πολυεκπομπής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα *Ελέγχου Συμμετοχής* αποστέλλοντας το κατάλληλο μήνυμα *Αναφοράς Συμμετοχής* (IGMP ή MLD αν πρόκειται για σύστημα βασισμένο στο IPv4 ή το IPV6 αντίστοιχα), ώστε να εκδηλώσει στο δρομολογητή πολυεκπομπής του δικτύου στο οποίο έχει προσδεθεί ότι επιθυμεί

τη λήψη ενός συγκεκριμένου ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής. Η λήψη του συγκεκριμένου μηνύματος σκανδαλίζει τον εν λόγω δρομολογητή να εκκινήσει τις κατάλληλες διαδικασίες που προβλέπονται από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής, ώστε να καταστεί μέλος του δένδρου διανομής.

Ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* προτείνει την αναπροσαρμογή του δένδρου διανομής της κίνησης πολυεκπομπής ώστε να συμπεριλάβει το νέο σημείο πρόσδεσης του κινητού κόμβου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεν θέτει κάποια επιπλέον απαίτηση ενθυλάκωσης πακέτων όπως ισχύει στην περίπτωση της unicast κινητικότητας δεδομένου ότι εν γένει στην περίπτωση των αποδεκτών κίνησης πολυεκπομπής η μεταβολή της διεύθυνσης του κινητού κόμβου δεν έχει κάποια επίδραση στην εκτέλεση των υπηρεσιών πολυεκπομπής, εφόσον η διεύθυνση προορισμού των πακέτων στρώματος δικτύου δεν μεταβάλλεται (εφόσον αντιστοιχεί στην ίδια ομάδα πολυεκπομπής).

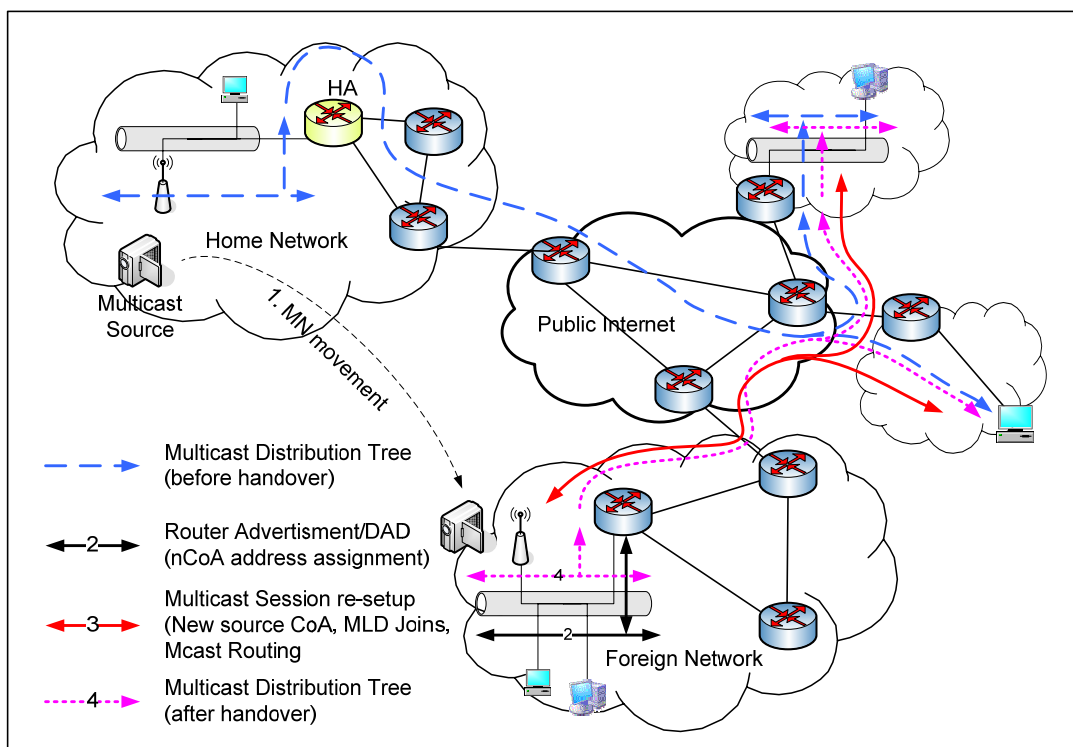


Σχήμα 2 - 16. Λειτουργία μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* κατά διαπομπή παραλήπτη IP multicast κίνησης

2.4.1.2.2 Κινητικότητα Πηγών Κίνησης

Για την περίπτωση κινητικότητας των πηγών κίνησης, η λειτουργία του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* ή πιο ορθά η απουσία κάποιου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας, λειτουργεί μάλλον ανασταλτικά. Στην πράξη κατά την ανάπτυξη εφαρμογών πολυεκπομπής με βάση αμφότερα τα μοντέλα προώθησης κίνησης πολυεκπομπής που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.1.1 (*Any Source Multicast* και *Source Specific Multicast*), η διεύθυνση του αποστολέα κίνησης χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση μίας συνόδου στο επίπεδο μεταφοράς τόσο στην πλευρά των αποστολέων όσο και στην πλευρά των

παραληπτών¹⁸. Στην περίπτωση μεταβολής της διεύθυνσης του αποστολέα απαιτείται η επανεγκατάσταση των χαρακτηριστικών των διεπαφών λογισμικού σε όλα τα άκρα της εκάστοτε συνόδου (αποστολείς και παραλήπτες). Αν και στην πλειοψηφία τους για τις εφαρμογές πολυεκπομπής οι χρησιμοποιούμενες συνδέσεις χαρακτηρίζονται ως *connectionless*, πράγμα που σημαίνει ότι η κατάλυση και εγκατάσταση τους δεν προϋποθέτει εκτέλεση σύγχρονων διαδικασιών στα άκρα τους (όπως στις συνδέσεις TCP/SCTP), η διαδικασία επανεγκατάστασης απαιτεί από την εκάστοτε πηγή την ενημέρωση του συνόλου των αποδεκτών αναφορικά με την επανα-ρύθμιση του αναγνωριστικού της. Εντούτοις η συγκεκριμένη διαδικασία είναι εξαιρετικά κοστοβόρα από την άποψη ότι απαιτεί την ανταλλαγή πλειάδας μηνυμάτων μεταξύ του συνόλου των τερματικών που συμμετέχουν στη σύνοδο. Για παράδειγμα για την υλοποίησή της απαιτείται η λειτουργία ενός μηχανισμού ο οποίος θα συντονίζει τη λειτουργία της εκάστοτε εφαρμογής και θα συγχρονίζει τη διαδικασία ενημέρωσης των παραληπτών αναφορικά με τη μεταβολή της διεύθυνσης του αποστολέα.



Σχήμα 2 - 17. Λειτουργία μηχανισμού Απομακρυσμένων Συμμετοχών κατά διαπομπή πηγής IP multicast κίνησης

Εξίσου σημαντική είναι και η απαίτηση για συγχρονισμό των διαδικασιών που σχετίζονται με τη λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής. Για παράδειγμα για την υποστήριξη μίας εφαρμογής SSM στην περίπτωση μεταβολής της διεύθυνσης πηγής απαιτείται η κατασκευή από την αρχή του δένδρου δρομολόγησης, πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει αφ' ενός να ενημερωθούν όλοι οι παραλήπτες για την μεταβολή διεύθυνσης του κόμβου αποστολέα, να

¹⁸ Η διεύθυνση των πηγών κίνησης multicast γίνεται γνωστή στους παραλήπτες κατά την φάση εγκατάστασης των συνόδων μέσω κατάλληλων μηχανισμού ανακοίνωσης (πχ. SAP, www URL), και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των διεπαφών λογισμικού του στρώματος μεταφοράς (transport layer sockets), μέσω των οποίων εγκαθίστανται οι διάφορες σύνοδοι πολυεκπομπής.

εκδώσουν νέα μηνύματα ελέγχου συμμετοχής IGMPv3/MLDv2 [15]-[16], στα οποία θα περιέχεται η νέα διεύθυνση του κόμβου αποστολέα, και τα οποία θα ενεργοποιήσουν την κατασκευή του νέου δένδρου που θα έχει ως ρίζα τη νέα θέση του κινητού κόμβου αποστολέα. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι για την περίπτωση του μοντέλου ASM η προώθηση πακέτων πολυεκπομπής στα οποία δεν χρησιμοποιείται η πραγματική διεύθυνση του κόμβου αποστολέα (αλλά αντίθετα η διεύθυνση που έχει ο κινητός κόμβος στο *Οικείο Δίκτυο*) δεν εξασφαλίζει την παροχή της υπηρεσίας πολυεκπομπής για δύο λόγους: πρώτον οι δρομολογητές πύλης που οριοθετούν τις διάφορες αυτόνομες περιοχές δικτύων, συνήθως απορρίπτουν τα πακέτα (δηλ. δεν επιτρέπουν την έξοδο προς ξένα δίκτυα) των οποίων η διεύθυνση αποστολέα δεν ανήκει στο δίκτυο της δικαιοδοσίας τους. Δεύτερον οι δρομολογητές που συστήνουν το δένδρο διανομής κίνησης πολυεκπομπής χρησιμοποιούν τη διεύθυνση αποστολέα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου RPF (Reverse Path Forwarding, βλέπε ενότητα 2.1.3), κατά τον οποίο ένα πακέτο πολυεκπομπής προωθείται μόνο στην περίπτωση που έχει αφιχθεί στον δρομολογητή από την είσοδο που αντιστοιχεί στο συντομότερο προς την πηγή μονοπάτι. Αυτό σημαίνει ότι μία πηγή δεν μπορεί να χρησιμοποιεί μία σταθερή διεύθυνση, όπως η διεύθυνση HoA, στο πεδίο διεύθυνση αποστολέα πράγμα που εύλογα θα έλυνε τα προβλήματα με το στρώμα μεταφοράς που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

2.4.1.3 Πλεονεκτήματα και Προβλήματα που Ανακύπτουν από τη Λειτουργία των Μηχανισμών Mobile IP Multicast

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται τα προτερήματα αλλά και τα προβλήματα που ανακύπτουν από την λειτουργία των μηχανισμών *Οικείων* και *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* που αναλύθηκαν παραπάνω. Εκτενής ανάλυση σχετικά μπορεί να βρεθεί στα [72]-[87].

Στην περίπτωση του μηχανισμού *Οικείων Συμμετοχών* του MIP, που καθιστά τον HA ως σημείο πρόσβασης στην υπηρεσία IP multicast, βασικά πλεονεκτήματα αποτελούν η απλότητα στην υλοποίηση κι εφαρμογή, δηλαδή το γεγονός ότι δεν τίθενται επιπλέον απαιτήσεις ούτε στην υποδομή της υπηρεσίας πολυεκπομπής, ούτε στους *Κόμβους Ανταποκριτές* για την από άκρο-σε-άκρο επικοινωνία. Επιπλέον προτέρημα αποτελεί και το γεγονός ότι η διαταραχή που προκαλεί η εκτέλεση μίας διαπομπής δεν έχει κανένα απολύτως αντίκτυπο στη δομή του δένδρου διανομής της κίνησης, πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση της μετακίνησης πηγών κίνησης. Όπως προαναφέρθηκε η διαπομπή εκτελείται διαφανώς προς τα ανώτερα στρώματα (δεν ισχύει στην περίπτωση των *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*) εφόσον πρακτικά το σημείο εισόδου/εξόδου από το δένδρο διανομής αποτελεί ο κόμβος HA ανεξάρτητα από την κινητικότητα των τερματικών (πηγών ή παραληπτών). Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ο μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα σε κινητούς κόμβους να παραμένουν μέλη συνόδων πολυεκπομπής ενώ είναι συνδεδεμένοι σε δίκτυα στα οποία η υπηρεσία δεν υποστηρίζεται. Θα πρέπει εντούτοις να σημειωθεί ότι για την περίπτωση των IPv6 συστημάτων η υποστήριξη της υπηρεσίας IP Multicast είναι υποχρεωτική.

Από την άλλη η λειτουργία του μηχανισμού *Οικείων Συμμετοχών* αποτελεί επίσης πηγή πλειάδας προβλημάτων, τα οποία εντοπίζονται τόσο στο βραχύ διάστημα εκτέλεσης μίας διαπομπής όσο και στον τρόπο με τον οποίο παραδίδεται η κίνηση πολυεκπομπής σε κινητούς κόμβους που

βρίσκονται συνδεδεμένοι σε *Ξένα Δίκτυα* για μεγάλο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, το βασικότερο μειονέκτημα του μηχανισμού αποτελεί το γεγονός ότι τα πακέτα κίνησης δεν ακολουθούν το ελάχιστο μονοπάτι από τις πηγές προς τους προορισμούς τόσο στην κινητικότητα πηγών όσο και στην κινητικότητα παραληπτών. Αυτό αποτελεί εγγενές πρόβλημα του μηχανισμού που εισάγει το MIP και είναι αντίστοιχο του προβλήματος *τριγωνικής δρομολόγησης* που αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.1. Σαν αποτέλεσμα προκαλούνται επιπρόσθετες καθυστερήσεις στην παράδοσή των πακέτων κίνησης πράγμα εξαιρετικά σπουδαίο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επιπλέον η χρήση του κόμβου HA ως σημείο «*αγκύρωσης*» κινητικότητας έχει σαν αποτέλεσμα τόσο την αύξηση του φορτίου κίνησης που διαχειρίζεται ο κόμβος αλλά και διαπερνά το ευρύτερο δίκτυο στο οποίο αυτός ανήκει.

Στην περίπτωση της κινητικότητας παραληπτών, η λειτουργία του μηχανισμού *Οικείων Συμμετοχών* πραγματοποιεί κακή διαχείριση των δικτυακών πόρων (εύρος ζώνης ζεύξεων, επεξεργαστική ισχύς) εφόσον καταστρατηγούνται μερικές από τις πλέον βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής IP Multicast. Πιο συγκεκριμένα, ο HA είναι υποχρεωμένος να επαναμεταδίδει το κάθε πακέτο κίνησης μίας ροής πολυεκπομπής προς τον καθένα κινητό χρήστη που βρίσκεται σε κάποιο απομακρυσμένο δίκτυο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι αντίθετη προς το μοντέλο IP Multicast, σύμφωνα το οποίο η κίνηση μεταδίδεται μία φορά προς κάθε έξοδο του δρομολογητή και όχι μία φορά για κάθε χρήστη. Στο ίδιο πλαίσιο, συναφής είναι και η επιτελούμενη πολλαπλή λήψη των πακέτων μίας ροής πολυεκπομπής προς το ίδιο δίκτυο πρόσβασης, στην περίπτωση που περισσότεροι του ενός παραλήπτες της ροής είναι προσδεμένοι στο ίδιο δίκτυο πρόσβασης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα στη βιβλιογραφία απαντάται με τον όρο «*σύγκλιση διόδων*» (tunnel convergence problem). Τέλος δε θα πρέπει να παραληφθεί και το γεγονός ότι ο μηχανισμός δεν επιτρέπει σε καμία περίπτωση την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών τόσο από την πλευρά των πηγών όσο και από την πλευρά των παραληπτών, εφόσον και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται η ολοκλήρωση των διαδικασιών *Επισήμανσης Μετακίνησης*, *Ρύθμισης Διεύθυνσης* και *Οικείας Εγγραφής* του MIP μετά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, ώστε να καταστεί δυνατή η επικοινωνία του κινητού κόμβου στο επίπεδο της συνόδου πολυεκπομπής στην οποία συμμετέχει. Αυτό σημαίνει ότι η απώλεια πακέτων κατά την εκτέλεση μίας διαπομπής είναι αναπόφευκτη.

Στην περίπτωση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η παράδοση των πακέτων πολυεκπομπής πραγματοποιείται άμεσα από το δένδρο διανομής, δηλαδή ακολουθώντας το βέλτιστο μονοπάτι ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν η διαπομπή ενός παραλήπτη κίνησης πραγματοποιείται προς ένα δίκτυο το οποίο είναι ήδη κομμάτι του δένδρου διανομής, δηλαδή για την περίπτωση στην οποία το νέο δίκτυο εξυπηρετεί ήδη έναν άλλο παραλήπτη της ίδιας ομάδας πολυεκπομπής. Στην περίπτωση αυτή, ο διαπεμπόμενος χρήστης καθίσταται αποδέκτης της κίνησης αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας πρόσδεσης στο στρώμα ζεύξης, μη αντιμετωπίζοντας καμία απολύτως επιπρόσθετη καθυστέρηση στο στρώμα δικτύου. Προφανώς αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* εφόσον τα πακέτα παραδίδονται ενθυλακωμένα στον κάθε

κινητό χρήστη ξεχωριστά μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών *Ανανέωσης Εγγραφής* του MIP. Επιπλέον σημαντικό μπορεί να χαρακτηριστεί και το γεγονός ότι ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* δεν εισάγει καμία τεχνική αναμετάδοσης πακέτων στη μόνιμη ελαχιστοποιώντας το κόστος προώθησης κίνησης με αυτόν τον τρόπο. Επιπρόσθετα, ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* δεν είναι ευάλωτος στην περίπτωση που ένας κινητός παραλήπτης εκτελεί πολύ ταχείς διαπομπές μεταξύ του ίδιου ζευγαριού δικτύων πρόσβασης (ring ring handovers). Εν γένει με βάση τις τυπικές ρυθμίσεις των πρωτοκόλλων *Ελέγχου Συμμετοχής* σε ομάδες πολυεκπομπής (IGMP/MLD), η αποχώρηση ενός δρομολογητή από ένα δένδρο διανομής πραγματοποιείται με κάποια καθυστέρηση της τάξης των 2-3 δευτερολέπτων εφόσον αποστέλλεται ένα κατάλληλο μήνυμα από τον κόμβο που αποχωρεί ή του ενός λεπτού της ώρας εφόσον δεν μεταδίδεται το μήνυμα. Έτσι στην περίπτωση που ο κινητός κόμβος επιστρέψει στο παλιό του δίκτυο μετά την αρχική διαπομπή του σε ένα γειτονικό, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μεταδίδονται ακόμη τα πακέτα πολυεκπομπής προς την ομάδα που είναι ήδη μέλος, οπότε δεν χρειάζεται να ανακατασκευαστεί το δένδρο ενώ ο ίδιος θα ξεκινήσει να λαμβάνει τα πακέτα κίνησης ευθύς αμέσως.

Για την περίπτωση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, η απουσία χρήσης ενός εξειδικευμένου μηχανισμού για την υποστήριξη μίας διαπομπής έχει σημαντικά μειονεκτήματα αναφορικά με το αντίκτυπο στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας. Στην ενότητα 2.4.1.2.2 αναλύθηκαν οι λόγοι για τους οποίους η διαπομπή μίας πηγής κίνησης οδηγεί στην κατάλυση της εγκατεστημένης συνόδου και απαιτεί την ανακατασκευή του δένδρου δρομολόγησης. Θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη διάρκεια ανακατασκευής του δένδρου δρομολόγησης όλα τα μεταδιδόμενα πακέτα από τις πηγές απορρίπτονται εντός του δικτύου κορμού (είτε από τον εντεταλμένο δρομολογητή πολυεκπομπής του νέου υποδικτύου στο οποίο συνδέθηκε η κινητή πηγή, είτε από τον κόμβο *Σημείο Συνάντησης* – *Rendezvous Point* – στην περίπτωση μοιραζόμενων δένδρων διανομής). Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η χρήση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* είναι αδύνατη για την διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής. Για την περίπτωση της κινητικότητας παραληπτών το σημαντικότερο πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι ο χρόνος που απαιτείται για την ανακατασκευή του δένδρου δρομολόγησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπολογία και την κατάσταση του δικτύου γενικότερα αλλά και το εύρος της διαπομπής (πχ. αν ο κινητός κόμβος διαπέμπεται εντός του ίδιου αυτόνομου συστήματος ή μεταξύ διαφορετικών δικτύων που ελέγχονται από διαφορετικούς λειτουργούς). Με άλλα λόγια η καθυστέρηση συμμετοχής στο δένδρο (join latency) είναι μη ντετερμινιστική και παρουσιάζει μεγάλη διασπορά τιμών. Συνεπώς, ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* παρουσιάζει τη βέλτιστη λύση από την άποψη κατανάλωσης δικτυακών πόρων για την περίπτωση της κινητικότητας παραληπτών αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί για εφαρμογές πραγματικού χρόνου σε ευρεία κλίμακα. Για την περίπτωση της κινητικότητας πηγών η χρήση του είναι πρακτικά αδύνατη στο σύγχρονο Διαδίκτυο (μπορεί να καταστεί δυνατή εφόσον μεταβληθεί η λειτουργία συγκεκριμένων μηχανισμών τόσο στο δίκτυο πυρήνα όσο και στους τερματικούς κόμβους).

Για αμφότερους τους μηχανισμούς *Οικείων* και *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, εκτός από την καθυστέρηση συμμετοχής στο δένδρο, στην περίπτωση διαπομπής παραληπτών κίνησης θα πρέπει να προστεθεί και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ένας κινητός κόμβος εκτελεί τις διαδικασίες *Επισήμανσης Μετακίνησης*, *Αναζήτησης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*. Αυτό ισχύει διότι σε κάθε περίπτωση η λειτουργία των πρωτοκόλλων IGMP/MLD προϋποθέτουν την αποστολή μηνυμάτων *Αναφορών Συμμετοχής* σε ομάδες πολυεκπομπής τα οποία θα περιέχουν έγκυρες διευθύνσεις στο πεδίο διεύθυνση αποστολέα (διαφορετικά απορρίπτονται από τους δρομολογητές πρόσβασης). Η απαίτηση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την διεύρυνση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο πραγματοποιείται απώλεια πακέτων, δηλαδή την καθυστέρηση εκτέλεσης της διαπομπής (handover latency). Ως εκ τούτου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του διαστήματος κατά το οποίο εκτελείται η διαπομπή στρώματος ζεύξης δεδομένων οι κινητοί παραλήπτες δεν είναι σε θέση να λάβουν πακέτα, η χρήση κανενός μηχανισμού δεν παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών. Όπως προαναφέρθηκε, για την περίπτωση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, η καθυστέρηση μίας διαπομπής εντός του ιδίου αυτόνομου συστήματος θα είναι σχετικά μικρή εφόσον στην χειρότερη περίπτωση δεν θα απαιτείται η πλήρης κατασκευή του νέου κλαδιού για την εξυπηρέτηση του χρήστη αλλά ενός μικρού κομματιού του. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που πραγματοποιούνται πολύ συχνές διαπομπές.

Συνοψίζοντας, οι δύο μηχανισμοί που αναλύθηκαν αποτελούν ουσιαστικά τις δύο ακραίες περιπτώσεις για την διαχείριση κινητικότητας κόμβων με ενεργές συνόδους πολυεκπομπής. Από τη μία ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* εισάγει ένα ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ του στρώματος δικτύου και του στρώματος μεταφοράς το οποίο απορροφά και αποκρύπτει την εκτέλεση διαπομπών στους τερματικούς κόμβους που συμμετέχουν στις συνόδους πολυεκπομπής. Από την άλλη ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* στηρίζεται στη λειτουργία των βασικών μηχανισμών της αρχιτεκτονικής IP Multicast για την αποκατάσταση της επικοινωνίας, μη προτείνοντας κάποιον εξειδικευμένο μηχανισμό για τη διαχείριση της κινητικότητας. Η επιλογή αυτή αν και για την περίπτωση της κινητικότητας παραληπτών θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν μία μέση λύση, για αυτή της κινητικότητας πηγών είναι καταστροφική εφόσον απαιτεί όπως αναλύθηκε παραπάνω την επανεγκατάσταση της συνόδου για όλα τα μέλη της ομάδας και την ανακατασκευή του δένδρου διανομής από την αρχή. Αναφορικά με την κατανάλωση δικτυακών πόρων ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* οδηγεί στην πλέον ασύμφορη λύση επιβάλλοντας τη χρήση unicast τεχνολογίας για την εξυπηρέτηση multicast εφαρμογών, πράγμα το οποίο εγείρει θέματα κακής κλιμάκωσης και κακοδιαχείρισης των πολλές φορές όχι άφθονων πόρων των ασύρματων συστημάτων. Αντίθετα ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιεί βέλτιστη διαχείριση πόρων στη μόνιμη κατάσταση. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι και οι δύο μηχανισμοί δεν λαμβάνουν καμία πρόνοια για την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών πράγμα το οποίο σημαίνει ότι σε κάθε περίπτωση η απώλεια πακέτων και η χειροτέρευση της ποιότητας εφαρμογών πραγματικού χρόνου είναι αναπόφευκτη.

2.4.2 Προηγμένοι Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο

Τα προβλήματα που προκύπτουν από την λειτουργία των μηχανισμών *Απομακρυσμένων και Οικείων Συμμετοχών*, είναι πάρα πολλά και κάθε άλλο παρά αμελητέα. Σαν αποτέλεσμα η απρόσκοπτη και αποδοτική παροχή υπηρεσιών κινητικότητας πολυεκπομπής σε μεγάλη κλίμακα καθίσταται πρακτικά ανέφικτη, εφόσον κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής δεν μπορεί να εξασφαλιστεί η εκτέλεση των εφαρμογών πολυεκπομπής σε ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας. Στην βιβλιογραφία έχει παρουσιαστεί μία σειρά από λύσεις/προτάσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι οποίες συνθέτουν ένα νέο πλαίσιο για τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής στις μέρες μας και το οποίο θα παρουσιαστεί στην συνέχεια. Η πλειονότητα των προτάσεων, αν και οδηγεί στην αντιμετώπιση των προβλημάτων σε ένα βαθμό, εστιάζεται στην ενσωμάτωση επεκτάσεων στους μηχανισμούς (πχ. με ορισμό επιπλέον μηνυμάτων μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων) ή προτείνοντας την επέκταση της αρχιτεκτονικής του MIP μέσω της εισαγωγής νέων οντοτήτων επιφορτισμένων με πρόσθετη λειτουργικότητα. Επιπλέον προτείνεται η χρησιμοποίηση μηχανισμών αναδρομολόγησης των ροών κίνησης πολυεκπομπής με χρήση ενθυλάκωσης πακέτων (Διόδων IP) για το σκοπό αυτό.

Προσπαθώντας να περιγράψουμε τη λογική που ακολουθείται στη σχεδίαση των μηχανισμών που ακολουθεί, θα λέγαμε ότι για την παροχή προηγμένων υπηρεσιών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής απαιτείται είτε η «σχεδόν βέλτιστη» διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του συστήματος, είτε αύξηση της πολυπλοκότητας του μηχανισμού, κυρίως μέσω της ανταλλαγής επιπλέον μηνυμάτων σηματοδότησης και της λειτουργικότητας που ανατίθεται στους κόμβους του δικτύου (αντίθετα με τις αρχές που έχουν ακολουθηθεί παραδοσιακά στην ανάπτυξη του Διαδικτύου). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι λύσεις προτείνουν την εγκατάσταση διόδων με διαφορετικά άκρα από αυτά που προτείνονται στην περίπτωση του μηχανισμού *Οικείων Συμμετοχών*. Εν γένει για την γρήγορη παράδοση των πακέτων κίνησης απαιτείται να υπάρχει ένας εύκολος τρόπος προώθησής τους προς τη νέα θέση του κινητού. Εναλλακτικά, ως βελτιώσεις του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* έχουν παρουσιαστεί λύσεις στις οποίες πραγματοποιείται επέκταση του δένδρου διανομής πριν ή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής που στοχεύουν στη μείωση της καθυστέρησης συμμετοχής στο δένδρο διανομής (join latency), δηλαδή του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο οι τελικοί χρήστες δεν μπορούν να λάβουν πακέτα κίνησης αν και έχει αποκατασταθεί η φυσική τους σύνδεσή τους στο νέο σημείο πρόσβασης.

Σαν γενικό συμπέρασμα πάντως θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος δεν έχει παρουσιαστεί μία λύση που να είναι ευρέως αποδεκτή και να αντιμετωπίζει το πρόβλημα από όλες τις πλευρές του (πχ. κινητικότητα πηγών/παραληπτών, αποδοτική χρήση πόρων). Η έννοια της ευρύτητας της αποδοχής προφανώς δε σχετίζεται μόνο με την εξάλειψη των προβλημάτων που εμφανίζει ο κάθε μηχανισμός αλλά μάλλον με το γεγονός ότι το ισοζύγιο μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων δεν έχει θετικό πρόσημο, εφόσον είναι εξαιρετικά δύσκολο να μη θυσιαστεί μία παράμετρος για χάριν κάποιας άλλης. Στην παρούσα

ενότητα θα αναλυθεί η λειτουργία των περισσότερο χαρακτηριστικών μηχανισμών που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία την τελευταία δεκαετία. Οι μηχανισμοί αυτοί αναπτύχθηκαν κυρίως για συστήματα βασισμένα στο πρωτόκολλο IPv4. Η εφαρμογή τους εντούτοις σε συστήματα IPv6 είναι προφανής για τις περισσότερες περιπτώσεις. Επιπλέον λεπτομέρειες και επαρκείς αναφορές μπορεί να αναζητηθούν στο [74]. Δεδομένου ότι δεν μπορούν να αναφερθούν όλοι οι μηχανισμοί που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, η ανάλυση πραγματοποιείται για τους μηχανισμούς που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο σχεδιαστικό ενδιαφέρον και βοηθούν στην καλύτερη ανάλυση του γενικότερου προβλήματος της κινητικότητας πολυεκπομπής που θα ακολουθήσει. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο σύγχρονες προτάσεις που έχουν γίνει την τελευταία τριετία, στα πλαίσια των οργανισμών IETF και IRTF. Οι μηχανισμοί αυτοί αποτελούν το κύριο αντικείμενο των προσπαθειών που εκτελούνται στις μέρες μας στον ευρύτερο τομέα διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, θέτοντας το πρόβλημα της κινητικότητας πολυεκπομπής σε μία νέα βάση, που δεν απαιτεί την ανάπτυξη ιδιαίτερων αρχιτεκτονικών αλλά αντίθετα το αντιμετωπίζει με χρήση της υπάρχουσας λειτουργικής υποδομής.

2.4.2.1 Παλαιότερες Προτάσεις

2.4.2.1.1 Προτάσεις Βασισμένες στη Μέθοδο Οικείων Συμμετοχών

Όλες οι προτάσεις που στηρίζονται στο μηχανισμό των *Οικείων Συμμετοχών* προσπαθούν, από τη μία να διατηρήσουν το σύνολο των πλεονεκτημάτων που περιγράφηκαν νωρίτερα, και από την άλλη να εκμηδενίσουν τα προβλήματα που σχετίζονται με την κακοδιαχείριση των πόρων κυρίως σε σχέση με το πρόβλημα της *σύγκλιση διόδων IP*. Γι' αυτό το λόγο αναπτύσσουν εξειδικευμένους μηχανισμούς μέσω των οποίων δίνεται δυνατότητα ελέγχου και διαχείρισης της λειτουργίας των διόδων που χρησιμοποιούνται κάθε χρονική στιγμή.

Mobile Multicast Protocol (MoM): Η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου MoM ήρθε να καλύψει την πληθώρα των προβλημάτων κλιμάκωσης που παρουσιάζει ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* αναφορικά με την προώθηση της κίνησης μέσω των διόδων IP. Σύμφωνα με αυτή, ορίζεται μία νέα οντότητα, επονομαζόμενη ως Designated Multicast Service Provider (DMSP), η οποία συνεργάζεται με τον Foreign Agent (FA) της αρχιτεκτονικής του MIPv4, ώστε η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής μέσω της διόδου IP του μηχανισμού *Οικείας Εγγραφής* να πραγματοποιείται μία μόνο φορά για κάθε ζευγάρι HA και FA. Στο ίδιο πλαίσιο, το πρωτόκολλο προβλέπει ότι ο κόμβος FA είναι πλέον υποχρεωμένος να προωθεί τα πακέτα στο υποδίκτυο που ανήκει ο κινούμενος κόμβος χρησιμοποιώντας τυπικούς μηχανισμούς προώθησης κίνησης πολυεκπομπής. Επιπρόσθετα, για την περίπτωση κατά την οποία κινητοί παραλήπτες που εξυπηρετούνται από διαφορετικούς κόμβους HA, εξυπηρετούνται από τον ίδιο FA, το πρωτόκολλο προβλέπει την επιλογή ενός από τους διαθέσιμους κόμβους HA για να λειτουργεί ως κόμβος DMSP οπότε και θα προωθεί την κατάλληλη κίνηση προς τον FA. Αν και το MoM έλυσε το πρόβλημα σύγκλισης διόδων IP δεν αντιμετώπισε το θέμα της τριγωνικής δρομολόγησης εφόσον τα πακέτα μεταφέρονται σε κάθε περίπτωση μέσω του DMSP. Επιπρόσθετα, η λειτουργία του αποτέλεσε πηγή ενός νέου προβλήματος που αφορά την περίπτωση κατά την οποία οι κόμβοι που εξυπηρετούνται από τον HA που λειτουργεί επίσης ως

DMSP για ένα δίκτυο, διαπεμφθούν από αυτό. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η επιλογή ενός νέου κόμβου DMSP πράγμα το οποίο απαιτεί την εκτέλεση ενός σύνθετου μηχανισμού για διαχείριση της αλλαγής.

Range-Based Mobile Multicast Protocol (RBMoM): Με στόχο την επιπρόσθετη αντιμετώπιση του προβλήματος της μη αποδοτικής τριγωνικής δρομολόγησης που άφησε ανοικτό το πρωτόκολλο MoM, οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου RBMoM προτείνουν την ανάπτυξη ενός αυτόνομου μηχανισμού κινητικότητας πολυεκπομπής ο οποίος αρχιτεκτονικά είναι παρόμοιος με τον μηχανισμό του MIP αλλά είναι προσανατολισμένος αποκλειστικά για τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής. Σύμφωνα τη νέα αρχιτεκτονική, ορίζεται ένας αντιπρόσωπος κινητικότητας, επονομαζόμενη ως Multicast Home Agent (MHA) ο οποίος έχει παρόμοια καθήκοντα με τον κόμβο HA της αρχιτεκτονικής MIP αλλά και τον κόμβο DMSP του πρωτοκόλλου MoM. Η διαφορά είναι ότι η λειτουργία του MHA έχει περιορισμένη εμβέλεια και περιορίζεται για μία συγκεκριμένη περιοχή του Διαδικτύου, σε αντίθεση με τον MIP-HA η λειτουργία του οποίου έχει παγκόσμια εμβέλεια. Με βάση την λειτουργία του πρωτοκόλλου, στην περίπτωση που ένας κινητός κόμβος κινείται σε *Ξένα Δίκτυα* τα οποία είναι στην περιοχή εμβέλειας ενός HA του τότε ο τελευταίος αποκτά το ρόλο του MHA. Στην περίπτωση κατά την οποία ο κινητός κόμβος διαπέμπεται σε ένα δίκτυο εκτός εμβέλειας του MHA, τότε ο κόμβος FA θα αποκτήσει τον ρόλο MHA. Δεδομένου ότι ο εκάστοτε κόμβος MHA γίνεται μέλος του δένδρου διανομής εξαλείφεται σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο της τριγωνικής δρομολόγησης ενώ χρησιμοποιώντας και τα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου MoM (λειτουργία κόμβου DMSP) το RBMoM περιορίζει επίσης και το πρόβλημα της σύγκλισης διόδων. Αρνητικό στοιχείο εντούτοις αποτελεί τόσο το γεγονός ότι το RBMoM προτείνει την ανάπτυξη μίας εντελώς νέας αρχιτεκτονικής, όσο και το γεγονός ότι για την διαχείριση της διαπομπής απαιτείται η εκτέλεση μίας πολύπλοκης διαδικασίας, με αυξημένο φορτίο σηματοδότησης και ελεγχόμενα αποτελέσματα αναφορικά με την ταχύτητα εκτέλεσης. Επίσης σημαντικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι η επιλογή της παραμέτρου που ορίζει την εμβέλεια αν και οδηγεί στην κατασκευή δένδρων διανομής που είναι πιο κοντά στους τερματικούς κόμβους (δηλ. η δρομολόγηση είναι «περισσότερο» βέλτιστη) απαιτούν την πιο συχνή ανακατασκευή τους πράγμα μη επιθυμητό εφόσον κατά την διάρκειά της παρατηρείται σημαντική απώλεια πακέτων.

2.4.2.1.2 Προτάσεις Βασισμένες στη Μέθοδο Απομακρυσμένων Συμμετοχών

Multicast By Multicast Agent Protocol (MMA): Με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατά τον οποίο δεν είναι εφικτή η παράδοση των πακέτων κίνησης πολυεκπομπής λόγω της καθυστέρησης των διαδικασιών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής, το πρωτόκολλο MMA, έχοντας ως βάση το μηχανισμό *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, προτείνει τη χρήση ενός μηχανισμού προώθησης πακέτων πολυεκπομπής. Για το σκοπό αυτό ορίζονται μία νέα αρχιτεκτονική διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής η οποία εισάγει δύο νέους λειτουργικούς κόμβους: τον Multicast Agent (MA) και τον Multicast Forwarder (MF). Ο πρώτος αποτελεί το σημείο από το οποίο κάθε κινητός κόμβος αποκτά πρόσβαση στο δένδρο διανομής κίνησης πολυεκπομπής (κάτι αντίστοιχο με τον κόμβο FA στην αρχιτεκτονική του MIPv4). Ο δεύτερος είναι υπεύθυνος για την προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής προς το δίκτυο στο

οποίο καταλήγει ο κινητός παραλήπτης αμέσως μετά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής ο κινητός κόμβος ενημερώνει το νέο MA που εξυπηρετεί το υποδίκτυο στο οποίο συνδέθηκε, αναφορικά με την επιθυμία του να καταστεί μέλος της ομάδας πολυεκπομπής αλλά και αναφορικά με τον προηγούμενο κόμβο MF που τον εξυπηρετούσε πριν τη διαπομπή. Ο νέος MA, στην περίπτωση που δεν είναι μέλος του δένδρου διανομής, από τη μία αιτείται τη συμμετοχή του σε αυτό, και από την άλλη επικοινωνεί με τον κόμβο MF με στόχο την προώθηση από τον τελευταίο, κάνοντας χρήση μίας δυναμικά εγκαθιστάμενης διόδου IP, της κατάλληλης ροής πολυεκπομπής προς αυτόν. Μόλις τα πακέτα πολυεκπομπής αρχίζουν να καταφθάνουν στο νέο MA από το δένδρο διανομής, ο τελευταίος αποστέλλει ένα κατάλληλο μήνυμα στον MF ώστε να σταματήσει την προώθηση διαμέσου της διόδου IP. Αν και το πρωτόκολλο MMA επιλύει το πρόβλημα της καθυστέρησης συμμετοχής στην ομάδα πολυεκπομπής, με βάση την έννοια που ορίζει ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* για παραλήπτες, εισάγει έναν πολύ σύνθετο μηχανισμό μέσω του οποίου πραγματοποιείται η προώθηση της κίνησης από τον MF στον MA. Πέρα από το γεγονός ότι προτείνει την ανάπτυξη μίας ανεξάρτητης υποδομής για την διαχείριση της κινητικότητας πολυεκπομπής, επιπλέον προϋποθέτει και τη λειτουργία ενός μηχανισμού μέσω του οποίου πραγματοποιείται η αναζήτηση του κόμβου MA που θα πρέπει να εκτελείται αμέσως μετά τη διαπομπή των κινητών παραληπτών κίνησης πολυεκπομπής, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο επιπρόσθετη καθυστέρηση στην όλη διαδικασία.

Timer-Based Mobile Multicast Protocol (TBMoM): Εμπνευσμένοι από τη λειτουργία των πρωτοκόλλων MoM, RBMoM και MMA, οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου TBMoM επιχειρούν από τη μία τον περιορισμό του κόστους που εισάγει η ανακατασκευή του δένδρου διανομής και από την άλλη την ταχύτατη παράδοση πακέτων πολυεκπομπής σε κινητούς παραλήπτες. Το πρωτόκολλο πραγματοποιεί την επέκταση της αρχιτεκτονικής του MIPv4 προς τη multicast εκδοχή του, θεωρώντας τη λειτουργία του κόμβου Foreign Multicast Agent (FMA), στον οποίο αποθηκεύονται πληροφορίες συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής για τους κινητούς παραλήπτες. Το πρωτόκολλο παρουσιάζει δύο τρόπους λειτουργίας ανάλογα με την κινητικότητα του εξυπηρετούμενου κινητού κόμβου. Στην περίπτωση που η συχνότητα εκτέλεσης διαπομπών ή η ταχύτητά του κινητού είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα να διαπέμπεται πολύ συχνά μεταξύ διάφορων *Ξένων Δικτύων*, οι διαπομπές εξυπηρετούνται από τους κόμβους FMA, επιβάλλοντας την μόνιμη προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής από τον προηγούμενο κόμβο FMA προς τον τρέχοντα FA. Στην αντίθετη περίπτωση (όχι συχνές διαπομπές) χρησιμοποιείται ο κλασικός μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Ο διαχωρισμός των δύο τρόπων λειτουργίας πραγματοποιείται μέσω της λειτουργίας δύο ξεχωριστών χρονομετρητών· του *join_timer* και του *group_timer*. Ο πρώτος χρησιμοποιείται από το κινητό όταν ξεκινά η διαδικασία συμμετοχής με τον πρώτο τρόπο λειτουργίας και αφορά το χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή που εστάλη η αίτηση στον κόμβο FMA που τον εξυπηρετεί. Ο κινητός κόμβος είναι υποχρεωμένος να ενημερώνει τον νέο FA του για τον εναπομείναντα χρόνο που υποδεικνύει ο *join_timer* μετά τη διαπομπή. Ο δεύτερος χρονομετρητής χρησιμοποιείται από τον κάθε κόμβο FA και αντιστοιχεί στην τρέχουσα ελάχιστη των τιμών του χρόνου *join_timer* που κοινοποιούνται σε αυτόν. Στην

περίπτωση που εκπνεύσει ο χρόνος του *group_timer*, ο FA αναλαμβάνει χρέη FMA και εκκινεί τη διαδικασία συμμετοχής στο δένδρο διανομής με βάση και την εμβέλεια του (αντίστοιχα με το πρωτόκολλο RBMoM). Το TBMoM χρησιμοποιεί ακριβώς το μηχανισμό του MMA για την διαχείριση της διαπομπής του MFA. Αν και το πρωτόκολλο λύνει σχεδόν όλα τα προβλήματα που παρατηρούνται κατά τη λειτουργία των RBMoM, MoM και MMA, μειώνοντας την απώλεια πακέτων και την επιβάρυνση από την συχνή ανακατασκευή των δένδρων διανομής και εξαλείφοντας το πρόβλημα της σύγκλισης διόδων IP, παρουσιάζει ένα νέο μοντέλο διαχείρισης κίνησης το οποίο στηρίζεται σε δεδομένα τα οποία δεν είναι ευρέως διαθέσιμα στους κινητούς κόμβους, όπως η ταχύτητά τους. Επιπλέον το επιθυμητό αποτέλεσμα πραγματοποιείται με χρήση σύνθετων δομών δεδομένων, ενώ η αντιμετώπιση του προβλήματος της καθυστέρησης συμμετοχής δεν πραγματοποιείται με ενιαίο και απλό τρόπο, αναθέτοντας επιπρόσθετη λειτουργικότητα στους κόμβους του δικτύου. Αυτό καθιστά δύσκολη την εφαρμογή του πρωτοκόλλου σε κάποιο πραγματικό δίκτυο.

Hierarchical SSM-based Approach (HSSM): Σύμφωνα με αυτή τη λύση, η κινητικότητα παραληπτών κίνησης πολυεκπομπής αντιμετωπίζεται με ιεραρχικό τρόπο, με παρόμοιο τρόπο όπως και στην περίπτωση του *Ιεραρχικού Πρωτοκόλλου Κινητού Διαδικτύου* που παρουσιάστηκε νωρίτερα (HMIP, βλέπε ενότητα 2.3.3.3). Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται αντίστοιχα με τον unicast μηχανισμό, δύο επίπεδα κινητικότητας, τα οποία αντιστοιχούν σε δύο κομμάτια του μονοπατιού που συνδέει την εκάστοτε πηγή κίνησης με τον κάθε παραλήπτη: το πρώτο επίπεδο, μακρο-επίπεδο, αφορά το κομμάτι που συνδέει την πηγή με τον συνοριακό δρομολογητή πύλης (Border Gateway Router, BGR) καθενός αυτόνομου δικτυακού συστήματος το οποίο περιέχει κινητούς παραλήπτες πολυεκπομπής. Το δεύτερο περιλαμβάνει το κομμάτι του μονοπατιού από τον BGR μέχρι τον κόμβο FA της αρχιτεκτονικής MIPv4 που εξυπηρετεί τον εκάστοτε τερματικό κινητό κόμβο. Η λειτουργία του μηχανισμού προβλέπει ότι για το μικρο-επίπεδο, το εκάστοτε δένδρο διανομής δημιουργείται αποκλειστικά για το κάθε αυτόνομο σύστημα ώστε η κίνηση να μεταδίδεται μέσω αυτού από τους εκάστοτε κόμβους FA που ουσιαστικά αποτελούν τα φύλλα του, μέχρι τον δρομολογητή BGR που αποτελεί τη ρίζα του. Η διαπομπή ενός κόμβου στο εσωτερικό του αυτόνομου συστήματος, που έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του εξυπηρετούν κόμβου FA, προκαλεί την μεταβολή του δένδρου διανομής σε τοπική κλίμακα, κι αντιστοιχεί συνεπώς σε μικρή χρονική καθυστέρηση. Για το μακρο-επίπεδο προβλέπεται ότι η εκάστοτε πηγή είναι υποχρεωμένη να επικοινωνεί μέσω κατάλληλων μηνυμάτων με τον εκάστοτε δρομολογητή BGR, ώστε να προωθεί προς αυτόν με χρήση κατάλληλων διόδων IP την κίνηση πολυεκπομπής. Κατά συνέπεια η διαπομπή ενός κόμβου μεταξύ διαφορετικών δικτύων έχει σαν απαίτηση την κατασκευή ενός δένδρου διανομής πολυεκπομπής σε μικρή (τοπική) κλίμακα, ενώ απλά απαιτεί την ενημέρωση της πηγής ώστε να επαναρυθμιστεί η δίοδος IP που χρησιμοποιείται στο μακρο-επίπεδο. Η συγκεκριμένη λύση που παρουσιάζει το πρωτόκολλο HSSM είναι παρόμοια με αυτή που προτείνεται από το μηχανισμό *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, δεδομένου του γεγονότος ότι ο τελευταίος δεν απαιτεί την ανακατασκευή του δένδρου στις περιπτώσεις ενδο-δικτυακών διαπομπών. Θετικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι για το μακρο-επίπεδο δεν απαιτείται (ανά-)κατασκευή του δένδρου αλλά μόνο εντός του νέου συστήματος.

Multicast Scheme for Wireless Networks (MobiCast): Το πρωτόκολλο MobiCast προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος που προκαλείται κατά την ανακατασκευή του δένδρου διανομής κίνησης πολυεκπομπής, λόγω της εκτέλεσης μίας διαπομπής, προτείνοντας τη χρήση ενός *ιεραρχικού* μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας σε συνδυασμό με τη χρήση μίας *νέας τοπικής* διεύθυνσης πολυεκπομπής. Επίσης παρουσιάζει έναν μηχανισμό προσωρινής αποθήκευσης πακέτων κίνησης, με στόχο την μείωση της απώλειας πακέτων κατά τη διάρκεια της διαπομπής. Με στόχο τη διαχείριση στο επίπεδο *μίκρο-κινητικότητας* (αντίστοιχα την ορολογία που έχει αναλυθεί για το πρωτόκολλο HMIP, βλέπε ενότητα 2.3.3.3), το MobiCast προτείνει τη λειτουργία μίας νέας λειτουργικής οντότητας, επονομαζόμενης ως *Domain Foreign Agent* (DFA), για κάθε περιοχή ενός δικτύου. Ο κόμβος DFA ουσιαστικά αποτελεί το σημείο πρόσβασης κάθε κινητού κόμβου στο δένδρο διανομής και το σημείο από το οποίο ξεκινά η διανομή της κίνησης εντός του δικτύου στο οποίο κινείται. Κατά την πρόσδεση ενός κινητού κόμβου MN σε ένα δίκτυο στο οποίο υποστηρίζεται το πρωτόκολλο MobiCast, εκτελούνται οι εξής διαδικασίες: αρχικά ο MN ενημερώνει, μέσω κατάλληλων μηνυμάτων σηματοδότησης, τον κόμβο DFA αναφορικά με την επιθυμία του να καταστεί μέλος μίας συγκεκριμένης ομάδας πολυεκπομπής. Σαν αποτέλεσμα ο DFA εκτελεί τις διαδικασίες του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης ώστε να γίνει ο ίδιος μέλος του δένδρου διανομής. Επιπρόσθετα ο κόμβος DFA επιλέγει μία *νέα*, μοναδική για την περιοχή στην οποία λειτουργεί (*τοπική*), διεύθυνση πολυεκπομπής κι ενημερώνει τόσο τον δρομολογητή που εξυπηρετεί το δίκτυο πρόσβασης στο οποίο συνδέθηκε ο MN, όσο και τους δρομολογητές πρόσβασης που εξυπηρετούν γειτονικά με τον πρώτο ασύρματα δίκτυα ώστε να καταστούν μέλη του δένδρου διανομής της ομάδας που ταυτοποιείται από τη *νέα* διεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται ένα *νέο τοπικό* δένδρο διανομής εντός του δικτύου που εξυπηρετεί ο MFA. Κατά τη διαπομπή του κινητού κόμβου εντός της περιοχής δικτύου που εξυπηρετεί ο MFA δεν απαιτείται η ανακατασκευή του *τοπικού* δένδρου εφόσον αυτή έχει πραγματοποιηθεί νωρίτερα. Το MobiCast προτείνει επίσης την προσωρινή αποθήκευση (buffering) των πακέτων που καταλήγουν στα γειτονικά δίκτυα με στόχο την χρησιμοποίηση τους αμέσως μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής του MN σε ένα από αυτά και τη μείωση του πλήθους των απολεσθέντων πακέτων λόγω της εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης. Όπως και στην περίπτωση του HSSM, η ιεραρχική αρχιτεκτονική του MobiCast περιορίζει την ανάγκη ανακατασκευής του δένδρου διανομής μόνο για τις περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται αλλαγή του κόμβου DFA, ενώ παράλληλα με τη χρήση του μηχανισμού buffering εκμηδενίζει την απώλεια πακέτων λόγω της εκτέλεσης διαπομπών. Αρνητικό σημείο εντούτοις αποτελεί το γεγονός ότι πραγματοποιείται άσκοπη χρήση δικτυακών πόρων εφόσον προβλέπεται η επιβάρυνση των γειτονικών δικτύων της περιοχής κινητικότητας ενός MN, με κίνηση πολυεκπομπής ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιος κόμβος ο οποίος να είναι μέλος της ομάδας πολυεκπομπής. Επιπρόσθετα μειονέκτημα αποτελεί και το γεγονός ότι απαιτείται ανάπτυξη μίας εξειδικευμένης αρχιτεκτονικής αποκλειστικά για την υποστήριξη κινητικότητας πολυεκπομπής πράγμα εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστεί σε πραγματικά συστήματα.

Mobility Support Agent (MSA): Με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης που μπορεί να έχει η καθυστέρηση που εισάγει η διαδικασία ανακατασκευής του δένδρου διανομής μίας ομάδας πολυεκπομπής, η συγκεκριμένη λύση προτείνει την χρήση ενός μηχανισμού πρόβλεψης του υποψηφίου προς διαπομπή από έναν κινητό παραλήπτη δικτύου και την προ-δραστική (πριν την εκτέλεση της διαπομπής) υποβολή μίας αίτησης εγγραφής προς αυτό αναφορικά με τις ομάδες πολυεκπομπής από τις οποίες επιθυμείται η παραλαβή κίνησης. Η υποβολή του αιτήματος γίνεται προς τον ειδικό γι αυτό το σκοπό κόμβο, επονομαζόμενο ως MSA. Ο συγκεκριμένος κόμβος είναι επιφορτισμένος να ελέγχει διαρκώς την όλη διαδικασία, να εκδίδει αιτήσεις συμμετοχής στο δένδρο διανομής κίνησης πολυεκπομπής, να προωθεί την κίνηση προς το φυσικό υποδίκτυο στο οποίο επιχειρείται η πρόσδεση του κινητού κόμβου και να ακυρώνει τα αιτήματα συμμετοχής τα οποία προέρχονται από λανθασμένες προβλέψεις. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός ελαττώνει την καθυστέρηση συμμετοχής λόγω διαπομπής εφόσον η έκδοση του εκάστοτε αιτήματος πραγματοποιείται πριν τη διαπομπή με αποτέλεσμα να ελαττώνεται ο αριθμός των χαμένων πακέτων που αυτή προκαλεί.

2.4.2.1.3 Υβριδικές Προτάσεις

Συνδυασμένες Συμμετοχές: Η συγκεκριμένη λύση προτείνει τον απόλυτα προφανή και λογικό συνδυασμό της λειτουργίας των μηχανισμών *Οικείων* και *Απομακρυσμένων* κι έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας πακέτων κατά την εκτέλεση διαπομπών σε ένα περιβάλλον που χρησιμοποιείται το MIPv6. Κατά βάση ο μηχανισμός προβλέπει τη χρήση και των δύο μηχανισμών ταυτόχρονα οπότε προτείνει ο κάθε κινητός κόμβος να καθίσταται μέλος των ομάδων πολυεκπομπής τόσο μέσω του κόμβου HA όσο και μέσω του δρομολογητή πρόσβασης AR του δικτύου από το οποίο αποκτά πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η συγκεκριμένη διαδικασία υλοποιείται σε δύο φάσεις: κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής σε ένα νέο δίκτυο, χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* έτσι ώστε ο κινητός κόμβος να μπορεί να λαμβάνει τα πακέτα κίνησης κατά τη διάρκεια του διαστήματος κατά το οποίο επεκτείνεται το δένδρο δρομολόγησης προς το νέο σημείο πρόσδεσής του. Όταν πραγματοποιείται το τελευταίο, ο κινητός κόμβος αποστέλλει, μέσω της διόδου IP που τον συνδέει με τον HA, ένα νέο μήνυμα MLD, επονομαζόμενο ως *MLD Hold*, μέσω του οποίου τον ενημερώνει ότι επιθυμεί να σταματήσει η προώθηση των πακέτα μέσω της διόδου IP, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι ο HA θα σταματήσει να είναι μέλος της ομάδας πολυεκπομπής. Η επανεκκίνηση της προώθησης πακέτων κίνησης μέσω της διόδου σε μία νέα διαπομπή, σηματοδοτείται από ένα τυπικό μήνυμα MLD το οποίο θα αναιρέσει τη λειτουργία του *MLD Hold*. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι αποφεύγεται η μόνιμη προώθηση πακέτων κίνησης, ενώ περιορίζεται ο χρόνος απώλειας πακέτων μόνο κατά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ενημέρωση του κόμβου HA. Εντούτοις η προώθηση των πακέτων αντιμετωπίζει όλη την καθυστέρηση που εισάγει το MIPv6 στην διαδικασία διαχείρισης unicast κινητικότητας. Αυτό σημαίνει ότι ο μηχανισμός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών. Επίσης αρνητικό είναι και το γεγονός ότι εφόσον χρησιμοποιούνται πλέον δύο μονοπάτια για την παράδοση των πακέτων, η επίδραση στο επίπεδο ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας θα είναι αρκετά μεγάλη δεδομένου ότι εν γένει το μονοπάτι που

συνδέει το κινητό με τον HA εισάγει μεγάλες καθυστερήσεις στην διαδικασία. Αρνητικό σημείο επίσης αποτελεί και το γεγονός ότι ο HA παραμένει συνεχώς μέλος του δένδρου διανομής, πράγμα το οποίο επιβαρύνει την περιοχή του δικτύου στην οποία είναι τοποθετημένος.

Mobile Multicast with Hierarchical Local Registrations (MMHLR): Ο συγκεκριμένος μηχανισμός προτείνει την ανάπτυξη εντός ενός αυτόνομου συστήματος, ενός δικτύου από συμβατούς με την τεχνολογία του MIPv4, κόμβους FA με βάση ένα ιεραρχικό μοντέλο στην κορυφή του οποίου βρίσκεται ένας μοναδικός κόμβος ονομαζόμενος ως root_FA. Ο root_FA είναι τοποθετημένος στο όριο καθενός αυτόνομου *Ξένου Δικτύου*. Κάθε κινητός κόμβος είναι υποχρεωμένος να ενημερώνει τον root_FA αναφορικά με την τρέχουσα CoA του. Επίσης όλοι οι κόμβοι FA που βρίσκονται σε ενδιάμεσα επίπεδα της ιεραρχίας (τα τερματικά είναι τα φύλλα), ανταλλάσσουν περιοδικά μηνύματα αναφορικά με τις ομάδες πολυεκπομπής που εξυπηρετούν. Ο μηχανισμός επιτρέπει είτε την απ' ευθείας συμμετοχή του κόμβου root_FA στο δένδρο διανομής είτε την συμμετοχή μέσω ενός από τους κόμβους HA των κινητών που έχουν συνδεθεί κι εξυπηρετούνται από το δίκτυο του root_FA. Στην τελευταία περίπτωση προβλέπεται η χρήση πολλαπλών HA με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών όταν ο αντίστοιχος κινητός κόμβος φεύγει από το εν λόγω *Ξένο Δίκτυο*. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός συνδυάζει τα πλεονεκτήματα που προέρχονται από τους μηχανισμούς *Οικείων* και *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Εντούτοις αποτελεί πηγή επιπλέον κόστους για τη διαχείριση της κατάστασης που αποθηκεύεται στους κόμβους FA λόγω όχι μόνο της αύξησης του φορτίου σηματοδότησης αλλά και του γεγονότος ότι δεν πραγματοποιείται καλή διαχείριση των ρευμάτων κίνησης πολυεκπομπής, εφόσον κάποιοι κόμβοι HA παραμένουν μέλη στις διάφορες ομάδες πολυεκπομπής ακόμη κι όταν δεν εξυπηρετούν κάποιο κόμβο. Επιπλέον όπως όλοι οι ιεραρχικοί μηχανισμοί, δεν παρέχει υποστήριξη στην περίπτωση αλλαγής του κόμβου root_FA, ενώ εν γένει δεν δίνει τη δυνατότητα διαπομπών με μηδενική απώλεια πακέτων (αδύνατη εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών).

Mobile Multicast Gateways (MMG): Στο ίδιο πλαίσιο με τον αμέσως προηγούμενο μηχανισμό, ο μηχανισμός MMG προτείνει τη χρήση ενός κόμβου πύλης (ονομαζόμενος ως MMG) στα όρια καθενός αυτόνομου συστήματος, ο οποίος είναι σε θέση να εξυπηρετεί τους κινητούς παραλήπτες που βρίσκονται εντός του συστήματος ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο επιθυμούν αυτοί να γίνουν μέλη της ομάδας (δηλ. *Οικείες* ή *Απομακρυσμένες Συμμετοχές*). Ο κόμβος MMG συγκεντρώνει τα αιτήματα από τους κόμβους FA του δικτύου και μπορεί είτε να γίνει απ' ευθείας μέλος του δένδρου διανομής είτε να λειτουργήσει σαν FA και να λάβει την κίνηση διαμέσου ενός κόμβου HA. Στην πρώτη περίπτωση απλά λειτουργεί σαν ενδιάμεσος δρομολογητής και προωθεί με χρήση των τυπικών μηχανισμών πολυεκπομπής μέχρι αυτά φτάσουν στα τερματικά. Στη δεύτερη μπορεί να προωθήσει τα πακέτα χρησιμοποιώντας κατάλληλα εγκατεστημένες διόδους IP προς τα τερματικά απ' ευθείας (παρόμοια με το μηχανισμό που προτείνει το πρωτόκολλο M-HMIPv6 που θα αναλυθεί παρακάτω, βλέπε ενότητα 2.4.2.2.1)

2.4.2.2 Σύγχρονες Προτάσεις

Στις μέρες μας η σχεδίαση και προτυποποίηση μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής δεν έχει φτάσει στο επίπεδο απαιτούμενης ωριμότητας ώστε να αναπτυχθεί ένα

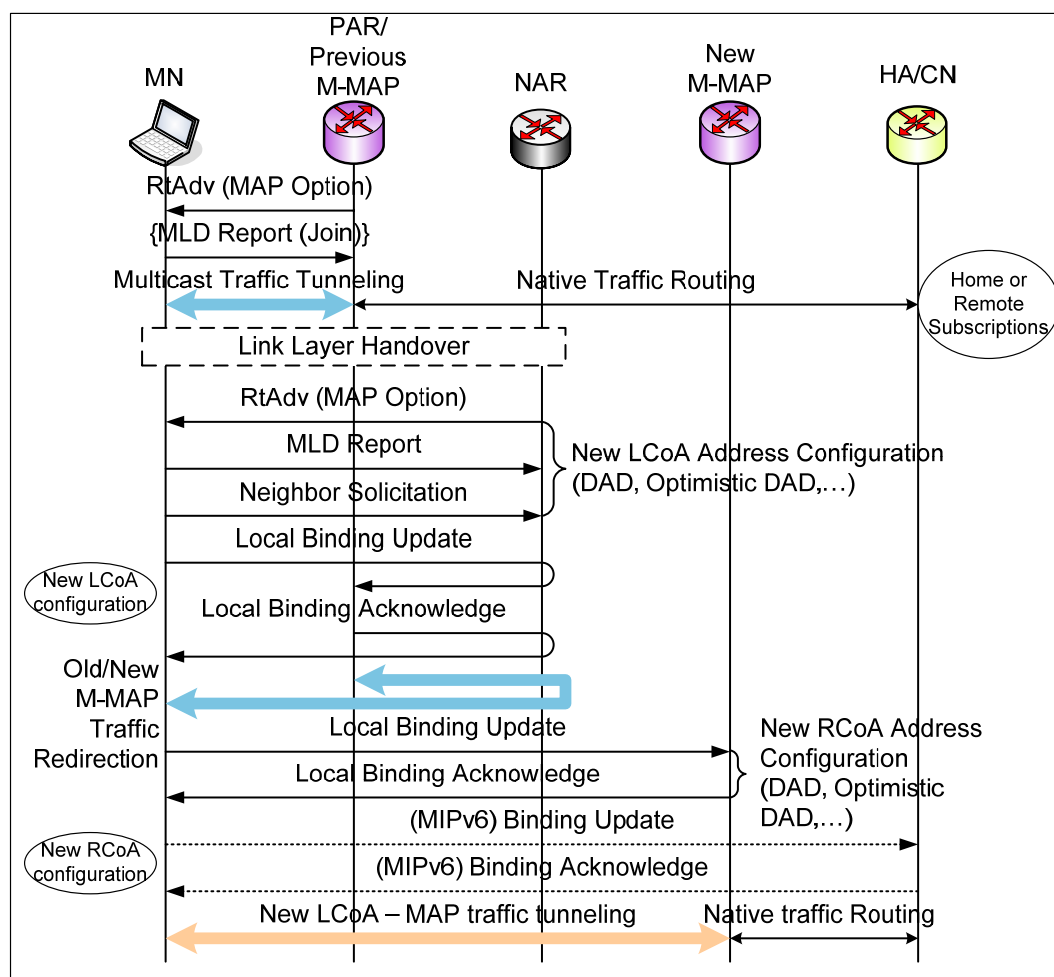
καθολικά αποδεκτό πρότυπο. Οι αιτίες για αυτή την καθυστέρηση είναι διάφορες· από τη μία η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής περιορίζεται σε κυρίως ενσύρματα δίκτυα ερευνητικού και ακαδημαϊκού χαρακτήρα. Επιπλέον αν και η ανάπτυξη ασύρματων τεχνολογιών έχει προχωρήσει αρκετά, η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών, είναι σε φάση πιλοτικής λειτουργίας με αποτέλεσμα οι ανάγκες για παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής να θεωρούνται επίσης προηγμένο χαρακτηριστικό, με περιορισμένη απήχηση παρά το γεγονός ότι η παροχή τους παρουσιάζει εξαιρετικά πλεονεκτήματα για τους λειτουργούς των δικτύων. Από την άλλη δε θα πρέπει να αμελήσουμε τη σύγχρονη τάση για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών πολυμέσων με μεγάλες σχετικά απαιτήσεις σε δικτυακούς πόρους που ενισχύουν την ζήτηση για υπηρεσίες πολυεκπομπής και κατά συνέπεια απαιτούν την ανάπτυξη των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας προς αυτή την κατεύθυνση. Πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι διαδικτυακή τηλεόραση και τα διαδραστικά παιχνίδια. Στο ίδιο πλαίσιο κινείται και η ανάπτυξη της υπηρεσίας MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service, βλέπε Παράρτημα Β) στο UMTS, η οποία προβλέπεται ότι θα δώσει επιπλέον ώθηση στην παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής στο Διαδίκτυο δεδομένου ότι η τεχνολογία προχωρά προς την ολοκλήρωση των δύο κόσμων (Διαδίκτυο και Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών) κάτω από την ομπρέλα του πρωτοκόλλου IP και την υποστήριξη πέρα από την κινητικότητα τερματικού και υπηρεσιών προσωπικής κινητικότητας και κινητικότητας υπηρεσιών σε ετερογενή συστήματα.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται προτάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί την τελευταία τριετία με βασικό αντικείμενο την διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής. Οι προτάσεις έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια των ομάδων εργασίας MOBOPTS [88] και MIPSHOP [62], των οργανισμών IRTF και IETF αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω μηχανισμοί έχουν τη μορφή επεκτάσεων ήδη προτυποποιημένων πρωτοκόλλων, όπως το HMIPv6 και το FMIPv6 (βλέπε ενότητα 2.3.3), που έχουν αναπτυχθεί από τους παραπάνω οργανισμούς για τη διαχείριση unicast κινητικότητας. Αυτό φανερώνει τόσο την ανάγκη ανάπτυξης ολοκληρωμένων λύσεων μέσω των οποίων η κινητικότητα να αντιμετωπίζεται ενιαία και ανεξάρτητα από τον τύπο της προσφερόμενης υπηρεσίας (unicast/multicast), όσο και την επιθυμία εκμετάλλευσης των προηγμένων χαρακτηριστικών των μηχανισμών unicast κινητικότητας για την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής. Στο ίδιο πλαίσιο παρουσιάζονται και σύγχρονες προτάσεις που αφορούν την διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής.

2.4.2.2.1 M-HMIPv6

Σε επέκταση της αρχιτεκτονικής που εισήγαγε το πρωτόκολλο HMIPv6 για την διαχείριση unicast κινητικότητας, έχει προταθεί ένας νέος μηχανισμός, επονομαζόμενος ως *Απρόσκοπτες Διαπομπές Υπηρεσιών Πολυεκπομπής με χρήση του Ιεραρχικού Πρωτοκόλλου Διαδικτύου* (*Seamless Multicast Handover in a Hierarchical Mobile IPv6 Environment*, M-HMIPv6) [89], προς την κατεύθυνση της διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός προσθέτει επιπλέον λειτουργίες στον κόμβο *Σημείο Πρόσδεσης Κινητικότητας* (*Mobility Anchor Point*, MAP) της αρχιτεκτονικής του HMIPv6, ώστε να καταστεί εφικτή η υποστήριξη διαπομπών για χρήστες που συμμετέχουν σε συνόδους πολυεκπομπής. Στην αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου M-HMIPv6 ο κόμβος MAP ονομάζεται Multicast - Mobility

Anchor Point (M-MAP). Το πρωτόκολλο M-HMIPv6 προβλέπει τη χρησιμοποίηση της αμφίδρομης διόδου IP του HMIPv6, μέσω της οποίας μεταφέρεται η unicast κίνηση του κινητού στο μονοπάτι του δικτύου που τον συνδέει με τον κόμβο MAP για τη μεταφορά της κίνησης πολυεκπομπής για τη μεταφορά κίνησης πολυεκπομπής από και προς το τερματικό. Κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής, μόνη απαίτηση παραμένει η «επαναρύθμιση» των χαρακτηριστικών της διόδου (με βάση τη νέα διεύθυνση του κινητού) ώστε να αλλάξει το φυσικό υποδίκτυο προς το οποίο κατευθύνονται τα πακέτα κίνησης. Το Σχήμα 2 - 18 παρουσιάζει τη διαδικασία σηματοδότησης του μηχανισμού M-HMIPv6. Σημειώνεται ότι στη συνέχεια παρουσιάζονται μόνο οι επεκτάσεις που εισάγει το πρωτόκολλο M-HMIPv6 για τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής, κι όχι η διαδικασία σηματοδότησης που κληρονομείται από το βασικό HMIPv6 που περιγράφεται στην ενότητα 2.3.3.3.



Σχήμα 2 - 18. Διαδικασία σηματοδότησης κατά τη λειτουργία του μηχανισμού M-HMIPv6

Η υλοποίηση του πρωτοκόλλου M-HMIPv6 προβλέπει ότι ένας κινητός παραλήπτης κίνησης πολυεκπομπής είναι σε θέση να συμμετέχει στις διάφορες ομάδες πολυεκπομπής, μέσω της διεπαφής που ορίζει η δίοδος IP που εγκαθίσταται από το πρωτόκολλο HMIPv6 για την υποστήριξη των unicast διαπομπών. Για να καταστεί δυνατή η προώθηση της κίνησης διαμέσου της διόδου, ο κινητός κόμβος απαιτείται να στείλει ένα μήνυμα MLD Αναφοράς Συμμετοχής στον κόμβο M-MAP. Ο συγκεκριμένος τρόπος είναι πανομοιότυπος με αυτόν που χρησιμοποιείται κατά

την επικοινωνία ενός κινητού με τον κόμβο HA στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* του MIPv6 (βλέπε ενότητα 2.4.1.1, Σχήμα 2 - 14). Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του μηχανισμού M-HMIPv6 αποτελεί το γεγονός ότι παρέχεται πλέον η δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των πακέτων κίνησης που μεταφέρονται μέσω της διόδου IP στον κόμβο M-MAP, με στόχο την μείωση της απώλειας πακέτων που μεταδίδονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος δικτύου αλλά και των διαδικασιών που έπονται αυτής, δηλαδή της *Αναζήτησης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης νέας Τοπικής Διεύθυνσης* LCoA. Θα πρέπει εντούτοις να σημειωθεί ότι το M-HMIPv6 δεν προβλέπει την ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου μηχανισμού buffering ο οποίος να πραγματοποιεί ευφυή διαχείριση των ρευμάτων κίνησης πολυεκπομπής που αποθηκεύονται προσωρινά (πχ. ανά παραλήπτη ή ανά ροή).

Με στόχο την αποφυγή χρήσης του μηχανισμού ενθυλάκωσης και προώθησης πακέτων κίνησης από τον κόμβο M-MAP σε μόνιμη βάση (για μεγάλες χρονικές περιόδους), και κατ' επέκταση τον περιορισμό του κόστους σε εύρος ζώνης από την επιπρόσθετη επικεφαλίδα των πακέτων IP, ο μηχανισμός M-HMIPv6 παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* από τους κινητούς παραλήπτες κίνησης πολυεκπομπής. Ειδικότερα το πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα προσωρινής παύσης της διαδικασίας προώθησης της κίνησης από τον κόμβο M-MAP (μέσω της αντίστοιχης Διόδου IP) δίνοντάς του τη δυνατότητα να καταστεί μέλος της ομάδας πολυεκπομπής μέσω του δρομολογητή πρόσβασης που εξυπηρετεί το ασύρματο υποδίκτυο πρόσβασης στο οποίο είναι συνδεδεμένος (ώστε να μην πραγματοποιείται πολλαπλή παράδοση των πακέτων στο κινητό). Η υλοποίηση της συγκεκριμένης λειτουργικότητας πραγματοποιείται με χρήση μηνυμάτων σηματοδότησης του πρωτοκόλλου MLD που ανταλλάσσει το κινητό με τον κόμβο M-MAP.

Πιο συγκεκριμένα, ένας κινητός κόμβος αμέσως μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής σε ένα ασύρματο υποδίκτυο της περιοχής δικαιοδοσίας του M-MAP στον οποίο είναι εγγεγραμμένος, πέρα από την χρήση του μηχανισμού M-HMIPv6 όπως περιγράφηκε νωρίτερα (δηλ. συμμετοχή μέσω της διόδου IP με τον M-MAP), αποστέλλει ένα μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* στον AR που εξυπηρετεί το δίκτυο πρόσβασης στο οποίο έχει συνδεθεί. Σαν αποτέλεσμα εκκινεί η διαδικασία *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* από τη νέα θέση του. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του M-HMIPv6 εντούτοις, το κινητό λαμβάνει κίνηση από την αμφίδρομη δίοδο που έχει με τον κόμβο M-MAP. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή του δένδρου προς τη μεριά του υποδικτύου στο οποίο ανήκει (δηλ. ολοκληρωθεί η *Απομακρυσμένη Συμμετοχή* του) δεν υπάρχει λόγος μεταφοράς προώθησης των πακέτων κίνησης από τη δίοδο IP του M-HMIPv6. Για το λόγο αυτό ο κινητός κόμβος αποστέλλει ένα τροποποιημένο μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* στον κόμβο M-MAP, μέσω της διόδου IP, υποδεικνύοντας στον κόμβο M-MAP ότι επιθυμεί να σταματήσει η προώθηση των πακέτων προς αυτό. Η λήψη του συγκεκριμένου μηνύματος αποχώρησης του τερματικού από τον M-MAP θα πρέπει να σηματοδοτήσει μόνο την παύση της προώθησης των πακέτων και όχι την αποχώρηση του δρομολογητή M-MAP από το δένδρο διανομής της κίνησης (το τελευταίο θα έχει σαν συνέπεια την αδυναμία υποστήριξης μελλοντικών διαπομπών του κινητού από τον M-MAP). Για το λόγο αυτό οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου M-HMIPv6

προτείνουν την επέκταση των μηνυμάτων Αναφοράς Συμμετοχής του πρωτοκόλλου MLD (και δεν χρησιμοποιείται το μήνυμα MLD Done), με ένα επιπλέον πεδίο για αυτό το σκοπό (attendance flag). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εκτέλεση μίας νέας διαπομπής ο κινητός κόμβος αφού ανανεώσει την εγγραφή του στον κόμβο M-MAP (Local Binding Update), πρέπει επίσης να αποστείλει ένα επιπλέον μήνυμα MLD Αναφοράς Συμμετοχής μέσω του οποίου θα υποδεικνύει ότι επιθυμεί να επανεκκινήσει η διαδικασία ενθυλάκωσης πακέτων πολυεκπομπής μέχρις ότου επίσης ολοκληρωθεί η διαδικασία Απομακρυσμένων Συμμετοχών από το νέο δίκτυο.

Αντίστοιχα με τη unicast έκδοση του πρωτοκόλλου HMIPv6, το βασικό πλεονέκτημα της λειτουργίας του M-HMIPv6 απορρέει από το γεγονός ότι η κινητικότητα αντιμετωπίζεται ως επί το πλείστον στο τοπικό επίπεδο της περιοχής ευθύνης του εκάστοτε κόμβου MAP, μειώνοντας, μέσω της θεωρούμενης ιεραρχικής αρχιτεκτονικής, τόσο το φορτίο σηματοδότησης για τη διαχείριση της κινητικότητας όσο και την καθυστέρηση που εισάγει η διαδικασία σηματοδότησης (τα μηνύματα ανταλλάσσονται κυρίως μεταξύ κόμβων που βρίσκονται εν γένει πολύ κοντά μεταξύ τους). Επίσης σημαντικό στοιχείο αποτελεί και το γεγονός ότι ο μηχανισμός μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία ένας κινητός κόμβος κινείται πολύ γρήγορα, δηλαδή σε περιπτώσεις κατά τις οποίες μία διαπομπή εκτελείται πριν ολοκληρωθεί η προηγούμενή της εφόσον η αποκατάσταση της επικοινωνίας απαιτεί απλά ένα χρόνο πλήρους διαδρομής μεταξύ του τερματικού και του κόμβου M-MAP.

Από την άλλη αρνητικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι κατά την υποστήριξη του μηχανισμού τα πακέτα πολυεκπομπής ενθυλακώνονται για κάθε κινητό κόμβο ξεχωριστά, πράγμα το οποίο αντίκειται στην αρχιτεκτονική IP Multicast όπως έχει αναλυθεί νωρίτερα. Επιπλέον αρνητικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός οδηγεί εν γένει στην εκτέλεση μεταδραστικών διαπομπών, δηλαδή όλες οι υποστηρικτικές ενέργειες (tunneling, buffering) εκτελούνται μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Έτσι αν και δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης «μικρο-διαπομπών», δεν μπορεί να οδηγήσει στην καθολική εξάλειψη της απώλειας πακέτων εφόσον κληρονομούνται όλες οι καθυστερήσεις που εισάγονται από την εκτέλεση των διαδικασιών *Επισήμανσης Μετακίνησης*, *Αναζήτησης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι επιπλέον αρνητικό στοιχείο για την εφαρμογή του μηχανισμού σε πραγματικές συνθήκες αποτελεί το γεγονός ότι η εύρυθμη και αποδοτική λειτουργία του προϋποθέτει τη λειτουργία άλλων προηγμένων μηχανισμών που δεν έχουν προτυποποιηθεί, όπως για παράδειγμα των προτεινόμενων επεκτάσεων του πρωτοκόλλου MLD που αναλύθηκαν νωρίτερα ή του μηχανισμού *Optimistic Duplicate Address Detection* κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Ρύθμισης Διεύθυνσης* όπως περιγράφεται στην ενότητα A.2.

Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα που προκύπτει από τη λειτουργία του M-HMIPv6 είναι η δυνατότητα να υποστηρίξει αβίαστα την κινητικότητα πηγών κίνησης πολυεκπομπής. Εν γένει προβλέπεται ότι μία πηγή είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τη διεύθυνση RCoA στο πεδίο διεύθυνση αποστολέα, και να δρομολογεί μέσω της διόδου IP τα πακέτα κίνησης προς τον κόμβο M-MAP. Στην περίπτωση που η κινητή πηγή διαπέμπεται μεταξύ δικτύων που ανήκουν στην περιοχή ευθύνης του ίδιου M-MAP δεν δημιουργείται κανένα πρόβλημα στη δρομολόγηση των πακέτων τα οποία ακολουθούν το δένδρο διανομής αφού φτάσουν στον M-MAP, όπως ακριβώς συμβαίνει

και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* του MIPv6. Από την άλλη ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεν μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη λύση για το πρόβλημα της κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής εφόσον στις περιπτώσεις αλλαγής του εξυπηρετούντος κόμβου M-MAP απαιτείται η ανακατασκευή του δένδρου δρομολόγησης ώστε να συμπεριλάβει το νέο M-MAP.

Με στόχο τη μείωση του κόστους, υπό την έννοια της απώλειας πακέτων σε επίπεδο εφαρμογής λόγω μη σύγκλισης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου M-HMIPv6 προτείνουν τη χρήση ενός υπο-μηχανισμού ο οποίος δίνει τη δυνατότητα παράλληλης κατασκευής ενός νέου δένδρου διανομής με το ήδη υπάρχον. Σύμφωνα με αυτόν, ο κινητός κόμβος πηγή δεν ξεκινά αμέσως μετά την αλλαγή του κόμβου M-MAP να αποστέλλει την κίνηση πολυεκπομπής μέσω αυτού, αλλά αντίθετα συνεχίζει να προωθεί τα πακέτα κίνησης μέσω του προηγούμενου M-MAP. Επιπλέον ο κόμβος πηγή αποστέλλει ένα ή λίγα περισσότερα κενά (χωρίς payload) IP datagrams προς το νέο M-MAP τα οποία κατευθύνονται προς την ίδια ομάδα πολυεκπομπής, και περιέχουν στο πεδίο 'διεύθυνση αποστολέα' τη νέα διεύθυνση RCoA του κινητού. Με αυτόν τον τρόπο, ο νέος κόμβος M-MAP εκκινεί άμεσα τη διαδικασία ένταξης του στο δένδρο διανομής το οποίο ταυτοποιείται από την ίδια ομάδα πολυεκπομπής αλλά κυρίως από τη νέα διεύθυνση του κινητού κόμβου (nRCoA). Δεδομένου ότι εν γένει δεν επιστρέφεται κάποιο μήνυμα σηματοδότησης μέσω του οποίου ο κινητός κόμβος ενημερώνεται ότι το κατάλληλο κλαδί του δένδρου έχει κατασκευαστεί επιτυχώς, ο κινητός κόμβος προχωρά στην κανονική προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής μέσω του νέου κλαδιού, μετά την πάροδο ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος. Το συγκεκριμένο διάστημα εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής.

Αν και ο παραπάνω μηχανισμός παρέχει έναν ασφαλή τρόπο για την ανακατασκευή του δένδρου διανομής, θέτει μία επιπλέον απαίτηση. Όπως έχει αναλυθεί, η ανάπτυξη των εφαρμογών πολυεκπομπής δεν είναι αγνώμων σχετικά με τη διεύθυνση των πηγών πολυεκπομπής (κυρίως λόγω της λειτουργίας των μηχανισμών του στρώματος μεταφοράς). Με στόχο την υποστήριξη της δυνατότητας λήψης των πακέτων κίνησης από τα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής, για την από άκρο-σε-άκρο επικοινωνία μεταξύ της πηγής και των παραληπτών προτείνεται η χρήση του επιπλέον στρώματος κινητικότητας όπως ακριβώς πραγματοποιείται κατά τη λειτουργία του μηχανισμού *Route Optimization* του MIPv6. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα πακέτα κίνησης περιέχουν σε ένα ειδικό πεδίο της επικεφαλίδας IPv6, την Home Address (HoA Option) της κινητής πηγής πολυεκπομπής. Έτσι, κατά τη λήψη των πακέτων από το στρώμα IP των παραληπτών, για την παράδοσή τους στα υπερκείμενα στρώματα απαιτείται η αλλαγή του περιεχομένου του πεδίου 'διεύθυνση αποστολέα', το οποίο εν γένει θα περιέχει την τρέχουσα CoA της κινητής πηγής, με το περιεχόμενο του πεδίου HoA Option. Εντούτοις η συγκεκριμένη λύση βρίσκει εφαρμογή μόνο για την περίπτωση της Any Source Multicast δρομολόγησης, κι όχι για την Source Specific Multicast.

2.4.2.2.2 M-FMIPv6

Αντίστοιχα με τον μηχανισμό που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, στο [92] παρουσιάζεται η multicast έκδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 που αναλύθηκε στην ενότητα

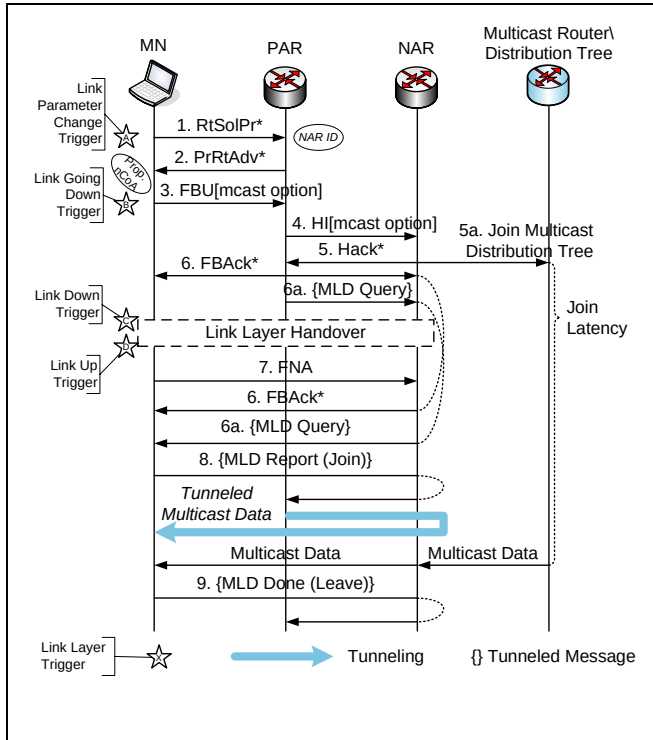
2.3.3.4. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός, που ονομάζεται *Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου για υποστήριξη Ταχέων Διαπομπών Πολυεκπομπής (Fast Multicast Protocol for Mobile IPv6 in the Fast Handovers Environment, M-FMIPv6)*, προτείνει το συνδυασμό των δυνατοτήτων του πρωτοκόλλου FMIPv6, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται ο «*προ-δραστικός*» τρόπος λειτουργίας, για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται η εκκίνηση της διαδικασίας επέκτασης του δένδρου διανομής της κίνησης πολυεκπομπής πριν την πρόσδεση του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο. Με στόχο τη μείωση της απώλειας πακέτων κίνησης, κατά τη διάρκεια του διαστήματος που εκτελείται η επέκταση του δένδρου διανομής, προτείνεται, μετά την πρόσδεση του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο, η χρήση της διόδου IP που ορίζει το πρωτόκολλο FMIPv6, για την προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής προς το νέο σημείο πρόσδεσης του κινητού κόμβου. Αντίστοιχα, όπως και στην περίπτωση των unicast διαπομπών, το πρωτόκολλο παρουσιάζει κι έναν εναλλακτικό τρόπο λειτουργίας, σύμφωνα με τον οποίο όλες οι υποστηρικτικές ενέργειες εκτελούνται «*μετα-δραστικά*» της διαπομπής του τερματικού, ελαχιστοποιώντας, στο βαθμό του εφικτού, τις απώλειες σε πακέτα. Στη συνέχεια αναλύονται όλες οι λεπτομέρειες που αφορούν στη λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις επεκτάσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής. Τα σχήματα (Σχήμα 2 - 19 και Σχήμα 2 - 20) παρουσιάζουν τις διαδικασίες σηματοδοσίας που εκτελούνται κατά τον *προ-δραστικό* και *μετα-δραστικό* τρόπο λειτουργίας του.

Περιγραφή Λειτουργίας

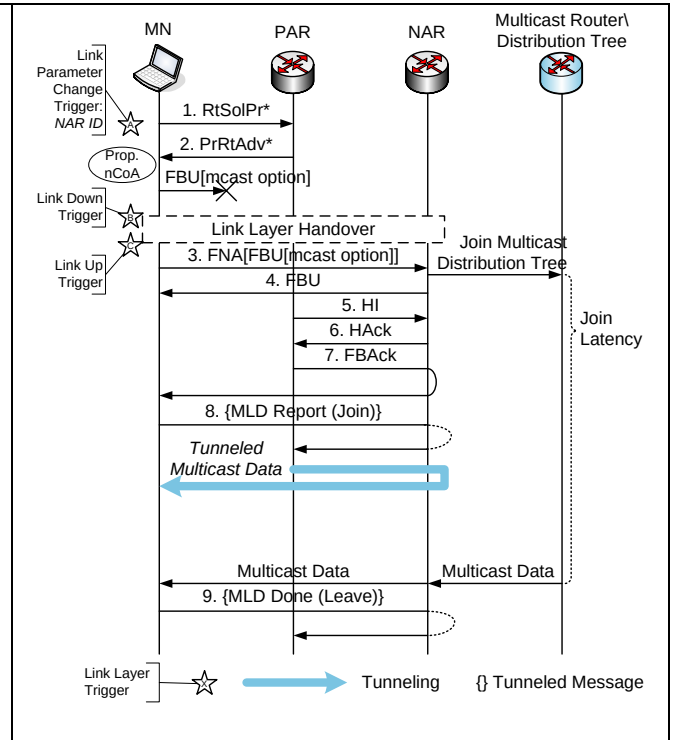
Το πρωτόκολλο M-FMIPv6 εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες του FMIPv6 και την ανταλλασσόμενη σηματοδοσία πριν την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, με στόχο την διαχείριση της διαπομπής κινητών που είναι μέλη ομάδων πολυεκπομπής και την μείωση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο οι παραλήπτες πολυεκπομπής είναι υποχρεωμένοι να αναμένουν την κατασκευή του δένδρου διανομής κίνησης. Η υλοποίηση της διαδικασίας πραγματοποιείται με την εισαγωγή επιπλέον πληροφορίας εντός των μηνυμάτων που ήδη χρησιμοποιούνται κατά τη λειτουργία του FMIPv6, για τη διαχείριση της unicast κινητικότητας, παρουσιάζοντας με αυτόν τον τρόπο έναν ενοποιημένο μηχανισμό που εξυπηρετεί αμφότερες unicast και multicast εφαρμογές.

Πιο αναλυτικά, το πρωτόκολλο M-FMIPv6 προβλέπει ότι κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων που προηγούνται της διαδικασίας υποστήριξης διαπομπής, ο κινητός κόμβος θα πρέπει να είναι ενήμερος σχετικά με το αν στο επικείμενο δίκτυο, από τη μία υποστηρίζεται η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής και από την άλλη αν ο νέος δρομολογητής πρόσβασης, ο οποίος πρόκειται να τον εξυπηρετήσει, είναι σε θέση να υποστηρίξει την εκτέλεση της διαδικασίας αναφορικά με την κινητικότητα πολυεκπομπής (στην αρνητική περίπτωση ο κινητός κόμβος έχει την επιλογή να επιλέξει έναν άλλο τρόπο ή μηχανισμό ή πρωτόκολλο για την διαχείριση της κινητικότητάς του, πχ. *Οικείες Συμμετοχές* μέσω του HA). Η συγκεκριμένη πληροφορία εισάγεται στα μηνύματα RtSolPr και PrRtAdv του FMIPv6 που ανταλλάσσει το κινητό με τον τρέχοντα δρομολογητή που εξυπηρετεί το δίκτυο στο οποίο βρίσκεται. Στη συνέχεια εφόσον παραδοθεί η κατάλληλη ένδειξη από το στρώμα ζεύξης δεδομένων που υποδεικνύει την εκτέλεση διαπομπής στο εγγύς μέλλον (Link Going Down trigger), το κινητό αποστέλλει στον δρομολογητή που εξυπηρετεί το δίκτυο

του, το μήνυμα FBU. Η χρήση του μηνύματος για την περίπτωση των unicast διαπομπών όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.3.4, είναι πολλαπλή. Πρώτον, με το μήνυμα αυτό το κινητό εξουσιοδοτεί τον Previous Access Router (PAR), να εγκαταστήσει μία εγγραφή στον κατάλληλο πίνακά του, μέσω της οποίας αντιστοιχίζεται η προηγούμενη τρέχουσα διεύθυνσή του (pCoA) με τη νέα (nCoA).



Σχήμα 2 - 19. Σηματοδότηση M-FMIPv6, Predictive Mode



Σχήμα 2 - 20. Σηματοδότηση M-FMIPv6, Reactive Mode

Η λήψη του μηνύματος FBU σκανδαλίζει την αποστολή του μηνύματος HI (Handover Initiate) προς τον νέο δρομολογητή πρόσβασης (New Access Router, NAR) μέσω του οποίου ο τελευταίος ενημερώνεται για την επικείμενη διαπομπή του κινητού σε αυτόν. Για την υποστήριξη της multicast διαπομπής, το M-FMIPv6 προβλέπει ότι ο κινητός κόμβος θα πρέπει να εισάγει εντός του μηνύματος FBU, τις διευθύνσεις των ομάδων πολυεκπομπής για τις οποίες επιθυμεί την εκτέλεση ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής. Οι συγκεκριμένη πληροφορία εισάγεται σε νέα, κατάλληλα διαμορφωμένα πεδία (*Multicast Options*). Τα συγκεκριμένα πεδία ουσιαστικά επεκτείνουν το μήνυμα FBU, χωρίς να απαιτείται η χρησιμοποίηση ενός νέου μηνύματος. Ο κόμβος PAR αντιγράφει τις παραπάνω διευθύνσεις σε νέα επίσης κατάλληλα φορμαρισμένα πεδία του μηνύματος HI με απώτερο σκοπό την ενημέρωση του κόμβου NAR αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο FMIPv6, μετά τη λήψη του μηνύματος HI, ο NAR είναι σε θέση να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα της προτεινόμενης από το κινητό nCoA (σε αρνητική περίπτωση επιλέγει μία νέα έγκυρη), οπότε εισάγει τις κατάλληλες εγγραφές στην Binding Cache του για αυτήν, ώστε να μπορεί να υποδεχθεί τον κινητό κόμβο αμέσως μετά τη διαπομπή του. Με αυτόν τον τρόπο δεν υπάρχει ανάγκη εκτέλεσης της διαδικασίας *Ρύθμισης Διεύθυνσης* από το κινητό μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο. Η επεξεργασία της περιεχόμενης στο μήνυμα HI πληροφορίας συμμετοχής πολυεκπομπής του κινητού κόμβου, σκανδαλίζει το NAR, ανάλογα με

τις τρέχουσες συμμετοχές του σε ομάδες πολυεκπομπής, ώστε να καταστεί μέλος των αντίστοιχων ομάδων πολυεκπομπής. Ως εκ τούτου αποστέλλει τα κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης των πρωτοκόλλων multicast δρομολόγησης και καθίσταται *άμεσα* μέλος των δένδρων διανομής κίνησης πολυεκπομπής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 - 19, η διαδικασία συμμετοχής στο εκάστοτε δένδρο εκτελείται προ-δραστικά της διαπομπής στρώματος ζεύξης, πράγμα εξαιρετικά σημαντικό, εφόσον με αυτόν τον τρόπο ο μηχανισμός εκμεταλλεύεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο κινητός κόμβος βρίσκεται στο προηγούμενο δίκτυο.

Για την ολοκλήρωση της προ-δραστικής διαδικασίας απαιτείται η ενημέρωση του κινητού κόμβου αλλά και του κόμβου PAR αναφορικά με την έκβαση των διαδικασιών που έχουν εκτελεστεί επιτυχώς. Για το λόγο αυτό ο κόμβος NAR αποστέλλει προς τον PAR το μήνυμα HAck (Handover Acknowledge). Μέσω του συγκεκριμένου μηνύματος αφ' ενός επιστρέφεται η έγκυρη νέα διεύθυνση του κινητού για το νέο δίκτυο και σηματοδοτείται η ετοιμότητα του τελευταίου να υποδεχθεί το πρώτο, κι αφ' ετέρου επιστρέφονται οι διευθύνσεις των ομάδων πολυεκπομπής για τις οποίες το νέο δίκτυο δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει την εκτέλεση ταχείας διαπομπής πολυεκπομπής. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω στην τελευταία περίπτωση το κινητό θα πρέπει να ενημερωθεί ώστε να προχωρήσει στην εκτέλεση ενός εναλλακτικού τρόπου για τη διαχείριση της επικείμενης διαπομπής. Η λήψη του μηνύματος HAck από τον PAR, έχει επίσης σαν αποτέλεσμα την επιβεβαίωση της εγκυρότητας της ήδη εγκατεστημένης εγγραφής που έχει ο τελευταίος στον πίνακα που συντηρεί, αναφορικά με την αντιστοίχιση των διευθύνσεων pCoA και nCoA. Επιπλέον ο PAR είναι υποχρεωμένος σε αυτό το χρονικό σημείο, να κατασκευάσει μία δίοδο IP η οποία θα τον συνδέσει άμεσα με το κινητό στη νέα του θέση στο νέο δίκτυο· η δίοδος έχει σαν άκρα της, την διεύθυνση του PAR και τη nCoA. Με βάση την προδιαγραφή του FMIPv6, ο PAR είναι εφεξής υποχρεωμένος να αποστέλλει όλα τα πακέτα κίνησης που καταφθάνουν σε αυτόν κι έχουν ως διεύθυνση προορισμού την τρέχουσα διεύθυνση του κινητού (pCoA), προς τη νέα θέση του (nCoA) στο νέο δίκτυο μέσω της συγκεκριμένης διόδου IP. Ακολούθως ο PAR είναι υποχρεωμένος να ενημερώσει το κινητό κόμβο, αναφορικά με την έκβαση της διαδικασίας υποστήριξης της διαπομπής του. Αυτό το πράττει με την αποστολή του μηνύματος FBack (Fast Binding Acknowledge) προς το κινητό. Το μήνυμα περιλαμβάνει και την έγκυρη διεύθυνση που επέλεξε ο NAR νωρίτερα και κοινοποίησε μέσω του μηνύματος HAck.

Για την υποστήριξη της διαπομπής πολυεκπομπής το πρωτόκολλο M-FMIPv6 προβλέπει ότι ο κινητός κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει την δίοδο IP που εγκαθίσταται για την περίπτωση των unicast διαπομπών. Για να καταστεί αυτό δυνατό απαιτείται η ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου συμμετοχών, διαμέσου του «ιδεατού» δικτύου που ορίζει η συγκεκριμένη δίοδος (βλέπε ενότητες 2.1.2 και 2.4.1.1). Με βάση τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MLD η συγκεκριμένη απαίτηση μεταφράζεται στην ανταλλαγή ενός μηνύματος *Γενικής Ερώτησης (MLD General Query)* κι αντίστοιχων μηνυμάτων *Αναφοράς Συμμετοχών*, για καθεμία από τις ομάδες πολυεκπομπής που επιχειρείται η υποστήριξη της ταχείας διαπομπής πολυεκπομπής. Η αποστολή του πρώτου μηνύματος είναι αποτέλεσμα της ανάγκης αρχικοποίησης της *ιδεατής* διεπαφής που

ορίζει η δίοδος¹⁹. Η λήψη των μηνυμάτων *Αναφοράς Συμμετοχών*, που ουσιαστικά ενεργοποιούν τη διαδικασία προώθησης κίνησης, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εφόσον το κινητό έχει εκτελέσει τη διαπομπή στρώματος δικτύου, δηλαδή εφόσον ολοκληρώσει τη διαδικασία σύνδεσης στο στρώμα δικτύου από τη νέα θέση του. Η τελευταία διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του τυπικού μηνύματος FNA που αποστέλλει το κινητό αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων (που σηματοδοτείται με τη λήψη του trigger *Link UP*). Η συγκεκριμένη απαίτηση πηγάζει από το γεγονός ότι η προώθηση πραγματοποιείται μέσω της δίοδου IP που έχει ως άκρο τη νέα διεύθυνση του τερματικού

Η προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής διαμέσου της FMIPv6 οριζόμενης δίοδου IP, πραγματοποιείται για όσο χρονικό διάστημα χρειάζεται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, δηλαδή για το διάστημα που απαιτείται για να καταστεί ο κόμβος NAR μέλος του δένδρου διανομής. Όταν αυτό υλοποιηθεί, οπότε η κίνηση πολυεκπομπής αρχίζει να καταφθάνει από το βέλτιστο μονοπάτι προς τον NAR, τα πακέτα κίνησης παραδίδονται χρησιμοποιώντας τους κλασικούς μηχανισμούς προώθησης κίνησης πολυεκπομπής προς το κινητό. Στο σημείο αυτό ο κινητός κόμβος είναι υποχρεωμένος να σηματοδοτήσει στον PAR ότι δεν επιθυμεί πλέον τη λήψη κίνησης πολυεκπομπής μέσω της δίοδου IP. Η διαδικασία υλοποιείται με την αποστολή του μηνύματος *MLD Done*. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την παράδοση των πακέτων κίνησης πολυεκπομπής που καταφθάνουν στον κόμβο NAR για λογαριασμό ενός τερματικού κόμβο ο οποίος μόλις συνδέθηκε στο δίκτυο του πρώτου, απαιτείται η αποστολή ενός MLD μηνύματος *Αναφοράς Συμμετοχής* από τον τελευταίο ούτως ώστε να ρυθμιστούν οι κατάλληλες παράμετροι στους πίνακες προώθησης του NAR. Οι συγκεκριμένες παράμετροι υποδεικνύουν ότι τα πακέτα μίας ομάδας πολυεκπομπής θα πρέπει να μεταδίδονται από το συγκεκριμένο δρομολογητή προς το συγκεκριμένο υποδίκτυο. Όπως αναλύεται στην ενότητα 2.1.2, η αποστολή του συγκεκριμένου MLD μηνύματος *Αναφοράς* προβλέπεται από την προδιαγραφή του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Το συγκεκριμένο μήνυμα δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 2 - 19 και το Σχήμα 2 - 20.

Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, όταν η αποστολή του μηνύματος FBU δεν καθίσταται δυνατή από το προηγούμενο της διαπομπής δίκτυο, το πρωτόκολλο FMIPv6 ακολουθεί τη λεγόμενη *μετα-δραστική* λειτουργία του. Σύμφωνα με αυτή οι διαδικασίες τόσο για τη ρύθμιση των εγγράφων στον κόμβο NAR όσο και για την προώθηση της κίνησης διαμέσου της δίοδου IP σκανδαλίζονται από το κινητό αμέσως μετά διαπομπή στρώματος ζεύξης. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2 - 20, για την υποστήριξη της διαπομπής πολυεκπομπής η διαδικασία έχει ως εξής: ο κινητός κόμβος έχοντας σχηματίζει μία νέα διεύθυνση από τις πληροφορίες που έχει συλλέξει μέσω της ανταλλαγής των proxy μηνυμάτων στην αρχή της διαδικασίας, αποστέλλει προς τον κόμβο NAR ένα μήνυμα FNA μέσω του οποίου σηματοδοτεί την άφισή του. Η προδιαγραφή του FMIPv6 προβλέπει ότι ο κινητός κόμβος θα πρέπει να συμπεριλάβει στο FNA, με στόχο την άμεση εκκίνηση της διαδικασίας υποστήριξης της διαπομπής από τον PAR, κι ένα μήνυμα FBU. Για την υποστήριξη των διαπομπών πολυεκπομπής, το M-FMIPv6 προβλέπει ότι θα πρέπει επίσης

¹⁹ Το πρωτόκολλο MLD απαιτεί από κάθε κόμβο παραλήπτη να αναμένει την λήψη του *Γενικού Μηνύματος Ερώτησης* (General Query) που υποδεικνύει ότι το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος υποστηρίζει την ανταλλαγή πακέτων πολυεκπομπής.

να συμπεριληφθούν και οι διευθύνσεις των ομάδων πολυεκπομπής όπως ακριβώς και στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών. Η λήψη του συνδυασμένου μηνύματος FNA[FBU] από τον NAR, τυπικά έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύθμιση της Neighbor Cache του τελευταίου και την προώθηση του FBU προς τον PAR. Για την περίπτωση των multicast διαπομπών, ο NAR προτού προωθήσει το FBU προς τον PAR, απαιτείται να επεξεργαστεί το πεδίο του FBU που περιέχει τις κοινοποιούμενες από το κινητό διευθύνσεις πολυεκπομπής, και με βάση τα περιεχόμενά του να εκκινήσει τη διαδικασία συμμετοχής στο δένδρο διανομής. Με τον τρόπο αυτό δηλαδή ξεκινά η διαδικασία *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* κατά τη μετα-δραστική λειτουργία.

Η υπόλοιπη διαδικασία εκτελείται χωρίς διαφοροποίηση πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ανταλλάσσονται τα μηνύματα HI και HAcK, στα οποία δεν περιέχονται πλέον οι διευθύνσεις πολυεκπομπής όπως στην περίπτωση της predictive λειτουργίας, ενώ τελικά επιστρέφεται στο κινητό το μήνυμα FBack μέσω του οποίου επιβεβαιώνεται η εγκατάσταση της αντιστοίχισης μεταξύ pCoA και nCoA στον PAR. Αυτό σημαίνει ότι η διόδος IP μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία μεταξύ του κινητού και του PAR. Όπως και στην περίπτωση του προ-δραστικού τρόπου λειτουργίας η ενεργοποίηση της διόδου έχει σαν αποτέλεσμα την αποστολή ενός MLD μηνύματος *Ερώτησης* (Query) προς το κινητό. Η λήψη του από το κινητό έχει σαν αποτέλεσμα την αποστολή, μέσω της διόδου, των καταλλήλων μηνυμάτων MLD *Αναφοράς Συμμετοχής* μέσω των οποίων σηματοδοτείται στον PAR η εκκίνηση της διαδικασίας προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής. Αντίστοιχα με την predictive λειτουργία, η διαδικασία ολοκληρώνεται με την αποστολή του μηνύματος MLD *Done* αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*.

Ποιοτική ανάλυση επίδοσης μηχανισμού M-FMIPv6

Ο μηχανισμός κινητικότητας που παρουσιάζει το M-FMIPv6 ουσιαστικά εκμεταλλεύεται τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου FMIPv6: το πρώτο είναι το γεγονός ότι η διαδικασία *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* εκκινεί προ-δραστικά (πριν την πρόσδεση του τερματικού στο νέο δίκτυο) οπότε μειώνεται το διάστημα στο οποίο δεν είναι διαθέσιμη η κατάλληλη ροή κίνησης σε αυτό. Το δεύτερο είναι η χρήση της διόδου IP για την προώθηση της κίνησης από το ένα δίκτυο στο άλλο δίνοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα επιπλέον περιορισμού της καθυστέρησης διαπομπής (handover latency²⁰). Το M-FMIPv6 αντιμετωπίζει το φαινόμενο της διαπομπής στο επίπεδο των δρομολογητών πρόσβασης που είναι σε άμεση σύνδεση με τον κινητό κόμβο, σε αντίθεση με τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν νωρίτερα που στις περισσότερες περιπτώσεις προτείνουν την εισαγωγή επιπλέον λειτουργικών κόμβων με πρόσθετα καθήκοντα διαχείρισης. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι μόνο τα εμπλεκόμενα στη διαδικασία μέρη επηρεάζονται (δηλ. κινητός κόμβος, δικτυακή υποδομή που καλείται να υποστηρίξει τη διαπομπή), ενώ παράλληλα δεν προκύπτουν θέματα κακοδιαχείρισης δικτυακών πόρων, εφόσον η δρομολόγηση των πακέτων είναι βέλτιστη κατά τη μόνιμη κατάσταση (δηλ. μετά την ολοκλήρωση της *Απομακρυσμένης Συμμετοχής*). Επιπλέον η προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής πραγματοποιείται μόνο κατά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την

²⁰ Χρονικό διάστημα κατά το οποίο το τερματικό δεν είναι σε θέση να επικοινωνήσει λόγω εκτέλεσης της διαπομπής.

αντιμετώπιση της διαταραχής που προκαλεί η διαπομπή κι όχι στη μόνιμη κατάσταση όπως προτείνεται για παράδειγμα από το μηχανισμό *Οικείων Συμμετοχών*.

Εντούτοις ο συγκεκριμένος μηχανισμός έχει και κάποια αρνητικά στοιχεία. Το σημαντικότερο αποτελεί το γεγονός ότι η διαδικασία στηρίζεται στην εγκυρότητα των προβλέψεων που πραγματοποιείται από τους μηχανισμούς πρόβλεψης διαπομπών. Αυτό σημαίνει ότι για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί καταλήγουν σε λάθος συμπεράσματα, όχι μόνο για την πρόβλεψη του δικτύου στο οποίο επίκειται η εκτέλεση μίας διαπομπής, αλλά και για την περίπτωση κατά την οποία η διαπομπή δεν εκτελείται καθόλου, η διαδικασία επέκτασης του δένδρου διανομής προς τον αρχικά επιλεγέντα κόμβο NAR, είναι αχρείαστη και οδηγεί στην σπατάλη δικτυακών πόρων για ένα μικρό χρονικό διάστημα (το οποίο καθορίζεται από ένα χρονομετρητή ειδικά ρυθμισμένο γι' αυτό το σκοπό). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της πρόβλεψης διαπομπών και η ανάπτυξη της υπηρεσίας MIH (βλέπε ενότητα 2.3.2), αναμένεται να εξαλείψει τις κακές συνέπειες που επηρεάζουν το M-FMIPv6.

Προχωρώντας περισσότερο στις λεπτομέρειες που συνθέτουν τον μηχανισμό M-FMIPv6, θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει τα ακόλουθα: η διαδικασία εκκίνησης της προώθησης κίνησης, είναι απολύτως ελεγχόμενη από τον κινητό κόμβο, και μάλιστα εκτελείται με μετα-δραστικό τρόπο. Αν και όπως αναλύθηκε παραπάνω αυτό είναι θετικό, εφόσον αποφεύγεται η εκτέλεσή της σε περιπτώσεις λανθασμένων προβλέψεων, υπάρχουν κάποια αρνητικά σημεία. Πρώτον, περιορίζονται στο ελάχιστο οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει ο μηχανισμός αναφορικά με την προσωρινή αποθήκευση (buffering) πακέτων κίνησης στο δίκτυο (παλαιό ή νέο) κατά τη διάρκεια της διαπομπής. Ιδανικά τα προσωρινά αποθηκευμένα πακέτα είναι δυνατό να αποσταλούν προς το κινητό μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Η μόνη επιλογή που υπάρχει εντούτοις με βάση τη σχεδίαση του M-FMIPv6, είναι η χρήση ενός αντίστοιχου μηχανισμού με αυτόν που χρησιμοποιείται στην περίπτωση των unicast διαπομπών. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός πραγματοποιεί προσωρινή αποθήκευση των πακέτων από τον PAR αμέσως μετά τη λήψη του μηνύματος FBU, και τα προωθεί προς τον NAR αμέσως μετά την λήψη του μηνύματος HAcK (δεν υπάρχει άλλο μήνυμα που να σκανδαλίζει το πρωτόκολλο FMIPv6 στον PAR). Για την περίπτωση του μηχανισμού πολυεκπομπής, η υλοποίηση ενός αντίστοιχου μηχανισμού buffering απαιτεί από τον PAR να επεξεργαστεί τα περιεχόμενα του μηνύματος HAcK και σαν αποτέλεσμα της επεξεργασίας να προωθήσει μόνο τα πακέτα των ρευμάτων κίνησης που δεν είναι διαθέσιμα στο νέο δίκτυο. Η τελευταία παρατήρηση όμως απαιτεί την επέκταση του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας ώστε να καταστεί δυνατή η διασυνεργασία του με τα πρωτόκολλα προώθησης κίνησης πολυεκπομπής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός M-FMIPv6 προσεγγίζει τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής ως ειδική περίπτωση του μηχανισμού που εφαρμόζεται στην περίπτωση unicast διαπομπών, με την ιδιαιτερότητα ότι για την περίπτωση της multicast κίνησης η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής είναι εφικτή για κάθε κινητό αποκλειστικά μέσω της unicast διόδου IP που προβλέπει το FMIPv6. Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η τελευταία παρατήρηση μπορεί να λειτουργήσει ανασταλτικά σε σενάρια εκτέλεσης *ομαδικών διαπομπών* (δηλ. σχεδόν ταυτόχρονων διαπομπών από μέλη της ίδιας ομάδας πολυεκπομπής μεταξύ του ίδιου ζευγαριού

δρομολογητών PAR και NAR). Στις περιπτώσεις αυτές ο μηχανισμός καταστρατηγεί τις αρχές της αρχιτεκτονικής IP Multicast, εφόσον η διαδικασία εκτελείται για κάθε κινητό ξεχωριστά, παρά το γεγονός ότι στην πράξη αφορά τα μέλη της ίδιας ομάδας πολυεκπομπής. Επίσης αυξάνει όχι μόνο το φορτίο σηματοδότησης αλλά και το φορτίο κίνησης που καλείται να διαχειριστεί το δίκτυο κατά το κρίσιμο διάστημα εκτέλεσης της ομαδικής διαπομπής.

Επιπλέον, με βάση την προδιαγραφή της αρχιτεκτονικής IP Multicast, ένας παραλήπτης κίνησης πολυεκπομπής, και δη κινητός, τη στιγμή που συνδέεται σε ένα νέο δίκτυο, δεν έχει γνώση αναφορικά με τη διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής (δηλ. αν ο δρομολογητής πολυεκπομπής που εξυπηρετεί το δίκτυο είναι μέλος του κατάλληλου δένδρου διανομής). Η συγκεκριμένη πληροφορία είναι αποθηκευμένη στον MDR που εξυπηρετεί το υποδίκτυο και μόνο. Αντίθετα, το πρωτόκολλο MLD προβλέπει ότι ένας τερματικός κόμβος μπορεί μόνο να ζητήσει, μέσω ενός μηνύματος *Αναφοράς Συμμετοχής*, να γίνει μέλος μίας ομάδας πολυεκπομπής μέσω του MDR του. Όταν ο τελευταίος γίνει μέλος του δένδρου διανομής, οπότε θα αρχίσουν να καταφθάνουν πακέτα κίνησης στο τερματικό μπορεί ο τερματικός κόμβος να συμπεράνει ότι ο MDR είναι μέλος του δένδρου. Η συγκεκριμένη «αδυναμία» γνώσης της συμμετοχής του MDR στο δένδρο διανομής από το τερματικό έχει αρνητικές συνέπειες και στη λειτουργία του μηχανισμού M-FMIPv6, που αφορούν τα όσα πρέπει να λάβουν χώρα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας ως βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο ένας κινητός κόμβος δεν λαμβάνει πακέτα πολυεκπομπής και δεδομένης της άγνοιας σχετικά με τη διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής στον MDR, μετά την εκτέλεση της διαπομπής υπάρχουν δύο επιλογές: πρώτον, εφόσον το ρεύμα κίνησης δεν είναι διαθέσιμο στο νέο δίκτυο, ο κινητός κόμβος θα πρέπει να προβεί άμεσα στην αποστολή του αιτήματος προώθησης κίνησης μέσω της διόδου IP στον PAR· δεύτερον, στην περίπτωση που το ρεύμα είναι διαθέσιμο, δεν υπάρχει ανάγκη αποστολής του συγκεκριμένου μηνύματος. Ο κινητός κόμβος χρειάζεται να αποφανθεί για τη διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης αμέσως μετά τη διαπομπή του στο νέο δίκτυο. Ένας απλός τρόπος για να το πραγματοποιήσει είναι να αποστείλει άμεσα, μετά την αποστολή του μηνύματος FNA, ένα μήνυμα MLD *Αναφοράς Συμμετοχής* στον κόμβο NAR και να αναμείνει την παράδοση πακέτων πολυεκπομπής για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Εντούτοις η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει σαν αποτέλεσμα επιπρόσθετη καθυστέρηση στην όλη διαδικασία, ιδίως στην περίπτωση κατά την οποία το κινητό θα πρέπει να ζητήσει από τον PAR την προώθηση της κίνησης μέσω της διόδου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τερματικός κόμβος ενημερώνεται για τη διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης μόνο μέσω της λήψης κάποιου πακέτου, κι όχι μέσω κάποιου μηνύματος σηματοδότησης. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι απαιτείται η παρακολούθηση (monitoring) από την πλευρά του.

Εναλλακτικά υπάρχει η δυνατότητα από τον κινητό κόμβο να αγνοήσει εντελώς την διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης στο νέο δίκτυο και να προχωρήσει άμεσα στην αποστολή του αιτήματος προώθησης από το προηγούμενο δίκτυο. Στην περίπτωση κατά την οποία το ρεύμα κίνησης δεν είναι διαθέσιμο στο νέο δίκτυο η συγκεκριμένη προσέγγιση αποτελεί τη βέλτιστη λύση εφόσον ελαχιστοποιείται το διάστημα αναμονής της κίνησης σε αυτό που

απαιτείται για τη διάδοση του αιτήματος προς τον PAR και την μετάδοση των πακέτων από τον τελευταίο προς το κινητό. Από την άλλη στην περίπτωση, που το ρεύμα είναι διαθέσιμο στο νέο δίκτυο, η άμεση αποστολή του αιτήματος αποτελεί πηγή κακής χρήσης δικτυακών πόρων, εφόσον μεταδίδονται αχρείαστα διπλότυπα πακέτα κίνησης από τον PAR, τον NAR και διαμέσου της ασύρματης ζεύξης. Επιπρόσθετα αυξάνεται το φορτίο σηματοδοσίας κατά το κρίσιμο χρονικό διάστημα εκτέλεσης της διαπομπής. Είναι προφανές ότι η κατάσταση καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη σε περιπτώσεις ταχέων και πολύ συχνών διαπομπών (ring-pong) ή ακόμη και διαπομπών οι οποίες αν και απαιτούν τη μεταβολή της IP διεύθυνσης του κινητού δεν απαιτούν τη μεταβολή του αντίστοιχο MDR (πχ. στην περίπτωση που τα ασύρματα – νέο και παλιό – τοπικά δίκτυα εξυπηρετούνται από τον ίδιο δρομολογητή/AR-MDR).

2.4.2.2.3 Διαχείριση Κινητικότητας Πηγών Κίνησης Πολυεκπομπής

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται το πρόβλημα της διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής στην περίπτωση κατά την οποία ο διαπεμπόμενος κόμβος λειτουργεί ως πηγή της κίνησης. Το πρόβλημα της διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής εμφανίζει διπλή εξάρτηση από την IP διεύθυνση της πηγής όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση της unicast κινητικότητας. Πιο συγκεκριμένα, η βασική διάσταση του προβλήματος αφορά την ανάγκη χρήσης της διεύθυνσης πηγής από τα ανώτερα στρώματα μεταφοράς (συνόδου και εφαρμογής) τόσο στους αποστολείς όσο και στους παραλήπτες. Κατά συνέπεια, η μεταβολή της IP διεύθυνσης λόγω της κινητικότητας της πηγής δημιουργεί προβλήματα στη διατήρηση της εγκατεστημένης συνόδου το σημαντικότερο από τα οποία είναι η ταυτοποίησή της. Η δεύτερη διάσταση του προβλήματος εντοπίζεται στη λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής και την ανάπτυξη βέλτιστων των δένδρων διανομής. Στην περίπτωση αυτή η αλλαγή της διεύθυνσης πηγής απαιτεί την ανακατασκευή του δένδρου διανομής, εφόσον η εκτέλεση των ελέγχων *Reverse Path Forwarding* (RPF checks) [18], [19], σε κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή, έχει σαν αποτέλεσμα την απόρριψη των πακέτων για τα οποία δεν υπάρχει κάποια καταχώρηση για τη νέα διεύθυνση. Εν γένει η λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στην περίπτωση της παροχής υπηρεσίας *Any Source Multicast* (ASM) δεν θέτει κάποιο αυστηρό περιορισμό αναφορικά με τη διεύθυνση πηγής, δηλαδή η λειτουργία τους μπορεί να εξυπηρετήσει την αλλαγή της διεύθυνσης πηγής με μία ίσως μικρή καθυστέρηση λόγω του επιπλέον φορτίου που απαιτεί η ανταλλαγή των επιπλέον μηνυμάτων σηματοδοσίας. Αυτό εντούτοις δεν ισχύει για την περίπτωση της *Source Specific Multicast* (SSM) υπηρεσίας. Σε αυτήν την περίπτωση, για τη συνέχιση της επικοινωνίας απαιτείται η κατασκευή ενός νέου source-rooted δένδρου διανομής, το οποίο θα έχει ως ρίζα το νέο σημείο πρόσβασης της κινητής πηγής εφόσον αλλάζουν τα βασικά αναγνωριστικά του εκάστοτε SSM καναλιού [89], [90], [91], [93], [94], [96].

Για την ανάπτυξη ενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής απαιτείται η αντιμετώπιση όλων των προβλημάτων που αναλύθηκαν παραπάνω ώστε η εκτέλεση διαπομπών να παραμένει διαφανής προς τα ανώτερα στρώματα. Επίσης θα πρέπει η ανακατασκευή των δένδρων διανομής να είναι ενιαία για τα δύο μοντέλα παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής (δηλ. ASM και SSM) και να πραγματοποιείται χωρίς να προκαλεί τη διακοπή του ρεύματος κίνησης από

τις πηγές προς τους παραλήπτες. Στη συνέχεια αναλύονται κάποιες λύσεις που έχουν πρόσφατα παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία και αποτελούν το σημείο εκκίνησης για την αντιμετώπιση του γενικότερου προβλήματος διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής.

Διατήρηση επικοινωνίας στα ανώτερα στρώματα (μεταφοράς, συνόδου, εφαρμογής) – HoA Option

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος που αναλύθηκε παραπάνω αναφορικά με τη χρήση της IP διεύθυνσης των κινητών πηγών πολυεκπομπής, η πλειονότητα των προτάσεων σήμερα συγκλίνει προς στην εισαγωγή ενός επιπλέον στρώματος μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και μεταφοράς. Η χρήση του συγκεκριμένου στρώματος θα έχει ως στόχο να καταστήσει τη διαπομπή των κινητών πηγών διαφανή προς τα ανώτερα στρώματα (ακριβώς όπως ισχύει και στην unicast περίπτωση). Η υλοποίηση του εν λόγω στρώματος κινητικότητας πραγματοποιείται με την εισαγωγή της *Οικείας Διεύθυνσης* (Home Address, HoA) της κινητή πηγής, σε όλα τα πακέτα που αποστέλλονται από αυτή προς το σύνολο των μελών της ομάδας πολυεκπομπής. Η HoA εισάγεται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο πεδίο γι' αυτό το σκοπό της επικεφαλίδας του στρώματος IP που ονομάζεται *HoA Option*²¹. Κάθε κινητή πηγή είναι υποχρεωμένη να χρησιμοποιεί την τρέχουσα διεύθυνσή της στο πεδίο 'διεύθυνση αποστολέα' των IP πακέτων πολυεκπομπής που αποστέλλει και να εισάγει την HoA σε ένα ειδικό γι' αυτό το σκοπό πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται διαχωρισμός του αναγνωριστικού που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση του κόμβου πηγής (κατά συνέπεια και των συνόδων πολυεκπομπής τις οποίες τροφοδοτεί), από αυτού που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση της τρέχουσας θέσης του. Όπως και στην περίπτωση της unicast κινητικότητας, οι παραλήπτες των πακέτων που περιέχουν το πεδίο HoA είναι υποχρεωμένοι να χρησιμοποιούν την τελευταία κατά τη παράδοση των πακέτων πολυεκπομπής προς το στρώμα μεταφοράς κι όχι την διεύθυνση που υπάρχει στα αφικνούμενα πακέτα. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός έχει πολλές ομοιότητες με το μηχανισμό Route Optimization του MIPv6 που αναλύεται στην ενότητα 2.4.2.2.1.

Επέκταση μηχανισμών προώθησης SSM κίνησης – Bi-casting

Κατά τη διαπομπή μίας πηγής πολυεκπομπής που παρέχει κίνηση στα μέλη μίας ASM ομάδας, η επανεγκατάσταση του δένδρου διανομής μπορεί να πραγματοποιηθεί (θεωρητικά) χωρίς την ενημέρωση/μεσολάβηση των παραληπτών. Δεδομένου ότι για την εγκατάσταση συνόδων πολυεκπομπής χρησιμοποιούνται κατά βάση *connectionless* συνδέσεις, με βάση την αρχιτεκτονική IP Multicast η ανακατασκευή των δένδρων διανομής είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί αυτόματα, δηλαδή με απλή χρήση των εγγενών μηχανισμών που υλοποιούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολυεκπομπής. Από την άλλη, η εγκατάσταση συνόδων με βάση το μοντέλο SSM απαιτεί την επανέκδοση νέων αιτημάτων από τη μεριά των παραληπτών, μέσω των κατάλληλων μηνυμάτων των πρωτοκόλλων IGMPv3\MLDv2, ώστε να δημιουργηθούν εκ νέου τα source-rooted SSM δένδρα διανομής προς την πλευρά των πηγών. Αυτό ισχύει διότι η μεταβολή της διεύθυνσης πηγής ουσιαστικά επηρεάζει το ένα από τα δύο αναγνωριστικά του καναλιού SSM που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του εκάστοτε δένδρου διανομής. Με

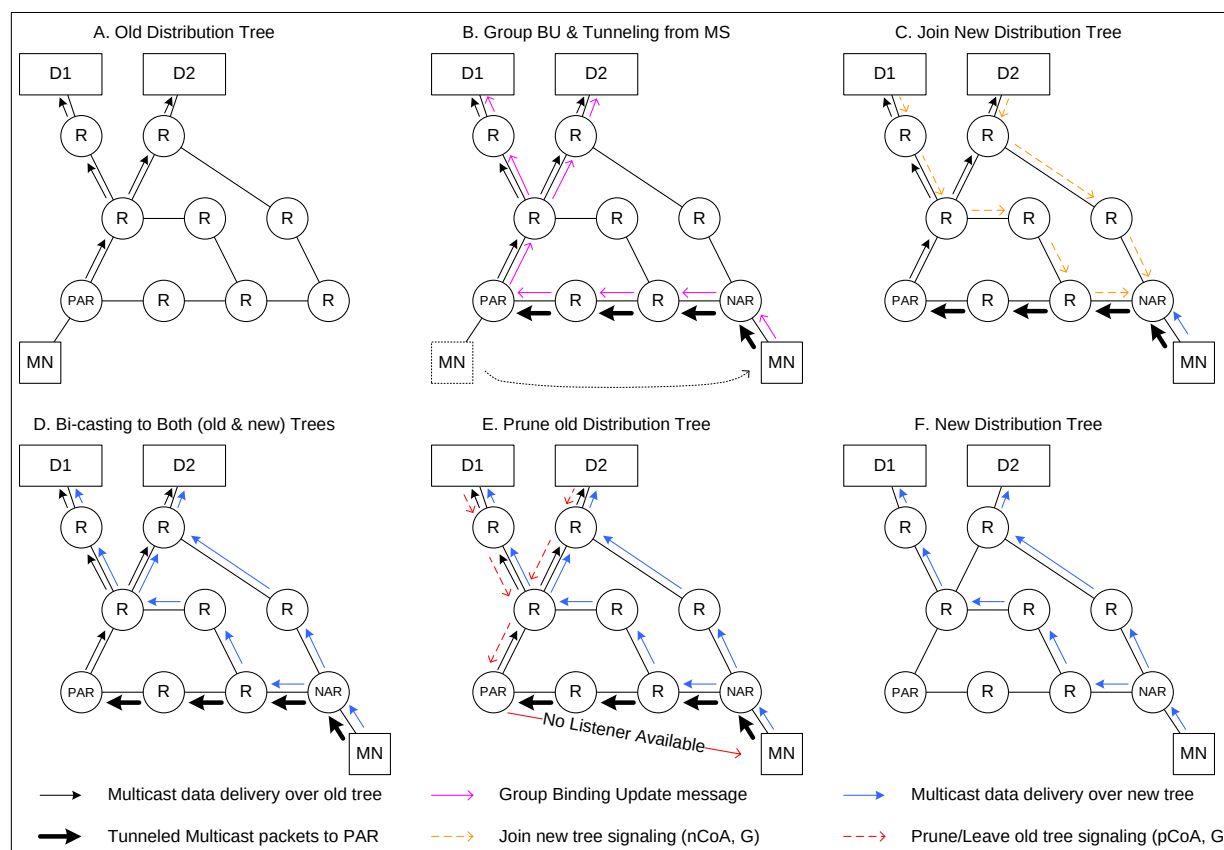
²¹ Το συγκεκριμένο πεδίο το οποίο ουσιαστικά μεταφέρει την HoA της κινητής πηγής απαντάται με διάφορους τίτλους στη βιβλιογραφία. Εντούτοις η σημασία της χρήσης του είναι η παγκόσμια ταυτοποίηση του κόμβου που εκπέμπει τα πακέτα.

στόχο την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, στο [94] προτείνονται κατάλληλες επεκτάσεις του πρωτοκόλλου MIPv6, μέσω των οποίων παρέχεται η δυνατότητα σε πηγές SSM κίνησης πολυεκπομπής να χρησιμοποιούν το παλιό δένδρο διανομής, για όσο χρόνο απαιτεί η ανακατασκευή του νέου, και να εκτελούν με αυτόν τον τρόπο απρόσκοπτες διαπομπές με μειωμένη απώλεια πακέτων.

Η λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού, που ονομάζεται *Supporting Mobile SSM Sources for IPv6* (MSSMSv6) θεωρεί ότι: πρώτον οι παραλήπτες κίνησης πολυεκπομπής ταυτοποιούν τα πακέτα που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη SSM σύνοδο από το πεδίο *HoA Option* που περιέχεται σε αυτά. Όταν μία πηγή εκτελεί μία διαπομπή που οδηγεί στην αλλαγή της διεύθυνσής της, αποστέλλει (πολυεκπέμπει) ένα κατάλληλο μήνυμα *Binding Update* προς το σύνολο των μελών της ομάδας πολυεκπομπής, το οποίο περιέχει τη νέα διεύθυνση του κόμβου πηγής. Καθένα από τα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής είναι υποχρεωμένο μετά τη λήψη του μηνύματος να εκκινήσει τη διαδικασία κατασκευής του δένδρου διανομής αποστέλλοντας προς τον MDR δρομολογητή του το κατάλληλο μήνυμα MLDv2 *Αναφοράς Συμμετοχής*, μέσω του οποίου ξεκινά η κατασκευή του νέου δένδρου διανομής για το νέο κανάλι (nCoA, G). Μετά την εκτέλεση της διαπομπής, ο κόμβος πηγής είναι υποχρεωμένος να μεταδίδει τα πακέτα κίνησης προς δύο δένδρα διανομής, δηλαδή το παλαιότερο δένδρο το οποίο έχει ρίζα τον MDR του προηγούμενου δικτύου στο οποίο ήταν προσδεμένος, και το νέο δένδρο το οποίο θα αρχίσει να δημιουργείται όπως εξηγήθηκε μόλις. Η προώθηση των πακέτων κίνησης προς τον προηγούμενο MDR πραγματοποιείται με χρήση μίας διόδου IP η οποία κατασκευάζεται για αυτό το σκοπό. Ο κόμβος πηγής συνεχίζει να προωθεί μέσω της διόδου τα πακέτα προς το προηγούμενο δίκτυο μέχρις ότου λάβει ένα κατάλληλο μήνυμα από αυτό, το οποίο υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν πλέον άλλα μέλη για το κανάλι πολυεκπομπής που είχε συσταθεί με βάση την παλιά διεύθυνσή του (pCoA). Το συγκεκριμένο μήνυμα αποστέλλεται σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας του πρωτοκόλλου *Multicast Source Notification of Interest Protocol* (MSNIP) [95]. Ο εκάστοτε MDR καθενός παραλήπτη της ομάδας πολυεκπομπής θα πρέπει να εκκινήσει και τη διαδικασία κλαδέματος από το παλιό δένδρο μόλις αρχίσουν να καταφθάνουν πακέτα από το νέο δίκτυο. Ο σκανδαλισμός της διαδικασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί εφόσον ικανοποιούνται και διάφορα κριτήρια ποιότητας. Το Σχήμα 2 - 21 παρουσιάζει τη διαδικασία που ακολουθείται κατά την λειτουργία του πρωτοκόλλου MSSMSv6.

Η λειτουργία του μηχανισμού MSSMSv6 ουσιαστικά αποτέλεσε μία εύκολα υλοποιήσιμη και δίκαιη λύση για την υποστήριξη της κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής, δεδομένου ότι η λύση στηρίζεται αποκλειστικά σε ενέργειες που αναλαμβάνουν οι συμμετέχοντες στην εκάστοτε σύνοδο πολυεκπομπής. Αν και ο μηχανισμός έχει σαν αποτέλεσμα την ομαλή μετάβαση από το παλιό δένδρο στο νέο, εφόσον δεν δημιουργεί προβλήματα μόνιμης κακής διαχείρισης δικτυακών πόρων, η εφαρμογή του αποτελεί πηγή επιπλέον προβλημάτων τα οποία σχετίζονται με το γεγονός ότι η τροφοδότηση περισσότερων του ενός δένδρων διανομής είναι εν γένει δύσκολη. Για παράδειγμα στις περιπτώσεις ταχέων διαπομπών μίας πηγής απαιτείται η τροφοδότηση περισσότερων δένδρων διανομής εφόσον η κατάλυση των παλαιότερων δεν ολοκληρώνεται σύντομα. Εντούτοις θετικό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι είναι απλή η

συνεργασία του MSSMSv6 με το FMIPv6, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει εύκολα στην εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών, με ελαχιστοποίηση των απολεσθέντων πακέτων στην περίπτωση που η κινητή πηγή είναι σε θέση να αποθηκεύει τα πακέτα που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Αρνητικό σημείο παραμένει το ότι το δίκτυο και οι παραλήπτες τους οποίους εξυπηρετεί, είναι υποχρεωμένοι να διαχειριστούν, κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του νέου δένδρου και κατάλυσης του παλιού, μία σειρά από ανεπιθύμητα και μάλλον κοστοβόρα, διπλότυπα πακέτα τα οποία καταφθάνουν από αμφότερα τα δένδρα. Τέλος αρνητικό σημείο αποτελεί και το γεγονός ότι λειτουργία του μηχανισμού δεν εκτελείται διαφανώς προς το σύνολο των συμμετεχόντων στην ομάδα. Αυτό σημαίνει ότι επηρεάζεται κι επιβαρύνεται το σύνολο των μελών της συνόδου για μία διαταραχή που οφείλεται απλά στην διαπομπή του κόμβου αποστολέα πράγμα μη επιθυμητό στη γενική περίπτωση. Αν και στην περίπτωση του μηχανισμού Route Optimization του MIPv6 είναι αποδεκτό, στην περίπτωση των εφαρμογών πολυεκπομπής δεν είναι διότι έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου σηματοδότησης που διακινείται στο δίκτυο.



Σχήμα 2 - 21. Διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής με χρήση του πρωτοκόλλου MSSMSv6

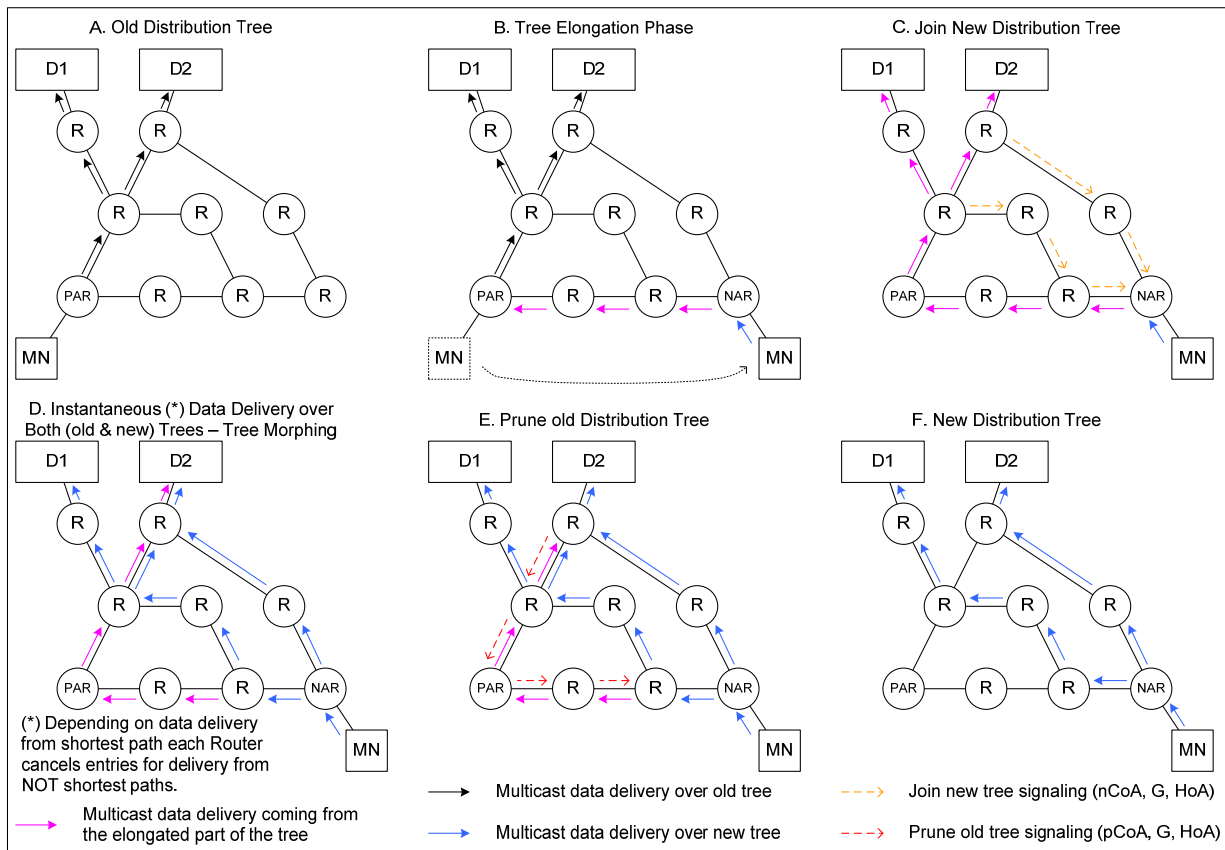
Επέκταση μηχανισμών δρομολόγησης – Tree morphing

Εναλλακτικά της πρότασης που παρουσιάστηκε από το πρωτόκολλο MSSMSv6, στη βιβλιογραφία έχει παρουσιαστεί ένας τρόπος που πραγματοποιεί την ομαλή και δυναμική αναδιάταξη του δένδρου διανομής ανάλογα με την κινητικότητα των πηγών καθ' αυτών (σε αντίθεση με την από άκρο-σε-άκρο προσέγγιση του MSSMSv6). Ο μηχανισμός, που ονομάζεται *Μορφοποίηση*

Δένδρου Διανομής για την υποστήριξη Κινητικότητας Πηγών Πολυεκπομπής (Tree Morphing Supporting Multicast Source Mobility) [96], εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η μεταβολή ενός δένδρου διανομής εξαιτίας της διαπομπής μίας πηγής, δεν είναι ολοκληρωτική αλλά μερική και εντοπίζεται κυρίως προς την πλευρά των πηγών (προς την πλευρά των παραληπτών τα δένδρα διανομής εκτείνονται σε κοινά υποσύνολα κόμβων τα οποία πιθανότατα δεν θα μεταβληθούν). Πιο συγκεκριμένα προτείνεται η σταδιακή αναμόρφωση του δένδρου χρησιμοποιώντας μηνύματα σηματοδότησης τα οποία διαδίδονται προς τους κόμβους του δένδρου και μεταφέρονται μέσω των πακέτων του εκάστοτε ρεύματος κίνησης. Επίσης προτείνεται η αποφυγή χρήσης μηχανισμών ενθυλάκωσης πακέτων κατά την εκτέλεση της διαδικασίας επέκτασης.

Η λειτουργία του μηχανισμού *tree morphing* στηρίζεται στην ταυτοποίηση της εκάστοτε SSM συνόδου με χρήση της *Home Address* (HoA) της πηγής, που μεταφέρεται στο πεδίο *HoA Option* (βλέπε παραπάνω) εντός της Επικεφαλίδας Κινητικότητας (*Mobility extension Header*), ενώ δρομολόγηση των πακέτων κατά μήκος των δένδρων στηρίζεται στην τρέχουσα διεύθυνση της πηγής (CoA). Επιπρόσθετα προβλέπεται ότι οι δρομολογητές που απαρτίζουν το δένδρο διανομής χρησιμοποιούν επιπλέον και την πληροφορία ταυτοποίησης της συνόδου SSM, δηλαδή της HoA. Για το λόγο αυτό κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής διατηρεί την τριάδα πλέον (CoA, G, HoA) για να ταυτοποιεί κάθε ρεύμα πακέτων πολυεκπομπής. Η απαίτηση αυτή εντούτοις έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του αλγορίθμου με βάση τον οποίο κάθε δρομολογητής επιλέγει προς ποια έξοδο του θα πρέπει να προωθεί τα πακέτα που καταφθάνουν σε μία είσοδό του.

Το Σχήμα 2 - 22 παρουσιάζει την λειτουργία του μηχανισμού *tree morphing* κατά την εκτέλεση μίας διαπομπής από μία κινητή πηγή. Η διαδικασία αναμόρφωσης του δένδρου ξεκινά από τον κινητό κόμβο αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής του. Ο μηχανισμός εκτελείται αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Ρύθμισης Διεύθυνσης* μέσω της οποίας το κινητό αποκτά μία νέα έγκυρη διεύθυνση (*new Care-of Address*, nCoA). Αρχικά εκτελείται η φάση *Επιμήκυνσης* (*Elongation*) του δένδρου διανομής, κατά τη διάρκεια της οποίας το παλαιό δένδρο διανομής επεκτείνεται από την παλαιά ρίζα του προς το νέο σημείο πρόσδεσης της κινητής πηγής. Δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται κάποιος μηχανισμός προώθησης κίνησης που να περιλαμβάνει ενθυλάκωση πακέτων για την υλοποίηση της συγκεκριμένης φάσης, η υλοποίηση του μηχανισμού *επιμήκυνσης* πραγματοποιείται με χρήση της IPv6 επικεφαλίδας επέκτασης *Hop-by-Hop*. Πιο συγκεκριμένα, ο κινητός κόμβος προσθέτει στο(α) πρώτο(α) πακέτο(α) που αποστέλλει μετά τη διαπομπή του, μία επικεφαλίδα του παραπάνω τύπου, στην οποία περιέχονται οι κατάλληλες τριάδες που ταυτοποιούν το παλαιό και το νέο SSM κανάλι πολυεκπομπής· δηλαδή (pCoA, G, HoA) και (nCoA, G, HoA). Όλοι οι κόμβοι που απαρτίζουν το μονοπάτι μεταξύ του νέου και προηγούμενο δρομολογητή πρόσβασης (NAR και PAR) είναι υποχρεωμένοι να επεξεργαστούν το περιεχόμενο της συγκεκριμένης επικεφαλίδας. Σαν αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διαδικασίας επέκτασης, οι τελευταίοι εγκαθιστούν στους πίνακες δρομολόγησής τους κατάλληλες εγγραφές που περιέχουν αντιστοιχίσεις αναφορικά με την προώθηση πακέτων πολυεκπομπής που έχουν σαν τρέχουσα διεύθυνση αποστολέα τη nCoA, οικεία διεύθυνση αποστολέα την HoA και σαν διεύθυνση προορισμού την διεύθυνση της ομάδας G.



Σχήμα 2 - 22. Διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής με χρήση του μηχανισμού Tree Morphing

Ο κόμβος PAR, ως ρίζα του προηγούμενου δένδρου διανομής απλά συνεχίζει να προωθεί τα πακέτα των εγκατεστημένων συνόδων κατά μήκος του ήδη εγκατεστημένου δένδρου διανομής με βάση την πληροφορία κατάστασης την οποία έχει. Επίσης συνεχίζει να προωθεί τα πακέτα πολυεκπομπής όπως καταφθάνουν σε αυτόν, δηλαδή χωρίς να αφαιρεί την επικεφαλίδα *Hop-by-Hop*. Με αυτόν τον τρόπο όλοι οι κόμβοι που απαρτίζουν το παλιό δένδρο διανομής ενημερώνονται για την ανανέωση της διεύθυνσης της πηγής πολυεκπομπής. Σε αυτό το σημείο η προώθηση των πακέτων ακολουθεί το παλιό δένδρο. Η επεξεργασία της επικεφαλίδας *Hop-by-Hop* από τους κόμβους του δένδρου σκανδαλίζει την εκτέλεση της διαδικασίας *αναμόρφωσής* του (φάσεις C και D στο Σχήμα 2 - 22). Αυτό σημαίνει ότι ένας ενδιαμέσος δρομολογητής αντιλαμβάνεται την άφιξη ενός πακέτου κίνησης SSM με διεύθυνση αποστολέα την nCoA. Στην περίπτωση κατά την οποία ο συγκεκριμένος ενδιαμέσος κόμβος αντιληφθεί ότι έχει πραγματοποιηθεί παράδοση του συγκεκριμένου πακέτου από ένα μη ελάχιστο μονοπάτι προς αυτόν θα πρέπει να αποστείλει ένα μήνυμα προς την κατεύθυνση του ελάχιστου μονοπατιού, μέσω του οποίου θα αιτείται την επέκταση του δένδρου προς αυτόν. Επιπλέον ο συγκεκριμένος δρομολογητής συνεχίζει την προώθηση των πακέτων κίνησης με βάση τις εγγραφές που είχε πριν τη λήψη του μηνύματος ανανέωσης (παλιό δένδρο). Η διαδικασία αυτή σταματά (δηλαδή ο δρομολογητής ανανεώνει τις εγγραφές του) μόλις σηματοδοτείται η παράδοση πακέτων για το συγκεκριμένο κανάλι πολυεκπομπής από το ελάχιστο μονοπάτι προς την πηγή nCoA.

Το βασικό πλεονέκτημα από τη λειτουργία του μηχανισμού tree morphing, απορρέει από το γεγονός ότι κατά τη λειτουργία του, η μετάβαση από το παλαιό στο νέο δένδρο είναι εξαιρετικά ομαλή και δεν εμπλέκει καθόλου τα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτείται καμία μεταβολή στο πρωτόκολλο MIPv6. Επιπλέον θετικό στοιχείο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και το γεγονός ότι το κύριο κομμάτι της μεταβολής αντιμετωπίζεται κοντά στην περιοχή των πηγών ενώ οι παραμένοντες στο δένδρο κόμβοι, μπορούν αυτόματα να ανανεώσουν τις εγγραφές τους αναφορικά με την ταυτοποίηση της συνόδου πολυεκπομπής, αφού επεξεργαστούν την πληροφορία που περιέχεται στα πακέτα κίνησης. Από την άλλη το βασικότερο αρνητικό σημείο του συγκεκριμένου μηχανισμού είναι το γεγονός ότι απαιτεί την αλλαγή όλης της στοίβας πρωτοκόλλων που υλοποιούν την αρχιτεκτονική IP Multicast και ιδιαίτερα το μοντέλο SSM. Αν και η απαίτηση έρχεται σαν αποτέλεσμα των βελτιστοποιήσεων που υπόσχεται ο μηχανισμός, θέτει πολύ κρίσιμα ερωτήματα αναφορικά με το κατά πόσο η εφαρμογή του μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα στο σύνολο της IP Multicast υποδομής, εφόσον η μετάβαση, βάσει τις αρχές που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.1, δεν είναι εύκολη (εν γένει απαιτεί την ανάπτυξη ενός νέου πρωτοκόλλου δρομολόγησης και προώθησης πακέτων πολυεκπομπής και τη μεταβολή της λειτουργίας του πρωτοκόλλου MLDv2 ώστε να συμπεριληφθεί η πληροφορία που αφορά την HoA της πηγής κατά την φάση εγκατάστασης των συνόδων SSM).

2.4.3 Γενικό Πλαίσιο Διαχείρισης Κινητικότητας Υπηρεσιών Πολυεκπομπής Διαδικτύου

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται το γενικότερο πλαίσιο εντός του οποίου ορίζεται σήμερα η υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής, για IPv6 συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν την αρχιτεκτονική MIPv6 ως βασικό μηχανισμό διαχείρισης κινητικότητας (*Κινητό Διαδίκτυο*). Το πλαίσιο παρουσιάζεται μέσα από μία τεχνική διατύπωση του προβλήματος, η οποία συνοψίζει την ανάλυση που έχει προηγηθεί, και από την περιγραφή και των λειτουργικών απαιτήσεων που καλούνται να ικανοποιήσουν οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής.

2.4.3.1 Τεχνική Διατύπωση Προβλήματος Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής

Όπως προαναφέρθηκε, το MIPv6 προσεγγίζει τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής μέσα από δύο ακραίες λύσεις, των *Απομακρυσμένων* και των *Οικείων Συμμετοχών*. Αμφότεροι οι μηχανισμοί παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, με τα τελευταία να υπερισχύουν στην περίπτωση που απαιτείται η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών για κινητούς χρήστες (πηγές ή παραλήπτες). Κατά συνέπεια, κανένας τους δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής ώστε να εφαρμοστεί σε μεγάλης έκτασης δίκτυα και για ευρείας κλίμακας εμπορικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Με βάση τις σύγχρονες πρακτικές, για να καταστεί το τελευταίο δυνατό απαιτείται η προσέγγιση μίας λύσης η οποία να «ανέχεται» έστω και σχεδόν βέλτιστη δρομολόγηση, τουλάχιστο κατά τη φάση της εκτέλεσης της διαπομπής, να έχει προβλέψιμο και περιορισμένο κόστος, και να καθιστά εφικτή την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε ικανοποιητική ποιότητα στη μόνιμη κατάσταση (δηλ. μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής).

Για την τεχνική διατύπωση του προβλήματος κινητικότητας πολυεκπομπής (multicast mobility), απαιτείται να αναλυθούν οι σημαντικές λεπτομέρειες που χαρακτηρίζουν τους διάφορους (υπο-)μηχανισμούς που το απαρτίζουν. Ως εκ τούτου, βασικό σημείο για την προσέγγισή του αποτελεί ο διαχωρισμός των απαιτήσεων που εισάγουν τα μοντέλα *Any Source Multicast* (ASM) και την *Source Specific Multicast* (SSM) (βλέπε ενότητα 2.1.1), και επιπλέον οι απαιτήσεις που θέτει το καθένα στο μηχανισμό διαχείρισης κινητικότητας. Δεύτερον, το πρόβλημα διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής έχει διαφορετικές προεκτάσεις ανάλογα με το αν η εκτέλεση του μηχανισμού υποστήριξης μίας διαπομπής αφορά την κινητικότητα μίας πηγής ή ενός παραλήπτη κίνησης πολυεκπομπής. Εν γένει οι πολύπλοκες διαδικασίες μέσω των οποίων υλοποιείται η δρομολόγηση πακέτων πολυεκπομπής δεν μπορούν να επεκταθούν εύκολα ώστε να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των μηχανισμών κινητικότητας, τόσο για τις πηγές όσο και για τους παραλήπτες. Κάθε κινητός παραλήπτης πολυεκπομπής απαιτεί την επέκταση του κλαδιού του δένδρου διανομής προς την εκάστοτε θέση του, ενώ από την άλλη, κάθε κινητή πηγή απαιτεί την ανακατασκευή του δένδρου αλλά και την τροποποίηση της συνόδου που ορίζει. Τρίτον, η λειτουργία ενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής θα πρέπει να θεωρηθεί εντός του πλαισίου που ορίζει η γενικευμένη αρχιτεκτονική πολυεκπομπής Διαδικτύου (IP Multicast architecture), ώστε να καθίσταται εφικτή η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε αυτό το πλαίσιο εντούτοις κι εφόσον τόσο οι πηγές όσο και οι παραλήπτες μπορεί να είναι κινούμενοι, η αλληλεπίδραση μεταξύ τους και με το δίκτυο θα πρέπει να πραγματοποιείται μέσω των πρωτοκόλλων που ορίζει η αρχιτεκτονική IP Multicast (για τη δρομολόγηση και για τον έλεγχο συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής). Με άλλα λόγια δεν είναι λογικό, στα πλαίσια των IP συστημάτων, να οδηγηθούμε σε μία νέα αρχιτεκτονική πολυεκπομπής, έχοντας ως μοναδικό στόχο την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής σε κινητούς χρήστες. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη μίας αρχιτεκτονικής πολυεκπομπής επιπέδου εφαρμογής (δηλ. ο πολλαπλασιασμός των ρευμάτων κίνησης πραγματοποιείται στο στρώμα εφαρμογής, ενώ η δρομολόγηση των ρευμάτων κίνησης υλοποιείται με πολλαπλά unicast ρεύματα μεταξύ των ζευγαριών τερματικών πηγών/παραληπτών) δεν αποτελεί λύση στο πρόβλημα κινητικότητας πολυεκπομπής στρώματος δικτύου, αλλά μάλλον αφορά το ζήτημα της ομαδικής επικοινωνίας.

Η υποστήριξη κινητικότητας θέτει επιπλέον απαιτήσεις στους μηχανισμούς δρομολόγησης πολυεκπομπής, οι οποίοι πλέον υποχρεωτικά χρειάζεται να προσαρμόζονται στο δυναμικά και ταχύτατα μεταβαλλόμενο ασύρματο περιβάλλον εντός του οποίου κινούνται τα τερματικά. Εντούτοις η σύγκλιση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής (δηλαδή η εγκατάσταση της νέας κατάστασης στους δρομολογητές), ενδέχεται να διαρκέσει σχετικά αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (της τάξης των δεκάδων ίσως δευτερολέπτων – μη ντετερμινιστικό διάστημα), γεγονός το οποίο σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό για την υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών για αλληλοδραστικές συνόδους ή συνόδους πραγματικού χρόνου. Κατά τη διάρκεια μίας διαπομπής πολυεκπομπής, η επίδοση εξαρτάται και από την εκάστοτε τοπολογία του δικτύου, το πρωτόκολλο δρομολόγησης, ή ακόμη και τον τύπο του αναπτυσσόμενου δένδρου διανομής (source-rooted ή shared). Ένας μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής συνεπώς, ο οποίος στηρίζεται σε μερική ή ολική κατασκευή του

δένδρου διανομής θα πρέπει να δίνει τη δυνατότητα προώθησης και προσωρινής αποθήκευσης των πακέτων κίνησης μεταξύ των κομβικών σημείων του δικτύου που παρεμβάλλονται, ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η επίδραση που έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών.

Ένας μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του όλα τα παραπάνω συστατικά στοιχεία και να επιτρέπει την απρόσκοπτη διατήρηση των συνόδων πολυεκπομπής, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι ένας κόμβος μπορεί να μετακινείται από ένα δίκτυο σε ένα άλλο. Επιπλέον η λειτουργία του θα πρέπει να είναι συμβατή με τη βασική απαίτηση περί ελαχιστοποίηση του κόστους για την επικοινωνία. Αυτό σημαίνει ότι η κατασκευή των δένδρων θα πρέπει να είναι βέλτιστη ενώ δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά κόρον μηχανισμοί *unicast ανακατεύθυνσης* της κίνησης προς συγκεκριμένους και μοναδικούς παραλήπτες. Στο ίδιο πλαίσιο οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να οδηγούν στην προδιαγραφή μηχανισμών που να δίνουν τη δυνατότητα *ανακατεύθυνσης της* κίνησης ανά ροή πολυεκπομπής κι όχι ανά τερματικό χρήστη (πηγή ή παραλήπτη).

Σημαντικό χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής IP Multicast αποτελεί το γεγονός ότι οι διευθύνσεις πολυεκπομπής δεν εμπεριέχουν πληροφορίες που να σχετίζονται με την τοπολογία ή τη θέση. Αυτό είναι πολύ θετικό για την περίπτωση των παραληπτών κίνησης, εφόσον η διατύπωση ενός αιτήματος συμμετοχής παραμένει απaráλλαχτη ανεξάρτητα από το σημείο του δικτύου στο οποίο είναι προσδεμένο το υποψήφιο μέλος. Οι πηγές πολυεκπομπής εντούτοις λειτουργούν εντελώς ανεξάρτητα από τους παραλήπτες· μία πηγή στέλνει τα πακέτα πολυεκπομπής προς μία ομάδα πολυεκπομπής χωρίς να διαχειρίζεται, στο στρώμα δικτύου, καμία πληροφορία αναφορικά με τους παραλήπτες, και χωρίς να δέχεται πίσω πληροφορίες αναφορικά με την λειτουργία τους. Επιπλέον δεν υπάρχει τρόπος ώστε να ενημερωθεί η πηγή για την (τρέχουσα) κατάσταση του δένδρου διανομής.

Οι διευθύνσεις των πηγών χρησιμοποιούνται τόσο από την υποδομή δρομολόγησης όσο και από τις εφαρμογές που εκτελούνται στην μεριά των παραληπτών (βλέπε ενότητα 2.4.1.3). Η διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής κληρονομεί το πρόβλημα *δυσδικτότητας* στη διευθυνσιοδότηση, όπως ακριβώς και κατά την σημείο-προς-σημείο επικοινωνία. Κατά συνέπεια, η χρήση διαφορετικών αναγνωριστικών για τη λογική ταυτοποίηση του κόμβου καθ' αυτού και της θέσης του στο Διαδίκτυο είναι επιβεβλημένη για την περίπτωση της κινητικότητας πηγών. Όπως και στην περίπτωση της λειτουργίας του μηχανισμού MIPv6 *Route Optimization*, ο συγκεκριμένος διαχωρισμός μπορεί να επιτευχθεί με χρήση της διαθέσιμης από το MIPv6 *Οικίας Διεύθυνσης* (Home Address, HoA) για την παγκόσμια ταυτοποίησή του, και της τρέχουσας διεύθυνσής του (Care-of Address, CoA) για τον προσδιορισμό της θέσης του.

Εξίσου σημαντικό στοιχείο για τη διαχείριση της κινητικότητας πολυεκπομπής είναι και το ότι οι εφαρμογές και υπηρεσίες πολυεκπομπής είναι μη εγγυημένης παράδοσης πράγμα το οποίο τις καθιστά άρρηκτα συνδεδεμένες με πρωτόκολλα του στρώματος μεταφορά μη προσανατολισμένα σε σύνδεση (connectionless). Υπ' αυτή την έννοια, κατά την παροχή μίας υπηρεσίας πολυεκπομπής, η απώλεια πακέτων, η παράδοση πακέτων εκτός σειράς, ή η παράδοση διπλότυπων πακέτων εντός των επιτρεπόμενων ορίων ποιότητας είναι αποδεκτή και μπορεί να

θεωρηθεί εκμεταλλεύσιμη από την πλευρά των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας, ώστε να θεωρούνται οι διαπομπές απρόσκοπτες. Η ανεκτικότητα αυτή από την πλευρά του στρώματος μεταφορά εντούτοις, δεν σημαίνει ότι η διαχείριση της κινητικότητας θα μπορεί να εκτελείται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών. Σαν αποτέλεσμα ένα επιπλέον πρόβλημα το οποίο καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας, είναι και η παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας στους κινητούς χρήστες κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μίας χρονοβόρας όπως προαναφέρθηκε διαπομπής πολυεκπομπής.

Οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής θα πρέπει επίσης να αντιμετωπίσουν και το πρόβλημα που ορίζει η εμβέλεια την οποία έχουν τα πακέτα πολυεκπομπής που αποστέλλονται από τις πηγές. Στην περίπτωση κινητικότητας πηγών συνεπώς θα πρέπει να είναι σεβαστοί οι περιορισμοί που αφορούν την αποστολή κίνησης που εμπλέκει το *Οικείο* ή τα *Επισκεπτόμενα/Ξένα* δίκτυα. Παρόμοια σημαντικό είναι και το θέμα της ασφάλειας που δημιουργείται κατά την διαπομπή μίας πηγής που χρησιμοποιεί το μοντέλο SSM. Η αλλαγή στη διεύθυνση του αποστολέα θέτει θέματα ασφάλειας στους παραλήπτες της ομάδας, οπότε απαιτείται η χρήση ενός μηχανισμού για την ανταλλαγή κλειδιών ασφαλείας για αυτόν τον σκοπό. Στο ίδιο πλαίσιο απαιτείται και η διασφάλιση των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων μέσω κρυπτογράφησης των περιεχομένων τους.

2.4.3.2 Λειτουργικές Απαιτήσεις από τους Μηχανισμούς Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, στην ακόλουθη λίστα συνοψίζονται οι λειτουργικές απαιτήσεις που καλείται να καλύψει ένας μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής:

- *Κλιμάκωση* (Scalability): Κάθε προτεινόμενος μηχανισμός απαιτείται να επιτυγχάνει το στόχο του ανεξάρτητα από τον αριθμό των κινητών χρηστών τον οποίο καλείται να εξυπηρετήσει παράλληλα, ώστε να μην καταλύονται οι βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής IP Multicast. Αυτό σημαίνει ότι η λύση δε θα πρέπει να αποτελεί πηγή προβλημάτων κακής διαχείρισης δικτυακών πόρων, για παράδειγμα μέσω μόνιμης «διόδευσης» της κίνησης πολυεκπομπής, όπως προτείνεται από το μηχανισμό *Οικείων Συμμετοχών* του MIP ή της προσωρινής μεν, αλλά καθολικής δε προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής στην ευρύτερη περιοχή κινητικότητας ενός τερματικού (πχ. μία τεχνική πλημμύρας των γειτονικών περιοχών κινητικότητας ενός τερματικού). Επίσης η λειτουργία του μηχανισμού θα πρέπει να μην εξαρτάται από το αν οι χρήστες είναι πυκνά ή αραιά καταμετρημένοι στην περιοχή δικτύου στην οποία κινούνται.
- *Ευρωστία* (Robustness): Η διατάραξη ή διακοπή της παρεχόμενης υπηρεσίας σε κινητούς χρήστες στην περίπτωση που είναι παραλήπτες, ή στους αποδέκτες της κίνησης πολυεκπομπής στην περίπτωση διαπομπής μίας πηγής, θα πρέπει να είναι ελάχιστη. Εν γένει, η λύση θα πρέπει να μην έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας τουλάχιστο αναφορικά με την καθυστέρηση παράδοσης, την διακύμανση της καθυστέρησης (jitter), την απώλεια πακέτων, το ρυθμό άφιξης πακέτων

κίνησης στους παραλήπτες (κινητούς ή σταθερούς) ή την παράδοση διπλότυπων πακέτων για μεγάλο χρονικό διάστημα.

- *Ανεξαρτησία από χρησιμοποιούμενη τεχνολογία πρόσβασης:* Η λειτουργία ενός μηχανισμό δεν θα πρέπει να αναπτύσσεται με βάση τις δυνατότητες μίας συγκεκριμένης τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης (πχ. WLAN 802.11, UMTS, κλπ). Αντίθετα θα πρέπει να είναι αρκετά γενική, η λειτουργία της να εντοπίζεται κυρίως στο στρώμα δικτύου, να στηρίζεται σε διαδεδομένα κι ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα και να μην θεωρεί την ανάπτυξη και λειτουργία ιδιαίτερων τεχνολογιών στρώματος ζεύξης για την διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής στρώματος δικτύου.
- *Κλίμακα εφαρμογής:* Η προτεινόμενη λύση δεν θα πρέπει να θεωρεί την αποδοτική λειτουργία ενός μηχανισμό μόνο στα πλαίσια ενός ιεραρχικού συστήματος (τοπικό επίπεδο ή επίπεδο αυτόνομου συστήματος), καλύπτοντας για παράδειγμα μόνο τις απαιτήσεις για διαχείριση στο επίπεδο της μικρο-κινητικότητας αλλά θα πρέπει να παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης κινητικότητας σε παγκόσμιο επίπεδο (μάκρο-κινητικότητα). Θα πρέπει δηλαδή η λύση να είναι καθολική και να παρουσιάζει καλή επίδοση σε όλες τις περιπτώσεις.
- *Ολοκλήρωση με μηχανισμούς διαχείρισης κινητικότητας για unicast εφαρμογές:* Η σχεδίαση των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής θα πρέπει να οδηγεί στην ανάπτυξη ενός ενοποιημένου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας για unicast και multicast εφαρμογές. Θα πρέπει δηλαδή να είναι αρκετά γενική (οριζόντια) ώστε να επιτρέπει τη διασυνεργασία με άλλους μηχανισμούς και τη διαχείριση πληροφοριών που αφορούν την οντότητα του τερματικού (πχ. παγκόσμια ταυτοποίηση, χρέωση, δικαιώματα χρήσης υπηρεσιών, εμβέλεια υπηρεσιών) αλλά και ειδική (κατακόρυφα) ώστε να αντιμετωπίζει τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η αρχιτεκτονική IP Multicast (πχ. έλεγχος συμμετοχής, διαχείριση εφαρμογών πολυεκπομπής).
- *Συμβατότητα με άλλους μηχανισμούς του δικτύου (Compatibility):* Η προτεινόμενη λύση θα πρέπει να είναι συμβατή με τη λειτουργία των πρωτοκόλλων που συνθέτουν την αρχιτεκτονική IP Multicast, για τον έλεγχο συμμετοχών σε ομάδες και τη δρομολόγηση πακέτων κίνησης πολυεκπομπής. Επίσης θα πρέπει να επιτρέπει την διασυνεργασία με άλλους αυτόνομους μηχανισμούς που λειτουργούν στα πλαίσια του Διαδικτύου, όπως για παράδειγμα πρωτόκολλα διαχείρισης Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service), ασφάλειας, εγκατάστασης ζεύξεων κ.α.
- *Ευκολία εφαρμογής σε πραγματικά συστήματα (Deployment):* Ο προτεινόμενος μηχανισμός θα πρέπει να θέτει ελάχιστες απαιτήσεις αναφορικά με το δικτυακό περιβάλλον στο οποίο θα μπορεί να λειτουργήσει. Δεδομένης και της απαίτησης συμβατότητας που περιγράφηκε παραπάνω, η προτεινόμενη λύση δεν θα πρέπει να προαπαιτεί την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών σε ευρεία κλίμακα αλλά θα πρέπει να στηρίζεται σε ήδη ώριμες τεχνολογίες. Για παράδειγμα η χρήση της τεχνικής tree morphing που αναλύεται στην ενότητα 2.4.3.2.2, αν και προφανώς ελαχιστοποιεί την ανάγκη ανταλλαγής σηματοδοσίας μεταξύ των μερών που συμμετέχουν σε μία σύνοδο πολυεκπομπής, απαιτεί την καθολική

επέκταση της αρχιτεκτονικής στο εύρος του δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται. Η συγκεκριμένη απαίτηση δυσχεραίνει εξαιρετικά τις διαδικασίες εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες εφόσον προϋποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου κορμού (σε όλο το δίκτυο!) θα πρέπει να χρησιμοποιούν ένα νέο συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Αντίθετα η αρχιτεκτονική MSSMv6 θέτει χαλαρότερες απαιτήσεις εφόσον η ανάγκη για εκτέλεση ενός μηχανισμού μόνο στους ακραίους κόμβους είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμη (πχ. οι τερματικοί χρήστες θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν ειδικό λογισμικό που στέλνει ένας πάροχος υπηρεσίας για το σκοπό αυτό).

- *Ενοποιημένη υποστήριξη κινητικότητας Πηγών και Παραληπτών κίνησης πολυεκπομπής:* Οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να δίνουν μία λύση για αμφότερα τα προβλήματα κινητικότητας πηγών και παραληπτών πολυεκπομπής· εναλλακτικά οι σχεδιαστικές επιλογές που χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών που αντιμετωπίζουν το ένα πρόβλημα (κινητικότητα πηγών/παραληπτών) θα πρέπει να μη δημιουργούν δυσεπίλυτα προβλήματα για το άλλο (κινητικότητα παραληπτών/πηγών αντίστοιχα).
- *Ασφάλεια (Security):* Ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα διασφάλισης των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται κατά την εκτέλεσή του, για παράδειγμα για τον έλεγχο συμμετοχής στις ομάδες πολυεκπομπής. Η συγκεκριμένη λειτουργία δεν αφορά την ανταλλαγή μηνυμάτων των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής (IGMP/MLD) αλλά τη λειτουργία του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας καθ' αυτού κατά την ανταλλαγή της πληροφορίας συμμετοχής. Επίσης αφορά την ανταλλαγή των κατάλληλων κλειδιών ασφαλείας, την αυθεντικοποίηση των χρηστών και την προστασία των ανταλλασσόμενων κατά την εκτέλεση της διαπομπής μηνυμάτων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω λίστα παρουσιάζει τις βασικότερες απαιτήσεις από την πλευρά της σχεδίασης ενός μηχανισμού κινητικότητας περιλαμβάνοντας απαιτήσεις αναφορικά με την υποστηριζόμενη λειτουργικότητά τους. Για παράδειγμα δεδομένης της μη ευρείας χρήσης επιχειρηματικών μοντέλων ή πολιτικών τιμολόγησης υπηρεσιών πολυεκπομπής, η λίστα δεν περιλαμβάνει απαίτηση για ανταλλαγή πληροφοριών χρέωσης κατά τη φάση εκτέλεσης μίας διαπομπής. Ακόμη πιο σημαντική μπορεί να χαρακτηριστεί η έλλειψη ανταλλαγής πληροφορίας αναφορικά με την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (Quality of Service). Στο πλαίσιο αυτό πάντως, η απαίτηση για σχεδίαση μηχανισμών και πρωτοκόλλων, που σέβονται τις αρχές ανάπτυξης ανοικτών κι επεκτάσιμων προτύπων και διεπαφών, δηλαδή επιτρέπουν την προσθήκη επιπλέον χαρακτηριστικών και τη μεταφορά επιπλέον πληροφορίας, θεωρείται στις μέρες μας βασική στους οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων (IETF, 3GPP) και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ακολουθείται.

Κλείνοντας τη συγκεκριμένη ενότητα θα μπορούσε να σημειωθεί ότι η διαχείριση κινητικότητας σχετίζεται με την προώθηση και εγκατάσταση του κατάλληλου *πλαισίου πληροφορίας*²² (information context) από το προηγούμενο της διαπομπής σημείο πρόσδεσης του κινητού

²² Το συγκεκριμένο πλαίσιο πληροφορίας αφορά στοιχεία όπως η συμμετοχή σε ομάδες πολυεκπομπής, η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, τα δικαιώματα πρόσβασης σε συγκεκριμένες υπηρεσίες, η χρέωση, η ασφάλεια κλπ.

κόμβου, στο νέο. Ουσιαστικά όλοι οι μηχανισμοί κινητικότητας επιχειρούν την υποστήριξη μίας διαπομπής εκτελώντας με τον ένα ή τον άλλον τρόπο την μεταφορά/επανεγκατάσταση του συγκεκριμένου *πλασίου πληροφορίας* από το παλιό δίκτυο στο νέο. Συνεπώς βασική αρχή για την σχεδίαση ενός μηχανισμού κινητικότητας και ιδιαίτερα για την περίπτωση των εφαρμογών πολυεκπομπής αποτελεί η δυνατότητα ταχείας μεταφοράς του εν λόγω *πλασίου πληροφορίας* πολυεκπομπής που θα καταστήσει δυνατή την απρόσκοπτη διαπομπή του κινητού.

2.4.3.2.1 Κινητικότητα παραληπτών κίνησης πολυεκπομπής

Η υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής για κινητούς παραλήπτες θέτει κυρίως απαιτήσεις που σχετίζονται με την ταχύτητα εκτέλεσης της διαπομπής και την απώλεια πακέτων. Αμφότερες αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την επίδραση που μπορεί να έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών ενώ εξαρτώνται κυρίως από τον μηχανισμό καθ'αυτό (δηλ. διαθεσιμότητα κρίσιμης πληροφορίας, χρονισμός διαδικασιών σηματοδότησης κλπ.). Επιπρόσθετα σχετίζεται με ζητήματα διαχείρισης πόρων. Βασική απαίτηση για την εκτεταμένη εφαρμογή ενός μηχανισμού σε ευρεία κλίμακα είναι η καθολική αποφυγή των προβλημάτων που εμφανίζει ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* αναφορικά με τη *σύγκλιση δρόμων* και την πολλαπλή παράδοση του ρεύματος κίνησης προς τα δίκτυα των παραληπτών. Με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση δικτυακών πόρων στην πλευρά των παραληπτών στη μόνιμη κατάσταση συνεπώς (δηλ. μετά την εκτέλεση της διαπομπής), απαιτείται η χρήση ενός μηχανισμού που να δίνει τη δυνατότητα δυναμικής επέκτασης των δένδρων διανομής, αντίστοιχου δηλαδή με τον μηχανισμό *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Κάθε χρήση οποιουδήποτε μηχανισμού unicast ενθυλάκωσης πακέτων σε ευρεία κλίμακα και σε μόνιμη βάση (εξαιρουμένου δηλαδή του μηχανισμού που προτείνει το πρωτόκολλο HMIP) είναι μη αποδεκτή και αντιτίθεται στις θεμελιώδεις αρχές του μοντέλου IP Multicast.

Κατά συνέπεια η διαχείριση κινητικότητας παραληπτών μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενός αυτόνομου μηχανισμού ο οποίος θα πρέπει να δίνει τη δυνατότητα έγκαιρης παράδοσης των πακέτων κίνησης στο κινητό το ταχύτερο δυνατό, ενώ παράλληλα θα εξασφαλίζει την εκτέλεση των απαραίτητων διαδικασιών, μέσω των οποίων θα σκανδαλίζεται το συντομότερο η επέκταση του δένδρου διανομής προς το σημείο του δικτύου από το οποίο θεωρείται ότι παρέχεται η υπηρεσία πολυεκπομπής (π.χ. για το M-FMIPv6 ο NAR ή για το M-HMIPv6 ο M-MAP). Όποιος και να είναι ο μηχανισμός εντούτοις, η αποτελεσματικότητά του κρίνεται από τη δυνατότητά του να υποστηρίζει την εκτέλεση διαπομπών με ελάχιστες *απώλειες* για τους παραλήπτες και με ελάχιστο ή ελεγχόμενο και μικρό *κόστος* για το δίκτυο. Για παράδειγμα, η χρήση ενός μηχανισμού μέσω του οποίου στη μόνιμη κατάσταση πραγματοποιείται η επέκταση του δένδρου διανομής όχι μόνο προς τα φυσικά δίκτυα όπου υπάρχουν παραλήπτες αλλά επίσης προς στα γειτονικά τους (ανεξάρτητα από την εκεί ύπαρξη παραληπτών), θα ήταν εξαιρετικά επωφελής για τους παραλήπτες, αλλά εξαιρετικά ζημιογόνος για το δίκτυο. Κατά συνέπεια, το ζητούμενο είναι να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός ο οποίος να υποστηρίζει την εκτέλεση διαπομπών προς όφελος της εκτελούμενης υπηρεσίας χωρίς να δημιουργεί όπως προαναφέρθηκε προβλήματα κλιμάκωσης στο δίκτυο.

Πέρα από τις απαιτήσεις που αναλύθηκαν παραπάνω κι αφορούν το πρόβλημα διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, η παρακάτω λίστα συνοψίζει τις λειτουργικές απαιτήσεις που είναι επιπλέον απαραίτητο να ικανοποιούν οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας παραληπτών πολυεκπομπής:

- Η προτεινόμενη λύση θα πρέπει να στηρίζεται στη χρήση των κλασικών μηχανισμών προώθησης κίνησης πολυεκπομπής (για τη δρομολόγηση και προώθηση στο κοινό μέσο του εκάστοτε στρώματος ζεύξης δεδομένων) στη μόνιμη κατάσταση, ώστε να μην πραγματοποιείται κακή χρήση δικτυακών πόρων.
- Επίσης η λύση θα πρέπει να χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του φαινομένου της διαπομπής, ούτως ώστε να υποστηρίζεται η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών και να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που τίθενται από το στρώματα εφαρμογής αναφορικά με την διατήρηση του επιπέδου της προσφερόμενης ποιότητας. Προφανώς η απουσία λειτουργίας ενός υποστηρικτικού υπομηχανισμού προώθησης της κίνησης, μεταφράζεται σε διεύρυνση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο ο κινητός παραλήπτης δεν λαμβάνει πακέτα κίνησης.
- Σαν μία πιο χαλαρή απαίτηση (αν και τα πρωτόκολλα ελέγχου συμμετοχής παρέχουν έναν σχετικά καλό μηχανισμό) θα πρέπει να υποστηρίζεται η δυνατότητα καταστροφής του παλαιού κλαδιού του δένδρου διανομής, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το διάστημα κατά το οποίο παραδίδονται πακέτα πολυεκπομπής σε αυτό χωρίς λόγο (εφόσον δεν υπάρχει ουσιαστικά κάποιος παραλήπτης κίνησης – leave latency).
- Σαν μία περισσότερο εξεζητημένη παρατήρηση θα μπορούσε να σημειωθεί και η απαίτηση από το μηχανισμός να εξασφαλίζει παράδοση πακέτων πολυεκπομπής σε επισκεπτόμενα δίκτυα όπου δεν υποστηρίζεται δρομολόγηση πολυεκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι τα πακέτα θα πρέπει να ενθυλακώνονται σε πακέτα unicast τα οποία θα παραδίδονται προς τον κάθε παραλήπτη ξεχωριστά (π.χ. η χρήση του μηχανισμού M-HMIPv6 μπορεί να υποστηρίξει αυτόματα αυτήν την λειτουργία).

2.4.3.2.2 Κινητικότητα πηγών κίνησης πολυεκπομπής

Εκτός κι αν χρησιμοποιείται μία εφάμιλλή λύση όπως αυτή που παρουσιάζεται από το μηχανισμό *Οικείων Συμμετοχών* του MIP, το βασικότερο πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής είναι αυτό της βέλτιστης δρομολόγησης. Όπως έχει αναλυθεί, μία αντίστοιχη λύση με αυτή του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, απαιτεί την εκ νέου εγκατάσταση του δένδρου διανομής και της συνόδου πολυεκπομπής, από την πηγή προς το σύνολο των παραληπτών. Όπως έχει αναλυθεί νωρίτερα η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι μη αποδεκτή για τα σύγχρονα συστήματα. Η λειτουργία του μηχανισμού *Οικείων Συμμετοχών* δεν θέτει επιπλέον απαιτήσεις σε αυτό το επίπεδο. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κάποιο προηγμένο σχήμα όπως το πρωτόκολλο FMIPv6, μέσω του οποίου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της εκτέλεσης των διαδικασιών πρόσδεσης στο νέο δίκτυο και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών καθίσταται εξαιρετικά απλή και ταχύτατη. Εντούτοις η τελευταία λύση οδηγεί σε μη

βέλτιστη (τριγωνική) δρομολόγηση των πακέτων που αποστέλλονται από την κινούμενη πηγή, πράγμα το οποίο λειτουργεί ανασταλτικά για την εφαρμογή της λύσης σε ευρεία κλίμακα (για παράδειγμα κατά την εκτέλεση μίας εφαρμογής τηλεδιάσκεψης τα ρεύματα κίνησης υφίστανται αυξημένη καθυστέρηση).

Μία πηγή (ASM ή SSM) κίνησης πολυεκπομπής, πρέπει να αντιμετωπίσει επιπλέον το θέμα της ταυτοποίησης σε δύο ξεχωριστά επίπεδα: το επίπεδο των τερματικών (πηγών) και το επίπεδο της συνόδου. Με στόχο τη συμβατότητα κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων *Reverse Path Forwarding* (RPF checks), θα πρέπει να χρησιμοποιείται μία τοπολογικά έγκυρη διεύθυνση η οποία να ταυτοποιεί τον κόμβο αποστολέα (στο πεδίο 'διεύθυνση αποστολέα'), και η οποία να είναι σύμφωνη με τον «τοπολογικό» χαρακτήρα του χρησιμοποιούμενου δένδρου διανομής. Αυτό σημαίνει ότι στο συγκεκριμένο πεδίο θα πρέπει κάθε στιγμή να εισάγεται μία διεύθυνση η οποία να ταυτοποιεί τοπολογικά τη ρίζα του δένδρου διανομής. Από την άλλη, με στόχο την διατήρηση της διαφάνειας στο επίπεδο εφαρμογής, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένα παγκόσμιο αναγνωριστικό του κόμβου πηγή, όπως για παράδειγμα η HoA του, ώστε να μην απαιτείται η επανεγκατάσταση της συνόδου κάθε φορά που εκτελείται μια διαπομπή σαν αποτέλεσμα της κινητικότητας του κόμβου. Κατά συνέπεια για την ανάπτυξη βέλτιστων δένδρων προώθησης της κίνησης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα στρώμα το οποίο να καθιστά διαφανή την εκτέλεση διαπομπών πηγών προς το σύνολο των παραληπτών πολυεκπομπής. Αυτό απαιτεί την τροποποίηση και άρση του περιορισμού που θέτει το MIPv6 αναφορικά με τη χρήση της επιπλέον HoA option που να μεταφέρει τη σχετική πληροφορία. Η συγκεκριμένη προσέγγιση (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.3), απαιτεί την τροποποίηση της λογικής του MIPv6 στους *Κόμβους Ανταποκριτές* (CN) κατά την επεξεργασία των πακέτων πολυεκπομπής.

Κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής μίας πηγής κίνησης πολυεκπομπής και με στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας πακέτων, απαιτείται να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός μέσω του οποίου θα παρέχεται η δυνατότητα προώθησης του ρεύματος κίνησης προς τους τελικούς παραλήπτες. Δεδομένου του ότι η εγκατάσταση του νέου δένδρου μπορεί να διαρκέσει ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας έτσι την ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας, ο μηχανισμός θα πρέπει να χρησιμοποιεί το προηγούμενο δένδρο, στο βαθμό του εφικτού, κατά το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για την αποκατάσταση της επικοινωνίας μέσω του νέου. Με βάση την αποδοτικότητα της λειτουργίας του μηχανισμού καθ' αυτού, η φάση μετάβασης μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση είτε των τεχνολογιών της αρχιτεκτονικής IP Multicast (δηλαδή μέσω της ανακατασκευής του δένδρου διανομής όπως προβλέπεται από ήδη προτυποποιημένους μηχανισμούς και πρωτόκολλα), είτε να οδηγήσει στην κατασκευή ενός νέου μηχανισμού. Η τελευταία πρόταση απαιτεί τη μεταβολή του μοντέλου ανάπτυξης δένδρων δρομολόγησης και την επέκταση της λογικής της γενικότερης αρχιτεκτονικής και δεν θα αναλυθεί περισσότερο.

Αν και στις μέρες μας έχουν γίνει προτάσεις, ακόμη και στα πλαίσια του πρωτοκόλλου MSSMv6, για την προ-δραστική αντιμετώπιση του προβλήματος διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής, εν γένει η άποψη σχετικά με την ανάπτυξη ενός προ-δραστικού της διαπομπής μηχανισμού, ο οποίος στηρίζεται σε προβλέψεις για την επέκταση του δένδρου

διανομής, δεν έχει γίνει ευρέως αποδεκτή. Ο βασικός λόγος είναι ότι οι μηχανισμοί πρόβλεψης δεν έχουν φτάσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο ωριμότητας. Εν γένει η βεβαιότητα της εκάστοτε πρόβλεψης δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής, ώστε να δικαιολογεί την προ-δραστική ανακατασκευή των δένδρων διανομής. Στην περίπτωση των παραληπτών κίνησης, το πρόβλημα είναι προφανώς διαφορετικό εφόσον το προκαλούμενο αντίκτυπο αφορά μόνο τον κινούμενο χρήστη αφενός, και επηρεάζει την μικρή περιοχή του δικτύου στην οποία αυτός κινείται αφετέρου. Η κινητικότητα των πηγών εντούτοις, επηρεάζει τη σύνοδο και κατά συνέπεια όλα τα συμμετέχοντα σε αυτή μέρη για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό η ανάπτυξη των μέχρι τώρα λύσεων έχει ακολουθήσει μία μετα-δραστική προσέγγιση, που προϋποθέτει τη λειτουργία ενός μηχανισμού που καθιστά εφικτή την ομαλή εκτέλεση της διαπομπής της πηγής πολυεκπομπής από το παλιό στο νέο δένδρο διανομής μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων.

2.5 Βιβλιογραφία

- [1] S. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting", IETF RFC 1112, August 1989
- [2] S. Deering, D. Cheriton, "Multicast Routing in Datagram Internetworks and Extended LANs," ACM Transactions on Computer Systems, Vol. 8, No. 2, Pages 85-110, May 1990
- [3] S. Deering, "Multicast Routing in Internetworks and Extended LANs," ACM SIGCOMM Computer Communication Review , Symposium proceedings on Communications architectures and protocols, Vol. 18 No. 4, pp. 55 – 64, August 1988
- [4] D. Thaler, M. Handley, D. Estrin, "The Internet Multicast Address Allocation Architecture", IETF RFC 2908, September 2000
- [5] V. Fuller, T. Li, "Classless Inter-domain Routing (CIDR): The Internet Address Assignment and Aggregation Plan", IETF RFC 4632, August 2006
- [6] R. Hinden, S. Deering, "Internet Protocol Version 6 (IPv6) Addressing Architecture", IETF RFC 4291, February 2006
- [7] D. Thaler, M. Handley, D. Estrin, "The Internet Multicast Address Allocation Architecture", IETF RFC 2908, September 2000
- [8] R. Hinden, S. Deering, "IPv6 Multicast Address Assignments", IETF RFC 2375, July 1998
- [9] Fenner, W., "Internet Group Management Protocol, Version 2 (IGMPv2)", IETF RFC 2236, November 1997
- [10] S. Deering, W. Fenner, B. Haberman, "Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6", IETF RFC 2710, October 1999
- [11] M. Ramalho, "Intra- and Inter-Domain Multicast Routing Protocols: A Survey and Taxonomy," IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 3, No. 1, First Quarter 2000
- [12] C. Diot, W. Dabbous, J. Crowcroft, "Multipoint communication: a survey of protocols, functions, and mechanisms," Selected Areas in Communications, Vol. 15, No. 3, pp. 277–290, April 1997
- [13] J. Lina, R. Changb, "A comparison of the Internet multicast routing protocols", Computer Communications, Vol. 22, No. 2, pp. 144-155, January 1999
- [14] H. Holbrook, B. Cain, "Source-Specific Multicast for IP", IETF RFC 4607, August 2006
- [15] B. Cain, S. Deering, I. Kouvelas, B. Fenner, A. Thyagarajan, "Internet Group Management Protocol, Version 3 (IGMPv3)", IETF RFC 3376, October 2002
- [16] R. Vida, L. Costa, "Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) for IPv6", IETF RFC 3810, June 2004
- [17] E. Weisstein. "NP-Complete Problem", from MathWorld, A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/NP-CompleteProblem.html>
- [18] Wikipedia contributors, "Reverse path forwarding," Wikipedia, The Free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Reverse_path_forwarding&oldid=117398659

- [19] Juniper Networks, "Reverse Path Forwarding (RPF), <http://www.juniper.net/techpubs/software/junos/junos60/swconfig60-multicast/html/mcast-overview11.html>
- [20] B. Williamson, "Developing IP Multicast Networks, Volume I", CISCO Press, ISBN 1-57870-077-9, 2000
- [21] D. Kosiur, "IP Multicasting, The complete Guide to Interactive Corporate Networks," John Wiley and Sons, ISBN 0-471-24359-0, 1998
- [22] D. Waitzman, C. Partridge, S. Deering, "Distance Vector Multicast Routing Protocol", IETF RFC 1075, November 1988
- [23] J. Moy, "Multicast Extensions to OSPF", IETF RFC 1584, March 1994
- [24] B. Fenner, M. Handley, H. Holbrook, I. Kouvelas, "Protocol Independent Multicast - Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification (Revised)", IETF RFC 4601, August 2006
- [25] A. Adams, J. Nicholas, W. Siadak, "Protocol Independent Multicast - Dense Mode (PIM-DM): Protocol Specification (Revised)", IETF RFC 3973, January 2005
- [26] A. J. Ballardie, P. F. Francis, and J. Crowcroft (August 1993). "Core Based Trees". ACM SIGCOMM Computer Communication Review. Vol. 23, No. 4, pp. 85–95, October 1993
- [27] D. Thaler, "Border Gateway Multicast Protocol (BGMP): Protocol Specification", IETF RFC 3913, September 2004
- [28] B. Fenner, D. Meyer, "Multicast Source Discovery Protocol (MSDP)", IETF RFC 3618, October 2003
- [29] W. M. Eddy, "At What Layer Does Mobility Belong?", IEEE Communications Magazine, Vol. 42, No. 10, pp. 155-159, October 2004
- [30] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, E. Schooler, "SIP: Session Initiation Protocol", IETF RFC 3261, June 2002
- [31] H. Schulzrinne, E. Wedlund, "Application-Layer Mobility Using SIP", Mobile Computing and Communications Review, Vol. 4, No. 3, pp. 47-57, July 2000
- [32] Q. Xie, K. Morneault, C. Sharp, H. Schwarzbauer, T. Taylor, I. Rytina, M. Kalla, L. Zhang, V. Paxson, "Stream Control Transmission Protocol", IETF RFC 2960, October 2000
- [33] S. Fu, M. Atiquzzaman, "SCTP: State of the Art in Research, Products, and Technical Challenges", IEEE Communications Magazine, Vol. 42, No. 4, pp. 64-76, April 2004
- [34] J. Noonan, P. Perry, J. Murphy, "A Study of SCTP Services in a Mobile IP Network", In proc. of IT&T Annual Conference, Ireland, October 2002.
- [35] S. Fu, M. Atiquzzaman, L. Ma, W. Ivancic, Y.-J. Lee, J. S. Jones, S. Lu, "TraSH: A Transport Layer Seamless Handover Scheme", Technical report, Department of Computer Science, University of Oklahoma, available at www.cs.ou.edu/~atiq, Nov. 2003.
- [36] 3GPP TS 23.060, "General Packet Radio Service (GPRS); Service description", March 2007

- [37] IEEE Std 802.11, 1999 (R2003), "Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", June 2003
- [38] IEEE Std 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", October 2004
- [39] IEEE Std. 802.11f-2003, "Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation", January 2003
- [40] IEEE 802.21 WG, Media Independent Handover Services, www.ieee802.org/21/
- [41] IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee, www.ieee802.org/
- [42] J. Manner (editor), M. Kojo (editor), "Mobility Related Terminology", IETF RFC 3753, June 2004
- [43] C. Perkins (editor), "IP Mobility Support for IPv4", IETF RFC 3344, August 2002
- [44] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", IETF RFC 3775, June 2004
- [45] C. Perkins, "IP Encapsulation within IP", IETF RFC 2003, October 1996
- [46] C. Perkins, "Minimal Encapsulation within IP", IETF RFC 2004, October 1996
- [47] A. Conta, S. Deering, "Generic Packet Tunneling in IPv6 Specification", IETF RFC 2473, December 1998
- [48] S. Deering, R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", IETF RFC 2460, December 1998
- [49] T. Narten, E. Nordmark, W. Simpson, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)", IETF RFC 2461, December 1998
- [50] T. Narten, E. Nordmark, W. Simpson, H. Soliman, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)", IETF Internet-draft, draft-ietf-ipv6-2461bis-11.txt, March 2007
- [51] S. Thomson, T. Narten, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", IETF RFC 2462, December 1998
- [52] S. Thomson, T. Narten, T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", IETF Internet-draft, draft-ietf-ipv6-rfc2462bis-08.txt, May 2005
- [53] R. Droms, Ed., J. Bound, B. Volz, T. Lemon, C. Perkins, M. Carney, "Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)", IETF 3315, July 2003
- [54] V. Gupta, D. Johnston, "IEEE 802.21, A Generalized Model for Link Layer Triggers", IEEE 802.21 Media Independent Handoff Working Group, March 2004 meeting. Available: http://www.ieee802.org/handoff/march04_meeting_docs/Generalized_triggers-02.pdf, March 2004
- [55] IEEE P802.21/D00.05, "Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Independent Handover Services", IEEE 802.21 MIH Working Group, January 2006

- [56] X. P. Costa, M. T. Moreno, H. Hartenstein, "A Performance Comparison of Mobile IPv6, Hierarchical Mobile IPv6, Fast Handovers for Mobile IPv6 and their Combination", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol. 7, No. 4, October 2003
- [57] A. T. Campbell, J. G. Castellanos, "IP Micro-Mobility Protocols", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol.4, No. 4, pp. 45-53, October 2000
- [58] N. Moore, "Optimistic Duplicate Address Detection (DAD) for IPv6", IETF RFC 4429, April 2006
- [59] C. Vogt, "Early Binding Updates for Mobile IPv6", IRTF Internet Draft, draft-vogt-mobopts-simple-ebu-00.txt, February 2006, (work in progress)
- [60] C. Vogt, R. Bless, M. Doll, T. Kuefner, "Early binding updates for mobile IPv6", Wireless Communications and Networking Conference, (WCNC 2005), Vol. 3, pp. 1440-1445, March 2005
- [61] H. Soliman, C. Castelluccia, K. El-Malki, L. Bellier, "Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management", IETF RFC 4140, August 2005
- [62] IETF MIPSHOP Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/mipshop-charter.html>
- [63] R. Koodli (editor), "Fast Handovers for Mobile IPv6", IETF RFC 4068, July 2005
- [64] M. Liebsch (Editor), A. Singh (Editor), H. Chaskar, D. Funato, "Candidate Access Router Discovery (CARD)", IETF RFC 4066, July 2005
- [65] P. McCann, "Mobile IPv6 Fast Handovers for 802.11 Networks", IETF RFC 4260, November 2005
- [66] L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. S. Venieris, "Fast Handover Support in a WLAN Environment: Challenges and Perspectives", IEEE Network, Vol. 19, No. 3, May 2005
- [67] S. Pack, Y. Choi, "Performance Analysis of Fast Handover in Mobile IPv6 Networks", Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 2775, pp. 679-691, Springer-Verlag, September 2003
- [68] S. Fu, M. Atiquzzaman, L. Ma, Y.-J.Lee, "Signaling cost and performance of SIGMA: A seamless handover scheme for data networks", Wireless Communications & Mobile Computing, Vol. 5, No. 7, Pages: 825-845, November 2005
- [69] J. Kempf, J. Wood, G. Fu, "Fast Mobile IPv6 Handover Packet Loss Performance, Measurements for Emulated Real Time Traffic", in proc of the Wireless Communications and Networking 2003 (WCNC 2003), Vol. 2, pp. 1230-1235, March 2003
- [70] Y.Gwon, J. Kempf, A. Yegin, "Scalability and Robustness Analysis of IPv6 Mobility Protocols", NTT DoCoMo PS2003-124 Report, 2003
- [71] S.-H. Hwang, Y.-H. Han, G.-G. Min, "Performance Analysis of IPv6 Mobility Support Protocols over IEEE 802.11 Network", IEICE Transactions on Communications, Vol. E87-B, No. 9, pp. 2313-2625, September 2004
- [72] G. Xylomenos, G. Polyzos, "IP Multicast for Mobile Hosts," IEEE Communications Magazine, Vol. 35, No. 1, pp. 54-58, January. 1997

- [73] C. Jelger, T. Noel, "Multicast for mobile hosts in IP networks: progress and challenges," IEEE Wireless Communications, Vol. 9, No. 5, pp. 58-64, October 2002
- [74] I. Romdhani, M. Kellil, H.-Y. Lach, A. Bouabdallah, H. Bettahar, "IP Mobile Multicast: Challenges and Solutions," IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 6, No. 1, First Quarter 2004
- [75] A. Acharya , B. R. Badrinath, A framework for delivering multicast message in networks with mobile hosts, Mobile Networks and Applications, Vol. 1, No.2, p.199-219, October 1996
- [76] U. Varshney, S. Chatterjee, "Architectural Issues to Support Multicasting over Wireless and Mobile Networks," Wireless Communications and Networking Conference (WCNC. 1999) Vol.1, pp. 41-45, September 1999
- [77] T. Ernst, C. Castelluccia, H.-Y. Lach, "Extending Mobile-IPv6 with multicast to support mobile networks in IPv6," in proc of 1st European Conference on Universal Multiservice Networks (ECUMN 2000), pp. 114-121, October 2000
- [78] H. Gossain, S. Kamat, , D. P. Agrawal, "A framework for handling multicast source movement over mobile IP," in proc. of the IEEE International Conference on Communications 2002 (ICC 2002), Vol. 5, pp. 3398-3402, May 2002
- [79] C. Bettstetter, A. Riedl, G. Gessler, "Interoperation of Mobile IPv6 and protocol independent multicast dense mode," in proc of the International Workshops on Parallel Processing 2000. pp. 531-539, August 2000
- [80] A. Acharya, A. Bakre, B. Badrinath, "IP multicast extensions for mobile internetworking," in proc. The Conference on Computer Communications (INFOCOM '96), Vol. 1, pp. 67-74, March 1996
- [81] C. R. Lin , "Mobile multicast support in IP networks," in proc. of the Global Telecommunications Conference 2002 (GLOBECOM '02) Vol. 2, pp. 1935-1939, November 2002
- [82] H.-S. Shin, Y.-J. Suh, and D.-H. Kwon, "Multicast Routing Protocol by Multicast Agent in Mobile Networks," in proc. of 2000 Int'l. Conference on Parallel Processing, August 2000
- [83] V. Chikarmane, C. Williamson, R Bunt, W. Mackrell, "Multicast support for mobile hosts using Mobile IP: Design issues and proposed architecture," Mobile Networks and Applications, Vol. 3, No. 4, pp. 365-379, January 1998
- [84] H. Gossain, C. D. M. Cordeiro, D. P. Agrawal, "Multicast: wired to wireless," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 6, pp. 116 – 123, June 2002
- [85] C. Williamson, T. Harrison, W. Mackrell, R. Bunt, "Performance evaluation of the MoM mobile multicast protocol", Mobile Networks And Applications, Vol. 3, No. 13, pp. 189-201, 1998
- [86] U. Varshney, "Multicast Over Wireless Networks", Communications of The ACM, Vol. 45, No. 12, pp. 31-37, December 2002

- [87] Apostolis Salkintzis (editor), "Mobile Internet, Enabling Technologies and Services," CRC Press, ISBN 0-8493-1631-6, 2004
- [88] IRTF MOBOPTS Working Group, <http://www.irtf.org/charter?gtype=rg&group=mobopts>
- [89] T. Schmidt, M. Waehlich, "Seamless Multicast Handover in a Hierarchical Mobile IPv6 Environment (M-HMIPv6)", IETF Internet Draft, draft-schmidt-waehlich-mhmipv6-04.txt, November 2005, Work in progress
- [90] T. Schmidt, M. Waehlich, "Multicast Mobility in MIPv6: Problem Statement", IRTF Internet Draft, (MobOpts research Group), draft-irtf-mobopts-mmcastv6-ps-02.txt, March 2007
- [91] H. K. Zhang, J. F. Guan, D. Y. Gao, H. C. Zhou, Y. J. Qin, "MIPv6 Extensions for Mobile Multicast: Problem Statement", IETF Internet Draft draft-zhang-multimob-memcast-ps-00.txt, July 2007
- [92] K. Suh, Y.-J. Suh, "Fast Multicast Protocol for Mobile IPv6 in the Fast Handovers Environment", IETF Internet Draft, draft-suh-mipshop-fmcast-mip6-00.txt, January 2004, (expired)
- [93] T. C. Schmidt, M. Waehlich, "Predictive versus Reactive - Analysis of Handover Performance and Its Implications on IPv6 and Multicast Mobility", Telecommunication Systems, Vol. 30, No. 1, pp. 123-142, November 2005
- [94] C. Jelger, T. Noel, "Supporting Mobile SSM Sources for IPv6 (MSSMSv6)", IETF Internet Draft, draft-jelger-mssmsv6-00.txt, January 2002, (expired)
- [95] B. Fenner, B. Haberman, H. Holbrook, I. Kouvelas, "Multicast Source Notification of Interest Protocol (MSNIP)", IETF Internet Draft, draft-ietf-magma-msnip-05.txt, March 2004, (expired)
- [96] T. Schmidt, M. Waehlich, "A First Performance Analysis of the Tree Morphing Approach to IPv6 Source Mobility in Source Specific Multicast Routing", in proc. of the Fifth International Conference on Networking (ICN 2006), April 2006

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΡΟΣΚΟΠΤΩΝ ΔΙΑΠΟΜΠΩΝ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ – Το Πρωτοκολλο M- FMIPv6/FTB

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σχεδίαση και η λειτουργία του προτεινόμενου από τη διατριβή μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Ο μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα σε κινητά τερματικά να εκτελούν ταχείς και με μικρές απώλειες διαπομπές στρώματος δικτύου, ελαχιστοποιώντας την επίδραση που έχουν αυτές στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών πολυεκπομπής. Βασικά χαρακτηριστικά του μηχανισμού αποτελούν η δυνατότητα προώθησης των πακέτων ανά ροή πληροφορίας πολυεκπομπής, κατ' απαίτηση του χρήστη και με βάση τη διαθεσιμότητά τους στο νέο δίκτυο, στο οποίο διαπέμπεται το κινητό. Επίσης προσφέρεται η δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των πακέτων κατά τη διάρκεια της περιόδου στην οποία το κινητό δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί με τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης, λόγω της εκτέλεσης των υποστηρικτικών διεργασιών στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Το κεφάλαιο αναλύονται όλα τα στοιχεία που αφορούν στην υλοποίηση του μηχανισμού και περιγράφονται όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν στην επίδοσή του. Επιπλέον αναλύονται τρόποι με τους οποίους είναι εφικτή η εκτέλεση πλήρως απρόσκοπτων διαπομπών δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε στοιχεία που δίνουν τη δυνατότητα περεταίρω βελτίωσης. Το κεφάλαιο κλείνει με μία παρουσίαση προτάσεων εφαρμογής του μηχανισμού σε σύγχρονα και μελλοντικά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες διαστάσεις του προβλήματος διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής [1], [2], κυρίως μέσα από τη λειτουργία ήδη προταθέντων λύσεων. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό αντικείμενο της διατριβής ως ένας νέος, εφάμιλλος με τους παραπάνω, μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Ο προτεινόμενος μηχανισμός τιτλοφορείται ως «*Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου για υποστήριξη Ταχέων Διαπομπών Πολυεκπομπής με χρήση μηχανισμών Προώθησης Ροών Πληροφορίας και Προσωρινής Αποθήκευσης Πακέτων*» (*Multicast Fast MIPv6 with Flow Tunneling and Buffering*, M-FMIPv6/FTB).

Ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι σε θέση να αντιμετωπίσει την πλειάδα των προβλημάτων που αναλύθηκαν στο τέλος της προηγούμενου κεφαλαίου, και να περιορίσει την επίδραση που έχει η εκτέλεση διαπομπών στην ποιότητα των εκτελούμενων στους κινητούς κόμβους εφαρμογών. Ο μηχανισμός ορίζεται σαν επέκταση του πρωτοκόλλου *Fast Handovers for Mobile IPv6* (FMIPv6), η λειτουργία του οποίου δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης ταχέων και απρόσκοπτων unicast διαπομπών (βλέπε ενότητα 2.3.3.4). Το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB έχει αρκετές ομοιότητες με τον μηχανισμό που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4.2.2.2 (M-FMIPv6), δεδομένου ότι αμφότεροι στηρίζονται στη λειτουργία του FMIPv6. Από την άλλη υπάρχουν πολλές διαφορές, οι οποίες υπερκεράζουν τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το M-FMIPv6 και ουσιαστικά βελτιστοποιούν τη χρήση του πρωτοκόλλου FMIPv6 για εφαρμογές και υπηρεσίες πολυεκπομπής. Βασικό πλεονέκτημα του M-FMIPv6/FTB αποτελεί το γεγονός ότι ορίζει ένα ενιαίο πλαίσιο διαχείρισης unicast και multicast κινητικότητας, στο οποίο η εκτέλεση FMIPv6 διαπομπών τοποθετείται πλησιέστερα στην αρχιτεκτονική IP Multicast (IPMA), και εντός του οποίου λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες και λεπτομέρειές της, προς όφελος των *πολλαπλών* τερματικών που αφορούν την εκάστοτε υπηρεσία πολυεκπομπής. Επιπλέον, όπως θα φανεί, παρέχεται η δυνατότητα εκτέλεσης «περισσότερο» *προ-δραστικών* διαπομπών πολυεκπομπής. Υπενθυμίζεται ότι με βάση το πρωτόκολλο M-FMIPv6, οι υποστηρικτικές δράσεις, εκτελούνται μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης (αντίστοιχα υιοθετώντας μία κατά κύριο λόγο *μετα-δραστική* προσέγγιση).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός, αφορά ως επί το πλείστον την κινητικότητα *παραληπτών* πολυεκπομπής. Το ζήτημα της κινητικότητας *πηγών* πολυεκπομπής προσεγγίζεται στα πλαίσια των εξελιγμένων μηχανισμών που αναλύθηκαν στην ενότητα 2.4.2.2.3 (Διαχείριση Κινητικότητας Πηγών Κίνησης Πολυεκπομπής) και 2.4.3.2.2 (Κινητικότητα πηγών κίνησης πολυεκπομπής). Ως εκ τούτου, με στόχο την πληρότητα της ανάλυσης, θα περιγραφούν οι δυνατότητες που ανακύπτουν από τη συνδυασμένη λειτουργία των μηχανισμών *MSSMSv6* και *tree morphing* (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.3) με τον μηχανισμό M-FMIPv6/FTB.

3.1 Το Περιβάλλον Εκτέλεσης Ταχέων Διαπομπών Πολυεκπομπής

Η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού M-FMIPv6/FTB θεωρείται στο γενικευμένο *περιβάλλον ταχέων διαπομπών* (*fast handovers environment*) που ορίζεται στα πλαίσια του πρωτοκόλλου FMIPv6 [3]. Όπως αναλύεται στα [3] και [4], το FMIPv6 προϋποθέτει τη λειτουργία τριών ανεξάρτητων βοηθητικών μηχανισμών, μέσω των οποίων ένας κινητός κόμβος

μπορεί, (α) να πραγματοποιεί έγκυρες προβλέψεις αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση διαπομπών, και (β) να αποκτά πληροφορίες στρώματος ζεύξης και δικτύου για τα δίκτυα στα οποία έχει τη δυνατότητα να διαπεμφθεί. Ιδιαίτερα για τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής, θεωρείται το *περιβάλλον εκτέλεσης ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής*, το οποίο απαρτίζεται από δρομολογητές πρόσβασης (ARs) των δικτύων στα οποία μπορεί να προσδεθεί ένας κινητός κόμβος. Οι συγκεκριμένοι ARs έχουν επιπλέον τη δυνατότητα να προωθούν πακέτα πολυεκπομπής προς τα ασύρματα δίκτυα που εξυπηρετούν, όπως ορίζει η αρχιτεκτονική IP Multicast, και να συμμετέχουν άμεσα σε δένδρα διανομής κίνησης με χρήση κάποιου πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολυεκπομπής αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι δρομολογητές έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες που αφορούν στην περιγραφή των δυνατοτήτων τους αναφορικά με την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής. Οι εν λόγω πληροφορίες κοινοποιούνται στους τερματικούς κόμβους με στόχο την καλύτερη και έγκαιρη διαχείριση των επικείμενων διαπομπών τους. Η δυνατότητα αυτή καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες ένας κινητός κόμβος προτίθεται να διαπεμφθεί σε ένα δίκτυο στο οποίο, για διάφορους λόγους, η εκτέλεση υπηρεσιών πολυεκπομπής δεν υποστηρίζεται όπως στο τρέχον δίκτυό του (πχ. δεν υποστηρίζεται η παροχή SSM υπηρεσιών πολυεκπομπής, ή η υπηρεσία είναι εκτός εμβέλειας – out of scope). Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η ανάληψη εναλλακτικών δράσεων για την διατήρηση της συνόδου (πχ. επιλογή άλλου δικτύου). Στη συνέχεια περιγράφεται το θεωρούμενο περιβάλλον ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής, το οποίο συντίθεται από μία σειρά μηχανισμών και διαδικασιών που εκτελούνται στο τερματικό και τους διάφορους κόμβους του δικτύου και έχουν ως στόχο την προετοιμασία της διαπομπής του τερματικού. Ακολούθως παρουσιάζεται λεπτομερώς η προδιαγραφή του προτεινόμενου μηχανισμού ως βασικού αντικειμένου της διατριβής και αναλύονται όλα τα βασικά και προηγμένα χαρακτηριστικά της και τρόποι εφαρμογής του σε σύγχρονα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών.

3.1.1 Ανακάλυψη Νέου Σημείου & Νέου Δρομολογητή Πρόσβασης (AP & AR Discovery)

Το βασικό κομμάτι της διαδικασίας προετοιμασίας μίας διαπομπής είναι η διαδικασία προσδιορισμού του δικτύου στο οποίο ένας κινητός κόμβος κατευθύνεται λίγο πριν την εκτέλεση της διαπομπής. Στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι διαδικασίες που αφορούν στην «ανακάλυψη» του νέου δικτύου δηλαδή των πληροφοριών που το ταυτοποιούν. Δεδομένης της ανεξαρτησίας των μηχανισμών που εκτελούνται στα διάφορα στρώματα δικτύωσης, η προετοιμασία μίας διαπομπής περιλαμβάνει την εκτέλεση αυτόνομων μηχανισμών γι' αυτό το σκοπό, στα στρώματα ζεύξης δεδομένων και δικτύου (2 και 3 αντίστοιχα), που περιγράφονται στη συνέχεια.

Κατά την προετοιμασία μίας επικείμενης διαπομπής, αρχικά συλλέγονται μετρήσεις φυσικών μεγεθών από την πλευρά του στρώματος ζεύξης ενός κινητού κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτή η *αποτίμηση* του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο αυτός κινείται και για το οποίο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη σχετικά με μία μελλοντική διαπομπή.

Επίσης ο κινητός κόμβος μπορεί να ελέγξει τη διαθεσιμότητα σημείων πρόσβασης (Access Points, APs) στη γεωγραφική περιοχή που κινείται αφού παρακολουθήσει την εκπομπή ειδικών γι' αυτό το σκοπό (με βάση τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης) μηνυμάτων. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός ονομάζεται *Ανακάλυψη (νέων) Σημείων Πρόσβασης* (new Access Point Discovery). Στη συνέχεια εκτελείται ο μηχανισμός *πρόβλεψης* διαπομπών, ο οποίος κατά βάση καταλήγει σε ένα επαρκούς βεβαιότητας συμπέρασμα, αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση μίας διαπομπής στο εγγύς μέλλον και το δίκτυο προς το οποίο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαπομπή. Εφόσον παγιωθεί η επιλογή του νέου δικτύου, απαιτείται η συνδρομή του στρώματος δικτύου για τον προσδιορισμό των αναγνωριστικών του για την προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου. Η διαδικασία αντίστοιχα ονομάζεται *Ανακάλυψη (νέου) Δρομολογητή Πρόσβασης* (new Access Router Discovery). Η διαδικασία πρόβλεψης δεν εκτελείται αποκλειστικά στο στρώμα ζεύξης. Αντίθετα ενδέχεται να πραγματοποιείται και στο στρώμα δικτύου, κατόπιν της *AP Discovery* και πριν της *AR Discovery*, οπότε λαμβάνονται υπόψη πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στο στρώμα δικτύου (πχ. AAA, καταμερισμός του φορτίου του δικτύου, χωρητικότητα, προσφερόμενες υπηρεσίες).

Στην πράξη η αποτίμηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος που εκτελεί η διαδικασία *AP Discovery* περιλαμβάνει εκτίμηση της ποιότητας ειδικών μηνυμάτων του στρώματος ζεύξης (beacons), που αποστέλλονται από τα σημεία πρόσβασης. Εν γένει στα περισσότερα συστήματα ασύρματης δικτύωσης, τέτοιου είδους μηνύματα διαχείρισης, αποστέλλονται περιοδικά από τους σταθμούς βάσης και χρησιμοποιούνται από τους τερματικούς σταθμούς που είναι συνδεδεμένοι στο εκάστοτε φυσικό υποδίκτυο. Τα συγκεκριμένα μηνύματα περιέχουν πληροφορίες διαχείρισης αναφορικά με το ασύρματο δίκτυο, όπως για παράδειγμα τη διεύθυνση του στρώματος δικτύου του σημείου πρόσβασης και το αναγνωριστικό του ευρύτερου δικτύου στο οποίο ανήκει το σημείο πρόσβασης (πχ. για ένα WLAN σύστημα IEEE 802.11 το SSID). Σε συνδυασμό με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων που μεταφέρουν τα παραπάνω μηνύματα, ένας κινητός κόμβος είναι σε θέση να δημιουργεί πίνακες αντιστοίχισης μέσω των οποίων μπορεί να «χαρτογραφεί» την ύπαρξη ασύρματων δικτύων στην περιοχή του.

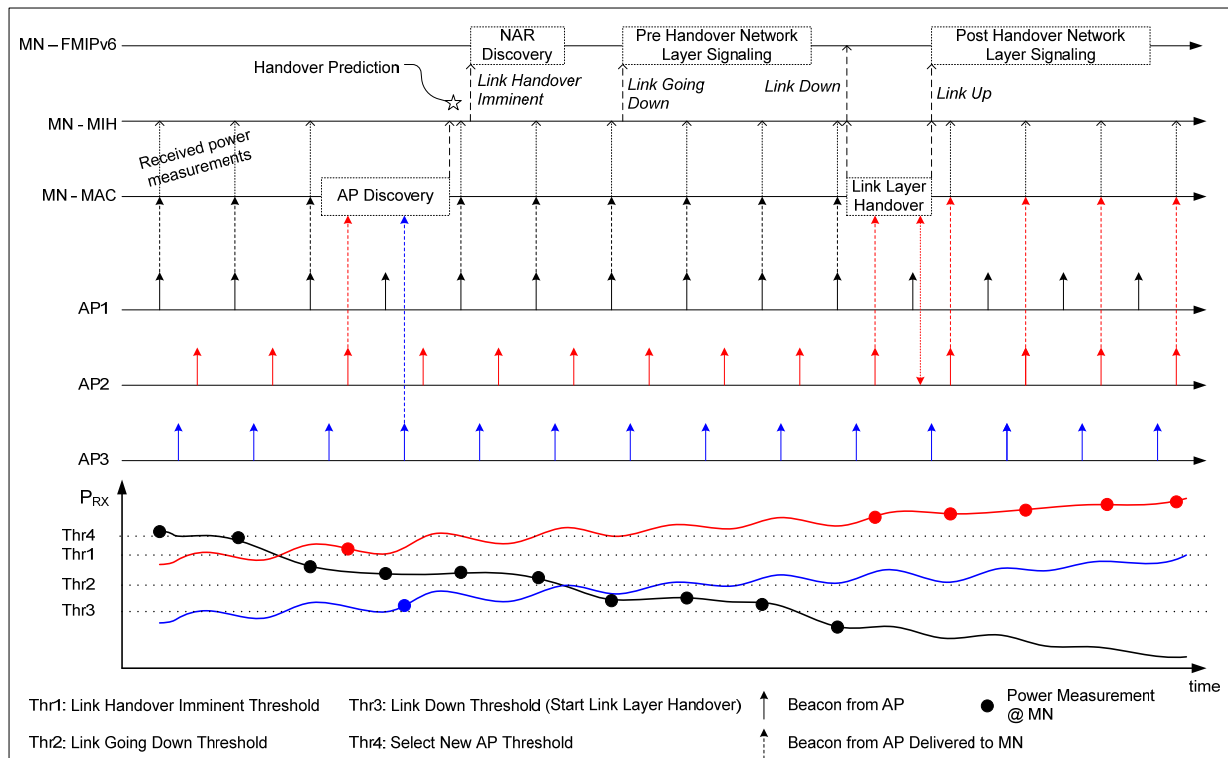
Η υλοποίηση του μηχανισμού *AP Discovery* από την πλευρά ενός κινητού κόμβου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα IEEE 802.11 ένας κινητός κόμβος είναι σε θέση να επεξεργάζεται τα beacons που εκπέμπονται στο κανάλι στο οποίο είναι συντονισμένος ο δέκτης του. Αυτό σημαίνει ότι για την αποτίμηση όλου του διαθέσιμου φάσματος κατά την εκτέλεση της διαδικασίας είναι υποχρεωμένος να συντονιστεί στα διαθέσιμα κανάλια και να αφουγκραστεί τη διαθεσιμότητα άλλων σταθμών βάσης σε καθένα από αυτά. Αυτό εντούτοις σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί με τον τρέχοντα σταθμό βάσης δηλαδή η επικοινωνία του διακόπτεται για ένα διάστημα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τεχνολογίες macro-diversity μέσω των οποίων ένας τερματικός κόμβος είναι σε θέση να επικοινωνεί με περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς (UMTS), η διακοπή της επικοινωνίας είναι δυνατό να αποφευχθεί. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφοροι μηχανισμοί που μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης που μπορεί να έχει η εκτέλεση της διαδικασίας *AP Discovery* στο επίπεδο της προσφερόμενης υπηρεσίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η χρήση δύο φυσικών διεπαφών στρώματος ζεύξης δεδομένων από την πλευρά του κινητού κόμβου, η μία από τις οποίες χρησιμεύει για την αποτίμηση του περιβάλλοντος και η δεύτερη για την επικοινωνία (όλη η κίνηση ανώτερων στρωμάτων μεταφέρεται από την τελευταία). Εναλλακτικές μέθοδοι προτείνουν την αντιστροφή της παραπάνω διαδικασίας μέσω της εκπομπής μηνυμάτων από την πλευρά των κινητών και τη συγκέντρωση των μετρήσεων στην πλευρά του δικτύου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει στην εξάλειψη της περιόδου κατά την οποία ένας κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί εφόσον οι σταθμοί βάσης είναι σε θέση να λαμβάνουν τα εκπεμπόμενα μηνύματα από τα κινητά (δηλ. έχουν δέκτες που σαρώνουν όλο το φάσμα) [5]. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο δυνατότητες: (α) οι σταθμοί βάσης επεξεργάζονται τις μετρήσεις και πραγματοποιούν την πρόβλεψη και (β) οι μετρήσεις επιστρέφονται μέσω κάποιου καταλλήλου για αυτό το σκοπό πρωτοκόλλου ώστε να επεξεργαστούν από τον κινητό κόμβο ο οποίος θα έχει ουσιαστικά και την ευθύνη της πρόβλεψης.

Το αποτέλεσμα της εκτέλεσης της διαδικασίας *AP Discovery* στη γενική περίπτωση είναι η δημιουργία μίας λίστας με τα γειτονικά σημεία πρόσβασης ενός κινητού κόμβου. Ανάλογα με την υλοποίηση του μηχανισμού πρόβλεψης, ο μηχανισμός μπορεί να περιλαμβάνει και την πραγματοποίηση της πρόβλεψης αναφορικά με το προς ποιο από τα περιεχόμενα στη λίστα APs θα πραγματοποιηθεί η επικείμενη διαπομπή του κινητού. Όπως και να έχει πάντως το αποτέλεσμα της οδηγείται σαν είσοδος στο μηχανισμό *AR Discovery*, από το οποίο θα αποκομισθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για την προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου. Ο σκανδαλισμός της διαδικασίας είναι ελεγχόμενος από πολλές παραμέτρους οι οποίες σχετίζονται με την ποιότητα της τρέχουσας σύνδεσης (δηλαδή οι διαδικασίες δεν εκτελούνται σειριακά, το πέρας της μίας δεν σκανδαλίζει την έναρξη της επόμενης). Στη γενική περίπτωση η βασική λειτουργικότητα του μηχανισμού *AR Discovery* περιλαμβάνει την συγκέντρωση πληροφοριών αναφορικά με την ταυτοποίηση των υποψηφίων δικτύων στα οποία ενδέχεται να διαπεμφθεί ένας κινητός κόμβος. Οι πληροφορίες συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα μέσω του οποίου αντιστοιχίζονται τα αναγνωριστικά επιπέδου στρώματος ζεύξης με αυτά του στρώματος δικτύου. Η διαδικασία *AR Discovery* περιλαμβάνει ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας επιπέδου δικτύου, μεταξύ του κινητού κόμβου και του δρομολογητή πρόσβασης που το εξυπηρετεί στο προηγούμενο της διαπομπής του δίκτυο. Για παράδειγμα στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών που ορίζει το πρωτόκολλο FMIPv6, η διαδικασία υλοποιείται μέσω της διαδικασίας *Proxy Router Discovery*, που υλοποιείται με την ανταλλαγή των μηνυμάτων (RtSolPr και PrRtAdv, βλέπε ενότητα 2.3.3.4).

Το Σχήμα 3 - 1 παρουσιάζει το χρονισμό των διαδικασιών που αναλύθηκαν μόλις και αφορούν το *περιβάλλον ταχέων διαπομπών*, στο οποίο θεωρείται η λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά περίπτωση που αντιστοιχεί στη λειτουργία ενός συστήματος WLAN που λειτουργεί σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11. Επίσης έχει θεωρηθεί η χρήση του μηχανισμού που προδιαγράφει το πρωτόκολλο MIH

για το ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης, για την παράδοση trigger (βλέπε ακόλουθη ενότητα). Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια η συνολική διαδικασία επιδέχεται βελτιστοποιήσεις σε πολλά σημεία (βλέπε ενότητα 3.5).



Σχήμα 3 - 1. Χρονική αλληλουχία διαδικασιών υποστήριξης διαπομπών στο Περιβάλλον Ταχέων Διαπομπών

3.1.2 Μηχανισμός Πρόβλεψης Διαπομπών

Η διαδικασία *πρόβλεψης* μιας διαπομπής είναι μία εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία, που εξαρτάται από μία αλληλουχία γεγονότων και πληροφοριών που λαμβάνουν χώρα και καθίστανται διαθέσιμες αντίστοιχα, στο κινητό τερματικό και τους κόμβους του ασύρματου δικτύου. Στο *περιβάλλον εκτέλεσης ταχέων διαπομπών*, μία πρόβλεψη περιλαμβάνει εκτός από τη βασική ένδειξη ότι *επικείμεται* η εκτέλεση της διαπομπής στο εγγύς μέλλον, επιπλέον την πληροφορία που αφορά το *δίκτυο* προς το οποίο θα εκτελεστεί η διαπομπή. Στην ιδανική περίπτωση μία πρόβλεψη μπορεί να συμπεριλάβει πληροφορία αναφορικά και με το *χρονικό σημείο* στο οποίο *αναμένεται* η εκτέλεση της διαπομπής. Οι σύγχρονοι μηχανισμοί πρόβλεψης εντούτοις, δεν υποστηρίζουν την τελευταία δυνατότητα. Από την μεριά της υλοποίησης ενός μηχανισμού διενέργειας προβλέψεων διαπομπών, απαιτείται η χρήση δύο ανεξάρτητων υπο-μηχανισμών: ενός μηχανισμού *παρακολούθησης* (monitoring) της ποιότητας των εγκατεστημένων ζεύξεων η οποία είναι συνυφασμένη στην πράξη με τη λειτουργία του μηχανισμού *AP Discovery*, κι ενός μηχανισμού *εκτέλεσης* (πραγματοποίησης) της *πρόβλεψης*. Ο πρώτος είναι επιφορτισμένος με το καθήκον να παρακολουθεί την ποιότητα των εγκατεστημένων ζεύξεων, ή τη μεταβολή της ποιότητάς τους, και στην περίπτωση ικανοποίησης συγκεκριμένων κριτηρίων, να σκανδαλίζει την εκκίνηση του δεύτερου. Ο τελευταίος *αποτιμά* λεπτομερώς το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον στο

οποίο βρίσκεται ο κινητός κόμβος και καταλήγει σε ένα σαφές συμπέρασμα αναφορικά με το (α) κατά πόσο είναι πιθανή η εκτέλεση μίας διαπομπής στο εγγύς μέλλον και (β) προς ποιο ασύρματο δίκτυο αναμένεται η πρόσδεση του κινητού κόμβου στο άμεσο μέλλον. Θα πρέπει να σημειωθεί πως αμφότερες οι διαδικασίες εκτελούνται σε ένα μικρό χρονικά διάστημα, της τάξης μερικών εκατοντάδων msec για την περίπτωση ενός τυπικού IEEE 802.11 WLAN

Ο αλγόριθμος που υλοποιεί ο μηχανισμός *πρόβλεψης* μίας διαπομπής είναι *άρρηκτα* συνδεδεμένος με τον αλγόριθμο μέσω του οποίου αποφασίζεται η εκτέλεση των διαπομπών στρώματος ζεύξης δεδομένων. Ουσιαστικά βασικός σκοπός του μηχανισμού πρόβλεψης είναι ο προσδιορισμός του δικτύου το οποίο θα επιλέξει ο αλγόριθμος εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης στην επικείμενη διαπομπή. Για να καταστεί αυτό δυνατό στις περισσότερες περιπτώσεις ο αλγόριθμος πρόβλεψης υλοποιεί τον αλγόριθμο απόφασης διαπομπής θέτοντας όμως ως είσοδο μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη στιγμή εκτέλεσής του (του αλγορίθμου πρόβλεψης). Κατά συνέπεια η λειτουργία του εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα σχετικής πληροφορίας στρώματος ζεύξης. Για παράδειγμα, ένας τυπικός αλγόριθμος εκτέλεσης διαπομπών σε ένα σύστημα WLAN IEEE 802.11 [6], συνήθως επιλέγει μία νέα σύνδεση με ένα τυχαίο τρόπο που σχετίζεται με το κανάλι στο οποίο ο κινητός κόμβος αναζητά ένα σταθμό βάσης. Εν γένει ο κινητός κόμβος συντονίζει τον πομποδέκτη του σε μία συχνότητα και *αφουγκράζεται* το ασύρματο μέσο για ένα χρονικό διάστημα ώστε να διαπιστώσει την εκπομπή μηνυμάτων (beacons) από ένα σταθμό βάσης. Αν λάβει κάποιο μήνυμα από ένα σταθμό βάσης εντός ενός προκαθορισμένου διαστήματος κι εφόσον ικανοποιούνται τα κριτήρια ποιότητας, προχωρά στην εγκατάσταση μίας νέας ζεύξης (αφού ολοκληρώσει μια σειρά από σχετικές διαδικασίες). Στην αρνητική περίπτωση συντονίζεται στο επόμενο κανάλι. Με αυτόν τον τρόπο διατρέχεται όλο το διαθέσιμο φάσμα κυκλικά, μέχρις ότου βρεθεί κάποιος σταθμός βάσης στην περιοχή του κινητού με τον οποίο είναι εφικτή η εγκατάσταση μίας ζεύξης ικανοποιητικής ποιότητας. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων, με αρκετά τυχαία χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η ποιότητα της ζεύξης, το περιβάλλον διάδοσης και τις παρεμβολές από γειτονικούς σταθμούς βάσης. Ένας αλγόριθμος πρόβλεψης για το παραπάνω σύστημα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του όλες τις παραμέτρους, ώστε να καταλήγει με ικανοποιητική βεβαιότητα σε σωστές προβλέψεις. Ένας τρόπος για να πραγματοποιηθεί αυτό, είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου επιλογής νέου σταθμού βάσης. Αυτό απαιτεί τη χρήση μετρήσεων ποιότητας του καναλιού αντίστοιχες με αυτών που θα λάβει υπόψη του ο αλγόριθμος *εκτέλεσης της διαπομπής*. Το τελευταίο είναι εξαιρετικά δύσκολο εφόσον ο μηχανισμός πρόβλεψης αποτιμά ένα «σχεδόν όμοιο» περιβάλλον με αυτό το οποίο θα αποτιμήσει ο μηχανισμός εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης κι όχι ένα «ακριβώς ίδιο» περιβάλλον. Ως εκ τούτου η πιθανότητα πραγματοποίησης ορθής πρόβλεψης μειώνεται.

Αναφορικά με το χρονισμό της εκτέλεσης της διαδικασίας πρόβλεψης σε σχέση με αυτή της εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης, θα πρέπει να σημειωθούν τα ακόλουθα: αν η εκτέλεση της πρόβλεψης πραγματοποιηθεί αρκετά νωρίτερα από την εκτέλεση της διαπομπής, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η πρόβλεψη να είναι λανθασμένη, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος πρόβλεψης θα έχει αποτιμήσει ένα εντελώς διαφορετικό περιβάλλον από αυτό στο οποίο θα

βρεθεί το κινητό κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής. Από την άλλη, αν η διαδικασία πρόβλεψης σκανδαλιστεί αργά/καθυστερημένα, σε σχέση με την εκτέλεση της διαπομπής, είναι πιθανό είτε να μην επιτραπεί η ολοκλήρωσή της ή ακόμη χειρότερα τα αποτελέσματά της να μην χρησιμοποιηθούν από τους μηχανισμούς του στρώματος δικτύου κατά την εκτέλεση μίας *προδραστικής* διαπομπής που είναι και το ζητούμενο. Κατά συνέπεια η επιλογή των κατωφλίων, που προδιαγράφουν τα όρια σκανδαλισμού για τη λειτουργία του υπο-μηχανισμού *παρακολούθησης* και καθορίζουν το συγχρονισμό με την λειτουργία των υπολοίπων μηχανισμών, είναι αρκετά σημαντική και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα του μηχανισμού *πρόβλεψης* και γενικά του μηχανισμού *προετοιμασίας* μίας διαπομπής.

Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι ο χαρακτηρισμός της ποιότητας των ασύρματων ζεύξεων στην πλειονότητα των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών πραγματοποιείται μέσω αποτίμησης φυσικών μεγεθών όπως η τιμή της λαμβανόμενης ισχύος (P_{RX}) ή του σηματοθορυβικού λόγου (Signal to Noise Ratio, SNR) ή του λόγου ισχύος σήματος προς την ισχύ των παρεμβολών (Signal to Interference Ratio, SIR). Αντίστοιχο μέγεθος είναι και ο ρυθμός μεταδιδόμενων λανθασμένων bits μέσω του οποίου υπολογίζονται οι παραπάνω λόγοι. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί αλγόριθμοι οι οποίοι στηρίζονται και σε άλλα μεγέθη όπως η ταχύτητα του κινητού, το φορτίο του δικτύου και η ποιότητα των προσφερόμενων από αυτό υπηρεσιών (πχ. ρυθμός απόρριψης εισερχομένων κλήσεων), ο χρόνος στον οποίο ένας κόμβος είναι συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο, ή η απόσταση ενός κινητού κόμβου από τους σταθμούς βάσης. Αυτοί οι αλγόριθμοι θεωρούνται εκτός του αντικειμένου της διατριβής. Για την ανάλυση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, σε όλη την έκταση της διατριβής έχει θεωρηθεί ο απλούστερος δυνατός μηχανισμός για την πρόβλεψη και την εκτέλεση διαπομπών στρώματος ζεύξης δεδομένων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του αποκλειστικά την ισχύ των λαμβανόμενων ηλεκτρομαγνητικών σημάτων (βλέπε 4^ο Κεφάλαιο, ενότητα 4.2.2).

3.1.3 Διεπαφή στρώματος Δικτύου και Ζεύξης Δεδομένων

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.2, ο οργανισμός IEEE έχει προχωρήσει τα τελευταία χρόνια, μέσω της προδιαγραφής του πρωτοκόλλου MIH (Media Independent Handovers), στη σχεδίαση ενός μηχανισμού ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων που αφορά στην προετοιμασία και εκτέλεση διαπομπών κινητών κόμβων. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς οι ροές πληροφορίας που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής*.

Στα πλαίσια της διατριβής, ο μηχανισμός πρόβλεψης διαπομπών θεωρείται ότι εκτελείται διαφανώς προς το στρώμα δικτύου και το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB. Επιπρόσθετα η διεπαφή μεταξύ τους υλοποιεί δύο ξεχωριστές κλήσεις/triggers (που αφορούν αντίστοιχα την παράδοση των γεγονότων/events από το MIH στο M-FMIPv6/FTB, βλέπε 2.3.2): το *Link Handoff Imminent* (ή αλλιώς *Link Quality Crosses Threshold*) και το *Link Going Down*. Πιο αναλυτικά, το πρώτο παραδίδεται όταν ο μηχανισμός πρόβλεψης καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ποιότητα της εγκατεστημένης σύνδεσης χειροτερεύει οπότε υπάρχει αυξημένη πιθανότητα για την εκτέλεση μίας διαπομπής στο εγγύς μέλλον. Η συγκεκριμένη διαπίστωση δικαιολογεί την έναρξη μίας

διαδικασίας προετοιμασίας μέσω της οποίας ο κινητός κόμβος θα μπορέσει να συλλέξει απαιτούμενες πληροφορίες στρώματος ζεύξης. Το δεύτερο trigger, αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η ποιότητα της σύνδεσης έχει χειροτερέψει σε τέτοιο βαθμό ώστε η εκτέλεση μίας διαπομπής να θεωρείται σχεδόν βέβαιη εντός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος. Η παράδοση του συγκεκριμένου γεγονότος μεταφράζεται ως η απαραίτητη ένδειξη ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία προ-δραστικής υποστήριξης της επικείμενης διαπομπής και έχει διπλή σημασία για τον κινητό κόμβο· αφενός επιβεβαιώνεται με μεγάλη βεβαιότητα το γεγονός ότι επίκειται η εκτέλεση μίας διαπομπής στο εγγύς μέλλον και αφ' ετέρου κοινοποιείται το αποτέλεσμα του μηχανισμού πρόβλεψης, αναφορικά με το δίκτυο προς το οποίο πρόκειται να συνδεθεί ο κινητός κόμβος μετά τη διαπομπή του. Η διεπαφή στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων ορίζει και δύο επιπρόσθετα triggers μέσω των οποίων το στρώμα δικτύου ενημερώνεται αναφορικά με την εκκίνηση και την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης (αντίστοιχα *Link Down* και *Link Up*). Με αυτόν τον τρόπο το στρώμα δικτύου ενημερώνεται για την κατάσταση του στρώματος ζεύξης δεδομένων και τη δυνατότητά του να αποστέλλει ή να λαμβάνει πλαίσια κίνησης (οπότε για παράδειγμα μπορεί να τεθεί σε λειτουργία ένας μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης εξερχόμενων πακέτων στο διάστημα που μεσολαβεί). Η παράδοση των εν λόγω trigger απεικονίζεται στο Σχήμα 3 - 1.

3.2 Στόχοι Σχεδίασης & Μεθοδολογική Προσέγγιση για τη Διαχείριση Κινητικότητας Πολυεκπομπής

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι κυριότερες αιτίες που οδηγούν στη χειροτέρευση της ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διαπομπών πολυεκπομπής αποτελούν: (α) η καθυστέρηση σύγκλισης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής (που προκαλεί την καθυστέρηση *άμεσης* ανακατασκευής των δένδρων διανομής και συνεπώς την αδυναμία *άμεσης* και έγκαιρης παράδοσης των πακέτων κίνησης προς τα μέλη των ομάδων πολυεκπομπής αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων), (β) η καθυστέρηση που προκαλείται κατά την εκτέλεση των βασικών IPv6 διαδικασιών, όπως *Αναζήτησης Δρομολογητή*, *Επισήμανσης Μετακίνησης* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, (γ) η αδυναμία επικοινωνίας κατά την διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων και τέλος (δ) η σύγκλιση διόδων IP (*IP tunnel convergence*) όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Οικείων Συμμετοχών* του MIPv6. Σε αυτό το πλαίσιο, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB έχει ως βασικό στόχο την αντιμετώπιση του συνόλου των προβλημάτων που παρουσιάζει η λειτουργία τόσο του πρωτοκόλλου MIPv6 όσο και αυτή του M-FMIPv6.

Πιο συγκεκριμένα, το M-FMIPv6/FTB αντιμετωπίζει το βασικό πρόβλημα της κινητικότητας πολυεκπομπής ακολουθώντας την προσέγγιση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*· κατά βάση, κάθε τερματικός κόμβος θεωρείται ότι είναι σε θέση να αιτηθεί την επέκταση του δένδρου διανομής προς τη εκάστοτε θέση του δικτύου στην οποία είναι προσδεμένος ή επίκειται να διαπεμφθεί στο εγγύς μέλλον. Ως εκ τούτου δε δημιουργούνται προβλήματα κακής

διαχείρισης δικτυακών πόρων, εφόσον αποφεύγεται η χρήση διόδων IP στη μόνιμη κατάσταση²³. Με στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας πακέτων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των χρονοβόρων διαδικασιών συμμετοχής στο δένδρο διανομής από το νέο δίκτυο και της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, προτείνεται η χρήση ενός αυτόνομου μηχανισμού προώθησης της/των κατάλληλης/ων ροής/ών κίνησης πολυεκπομπής από το παλαιό δίκτυο, αποκλειστικά για τις ροές κίνησης πολυεκπομπής που αφορούν τον διαπεμπόμενο χρήστη. Η λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού έχει σαν αποτέλεσμα την προώθηση των πακέτων κίνησης προς το νέο σημείο πρόσβασης και εάν είναι αναγκαίο την προσωρινή αποθήκευσή τους σε αυτό, και μέχρις ότου ολοκληρωθούν οι διαδικασίες του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 στο οποίο στηρίζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός αποτελεί τη βάση για την αντιμετώπιση των γενικών προβλημάτων κινητικότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω (*Επισήμανση Μετακίνησης, Ρύθμιση Διεύθυνσης, προ-δραστική εκτέλεση υποστηρικτικών διαδικασιών*). Η ακόλουθη λίστα προσδιορίζει λεπτομερώς τους στόχους σχεδίασης που καλύπτει το M-FMIPv6/FTB, ειδικά για την εκτέλεση *απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής*:

1. Με στόχο τη μείωση της επίδρασης της καθυστέρησης επέκτασης του δένδρου διανομής στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας, η εκκίνηση της διαδικασίας επέκτασης θα πρέπει να σκανδαλίζεται το συντομότερο δυνατό. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία συμμετοχής στο δένδρο θα πρέπει να ξεκινά μόλις υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση της διαπομπής ενός κινητού κόμβου σε ένα νέο (υπο-)δίκτυο. Το καταλληλότερο τοπολογικό σημείο από το οποίο θα πρέπει να εκκινεί η σχετική διαδικασία σηματοδότησης είναι ο νέος δρομολογητής πρόσβασης (New Access Router, NAR), ο οποίος στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική παίζει επίσης και το ρόλο του εντεταλμένου δρομολογητή πολυεκπομπής²⁴. Για την υλοποίηση της διαδικασίας συμμετοχής στο δένδρο διανομής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κλασικοί μηχανισμοί των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής (δηλ. δεν απαιτείται καμία τροποποίηση στα υπάρχοντα πρωτόκολλα και μηχανισμούς της αρχιτεκτονικής IP Multicast).
2. Με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης της απώλειας πακέτων λόγω της εκτέλεσης της διαπομπής πολυεκπομπής (δηλ. της διαπομπής στρώματος δικτύου), απαιτείται η χρήση ενός μηχανισμού μέσω του οποίου θα πραγματοποιείται προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής προς το νέο σημείο πρόσβασης. Η υλοποίηση του μηχανισμού προώθησης πραγματοποιείται με χρήση του βασικού IPv6 μηχανισμού ενθυλάκωσης πακέτων πολυεκπομπής, σε IP unicast πακέτα (δηλ. διόδων IP, IP tunneling). Το καταλληλότερο σημείο από το οποίο μπορεί να ξεκινά η προώθηση των πακέτων είναι το προηγούμενο σημείο πρόσβασής του κινητού. Το σημείο αυτό παίζει επίσης το ρόλο του προηγούμενου της διαπομπής εντεταλμένου δρομολογητή πολυεκπομπής (MDR), σε αντίθεση με την χρήση των κόμβων Home Agent ή M-MAP όταν χρησιμοποιείται το MIPv6 ή M-HMIPv6 αντίστοιχα. Ο συγκεκριμένος

²³ Ο όρος *μόνιμη κατάσταση* αντιστοιχεί στην φάση κατά την οποία έχει ολοκληρωθεί η διαπομπή στρώματος δικτύου στο νέο δίκτυο οπότε και έχει ξεκινήσει η παράδοση των πακέτων πολυεκπομπής σε αυτό, όπως ακριβώς προβλέπει ο χρησιμοποιούμενος μηχανισμός.

²⁴ Για την υποστήριξη κινητικότητας πολυεκπομπής παραληπτών, ο εκάστοτε *Δρομολογητής Πρόσβασης* (Access Router, AR), μέσω του οποίου ένας τερματικός κόμβος αποκτά πρόσβαση στο Διαδίκτυο, παίζει επίσης το ρόλο του *Εντεταλμένου Δρομολογητή Πρόσβασης* (Multicast Designated Router, MDR) που ορίζεται στη γενικευμένη Αρχιτεκτονική Πολυεκπομπής Διαδικτύου (IP Multicast Architecture).

δρομολογητής είναι το μόνο γνωστό σημείο στο οποίο ήδη καταλήγει η επιθυμητή ροή πολυεκπομπής και από την οποία μπορεί να ξεκινήσει η *δρομολόγησή* της, προς το νέο σημείο πρόσδεσης του κινητού τερματικού. Επίσης το συγκεκριμένο σημείο θεωρείται ως καταλληλότερο, εφόσον ουσιαστικά προσφέρει την υπηρεσία κινητικότητας στο εκάστοτε κινητό. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται η ανάγκη επέκτασης της αρχιτεκτονικής του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας με επιπλέον λειτουργικές οντότητες.

3. Με στόχο την ελαχιστοποίηση του επιπρόσθετου κόστους και της επιπρόσθετης κατανάλωσης δικτυακών πόρων για την υποστήριξη της διαπομπής, η διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας προώθησης κίνησης θα πρέπει να είναι ελεγχόμενη χρονικά. Με άλλα λόγια η διαδικασία θα πρέπει να εκτελείται ταχύτατα κι εντός ενός μικρού και προβλεπόμενου χρονικού διαστήματος. Ιδανικά η συγκεκριμένη διαδικασία θα πρέπει να διαρκεί όσο χρόνο απαιτείται για την ολοκλήρωση της επέκτασης του δένδρου διανομής προς το νέο σημείο πρόσβασης.
4. Με στόχο την ελαχιστοποίηση των πόρων που καταναλώνονται κατά τη φάση υποστήριξης της διαπομπής και δεδομένου ότι ο χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, η εκτέλεση της διαδικασίας προώθησης θα πρέπει να πραγματοποιείται μόνο εφόσον το νέο σημείο πρόσβασης δεν είναι μέλος του δένδρου διανομής (το πρωτόκολλο M-FMIPv6 απαιτεί τη λειτουργία ενός ξεχωριστού μηχανισμού για αυτό το σκοπό, βλέπε ενότητα 2.4.2.2.2).
5. Με στόχο την υλοποίηση της κατ' απαίτηση προώθησης κίνησης πολυεκπομπής από το προηγούμενο της διαπομπής σημείο πρόσβασής της με χρήση της υπάρχουσας υποδομής υλικού και λογισμικού, ο νέος δρομολογητής πρόσβασης θα πρέπει να λειτουργεί με ένα συμβατό ως προς τη λειτουργία των πρωτοκόλλων *ελέγχου συμμετοχής* (MLD για συστήματα βασισμένα στο IPv6) τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι για τον έλεγχο των προωθούμενων ροών κίνησης (ανεξάρτητα από το αν πρόκειται για ASM και SSM εφαρμογές) θα πρέπει να γίνονται απόλυτα σεβαστοί οι περιορισμοί που τίθενται από το πρωτόκολλο MLD (έκδοση 1 και 2 αντίστοιχα). Με αυτόν τον τρόπο θα προωθούνται μόνο οι ροές κίνησης για τις οποίες ο νέος δρομολογητής πρόσβασης δεν είναι μέλος του δένδρου διανομής κίνησης.
6. Ο νέος δρομολογητής πρόσβασης θα πρέπει να διατηρεί το ρόλο του ως *Εντεταλμένος Δρομολογητής Πολυεκπομπής* εκτός από τη *μόνιμη κατάσταση* αλλά και κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της διαπομπής καθ' αυτής. Με αυτόν τον τρόπο ο νέος δρομολογητής πρόσβασης μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερα του ενός κινητά τερματικά με τρόπο συμβατό με την αρχιτεκτονική IP Multicast. Ο συγκεκριμένος στόχος αφορά την εκτέλεση διαπομπών από πολλά κινητά προς το ίδιο δίκτυο και εξαλείφει φαινόμενα σύγκλισης διόδων κατά τη φάση εκτέλεσης ομαδικών διαπομπών (δηλ. ταυτόχρονων διαπομπών πολλών τερματικών προς τον ίδιο δρομολογητή).
7. Με στόχο επίσης την αποφυγή κάθε είδους προβλήματος που σχετίζεται με τη *σύγκλιση* διόδων μεταξύ των δρομολογητών πρόσβασης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διαπομπών περισσότερων του ενός χρηστών, η προώθηση των πακέτων κίνησης θα πρέπει να πραγματοποιείται ανά ροή κίνησης και ανά ζευγάρι δρομολογητών πρόσβασης (πχ. όχι όπως

προτείνει το M-FMIPv6 μεταξύ του προηγούμενου δρομολογητή και του κινητού τερματικού). Για το λόγο αυτό ο εκάστοτε νέος δρομολογητής πρόσβασης είναι υποχρεωμένος να ελέγχει ποιες ροές καταφθάνουν σε αυτόν σαν μέρος της διαδικασίας προώθησης του μηχανισμού M-FMIPv6/FTB και ποιες σαν αποτέλεσμα της *Απομακρυσμένης Συμμετοχής* του στα δένδρα διανομής.

8. Με στόχο τη μείωση της απώλειας πακέτων κατά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης των πολυεκπεμπόμενων πακέτων στο φυσικό στρώμα για λογαριασμό του διαπεμπόμενου τερματικού. Το συγκεκριμένο ζήτημα αφορά *αποκλειστικά* την κινητικότητα καθενός κινητού κόμβου, κι όχι την ροή πολυεκπομπής. Ως εκ τούτου, ο συγκεκριμένος μηχανισμός θα πρέπει να πραγματοποιεί την αποθήκευση πακέτων *αποκλειστικά* για λογαριασμού του κινητού κόμβου που εκτελεί τη διαπομπή ώστε να μην επιβαρύνει τα υπόλοιπα μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής τα οποία πιθανότατα είναι συνδεδεμένα στο ίδιο φυσικό υποδίκτυο. Το καταλληλότερο σημείο στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεδομένων των περιορισμών ελέγχου και διαθεσιμότητας της κατάλληλης πληροφορίας είναι το στρώμα δικτύου του δρομολογητή πρόσβασης του δικτύου στο οποίο αναμένεται η πρόσδεση του κινητού κόμβου.

3.3 Το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB

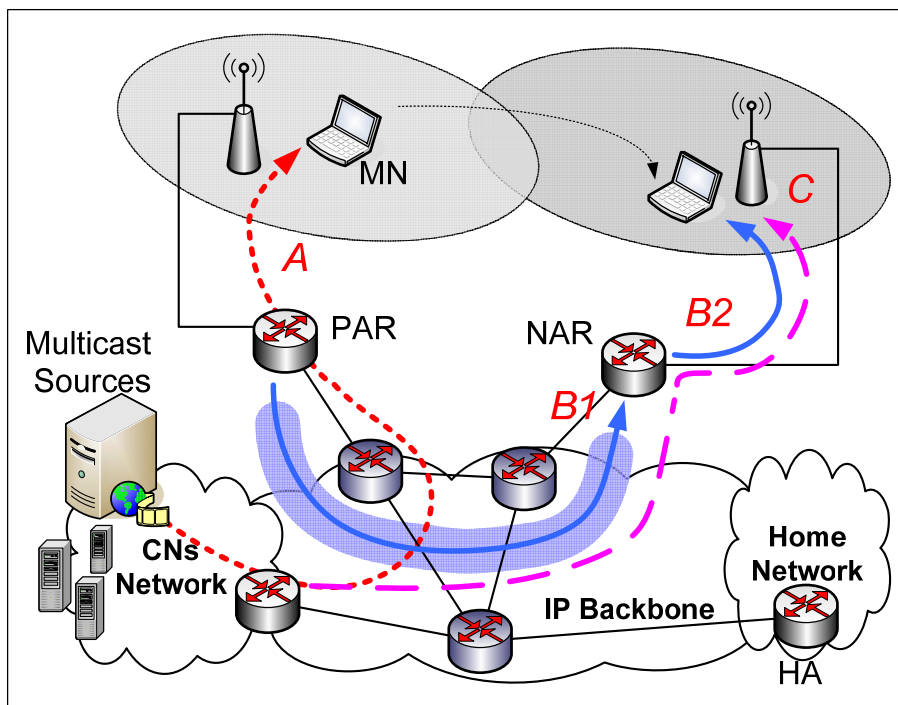
Στην συνέχεια αναλύεται η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, M-FMIPv6/FTB. Η προτεινόμενη λύση προσεγγίζεται μέσα από τη λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6, το οποίο εκτελείται κατανεμημένα τόσο στον διαπεμπόμενο κινητό κόμβο (Mobile Node, MN) όσο και στους δρομολογητές πρόσβασης (Access Routers, AR) μέσω των οποίων ο πρώτος αποκτά πρόσβαση στο Διαδίκτυο και τις υπηρεσίες πολυεκπομπής. Στα επόμενα, αναλύονται λεπτομερώς οι επεκτάσεις που εισάγει το M-FMIPv6/FTB στο επίπεδο σηματοδότησης καθώς και οι λεπτομέρειες που αφορούν στην υλοποίηση και εφαρμογή του σε ένα πραγματικό σύστημα.

3.3.1 Βασική λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB

Βασικός στόχος της λειτουργίας του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB είναι να υλοποιήσει ένα μηχανισμό ταχείας παράδοσης του ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής στη νέα θέση στην οποία αναμένεται η πρόσδεση ενός κινητού κόμβου, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σε πακέτα λόγω της εκτέλεσης της διαπομπής. Επίσης βασικό μέλημα αποτελεί και το γεγονός ότι η υποστήριξη της διαπομπής επιχειρείται με έναν σύγχρονο ως προς την κινητικότητα του χρήστη τρόπο, ενώ παράλληλα δεν καταστρατηγούνται οι αρχές του μοντέλου IP Multicast. Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν όλες οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα όταν χρησιμοποιείται το προτεινόμενο πρωτόκολλο.

Το Σχήμα 3 - 2 παρουσιάζει τη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα πολυεκπομπής που παραδίδονται σε έναν κινητό χρήστη που εκτελεί μία διαπομπή μεταξύ δύο διαφορετικών δικτύων, η οποία υποστηρίζεται από το M-FMIPv6/FTB. Όπως φαίνεται στο σχήμα, αρχικά (πριν

την εκτέλεση της διαπομπής) τα πακέτα παραδίδονται μέσω του μονοπατιού *A*, από την πηγή διαμέσου του τυπικού δρομολογητή πρόσβασης (προηγούμενου της διαπομπής, *PAR*). Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του φαινομένου της διαπομπής, τα πακέτα πολυεκπομπής ακολουθούν τη διαδρομή *B*, οπότε ανακατευθύνονται από το παλιό προς το νέο δίκτυο. Το μονοπάτι *B* αποτελείται από δύο κομμάτια: το πρώτο (*B1*) υλοποιείται μέσω μίας αμφίδρομης unicast διόδου IP που εγκαθίσταται μεταξύ των δρομολογητών πρόσβασης του παλαιού και του νέου δικτύου (*PAR* και *NAR*). Η κομμάτι *B2* αφορά την προώθηση των πακέτων στο νέο τοπικό δίκτυο στο οποίο προσδέθηκε ο κινητός κόμβος. Σε αυτό τα πακέτα προωθούνται κανονικά, όχι ενθυλακωμένα. Στην τελική φάση (νέα μόνιμη κατάσταση), η παράδοση των πακέτων ακολουθεί το βέλτιστο μονοπάτι προς τον διαπεμφθέντα κόμβο, οπότε τα πακέτα πολυεκπομπής ακολουθούν τη διαδρομή *C*. Σε αυτή τη φάση αναστέλλεται η διαδικασία προώθησης μέσω της διαδρομής *B*.



Σχήμα 3 - 2. Διαδικασία παράδοσης πακέτων πολυεκπομπής κατά τη λειτουργία του M-FMIPv6/FTB

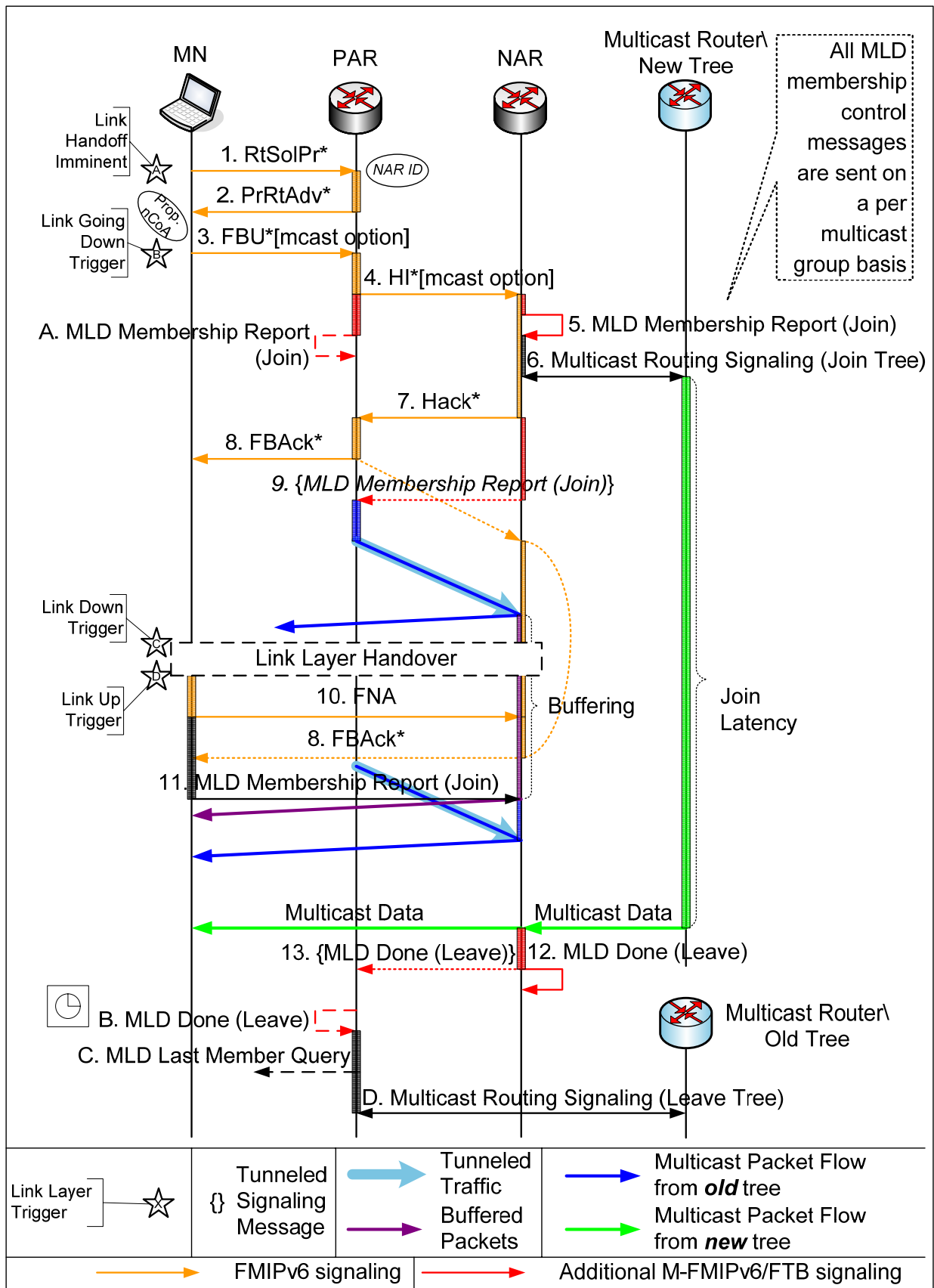
Όπως και στην περίπτωση των unicast διαπομπών βασισμένων στο FMIPv6, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB παρουσιάζει δύο τρόπους λειτουργίας: τον *προ-δραστικό* και τον *μετα-δραστικό*. Η διαφοροποίηση μεταξύ τους εντοπίζεται στο αν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία προεγκατάστασης της απαραίτητης πληροφορίας στο νέο δίκτυο πριν την πρόσδεση του κινητού τερματικού σε αυτό. Η διαδικασία διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής είναι ουσιαστικά ενοποιημένη με αυτή της unicast κινητικότητας από πλευράς σηματοδότησης. Αυτό σημαίνει ότι για τη διαπομπή πολυεκπομπής, δεν ορίζονται νέα μηνύματα για το πρωτόκολλο FMIPv6, αλλά αντίθετα χρησιμοποιούνται οι δυνατότητες επέκτασης που προσφέρουν τα ήδη προτυποποιημένα μηνύματά του. Όλες οι προτεινόμενες επεκτάσεις ακολουθούν ευρέως αποδεκτούς κανόνες

μορφοποίησης, που έχουν υιοθετηθεί για συστήματα βασισμένα στο IPv6. Όλες οι επεκτάσεις και προσθήκες αναλύονται εκτενώς στην ενότητα 3.3.1.4.

3.3.1.1 Προ-δραστική (Predictive) λειτουργία

Το Σχήμα 3 - 3 παρουσιάζει τη διαδικασία σηματοδότησης κατά τη predictive (προ-δραστική) λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Όπως και στην περίπτωση της σημείου-προς-σημείο επικοινωνίας, η διαδικασία ξεκινά με τη εκτέλεση της διαδικασίας *Proxy Router Discovery* που περιλαμβάνει την ανταλλαγή των μηνυμάτων (1) *Router Solicitation for Proxy* (RtSolPr) και (2) *Proxy Router Advertisement* (PrRtAdv). Για την υποστήριξη της unicast κινητικότητας η ανταλλαγή των μηνυμάτων αυτών υλοποιεί τη διαδικασία *AR Discovery*. Η διαδικασία σκανδαλίζεται από την παράδοση του γεγονότος *Link Handover Imminent* στο στρώμα δικτύου, το οποίο υποδεικνύει ότι η ποιότητα της εγκατεστημένης ζεύξης έχει χειροτερεύσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να δικαιολογείται η έναρξη της διαδικασίας προετοιμασίας της διαπομπής προς ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Ο προσδιορισμός του δικτύου προς το οποίο θα πραγματοποιηθεί η διαπομπή έχει γίνει από τον μηχανισμό πρόβλεψης διαπομπών. Για τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB προβλέπει μία μικρή επέκταση στο μήνυμα PrRtAdv. Η επέκταση περιλαμβάνει την προσθήκη δύο νέων δυαδικών ψηφίων (bit flags) στα μηνύματα της διαδικασίας, μέσω των οποίων ο κινητός κόμβος ενημερώνεται για τις δυνατότητες του νέου δικτύου να υποστηρίξει τη διαπομπή των υπηρεσιών πολυεκπομπής. Κατά τα άλλα, τα περιεχόμενα των proxy μηνυμάτων του FMIPv6 παραμένουν ίδια όπως και στην περίπτωση της unicast κινητικότητας· δηλαδή το RtSolPr περιέχει ένα αναγνωριστικό στρώματος ζεύξης για το νέο δίκτυο ενώ το PrRtAdv περιέχει την IPv6 διεύθυνση του NAR, ο οποίος εξυπηρετεί το νέο δίκτυο, αλλά και το αντίστοιχο πρόθημα διευθύνσεων (address prefix), το οποίο θα χρησιμοποιήσει το κινητό για την διαμόρφωση της νέας IPv6 διεύθυνσής του (new Care-of Address, nCoA). Η μορφοποίηση και τα περιεχόμενα του μηνύματος PrRtAdv αναλύονται στην ενότητα 3.3.1.4.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο FMIPv6, η διαδικασία υποστήριξης ταχέων διαπομπών ξεκινά τη στιγμή που υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις σχετικά με την εκτέλεση μίας διαπομπής στο εγγύς μέλλον. Αυτό σημαίνει ότι για την εκκίνηση της διαδικασίας καθ' αυτής, είναι απαραίτητο να υπάρχει βεβαιότητα τόσο για την άμεση εκτέλεση της διαπομπής όσο και την εγκυρότητα της πρόβλεψης αναφορικά με το σε ποιο δίκτυο προβλέπεται η διαπομπή του κινητού. Στα πλαίσια της διατριβής η συγκεκριμένη απαίτηση καλύπτεται από την παράδοση του trigger *Link Going Down*. Σε αυτό το σημείο και με βάση την πληροφορία που έχει συλλεχθεί κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Proxy Router Discovery*, ο κινητός κόμβος δημιουργεί το μήνυμα (3) *Fast Binding Update* (FBU) το οποίο και αποστέλλει προς το δρομολογητή πρόσβασης του δικτύου στο οποίο είναι προσδεμένος (δηλ. τον PAR). Το μήνυμα περιέχει σε κατάλληλα πεδία γι' αυτό το σκοπό, την τρέχουσα διεύθυνση IP του κινητού κόμβου (previous CoA, pCoA) αλλά και τη νέα διεύθυνση (nCoA) που σχημάτισε με χρήση του μηχανισμού *Proxy Router Discovery* που εκτελέστηκε νωρίτερα.



Σχήμα 3 - 3. Σηματοδότηση κατά την προ-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB

Η αποστολή του μηνύματος FBU ουσιαστικά αντιστοιχεί στην αποστολή μίας εξουσιοδότησης από την πλευρά του κινητού προς τον PAR, μέσω της οποίας ο τελευταίος αντιστοιχεί την pCoA με

την nCoA. Η συγκεκριμένη εξουσιοδότηση σκανδαλίζει τον PAR ώστε να ξεκινήσει την προσωρινή αποθήκευση (buffering) των unicast πακέτων που καταφθάνουν σε αυτόν κι έχουν διεύθυνση προορισμού τη pCoA. Η διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης χρησιμεύει για την ελαχιστοποίηση της απώλειας πακέτων, στην περίπτωση κατά την οποία ο κινητός κόμβος εκτελέσει τη διαπομπή στρώματος δικτύου προτού ολοκληρωθεί η προ-δραστική διαδικασία σηματοδότησης του FMIPv6 για την υποστήριξη unicast διαπομπών που ακολουθεί. Επιπρόσθετα, η παράδοση του μηνύματος έχει σαν αποτέλεσμα την αρχικοποίηση της διαδικασίας μέσω της οποίας θα καταστεί εφικτή η μελλοντική κατασκευή μίας διόδου IP μεταξύ του PAR και του κινητού για την προώθηση των unicast πακέτων κίνησης κατά τη διάρκεια του φαινομένου της διαπομπής.

Για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής, το μήνυμα FBU επεκτείνεται ώστε να συμπεριλάβει επιπλέον πληροφορίες που αφορούν την ταυτοποίηση των ροών πολυεκπομπής. Απώτερος σκοπός είναι η αποστολή των αναγνωριστικών των ροών πολυεκπομπής προς το NAR, μέσω της σηματοδότησης που ακολουθεί. Τα συγκεκριμένα αναγνωριστικά δεν είναι τίποτα άλλο πέρα από τις διευθύνσεις των ομάδων πολυεκπομπής εφόσον πρόκειται για ASM ροές ή τους πίνακες που ταυτοποιούν τα κανάλια SSM κίνησης (δηλ. διευθύνσεις ομάδων πολυεκπομπής συν μία INCLUDE ή EXCLUDE λίστα με τις διευθύνσεις των πηγών [7]). Η ακριβής μορφοποίηση των πεδίων στα οποία εισάγεται η πληροφορία αναλύεται στην ενότητα 3.3.1.4 που ακολουθεί. Το μήνυμα FBU υλοποιείται χρησιμοποιώντας την *Επικεφαλίδα Επέκτασης Κινητικότητας* (που προδιαγράφεται από το MIPv6 [8]). Η υλοποίηση των δομών που περιέχουν την παραπάνω πληροφορία πολυεκπομπής, ακολουθεί πρότυπους κανόνες μορφοποίησης (type, length, value, TVL), που προτείνονται για την ανάπτυξη των προτύπων από την IETF. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για την υλοποίηση της συγκεκριμένης ροής πληροφορίας δεν προδιαγράφεται κάποιο νέο μήνυμα, ενώ η μετάδοσή της πραγματοποιείται σύγχρονα με ένα μήνυμα το οποίο ήδη χρησιμοποιείται για την υποστήριξη unicast διαπομπών, παρουσιάζοντας με αυτόν τον τρόπο ένα ενοποιημένο μηχανισμό υποστήριξης unicast και multicast διαπομπών.

Η λήψη του μηνύματος FBU από τον PAR έχει σαν αποτέλεσμα την κατασκευή του μηνύματος (4) *Handover Initiate* (HI). Μέσω αυτού ο NAR ενημερώνεται για την επικείμενη διαπομπή του κινητού κόμβου προς τον ίδιο στο άμεσο μέλλον. Αν το και το μήνυμα FBU δεν περιέχει τη διεύθυνση του NAR, ο PAR είναι σε θέση να την προσδιορίσει χρησιμοποιώντας την nCoA. Το μήνυμα HI περιλαμβάνει και τη διεύθυνση στρώματος ζεύξης δεδομένων του κινητού, μέσω της οποίας θα καταστεί δυνατό για το NAR να προετοιμαστεί για την υποδοχή του τερματικού αλλά επίσης και να το ταυτοποιήσει σε περίπτωση που η διαδικασία δεν ολοκληρωθεί με πλήρη επιτυχία. Υπενθυμίζεται ότι το πρωτόκολλο FMIPv6 έχει διάφορες ασφαλιστικές δικλείδες μέσω των οποίων εγγυάται η εκτέλεση ταχέων διαπομπών ενός κινητού ακόμη και στην περίπτωση που η προτεινόμενη διεύθυνση του κινητού δεν είναι έγκυρη για το νέο δίκτυο. Για την περίπτωση των διαπομπών πολυεκπομπής, το μήνυμα HI επεκτείνεται ώστε να περιλάβει επιπλέον τα αναγνωριστικά των ροών πολυεκπομπής που περιέχονταν ήδη στο μήνυμα FBU. Αντίστοιχα με την περίπτωση του μηνύματος FBU, και δεδομένου ότι το μήνυμα HI (όπως και το HAcK που μεταδίδεται σαν απάντηση του στη συνέχεια) ουσιαστικά υλοποιείται μέσω του

πρωτοκόλλου ICMPv6, οι προτεινόμενες επεκτάσεις μορφοποιούνται σαν *πεδία επιλογές* (option fields) ICMPv6. Λεπτομέρειες αναφορικά με τη μορφοποίησή τους υπάρχουν στην ενότητα 3.3.1.4.

Η λήψη του μηνύματος HI από το NAR αποτελεί σημείο κλειδί για την περαιτέρω εξέλιξη της διαδικασίας υποστήριξης ταχέων προ-δραστικών διαπομπών τόσο για τη unicast όσο και για την multicast περίπτωση. Αναφορικά με την πρώτη, αρχικά επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα της προτεινόμενης από τον κινητό κόμβο nCoA από το νέο δίκτυο. Στην περίπτωση που η διεύθυνση δεν είναι έγκυρη, ο NAR μπορεί να προτείνει, με χρήση ενός statefull μηχανισμού, μία νέα διεύθυνση την οποία και θα επικοινωνήσει στο κινητό στη συνέχεια (μέσω της διαδικασίας σηματοδότησης που ακολουθεί). Από το σημείο αυτό και μετά ο NAR λειτουργεί ως proxy για την nCoA πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αρχίζει να εκτελεί το κομμάτι του πρωτοκόλλου *Neighbor Discovery for IPv6* για λογαριασμό του κινητού κόμβου. Αυτό σημαίνει ότι απαντάει σε μηνύματα *Neighbor Solicitation* με κατάλληλα μηνύματα *Neighbor Advertisement*, όπως ακριβώς θα έκανε ο ίδιος ο κόμβος αν ήταν παρόν στο φυσικό δίκτυο. Επιπλέον σημαίνει ότι για το υπόλοιπο της διαδικασίας, η nCoA δεν μπορεί να ανατεθεί σε κάποιον άλλο κόμβο του δικτύου του NAR, εφόσον ο τελευταίος θα συμμετάσχει κανονικά στην διαδικασία *Duplicate Address Detection* για λογαριασμό του κόμβου. Επιπρόσθετα ο NAR δημιουργεί μία επιπλέον εγγραφή για την nCoA στον πίνακα προώθησης (*host route entry*) που συντηρεί. Η εγκατάσταση της συγκεκριμένης εγγραφής έχει σαν αποτέλεσμα να μην ενεργοποιείται ο μηχανισμός *Address Resolution* του πρωτοκόλλου *Neighbor Discovery for IPv6* για τα πακέτα που μπορεί να καταφθάσουν στον NAR (μέσω της διόδου IP όπως περιγράφεται στη συνέχεια). Τέλος ο NAR ενεργοποιεί τη διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης (buffering) των πακέτων για τη nCoA που σημαίνει ότι είναι πλέον σε θέση να αποθηκεύει προσωρινά όλα τα πακέτα που περνούν από αυτόν κι έχουν ως διεύθυνση προορισμού τη nCoA.

Για την υποστήριξη ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής με χρήση του M-FMIPv6/FTB, η διαδικασία είναι πιο σύνθετη. Η παράδοση του μηνύματος HI στο NAR και η επεξεργασία των αναγνωριστικών των ροών πληροφορίας πολυεκπομπής που περιέχονται σε αυτό, σκανδαλίζει τον τελευταίο ώστε να αποστείλει ένα μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* (5, MLD Membership Report). Το συγκεκριμένο μήνυμα προωθείται από τον NAR προς τη φυσική διεπαφή (έξοδο) προς την οποία αναμένεται η πρόσδεση του κινητού κόμβου. Ο προσδιορισμός της διεπαφής μπορεί να γίνει εξετάζοντας την προτεινόμενη nCoA από το κινητό. Εντούτοις η συγκεκριμένη αντιστοίχιση ενδέχεται να μην είναι εφικτή, αφού με βάση τις αναπτυσσόμενες αρχιτεκτονικές των ασυρμάτων δικτύων ο NAR μπορεί από την ίδια έξοδο του να εξυπηρετεί μία πλειάδα φυσικών ασύρματων δικτύων. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος ο κινητός κόμβος θα πρέπει να αποστέλλει επίσης τη διεύθυνση στρώματος ζεύξης του Access Point που χρησιμοποίησε κατά τη διαδικασία AR Discovery. Προφανώς η λήψη του μηνύματος PrRtAdv θα πρέπει να περιέχει επιπλέον ένα πεδίο το οποίο θα υποδεικνύει την απαίτηση για αποστολή της διεύθυνσης στρώματος ζεύξης δεδομένων και τα μηνύματα FBU και HI να επεκταθούν κατάλληλα ώστε να μεταφέρουν επίσης τη συγκεκριμένη πληροφορία. Η συγκεκριμένη επέκταση απλά απαιτεί την εισαγωγή ενός επιπλέον πεδίου επιλογής στα συγκεκριμένα μηνύματα το οποίο

να έχει τη μορφοποίηση που αντιστοιχεί στις διευθύνσεις του στρώματος ζεύξης όπως προδιαγράφεται στο [3].

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 - 3, το μήνυμα (5) *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* είναι «αυτοεπιστρεφόμενο», δηλαδή παραδίδεται στον αποστολέα του (δηλ. το NAR). Για την υλοποίηση αυτής της διαδικασίας δεν απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος χειρισμός από την πλευρά του NAR, εφόσον η συγκεκριμένη συμπεριφορά είναι ήδη προδιαγεγραμμένη από το πρωτόκολλο MLD [9], [7]. Όπως αναλύεται στην ενότητα 2.1.2 (Έλεγχος Συμμετοχής Χρηστών σε Ομάδες Πολυεκπομπής), το πρωτόκολλο MLD είναι ασύμμετρο, προβλέποντας διαφορετική συμπεριφορά για τους δρομολογητές που καθίστανται μέλη των δένδρων διανομής και για τους τερματικούς κόμβους που αποτελούν παραλήπτες κίνησης πολυεκπομπής. Ιδιαίτερα για τους δρομολογητές όμως, προβλέπεται ότι μπορούν να υλοποιούν και τα δύο μέρη του πρωτοκόλλου και να καθίστανται με αυτόν τον τρόπο οι ίδιοι μέλη μίας ομάδας πολυεκπομπής. Για το λόγο αυτό οι δρομολογητές πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζονται τα μηνύματα του πρωτοκόλλου τοπικά. Για την αποστολή και τη λήψη του μηνύματος 5, ο κόμβος NAR απαιτείται να λειτουργεί επίσης και σαν παραλήπτης κίνησης πολυεκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιήσει το λογισμικό που υλοποιεί τόσο το «μέρος δρομολογητή» (router part) όσο και το «μέρος τερματικού» (host part). Αναφορικά με την υλοποίηση του συγκεκριμένου μηχανισμού, η μόνη ουσιαστική απαίτηση που τίθεται για την αποστολή του μηνύματος είναι η κατασκευή μίας διεπαφής λογισμικού στρώματος δικτύου (datagram socket) μεταξύ του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB και του πρωτοκόλλου MLD. Το πρώτο παίζει το ρόλο του πελάτη ενώ το δεύτερο το ρόλο του εξυπηρετητή, όπως δηλαδή ακριβώς προβλέπεται για την περίπτωση ενός κοινού τερματικού το οποίο αιτείται τη συμμετοχή του σε μία συγκεκριμένη ομάδα πολυεκπομπής. Σημειώνεται ότι η κατασκευή του socket αποτελεί μέρος της βασικής λειτουργικότητας που προβλέπεται για όλα τα συστήματα τα οποία υλοποιούν το στρώμα δικτύου (IP) στο Διαδίκτυο. Πρόκειται δηλαδή για μία πολύ χαλαρή απαίτηση που μπορεί να υποστηριχθεί από το σύνολο των δρομολογητών και δεν απαιτεί καμία μεταβολή σε κάποιο ήδη χρησιμοποιούμενο λογισμικό ή πρωτόκολλο.

Η επιστροφή του μηνύματος *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* στο κομμάτι λογισμικού του NAR που υλοποιεί το «μέρος δρομολογητή» του πρωτοκόλλου MLD, σκανδαλίζει τη διαδικασία σηματοδότησης του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολυεκπομπής (μήνυμα 6 στο Σχήμα 3 - 3), μέσω της οποίας θα καταστεί δυνατή η συμμετοχή του NAR στο δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής. Μέσω του αυτοεπιστρεφόμενου μηνύματος MLD, παρέχεται η δυνατότητα επικοινωνίας και διαλειτουργικότητας του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB με το πρωτόκολλο δρομολόγησης²⁵ πολυεκπομπής. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις: πρώτον με βάση τα περιεχόμενα του μηνύματος HI (ICMPv6 multicast option), ο κινητός κόμβος ενδέχεται να έχει ζητήσει την υποστήριξη της διαπομπής για περισσότερες από μία ASM ομάδες ή SSM κανάλια πολυεκπομπής. Εντούτοις τόσο το μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* (5) όσο και το μήνυμα δρομολόγησης πολυεκπομπής (6), αφορούν

²⁵ Εν γένει οι μηχανισμοί που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 δεν αναλύουν τον τρόπο με τον οποίο καθίσταται δυνατή η επικοινωνία μεταξύ του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που προδιαγράφει το πρωτόκολλο M-FMIPv6 και του πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολυεκπομπής.

τη συμμετοχή σε μία μοναδική ομάδα ή ένα μοναδικό κανάλι SSM. Κατά συνέπεια στην περίπτωση που επιχειρείται η υποστήριξη διαπομπής ενός κινητού κόμβου ο οποίος έχει περισσότερες από μία ενεργές συνόδους πολυεκπομπής, η λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB επιβάλλει την αποστολή αντίστοιχων το πλήθος μηνυμάτων σηματοδότησης 5 και 6, όπως ακριβώς ισχύει και κατά τη συμμετοχή ενός σταθερού τερματικού κόμβου σε περισσότερες της μίας ομάδες πολυεκπομπής.

Δεδομένου ότι κατά τη στιγμή λήψης του μηνύματος HI ο κόμβος NAR ενδέχεται να είναι ήδη μέλος της ομάδας πολυεκπομπής η αποστολή των παραπάνω μηνυμάτων, 5 και 6, δεν είναι πάντα απαραίτητη. Αυτό σημαίνει ότι ο NAR θα πρέπει να ελέγχει τον πίνακα προώθησης κίνησης πολυεκπομπής, που κατασκευάζεται από τα πρωτόκολλα MLD και δρομολόγησης πολυεκπομπής, και να προχωρά στην έκδοση του αυτό-επιστρεφόμενου μηνύματος MLD *Αναφοράς Συμμετοχής* (5), μόνο εφόσον καταλήγει στο συμπέρασμα ότι δεν είναι ήδη μέλος της συγκεκριμένης ομάδας πολυεκπομπής. Η συγκεκριμένη απαίτηση καλύπτεται ήδη από την τυπική λειτουργία του πρωτοκόλλου MLD και ιδιαίτερα του «μέρους τερματικού» που προαναφέρθηκε. Πιο αναλυτικά, το πρωτόκολλο MLD προβλέπει ότι η αποστολή μηνυμάτων *Αναφοράς Συμμετοχής* ή *Αποχώρησης* από ομάδες ASM ή κανάλια SSM πολυεκπομπής, πραγματοποιείται συγκεντρωτικά από τον κόμβο και με βάση την συγκεντρωτική λίστας ελέγχου συμμετοχών που συντηρείται τοπικά στον κόμβο. Για παράδειγμα έστω ότι σε έναν τερματικό κόμβο δύο ξεχωριστές μεταξύ τους εφαρμογές A1 και A2 έχουν ζητήσει την συμμετοχή του κόμβου στην ίδια ομάδα πολυεκπομπής G. Η έκδοση του αιτήματος στην πράξη υλοποιείται με την πραγματοποίηση δύο αντίστοιχων ξεχωριστών τοπικών κλήσεων λειτουργικού συστήματος προς τη διεπαφή λογισμικού (API) που υλοποιεί το πρωτόκολλο MLD [9], [7]. Με βάση την υλοποίηση του MLD, για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης κλήσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα εξής στοιχεία: αναγνωριστικό ροής πολυεκπομπής (δηλ. η διεύθυνση της ομάδας G και η λίστα πηγών εφόσον πρόκειται για SSM κίνηση), και η φυσική διεπαφή στρώματος ζεύξης δεδομένων (MAC interface) του κόμβου από την οποία θα πρέπει να εκδοθεί το αίτημα. Ως γνωστό η επεξεργασία της πρώτης κατά σειρά κλήσης από το πρωτόκολλο MLD, έχει σαν αποτέλεσμα την έκδοση ενός μηνύματος *Αναφοράς Συμμετοχής* όπως ακριβώς αναλύθηκε νωρίτερα, μέσω του οποίου ενημερώνεται πλέον ο εντεταλμένος δρομολογητής πολυεκπομπής του δικτύου σχετικά. Η επεξεργασία του δεύτερου σε σειρά αιτήματος (που προέρχεται από την δεύτερη εφαρμογή) δεν θα οδηγήσει στην έκδοση ενός του μηνύματος MLD προς το δίκτυο, εφόσον ο κόμβος είναι ήδη μέλος της ομάδας πολυεκπομπής. Εντούτοις, παρά το γεγονός ότι δεν αποστέλλεται επιπλέον μήνυμα, πραγματοποιείται η εγκατάσταση της διεπαφής στρώματος μεταφοράς (socket) από την πλευρά του μέρους τερματικού, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο κόμβος θα πρέπει να διατηρεί τη συμμετοχή του στην ομάδα εφόσον τουλάχιστο μία εφαρμογή είναι ακόμη ενεργή. Αντίστοιχη συμπεριφορά θα ακολουθηθεί και στην περίπτωση κατά την οποία τερματιστεί η μία μόνο από τις δύο εφαρμογές (ενώ η άλλη συνεχίζει να λειτουργεί)· ο κόμβος δεν θα εκδώσει μήνυμα κάποιο μήνυμα αποχώρησης από την ομάδα πολυεκπομπής.

Είναι προφανές ότι η παραπάνω δυνατότητα εξυπηρετεί με ιδανικό τρόπο τη λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB στο σημείο κατά το οποίο θα πρέπει να αποφασιστεί ή όχι η αποστολή του μηνύματος 5a. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι το στο παραπάνω παράδειγμα το ρόλο των εφαρμογών παίζει η υλοποίηση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, η μόνη απαίτηση για την υλοποίηση του μηχανισμού είναι η πραγματοποίηση τοπικών κλήσεων από το τελευταίο, προς τη διεπαφή API του λογισμικού που υλοποιεί το «μέρος τερματικού» του πρωτοκόλλου MLD στο NAR. Αν το πρωτόκολλο εξυπηρετεί δύο πανομοιότυπα αιτήματα (σχεδόν) ταυτόχρονα, η έκδοση των μηνυμάτων 5 και 6 θα πραγματοποιηθεί μόνο για το πρώτο αίτημα. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια το ίδιο ισχύει και για την έκδοση των μηνυμάτων 12 και 13.

Ο κόμβος NAR μετά την επεξεργασία του μηνύματος HI, έχει από τη μία προετοιμαστεί για την επικείμενη unicast διαπομπή του κινητού κόμβου κι από την άλλη έχει αιτηθεί τη συμμετοχή του στα δένδρα διανομής των ομάδων πολυεκπομπής στις οποίες συμμετέχει ήδη ο τελευταίος. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του πρωτοκόλλου FMIPv6 ο κόμβος NAR είναι υποχρεωμένος να ενημερώσει τόσο το κινητό τερματικό όσο και τον PAR σχετικά με την εξέλιξη των τελευταίων διαδικασιών. Για το λόγο αυτό αποστέλλεται το μήνυμα (7) *Handover Acknowledge* (HACK). Το μήνυμα περιέχει ένα συγκεκριμένο κωδικό, ο οποίος αποκαλύπτει την έκβαση της διαδικασίας προετοιμασίας του NAR. Επίσης στο μήνυμα εισάγεται και η έγκυρη πλέον νέα διεύθυνση nCoA του κινητού κόμβου που επιλέχθηκε για το δίκτυο του NAR. Για την υποστήριξη των διαπομπών πολυεκπομπής το μήνυμα HACK επεκτείνεται ώστε να συμπεριλάβει και τα αναγνωριστικά των ομάδων πολυεκπομπής για τις οποίες δεν είναι δυνατό να υποστηριχθεί η διαδικασία ταχέων διαπομπών που προσφέρει το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB. Τα συγκεκριμένα αναγνωριστικά εισάγονται σε αντίστοιχα με αυτά του μηνύματος HI πεδία, που ακολουθούν τη μορφοποίηση που προβλέπεται από το πρωτόκολλο ICMPv6. Η ενημέρωση του κινητού κόμβου είναι απαραίτητη ώστε στην περίπτωση που η υποστήριξη της διαπομπής δεν είναι εφικτή να καταστεί δυνατό για αυτόν, να χρησιμοποιήσει κάποιο εναλλακτικό μηχανισμό εφόσον υποστηρίζεται. Εν γένει η δυνατότητα υποστήριξης της διαπομπής πολυεκπομπής αφορά τόσο την πολιτική και τη διαθεσιμότητα πόρων του νέου δικτύου στο οποίο ανήκει ο NAR όσο και την εμβέλεια της υπηρεσίας πολυεκπομπής.

Με στόχο την ενημέρωση του κινητού κόμβου αναφορικά με τη διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής, η λήψη του μηνύματος HACK από τον PAR πυροδοτεί την δημιουργία κι αποστολή του μηνύματος (8) *Fast Binding Acknowledge* (FBACK) προς τον κινητό κόμβο σαν απάντηση του αρχικού μηνύματος FBU. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι ο κόμβος PAR δεν μπορεί να είναι ενήμερος για τη σύνδεση του κινητού κόμβου στο ασύρματο δίκτυό του, εφόσον ο τελευταίος μπορεί αυτόβουλα να εκτελέσει τη διαπομπή στρώματος ζεύξης δεδομένων, και με στόχο την αποφυγή της εκτέλεσης της διαδικασίας μετα-δραστηκής διαπομπής, από το νέο δίκτυο, το μήνυμα αποστέλλεται τόσο προς την παλιά (pCoA) όσο και προς την νέα (nCoA) διεύθυνση του κινητού. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 - 3 το μήνυμα FBACK είναι το πρώτο μήνυμα που λαμβάνει ο κινητός κόμβος μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο. Κατά την εκτέλεση FMIPv6 διαπομπών προ-δραστηκού (predictive) τύπου, ο κόμβος PAR σταματά να προωθεί προς το δίκτυό του τα unicast πακέτα που προορίζονται για τον κινητό κόμβο (με διεύθυνση pCoA)

αμέσως μετά την αποστολή του μηνύματος FBAck. Αυτό δεν ισχύει για την περίπτωση των πακέτων πολυεκπομπής τα οποία συνεχίζουν να προωθούνται κανονικά προς το παλιό δίκτυο εφόσον σε αυτό είναι πιθανό να εξυπηρετούνται επιπλέον χρήστες της ίδιας υπηρεσίας πολυεκπομπής ανεξάρτητα από αυτόν που εκτέλεσε τη διαπομπή. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, ο PAR θα αντιληφθεί την ύπαρξη άλλων χρηστών μέσω της λειτουργίας του πρωτοκόλλου *Ελέγχου Συμμετοχής* σε ομάδες πολυεκπομπής, μετά τη διέλευση ενός τυχαίου χρονικού διαστήματος ομοιόμορφα κατανεμημένου στο (0, 125] sec (με βάση τις τυπικές ρυθμίσεις των IGMP/MLD).

Με βάση την προδιαγραφή του FMIPv6, η λήψη του μηνύματος HAcK από τον PAR έχει διπλή σημασία: αρχικά ο PAR ενημερώνεται (επιβεβαιώνει) για τη νέα διεύθυνση nCoA που θα έχει το κινητό στο νέο δίκτυο. Στη συνέχεια μπορεί να θεωρήσει εαυτόν εξουσιοδοτημένο για την προώθηση των unicast πακέτων που περνούν από αυτόν και προορίζονται προς την rCoA του κινητού, προς τη νέα έγκυρη nCoA. Η εξουσιοδότηση έχει φτάσει στον PAR μέσω του μηνύματος FBU. Με στόχο την ελάττωση του χρονικού διαστήματος στο οποίο ένας κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί λόγω της καθυστέρησης που εισάγει η διαδικασία σηματοδότησης του MIPv6 (βλέπε ενότητα 2.3.1), αλλά και λόγω της εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, σύμφωνα με το FMIPv6, ο PAR κατασκευάζει μία αμφίδρομη δίοδο IP για αυτό το σκοπό μέσω της οποίας αρχίζει να προωθεί τα πακέτα που περνούν από αυτόν κι έχουν διεύθυνση προορισμού την rCoA. Ως άκρα της διόδου ορίζονται η διεύθυνση του PAR και η nCoA. Στα πλαίσια της διατριβής κάθε αναφορά στη συγκεκριμένη δίοδο θα γίνεται με τον όρο *PAR_to_nCoA_Tunnel*. Δεδομένου ότι η δίοδος είναι αμφίδρομη, το πρωτόκολλο FMIPv6 δίνει τη δυνατότητα στους κινητούς κόμβους να χρησιμοποιούν την rCoA για το ίδιο χρονικό διάστημα, εξαλείφοντας τα προβλήματα που σχετίζονται είτε με μηχανισμούς ingress filtering είτε με την καθυστέρηση μετάδοσης της σηματοδότησης του MIPv6. Όπως προαναφέρθηκε ο PAR σταματά να προωθεί τα unicast πακέτα του κινητού κόμβου που καταφθάνουν σε αυτόν μετά τη λήψη του FBAck, προς τη διεπαφή που αντιστοιχεί προς το φυσικό υποδίκτυο στο οποίο είναι προσδεμένος. Αντί αυτού, αρχίζει να προωθεί τα συγκεκριμένα πακέτα προς την ιδεατή διεπαφή που ορίζει η παραπάνω δίοδος IP, αφού πρώτα προωθήσει επίσης όλα τα πακέτα τα οποία βρίσκονται ήδη αποθηκευμένα στον προσωρινό καταχωρητή αποθήκευσης (buffer) που είχε εγκαταστήσει για αυτό το σκοπό. Σημειώνεται ότι τα πακέτα που μεταφέρονται με χρήση της διόδου από το παλιό προς το νέο δίκτυο, αποθηκεύονται στον NAR σε έναν αντίστοιχο buffer μέχρις ότου σηματοδοτηθεί η πρόσδεση του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο.

Για τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής εντούτοις, τα πράγματα είναι περισσότερο σύνθετα. Η χρήση της διεύθυνσης προορισμού δεν μπορεί από μόνη της να αποκαλύψει προς πιο υποδίκτυο θα πρέπει να προωθηθεί ένα πακέτο πολυεκπομπής. Με βάση την αρχιτεκτονική IP Multicast, ένας δρομολογητής για να πραγματοποιήσει προώθηση πακέτων πολυεκπομπής προς μία έξοδό του, θα πρέπει να έχει λάβει ένα κατάλληλο μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής*. Στη γενική περίπτωση το συγκεκριμένο μήνυμα αποκαλύπτει ότι σε ένα υποδίκτυο υπάρχει ένας ή περισσότεροι κόμβοι, οι οποίοι επιθυμούν λήψη πακέτων που ανήκουν στην συγκεκριμένη ομάδα πολυεκπομπής. Η λήψη του μηνύματος έχει σαν αποτέλεσμα την ενημέρωση ενός πίνακα

αντιστοίχισης μέσω του οποίου αποκαλύπτεται προς ποιες εξόδους (διεπαφές στρώματος δικτύου-ζεύξης δεδομένων) του δρομολογητή θα πρέπει να προωθούνται τα πακέτα πολυεκπομπής που καταφθάνουν σε αυτόν.

Με στόχο την υλοποίηση ενός μηχανισμού προώθησης κίνησης από το παλιό προς το νέο δίκτυο, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB προτείνει την εγκατάσταση μίας νέας *αμφίδρομης διόδου IP*, επονομαζόμενης ως τα πλαίσια της διατριβής ως *PAR_to_NAR_Tunnel*. Η συγκεκριμένη δίοδος εγκαθίσταται μεταξύ των δρομολογητών πρόσβασης PAR και NAR. Για την εκκίνηση της διαδικασίας προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής, ο κόμβος NAR μετά την αποστολή του μηνύματος HAcK είναι υποχρεωμένος να αποστείλει ένα μήνυμα *MLD Membership Report* (9), διαμέσου της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel*. Εφόσον ο τελευταίος λειτουργεί ως προς τον PAR ως παραλήπτης κίνησης όπως ακριβώς ένας τυπικός παραλήπτης πολυεκπομπής προς τον εκάστοτε *Εντεταλμένο Δρομολογητή Πολυεκπομπής (Multicast Designated Router)*, που εξυπηρετείτο φυσικό υποδίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένοι, η αποστολή του συγκεκριμένου μηνύματος απαιτεί τη χρήση του λογισμικού «τερματικού πολυεκπομπής» του πρωτοκόλλου MLD που εκτελείται στον NAR. Η αποστολή του συγκεκριμένου μηνύματος MLD, μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα (δηλ. απροσκάλεστα – *unsolicited report*), εφόσον η δίοδος *PAR_to_NAR_Tunnel* δεν είναι δυναμικά δημιουργούμενη ανά διαπομπή κινητού κόμβου, αλλά *a priori* κατασκευασμένη και στατικά ρυθμισμένη ανά ζευγάρι δρομολογητών πρόσβασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν η δίοδος *PAR_to_NAR_Tunnel* δημιουργείται δυναμικά, η αποστολή του μηνύματος MLD Αναφοράς Συμμετοχής θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αφού ο NAR λάβει πρώτα ένα μήνυμα *MLD Γενικής Ερώτησης (General Query)*, βλέπε ενότητα 2.1.2). Όπως και να έχει πάντως η λήψη του μηνύματος *Αναφοράς Συμμετοχής* από τον PAR διαμέσου της ιδεατής διεπαφής της διόδου έχει σαν αποτέλεσμα την εκκίνηση της διαδικασίας προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής προς τον NAR.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη δίοδος IP, είναι εντελώς διαφορετική από την προτεινόμενη από το αντίστοιχο πρωτόκολλο M-FMIPv6, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.2). Κατ' αρχήν, στην περίπτωση του M-FMIPv6 η δίοδος είναι ακριβώς αυτή που ορίζεται στα πλαίσια του πρωτοκόλλου FMIPv6 για τη μεταφορά unicast κίνησης από τον PAR προς τη nCoA του κινητού. Η *PAR_to_NAR_Tunnel* από την άλλη (α) εγκαθίσταται μεταξύ καθενός ζευγαριού PAR και NAR κι όχι μεταξύ του PAR και του κινητού που εκτελεί τη διαπομπή, (β) ορίζεται και χρησιμοποιείται στα πλαίσια του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, αποκλειστικά για τη μεταφορά κίνησης και σηματοδότησης πολυεκπομπής, δίνοντας τη δυνατότητα στον NAR να καταστεί μέλος του δένδρου διανομής από το γνωστό και πλέον κατάλληλο σημείο στο οποίο καταλήγει ήδη η κίνηση για τη συγκεκριμένη ομάδα (δηλ. τον PAR), (γ) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά κίνησης ανά ροή πολυεκπομπής κι όχι ανά κινητό χρήστη, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο NAR είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τη ροή που μεταφέρεται από τη δίοδο *PAR_to_NAR_Tunnel* για περισσότερους από ένα χρήστες, ανεξάρτητα από την ταυτότητα του κόμβου ο οποίος ουσιαστικά σκανδάλισε την όλη διαδικασία.

Η χρήση της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel*, δίνει τη δυνατότητα στον NAR να πραγματοποιεί βέλτιστη διαχείριση στις εισερχόμενες σε αυτόν ροές πολυεκπομπής. Για παράδειγμα, έστω ότι

ένας δρομολογητής πρόσβασης καλείται να υποδεχθεί δύο ανεξάρτητα κινούμενους κινητούς κόμβους MN1 και MN2 σχεδόν ταυτόχρονα, κι ότι η διαπομπή του MN1 επιβάλλει τη χρήση της διόδου *PAR1_to_NAR_Tunnel* για τη μεταφορά κίνησης για τη ροή πολυεκπομπής G από τον PAR1 προς τον NAR, ενώ η διαπομπή του MN2 απαιτεί για τη μεταφορά κίνησης για την ίδια ροή πολυεκπομπής G από τον PAR2 προς το NAR, τη χρήση της διόδου *PAR2_to_NAR_Tunnel*. Υποθέτοντας ότι τη στιγμή που καταφθάνει το μήνυμα HI από τον PAR2 για τον MN2, έχει ήδη αρχίσει η προώθηση μέσω της διόδου *PAR1_to_NAR_Tunnel* για τον MN1, ο NAR μπορεί κάλλιστα να θεωρήσει εαυτόν ήδη μέλος της ομάδας πολυεκπομπής και να μην εκδηλώσει το αίτημα (μέσω του μηνύματος 9) για προώθηση της κίνησης της ροής από τη δίοδο *PAR2_to_NAR_Tunnel*. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας εντούτοις τίθεται μία επιπλέον απαίτηση στο πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το συγκεκριμένο λογισμικό καλεί το «μέρος τερματικού» του πρωτοκόλλου MLD στον NAR, ώστε να καταστεί ο τελευταίος μέλος της ομάδας πολυεκπομπής από την εκάστοτε δίοδο *PAR_to_NAR_Tunnel*. Η συγκεκριμένη κλίση υλοποιείται στην πράξη με την κατασκευή ενός multicast socket από τη διεπαφή που ορίζει η δίοδος *PAR_to_NAR_Tunnel*. Στο παραπάνω παράδειγμα, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB, προτού προχωρήσει στην κατασκευή του δεύτερου socket, θα πρέπει να έχει ελέγξει ποια ροή καταφθάνει από άλλα ταυτόχρονα ενεργά socket. Αν ο έλεγχος καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η ροή πολυεκπομπής παραδίδεται ήδη από κάποιο άλλο, τότε η κλίση δημιουργίας του νέου socket θα πρέπει να μην πραγματοποιηθεί²⁶. Το ζητούμενο είναι σε κάθε περίπτωση να εξαιρεθούν οι αιτήσεις για τις ροές πολυεκπομπής που ήδη παραδίδονται στον NAR, οπότε και να μην εκκινήσει άσκοπα η προώθηση πακέτων από το προηγούμενο δίκτυο του δευτέρου κατά σειρά κινητού τερματικού, προς το δίκτυο του NAR.

Αναφορικά με την παράδοση των πακέτων πολυεκπομπής προς το νέο ασύρματο δίκτυο, ο κόμβος NAR, αφού αφαιρέσει την επιπρόσθετη επικεφαλίδα που προέρχεται από τη δίοδο *PAR_to_NAR_Tunnel*, προωθεί τα πακέτα προς το φυσικό υποδίκτυο στο οποίο αναμένεται η προσάρτηση του κινητού κόμβου. Η συγκεκριμένη διαδικασία εκτελείται «αυτόματα», δεδομένου ότι είναι ήδη εγκατεστημένη η κατάλληλη πληροφορία στον *Πίνακα Προώθησης Κίνησης Πολυεκπομπής* (Multicast Forwarding Table) και πραγματοποιείται κάνοντας χρήση των τυπικών μηχανισμών προώθησης πακέτων πολυεκπομπής από έναν δρομολογητή προς ένα υποδίκτυο. Υπενθυμίζεται ότι ο πίνακας έχει ήδη ρυθμιστεί από την μετάδοση και λήψη του αυτοεπιστρεφόμενου μηνύματος MLD (5). Ειδικότερα, ο πίνακας περιέχει μία εγγραφή η οποία αποκαλύπτει ότι, για την περίπτωση της ASM κίνησης, τα πακέτα που καταφθάνουν από τη δίοδο κι έχουν διεύθυνση προορισμού τη συγκεκριμένη διεύθυνση της ομάδας πολυεκπομπής, ή για την περίπτωση της SSM κίνησης, τα πακέτα που επιπλέον ικανοποιούν του περιορισμούς φιλτραρίσματος αναφορικά με τη διεύθυνση της πηγής, θα πρέπει να προωθούνται προς τη συγκεκριμένη φυσική διεπαφή προς την οποία αναμένεται η προσάρτηση του κινητού κόμβου.

²⁶ Το πρωτόκολλο MLD προβλέπει ότι ένας τερματικός κόμβος έχει τη δυνατότητα να αιτηθεί τη συμμετοχή του σε μία ομάδα πολυεκπομπής από περισσότερες της μίας διεπαφές ταυτόχρονα. Ένας τερματικός κόμβος μπορεί να κατασκευάσει περισσότερα του ενός sockets στρώματος μεταφοράς για την ίδια ομάδα πολυεκπομπής, εφόσον χρησιμοποιείται διαφορετική διεπαφή των στρωμάτων δικτύου/ζεύξης δεδομένων. Με άλλα λόγια ο κόμβος μπορεί να καταστεί μέλος της ίδιας ομάδας πολυεκπομπής από διαφορετικά δίκτυα ταυτόχρονα. Ο έλεγχος για το ποιά διεπαφή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αφορά τη λειτουργία των στρωμάτων μεταφοράς κι όχι του MLD.

Η λήψη του μηνύματος FBACk από το κινητό αντιστοιχεί στο σημείο ολοκλήρωσης της διαδικασίας προετοιμασίας της διαπομπής του κινητού στο νέο δίκτυο. Από το σημείο αυτό και μετά απομένει μόνο η εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων μέσω της οποίας το κινητό θα αποσυνδεθεί από το τρέχον δίκτυο και θα συνδεθεί στο νέο. Εν γένει ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των στιγμών παράδοσης του μηνύματος FBACk και της εκκίνησης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεν είναι γνωστός. Εντούτοις, δεδομένης της λειτουργίας του μηχανισμού πρόβλεψης και των ρυθμίσεων που μπορεί αυτός να πάρει, ο συγκεκριμένος χρόνος είναι αρκετά μικρός (της τάξης της διάρκειας της διαπομπής στρώματος ζεύξης - δηλ. μερικών εκατοντάδων msec). Η έναρξη της διαπομπής στρώματος ζεύξης σηματοδοτείται στο στρώμα δικτύου μέσω της παράδοσης του γεγονότος *Link Down*.

Η παράδοση του γεγονότος *Link Up* στο στρώμα δικτύου, αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο ο κινητός κόμβος είναι πλέον συνδεδεμένος με το *Σημείο Πρόσβασης* (AP) του νέου δικτύου. Η παράδοση του συγκεκριμένου γεγονότος από το στρώμα MIIH στο στρώμα δικτύου έχει μία επιπλέον χρησιμότητα· η ροή πληροφορίας που συνοδεύει το *Link Up*, μεταφέρει στοιχεία που αφορούν στην ταυτοποίηση του δικτύου στο οποίο προσδέθηκε το κινητό. Αυτό σημαίνει ότι το πρωτόκολλο FMIPv6 ενημερώνεται για την διεύθυνση στρώματος ζεύξης του AP με το οποίο έχει εγκατασταθεί η σύνδεση. Αυτή η δυνατότητα δεν υπάρχει στις περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιείται το στρώμα MIIH. Μεγάλο πλεονέκτημα από τη συγκεκριμένη λειτουργία αποτελεί το γεγονός ότι δεν απαιτείται πλέον η εκτέλεση των διαδικασιών *Επισήμανσης Μετακίνησης* και *Ανακάλυψης Δρομολογητή* του πρωτοκόλλου *Neighbor Discovery for IPv6* (ND), εφόσον ο κινητός κόμβος είναι ήδη ενήμερος σχετικά, από την εκτέλεση της διαδικασίας *Proxy Router Discovery* του FMIPv6, για τις απαιτούμενες πληροφορίες.

Όπως αναλύθηκε νωρίτερα εντούτοις και με στόχο την επιτάχυνση της διαδικασίας πρόσδεσης στο στρώμα δικτύου πλέον, το πρωτόκολλο FMIPv6 προβλέπει ότι ο κινητός κόμβος θα πρέπει να σηματοδοτήσει την πρόσδεσή του σε αυτό. Για να το πράξει αποστέλλει το μήνυμα (10) *Fast Neighbor Advertisement* (FNA) στο οποίο εκτός από τη nCoA του συμπεριλαμβάνει και την χρησιμοποιούμενη από τον ίδιο διεύθυνση στρώματος ζεύξης. Το μήνυμα έχει ακριβώς την ίδια μορφοποίηση με το μήνυμα *Neighbor Advertisement* που προδιαγράφεται κατά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου ND. Εντούτοις η χρήση του είναι διαφορετική. Η λήψη του μηνύματος FNA σηματοδοτεί στον κόμβο NAR την πρόσδεση ενός κινητού σε ένα ασύρματο δίκτυο φυσικά προσαρτημένο σε αυτόν. Στο σημείο αυτό, ο NAR είναι υποχρεωμένος να ελέγξει αν έχει κάποια εγγραφή στην *IPv6 Neighbor Cache* του, σχετικά με τον κόμβο που απέστειλε το μήνυμα. Όπως έχει αναλυθεί νωρίτερα, για τις ταχείες διαπομπές προ-δραστικού τύπου, ο NAR λειτουργεί ως πληρεξούσιος (proxy) για τη nCoA, που σημαίνει θα πρέπει να έχει αντίστοιχη εγγραφή στην *IPv6 Neighbor Cache* που συντηρεί. Με τη λήψη του μηνύματος FNA, ο NAR διαγράφει την proxy εγγραφή και προχωρά στην άμεση κατασκευή μίας νέας, η κατάσταση της οποίας τίθεται απ' ευθείας στην τιμή *Reachable* (σύμφωνα με την προδιαγραφή του ND θα έπρεπε να είχε προηγηθεί η εκτέλεση της διαδικασίας *Address Resolution*) [10]. Αυτό έχει σαν συνέπεια την άμεση προώθηση όλων των προσωρινά αποθηκευμένων πακέτων τα οποία έχουν ως διεύθυνση προορισμού τη nCoA προς την κατάλληλη έξοδο του NAR, ώστε να παραληφθούν άμεσα από τον

αφιχθέντα κινητό κόμβο. Επιπρόσθετα ο NAR προχωρά στην ακύρωση της εγκατεστημένης *host route* εγγραφής που έχει στον πίνακα δρομολόγησής του για την διεύθυνση pCoA, εφόσον ο κινητός κόμβος είναι πλέον παρόν στο φυσικό υποδίκτυο.

Οι παραπάνω ενέργειες είναι επαρκείς ώστε να εξασφαλίσουν την άμεση επικοινωνία του κινητού κόμβου για συνόδους unicast εφόσον, για την κατεύθυνση προς το κινητό (downstream), ο NAR είναι πλέον σε θέση να προωθεί όλα τα πακέτα που έχει προσωρινά αποθηκευμένα για λογαριασμό του κινητού (δηλ. για τη nCoA). Υπενθυμίζεται ότι μέχρι ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία σηματοδότησης *Οικείας Εγγραφής* (Home Registration) του MIPv6, ο κινητός κόμβος θα λαμβάνει μέσω της διόδου που έχει εγκατασταθεί με τον PAR νωρίτερα (*PAR_to_nCoA_Tunnel*), όλα τα πακέτα που προορίζονταν στην προηγούμενη της διαπομπής διεύθυνσή του (δηλ. για τη pCoA). Από την άλλη, για την κατεύθυνση από το κινητό προς το δίκτυο (upstream), ο κινητός κόμβος επίσης είναι σε θέση να αποστέλλει χρησιμοποιώντας την αμφίδρομη δίοδο *PAR_to_nCoA_Tunnel*, όλα τα εξερχόμενα από αυτόν πακέτα. Σημειώνεται ότι για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ο κινητός κόμβος έχει αποθηκεύσει προσωρινά όλα τα πακέτα τα οποία δεν μπορούσε να αποστέλλει κατά τη διαδικασία εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων.

Όπως έχει προαναφερθεί, με βάση το προτεινόμενο πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB, ο κόμβος NAR από τη στιγμή που έλαβε το μήνυμα HI έχει ρυθμίσει τον *Πίνακα Προώθησης Πολυεκπομπής* (Multicast Forwarding Table), με τέτοιο τρόπο ώστε ανεξάρτητα από την πρόσδεση του κινητού κόμβου σε αυτόν, τα πακέτα πολυεκπομπής να προωθούνται προς την έξοδό του που αντιστοιχεί στο φυσικό υποδίκτυο στο οποίο αναμένεται η πρόσδεση του κινητού κόμβου. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την αποστολή και λήψη του αυτοεπιστρεφόμενου μηνύματος *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* (5). Με στόχο να καταστεί εφικτή η λήψη των πακέτων πολυεκπομπής από τον κινητό κόμβο αμέσως μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο σε όλες τις περιπτώσεις, απαιτείται η αποστολή ενός μηνύματος *MLD Membership Report* (μήνυμα 11 στο Σχήμα 3 - 3). Η αποστολή και λήψη του συγκεκριμένου μηνύματος ουσιαστικά αντιστοιχεί στην εκτέλεση της διαδικασίας *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* από την πλευρά του κινητού. Το συγκεκριμένο μήνυμα θα πρέπει να αποσταλεί ώστε να ρυθμιστούν όλοι οι μεταγωγείς του ενσύρματου δικτύου υποδομής μέσω του οποίου ο κόμβος NAR συνδέεται με τα Σημεία ασύρματης Πρόσβασης.

Η αποστολή του συγκεκριμένου μηνύματος δεν είναι πάντα απαραίτητη για τη λήψη των πακέτων πολυεκπομπής από την πλευρά του κινητού. Εν γένει η έκδοση ενός μηνύματος *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* έχει σαν αποτέλεσμα την ρύθμιση των στρωμάτων ζεύξης δεδομένων και δικτύου στην πλευρά του κόμβου που το αποστέλλει, ούτως ώστε να «συλλέγονται» μόνο τα πλαίσια που μεταδίδονται στο φυσικό μέσο και αντιστοιχούν σε ομάδες πολυεκπομπής στις οποίες συμμετέχει ο κόμβος. Για έναν κινητό κόμβο ο οποίος μόλις εκτέλεσε μία διαπομπή, η συγκεκριμένη ρύθμιση πραγματοποιείται τη στιγμή κατά την οποία αποστέλλεται το αίτημα για συμμετοχή στην ομάδα πολυεκπομπής. Αυτό είναι ανεξάρτητο τόσο από την εκτέλεση διαπομπών όσο και από την διεύθυνση του κόμβου που εκδίδει το αίτημα. Η αποστολή του συγκεκριμένου μηνύματος είναι απαραίτητη για την ενημέρωση του ενσύρματου κυρίως δικτύου

υποδομής (που συνθέτει το ασύρματο δίκτυο), και ιδίως για την περίπτωση όπου, για την προώθηση κίνησης πολυεκπομπής, χρησιμοποιούνται μεταγωγείς στρώματος 2 οι οποίοι μεταγάγουν πλαίσια πολυεκπομπής χρησιμοποιώντας τη σηματοδότηση πολυεκπομπής του στρώματος 3 (snoring switches²⁷) [11] δηλαδή τα ανταλλασσόμενα MLD μηνύματα. Εφόσον η λειτουργία ενός δρομολογητή πρόσβασης είναι ενοποιημένη με αυτή του σημείου πρόσβασης, η αποστολή του μηνύματος 11 δεν είναι απαραίτητη. Εντούτοις είναι δύσκολο για έναν κινητό κόμβο να ενημερωθεί σχετικά με το αν κάτι τέτοιο ισχύει. Μια λύση για το πρόβλημα θα ήταν η εκτέλεση της διαδικασίας Proxy Router Discovery να επιστέφει επιπλέον και τη διεύθυνση στρώματος ζεύξης του NAR που αντιστοιχεί στο ανακοινωμένο πρόθημα. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητός κόμβος θα μπορούσε να καταλήξει στο παραπάνω συμπέρασμα εφόσον η επιστρεφόμενη διεύθυνση ταυτίζονταν ή όχι με τη διεύθυνση του AP που χρησιμοποιήθηκε σαν αναγνωριστικό για τον NAR αρχικά. Κατά συνέπεια η λήψη των πακέτων πολυεκπομπής από τον κινητό κόμβο μετά την εκτέλεση της διαπομπής του στο νέο δίκτυο, καθυστερεί στη χειρότερη περίπτωση κατά το χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο πλήρους διαδρομής μεταξύ του κινητού και του πλησιέστερου στο NAR μεταγωγέα συν τον όποιο χρόνο απαιτείται για την επεξεργασία του μηνύματος κατά μήκος της διαδρομής που αυτό ακολουθεί.

Όπως έχει αναλυθεί η προτεινόμενη από το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB διαδικασία διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, προσφέρει ένα τρόπο ώστε ο κινητός κόμβος να μπορεί να λαμβάνει τα πακέτα κίνησης πολυεκπομπής για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται μέχρις ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία συμμετοχής του NAR στο δένδρο διανομής της ομάδας πολυεκπομπής. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σταματήσει η διαδικασία προώθησης των πακέτων πολυεκπομπής από τον PAR προς το NAR διαμέσου της διόδου *IP PAR_to_NAR_tunnel*. Για να καταστεί αυτό δυνατό ο κόμβος NAR απαιτείται να πραγματοποιήσει τις παρακάτω δύο ενέργειες: αρχικά είναι απαραίτητο να παραδώσει μία ένδειξη στο κομμάτι λογισμικού που υλοποιεί το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB μέσω της οποίας να αποκαλύπτεται ότι έχουν ήδη αρχίσει να καταφθάνουν πακέτα που ανήκουν σε μία ροή πολυεκπομπής, από την είσοδο (interface) που συνδέει το NAR με το δένδρο διανομής. Στη συνέχεια, σαν αντίδραση στην παραπάνω ένδειξη, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες κλήσεις λειτουργικού συστήματος ώστε να «κλείσουν» τα sockets που δημιουργήθηκαν κατά την ενεργοποίηση της διαδικασίας προώθησης μέσω της διόδου *PAR_to_NAR_tunnel*. Σαν αποτέλεσμα των κλήσεων κλεισίματος, το πρωτόκολλο MLD θα πρέπει να προχωρήσει στην έκδοση του κατάλληλου μηνύματος αποχώρησης από την ομάδα πολυεκπομπής, δηλαδή του μηνύματος *MLD Done* εφόσον χρησιμοποιείται η έκδοση 1 για το πρώτο ή ενός μηνύματος MLD State/Filter Change Report (INCLUDE NULL) εφόσον πρόκειται για το MLDv2. Στο Σχήμα 3 - 3 αποστέλλονται τα μηνύματα 12 και 13, που αντιστοιχούν στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MLDv1.

²⁷ Εν γένει οι συγκεκριμένοι μεταγωγείς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα ενσύρματα τοπικά δίκτυα υποδομής, «καταστρατηγούν» τις αρχές της διαστρωμάτωσης οπότε έχουν τη δυνατότητα να χειρίζονται πληροφορίες στρώματος δικτύου – 3 – παρά το γεγονός ότι πρόκειται για συσκευές στρώματος ζεύξης δεδομένων – 2. Επίσης σημαντικό στοιχείο (για τη λειτουργία των υπηρεσιών πολυεκπομπής), είναι το ότι δε γεφυρώνουν όλες τις φυσικές διεπαφές τους, εξομοιώνοντας την κοινή πρόσβαση όλων των συνδεδεμένων σε αυτούς κόμβους στο κοινό φυσικό μέσο, αλλά αντίθετα, με στόχο την εξοικονόμηση του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης, εγκαθιστούν σημείου-προς-σημείο ζεύξεις μεταξύ τους, αναπτύσσοντας με αυτόν τον τρόπο τοπολογίες αστέρια.

Το πρώτο μήνυμα αποχώρησης (12), σηματοδοτεί την αποκατάσταση της συμμετοχής του κόμβου NAR καθ' αυτού στην ομάδα πολυεκπομπής σαν τερματικό (δηλ. όχι στο δένδρο διανομής σαν δρομολογητής πολυεκπομπής). Δεδομένου ότι το μήνυμα 12 είναι αυτοεπιστρεφόμενο κι αφορά τη διεπαφή του NAR που οδηγεί προς το κινητό, με βάση τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MLD [9], [7], η λήψη του από τον NAR θα οδηγήσει στην άμεση έκδοση ενός μηνύματος MLDv1 *Last Member Query* ή MLDv2 *Multicast Address and Source Specific Query* (δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 3 - 3), στο οποίο θα πρέπει να απαντήσει ο κινητός κόμβος με ένα κατάλληλο μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* στην ομάδα. Η συγκεκριμένη διαδικασία δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 3 - 3, δεδομένου ότι δεν αφορά τη διαδικασία διαχείρισης της διαπομπής, αλλά σχετίζεται με την λειτουργία του πρωτοκόλλου MLD. Το δεύτερο μήνυμα αποχώρησης εκδίδεται από το NAR προς το ιδεατό δίκτυο που ορίζει η διοδος *PAR_to_NAR_tunnel*. Η λήψη του μηνύματος 13 από τον PAR οδηγεί οριστική παύση της διαδικασίας προώθησης πακέτων πολυεκπομπής προς τον NAR. Η διαδικασία αποχώρησης που εκτελείται μέσω της μετάδοσης των μηνυμάτων 12 και 13 εκτελείται ανά ροή κίνησης πολυεκπομπής. Στο σημείο αυτό σηματοδοτείται η ολοκλήρωση της διαδικασίας υποστήριξης της διαπομπής πολυεκπομπής από το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB. Η επεξεργασία των μηνυμάτων 12 και 13 αντιστοιχεί και στο σημείο κατά το οποίο τερματίζεται η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού.

3.3.1.1.1 Προ-δραστική προσωρινή αποθήκευση πακέτων – Predictive Buffering

Αν και η διαδικασίας προ-δραστικής προώθησης κίνησης βοηθά σημαντικά στον περιορισμό της απώλειας πακέτων που προκαλεί η εκτέλεση μίας διαπομπής, δεν μπορεί να οδηγήσει στην εκτέλεση πλήρως απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής, δηλαδή διαπομπών οι οποίες να ικανοποιούν αμφότερες τις απαιτήσεις για εκμηδενισμό των απολεσθέντων πακέτων. Στη γενική περίπτωση ένας κινητός κόμβος χάνει τα πακέτα τα οποία μεταδίδονται κατά τη διάρκεια τόσο της προετοιμασίας όσο και εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Όπως αναλύθηκε νωρίτερα, στην περίπτωση των unicast προ-δραστικών FMIPv6 διαπομπών, οι απώλειες στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι δυνατό να περιοριστούν εφόσον λειτουργεί ένας μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης (buffering) στους δρομολογητές πρόσβασης που υποστηρίζουν τη διαπομπή. Υπενθυμίζεται ότι ο μηχανισμός λειτουργεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των στιγμών παράδοσης των μηνυμάτων FBU και FNA στους κόμβους PAR και NAR αντίστοιχα. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένας ανεξάρτητος μηχανισμός μέσω του οποίου καθίσταται δυνατή η προσωρινή αποθήκευση πακέτων για λογαριασμό ενός κινητού κόμβου ο οποίος έχει ενεργές συνόδους πολυεκπομπής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και ο προτεινόμενος μηχανισμός παρουσιάζεται στα πλαίσια του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, η υλοποίησή του είναι αρκετά γενική. Ως εκ τούτου μπορεί να εφαρμοστεί και από άλλους μηχανισμούς διαχείρισης κινητικότητας αυτόνομα. Αντίστοιχα με την περίπτωση των unicast διαπομπών, ο προτεινόμενος μηχανισμός έχει εφαρμογή μόνο στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών και εκτελείται μόνο στην περίοδο προετοιμασίας και εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης.

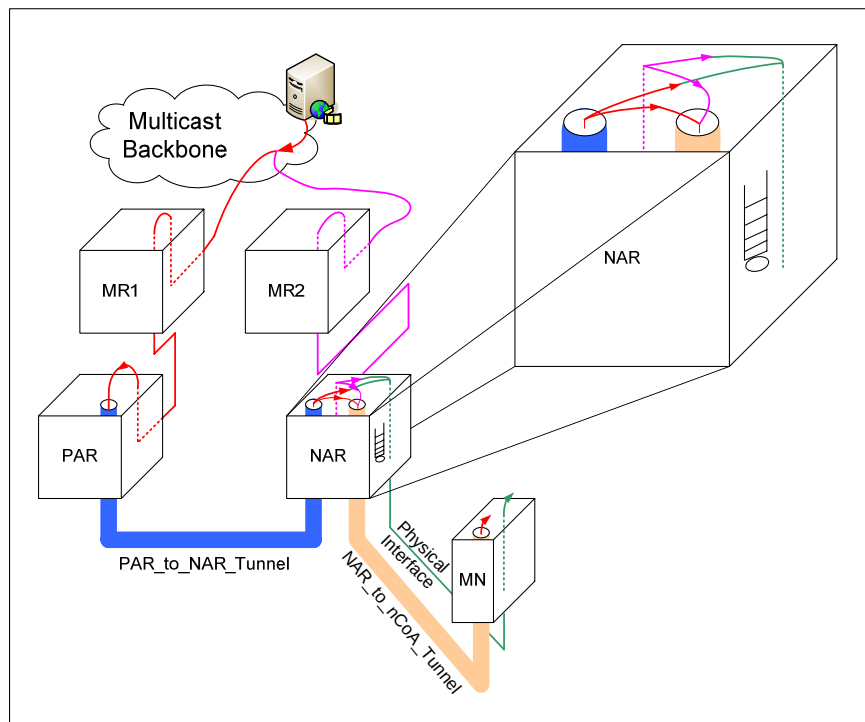
Εν γένει η ανάπτυξη ενός μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης πακέτων για εφαρμογές πολυεκπομπής είναι μία διαδικασία εντελώς διαφορετική από αυτή που αφορά τις εφαρμογές unicast. Στην unicast περίπτωση η προσωρινή αποθήκευση των πακέτων γίνεται με βάση την IP διεύθυνση προορισμού, σε καθένα από τους δρομολογητές πρόσβασης. Αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση των διαπομπών πολυεκπομπής ακριβώς επειδή η μετάδοση των προσωρινά αποθηκευμένων πακέτων πολυεκπομπής προς τον κινητό κόμβο μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο, δεν θα πρέπει να επηρεάσει τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής, που μοιράζονται το ίδιο φυσικό μέσο με τον κινητό κόμβο (για τον οποίο πραγματοποιήθηκε η αποθήκευση). Με άλλα λόγια, δεν είναι «ορθό» τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας να λάβουν διπλότυπα πακέτα εξαιτίας της αδυναμίας ενός κόμβου να επικοινωνήσει κάποιο χρονικό διάστημα. Έχοντας αυτή τη σχεδιαστική προσέγγιση κατά νου, η ανάπτυξη ενός «δίκαιου» μηχανισμού buffering, θα πρέπει να γίνεται με στόχο την εξυπηρέτηση αποκλειστικά του κόμβου που ζήτησε την αποθήκευση των πακέτων κι όχι την ομάδα πολυεκπομπής. Σε κάθε περίπτωση η αποθήκευση χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της κινητικότητας ενός χρήστη αποκλειστικά οπότε θα πρέπει να επηρεάζεται από το γεγονός ότι η κίνηση αφορά μία ομάδα τερματικών.

Η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού buffering πακέτων πολυεκπομπής στηρίζεται στην χρησιμοποίηση της δικτυακής υποδομής (υλικού και λογισμικού), που ήδη καθιστά δυνατή την προσωρινή αποθήκευση των unicast πακέτων για λογαριασμό ενός κινητού τερματικού. Με στόχο το διαχωρισμό και την αποθήκευση της κίνησης πολυεκπομπής του εκάστοτε κινητού κόμβου, προτείνεται η εγκατάσταση μίας νέας διόδου IP στον κόμβο NAR, επονομαζόμενης ως *NAR_to_nCoA_Tunnel*. Η συγκεκριμένη διόδος συνδέει το NAR με τον κινητό κόμβο στη νέα θέση του μετά τη διαπομπή. Η κατασκευή και λειτουργία της συγκεκριμένης διόδου θεωρείται κατά το χρονικό διάστημα στο οποίο αναμένεται η πρόσδεση του κινητού κόμβου σε ένα φυσικό δίκτυο του NAR και μόνο, δηλαδή κατά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο κινητός κόμβος δεν είναι φυσικά παρόν στο νέο δίκτυο ώστε να λάβει όσα πακέτα πολυεκπέμπονται. Το διάστημα αυτό προσδιορίζεται από τη στιγμή που παραδίδεται στο NAR το μήνυμα HI και μέχρι τη στιγμή που παραδίδεται το μήνυμα FNA.

Η παράδοση του μηνύματος HI σκανδαλίζει το NAR ώστε αρχικά να κατασκευάσει την παραπάνω διόδο IP (πράγμα το οποίο στην πράξη σημαίνει ότι προσδιορίζεται ένα νέο αναγνωριστικό για το κατασκευαζόμενο ιδεατό δίκτυο στο οποίο είναι πλέον συνδεδεμένος ο NAR - *NAR_to_nCoA_Tunnel* interface identifier). Στη συνέχεια και με βάση τις περιεχόμενες πληροφορίες αναφορικά με τη συμμετοχή του κινητού κόμβου σε ομάδες πολυεκπομπής που περιέχονται στο HI, προβλέπεται η προσθήκη στον *Πίνακα Προώθησης Κίνησης Πολυεκπομπής* (Multicast Forwarding Table) των κατάλληλων εγγραφών ώστε να καταστεί δυνατή η προώθηση των πακέτων κίνησης που ζήτησε ο κινητός κόμβος προς το ιδεατό δίκτυο που ορίζει η διόδος *NAR_to_nCoA_Tunnel*. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα έχει σαν αποτέλεσμα την ενθυλάκωση όλων των πακέτων για τις συγκεκριμένες ομάδες ή κανάλια πολυεκπομπής που καταφθάνουν στο NAR, σε unicast πακέτα τα οποία θα έχουν σαν διεύθυνση αποστολέα τη διεύθυνση του NAR και σαν διεύθυνση προορισμού τη νέα διεύθυνση του κινητού (nCoA). Όπως προαναφέρθηκε,

με βάση την τυπική λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6, όλα τα unicast πακέτα που καταφθάνουν στον NAR πριν την πρόσδεση του κινητού, αποθηκεύονται προσωρινά σε κατάλληλους γι' αυτό το σκοπό buffers μέχρις ότου παραδοθεί σε αυτόν το μήνυμα FNA. Σαν αποτέλεσμα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η δίοδος *NAR_to_nCoA_Tunnel*, ο παραπάνω μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης όλης της κίνησης πολυεκπομπής που αφορά τον εκάστοτε κινητό κόμβο και μόνο κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που αυτός δεν είναι σε θέση να τα λάβει, δηλαδή όταν εκτελεί τη διαπομπή στρώματος ζεύξης δεδομένων.

Η διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης θα πρέπει να τερματιστεί τη στιγμή που σηματοδοτείται η πρόσδεση του κινητού κόμβου στο δίκτυο του NAR. Στο σημείο αυτό ο τελευταίος θα πρέπει να τερματίσει τη λειτουργία της διόδου *IP NAR_to_nCoA_Tunnel* και επίσης να αφαιρέσει τις αντίστοιχες εγγραφές από τον *Πίνακα Προώθησης Κίνησης Πολυεκπομπής* που σχετίζονται με αυτή, ώστε να σταματήσει η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής προς τη δίοδο. Το Σχήμα 3 - 4 απεικονίζει τη συγκεκριμένη δυνατότητα δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα στον κόμβο NAR, όταν είναι ενεργή η δίοδος *NAR_to_nCoA_Tunnel*, δηλαδή στο διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής των μηνυμάτων HAck και FNA.



Σχήμα 3 - 4. Χρησιμοποιούμενες Δίοδοι IP (IP Tunnels) για την προώθηση και προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής κατά την προ-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης των πακέτων πολυεκπομπής για λογαριασμό ενός κινητού κόμβου στον NAR, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο αυτά καταφθάνουν σε αυτόν. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού buffering δεν διαχωρίζει τα πακέτα που αφικνούνται στον NAR από τον PAR, μέσω της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel*, ή μέσω του δένδρου διανομής, στην περίπτωση κατά την οποία ο NAR είναι ήδη ή έγινε εν τω μεταξύ μέλος του. Με άλλα λόγια ο μηχανισμός buffering είναι εντελώς ανεξάρτητος από τη μηχανισμό προώθησης και παράδοσης της κίνησης

για λογαριασμό του κινητού. Υπενθυμίζεται ότι αν ο NAR είναι ήδη μέλος μίας ομάδας πολυεκπομπής όταν λαμβάνει το μήνυμα HI, τότε, με βάση το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB, δεν σκανδαλίζεται η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής από τη δίοδο *PAR_to_NAR_Tunnel*. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τα παραπάνω, ο NAR συνεχίζει να προωθεί τα πακέτα πολυεκπομπής που καταφθάνουν σε αυτόν προς το φυσικό ασύρματο δίκτυο στο οποίο αναμένεται η πρόσδεση του κινητού κόμβου, ανεξάρτητα από το αν έχει συνδεθεί σε αυτόν ο κινητός κόμβος ή όχι κι ανεξάρτητα από το γεγονός ότι αυτά ενδέχεται να αποθηκεύονται προσωρινά για λογαριασμό ενός αναμενόμενου κινητού κόμβου. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε να μην επηρεαστεί η προώθηση πακέτων πολυεκπομπής προς ήδη συνδεδεμένους τερματικούς κόμβους στο δίκτυο του NAR.

3.3.1.2 Μετα-δραστική (Reactive) λειτουργία

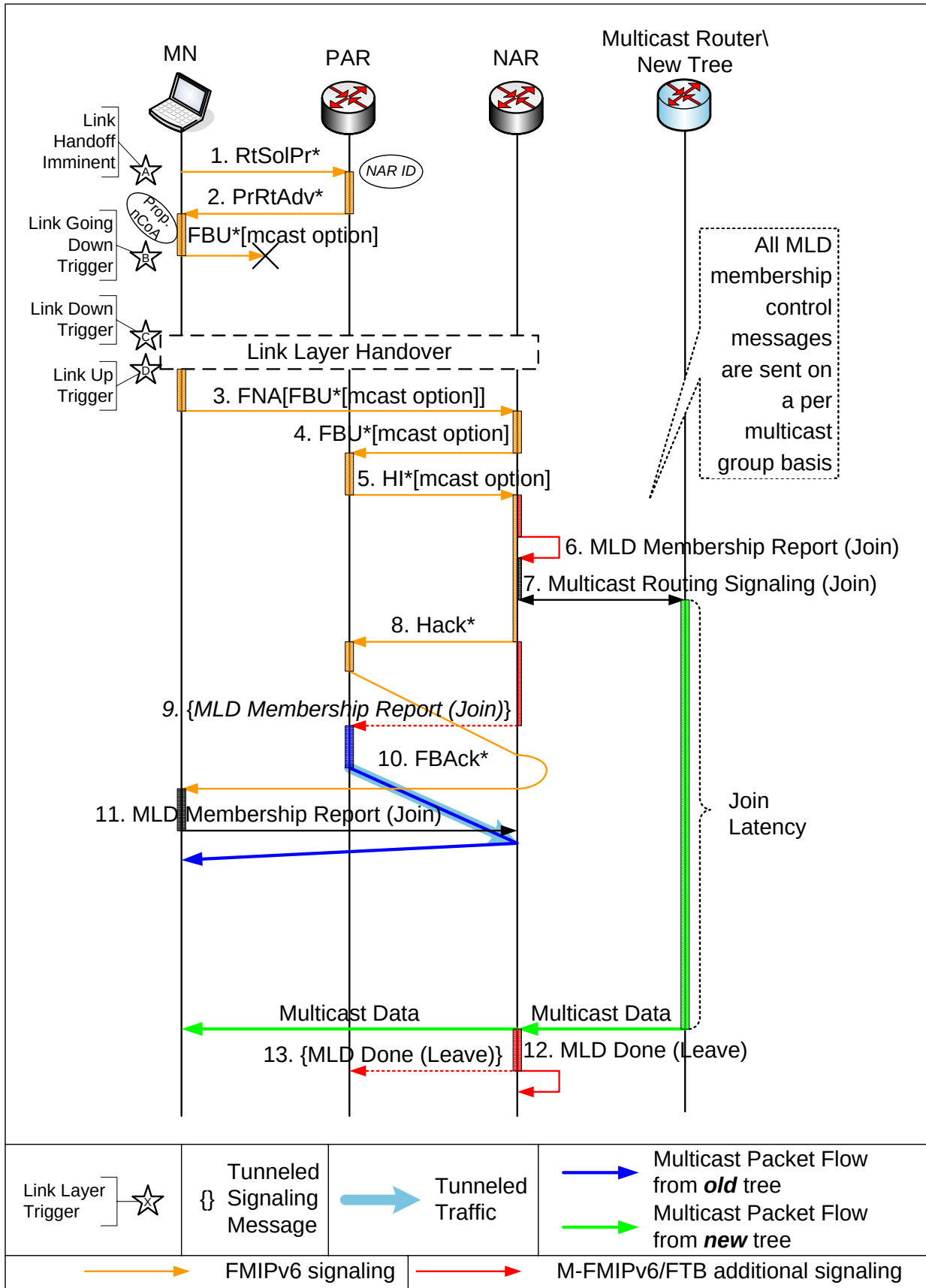
Η εκτέλεση της προ-δραστικής διαδικασίας σηματοδοσίας προϋποθέτει αφενός την ενημέρωση του κινητού κόμβου αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση της διαπομπής στο άμεσο μέλλον και αφετέρου την παράδοση του μηνύματος HI στον NAR μέσω του οποίου σηματοδοτείται η έναρξη της διαδικασίας υποστήριξης της ταχείας διαπομπής. Εντούτοις η βεβαιότητα ορθής (χωρίς σφάλματα) εκτέλεσης των συγκεκριμένων διαδικασιών δεν μπορεί να εγγυηθεί. Επίσης, ο κινητός κόμβος ενδέχεται να αποσυνδεθεί από το δίκτυο του PAR προτού ακόμη αρχίσει η predictive σηματοδοσία. Κατά συνέπεια υπάρχει αρκετά μεγάλη πιθανότητα ο κινητός κόμβος να συνδεθεί στο δίκτυο στο οποίο έχει προβλεφθεί, αλλά το νέο δίκτυο να μην είναι προετοιμασμένο κατάλληλα ώστε να το υποδεχθεί (δηλ. να μην έχει πραγματοποιηθεί από τον NAR η διαδικασία επιβεβαίωσης της μοναδικότητας της διεύθυνσης nCoA, που έχει σχηματίσει το κινητό κατά τη διαδικασία *Proxy Router Discovery*). Σε αυτήν την περίπτωση, σύμφωνα με το πρωτόκολλο *Neighbor Discovery for IPv6* αλλά και το *Mobile IPv6*, ο κινητός κόμβος, είναι υποχρεωμένος να εκτελέσει τις διαδικασίες *Αναζήτησης Δρομολογητή*, *Επισήμανσης Μετακίνησης* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, προτού προχωρήσει στην αποκατάσταση της επικοινωνίας του με τους κόμβους με τους οποίους έχει ήδη εγκατεστημένες συνόδους. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση που ο κινητός κόμβος έχει εγκατεστημένες συνόδους πολυεκπομπής για την επανεγκατάσταση των οποίων με χρήση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* απαιτείται η αποστολή των καταλλήλων μηνυμάτων MLD Αναφοράς Συμμετοχής, ώστε να σκανδαλιστεί η διαδικασία συμμετοχής του νέου δρομολογητή πρόσβασης στο δένδρο διανομής, (δηλ. μετά την ολοκλήρωση της *Ρύθμισης Διεύθυνσης*).

Με στόχο την αντιμετώπιση της παραπάνω αδυναμίας επικοινωνίας λόγω του κακού συγχρονισμού των διαδικασιών υποστήριξης διαπομπών των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων, ο κινητός κόμβος έχει τη δυνατότητα χρήσης του πρωτοκόλλου FMIPv6 κατά τη λεγόμενη *μετα-δραστική (reactive)* λειτουργία. Σύμφωνα με αυτή, ο τελευταίος χρησιμοποιεί τα μηνύματα του FMIPv6 ώστε από τη μία να πετύχει άμεση ρύθμιση της διεύθυνσής του αμέσως μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο, ενώ επιπρόσθετα επικοινωνεί με τον δρομολογητή που τον εξυπηρετούσε στο προηγούμενο της διαπομπής του δίκτυο (PAR), ώστε να καταστεί δυνατή η προώθηση των πακέτων κίνησης που αφορούν τις συνόδους στις οποίες συμμετέχει.

Αντίστοιχα με την εκτέλεση unicast μετα-δραστικών διαπομπών μέσω του FMIPv6, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB υποστηρίζει την εκτέλεση μετα-δραστικών διαπομπών πολυεκπομπής, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα στον κινητό κόμβο να καταστεί παραλήπτης του ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής από το νέο δίκτυο πιο σύντομα, παρά το γεγονός ότι για το αρχικό μετά τη διαπομπή χρονικό διάστημα ο δρομολογητής πρόσβασης δεν είναι μέλος του δένδρου διανομής. Η δυνατότητα αυτή προσφέρεται μέσω της χρήσης των μηνυμάτων σηματοδοσίας του προτεινόμενου πρωτοκόλλου και της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel*, που συνδέει τους δρομολογητές πρόσβασης που εξυπηρετούν το παλιό και το νέο δίκτυο. Το Σχήμα 3 - 5 παρουσιάζει τη διαδικασία σηματοδοσίας του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του για την εκτέλεση της οποίας υπενθυμίζεται ότι βασική προϋπόθεση αποτελεί η εκτέλεση της διαδικασίας πρόβλεψης της διαπομπής αλλά και η ολοκλήρωση της σηματοδοσίας *Proxy Router Discovery* αρχικά. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητός κόμβος τη στιγμή που συνδέεται στο νέο δίκτυο (όταν δηλαδή παραδίδεται το trigger Link Up), αναγνωρίζει ότι έχει συνδεθεί στο δίκτυο που είχε προβλεφθεί αρχικά, κι επίσης έχει ήδη σχηματίσει μία διεύθυνση nCoA με βάση το πρόθημα που του είχε κοινοποιηθεί μέσω του μηνύματος PrRtAdv. Επιπλέον είναι ενήμερος και για την IPv6 διεύθυνση του NAR.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτέλεση μιας διαπομπής προ-δραστικού τύπου θεωρείται ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία ο κινητός κόμβος αποσυνδεθεί από το δίκτυο του PAR προτού λάβει το μήνυμα FBACk ενώ ήδη έχει αποστείλει επιτυχώς το μήνυμα FBU από το παλιό δίκτυο στον PAR. Όπως προαναφέρθηκε, σε αυτήν την περίπτωση (βλέπε [12] και ενότητα 2.3.3.4), ο κινητός κόμβος παραλαμβάνει το μήνυμα FBACk αμέσως μετά την πρόσδεση του στο νέο δίκτυο, δεδομένου ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 - 3, το μήνυμα αποστέλλεται από τον PAR και προς τη έγκυρη nCoA του κινητού. Ο κινητός κόμβος είναι σε θέση να επιβεβαιώσει τη μη ολοκλήρωση ή εκτέλεση της διαδικασίας ταχείας διαπομπής από τη μη λήψη του μηνύματος FBACk (στην περίπτωση που είχε αποστείλει το μήνυμα FBU αλλά αυτό δεν παραδόθηκε λόγω κάποιου σφάλματος στη μετάδοση). Για το λόγο αυτό, μετά την παράδοση του *Link Up* trigger, κατασκευάζει το μήνυμα FNA στο οποίο όμως πλέον ενθυλακώνει επιπλέον το μήνυμα FBU που θα πρέπει να αποσταλεί στον PAR. Για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής, το μήνυμα FBU περιέχει, όπως ακριβώς και στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών, επιπλέον και το σχετικό με τις συμμετοχές σε ομάδες πολυεκπομπής του κινητού κόμβου κατάλληλο πεδίο (βλέπε ενότητα 3.3.1.4.2, Νέο Πεδίο: «Πληροφορία Συμμετοχής Πολυεκπομπής» - Multicast Subscription Options). Το μήνυμα FNA[FBU], αποστέλλεται προς το NAR.

Από το σημείο που παραδίδεται το μήνυμα FBU στον PAR και μετά, η διαδικασία είναι ακριβώς ίδια με αυτή που περιγράφηκε κατά την προ-δραστική λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Ειδικότερα, ο PAR ενημερώνει το NAR αναφορικά με την επιθυμία του κινητού να λάβει κίνηση πολυεκπομπής. Η ενημέρωση πραγματοποιείται μέσω του μηνύματος HI και η επιτυχής έκβαση της όλης διαδικασίας επιβεβαιώνεται από το HAcK όπως επιβάλει η μετα-δραστική λειτουργία του FMIPv6 για την υποστήριξη των unicast διαπομπών. Εν τω μεταξύ έχει σκανδαλιστεί η διαδικασία *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* του NAR μέσω της αποστολής, όπως



Σχήμα 3 - 5. Σηματοδότηση κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB

και στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών, του αυτοεπιστρεφόμενου μηνύματος *MLD Membership Report*. Σαν αποτέλεσμα της επεξεργασίας του τελευταίου μηνύματος, αποστέλλονται και τα κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης του πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολυεκπομπής. Μετά την αποστολή του HAcK, η διαδικασία προχωρά με τον NAR να εκδηλώνει το αίτημα για προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής από τον PAR μέσω του μηνύματος *MLD Αναφοράς Συμμετοχών*, που μεταδίδεται μέσω της διόδου IP, ενώ παράλληλα ο PAR επιστρέφει το μήνυμα FBAcK στο κινητό. Ο PAR αρχίζει να προωθεί τα πακέτα πολυεκπομπής σχεδόν αμέσως μετά την αποστολή του μηνύματος FBAcK. Η λήψη του τελευταίου από το κινητό προκαλεί την αποστολή του μηνύματος *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* ώστε να καταστεί εφικτή η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής ανεξάρτητα από την τοπολογία του δικτύου στρώματος 2 του νέου δικτύου. Η διαδικασία διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής ολοκληρώνεται μόλις ο NAR καταστεί μέλος του δένδρου διανομής από το βέλτιστο μονοπάτι. Στο σημείο αυτό αποστέλλεται το κατάλληλο μήνυμα *MLD Done* από την ομάδα από τον NAR, ώστε να ενημερωθεί ο PAR και να σταματήσει την προώθηση των πακέτων διαμέσου της διόδου IP. Αντίστοιχα αποστέλλεται και το αυτοεπιστρεφόμενο μήνυμα *MLD Done* για την αποκατάσταση της τάξης τοπικά στο NAR.

Αν η διεύθυνση που έχει σχηματίσει ο κινητός κόμβος μετά την εκτέλεση της διαπομπής στο νέο δίκτυο δεν είναι σωστή, ο NAR μετά τη λήψη του μηνύματος FNA[FBU] επιστρέφει στο κινητό ένα μήνυμα RtAdv το οποίο περιέχει στο πεδίο *NAACK option* μία νέα έγκυρη διεύθυνση και απορρίπτει το περιεχόμενο στο FNA μήνυμα FBU. Στη συνέχεια ο κινητός κόμβος ρυθμίζει τη νέα διεύθυνσή του και κατασκευάζει ένα νέο FBU μήνυμα (με βάση αυτή) το οποίο αποστέλλει απ' ευθείας στον PAR. Στην περίπτωση που η περιεχόμενη στο FNA nCoA είναι έγκυρη ο NAR αποθυλακώνει το FBU από αυτό και το προωθεί/δρομολογεί προς τον PAR χωρίς κανένα πρόβλημα όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Επιπρόσθετα, κατά την μετα-δραστική λειτουργία του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, η αίτηση συμμετοχής του νέου δρομολογητή πρόσβασης στο δένδρο διανομής θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ακόμη νωρίτερα. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3 - 5, ο νέος δρομολογητή πρόσβασης NAR εκδηλώνει το αίτημά του για συμμετοχή στο δένδρο διανομής μετά την παράδοση σε αυτόν του μηνύματος HI, παρά το γεγονός ότι έχει νωρίτερα επεξεργαστεί το μήνυμα FBU το οποίο περιέχει την απαραίτητη πληροφορία αναφορικά με τις συμμετοχές του κινητού κόμβου στις διάφορες ομάδες πολυεκπομπής. Είναι προφανές ότι το αίτημα για συμμετοχή του NAR στο δένδρο διανομής θα μπορούσε να εκδοθεί τη χρονική στιγμή που παραδίδεται σε αυτόν το FNA το οποίο περιέχει το FBU, όπως ακριβώς προτείνεται από το πρωτόκολλο M-FMIPv6 (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.2). Ο λόγος για τον οποίο δεν πραγματοποιείται το τελευταίο είναι ο εξής: κατά την εκτέλεση μίας διαπομπής το σημαντικό κομμάτι της καθυστέρησης προέρχεται κυρίως από την αδυναμία έγκαιρου σκανδαλισμού της διαδικασίας προώθησης των πακέτων κίνησης μέσω της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel* κι όχι από το πόσο πιο γρήγορα μπορεί να σκανδαλιστεί η διαδικασία *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Αυτή η παρατήρηση είναι εξαιρετικά σημαντική για την περίπτωση που η συγκεκριμένη καθυστέρηση είναι της τάξης των δευτερολέπτων που αντιστοιχεί στην εκτέλεση δια-τομεακών διαπομπών

(inter-domain, δηλ. διαπομπών ενός κινητού μεταξύ δύο διαφορετικών αυτόνομων δικτύων). Στις περιπτώσεις που πρόκειται για διαπομπές στις οποίες ένας κινητός κόμβος αλλάζει μεν δρομολογητή πρόσβασης αλλά η «απόσταση» του νέου με τον παλιό είναι μικρή (intra-domain, δηλ. της τάξης των 1-2 hops, που αντιστοιχεί σε καθυστέρηση μερικών δεκάδων msec), οι διαφορές στην επίδοση είναι πολύ μικρές. Αυτό ισχύει διότι αν και η επέκταση του δένδρου διανομής προς το νέο δρομολογητή πρόσβασης που εκτελείται μέσα στον ίδιο τομέα δικτύου διαρκεί πολύ λίγο, αντίστοιχα γρήγορα εκτελείται και η ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδότησης τόσο του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB όσο και του εκάστοτε πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολυεκπομπής. Σαν αποτέλεσμα το μήνυμα FBACk να παραδίδεται επίσης πολύ γρήγορα. Κατά συνέπεια, στην πράξη το μικρό όφελος που προκαλεί η βελτίωση της υπηρεσίας στην πρώτη περίπτωση δε δικαιολογεί την σοβαρή αύξηση της πολυπλοκότητας από την επεξεργασία του μηνύματος FBU στον NAR.

3.3.1.3 Απουσία προβλέψεων - λανθασμένες προβλέψεις/μετακινήσεις

Όπως αναλύθηκε στις ενότητες 2.3.3.4 (Fast Handovers for Mobile IPv6 – FMIPv6) και 3.1 (Το Περιβάλλον Εκτέλεσης Ταχέων Διαπομπών Πολυεκπομπής), η λειτουργία ενός μηχανισμού πρόβλεψης διαπομπών στη γενική περίπτωση, δεν μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα απόλυτης εγκυρότητας. Η βασική αιτία που προκαλεί τη συγκεκριμένη αβεβαιότητα είναι το γεγονός ότι η προετοιμασία και εκτέλεση διαπομπών σε ένα ασύρματο περιβάλλον εξαρτάται από μία πληθώρα τυχαίων γεγονότων που σχετίζονται με τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την υλοποίηση του φυσικού στρώματος και του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση εκτέλεσης μίας οξείας διαπομπής (hard handover), όπου ο κινητός κόμβος αποσυνδέεται από το τρέχον σημείο πρόσβασης, αποτιμά το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον στο οποίο κινείται και στη συνέχεια αποφασίζει σε ποιο από τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης θα συνδεθεί τελικά, η διαδικασία πρόβλεψης μπορεί να έχει αποτιμήσει ένα εντελώς διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον από αυτό το οποίο θα κληθεί να αποτιμήσει ο αλγόριθμος εκτέλεσης της διαπομπής. Ως εκ τούτου η πρόβλεψη αν και ενδέχεται να είναι ορθή με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, ενδέχεται να μην υποδείξει το ίδιο δίκτυο με αυτό που τελικά θα επιλέξει ο αλγόριθμος εκτέλεσης της διαπομπής. Γενικά η διαδικασία εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης λειτουργεί ανεξάρτητα από το μηχανισμό εκτέλεσης της πρόβλεψης και προετοιμασίας της διαπομπής· αυτό σημαίνει ότι είναι αρκετά πιθανό η πρώτη να εκτελεστεί προτού εκτελεστεί ή ολοκληρωθεί η εκτέλεση της δεύτερης. Ένας πολύ πιθανός λόγος που μπορεί να οδηγήσει σε αυτό, είναι για παράδειγμα το γεγονός ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μειώθηκε πολύ γρήγορα λόγω φαινομένων σκίασης (*shadow fading*) ή λόγω υψηλής ταχύτητας του κινητού, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει το χρονικό περιθώριο να εκτελεστεί ο μηχανισμός πρόβλεψης και το στρώμα ζεύξης να προχωρήσει άμεσα στην αναζήτηση ενός νέου σημείου πρόσβασης με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της ζεύξης.

Η αδυναμία συγχρονισμού της εκτέλεσης των διαδικασιών πρόβλεψης/προετοιμασίας μίας διαπομπής και του μηχανισμού εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών (unicast ή multicast), στην πράξη μεταφράζεται ως αδυναμία χρήσης του πρωτοκόλλου FMIPv6, ακόμη και κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του. Με στόχο

την αύξηση της ευρωστίας του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας στρώματος δικτύου, οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου FMIPv6 έχουν προβλέψει ότι ένας κινητός κόμβος είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό υποστήριξης της διαπομπής, ακόμη και στην περίπτωση που η πρόβλεψη δεν είναι σωστή ή η εκτέλεσή της δεν έχει πραγματοποιηθεί καθόλου. Σε αυτήν την περίπτωση ο κινητός κόμβος συνδέεται σε ένα δίκτυο στο οποίο ο NAR δεν είναι προετοιμασμένος να τον υποδεχθεί και ο κινητός κόμβος δεν έχει τη στιγμή της πρόσδεσής του, καμία πληροφορία σχετικά με το δίκτυο στο οποίο συνδέθηκε (τουλάχιστο σχετικά με το πρόβλημα διευθύνσεων που χρησιμοποιείται σε αυτό). Για την αντιμετώπιση της παραπάνω κατάστασης το πρωτόκολλο FMIPv6 προβλέπει ότι εκτελείται η ενονομαζόμενη στα πλαίσια της διατριβής, *πλήρως μετα-δραστικής διαπομπή*²⁸ (completely reactive handover) [12].

3.3.1.3.1 Πλήρως μετα-δραστική (Completely Reactive) λειτουργία

Σύμφωνα με την *πλήρως μετα-δραστική* λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6, ένας κινητός κόμβος αμέσως μετά την εκτέλεση μίας διαπομπής με λανθασμένη πρόβλεψη, απαιτείται, προτού προβεί σε οποιαδήποτε άλλη ενέργεια που αφορά στην υποστήριξη της διαπομπής του, να εκτελέσει τις τυπικές IPv6 διαδικασίες *Ανακάλυψης Δρομολογητή, Επισήμανσης Μετακίνησης και Ρύθμισης Διεύθυνσης*. Η ανάγκη εκτέλεσης των τελευταίων διαδικασιών επιβάλλεται από το γεγονός ότι τη στιγμή που εγκαθίσταται η νέα σύνδεση στρώματος ζεύξης, ο κινητός κόμβος δεν έχει καμία πληροφορία για το αν η διαπομπή του έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του δρομολογητή πρόσβασης που τον εξυπηρετεί (υπενθυμίζεται ότι στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών, η πληροφορία αυτού του είδους συλλέγεται κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Proxy Router Discovery* σε συνδυασμό με το μηχανισμό *AP Discovery*). Επιπλέον στην περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί αλλαγή του εξυπηρετούντος δρομολογητή πρόσβασης, δεν είναι γνωστό στον κινητό κόμβο το νέο πρόβλημα διευθύνσεων που χρησιμοποιείται στο νέο δίκτυο. Όταν εκτελεστούν οι παραπάνω διαδικασίες, ο κινητός κόμβος μπορεί να προχωρήσει στην εκτέλεση μίας μετα-δραστικής διαπομπής, όπως ακριβώς αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η προώθηση πακέτων κίνησης από το προηγούμενο δίκτυο του προς την νέα θέση του, εξαλείφοντας έτσι τουλάχιστο την καθυστέρηση που εισάγει η διαδικασία *MIPv6 Binding Update*. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτέλεση μίας πλήρως μετα-δραστικής διαπομπής, δεν μπορεί να αντιμετωπίσει την αδυναμία επικοινωνίας κατά την εκτέλεση των διαδικασιών *Ανακάλυψης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης* που προηγήθηκαν. Κατά συνέπεια ο κινητός κόμβος χάνει όλα τα πακέτα που καταφθάνουν στον PAR μετά την αποσύνδεσή του από το παλαιό δίκτυο και μέχρι τη στιγμή που φθάνει σε αυτόν το μήνυμα FBU. Υπενθυμίζεται ότι ο PAR προωθεί τα αποθηκευμένα και αφικνούμενα πακέτα προς τον νέο δρομολογητή πρόσβασης NAR καθ' όλη τη διάρκεια της προπαρασκευαστικής διαδικασίας. Εφόσον η πρόβλεψη είναι λανθασμένη, η προώθηση των πακέτων (αν πραγματοποιείται) τα οδηγεί προς έναν άλλο δρομολογητή με αποτέλεσμα να απορρίπτονται από αυτόν μετά το πέρας ενός μικρού χρονικού διαστήματος.

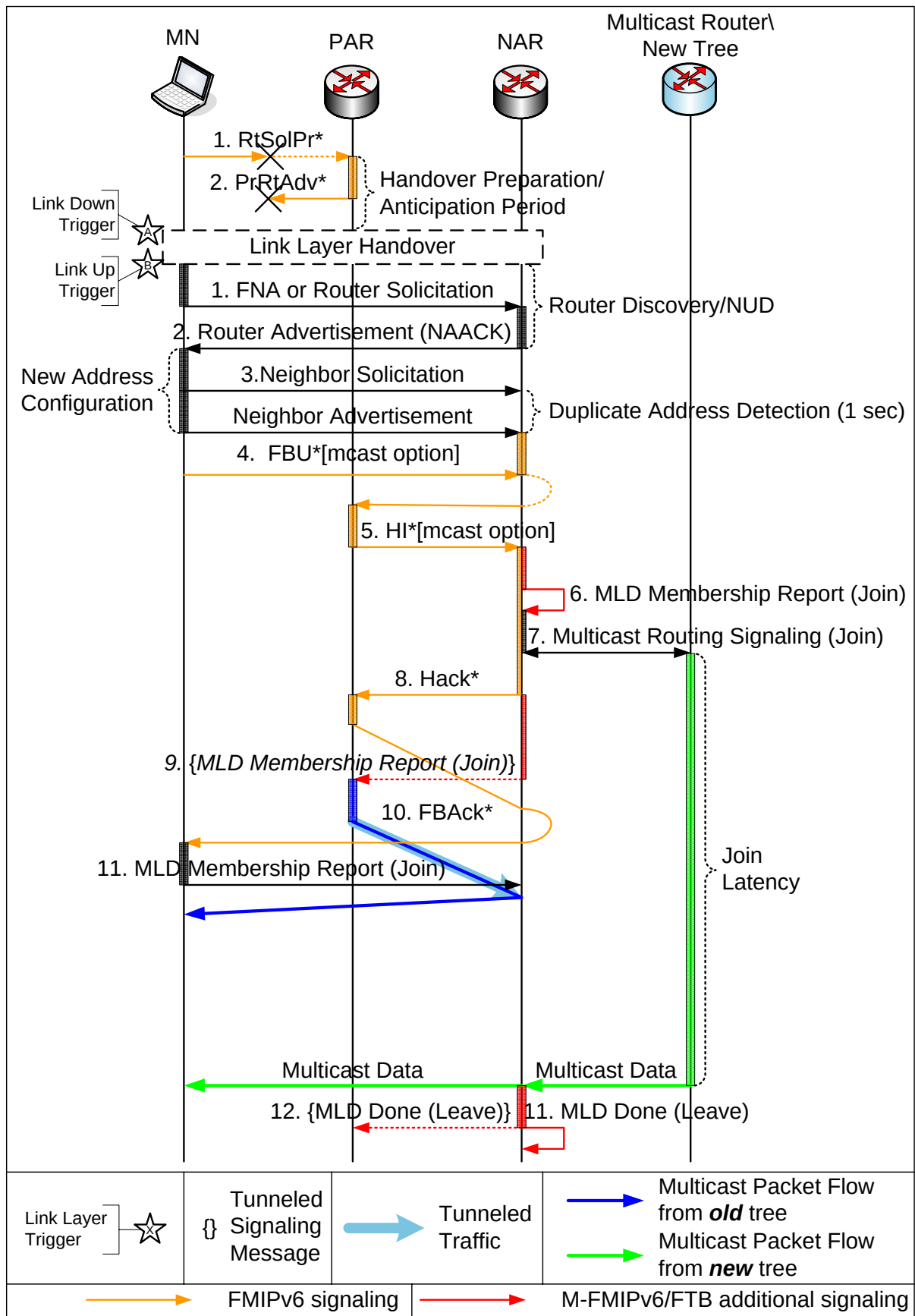
²⁸ Ο όρος «πλήρως μετα-δραστική διαπομπή» δεν χρησιμοποιείται στα κείμενα που περιγράφουν το πρωτόκολλο FMIPv6 αλλά έχει υιοθετηθεί στα πλαίσια της διατριβής καθαρά για λόγους ερμηνείας και ταυτοποίησης της συγκεκριμένης περίπτωσης.

Το Σχήμα 3 - 6 παρουσιάζει την λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB στην περίπτωση που έχει εκτελεστεί μία λανθασμένη πρόβλεψη. Η σηματοδότηση που ανταλλάσσεται μεταξύ των κόμβων του δικτύου είναι ίδια είτε ο μηχανισμός έχει καταλήξει σε λάθος συμπέρασμα, είτε η παράδοση του γεγονότος *Link Handover Imminent* δεν έχει πραγματοποιηθεί, είτε ο κινητός κόμβος έχει αποχωρήσει από το δίκτυο του PAR πριν αποστείλει ή παραλάβει αντίστοιχα ένα από τα proxy μηνύματα με τα οποία ξεκινούν οι διαδικασίες προετοιμασίας της διαπομπής. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η βασική διαφορά με την διαδικασία μετα-δραστικών διαπομπών, εντοπίζεται αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα ο κινητός κόμβος εκτελεί τη διαδικασία *Αναζήτησης Δρομολογητή* και αποστέλλει ένα μήνυμα *Router Solicitation* μέσω του οποίου επιζητά την άμεση αποστολή ενός μηνύματος *Router Advertisement* ώστε να ενημερωθεί για το δίκτυο στο οποίο έχει προσδεθεί. Στη συνέχεια προχωρά στη ρύθμιση μίας νέας διεύθυνσης κι αποστέλλει (πολυεκπέμπει) το μήνυμα *Neighbor Solicitation* όπως επιβάλει η εκτέλεση της διαδικασίας *Duplicate Address Detection*. Μετά το πέρας του προβλεπόμενου χρονικού διαστήματος για την επιβεβαίωση της μοναδικότητας της νέας διεύθυνσης, ο κινητός κόμβος είναι σε θέση να προχωρήσει στην εκτέλεση μίας μετα-δραστικής διαπομπής όπως προβλέπει το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB. Για το λόγο αυτό αφού κοινοποιήσει την παρουσία του νέο δίκτυο, μέσω του μηνύματος *Neighbor Advertisement*, προχωρά στην αποστολή του κατάλληλου μηνύματος FBU προς τον PAR που τον εξυπηρετούσε στο προηγούμενο της διαπομπής του δικτύο. Η αποστολή του μηνύματος FNA δεν είναι απαραίτητη. Από το σημείο αυτό και έπειτα η διαδικασία είναι πανομοιότυπη με αυτή που εκτελέστηκε στην περίπτωση που το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB λειτουργεί σύμφωνα με το μετα-δραστικό τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Η εκτέλεση της διαδικασίας πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών δεν εισάγει κάποιο νέο στοιχείο αναφορικά με τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής εφόσον το όλο ζήτημα σχετίζεται με το γενικότερο θέμα κινητικότητας του κινητού κι όχι με το είδος των υπηρεσιών που παρέχονται σε αυτό. Κατά συνέπεια πέρα από την αρχική καθυστέρηση που εισάγουν οι διαδικασίες *Router* και *Neighbor Discovery* που προηγούνται, ο κινητός κόμβος είναι σε θέση να λάβει τα κατάλληλα πακέτα πολυεκπομπής με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση των τυπικών μετα-δραστικών διαπομπών που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα.

3.3.1.4 Επεκτάσεις των Μηνυμάτων του FMIPv6 για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι επεκτάσεις που εισάγει το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB στα περιεχόμενα των μηνυμάτων του FMIPv6, με στόχο την υλοποίηση του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Οι εν λόγω επεκτάσεις αφορούν όλα τα μηνύματα του πρωτοκόλλου FMIPv6 πλην του FNA. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι προτεινόμενες επεκτάσεις έχουν διαφορετική μορφοποίηση ανάλογα με το αν επιθυμείται η υποστήριξη διαπομπών για κινητούς χρήστες οι οποίοι έχουν ενεργές ASM ή SSM συνόδους πολυεκπομπής, πράγμα το οποίο απαιτεί τουλάχιστο την υποστήριξη της πρώτης ή της δεύτερης έκδοσης του πρωτοκόλλου MLD αντίστοιχα (MLDv1 ή MLDv2). Αν και κάποιος θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι εφόσον ότι η υποστηριζόμενη από το MLDv2 λειτουργικότητα είναι επαρκής ώστε



Σχήμα 3 - 6. Διαδικασία σηματοδότησης κατά την Πλήρως Μετα-δραστική λειτουργία του M-FMIPv6/FTB

να καλύψει και τις δύο περιπτώσεις ASM και SSM εφαρμογών πολυεκπομπής, θα πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση της βασικής έκδοσης MLDv1 είναι εξαιρετικά απλούστερη. Επιπλέον δεδομένου ότι η παροχή SSM υπηρεσιών σε κινητούς χρήστες δεν έχει ακόμη αποκτήσει μεγάλη απήχηση σε σύγχρονα συστήματα, η χρήση του προτεινόμενο μηχανισμού μπορεί εφαρμοστεί αρχικά ή πιλοτικά για υπηρεσίες ASM. Πάντως η μετάβαση από την παλιά έκδοση στην νέα, ή ο συνδυασμός τους για την υποστήριξη SSM υπηρεσιών, είναι εξαιρετικά προφανής από τη σκοπιά του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, και δε χρήζει περεταίρω ανάλυσης.

Για την υποστήριξη M-FMIPv6/FTB διαπομπών πολυεκπομπής, ο κινητός κόμβος είναι απαραίτητο να γνωρίζει εάν ο νέος δρομολογητής πρόσβασης NAR, έχει τη δυνατότητα να αναλάβει την υποστήριξη της διαπομπής. Οι λόγοι που επιβάλλουν την ικανοποίηση της συγκεκριμένης απαίτησης είναι πολλαπλοί: πρώτον στη θετική περίπτωση ο κινητός κόμβος ενημερώνεται ώστε να εισάγει τις κατάλληλες πληροφορίες στο μήνυμα FBU και να εκκινήσει άμεσα τη διαδικασία. Στην αρνητική περίπτωση αντίστοιχα ο κινητός κόμβος έχει την επιλογή να χρησιμοποιήσει κάποιον άλλο μηχανισμό (όπως για παράδειγμα το πρωτόκολλο MIPv6 μέσω της διαδικασίας *Οικείων Συμμετοχών*, βλέπε ενότητες 2.4.1, 2.4.1.1) μέσω του οποίου θα καταστεί δυνατή η αποκατάσταση της επικοινωνίας έστω και με χειρότερη ποιότητα. Επιπρόσθετα, η κοινοποίηση της συγκεκριμένης πληροφορίας είναι αρκετά σημαντική και για την περίπτωση της υποστήριξη κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής, εφόσον με αυτόν τον τρόπο ο κινητός κόμβος ενημερώνεται αναφορικά με τη δυνατότητα του NAR να συμμετάσχει σε δένδρα διανομής λόγω εφαρμογής κάποιας πολιτικής του νέου αυτόνομου συστήματος στο οποίο εισέρχεται.

Δεδομένου ότι η διαχείριση κι ο έλεγχος συμμετοχής σε συνόδους πολυεκπομπής διαφοροποιείται ανάλογα με το αν η ακολουθείται το μοντέλο ASM ή SSM, ο κινητός κόμβος θα πρέπει να ενημερωθεί ειδικά για το αν το νέο δίκτυο υποστηρίζει την παροχή υπηρεσιών ASM ή/και SSM. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητός κόμβος θα πρέπει να ενημερωθεί για το ποια έκδοση του πρωτοκόλλου MLD χρησιμοποιείται από το νέο δίκτυο (δηλ. MLDv1 ή/και MLDv2). Αυτό είναι απαραίτητο εφόσον για την εκτέλεση διαπομπών πολυεκπομπής, θα πρέπει ίσως να χρησιμοποιηθεί διαφορετική έκδοση του πρωτοκόλλου MLD, που εξαρτάται τόσο από το είδος της συνόδου όσο και από την έκδοση του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται στο παλιό αλλά και στο νέο δίκτυο. Με βάση τη σηματοδότηση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB που αναλύθηκε νωρίτερα, το ζητούμενο είναι να απαντηθεί το ερώτημα *«ποιο είναι το κατάλληλο πρωτόκολλο που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί από τη μία για την εκτέλεση του μηχανισμού "Απομακρυσμένων Συμμετοχών" στο νέο δίκτυο, και από την άλλη για την εκκίνηση του μηχανισμού προώθησης της κίνησης μέσω της διόδου PAR_to_NAR_Tunnel;»*.

Οι απαντήσεις δεν είναι προφανείς· στην απλή περίπτωση, στην οποία υποστηρίζεται τουλάχιστο το ίδιο πρωτόκολλο στα δύο δίκτυα, δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος ώστε να υπάρξει αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο προσδιορίζονται οι συμμετοχές του κινητού κόμβου στις διάφορες ομάδες πολυεκπομπής, οπότε δεν προτείνεται η μεταβολή του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου, είτε χρησιμοποιείται το MLDv1 τόσο στο παλιό όσο και στο νέο δίκτυο, είτε το MLDv2, είτε αμφότερα. Στην περίπτωση κατά την οποία στο νέο δίκτυο υποστηρίζεται μόνο το MLDv2, ενώ το παλιό υποστηρίζει μόνο το MLDv1, επίσης τα πράγματα είναι σχετικά απλά· εν γένει η

σχεδίαση του MLDv2 διαθέτει τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία το καθιστούν backwards compatible για χρήση του σε συστήματα που ακολουθούν το MLDv1. Στην αντίθετη περίπτωση εντούτοις, όπου το νέο δίκτυο υποστηρίζει μόνο το MLDv1, ενώ στο παλιό υποστηρίζεται η έκδοση MLDv2 η κατάσταση είναι περισσότερο σύνθετη. Το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB με στόχο την ικανοποίηση της απαίτησης για διατήρηση της επικοινωνίας σε όσο το δυνατό περισσότερες περιπτώσεις, παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης μίας διαπομπής μιας ASM συνόδου πολυεκπομπής, εφόσον η χρήση του MLDv1 για την υποβολή των αιτημάτων που θα πυροδοτήσουν την προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής από το παλιό στο νέο δίκτυο είναι εφικτή (λόγω των backwards compatibility χαρακτηριστικών του MLDv2). Το αντίστροφο εντούτοις δεν μπορεί να υποστηριχθεί δεδομένου ότι εν γένει η προώθηση ενός SSM ρεύματος από μία ASM υποδομή είναι προβληματική. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητός κόμβος θα πρέπει να χρησιμοποιήσει κάποιο άλλο μηχανισμό για την παραλαβή του ρεύματος SSM που επιθυμεί ή θα πρέπει να αρκестεί στην χαλάρωση του μηχανισμού φιλτραρίσματος που εκτελεί ο μηχανισμός SSM στην ολοκληρωτική κατάλυσή του σύμφωνα με το μοντέλο ASM. Η τελευταία παρατήρηση αποτελεί αντικείμενο περεταίρω έρευνας. Ο Πίνακας 3 - 1 που ακολουθεί συνοψίζει τα παραπάνω.

Πίνακας 3 - 1. Χρησιμοποιούμενη έκδοση πρωτοκόλλου MLD κατά τη διαδικασία υποστήριξης διαπομπών με χρήση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB

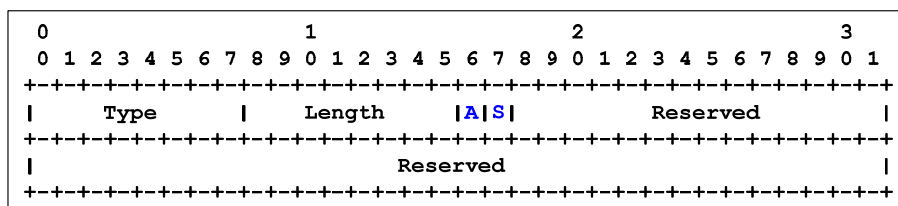
Υποστηριζόμενο από τους PAR και NAR πρωτόκολλο ελέγχου συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής		PAR		
		<i>MLDv1</i>	<i>MLDv2</i>	<i>MLDv1 ή MLDv2</i>
NAR	<i>MLDv1</i>	MLDv1	MLDv1 ^a	MLDv1 ^a
	<i>MLDv2</i>	MLDv1 ^b και MLDv2 ^c	MLDv2	MLDv1 ^{b,d} ή MLDv2
	<i>MLDv1 ή MLDv2</i>	MLDv1	MLDv2	MLDv1 ή MLDv2
^a Μόνο για ASM υπηρεσίες. SSM διαπομπή δεν υποστηρίζεται ^b Μόνο για την σηματοδότηση διαμέσου της διόδου IP <i>PAR_to_NAR_Tunnel</i> ^c Μόνο για την σηματοδότηση εκκίνησης/σκανδαλισμού της διαδικασίας <i>Απομακρυσμένων Συμμετοχών</i>				

3.3.1.4.1 Επεκτάσεις μηνυμάτων *RtSolPr* και *PrRtAdv*

Η προετοιμασία μίας unicast διαπομπής υποστηριζόμενης από το FMIPv6, ανεξάρτητα από τον τύπο της (προ-δραστική ή μετα-δραστική), υλοποιείται μέσω της ανταλλαγής των μηνυμάτων *RtSolPr* και *PrRtAdv* κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Proxy Router Discovery*. Ο κινητός κόμβος ενημερώνεται αναφορικά με τις δυνατότητες των υποψήφιων δικτύων στα οποία μπορεί (έχει τη δυνατότητα) να διαπεμφθεί. Το επιστρεφόμενο μήνυμα *PrRtAdv* περιέχει πληροφορίες στρώματος δικτύου, όπως η IP διεύθυνση του NAR και το πρόθημα διευθύνσεων που χρησιμοποιείται στα φυσικά δίκτυα τα οποία αυτός εξυπηρετεί. Για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής η συγκεκριμένη πληροφορία χρειάζεται να επεκταθεί ώστε να συμπεριληφθούν στοιχεία που αφορούν στις δυνατότητες του νέου δρομολογητή για παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής.

Δεδομένου ότι η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής αναφέρεται στο καθένα φυσικό υποδίκτυο του δρομολογητή (κι όχι στον δρομολογητή καθ' αυτό), η σχετική πληροφορία θα πρέπει να παρέχεται ανά διεπαφή του δρομολογητή προς τα φυσικά δίκτυα (όπως δηλαδή ακριβώς και το πρόγραμμα διευθύνσεων που αυτός ανακοινώνει ή τη διεύθυνση στρώματος ζεύξης). Για το λόγο αυτό το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB προτείνει τη χρήση ενός νέου πεδίου το οποίο επεκτείνει το μήνυμα PrRtAdv, που ονομάζεται *Multicast Router Capability Option* και ακολουθεί τη μορφοποίηση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 - 7. Το συγκεκριμένο πεδίο επεκτείνει το πεδίο AR-Info στον όρο *[AR-ID, AR-Info]_tuple* που ορίζεται στο [3]. Το συγκεκριμένο πεδίο αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Type: ακέραιος χωρίς πρόσημο ο οποίος ταυτοποιεί τον τύπο του προτεινόμενου πεδίου *Multicast Router Capability Option* (σε σχέση με άλλα πεδία που χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο FMIPv6)
- Length: ακέραιος χωρίς πρόσημο που αποκαλύπτει το μήκος του πεδίου σε πολλαπλάσια των 8 οκτάδων δυαδικών ψηφίων. Προφανώς η τιμή του είναι ίση με 1.
- A flag/bit: Όταν έχει τιμή 1, σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος δρομολογητής χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MLDv1 στη διεπαφή που ταυτοποιείται από την *[AR-ID, AR-Info]_tuple* στην οποία περιέχεται κι ότι ο δρομολογητής είναι σε θέση να υποστηρίξει διαπομπές με χρήση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Όταν έχει τιμή 0 σημαίνει ότι ο δρομολογητής δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το MLDv1 για την υποστήριξη ταχέων διαπομπών.



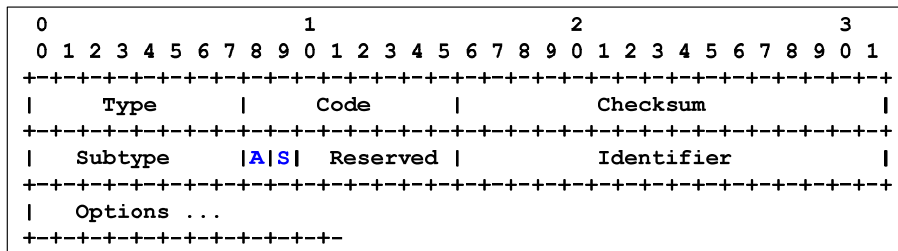
Σχήμα 3 - 7. Multicast Router Capability Option

- S flag/bit: Όταν έχει τιμή 1 σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος δρομολογητής χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MLDv2 στη διεπαφή που ταυτοποιείται από την *[AR-ID, AR-Info]_tuple* στην οποία περιέχεται κι ότι ο δρομολογητής είναι σε θέση να υποστηρίξει διαπομπές με χρήση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Όταν έχει τιμή 0 σημαίνει ότι ο δρομολογητής δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το MLDv2 για την υποστήριξη ταχέων διαπομπών.

Με βάση τη μορφοποίηση του πεδίου *Multicast Router Capability Option* είναι προφανές ότι ο κινητός κόμβος έχει τη δυνατότητα να ενημερωθεί για κάθε έκδοση του πρωτοκόλλου ξεχωριστά ικανοποιώντας με αυτό τον τρόπο το σύνολο των απαιτήσεων που αναλύθηκαν νωρίτερα.

Με στόχο τον περιορισμό της ανακοινωμένης πληροφορίας πολυεκπομπής εντός του μηνύματος PrRtAdv, δηλαδή την αποφυγή εισαγωγής του πεδίου *Multicast Router Capability Option* σε αυτό, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB προβλέπει επιπλέον την επέκταση του μηνύματος RtSolPr κατάλληλα. Το τροποποιημένο μήνυμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 - 8. Όπως είναι προφανές, στο μήνυμα έχουν εισαχθεί επιπλέον δύο δυαδικά ψηφία, A και S, μέσω των οποίων ο κινητός κόμβος κοινοποιεί στον PAR του ότι επιθυμεί να ενημερωθεί αναφορικά με τις δυνατότητες του

NAR να υποστηρίξουν ταχείς διαπομπές με χρήση του πρωτοκόλλου MLDv1 και MLDv2 αντίστοιχα.



Σχήμα 3 - 8. Τροποποιημένο μήνυμα RtSolPr για την υποστήριξης διαπομπών πολυεκπομπής σύμφωνα με το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB

3.3.1.4.2 Νέο Πεδίο: «Πληροφορία Συμμετοχής Πολυεκπομπής» - *Multicast Subscription Options*

Όπως αναλύθηκε, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB στηρίζεται στην κοινοποίηση, από την πλευρά του κινητού κόμβου προς το δίκτυο, της πληροφορίας που αφορά στις συμμετοχές του πρώτου σε ομάδες ή κανάλια πολυεκπομπής. Για τη μεταφορά της συγκεκριμένης πληροφορίας συμμετοχής, έχει οριστεί ένα νέο πεδίο το οποίο επεκτείνει τα περιεχόμενα των μηνυμάτων FBU, HI, HAcK και FBAcK. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η μορφοποίηση του νέου πεδίου, ενονομαζόμενου ως *Multicast Subscription Option*.

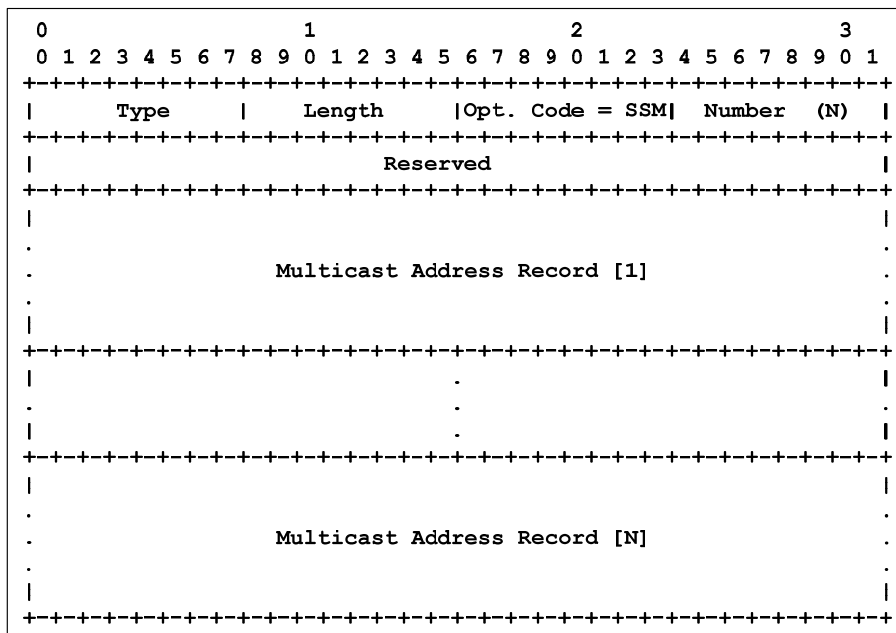
Για την υποστήριξη διαπομπών που αφορούν ASM ή SSM υπηρεσίες πολυεκπομπής η απαραίτητη πληροφορία που θα πρέπει να προωθηθεί από το κινητό δεν είναι ίδια. Με στόχο να υποστηριχθούν και οι δύο τύποι υπηρεσιών, όπως περιγράφεται στον Πίνακας 3 - 1, στη συνέχεια παρουσιάζεται η μορφοποίηση του πεδίου *Multicast Subscription Option* ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη έκδοση του πρωτοκόλλου MLD.

MLDv1 – ASM

Το Σχήμα 3 - 9 απεικονίζει τα περιεχόμενα του πεδίου *Multicast Subscription Option* για την περίπτωση της υποστήριξης ASM διαπομπών M-FMIPv6/FTB. Αυτά είναι:

- Type: ακέραιος χωρίς πρόσημο ο οποίος ταυτοποιεί τον τύπο του προτεινόμενου πεδίου *Multicast Router Capability Option* (σε σχέση με άλλα πεδία που χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο FMIPv6)
- Length: ακέραιος χωρίς πρόσημο που αποκαλύπτει το μήκος του πεδίου πολλαπλάσια των 8 οκτάδων δυαδικών ψηφίων. Προφανώς η τιμή του είναι ίση με 1.
- Option Code (Opt. Code): ακέραιος χωρίς πρόσημο ο οποίος διαχωρίζει/ταυτοποιεί το συγκεκριμένο πεδίο σε σχέση με το ακόλουθο. Ο συγκεκριμένος κωδικός καθορίζει τη μορφοποίηση του υπόλοιπου μέρους του πεδίου. Η τιμή του συγκεκριμένου πεδίου αντιστοιχεί στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MLDv1 για την υποστήριξη της διαπομπής που αφορά εφαρμογές ASM.
- Number (N): ακέραιος χωρίς πρόσημο ο οποίο αποκαλύπτει το πλήθος των περιεχομένων στο υπόλοιπο του πεδίου *Διευθύνσεων Πολυεκπομπής* (Multicast Address [i]) για τις οποίες ζητείται η υποστήριξη ταχέων διαπομπών.

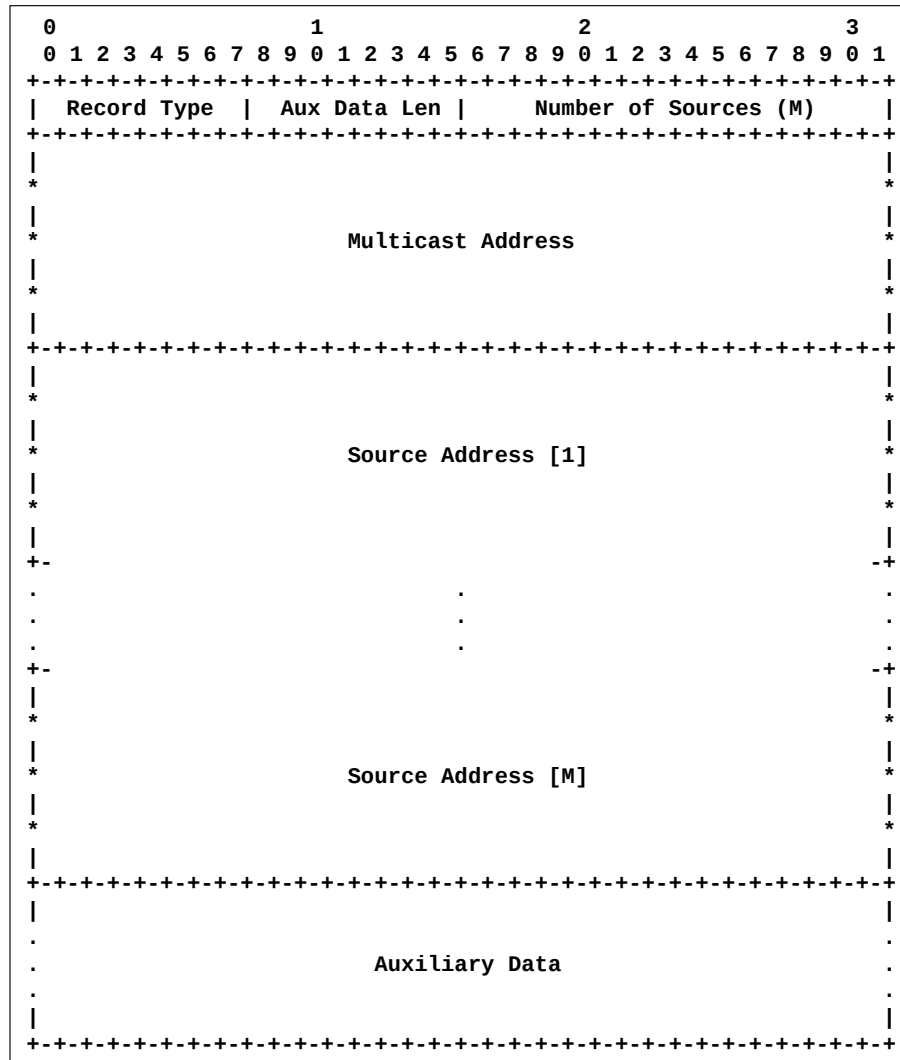
- Number (N): ακέραιος χωρίς πρόσημο ο οποίο αποκαλύπτει το πλήθος των περιεχομένων στο υπόλοιπο του πεδίου Πίνακες Διευθύνσεων Πολυεκπομπής (Multicast Address Record [i]) για τις οποίες ζητείται η υποστήριξη ταχέων διαπομπών.



Σχήμα 3 - 10. Πεδίο SSM Multicast Subscription Option για τη μεταφορά πληροφορίας συμμετοχών πολυεκπομπής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MLDv2

- Multicast Address Record [i]: Το συγκεκριμένο πεδίο περιέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία μέσω της οποίας μπορεί να ταυτοποιηθούν τα διάφορα SSM κανάλια για τα οποία επιθυμείται ή υποστηρίζεται εκτέλεση ταχέων διαπομπών με χρήση του M-FMIPv6/FTB. Η σημασιολογία των περιεχομένων αναγνωριστικών των καναλιών, διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του μηνύματος το οποίο μεταφέρει το συγκεκριμένο option. Για την περίπτωση των FBU και HI μεταφέρονται τα αναγνωριστικά για τα οποία επιθυμείται από το κινητό η υποστήριξη ταχέων διαπομπών. Αντίστοιχα για τα HAcK και FBAcK μεταφέρονται τα αναγνωριστικά για τα οποία ο NAR δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει ταχείς διαπομπές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μορφοποίηση του συγκεκριμένου πεδίου δεν είναι νέα· αντίθετα έχει χρησιμοποιηθεί η ήδη προτυποποιημένη μορφή που έχουν τα συγκεκριμένα πεδία όπως ορίζονται από το πρωτόκολλο MLDv2 [7] (χρησιμοποιούνται κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων αναφοράς συμμετοχής σε SSM κανάλια πολυεκπομπής). Το Σχήμα 3 - 11 που ακολουθεί παρουσιάζει τη μορφοποίηση του συγκεκριμένου πεδίου ενώ τα περιεχόμενά του αναλύονται στη συνέχεια:
- ο Record Type: Τύπος του συγκεκριμένου Record με βάση τους ορισμούς που δίνονται στο [7]. Ο τύπος χαρακτηρίζει αν η συμμετοχή στο κανάλι πραγματοποιείται μέσω της επιλογής μόνο των συγκεκριμένων πηγών κίνησης πολυεκπομπής που περιέχονται στη συνέχεια στη λίστα Source Address [j] (INCLUDE mode) ή αντίστοιχα μέσω της εξαίρεσης των πηγών πολυεκπομπής που περιέχονται στη λίστα Source Address [j] (EXCLUDE mode).

- ο Auxiliary Field Data Length: Μήκος πεδίου Auxiliary Data που ακολουθεί.
- ο Number of Sources (M): Πλήθος διευθύνσεων πηγών πολυεκπομπής που ακολουθούν στο πεδίο Source Address [j].
- ο Multicast Address: Διεύθυνση πολυεκπομπής που χαρακτηρίζει το SSM κανάλι πολυεκπομπής που ορίζει το Record.



Σχήμα 3 - 11. Μορφοποίηση πεδίου Multicast Address Record [7]

- ο Source Address [j]: Λίστα διευθύνσεων πηγών κίνησης πολυεκπομπής που ορίζουν το SSM κανάλι.
- ο Auxiliary Data: Πεδίο επιπλέον πληροφορίας. Κατά τη φάση της συγγραφής το πεδίο δε χρησιμοποιείται (έχει μηδενικό μήκος), εφόσον δεν έχει προτυποποιηθεί κάποια διαδικασία στα πλαίσια του πρωτοκόλλου MLDv2 η οποία να μεταφέρει σχετική πληροφορία μέσω αυτού. Η χρήση του προτείνεται ούτως ώστε να καλύψει ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις του πρωτοκόλλου.

3.3.2 Διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών του M-FMIPv6/FTB

Όπως έχει αναφερθεί στο 2^ο Κεφάλαιο (ενότητα 2.4.3), το πρόβλημα της διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής είναι αρκετά διαφορετικό από αυτό της κινητικότητας παραληπτών, επειδή ακριβώς απαιτεί πέρα από την ανακατασκευή ενός μικρού ή μεγάλου κομματιού του δένδρου διανομής, επιπλέον και την από άκρο-σε-άκρο προώθηση μηνυμάτων σηματοδότησης ώστε να ανανεωθεί η αποθηκευμένη στους ενδιάμεσους δρομολογητές πληροφορία προώθησης (ιδιαίτερα για την περίπτωση SSM εφαρμογών). Σε αυτό το πλαίσιο, η λειτουργία μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής χρειάζεται να παρέχει τα απαραίτητα μέσα ώστε, παρά το γεγονός οι προτεινόμενες λύσεις δεν πραγματοποιούν βέλτιστη χρήση των δικτυακών κυρίως πόρων, τουλάχιστο να είναι εφικτή η συνέχιση της επικοινωνίας μεταξύ των πηγών και των παραληπτών για το χρονικό διάστημα στο οποίο επιχειρείται η ανακατασκευή του δένδρου διανομής. Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί ο τρόπος²⁹ με τον οποίο γίνεται εφικτή η επέκταση του προτεινόμενου από τη διατριβή πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, σε ένα περιβάλλον ταχέων διαπομπών για κινητές πηγές κίνησης πολυεκπομπής. Η βασική λύση στο πρόβλημα υποστήριξης διαπομπών πηγών πολυεκπομπής, διαχωρίζεται ανάλογα με το αν η εκτελούμενη υπηρεσία πολυεκπομπής ακολουθεί το μοντέλο ASM ή SSM. Και στις δύο περιπτώσεις, η λύση θεωρεί έναν προ-δραστικό τρόπο κατασκευής του δένδρου διανομής σκανδαλίζοντας τη διαδικασία σηματοδότησης πριν την εκτέλεση της διαπομπής, εφόσον αυτό είναι εφικτό.

Για την περίπτωση της ASM κίνησης προτείνεται η χρήση μίας εφάμιλλης της διαδικασίας *Tree Initialization*, που προτείνεται στο [13]. Η συγκεκριμένη τεχνική προτείνει την κατασκευή του νέου δένδρου διανομής με χρήση πακέτων πολυεκπομπής χωρίς φορτίο (μόνο επικεφαλίδες πρωτοκόλλου IP). Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα περιορισμού του δικτυακού φορτίου που περνάει στο δίκτυο κατά τη φάση κατασκευής του δένδρου. Στην περίπτωση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB η τεχνική *Tree Initialization*, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προ-δραστικά, δηλαδή νωρίτερα από την προσάρτηση της κινητής πηγής στο νέο δίκτυο. Το σημείο στο οποίο πυροδοτείται η επέκταση του δένδρου διανομής από το νέο δίκτυο αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που έχει ολοκληρωθεί η επεξεργασία του μηνύματος HAcK. Σε αυτό το σημείο ο κόμβος NAR, έχει ενημερωθεί αναφορικά με τις ομάδες πολυεκπομπής για τις οποίες λειτουργεί ως πηγή. Τονίζεται ότι για την υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών πηγών κίνησης πολυεκπομπής, η λειτουργία του M-FMIPv6/FTB προϋποθέτει την χρήση ενός ενδιάμεσου στρώματος μεταξύ του στρώματος δικτύου και του στρώματος μεταφοράς δεδομένων μέσω της χρήσης της *Home Address* του κινητού κόμβου (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.3, HoA Option) που θα καταστήσει διαφανή τη διαπομπή της πηγής ως προς το σύνολο των μελών της ομάδας πολυεκπομπής.

²⁹ Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι βασικές ιδέες που περιγράφονται στην παρούσα ενότητα και αφορούν τη διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής δεν είναι πρωτότυπες αλλά αποτελούν αντικείμενο και αποτέλεσμα της έρευνας που παρουσιάζεται στην ενότητα 2.4.2.2.3 και τις σχετικές αναφορές.

Για την περίπτωση SSM εφαρμογών, η λύση μπορεί να προσεγγιστεί μέσω του μηχανισμού *Supporting Mobile SSM Sources for IPv6* (MSSMSv6) που αναλύεται στην ενότητα 2.4.2.2.3. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός επίσης προτείνει την ταυτόχρονη χρήση δύο δένδρων διανομής, του προηγούμενου της διαπομπής και του νέου. Με βάση το περιβάλλον ταχέων διαπομπών, η κατασκευή του νέου δένδρου μπορεί να ξεκινήσει αμέσως μετά την παράδοση του μηνύματος FBack στον τερματικό κόμβο. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του MSSMSv6, σε αυτό το σημείο η κινητή πηγή θα πρέπει να ενημερώσει το σύνολο των μελών της SSM ομάδας πολυεκπομπής αναφορικά με την επικείμενη αλλαγή της διεύθυνσής της. Στη συνέχεια και μέχρις ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία σηματοδοσίας για την κατασκευή του νέου δένδρου διανομής, η κινητή πηγή θα προωθεί τα πακέτα μέσω τόσο του παλαιού όσο και του νέου δένδρου διανομής. Ιδιαίτερα για τη φάση σύνδεσης της πηγής στο νέο δίκτυο, αυτό μπορεί να καταστεί δυνατό μέσω της αμφίδρομης διόδου *PAR_to_nCoA_tunnel* που έχει προδιαγραφεί από τη βασική έκδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6. Η ακύρωση της προώθησης κίνησης στο παλαιό δένδρο διανομής θα πραγματοποιηθεί μόλις επιβεβαιωθεί η μετάβαση όλων μελών της ομάδας στο νέο. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι και στην περίπτωση αυτή απαιτείται η εισαγωγή της HoA Option στα εξερχόμενα από την κινητή πηγή πακέτων πολυεκπομπής, ώστε η διαπομπή να παραμένει διαφανής στα ανώτερα στρώματα των παραληπτών κίνησης.

Για την περίπτωση που θεωρείται ο μηχανισμός Tree Morphing, δεδομένου ότι η κινητικότητα αντιμετωπίζεται στο επίπεδο του πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολυεκπομπής, δεν τίθεται κάποιο θέμα διασυνεργασίας των δύο μηχανισμών (δηλαδή η ενοποίησή τους είναι άμεση). Σε αυτή την περίπτωση και με βάση τη λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού το αποκλειστικό όφελος προκύπτει από τη δυνατότητα άμεσης ρύθμισης της διεύθυνσης της κινητής πηγής τη στιγμή πρόσδεσής της στο νέο δίκτυο (δηλ. δεν υπάρχει επιπλέον καθυστέρηση στην εκκίνηση του συγκεκριμένου μηχανισμού). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον η γενικότερη φιλοσοφία στη σχεδίαση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB έχει γίνει με γνώμονα την ικανοποίηση της θεμελιώδους απαίτησης για ελαχιστοποίηση των προβλημάτων εφαρμογής (deployment), η χρήση του μηχανισμού Tree Morphing δεν κρίνεται ρεαλιστική κατά τη φάση της συγγραφής και δεν θα αναλυθεί περεταίρω.

3.3.3 Ποιότητα Υπηρεσίας

Στις προηγούμενες ενότητες κατέστη σαφές ότι βασικό μέλημα της λειτουργίας του μηχανισμού M-FMIPv6/FTB είναι η κατά το δυνατό ταχύτερη εκτέλεση των διαδικασιών σηματοδοσίας, ώστε να επιτευχθεί η άμεση η πρόσδεση του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο και να περιοριστεί η απώλεια σε πακέτα δεδομένων και η επίδραση της εκτελούμενης διαπομπής στο στρώμα εφαρμογής. Βασική προϋπόθεση για να καταστεί αυτό εφικτό είναι η διαθεσιμότητα δικτυακών πόρων στην χρησιμοποιούμενη υποδομή, πράγμα το οποίο στην πράξη δεν μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένο. Η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών (σε ό,τι αφορά τόσο την ταχύτητα όσο και την απώλεια πακέτων), για αμφότερες τις υπηρεσίες unicast και multicast, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων, κυρίως στο νέο δίκτυο προς το οποίο

κατευθύνεται ο κινητός κόμβος. Με βάση την προδιαγραφή του FMIPv6 και του M-FMIPv6/FTB, οι απαιτήσεις σε δικτυακούς πόρους προσδιορίζεται από την ακόλουθη λίστα:

- διαθεσιμότητα εύρους ζώνης στο ενσύρματο μονοπάτι που συνδέει το προηγούμενο και το νέο δίκτυο κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής
- διαθεσιμότητα εύρους ζώνης στο νέο ασύρματο δίκτυο κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής αλλά και στη μόνιμη κατάσταση
- διαθεσιμότητα εύρους ζώνης στο μονοπάτι που συνδέει το νέο δρομολογητή πρόσβασης με το δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής
- διαθεσιμότητα προσωρινού αποθηκευτικού χώρου στους καταχωρητές προσωρινής αποθήκευσης του νέου δικτύου με στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας πακέτων κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής
- διαθεσιμότητα επεξεργαστικής ισχύος στους δρομολογητές πρόσβασης, τους εντεταλμένους δρομολογητές πολυεκπομπής, τόσο του παλαιού όσο και του νέου δικτύου κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής και τους δρομολογητές πολυεκπομπής που συνθέτουν το νέο δένδρο διανομής στη νέα μόνιμη κατάσταση

Εφόσον η ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων δεν είναι εγγυημένη ιδίως στο *περιβάλλον ταχέων διαπομπών*, η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών ουσιαστικά μία διαδικασία *βέλτιστης προσπάθειας*, κατά την οποία κάθε τερματικός χρήστης εξυπηρετείται με τον καλύτερο διαθέσιμο τρόπο από το δίκτυο, αλλά χωρίς εγγυήσεις. Προϋπόθεση για την εκτέλεση μίας απρόσκοπτης διαπομπής αποτελεί η διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων στο νέο σύστημα. Κατά συνέπεια για τη *διασφάλιση* εκτέλεσης μίας απρόσκοπτης διαπομπής, απαιτείται η λειτουργία ενός επιπλέον μηχανισμού ο οποίος να πραγματοποιεί διαχείριση των διαθέσιμων δικτυακών πόρων για λογαριασμό των διαπεμπόμενων τερματικών κόμβων, κατά τη φάση εκτέλεσής της. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι απαιτείται η ενοποίηση των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας και διαχείρισης συνόδων ώστε να εξασφαλίζεται η δυναμική και βέλτιστη διαχείριση των δικτυακών πόρων. Στη συνέχεια περιγράφονται διάφορες τεχνικές μέσω των οποίων μπορεί να εγγυηθεί η απρόσκοπτη εκτέλεση διαπομπών πολυεκπομπής στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών.

Η λύση στο πρόβλημα διασφάλισης της ποιότητας προσεγγίζεται μέσα από την ενοποίηση της αρχιτεκτονική διαχείρισης συνόδων που αφορά την προσφορά υπηρεσιών προκαθορισμένης ποιότητας (Quality of Service, QoS) στο σύγχρονο Διαδίκτυο, δηλαδή των αρχιτεκτονικών IntServ (Integrated Services) [14] και DiffServ (Differentiated Services) [15], στο περιβάλλον ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία τεχνική για καθεμία από τις παραπάνω αρχιτεκτονικές, δηλαδή για την εκτέλεση των προπαρασκευαστικών διαδικασιών σε ότι αφορά την αρχιτεκτονική IntServ, ή την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών ανάθεσης πόρων στην πλευρά του δικτύου στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής DiffServ με στόχο την παροχή υπηρεσιών διαφοροποιημένης ποιότητας για τις διάφορες κλάσεις υπηρεσίας (πχ πραγματικού χρόνου ή μη, με απώλεια πακέτων ή όχι κλπ).

Στην περίπτωση του *περιβάλλοντος εκτέλεσης ταχέων διαπομπών*, η προετοιμασία μίας διαπομπής λαμβάνει χώρα κατά την εκτέλεση των διαδικασιών *AP* και *NAR Discovery*, κατά τη διάρκεια των οποίων ο κινητός κόμβος ενημερώνεται αναφορικά με την ύπαρξη διαθέσιμων δικτύων στην περιοχή κινητικότητάς του και προβλέπεται την αναμενόμενη διαπομπή του σε ένα από αυτά. Παράλληλα, για την διασφάλιση της εκτέλεσης μίας απρόσκοπτης διαπομπής, η εκτέλεση της διαδικασίας πρόβλεψής της θα πρέπει να έχει συνεκτιμήσει επιπλέον και την πληροφορία που σχετίζεται με την ποιότητα υπηρεσίας (*QoS context*) αναφορικά με τις απαιτήσεις σε δικτυακούς πόρους από την πλευρά των εφαρμογών και τα στοιχεία που αφορούν τη διαθεσιμότητά τους στο νέο δίκτυο. Στην πράξη αυτό απαιτεί την υλοποίηση επιπλέον ροών πληροφορίας, οι οποίες θα μεταφέρουν τα παραπάνω πλαίσια πληροφορίας *QoS*, και θα καταστήσουν εφικτή την εξαγωγή ενός έγκυρου συμπεράσματος αναφορικά με την εκτέλεση της διαπομπής του κινητού (βραχυπρόθεσμα) σε δεδομένη ποιότητα, αλλά και την παροχή της υπηρεσίας πολυεκπομπής στη μόνιμη κατάσταση (μέσο- και μακροπρόθεσμα). Η υλοποίηση των εν λόγω ροών πληροφορίας ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ήδη προτυποποιημένων πρωτοκόλλων όπως το *Context Transfer Protocol* (CTXP) [16] ή το *Candidate Access Router Discovery* (CARD) [17] για αυτό το σκοπό. Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα έχουν τη δυνατότητα να καταστήσουν εφικτή από τη μία τη μεταφορά των κατάλληλων πληροφοριών (στην προκειμένη περίπτωση των πλαισίων *QoS*) προς τους κόμβους του δικτύου στους οποίους λαμβάνονται οι αποφάσεις δέσμευσης πόρων, και από την άλλη την ενημέρωση των τερματικών αναφορικά με τη διαθεσιμότητα δικτυακών πόρων σε γειτονικά δίκτυα. Όπως και να έχει πάντως σαν αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας έχουμε την κατασκευή ενός «χάρτη» της περιοχής κινητικότητας του τερματικού κόμβου, εμπλουτισμένου με τρέχουσα πληροφορία αναφορικά με τη διαθεσιμότητα δικτυακών πόρων. Ο χάρτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την διαδικασία εκτέλεσης πρόβλεψης της διαπομπής προς όφελος του κινητού κόμβου διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την επιτυχή εκτέλεση της διαπομπής τουλάχιστο σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων βραχυπρόθεσμα αλλά και μεσοπρόθεσμα.

Είναι προφανές πως η λύση που περιγράφηκε παραπάνω αν και είναι συμβατή με τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου *FMIPv6* αναφορικά με την πρόβλεψη και προετοιμασία διαπομπών, δεν συνθέτει έναν ασφαλή τρόπο εκτέλεσης μίας απρόσκοπτης διαπομπής δεδομένου του ότι η βασική ιδέα δεν περιλαμβάνει δέσμευση πόρων, τουλάχιστο κατά τη φάση προετοιμασίας της διαπομπής στο νέο δίκτυο. Αντίθετα ο μηχανισμός συνθέτει μία ενημερωμένη αναφορά, σχετικά με τη διαθεσιμότητα των ζητούμενων δικτυακών πόρων στο νέο δίκτυο. Με στόχο την αντιμετώπιση της συγκεκριμένης αδυναμίας, η πιο προφανής λύση για το περιβάλλον ταχέων διαπομπών είναι η χρησιμοποίηση ενός σχήματος το οποίο να πραγματοποιεί προ-δραστική δέσμευση πόρων κατά τη φάση προετοιμασίας μίας διαπομπής, δηλαδή κατά την περίοδο που μεσολαβεί μεταξύ της ανταλλαγής των *FMIPv6* μηνυμάτων *FBU* και *FBack*. Ο μηχανισμός μπορεί να υλοποιηθεί επεκτείνοντας την πληροφορία που εισάγεται στα μηνύματα *FBU*, *HI*, *HAck* και *FBack*, με στοιχεία που αφορούν την ποιότητα υπηρεσίας της εκτελούμενης υπηρεσίας. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που δεν είναι επιθυμητή η επέκταση των μηνυμάτων του *FMIPv6*,

είναι εφικτή η χρησιμοποίηση ενός ανεξάρτητου μηχανισμού που στηρίζεται, είτε στο CXTF, είτε στο Resource Reservation Protocol (RSVP) [18], μέσω των οποίων οποίου μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή κατάλληλων μηνυμάτων σηματοδότησης για τον ίδιο σκοπό. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που πραγματοποιείται προ-δραστική δέσμευση δικτυακών πόρων, βασική απαίτηση αποτελεί η εξάλειψη της πιθανότητας εκτέλεσης λανθασμένων προβλέψεων, ώστε ο μηχανισμός να μην οδηγεί στην άσκοπη και ζημιογόνο για το σύστημα δέσμευση δικτυακών πόρων όταν πραγματοποιούνται λανθασμένες προβλέψεις. Προτεινόμενες λύσεις που είναι σε θέση να καταστήσουν αυτό εφικτό αναλύονται παρακάτω (βλέπε ενότητα 3.5, Προηγμένη λειτουργία πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB).

Η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών σχετίζεται επίσης με τον τύπο την εκτελούμενης υπηρεσίας· για παράδειγμα, κατά την εκτέλεση μίας υπηρεσίας πραγματικού χρόνου Διαδικτυακής τηλεόρασης, μία διαπομπή μπορεί να χαρακτηριστεί ως απρόσκοπτη, εφόσον ικανοποιείται απόλυτα το κριτήριο ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης παράδοσης των πακέτων και παρά το γεγονός ότι η παρατηρείται απώλεια σε πακέτα δεδομένων. Στην προκειμένη περίπτωση είναι προφανές ότι η εκτέλεση μίας διαδικασίας προσωρινής αποθήκευσης πακέτων δεν είναι τόσο σημαντική, όσο η απαίτηση για ταχεία εκτέλεση της διαπομπής και απόλυτου συγχρονισμού των διαδικασιών μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων. Από την άλλη, κατά την εκτέλεση μίας υπηρεσίας μεταφοράς δεδομένων μη πραγματικού χρόνου (πχ. database replication), η απώλεια πακέτων είναι μη αποδεκτή ενώ μία μικρή καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων μπορεί να είναι ανεκτή. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι για την παροχή υπηρεσιών υποστήριξης διαπομπών πολυεκπομπής είναι δυνατό να ακολουθηθεί το μοντέλο των *διαφοροποιημένων υπηρεσιών DiffServ*, οπότε προτείνεται η εκτέλεση της διαπομπής να διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της εκτελούμενης υπηρεσίας. Σε αυτό το πλαίσιο είναι επόμενο να θεωρηθεί ότι η εγγυημένη εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών μπορεί να προσφερθεί κατά προτεραιότητα σε τερματικούς χρήστες οι οποίοι κάνουν χρήση συγκεκριμένων υπηρεσιών. Εναλλακτικά επίσης μπορεί να προσεγγιστεί σαν μία υπηρεσία δέσμευσης δικτυακών πόρων στο δίκτυο προορισμού κατά προτεραιότητα και απαίτηση του χρήστη και με βάση την εκτελούμενη υπηρεσία. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση έλλειψης πόρων, οι τερματικοί κόμβοι θα είναι σε θέση να εκτελούν απρόσκοπτες διαπομπές για υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας με μεγαλύτερη πιθανότητα, σε σχέση με υπηρεσίες χαμηλότερης προτεραιότητας. Οι τελευταίες προφανώς θα εξυπηρετούνται ακολουθώντας το μοντέλο βέλτιστης προσπάθειας πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το δίκτυο δεν μπορεί να εγγυηθεί την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών για ένα τύπο υπηρεσίας ή για ένα τύπο χρήστη.

3.3.3.1 Κλιμάκωση

Ο βασικός στόχος του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB είναι να εξαλείψει τα προβλήματα που σχετίζονται με την διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής στα πλαίσια λειτουργίας της αρχιτεκτονικής του πρωτοκόλλου MIPv6 και παράλληλα να αντιμετωπίσει όλες τις δυσκολίες που εμφανίζει το πρωτόκολλο M-FMIPv6 [19]. Όπως έχει αναλυθεί, τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζει η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής με βάση το MIPv6 και τα οποία αποτελούν τις βασικότερες αιτίες για την χειροτέρευση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας κατά τη

φάση εκτέλεσης της διαπομπής, σχετίζονται με την καθυστέρηση που εισάγεται τόσο κατά τη φάση επέκτασης του δένδρου διανομής πολυεκπομπής όσο και κατά την εκτέλεση των βασικών διαδικασιών του IPv6 [10], όπως η *Ανακάλυψη Δρομολογητή*, η *Ρύθμιση Διεύθυνσης* (statefull/stateless) και η *Επισήμανση Μετακίνησης*, αλλά και η κακή διαχείριση δικτυακών πόρων λόγω της εκτέλεσης του φαινομένου της *σύγκλισης διόδων* που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο [1]-[2]. Με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης της κινητικότητας σε ότι αφορά την κλιμάκωση φαινομένων διαχείρισης πόρων, η σχεδίαση του προτεινόμενου σχήματος έχει βασιστεί στην αρχιτεκτονική του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, προβλέποντας ότι κάθε κινητό τερματικό υποχρεούται να ανανεώσει τη συμμετοχή του στο δένδρο διανομής από τη νέα θέση του. Με αυτόν τον τρόπο αποκλείεται η χρήση του μηχανισμού ενθυλάκωσης πακέτων και εξαλείφεται η κίνδυνος σύγκλισης διόδων στη μόνιμη κατάσταση. Το M-FMIPv6/FTB αντιμετωπίζει τα παραπάνω προβλήματα καθυστέρησης με χρήση των διαθέσιμων από το FMIPv6 μηχανισμών τόσο για την *Ανακάλυψη Δρομολογητή* όσο και για την *Ρύθμιση Διεύθυνσης*. Στο ίδιο πλαίσιο, συναφής είναι και η δυνατότητα του πρωτοκόλλου να μην οδηγεί στην εγκατάσταση του υποστηρικτικού μηχανισμού προώθησης της κίνησης από το προηγούμενο δίκτυο εφόσον ο νέος δρομολογητής πρόσβασης είναι ήδη μέλος του δένδρου διανομής πολυεκπομπής. Η συγκεκριμένη παρατήρηση εντούτοις εφαρμόζεται και για την περίοδο της διαπομπής θεωρώντας ότι ο NAR καθίσταται μέλος του δένδρου μέσω της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel*.

Πιο συγκεκριμένα, ο προτεινόμενος μηχανισμός έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην καταλύονται δύο από τα πλέον βασικά χαρακτηριστικά της *Αρχιτεκτονικής IP Multicast* κατά την περίοδο εκτέλεσης της διαπομπής. Το πρωτόκολλο διατηρεί το ρόλο του NAR ως εντεταλμένου δρομολογητή πολυεκπομπής κατά την περίοδο εκτέλεσης της διαπομπής, παρέχοντας τη δυνατότητα εξυπηρέτησης περισσότερων του ενός κινητών χρηστών, κατά το κρίσιμο χρονικό διάστημα της εκτέλεσης μίας ομαδικής διαπομπής πολυεκπομπής. Ο NAR είναι σε θέση να ελέγχει κάθε χρονική στιγμή ποιο ρεύμα κίνησης πολυεκπομπής καταφθάνει σε αυτόν και από ποια είσοδο (δηλ. από το δένδρο διανομής ή από κάποια δίοδο IP ως μέρος της λειτουργίας του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB). Αυτό σημαίνει ότι για την περίπτωση που δύο ή περισσότεροι χρήστες της ίδιας υπηρεσίας καταλήξουν στον ίδιο NAR την ίδια χρονική περίοδο, δεν είναι απαραίτητη η μεταφορά του ίδιου ρεύματος κίνησης από τον εκάστοτε PAR παρά μόνο για τον τερματικό κόμβο που εκτέλεσε πρώτος τη διαπομπή. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η άσκοπη κατανάλωση πόρων όχι μόνο στο μονοπάτι που συνδέει τον NAR με τον/τους αντίστοιχο/ους PAR/s, αλλά κυρίως στον ασύρματο δίαυλο που συνδέει τον πρώτο με τους κινητούς τερματικούς κόμβους. Στην αντίστοιχη περίπτωση που δεν ακολουθείται η ανά ομάδα πολυεκπομπής προσέγγιση, ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας (βλέπε λειτουργία πρωτοκόλλου M-FMIPv6) είναι υποχρεωμένος να εγκαταστήσει πολλαπλές διόδους IP, μεταξύ των PAR και των κινητών τερματικών που εξυπηρετούν, με μοναδικό όφελος τον περιορισμό των λειτουργικών απαιτήσεων του κόμβου NAR και τη μεταφορά τους στην πλευρά του τερματικού κόμβου. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα περιορίζει και το μέγεθος της ροής πληροφορίας (φορτίο σηματοδότησης) που ανταλλάσσεται μεταξύ των NAR και PAR

κατά τη λειτουργία του μηχανισμού υποστήριξης της διαπομπής πολυεκπομπής αλλά και της ποσότητας πληροφορίας που αποθηκεύεται στον NAR για αυτό το σκοπό από το πρωτόκολλο MLD (εν γένει οι εντεταλμένοι δρομολογητές πολυεκπομπής δεν διατηρούν πληροφορία ανά τερματικό χρήστη αλλά μόνο ανά διεπαφή και ομάδα πολυεκπομπής).

3.4 Ποιοτική Ανάλυση Επίδοσης

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται τα σημαντικά χαρακτηριστικά των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που περιγράφηκαν νωρίτερα (δηλ. M-FMIPv6/FTB, M-FMIPv6, M-HMIPv6 και *Απομακρυσμένες Συμμετοχές*), τα οποία και επηρεάζουν σημαντικά την επίδοσή τους. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη παρουσίαση των πιο σημαντικών αιτιών καθυστέρησης που παρατηρούνται κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής, αλλά και των περισσότερο σημαντικών πηγών κατανάλωσης πόρων που απαιτεί η εύρυθμη λειτουργία των εν λόγω μηχανισμών.

3.4.1 Χρονισμός Διαδικασιών Σηματοδότησης κατά την Διαπομπή

Ο βασικός στόχος ενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας είναι εκτός από την παροχή της δυνατότητας αποκατάστασης των εγκατεστημένων συνόδων στην πλευρά του τερματικού, επιπλέον η ελαχιστοποίηση, αν όχι η εξάλειψη, της επίδρασης που μπορεί να έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας στο κινητό. Όπως έχει αναλυθεί η διακοπή της υπηρεσίας στο τερματικό είναι αποτέλεσμα της κατάλυσης των συνδέσεων που αυτό έχει τόσο στο στρώμα δικτύου όσο και στο στρώμα ζεύξης δεδομένων κατά τη φάση εκτέλεσης της διαπομπής. Σε ότι αφορά την αδυναμία επικοινωνίας στο στρώμα δικτύου, όπως έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και περιγράφεται λεπτομερώς και στο Παράρτημα Α, το κινητό, μετά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης, δεν είναι σε θέση να επικοινωνεί με κάποιο κόμβο στο Διαδίκτυο, εάν δεν έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση των διαδικασιών *Επισήμανσης Μετακίνησης, Ανακάλυψης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης* στο νέο δίκτυο και επίσης δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία *Ανανέωσης Εγγραφής* του MIPv6 μέσω της οποίας ενημερώνεται η υποδομή του MIPv6 για την αλλαγή δικτύου πρόσβασης του κινητού. Με βάση την προδιαγραφή του πρωτοκόλλου *Neighbor Discovery for IPv6*, οι δύο πρώτες περιλαμβάνουν την εκτέλεση των διαδικασιών *Neighbor Discovery* και *Duplicate Address Detection (DAD)*, η διάρκεια της οποίας (D_{DAD}) στην τυπική περίπτωση ισούται με ένα sec. Στη συνέχεια αποκαθίσταται η επικοινωνία με τους Κόμβους Ανταποκριτές CN, μέσω των διαδικασιών του MIPv6, μία διαδικασία η οποία στην τυπική περίπτωση απαιτεί χρόνο ίσο με 2 χρόνους πλήρους διαδρομής από το κινητό μέχρι τον εκάστοτε *Κόμβο Ανταποκριτή* μέχρι να ολοκληρωθεί (βλέπε Παράρτημα Α).

Στην περίπτωση των κλασικών *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* πολυεκπομπής (χωρίς δηλαδή την χρήση του FMIPv6), ο χρόνος που απαιτείται για την αποκατάσταση της επικοινωνίας επηρεάζεται (α) από το χρόνο που απαιτείται για την Ρύθμιση της Διεύθυνσης επίσης, δεδομένου ότι ο τερματικός κόμβος είναι υποχρεωμένος να εκδώσει ένα μήνυμα MLD *Αναφοράς Συμμετοχής*, αμέσως μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο, στο οποίο να έχει χρησιμοποιηθεί μία έγκυρη διεύθυνση στο πεδίο διεύθυνση αποστολέα, και (β) από το χρόνο που απαιτείται για

να ολοκληρωθεί η διαδικασία συμμετοχής του νέου δρομολογητή πρόσβασης, του δικτύου στο οποίο συνδέεται το κινητό, στο δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής (*Remote Subscription Delay*, $D_{\text{REM\_SUBSCR}}$). Η τελευταία εξαρτάται κυρίως από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής, εφόσον μέσω αυτού και των προβλεπόμενων διαδικασιών σηματοδότησης, προωθείται και εγκαθίσταται η κατάλληλη πληροφορία στους ενδιάμεσους δρομολογητές που συνθέτουν το δένδρο διανομής πολυεκπομπής.

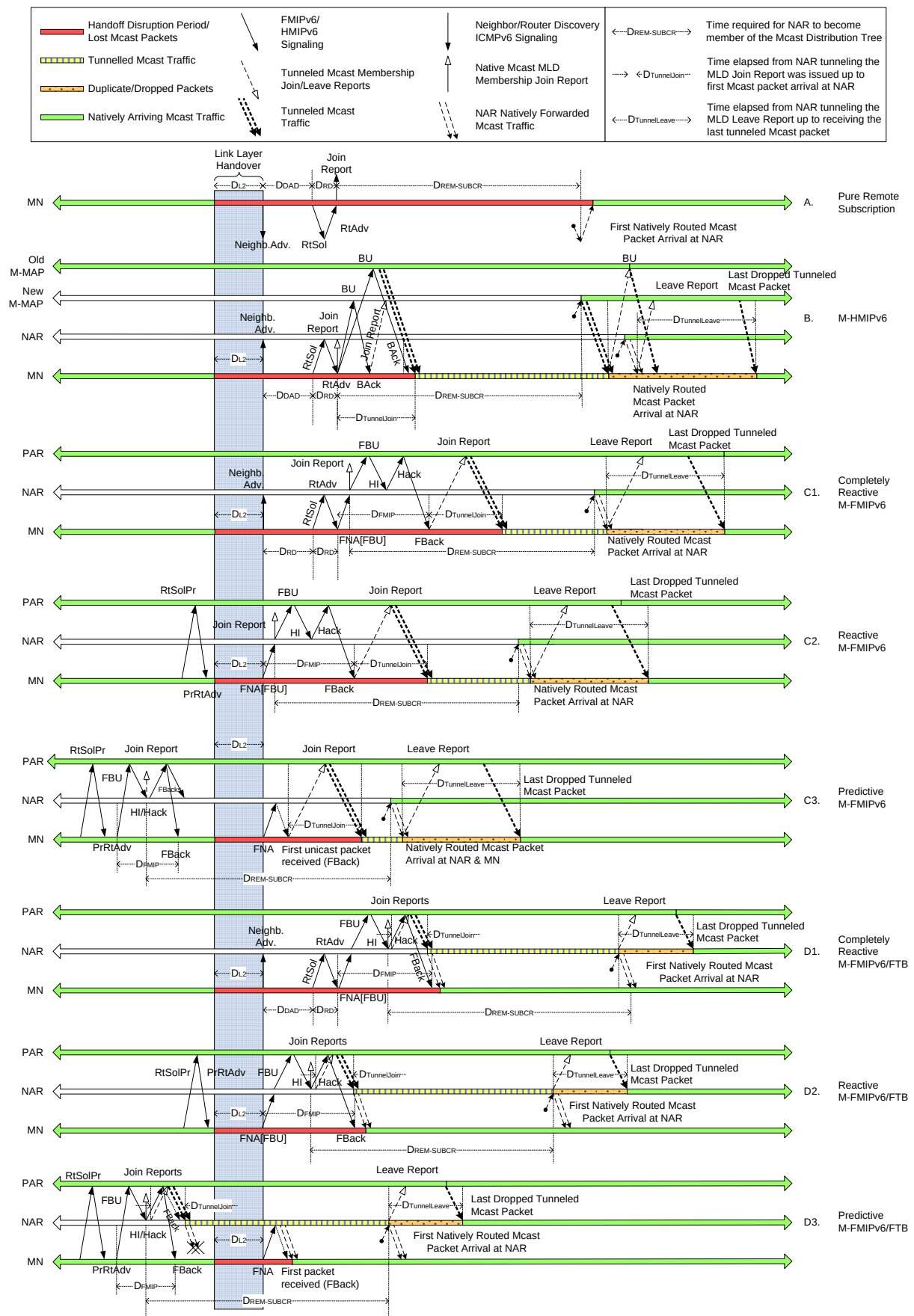
Σύμφωνα με την προδιαγραφή τόσο του προτεινόμενου μηχανισμού M-FMIPv6/FTB όσο και του μηχανισμού που προτείνεται από το πρωτόκολλο M-FMIPv6, ο κόμβος NAR είναι σε θέση να εκδώσει το αίτημα για την επέκταση του δένδρου διανομής πολυεκπομπής προς την πλευρά του, ανεξάρτητα από την πρόοδο της διαδικασίας *Ρύθμισης Διεύθυνσης*, εφόσον η τελευταία αφορά αποκλειστικά τη λειτουργία του βασικού πρωτοκόλλου FMIPv6 που είναι ανεξάρτητο από τη διαχείριση της διαπομπής πολυεκπομπής. Αν και η έκδοση του παραπάνω αιτήματος με τον συγκεκριμένο τρόπο, συνιστά μία σημαντική βελτίωση σε σχέση με τον τυπικό μηχανισμό *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής τη στιγμή που επιθυμείται η εκτέλεση ταχέων και απρόσκοπτων διαπομπών, εφόσον η καθυστέρηση που μπορεί να εισάγει η διαδικασία συμμετοχής στο δένδρο διανομής είναι μη ντετερμινιστική και σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να διαρκέσει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων. Για το λόγο αυτό αμφότεροι οι μηχανισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και ο μηχανισμός που προτείνεται από το πρωτόκολλο M-HMIPv6, επιχειρούν την προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής μέσω των διόδων IP από το παλιό προς το νέο δίκτυο.

Σε ό,τι αφορά τη λειτουργία των μηχανισμών προώθησης κίνησης πολυεκπομπής θα πρέπει εντούτοις να σημειωθούν τα ακόλουθα: πρώτον, για να εκτιμήσουμε την αποδοτικότητά τους θα πρέπει να προσδιορίσουμε τη χρονική στιγμή στην οποία το ρεύμα κίνησης καθίσταται *διαθέσιμο* στο τερματικό κόμβο. Δεδομένου ότι η εκκίνηση της διαδικασίας προώθησης της κίνησης σκανδαλίζεται μέσω της σηματοδότησης του πρωτοκόλλου MLD, είναι προφανές ότι η συνολική επίδοση εξαρτάται από τη χρονική στιγμή κατά την οποία εκδίδονται τα συγκεκριμένα μηνύματα *Αναφοράς Συμμετοχής* διαμέσου των διόδων IP. Όπως έχει αναλυθεί, με βάση το M-FMIPv6/FTB το μήνυμα σκανδαλισμού εκδίδεται αμέσως μετά την παράδοση του μηνύματος HI στον NAR, πράγμα το οποίο για την περίπτωση εκτέλεσης μίας προ-δραστικής διαπομπής οδηγεί στην εκκίνηση της διαδικασίας προώθησης λίγο νωρίτερα από την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης για το κινητό. Από την άλλη, στην περίπτωση του M-FMIPv6, το αντίστοιχο μήνυμα αποστέλλεται αμέσως μετά την πρόσδεση του τερματικού κόμβου στο δίκτυο του NAR. Παρόμοια πρακτική ακολουθείται και κατά τη λειτουργία του M-HMIPv6, όπου η έκδοση του μηνύματος σκανδαλισμού πραγματοποιείται ακόμη αργότερα, εφόσον προϋποθέτει την ολοκλήρωση των διαδικασιών *Ρύθμισης Διεύθυνσης* και *Ανανέωσης Εγγραφής* στον κόμβο M-MAP. Οι τελευταίες διαδικασίες πραγματοποιούνται μετά την πρόσδεση του κινητού στο δίκτυο του νέου M-MAP. Με βάση τα παραπάνω, φαίνεται ότι στις δύο τελευταίες περιπτώσεις ο κινητός κόμβος είναι υποχρεωμένος στην καλύτερη περίπτωση να αναμένει κατά ένα χρονικό διάστημα ίσο τουλάχιστο με το χρόνο πλήρους διαδρομής (round trip time) μεταξύ του ιδίου και του PAR ή του προηγούμενου M-MAP αντίστοιχα, μέχρις ότου αρχίζουν να παραδίδονται σε αυτόν πακέτα

πολυεκπομπής. Αντίθετα στην περίπτωση του M-FMIPv6/FTB τα πακέτα πολυεκπομπής είναι ήδη διαθέσιμα στο τερματικό τη στιγμή της πρόσδεσής του στο νέο δίκτυο (δεδομένου ότι η διαδικασία προ-δραστικής σηματοδότησης έχει ολοκληρωθεί).

Η εκτέλεση της διαδικασίας προώθησης κίνησης μέσω των αντίστοιχων διόδων IP έχει μία επιπλέον συνέπεια, η οποία σχετίζεται με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου ελέγχου συμμετοχής MLD. Πιο συγκεκριμένα, με βάση το MLD, ένας εντεταλμένος δρομολογητής, δεδομένου ότι δεν συντηρεί πληροφορίες αναφορικά με τη συμμετοχή τερματικών κόμβων σε ομάδες πολυεκπομπής, αλλά συνθέτει μία συνολική λίστα για κάθε ομάδα και δίκτυο, είναι υποχρεωμένος εφόσον λάβει ένα μήνυμα αποχώρησης (MLD Done) από μία ομάδα πολυεκπομπής, να επιβεβαιώσει ότι δεν υπάρχει κάποιος δεύτερος κόμβος που επιθυμεί τη λήψη του συγκεκριμένου ρεύματος κίνησης, προτού προχωρήσει στην καταστολή της διαδικασίας προώθησης. Για να το κάνει αυτό αποστέλλει στην τυπική περίπτωση δύο μηνύματα ερώτησης συμμετοχής, με ρυθμό ένα μήνυμα ανά sec στην τυπική περίπτωση, και αναμένει μία αναφορά που θα υποδείξει ότι η παραπάνω υπόθεση δεν είναι αληθής. Προφανώς ο δρομολογητής πολυεκπομπής συνεχίζει να προωθεί τα πακέτα πολυεκπομπής μέχρις ότου εκπνεύσει το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το ίδιο χρονικό διάστημα ο κινητός κόμβος λαμβάνει τα πακέτα της ίδιας ροής πολυεκπομπής από το δένδρο διανομής μέσω του NAR, και ως εκ τούτου, τα συγκεκριμένα πακέτα παραδίδονται δύο φορές σε αυτόν, πράγμα προφανώς μη επιθυμητό. Ο ρυθμός μετάδοσης των μηνυμάτων Ερώτησης, μπορεί να μεταβληθεί ή να λάβει μηδενική τιμή, το οποίο σημαίνει ότι το τερματικό θα σταματήσει να λαμβάνει τα διπλότυπα πακέτα μετά το πέρας διαστήματος ίσου με το χρόνο μίας πλήρους διαδρομής μεταξύ του παλαιού και του νέου δικτύου. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η συγκεκριμένη καθυστέρηση στην παύση της προώθησης των πακέτων μέσω της διόδου IP, ενδέχεται να μην είναι τόσο επιζήμια για το τερματικό κόμβο για όλη τη διάρκεια του διαστήματος που προαναφέρθηκε, αν αναλογιστούμε ότι οι ροές των πακέτων πολυεκπομπής που παραδίδονται προς τα δίκτυα των PAR και NAR δεν είναι συγχρονισμένες μεταξύ τους (δηλαδή η παράδοση ενός συγκεκριμένου πακέτου στο δίκτυο του πρώτου δεν ταυτίζεται χρονικά με την παράδοση ενός αντιγράφου του ταυτόχρονα στο δίκτυο του δεύτερου). Ως εκ τούτου αν επιθυμείται η ελαχιστοποίηση της απώλειας πακέτων στο τερματικό, δεδομένου ότι και τα πακέτα που μεταφέρονται διαμέσου της διόδου IP υφίστανται επιπλέον καθυστέρηση, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διακοπή της προώθησης ίσως είναι επιθυμητό να καθυστερήσει για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε τα συγχρονιστούν οι ροές και να εκμηδενιστεί η απώλεια σε πακέτα. Το μέγεθος του συγκεκριμένου διαστήματος αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης και δε θα αναλυθεί περισσότερο στα πλαίσια της διατριβής.

Το Σχήμα 3 - 12 παρουσιάζει το χρονισμό των διαδικασιών σηματοδότησης και παράδοσης πακέτων πολυεκπομπής όταν χρησιμοποιούνται κατά σειρά οι μηχανισμοί Απομακρυσμένων Συμμετοχών, M-HMIPv6, M-FMIPv6 και ο προτεινόμενος M-FMIPv6/FTB. Για τους μηχανισμούς που βασίζονται στο FMIPv6 παρουσιάζεται η προ-δραστική, μετα-δραστική και πλήρως μετα-δραστική λειτουργία τους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB παρουσιάζει, ιδίως κατά την προ-δραστική λειτουργία του, το μικρότερο διάστημα κατά το οποίο



Σχήμα 3 - 12. Χρονισμός Διαδικασιών Σηματοδοσίας και παράδοσης πακέτων κίνησης κατά την λειτουργία των πρωτοκόλλων M-FMIPv6/FTB, M-FMIPv6, M-HMIPv6 και του μηχανισμού Remote Subscription

ο κινητός κόμβος δεν είναι σε θέση να λάβει πακέτα κίνησης, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα απαραίτητα πακέτα πολυεκπομπής είναι διαθέσιμα στο νέο δίκτυο τη στιγμή της πρόσδεσης του κινητού κόμβου σε αυτό. Επίσης είναι προφανές ότι με αυτόν τον τρόπο απαιτείται η κατανάλωση περισσότερων δικτυακών πόρων εφόσον το προτεινόμενο σχήμα επιχειρεί την προώθηση του αντίστοιχου ρεύματος πολυεκπομπής από το παλαιό δίκτυο για όλο το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Απομακρυσμένης Συμμετοχής* από τη μεριά του NAR. Επίσης ο προτεινόμενος μηχανισμός απαιτεί επιπλέον δικτυακούς πόρους για την προσωρινή αποθήκευση πακέτων το διάστημα που προηγείται της πρόσδεσης του κινητού στο νέο δίκτυο. Αντίθετα το σχήμα του πρωτοκόλλου M-FMIPv6 έχει μικρότερη κατανάλωση σε δικτυακούς πόρους εφόσον οποιαδήποτε υποστηρικτική ενέργεια πραγματοποιείται μετά την πρόσδεση του τερματικού στο νέο δίκτυο. Σημειώνεται ότι στο σχήμα δεν απεικονίζεται η διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης πακέτων που προβλέπεται κατά την προ-δραστική λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB.

3.4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Ο Πίνακας 3 -2 που ακολουθεί, συνοψίζει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που απορρέουν από τη λειτουργία των προηγμένων μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που έχουν αναλυθεί στα πλαίσια της διατριβής. Η παρουσιαζόμενη λίστα δεν εξαντλεί τις δυνατότητες του καθενός μηχανισμού. Βασικός στόχος της παρουσίασής της εντούτοις είναι η αποσαφήνιση των βασικών δυνατοτήτων του καθενός μηχανισμού σε σχέση με τους υπόλοιπους και ο προσδιορισμός των κύριων αδυναμιών τους και των σημείων που χρειάζονται περεταίρω διερεύνηση.

Πίνακας 3 - 2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κατά τη Λειτουργία των Εξεταζόμενων Μηχανισμών Διαχείρισης Κινητικότητας Αποδεκτών Κίνησης Πολυεκπομπής

Μηχανισμός Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απομακρυσμένες Συμμετοχές [8], [9]	• Αποδοτική χρήση δικτυακών πόρων λόγω της κατασκευής δένδρων διανομής ελάχιστου κόστους • Απλότητα στην εφαρμογή: δεν απαιτείται καμία εγκατάσταση επιπλέον λογισμικού στο δίκτυο, εφόσον όλες οι διαδικασίες εκτελούνται με χρήση ήδη υπαρχόντων μηχανισμών και διαδικασιών του IPv6	• Μεγάλη καθυστέρηση από την εκτέλεση των διαδικασιών <i>Ανακάλυψης Δρομολογητή, Επισήμανσης Μετακίνησης, Ρύθμισης Διεύθυνσης</i> • Μεγάλη καθυστέρηση στην επανεγκατάσταση του δένδρου διανομής μετά την εκτέλεση της διαπομπής, από την σύγκλιση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολυεκπομπής • Απαιτείται η ανάπτυξη μίας διαδικασίας παρακολούθησης στην πλευρά του κινητού τερματικού που θα επιτρέπει το σκανδαλισμό της διαδικασίας συμμετοχής στο δένδρο διανομής αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαπομπής στο νέο δίκτυο. Οι υπόλοιποι μηχανισμοί

Μηχανισμός Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
M-HMIPv6 [13]	• Δυνατότητα παράδοσης του ρεύματος κίνησης στη νέα θέση του κινητού τερματικού μέσω διόδου IP μέχρις ότου ολοκληρωθεί η συμμετοχή του νέου κόμβου M-MAP στο δένδρο διανομής κίνησης πολυεκπομπής • Διαχωρισμός μικρο/μάκρο-κινητικότητας παρέχοντας τη δυνατότητα περιορισμού του φορτίου σηματοδοσίας στην περίπτωση της μικρο κινητικότητας • Περιορισμένη κατανάλωση δικτυακών πόρων δεδομένου ότι όλες οι υποστηρικτικές διαδικασίες ξεκινούν μετά την πρόσδεση του τερματικού κόμβου στο νέο δίκτυο • Δυνατότητα υποστήριξης διαπομπών παλινδρόμησης του τερματικού κόμβου μεταξύ δύο δικτύων με μειωμένο φορτίο σηματοδοσίας • Δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης πακέτων ώστε να παραδοθούν στο τερματικό κόμβο μετά την εκτέλεση της διαπομπής • Δυνατότητα υποστήριξης διαπομπών πηγών πολυεκπομπής (απαιτείται η τροποποίηση της λειτουργικότητας των αποδεκτών κίνησης)	θεωρούν τη συγκεκριμένη διαδικασία ενσωματωμένη στο γενικότερο μηχανισμό • Επιπρόσθετη καθυστέρηση από την εκτέλεση βασικών διαδικασιών IPv6 (<i>Επισήμανση Μετακίνησης, Ανακάλυψη Δρομολογητή, Ρύθμισης Διεύθυνσης</i>) αμέσως μετά από κάθε διαπομπής του τερματικού (δηλ. σε μάκρο/μικρο επίπεδο) • Επιπρόσθετη καθυστέρηση στην εγκατάσταση των διόδων IP και την παράδοση του ρεύματος κίνησης εφόσον όλες οι διαδικασίες εκτελούνται μετά την διαπομπή του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο • Αδυναμία εκμετάλλευσης διαθέσιμης πληροφορίας σχετικά με την εκτέλεση επικείμενων διαπομπών • Σύγκλιση διόδων IP κατά τη διάρκεια υποστήριξης διαδικασιών ομαδικής διαπομπής • Παράδοση διπλότυπων και εκτός σειράς πακέτων σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας του υποστηρικτικού μηχανισμού προώθησης κίνησης
M-FMIPv6 [19]	• Ανάλυση προ-δραστικής δράσης στην επέκταση του δένδρου διανομής δεδομένου ότι υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση μίας διαπομπής • Εγκατάσταση μηχανισμού προώθησης κίνησης για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας <i>Απομακρυσμένης Συμμετοχής</i> από το νέο δίκτυο • Ανεξαρτησία από την εκτέλεση των βασικών διαδικασιών του IPv6 (<i>Επισήμανσης Μετακίνησης, Ανακάλυψης Δρομολογητή και Ρύθμισης Διεύθυνσης</i>) • Δυνατότητα υποστήριξης διαπομπών παλινδρόμησης του τερματικού κόμβου μεταξύ δύο	• Επιπρόσθετη καθυστέρηση στην εγκατάσταση των διόδων IP και την παράδοση του ρεύματος κίνησης εφόσον όλες οι υποστηρικτικές διαδικασίες εκτελούνται μετά την διαπομπή του κινητού κόμβου στο νέο δίκτυο • Σύγκλιση διόδων IP κατά τη διάρκεια υποστήριξης διαδικασιών ομαδικής διαπομπής • Αδυναμία προσωρινής αποθήκευσης πακέτων για λογαριασμό του διαπεμπόμενου χρήστη από την πλευρά του δικτύου (αύξηση του επιπέδου απολεσθέντων πακέτων λόγω εκτέλεσης της διαπομπής) • Ανάγκη ανάπτυξης ειδικού μηχανισμού στην πλευρά του κινητού κόμβου ο οποίος θα πρέπει να ελέγχει για τη διαθεσιμότητα του

Μηχανισμός Διαχείρισης Κινητικότητας Πολυεκπομπής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
M-FMIPv6/FTB [20], [21], [22], [23],	δικτύων	ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής και να σκανδαλίζει τις κατάλληλες υποστηρικτικές διαδικασίες μετά τη διαπομπής του κινητού • Παράδοση διπλότυπων και εκτός σειράς πακέτων σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας του υποστηρικτικού μηχανισμού προώθησης κίνησης
	• Όλα τα πλεονεκτήματα του μηχανισμού M-FMIPv6 • Ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος αναμονής του ρεύματος κίνησης στην πλευρά του τερματικού μόνο κατά το χρονικό διάστημα εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης • Δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης πακέτων πολυεκπομπής για λογαριασμό του καθενός διαπεμπόμενου τερματικού στην πλευρά του νέου δικτύου ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια πακέτων μόνο κατά το χρονικό διάστημα εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης • Δυνατότητα εκτέλεσης ομαδικών διαπομπών πολυεκπομπής με αποδοτικό τρόπο τόσο για το δίκτυο όσο και για τα μέλη της ομάδας	• Αυξημένη κατανάλωση δικτυακών πόρων για την υποστήριξη των μηχανισμών προώθησης κίνησης και προσωρινής αποθήκευσης πακέτων πολυεκπομπής. • Απαίτηση για κατανάλωση δικτυακών πόρων για υποστήριξη της διαπομπής κατά το χρονικό διάστημα που προηγείται της διαπομπής • Εξάρτηση από τη λειτουργία του μηχανισμού πρόβλεψης διαπομπών (η κακή λειτουργία του εν λόγω μηχανισμού προκαλεί μεγάλη κατανάλωση και μειωμένη απόδοση του πρωτοκόλλου) • Παράδοση διπλότυπων και εκτός σειράς πακέτων σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας του υποστηρικτικού μηχανισμού προώθησης κίνησης

3.5 Προηγμένη λειτουργία πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB

Στην ενότητα 3.3 παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίον το προτεινόμενο πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB είναι σε θέση να αντιμετωπίσει την πληθώρα των προβλημάτων κινητικότητας πολυεκπομπής, με αρκετά ικανοποιητικό και αποδοτικό τρόπο. Στην προηγούμενη ενότητα 3.4 (Ποιοτική Ανάλυση Επίδοσης) εντούτοις, παρουσιάστηκαν κάποια προβληματικά σημεία, τα οποία χρήζουν επιπλέον βελτιώσεων. Στη συνέχεια θα περιγραφούν κάποιες προτάσεις, μέσω των οποίων προάγεται η προσφερόμενη από το M-FMIPv6/FTB λειτουργικότητα και καθίσταται εφικτή η αντιμετώπιση μερικών από τα παραπάνω προβλημάτων. Οι προτάσεις οδηγούν στην περαιτέρω βελτίωση του προτεινόμενου μηχανισμού από τη σκοπιά τόσο των προσφερόμενων υπηρεσιών πολυεκπομπής, όσο ζητημάτων διαχείρισης κινητικότητας.

3.5.1 Καθυστέρηση Αποχώρησης Από Ομάδες Πολυεκπομπής (Leave Latency)

Όπως αναλύεται στην ενότητα 2.1.2, ένας εντεταλμένος δρομολογητής πολυεκπομπής (Multicast Designated Router, MDR), μπορεί να αποχωρήσει από το δένδρο διανομής μίας

ομάδας πολυεκπομπής, εφόσον είναι απόλυτα βέβαιος πως δεν εξυπηρετεί κανέναν κόμβο ο οποίος να επιθυμεί τη λήψη του συγκεκριμένου ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής. Με βάση την προδιαγραφή του πρωτοκόλλου MLD, κάθε τερματικός κόμβος έχει τη δυνατότητα να σηματοδοτεί, μέσω ενός κατάλληλου μηνύματος MLD (*MLDv1 Done* ή *MLDv2 Membership Report[INCLUDE-Null]*) στον MDR του, το αίτημά του για αποχώρηση. Ο MDR με τη σειρά του, με στόχο να καλύψει την παραπάνω απαίτηση, σχετικά με τη βεβαιότητα συμμετοχής ή μη, αποστέλλει ένα μήνυμα *Ερώτησης* (MLD Last Member Query) προς το υποδίκτυο από το οποίο προήλθε το μήνυμα αποχώρησης, μέσω του οποίου ζητά από τους κόμβους του δικτύου να τον ενημερώσουν αναφορικά με τη συμμετοχή τους στη συγκεκριμένη ομάδα. Αν ο MDR λάβει κάποιο μήνυμα *Αναφοράς Συμμετοχής*, εντός ενός προδιαγεγραμμένου χρονικού διαστήματος (η τυπική τιμή για το MLD είναι 1 sec), τότε αντιλαμβάνεται ότι θα πρέπει να συνεχίσει να προωθεί τα πακέτα στο συγκεκριμένο υποδίκτυο και βεβαίως θα πρέπει να συνεχίσει να συμμετέχει στο δένδρο διανομής. Στην αντίθετη περίπτωση που εκπνεύσει το χρονικό διάστημα χωρίς λήψη του παραπάνω μηνύματος, ο MDR αποχωρεί από το δένδρο διανομής, οπότε σκανδαλίζεται και η αντίστοιχη διαδικασία σηματοδότησης με βάση το πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυεκπομπής που χρησιμοποιείται.

Η αποχώρηση ενός MDR από το δένδρο διανομής μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης με έναν περισσότερο αυτόματο και λιγότερο αποδοτικό τρόπο. Το MLD προβλέπει ότι κάθε τερματικός κόμβος είναι υποχρεωμένος να ανανεώνει περιοδικά τη συμμετοχή του στην κάθε ομάδα πολυεκπομπής (η τυπική τιμή για το MLD είναι κάθε 125 sec). Στην περίπτωση που ένας παραλήπτης κίνησης πολυεκπομπής επιθυμεί να αποχωρήσει από την ομάδα, αρκεί να μην ανανεώσει τη συμμετοχή του. Αν η συμμετοχή δεν ανανεωθεί στο προβλεπόμενο χρονικό διάστημα, ο MDR αφού αποστείλει πρώτα τα κατάλληλα μηνύματα *Ερώτησης Συμμετοχής* και εφόσον δε λάβει θετικές αναφορές συμμετοχής, αντιλαμβάνεται ότι δεν εξυπηρετεί τερματικούς κόμβους που είναι παραλήπτες του συγκεκριμένου ρεύματος κίνησης και αποχωρεί από το δένδρο διανομής. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή ο MDR συνεχίζει, για ένα διόλου ευκαταφρόνητο χρονικό διάστημα, να αποστέλλει άσκοπα τα πακέτα πολυεκπομπής στο συγκεκριμένο υποδίκτυο, εφόσον κανένας κόμβος δεν ενδιαφέρεται για τη λήψη τους σε αυτό. Το τελευταίο είναι ακόμη πιο σημαντικό εφόσον η κίνηση μεταφέρεται επίσης άσκοπα κατά μήκος του δένδρου διανομής.

Στην περίπτωση των ενσύρματων δικτύων το πρόβλημα ενημέρωσης του MDR ενδέχεται να μην είναι τόσο κρίσιμο, εφόσον από τη μία το εύρος ζώνης τουλάχιστο δεν είναι σε έλλειμμα (σε σύγκριση με τους ασύρματος) και από την άλλη στην πράξη κάθε κόμβος ενημερώνει τον MDR για την αποχώρησή του. Εντούτοις αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων που εξυπηρετούν κινητούς χρήστες. Στην περίπτωση αυτή, αφενός οι πόροι του ασύρματου ραδιοδιαύλου θεωρούνται περισσότερο πολύτιμοι. Το πιο σημαντικό πρόβλημα προκαλείται εντούτοις εξαιτίας της κινητικότητας των χρηστών. Συνήθως ένας κινητός κόμβος έχει αποσυνδεθεί από το φυσικό δίκτυο τη στιγμή που θα πρέπει να ενημερώσει τον προηγούμενο της διαπομπής του MDR σχετικά με την απομάκρυνσή του από το δίκτυό του. Επίσης ο κινητός κόμβος δεν έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει το κατάλληλο μήνυμα από το νέο του δίκτυο προς

τον προηγούμενο MDR του αφού τα μηνύματα MLD θεωρούνται έγκυρα μόνο κατά τη μετάδοσή τους στο υποδίκτυο (βλέπε [9], [7]). Κατά συνέπεια ο μόνος τρόπος για την ενημέρωση του προηγούμενου MDR και την αποχώρησή του από το δένδρο διανομής, είναι η χρήση του μηχανισμού *μη ανανέωσης της συμμετοχής* σε αυτό, που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην περίπτωση που επιθυμείται η ρητή αποχώρηση από το δένδρο διανομής απαιτείται η ανάπτυξη ενός ξεχωριστού μηχανισμού, ο οποίος να είναι πλέον κομμάτι του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας και όχι του μηχανισμού διαχείρισης συνόδων πολυεκπομπής (δηλ. της αρχιτεκτονικής IP Multicast)

Με στόχο την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB δίνει τη δυνατότητα σκανδαλισμού της διαδικασίας ερώτησης/ελέγχου συμμετοχής (*Last Member Query*), με χρήση ενός αντίστοιχου μηχανισμού με αυτού που καθιστά εφικτή την εκκίνηση της διαδικασίας συμμετοχής στον κόμβο NAR. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση δύο αυτοεπιστρεφόμενων μηνυμάτων MLD στην πλευρά του PAR. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 - 3, αρχικά ο κόμβος PAR κατασκευάζει ένα κατάλληλο μήνυμα *MLD Αναφοράς Συμμετοχής* (μήνυμα A στο Σχήμα 3 - 3), με βάση τα περιεχόμενα του μηνύματος FBU που έχει λάβει. Η αποστολή του συγκεκριμένου μηνύματος (ή μηνυμάτων εφόσον πρόκειται για πολλές ομάδες πολυεκπομπής), γίνεται από τη διεπαφή από την οποία προήλθε το μήνυμα FBU. Όπως και στην περίπτωση του NAR, αποστολή των συγκεκριμένων μηνυμάτων πραγματοποιείται εφόσον κατασκευαστεί η κατάλληλη διεπαφή (socket) από το λογισμικό που υλοποιεί το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB προς το αντίστοιχο που υλοποιεί το «μέρος τερματικού» του πρωτοκόλλου MLD.

Στη συνέχεια, για την υλοποίηση του μηχανισμού αποχώρησης του PAR από το δένδρο διανομής απαιτείται η αποστολή ενός μηνύματος MLD μέσω του οποίου θα πυροδοτηθεί τουλάχιστο η διαδικασία *Last Member Query*. Με βάση τα παραπάνω, είναι προφανές ότι για να πραγματοποιηθεί αυτό αρκεί το «κλείσιμο» του socket που είχε κατασκευαστεί αρχικά από την πλευρά του πρωτοκόλλου M-FMIPv6. Σαν αποτέλεσμα του «κλεισίματος», το λογισμικό «μέρος τερματικού» του πρωτοκόλλου MLD του PAR, θα αποστείλει ένα αυτοεπιστρεφόμενο μήνυμα αποχώρησης *MLD Done* (μήνυμα B). Η λήψη του μηνύματος από το «μέρος δρομολογητή» του MLD θα οδηγήσει στην αποστολή προς το φυσικό υποδίκτυο πλέον ενός μηνύματος ερώτησης *MLD Last Member Query* (μήνυμα C). Εφόσον δεν υπάρχει κάποιος άλλος τερματικός κόμβος ο οποίος αναγκαστικά θα πρέπει να ανανεώσει τη συμμετοχή του για τη συγκεκριμένη ομάδα πολυεκπομπής, ο PAR θα πρέπει να αποχωρήσει από το δένδρο διανομής (μήνυμα D) άμεσα.

Το μεγάλο πρόβλημα για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας, είναι το σημείο στο οποίο σκανδαλίζεται το «κλείσιμο» του socket στην πλευρά του «μέρους τερματικού» του PAR. Το ιδανικό από την άποψη κατανάλωσης δικτυακών πόρων χρονικό σημείο για αυτό είναι αυτό κατά το οποίο ο κινητός κόμβος αποχωρεί από το δίκτυο του PAR. Για τον προσδιορισμό του εντούτοις, απαιτείται η παράδοση ενός γεγονότος αντίστοιχου με το *Link Down* στον PAR. Εντούτοις, δεδομένου ότι υπάρχει πολύ σοβαρό ενδεχόμενο ο κινητός κόμβος να επιστρέψει στο δίκτυο του PAR (παλινδρομικές διαπομπές, ping-pong handover), ο σκανδαλισμός του «κλεισίματος» θα πρέπει να καθυστερηθεί για ένα μικρό διάστημα επιπλέον ώστε να μην

απαιτείται η άσκοπη εκτέλεση ενός προσωρινού κλαδέματος και ακολούθως η επέκταση του δένδρου από την αρχή. Επιπρόσθετα, η παράδοση του συγκεκριμένου γεγονότος ενδέχεται να μην υποστηρίζεται (δεδομένου ότι αφορά το δρομολογητή). Επίσης η συγκεκριμένη υλοποίηση απαιτεί ο PAR να τηρεί ένα πίνακα αντιστοίχισης μεταξύ των κατασκευασμένων socket ανά κινητό κόμβο ο οποίος είναι σε φάση εκτέλεσης διαπομπής ώστε να αντιστοιχίζει την παράδοση των γεγονότων με τα socket που θα πρέπει να κλείσουν. Εναλλακτικά η διαδικασία «κλεισίματος» μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ενός απλού χρονομετρητή ο οποίος να αφήνει το περιθώριο ολοκλήρωσης της διαπομπής τουλάχιστο και δεν επιτρέπει την συνέχιση της προώθησης για ασύμφορα μεγάλο χρονικό διαστήματα. Ένα περιθώριο της τάξης του ενός ή λίγων περισσότερων sec είναι υπεραρκετό ώστε να καλύψει περιπτώσεις κινητών που παλινδρομούν μεταξύ διαφόρων δικτύων.

3.5.2 Απόλυτος Συγχρονισμός Διαπομπών Στρώματος Δικτύου και Ζεύξης Δεδομένων

Ένα από τα προβλήματα που εισάγει η λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB είναι αυτό της πρόωρης εκκίνησης του μηχανισμού προώθησης των πακέτων πολυεκπομπής από το παλιό προς το νέο δίκτυο στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών. Όπως αναλύθηκε νωρίτερα το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η προ-δραστική προώθηση είναι επί της ουσίας αχρείαστη για το διάστημα που προηγείται της διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, δεδομένου ότι ο κινητός κόμβος λαμβάνει τα πακέτα πολυεκπομπής ενώ είναι συνδεδεμένος στο προηγούμενο δίκτυο. Επιπλέον μερικά από αυτά τα πακέτα αποθηκεύονται χωρίς ιδιαίτερο λόγο και από τον προτεινόμενο μηχανισμό buffering. Στην περίπτωση εκτέλεσης προ-δραστικών διαπομπών, το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι σχετικά μικρό οπότε το πρόβλημα δεν είναι αρκετά σοβαρό και μπορεί να θεωρηθεί ανεκτό, δεδομένου του οφέλους που αποκομίζεται (trade-off). Εντούτοις, όπως θα φανεί και στο 4^ο Κεφάλαιο, στην περίπτωση των λανθασμένων προβλέψεων το πρόβλημα είναι εξαιρετικά έντονο τόσο για το δίκτυο όσο και για την προσφερόμενη στο κινητό ποιότητα υπηρεσίας.

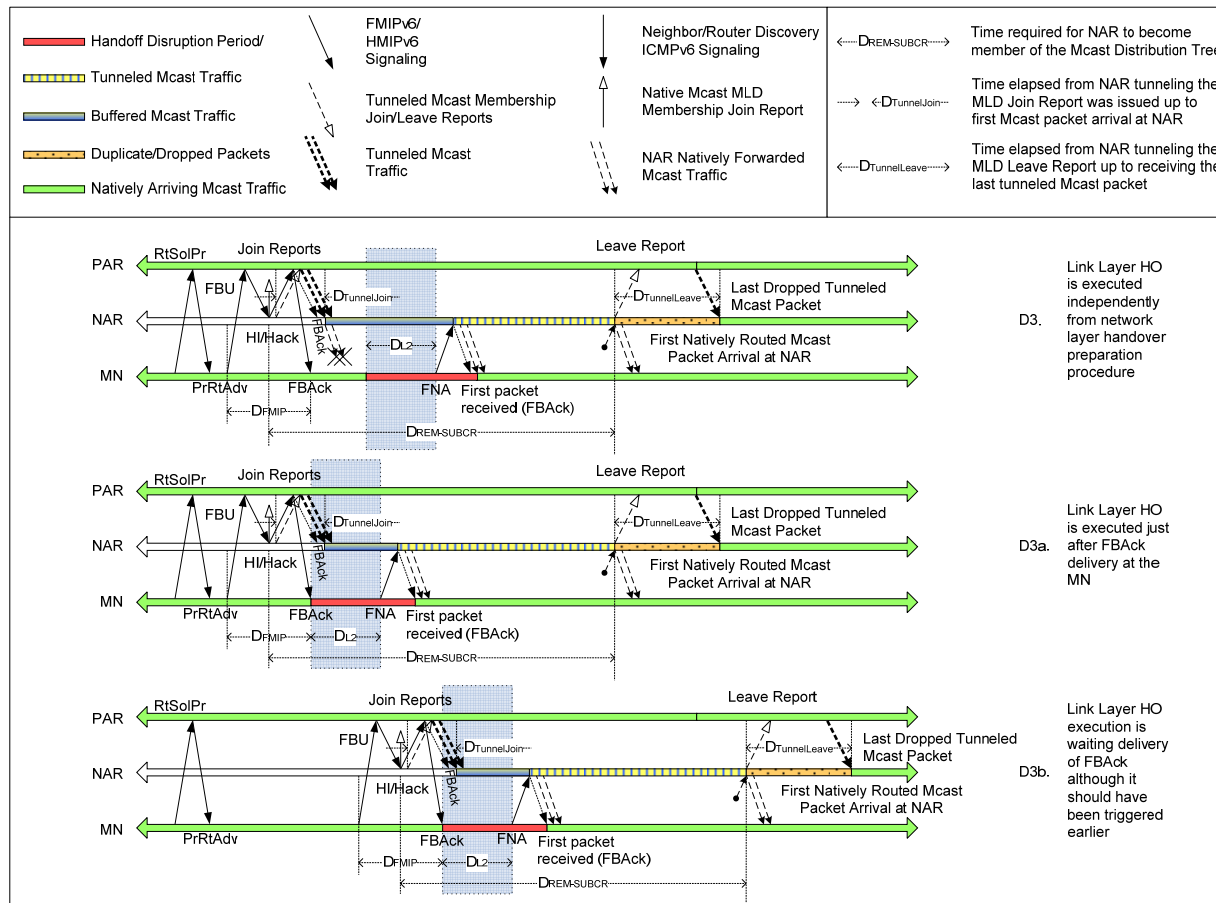
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι γενικότερο, δηλαδή δεν σχετίζεται αποκλειστικά με την λειτουργία του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, αλλά αφορά το γενικότερο πλαίσιο στο οποίο θεωρείται η λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6. Για παράδειγμα στην περίπτωση των unicast διαπομπών, η προ-δραστική λειτουργία του FMIPv6, προβλέπει ότι σταματά η προώθηση των unicast πακέτων στον κινητό κόμβο μόλις ολοκληρωθεί η προ-δραστική διαδικασία σηματοδότησης. Τα πακέτα προωθούνται και αποθηκεύονται προσωρινά στον νέο δρομολογητή πρόσβασης και παραδίδονται στο κινητό αφότου συνδεθεί μετά από λίγο στο νέο δίκτυο, διαταράσσοντας σημαντικά την ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας σε αυτό. Στο ίδιο πλαίσιο, συναφές είναι και το πρόβλημα λανθασμένων προβλέψεων· εν γένει μία λάθος πρόβλεψη έχει σαν αποτέλεσμα εκτός από την χειροτέρευση της προσφερόμενης ποιότητας στο κινητό επιπλέον και την κακή και άσκοπη χρήση των δικτυακών πόρων για την προώθηση αλλά και τη προσωρινή αποθήκευση των πακέτων στο λάθος δίκτυο.

Είναι προφανές ότι η βασική αιτία δημιουργίας των παραπάνω προβλημάτων προέρχεται από την αδυναμία απόλυτου συγχρονισμού μεταξύ των μηχανισμών υποστήριξης της διαπομπής που εκτελούνται στα στρώματα δικτύου και ζεύξης δεδομένων. Κατά συνέπεια, για την αντιμετώπισή τους απαιτείται η περεταίρω διασυνεργασία των διεργασιών που εκτελούνται σε αυτά. Βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση ή στην καλύτερη περίπτωση ο εκμηδενισμός του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ της στιγμής που παραδίδεται το μήνυμα FBACk στον κινητό κόμβο στο παλιό δίκτυο και του χρονικού σημείου στο οποίο ξεκινά η διαπομπή στρώματος ζεύξης δεδομένων. Με βάση τις προσφερόμενες δυνατότητες από το στρώμα MIPv6, ένας πιθανός τρόπος ικανοποίησης της παραπάνω απαίτησης είναι η αποστολή της εντολής «Άμεση Εκτέλεση Διαπομπής» (βλέπε Πίνακας 2 - 1, MIPv6 Commands Scan, Link Switch), από το στρώμα δικτύου προς το στρώμα ζεύξης δεδομένων αμέσως μετά την παράδοση του μηνύματος FBACk στο κινητό. Η συγκεκριμένη απαίτηση είναι εύκολα υλοποιήσιμη, εφόσον κατά την προετοιμασία μίας προ-δραστικής διαπομπής, προφανώς επίκειται η ικανοποίηση των κριτηρίων σκανδαλισμού της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Προχωρώντας στον πιο αυστηρό συγχρονισμό των διαδικασιών των στρωμάτων ζεύξης και δικτύου, στο συγκεκριμένο σημείο θα πρέπει να απαιτηθεί η εκτέλεση της διαπομπής προς το δίκτυο στο οποίο έχει καταλήξει νωρίτερα ο μηχανισμός πρόβλεψης διαπομπών και προς το οποίο έχει ήδη εκτελεστεί η διαδικασία προετοιμασίας. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται η πιθανότητα εκτέλεσης λανθασμένων προβλέψεων και κατ' επέκταση περιορίζεται η άσκοπη κατανάλωση πόρων λόγω της εκτέλεσης πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών.

Τέλος μία επιπλέον πρόταση που θα μπορούσε να εξαλείψει και την πιθανότητα εκτέλεσης μετα-δραστικών διαπομπών, ή τουλάχιστο να μειώσει τη συχνότητα εμφάνισής τους στο ελάχιστο, είναι η ικανοποίηση της απαίτησης ο κινητός κόμβος να μην επιτρέπει την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος δικτύου εφόσον δεν έχει ολοκληρωθεί η προ-δραστική διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης θα πρέπει να ελέγχεται αποκλειστικά από το πρωτόκολλο FMIPv6 και να σκανδαλίζεται από την παράδοση του μηνύματος FBACk στο κινητό στο παλιό δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, ο συγχρονισμός των μηχανισμών διαχείρισης διαπομπών στα στρώματα δικτύου και ζεύξης επιτυγχάνεται με τον περιορισμό της ανεξαρτησίας στη λειτουργία του τελευταίου και την επέκταση της λογικής των αλγορίθμων απόφασης εκτέλεσης διαπομπής στο πρώτο.

Παρατηρώντας την περίπτωση D3 στο Σχήμα 3 - 12, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην τυπική περίπτωση η εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης είναι ανεξάρτητη από αυτή της προετοιμασίας της διαπομπής στρώματος δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB προσαρμόζεται στα γεγονότα που συμβαίνουν στο υποκείμενο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Αντίθετα η λειτουργία που αναλύθηκε μόλις, αφαιρεί πολλά από τα χαρακτηριστικά ανεξαρτησίας από το στρώμα ζεύξης, τα οποία και εισάγει στις λειτουργικές υποχρεώσεις του στρώματος δικτύου. Το Σχήμα 3 - 13 απεικονίζει τις διαδικασίες σηματοδότησης του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB στην περίπτωση που εφαρμόζονται οι παραπάνω προτάσεις. Έτσι πέρα από την κλασική προ-δραστική λειτουργία (περίπτωση D3 Σχήμα 3 - 12, η οποία επίσης απεικονίζεται στο Σχήμα 3 - 13), παρουσιάζεται και η προηγμένη λειτουργία του M-

FMIPv6/FTB στην οποία η εκτέλεση της διαπομπής πραγματοποιείται αμέσως μετά την παράδοση του μηνύματος FBBack, είτε αυτή πραγματοποιείται πριν το χρονικό σημείο στο οποίο θα σκανδαλιζόταν η ανεξάρτητη εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης (περίπτωση D3a Σχήμα 3 - 13), είτε πραγματοποιείται μετά (περίπτωση D3b Σχήμα 3 - 13), λόγω αργοπορημένου σκανδαλισμού του γεγονότος Link Handoff Imminent.



Σχήμα 3 - 13. Χρονισμός Διαδικασιών Σηματοδότησης και παράδοσης πακέτων κίνησης κατά την προηγμένη λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 - 13, το μεγάλο όφελος που προκαλεί η λειτουργία των παραπάνω τεχνικών εντοπίζεται στο ότι με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο αριθμός των πακέτων που αποθηκεύονται προσωρινά στον NAR. Από την άλλη, η διαδικασία προώθησης των πακέτων πολυεκπομπής είναι ανεξάρτητη από τη χρονική στιγμή που συνδέεται ο κινητός κόμβος στο νέο δίκτυο ή τη στιγμή που αποσυνδέεται από το παλιό. Αντίθετα η διαδικασία εξαρτάται αποκλειστικά από το χρόνο που απαιτείται ώστε ο νέος δρομολογητής πρόσβασης να καταστεί μέλος του δένδρου διανομής. Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα για την αποτίμηση του συνολικού οφέλους που προκαλείται από η λειτουργία του προηγμένου μηχανισμού, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και τη χρήση του μηχανισμού έγκαιρης αποχώρησης του κόμβου PAR από το δένδρο διανομής. Καταλήγουμε συνεπώς στο συμπέρασμα ότι συνολικά πλέον στο δίκτυο δρομολογούνται λιγότερα πακέτα πολυεκπομπής. Με άλλα λόγια παρατηρώντας το συνολικό πλήθος των πακέτων που προωθούνται κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του φαινομένου της διαπομπής, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος προηγμένος μηχανισμός

πραγματοποιεί προώθηση μικρότερου αριθμού πακέτων πολυεκπομπής (μέσω του δένδρου διανομής ή μέσω της διόδου IP *PAR_to_NAR_Tunnel*) κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου της διαπομπής.

3.6 Εφαρμογή του M-FMIPv6/FTB σε Σύγχρονα και Μελλοντικά Συστήματα Επικοινωνιών

Ο μηχανισμός που προτείνεται μέσω του M-FMIPv6/FTB, έχει οριστεί ως η multicast επέκταση του πρωτοκόλλου FMIPv6, το οποίο καλύπτει την υποστήριξη unicast διαπομπών. Η λειτουργία του τελευταίου θεωρείται στο *περιβάλλον ταχέων διαπομπών* [3], το οποίο έχει οριστεί σαν ένα γενικό πλαίσιο, εντός του οποίου ο κινητός κόμβος και το δίκτυο είναι σε θέση να διαχειριστούν πληροφορίες που αφορούν στη λειτουργία του στρώματος ζεύξης δεδομένων και σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα και ποιότητα ήδη εγκατεστημένων ζεύξεων. Πιο συγκεκριμένα οι πληροφορίες σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα γειτονικών δικτύων πρόσβασης στην περιοχή κινητικότητας του τερματικού, τη δυνατότητα εγκατάστασης ή απεγκατάστασης συνδέσεων στρώματος ζεύξης δεδομένων, τη διαχείριση εντολών άμεσης εκτέλεσης διαπομπών σε γειτονικά δίκτυα, την έκδοση αναφορών σχετικών με την διαδικασία εκτέλεσης μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων. Βασικός στόχος από τη διαχείριση των συγκεκριμένων πληροφορικών αποτελεί η προετοιμασία της διαπομπής του τερματικού κόμβου πριν την εκτέλεσή της. Έχοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι, βασική απαίτηση για την εφαρμογή του προτεινόμενου μηχανισμού πολυεκπομπής σε πραγματικά συστήματα τηλεπικοινωνιών, αποτελεί η εγκατάσταση και λειτουργία του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών* στη μορφή που περιγράφεται στο [3]. Η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής προφανώς είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας του περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών και της εφαρμογής των επεκτάσεων που περιγράφηκαν. Θα πρέπει να τονιστεί ότι σε ό,τι αφορά το ζήτημα «εγκατάστασης» του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών* (βλέπε ενότητες 2.3.2 και 3.2), τόσο η ομάδα εργασίας IEEE 802.21 [24], όσο και οι ομάδες IETF DNA [25] και IRTF MOBOPTS [26], ασχολούνται με την προτυποποίηση του συγκεκριμένου γενικευμένου πλαισίου, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των απαιτήσεων και δυνατοτήτων που τίθενται και είναι απαραίτητο να υποστηριχθούν αντίστοιχα από τη σκοπιά των στρωμάτων ζεύξης δεδομένων και δικτύου. Οι αναγνώστες μπορούν να απευθυνθούν στα [27], [28] και [29] για περισσότερες πληροφορίες. Αντίστοιχα, σε σχέση με την εγκατάσταση και εφαρμογή του λειτουργικού κομματιού του προτεινόμενου μηχανισμού, είναι προφανές ότι η μόνη απαίτηση είναι η εγκατάσταση του κατάλληλου λογισμικού που υλοποιεί το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB τόσο στη μεριά των τερματικών όσο και στην πλευρά του δικτύου και δη τους δρομολογητές των ασύρματων δικτύων πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι δεν τίθεται επιπλέον απαιτήσεις εισαγωγής νέων λειτουργικών κόμβων εντός του δικτύου (πρόσβασης ή πυρήνα) για τη λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί απευθείας (όπως έχει περιγραφεί μέχρις εδώ) σε υπάρχοντα συστήματα κινητών επικοινωνιών 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς, όπως το GSM/GPRS και το UMTS αντίστοιχα. Ο βασικός λόγος είναι ότι το πρωτόκολλο FMIPv6 είναι άμεσα εφαρμόσιμο σε δίκτυα που βασίζονται αποκλειστικά στο IP. Στα παραπάνω συστήματα

έχει θεωρηθεί μία αυτόνομη αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων, σύμφωνα με την οποία η κινητικότητα των τερματικών κόμβων αντιμετωπίζεται στο στρώμα ζεύξης δεδομένων [30], ενώ για τα IP συστήματα η διαχείριση κινητικότητας θεωρείται στο στρώμα δικτύου. Σύμφωνα με την προδιαγραφή της υπηρεσίας GPRS (τόσο για το GSM όσο και για το UMTS), η επικοινωνία ενός τερματικού κόμβου με το παγκόσμιας εμβέλειας Διαδίκτυο, θεωρείται μέσω μίας σημείου-προς-σημείο ζεύξης (στρώματος 2), που εγκαθίσταται μεταξύ του κινητού κόμβου και της πύλης του δικτύου κινητών επικοινωνιών προς το Διαδίκτυο (κόμβος GGSN). Στην πράξη η συγκεκριμένη ζεύξη απαρτίζεται από τις επιμέρους συνδέσεις κατά μήκος του ασύρματου και ασύρματου δικτύου (δηλ. στον ασύρματο ραδιοδίαυλο, το ενσύρματο δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού). Κατά την εκτέλεση διαπομπών ενός τερματικού κόμβου μεταξύ διαφόρων κυψελών (δηλ. περιοχών ασύρματης πρόσβασης), ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας ουσιαστικά «μεταφέρει», ή με βάση τη χρησιμοποιούμενη ορολογία «επανατοποθετεί³⁰», τις παραπάνω επιμέρους συνδέσεις μεταξύ των νέων κόμβων του ιεραρχικού δικτύου, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα νέο ελάχιστο μονοπάτι μεταξύ του τερματικού και του κόμβου GGSN.

Το M-FMIPv6/FTB είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε συστήματα κινητών επικοινωνιών που ακολουθούν την *Αρχιτεκτονική All-IP Συστημάτων* (All-IP Network, AIPN) [31]-[32], η οποία έχει προταθεί σαν η μετεξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου κορμού για συστήματα κινητών επικοινωνιών επόμενης της τρίτης (Beyond 3G, B3G) και τέταρτης γενιάς (4G). Το AIPN είναι ένα δίκτυο βασισμένο στο πρωτόκολλο IP, αναφορικά τόσο με την δρομολόγηση των πακέτων κίνησης προς τους τερματικούς κόμβους που εξυπηρετεί όσο και με τον έλεγχο των υπηρεσιών που προσφέρονται από αυτό. Υπενθυμίζεται ότι στο UMTS αν και προσφέρεται η δυνατότητα μεταφοράς πακέτων IP μέσω της υπηρεσίας GPRS, ο έλεγχος υπηρεσιών πραγματοποιείται αποκλειστικά από αυτόνομους μηχανισμούς και ειδικά πρωτόκολλα για αυτό το σκοπό. Οι προσφερόμενες από το AIPN υπηρεσίες ελέγχου περιλαμβάνουν και την διαχείριση κινητικότητας η οποία πλέον θα βασιστεί αποκλειστικά σε τεχνολογίες και πρωτόκολλα βασισμένα στο IP, και θα είναι ανεξάρτητες από τις αντίστοιχες τεχνολογίες πρόσβασης και μεταφοράς πακέτων κίνησης. Βασικός στόχος της λειτουργίας του AIPN είναι η παροχή ομοιογενών υπηρεσιών εντός και μεταξύ μίας πληθώρας συστημάτων πρόσβασης και τερματικών. Η διασύνδεση και διασυνεργασία με εξωτερικά δίκτυα IP, όπως το Διαδίκτυο, ή παλαιότερα συστήματα τηλεπικοινωνιών (PSTN, GSM, UMTS), θα υποστηρίζεται στις άκρες του δικτύου AIPN με χρήση ειδικών *Κόμβων Πυλών* (*gateways*) προς τα διάφορα ετερογενή συστήματα.

Σύμφωνα με την *Αρχιτεκτονική AIPN*, κάθε κινητός κόμβος αποκτά πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω ενός *Κόμβου Πύλης*, που είναι τοποθετημένος στην άκρη ενός IP δικτύου προς την πλευρά ετερογενών δικτύων ασύρματης πρόσβασης, όπως για παράδειγμα τα IEEE 802.11 WLAN, IEEE 802.16 WWAN, UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), Ad-hoc networks κ.α. Ο *Κόμβος Πύλη* παίζει για καθεμία τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης, το ρόλο που αντιστοιχεί στον κόμβο *Δρομολογητή Πρόσβασης* (AR), που έχει θεωρηθεί στα πλαίσια της διατριβής. Το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB μπορεί να εγκατασταθεί στους *Κόμβους Πύλες* και να υποστηρίξει

³⁰ Στην αγγλική αποδίδεται από τον όρο relocation.

την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί, θεωρώντας ότι καθένα από τα ετερογενή παραπάνω δίκτυα είναι δυνατό αφενός να διαχειριστεί, μέσω αυτόνομων μηχανισμών που ανήκουν στο υποκείμενο στρώμα, την εγκατάσταση και κατάλυση συνδέσεων μεταξύ του κινητού τερματικού και του *Κόμβου Πύλη*, και αφετέρου ότι ο τερματικός κόμβος κινείται εντός του περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών ανεξάρτητα από την τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιείται. Σε αυτό το σενάριο, η μόνη δυσκολία παραμένει η εγκατάσταση και λειτουργία του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών*, δηλαδή η εγκατάσταση ενός πλαισίου πληροφοριών το οποίο θα υποστηρίξει τη διασυνεργασία μεταξύ των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας που λειτουργούν στα στρώματα ζεύξης και δικτύου. Υπενθυμίζεται ότι η ομάδα IEEE 802.21 εργάζεται ήδη προς αυτήν την κατεύθυνση [27], παρουσιάζοντας προς το στρώμα δικτύου, ένα ομογενοποιημένο στρώμα διαχείρισης γεγονότων που λαμβάνουν χώρα στο στρώμα ζεύξης, ανεξάρτητα δηλαδή από την τεχνολογία (πχ. IEEE 802.11 WLAN ή UTRAN).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο προτάσεις εφαρμογής του προτεινόμενου μηχανισμού σε συστήματα ασύρματων δικτύων τοπικής ή ευρείας κλίμακας όπως το IEEE 802.11 WLAN και το UMTS στην έκδοση AIPN. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται οι διαδικασίες σηματοδότησης που λαμβάνουν χώρα κατά την εκτέλεση προ-δραστικών διαπομπών πολυεκπομπής, όταν χρησιμοποιείται ο προτεινόμενος μηχανισμός κινητικότητας. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην ταυτοποίηση των ιδιαίτερων μηνυμάτων σηματοδότησης που αφορούν καθεμία από τις τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης που περιγράφονται. Η παράδοση των συγκεκριμένων μηνυμάτων αντιστοιχεί σε ιδιαίτερα σπουδαία, για την εξέλιξη της εκτελούμενης διαπομπής, χρονικά σημεία, δεδομένου του ότι επηρεάζουν την εξέλιξη της συνολικής διαδικασίας διαχείρισης της διαπομπής. Σημειώνεται ότι η ανάλυση που ακολουθεί καλύπτει μόνο τις περιπτώσεις διαπομπών ίδιας τεχνολογίας (οριζόντιες διαπομπές). Η περίπτωση διαπομπών μεταξύ συστημάτων διαφορετικών τεχνολογιών αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης μελλοντικής έρευνας και δε θα αναλυθεί περαιτέρω.

3.6.1 IEEE 802.11 – WLAN

Στην περίπτωση των ασύρματων συστημάτων τοπικής εμβέλειας, και πιο συγκεκριμένα στο σύστημα IEEE 802.11, κάθε κινητός κόμβος είναι συσχετισμένος κάθε χρονική στιγμή με ένα μοναδικό σταθμό βάσης μέσω του οποίου αποκτά πρόσβαση στο υπόλοιπο ασύρματο τοπικό δίκτυο και μέσω του δρομολογητή πρόσβασης στο παγκόσμιο Διαδίκτυο. Ως συσχέτιση εννοείται η περίπτωση στην οποία αμφότεροι κόμβοι (σταθμός βάσης και ασύρματος σταθμός) έχουν ανταλλάξει την κατάλληλη πληροφορία που τους επιτρέπει να έχουν εγκατεστημένη μία αμφίδρομη σύνδεση μέσω του ασύρματου ραδιοδιαύλου μέσω του οποίου επικοινωνούν. Επιπλέον αφορά και θέματα ασφάλειας (αυθεντικοποίησης του χρήστη και του δικτύου κλπ).

Σύμφωνα με την προδιαγραφή του IEEE 802.11 [6], ένας κινητός κόμβος οδηγείται στην εκτέλεση μίας διαπομπής όταν καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ποιότητα της εγκατεστημένης με τον τρέχοντα σταθμό βάσης σύνδεσης δεν είναι *ικανοποιητική*. Ο ορισμός της ποιότητας μίας σύνδεσης ως ικανοποιητική δεν είναι απόλυτος και εξαρτάται από την υλοποίηση. Στις

περισσότερες περιπτώσεις εντούτοις εννοείται ότι είτε η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι εξαιρετικά χαμηλή, είτε ότι ο ρυθμός των λαθών μετάδοσης είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μην είναι εφικτή η αποδιαμόρφωση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, η ανασύνθεση των πλαισίων πληροφορίας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων και η επίτευξη ενός αποδεκτού ρυθμού διέλευσης. Ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας στρώματος ζεύξης χρειάζεται να χρησιμοποιεί ένα υπο-μηχανισμό παρακολούθησης της ποιότητας της εγκατεστημένης ζεύξης με το συσχετισμένο σταθμό βάσης. Όταν ο συγκεκριμένος μηχανισμός καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η ποιότητα της ζεύξης δεν είναι ικανοποιητική, ο σταθμός είναι υποχρεωμένος να εκκινήσει τη διαδικασία εκτέλεσης της διαπομπής προς ένα γειτονικό σταθμό βάσης. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του συστήματος IEEE 802.11, η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά ο τερματικός/ασύρματος/κινητός σταθμός πραγματοποιεί σάρωση (scanning) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ούτως ώστε να συμπεράνει εάν υπάρχει κάποιος άλλος σταθμός βάσης στην περιοχή του, από τον οποίο λαμβάνει σήματα ικανοποιητικής ποιότητας. Κάθε σταθμός βάσης εκπέμπει περιοδικά (κάθε 100msec στην τυπική περίπτωση) σήματα που τον ταυτοποιούν και μέσω των οποίων συγχρονίζονται οι κινητοί σταθμοί που βρίσκονται στην περιοχή εμβέλειάς του.
2. Με βάση τόσο τη διαδικασία σάρωσης και τα λαμβανόμενα μηνύματα δημιουργείται στην πλευρά του τερματικού μία λίστα με τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στην ευρύτερη περιοχή κινητικότητας του. Η λίστα συνήθως ταξινομείται με βάση κάποιο κριτήριο ποιότητας όπως για παράδειγμα η ισχύς των λαμβανόμενων σημάτων. Επίσης περιλαμβάνει για κάθε σημείο πρόσβασης που ανακαλύφθηκε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες συντονισμού και συγχρονισμού του φυσικού στρώματος και του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Σημειώνεται ότι η εκτέλεση των βημάτων 1 και 2 ουσιαστικά αντιστοιχεί στην εκτέλεση της διαδικασίας *Ανακάλυψης Σημείου Πρόσβασης*.
3. Ακόλουθα ο κινητός κόμβος επιλέγει κάποιον από τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης με βάση κάποιο κριτήριο. Η υλοποίηση του αλγορίθμου επιλογής εξαρτάται αποκλειστικά από την υλοποίηση του πρωτοκόλλου (δεν είναι προτυποποιημένη). Μόλις πραγματοποιηθεί η επιλογή εκτελείται η διαδικασία *συμμετοχής (joining)* μέσω της οποίας ο κινητός κόμβος συντονίζει τον πομποδέκτη του με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου από τον επιλεγθέντα σταθμό βάσης καναλιού.
4. Στη συνέχεια εκτελείται η διαδικασία *αυθεντικοποίησης (authentication)* του κινητού τερματικού η οποία ανάλογα με το επίπεδο ασφάλειας (Open System – Shared Key Authentication) περιλαμβάνει ανταλλαγή 2 έως 4 μηνυμάτων σηματοδότησης.
5. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το *συσχετισμό (association)* του κινητού τερματικού με το νέο σταθμό βάσης στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Η διαδικασία ουσιαστικά πραγματοποιεί ένα είδος εγγραφής του κινητού κόμβου στον επιλεγθέντα σταθμό βάσης. Με αυτόν τον τρόπο ενημερώνεται ο τελευταίος, μέσω κατάλληλων μηνυμάτων σηματοδότησης, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας προσάρτησης του κινητού κόμβου στο τοπικό ασύρματο δίκτυό του.

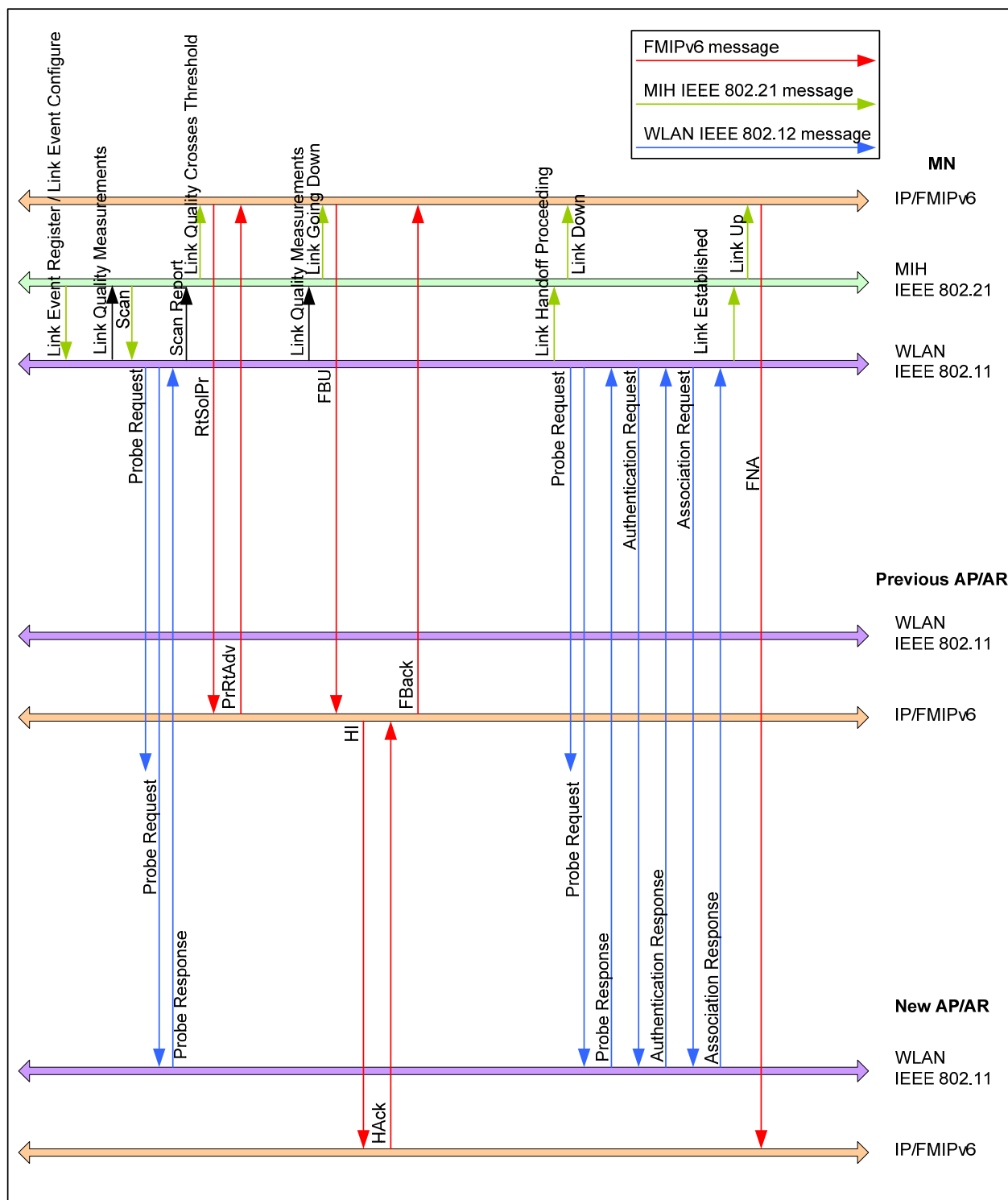
Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας *συσχετισμού*, ο κινητός κόμβος και ο σταθμός βάσης έχουν εγκατεστημένη μεταξύ τους μία σύνδεση μέσω της οποίας είναι εφικτή η επικοινωνία του πρώτου τόσο με άλλους γειτονικούς κόμβους στο τοπικό ασύρματο δίκτυο όσο και με άλλους κόμβους στο Διαδίκτυο εφόσον υπάρχει κάποιος δρομολογητής πρόσβασης, άμεσα συνδεδεμένος στο AP, που προσφέρει τη διασύνδεση. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι με στόχο τη μείωση της επίδρασης που μπορεί να έχει η εκτέλεση της διαπομπής στην ποιότητα των προσφερόμενων στο κινητό υπηρεσιών, προβλέπεται η βελτίωση της επίδοσης του μηχανισμού υποστήριξης μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων για τα συστήματα IEEE 802.11 μέσω της χρήσης του πρωτοκόλλου *Inter-Access Point Protocol* (IAPP) [33]. Η λειτουργία του IAPP δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς τυχόντων προσωρινά αποθηκευμένων πακέτων στο προηγούμενο της διαπομπής σημείο πρόσβασης προς το νέο. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου εντούτοις δεν έχει επεκταθεί για την περίπτωση πακέτων πολυεκπομπής και δεν θα αναλυθεί περεταίρω.

Έχοντας περιγράψει τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία ενός συστήματος IEEE 802.11 εντός του περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής. Για το λόγο αυτό θεωρείται ένα σενάριο κινητικότητας που περιλαμβάνει τη διαπομπή ενός κινητού κόμβου μεταξύ δύο σημείων πρόσβασης (AP) τα οποία ανήκουν σε διαφορετικές περιοχές δικτύου IP (IP network domains), ενώ ο κινητός κόμβος έχει ήδη εγκατεστημένη μία σύνδεση πολυεκπομπής πριν τη διαπομπή του. Το Σχήμα 3 - 14 που ακολουθεί απεικονίζει τη σηματοδότηση που ανταλλάσσεται μεταξύ του κινητού κόμβου και προηγούμενου και νέου σημείου/δρομολογητή πρόσβασης κατά την εκτέλεση της διαπομπής³¹.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το ενδιαμέσο στρώμα MII αρχικά (όχι κατ' ανάγκη λίγο πριν την εκτέλεση μίας διαπομπής), εκδίδει μία αίτηση εγγραφής προς το υποκείμενο στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο ασύρματο μέσο (WLAN MAC), με την οποία προδιαγράφει τη λίστα των υπηρεσιών (γεγονότων, σημείων σκανδαλισμού) για τα οποία ζητά να ενημερωθεί μέσω κατάλληλων ενδείξεων από το τελευταίο. Στη συνέχεια, με βάση τις αναφερόμενες στο στρώμα MII μετρήσεις ποιότητας, εφόσον η ποιότητα της εγκατεστημένης ζεύξης χειροτερεύσει αρκετά (ξεπεράσει ένα προδιαγεγραμμένο κατώφλι ποιότητας), το στρώμα MII προχωρά στην εκτέλεση της διαδικασίας ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης. Για το σκοπό αυτό εκδίδει μία εντολή σάρωσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, προς το στρώμα ζεύξης δεδομένων μέσω της οποίας επιχειρεί την κατασκευή μίας λίστας με τα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα στην περιοχή κινητικότητάς του.

Με βάση την προδιαγραφή του IEEE 802.11, η εκτέλεση της διαδικασίας *σάρωσης* υλοποιείται με την ανταλλαγή κατάλληλων μηνυμάτων διαχείρισης (Probe Request/Response), που ανταλλάσσονται μεταξύ του τερματικού σταθμού και των διαθέσιμων στην περιοχή του σημείων

³¹ Για λόγους απλούστευσης του σχήματος δεν απεικονίζεται η σηματοδότηση που αφορά τη διαπομπή πολυεκπομπής εφόσον η συγκεκριμένη διαδικασία εκτελείται αποκλειστικά στο στρώμα δικτύου και δεν επηρεάζει ή επηρεάζεται από τα υποκείμενα στρώματα. Οι ενδιαφερόμενοι αναγνώστες παραπέμπονται στο Σχήμα 3 - 3 και το Σχήμα 3 - 5 για τη σχετική σηματοδότηση.



Σχήμα 3 - 14. Διαδικασία σηματοδότησης οριζόντιας διαπομπής IEEE 802.11, με χρήση IEEE 802.21 προτυποποιημένων γεγονότων/σημείων σκανδαλισμού

πρόσβασης. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας *σάρωσης* οδηγεί στην κατασκευή της λίστας με τα διαθέσιμα AP η οποία και προωθείται προς το στρώμα MIH. Δεδομένου ότι συνεχίζει να ικανοποιείται το κριτήριο χειροτέρευσης της ποιότητας της εγκατεστημένης ζεύξης, το στρώμα MIH προχωρά προς την έκδοση του γεγονότος *Link_Quality_Crosses_Threshold* προς το στρώμα δικτύου δηλαδή το πρωτόκολλο FMIPv6. Στο σημείο αυτό ξεκινά η εκτέλεση της διαδικασίας

Ανακάλυψη Νέου Δρομολογητή Πρόσβασης (New Access Router Discovery, NAR Discovery). Η εκτέλεση της διαδικασίας NAR Discovery, που υλοποιείται με την ανταλλαγή των μηνυμάτων RtSolPr και PrRtAdv, χρησιμοποιεί σαν είσοδο την αναφορά που προέκυψε από τη διαδικασία *AP Discovery*, και οδηγεί στην δημιουργία μίας λίστας με τα διαθέσιμα δίκτυα στην περιοχή κινητικότητας του ασύρματου κόμβου. Η λίστα κατασκευάζεται από τον τρέχοντα AR ο οποίος θα πρέπει να συντηρεί πίνακες αντιστοίχισης μεταξύ των διευθύνσεων στρώματος ζεύξης δεδομένων και στρώματος δικτύου (βλέπε ενότητα 3.1.1). Εφόσον το κινητό συνεχίζει να απομακρύνεται από το τρέχον AP, η ποιότητα της σύνδεσης που έχει με αυτό θα συνεχίζει να χειροτερεύει. Το χρονικό σημείο κατά το οποίο η ποιότητα ξεπεράσει ένα δεύτερο κατώφλι, το στρώμα M1H εκδίδει μία αντίστοιχη ένδειξη προς το στρώμα δικτύου μέσω του trigger *Link_Going_Down* (LGD). Προφανώς για την έκδοση του συγκεκριμένου trigger απαιτείται η παρακολούθηση του επιπέδου ποιότητας της εγκατεστημένης ζεύξης. Η εκτέλεση της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί υποχρέωση του στρώματος MAC το οποίο ουσιαστικά παραδίδει μετρήσεις ποιότητας προς το M1H για το σκοπό αυτό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράδοση του γεγονότος LGD προς το στρώμα δικτύου πραγματοποιείται εφόσον έχει εκτελεστεί επιτυχώς εκτός από τις διαδικασίες AP/AR Discovery, επιπλέον και η διαδικασία πρόβλεψης της διαπομπής πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η ροή πληροφορίας από το στρώμα M1H προς το στρώμα δικτύου ουσιαστικά μεταφέρει το αναγνωριστικό του δικτύου προς το οποίο εκτιμάται ότι θα καταλήξει το κινητό στην επικείμενη διαπομπή του.

Η έκδοση του γεγονότος LGD ουσιαστικά σηματοδοτεί την εκκίνηση της διαδικασίας υποστήριξης ταχέων διαπομπών και οδηγεί στην αποστολή του μηνύματος FBU από την πλευρά του τερματικού προς τον δρομολογητή πρόσβασης που εξυπηρετεί το δίκτυο στο οποίο ανήκει. Η διαδικασία προχωρά με την αντίστοιχη ενημέρωση του νέου δρομολογητή πρόσβασης μέσω των μηνυμάτων H1 και HAck και την περαιτέρω ενημέρωση του τερματικού για την έκβαση της προ-δραστικής προετοιμασίας της διαπομπής του. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την αποστολή του μηνύματος FBACk προς το κινητό. Στις σύγχρονες υλοποιήσεις των συστημάτων τοπικών ασύρματων δικτύων, η εκτέλεση μίας διαπομπής (στρώματος 2) ελέγχεται αποκλειστικά από το στρώμα ζεύξης δεδομένων και τους αλγορίθμους που εκτελούνται σε αυτό. Δεδομένης της έκδοσης του γεγονότος LGD και της ολοκλήρωσης της διαδικασίας προετοιμασίας της διαπομπής στο στρώμα δικτύου (για την εκτέλεση μίας προ-δραστικής διαπομπής), με την παράδοση του μηνύματος FBACk, θεωρείται ότι σε κάποια στιγμή θα ξεκινήσει η διαδικασία εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Τη χρονική στιγμή αυτή δεδομένου ότι το στρώμα ζεύξης δεδομένων ενημερώνει σχετικά το στρώμα M1H, εκδίδεται και το trigger *Link_Down* που υποδεικνύει στο στρώμα δικτύου ότι το στρώμα ζεύξης δεδομένων δεν είναι πλέον διαθέσιμο εφόσον εκτελείται η διαπομπή. Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης, εκτελούνται οι διαδικασίες που περιγράφηκαν στην αρχή της παρούσας ενότητας. Πιο συγκεκριμένα εκτελείται ξανά η διαδικασία *σάρωσης* του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Probe Request/Response), επιλέγεται με βάση το αποτέλεσμα της σάρωσης ένα νέο σημείο πρόσβασης, ακολουθεί η διαδικασία *συμμετοχής* στο δίκτυό του, εκτελείται η διαδικασία

αυθεντικοποίησης (Authentication Request/Response) και τέλος η διαδικασία *συσχέτισης* μεταξύ του κινητού τερματικού με το νέο δίκτυο (Association Request/Response).

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας *συσχέτισης* και εφόσον έχει εγκατασταθεί μία νέα σύνδεση μεταξύ του κινητού τερματικού και του νέου AP, ενημερώνεται το στρώμα M1H στην πλευρά του τερματικού και ακολούθως εκδίδει το γεγονός Link_Up προς το στρώμα δικτύου. Η παράδοση του τελευταίου υποδεικνύει ότι έχει ολοκληρωθεί η εγκατάσταση της νέας ζεύξης με νέο AP και κατά συνέπεια η διαδικασία μπορεί να προχωρήσει προς την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος δικτύου. Η τελευταία υλοποιείται με την αποστολή του μηνύματος FNA και των υπόλοιπων μηνυμάτων σηματοδότησης που αφορούν την εκτέλεση της διαπομπής πολυεκπομπής όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 3.3.1.

3.6.2 Συστήματα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς

Η εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών, προήλθε μέσα από την εφαρμογή ήδη ώριμων τεχνολογιών μεταγωγής κυκλώματος, που επηρέασε τη φιλοσοφία στην παροχή υπηρεσιών (άλλωστε η βασική υπηρεσία που προσφέρθηκε αρχικά ήταν η τηλεφωνία) αλλά και την αρχιτεκτονική τους. Κατά βάση τα συστήματα κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς (2.5G και 3G) δίνουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου επιχειρώντας την προεγκατάσταση συνδέσεων συγκεκριμένης ποιότητας, στο μονοπάτι που εκτείνεται εντός του κινητού δικτύου που συνδέει το τερματικό με έναν κόμβο πύλη του δικτύου προς το υπόλοιπο Διαδίκτυο (GGSN). Για το λόγο αυτό, αλλά και με στόχο τον απόλυτο έλεγχο των διαδικασιών διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας, τα συστήματα κινητών επικοινωνιών στηρίχθηκαν στην χρησιμοποίηση πάρα πολλών εξειδικευμένων πρωτοκόλλων, τόσο στο επίπεδο ελέγχου, όσο και στο επίπεδο χρήστη (δεδομένων). Η συγκεκριμένη σχεδιαστική επιλογή, περιορίζει σημαντικά τις δυνατότητες διασύνδεσης των δικτύων κινητών επικοινωνιών με ετερογενή ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης και πιο ανοικτά πρωτόκολλα όπως το IP. Παράλληλα αποτελεί πηγή επιπλέον δικτυακού φορτίου στο δίκτυο πυρήνα. Σαν αποτέλεσμα τα συστήματα 2.5G και 3G, αν και παρέχουν υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, δεν ξεπέρασαν την τροχοπέδη της πολυπλοκότητας στην αρχιτεκτονική, οπότε παρέμειναν κλειστά, υπό την έννοια ότι η διαλειτουργικότητα θεωρείται μόνο για συστήματα ίδιας τεχνολογίας.

Με αναφορά στη διασύνδεση του UMTS με συστήματα που βασίζονται στο IP, οι λύσεις που υιοθετήθηκαν, αν και παρέχουν καθολική αντιμετώπιση των προβλημάτων, και δίνουν τη δυνατότητα προσφοράς υψηλού επιπέδου δικτυακών υπηρεσιών, δεν ακολουθούν την πλέον αποδοτική από την άποψη διαχείρισης πόρων (σε αμφότερα επίπεδα ελέγχου ή χρήστη) προσέγγιση. Ας πάρουμε για παράδειγμα δυο πολύ χαρακτηριστικές περιπτώσεις προσαρμογής του συστήματος UMTS. Η πρώτη σχετίζεται με τη διασύνδεσή του με ασύρματα τοπικά δίκτυα, όπως το IEEE 802.11 WLAN, στο επίπεδο δικτύου και το επίπεδο προσφερόμενων υπηρεσιών (roaming) [34]. Στην περίπτωση αυτή οι σχεδιαστές οδηγήθηκαν σε μία λύση που απαιτούσε εγκατάσταση νέων λειτουργικών κόμβων για την προσαρμογή του συστήματος σε συστήματα βασισμένα στο IP και επιπλέον την ανάπτυξη επιπρόσθετης λειτουργικότητας εντός των νέων αλλά και των υπάρχοντων κόμβων. Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε σε θέματα ασφάλειας (διμερούς

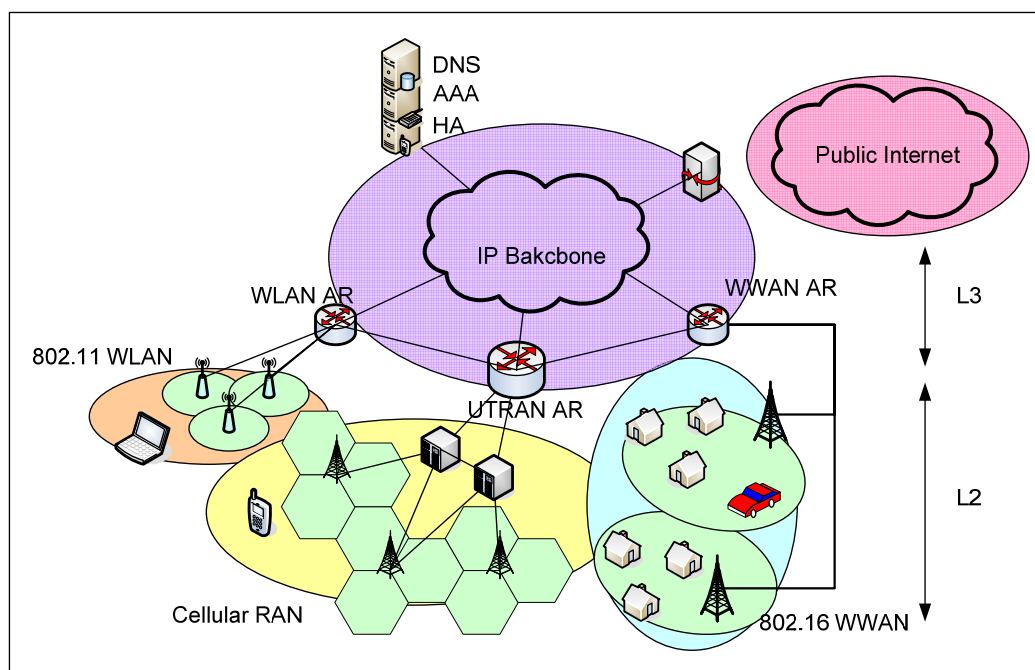
αυθεντικοποίησης, πιστοποίησης, ελέγχου πρόσβασης), χρέωσης και ποιότητας υπηρεσίας. Η δεύτερη αφορά τη διασύνδεση του UMTS στο επίπεδο υποστήριξης υπηρεσιών πολυεκπομπής. Για το λόγο αυτό προδιαγράφηκε μία νέα υπηρεσία επιπέδου δικτύου στην περιοχή μεταγωγής πακέτου, επονομαζόμενη ως υπηρεσίας *Multimedia Broadcast/Multicast Service* (MBMS) για την παροχή υπηρεσιών καθολικής εκπομπής και πολυεκπομπής εντός του δικτύου UMTS [35]. Η MBMS καθιστά εφικτή τη διασύνδεση με το Διαδίκτυο Πολυεκπομπής (IP Multicast) και πιο σπουδαία την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής με βέλτιστο τρόπο, προδιαγράφοντας την χρήση μοιραζόμενων συνδέσεων εντός των δικτύων πρόσβασης και κορμού, διαμέσου των οποίων μεταφέρονται τα πακέτα ροών πληροφορίας συγκεκριμένης ποιότητας που καταλήγουν σε τερματικούς κόμβους-μέλη ομάδων πολυεκπομπής Διαδικτύου. Η ανάπτυξη της υπηρεσίας MBMS ουσιαστικά οδήγησε στην επέκταση της υπηρεσίας GPRS, ορίζοντας μία νέα υπηρεσία για τη διαχείριση συνόδων πολυεκπομπής, επέκτεινε τη λειτουργία των πρωτοκόλλων διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας και απαίτησε την επέκταση της αρχιτεκτονική του δικτύου μέσω της εισαγωγής ενός νέου λειτουργικού κόμβου για τη διαχείριση των εκτελούμενων υπηρεσιών πολυεκπομπής (ουσιαστικά πρόκειται για έναν κόμβο πύλη προς το «multicast Διαδίκτυο»). Η υπηρεσία MBMS περιγράφεται στο Παράρτημα Β.

Με στόχο την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων στη διασύνδεση, τα συστήματα επόμενης γενιάς προβλέπεται ότι θα ακολουθήσουν μία εντελώς διαφορετική φιλοσοφία αναφορικά με την αρχιτεκτονική δομή τους και τη λειτουργικότητα που εγκαθίσταται στους κόμβους που τα απαρτίζουν. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα τέταρτης γενιάς (4G) αναμένεται να έχουν πολύ απλή δομή που θα στηρίζεται αποκλειστικά στη λειτουργία του πρωτοκόλλου IP τόσο για το δίκτυο κορμού όσο και για το δίκτυο πρόσβασης [36], [32]. Με άλλα λόγια αναμένεται να ακολουθήσουν την αρχιτεκτονική All-IP που περιγράφηκε νωρίτερα, χρησιμοποιώντας κατά βάση πρωτόκολλα από τη στοίβα TCP/IP. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί η διασύνδεση μεταξύ ετερογενών συστημάτων στο επίπεδο δικτύου, ενώ παράλληλα θα απαλειφθεί η ανάγκη μετατροπής ή ενθυλάκωσης των πακέτων δεδομένων σε κατάλληλα πακέτα για τη μεταφορά τους εντός του δικτύου, από και προς το τερματικό. Έχοντας ως κοινό παρανομαστή το πρωτόκολλο IP για τη διασύνδεση, προβλέπεται ότι όλα τα ετερογενή μεταξύ τους συστήματα θα χρησιμοποιούν ήδη προτυποποιημένα πρωτόκολλα για την διαχείριση συνόδων και κινητικότητας, τον έλεγχο πρόσβασης και την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας.

Το Σχήμα 3 - 15 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική που προβλέπεται να ακολουθηθεί στα συστήματα 4G, παρουσιάζοντας την δομή του δικτύου ενός παρόχου για την περίπτωση που αυτός λειτουργεί τρία αυτόνομα δίκτυα πρόσβασης (IEEE 802.11 WLAN, UMTS Terrestrial Radio Access Network και IEEE 802.16 WWAN). Η διασύνδεση των συστημάτων διαφορετικών τεχνολογιών πραγματοποιείται στο επίπεδο δικτύου (L3), μέσω του δικτύου κορμού. Όπως φαίνεται στο σχήμα, σε κάθε δίκτυο πρόσβασης παρέχεται πρόσβαση στο δίκτυο του παρόχου μέσω ενός ειδικού δρομολογητή πρόσβασης AR (Access Router). Ο AR τερματίζει τα πρωτόκολλα που αφορούν τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία του δικτύου πρόσβασης και ενδέχεται να προσφέρει υπηρεσίες ελέγχου πρόσβασης στους κινητούς χρήστες που είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν (σε συνδυασμό με κάποιον ειδικό εξυπηρετητή του δικτύου). Ο έλεγχος

πρόσβασης, η διαχείριση κινητικότητας και συνόδων και οι υπόλοιπες υπηρεσίες του δικτύου θεωρείται ότι ελέγχονται μέσω αυτόνομων μηχανισμών και πρωτοκόλλων που διαχειρίζεται ο εκάστοτε πάροχος αποκλειστικά (AAA, DNS servers κλπ). Όλες οι υπηρεσίες/λειτουργίες θεωρείται επίσης ότι ανήκουν στο στρώμα δικτύου και ελέγχονται κεντρικά από τον λειτουργό του δικτύου. Αντίστοιχα για την περίπτωση κινητικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικών παρόχων προβλέπεται ότι θα καθίσταται δυνατή εφόσον έχουν συναφθεί οι κατάλληλες συμφωνίες περιαγωγής (roaming agreements) μεταξύ των παρόχων για αυτό το σκοπό, ενώ παράλληλα εκτελούνται οι κατάλληλες διαδικασίες στο στρώμα δικτύου κατά τη διάρκεια της διαπομπής (ανταλλαγή μηνυμάτων για ασφάλεια, ποιότητα υπηρεσίας, χρέωση).

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η εφαρμογή του προτεινόμενου από τη διατριβή πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, σε συστήματα 4G που υιοθετούν την αρχιτεκτονική All-IP. Δεδομένης της απαίτησης για χρήση της υπηρεσίας MBMS στο All-IP δίκτυο (το οποίο θεωρείται, τουλάχιστο αναφορικά με τον επίπεδο των προσφερόμενων υπηρεσιών συμβατό στο επίπεδο 3 - NAS), παρουσιάζεται επίσης και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να προσαρμοστεί η λειτουργία του M-FMIPv6/FTB σε συνδυασμό με τις διαδικασίες κινητικότητας που έχουν οριστεί από την υπηρεσία MBMS.



Σχήμα 3 - 15. Βασική δομή δικτύου κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G)

Πιο συγκεκριμένα, σε όσα αφορούν τις απαιτήσεις και δυνατότητες του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, τα πράγματα είναι αρκετά απλά και ξεκάθαρα· βασική απαίτηση είναι η λειτουργία του περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών στο τερματικό και η υποστήριξη του πρωτοκόλλου FMIPv6 με τις επεκτάσεις πολυεκπομπής που αναλύθηκαν νωρίτερα τόσο στο τερματικό όσο και στον δρομολογητή πρόσβασης. Με άλλα λόγια η λειτουργία του M-FMIPv6/FTB εκτελείται διαφανώς ως προς το δίκτυο πρόσβασης δεδομένου ότι έχουν οριστεί κατάλληλα γεγονότα που περιγράφουν την πρόοδο της εκτέλεσης της διαπομπής. Από την άλλη, για τη λειτουργία της υπηρεσίας MBMS, και πιο σημαντικά του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που αφορά το

δίκτυο πρόσβασης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση την προδιαγραφή της για συστήματα 3G, δεν χρησιμοποιείται, όπως στην περίπτωση της εκτέλεσης της υπηρεσίας GPRS, κανένας μηχανισμός προώθησης κίνησης μεταξύ των εσωτερικών κόμβων του δικτύου, ενώ παράλληλα δεν πραγματοποιείται προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής με στόχο τον περιορισμό της απώλειας πακέτων κατά την εκτέλεση της διαπομπής. Αυτό σημαίνει ότι:

- δε χρησιμοποιείται ο μηχανισμός προώθησης κίνησης (μέσω διόδου) διαμέσου της διεπαφής Iur που διασυνδέει τους κόμβους RNC στο δίκτυο πρόσβασης.
- δεν έχει προβλεφθεί η χρήση αντίστοιχου μηχανισμού προώθησης κίνησης διαμέσου του δικτύου κορμού (δηλαδή στην αρχιτεκτονική του UMTS διαμέσου των κόμβων SGSN)
- δεν έχει προβλεφθεί η χρήση μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης πακέτων τουλάχιστο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής σε κανένα επίπεδο της ιεραρχικής αρχιτεκτονικής του UMTS

Κατά την εκτέλεση διαπομπών πολυεκπομπής σε ένα σύστημα 4G, προτείνεται η χρήση των μηχανισμών που προβλέπει το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB για την προώθηση των πακέτων και την προσωρινή αποθήκευσή τους.

Το Σχήμα 3 - 16 παρουσιάζει τη διαδικασία σηματοδότησης που εκτελείται κατά τη διαπομπή ενός κινητού κόμβου που είναι συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο 4^{ης} γενιάς. Η διαδικασία SRNS Relocation, που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας του UMTS, λαμβάνει χώρα όταν η διαπομπή ενός κινητού κόμβου μεταξύ δύο σταθμών βάσης έχει σαν αποτέλεσμα εκτός από την αλλαγή του κόμβου RNC που τον εξυπηρετεί στο δίκτυο πρόσβασης (UTRAN), απαιτείται και η αλλαγή του δρομολογητή πρόσβασης UAR. Βασικός στόχος από την εκτέλεσή της, είναι η προετοιμασία του τερματικού και των κόμβων του δικτύου για την επικείμενη διαπομπή. Η προετοιμασία αφορά κυρίως τη μεταφορά των καταλλήλων πλαισίων πληροφορίας που σχετίζεται όχι μόνο με την κινητικότητα του τερματικού αλλά επιπλέον και με τη σύνοδο πολυεκπομπής που είναι σε εξέλιξη. Όπως φαίνεται και στο σχήμα η όλη διαδικασία μπορεί να χωριστεί στις ακόλουθες φάσεις:

Φάση 1 - *Πρόβλεψη διαπομπής* (βήμα 1): Ο μηχανισμός πρόβλεψης διαπομπής είναι κατανεμημένος μεταξύ του τερματικού και του κόμβου RNC. Ο μηχανισμός καταλήγει με βάση μετρήσεις φυσικών μεγεθών στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει να ξεκινήσει η διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής προς ένα νέο σταθμό βάσης. Με βάση την ορολογία που χρησιμοποιείται από την υπηρεσία MIH IEEE 802.21, το αποτέλεσμα της λειτουργίας του οδηγεί στην έκδοση του γεγονότος *Link Quality Crosses Threshold* που παρουσιάστηκε νωρίτερα.

Φάση 2 - *Προετοιμασία διαπομπής τερματικού* (βήματα 2 – 4): Με βάση την πρόβλεψη της διαπομπής, η διαδικασία συνεχίζει με την προετοιμασία της διαπομπής IP του τερματικού. Για το λόγο αυτό εκτελείται η διαδικασία *Proxy Router Discovery* όπως έχει αναλυθεί, ενώ διατηρείται και το μήνυμα 3 το οποίο αντιστοιχεί στην προετοιμασία του δικτύου κορμού του για τον ίδιο σκοπό (βλέπε [30]).

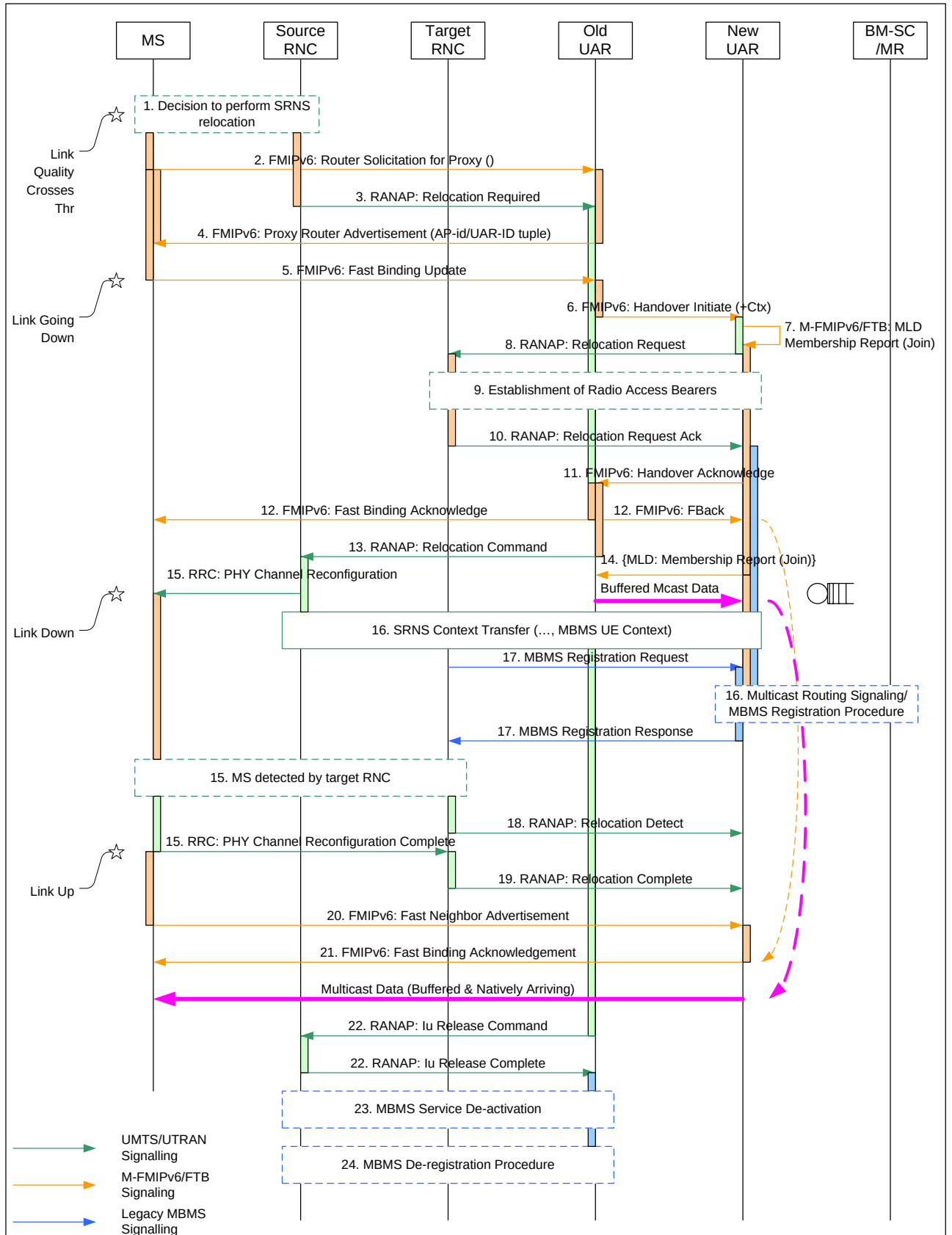
Φάση 3 - *Προετοιμασία νέων δικτύων πρόσβασης και κορμού* (βήματα 5 – 13): Σηματοδοτείται από το δίκτυο πρόσβασης η επικείμενη εκτέλεση της διαπομπής, οπότε ξεκινά η

προετοιμασία του νέου δικτύου πρόσβασης για να υποδεχθεί το τερματικό. Η προετοιμασία, εκτός από την διαχείριση της απαραίτητης πληροφορίας IP (όπως προβλέπει το FMIPv6) περιλαμβάνει και την εκτέλεση των απαραίτητων συνδέσεων εντός του δικτύου πρόσβασης (πλην της ασύρματης ζεύξης η οποία εγκαθίσταται στη φάση 5) που θα χρησιμοποιηθούν για τη σηματοδότηση και τις συνδέσεις σημείου προς σημείο. Οι συνδέσεις πολυεκπομπής επίσης δεν εγκαθίστανται στην παρούσα φάση, αλλά στη φάση 6. Το πέρας της παρούσας φάσης βρίσκει τους κόμβους UAR έτοιμους να υποστηρίξουν την διαπομπή του τερματικού που ακολουθεί, όπως προβλέπεται από τη λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6.

Φάση 4 - *Μεταφορά - εγκατάσταση πλαισίων πληροφορίας κινητικότητας και πολυεκπομπής στο νέο δίκτυο* (βήματα 14, 16, 17): Παράλληλα με την εκτέλεση της διαπομπής (φάση 5), πραγματοποιείται και η μεταφορά της πληροφορίας διαχείρισης κινητικότητας και πολυεκπομπής από το παλιό στο νέο δίκτυο. Η μεταφορά της συγκεκριμένης πληροφορίας είναι απαραίτητη για την επανεγκατάσταση των ενεργών συνόδων πολυεκπομπής του τερματικού, διαμέσου του νέου δικτύου πρόσβασης. Ο ακριβής τρόπος με τον οποίο υλοποιείται αυτή η μεταφορά αποτελεί αντικείμενο περεταίρω διερεύνησης και δεν αναλύεται περισσότερο. Γενικά πάντως, η βασική απαίτηση είναι να ενημερωθεί ο κόμβος RNC που ανήκει στο νέο δίκτυο πρόσβασης αναφορικά με τις εγκατεστημένες συνόδους πολυεκπομπής που θα πρέπει να εγκατασταθούν σε αυτόν, ώστε να εκτελεστεί η διαδικασία εγγραφής στην αντίστοιχη υπηρεσία MBMS που ακολουθεί. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται εκτός από τα πλαίσια κινητικότητας και τα πλαίσια πληροφορίας πολυεκπομπής χρήστη (MBMS UE Context, βλέπε Παράρτημα Β) τα οποία και μεταφέρονται ουσιαστικά από τον κόμβο source RNC στον target RNC.

Φάση 5 - *Εκτέλεση διαπομπής στρώματος 2* (βήμα 15): Στη φάση αυτή το κινητό τερματικό τερματίζει τη σύνδεσή του με τον προηγούμενο σταθμό βάσης και εγκαθιστά σύνδεση με το νέο σταθμό βάσης υπό την επίβλεψη του κόμβου RNC. Με βάση την πληροφορία που κατέστη διαθέσιμη στο προηγούμενο βήμα, εγκαθίστανται εκτός από τις συνδέσεις σηματοδότησης και οι κατάλληλες (μοιραζόμενες ή μη) συνδέσεις από τις οποίες θα εξυπηρετηθούν οι ενεργές σύνοδοι MBMS. Σημειώνεται ότι η αρχιτεκτονική MBMS προβλέπει πως για την παροχή της υπηρεσίας πολυεκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθούν μη μοιραζόμενες φυσικές συνδέσεις εφόσον η συγκεκριμένη σύνοδος δεν εμπλέκει πολλαπλά μέλη.

Φάση 6 - *Αποκατάσταση επικοινωνίας στρώματος δικτύου στο νέο δίκτυο - ολοκλήρωση διαπομπής στρώματος IP* - (βήματα 18 - 21): Μετά την εκτέλεση της διαπομπής και την ολοκλήρωση της προετοιμασίας του δικτύου πρόσβασης, σειρά έχει η ολοκλήρωση της διαπομπής στο στρώμα δικτύου. Στη φάση αυτή ενημερώνεται το δίκτυο κορμού για την πρόσβαση του τερματικού στην περιοχή ευθύνης του (οπότε επιβεβαιώνεται η διαδικασία εγγραφής του σε αυτό) και ξεκινά η προώθηση των πακέτων κίνησης προς το τερματικό. Παράλληλα προωθούνται και τα προσωρινά αποθηκευμένα πακέτα πολυεκπομπής που έχουν αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια προετοιμασίας και εκτέλεσης της διαπομπής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την παρούσα φάση εκτελούνται και οι διαδικασίες που αφορούν τη λειτουργία του πρωτοκόλλου Mobile IP για τις συνδέσεις σημείου προς σημείο.



Σχήμα 3 - 16. Διαδικασία SRNS Relocation κατά τη διαπομπή κινητού τερματικού με ενεργή σύνοδο MBMS

Φάση 7 - *Αποδέσμευση δικτυακών πόρων στο παλαιό δίκτυο* (βήματα 22 – 24): Τέλος, αποδεσμεύονται οι πόροι του προηγούμενου της διαπομπής δικτύου τόσο στο δίκτυο πρόσβασης όσο και στο δίκτυο κορμού. Η αποδέσμευση αφορά αμφότερες συνδέσεις σημείου προς σημείο και πολυεκπομπής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εκτέλεση της διαδικασίας SRNS Relocation που περιγράφηκε, έχει εξαιρεθεί η εκτέλεση της θεμελιώδους διαδικασίας *Routeing Area Update* του UMTS [30]. Η συγκεκριμένη διαδικασία φροντίζει για την ανανέωση πληροφορίας αναφορικά με την περιοχή (δρομολόγησης, όχι γεωγραφική) του δικτύου στην οποία είναι συνδεδεμένο το κινητό. Στην περίπτωση εντούτοις που χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονική All-IP που περιγράφηκε νωρίτερα, η συγκεκριμένη λειτουργικότητα δεν είναι απαραίτητη εφόσον μπορεί να αντικατασταθεί από την τυπική λειτουργία του πρωτοκόλλου Mobile IP. Οι ενδιαφερόμενοι αναγνώστες παραπέμπονται στο [37] για αναλυτικότερη περιγραφή.

3.7 Βιβλιογραφία

- [1] T. Schmidt, M. Waehlich, "Multicast Mobility in MIPv6: Problem Statement", IRTF Internet Draft (MobOpts Research Group), draft-irtf-mobopts-mmcastv6-ps-02.txt, March 2007, (work in progress)
- [2] H. K. Zhang, J. F. Guan, D. Y. Gao, H. C. Zhou, Y. J. Qin, "MIPv6 Extensions for Mobile Multicast: Problem Statement", IETF Internet Draft draft-zhang-multimob-memcast-ps-00.txt, July 2007
- [3] R. Koodli (editor), "Fast Handovers for Mobile IPv6", IETF RFC 4068, July 2005
- [4] P. McCann, "Mobile IPv6 Fast Handovers for 802.11 Networks", IETF RFC 4260, November 2005
- [5] Matthias Lott, Wolfgang Zirwas, Eiman Mohyeldin, "Fast Handover in Multi-hop Systems Beyond 3G", in proc. of 12th European Wireless Conference, Athens, Greece, April 2006
- [6] IEEE Std 802.11, 1999 (R2003), "Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", June 2003
- [7] R. Vida, L. Costa, "Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) for IPv6", IETF RFC 3810, June 2004
- [8] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", IETF RFC 3775, June 2004
- [9] S. Deering, W. Fenner, B. Haberman, "Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6", IETF RFC 2710, October 1999
- [10] T. Narten, E. Nordmark, W. Simpson, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)", IETF RFC 2461, December 1998
- [11] M. Christensen, K. Kimball, F. Solensky, "Considerations for Internet Group Management Protocol (IGMP) and Multicast Listener Discovery (MLD) Snooping Switches", IETF RFC 4551, May 2006
- [12] L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. S. Venieris, "Fast Handover Support in a WLAN Environment: Challenges and Perspectives", IEEE Network, Vol. 19, No. 3, May 2005
- [13] T. Schmidt, M. Waehlich, "Seamless Multicast Handover in a Hierarchical Mobile IPv6 Environment (M-HMIPv6)", IETF Internet Draft, draft-schmidt-waehlich-mhmip6-04.txt, November 2005
- [14] R. Braden, D. Clark, S. Shenker, "Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview", IETF RFC 1633, June 1994
- [15] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services", IETF RFC 2475, December 1998

- [16] J. Loughney, M. Nakhjiri, C. Perkins, R. Koodli, "Context Transfer Protocol (CXTTP)", IETF RFC 4067, July 2005, available online at <http://www.ietf.org/rfc/rfc4067.txt?number=4067>
- [17] M. Liebsch, A. Singh, H. Chaskar, D. Funato, E. Shim, "Candidate Access Router Discovery (CARD)", IETF RFC 4066, July 2005, available online at <http://www.ietf.org/rfc/rfc4066.txt?number=4066>
- [18] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification", IETF RFC 2205, September 1997
- [19] K. Suh, Y.-J. Suh, "Fast Multicast Protocol for Mobile IPv6 in the Fast Handovers Environment", IETF Internet Draft, draft-suh-mipshop-fmcast-mip6-00.txt, January 2004, (expired)
- [20] G. Leoleis, G. Prezerakos and I. Venieris, "Seamless multicast mobility support using fast MIPv6 extensions", Computer Communications, Vol. 29, No. 18, pp. 3745-3765, November 2006
- [21] G. Leoleis and I. Venieris, "Fast MIPv6 extensions supporting seamless multicast handovers", Computer Networks, Vol. 51, No. 9, pp. 2379-2396, June 2007
- [22] G. Leoleis, I. Venieris, "Fast MIPv6 Extensions Supporting Seamless Multicast Handovers", in proc. of 12th European Wireless Conference, April 2006
- [23] G. Leoleis, I. Venieris, "Fast MIPv6 Extensions Enabling Seamless Multicast Handovers: Performance Analysis", Not published, available at http://george.leoleis.googlepages.com/FMIPv6-M_PerfAnalysis1.pdf and http://george.leoleis.googlepages.com/FMIPv6-M_PerfAnalysis2.pdf
- [24] IEEE 802.21 WG, Media Independent Handover Services, www.ieee802.org/21/
- [25] IETF Detecting Network Attachment (DNA) Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/dna-charter.html>
- [26] IRTF MOBOPTS Working Group, <http://www.irtf.org/charter?gtype=rg&group=mobopts>
- [27] IEEE P802.21/D00.05, "Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Independent Handover Services", IEEE 802.21 MIH Working Group, January 2006
- [28] F. Teraoka, K. Gogo, K. Mitsuya, R. Shibui, K. Mitani "Unified L2 Abstractions for L3-Driven Fast Handover", IRTF Internet Draft, draft-koki-mobopts-l2-abstractions-05.txt, June 2006, Work in Progress
- [29] S. Krishnan, N. Montavont, E. Njedjou, S. Veerepalli, A. Yegin, "Link-layer Event Notifications for Detecting Network Attachments", IETF Internet Draft, draft-ietf-dna-link-information-04.txt, Oct. 2006, Work in Progress
- [30] 3GPP TS 23.060 "General Packet Radio Service (GPRS); Service description", March 2007
- [31] 3GPP TS 22.258, "Service Requirements for the All-IP Network (AIPN)", Stage 1, March 2006

- [32] Y.-J Choi, L. B. Lee, S.Bahk, "All-IP 4G Network Architecture for Efficient Mobility and Resource Management", IEEE Wireless Magazine, Vol. 14, No. 2, pp. 42-46, April 2007
- [33] IEEE Std. 802.11f-2003, "Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation", January 2003
- [34] 3GPP TS 23.346 "3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking; System description", March 2007
- [35] 3GPP TS 23.246 "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description", June 2007
- [36] Erik Bohlin, Jean-Claude Burgelman, Carlos Rodriguez Casal, "The future of mobile communications in the EU", Telematics and Informatics, Vol. 24, No. 3, pp. 238-242, 2007
- [37] Α. Δημοπούλου, «Διαχείριση Κινητικότητας και Υποστήριξη Απρόσκοπτων Διαπομπών σε Κινητά Δίκτυα IP 4^{ης} Γενιάς», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Ιούλιος 2006

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ M-FMIPv6/FTB

Στο παρόν κεφάλαιο αξιολογείται η επίδοση του προτεινόμενου από τη διατριβή μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, μέσω προσομοίωσης της λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ρεαλιστικά σενάρια προσομοίωσης, στα οποία λαμβάνεται υπόψη η κινητικότητα του τερματικού (κατεύθυνση, μέτρο ταχύτητας) και η τυχαία φύση του ασύρματου μέσου διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, εντός του οποίου μοντελοποιείται η κίνησή του. Με στόχο την καλύτερη αξιολόγηση της επίδοσης, παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα της επίδοσης των μηχανισμών κινητικότητας πολυεκπομπής που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η επίδοση μελετάται ως προς σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία των μηχανισμών και την τοπολογία του συστήματος, καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο ένα μεγάλο φάσμα περιπτώσεων που απαντάται σε πραγματικά συστήματα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την υπεροχή του προτεινόμενου μηχανισμού σε σχέση με τους υπόλοιπους, αναφορικά με την επίδραση που έχει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας. Επίσης εντοπίζουν την αύξηση του κόστους που επιβάλλει η υποστήριξη της διαπομπής, στην κατανάλωση δικτυακών πόρων για την προώθηση και την προσωρινή αποθήκευση πακέτων πολυεκπομπής.

Η επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής αξιολογείται μέσα από την προσομοίωση της λειτουργίας του με χρήση του εργαλείου προσομοιώσεων OPNET [1]. Για το λόγο αυτό αρχικά αναπτύχθηκε λογισμικό που μοντελοποιεί τη λειτουργία τόσο του πρωτοκόλλου FMIPv6 αναφορικά με τις δυνατότητες προ-δραστικής ρύθμισης διεύθυνσης και ταχείας πρόσδεσης του τερματικού στο νέο δίκτυο όσο και του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών* για ένα τυπικό σύστημα WLAN IEEE 802.11. Η υλοποίηση του πρωτοκόλλου FMIPv6 πραγματοποιήθηκε με βάση το [2]. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν οι επεκτάσεις που παρουσιάστηκαν για την υποστήριξη *ταχέων διαπομπών πολυεκπομπής*, που εισάγει το M-FMIPv6/FTB. Στο ίδιο πλαίσιο προσομοιώσεων αναπτύχθηκαν και οι επεκτάσεις των πρωτοκόλλων M-FMIPv6 και M-HMIPv6, όπως αυτά περιγράφονται στα [3] και [4] αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, έχει προσομοιωθεί και η λειτουργία του μηχανισμού «*Απομακρυσμένων Συμμετοχών*» [5], κατά την οποία έχει θεωρηθεί ότι το κινητό ξεκινά αυτόβουλά την διαδικασία συμμετοχής του στο δένδρο διανομής από το νέο σημείο πρόσβασης, αμέσως μετά την πρόσδεσή του στο νέο δίκτυο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση των πρωτοκόλλων M-FMIPv6/FTB, M-FMIPv6 και M-HMIPv6 έχει πραγματοποιηθεί στο έπακρο σε ό,τι αφορά τη σηματοδότηση και την υποστηριζόμενη λειτουργικότητα με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές. Το ίδιο ισχύει και για την υλοποίηση του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών* που υλοποιήθηκε. Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι λεπτομέρειες του υλοποιημένου πλαισίου εκτέλεσης προσομοιώσεων, ακολουθούμενες από τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση της επίδοσης των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας.

Για τη αξιολόγηση της επίδοσης των μηχανισμών κινητικότητας πολυεκπομπής, έχει αναπτυχθεί ένα αρκετά ρεαλιστικό περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο μοντελοποιεί τη λειτουργία δύο αυτόνομων ασύρματων τοπικών δικτύων. Δεδομένου ότι αποτιμάται η λειτουργία μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας, ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στη μοντελοποίηση και λειτουργία των μηχανισμών που αφορούν τα στρώματα ζεύξης δεδομένων και δικτύου, τα οποία επηρεάζουν την συνολική επίδοση του καθενός μηχανισμού. Βασικός στόχος ήταν η μοντελοποίηση όλων των σημαντικών φαινομένων, ώστε να είναι ξεκάθαρη η επίδρασή τους στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα δεδομένου ότι η λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 επηρεάζεται αρκετά από τις μεταβολές της ποιότητας της εγκατεστημένης ζεύξης στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην μοντελοποίηση τόσο της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων όσο και της κινητικότητας των τερματικών. Το πρώτο επηρεάζει πάρα πολύ τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά το πρωτόκολλο στις μεταβολές της ποιότητας της ζεύξης και στην εγκυρότητα των προβλέψεων για τις επικείμενες διαπομπές. Το δεύτερο επηρεάζει τη λειτουργία των μηχανισμών πρόβλεψης και εκτέλεσης διαπομπών, και μέσω αυτών τη συνολική επίδοση.

4.1 Απαιτήσεις για την εκτέλεση προσομοιώσεων

Δεδομένων των δυσκολιών στην εκτέλεση πειραμάτων σε πραγματικά συστήματα κινητών επικοινωνιών, η πλειονότητα των ερευνητών στις μέρες μας καταφεύγει στη εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας προηγμένα εργαλεία προσομοιώσεων. Εντούτοις εξαιτίας της

έλλειψης σε υπολογιστικούς πόρους στις μηχανές εκτέλεσης προσομοιώσεων και της επιθυμίας απλοποίηση των μοντελοποιούμενων διαδικασιών, πολλά από τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία προσομοίωσης στηρίζονται στη πραγματοποίηση παραδοχών αναφορικά με τη μοντελοποίηση ορισμένων μηχανισμών. Στην περίπτωση των ασύρματων κινητών δικτύων, πολλές από τις επιλογές των ερευνητών επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα. Με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης που μπορεί να έχει η μοντελοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στην ποιότητα και εγκυρότητα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, η εργασία των Kotz κ.α., με τίτλο "Experimental Evaluation of Wireless Simulation Assumptions" [6], παρουσιάζει τις πιο σπουδαίες απαιτήσεις που θα πρέπει να ικανοποιούνται κατά την εκτέλεση προσομοιώσεων σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Οι απαιτήσεις αυτές, που έχουν ικανοποιηθεί στο θεωρούμενο πλαίσιο προσομοιώσεων, είναι:

1. Εν γένει η πλειονότητα των ερευνητών θεωρεί ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πραγματοποιείται απρόσκοπτα μεταξύ ενός πομπού κι ενός δέκτη χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μορφολογία του εδάφους ή γενικότερα το ανάγλυφο του περιβάλλοντος πάνω από το οποίο διαδίδονται αυτά. Εκτός και αν η γεωμετρία του περιβάλλοντος προσομοίωσης το επιτρέπει (π.χ. σε περιβάλλον μικρών διαστάσεων), γενικά δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι η διάδοση πραγματοποιείται πάνω από επίπεδη επιφάνεια.
2. Στη γενική περίπτωση δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι σφαιρική και ότι η περιοχή ηλεκτρομαγνητικής κάλυψης μίας πηγής (περιοχή στην οποία μπορεί ένας δέκτης να λάβει επιτυχώς σήματα από την πηγή, range) είναι ίδια για όλες τις πηγές που ανήκουν στο περιβάλλον προσομοίωσης.
3. Αν και η πλειονότητα των ασύρματων συστημάτων δικτύωσης δίνει τη δυνατότητα εγκατάστασης αμφίδρομων ζεύξεων δεν θα πρέπει να θεωρείται δεδομένη η δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας. Για παράδειγμα η παράδοση ενός μηνύματος από την πλευρά μίας πηγής προς έναν παραλήπτη δε σημαίνει ότι ο τελευταίος είναι σε θέση να αποστείλει επιτυχώς προς την πρώτη ένα νέο μήνυμα.
4. Δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι η περιοχή κάλυψης ενός πομποδέκτη, είναι σαφώς ορισμένη για μία ηλεκτρομαγνητική πηγή και ότι εξαρτάται κατά βάση από την απόσταση του δέκτη από αυτή. Το φυσικό περιβάλλον επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κυρίως στο χώρο αλλά και στο χρόνο. Εν γένει δεν θα πρέπει να υποτιμάται η επίδραση που μπορεί να έχουν στη διακύμανση της λαμβανόμενης ισχύος φαινόμενα όπως ανάκλαση, διάθλαση, σκέδαση και ανεμπόδιση επαφή πομπού και δέκτη.

Η παραπάνω λίστα συνοψίζει τις πλέον σημαντικές παραδοχές που θα πρέπει να αποφεύγεται να πραγματοποιούνται κατά την διενέργεια προσομοιώσεων σε ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Η εφαρμογή των αντικειμένων της λίστας στο πλαίσιο προσομοιώσεων που περιγράφεται στην ενότητα που ακολουθεί, οδήγησε στην μοντελοποίηση ενός αρκετά ρεαλιστικού ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος εντός θεωρούμενου περιβάλλοντος προσομοίωσης. Η εκτέλεση προσομοιώσεων, με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου εργαλείου όπως

το OPNET, είναι μία αρκετά σύνθετη διαδικασία που απαιτεί τη μοντελοποίηση αρκετών διαδικασιών από το στρώμα εφαρμογής μέχρι το φυσικό στρώμα. Στο πλαίσιο προσομοιώσεων που αναπτύχθηκε στη διατριβή, έχει χρησιμοποιηθεί μία ξεχωριστή διαδικασία για το καθένα στρώμα δικτύωσης (με αναφορά στο πρότυπο OSI) της στοίβας TCP/IP. Ακολούθως αναπτύχθηκαν ανεξάρτητες διαδικασίες για το πρωτόκολλο FMIPv6, το οποίο τοποθετήθηκε στο στρώμα δικτύου, και τις επεκτάσεις που αφορούν στη λειτουργία των μηχανισμών κινητικότητας πολυεκπομπής, και αφετέρου για το *Περιβάλλον Εκτέλεσης Ταχέων Διαπομπών* (βλέπε ενότητα 3.1). Ιδιαίτερα για το τελευταίο αναπτύχθηκαν διαδικασίες που παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της ποιότητας της εκάστοτε ζεύξης, την έκδοση αναφορών προς το στρώμα δικτύου αναφορικά με γεγονότα που λαμβάνουν χώρα στο στρώμα ζεύξης και την πραγματοποίηση προβλέψεων αναφορικά με επικείμενες διαπομπές. Για όλα τα υπόλοιπα στρώματα χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές διαδικασίες που παρέχονται από το OPNET.

4.2 Το πλαίσιο προσομοίωσης

4.2.1 Μοντελοποίηση Ηλεκτρομαγνητικού Περιβάλλοντος

Όπως προαναφέρθηκε, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μοντελοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος εντός του οποίου θεωρείται η κίνηση των τερματικών. Έχοντας κατά νου τη λίστα των απαιτήσεων που περιγράφονται στην ενότητα 4.1 (Απαιτήσεις για την εκτέλεση προσομοιώσεων), υλοποιήθηκαν ξεχωριστά μοντέλα τόσο για τον υπολογισμό της εξασθένισης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω των απωλειών διάδοσης, όσο και για την μοντελοποίηση του φαινομένου σκίασης (shadowing) που οφείλεται στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Στη συνέχεια περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο στηρίχθηκε η ανάπτυξη των παραπάνω μοντέλων και οι απαραίτητες λεπτομέρειες που αφορά το καθένα.

4.2.1.1 Απώλειες Διάδοσης

Η μέση λαμβανόμενη ισχύς P_R ενός σήματος που διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη d και δίνεται από την έκφραση (4.1), γνωστή ως εξίσωση του Friis [7], [8]:

$$P_R = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \quad (4.1)$$

όπου P_T είναι η ισχύς εκπομπής, λ το μήκος κύματος, ενώ G_T και G_R , είναι τα κέρδη ισχύος των κεραιών πομπού και δέκτη αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, η παραδοχή ελεύθερου χώρου δεν ισχύει για τα ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών, οπότε οι *απώλειες διάδοσης* (path loss) $PL = P_T/P_R$, μεταβάλλονται με την απόσταση με διαφορετικό τρόπο από αυτόν που ορίζει η εξίσωση (4.1). Πειραματικές μελέτες έχουν οδηγήσει στην εξαγωγή εμπειρικών μοντέλων απωλειών διάδοσης για διάφορα είδη ασύρματων συστημάτων και περιβαλλόντων διάδοσης (εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων). Ολοκληρωμένη περιγραφή για τα πιο διαδεδομένα μοντέλα μπορεί να βρεθεί στο [7].

Η πτώση της τιμής της λαμβανόμενης ισχύος με την απόσταση, συνηθίζεται να περιγράφεται με τη χρήση του *συντελεστή απωλειών ισχύος* n (*path loss exponent*). Όταν οι απώλειες εκφράζονται σε decibel (dB), ο συντελεστής n δηλώνει την κλίση της συνάρτησης $PL(d)$ η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$PL(d)|_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_R(d)} \right) = PL(d_0)|_{dB} + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + S \quad (4.2)$$

όπου η παράμετρος d_0 δηλώνει μία απόσταση αναφοράς, ενώ με S συμβολίζεται μία τυχαία μεταβλητή μηδενικής μέσης τιμής που σχετίζεται με την περιγραφή των *διαλείψεων ισχύος μεγάλης κλίμακας* (*large scale fading, shadowing*), που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Στην περίπτωση απωλειών ελευθέρου χώρου ισχύει $n = 2$, ενώ συνήθως για τα διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης ο συντελεστής λαμβάνει εμπειρικές τιμές $n > 2$. Εξαιρεση αποτελεί η διάδοση σε περιβάλλοντα όπου ευνοείται η ύπαρξη συνθηκών κυματοδότησης (π.χ. στενοί δρόμοι, διάδρομοι) όπου έχουν μετρηθεί τιμές $n < 2$.

Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, βασικός στόχος από την εκτέλεση των προσομοιώσεων είναι η αποτίμηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού σε ένα τυπικό σενάριο κινητικότητας. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου σεναρίου εμπεριέχει την επιλογή του φυσικού περιβάλλοντος εντός του οποίου κινείται το τερματικό. Ως εκ τούτου επελέγη η χρήση ενός περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου (γραφείων, σταθμών μέσων μαζικής μεταφοράς ή ένα περιβάλλον με έντονη εμπορική δραστηριότητα) στο οποίο είναι εγκατεστημένα δύο αυτόνομα συστήματα WLAN που λειτουργούν στην μπάντα συχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific, Medical). Με στόχο την ακριβέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών της μπάντας ISM, χρησιμοποιήθηκε η Rec. ITU-R P.1238 [9], η οποία ουσιαστικά παρέχει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την ανάπτυξη του επιθυμητού μοντέλου προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την P.1238³² και κατ'αντιστοιχία με την (4.2), το βασικό μοντέλο για τις απώλειες διάδοσης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$L_{total}|_{dB} = 20 \log_{10} f + n \log_{10} d + L_f(N) - 28 + S \quad (4.3)$$

όπου L_{total} είναι οι συνολικές απώλειες διάδοσης σε dB, n ο συντελεστής απωλειών ισχύος, f η συχνότητα σε MHz, d η απόσταση του πομπού από το δέκτη σε m και $L_f(N)$ ένας παράγοντας ο οποίος περιγράφει τις απώλειες σε dB όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαπερνούν N ορόφους ενός κτηρίου. Όπως και παραπάνω, ο παράγοντας S περιγράφει τις απώλειες λόγω του shadowing (βλέπε ενότητα 4.2.1.2).

Με βάση το [9], για την περίπτωση ενός συστήματος WLAN που λειτουργεί στον εσωτερικό χώρο ενός περιβάλλοντος γραφείων που βρίσκονται στον ίδιο όροφο ($N = 0$), η έκφραση (4.3) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$L_{total}|_{dB} = 20 \log_{10} f + 30 \log_{10} d - 28 + S \quad (4.4)$$

³² Ενδιαφερόμενοι αναγνώστες μπορούν να απευθυνθούν στο [10] για την αντίστοιχη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος εξωτερικού χώρου.

όπου έχει εξαιρεθεί η συνεισφορά του παράγοντα L_f . Η εξίσωση (4.4) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Οι τιμές των f και d , είναι διαθέσιμες από το εργαλείο προσομοίωσης κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

4.2.1.2 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας – Shadow Fading

Στη γενική περίπτωση η διάδοση ενός σήματος διαμέσου ενός ασύρματου καναλιού υφίσταται τυχαία μεταβολή εξαιτίας παρεμποδίσεων από την ύπαρξη αντικειμένων στη διαδρομή που ακολουθείται. Σαν αποτέλεσμα προκαλούνται αντίστοιχες μεταβολές στη λαμβανόμενη ισχύ στο δέκτη. Όπως περιγράφεται στο [7], η μεταβολή της εξασθένησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου, προκαλείται από μία πλειάδα φαινομένων όπως ανακλάσεις και διαθλάσεις από και διαμέσου αντίστοιχα των αντικειμένων (έπιπλα, τοίχοι, πάτωμα, ταβάνι), απώλεια λόγω της διάδοσης διαμέσου τοίχων ή άλλων εμποδίων, κυματοδήγηση εντός διαδρόμων και κινητικότητα ατόμων ή άλλων αντικειμένων. Για την μοντελοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος με μεγαλύτερη ακρίβεια είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός μοντέλου το οποίο να λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην λαμβανόμενη ισχύ εξαιτίας της ύπαρξης των παραπάνω φαινομένων. Δεδομένου του ότι η θέση, το μέγεθος και τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων του χώρου είναι εν γένει απροσδιόριστα, ο προσδιορισμός του συγκεκριμένου θεωρητικού μοντέλου πραγματοποιείται με χρήση στατιστικών στοιχείων που έχουν προκύψει από μετρήσεις σε αντίστοιχα περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου. Το πλέον αντιπροσωπευτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επιπρόσθετης τυχαίας εξασθένησης λόγω των φαινομένων σκίασης είναι η *λογαριθμο-κανονική κατανομή* [7]. Η εγκυρότητα εφαρμογής του συγκεκριμένου μοντέλου έχει επιβεβαιωθεί εμπειρικά σε αμφότερα τα περιβάλλοντα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου [7].

Αν θεωρηθεί ότι μετράται πειραματικά η λαμβανόμενη ισχύς στην περιφέρεια ενός κύκλου στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ένας πομπός με ομοιοκατευθυντική κεραία, οι τιμές ισχύος που θα καταγραφούν στο δέκτη δε θα είναι ταυτόσημες κατά μήκος της περιφέρειας ακτίνας R . Αντίθετα οι απώλειες διάδοσης (path loss) σε κάθε σημείο της περιφέρειας θα κυμαίνονται γύρω από μία μέση τιμή $PL(R)$. Οι επιδράσεις του ραδιοδιαύλου που οδηγούν σε αυτήν την πειραματική παρατήρηση ονομάζονται *διαλείψεις μεγάλης κλίμακας* (large scale fading) και αυτή ακριβώς η μεταβολή περιγράφεται από την τυχαία μεταβλητή S στις εξισώσεις (4.2), (4.3) και (4.4). Όπως προαναφέρθηκε, ο προσδιορισμός των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας έγκειται στην στατιστική περιγραφή της S . Έχει παρατηρηθεί ότι σε κλίμακα dB, το σφάλμα των πειραματικών τιμών απωλειών διάδοσης από τις θεωρητικά αναμενόμενες ακολουθεί *κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή* [7]. Συνεπώς, η τυχαία μεταβλητή S ορίζεται πλήρως από την *τυπική απόκλιση* σ_s της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ακόλουθης εξίσωσης:

$$p_s(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-\frac{(S)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (4.5)$$

Η παράμετρος σ_s καλείται παράμετρος σκίασης (shadowing parameter), δίνεται σε dB και η τιμή της δηλώνει την ακρίβεια μοντελοποίησης των απωλειών διάδοσης μέσω της εξίσωσης (4.2). Μία τυπική τιμή της σ_s είναι 8 dB.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εργασίες για τον εμπειρικό χαρακτηρισμό της συσχέτισης του φαινομένου της σκίασης με την απόσταση, για διαφορετικά περιβάλλοντα και σε διαφορετικές συχνότητες. Το πλέον κοινό αναλυτικό και χρησιμοποιούμενο μοντέλο, έχει προταθεί από τον Gudmundson [11]. Σύμφωνα με αυτό, η συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων σκίασης που αφορούν δύο σημεία τα οποία απέχουν απόσταση d μπορεί να εκφραστεί ως:

$$A(d) = \sigma_s^2 \rho_D^{d/D} \quad (4.6)$$

όπου ρ_D είναι η συσχέτιση μεταξύ δύο σημείων τα οποία απέχουν σταθερή απόσταση D . Η συγκεκριμένη συσχέτιση μπορεί να αποκτηθεί εμπειρικά και μεταβάλλεται με βάση το περιβάλλον διάδοσης και τη συχνότητα του καναλιού. Η εμπειρική εξάρτηση του συγκεκριμένου μοντέλου μπορεί να αφαιρεθεί ορίζοντας ότι τα δείγματα δεν θεωρούνται συσχετισμένα για αποστάσεις μεγαλύτερες τις *απόστασης αποσυσχέτισης* X_C . Η *απόσταση αποσυσχέτισης* X_C είναι η απόσταση στην οποία η αυτοσυσχέτιση του σήματος ισούται με το $1/e$ της μέγιστης τιμής της ($\max\{\rho_D\} = 1$). Εμπειρικά έχει προσδιοριστεί ότι η τάξη μεγέθους της X_C , είναι αντίστοιχη των διαστάσεων των αντικειμένων στα οποία οφείλεται η ύπαρξη του φαινομένου της σκίασης. Ως εκ τούτου με χρήση της απόστασης αποσυσχέτισης, η έκφραση (4.6) λαμβάνει τη μορφή:

$$A(d) = \sigma_s^2 e^{-d/X_C} \quad (4.7)$$

Στο ίδιο πλαίσιο, στο [12], συνάμα με τη μεθοδολογία δημιουργίας του δείγματος τιμών σκίασης, προτείνεται η χρήση της έκφρασης

$$A(d) = e^{-\frac{d}{X_C} \cdot \ln 2} \quad (4.8)$$

για την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια, η συγκεκριμένη έκφραση εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα (οι εξαγόμενες τιμές έχουν μικρότερη απόκλιση από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή). Ως εκ τούτου στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, χρησιμοποιήθηκε η έκφραση (4.8).

Σύμφωνα με το [13], ο προσδιορισμός των στοιχείων σκίασης για μία διακριτή περιοχή διαστάσεων $N \times N$, ανάγεται στον προσδιορισμό ενός πίνακα $L \in R^{M \times M}$, με $M = N^2$, ο οποίος θα πραγματοποιεί ένα γραμμικό μετασχηματισμό ανεξάρτητων και πανομοιότυπα κατανεμημένων (iid, independent and identically distributed) τυχαίων μεταβλητών, που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Με άλλα λόγια ανάγεται στον προσδιορισμό των στοιχείων ενός πίνακα L , ο οποίος ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\vec{y} = L \vec{x} \quad (4.9),$$

όπου $\vec{y} \in R^{M \times 1}$ είναι το ζητούμενο διάνυσμα (πίνακας στήλη) το οποίο περιέχει τις χωρικά συσχετισμένες μεταξύ τους τιμές για την έκφραση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, και $\vec{x} \in R^{M \times 1}$ είναι ένα διάνυσμα το οποίο περιέχει τιμές iid τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν την κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης σ_s . Εντούτοις ισχύει ότι:

$$A_{xx} = \vec{X} \vec{X}^T = I \in R^{M \times M} \quad (4.10),$$

όπου $A_{xx} \in R^{M \times M}$ είναι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης του διανύσματος $\vec{X}$, και $\vec{X}^T$ υποδηλώνει τον ανάστροφο του $\vec{X}$. Με βάση τις εξισώσεις (4.9) και (4.10), ο πίνακας αυτοσυσχέτισης $A_{yy} = \vec{Y} \vec{Y}^T \in R^{M \times M}$ του διανύσματος $\vec{Y}$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$A_{yy} = \vec{Y} \vec{Y}^T = \left(L \vec{X} \right) \left(L \vec{X} \right)^T = L \vec{X} \vec{X}^T L^T \stackrel{(4.10)}{\Rightarrow} \\ A_{yy} = L L^T \quad (4.11).$$

Δεδομένου ότι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης A_{yy} των στοιχείων σκίασης είναι συμμετρικός, με βάση το μετασχηματισμό Cholesky [14], [15], ο πίνακας L δύναται να ληφθεί από την παρακάτω έκφραση:

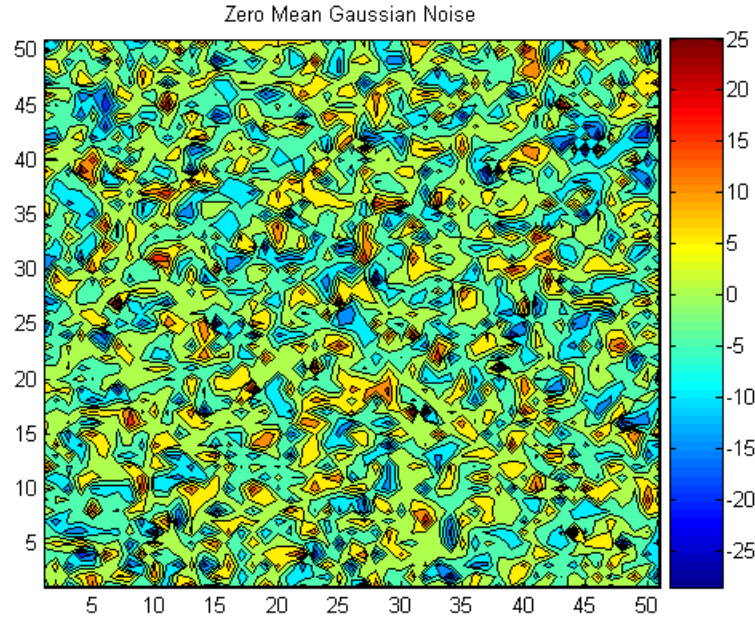
$$L^2 = A_{yy} \Leftrightarrow L = \text{sqrtn}(A_{yy}) \quad (4.12),$$

όπου $\text{sqrtn}(\mathbf{M})$ είναι η συνάρτηση υπολογισμού της *τετραγωνικής ρίζας του πίνακα $\mathbf{M}$* .

Με βάση τα παραπάνω θεωρητικά στοιχεία, στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός πλέγματος τιμών χωρικά συσχετισμένων μεταξύ τους, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της σκίασης στον προσομοιωτή. Η μεθοδολογία περιγράφεται στα [7], [13], και [12], αλλά επαναλαμβάνεται στη συνέχεια για λόγους πληρότητας.

Με βάση την εξίσωση (4.9), ο προσδιορισμός των στοιχείων σκίασης ενός πίνακα L_S μπορεί να πραγματοποιηθεί πραγματοποιώντας γραμμικό μετασχηματισμό των τιμών μίας τυχαίας μεταβλητής που ακολουθεί την κανονική κατανομή (με μηδενική μέση τιμή και $\sigma_S = 8$ dB). Για το λόγο αυτό αρχικά, θεωρήθηκε μία *περιοχή κινητικότητας* του τερματικού, διαστάσεων 100×100 m², για την οποία θα υπολογιστούν τα δείγματα σκίασης. Στη συνέχεια η περιοχή κατακερματίστηκε σε ένα πλέγμα 50×50 σημείων ($m = 50$). Ο συγκεκριμένος κατακερματισμός έγινε με γνώμονα το κριτήριο της *απόστασης αποσυσχέτισης* X_C , η οποία θεωρήθηκε ίση με 5 m ($>40\lambda$, $\lambda \approx 0,125$ m για το σύστημα WLAN IEEE 802.11). Σε κάθε σημείο του παραπάνω πλέγματος αντιστοιχήθηκε μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική κατανομή, μηδενικής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης $\sigma_S = 8$ dB, κατασκευάζοντας έτσι τον πίνακα L_W . Ο πίνακας αυτός αποτελεί το πρώτο στάδιο του πλέγματος σκίασης και περιέχει ουσιαστικά δείγματα λευκού θορύβου, τα οποία είναι ασυσχέιστα μεταξύ τους. Υπενθυμίζεται ότι η κανονική κατανομή (από την οποία παρήχθησαν οι τιμές των στοιχείων του), παράγει iid τιμές και άρα ασυσχέιστες μεταξύ τους. Το Σχήμα 4 - 1 παρουσιάζει το διάγραμμα ισοϋψών που προέκυψε από την εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας, για το πλέγμα των 50×50 σημείων της περιοχής κινητικότητας. Δεδομένου ότι η χρήση της εξίσωσης (4.9) θεωρεί ότι τα διανύσματα $\vec{X}$

και $\vec{y}$ είναι μονοδιάστατα, ο πίνακας L_W μετατράπηκε στον πίνακα στήλη $\vec{l}_W \in R^{m^2 \times 1}$. Η μετατροπή του πίνακα πραγματοποιήθηκε αναδιατάσσοντας τις στήλες του σε μία στήλη (πρώτα την 1^{η} , μετά τη 2^{η} κ.ο.κ.).



Σχήμα 4 - 1. Διάγραμμα ισοϋψών ισχύος (dB) λευκού θορύβου μηδενικής μέσης τιμής και $\sigma_S = 8$ dB για πλέγμα 50×50 σημείων

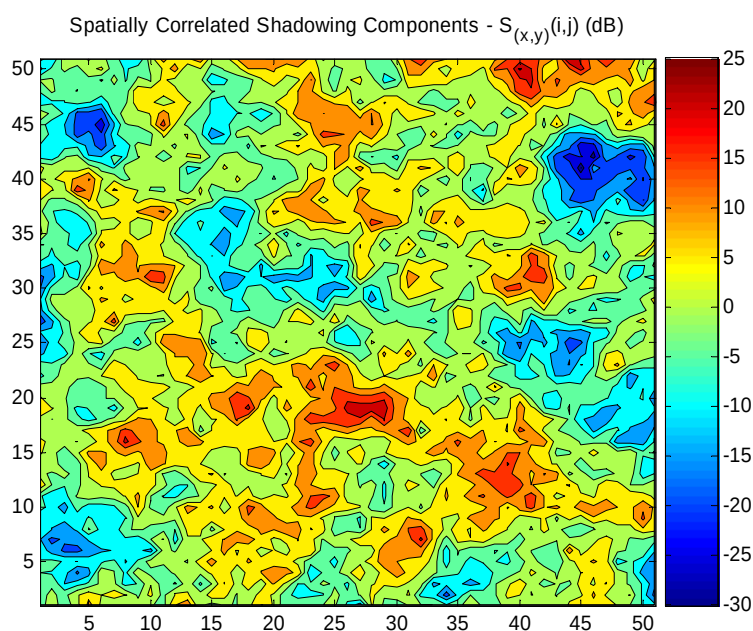
Ακολουθώς κατασκευάστηκαν $m \times m$ ($m = 50$) πίνακες $D_{i,j}, 1 \leq i, j \leq m$, καθένας από τους οποίους περιείχε την απόσταση του σημείου (i, j) του πλέγματος από τα όλα τα υπόλοιπα. Από τις εξισώσεις (4.9) και (4.12) προκύπτει ότι ο προσδιορισμός των στοιχείων σκίασης απαιτεί τη χρήση του πίνακα αυτοσυσχέτισης $A_{yy} \in R^{m^2 \times m^2}$. Για τον προσδιορισμό του καθενός στοιχείου $a_{ij}, 1 \leq i, j \leq m^2$ του A_{yy} , χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (4.8) όπου η απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος περιγράφεται από τον εκάστοτε πίνακα $D_{i,j}$. Με βάση τον ορισμό του πίνακα αυτοσυσχέτισης, κάθε γραμμή του πίνακα A_{yy} , αντιστοιχεί στη συσχέτιση καθενός σημείου του αρχικού πλέγματος με όλα τα υπόλοιπα. Κατόπιν κατασκευάστηκε ο πίνακας γραμμικού μετασχηματισμού L όπως ακριβώς περιγράφεται από την εξίσωση (4.12) (κάνοντας δηλαδή χρήση της συνάρτησης *sqrtm*). Τέλος, το διάνυσμα με τα χωρικά συσχετισμένα στοιχεία σκίασης του πίνακα L_S , προέκυψε εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.9). Με άλλα λόγια, το διάνυσμα (πίνακας στήλη) $\vec{l}_S \in R^{m^2 \times 1}$ προέκυψε από την εξίσωση $\vec{l}_S = L \vec{l}_W$. Η τελική μορφή του πίνακα L_S , δημιουργήθηκε αναδιατάσσοντας τα στοιχεία του διανύσματος $\vec{l}_S$ σε m στήλες

(τα στοιχεία της πρώτης, δεύτερης, κ.ο.κ, m-οστής ομάδων, των ανά m το πλήθος γραμμών του $\vec{I}_S$, τοποθετήθηκαν στην πρώτη, δεύτερη, κ.ο.κ., m-οστή στήλη του L_S).

Με βάση το [12], η ακρίβεια του προσδιορισμού των στοιχείων σκίασης που περιέχεται στον πίνακα L_S και παρήχθησαν με την παραπάνω μέθοδο δεν είναι ικανοποιητική. Αυτό ισχύει εξαιτίας της περιορισμένης ακρίβειας της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης που περιγράφεται από την εξίσωση (4.7) αλλά και του γεγονότος ότι με χρήση ενός υπολογιστή είναι δυνατή μόνο η γέννηση ψευδοτυχαίων τιμών για το διάνυσμα $\vec{I}_W$. Σαν αποτέλεσμα, η μέση τιμή των δειγμάτων που περιέχονται στον πίνακα L_S δεν είναι μηδενική αλλά παρουσιάζει απόκλιση. Με στόχο τον περιορισμό της συγκεκριμένης απόκλισης του αποτελέσματος, στο [12] προτείνεται η διόρθωση του L_S με χρήση της εξίσωσης:

$$L_{S\_CORRECTED}(x,y) = \left(L_S(x,y) - (\mu_{L_W} - \mu_{L_S}) \right) \frac{\sigma_{L_S}}{\sigma_{L_W}} \quad (4.13),$$

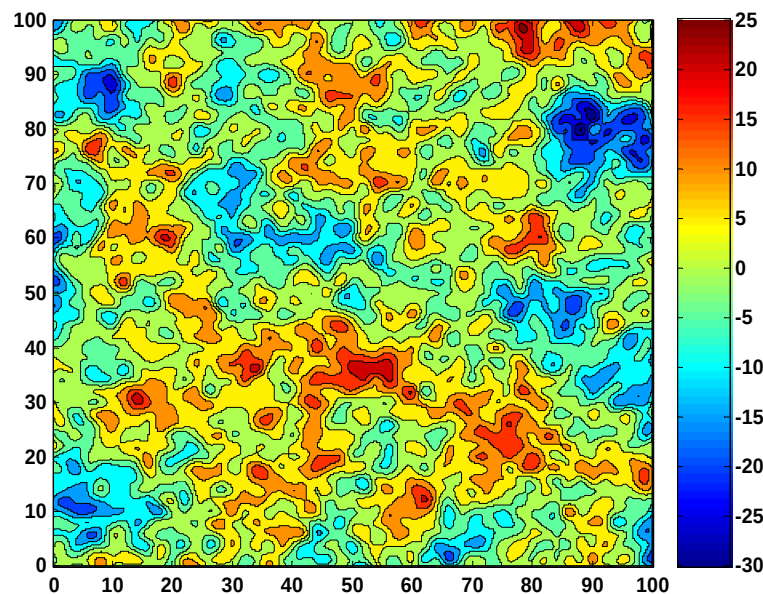
όπου μ και σ οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των πινάκων L_S και L_W . Το Σχήμα 4 - 2 απεικονίζει το διάγραμμα ισοϋψών του πίνακα $L_{S\_CORRECTED}$ που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία έχοντας σαν είσοδο το διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4 - 1.



Σχήμα 4 - 2. Διάγραμμα ισοϋψών ισχύος χωρικά συσχετισμένων στοιχείων σκίασης σε dB

Τέλος, με βάση το [12] και με στόχο την κατασκευή ενός περισσότερου ακριβούς πλέγματος τιμών σκίασης, δημιουργήθηκε ένα νέο πλέγμα διαστάσεων 250 × 250, κάνοντας χρήση της μεθόδου *spline παρεμβολής*. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιεί ένωση δύο παρακείμενων σημείων του αρχικού πλέγματος με μία ομαλή γραμμή, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές όλων των

γειτονικών σημείων που σχετίζονται με τα συνδεδεμένα, αυξάνοντας την πυκνότητα των σημείων του πλέγματος στοιχείων σκίασης. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αντιστοίχιση ενός σημείου του νέου πλέγματος σε πολύ μικρότερες περιοχές, διαστάσεων $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$, τις αρχικής περιοχής κινητικότητας. Το Σχήμα 4 - 3 παρουσιάζει το διάγραμμα ισοϋψών που προέκυψε μετά την εφαρμογή της μεθόδου της spline παρεμβολής. Σημειώνεται ότι οι άξονες του διαγράμματος του σχήματος 4 - 3, απεικονίζουν τις διαστάσεις της περιοχής κινητικότητας σε αντίθεση με τα διαγράμματα των σχημάτων 4 - 1 και 4 - 2 τα οποία απεικονίζουν τα σημεία του πλέγματος. Δεδομένης της μεθοδολογίας που περιγράφηκε η κατασκευή του πλέγματος τιμών σκίασης δεν είναι μοναδική εφόσον τα στοιχεία του πίνακα L_w είναι τυχαία. Με στόχο την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων του τελικού πλέγματος τιμών από τη θεωρητικό πλαίσιο που περιγράφηκε, η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος σκίασης εκτελέστηκε 100 φορές οπότε και επιλέχθηκε το πλέγμα με την πλησιέστερη στο μηδέν απόλυτη μέση τιμή.



Σχήμα 4 - 3. Εφαρμογή μεθόδου spline παρεμβολής στο πλέγμα στοιχείων σκίασης

4.2.2 Μηχανισμοί Ανακάλυψης Νέου Σημείου Πρόσβασης, Πρόβλεψης & Εκτέλεσης Διαπομπών

Η λειτουργία και επίδοση του FMIPn6, στο οποίο στηρίζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής M-FMIPn6/FTB, βασίζεται στη λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών *ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης, πρόβλεψης διαπομπής και εκτέλεσης διαπομπής*. Οι μηχανισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται για την έγκαιρη εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων αναφορικά με την πρόοδο μίας διαπομπής στρώματος δικτύου. Η λειτουργία του καθενός βοηθητικού μηχανισμού επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού, με θετικό ή αρνητικό τρόπο. Για παράδειγμα στην περίπτωση που η πρόβλεψη μίας διαπομπής είναι ακριβής και παραδοθεί έγκαιρα, είναι πιθανότερη η εκτέλεση διαπομπής προ-δραστικού τύπου, που εμφανίζει την καλύτερη επίδοση όπως θα φανεί στη

συνέχεια. Αντίθετα μία λανθασμένη πρόβλεψη έχει σαν αποτέλεσμα την εκτέλεση πλήρως μεταδραστικής διαπομπής η οποία έχει τη χειρότερη συγκριτικά επίδοση. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών που υλοποιήθηκαν στον προσομοιωτή. Η παρουσίαση έχει ως στόχο την περιγραφή των χαρακτηριστικών του καθενός μηχανισμού, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του.

Η βασική αποστολή ενός μηχανισμού ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης, είναι η κατά το δυνατό και απαραίτητο. λεπτομερής χαρτογράφηση της περιοχής κινητικότητας του τερματικού, ώστε να καταστεί δυνατή η επιλογή ενός νέου σημείου πρόσβασης στο εγγύς μέλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, οι βασικές απαιτήσεις από το μηχανισμό είναι δύο· πρώτον, η λειτουργία του μηχανισμού θα πρέπει να οδηγεί στον προσδιορισμό των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης στην περιοχή εμβέλειας του τερματικού (θεωρείται ότι το τερματικό είναι αντίστοιχα εντός της περιοχής εμβέλειας του εκάστοτε σημείου πρόσβασης και κατά συνέπεια είναι εφικτή η εγκατάσταση αμφίδρομων συνδέσεων στρώματος ζεύξης). Με άλλα λόγια ο μηχανισμός θα πρέπει να επιστρέψει ένα αναγνωριστικό του σημείου πρόσβασης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από το πρωτόκολλο FMIPv6. Δεύτερον, ο μηχανισμός θα πρέπει να συλλέξει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την ποιότητα της ζεύξης που μπορεί να εγκατασταθεί με καθένα από τα εντοπισμένα στο προηγούμενο βήμα σημεία πρόσβασης. Ο συνδυασμός των παραπάνω στοιχείων θα χρησιμοποιηθούν από το μηχανισμό πρόβλεψης για την επιλογή του αναμενόμενου προς διαπομπή σημείου πρόσβασης. Όσον αφορά τα στοιχεία ποιότητας της ζεύξης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια στον προσδιορισμό της τιμής τους εξαρτάται από την υλοποίηση του εκάστοτε αλγορίθμου. Στις μέρες μας δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο σύμφωνα με το οποίο υλοποιούνται οι αλγόριθμοι προσδιορισμού των νέων σημείων πρόσβασης. Σαν γενικό κανόνα πάντως αναγνωρίζουμε ότι ο αλγόριθμος επιλογής του νέου σημείου πρόσβασης θα πρέπει να λειτουργεί στο ίδιο πλαίσιο με τον αλγόριθμο εκτέλεσης της διαπομπής. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να δίνει όλα τα στοιχεία στα οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος εκτέλεσης της διαπομπής, ώστε να είναι εφικτή η αποτίμηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος από τον αλγόριθμο πρόβλεψης με τον ίδιο τρόπο.

Στο πλαίσιο προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή, ο μηχανισμός αναζήτησης νέων σημείων πρόσβασης ήταν εξαιρετικά απλός. Δεδομένου ότι προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός ασύρματου συστήματος WLAN IEEE 802.11 [19]-[20], ο μηχανισμός AP Discovery εκτελούνταν στο τερματικό και πραγματοποιούσε τα εξής βήματα: αρχικά ο σταθμός έμπαινε στη φάση *σάρωσης* του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (physical medium scanning). Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.6.1, σε αυτήν τη φάση ο σταθμός αφουγκράζεται (δηλ. συντονίζει τον πομποδέκτη του σε μία συγκεκριμένη κεντρική συχνότητα) το εκάστοτε κανάλι για περιοδικά αποστελλόμενα μηνύματα διαχείρισης (beacon) του ασύρματου δικτύου. Τα συγκεκριμένα μηνύματα περιέχουν τα απαραίτητα στοιχεία ταυτοποίησης του ασύρματου δικτύου από το οποίο προέρχονται. Κατά συνέπεια η επεξεργασία τους καλύπτει πλήρως την πρώτη από τις απαιτήσεις που περιγράφηκαν νωρίτερα. Η υλοποίηση του αλγορίθμου εκτέλεσης διαπομπής στηρίζεται αποκλειστικά στην αποτίμηση της ισχύος των λαμβανόμενων beacon μηνυμάτων από κάθε AP, οπότε η εκτίμηση της ποιότητας των υποψηφίων συνδέσεων με τα αντίστοιχα σημεία πρόσβασης

έγινε καταγράφοντας το επίπεδο της ισχύος των λαμβανόμενων beacon μηνυμάτων. Το πρότυπο IEEE 802.11 προβλέπει την ύπαρξη 11 καναλιών (ή 13 για συγκεκριμένες χώρες), ανά 3 μη επικαλυπτόμενα. Όπως θα φανεί και παρακάτω, στην τοπολογία προσομοίωσης που θεωρήθηκε, στον προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά κανάλια (διαφορετικών κεντρικών συχνοτήτων και μη επικαλυπτόμενου εύρους). Γι' αυτό το λόγο στον προσομοιωτή, ο μηχανισμός ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης όπως και ο μηχανισμός εκτέλεσης διαπομπών σάρωναν μόνο αυτά τα κανάλια. Δεδομένου ότι η περίοδος αποστολής των μηνυμάτων beacon ήταν 100 msec, η μέση διάρκεια εκτέλεσης του μηχανισμού ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης ήταν 250 msec. Η υλοποίηση της διαδικασίας *σάρωσης* ήταν *παθητική* (passive scanning), δηλαδή ο τερματικός σταθμός ανέμενε την λήψη του μηνύματος beacon κάθε φορά που συντονίζονταν σε ένα νέο κανάλι.

Για την περίπτωση ενός ασύρματου συστήματος που λειτουργεί με βάση το πρωτόκολλο FMIPv6, η λειτουργία του μηχανισμού πρόβλεψης μίας διαπομπής είναι εξαιρετικά σημαντική. Εν γένει η λειτουργία του μηχανισμού πρόβλεψης στηρίζεται, αφενός στην σχεδίαση του αλγορίθμου εκτέλεσης της διαπομπής, κι αφετέρου στην ακρίβεια των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος και με βάση τις οποίες πραγματοποιείται η πρόβλεψη. Ο αλγόριθμος εκτέλεσης της διαπομπής επιλέγει το νέο σταθμό βάσης με βάση μετρήσεις φυσικών μεγεθών που πραγματοποιούνται τη στιγμή εκτέλεσης της διαπομπής. Από την άλλη, ο αλγόριθμος πρόβλεψης είναι υποχρεωμένος να προβλέψει το σταθμό βάσης που θα επέλεγε ο αλγόριθμος εκτέλεσης της διαπομπής αν λάμβανε σαν είσοδο τις τιμές μετρήσεων που εισάγονται στον αλγόριθμο πρόβλεψης. Αλγοριθμικά οι δύο μηχανισμοί είναι πανομοιότυποι. Εντούτοις αυτό δε σημαίνει ότι οι προβλέψεις θα είναι πάντα σωστές, εφόσον ότι ο αλγόριθμος εκτέλεσης μίας διαπομπής ενδέχεται να κληθεί να αποτιμήσει ένα εντελώς διαφορετικό περιβάλλον από αυτό που αποτίμησε ο αλγόριθμος πρόβλεψης. Κατά συνέπεια είναι πολύ σημαντικό ο αλγόριθμος πρόβλεψης να εκτελείται χρονικά λίγο πριν τον αλγόριθμο εκτέλεσης της διαπομπής. Εντούτοις κάτι τέτοιο δεν είναι πάντοτε εφικτό, εφόσον οι συνθήκες σκανδαλισμού του καθενός διαφέρουν μεταξύ τους.

Βασικός σκοπός της λειτουργίας των μηχανισμών εκτέλεσης διαπομπών στρώματος ζεύξης είναι η κατάλυση της υπάρχουσας ζεύξης με το τρέχον σημείων πρόσβασης, η επιλογή ενός νέου και η εγκατάσταση μίας νέας σύνδεσης με αυτό. Η διαδικασία κατάλυσης της υπάρχουσας σύνδεσης εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο σύστημα. Για παράδειγμα στο IEEE 802.11 δεν προβλέπεται κάποιο μήνυμα σηματοδότησης για αυτό το σκοπό, αλλά πραγματοποιείται καταστροφή των εγγραφών στο σημείο πρόσβασης εφόσον δεν προκύπτει ότι ένας σταθμός είναι συνδεδεμένος σε αυτό μετά την παρέλευση ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Η διαδικασία εγκατάστασης μίας σύνδεσης με ένα σταθμό βάσης περιλαμβάνει μετάδοση μηνυμάτων σηματοδότησης για την ταυτοποίηση του εκάστοτε κόμβου και την ανταλλαγή των απαραίτητων αναγνωριστικών. Για το σύστημα IEEE 802.11 η συγκεκριμένη διαδικασία συντίθεται από την ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδότησης που περιγράφονται στην ενότητα 3.6.1 και το [20].

Η ευφυΐα του αλγορίθμου εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης τοποθετείται στον αλγόριθμο επιλογής νέου σταθμού πρόσβασης. Βασικό κριτήριο σκανδαλισμού της διαδικασίας

αναζήτησης νέου σημείου πρόσβασης, αποτελεί η ποιότητα της εγκατεστημένης ζεύξης. Εν γένει το ζητούμενο είναι να πραγματοποιηθεί η επιλογή ενός σταθμού βάσης, με τον οποίο η ζεύξη που θα εγκατασταθεί να είναι αξιόπιστη. Το θέμα αξιοπιστίας είναι αρκετά σημαντικό, εφόσον η επιλογή ενός ακατάλληλου σημείου πρόσβασης θα οδηγήσει σε νέα διαπομπή του κινητού τερματικού από το νέο σημείο πρόσβασης στο άμεσο μέλλον. Το συγκεκριμένο φαινόμενο περιγράφεται στη βιβλιογραφία ως *παλινδρόμηση* (ping-pong) και σύμφωνα με αυτό, ο κινητός σταθμός διαπέμπεται μεταξύ δύο ή περισσότερων σταθμών βάσης δεδομένης της συνεχούς ικανοποίησης των κριτηρίων εκτέλεσης της διαπομπής σε ένα μικρό σχετικά χρονικό διάστημα. Με στόχο τον περιορισμό του φαινομένου της παλινδρόμησης, οι σχεδιαστές των αλγορίθμων εκτέλεσης διαπομπών θέτουν περισσότερο σύνθετα κριτήρια στην επιλογή του εκάστοτε νέου σημείου πρόσβασης. Τα κριτήρια αυτά αποτιμούν και τη χρονική συνιστώσα της μεταβολής των ποιοτικών χαρακτηριστικών της ζεύξης έτσι ώστε να περιορίζεται η επίδραση των φαινομένων διαλείψεων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα στην τελική επιλογή. Η αποτίμηση της χρονικής συνιστώσας πραγματοποιείται μέσω ενός μηχανισμού *χρονικής υστέρησης* (*hysteresis*). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποτιμά την ποιότητα της ζεύξης σε ένα ευρύ χρονικό παράθυρο απαιτώντας την ικανοποίηση του κριτηρίου ποιότητας για όλη την έκταση του εν λόγω χρονικού παραθύρου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ως βασικό κριτήριο για την επιλογή ενός νέου σημείου πρόσβασης, την μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος σε ένα επίπεδο χαμηλότερο ενός κατωφλίου, η εφαρμογή του μηχανισμού χρονικής υστέρησης επιβάλλει την ικανοποίηση του κριτηρίου για όλη τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου που τον χαρακτηρίζει. Με αυτόν τον τρόπο ο μηχανισμός εκτέλεσης διαπομπής δεν σκανδαλίζεται άσκοπα εξαιτίας μίας προσωρινής διάλειψης ενώ παράλληλα επιτρέπεται, λόγω της εισαγόμενης καθυστέρησης, στον κινητό κόμβο να επιβεβαιώσει την απομάκρυνσή του από την περιοχή κάλυψης του τρέχοντα σταθμού βάσης. Το δεύτερο σημείο στο οποίο που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή είναι η επιλογή του νέου σημείου πρόσβασης από τη λίστα με τα διαθέσιμα στην περιοχή. Όπως προαναφέρθηκε για αυτό το ζήτημα δεν υπάρχει γενικός κανόνας. Δεδομένου του ότι δεν χρησιμοποιούνται γεωγραφικά στοιχεία αναφορικά με την τοποθεσία του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού και της κατεύθυνσής του, η επιλογή στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται με στόχο την μείωση του χρόνου επιλογής, ικανοποιώντας παράλληλα το κριτήριο αξιοπιστίας επιλογής.

Στα πλαίσια του προσομοιωτή που αναπτύχθηκε, κάθε κινητό εκκινούσε τη διαδικασία εκτέλεσης διαπομπής, όταν η λαμβανόμενη ισχύς των beacon μηνυμάτων είχε τιμή μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι ($P_{RX\_WLAN\_HO\_THR}$). Ο μηχανισμός υστέρησης υλοποιήθηκε απαιτώντας από το σταθμό να εισέλθει στη φάση σάρωσης εφόσον επιβεβαιωνόταν η μέτρηση τεσσάρων συνεχόμενων beacon μηνυμάτων από το τρέχοντα σταθμό βάσης, με τιμή κατώτερη από το κατώφλι $P_{RX\_WLAN\_HO\_THR}$. Στην περίπτωση κατά την οποία η τιμή της λαμβανόμενης ισχύος μετριόταν μεγαλύτερη από το κατώφλι σε κάποιο από τα τέσσερα beacons, η διαδικασία μηδενίζονταν. Αυτό σημαίνει ότι για την εκτέλεση της διαπομπής απαιτούσαν η λήψη επιπλέον τεσσάρων συνεχόμενων beacon μηνυμάτων που να ικανοποιούν την παραπάνω απαίτηση. Αντίστοιχα η επιλογή του νέου σημείου πρόσβασης πραγματοποιούνταν εφόσον η λαμβανόμενη ισχύς στο τερματικό, είχε μεγαλύτερη τιμή από ένα ανώφλι ($P_{RX\_AP\_SELECTION\_THR}$). Με αυτόν τον

τρόπο η διαδικασία εκτέλεσης διαπομπής εκκινούσε εφόσον στην τυπική περίπτωση ο κινητός κόμβος είχε απομακρυνθεί αρκετά από τον τρέχοντα σταθμό βάσης. Αντίστοιχα το κριτήριο της επιλογής του νέου σταθμού βάσης έδωσε τη δυνατότητα επιλογής ενός σταθμού μόνο στην περίπτωση κατά την οποία ο κινητός σταθμός βρισκονταν αρκετά βαθιά εντός της περιοχής κάλυψής του. Με αυτόν τον τρόπο περιορίστηκαν αρκετά (όχι στο έπακρο πάντως) φαινόμενα παλινδρόμησης (ring-rong handovers) μεταξύ των σταθμών βάσης. Σημειώνεται ότι η τελική επιλογή του νέου σταθμού βάσης επηρεαζόταν και από τη συχνότητα του καναλιού. Ο αλγόριθμος προέβλεπε ότι επιλέγεται ο πρώτος σταθμός από το επόμενο κανάλι που ικανοποιεί το κριτήριο ποιότητας $P_{RX\_AP\_SELECTION\_THR}$. Τα κανάλια εξετάζονταν κυκλικά οπότε και επιλέγονταν το πρώτο που ικανοποιούσε το κριτήριο. [16]

Κλείνοντας την παρούσα ενότητα θα πρέπει να σημειωθεί ότι βασικός στόχος ήταν η υλοποίηση ρεαλιστικών μηχανισμών οι οποίοι είναι παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται από πραγματικά συστήματα IEEE 802.11. Για το λόγο αυτό δεν επιλέχθηκε η ανάπτυξη μηχανισμών που λαμβάνουν υπόψη τους όλη τη διαθέσιμα πληροφορία, η οποία στα πλαίσια του προσομοιωτή είναι αρκετή και αρκετά ακριβής, πράγμα το οποίο θα είχε σαν αποτέλεσμα την προσομοίωση ιδανικών σεναρίων, που δεν θα ανταποκρίνονταν στην πραγματικότητα. Αντίθετα μελετήθηκε η επίδοση των μηχανισμών στις περιπτώσεις όπου συνέβαιναν λάθη (στις προβλέψεις ή στις επιλογές των νέων σημείων πρόσβασης), που είχαν σαν αποτέλεσμα την εκτέλεση παλινδρομικών διαπομπών σε μικρό χρονικό διάστημα, γεγονός το οποίο δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης σε πιο πραγματικά σενάρια. Ένας περισσότερο προηγμένος αλγόριθμος επιλογής έχει τη δυνατότητα να αποφεύγει εκτέλεση τέτοιων φαινομένων που έχουν αρνητική επίδραση στη συνολική επίδοση.

4.2.3 Link Layer Triggers

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα πληροφορίας στρώματος ζεύξης μέσω της οποίας αποκαλύπτεται η ποιότητα της εγκατεστημένης ζεύξης, η πρόοδος εκτέλεσης μίας διαπομπής ή η επικείμενη εκτέλεσή της. Στο πλαίσιο προσομοίωσης που θεωρείται στη διατριβή, η συγκεκριμένη ροή πληροφορίας έχει υλοποιηθεί μέσω της παράδοσης αναφορών προς τη διεργασία που υλοποιεί το πρωτόκολλο FMIPv6, στη μορφή σημείων σκανδαλισμού (trigger³³), όπως αυτά που περιγράφονται στα κεφάλαια 2 και 3. Πιο συγκεκριμένα, έχουν χρησιμοποιηθεί τέσσερα διαφορετικά triggers τα οποία είναι: το *Link Quality Crosses Threshold* (LQCT), το *Link Going Down* (LGD), το *Link Down* (LD) και το *Link Up* (LU). Η επιλογή των συγκεκριμένων σημείων σκανδαλισμού είναι σύμφωνη με τα όσα αναφέρονται στο [17] και τις προδιαγραφές που εκδίδονται από την ομάδα προτυποποίησης του πρωτοκόλλου MIH, IEEE 802.21 [18], που ασχολείται με την ανάπτυξη του στρώματος *Διαχείρισης Διαπομπών Ανεξαρτήτως Μέσου* (Media Independent Handover, MIH).

³³ Ορολογία: Με τον όρο trigger, ουσιαστικά εννοείται η παράδοση ενός μηνύματος που σκανδαλίζει την εκτέλεση μίας διαδικασίας. Το στρώμα MIH, ουσιαστικά προωθεί προς το πρωτόκολλο FMIPv6 ειδοποιήσεις (αναφορές ενημέρωσης, notifications), ενημερώνοντάς το σχετικά με το ποια «σημαντικά» γεγονότα έχουν λάβει χώρα στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Αντίστοιχα, το πρωτόκολλο FMIPv6, σκανδαλίζεται από την παράδοση των συγκεκριμένων μηνυμάτων, οπότε θεωρείται ότι παραδίδεται σε αυτό το εκάστοτε trigger.

Η παράδοση των triggers πραγματοποιείται στη μεριά του τερματικού κάνοντας χρήση ενός υπομηχανισμού παρακολούθησης της λειτουργίας του στρώματος ζεύξης δεδομένων και του επιπέδου ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων από τον εκάστοτε σταθμό βάσης. Τα δύο πρώτα trigger LQCT και LGD, παραδίδονται όταν ο μηχανισμός παρακολούθησης της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το επίπεδο ισχύος είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, τουλάχιστο κατά ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η επιλογή τόσο του κατωφλίου ισχύος, όσο και του χρονικού διαστήματος, επηρεάζουν τη λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6. Για την περίπτωση του trigger LQCT, το κατώφλι προσδιορίζεται από την παράμετρο $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα από την παράμετρο $D_{RX\_HO\_PREP\_THR}$. Η παράδοση του trigger LQCT υποδηλώνει ότι έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση της διαδικασίας *Ανακάλυψης Νέου Σημείου Πρόσβασης* (AP Discovery), οπότε ο κινητός κόμβος έχει τη δυνατότητα να προχωρήσει στην εκτέλεση της διαδικασίας *Ανακάλυψης Νέου Δρομολογητή Πρόσβασης* (AR Discovery) μέσω της proxy διαδικασίας που προβλέπεται από το FMIPv6. Με άλλα λόγια η παράδοση του trigger LQCT ουσιαστικά σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας *προετοιμασίας* της διαπομπής στρώματος δικτύου. Αντίστοιχα, η παράδοση του trigger LGD πραγματοποιείται όταν το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος μετριέται μικρότερο του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$, για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της περιόδου $D_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Η παράδοση του LGD σηματοδοτεί στο στρώμα δικτύου ότι θα πρέπει να εκκινήσει η διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής προς το δίκτυο στο οποίο έχει καταλήξει ο μηχανισμός πρόβλεψης διαπομπής. Η πραγματοποίηση της πρόβλεψης ουσιαστικά έχει πραγματοποιηθεί από το στιγμή που παραδίδεται το trigger LQCT που προηγήθηκε.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράδοση των trigger LQCT και LGD στον προσομοιωτή πραγματοποιείται σειριακά. Αυτό σημαίνει ότι σε καμία περίπτωση το δεύτερο δεν θα παραδοθεί αν δεν έχει πρώτα πραγματοποιηθεί η παράδοση του πρώτου. Ο συγκεκριμένος περιορισμός είναι επιβεβλημένος δεδομένου του ότι η παράδοση του trigger δεν σηματοδοτεί μόνο το γεγονός ότι το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος στο τερματικό είναι μικρότερο του κατωφλίου για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, αλλά ότι στην περίπτωση του LQCT έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία AP Discovery (*προετοιμασία*) και στην περίπτωση του LGD ότι έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία *πρόβλεψης* της διαπομπής. Όπως και να έχει πάντως η υλοποίηση του πρωτοκόλλου FMIPv6 κατά την *προ-δραστική* λειτουργία, δεν επιτρέπει την αποστολή του μηνύματος FBU πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας Proxy Router Discovery.

Αναφορικά με τη χρήση του μηχανισμού χρονικής υστέρησης ($D_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ και $D_{RX\_HO\_ANT\_THR}$) στην παράδοση και των δύο trigger, σημειώνεται ότι υλοποιήθηκε με στόχο τον περιορισμό των λαθών στην παράδοσή τους. Η επίδραση του φαινομένου σκίασης σε συνδυασμό με τη μεταβολή της ταχύτητας του τερματικού (κατά μέτρο και διεύθυνση), μπορεί να οδηγήσουν σε περιπτώσεις «λανθασμένου συναγερμού». Το συγκεκριμένο φαινόμενο λαμβάνει χώρα στις περιπτώσεις που το τερματικό λαμβάνει σήματα χαμηλής ισχύος, για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (π.χ. διότι εισήλθε σε μία περιοχή έντονης σκίασης, αλλά κινείται επαρκώς γρήγορα ώστε να εξέλθει από αυτή σύντομα). Με στόχο την αποφυγή τέτοιων φαινομένων επιλέχθηκε η χρήση της τεχνική με τη χρονική υστέρηση. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη τεχνική

χρησιμοποιείται κατά κόρον από μηχανισμούς εκτέλεσης διαπομπών στρώματος ζεύξης δεδομένων και κατά συνέπεια θα πρέπει να θεωρηθεί αρκετά ασφαλής όσον αφορά τους περιορισμούς που μπορεί να εισάγει η εφαρμογή της.

Τέλος, όσον αφορά τα trigger LD και LU, η παράδοσή τους σηματοδοτείται ουσιαστικά από την διεργασία υλοποίησης του στρώματος ζεύξης δεδομένων (IEEE 802.11 WLAN). Η συγκεκριμένη διεργασία επιβλέπει τόσο το επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος και σκανδαλίζει τη διαδικασία εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης δεδομένων, όσο και την ανταλλασσόμενη σηματοδότηση μεταξύ του τερματικού και του AP. Ως εκ τούτου η παράδοση του LD σηματοδοτεί ότι έχει καταλυθεί η ζεύξη με το τρέχον AP, και ότι το στρώμα MAC είναι σε φάση αναζήτησης νέου (μέσω της διαδικασίας *σάρωσης* του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος). Η παράδοση του συγκεκριμένου trigger δεν προκαλεί την αποστολή κάποιου μηνύματος από την πλευρά του τερματικού αλλά επηρεάζει την κατάσταση του πρωτοκόλλου FMIPv6, δεδομένου του ότι ο κόμβος μπορεί να προετοιμάσει την εκτέλεση μίας διαπομπής μετα-δραστικού τύπου εφόσον δεν έχει παραληφθεί το μήνυμα FBBack. Από την άλλη, η παράδοση του trigger LU σηματοδοτεί στο στρώμα δικτύου ότι ο κόμβος είναι σε θέση να επικοινωνεί στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, εφόσον έχει μόλις ολοκληρωθεί η διαπομπή σε αυτό (ολοκλήρωση διαδικασιών *σάρωσης* και *συσχετισμού* με το νέο AP, βλέπε ενότητα 3.6.1). Όπως έχει αναλυθεί η παράδοση του LU σκανδαλίζει το πρωτόκολλο FMIPv6 ώστε να προχωρήσει στην ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος δικτύου μέσω της αποστολής του μηνύματος FNA. Για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου M-HMIPv6, η παράδοση του LU σηματοδοτεί την εκκίνηση της διαδικασίας υποστήριξης κινητικότητας (βλέπε ενότητες 2.3.3.3 και 2.4.2.2.1), τα πρώτα βήματα της οποίας είναι η *Επισήμανση Μετακίνησης*, η *Ανακάλυψη Δρομολογητή* και η *Ρύθμιση Διεύθυνσης*. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Η διαφορά είναι ότι στην περίπτωση των *Απομακρυσμένων Συμμετοχών* το επόμενο βήμα μετά τη *Ρύθμιση Διεύθυνσης* είναι η αποστολή ενός μηνύματος MLD *Αναφοράς Συμμετοχής* στο νέο δρομολογητή πρόσβασης για την συμμετοχή του στο κατάλληλο δένδρο διανομής.

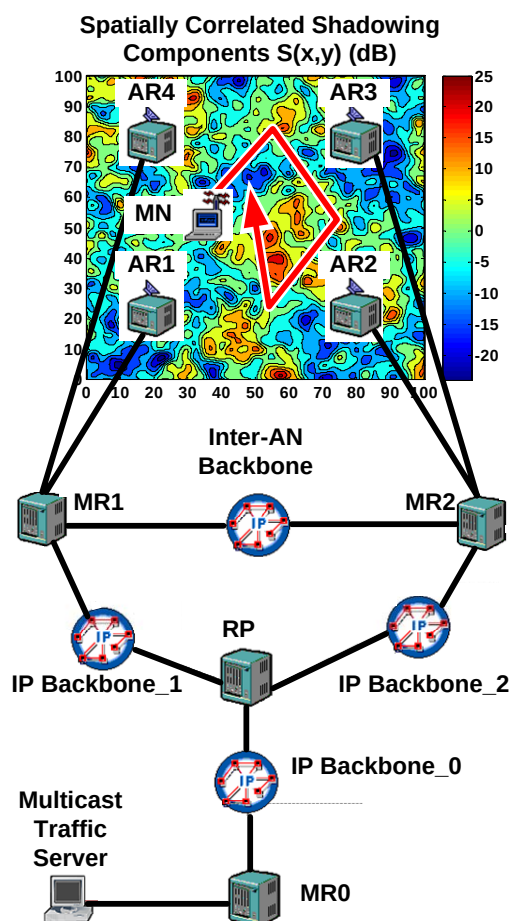
4.2.4 Τοπολογία δικτύου

Η τοπολογία δικτύου που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της επίδοσης των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 4 - 4, και χωρίζεται σε τρεις κύριες περιοχές:

- *Περιοχή Ασύρματων Δικτύων Πρόσβασης* (πάνω μέρος): αποτελείται από την περιοχή κινητικότητας των τερματικών κόμβων, η οποία έχει τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2.1 και διαστάσεις $100 \times 100 \text{ m}^2$. Εντός της περιοχής κινητικότητας έχουν τοποθετηθεί τέσσερις δρομολογητές πρόσβασης (Access Routers, AR), στις κορυφές ενός τετραγώνου πλευράς 60 m (AR₁₋₄). Με αυτόν τον τρόπο έχουν θεωρηθεί δύο αυτόνομες περιοχές δικτύου, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από ένα ζευγάρι δρομολογητών πρόσβασης. Κάθε AR είναι εξοπλισμένος με μία διεπαφή IEEE 802.11b, που λειτουργεί σαν σημείο πρόσβασης (Access Point). Με αυτόν τον τρόπο ορίστηκαν τέσσερα διαφορετικά μεταξύ τους τοπικά ασύρματα δίκτυα. Με στόχο τον περιορισμό των παρεμβολών μεταξύ των ασυρμάτων δικτύων, τα AP₁ και AP₃ λειτουργούσαν στο κανάλι 1, το AP₂ στο κανάλι 6

και το AR_4 στο κανάλι 11. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη συχνότητα λειτουργίας του κάθε καναλιού μπορεί να αναζητηθούν στο [20]. Κάθε AR είναι άμεσα συνδεδεμένος με ένα από τους δύο δρομολογητές πολυεκπομπής (MR, Multicast Router) που παρέχουν πρόσβαση στο δίκτυο κορμού πολυεκπομπής. Οι συγκεκριμένοι δρομολογητές παίζουν το ρόλο και των δρομολογητών «πύλη» (gateway router), για καθεμία από τις δύο οριζόμενες αυτόνομες περιοχές δικτύου (2 τομείς δικτύου: αριστερά απαρτιζόμενος από τους κόμβους MR_1 , AR_1 και AR_4 , και δεξιά από τους κόμβους MR_2 , AR_2 και AR_3) που θεωρούνται στην τοπολογία. Για τις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο M-HMIPv6, οι δρομολογητές MR_1 και MR_2 , έπαιζαν το ρόλο του κόμβου M-MAP (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.1).

- *Περιοχή Δικτύου Πηγών Κίνησης Πολυεκπομπής* (κάτω μέρος): Αποτελείται από έναν δρομολογητή πολυεκπομπής MR_0 μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διασύνδεση του εξυπηρετητή-πηγή κίνησης πολυεκπομπής στα τερματικά.



Σχήμα 4 - 4. Τοπολογία Δικτύου Προσομοίωσης

- *Περιοχή Δικτύου Κορμού IP (IP Backbone, μέση)*: η συγκεκριμένη περιοχή αποτελείται από τρεις κόμβους $IP\_Backbone_i$, που προσομοιώνουν τη λειτουργία ενός δικτύου μεταφοράς από την περιοχή Πηγών προς το καθένα αυτόνομο *Δίκτυο Πρόσβασης*. Ο κάθε κόμβος $IP\_Backbone_i$, εισάγει τυχαία αλλά μικρή καθυστέρηση (της τάξης των 10-50

msec) σε κάθε πακέτο που τον διαπερνά. Όλοι οι κόμβοι $IP\_Backbone_i$, διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός επιπλέον δρομολογητή πολυεκπομπής ο οποίος παίζει το ρόλο του σημείου συνάντησης (*rendezvous point*), όπως απαιτείται για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου PIM-SM που χρησιμοποιήθηκε για την δρομολόγηση πολυεκπομπής στην τοπολογία.

Κατά τη διάρκεια μίας διαπομπής, ανταλλάσσεται ένας σημαντικός αριθμός πακέτων κίνησης μεταξύ των δρομολογητών πρόσβασης που ελέγχουν τα εμπλεκόμενα ασύρματα δίκτυα, εκτός από τα πακέτα σηματοδότησης. Με στόχο τη μελέτη και αξιολόγηση της επίδοσης καθενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας, χρησιμοποιήθηκε ο κόμβος *Inter_AN_Backbone*, ο οποίος διασυνδέει τους δρομολογητές MR_1 και MR_2 . Η χρήση του συγκεκριμένου κόμβου, έδωσε τη δυνατότητα μεταβολής της καθυστέρησης που εφαρμόζεται στα πακέτα που τον διαπερνούν στις περιπτώσεις εκτέλεσης δια-τομεακών διαπομπών. Στα επόμενα ως ενδο-τομεακές θα θεωρούνται οι διαπομπές που πραγματοποιούνται μεταξύ των AR ζευγαριών 1 - 4 και 2 - 3. Όλοι οι υπόλοιποι συνδυασμοί αντιστοιχούν σε εκτέλεση δια-τομεακών διαπομπών.

4.3 Σενάρια Προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται λεπτομερώς τα σενάρια προσομοίωσης που εκτελέστηκαν για την αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού. Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο σενάρια· το πρώτο (*Σενάριο I*) αφορά τυχαία κίνηση του τερματικού εντός της προκαθορισμένης περιοχής κινητικότητας. Το δεύτερο (*Σενάριο II*) προβλέπει κίνηση του τερματικού σε προδιαγεγραμμένες διαδρομές. Το πρώτο σενάριο αποτελεί μία τυπική περίπτωση κινητικότητας. Έχει ως στόχο τη μελέτη της επίδοσης των μηχανισμών κατά τη μεταβολή βασικών ρυθμίσεων του προσομοιωτή και των πρωτοκόλλων που υλοποιούν τους υπό μελέτη μηχανισμούς κινητικότητας και χαρακτηρίζεται από την τυχαία κίνηση των τερματικών σε ένα ρεαλιστικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Το δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκε με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η κατά μέτρο μεταβολή της ταχύτητας του τερματικού στην επίδοση των μηχανισμών κινητικότητας. Όπως θα φανεί και από την περιγραφή των αποτελεσμάτων, η επίδραση της συγκεκριμένης μεταβολής επηρεάζει κατά πολύ τη λειτουργία των μηχανισμών ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης, πρόβλεψης και εκτέλεσης διαπομπής που περιγράφηκαν νωρίτερα, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την συνολική επίδοση. Δεδομένου ότι το ζητούμενο ήταν η διερεύνηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού κατά τη μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας, επιλέχθηκε η σχεδίαση ενός ξεχωριστού σεναρίου στο οποίο είχε περιοριστεί η επίδραση που έχει η τυχαία μεταβολή της κατεύθυνσης του τερματικού.

4.3.1 Σενάριο I: Τυχαία Κίνηση Τερματικού - Random Waypoint Mobility

Το *Σενάριο I* υλοποιήθηκε με στόχο τη μελέτη μίας τυπικής περίπτωσης κινητικότητας ενός τερματικού εντός ενός περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου. Το σενάριο προβλέπει τυχαία κίνηση για το τερματικό με βάση το μοντέλο Random Waypoint (RWP) [21]. Η χρήση του

συγκεκριμένου μοντέλου κρίθηκε επαρκής δεδομένου ότι παρέχει τη δυνατότητα παραμετροποίησης της κίνησης του τερματικού για το θεωρούμενο περιβάλλον κινητικότητας. Σύμφωνα με το RWP, ένα κινητό τερματικό μετακινείται σε ευθύγραμμα τμήματα, εντός μίας προκαθορισμένης γεωγραφικά περιοχής κινητικότητας. Η κίνηση πραγματοποιείται σε ευθύγραμμα τμήματα με σταθερή ως προς το μέτρο και διεύθυνση ταχύτητα. Το μέτρο της ταχύτητας είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο διάστημα $[v_{\min}, v_{\max}]$. Ξεκινώντας από ένα γνωστό σημείο, κάθε νέο σημείο προς το οποίο κατευθύνεται ο κόμβος, προσδιορίζεται επίσης τυχαία με μόνο περιορισμό το νέο σημείο να ανήκει στην περιοχή κινητικότητας. Ο κόμβος σταματά την κίνησή του μόλις φτάνει στο εκάστοτε σημείο προορισμού, για χρονικό διάστημα του οποίου η διάρκεια είναι επίσης ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[t_{\min}, t_{\max}]$. Το προφίλ του κινητού που ακολουθεί το μοντέλο RWP μπορεί να παρομοιαστεί με την κίνηση που ακολουθεί ένας αγοραστής σε έναν όροφο ενός κτηρίου καταστημάτων, όπου έχει τη δυνατότητα να μετακινείται τυχαία και να σταματά τυχαία ώστε να παρατηρεί τις βιτρίνες των καταστημάτων. Το Σχήμα 4 - 4 απεικονίζει τη βασική ιδέα του σεναρίου και μία τυχαία διαδρομή του κινητού. Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων ως περιοχή κινητικότητας θεωρήθηκε η περιοχή για την οποία έχουν προσδιοριστεί τα στοιχεία σκίασης με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 4.2.1.2. Το κινητό συνδέεται σαν αποτέλεσμα της κινητικότητας τους σε όλα τα AP που έχουν τοποθετηθεί στην *Περιοχή Δικτύων Πρόσβασης*, εκτελώντας διαπομπές από το ένα στο άλλο όταν το επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος πέφτει κάτω από τα επιλεχθέντα κατώφλια. Σημειώνεται ότι από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο προσομοιωτή, το ποσοστό των ενδο-τομεακών διαπομπών προς το σύνολο των διαπομπών για όλες τις προσομοιώσεις του παρόντος σεναρίου ήταν της τάξης του 45%.

Η χρήση της τυχαίας κινητικότητας στο *Σενάριο I*, έδωσε τη δυνατότητα αποτίμησης της γενικής συμπεριφοράς του καθενός μηχανισμού (M-FMIPv6/FTB, M-FMIPv6, M-HMIPv6 και *Απομακρυσμένες Συμμετοχές*) οπότε και εντοπίστηκαν οι περιπτώσεις στις οποίες κάθε μηχανισμός υπερέχει ή μειονεκτεί. Εντούτοις το ζητούμενο ήταν η πραγματοποίηση μίας δίκαιης συγκριτικής αξιολόγησης των μηχανισμών πράγμα το οποίο σημαίνει ότι οι μηχανισμοί θα έπρεπε να αξιολογηθούν στις ίδιες συνθήκες. Προκαταρκτικά αποτελέσματα (που δεν παρουσιάζονται στη συνέχεια) έδειξαν ότι η επίδραση του μοντέλου RWP στη συγκριτική αξιολόγηση της συνολικής επίδοσης των μηχανισμών ήταν καταλυτική. Η χρήση των τυχαίων διαδρομών που παρήγαγε σε κάθε προσομοίωση το μοντέλο RWP, είχε σαν αποτέλεσμα την αποτίμηση της επίδοσης σε εντελώς διαφορετικές συνθήκες για τον κάθε μηχανισμό. Στην πράξη αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι δεδομένων των διαφορετικών διαδρομών που ακολουθούσε το τερματικό, κάθε μηχανισμός αντιμετώπιζε διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον και εκτελούσε διαφορετική αλληλουχία διαπομπών. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα παρουσίασαν αποκλίσεις με αναφορά στην απόλυτη τιμή των μετρούμενων μεγεθών και σε πολλές περιπτώσεις δεν ήταν συγκρίσιμα μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η *προ-κατασκευή* των τυχαίων διαδρομών που ακολουθούσε το τερματικό με βάση το μοντέλο RWP και ακολούθως η χρήση των προ-κατασκευασμένων διαδρομών κατά την προσομοίωση της λειτουργίας του κάθε μηχανισμού. Η συγκεκριμένη διαδικασία οδήγησε στην κατασκευή

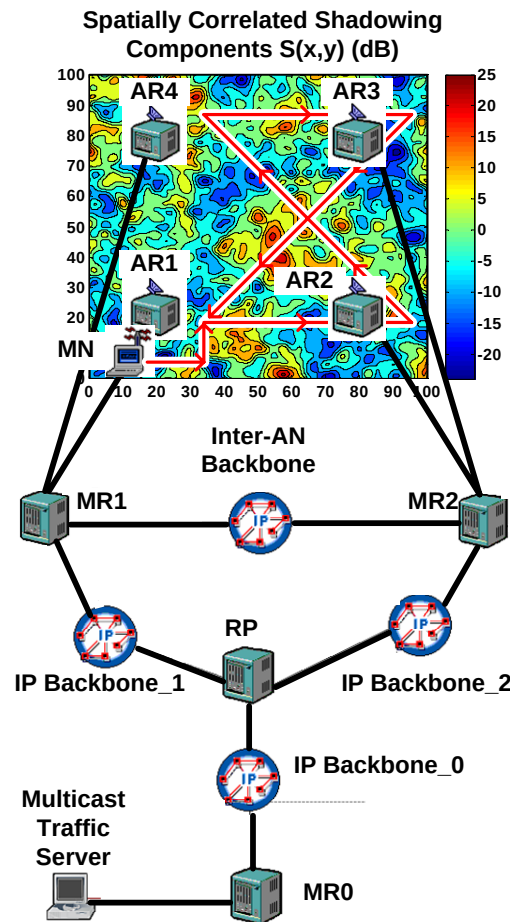
διαδρομών με βάση το μοντέλο RWP και η καταγραφή των τυχαίων σημείων, ταχυτήτων και διαστημάτων παύσης κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων της λειτουργίας του κάθε μηχανισμού. Με αυτόν τον τρόπο οι βοηθητικοί μηχανισμοί, που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2.2, σκανδαλίζονταν με τον ίδιο τρόπο οπότε όλες οι διαφοροποιήσεις στη συνολική επίδοση οφείλεται στην διαφορετική σχεδίαση του μηχανισμού του στρώματος δικτύου. Έτσι συγκρίθηκε η επίδοση των μηχανισμών στις ίδιες ακριβώς συνθήκες αναφορικά τόσο με το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον που αντιμετωπίζει ο καθένας, όσο και τη έκδοση των link layer triggers ή τη λειτουργία του μηχανισμού προβλέψεων που επηρεάζουν, όπως θα φανεί στη συνέχεια, τη συνολική επίδοση. Τέλος σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, αντιστοιχούν στη μέση τιμή μετρήσεων που προήλθαν από 40 επαναλήψεις. Καθεμία από τις επαναλήψεις προέβλεπε αρχικοποίηση σε διαφορετική τιμή της παραμέτρου που ελέγχει τη γέννηση τυχαίων αριθμών στον προσομοιωτή (seed number).

4.3.2 Σενάριο II: Κίνηση Τερματικού σε Προκαθορισμένη Διαδρομή - Fixed Trajectories

Το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης προβλέπει κίνηση του τερματικού πάνω σε προκαθορισμένες διαδρομές. Το Σχήμα 4 - 5 παρουσιάζει τη μορφή των διαδρομών. Σύμφωνα με το *Σενάριο II*, η κίνηση του τερματικού πραγματοποιείται πάνω σε έξι ευθύγραμμα τμήματα: το κινητό ξεκινά από ένα σημείο κοντά στον AR_1 και κινούμενο δεξιά για 20 sec διανύει μία απόσταση α m. Στη συνέχεια κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω για άλλα 20 sec διανύοντας αντίστοιχα απόσταση β m. Ακολουθώντας συνεχίζει την κίνηση προς τις γωνίες ενός τετραγώνου πλευράς 60 m, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4 - 5, σχηματίζοντας μία *κλεψύδρα*. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά κινείται δεξιά προς τον AR_2 , στη συνέχεια διαγώνια πάνω και αριστερά προς τον AR_4 , μετά οριζόντια δεξιά προς τον AR_3 , και τέλος επιστρέφει στο σημείο από το οποίο ξεκίνησε κοντά στον AR_1 . Κατά τη διάρκεια της κίνησης του στις γωνίες του τετραγώνου που μόλις περιγράφηκε, το τερματικό κινείται με σταθερή ταχύτητα. Με στόχο την προσομοίωση πληθώρας περιπτώσεων διαπομπών, κι έχοντας υπόψη ότι λόγω του φαινομένου της σκίασης (διαλείψεις μεγάλης κλίμακας), η κίνηση σε κοντινές περιοχές της περιοχής κινητικότητας έχει σαν αποτέλεσμα την έκδοση trigger με διαφορετική χρονική αλληλουχία, κατασκευάστηκαν πέντε διαφορετικές διαδρομές με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Για την κατασκευή της καθεμίας διαδρομής απλά επιλέχθηκε διαφορετική τιμή για τη δυάδα (α, β) , των τμημάτων δηλαδή που διανύει το κινητό αρχικά. Οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν οι εξής: (0, 0), (5, 2.5), (10, 5), (15, 7.5), (20, 10).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την κίνηση του τερματικού κατά μήκος των ευθυγράμμων τμημάτων με μήκη α και β , το κινητό παρέμενε συνδεδεμένο στο AP του AR_1 (δηλαδή δεν υπήρχε περίπτωση διαπομπής του σε κάποιο γειτονικό κόμβο). Επίσης το τερματικό ξεκινούσε την κίνησή του στο τμήμα με μήκος α , μετά την παρέλευση 150 sec από τη στιγμή εκκίνησης της προσομοίωσης, χρονικό διάστημα απαραίτητο για τη σύγκλιση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης της τοπολογίας. Η τυπική τιμή για την ταχύτητα του τερματικού κατά την κίνηση στο κύριο μέρος της διαδρομής (*κλεψύδρα*) ήταν 3 m/sec. Τέλος, όπως και στην περίπτωση του

Σεναρίου 1 επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 4.4.2, αντιστοιχούν στη μέση τιμή μετρήσεων που προήλθαν από 40 επαναλήψεις προσομοιώσεων που προήλθαν χρησιμοποιώντας την καθεμία από τις 5 παραπάνω διαδρομές. Καθεμία από τις επαναλήψεις προέβλεπε διαφορετική τιμή αρχικοποίησης της παραμέτρου που ελέγχει τη γέννηση τυχαίων αριθμών (seed number).



Σχήμα 4 - 5. Σενάριο προσομοίωσης προκαθορισμένης διαδρομής

4.3.3 Τυπικές Ρυθμίσεις Προσομοιωτή

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται οι τυπικές ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοιωτή που αναπτύχθηκε. Ο Πίνακας 4 - 1 που ακολουθεί, παρουσιάζει τις τυπικές τιμές για τις πιο σημαντικές παραμέτρους. Οι τιμές που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στην περίπτωση που δεν μεταβαλλόταν η αντίστοιχη παράμετρος.

Πίνακας 4 - 1. Τυπικές Ρυθμίσεις Προσομοιωτή

Παράμετρος	Τυπική Τιμή
<i>FMIPv6</i>	
$P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$	-70.05 dBm
$P_{RX\_HO\_PREP\_THR} = P_{RX\_HO\_ANT\_THR} + 0,8$	-69.97 dBm
$D_{RX\_HO\_ANT\_THR}, D_{RX\_HO\_PREP\_THR}$	100 msec
$P_{RX\_AP\_DISCOVERY\_THR} = P_{RX\_HO\_PREP\_THR} + 0.5$	-69.93 dBm
AP Discovery repetition period	5 sec

Παράμετρος	Τυπική Τιμή
NAR HI/FNA timer	0.5 sec
<i>WLAN IEEE 802.11b</i>	
Receiver Sensitivity	-90 dBm
$P_{RX\_WLAN\_HO\_THR}$	-70 dBm
$P_{RX\_AP\_SELECTION\_THR}$	-68 dBm
Beacon Interval	100 msec
<i>MLD (physical wireless/wired interfaces)</i>	
Query Interval	10 sec
Query Response Interval	5 sec
Last Member Query Response Interval	2 sec
<i>MLD (tunnel interfaces)</i>	
Query Response Interval	0 sec
Last Member Query Response Interval	0.1 sec
<i>ICMPv6</i>	
Neighbor Discovery – Duplicate Address Detection Duration	1 sec
Neighbor Cache Buffer Capacity (Καταχωρητής Προσωρινά Αποθηκευόμενων Πακέτων)	25 packets/MAC Address
<i>Inter Access Network Wired Link Delay (D_{WL})</i>	25 msec
<i>Remote Subscription Latency (D_{REM_SUBSCR})</i>	3 sec
<i>Πηγή Κίνησης (CBR Streaming Video)</i>	
Bitrate	200 Kbps
Frame (packet generation rate)	64 frames/sec
Frame size	400 bytes
<i>Περιοχή κινητικότητας τερματικών</i>	
Διαστάσεις	100 × 100 m ²
Πλαίσιο τοποθέτησης AR (κεντραρισμένο με την περιοχή κινητικότητας)	60 × 60 m ²
Frame size	400 bytes
<i>Προφίλ Κινητικότητας (Σενάριο I: Τυχαία Κίνηση – Random Waypoint model)</i>	
Ταχύτητα κινητού κόμβου [v_{min} , v_{max}]	[1, 5] m/sec
Διάστημα παύσης [t_{min} , t_{max}]	[0, 20] sec
Επαναλήψεις	40
Διάρκεια σεναρίου	1000 sec
Χρονικό διάστημα αδράνειας για την σύγκλιση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης	200 sec
<i>Προφίλ Κινητικότητας (Σενάριο II: Κίνηση σε προκαθορισμένες διαδρομές)</i>	
Επαναλήψεις	40
Ταχύτητα κινητού κόμβου (κατά την κίνησή του στη σχηματιζόμενη κλεψύδρα)	3 m/sec
Χρονικό διάστημα αδράνειας για την σύγκλιση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης	150 sec
<i>Shadow Fading Modeling</i>	
Μέση τιμή	0
Τυπική απόκλιση σ_s	8 dB
Απόσταση αποσυσχέτισης στοιχείων σκίασης X_c	5 m
Αρχικό πλέγμα στοιχείων σκίασης	50 × 50 δείγματα
Πλέγμα παρεμβολής spline	250 × 250 σημεία
Κύτταρο πλέγματος παρεμβολής	0.4 × 0.4 m ²

Για τους WLAN κόμβους, σημεία πρόσβασης (AP) και κινητά τερματικά, θεωρήθηκε μία τυπική τιμή για την ευαισθησία του δέκτη (receiver sensitivity) ίση με -90 dBm. Το όριο της ευαισθησίας του δέκτη αντιστοιχεί στο επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος κάτω από το οποίο δεν είναι εφικτή η αποδιαμόρφωση των λαμβανόμενων ηλεκτρομαγνητικών σήματα εξαιτίας της πολύ χαμηλής ισχύος λήψης (οπότε και θεωρείται ως θόρυβος). Επιπλέον σημειώνεται ότι η παράμετρος *AP Discovery repetition period* αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν επιτρέπεται η επανεκτέλεση της διαδικασίας AP Discovery, ακόμη κι αν η λαμβανόμενη ισχύς είναι μικρότερη από το κατώφλι των $P_{RX\_AP\_DISCOVERY\_THR}$ dBm.

4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Η αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας τις ρυθμίσεις των παραμέτρων που επηρεάζουν την επίδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 αλλά και τα χαρακτηριστικά της τοπολογίας του δικτύου. Ο Πίνακας 4 - 2 που ακολουθεί συνοψίζει τις παραμέτρους που μεταβάλλονταν κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων:

Πίνακας 4 - 2. Μεταβλητές παράμετροι κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων

Παράμετρος	Σενάριο	Περιγραφή
Handover Anticipation Power Threshold $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ (dBm)	I, II	Αντιστοιχεί στο κατώφλι στο οποίο εκδίδεται το trigger <i>Link Going Down</i> . Καθορίζει το χρονισμό της διαδικασίας σηματοδότησης του FMIPv6, εφόσον όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο πιο καθυστερημένα εκκινεί η διαδικασία σηματοδότησης από το FMIPv6. Αντίστοιχα αργότερα σκανδαλίζεται και η διαδικασία προώθησης κίνησης μέσω της διόδου <i>PAR_to_NAR_Tunnel</i> . Η τιμή του επίσης επηρεάζει και τον τρόπο λειτουργίας του FMIPv6 (predictive – reactive).
Handover Preparation Power Threshold $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ (dBm)	II	Αντιστοιχεί στο κατώφλι στο οποίο εκδίδεται το trigger <i>Link Quality Crosses Threshold</i> οπότε καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία εκκινεί η διαδικασία προετοιμασίας της διαπομπής (διαδικασία Proxy Router Discovery). Η τιμή του κατωφλίου επηρεάζει και το κατώφλι στο οποίο σκανδαλίζεται η εκτέλεση της διαδικασίας ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης και κατά συνέπεια την ακρίβεια των προβλέψεων που πραγματοποιεί ο αντίστοιχος μηχανισμός.
Inter-Access Network Wired Link Delay D_{WL} (sec)	I, II	Η παράμετρος αφορά την επιπρόσθετη καθυστέρηση που υφίστανται τα πακέτα που διαπερνούν τον κόμβο Inter-AN_Backbone. Κατά συνέπεια επηρεάζει το χρόνο που απαιτείται για τη διάδοση των μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ των δρομολογητών πρόσβασης που ανήκουν στις δύο αυτόνομες περιοχές δικτύου που έχουν θεωρηθεί στην

Παράμετρος	Σενάριο	Περιγραφή
		τοπολογία. Με τη μεταβολή της αποκαλύπτεται το πώς επηρεάζεται η επίδοση των πρωτοκόλλων FMIPv6 και HMIPv6 όταν η μεταβάλλεται η «απόσταση» του προηγούμενου από το νέο δίκτυο. Επίσης η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζει το χρόνο που απαιτείται ώστε τα ενυλακωμένα μέσω των διόδων πακέτα πολυεκπομπής, να φτάσουν στο νέο δίκτυο.
Access Router Buffer Size (πακέτα)	I	Η παράμετρος περιγράφει τον αριθμό των πακέτων που είναι δυνατό να αποθηκευθούν στον καταχωρητή προσωρινής αποθήκευσης του εκάστοτε δρομολογητή πρόσβασης, ώστε να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η απώλεια πακέτων όταν η συγκεκριμένη δυνατότητα είναι περιορισμένη.
Ταχύτητα κινητού τερματικού (m/sec)	II	Παρατηρήθηκε πως επηρεάζεται η επίδοση του συνολικού μηχανισμού όταν το κινητό ακολουθεί την ίδια διαδρομή με διαφορετικές ταχύτητες.
Πλήθος κινητών τερματικών που διαπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα	I	Με στόχο την παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο ο προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να υποστηρίξει ομαδικές διαπομπές, μεταβλήθηκε το πλήθος των κινητών τερματικών που συμμετέχουν στην ίδια σύνοδο πολυεκπομπής και διαπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα.

Η αξιολόγηση της επίδοσης των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που μελετούνται πραγματοποιήθηκε παρατηρώντας τη μεταβολή των δύο ακόλουθων μεγεθών:

- *Αριθμός Χαμένων Πακέτων* (εξαιτίας της εκτέλεσης της διαπομπής): Για τις περιπτώσεις διαπομπών που διερευνήθηκαν, η συνολική απώλεια πακέτων κίνησης πολυεκπομπής είναι συνάρτηση της διάρκειας εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης, της αποτελεσματικότητας στη λειτουργία του μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης πακέτων, του χρονικού διαστήματος που απαιτείται ώστε ο εκάστοτε νέος δρομολογητής πρόσβασης (NAR) να καταστεί μέλος του δένδρου διανομής, του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την μετάδοση των μηνυμάτων σηματοδοσίας (χρονισμός εκάστοτε πρωτοκόλλου) αλλά και του διαστήματος που απαιτείται ώστε τα προωθούμενα από τον κάθε μηχανισμό πακέτα να φτάσουν στο τερματικό. Δεδομένου ότι ο ρυθμός γέννησης πακέτων κίνησης πολυεκπομπής από την χρησιμοποιούμενη εφαρμογή είναι σταθερός, η έκφραση του πλήθους των χαμένων πακέτων αντιστοιχεί στο μέγεθος της διαταραχής που προκαλεί η εκτέλεση της διαπομπής στην ποιότητα της προσφερόμενης στο τερματικό υπηρεσίας. Ως εκ τούτου ο αριθμός των χαμένων πακέτων παρουσιάζει μία συνολική εικόνα για την ικανότητα του κάθε μηχανισμού να επιτύχει (α) εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών και (β) μείωση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο ο τερματικός κόμβος δεν είναι σε θέση να

επικοινωνεί με το δίκτυο. Σημειώνεται ότι στα αποτελέσματα που ακολουθούν, οι μετρήσεις απωλειών πακέτων έχουν γίνει στο στρώμα εφαρμογής και κατά συνέπεια αφορούν απώλεια πακέτων που μπορεί να προέρχεται από μη παράδοση του πακέτου, από καθυστερήσεις στην παράδοση (πακέτα που παραδίδονται με μεγάλη καθυστέρηση, π.χ. λόγω προώθησης από τις διόδους και προσωρινή αποθήκευσή τους στους κατάλληλους καταχωρητές, θεωρούνται εκπρόθεσμα και αγνοούνται). Στο ίδιο πλαίσιο θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέτρηση της απώλειας πακέτων περιλαμβάνει και τη συνεισφορά κατά την εκτέλεση του μηχανισμού ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης για την περίπτωση των βασισμένων στο πρωτόκολλο FMIPv6 μηχανισμών.

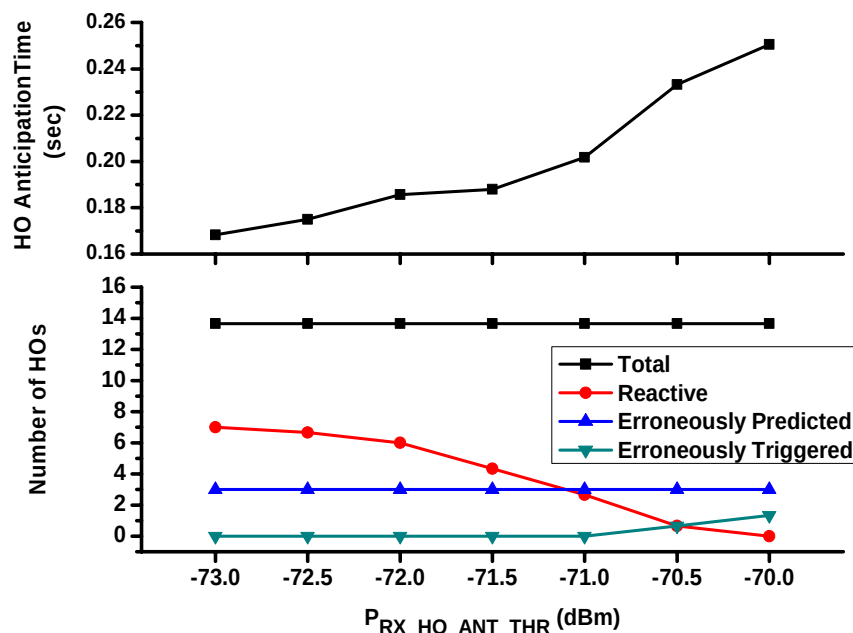
- *Κατανάλωση δικτυακών πόρων* (για την υποστήριξη της διαπομπής): Εκφράζεται από τη μέτρηση των πακέτων που προωθούνται διαμέσου των διόδων που χρησιμοποιούνται από τον καθένα μηχανισμό. Η συγκεκριμένη μέτρηση επηρεάζεται κατά βάση από το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την συμμετοχή του νέου δρομολογητή πρόσβασης στο δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής και από τη διαδικασία σηματοδοσίας που χαρακτηρίζει τον κάθε μηχανισμό. Η μέτρηση περιλαμβάνει το φορτίο για την προώθηση πακέτων που απορρίπτονται στο νέο δρομολογητή πρόσβασης λόγω υπερχείλισης του καταχωρητή προσωρινής αποθήκευσης, για την περίπτωση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Επίσης περιλαμβάνει και τον αριθμό των πακέτων που είναι ουσιαστικά διπλότυπα (ο προηγούμενος AR καθυστερεί να σταματήσει την προώθηση των πακέτων μόλις ο νέος καθίσταται μέλος του δένδρου διανομής κίνησης κατά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διάδοση των καταλλήλων μηνυμάτων σηματοδοσίας). Η κατανάλωση δικτυακών πόρων παρουσιάζεται και μέσα από τη μέτρηση των πακέτων που αποθηκεύονται προσωρινά στον καταχωρητή προσωρινής αποθήκευσης για την περίπτωση του μηχανισμού M-FMIPv6/FTB. Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζονται οι απαιτήσεις που θέτει ο συγκεκριμένος μηχανισμός στην τοπολογία που εξετάζεται.

4.4.1 Σενάριο I

4.4.1.1 Επίδραση από τη μεταβολή των ορίων σκανδαλισμού

Στην παρούσα ενότητα αξιολογείται η επίδοση κατά τη μεταβολή της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ που αντιστοιχεί στο όριο στο οποίο ξεκινά η διαδικασία *προετοιμασίας* της διαπομπής στρώματος δικτύου από το FMIPv6 (δηλ. έκδοση του trigger Link Going Down και αποστολή του μηνύματος FBU). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για το *Σενάριο I*, η τιμή της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ επηρεάζει και την τιμή της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$, δεδομένου ότι η τελευταία τίθεται πάντα 0.8 dB μεγαλύτερη της πρώτης. Η τιμή του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ ελέγχει το χρονισμό της διαδικασίας σηματοδοσίας του πρωτοκόλλου FMIPv6. Όσο πιο μικρή είναι η συγκεκριμένη τιμή, τόσο αργότερα σκανδαλίζεται η αποστολή του μηνύματος FBU, αντίστοιχα αργότερα ενημερώνεται ο εκάστοτε κόμβος NAR και επίσης σκανδαλίζεται η προώθηση μέσω της διόδου των πακέτων πολυεκπομπής από τον PAR. Ως εκ τούτου καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του πρωτοκόλλου FMIPv6 (predictive, reactive). Στην πράξη επηρεάζει τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος προσμονής της διαπομπής t_{ant} (handover anticipation time), δηλαδή του χρονικού

διαστήματος μεταξύ της αποστολής του μηνύματος FBU μέχρι την έναρξη της διαπομπής. Σημειώνεται ότι στην ιδανική περίπτωση το διάστημα t_{ant} μπορεί να είναι μηδενικό, αρκεί να παραδοθεί με επιτυχία το μήνυμα FBU στον PAR πριν την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Κατά την εκτέλεση του τυπικού σεναρίου τυχαίας κινητικότητας, η υλοποίηση του πρωτοκόλλου FMIPv6 είχε τη δυνατότητα διαχείρισης διαπομπών τριών τύπων (*προ-δραστική, μετα-δραστική και πλήρως μετα-δραστική*, βλέπε ενότητα 3.3). Επίσης θα πρέπει να τονιστεί ότι ιδιαίτερα για την περίπτωση των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών, η διαδικασία προώθησης κίνησης πολυεκπομπή ξεκινά αμέσως μετά την εκτέλεση της διαδικασίας *Ρύθμισης Διεύθυνσης* που ακολουθούσε την ολοκλήρωση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Το Σχήμα 4 - 6 που ακολουθεί συνοψίζει την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο μηχανισμό έκδοσης trigger, τη διαδικασία *ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης* και το μηχανισμό *εκτέλεσης διαπομπών στρώματος ζεύξης*, παρουσιάζοντας τον μέσο αριθμό διαφόρων τύπων διαπομπών με τη μεταβολή της παραμέτρου $P_{\text{RX\_HO\_ANT\_THR}}$. Έτσι παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 από τη διακύμανση του $P_{\text{RX\_HO\_ANT\_THR}}$.



Σχήμα 4 - 6. Μέσος αριθμός διαπομπών και χρονικό διάστημα αναμονής διαπομπής (για διαπομπές προ-δραστικού τύπου), συναρτήσει του κατωφλίου $P_{\text{RX\_HO\_ANT\_THR}}$

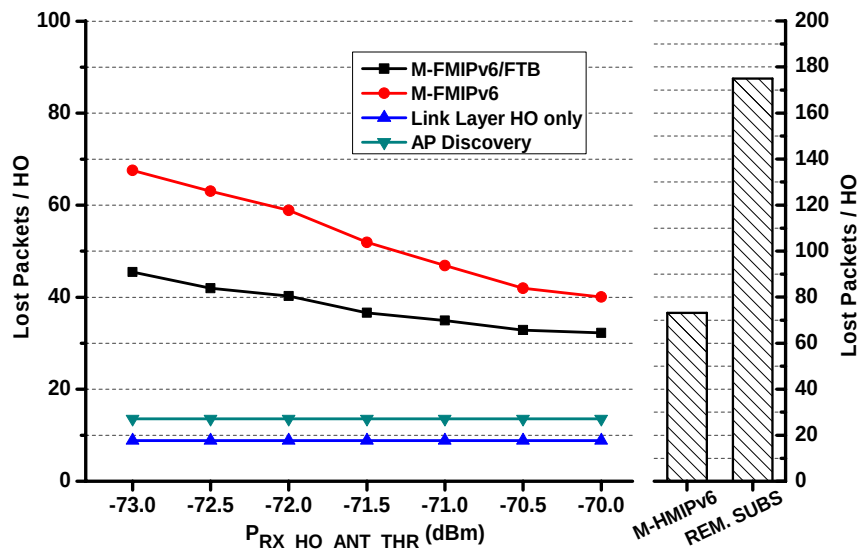
Πιο αναλυτικά, το κάτω διάγραμμα του σχήματος δείχνει τη μεταβολή του συνολικού αριθμού διαπομπών, του αριθμού μετα-δραστικών διαπομπών και του αριθμού των διαπομπών που πραγματοποιήθηκαν προς λανθασμένο δίκτυο (*erroneously predicted*, ο μηχανισμός πρόβλεψης επέστρεψε άλλο δίκτυο από αυτό προς το οποίο διαπέμφθηκε τελικά το κινητό), συναρτήσει της μεταβολή της παραμέτρου $P_{\text{RX\_HO\_ANT\_THR}}$. Ο αριθμός των διαπομπών με λανθασμένη πρόβλεψη αντιστοιχεί στον αριθμό των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών, ενώ η διαφορά του συνολικού αριθμού διαπομπών από το άθροισμα των μετα-δραστικών συν των πλήρως μετα-δραστικών αντιστοιχεί στις διαπομπές προ-δραστικού τύπου. Το πάνω διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή

του t_{ant} με το $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η αύξηση τις τιμές του κατωφλίου προκαλεί αύξηση του χρονικού διαστήματος αναμονής της διαπομπής όπως εξηγήθηκε νωρίτερα. Από τη συνδυασμένη παρατήρηση των δύο διαγραμμάτων του σχήματος εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μείωση του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του πλήθους των μετα-δραστικών διαπομπών. Αυτό είναι αναμενόμενο εφόσον η μείωση του ορίου σκανδαλισμού της διαδικασίας περιορίζει την πιθανότητα επιτυχούς αποστολής του μηνύματος FBU από το κινητό. Κατά συνέπεια αυξάνει τις πιθανότητες εκτέλεσης διαπομπών μετα-δραστικού τύπου. Τόσο ο συνολικός αριθμός διαπομπών όσο και ο αριθμός των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών παραμένει αμετάβλητος με τη μεταβολή του $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα του γεγονότος ότι αμφότερες οι τιμές εξαρτώνται από τη διαδρομή που ακολουθεί το κινητό και την υλοποίηση των βοηθητικών μηχανισμών (πρόβλεψης και εκτέλεσης διαπομπής) και μόνο, και όχι από το χρόνο t_{ant} ο οποίος επηρεάζει τη λειτουργία του FMIPv6. Υπενθυμίζεται ότι όλες οι μετρήσεις έχουν γίνει για τις ίδιες τυχαίες διαδρομές (βλέπε ενότητα 4.3.1) και κατά συνέπεια για αυτές τις διαδρομές η συμπεριφορά των βοηθητικών μηχανισμών ήταν συγκεκριμένη και αμετάβλητη με το $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$.

Το κάτω διάγραμμα του σχήματος παρουσιάζει επίσης τον αριθμό των διαπομπών που προβλέφθηκαν ότι θα εκτελεστούν αλλά τελικά δεν εκτελέστηκαν (*erroneously triggered*). Η καμπύλη παρουσιάζει το πλήθος των περιπτώσεων στις οποίες αν και οι συνθήκες για την προετοιμασία μίας διαπομπής στρώματος δικτύου ικανοποιούνταν, τελικά δεν ικανοποιήθηκαν οι συνθήκες εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Αιτίες ύπαρξης του συγκεκριμένου φαινομένου είναι δύο: πρώτον, το κινητό βρισκόταν εντός μίας περιοχής έντονης σκίασης αρχικά, οπότε και ξεκίνησε τη διαδικασία προετοιμασίας όπως έπρεπε, αλλά η διαπομπή δεν εκτελέστηκε διότι τελικά εξήλθε ταχύτατα και έγκαιρα από αυτήν. Δεύτερον, το κινητό άλλαξε κατεύθυνση απότομα μετά την εκτέλεση της διαδικασίας προετοιμασίας οπότε παρέμεινε στην περιοχή κάλυψης του τρέχοντος σημείου πρόσβασης. Το διάγραμμα δείχνει ότι ο αριθμός των *erroneously triggered* διαπομπών, ακολουθεί την αύξηση του $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ από κάποιο σημείο και μετά. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση του συγκεκριμένου κατωφλίου σκανδαλίζει πιο γρήγορα τη διαδικασία προετοιμασίας. Με άλλα λόγια αυξάνει την πιθανότητα ύπαρξης των παραπάνω γενεσιουργών αιτιών του φαινομένου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων σύμφωνα με το *Σενάριο I*. Το Σχήμα 4 - 7 παρουσιάζει το μέσο πλήθος χαμένων πακέτων, ανά διαπομπή ενός τερματικού, όταν χρησιμοποιείται κάποιο από τα πρωτόκολλα M-FMIPv6/FTB, M-FMIPv6, M-HMIPv6 ή απλές *Απομακρυσμένες Συμμετοχές*. Το διάγραμμα στα αριστερά παρουσιάζει τη μεταβολή του πλήθους των χαμένων πακέτων για τους μηχανισμούς που βασίζονται στο πρωτόκολλο FMIPv6, όταν μεταβάλλεται το κατώφλι $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Επιπρόσθετα στο διάγραμμα απεικονίζεται και η απώλεια πακέτων που οφείλεται στην εκτέλεση των βοηθητικών μηχανισμών *ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης* και *εκτέλεσης διαπομπής* στρώματος ζεύξης. Αντίστοιχα το ραβδόγραμμα στα δεξιά παρουσιάζει την επίδοση των μηχανισμών M-HMIPv6 και *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Στο Σχήμα 4 - 8 που ακολουθεί, παρουσιάζεται (πάνω διάγραμμα) το μέσο πλήθος των προωθούμενων πακέτων, ανά

διαπομπή του κινητού, για τους μηχανισμούς M-FMIPv6/FTP, M-FMIPv6 και M-HMIPv6. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το μέσο πλήθος πακέτων, που αποθηκεύονται (προσωρινά) κατά τη διάρκεια μίας διαπομπής στους AR όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός M-FMIPv6/FTB.



Σχήμα 4 - 7. Μέσος αριθμός χαμένων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει του κατωφλίου

$P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$

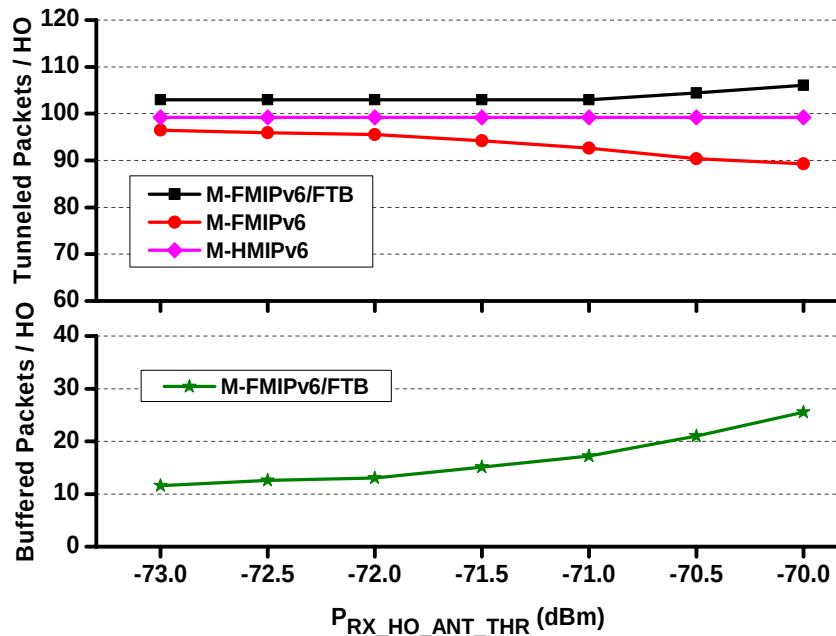
Το πλέον προφανές συμπέρασμα που προκύπτει από τις καμπύλες που παρουσιάζονται στα παραπάνω διαγράμματα, είναι ότι το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB εμφανίζει καλύτερη συγκριτικά επίδοση σε σχέση με τους άλλους μηχανισμούς, εξαιτίας του ότι κατά τη λειτουργία του χρησιμοποιούνται σχετικά περισσότεροι πόροι από την πλευρά του δικτύου για την υποστήριξη της διαπομπής (προώθηση πακέτων μέσω διόδων και προσωρινή αποθήκευσή τους όσο το τερματικό δεν είναι ακόμη συνδεδεμένο στο νέο δίκτυο). Η υπεροχή όμως στην επίδοση, δεν προέρχεται αποκλειστικά από την αύξηση στην κατανάλωση πόρων αλλά επίσης και από τον καλύτερο συγχρονισμό των διαδικασιών σηματοδότησης. Για παράδειγμα στις διαπομπές μετα-δραστικού ή πλήρως μετα-δραστικού τύπου, το M-FMIPv6/FTB ξεκινά την προώθηση πακέτων νωρίτερα, μειώνοντας περισσότερο το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το κινητό δεν λαμβάνει πακέτα κίνησης. Υπενθυμίζεται ότι ο μηχανισμός που προτείνεται από το M-FMIPv6 απαιτεί έναν επιπλέον χρόνο πλήρους διαδρομής (Round Trip Time, RTT) για τον σκανδαλισμό της προώθησης των πακέτων (βλέπε ενότητα 2.4.2.2.1). Επιπρόσθετα κατά την εκτέλεση διαπομπών προ-δραστικού τύπου, όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB απώλεια πακέτων λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του μηχανισμού ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης, στη φάση σάρωσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (κατά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης δε χάνονται πακέτα λόγω αποθήκευσής τους στον εκάστοτε NAR). Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το M-FMIPv6, η απώλεια πακέτων λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των διαδικασιών AP Discovery και διαπομπής στρώματος ζεύξης. Τέλος από τη συνδυασμένη παρατήρηση του αριστερού διαγράμματος στο Σχήμα 4 - 7 και των διαγραμμάτων στο Σχήμα 4 - 6, εξάγεται το συμπέρασμα το πρωτόκολλο FMIPv6 εμφανίζει

καλύτερη επίδοση όταν εκτελούνται διαπομπές προ-δραστικού τύπου, παρά στην περίπτωση των μετα-δραστικών.

Συγκρίνοντας τις απόλυτες τιμές των αποτελεσμάτων του M-HMIPv6, με αυτές των μηχανισμών που βασίζονται στο FMIPv6, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τελευταίοι επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη λειτουργία της διαδικασίας *Ανακάλυψης Νέου Σημείου Πρόσβασης* εφόσον ένα μεγάλο ποσοστό της απώλειας πακέτων προκαλείται από την αδυναμία επικοινωνίας του τερματικού στη φάση αυτή. Αντίθετα, η επίδοση του M-HMIPv6 επηρεάζεται από τη λειτουργία των βασικών μηχανισμών του IPv6, *Επισήμανση Μετακίνησης*, *Ανακάλυψης Δρομολογητή* και *Ρύθμισης Διεύθυνσης*. Η επίδοση του M-HMIPv6 είναι παρόμοια με αυτή του μηχανισμού M-FMIPv6 κατά την πλήρως μετα-δραστική λειτουργία του. Για τους βασισμένους στο FMIPv6 μηχανισμούς, επιπλέον σημαντικός λόγος αύξησης της απώλειας είναι και η εκτέλεση διαπομπών πλήρως μετα-δραστικού τύπου. Ως εκ τούτου, η προηγμένη λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 και των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής που εξετάζονται, μπορεί να επιτευχθεί εφόσον οι βοηθητικοί μηχανισμοί από τους οποίους συλλέγεται η απαραίτητη πληροφορία προετοιμασίας της διαπομπής, λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επιβαρύνουν τη συνολική επίδοση. Η λειτουργία του στρώματος MIIH, μπορεί να δώσει λύση σε αυτό το σημείο. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του στρώματος MIIH [17], η πλήρης λειτουργία του MIIH θεωρείται κατανεμημένη μεταξύ του κινητού και του σημείου πρόσβασης. Η συγκεκριμένη δυνατότητα μπορεί να εκμηδενίσει την επίδραση των βοηθητικών μηχανισμών. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μηχανισμοί πρόβλεψης και διαχείρισης διαπομπών στρώματος ζεύξης οι οποίοι εκτελούνται κατανεμημένα μεταξύ του κινητού και του σημείου πρόσβασης. Αν και η εκτέλεσή τους είναι περισσότερο απαιτητική σε σηματοδοσία και πιθανότατα λιγότερο ταχεία (σε σχέση με τον μηχανισμό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του προσομοιωτή), η επίδρασή τους στη συνολική επίδοση μπορεί να είναι ελάχιστη και κατά συνέπεια η χρήση τους συνίσταται σε σχέση με τον απλοϊκό μηχανισμό που χρησιμοποιήθηκε.

Σε ότι αφορά την κατανάλωση πόρων για την υποστήριξη της διαπομπής, από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 - 8, παρατηρείται ότι τόσο για το μηχανισμό M-FMIPv6/FTB όσο και τον M-HMIPv6, η προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής μέσω των αντίστοιχων διόδων, πραγματοποιείται για χρονικό διάστημα ανάλογο του διαστήματος που απαιτείται για τη συμμετοχή του νέου δικτύου στο δένδρο διανομής της κίνησης πολυεκπομπής. Ιδιαίτερα για τον πρώτο, η προώθηση πραγματοποιείται ανεξάρτητα από τον τύπο της εκτελούμενης διαπομπής (predictive, reactive, completely reactive) ή τη διάρκεια της περιόδου αναμονής της διαπομπής για τις predictive, ή τη διάρκεια της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Επίσης φαίνεται ότι το ποσό των πόρων που καταναλώνονται για την προώθηση κίνησης ανά διαπομπή είναι αυξημένο κατά ένα επιπλέον ποσό. Το ποσό αυτό αφορά τα πακέτα που προωθούνται κατά την εκτέλεση διαπομπών που προβλέφθηκαν λανθασμένα και των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών. Υπενθυμίζεται ότι το M-FMIPv6/FTB επιχειρεί προώθηση πακέτων πριν την εκτέλεση της διαπομπής. Σε περίπτωση λάθους (μη επιβεβαίωσης μέσω του μηνύματος FNA στο NAR) σταματά την προώθηση μόλις εκπνεύσει ένας χρονομετρητής (βλέπε Πίνακας 4 - 1, NAR HI/FNA timer – 0,5 sec). Από την άλλη το πρωτόκολλο M-FMIPv6 πραγματοποιεί προώθηση κίνησης μόνο

εφόσον το τερματικό έχει προσδεθεί στο νέο δίκτυο, πράγμα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να προωθούνται πακέτα μόνο στις περιπτώσεις που διαπομπή έχει εκτελεστεί επιτυχώς. Αυτή η επιλογή μειώνει το ποσό των καταναλισκόμενων πόρων στην περίπτωση των προ-δραστικών διαπομπών. Εντούτοις αυξάνει το πλήθος των πακέτων που χάνονται δεδομένου ότι η προώθησή τους από το προηγούμενο δίκτυο καθυστερεί να ξεκινήσει.



Σχήμα 4 - 8. Μέσος αριθμός προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή και μέσος αριθμός προσωρινά αποθηκευόμενων πακέτων στους AR της τοπολογίας, συνάρτησι του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$

Από το κάτω διάγραμμα του σχήματος 4 – 8 φαίνεται ότι για τον προτεινόμενο μηχανισμό, το πλήθος των προσωρινά αποθηκευόμενων πακέτων στις ουρές των δρομολογητών πρόσβασης κατά την περίοδο εκτέλεσης μίας διαπομπής στρώματος δικτύου, ακολουθεί τη μεταβολή του χρόνου αναμονής της διαπομπής t_{ant} . Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη εφόσον όσο νωρίτερα σκανδαλίζεται η διαδικασία από το FMIPv6, τόσο νωρίτερα ξεκινά η προώθηση των πακέτων. Τα πακέτα που καταφθάνουν στον εκάστοτε NAR αποθηκεύονται προσωρινά, ώστε να αποσταλούν στο τερματικό μετά την πρόσδεσή του. Κατά συνέπεια είναι προφανής η ανάγκη για βέλτιστη ρύθμιση των βοηθητικών διαδικασιών του FMIPv6 ώστε από τη μία να αυξάνεται η πιθανότητα εκτέλεσης διαπομπών προ-δραστικού τύπου, αλλά από την άλλη η διαδικασία να μην ξεκινά πάρα πολύ νωρίς ώστε η κατανάλωση πόρων λόγω της αποθήκευσης πακέτων να διατηρείται σε λογικά πλαίσια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ίδια παρατήρηση αφορά και την απόδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 όταν αυτό χρησιμοποιείται για την υποστήριξη unicast διαπομπών. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την προδιαγραφή του FMIPv6 ο εκάστοτε PAR ξεκινά την προώθηση των πακέτων προς τη nCoA αμέσως μετά την παράδοση του μηνύματος HAck.

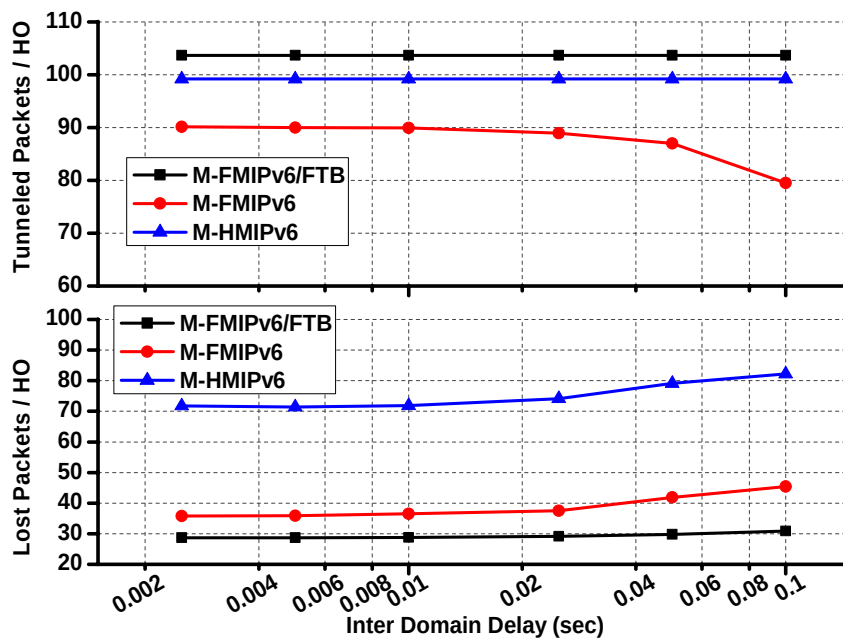
Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα, είναι προφανές ότι το M-FMIPv6/FTB δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει εκτέλεση διαπομπών πολυεκπομπής με μηδενική απώλεια πακέτων, ανεξάρτητα από τη ρύθμιση του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Από την άλλη όμως παρέχει τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης της απώλειας, ιδίως όταν εκτελούνται διαπομπές προ-δραστικού τύπου. Η ελάχιστη τιμή, στην περίπτωση που η πρόβλεψη είναι έγκυρη, καθορίζεται από τη λειτουργία του βοηθητικού μηχανισμού *ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης*. Η βελτιστοποίηση στην επίδοση έρχεται σαν αποτέλεσμα της αυξημένης αλλά συνάμα και καλύτερης διαχείρισης της κατανάλωσης δικτυακών πόρων. Άλλωστε δεν είναι εφικτή η επίτευξη του εκμηδενισμού των απωλειών λόγω εκτέλεσης της διαπομπής, χωρίς την κατανάλωση δικτυακών πόρων για την υποστήριξή της (προώθηση και αποθήκευση πακέτων).

4.4.1.2 Επίδραση της απόστασης μεταξύ των περιοχών δικτύων πρόσβασης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης προσομοιώσεων του *Σεναρίου I* και αξιολογείται η επίδοση των μηχανισμών κατά τη μεταβολή της καθυστέρησης που εισάγεται στη μετάδοση πακέτων στρώματος IP όταν αυτά περνούν από τον κόμβο *Inter-Access Network Backbone* της τοπολογίας. Με αυτόν τον τρόπο διερευνάται η επίδοση των υπό μελέτη μηχανισμών όταν η απόσταση του παλιού από το νέο δίκτυο είναι σχετικά μικρή ή μεγάλη. Στην πράξη η συγκεκριμένη καθυστέρηση μοντελοποιεί την εκτέλεση ενδο-τομεακών ή δια-τομεακών διαπομπών. Η επίδραση της συγκεκριμένης καθυστέρησης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το συγχρονισμό των κόμβων που μετέχουν στη διαδικασία υποστήριξης διαπομπών. Αυτό ισχύει τόσο για τους μηχανισμούς που στηρίζονται στο πρωτόκολλο FMIPv6, όσο και του M-HMIPv6, εφόσον καθυστερεί περισσότερο η λήψη των κρίσιμων μηνυμάτων σηματοδότησης. Επιπρόσθετα η συγκεκριμένη καθυστέρηση επηρεάζει και το χρόνο που χρειάζεται για την λήψη των πακέτων κίνησης που προωθούνται μέσω των διόδων του κάθε μηχανισμού.

Το κάτω διαγράμματα στο Σχήμα 4 - 9 παρουσιάζει το μέσο αριθμό χαμένων πακέτων ανά διαπομπή, όταν μεταβάλλεται η τιμή της επιπρόσθετης καθυστέρησης D_{WL} , που υφίστανται τα πακέτα που διαπερνούν τον κόμβο *Inter-AN_Backbone*. Το διάγραμμα δεν περιέχει την επίδοση του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*, εφόσον η μεταβολή της καθυστέρησης D_{WL} δεν επηρεάζει την επίδοσή του (βλέπε Σχήμα 4 - 7 για αναφορά). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 - 9, για χαμηλές τιμές της καθυστέρησης D_{WL} (0.002 sec - .. - 0.01 sec), οι οποίες στην πράξη αντιστοιχούν σε περιπτώσεις εκτέλεσης ενδο-τομεακών διαπομπών (δηλ. στην τοπολογία αρκεί να θεωρήσουμε ότι όλοι οι ARs ελέγχονται από τον ίδιο πάροχο), όλοι οι μηχανισμοί παρουσιάζουν σταθερά την καλύτερη επίδοσή τους (ελάχιστη απώλεια πακέτων ανά διαπομπή). Με άλλα λόγια το φαινόμενο της μικρής μεταβολής της D_{WL} δεν είναι τόσο έντονο, δηλαδή δεν επηρεάζει σημαντικά την επίδοση των μηχανισμών. Η αύξηση της τιμής της D_{WL} σε τιμές μεγαλύτερες των 0.02 sec, προκαλεί διαφορετική μεταβολή στην επίδοση του κάθε μηχανισμού. Στην περίπτωση του M-FMIPv6/FTB προκαλείται μικρή αύξηση του μέσου πλήθους απολεσθέντων πακέτων (σε σχέση με την αύξηση που παρατηρείται για τους μηχανισμούς των M-FMIPv6 και M-HMIPv6). Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι χρησιμοποιούνται περισσότερο αποδοτικά οι μηχανισμοί προώθησης κίνησης και προσωρινής αποθήκευσης πακέτων πριν την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Για την καλύτερη ερμηνεία των

αποτελεσμάτων, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τις επιλεγμένες ρυθμίσεις του πρωτοκόλλου FMIPv6 στο *Σενάριο Ι* (βλέπε Πίνακας 4 - 1), ο χρόνος κατά τον οποίο το τερματικό δεν είναι σε θέση να λαμβάνει πακέτα κίνησης είναι ελάχιστος (η πλειονότητα των διαπομπών είναι προ-δραστικού τύπου). Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα στην περίπτωση αυτή η απώλεια πακέτων προκαλείται κυρίως από την εκτέλεση της διαδικασίας *ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης* και από την *εκτέλεση πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών*. Οι συγκεκριμένες ρυθμίσεις έχουν σαν αποτέλεσμα ο χρόνος αναμονής της διαπομπής t_{ant} να είναι επαρκής για την εκτέλεση προ-δραστικών διαπομπών, πράγμα πολύ σημαντικό εφόσον τα μηνύματα σηματοδοσίας υφίστανται την επιπρόσθετη καθυστέρηση D_{WL} .

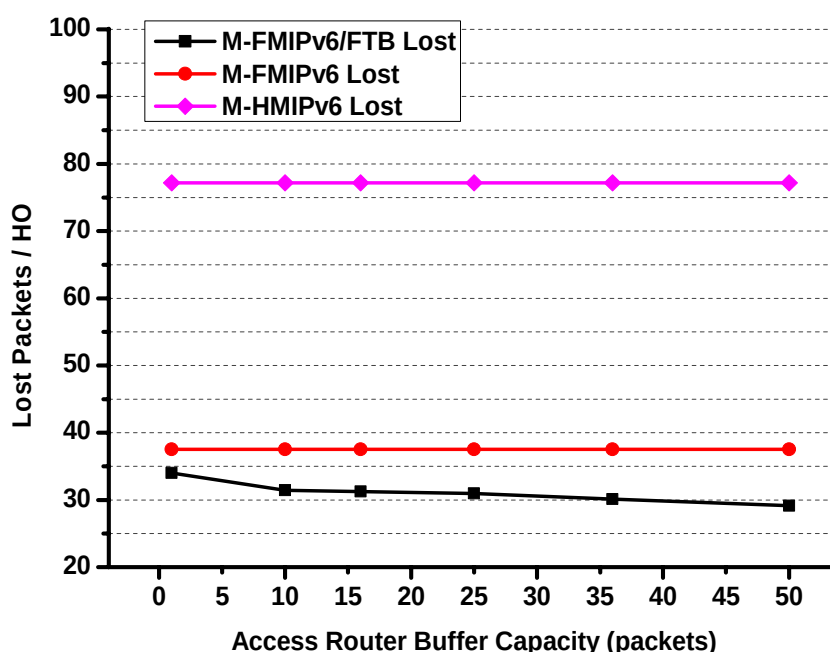


Σχήμα 4 - 9. Μέσος αριθμός απολεσθέντων και προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της καθυστέρησης D_{WL}

Από την άλλη, η επίδοση των μηχανισμών M-FMIPv6 και M-HMIPv6 είναι συγκριτικά χειρότερη, εξαιτίας του γεγονότος ότι, κατά την εκτέλεση δια-τομεακών διαπομπών, τόσο τα μηνύματα σηματοδοσίας, που σκανδαλίζουν την έναρξη της διαδικασίας προώθησης κίνησης, όσο και τα προωθούμενα πακέτα κίνησης, καθυστερούν περισσότερο κατά τη διέλευσή τους από τον κόμβο *Inter_AN_Backbone*. Αντίθετα στην περίπτωση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB η επίδραση της συγκεκριμένης καθυστέρησης είναι μικρότερη, εφόσον κατά την εκτέλεση των προ-δραστικών διαπομπών η διαδικασία προώθησης έχει σκανδαλιστεί νωρίτερα από την πρόσδεση του τερματικού στο νέο δίκτυο. Σαν αποτέλεσμα τα πακέτα κίνησης είναι διαθέσιμα μόλις το κινητό συνδέεται σε αυτό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη χρήση μίας περισσότερο συντηρητικής ρύθμισης της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ (-72 dBm), κατά την οποία η πλειονότητα των διαπομπών ήταν μετα-δραστικού τύπου, η επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού χειροτέρευσε. Εντούτοις η επίδοση ήταν συνεχώς καλύτερη από τους άλλους μηχανισμούς εξαιτίας του ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις η προώθηση ξεκινούσε πιο νωρίς.

Το πάνω διάγραμμα στο Σχήμα 4 - 9 παρουσιάζει το μέσο αριθμό πακέτων που προωθούνται μέσω των διόδων που χρησιμοποιούνται σε κάθε μηχανισμό ανά διαπομπή. Από το διάγραμμα επιβεβαιώνεται ότι για τους μηχανισμούς M-FMIPv6/FTB και M-HMIPv6 η διαδικασία προώθησης είναι ανεξάρτητη από την τιμή της καθυστέρησης D_{WL} , αλλά εξαρτάται από το χρονικό διάστημα D_{REM_SUBSCR} , που απαιτείται ώστε να καταστεί ο εκάστοτε κόμβος NAR ή ο κόμβος M-MAP αντίστοιχα, μέλος του δένδρου διανομής κίνησης πολυεκπομπής. Αυτό ισχύει διότι τα μηνύματα σκανδαλισμού της έναρξης ή της λήξης της διαδικασίας καθυστερούν κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Η διάρκεια του διαστήματος προώθησης εξαρτάται από την παράμετρο D_{REM_SUBSCR} όπως εξηγήθηκε. Από την άλλη, για το πρωτόκολλο M-FMIPv6, η αύξηση της D_{WL} προκαλεί μείωση του πλήθους των πακέτων που προωθούνται τελικά. Η εξήγηση είναι ότι κατά τη χρήση του πρωτοκόλλου M-FMIPv6, η διάρκεια της διαδικασίας προώθησης μειώνεται λόγω της καθυστέρησης της μετάδοσης των μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ των δύο περιοχών δικτύου. Αποτέλεσμα εντούτοις της συγκεκριμένης μείωσης είναι η αύξηση του πλήθους των χαμένων πακέτων λόγω του κακού συγχρονισμού των επιμέρους διαδικασιών όπως έχει αναλυθεί.

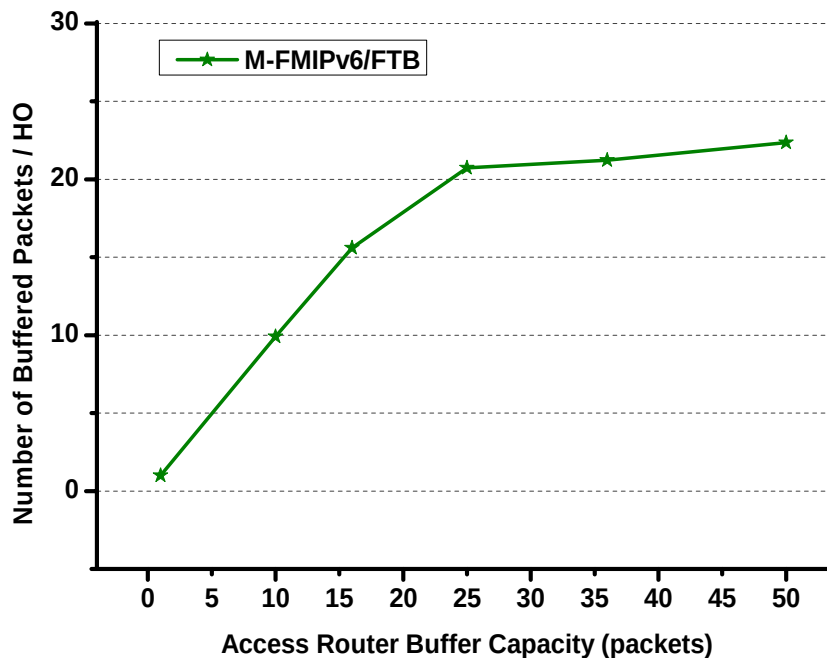
4.4.1.3 Επίδραση της χωρητικότητας των προσωρινών καταχωρητών στους δρομολογητές πρόσβασης



Σχήμα 4 - 10. Μέσος αριθμός απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της χωρητικότητας των καταχωρητών προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στους AR

Το Σχήμα 4 - 10 παρουσιάζει την επίδραση της χωρητικότητας των καταχωρητών προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στους κόμβους AR της τοπολογίας, στο μέσο πλήθος χαμένων πακέτων ανά διαπομπή, κατά την προσομοίωση του *Σεναρίου 1*. Για τους μηχανισμούς M-FMIPv6 και M-HMIPv6 δεν πραγματοποιείται χρήση του μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης. Κατά συνέπεια η παρουσιαζόμενη τιμή της απώλειας είναι σταθερή. Οι τιμές χαμένων πακέτων παρουσιάζονται

για αναφορά σε σχέση με την επίδοση του M-FMIPv6/FTB. Στο Σχήμα 4 - 11 απεικονίζεται το μέσο πλήθος των πακέτων που αποθηκεύονται προσωρινά στους καταχωρητές συναρτήσει της χωρητικότητάς τους.



Σχήμα 4 - 11. Μέσος αριθμός προσωρινά αποθηκευμένων πακέτων στους καταχωρητές προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στους AR, συναρτήσει της χωρητικότητας των καταχωρητών

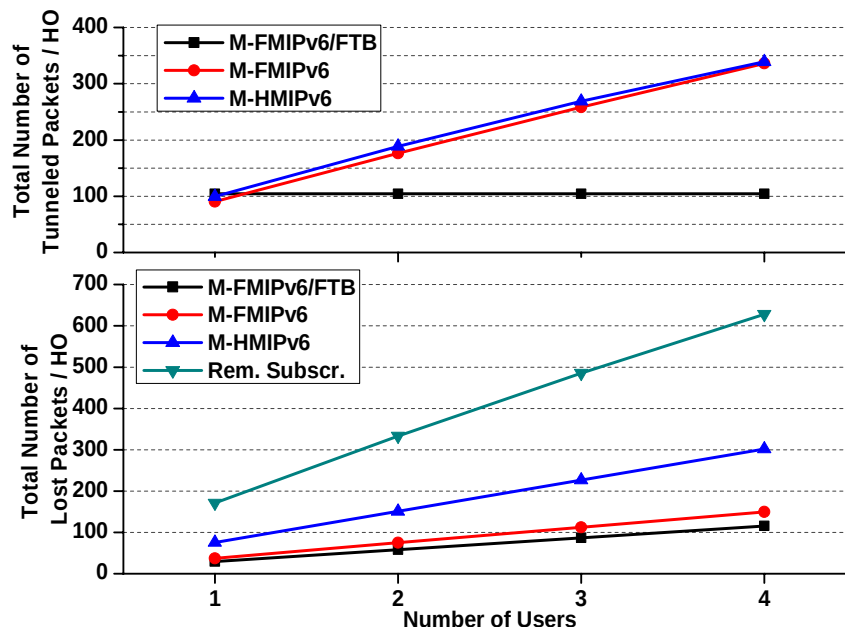
Από το πρώτο σχήμα καθίσταται σαφές ότι η αύξηση της χωρητικότητας των καταχωρητών έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου αριθμού χαμένων πακέτων ανά διαπομπή. Η βασική αιτία αποκαλύπτεται από το δεύτερο σχήμα και δεν είναι άλλη από το γεγονός ότι η αύξηση της χωρητικότητας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των πακέτων που απορρίπτονται λόγω υπερχειλίσης των καταχωρητών. Για τις χρησιμοποιούμενες ρυθμίσεις του *Σεναρίου 1*, και κατά βάση το ρυθμό γέννησης πακέτων στο στρώμα εφαρμογής, υπερχειλίση λαμβάνει χώρα σε όλες τις περιπτώσεις όπου η χωρητικότητα είναι μικρότερη των 16 πακέτων. Στο Σχήμα 4 - 10 φαίνεται ότι ο μηχανισμός M-FMIPv6/FTB είχε καλύτερη επίδοση από τους άλλους δύο ακόμη και στην περίπτωση που η χωρητικότητα των AR είναι ελάχιστη (1 πακέτο). Σε αυτήν την περίπτωση όλα τα πακέτα που προωθούνται στον εκάστοτε NAR πριν τη διαπομπή από τον M-FMIPv6/FTB, απορρίπτονται. Σε αυτήν την περίπτωση, το M-FMIPv6/FTB υπερέχει των άλλων δύο εξαιτίας δύο βασικών σχεδιαστικών επιλογών: πρώτον διότι η προώθηση των πακέτων εκτελείται προ-δραστικά της διαπομπής, σε αντίθεση με τους μηχανισμούς M-FMIPv6 και M-HMIPv6 που ακολουθούν μετα-δραστική προσέγγιση (η προώθηση σκανδαλίζεται και εκτελείται καθυστερημένα, μετά τη διαπομπή), και δεύτερον διότι στην μετα-δραστικές διαπομπές η διαδικασία σηματοδότησης έχει σαν αποτέλεσμα να σκανδαλίζεται νωρίτερα η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής.

4.4.1.4 Επίδραση του αριθμού τερματικών

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η δυνατότητα του καθενός μηχανισμού να υποστηρίξει ταυτόχρονες διαπομπές τερματικών κόμβων που έχουν εγκατεστημένη την ίδια σύνοδο πολυεκπομπής. Για αυτό το λόγο τροποποιήθηκε ελαφρώς το *Σενάριο I*, ώστε να συμπεριλάβει την κινητικότητα μέχρι και τεσσάρων κινητών τερματικών. Τα τερματικά τοποθετήθηκαν στις γωνίες ενός τετραγώνου το οποίο είχε ακμή ίση με 1 m. Το αποτέλεσμα του σεναρίου μπορεί να παρομοιαστεί με την κινητικότητα ενός έως τεσσάρων ατόμων, τα οποία βρίσκονται εντός ενός κινούμενου οχήματος. Το όχημα κινείται στην ορισμένη από το *Σενάριο I* περιοχή κινητικότητας, σύμφωνα με το μοντέλο κινητικότητας Random Waypoint, όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.3.1. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτέλεση των ομαδικών διαπομπών αφορά κυρίως περιπτώσεις κινητικότητας πολλών τερματικών σε υψηλές ταχύτητες (πχ. εντός κινούμενων οχημάτων όπως αεροπλάνα, τραίνα, πλοία, αυτοκίνητα σε εθνικό οδικό δίκτυο) ή ακόμη και την περίπτωση κινητών δικτύων. Επιπρόσθετα σενάρια ομαδικής κινητικότητας είναι περισσότερο πιθανά σε μητροπολιτικά δίκτυα ευρείας κλίμακας (Wide Area Networks, WAN), όπως το UMTS ή τα δορυφορικά δίκτυα. Σε αυτά τα δίκτυα η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής είναι ενδεδειγμένη εξαιτίας όχι μόνο της ταχύτητας των κινητών αλλά και του ότι η πυκνότητα χρηστών ανά κυψέλη/περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης/δορυφόρου είναι μεγάλη. Κατά συνέπεια το τροποποιημένο σενάριο που παρουσιάζεται είναι μάλλον μη ρεαλιστικό για το περιβάλλον ενός εσωτερικού χώρου και το σύστημα WLAN που έχει θεωρηθεί στο *Σενάριο I*. Εντούτοις, η χρήση του πραγματοποιείται με στόχο την παρουσίαση των δυνατοτήτων του προτεινόμενου από τη διατριβή πρωτοκόλλου, να υποστηρίξει διαπομπές *ανά ροή* κίνησης, σε αντίθεση με τους μηχανισμούς M-FMIPv6 και M-HMIPv6, που (ακολουθώντας τη σχεδίαση των βασικών unicast προτύπων τους) υποστηρίζουν *ανά χρήστη* διαπομπές.

Το Σχήμα 4 - 12 παρουσιάζει το μέσο πλήθος των πακέτων που χάνονται ανά διαπομπή καθενός κινητού τερματικού κόμβου, και το μέσο πλήθος των πακέτων που προωθούνται από κάθε μηχανισμό ανά διαπομπή, όταν εκτελείται το τροποποιημένο *Σενάριο I*, καθώς αυξάνεται το πλήθος των τερματικών που συμμετέχουν στη διαπεμπόμενη ομάδα τερματικών. Όπως φαίνεται στο σχήμα, για το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB, η αύξηση του μεγέθους της ομάδας κινητών έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου πλήθους χαμένων πακέτων ανά διαπομπή. Η συγκεκριμένη αύξηση διαμορφώνεται ως εξής: για την διαπομπές προ-δραστικού τύπου η απώλεια καθενός χρήστη προέρχεται από την εκτέλεση του μηχανισμού ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης. Η απώλεια εκμηδενίζεται κατά την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης λόγω της λειτουργίας του μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης που λειτουργεί ανεξάρτητα για κάθε τερματικό. Για τις διαπομπές μετα-δραστικού τύπου, η απώλεια προέρχεται από την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης κάθε τερματικού και το χρόνο που απαιτείται για τον σκανδαλισμό της διαδικασίας προώθησης κίνησης μέσω της διόδου. Αυτό όμως ισχύει μόνο για το πρώτο τερματικό που εκτελεί τη διαπομπή. Υπενθυμίζεται ότι με βάση τη σχεδίαση του μηχανισμού M-FMIPv6/FTB, προώθηση της κίνησης μέσω της διόδου *PAR_to_NAR_Tunnel*, δεν πραγματοποιείται εφόσον ο NAR καταλήξει στο συμπέρασμα ότι λαμβάνει ήδη τη ροή κίνησης πολυεκπομπής μέσω μίας διόδου ή είναι ο ίδιος μέλος του δένδρου διανομής. Στην

προκειμένη περίπτωση ισχύει το πρώτο. Ως εκ τούτου το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB βελτιώνει περαιτέρω την επίδοση των μετα-δραστικών διαπομπών για τον δεύτερο και τους λοιπούς χρήστες. Ένα εξίσου σημαντικό στοιχείο είναι το ότι η παραπάνω δυνατότητα πραγματοποιείται χωρίς να καταστρατηγούνται οι αρχές της αρχιτεκτονικής IP Multicast, εφόσον η προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής στο ασύρματο δίκτυο του NAR στο οποίο προσδένονται τα τερματικά, πραγματοποιείται μία και μοναδική φορά στο μοιραζόμενο μέσο. Από την άλλη στην περίπτωση των πρωτοκόλλων M-FMIPv6 και M-HMIPv6 η κατάσταση με την απώλεια πακέτων δεν έχει κάποια διαφοροποίηση με αυτά που έχουν περιγραφεί νωρίτερα. Κάθε τερματικό υφίσταται την ίδια απώλεια πακέτων λόγω διαπομπής, δεδομένου ότι κανένας από τους δύο μηχανισμούς δεν εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η προωθούμενη κίνηση είναι κίνηση πολυεκπομπής. Η χειρότερη επίδοση επιβεβαιώνεται και από την κλίση των καμπύλων που εμφανίζει κάθε μηχανισμός στο Σχήμα 4 - 12 (κάτω διάγραμμα).



Σχήμα 4 - 12. Μέσος αριθμός απολεσθέντων και προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει του αριθμού τερματικών που εκτελούν σχεδόν ταυτόχρονη διαπομπή

Αναφορικά με την κατανάλωση δικτυακών πόρων για την υποστήριξη των διαπομπών συναρτήσει του αριθμού των ενεργών χρηστών στην ομάδα κινητικότητας, από το πάνω διάγραμμα στο Σχήμα 4 - 12 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για τους επόμενους του δεύτερου στη σειρά χρήστες, ο κόμβος NAR καθίσταται μέλος του δένδρου διανομής συντομότερα (η αίτηση συμμετοχής πραγματοποιείται μόνο μία φορά για λογαριασμό του πρώτου χρήστη). Αυτό σημαίνει ότι το μέσο πλήθος πακέτων που προωθείται για τον καθένα είναι μικρότερο. Εντούτοις η διαδικασία προώθησης κίνησης προκαλεί τη δημιουργία αρκετά σημαντικών ριπών κίνησης (traffic burst) κατά τη χρήση των μηχανισμών M-FMIPv6 και M-HMIPv6, για όλη τη διάρκεια του διαστήματος που απαιτείται για τη συμμετοχή του νέου δικτύου στο δένδρο διανομής κίνησης πολυεκπομπής. Η εμφάνιση των συγκεκριμένων ριπών κίνησης μπορεί να προκαλέσουν

αστάθεια στην υποστήριξη των διαπομπών των κινητών τερματικών αλλά του νέου δικτύου γενικότερα. Η εκτέλεση προσομοιώσεων (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται) με περισσότερους χρήστες και με μεγαλύτερου ρυθμού ροές έδειξαν ότι το συγκεκριμένο φαινόμενο αύξησε το μέσο πλήθος απολεσθέντων πακέτων εξαιτίας της απόρριψής τους στο στρώμα ζεύξης. Από την άλλη, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB διατηρεί το ποσό δικτυακών πόρων που καταναλώνονται για την υποστήριξη της ομαδικής διαπομπής στο ελάχιστο. Όπως προαναφέρθηκε αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η διαδικασία προώθησης ελέγχεται αποκλειστικά από τον πλέον κατάλληλο για αυτό το σκοπό κόμβο, δηλαδή το δρομολογητή πρόσβασης στο νέο δίκτυο.

4.4.2 Σενάριο II

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.3.2, το *Σενάριο II* χρησιμοποιήθηκε με στόχο τη μελέτη μερικών ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας αλλά και της επίδρασης που έχει η λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών *Ανακάλυψης Νέων Σημείων Πρόσβασης, Πρόβλεψης Διαπομπής* και *Εκτέλεσης Διαπομπής* στην συνολική επίδοση του καθενός. Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η επίδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 και των αντίστοιχων επεκτάσεών του που αφορούν στη διαχείριση διαπομπών πολυεκπομπής, M-FMIPv6/FTB και M-FMIPv6, που έχουν παρουσιαστεί. Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων σύμφωνα με το *Σενάριο II*, δεν έχει χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης πακέτων κατά τη λειτουργία του προτεινόμενου από τη διατριβή πρωτοκόλλου. Ως εκ τούτου στα επόμενα η κάθε αναφορά στο συγκεκριμένο μηχανισμό θα γίνεται με το ακρωνύμιο M-FMIPv6/FT (M-FMIPv6 with Flow Tunneling).

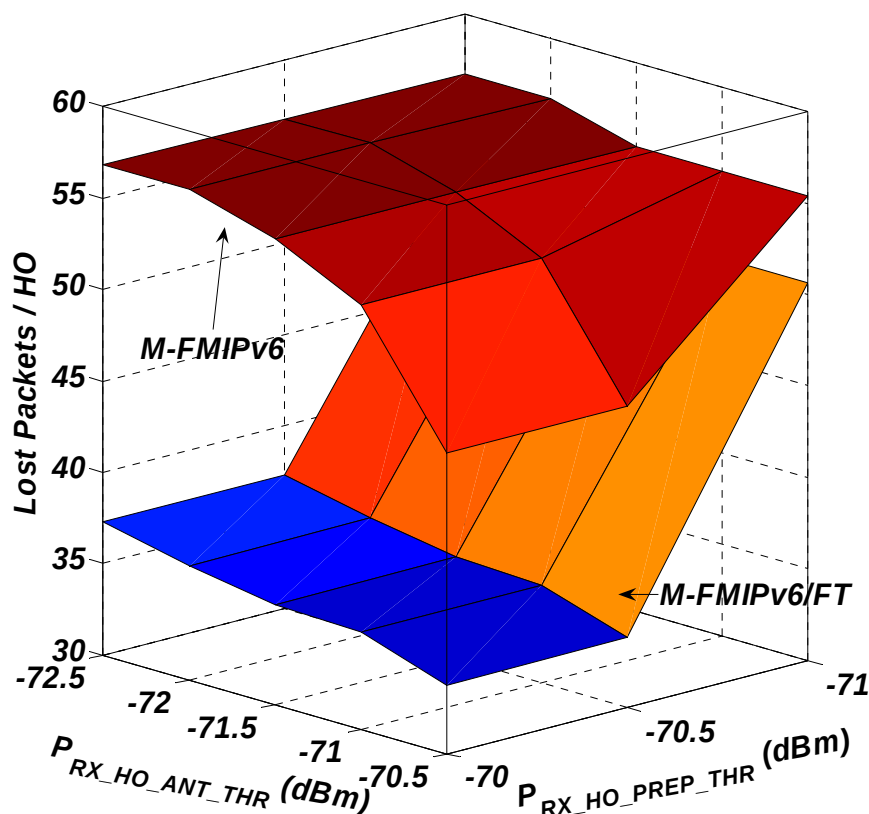
4.4.2.1 Επίδραση της λειτουργίας των βοηθητικών μηχανισμών πρόβλεψης και προετοιμασίας διαπομπής

Η λειτουργία και επίδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 εξαρτάται από τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών που χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου. Στο πλαίσιο προσομοιώσεων που έχει αναπτυχθεί, οι διαδικασίες που επιτελούνται από αυτούς τους μηχανισμούς έχουν ομαδοποιηθεί σε δύο κύριες φάσεις: τη *φάση προετοιμασίας/πρόβλεψης* της διαπομπής και τη *φάση προσμονής* της διαπομπής. Η εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης είναι παντελώς ανεξάρτητη από την εκτέλεση αυτών των διαδικασιών. Η φάση *προετοιμασίας/πρόβλεψης διαπομπής* ουσιαστικά ξεκινά με την έκδοση του trigger *Link Quality Crosses Threshold* (LQCT). Η παράδοση της συγκεκριμένης ένδειξης στο πρωτόκολλο FMIPv6, σημαίνει ότι αναμένεται η εκτέλεση διαπομπής στο εγγύς μέλλον, εφόσον το επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος έχει πέσει κάτω από το κατώφλι $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$. Επιπλέον αποκαλύπτει ότι έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση της διαδικασίας AP Discovery και έχει εκτελεστεί η πρόβλεψη αναφορικά με το σε ποιο δίκτυο αναμένεται η πρόσδεση του κινητού. Με στόχο την προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου εκτελείται και η διαδικασία Proxy AR Discovery από το FMIPv6, ώστε το τερματικό να αποκτήσει την απαραίτητη πληροφορία στρώματος δικτύου (πρόθλημα νέου δρομολογητή πρόσβασης, ρύθμιση νέας διεύθυνσης).

Η έναρξη της φάσης *προσμονής της διαπομπής* σηματοδοτείται από την έκδοση του trigger *Link Going Down* (LGD). Η παράδοση του συγκεκριμένου trigger μεταφράζεται ως η ένδειξη σύμφωνα με την οποία αναμένεται η άμεση εκτέλεση διαπομπής προς το δίκτυο που είχε προβλεφθεί κατά τη φάση *προετοιμασίας/πρόβλεψης*, εφόσον η ισχύς των λαμβανόμενων σημάτων από το τρέχον σημείο πρόσβασης έχει πέσει χαμηλότερα από το κατώφλι $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Σε αυτό το σημείο ξεκινά η προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου με την αποστολή του μηνύματος FBU από το κινητό. Εφόσον η διαδικασία σηματοδοσίας στρώματος δικτύου προχωρήσει κανονικά, εκτελείται διαπομπή προ-δραστικού τύπου. Από την άλλη αν δεν παραδοθεί το μήνυμα FBU, εκτελείται διαπομπή μετα-δραστικού τύπου αμέσως μετά την πρόσδεση του κινητού στο νέο δίκτυο. Στην περίπτωση όπου η πρόβλεψη δεν ήταν σωστή, ή η εκτέλεση της διαπομπής προηγήθηκε της έκδοσης του trigger LQCT, τότε αμέσως μετά την πρόσδεση του κινητού εκτελείται πλήρως μετα-δραστική διαπομπή. Η διαπομπή αυτή απαιτεί την εκτέλεση των βασικών IPv6 διαδικασιών (*Επισήμανση Μετακίνησης, Ανακάλυψης Δρομολογητή και Ρύθμισης Διεύθυνσης*). Συνοψίζοντας, η επιλογή του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ καθορίζει αν υπάρχει γενικά αρκετός χρόνος ώστε να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο FMIPv6 για την υποστήριξη μίας επικείμενης διαπομπής, ενώ τη τιμή του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τύπο της διαπομπής που πρόκειται να εκτελεστεί, αφού όσο πιο καθυστερημένα εκδίδεται το trigger LGD, τόσο λιγότερος χρόνος απομένει για την εκτέλεση διαπομπής προ-δραστικού τύπου.

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η επίδραση που έχει η λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών πρόβλεψης και προετοιμασίας της διαπομπής στη συνολική επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής όταν χρησιμοποιείται το *Σενάριο II*. Η μελέτη πραγματοποιείται μεταβάλλοντας τις τιμές των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται η επίδραση στη συνολική επίδοση όταν η διαδικασία σκανδαλίζεται αρκετά νωρίς ή όχι σε σχέση με την ανεξάρτητη εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Το Σχήμα 4 – 13 παρουσιάζει το μέσο πλήθος χαμένων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της μεταβολής των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι η επίδοση των μηχανισμών M-FMIPv6/FT και M-FMIPv6 επηρεάζεται αρκετά από την τιμή των κατωφλίων. Σαν γενική εικόνα θα μπορούσε να σημειωθεί ότι η επίδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 είναι καλύτερη (μικρότερη απώλεια πακέτων λόγω διαπομπής), στις περιπτώσεις κατά τις οποίες το πρωτόκολλο σκανδαλίζεται σχετικά νωρίς σε σχέση με την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Η βασική αιτία πίσω από αυτή τη συμπεριφορά είναι ότι η μείωση του κατωφλίου που ρυθμίζει την έκδοση του trigger LQCT (δηλ το $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$), προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της πιθανότητας εκτέλεσης διαπομπών πλήρως μετα-δραστικού τύπου, εφόσον στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπήρχε η δυνατότητα εκτέλεσης της διαδικασίας Proxy Router Discovery κατά τη φάση *προετοιμασίας/πρόβλεψης* της διαπομπής. Από την άλλη, στην περίπτωση που η έκδοση του trigger LQCT γίνεται «σχετικά νωρίς», η χρήση του πρωτοκόλλου FMIPv6 προκαλεί μείωση του πλήθους των χαμένων πακέτων, εφόσον είναι πιθανότερη η εκτέλεση διαπομπών προ-δραστικού ή μετα-δραστικού τύπου. Δεύτερον, από το διάγραμμα είναι προφανές ότι τόσο ο προτεινόμενος από τη διατριβή

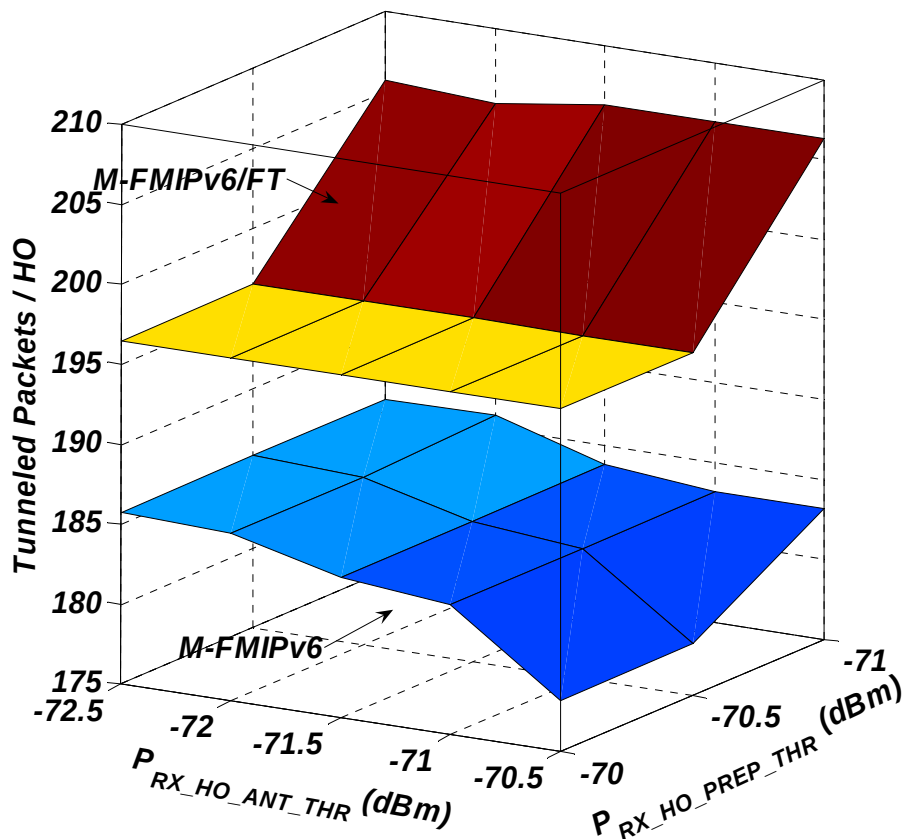
μηχανισμός M-FMIPv6/FT, όσο και ο μηχανισμός M-FMIPv6 παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση στην περίπτωση που λειτουργούν προ-δραστικά, παρά κατά τη μετα-δραστική λειτουργία τους. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι η αύξηση της τιμής του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$, η οποία προκαλεί αύξηση του ποσοστού των προ-δραστικών διαπομπών σε σχέση με τις μετα-δραστικές, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού χαμένων πακέτων ανά διαπομπή.



Σχήμα 4 – 13. Μέσος αριθμός απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$

Από το διάγραμμα του παραπάνω σχήματος, είναι προφανές ότι το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FT παρουσιάζει καλύτερη επίδοση σε σχέση με το M-FMIPv6, ανεξάρτητα από την επιλογή των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι στην πρώτη περίπτωση η διαδικασία προώθησης της κίνησης μέσω των διόδων ενθυλάκωσης πακέτων, ξεκινά νωρίτερα σε σχέση με τη δεύτερη. Ιδιαίτερα κατά την εκτέλεση των προ-δραστικών διαπομπών, το πρωτόκολλο M-FMIPv6/FT καθιστά διαθέσιμη στο νέο δίκτυο τη ροή κίνησης πολυεκπομπής ακόμη και πριν την πρόσδεση του τερματικού σε αυτό. Αντίστοιχα, κατά την εκτέλεση διαπομπών μετα-δραστικού και πλήρως μετα-δραστικού τύπου, η διαδικασία σηματοδότησης του M-FMIPv6/FT δίνει τη δυνατότητα γρηγορότερου σκανδαλισμού της διαδικασίας προώθησης· για το M-FMIPv6 η διαδικασία καθυστερεί κατά το χρόνο μίας πλήρους διαδρομής μεταξύ του εκάστοτε PAR και του τερματικού. Για το M-FMIPv6/FT, ο σκανδαλισμός πραγματοποιείται παράλληλα με την διαδικασία που προβλέπει το πρωτόκολλο FMIPv6. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, κανένας από τους δύο μηχανισμούς δεν είναι σε θέση να

υποστηρίζει την εκτέλεση διαπομπών με μηδενική απώλεια, ανεξάρτητα από την επιλογή των κατωφλίων που ρυθμίζουν τον τρόπο σκανδαλισμού τους. Η βασική αιτία είναι ότι κυρίαρχο μέρος της απώλειας προέρχεται από την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης και από την εκτέλεση της διαδικασίας ανακάλυψης νέων σημείων πρόσβασης. Εντούτοις θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός, δίνει τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης της απώλειας κατά την προ-δραστική λειτουργία του. Το παρατηρούμενο ελάχιστο οφείλεται κατά βάση στη λειτουργία των μηχανισμών στρώματος ζεύξης και όχι σε αυτόν του στρώματος δικτύου.



Σχήμα 4 – 14. Μέσος αριθμός προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συνάρτησι των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$

Το Σχήμα 4 – 14 παρουσιάζει το μέσο πλήθος προωθούμενων πακέτων μέσω των διόδων, ανά διαπομπή, συνάρτησι της μεταβολής των κατωφλίων $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι κατά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6, η κατανάλωση δικτυακών πόρων μειώνεται με την αύξηση της τιμής του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$. Όπως αναλύθηκε νωρίτερα αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός ακολουθεί μία μετα-δραστική προσέγγιση στην διαδικασία προώθησης πακέτων κατά την εκτέλεση προ-δραστικών διαπομπών, εφόσον η συγκεκριμένη διαδικασία σκανδαλίζεται μετά την πρόσδεση του τερματικού στο νέο δίκτυο. Στην περίπτωση των μετα-δραστικών διαπομπών η διάρκεια της διαδικασίας προώθησης είναι αντίστοιχη της διάρκειας του διαστήματος που απαιτείται ώστε ο νέος δρομολογητής πρόσβασης καταστεί μέλος του δένδρου διανομής της κίνησης πολυεκπομπής.

Ο μηχανισμός το M-FMIPv6/FT, παρουσιάζει μεγαλύτερη κατανάλωση δικτυακών πόρων εξαιτίας δύο λόγων: πρώτον, ανεξάρτητα από τον τύπο της διαπομπής στρώματος δικτύου (προ-δραστική, μετα-δραστική, πλήρως μετα-δραστική), το πλήθος των πακέτων που προωθούνται, είναι πάντοτε ανάλογο του διαστήματος που απαιτείται για την συμμετοχή του νέου δρομολογητή πρόσβασης στο δένδρο διανομής D_{REM_SUBSCR} . Δεύτερον, στην περίπτωση που η πρόβλεψη μίας διαπομπής δεν είναι σωστή, οπότε εκτελείται μία διαπομπή πλήρως μετα-δραστικού τύπου, ο προτεινόμενος μηχανισμός πραγματοποιεί προώθηση κίνησης για ένα μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης του 0.5 sec στις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν), μέχρις ότου επιβεβαιωθεί η αποτυχία της πρόβλεψης και σκανδαλιστεί η ακύρωση της διαδικασίας. Η τελευταία διαδικασία προκαλεί τεράστια αύξηση στο μέσο πλήθος των προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, στην περίπτωση που η τιμή του κατωφλίου $P_{RX\_HO\_PREP\_THR}$ είχε την ελάχιστη τιμή της (δηλ. -71 dBm). Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στο πλήθος των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών όπως περιγράφηκε νωρίτερα. Πάντως, η αύξηση της κατανάλωσης δικτυακών πόρων για την περίπτωση του μηχανισμού M-FMIPv6/FT είναι αυτή που δικαιολογεί την αντίστοιχη μείωση στην απώλειες πακέτων, ενώ αντίθετα η χαμηλή τιμή που εμφανίζει ο μηχανισμός M-FMIPv6 προκαλεί μεγαλύτερη απώλεια.

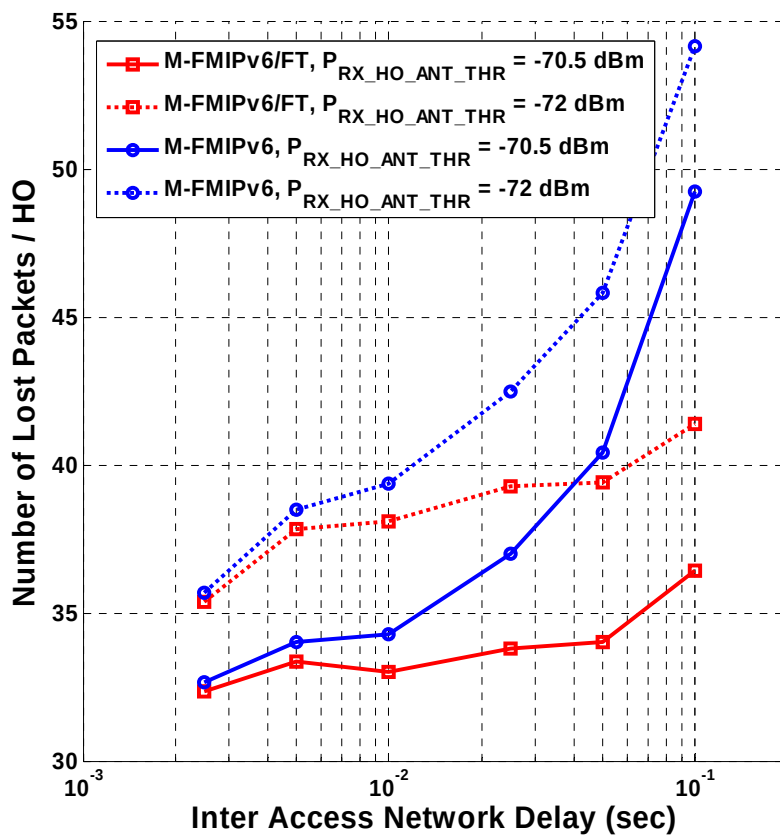
4.4.2.2 Επίδραση της απόστασης μεταξύ των περιοχών δικτύων πρόσβασης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των δύο τομέων δικτύου (δια-τομεακή απόσταση, *Inter-Access Network Wired Link Delay*, D_{WL}), που χαρακτηρίζει την τοπολογία που αναπτύχθηκε στον προσομοιωτή, κατά την εκτέλεση προσομοιώσεων σύμφωνα με το *Σενάριο II*. Σημειώνεται ότι τόσο τα αποτελέσματα όσο και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται, είναι αντίστοιχα με αυτά της ενότητας 4.4.1.2, αλλά επαναλαμβάνονται για χάριν πληρότητας.

Ο χρόνος που απαιτείται για την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ των εκάστοτε κόμβων PAR και NAR, που συμμετέχουν στην υποστήριξη της διαπομπής ενός κινητού τερματικού, επηρεάζει καθοριστικά την λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 (οι κόμβοι δεν συγχρονίζονται γρήγορα μεταξύ τους). Για την περίπτωση εκτέλεσης δια-τομεακών διαπομπών, η επιπρόσθετη καθυστέρηση επηρεάζει και το χρόνο που απαιτείται ώστε τα προωθούμενα μέσω των διόδων πακέτα να μεταφερθούν από το παλιό στο νέο δίκτυο. Τα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 4 – 15 και Σχήμα 4 – 16), παρουσιάζουν την εξάρτηση του χρόνου μη διαθεσιμότητας της ροής κίνησης στο τερματικό (*service disruption time*), λόγω εκτέλεσης της διαπομπής, και την κατανάλωση δικτυακών πόρων για την υποστήριξη της διαπομπής συναρτήσει της μεταβολής της επιβαλλόμενης καθυστέρησης στα πακέτα που διαπερνούν τον κόμβο *Inter-AN_Backbone* της τοπολογίας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4 – 5.

Αμφότερα τα διαγράμματα παρουσιάζουν την επίδοση των πρωτοκόλλων M-FMIPv6/FT και M-FMIPv6 για την περίπτωση κατά την οποία ο σκανδαλισμός τη *φάσης προσμονής* της διαπομπής, πραγματοποιείται *επαρκώς νωρίς* ($P_{RX\_HO\_ANT\_THR} = -70.5$ dBm) ή *μάλλον καθυστερημένα* ($P_{RX\_HO\_ANT\_THR} = -72.0$ dBm), σε σύγκριση με την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Στην πρώτη περίπτωση, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 85% των εκτελούμενων διαπομπών

ήταν προ-δραστικού τύπου, ενώ για τη δεύτερη μόνο το 40%. Και για τις δύο περιπτώσεις το ποσοστό των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών είναι της τάξης του 15%.

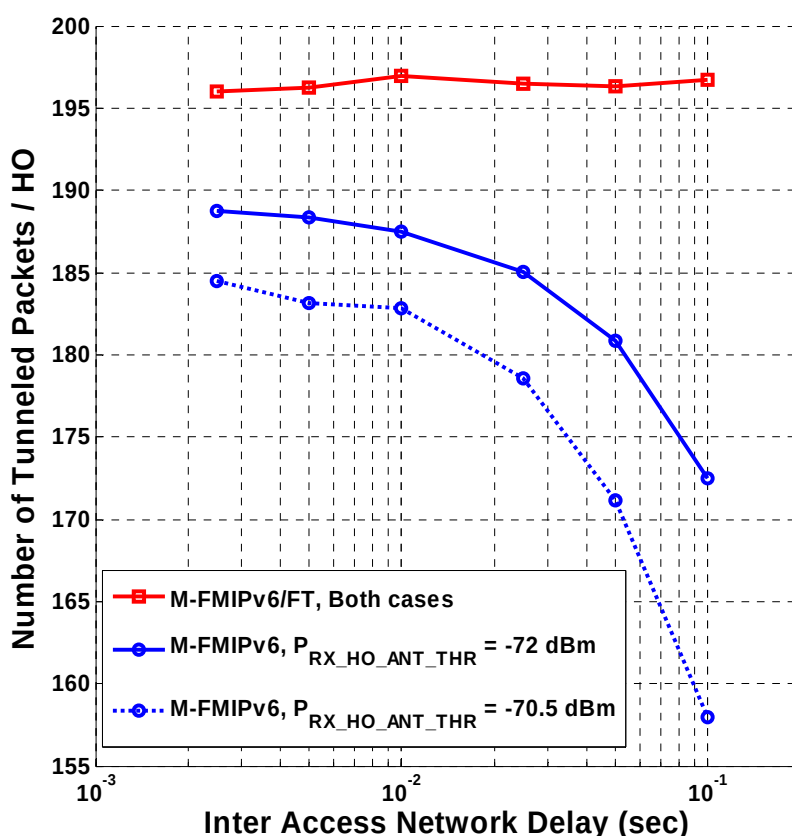


Σχήμα 4 – 15. Μέσος αριθμός απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσει της καθυστέρησης D_{WL}

Από το διάγραμμα του σχήματος 4 – 15, φαίνεται ότι η αύξηση της καθυστέρησης D_{WL} έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου πλήθους πακέτων που χάνονται λόγω εκτέλεση της διαπομπής ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ και για τους δύο μηχανισμούς. Η συγκεκριμένη αύξηση δικαιολογείται ως το αποτέλεσμα της επιπρόσθετης καθυστέρησης που υπεισέρχεται στην προώθηση της κίνησης προς το νέο δίκτυο μέσω των διόδων που χρησιμοποιεί ο κάθε μηχανισμός. Εντούτοις, για την περίπτωση του προτεινόμενου μηχανισμού M-FMIPv6/FT, η επίδραση είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με αυτή στον μηχανισμό M-FMIPv6. Η διαφορά δικαιολογείται σαν αποτέλεσμα του γεγονότος ότι όταν χρησιμοποιείται ο πρώτος (M-FMIPv6/FT), πραγματοποιείται προώθηση κίνησης προς το νέο δίκτυο αρκετά νωρίτερα από την πρόσδεση του τερματικού σε αυτό. Ως εκ τούτου, κατά την εκτέλεση διαπομπών προ-δραστικού τύπου, τα πακέτα κίνησης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις διαθέσιμα στο τερματικό, αφού η προώθησή τους έχει ξεκινήσει αρκετά νωρίτερα. Επιπρόσθετα, η λειτουργία του πρωτοκόλλου M-FMIPv6 απαιτεί έναν επιπλέον χρόνο πλήρους διαδρομής (RTT) σε σχέση με την λειτουργία του M-FMIPv6/FT για την εκκίνηση της διαδικασίας προώθησης των πακέτων κίνησης, πράγμα το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις περιπτώσεις όπου η τιμές

της επιπρόσθετης καθυστέρησης είναι σχετικά μεγάλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 – 15 ($D_{WL} > 25$ msec).

Οι απαιτήσεις του μηχανισμού M-FMIPv6/FT σε δικτυακούς πόρους είναι μάλλον σταθερές και ανεξάρτητες από τον τρόπο με τον οποίο σκανδαλίζεται το πρωτόκολλο FMIPv6. Στο Σχήμα 4 – 16 φαίνεται ότι το μέσο πλήθος των πακέτων που προωθούνται μέσω της διόδου δεν μεταβάλλεται σημαντικά (οι μικρές διακυμάνσεις οφείλονται στην εκτέλεση πλήρως μεταδραστικών διαπομπών), εφόσον εξαρτάται από το διάστημα που απαιτείται από τον εκάστοτε νέο δρομολογητή πρόσβασης να καταστεί μέλος του δένδρου διανομής της κίνησης πολυεκπομπής. Από την άλλη η αύξηση της καθυστέρησης D_{WL} , προκαλεί μείωση του μέσου πλήθους προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή για το μηχανισμό M-FMIPv6, σαν αποτέλεσμα του γεγονότος ότι ο συγχρονισμός του πρωτοκόλλου επηρεάζεται σημαντικά από την επιπρόσθετη καθυστέρηση όπως αναλύθηκε παραπάνω. Για άλλη μία φορά θα πρέπει να επισημανθεί ότι η κακή λειτουργία του μηχανισμού προώθησης κίνησης του M-FMIPv6 (η μείωση της διάρκειας του διαστήματος που πραγματοποιείται προώθηση πακέτων είναι αποτέλεσμα κακού συγχρονισμού), έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απώλειας σε πακέτα λόγω εκτέλεσης της διαπομπής. Από την άλλη, ο προτεινόμενος μηχανισμός αντιμετωπίζει το συγκεκριμένο πρόβλημα, μόνο στην περίπτωση που η D_{WL} έχει την ακραία τιμή 0.1 sec.



Σχήμα 4 – 16. Μέσος αριθμός προωθούμενων πακέτων ανά διαπομπή, συναρτήσεως της καθυστέρησης D_{WL}

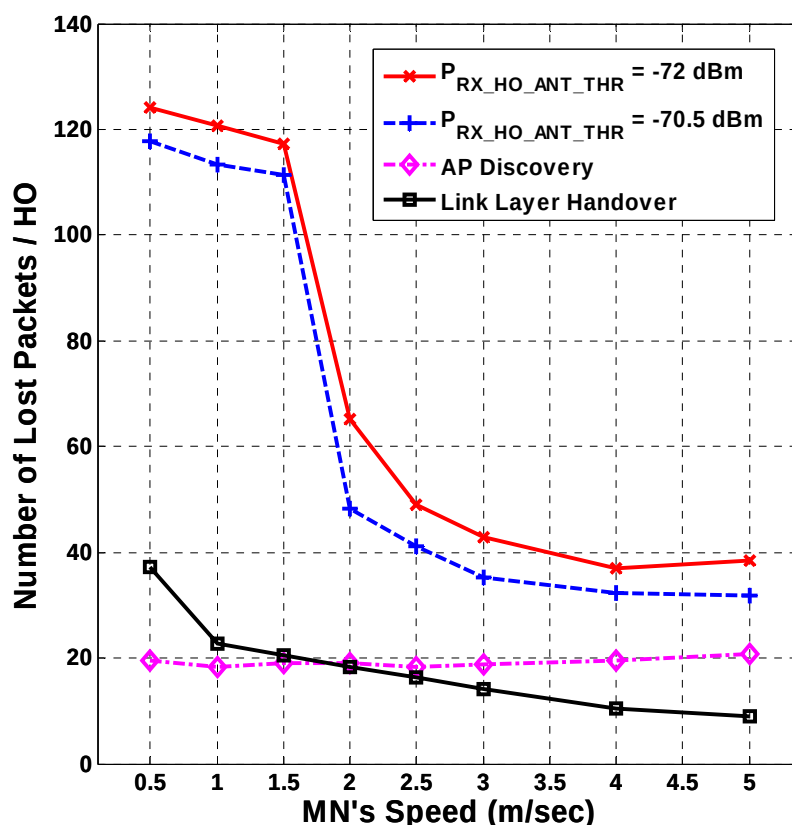
4.4.2.3 Επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του τερματικού

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας του τερματικού στην επίδοση του προτεινόμενου από τη διατριβή μηχανισμού. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα από προσομοιώσεις στις οποίες έχει μεταβληθεί η ταχύτητα του τερματικού στο κύριο μέρος της διαδρομής (*κλεψύδρα*) που προβλέπει το *Σενάριο II* (δηλαδή εκτός από το οριζόντιο και κατακόρυφο τμήμα που διατρέχεται αρχικά). Σημειώνεται ότι για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν εκτελεστεί όλες οι προσομοιώσεις που προβλέπει το *Σενάριο II*, με τη διαφορά ότι η ταχύτητα του τερματικού είχε κάθε φορά διαφορετική αλλά σταθερή τιμή. Η διάρκεια εκτέλεσης του σεναρίου μεταβαλλόταν ανάλογα με την ταχύτητα του τερματικού ώστε να είναι δυνατό το κινητό να διατρέξει όλη τη διαδρομή που προβλέπει το σενάριο και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Το Σχήμα 4 – 17 παρουσιάζει το μέσο πλήθος απολεσθέντων πακέτων ανά διαπομπή όταν χρησιμοποιείται ο προτεινόμενος μηχανισμός M-FMIPv6/FT, συναρτήσει της ταχύτητας του τερματικού. Το διάγραμμα περιέχει αποτελέσματα για δύο διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$ (-70.5 dBm και -72 dBm), η οποία καθορίζει τον τρόπο σκανδαλισμού του FMIPv6. Επιπρόσθετα στο διάγραμμα παρουσιάζεται η απώλεια πακέτων που προκαλείται κατά την εκτέλεση του μηχανισμού *Ανακάλυψης Νέου Σημείου Πρόσβασης* και από την *εκτέλεση* της *διαπομπής στρώματος ζεύξης*. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης αυτών των διαδικασιών, το τερματικό δεν είναι σε θέση να λάβει ή να στείλει πλαίσια στρώματος ζεύξης δεδομένων. Ως εκ τούτου αντιστοιχούν σε ένα αναπόφευκτο πρόβλημα για το μηχανισμό υποστήριξης της διαπομπής, που προσπαθεί να μειώσει την απώλεια σε πακέτα. Με στόχο την παρουσίαση μίας πιο ξεκάθαρης εικόνας των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων, το Σχήμα 4 – 18 παρουσιάζει το μέσο πλήθος των συνολικών διαπομπών, το μέσο πλήθος των μετα-δραστικών για τις δύο τιμές της παραμέτρου $P_{RX\_HO\_ANT\_THR}$, και το μέσο πλήθος των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών που εκτελέστηκαν στο σενάριο που περιγράφηκε νωρίτερα. Η διαφορά του συνολικού αριθμού διαπομπών από το άθροισμα των μετα-δραστικών και των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών αντιστοιχεί στο μέσο πλήθος των διαπομπών προ-δραστικού τύπου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 – 17, το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η αύξηση της ταχύτητας του τερματικού έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου πλήθους χαμένων πακέτων λόγω εκτέλεσης της διαπομπής. Η βασική αιτία για αυτό το φαινόμενο είναι ότι η συνολική επίδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών πρόβλεψης και εκτέλεσης τη διαπομπής στρώματος ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα, από την καμπύλη που δείχνει το πλήθος των χαμένων πακέτων λόγω της διαπομπής στρώματος ζεύξης, παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί μείωση της διάρκειας εκτέλεσης της διαπομπής (υπενθυμίζεται ότι ο ρυθμός γέννησης πακέτων στο στρώμα εφαρμογής είναι σταθερός). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι σε υψηλότερες ταχύτητες ο αλγόριθμος επιλογής νέων σημείων πρόσβασης μπορεί και λαμβάνει ορθότερες αποφάσεις, εφόσον έχει να αντιμετωπίσει ένα πιο σαφές ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ταχύτητας, έχει σαν αποτέλεσμα το τερματικό να κινείται

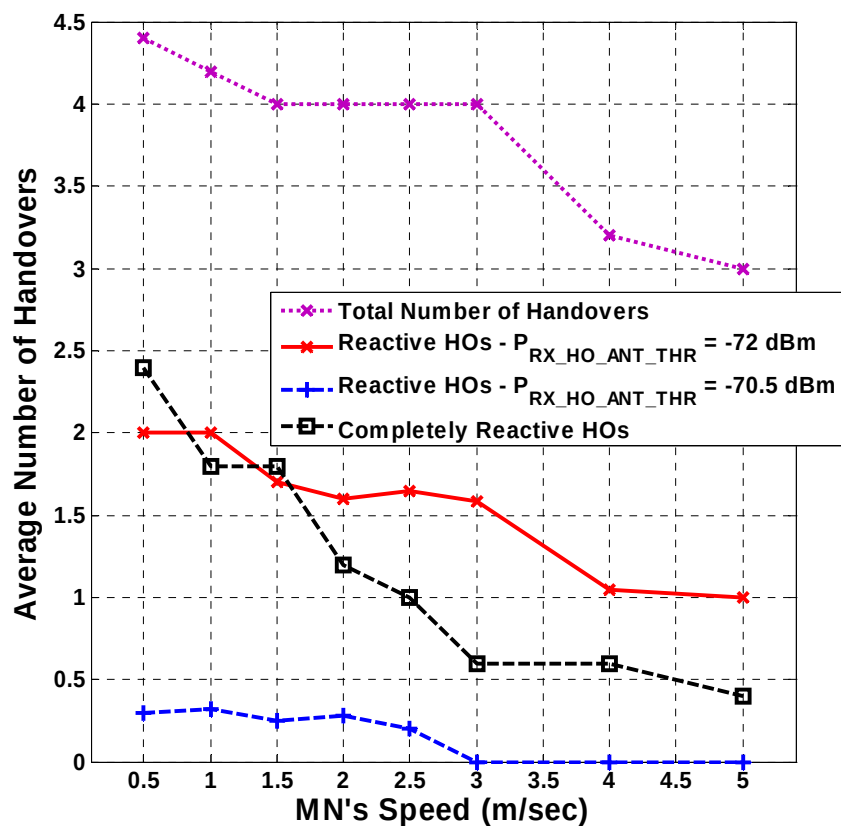
ταχύτητα εκτός περιοχών όπου οι μετρήσεις της ποιότητας των υποψηφίων ζεύξεων δεν είναι ξεκάθαρες, σε σχέση με τα όρια που έχουν χρησιμοποιηθεί από τους αντίστοιχους αλγορίθμους για την πρόβλεψη και επιλογή ενός νέου σημείου πρόσβασης. Με άλλα λόγια το τερματικό δεν παραμένει για αρκετό χρονικό διάστημα εντός περιοχών στις οποίες η επιλογή ενός νέου σημείου πρόσβασης δεν επιτρέπεται, διότι η τιμή της λαμβανόμενης ισχύος είναι χαμηλότερη του ανωφλίου $P_{RX\_AP\_SELECTION\_THR}$.



Σχήμα 4 – 17. Μέσο πλήθος χαμένων πακέτων ανά διακοπή κατά τη χρήση του μηχανισμού M-FMIPv6/FT, συναρτήσει της ταχύτητας του τερματικού

Δεύτερον, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4 – 18, η αύξηση της ταχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου αριθμού διακομών καθώς επίσης και του μέσου πλήθους των πλήρως μετα-δραστικών διακομών. Η αιτία πραγματοποίησης του πρώτου είναι ότι για χαμηλές ταχύτητες, οι αποφάσεις εκτέλεσης διακομής είναι «λιγότερο ακριβείς μακροπρόθεσμα». Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα εκτέλεσης μίας νέας διακομής λίγο μετά την εκτέλεση της πρώτης είναι αρκετά μεγάλη, εξαιτίας της μη ορθής επιλογής που πραγματοποιήθηκε αρχικά. Για υψηλότερες ταχύτητες αντίθετα, και δεδομένου ότι τα σημεία πρόσβασης εκπέμπουν μηνύματα beacon με σταθερή συχνότητα, η διαδικασία της χρονικής υστέρησης που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2, δίνει τη δυνατότητα στο τερματικό να κινηθεί βαθύτερα στην περιοχή κάλυψης του νέου σημείου πρόσβασης. Σαν αποτέλεσμα, η επιλογή του να είναι περισσότερο ορθή. Στον ίδιο ακριβώς λόγο οφείλεται και η καλύτερη λειτουργία του αλγορίθμου πρόβλεψης/επιλογής νέου σημείου πρόσβασης, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται από τη μείωση του αριθμού των

πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών. Συνοψίζοντας λοιπόν η αύξηση της ταχύτητας του τερματικού προκαλεί μείωση της απώλειας πακέτων σαν αποτέλεσμα της μείωσης του πλήθους των εκτελούμενων διαπομπών αλλά και του πλήθους των πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών στο πολύ συγκεκριμένο σενάριο που μελετούμε. Οι εν λόγω μειώσεις είναι αποτέλεσμα της βελτίωσης της λειτουργίας των μηχανισμών εκτέλεσης και πρόβλεψης της διαπομπής στρώματος ζεύξης.



Σχήμα 4 – 18. Μέσος αριθμός διαπομπών συναρτήσει της μεταβολής της ταχύτητας τερματικού

Από το Σχήμα 4 – 18 είναι προφανές ότι η αύξηση της ταχύτητας του τερματικού προκαλεί μείωση του μέσου πλήθους μετα-δραστικών διαπομπών. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι και αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη λειτουργία των βοηθητικών του πρωτοκόλλου FMIPv6 μηχανισμών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η πλειοψηφία των διαπομπών που δεν εκτελούνται εξαιτίας των λόγων που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ήταν διαπομπές μετα-δραστικού τύπου. Αυτό είναι λογικό αν αναλογιστούμε ότι στην περίπτωση κατά την οποία το κινητό είναι υποχρεωμένο να εκτελέσει μία δεύτερη διαπομπή εντός ενός μικρού χρονικού διαστήματος σε σχέση με την προηγούμενη, η εκτέλεση της χρονοβόρας διαδικασίας *ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης*,³⁴ δεν αφήνει τα χρονικά περιθώρια ώστε να σκανδαλιστεί ομαλά η εκτέλεση της φάσης *προσμονής της διαπομπής*. Στην πράξη αυτό μεταφράζονταν ως αδυναμία αποστολής του μηνύματος FBU, εφόσον αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας

³⁴ Η τυπική διάρκεια της διαδικασίας AP Discovery στον προσομοιωτή ήταν μεγαλύτερη των 200 msec.

AP Discovery, ακολουθεί η εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Με βάση την προδιαγραφή του FMIPv6, σε αυτή την περίπτωση εκτελείται διαπομπή μετα-δραστικού τύπου και το μήνυμα FBU αποστέλλεται αμέσως μετά την πρόσδεση στο νέο σημείο πρόσβασης μαζί με το μήνυμα FNA.

Είναι γεγονός ότι οι βασικοί λόγοι που προκαλούν χειροτέρευση της επίδοσης όταν η ταχύτητα είναι χαμηλή, δεν σχετίζονται με τη βασική λειτουργία του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Αντίθετα σχετίζονται με τη λειτουργία των βοηθητικών του FMIPv6 μηχανισμών, οι οποίοι φροντίζουν κατά βάση για την προετοιμασία της διαπομπής στρώματος δικτύου και την εκτέλεση της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Στην περίπτωση που οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί λειτουργούν βέλτιστα, η επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού κινητικότητας εμφανίζει την καλύτερη συγκριτικά τιμή (ελάχιστη). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4 – 17, ο μέσος αριθμός χαμένων πακέτων στην περίπτωση που η ταχύτητα είναι 5 m/sec, συντίθεται κατά κύριο λόγο από την απώλεια κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των διαδικασιών *ανακάλυψης νέου σημείου πρόσβασης* και *εκτέλεσης διαπομπής στρώματος ζεύξης* και όχι από τη λειτουργία του μηχανισμού υποστήριξης της διαπομπής στρώματος δικτύου. Οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν έδειξαν ότι η κακή σχετικά συμπεριφορά των βοηθητικών μηχανισμών είναι ουσιαστικά αποτέλεσμα της ακατάλληλης, όπως αποδείχθηκε, διαδικασίας αποτίμησης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος. Υπενθυμίζεται ότι στο πλαίσιο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε, οι βοηθητικοί μηχανισμοί προετοιμασίας διαπομπής στρώματος δικτύου και εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης, βασίζονται στις αποφάσεις τους αναφορικά με το προς ποιο δίκτυο κατευθύνεται ή πρέπει να συνδεθεί το κινητό, ή με το πότε θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαπομπή, σε μετρήσεις της λαμβανόμενης ισχύος στην πλευρά του τερματικού. Δεδομένου ότι το σύστημα δεν κρατά κάποιο ιστορικό, οι μετρήσεις δεν περιέχουν καμία πληροφορία αναφορικά με την κινητικότητα του τερματικού και δη την ταχύτητά του. Αντίστοιχα, οι αλγόριθμοι αποτίμησης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος δεν επεξεργάζονται τις μετρήσεις ισχύος ώστε να αποφανθούν σχετικά αλλά βασίζονται τα αποτελέσματά τους σε απλές συνθήκες ικανοποίησης των κριτηρίων με τα κατώφλια που έχουν περιγραφεί νωρίτερα.

Με στόχο την επίτευξη μίας περισσότερο ομαλής, αν όχι ομοιόμορφης, συμπεριφοράς του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που παρουσιάζει κατά βάση το πρωτόκολλο FMIPv6, θα πρέπει τόσο ο αλγόριθμος επιλογής νέων σημείων πρόσβασης, τόσο στην περίπτωση του μηχανισμού εκτέλεσης της διαπομπής στρώματος ζεύξης όσο και σε αυτή του μηχανισμού πρόβλεψης της διαπομπής, να λαμβάνει υπόψη του μετρήσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε μία έκφραση της ταχύτητας του τερματικού. Στην πράξη το ζητούμενο είναι η χρήση μίας παραμέτρου μέσω της οποίας να μπορεί να εκφραστεί εύκολα και με ικανοποιητική ακρίβεια η μεταβολή της ποιότητας των ζεύξεων στο χρόνο. Μια τέτοια παράμετρος είναι ο *ρυθμός μεταβολής της λαμβανόμενης ισχύος* στο τερματικό, *ως προς το χρόνο*. Κατόπιν μελέτης της διακύμανσης του *ρυθμού μεταβολής της λαμβανόμενης ισχύος ως προς το χρόνο*, που προκαλείται από αύξηση της ταχύτητας του κινητού στο σενάριο προσομοιώσεων που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα, παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός ακολούθησε την αύξηση της

ταχύτητας. Οι μετρήσεις του μέσου ρυθμού πραγματοποιήθηκαν με δειγματοληψία μετρήσεων της λαμβανόμενης ισχύος για ένα μικρό χρονικό παράθυρο (της τάξης των 500 msec). Έχοντας υπόψη τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 – 18, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύστημα που μελετήθηκε, λειτουργούσε καλύτερα (οι αποφάσεις ήταν ορθότερες), όταν οι μετρήσεις του μέσου ρυθμού λάμβαναν μεγάλες κατά απόλυτη τιμή, αλλά αρνητικές τιμές. Οι περιπτώσεις αυτές αντιστοιχούν σε μεγάλους ρυθμούς χειροτέρευσης της ποιότητας της ζεύξης. Για τις περιπτώσεις με μικρότερους κατά απόλυτη τιμή ρυθμούς προέκυψε ότι η πλειονότητα των επιλογών και προβλέψεων ήταν λανθασμένη. Αυτό ερμηνεύει και την αύξηση του μέσου πλήθους των μετα-δραστικών και πλήρως μετα-δραστικών διαπομπών όπως αναλύθηκε νωρίτερα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, θα πρέπει να τονιστεί ότι για τον περιορισμό των λανθασμένων και άκαιρων προβλέψεων και επιλογών νέων σημείων πρόσβασης, και για την σωστή λειτουργία του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας στο στρώμα δικτύου, είναι απαραίτητο και οι μηχανισμοί έκδοσης των trigger που αναλύθηκαν στην ενότητα 4.2.3, να έχουν τη δυνατότητα αξιολόγησης παραμέτρων που εκφράζουν το ρυθμό μεταβολής της ποιότητας των εγκατεστημένων ζεύξεων. Αυτό σημαίνει ότι ο μηχανισμός θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να προβαίνει στη άμεση έκδοση του κατάλληλου trigger εφόσον ο ρυθμός χειροτέρευσης της ποιότητας είναι σχετικά μεγάλος. Αντίθετα θα πρέπει να καθυστερεί την έκδοσή του στην περίπτωση που η απόλυτη τιμή του είναι μικρή. Ο ακριβής σχεδιασμός ενός τέτοιου μηχανισμού είναι εκτός του αντικειμένου της διατριβής και δε θα αναλυθεί περαιτέρω.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη λειτουργία του πρωτοκόλλου FMIPv6 στη γενική περίπτωση απαιτεί από το μηχανισμό πρόβλεψης της διαπομπής τη διενέργεια μίας πρόβλεψης εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (μικρού σε διάρκεια). Αυτό σημαίνει ότι η έκδοση του trigger Link Going Down δε θα πρέπει να υποδεικνύει μόνο το δίκτυο προς το οποίο επίκειται η διαπομπή του κινητού αλλά να δίνει και μία ακριβή εκτίμηση για το πότε προβλέπεται ότι θα εκτελεστεί η συγκεκριμένη διαπομπή (πόσος χρόνος απομένει μέχρι την εκτέλεσή της). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί καλύτερος συγχρονισμός των διαδικασιών διαχείρισης διαπομπών των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων. Επιπλέον θα καταστεί εφικτός ο περιορισμός της επίδρασης που μπορεί να έχει η διακύμανση της ταχύτητας στην επίδοση του πρωτοκόλλου FMIPv6 με στόχο τον περιορισμό των απωλειών λόγω εκτέλεσης της διαπομπής. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.5 (Προηγμένη λειτουργία πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB) σύμφωνα με τις οποίες επιβάλλεται ο συγχρονισμός μεταξύ των διαδικασιών του στρώματος δικτύου και ζεύξης δεδομένων, αποφεύγονται τα φαινόμενα λανθασμένων προβλέψεων και άσκοπων προωθήσεων πακέτων και μειώνεται το διάστημα στο οποίο το τερματικό δεν είναι σε θέση να λάβει πακέτα κίνησης.

4.5 Βιβλιογραφία

- [1] OPNET Technologies, OPNET Modeler, v 10.5 PL2, www.opnet.com
- [2] R. Koodli (editor), "Fast Handovers for Mobile IPv6", IETF RFC 4068, July 2005
- [3] K. Suh, Y.-J. Suh, "Fast Multicast Protocol for Mobile IPv6 in the Fast Handovers Environment", IETF Internet Draft, draft-suh-mipshop-fmcast-mip6-00.txt, January 2004, (expired)
- [4] T. Schmidt, M. Waehlich, "Seamless Multicast Handover in a Hierarchical Mobile IPv6 Environment (M-HMIPv6)", IETF Internet Draft, draft-schmidt-waehlich-mhmip6-04.txt, November 2005, Work in progress
- [5] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", IETF RFC 3775, June 2004
- [6] D. Kotz, C. Newport, R. S. Gray, J. Liu, Y. Yuan, C. Elliott, "Experimental Evaluation of Wireless Simulation Assumptions", in proc. of the ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), pp. 78-82, October 2004
- [7] A. Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press, 2005, chapter 2
- [8] A. Neskovic, N. Neskovic, G. Paunovic, "Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment", IEEE Communication Surveys, Vol. 3, 2000
- [9] ITU-R RECOMMENDATION P.1238-4, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz", 2005, available online at: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238/>
- [10] ITU-R RECOMMENDATION P.1411-3, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz", 2005, available online at: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1411/>
- [11] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," Electronic Letters, Vol. 27, pp. 2145–2146, Nov. 7, 1991.
- [12] I. Forkel, M. Schinnenburg, M. Ang, "Generation of Two-Dimensional Correlated Shadowing for Mobile Radio Network Simulation", In Proc. of The 7th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2004, Abano Terme, Italy, September 2004
- [13] M.C. Jeruchim, P. Balaban, K.S. Shanmugan, "Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques", 2nd ed., Kluwer Academic Plenum Publishers, 2000, pp. 397-399
- [14] Weisstein, Eric W. "Cholesky Decomposition." From MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/CholeskyDecomposition.html>

- [15] Planet Math, "Cholesky Decomposition", <http://planetmath.org/encyclopedia/CholeskyDecomposition.html>
- [16] N. Tripathi, J. Reed, H. VanLandingham, "Radio Resource Management in Cellular Systems", Kluwer Academic Publishers, 2002
- [17] IEEE P802.21/D00.05, "Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Independent Handover Services", IEEE 802.21 MIH Working Group, January 2006
- [18] IEEE 802.21 Media Independent Handoff Working Group, <http://www.ieee802.org/21/>
- [19] P. McCann, "Mobile IPv6 Fast Handovers for 802.11 Networks", IETF RFC 4260, November 2005
- [20] IEEE Std 802.11, 1999 (R2003), "Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", June 2003
- [21] C. Bettstetter , H. Hartenstein , X. P. Costa, "Stochastic properties of the random waypoint mobility model", Wireless Networks, v.10 n.5, p.555-567, September 2004

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει συνοπτικά το αντικείμενο της διατριβής, δίνοντας έμφαση στα συμπεράσματά της, καθώς και στις ανοιχτές περιοχές για μελλοντική έρευνα.

5.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Οι τεχνολογίες Διαδικτύου αποτελούν στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών το συνδυαστικό κρίκο μεταξύ ετερογενών δικτύων πρόσβασης, με στόχο την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων σε κινούμενους χρήστες. Η ανάγκη διασύνδεσης εκτείνεται σε δύο επίπεδα: στο δίκτυο και στις υπηρεσίες. Η πρώτη είναι απαραίτητη ώστε να είναι εφικτή η διατήρηση της επικοινωνίας των τερματικών καθώς διαπέμπονται από το ένα δίκτυο στο άλλο. Η δεύτερη προκύπτει ως απαίτηση για την προσφορά ενός ευρέως συνόλου υπηρεσιών (δυναμικών δεδομένων ή πραγματικού χρόνου), σε όλα τα δίκτυα, ανεξάρτητα από τη διοικητική τους υπόσταση, την τεχνολογία πρόσβασης, τις τερματικές συσκευές και τις προσωπικές προτιμήσεις των χρηστών. Οι κατευθύνσεις αυτές συγκλίνουν στη χρησιμοποίηση μίας ενιαίας τεχνολογίας και για τις δύο περιπτώσεις. Το πρωτόκολλο IP αποτελεί τη βάση στην οποία μπορεί να επιτευχθεί η διασύνδεση ακριβώς επειδή πλέον παρουσιάζεται σαν μία ενιαία, ανοικτή και ώριμη πλατφόρμα επικοινωνίας με προηγμένα χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Έχοντας σαν δεδομένη την ομοιογένεια στην διαδικασία προσφοράς υπηρεσιών που προέρχεται από τους μηχανισμούς του πρωτοκόλλου IP, το βασικό στοίχημα είναι η διασύνδεση στο επίπεδο του δικτύου με στόχο την ανεξαρτησία από την τεχνολογία πρόσβασης, την απλοποίηση των διαδικασιών εγκατάστασης συνόδων για τη μείωση του φορτίου σηματοδότησης στο επίπεδο του δικτύου και τη διαχείριση κινητικότητας με στόχο την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών που επιβάλει η κινητικότητα των χρηστών. Σε αυτό το πλαίσιο, στη διατριβή έχει ως θέμα τη διαχείριση κινητικότητας και τη διερεύνηση των διαδικασιών εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής. Η εφαρμογή των τεχνολογιών πολυεκπομπής αφορά στην παροχή μίας μεγάλης πλειάδας υπηρεσιών πραγματικού χρόνου που χρησιμοποιούνται σήμερα στο *Κινητό Διαδίκτυο*, μέσω της αρχιτεκτονικής του πρωτοκόλλου Mobile IP.

Η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών στο *Κινητό Διαδίκτυο* είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με δύο παράγοντες: ο πρώτος αφορά στην τοπική διάσταση του προβλήματος μετάβασης από το παλιό δίκτυο στο νέο. Στη φάση αυτή ο κινητός κόμβος θα πρέπει να αποκαταστήσει την επικοινωνία του στο στρώμα ζεύξης δεδομένων και να αποκτήσει μία νέα IP διεύθυνση ώστε να μπορεί να συνδεθεί με έναν οποιοδήποτε άλλο κόμβο στο Διαδίκτυο. Ανάλογα με την τεχνολογία και την τοπολογία του ασύρματου δικτύου, η αποκατάσταση της επικοινωνίας στο στρώμα ζεύξης μπορεί ή όχι να αντιστοιχεί στη διακοπή της σύνδεσης του τερματικού με το δίκτυο στο στρώμα ζεύξης για ένα μικρό χρονικό διάστημα (οξείες διαπομπές, *hard handovers*). Σε αυτό το διάστημα, εφόσον δεν υπάρχει πρόνοια από το μηχανισμό κινητικότητας, λαμβάνει χώρα απώλεια πακέτων. Ο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με την εκτέλεση των διαδικασιών ανάνηψης των ενεργών συνόδων που είχε ο κινητός κόμβος πριν την αλλαγή δικτύου. Το πρόβλημα είναι ότι η παροχή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου δεν αφήνει πολλά χρονικά περιθώρια για την εκτέλεση των διαδικασιών ενώ απαιτείται επίσης η διαδικασία ενημέρωσης της υποδομής κινητικότητας του MIP για την πραγματοποίησή της (μέσω των διαδικασιών *Οικείας Εγγραφής* και *Εγγραφής Ανταποκριτών*).

Από την άλλη, το ζήτημα της διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής είναι πολυδιάστατο. Ο λόγος είναι ότι κληρονομεί τα χαρακτηριστικά αλλά και τα προβλήματα που σχετίζονται με την

κινητικότητα των τερματικών και την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής. Έχοντας τη συγκεκριμένη παρατήρηση κατά νου, η διατριβή ξεκίνησε με την περιγραφή των δομικών χαρακτηριστικών των δύο τεχνολογιών, παρουσιάζοντας το περιβάλλον του *Κινητού Διαδικτύου Πολυεκπομπής*. Στα πλαίσιά του, το πρωτόκολλο MIP λειτουργεί σε δύο φάσεις: αρχικά αντιμετωπίζει τα ζητήματα κινητικότητας, που σχετίζονται με την αλλαγή της διεύθυνσης του τερματικού. Στη συνέχεια, προχωρά στην αποκατάσταση των συνόδων πολυεκπομπής σε παγκόσμιο επίπεδο, προδιαγράφοντας τη λειτουργία δύο βασικών μηχανισμών, των *Οικείων* και των *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Ο πρώτος προτείνει την κατά κόρον χρήση της unicast υποδομής για την περίπτωση των διαπομπών πολυεκπομπής. Ο δεύτερος προτείνει την αποκλειστική χρήση των μηχανισμών που προδιαγράφονται από την αρχιτεκτονική *Πολυεκπομπής Διαδικτύου*, ανεξάρτητα από την κινητικότητα του τερματικού. Εντούτοις δεν προτείνεται κάποια τεχνική για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλεί η κινητικότητα σχετικά με την ανακατασκευή του δένδρου διανομής και την επανεγκατάσταση των συνόδων πολυεκπομπής. Καθένας από τους μηχανισμούς παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και αρκετά μειονεκτήματα, τα πιο σημαντικά από τα οποία είναι η πολύ κακή χρήση δικτυακών πόρων για την περίπτωση του πρώτου (πρόβλημα σύγκλισης διόδων) και η αδυναμία εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής εφόσον οι καθυστερήσεις που υπεισέρχονται στη διαδικασία αποκατάστασης της επικοινωνίας τουλάχιστο είναι απαγορευτικές για τη εκτέλεση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.

Στις μέρες μας ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ανάπτυξη μηχανισμών που δίνουν την δυνατότητα εκμηδενισμού της επίδρασης που έχει η μετάβαση του τερματικού από το ένα δίκτυο στο άλλο παρουσιάζοντας προηγμένους μηχανισμούς κινητικότητας για αυτό το σκοπό. Σύμφωνα με αυτούς, αρχικά επιχειρείται η αντιμετώπιση του τοπικού φαινομένου κινητικότητας οπότε περιορίζονται οι καθυστερήσεις που προκαλεί η διαδικασία πρόσδεσης στο νέο δίκτυο. Για την αποκατάσταση της επικοινωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο, δεδομένου του ότι οι καθυστερήσεις είναι μη ντετερμινιστικές, επιλέγεται η χρήση μηχανισμών προώθησης της κίνησης από το προηγούμενο της διαπομπής σημείο. Για το λόγο αυτό έχουν προδιαγραφεί δύο πρωτόκολλα από την IETF, το HMIPv6 και το FMIPv6. Το πρώτο προτείνει την ανάπτυξη μίας ιεραρχικής αρχιτεκτονικής διαχείρισης κινητικότητας που εστιάζει στην ταχύτερη αντιμετώπιση των ζητημάτων τοπικής κινητικότητας. Το δεύτερο, με στόχο την προετοιμασία της διαπομπής σε τοπικό επίπεδο, βασίζεται στην επέκταση της διεπαφής του στρώματος δικτύου με το στρώμα ζεύξης και απαιτεί την παράδοση από αυτό ενδείξεων αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση μίας διαπομπής. Απώτερος σκοπός είναι η προετοιμασία του νέου δικτύου με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί η άμεση (ταχεία) σύνδεση του τερματικού μετά τη διαπομπή του σε αυτό. Αμφότεροι οι παραπάνω μηχανισμοί δίνουν την δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων διαπομπών με το δεύτερο να υπερισχύει εξαιτίας της προ-δραστικής προσέγγισης και της δυνατότητας εκμηδενισμού της απώλειας, μέσω της προσωρινής αποθήκευσης πακέτων στο δίκτυο. Αρνητικό σημείο αποτελεί η απαίτηση για πραγματοποίηση προβλέψεων αναφορικά με την επικείμενη εκτέλεση μίας διαπομπής, εφόσον χρειάζεται ανάπτυξη μηχανισμών αποτίμησης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το τερματικό. Επιπλέον είναι απαραίτητη η

λειτουργία ενός ξεχωριστού μηχανισμού για την παράδοση των trigger από το στρώμα ζεύξης μέσω του *Περιβάλλοντος Ταχέων Διαπομπών*.

Επιστρέφοντας στο ζήτημα της διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής, στη συνέχεια αναλύθηκαν επεκτάσεις των μηχανισμών υποστήριξης απρόσκοπτων διαπομπών, που έχουν παρουσιαστεί στις μέρες μας, προς την κατεύθυνση των υπηρεσιών πολυεκπομπής. Οι επεκτάσεις εστιάζουν στην χρήση της ήδη υπάρχουσας unicast υποδομής, που παρουσιάζουν τα πρωτόκολλα HMIPv6 και FMIPv6, με στόχο να υποστηρίξουν multicast διαπομπές. Για το λόγο αυτό έχουν παρουσιαστεί αντίστοιχα δύο πρωτόκολλα, το M-HMIPv6 και το M-FMIPv6, μέσω των οποίων προτείνεται η προώθηση κίνησης πολυεκπομπής από το προηγούμενο δίκτυο στο νέο, με στόχο τη μείωση του διαστήματος στο οποίο ένας κινητός δεν είναι σε θέση να λάβει κίνηση πολυεκπομπής αμέσως μετά τη διαπομπή του στο νέο δίκτυο και μέχρι αυτό καταστεί μέλος του δένδρου διανομής. Εντούτοις, αμφότεροι οι μηχανισμοί παρουσιάζουν πλειάδα προβλημάτων. Το βασικότερο από αυτά είναι ότι γενικά ακολουθείται μία μετα-δραστική προσέγγιση στη διαδικασία προώθησης της κίνησης προς το τερματικό (δηλαδή μετά τη διαπομπή). Αυτό σε πολλές περιπτώσεις επηρεάζει την εκτέλεση εφαρμογών πραγματικού χρόνου, εφόσον η απώλεια σε πακέτα δεν είναι δυνατό να εκμηδενιστεί. Επίσης σημαντικό αρνητικό σημείο είναι ότι και οι δύο μηχανισμοί, σε ορισμένα σημεία, καταστρατηγούν τις αρχές της αρχιτεκτονικής *Πολυεκπομπής Διαδικτύου*, αφήνοντας κενά αναφορικά με την επίδοση ή τη βέλτιστη διαχείριση δικτυακών πόρων, όπου το τερματικό θα πρέπει να ελέγξει τη διαθεσιμότητα του ρεύματος πολυεκπομπής στο νέο δίκτυο ή όταν εκτελούνται ομαδικές διαπομπές αντίστοιχα. Για την διαχείριση της κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής, παρουσιάστηκαν οι μηχανισμοί MSSMv6 και Tree Morphing. Ο πρώτος προτείνει τη συνολική επανεγκατάσταση της συνόδου πολυεκπομπής και του δένδρου διανομής μέσω μηνυμάτων που μεταδίδονται από τις διαπεμπόμενες πηγές προς τους παραλήπτες. Στο μεσοδιάστημα της ανακατασκευής χρησιμοποιείται το παλιό δένδρο. Αντίστοιχα ο μηχανισμός Tree Morphing προτείνει την δυναμική ανακατασκευή του δένδρου με λειτουργίες που εκτελούνται αποκλειστικά εντός του δικτύου και δεν επηρεάζουν τα μέλη των ομάδων πολυεκπομπής.

Έχοντας αναλύσει το τεχνολογικό περιβάλλον που έχει επικρατήσει στα πλαίσια του Κινητού Διαδικτύου Πολυεκπομπής, στη συνέχεια η ανάλυση προχώρησε προς την λεπτομερή περιγραφή του γενικού πλαισίου εντός του οποίου θεωρείται η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής στις μέρες μας. Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν, τα οποία επιβεβαιώθηκαν και από την ανάλυση που ακολούθησε, ήταν:

- Η διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής απαιτεί την ανάπτυξη ενός μηχανισμού ο οποίος να αντιμετωπίζει τις ιδιαιτερότητες των εφαρμογών πολυεκπομπής αποκλειστικά, αναφορικά με την ανακατασκευή των δένδρων διανομής και την επανεκκίνηση των συνόδων πολυεκπομπής
- Απαιτείται ενοποιημένη προσέγγιση με τους μηχανισμούς διαχείρισης unicast κινητικότητας ώστε να μην επαναλαμβάνεται η εκτέλεση βασικών διαδικασιών για κάθε μία περίπτωση.
- Η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών απαιτεί τη λειτουργία ενός μηχανισμού που να πραγματοποιεί προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής μέσω του παλαιού δένδρου, για το

χρονικό διάστημα που απαιτείται μέχρις ότου ολοκληρωθεί η ανακατασκευή του δένδρου διανομής.

- Για την αντιμετώπιση φαινομένων απώλειας πακέτων λόγω αδυναμίας επικοινωνίας στο στρώμα ζεύξης και κακού συγχρονισμού μεταξύ των στρωμάτων ζεύξης και δικτύου απαιτείται η ανάπτυξη ενός μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης πακέτων πολυεκπομπής
- Με στόχο την βέλτιστη διαχείριση πόρων, οι διαδικασίες προώθησης και προσωρινής αποθήκευσης δεν πρέπει να πραγματοποιούνται αλόγιστα αλλά με γνώμονα τη διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης στο νέο δίκτυο. Στο ίδιο πλαίσιο θα πρέπει να αποφεύγονται και τα φαινόμενα σύγκλισης διόδων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των διαπομπών.

Έχοντας προσδιορίσει τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν, ώστε να είναι εφικτή η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής, προχωρήσαμε στην σχεδίαση ενός μηχανισμού ο οποίος είχε ως βασικό στόχο τον εκμηδενισμό της απώλειας που προκαλεί η διαπομπή στις εκτελούμενες εφαρμογές πολυεκπομπής, πραγματοποιεί βέλτιστη διαχείριση πόρων και δεν θέτει καμία επιπλέον απαίτηση κατά την εφαρμογή του (deployment) σε πραγματικά συστήματα (δηλαδή δεν απαιτεί ανάπτυξη ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής ή επέκταση των ήδη προτυποποιημένων μηχανισμών και πρωτοκόλλων της αρχιτεκτονικής IP Multicast). Ο προτεινόμενος μηχανισμός παρουσιάστηκε στη μορφή του πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB. Είναι βασισμένος στο πρωτόκολλο FMIPv6 και η σχεδίασή του στηρίχθηκε στην επέκταση των μηνυμάτων του τελευταίου για την υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής. Σαν αποτέλεσμα προδιαγράφηκε ένας μηχανισμός, που πετυχαίνει ενιαία υποστήριξη unicast και multicast διαπομπών στα πλαίσια του Κινητού Διαδικτύου. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Χρησιμοποιείται η υποδομή του FMIPv6 για την αντιμετώπιση των βασικών προβλημάτων που σχετίζονται με την κινητικότητα των πηγών και των παραληπτών κίνησης πολυεκπομπής. Αυτά αφορούν τις καθυστερήσεις που εισάγονται από τις διαδικασίες ρύθμιση της νέας διεύθυνσης του τερματικού, επισήμανσης μετακίνησης στο νέο δίκτυο και πρόσδεσης του τερματικού σε αυτό. Με τον όρο πρόσδεση εννοείται η αποκατάσταση της επικοινωνίας στο στρώμα δικτύου. Επίσης επιτυγχάνεται ανεξαρτησία από υποκείμενη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης, εφόσον χρησιμοποιείται η επέκταση της διεπαφής μεταξύ των στρωμάτων δικτύου και ζεύξης δεδομένων από το *Περιβάλλον Ταχέων Διαπομπών*.
- Πραγματοποιείται βέλτιστη διαχείριση δικτυακών πόρων στη μόνιμη κατάσταση. Για την αποκατάσταση της συνόδου πολυεκπομπής ακολουθείται η φιλοσοφία του μηχανισμού *Απομακρυσμένων Συμμετοχών*. Ως εκ τούτου απαιτείται η χρήση τεχνικών για την επίλυση των επιμέρους προβλημάτων που εισάγει αυτή. Οι συγκεκριμένες τεχνικές είναι:
 - ο Παραλήπτες κίνησης
 - Για τη μείωση του χρονικού διαστήματος αναμονής του ρεύματος κίνησης στο νέο σημείο πρόσδεσης του τερματικού

- το αίτημα επέκτασης του δένδρου διανομής εκδίδεται λίγο πριν την διαπομπή του τερματικού στο νέο δίκτυο
- επιχειρείται προώθηση του ρεύματος κίνησης πολυεκπομπής προς το νέο δίκτυο, εφόσον αυτό δεν είναι διαθέσιμο σε αυτό, επίσης πριν τη διαπομπή του τερματικού.
- Με στόχο τη μείωση της απώλειας των πακέτων πολυεκπομπής που προέρχεται από την αδυναμία επικοινωνίας του τερματικού κατά τη διάρκεια απώλειας της σύνδεσης στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, επιχειρείται προσωρινή αποθήκευση των πακέτων πολυεκπομπής για λογαριασμό του διαπεμπόμενου τερματικού και μόνο.
- Η διαδικασία σηματοδότησης, που υλοποιεί το μηχανισμό, σέβεται όλες τις αρχές της αρχιτεκτονικής *Πολυεκπομπής Διαδικτύου*, ώστε ο νέος δρομολογητής πρόσβασης διατηρεί το ρόλο του εντεταλμένου δρομολογητή πολυεκπομπής. Με αυτόν τον τρόπο προσφέρονται οι εξής δυνατότητες:
 - Υποστηρίζονται διαπομπές ανά ροή πολυεκπομπής ώστε να ικανοποιούνται τα χαρακτηριστικά της καθεμίας (ποιότητα, ασφάλεια) και δίνεται η δυνατότητα βέλτιστης διαχείρισης δικτυακών πόρων κατά την εκτέλεση ομαδικών διαπομπών.
 - Παρέχεται η δυνατότητα κεντρικού ελέγχου στη διαδικασία προώθησης των ροών πολυεκπομπής, στον κόμβο που έχει την απαιτούμενη πληροφορία για το νέο δίκτυο (διαθεσιμότητα ροής). Επίσης προσφέρεται η δυνατότητα συγχρονισμού των ρευμάτων κίνησης που αφικνούνται στο νέο δρομολογητή πρόσβασης εφόσον τα μεταφερόμενα πακέτα είναι αριθμημένα.
 - Δεν απαιτείται η παρακολούθηση της διαθεσιμότητας του ρεύματος πολυεκπομπής στο φυσικό μέσο από την πλευρά του τερματικού, εφόσον προβλέπεται ότι το ρεύμα θα καταστεί διαθέσιμο, είτε μέσω του προηγούμενου δικτύου, είτε μέσω του δένδρου διανομής, το συντομότερο δυνατό.
- ο Πηγές κίνησης
 - Υποστηρίζεται η διαλειτουργικότητα με το μηχανισμό *Οικείων Συμμετοχών* του MIP, ή τους προηγμένους μηχανισμούς *MSSMSv6* και *Tree Morphing*, για την προώθηση του ρεύματος κίνησης προς τον HA ή την ανακατασκευή του δένδρου διανομής αντίστοιχα.
 - Προσφέρεται η δυνατότητα προ-δραστικής ανακατασκευής της συνόδου πολυεκπομπής για τη ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος διακοπής της προσφερόμενης υπηρεσίας.
 - Απαιτείται η επέκταση του μηχανισμού *Route Optimization* του MIP για την περίπτωση της κινητικότητας πολυεκπομπής, ώστε να περιοριστούν τα προβλήματα που εισάγει η δυαδικότητα του ρόλου της διεύθυνσης της πηγής. Ως

εκ τούτου προτείνεται η χρήση της *Οικείας Διεύθυνσης* της πηγής (Home Address) κατά την παράδοση των πακέτων στρώματος δικτύου στα ανώτερα στρώματα και η χρήση της τρέχουσας διεύθυνσης της πηγής για τη δρομολόγηση των πακέτων προς τα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής. Η συγκεκριμένη πρόταση είναι επίσης συμβατή με τους μηχανισμούς *MSSMSv6* και *Tree Morphing*.

- Προσφέρεται η δυνατότητα εκμηδενισμού της απώλειας σε πακέτα μέσω των μηχανισμών που προσφέρει η βασική έκδοση του FMIPv6.
- Προσφέρεται η δυνατότητα ολοκλήρωσης με μηχανισμούς *Ποιότητας Υπηρεσίας* (QoS), που έχουν επικρατήσει στο Κινητό Διαδίκτυο.
- Επιτυγχάνεται καλή διαχείριση πόρων στην φάση εκτέλεσης της διαπομπής και στην μόνιμη κατάσταση (κλιμάκωση). Επίσης, για τις περιπτώσεις πολύ γρήγορων διαπομπών μεταξύ των ίδιων ή διαφορετικών δικτύων, ή λανθασμένων προβλέψεων, παρέχεται η δυνατότητα καταστολής της διαδικασίας προώθησης της κίνησης από το παλιό δίκτυο.
- Προσφέρεται η δυνατότητα λειτουργίας προ-δραστικά ή μετα-δραστικά της διαπομπής στρώματος ζεύξης αυξάνοντας την ευρωστία του μηχανισμού. Η συγκεκριμένη επιλογή μπορεί να ενεργοποιηθεί ανάλογα και με το είδος της εκτελούμενης εφαρμογής εφαρμόζοντας την πολιτική του δικτύου για την υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών μόνο για την περίπτωση εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Επίσης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που το κινητό διαπέμπεται μεταξύ δικτύων πρόσβασης πολύ γρήγορα με στόχο την προώθηση του ρεύματος κίνησης προς το κατάλληλο δίκτυο το συντομότερο δυνατό (πλήρως μετα-δραστικές διαπομπές).

Ακολουθώς περιγράφηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου πρωτόκολλου ώστε να ξεκαθαριστούν τα σημεία υπεροχής του, αλλά και τα σημεία στα οποία υστερεί, σε σχέση με τους εφάμιλλους μηχανισμούς που παρουσιάστηκαν νωρίτερα. Η ανάλυση κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

- Ο προτεινόμενος μηχανισμός εκμεταλλεύεται στο έπακρο τα χαρακτηριστικά του FMIPv6 και του περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών, αναφορικά με την προ-δραστική προσέγγιση στο ζήτημα της διαχείρισης κινητικότητας, με στόχο την εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής. Οι άλλοι μηχανισμοί ακολουθούν μία μετα-δραστική προσέγγιση η οποία έχει άμεσες συνέπειες στην διαδικασία προώθησης του ρεύματος πολυεκπομπής στο νέο δίκτυο. Η προ-δραστική προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα περιορισμού του χρονικού διαστήματος στο οποίο δεν είναι διαθέσιμο το ρεύμα κίνησης στο νέο δίκτυο (αμέσως μετά την σύνδεσή ενός παραλήπτη σε αυτό). Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση των κινούμενων πηγών, κατά την οποία παρέχεται η δυνατότητα προ-δραστικής ανακατασκευής του δένδρου διανομής και επανεκκίνησης της συνόδου πολυεκπομπής
- Το M-FMIPv6/FTB δεν καταστρατηγεί αλλά αντίθετα διατηρεί όλα τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής IP Multicast, εκτός από τη μόνιμη κατάσταση και κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του φαινομένου της διαπομπής επιτυγχάνοντας:

- ο Ευκολία στην εφαρμογή σε πραγματικά συστήματα
 - ο Συγκέντρωση της απαραίτητης λειτουργικότητας στην πλευρά του δικτύου ώστε αφενός να περιοριστεί η αβεβαιότητα αναφορικά με τη διαθεσιμότητα του ρεύματος κίνησης στην πλευρά του τερματικού (οι άλλοι μηχανισμοί δεν το πετυχαίνουν) και αφετέρου να επιτευχθεί βέλτιστη διαχείριση δικτυακών πόρων κατά την εκτέλεση της διαπομπής (ομαδικές διαπομπές)
 - ο Παρέχεται η δυνατότητα αντιμετώπισης του φαινομένου καθυστερημένης αποχώρησης του προηγούμενου δρομολογητή πρόσβασης από το δένδρο διανομής (leave latency)
- Αρνητικό σημείο αποτελεί η εξάρτηση από τη λειτουργία του μηχανισμού παράδοσης ενδείξεων από το στρώμα ζεύξης και του μηχανισμού εκτέλεσης προβλέψεων αναφορικά με το δίκτυο στο οποίο θα διαπεμφθεί το τερματικό. Εντούτοις, ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση, ο προτεινόμενος μηχανισμός, κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του, παρουσιάζει αντίστοιχη λειτουργία με τους εφάμιλλούς του.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν δύο προτάσεις για την εφαρμογή του M-FMIPv6/FTB σε πραγματικά και μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών, όπως το IEEE 802.11 WLAN και τα συστήματα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς που ακολουθούν την αρχιτεκτονική All-IP για το δίκτυο πυρήνα. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στην εκτέλεση οριζοντίων διαπομπών, δηλαδή διαπομπών μεταξύ ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία στο ασύρματο μέσο. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

Για το σύστημα WLAN και γενικά κατά την εκτέλεση οξείων διαπομπών (hard handovers) αποκλειστικά ελεγχόμενων από το τερματικό, η ανάλυση έδειξε ότι πολύ σημαντικό ρόλο παίζει ο συγχρονισμός των διαδικασιών που εκτελούνται στο στρώμα ζεύξης δεδομένων και το στρώμα δικτύου, στο οποίο εκτελείται ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας πολυεκπομπής. Έχοντας δεδομένη τη μη διαθεσιμότητα της ζεύξης για κάποιο χρονικό διάστημα, η επίτευξη του συγχρονισμού έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία δεν είναι διαθέσιμο το ρεύμα κίνησης στο στρώμα δικτύου. Αυτή είναι η καλύτερη επίδοση που μπορεί να επιτευχθεί για το σύστημα.

Από την άλλη, για τα συστήματα 4^{ης} γενιάς, τα πράγματα είναι περισσότερο σύνθετα. Κατ' αρχήν, με βάση την προδιαγραφή της υπηρεσίας MBMS που περιγράφεται στο Παράρτημα Β, προβλέπεται ότι το δίκτυο πρόσβασης UTRAN δεν προσφέρει τη δυνατότητα προώθησης της κίνησης πολυεκπομπής μεταξύ των κόμβων SGSN κατά τη διαπομπή ενός τερματικού. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μειώνεται η πολυπλοκότητα και το φορτίο σηματοδότησης της διαδικασίας, αλλά να μην είναι εφικτή η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών. Ακόμη πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι για τις υπηρεσίες MBMS, οι προδιαγραφές δεν προβλέπουν τη δυνατότητα εκτέλεσης αμβλειών διαπομπών (soft handovers) εσωτερικά στο δίκτυο πρόσβασης, μέσω των τεχνολογιών macro-diversity. Κατά συνέπεια η λειτουργία του μηχανισμού προώθησης κίνησης και προσωρινής αποθήκευσης πακέτων πολυεκπομπής, που προσφέρει το M-FMIPv6/FTB, μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά σε αυτό το σημείο. Επιπρόσθετα, μέσα από τη διαδικασία σηματοδότησης

που προτάθηκε, αναδείχθηκε ο ρόλος που έχει η διαδικασία context transfer στην υποστήριξη διαπομπών πολυεκπομπής ως ένας μηχανισμός που παρέχει τις εξής δυνατότητες:

- ακριβή ενημέρωση του νέου δικτύου πρόσβασης αναφορικά με την επικείμενη διαπομπή του τερματικού
- προ-δραστική εγκατάσταση της πληροφορίας πολυεκπομπής και ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση δικτυακών πόρων κατά τη διάρκεια της διαπομπής για λογαριασμό του διαπεμπόμενου τερματικού

Έχοντας παρουσιάσει το πλήρες περιβάλλον και το σύνολο των χαρακτηριστικών εντός του οποίου θεωρείται η λειτουργία του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, στη συνέχεια προχωρήσαμε στην αξιολόγηση της επίδοσής του μέσω προσομοίωσης με χρήση του εργαλείου OPNET. Στο πλαίσιο των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, θεωρήθηκε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον εσωτερικού χώρου, μίας τοπολογία δύο τοπικών ασύρματων δικτύων WLAN IEEE 802.11, στο οποίο μοντελοποιήθηκε η τυχαία φύση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος και η κινητικότητα των τερματικών που διαπέμπονται μεταξύ των δικτύων. Δεδομένου ότι δεν είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν όλες οι παράμετροι που μπορεί να επηρεάσουν την επίδοση ενός μηχανισμού, βασικός στόχος ήταν η συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος με τους εφάμιλλους μηχανισμούς που παρουσιάστηκαν νωρίτερα. Η αξιολόγηση έγινε ως προς παραμέτρους που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο σκανδαλίζεται η λειτουργία των μηχανισμών και τα χαρακτηριστικά της τοπολογίας που χρησιμοποιήθηκε. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη είναι τα εξής:

- Ο προτεινόμενος μηχανισμός εκμεταλλεύεται στο έπακρο τις δυνατότητες που προσφέρονται από το πρωτόκολλο FMIPv6 και το περιβάλλον ταχέων διαπομπών για την προ-δραστική εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών πολυεκπομπής. Σε αυτό το πλαίσιο επιτυγχάνεται εκμηδενισμός της επίδρασης που προκαλεί η διαπομπή πολυεκπομπής στην ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών. Οι εφάμιλλοι μηχανισμοί δεν είναι σε θέση να εκμηδενίσουν την επίδραση της ποιότητας επειδή ακριβώς ακολουθούν μία μετα-δραστική φιλοσοφία στην αντιμετώπιση της κινητικότητας πολυεκπομπής.
- Η συνδυασμένη λειτουργία των μηχανισμών προώθησης κίνησης από το προηγούμενο δίκτυο και προσωρινής αποθήκευσης πακέτων πολυεκπομπής είναι οι βασικοί λόγοι για τον εκμηδενισμό την επίδρασης της ποιότητας στις εκτελούμενες υπηρεσίες. Τα οφέλη από τη λειτουργία τους αφορούν ακριβώς το γεγονός ότι λειτουργούν προ-δραστικά της διαπομπής. Οι υπόλοιποι μηχανισμοί δεν έχουν τη δυνατότητα χρήσης μηχανισμών αποθήκευσης πακέτων για λογαριασμό του χρήστη εφόσον ακολουθούν μία μετα-δραστική προσέγγιση στο θέμα.
- Η προ-δραστική προσέγγιση στο ζήτημα της προώθησης της κίνησης στο νέο δίκτυο, δίνει τη δυνατότητα περιορισμού της επίδρασης που έχουν τα χαρακτηριστικά της δικτυακής τοπολογίας, στην περίπτωση δια-τομεακών διαπομπών (inter-domain handovers).
- Το M-FMIPv6/FTB εμφανίζει πάρα πολύ καλή επίδοση σε ότι αφορά τις ομαδικές διαπομπές τερματικών προς το ίδιο δίκτυο.

- Ο προτεινόμενος μηχανισμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη λειτουργία του *Περιβάλλοντος Ταχέων Διαπομπών* και των μηχανισμών που το συνθέτουν, που αφορούν στην πρόβλεψη και προετοιμασία της διαπομπής. Η συγκεκριμένη αδυναμία εντούτοις αφορά το γενικότερο πλαίσιο που εισάγει το πρωτόκολλο FMIPv6 και δεν σχετίζεται αποκλειστικά με τις διαπομπές πολυεκπομπής. Στις μέρες μας καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη των συγκεκριμένων μηχανισμών μέσω της ομάδας IEEE 802.21 και την προδιαγραφή της υπηρεσίας Media Independent Handovers. Η επίδραση του *Περιβάλλοντος Ταχέων Διαπομπών* στην επίδοση του M-FMIPv6/FTB έχει ως εξής:
 - ο Δεν είναι πάντα εφικτή η λειτουργία του M-FMIPv6/FTB με προ-δραστικό τρόπο. Κατά τη μετα-δραστική λειτουργία του λαμβάνει χώρα απώλεια πακέτων.
 - ο Οι λανθασμένες προβλέψεις οδηγούν στην εκτέλεση πλήρων μετα-δραστικών διαπομπών που εμφανίζουν τη χειρότερη επίδοση.
 - ο Όταν ο σκανδαλισμός της διαδικασίας προετοιμασίας της διαπομπής δε θα πρέπει να πραγματοποιείται πολύ νωρίτερα από το χρονικό σημείο στο οποίο εκτελείται η διαπομπή στρώματος ζεύξης, διότι έτσι αυξάνεται η πιθανότητα πραγματοποίησης λανθασμένων προβλέψεων.
 - ο Απαιτείται η ανάπτυξη ενός μηχανισμού προβλέψεων διαπομπών ο οποίος να λαμβάνει υπόψη του την ταχύτητα του κινητού κόμβου, ώστε επίσης να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα λανθασμένων προβλέψεων.
- Μια αδυναμία του προτεινόμενου μηχανισμού είναι η μεγαλύτερη κατανάλωση πόρων σε σχέση με τους υπόλοιπους μηχανισμούς για την υποστήριξη της διαπομπής (προώθηση κίνησης και προσωρινή αποθήκευση πακέτων), που προέρχεται από την προ-δραστική προσέγγιση που ακολουθείται. Το ποσοστό της αύξησης σχετίζεται με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της προσφερόμενης υπηρεσίας. Η αντιμετώπιση της συγκεκριμένης αδυναμίας μπορεί να επιτευχθεί με τον *απόλυτο συγχρονισμό* των διαδικασιών, που εκτελούνται στα στρώματα ζεύξης και δικτύου, ώστε να περιοριστεί το διάστημα που προηγείται της διαπομπής και κατά το οποίο καταναλώνονται πόροι για την επικείμενη εκτέλεσή της. Ο συγκεκριμένος τρόπος δίνει επίσης τη δυνατότητα μείωσης της πιθανότητας εκτέλεσης λανθασμένης διαπομπής.

Σαν ένα γενικό συμπέρασμα, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι το προτεινόμενο από τη διατριβή πρωτόκολλο M-FMIPv6/FTB, παρουσιάζει την πλέον αποδοτική λύση από την άποψη μείωσης της διαταραχής που μπορεί να προκαλέσει η εκτέλεση μίας διαπομπής στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας, με ένα επιπλέον κόστος στην κατανάλωση πόρων για την υποστήριξή της. Βασικό ζήτημα για την αποδοτική λειτουργία του μηχανισμού είναι η αντίστοιχα αποδοτική λειτουργία των βοηθητικών μηχανισμών του πρωτοκόλλου FMIPv6, που αφορούν την προετοιμασία και εκτέλεση της διαπομπής στρώματος δικτύου. Η βέλτιστη λειτουργία των συγκεκριμένων μηχανισμών έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των αρνητικών συνεπειών που προκαλεί η προ-δραστική προώθηση των πακέτων πολυεκπομπής, που προτείνεται από το M-FMIPv6/FTB, αλλά και τον περιορισμό διαπομπών πλήρως μετα-δραστικού τύπου στις οποίες παρατηρήθηκε η χειρότερη επίδοση.

5.2 Περιοχές Μελλοντικής Έρευνας

Η λειτουργία του προτεινόμενου από τη διατριβή πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, αν και επιτυγχάνει την αντιμετώπιση μίας πλειάδας προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαχείριση κινητικότητας πολυεκπομπής, αφήνει ορισμένα σημεία που επιδέχονται περεταίρω διερεύνηση και περιγράφονται στη συνέχεια.

Κατά την αξιολόγηση του προτεινόμενου μηχανισμού, έγινε σαφές ότι η επίδοσή του επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη λειτουργία των μηχανισμών που συνθέτουν το λεγόμενο *Περιβάλλον Ταχέων Διαπομπών*. Η λειτουργία του τελευταίου αφορά το γενικότερο πλαίσιο που ορίζει το πρωτόκολλο FMIPv6 και όχι μόνο την υποστήριξη των διαπομπών πολυεκπομπής. Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε [1], φάνηκε ότι ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στις δυνατότητες που αυτό προσφέρει αναφορικά με την πρόβλεψη και τον έλεγχο της προόδου μίας διαπομπής. Τα πεδία που επιδέχονται βελτιώσεις, αφορούν εκτός από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθούν έγκυρες προβλέψεις, επιπλέον στους τρόπους με τους οποίους είναι δυνατό να επιτευχθεί *συγχρονισμός* των διαδικασιών που εκτελούνται στα στρώματα ζεύξης και δικτύου. Ο συγκεκριμένος συγχρονισμός έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό των αρνητικών συνεπειών που προέρχονται από τις λανθασμένες προβλέψεις ή τις μεγάλες καθυστερήσεις στην αναμονή της διαπομπής στρώματος ζεύξης. Για την περίπτωση των διαπομπών πολυεκπομπής περιορίζουν ή εκμηδενίζουν το διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται προ-δραστική προώθηση της κίνησης πολυεκπομπής, μεταξύ του παλαιού και του νέου δικτύου και ελαχιστοποιούν το ποσό των δικτυακών πόρων που καταναλώνονται για την υποστήριξή της. Έχοντας ως δεδομένο ότι ο μηχανισμός επιτυγχάνει τη βέλτιστη επίδοσή του όταν λειτουργεί προ-δραστικά, είναι επιθυμητό να υπάρχει ένας τρόπος που να εξασφαλίζει ακριβώς αυτό. Επιπρόσθετη έρευνα απαιτείται και σε ότι αφορά τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η ταχύτητα του τερματικού τη λειτουργία του *περιβάλλοντος ταχέων διαπομπών*. Σημείο εκκίνησης για το συγκεκριμένο ζήτημα αποτελεί η αποτίμηση παραμέτρων ποιότητας της ζεύξης που έχουν τη δυνατότητα να δώσουν αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με την τρέχουσα τιμή της ταχύτητας. Στη συνέχεια απαιτείται η προσαρμογή των συγκεκριμένων συμπερασμάτων στη διαδικασία διεξαγωγής προβλέψεων αλλά στον αλγόριθμο εκτέλεσης της διαπομπής.

Ένα άλλο πεδίο έρευνας αφορά στην πληροφορία που μεταφέρεται μέσω της διαδικασίας σηματοδότησης που προβλέπει η λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού. Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε δόθηκε ιδιαίτερο βάρος στο λειτουργικό κομμάτι της διαπομπής, που σχετίζεται με την μεταφορά του *πλαισίου πληροφορίας (information context)* πολυεκπομπής. Η υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών *εγγυημένης ποιότητας* απαιτεί τη μεταφορά της επιπλέον *πληροφορίας ποιότητας υπηρεσίας (QoS Context)*. Η πληροφορία αυτή επηρεάζει τόσο την εκτέλεση της διαπομπής, όσο και τη διαχείριση πόρων στη μόνιμη κατάσταση (που ακολουθεί τη διαπομπή). Η ροή πληροφορίας QoS, μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση ήδη προτυποποιημένων μηχανισμών που έχουν επικρατήσει στα IP δίκτυα, όπως των μηχανισμών IntServ και DiffServ. Το ζητούμενο εντούτοις είναι ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο μπορεί να εφαρμοστούν οι πολιτικές διαχείρισης πόρων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαπομπής, ώστε να εξασφαλιστεί η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών. Στο ίδιο μήκος κύματος απαιτείται και η διερεύνηση

διαδικασιών *context transfer*, για την υποστήριξη λειτουργιών διασφαλισμένης επικοινωνίας και AAA (Authentication, Authorization, Accounting). Όπως αναλύθηκε, οι λειτουργίες αυτές μπορούν να υποστηριχθούν μέσω των πρωτοκόλλων CXTCP (Context Transfer Protocol) και CARD (Candidate Access Router Discovery). Επίσης ζητούμενο είναι να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις που θέτουν οι εφαρμογές πολυεκπομπής για το περιεχόμενο των συγκεκριμένων ροών πληροφορίας και τα παραπάνω πρωτόκολλα για την υποστήριξη απρόσκοπτων διαπομπών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη και η αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού σε ένα περιβάλλον που ακολουθεί την αρχιτεκτονική All-IP, αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης ζεύξης. Η ανάλυση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, εστίασε στη λειτουργία δικτύων τοπικής κλίμακας, εσωτερικού χώρου. Επιπρόσθετα όμως, η περίπτωση μεγαλύτερων σε κλίμακα δικτύων, εξωτερικού περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα των δικτύων 4^{ης} γενιάς ή μητροπολιτικών ασύρματων δικτύων που ακολουθούν το πρότυπο IEEE 802.16, χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Ιδίως για τα πρώτα, η μελέτη μπορεί να κατευθυνθεί προς τα ζητήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ των υπηρεσιών IP Multicast και MBMS, που περιγράφονται στο Παράρτημα Β. Στο πλαίσιο αυτό, μπορεί να μελετηθεί πιο διεξοδικά η επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού κατά την εκτέλεση κατακόρυφων διαπομπών, δηλαδή διαπομπών μεταξύ ετερογενών δικτύων πρόσβασης, όπου τα τερματικά έχουν, ή όχι, τη δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης σε πολλά δίκτυα (multi-homing). Αντίστοιχο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι τεχνολογίες κινητικότητας δικτύων. Η ομάδα εργασίας NEMO (Network Mobility) [2], του οργανισμού IETF, ασχολείται με την μελέτη της συγκεκριμένης περιοχής. Το ζητούμενο είναι να προσδιοριστεί πώς μπορεί να εφαρμοστεί ο προτεινόμενος μηχανισμός στην περίπτωση των κινητών δικτύων, ώστε να μειωθεί το φορτίο σηματοδότησης που προκαλεί η ομαδική διαπομπή, να επιτευχθεί βέλτιστη διαχείριση πόρων και να υποστηριχθεί η εκτέλεση απρόσκοπτων διαπομπών για τα τερματικά που ανήκουν σε αυτά.

Μέσω του προτεινόμενου πρωτοκόλλου M-FMIPv6/FTB, παρουσιάστηκε ένας αυτόνομος μηχανισμός προ-δραστικής αποθήκευσης πακέτων πολυεκπομπής (multicast buffering), για λογαριασμό των διαπεμπόμενων τερματικών. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αξιολογήθηκε μόνο για μία εφαρμογή πραγματικού χρόνου βέλτιστης προσπάθειας. Στον αντίποδα αυτής της περίπτωσης, εξαιρετικά ενδιαφέρουσα είναι η αξιολόγηση με χρήση εφαρμογών που χρησιμοποιούν μηχανισμούς εγγυημένης μεταφοράς πακέτων πολυεκπομπής. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατό να αναδειχθεί η επίδραση του μηχανισμού buffering στην ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών πολυεκπομπής στους κινούμενους χρήστες. Η ομάδα εργασίας RMT (Reliable Multicast Transfer) [3], του οργανισμού IETF, ασχολείται με την προτυποποίησή μηχανισμών αξιόπιστης μεταφοράς ρευμάτων πολυεκπομπής, χωρίς να επικεντρώνει σε προβλήματα ή απαιτήσεις που προκύπτουν από την κινητικότητα των τερματικών.

Τέλος, επιπλέον αξιολόγησης χρήζει η δυνατότητα που προσφέρει ο προτεινόμενος μηχανισμός σχετικά με την προ-δραστική ανακατασκευή των δένδρων διανομής, στην περίπτωση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής. Έχοντας ως δεδομένο ότι η ανακατασκευή του δένδρου διανομής προκαλεί τη γέννηση μεγάλου φορτίου σηματοδότησης και επηρεάζει όλα τα μέλη που συμμετέχουν στην σύνοδο πολυεκπομπής, δεν είναι ορθό να επιχειρείται εφόσον η βεβαιότητα

εκτέλεσης μίας διαπομπής δεν είναι μεγάλη. Στο πλαίσιο αυτό απαιτείται να αξιολογηθούν οι συνέπειες που έχει εν γένει η προ-δραστική ανακατασκευή των δένδρων διανομής, ώστε να πιστοποιηθούν τα οφέλη και οι ζημίες που αποκομίζονται και προκαλούνται αντίστοιχα, σε περιπτώσεις που οι προβλέψεις των διαπομπών είναι περιορισμένης αξιοπιστίας.

5.3 Βιβλιογραφία

- [1] G. Leoleis and I. Venieris, "Fast MIPv6 extensions supporting seamless multicast handovers", *Computer Networks*, Vol. 51, No. 9, pp. 2379-2396, June 2007
- [2] IETF NEMO (Network Mobility) Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/nemo-charter.html>
- [3] IETF RMT (Reliable Multicast Transfer) Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/rmt-charter.html>

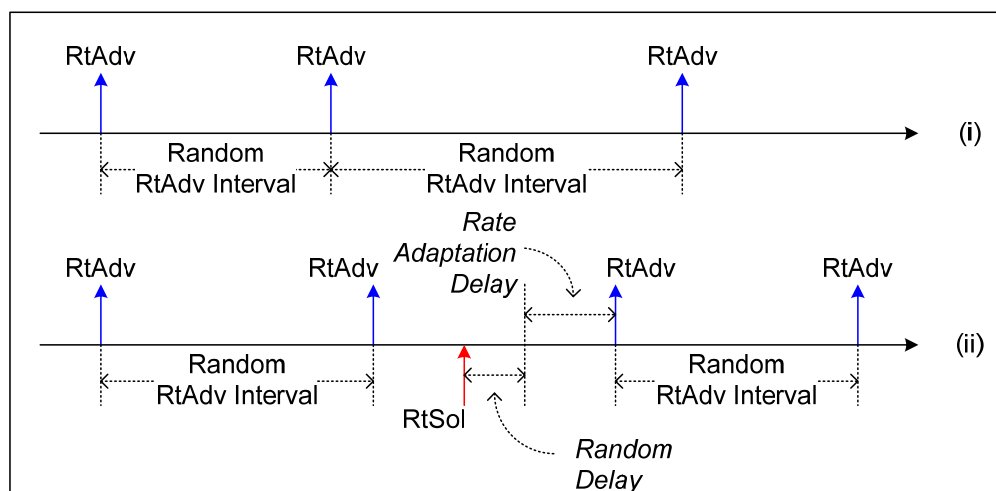
Παράρτημα Α

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΙΑΠΟΜΠΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ IPv6

Στο παράρτημα περιγράφονται λεπτομερώς οι διαδικασίες που εκτελούνται από ένα κινητό κόμβο, κατά την διάρκεια μίας διαπομπής στρώματος δικτύου, μεταξύ συστημάτων που βασίζονται στο πρωτόκολλο IPv6. Ειδικότερα αναλύονται οι λειτουργίες που προβλέπονται από τα πρωτόκολλα Neighbor Discovery for IPv6 και Mobile IPv6. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην περιγραφή των πηγών καθυστέρησης των διαδικασιών διαχείρισης κινητικότητας όπως η "Ανακάλυψη Δρομολογητή", η "Ρύθμιση Διεύθυνσης" και η "Επισήμανση Μετακίνησης". Οι συγκεκριμένες διαδικασίες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ταχύτητα εκτέλεσης της διαπομπής και επηρεάζουν κυρίως την ποιότητα των εκτελούμενων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Επίσης αναλύονται οι διάφορες πηγές καθυστέρησης που προέρχονται από την εκτέλεση των διαδικασιών "Οικείας Εγγραφής" και "Εγγραφής Ανταποκριτών" που προβλέπει το πρωτόκολλο MIPv6.

A.1 Ανακάλυψη Δρομολογητή – Router Discovery

Το πρωτόκολλο Neighbor Discovery for IPv6 (ND) [1]-[2], προβλέπει ότι ένας τερματικός κόμβος (host) είναι σε θέση να συλλέξει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη δρομολογητών στο υποδίκτυο στο οποίο βρίσκεται συνδεδεμένος, κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Ανακάλυψη Δρομολογητή*. Σύμφωνα με αυτήν, κάθε συνδεδεμένος κόμβος σε ένα υποδίκτυο, λαμβάνει μηνύματα *Ανακοίνωση Δρομολογητή* (Router Advertisement, RA) τα οποία περιέχουν κατάλληλα προθήματα διευθύνσεων (address prefixes) που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο υποδίκτυο. Τα μηνύματα μεταδίδονται περιοδικά από τους δρομολογητές που εξυπηρετούν το υποδίκτυο. Το πρωτόκολλο επίσης προβλέπει πως ένας τερματικός κόμβος έχει τη δυνατότητα να υιοθετήσει μία πιο ενεργητική στάση αναφορικά με το χρονισμό της διαδικασίας, οπότε μπορεί *αυτόβουλα* να αποστείλει ένα μήνυμα *Πρόσκλησης Δρομολογητή για αποστολή Ανακοίνωσης* (Router Solicitation, RS), με το οποίο εκδηλώνει στους συνδεδεμένους στο υποδίκτυο δρομολογητές την επιθυμία του να στείλουν ένα μήνυμα RA. Τόσο τα μηνύματα RA όσο και τα RS έχουν σαν διεύθυνση προορισμού εκ των προτέρων προκαθορισμένες διευθύνσεις πολυεκπομπής για τις οποίες προβλέπεται ότι κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μηνύματα (δεδομένου ότι έχει ενεργοποιημένη μία φυσική διεπαφή σε ένα IPv6 υποδίκτυο). Οι διευθύνσεις αυτές είναι οι *all-nodes-multicast-address* και *all-routers-multicast-address*, για τα RA και RS αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που το μήνυμα RA στέλνεται σαν απάντηση ενός μηνύματος RS, ο δρομολογητής είναι υποχρεωμένος να καθυστερήσει την αποστολή του για ένα τυχαίο χρονικά διάστημα³⁵ (από 0 μέχρι 500 sec).



Σχήμα Α - 1. Χρονισμός Μηνυμάτων RA και RS σύμφωνα με το πρωτόκολλο Neighbor Discovery for IPv6

Το πρωτόκολλο ND καθορίζει την περίοδο εκπομπής των μηνυμάτων RA και επιτρέπει η τιμή της να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[min\_RtAdv\_interval, max\_RtAdv\_interval]$. Επίσης προβλέπει τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές τόσο για το *min_RtAdv_interval* όσο και για το *max_RtAdv_interval* ώστε οι επιτρεπόμενες τιμές της περιόδου να κυμαίνονται μεταξύ 3 και 1800 sec. Βασικό σημείο αναφορικά με την περίοδο εκπομπής των μηνυμάτων RA αποτελεί ο

³⁵ Η χρονική καθυστέρηση επιβάλλεται από την ανάγκη αποφυγής φαινομένων συμφόρησης του δικτύου στην περίπτωση που στο υποδίκτυο υπάρχουν περισσότεροι του ενός δρομολογητές.

αυστηρός περιορισμός του ρυθμού με τον οποίον εκπέμπονται, ο οποίος δεν μπορεί να είναι μικρότερος από ένα μήνυμα κάθε 3 sec. Ο περιορισμός ισχύει και για την περίπτωση που ένας δρομολογητής αποστέλλει το μήνυμα RA σαν απάντηση σε ένα μήνυμα RS. Το Σχήμα A - 1 απεικονίζει το χρονισμό της διαδικασίας αποστολής μηνυμάτων RA στις περιπτώσεις που αυτά στέλνονται περιοδικά ή σαν απάντηση της άφιξης ενός μηνύματος RS. Η περίπτωση (i) του σχήματος απεικονίζει την τυπική περίπτωση περιοδικής μετάδοσης μηνυμάτων RA. Αντίστοιχα η περίπτωση (ii) απεικονίζει τον χρονισμό στην περίπτωση που ένας κόμβος στέλνει αυτόβουλα ένα μήνυμα RS. Όπως φαίνεται στο σχήμα, στην περίπτωση (ii), η αποστολή του RA, καθυστερείται από τον δρομολογητή κατά (a) ένα τυχαίο χρονικό διάστημα ομοιόμορφα κατανομημένο στο διάστημα [0, 500] msec και (b) κατά ένα χρονικό διάστημα απαραίτητο ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση για περιορισμό του ρυθμού μετάδοσης των μηνυμάτων RA σε ένα ανά 3 sec.

A.2 Ρύθμιση IPv6 Διεύθυνσης – Address Autoconfiguration

Με βάση τις αρχές διευθυνσιοδότησης [3] των συστημάτων που είναι βασισμένα στο πρωτόκολλο IPv6 [4], κάθε κόμβος είναι υποχρεωμένος να χρησιμοποιεί τουλάχιστο μία έγκυρη διεύθυνση για κάθε ένα από τα φυσικά υποδίκτυα στα οποία είναι συνδεδεμένος. Ανάλογα με την εμβέλεια της διεύθυνσης, καθίσταται εφικτή η επικοινωνία του κόμβου στο αντίστοιχο δίκτυο (τοπικό υποδίκτυο, αυτόνομη περιοχή, Διαδίκτυο). Ο σχηματισμός μίας διεύθυνσης IPv6, πραγματοποιείται συνδυάζοντας ένα *πρόθημα* (*prefix*), που αναγνωρίζει την εμβέλειά της και το υποδίκτυο στο οποίο βρίσκεται ο κόμβος, και ένα *επίθημα* (*suffix*) που ταυτοποιεί το τερματικό ή πιο αυστηρά την διεπαφή στρώματος δικτύου ενός τερματικού προς το στρώμα σύνδεσης δεδομένων (ενδέχεται ένα τερματικό να έχει πολλαπλές διεπαφές προς το ίδιο ή διαφορετικά φυσικά δίκτυα). Αναφορικά με το πρόθημα, η εμβέλεια μίας unicast IPv6 διεύθυνσης [3], καθορίζεται από τα πρώτα 10 bits της και μπορεί να είναι τριών τύπων: *link-local*, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για επικοινωνία μεταξύ κόμβων που ανήκουν στο ίδιο υποδίκτυο και μόνο, *site-local* για επικοινωνία αντίστοιχα σε μία συγκεκριμένη περιοχή, και *global* για επικοινωνία σε ολόκληρο το Διαδίκτυο. Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται το πρόθημα απαιτεί τη συνδρομή του διαχειριστή του υποδικτύου (για τις global διευθύνσεις), και συνεπώς δεν τίθεται θέμα μοναδικότητας. Ο καθορισμός του επιθήματος πραγματοποιείται με αυτόματο τρόπο οπότε χρήζει ιδιαίτερης προσοχής δεδομένου ότι θα πρέπει να εξασφαλιστεί η μοναδικότητα της διεύθυνσης με βάση την εμβέλειά της. Το επίθημα σχηματίζεται με 3 τρόπους: απευθείας ανάθεση από μία λίστα διαθέσιμων επιθεμάτων, επιλογή ενός τυχαίου αριθμού με βάση κάποιο αλγόριθμο και με δημιουργία μέσω αντιστοίχισης από το αναγνωριστικό που χρησιμοποιείται σαν διεύθυνση του στρώματος σύνδεσης δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση πάντως, το επίθημα ταυτοποιεί τη συγκεκριμένη διεπαφή του κόμβου στο υποδίκτυο και γι αυτό ονομάζεται *αναγνωριστικό διεπαφής* (*interface identifier*).

Με στόχο τη ρύθμιση της IPv6 διεύθυνσης που αντιστοιχεί σε μία διεπαφή ενός κόμβου προς τα υποδίκτυα στα οποία είναι συνδεδεμένος, έχουν προδιαγραφεί δύο μηχανισμοί. Αυτοί είναι οι: *Αυτόματη Ρύθμιση Διεύθυνσης Χωρίς Χρήση Υπάρχουσας Κατάστασης* (*Stateless Address*

Autoconfiguration), και αντίστοιχα *Με Χρήση Υπάρχουσας Κατάστασης (Statefull Address Autoconfiguration)*. Ο δεύτερος εμπλέκει τη μεσολάβηση ενός εντεταλμένου για αυτό το σκοπό εξυπηρετητή που έχει προδιαγραφεί από το πρωτόκολλο Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) [5]. Ο πρώτος δεν εμπλέκει κάποιον εξυπηρετητή, αλλά αντίθετα η ρύθμιση πραγματοποιείται με τη συνεργασία του εκάστοτε κόμβου και του δρομολογητή πρόσβασης που εξυπηρετεί το υποδίκτυο στο οποίο συνδέεται και μέσω του οποίου επιθυμείται η διασύνδεση με το υπόλοιπο Διαδίκτυο. Στα επόμενα δεν θα μας απασχολήσει η περίπτωση του statefull μηχανισμού δεδομένου ότι αφ' ενός είναι περισσότερο χρονοβόρα κι αφ' ετέρου υποτίθεται ότι κάθε IPv6 υποδίκτυο υποστηρίζει τη stateless λειτουργία.

Με βάση το μηχανισμό *Αυτόματης Ρύθμισης Διεύθυνσης χωρίς χρήση υπάρχουσας κατάστασης (Stateless Address Autoconfiguration)* που περιγράφεται στο [6], ή στην νεότερη έκδοσή του [7], ένας κινητός κόμβος μπορεί να αυτόματα να ρυθμίσει τη διεύθυνσή του, δηλαδή να αποκτήσει μία παγκόσμια μοναδική διεύθυνση. Αυτό πραγματοποιείται ανταλλάσσοντας μηνύματα με το δρομολογητή του υποδικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένος, σύμφωνα με τη διαδικασία *Ανακάλυψης Δρομολογητή*. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε δρομολογητής εισάγει στα μηνύματα RA που εκπέμπει περιοδικά σε κάθε υποδίκτυο, το πρόθημα διευθύνσεων που αντιστοιχεί σε αυτό. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα RA, έχει τη δυνατότητα σε συνδυασμό με το επιλεγμένο από τον ίδιο επίθημα, να σχηματίσει μία μοναδική διεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο, δεδομένης της μοναδικότητας του προθήματος, η μοναδικότητα της διεύθυνσης βασίζεται στην μοναδικότητα του επιθήματος που χρησιμοποιεί κάθε κόμβος. Το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι για τη διασφάλιση της μοναδικότητας του επιθήματος ικανή και αναγκαία συνθήκη είναι να εξασφαλιστεί η μοναδικότητα της link-local διεύθυνσής του (δεδομένου ότι το πρόθημα είναι προκαθορισμένο, δηλ. FF80::/10 και του ότι το επίθημα έχει μέγεθος 64 bits). Για να καταστεί αυτό εφικτό χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Επισήμανσης Διπλότυπης Διεύθυνσης (Duplicate Address Detection, DAD)*. Ο μηχανισμός DAD περιλαμβάνει την αποστολή μηνυμάτων του πρωτοκόλλου ND, που επιβεβαιώνουν την χρήση ή όχι μίας διεύθυνσης από έναν κόμβο σε ένα υποδίκτυο. Η εκτέλεσή του πραγματοποιείται κατανεμημένα, δηλαδή με τη συμμετοχή όλων των κόμβων του υποδικτύου κι όχι με την αναζήτηση της διεύθυνσης κεντρικά σε μία λίστα αντιστοιχίσεων.

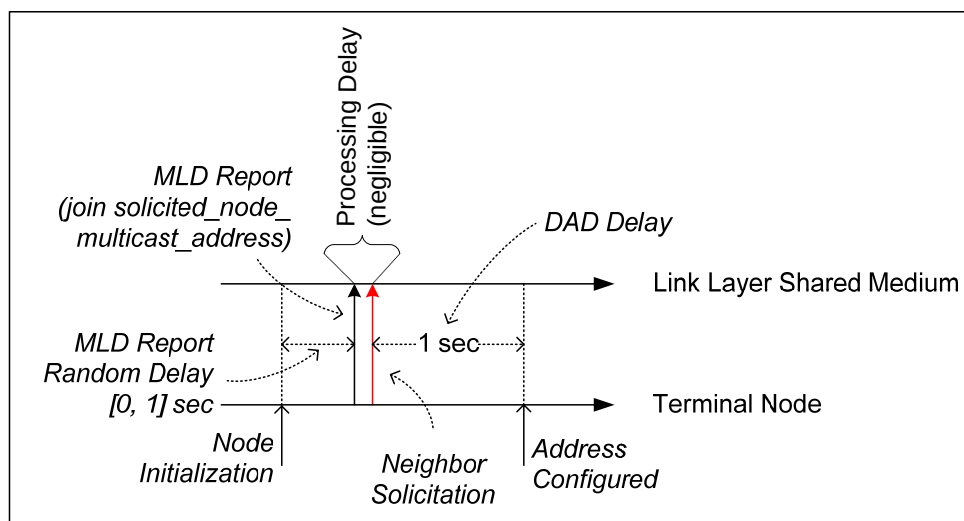
Πιο συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο ND, μέσω της λειτουργίας του μηχανισμού *Ανακάλυψης Γειτονικού Κόμβου (Neighbor Discovery)*, προβλέπει ότι κάθε κόμβος μπορεί να συλλέξει πληροφορίες αναφορικά με τις διευθύνσεις στρώματος δικτύου ή/και σύνδεσης δεδομένων, που αφορούν γειτονικούς του κόμβους που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο υποδίκτυο με αυτόν. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα μηνύματα *Πρόσκλησης (Ανακοίνωσης) Γειτονικού Κόμβου (Neighbor Solicitation, NS)* και *Ανακοίνωσης Γειτονικού Κόμβου (Neighbor Advertisement, NA)*, κατ' αντιστοιχία με το μηχανισμό *Ανακάλυψη Δρομολογητή*. Ο μηχανισμός *Neighbor Discovery* προβλέπει ότι ένας κόμβος μπορεί να στείλει το μήνυμα NS σε έναν γειτονικό του κόμβο, ζητώντας από αυτόν να τον ενημερώσει για την διεύθυνση στρώματος ζεύξης που χρησιμοποιεί. Ο κόμβος προς τον οποίο απευθύνεται το μήνυμα NS, είναι υποχρεωμένος να απαντήσει με ένα μήνυμα NA, στο οποίο εισάγει τη διεύθυνση στρώματος ζεύξης όπως του ζητήθηκε.

Η λειτουργία του μηχανισμού DAD στηρίζεται στο μηχανισμό *Neighbor Discovery*. Κατά την εκτέλεση του μηχανισμού DAD, ο κόμβος που επιθυμεί να ελέγξει αν μία διεύθυνση χρησιμοποιείται ήδη από έναν άλλο κόμβο στο συγκεκριμένο υποδίκτυο αποστέλλει το μήνυμα NS προς το υποδίκτυο στο οποίο επιχειρεί τον έλεγχο. Ο σκοπός αποστολής του μηνύματος είναι η ενημέρωση του ίδιου του ερωτώντος κόμβου, αναφορικά με την IPv6 link-local διεύθυνση που προτίθεται ο ίδιος να χρησιμοποιήσει. Εάν κάποιος κόμβος χρησιμοποιεί ήδη τη διεύθυνση, είναι υποχρεωμένος να απαντήσει στο μήνυμα NS με ένα αντίστοιχο NA. Στην περίπτωση αυτή ο ερωτών κόμβος αποτρέπεται από το να χρησιμοποιήσει το αρχικά επιλεχθέν επίθημα για την διεύθυνσή του. Στην περίπτωση που η διεύθυνση δεν χρησιμοποιείται, κανένας κόμβος δεν πρόκειται να απαντήσει στο πολυεκπεμπόμενο μήνυμα NS. Το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι ο ερωτών κόμβος πρέπει να αναμένει για χρονικό διάστημα ίσο με 1 sec, προτού αποφανθεί ότι η διεύθυνση δεν χρησιμοποιείται οπότε μπορεί να τη χρησιμοποιήσει ο ίδιος.

Κατά τη λειτουργία του μηχανισμού DAD, το τερματικό δεν έχει ακόμη ρυθμίσει τη διεύθυνσή του. Για το λόγο αυτό κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων NS και NA χρησιμοποιούνται διευθύνσεις πολυεκπομπής. Το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι για το μήνυμα NS η διεύθυνση αποστολέα τίθεται ίση με την *ακαθόριστη διεύθυνση* (*unspecified address, ::/128*), ενώ σαν διεύθυνση προορισμού χρησιμοποιείται η διεύθυνση *solicited_node_multicast_address*. Η τελευταία προκύπτει από το συνδυασμό του προθήματος FF02:0:0:0:0:1:FF00::/104 με τα 24 λιγότερο σημαντικά ψηφία του επιθήματος. Αντίστοιχα για το μήνυμα NA, ο αποστολέας εισάγει τη διεύθυνση της διεπαφής από την οποία στέλνει το μήνυμα στο πεδίο διεύθυνση αποστολέα, ενώ στο πεδίο διεύθυνση προορισμού εισάγεται η διεύθυνση *all_nodes_multicast_address*. Εντούτοις για να μπορέσει ένας κόμβος να λάβει πακέτα στρώματος δικτύου (datagrams) που έχουν ως διεύθυνση προορισμού την *solicited_node_multicast_address* θα πρέπει να έχει ρυθμίσει το στρώμα σύνδεσης δεδομένων του κατάλληλα. Για να συμβεί αυτό ο κόμβος είναι υποχρεωμένος να έχει αποστείλει ένα μήνυμα συμμετοχής στην ομάδα πολυεκπομπής που ταυτοποιείται από τη διεύθυνση *solicited_node_multicast_address*. Ουσιαστικά το μήνυμα δεν απευθύνεται σε κάποιο δρομολογητή πολυεκπομπής αλλά χρησιμοποιείται μόνο για τη ρύθμιση του στρώματος σύνδεσης δεδομένων των κόμβων που μοιράζονται το κοινό φυσικό μέσο του συγκεκριμένου υποδικτύου (συσκευών μεταγωγής π.χ. switches, bridges κλπ.). Το πρωτόκολλο ND και η προδιαγραφή του μηχανισμού DAD εντούτοις, προβλέπουν ότι η αποστολή του μηνύματος *Αναφορά Συμμετοχής* (MLD Membership Report, [8]), που καθιστά εφικτή τη συμμετοχή του κόμβου στην ομάδα πολυεκπομπής *solicited_node_multicast_address*, θα πρέπει να καθυστερήσει κατά ένα, ομοιόμορφα κατανεμημένο στο [0, 1] sec, τυχαίο χρονικό διάστημα. Αυτό απαιτείται ώστε να αποφεύγεται η συμφόρηση των συσκευών μεταγωγής σε περιπτώσεις μαζικής αρχικοποίησης των κόμβων ενός τοπικού δικτύου (π.χ. στην περίπτωση ανάνηψης μετά από καταστάσεις έλλειψης ρευματοδότησης). Το Σχήμα Α - 2 απεικονίζει το χρονισμό της διαδικασίας ρύθμισης διεύθυνσης που περιγράφηκε παραπάνω.

Ένας κινητός χρήστης θα πρέπει να ξεκινήσει τη διαδικασία ρύθμισης μίας νέας διεύθυνσης στην περίπτωση κατά την οποία λάβει ένα μήνυμα RA το οποίο περιέχει ένα άγνωστο προς αυτόν πρόθημα. Στην περίπτωση αυτή το κινητό (δεδομένου ότι αποφαίνεται πως έχει αλλάξει

υποδίκτυο) πρέπει να επιβεβαιώσει τη μοναδικότητα της link-local διεύθυνσής του, παρά το γεγονός ότι αυτή μπορεί να μην αλλάξει (το πρόθημα αλλά και το επίθημα παραμένουν ίδια). Ο λόγος που επιβάλλει την εκτέλεση του μηχανισμού DAD σε αυτή την περίπτωση είναι ότι υπάρχει πιθανότητα στο νέο υποδίκτυο στο οποίο εισήλθε να υπάρχει κάποιος άλλος κόμβος ο οποίος να χρησιμοποιεί ήδη τη διεύθυνση. Το κινητό, δεδομένου ότι επιβεβαιώσει την μοναδικότητα της link-local διεύθυνσής του, μπορεί να σχηματίσει με βάση το πρόθημα από το μήνυμα RA, την global διεύθυνσή του για το ίδιο interface. Η διεύθυνση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας, χωρίς δηλαδή να απαιτείται η εκτέλεση του ελέγχου DAD. Εναλλακτικά το κινητό είναι σε θέση να εκτελέσει παράλληλα το μηχανισμό DAD τόσο για την link-local όσο και την global διεύθυνσή του, ή ακόμη για περισσότερες από μία διευθύνσεις.



Σχήμα Α - 2. Χρονισμός Διαδικασίας Stateless Address Autoconfiguration

A.3 Επισήμανση Μετακίνησης – Movement Detection

Κάθε κινητός IPv6 κόμβος είναι υποχρεωμένος να έχει μία υλοποίηση του μηχανισμού *Επισήμανσης Μετακίνησης (Movement Detection)*, ο οποίος του δίνει τη δυνατότητα να επιβεβαιώσει ότι έχει αλλάξει υποδίκτυο. Από τη στιγμή που ο κινητός κόμβος έχει αποφανθεί για την αλλαγή του δικτύου, θα πρέπει να προβεί σε πολύ σημαντικές ενέργειες αναφορικά με την κινητικότητα του όπως να αλλάξει την ρύθμιση που έχει για τον προκαθορισμένο δρομολογητή (default router) του, να επιβεβαιώσει τη μοναδικότητα των link-layer διευθύνσεών του, να ακυρώσει τις διευθύνσεις που είχε μέχρι πρότινος, να εκκινήσει τις διαδικασίες ρύθμισης νέων διευθύνσεων και τέλος να προχωρήσει με την εκτέλεση της σηματοδότησης για την υποστήριξη της κινητικότητας του όπως προβλέπει το πρωτόκολλο Mobile IPv6.

Ο απλούστερος και πιο κοινόχρηστος μηχανισμός *Επισήμανσης Μετακίνησης* υλοποιείται μέσω της ανάλυσης των προθημάτων που περιέχονται στα μηνύματα RA και της επιβεβαίωσης αδυναμίας επικοινωνίας με τον προηγούμενο δρομολογητή μέσω της ζεύξης που χρησιμοποιούνταν πρωτύτερα (εννοείται όχι διαμέσου άλλου δρομολογητή, αλλά μόνο με χρήση μίας ζεύξης). Στην πράξη ένα κινητό σταματά να λαμβάνει μηνύματα RA τα οποία να περιέχουν το πρόθημα που χρησιμοποιούσε, ενώ αντίστοιχα λαμβάνει μηνύματα RA με ένα διαφορετικό πρόθημα. Επιπλέον, η λήψη ενός μηνύματος RA με διαφορετικό πρόθημα, ή η απουσία λήψης

ενός αναμενόμενου μηνύματος RA ή μεταβολή του ρυθμού με τον οποίο καταφθάνουν τα μηνύματα RA δεν θα πρέπει να θεωρούνται επαρκείς ενδείξεις για την επιβεβαίωση της μετακίνησης. Από την άλλη, η εκτέλεση μίας διαπομπής στρώματος ζεύξης αποτελεί ένδειξη μετακίνησης· εντούτοις δεν αποτελεί ικανή συνθήκη απόφασης μετακίνησης σε νέο υποδίκτυο, εφόσον ένα κινητό μπορεί να αλλάζει σημείο πρόσβασης (access point) ενός ασύρματου δικτύου αλλά να μην εκτελεί ταυτόχρονα διαπομπή στρώματος δικτύου (IP handover).

Για την επιβεβαίωση της μετακίνησης ένας κινητός κόμβος θα πρέπει να έχει επαρκείς ενδείξεις ότι δεν μοιράζεται το ίδιο φυσικό μέσο με τον δρομολογητή με τον οποίο επικοινωνούσε πρότερα. Για να καταλήξει σε αυτό το συμπέρασμα χρησιμοποιείται ο μηχανισμός *Επισήμανσης Αδυναμίας Επικοινωνίας με Γειτονικό Κόμβο* (Neighbor Unreachability Detection, NUD). Σύμφωνα με αυτόν ένας κόμβος επιβεβαιώνει την αδυναμία ενός γειτονικού του κόμβου (που υποτίθεται ότι βρίσκεται στο ίδιο υποδίκτυο με αυτόν) να λάβει τα μηνύματα που του αποστέλλει. Ο μηχανισμός NUD υλοποιείται με τη χρήση των μηνυμάτων του πρωτοκόλλου *Neighbor Discovery*. Πιο συγκεκριμένα, ένας κόμβος αποστέλλει, χρησιμοποιώντας την προκαθορισμένη unicast διεύθυνση μίας διεπαφής του, ένα μήνυμα NS. Το μήνυμα αποστέλλεται προς την αντίστοιχη unicast διεύθυνση ενός κόμβου με τον οποίο επικοινωνούσε. Αν οι δύο κόμβοι συνεχίζουν να βρίσκονται στο ίδιο υποδίκτυο, τότε ο δεύτερος (ερωτώμενος) είναι υποχρεωμένος να απαντήσει με ένα μήνυμα NA στον πρώτο (ερωτών). Το μήνυμα NA θα πρέπει να σταλεί σε μία unicast διεύθυνση του ερωτώντος κόμβου που έστειλε το μήνυμα NS. Το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι ένας κόμβος ο οποίος εκτελεί το μηχανισμό NUD, μπορεί να επιβεβαιώσει την απουσία ενός κόμβου από ένα υποδίκτυο, εφόσον δε λάβει απάντηση σε κανένα από τα 3 μηνύματα NS που μπορεί να στέλνει, με ρυθμό όχι μικρότερο από ένα μήνυμα ανά ένα sec.

Μια επιπλέον σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι ένας κόμβος ο οποίος επιθυμεί να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό NUD για να επιβεβαιώσει την εκτέλεση διαπομπής στρώματος δικτύου, είναι υποχρεωμένος να χρησιμοποιήσει την unicast link-layer διεύθυνσή του, για την οποία εντούτοις θα πρέπει να έχει επιβεβαιώσει ότι δεν χρησιμοποιείται από κάποιο άλλο κόμβο στο υποδίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος. Αυτό σημαίνει ότι ένας κινητός κόμβος δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει άμεσα το μηχανισμό NUD που περιγράφηκε μόλις, στην περίπτωση που έχει κάποια ένδειξη από το στρώμα ζεύξης για την διαπομπή του σε έναν διαφορετικό σταθμό βάσης για παράδειγμα. Για το λόγο αυτό το πρωτόκολλο ND προβλέπει ότι το κινητό θα πρέπει να περιμένει να λάβει τουλάχιστο 3 μηνύματα RA με διαφορετικό πρόθημα, στη συνέχεια να ρυθμίσει τη νέα διεύθυνσή του (ή να επιβεβαιώσει τη μοναδικότητα της προηγούμενης link-local του), και μετά να εκτελέσει το μηχανισμό NUD για τον προηγούμενο δρομολογητή του ώστε να διαγράψει ότι πληροφορία κατάστασης είχε σχετικά με αυτόν και να την αντικαταστήσει με αυτή που συνέλεξε από τα νέα μηνύματα RA. Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση του μηχανισμού NUD δεν απαιτείται η αποστολή ενός μηνύματος MLD *Αναφοράς Συμμετοχής* για την ομάδα `solicited_nodes_multicast_address`, εφόσον το κινητό έχει ήδη καταστεί μέλος της συγκεκριμένης ομάδας πολυεκπομπής κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας DAD.

Υπενθυμίζεται ότι η συμμετοχή στη συγκεκριμένη ομάδα ώστε να μπορεί να λαμβάνει μηνύματα NS που αποστέλλονται προς αυτή.

Το Σχήμα Α - 3 που ακολουθεί, απεικονίζει το χρονισμό των διαδικασιών που εκτελούνται κατά τη διαπομπή ενός κινητού κόμβου από έναν δρομολογητή πρόσβασης (Access router, AR) σε έναν άλλο. Στο σχήμα παρουσιάζονται εκτός από τις διαδικασίες αναζήτησης δρομολογητή, ρύθμισης διεύθυνσης και επισήμανσης μετακίνησης και η σηματοδότηση για πού αφορά την υποστήριξη κινητικότητας του κόμβου με χρήση του πρωτοκόλλου Mobile IPv6. Λεπτομέρειες για την τελευταία περιέχονται στην επόμενη ενότητα.

A.4 Λειτουργία Mobile IPv6

Στην περίπτωση που ο μηχανισμός *Επισήμανσης Μετακίνησης* καταλήξει με επαρκή βεβαιότητα στο συμπέρασμα ότι έχει εκτελέσει επιτυχώς μία διαπομπή στρώματος δικτύου (οπότε έχει επιβεβαιωθεί η μοναδικότητα της link-local διεύθυνσης του κινητού, κι έχουν αλλάξει οι ρυθμίσεις του αναφορικά με τον default δρομολογητή του), κι εφόσον χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Mobile IPv6 για την υποστήριξη της κινητικότητας του κόμβου, πρέπει να εκτελεστούν οι απαραίτητες διαδικασίες που σχετίζονται με την υποστήριξη της κινητικότητας του κόμβου. Οι τελευταίες σχετίζονται με την αποκατάσταση των ήδη εγκατεστημένων συνδέσεων του κινητού με τους κόμβους με τους οποίους επικοινωνούσε πριν τη διαπομπή. Το πρωτόκολλο Mobile IPv6 προβλέπει ότι γι αυτό το σκοπό το κινητό θα πρέπει να εκτελέσει τις διαδικασίες *Οικείας Εγγραφής* (*Home Registration*) με τον *Οικείο Αντιπρόσωπό* (Home Agent, HA) του, και *Εγγραφής Ανταποκριτών* (*Correspondent Registration*). [9]

Όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 2, βασικός στόχος της λειτουργίας του πρωτοκόλλου MIPv6 είναι η ανάπτυξη ενός μηχανισμού ο οποίος να δίνει τη δυνατότητα σε ένα κινητό κόμβο να είναι «προσβάσιμος» (reachable, δηλαδή να μη στερείται της δυνατότητας να γίνει αποδέκτης μηνυμάτων που απευθύνονται προς αυτόν, εξαιτίας της κίνησής του), ανεξάρτητα από την τρέχουσα θέση του στο Διαδίκτυο, και δίνοντας την αίσθηση ότι ο κόμβος είναι σταθερά συνδεδεμένος στο *Οικείο Δίκτυό* του. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του MIPv6, κάθε κινητός κόμβος, ή πιο αυστηρά κάθε κόμβος ο οποίος επιθυμεί την υποστήριξη της κινητικότητάς του, ταυτοποιείται από την διεύθυνση του στο Οικείο δίκτυό του (Home Address, HoA), δηλαδή μία διεύθυνση που αντιστοιχεί σε ένα υποδίκτυο του HA του, και από την τρέχουσα διεύθυνσή του στο Διαδίκτυο (Care-of Address, CoA). Η πρώτη παίζει το ρόλο της ταυτοποίησης του κινητού κόμβου σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ η δεύτερη δίνει τη δυνατότητα ταυτοποίησης της θέσης στο Διαδίκτυο. Στην περίπτωση που το κινητό βρίσκεται στο οικείο δίκτυο η CoA δεν ορίζεται οπότε η HoA παίζει και τους δύο ρόλους, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τους σταθερούς (ακίνητους) κόμβους.

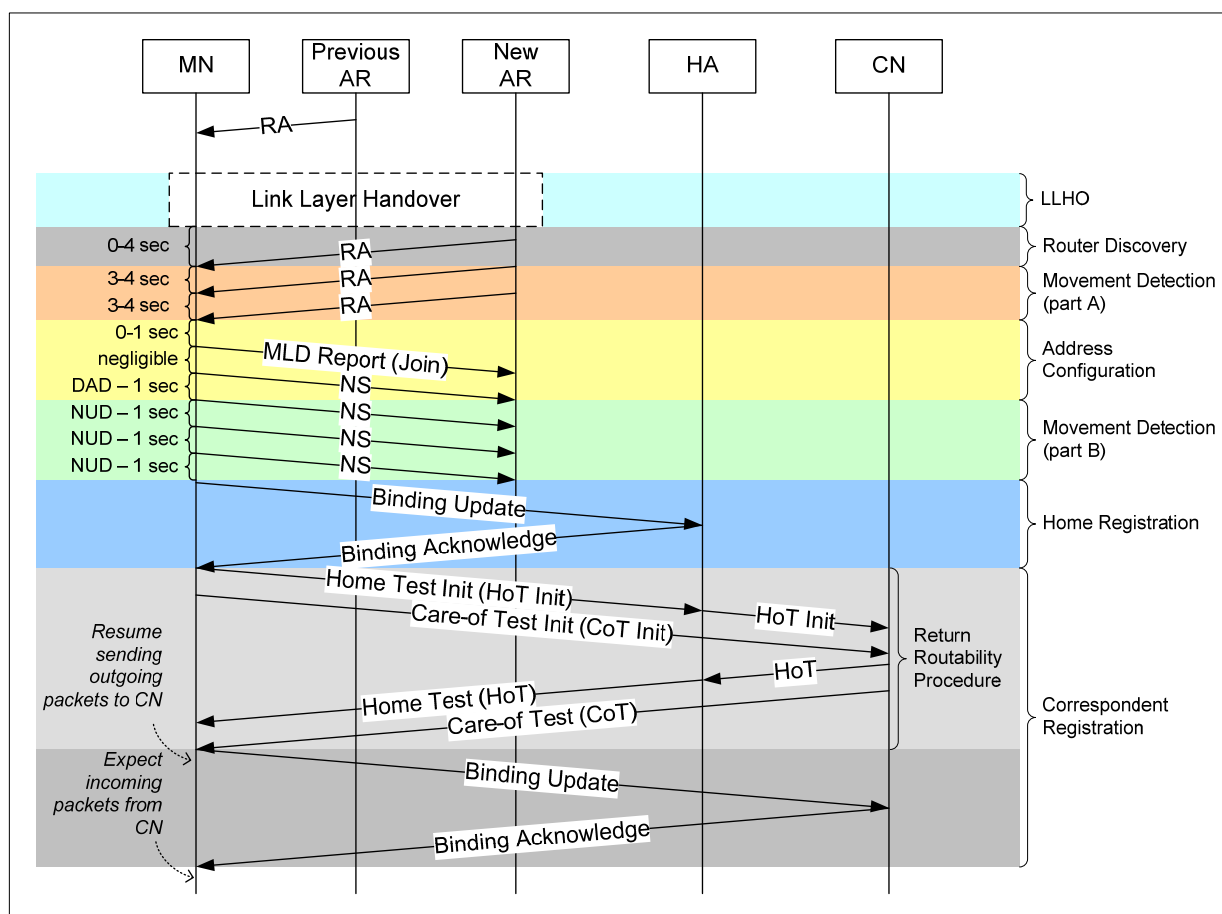
Ο μηχανισμός που προδιαγράφει το MIP, προβλέπει ότι για την υποστήριξη της κινητικότητας κάθε κινητός κόμβος είναι υποχρεωμένος να ενημερώνει τον HA του, αναφορικά με την τρέχουσα τιμή της CoA. Ο HA είναι υποχρεωμένος να τηρεί έναν πίνακα (Binding Cache) με αντιστοιχήσεις μεταξύ της HoA κάθε κινητού με την εκάστοτε CoA. Η ενημέρωση του HA γίνεται με αποστολή ενός μηνύματος από το κινητό κάθε φορά που αλλάζει η διεύθυνσή του, λόγω της διαπομπής του από ένα δίκτυο σε ένα άλλο, αλλά και περιοδικά ούτως ώστε ο HA να είναι

διαρκώς ενήμερος για την κατάσταση της «προσβασιμότητας» του κινητού. Η διαδικασία ονομάζεται Οικεία Εγγραφή (Home Registration) και περιλαμβάνει την ανταλλαγή δύο μηνυμάτων μεταξύ του κινητού και του HA· του μηνύματος *Ανανέωσης Εγγραφής* (*Binding Update*, BU), και του μηνύματος *Επιβεβαίωσης Εγγραφής* (*Binding Acknowledge*, BAck). Με το πρώτο, το κινητό ενημερώνει τον HA του αναφορικά με τη αλλαγή της θέσης του (στο Διαδίκτυο), οπότε του στέλνει τη νέα CoA του. Αντίστοιχα, ο HA επιβεβαιώνει τη λήψη του μηνύματος BU και την επιτυχή ή όχι ανανέωση της εγγραφής που κρατά για την αντιστοιχία μεταξύ της HoA και της νέας CoA. Δεδομένου ότι το κινητό και ο HA ανήκουν διοικητικά στην ίδια περιοχή δικτύου, για την ανταλλαγή των μηνυμάτων BU και BAck χρησιμοποιούνται μοιραζόμενα πιστοποιητικά ασφάλειας που δίνουν δυνατότητα αυθεντικοποίησης και κρυπτογράφησης τους μέσω του εγγενούς μηχανισμού IPsec του πρωτοκόλλου IPv6 για το σκοπό αυτό.

Η υποστήριξη της κινητικότητας ενός κινητού κόμβου πραγματοποιείται από τον κόμβο HA. Το πρωτόκολλο MIPv6 προβλέπει ότι ο HA, ανάλογα με τις εγγραφές που έχει στην Binding Cache του, θα πρέπει να ανακτά και να προωθεί τα πακέτα (που φτάνουν στο *Οικείο Δίκτυο*) καθενός από τους κινητούς κόμβους που εξυπηρετεί (δεδομένου ότι έχουν την HoA σαν διεύθυνση προορισμού), προς την τρέχουσα CoA τους, που έχει αποθηκευμένη. Για να πραγματοποιήσει τα παραπάνω ο HA χρειάζεται να εκτελεί δύο ξεχωριστές διαδικασίες: πρώτον θα πρέπει να ενεργεί σαν «πληρεξούσιος για την HoA» (proxy) στο υποδίκτυο που αντιστοιχεί στην HoA του κινητού, και δεύτερον θα πρέπει να δρομολογεί τα πακέτα προς την τρέχουσα θέση του κινητού. Η εξουσιοδότηση του HA αναφορικά με την HoA, δίνει το δικαίωμα και τη δυνατότητα στον πρώτο να χειρίζεται αποκλειστικά τα πακέτα που καταφθάνουν στο υποδίκτυο που αυτή αντιστοιχεί (το οποίο υποτίθεται ότι εξυπηρετεί ο HA). Ο εν λόγω χειρισμός έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία της εικόνας, προς όλους του υπόλοιπους κόμβους του Διαδικτύου, ότι το κινητό είναι συνδεδεμένο σε ένα φυσικά προσαρτημένο στον HA υποδίκτυο. Δεδομένου ότι το κινητό βρίσκεται σε ένα ξένο δίκτυο, η προώθηση των πακέτων που έχουν σαν διεύθυνση προορισμού την HoA προς αυτό καθίσταται εφικτή με την με χρήση μηχανισμών ενθυλάκωσης πακέτων [10]. Ο μηχανισμός αυτός έχει σαν απαίτηση την εγκατάσταση μίας αμφίδρομης «διόδου IP» (IP Tunnel), που πραγματοποιεί την ενθυλάκωση των αφικνούμενων IPv6 datagrams σε νέα, στα οποία εισάγεται στο πεδίο 'διεύθυνση αποστολέα' και 'προορισμού', η διεύθυνση του HA και η CoA του κινητού αντίστοιχα. Ο κινητός κόμβος μόλις λάβει το ενθυλακωμένο πακέτο, αφαιρεί την επιπρόσθετη επικεφαλίδα και το παραδίδει στα ανώτερα του IP στρώματα μεταφοράς. Η βασική λειτουργία του MIPv6 προβλέπει ότι για την αποστολή πακέτων από την μεριά του κινητού θα πρέπει να ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία αναφορικά με την ενθυλάκωση των εξερχόμενων πακέτων στην περίπτωση που η διαδικασία Καταχώρησης Ανταποκριτών, που περιγράφεται στη συνέχεια, δεν έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία ή δεν υποστηρίζεται από τους Ανταποκριτές.

Η βασική καινοτομία που εισήγαγε το πρωτόκολλο MIPv6 σε σχέση με το αντίστοιχο της προηγούμενης έκδοσης MIPv4, αποτελεί η δυνατότητα απ' ευθείας επικοινωνίας μεταξύ των κινητών κόμβων και των Ανταποκριτών Κόμβων CN, χωρίς τη μόνιμη μεσολάβηση του HA στο

μονοπάτι μεταφοράς των πακέτων. Η συγκεκριμένη δυνατότητα εγκαθίσταται μέσω του μηχανισμού *Βελτιστοποίησης Διαδρομής (Route Optimization)* και της διαδικασίας *Εγγραφής Ανταποκριτών*. Ο μηχανισμός ενεργοποιείται από το κινητό και υλοποιείται με την ανταλλαγή δύο μηνυμάτων σηματοδότησης, του *Ανανέωση Εγγραφής (Binding Update, BU)*, και του *Επιβεβαίωση Εγγραφής (Binding Acknowledge, BAck)*. Όπως και στην περίπτωση της *Οικείας Εγγραφής*, τα μηνύματα έχουν σαν αποτέλεσμα την ενημέρωση ενός κατάλληλου πίνακα αντιστοίχισης (Binding Cache), τόσο στο κινητό, όσο και στον CN, για την αντιστοίχιση μεταξύ της CoA, της HoA και της διεύθυνσης του CN. Στη συνέχεια το κινητό και ο εκάστοτε CN είναι σε θέση να επικοινωνούν απ' ευθείας μεταξύ τους, με την προϋπόθεση ότι στα ανταλλασσόμενα πακέτα εισάγεται σε ένα κατάλληλο για αυτό το σκοπό πεδίο, η διεύθυνση HoA του κινητού.



Σχήμα Α - 3. Σηματοδότηση κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διαπομπής στρώματος δικτύου με χρήση των πρωτοκόλλων Neighbor Discovery for IPv6 και Mobile IPv6

Βασικό πρόβλημα για την υποστήριξη της κινητικότητας με τη χρήση του μηχανισμού Βελτιστοποίησης Διαδρομής αποτελεί η διασφάλιση της εγκυρότητας και αυθεντικότητας των μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ του κινητού και του εκάστοτε CN με τον οποίο επικοινωνεί. Εν γένει οι δύο αυτοί κόμβοι δεν ανήκουν στην ίδια διοικητική περιοχή και κατά συνέπεια δεν μπορούν να μοιράζονται τα απαραίτητα πιστοποιητικά ασφαλείας χωρίς την παρέμβαση μίας τρίτης οντότητας. Δεδομένου ότι η ανάπτυξη μίας αρχιτεκτονικής, που θα περιελάμβανε ειδικούς γι αυτό το σκοπό (τρίτους) εξυπηρετητές εγείρει θέματα επίδοσης, κλιμάκωσης και αυξημένων λειτουργικών απαιτήσεων στις υποδομές που παρέχουν υπηρεσίες ασφαλείας με χρήση

τεχνολογιών δημοσίου κλειδιού PKI, οι σχεδιαστές του MIPv6 επέλεξαν την χρήση μίας αυτόνομης διαδικασίας που καθιστά εφικτή την αυθεντικοποίηση του κινητού και των ανταποκριτών κόμβων μεταξύ τους. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η διαδικασία *Return Routability*, μέσω της οποίας ο εκάστοτε CN διαβεβαιώνεται ότι ένας κόμβος είναι σε θέση να χρησιμοποιεί την CoA που ισχυρίζεται, αν και ταυτοποιείται από την HoA. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα Α - 3, η διαδικασία περιλαμβάνει την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του κινητού και του CN σε δύο φάσεις. Αρχικά το κινητό στέλνει προς τον CN, ένα μήνυμα *Home Test Init* (HoT Init) το οποίο κατευθύνει πρώτα στον HA του, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό της διόδου (δηλ. ενθυλακώνοντάς το σε ένα datagram με διεύθυνση προορισμού αυτή του HA του και χρησιμοποιώντας το μηχανισμό ασφαλούς επικοινωνίας IPsec). Ο τελευταίος αφαιρεί τη εξωτερική επικεφαλίδα και προωθεί το μήνυμα προς τον CN. Η διεύθυνση αποστολέα του γνήσιου μηνύματος *HoT Init* είναι η HoA. Ο CN απαντάει στο μήνυμα *HoT Init* στέλνοντας ένα μήνυμα *Home Test* (HoT) προς την HoA του κινητού, στο οποίο περιέχεται μία δυαδική λέξη μήκους 64 bits (keygen token) την οποία θα χρησιμοποιήσει το κινητό στην ακόλουθη αυθεντικοποίηση του μηνύματος BU. Αντίστοιχα με την παραπάνω διαδικασία το κινητό στέλνει και το μήνυμα *Care-of Test Init* (CoT Init) απ' ευθείας προς τον CN (δηλ. όχι μέσω του HA), χρησιμοποιώντας την CoA του. Αντίστοιχα ο CN απαντάει με το μήνυμα *Care-of Test* (CoT) στο οποίο εισάγει μία άλλη δυαδική λέξη 64 bits για τον ίδιο σκοπό. Τα μηνύματα HoT και CoT στέλνονται ταυτόχρονα, ενώ η λήξη της διαδικασίας *Return Routability* σηματοδοτείται τη στιγμή που βεβαιώνεται ότι το κινητό έχει λάβει και τα δύο. Από το σημείο αυτό και μετά μπορεί να προχωρήσει στην αποστολή του μηνύματος BU προς τον CN κι επίσης να ξεκινήσει να αποστέλλει πακέτα κανονικά, χωρίς τη μεσολάβηση του HA. Ο CN αφού λάβει το μήνυμα BU και ανανεώσει τις εγγραφές στην Binding Cache του, απαντάει με το μήνυμα Back και μπορεί κι αυτός να αρχίσει να αποστέλλει τα πακέτα της κίνησης προς το κινητό. Με τη λήψη του μηνύματος BAcK από το κινητό, ολοκληρώνεται η διαδικασία σηματοδότησης, οπότε το κινητό κι ο CN μπορούν να επικοινωνούν κανονικά όπως δύο οποιοιδήποτε άλλοι κόμβοι στο Διαδίκτυο (με την προϋπόθεση ότι εισάγουν την HoA στο κατάλληλο πεδίο της επικεφαλίδας των πακέτων που ανταλλάσσουν).

A.5 Ανάλυση πηγών καθυστέρησης με χρήση των τυπικών ρυθμίσεων του ND

Η καθυστέρηση στην εκτέλεση της διαδικασίας *Router Discovery*, είναι στενά συνδεδεμένη με τις ρυθμίσεις που έχουν οι τοπικοί δρομολογητές αναφορικά με την *περίοδο* μετάδοσης των μηνυμάτων *Ανακοίνωσης Δρομολογητή* (RA). Όταν χρησιμοποιούνται οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης, και με βάση τις προτεινόμενες τυπικές ελάχιστες τιμές στην προδιαγραφή του πρωτοκόλλου ND, τα πολυεκπεμπόμενα μηνύματα RA μεταδίδονται κάθε 3.5 sec κατά μέσο όρο, με αποτέλεσμα ένας κινητός κόμβος ο οποίος διαπέμπεται σε ένα νέο υποδίκτυο, να λαμβάνει το μήνυμα RA μετά από 1.75 sec κατά μέσο όρο. Στην περίπτωση που ο κινητός κόμβος αποστείλει ένα μήνυμα *Πρόσκλησης Δρομολογητή* (RS), ο χρόνος μειώνεται στα 1.625 sec κατά μέσο όρο, δεδομένου ότι συντίθεται από την περίοδο που απαιτείται για τον περιορισμό του ρυθμού μετάδοσης των RA, που είναι ένα μήνυμα κάθε 3 sec κατ' ελάχιστο, και από την απαίτηση για

καθυστερημένη απάντηση σε μηνύματα RS κατά ένα χρονικό διάστημα ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα $[0, 500]$ msec.

Στην περίπτωση κατά την οποία ο κινητός κόμβος εκτελεί πρώτα την επιβεβαίωση μοναδικότητας της link-local διεύθυνσής του και μετά αποστέλλει το μήνυμα RS, η καθυστέρηση λήψης του μηνύματος RA προκύπτει ίση με 1.75 sec. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα Α - 2, η περίοδος αυτή αποτελείται από το χρόνο που απαιτείται να καθυστερηθεί η αποστολή του μηνύματος MLD για τη συμμετοχή του στην ομάδα πολυεκπομπής *solicited_node_multicast_address* κατά ένα χρονικό διάστημα ομοιόμορφα κατανεμημένο στο $[0, 1]$ sec (δηλ. 500 msec κατά μέσο όρο), το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκτέλεση του μηχανισμού DAD (1 sec) και τέλος την καθυστέρηση στην εκπομπή του μηνύματος RA κατά ένα χρονικό διάστημα ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα $[0, 500]$ msec (δηλ. 250 msec κατά μέσο όρο) όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας *Επισήμανση Μετακίνησης*, οι προδιαγραφές καθορίζουν ότι ένας κινητός κόμβος δεν θα πρέπει να καταλήγει στο συμπέρασμα ότι έχει αλλάξει υποδίκτυο IP εάν δεν έχει πρώτα λάβει τρία συνεχόμενα μηνύματα RA τα οποία να περιέχουν διαφορετικά προθήματα διευθύνσεων σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιεί, ενώ απαιτείται και η εκτέλεση του μηχανισμού *Neighbor Unreachability Detection* ο οποίος θα επιβεβαιώσει την απουσία του προηγούμενου δρομολογητή πρόσβασης από το υποδίκτυο. Η καθυστέρηση για τη λήψη του πρώτου μηνύματος RA έχει αναλυθεί παραπάνω στην φάση εκτέλεσης της διαδικασίας Router Discovery. Τα δύο επόμενα όπως επίσης προαναφέρθηκε μεταδίδονται κατά μέσο όρο κάθε 3.5 sec (κατ' ελάχιστο κάθε 3 με 4 sec) με αποτέλεσμα η εκτέλεση του μηχανισμού NUD να μην είναι δυνατό να ξεκινήσει γρηγορότερα από 7 sec μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας Router Discovery. Επιπλέον, η εκτέλεση της διαδικασίας NUD, που περιλαμβάνει την αποστολή τριών μηνυμάτων Neighbor Solicitation, διαρκεί 3 sec εφόσον θα πρέπει να ικανοποιηθεί ο περιορισμός στην αποστολή των μηνυμάτων NS που δεν μπορεί να είναι μικρότερος από ένα μήνυμα κάθε ένα sec. Άρα συνολικά η διαδικασία NUD ολοκληρώνεται 10 sec μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας Router Discovery. Στην περίπτωση που το κινητό ακολουθεί πιο ενεργητική στάση αποστέλλοντας μηνύματα RS, τότε ο μέσος χρόνος για τη λήψη του δεύτερου και τρίτου μηνύματος RA είναι 3.25 sec (που αποτελείται από το διάστημα περιορισμού του ρυθμού εκπομπής των μηνυμάτων RA, δηλ. ένα κάθε 3 sec, και το μέσο χρόνο επιπρόσθετης καθυστέρησης των μηνυμάτων RA που στέλνονται σαν απάντηση σε μηνύματα RS, (δηλ. επιπρόσθετη καθυστέρηση κατά ένα χρονικό διάστημα ομοιόμορφα κατανεμημένο στο $[0, 500]$ msec, δηλ. 0.25 sec κατά μέσο όρο). Σε αυτήν την περίπτωση η εκτέλεση του μηχανισμού NUD ξεκινά και ολοκληρώνεται 6.5 και 9.5 sec αντίστοιχα μετά το πέρας της διαδικασίας Router Discovery.

Κατά την εκτέλεση των διαδικασιών για την υποστήριξη της κινητικότητας που εμπλέκουν τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv6, οι βασικές πηγές καθυστέρησης προκύπτουν από την μετάδοση των μηνυμάτων στα μονοπάτια του δικτύου που συνδέουν τον κινητό κόμβο (MN) με τον HA του και τον αντίστοιχο CN. Με αναφορά στους χρόνους πλήρους διαδρομής που απαιτούνται για την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων (δηλ. για την μετάδοση ενός πακέτου από

έναν κόμβο προς έναν άλλο και την λήψη ενός πακέτου επιβεβαίωσης από τον άλλο στον ένα, Round-Trip Time, RTT) στα παρακάτω ορίζονται οι εξής χρόνοι:

- $RTT(MN, HA)$: χρόνος για ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του MN και του HA
- $RTT(MN, CN)$: χρόνος για ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του MN και του CN
- $RTT(HA, CN)$: χρόνος για ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του HA και του CN

Όπως φαίνεται στο Σχήμα A - 3, για την εκτέλεση της διαδικασίας *Οικείας Εγγραφής* η καθυστέρηση είναι προφανώς ίση με $RTT(MN, HA)$. Στην περίπτωση της διαδικασίας *Εγγραφής Ανταποκριτών*, η καθυστέρηση προσδιορίζεται από τη σχέση $\max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$.

Η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου MIPv6, αφήνει αρκετά περιθώρια αναφορικά με την χρονική αλληλουχία κατά την οποία εκτελούνται οι διαδικασίες *Οικείας Εγγραφής* και *Εγγραφής Ανταποκριτών*. Στο Σχήμα A - 3 απεικονίζεται η «*συντηρητική*» περίπτωση κατά την οποία το κινητό περιμένει την λήψη του μηνύματος Back, πριν ξεκινήσει την εκτέλεση της διαδικασίας *Return Routability* (RR). Εντούτοις προδιαγράφεται και μία περισσότερο «*προοδευτικής*» προσέγγισης κατά την οποία επιτρέπεται η παράλληλη εκτέλεση της τελευταίας με την διαδικασία *Οικείας Εγγραφής*. Στην προοδευτική περίπτωση το κινητό επιτρέπεται να αρχίσει να χρησιμοποιεί την νέα CoA αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας RR και την αποστολή του μηνύματος BU προς τον CN, ενώ για την συντηρητική περίπτωση προβλέπεται ότι κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μόνο εφόσον έχει λάβει το μήνυμα Back από τον CN. Αναφορικά με την συνολική καθυστέρηση για την εκτέλεση των διαδικασιών Home και Correspondent Registration, στην συντηρητική περίπτωση το κινητό είναι σε θέση να στείλει και να λάβει πακέτα μετά από χρόνο που ισούται με $RTT(MN, HA) + \max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$, ενώ στην προοδευτική με $\max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$. Από την άλλη, για την προοδευτική περίπτωση η καθυστέρηση για την αποστολή πακέτων είναι $\max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\}$ ενώ για τη λήψη $\max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$. Τέλος με βάση την προδιαγραφή του MIPv6, τα keygen tokens μπορεί να διατηρούνται από ένα τερματικό κόμβο (κινητό ή CN) για 3.5 min, πράγμα που σημαίνει ότι ένας κινητός κόμβος μπορεί να μην είναι απαραίτητο να εκτελέσει τη διαδικασία RR, αλλά να χρησιμοποιήσει την ήδη αποθηκευμένη πληροφορία για την αυθεντικοποίηση του μηνύματος BU. Στην περίπτωση αυτή οι καθυστερήσεις που εισάγονται τόσο για την αποστολή και όσο για την λήψη πακέτων είναι για τη μεν συντηρητική περίπτωση ίσες με $RTT(MN, HA) + RTT(MN, CN) + RTT(MN, CN)$, ενώ για την προοδευτική ίσες με $\max\{RTT(MN, HA), RTT(MN, CN)\}$ και $\max\{RTT(MN, HA), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$.

A.6 Ανάλυση πηγών καθυστέρησης με χρήση προηγμένων ρυθμίσεων του MIPv6

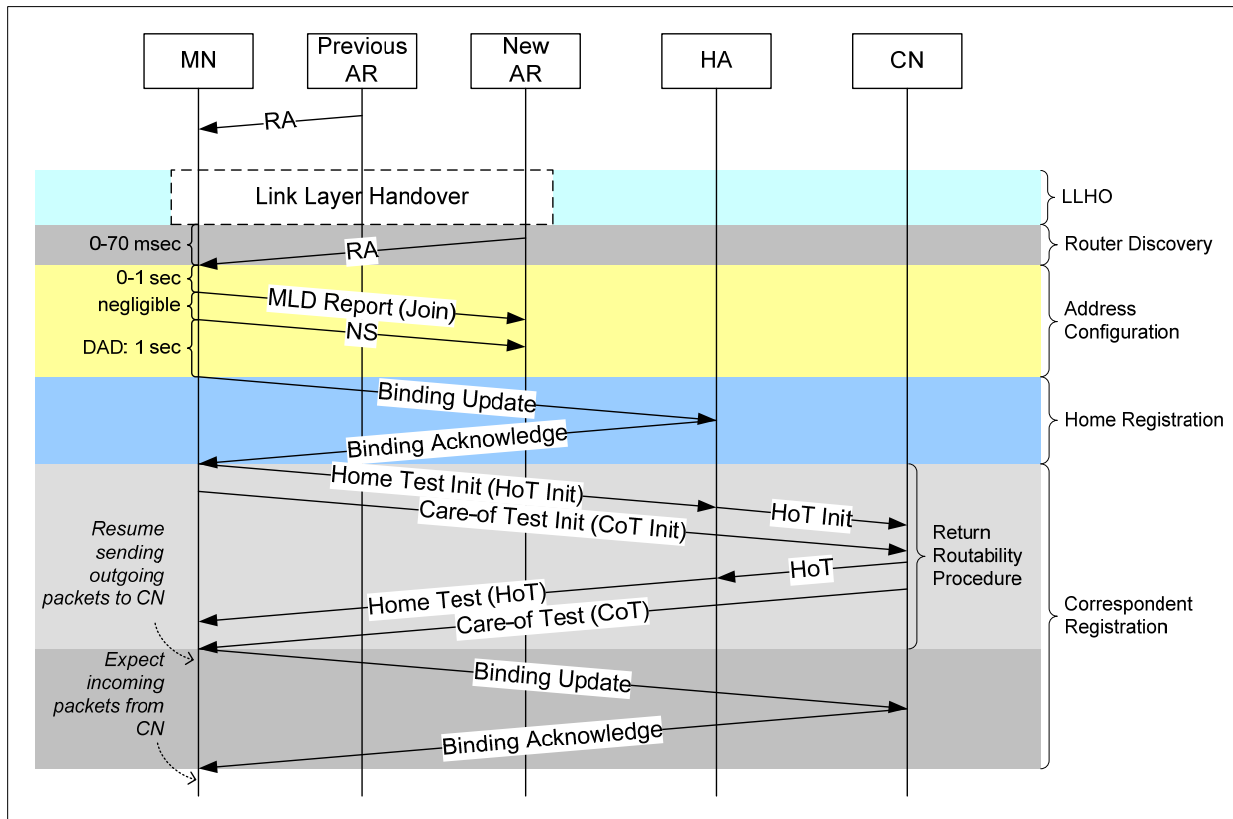
Η εκτέλεση των διαδικασιών *Router Discovery* και *Movement Detection* που προδιαγράφονται από το πρωτόκολλο ND, αποτελούν την σημαντικότερη πηγή καθυστέρησης κατά την εκτέλεση μιας διαπομπής από έναν κινητό κόμβο. Όσων αφορούν την πρώτη, το πρωτόκολλο ND θέτει

αρκετά αυστηρούς περιορισμούς αναφορικά με τη συχνότητα εκπομπής των μηνυμάτων Router Advertisement. Το MIPv6 επαναπροσδιορίζει τις ελάχιστες τιμές που αφορούν στην περίοδο των εκπεμπόμενων μηνυμάτων RA από τους δρομολογητές πρόσβασης, με στόχο την ελαχιστοποίηση των χρόνων που απαιτείται να περιμένει ένας κινητός κόμβος ούτως ώστε να εκτελέσει τις διαδικασίες που απαιτούνται για την γρήγορη διαπομπή του από ένα υποδίκτυο σε ένα άλλο. Με βάση τις νέες προδιαγραφές η περίοδος μετάδοσης των μηνυμάτων RA μπορεί να γίνεται σε ένα χρονικό διάστημα ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα [30, 70] msec. Επιπλέον στις προδιαγραφές καθορίζεται και ένα νέο πεδίο που αφορά στην κοινοποίηση (του μεγίστου) της περιόδου μετάδοσης των μηνυμάτων RA (Advertisement Interval) με ακρίβεια της τάξης των msec, που επιβάλλει σε έναν τερματικό σταθμό να θεωρεί ότι έχει απολέσει ένα μήνυμα RA εφόσον έχει παρέλθει χρονικό διάστημα ίσο με το μέγιστο που έχει κοινοποιηθεί. Η ρύθμιση αυτή χρησιμοποιείται για την ελάττωση του ρυθμού αποστολής μηνυμάτων RS, που μπορεί να προκληθεί σε περιπτώσεις που η πρόσβαση στο φυσικό μέσο εισάγει σημαντικές καθυστερήσεις.

Οι παραπάνω βελτιστοποιήσεις που εισάγονται από το MIPv6, επηρεάζουν επίσης και την εκτέλεση της διαδικασίας *Movement Detection*. Πιο συγκεκριμένα η χρήση του πεδίου Advertisement Interval δίνει τη δυνατότητα σε ένα κινητό κόμβο να αντιληφθεί την απουσία ενός συγκεκριμένου δρομολογητή από το υποδίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος, μέσω της απουσίας λήψης των μηνυμάτων RA στο χρονικό διάστημα που του είχε κοινοποιηθεί και μάλιστα χωρίς την ανάγκη εκτέλεσης της διαδικασίας Neighbor Unreachability Detection. Εντούτοις για την βεβαίωση της μετακίνησης το πρωτόκολλο προδιαγράφει ότι το κινητό θα πρέπει να επιβεβαιώσει ότι έχει χάσει τρία μηνύματα RA. Η χαλάρωση του περιορισμού αναφορικά με την εκτέλεση του μηχανισμού NUD είναι επίσης σημαντική λόγω του γεγονότος ότι η προδιαγραφή του MIPv6 δεν αλλάζει τον περιορισμό αναφορικά με το ρυθμό μετάδοσης των μηνυμάτων RS, τα οποία μεταδίδονται κατά την εκτέλεση του NUD. Επιπλέον το κινητό δεν είναι υποχρεωμένο να έχει εκτελέσει τη διαδικασία επιβεβαίωσης για την link-local διεύθυνσή του, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της διαδικασίας *Επισήμανση Μετακίνησης*.

Οι τροποποιήσεις που εισήγαγε το πρωτόκολλο MIPv6, επηρεάζουν και τη μέση διάρκεια που έχουν οι διαδικασίες που εκτελούνται κατόπιν της διαπομπής ενός κινητού μεταξύ δύο υποδικτύων. Το Σχήμα Α - 4 απεικονίζει το χρονισμό της σηματοδότησης με βάση τις ρυθμίσεις που εισάγει το MIPv6. Πιο συγκεκριμένα, για την εκτέλεση της διαδικασίας Router Discovery ένα κινητό θα πρέπει να περιμένει κατά μέσο όρο 25 msec. Αντίστοιχα, η λήψη των επιπλέον δύο μηνυμάτων RA για την ολοκλήρωση της διαδικασίας *Movement Detection* διαρκεί κατά μέσο όρο 100 msec, δεδομένου ότι η λήψη του καθενός πραγματοποιείται σε 50 msec. Σαν αποτέλεσμα η ολοκλήρωση των διαδικασιών *Router Discovery* και *Movement Detection* πραγματοποιείται σε χρόνο 125 msec κατά μέσο όρο, που με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα αποτελεί σημαντική βελτίωση στην επίδοση. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι προηγμένοι μηχανισμοί που εισάγει το πρωτόκολλο MIPv6 δεν έχουν καμία επίδραση στο χρονισμό που αφορά την αποστολή μηνυμάτων RA σαν απάντηση σε μηνύματα RS. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα Α.1 κι απεικονίζονται στο Σχήμα Α - 1(ii). Η διαδικασία *Ρύθμισης*

Διεύθυνσης του κινητού ξεκινά αμέσως μετά την ολοκλήρωση της *Router Discovery* κι εκτελείται παράλληλα με την *Movement Detection*. Η διαδικασία είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα A.2 κι απεικονίζεται στο Σχήμα A - 2. Το ίδιο ισχύει και για την εκτέλεση των διαδικασιών Οικείας Εγγραφής και Εγγραφής Ανταποκριτών που περιγράφονται στην ενότητα A.4.



Σχήμα A - 4. Σηματοδότηση κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διαπομπής στρώματος δικτύου με χρήση των ρυθμίσεων του πρωτοκόλλου Mobile IPv6 (συντηρητική προσέγγιση)

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις καθυστερήσεις για τις διαδικασίες που εκτελούνται κατά τη διάρκεια μιας διαπομπής IP όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Neighbor Discovery for IPv6 ή το MIPv6.

Πίνακας A - 1. Καθυστερήσεις στις διαδικασίες που απαρτίζουν την εκτέλεση διαπομπών στρώματος IP, με χρήση των τυπικών ρυθμίσεων των πρωτοκόλλων Neighbor Discovery for IPv6 και MIPv6

Διαδικασία	Καθυστερήση (sec)		Μέση Τιμή (sec)	
	ND	MIPv6	ND	MIPv6
Ανακάλυψη Δρομολογητή (Router Discovery)	0 – 4	0 – 0.07	1.75	0.025
Ρύθμιση Διεύθυνσης (Stateless Address Configuration)	1 – 2	1 – 2	1.5	1.5

Διαδικασία			Καθυστέρηση (sec)		Μέση Τιμή (sec)	
			ND	MIPv6	ND	MIPv6
Επισήμανση Μετακίνησης (Movement Detection)			9 – 11	0	10	0
MIPv6 Home and Correspondent Registrations	Εξερχόμενα από το MN πακέτα	Συντηρητική	$RTT(MN, HA) + \max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$			
		Προοδευτική	$\max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\}$			
	Εισερχόμενα στο MN πακέτα	Συντηρητική	$RTT(MN, HA) + \max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$			
		Προοδευτική	$\max\{RTT(MN, HA) + RTT(HA, CN), RTT(MN, CN)\} + RTT(MN, CN)$			

A.7 Βιβλιογραφία

- [1] T. Narten, E. Nordmark, W. Simpson, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)", IETF RFC 2461, December 1998
- [2] T. Narten, E. Nordmark, W. Simpson, H. Soliman, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)", IETF Internet-draft, draft-ietf-ipv6-2461bis-11.txt, March 2007
- [3] R. Hinden, S. Deering, "Internet Protocol Version 6 (IPv6) Addressing Architecture", IETF RFC 3513, April 2003
- [4] S. Deering, R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", IETF RFC 2460, December 1998
- [5] R. Droms, Ed., J. Bound, B. Volz, T. Lemon, C. Perkins, M. Carney, "Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)", IETF 3315, July 2003
- [6] S. Thomson, T. Narten, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", IETF RFC 2462, December 1998
- [7] S. Thomson, T. Narten, T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", IETF Internet-draft, draft-ietf-ipv6-rfc2462bis-08.txt, May 2005
- [8] S. Deering, W. Fenner, B. Haberman, "Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6", IETF RFC 2710, October 1999
- [9] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", IETF RFC 3775, June 2004
- [10] A. Conta, S. Deering, "Generic Packet Tunneling in IPv6 Specification", IETF RFC 2473, December 1998

Παράρτημα Β

ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΠΟΛΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

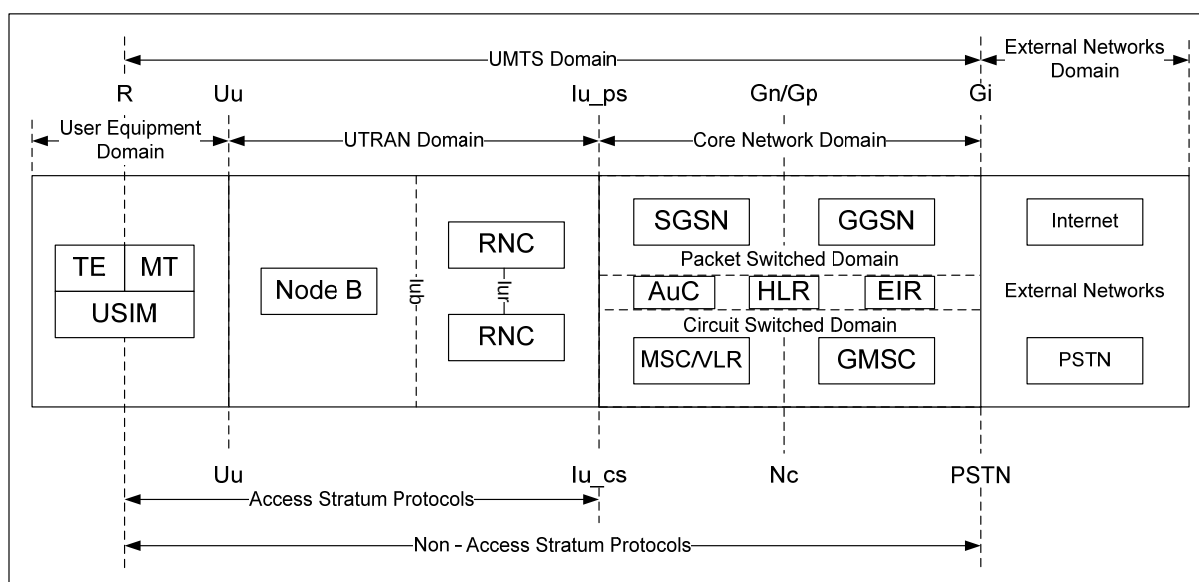
Το παράρτημα περιγράφει εκτενώς τη λειτουργία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς με έμφαση στο σύστημα UMTS, όπως αυτό παρουσιάζεται στα πρότυπα που εκδίδονται από τον οργανισμό 3GPP. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περιοχή μεταγωγής πακέτου, όπως αυτή ορίζεται στα πλαίσια της υπηρεσίας GPRS, και παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service), που αφορά την υποστήριξη υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου πολυεκπομπής εντός του δικτύου UMTS. Η υπηρεσία MBMS προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής. Η υποστηριζόμενη λειτουργικότητα καλύπτει τους τομείς διαχείρισης συνόδων και ποιότητας υπηρεσίας, διαχείρισης κινητικότητας, ασφάλειας, μεταφορά δεδομένων στο επίπεδο δικτύου ορίζοντας με αυτόν τον τρόπο μία εφάμιλλη της IP Multicast υπηρεσία.

Η υποστήριξη υπηρεσιών πολυεκπομπής σε συστήματα κινητών επικοινωνιών δεν αποτέλεσε πρώτη μέριμνα για τους οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων. Η ίδια φιλοσοφία ακολουθήθηκε και στα συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G). Μία από τις πλέον βασικές αιτίες είναι ότι η ζήτηση για υπηρεσίες πολυεκπομπής καθυστέρησε αρκετά (αν και υπήρξε αλματώδης εξέλιξη των τεχνολογιών πολυεκπομπής, από άποψη μηχανισμών και πρωτοκόλλων σηματοδότησης για δίκτυα μεταγωγής πακέτου). Η ανάπτυξη εφαρμογών για εμπορικούς σκοπούς κυρίως, εκτός δηλαδή του Mbone [1]-[2], προωθήθηκε στα πλαίσια ερευνητικών/ακαδημαϊκών προγραμμάτων και δεν ήταν σε καμία περίπτωση εφάμιλλη σε ποιότητα με αυτή των υπηρεσιών unicast. Στις μέρες μας, η απαίτηση παροχής προηγμένων υπηρεσιών εικόνας και ήχου μέσω κινητών τηλεφώνων έχει αλλάξει σημαντικά το τοπίο και έχει καταστήσει τη χρήση τεχνολογιών πολυεκπομπής στα συστήματα κινητών επικοινωνιών επιτακτική. Το παρόν παράρτημα παρουσιάζει την σημερινή κατάσταση, αναφορικά με τις διαδικασίες παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής στο σύστημα UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Αρχικά δίδεται μια γενική εικόνα για την αρχιτεκτονική του UMTS και τις δυνατότητες που έχει για την παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου. Ακολούθως εξετάζονται οι μηχανισμοί που αφορούν στη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες που παρέχονται από δικτύου για την υποστήριξη υπηρεσιών πολυεκπομπής Διαδικτύου και αναλύονται οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας που σχετίζονται με το βασικό αντικείμενο της διατριβής.

B.1 Συστήματα κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς

B.1.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS

Η γενική αρχιτεκτονική δομή του UMTS [3] έχει θεωρήσει τέσσερις ξεχωριστές υπο-περιοχές με βάση τους κόμβους που απαρτίζουν το δίκτυο και το είδος των υπηρεσιών που προσφέρει το καθένα. Αυτές είναι:



Σχήμα Β - 1. Αρχιτεκτονική Δικτύου UMTS - Περιοχές Δικτύου

- *Εξοπλισμός Χρήστη (User Equipment, UE)*, που απαρτίζεται από το κινητό τερματικό - στο οποίο τερματίζονται όλα τα UMTS πρωτόκολλα - τον τερματικό εξοπλισμό (Mobile

Terminal, MT, ουσιαστικά πρόκειται για μία συσκευή με υπολογιστική ισχύ ικανή να καλύψει τις ανάγκες των εφαρμογών) και την USIM κάρτα.

- *Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης* (UMTS Terrestrial Radio Access Network, UTRAN), που περιλαμβάνει τους κόμβους RNC (Radio Network Controller) και τους Σταθμούς Βάσης (Node B).
- *Δίκτυο Πυρήνα/Κορμού* (Core Network, CN), εντός του οποίου εκτελούνται όλες οι προσφερόμενες από το δίκτυο υπηρεσίες και το οποίο παρέχει διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα.
- *Εξωτερικά Δικτύων* (External Networks – PSTN και Packet Data Networks, π.χ. Internet, X.25).

Ανάλογα με το είδος κίνησης που μεταγεται ορίζονται δύο ανεξάρτητες περιοχές στο δίκτυο κορμού· η *περιοχή μεταγωγής κυκλώματος* (circuit switched domain) και η *περιοχή μεταγωγής πακέτου* (packet switched domain). Οι κόμβοι που τις απαρτίζουν είναι στην μεν πρώτη το MSC/VLR (Mobile Switching Centre/Visited Location Register) και το GMSC (Gateway MSC), ενώ στην δεύτερη ο SGSN (Serving GPRS Support Node) και ο GGSN (Gateway GPRS Support Node). Επιπρόσθετα το δίκτυο κορμού περιλαμβάνει τους κόμβους HLR (Home Location Register), EIR (Equipment Identity System) και AuC (Authentication Centre) που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή δεδομένων σχετικά με τους χρήστες (εγγραφές αυθεντικότητας, πιστοποίησης, δικαιώματα πρόσβασης). Αναφορικά με την χρήση των πρωτοκόλλων, ορίζονται δυο ανεξάρτητα στρώματα (strata): το Access Stratum (AS) και το Non-Access Stratum (NAS). Στην πρώτη περίπτωση αναφερόμαστε σε πρωτόκολλα που σχετίζονται με διαδικασίες που εκτελούνται για την εγκατάσταση και τον έλεγχο των μηχανισμών πρόσβασης μεταξύ του κινητού τερματικού και του δικτύου πρόσβασης. Στη δεύτερη για διαδικασίες που εκτελούνται μεταξύ των τερματικών και του δικτύου κορμού. Στο Σχήμα Β - 1 παρουσιάζονται οι παραπάνω οι κόμβοι του δικτύου UMTS, η κατανομή τους στις διάφορες περιοχές του και τα σημεία αναφοράς που τις διαχωρίζουν. Στο σχήμα δεν σημειώνονται τα σημεία αναφοράς στο δίκτυο κορμού που αφορούν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων UMTS καθώς και συστημάτων προηγούμενης γενιάς (GSM). [3]-[4]

B.1.2 Παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου στο UMTS – Υπηρεσία GPRS

Η παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου στο UMTS υλοποιείται μέσω της υπηρεσίας GPRS [5]-[7] η οποία επιχειρεί την εγκατάσταση συνδέσεων μεταγωγής πακέτου από άκρο σε άκρο εντός της περιοχής UMTS, δηλαδή μεταξύ του σημείων αναφοράς R και Gi (βλέπε Σχήμα Β - 1). Η υπηρεσία στηρίζεται στην έννοια της ιεραρχικής εγκατάστασης φορέων (bearers) μεταγωγής πακέτου μεταξύ των διαφόρων περιοχών του συστήματος και μεταξύ των κόμβων που τις απαρτίζουν. Στην κορυφή της συγκεκριμένης ιεραρχίας βρίσκεται ο λεγόμενος φορέας υπηρεσίας UMTS, πάνω από τον οποίο μεταφέρονται τα πακέτα των κινητών χρηστών από το ένα σημείο εισόδου (R ή Gi) προς το άλλο (Gi ή R αντίστοιχα). Στην πράξη η υπηρεσία GPRS

δίνει στους τελικούς χρήστες την εικόνα ότι το σύστημα παρέχει τα μέσα ώστε να συνδεθούν με ένα (εξωτερικό) δίκτυο μεταγωγής πακέτου, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση της λειτουργίας των τοπικών δικτύων δεδομένων (IEEE 802) [8]. Ο κόμβος GGSN παίζει το ρόλο του δρομολογητή πρόσβασης για κάθε κινητό τερματικό που επιθυμεί να στείλει ή να λάβει πακέτα και στον οποίο με την εγκατάσταση της από άκρο σε άκρο σύνδεσης, ανατίθεται μία ή περισσότερες έγκυρες διευθύνσεις στρώματος δικτύου. Οι συγκεκριμένες διευθύνσεις λειτουργούν ως αναγνωριστικά του τερματικού στα εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου (π.χ. Internet) και καθιστούν εφικτή τη δρομολόγηση των πακέτων του σε αυτά. Σημειώνεται ότι οι διευθύνσεις IP δεν παίζουν κάποιο ρόλο στη διαδικασία προώθησης/δρομολόγησης της κίνησης από και προς τα τερματικά εντός του δικτύου UMTS. Οι βασικές υπηρεσίες που προσφέρει η υπηρεσία GPRS κι εμπεριέχονται στα πρωτόκολλα που την απαρτίζουν είναι:

- Έλεγχος Πρόσβασης στο Δίκτυο
- Διαχείριση Πόρων Συστήματος, Ασύρματων και Ενσύρματων Συνδέσεων
- Μεταγωγή (Δρομολόγηση) πακέτων εντός του δικτύου UMTS και μεταφορά των πακέτων των τελικών χρηστών, εντός του UMTS αλλά και προς και από κάποιο εξωτερικό δίκτυο (π.χ. Διαδίκτυο, X.25)
- Διαχείριση Κινητικότητας
- Διαχείριση Δικτύου (Network Management)

Σε γενικές γραμμές η λειτουργία ελέγχου πρόσβασης στο δίκτυο αφορά την εκτέλεση διεργασιών μεταξύ των κινητών χρηστών και του συστήματος για την πιστοποίηση της αυθεντικότητας των δύο επικοινωνούντων μερών, την εγγραφή του χρήστη στην υπηρεσία επιπέδου δικτύου (UMTS), την εξουσιοδότηση και τον έλεγχο στην πρόσβαση στους ζητούμενους πόρους του συστήματος, τη χρέωσή του (πρόκειται ουσιαστικά για την υλοποίηση των λειτουργιών που προβλέπονται για τα συστήματα AAA – Authentication, Authorization, Accounting). Από την άλλη η λειτουργία δρομολόγησης και μεταφοράς πακέτων καθιστά δυνατή την εγκατάσταση συνδέσεων με συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας, η οποία συμφωνείτε μεταξύ των τερματικών και του δικτύου τη στιγμή της εγκατάστασής και είναι διαπραγματεύσιμη κατά τη διάρκεια παροχής της υπηρεσίας. Η υπηρεσία GPRS δίνει τη δυνατότητα διαπομπής των συνδέσεων ενός κινητού χρήστη από ένα σημείο πρόσβασης σε κάποιο άλλο. Θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι οι διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας καθιστούν εφικτή της διαπομπή του χρήστη εξασφαλίζοντας παράλληλα (εφόσον υπάρχουν οι απαιτούμενοι πόροι στο σύστημα) ότι ακόμη και κατά την διάρκεια της διαπομπής δεν θα προκληθεί μείωση στο επίπεδο της προσφερόμενης στο χρήστη ποιότητας υπηρεσίας (απρόσκοπτες διαπομπές).

B.1.2.1 Φορείς και Κλάσεις Υπηρεσίας – Ποιότητα Υπηρεσίας στο UMTS

Όπως προαναφέρθηκε, η παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας στο UMTS στηρίζεται στην εγκατάσταση *φορέων υπηρεσίας* (bearers), που ακολουθούν ένα *ιεραρχικό μοντέλο* [10]. Ως φορέας ορίζεται η σύνδεση μεταξύ δύο (ή περισσότερων στην περίπτωση της υπηρεσίας MBMS, βλέπε ενότητα B.2.2) μερών, με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ποιότητας. Σύμφωνα με το

παραπάνω μοντέλο, αρχικά ζητείται η εγκατάσταση του υψηλότερου στην ιεραρχία φορέα, που καλύπτει την από άκρο σε άκρο υπηρεσία εντός του δικτύου UMTS (φορέας υπηρεσίας UMTS). Η εγκατάσταση του φορέα UMTS σκανδαλίζει την εγκατάσταση ενός φορέα στο δίκτυο πρόσβασης (UTRAN bearer) κι ενός φορέα ιδίου επιπέδου στο δίκτυο πυρήνα (CN bearer). Αντίστοιχα, ο πρώτος από αυτούς αιτείται την εγκατάσταση ενός φορέα για την ασύρματη ζεύξη κι άλλων (ανεξάρτητων/στο ίδιο επίπεδο) για τις ενσύρματες. Η διαδικασία ολοκληρώνεται στο κατώτατο επίπεδο της ιεραρχίας που αφορά την πραγματική διαχείριση των φυσικών πόρων του συστήματος, και τις πραγματικές ζεύξεις μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων. Αντίστοιχα ισχύουν και στην μεριά του δικτύου πυρήνα. Όλοι οι φορείς που εγκαθίστανται έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά από άποψη ποιότητας υπηρεσίας ώστε ή ιδεατή από άκρο σε άκρο σύνδεση να έχει αντίστοιχα ενιαία χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας³⁶.

Η αρχιτεκτονική ποιότητας υπηρεσίας του UMTS ορίζει τέσσερις (4) διαφορετικές *κλάσεις υπηρεσίας* (ή *κλάσεις κίνησης*), καθεμία από τις οποίες ικανοποιεί διαφορετικές απαιτήσεις αναφορικά με τις παραμέτρους ποιότητας που την χαρακτηρίζουν κι οι οποίες είναι:

- Conversational
- Streaming
- Interactive
- Background

Ο βασικός παράγοντας για τον διαχωρισμό μεταξύ των κλάσεων υπηρεσίας είναι η ευαισθησία που έχει η καθεμία αναφορικά με την καθυστέρηση την οποία μπορούν να υποστούν τα πακέτα που μεταφέρονται από τον φορέα που την έχει ενεργοποιήσει. Για παράδειγμα στην περίπτωση της conversational απαιτείται ταχύτατη παράδοση των πακέτων (υπηρεσίες τηλεφωνίας), ενώ για την background δεν ορίζεται κάποιος περιορισμός (υπηρεσία e-mail). Εκτός από την καθυστέρηση σημαντικό ρόλο παίζουν κι άλλες παράμετροι, όπως η εγγύηση του ρυθμού μετάδοσης, η παράδοση δεδομένων με συγκεκριμένο αριθμό λαθών ή η προτεραιότητα για τη μεταφορά των πακέτων (π.χ. υπηρεσία www μπορεί να έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από την e-mail). Σε κάθε περίπτωση πάντως η κατηγοριοποίηση γίνεται διότι ανεξάρτητα από τις επιμέρους τιμές των παραμέτρων ποιότητας που πρέπει να υποστηριχθούν, η διαδικασίες εγκατάστασης συνδέσεων ενεργοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς δικτύου για κάθε κλάση. Ο βασικός στόχος είναι η βέλτιστη χρήση των πόρων του συστήματος και η τήρηση των συμφωνιών μεταξύ δικτύου και τελικών χρηστών αναφορικά με το επίπεδο της προσφερόμενης υπηρεσίας. Για παράδειγμα η ενεργοποίηση ενός φορέα υπηρεσίας streaming για τη μεταφορά μίας ροής video με απαίτηση για εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση ενός φορέα εγγυημένης μετάδοσης (χωρίς σφάλματα) για την ασύρματη ζεύξη (όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα λάθους). Αντίθετα για μία υπηρεσία www κλάσης background μπορεί να μην ενεργοποιηθεί ο φορέας εγγυημένης μετάδοσης.

³⁶ Στο Σχήμα Β - 5 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ποιότητας υπηρεσίας του UMTS που καλύπτει την περίπτωση των υπηρεσιών πολυεκπομπή.

B.1.2.2 Μηχανισμοί Διαχείρισης Συνόδων

Στην αρχιτεκτονική GPRS ορίζονται επιμέρους υπολειτουργίες κατάλληλες για την διαχείριση των συνόδων των τελικών χρηστών [5]. Επιγραμματικά αναφέρονται οι ακόλουθες:

- Αναμετάδοση πακέτων πληροφορίας μεταξύ διαφόρων λειτουργικών οντοτήτων εντός συγκεκριμένων κόμβων που αφορά την προσαρμογή τους από ένα πρωτόκολλο σε ένα άλλο (για παράδειγμα άλλο είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την μεταφορά των πλαισίων κίνησης στην ασύρματη ζεύξη κι άλλο στην ενσύρματη, εφόσον άλλες είναι κι απαιτήσεις σε λειτουργικότητα σε καθεμία από αυτές)
- Δρομολόγηση των μεταφερόμενων πακέτων μεταξύ των κόμβων που απαρτίζουν το UMTS δίκτυο
- Μετάφραση κι αντιστοίχηση διευθύνσεων δικτύου σε σημεία εισόδου υπηρεσίας επιπέδου δικτύου UMTS
- Εγκατάσταση διόδων πακέτων (tunneling) μεταξύ διαφόρων κόμβων του συστήματος
- Συμπύεση πακέτων δεδομένων που ανήκουν σε συγκεκριμένες ροές
- Κρυπτογράφηση πακέτων συνόδων
- Λειτουργία Domain Name Server

Κατά την εκτέλεση των διαδικασιών εγκατάστασης συνόδων, αρχικά επιλέγεται ο κατάλληλος κόμβος GGSN, ο οποίος αποτελεί το σημείο πρόσβασης του χρήστη στην υπηρεσία δεδομένων (μεταγωγής πακέτων IP) που ζητά. Στη συνέχεια ανατίθεται στο τερματικό μία διεύθυνση επιπέδου δικτύου (IP) κι δεσμεύονται οι πόροι στο ενσύρματο και το ασύρματο κομμάτι της διαδρομής. Από το σημείο αυτό κι έπειτα η σύνδεση του τελικού χρήστη με το σημείο πρόσβασης υπηρεσίας μεταγωγής πακέτου είναι εγκατεστημένη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά πακέτων κίνησης από και προς το κινητό.

B.1.2.3 Μηχανισμοί Διαχείρισης Κινητικότητας

Η υπηρεσία GPRS υποστηρίζεται από τον πιο προηγμένο μηχανισμό διαχείρισης κινητικότητας χρηστών που έχει αναπτυχθεί σε συστήματα επικοινωνιών ευρείας κλίμακας δίνοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης απρόσκοπτων, ταχέων και με ελάχιστα λάθη διαπομπών κινητών χρηστών [5]. Σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός διαφοροποιείται με βάση δυο κριτήρια: το πρώτο αφορά το αν ο διαπεμπόμενος χρήστης έχει ενεργές συνδέσεις (πραγματοποιείται μεταφορά δεδομένων) τη στιγμή της διαπομπής, ενώ το δεύτερο το αν η διαπομπή προκαλεί/απαιτεί ή όχι την αλλαγή του κόμβου SGSN που εξυπηρετεί τον χρήστη (η γεωγραφική περιοχή στην οποία εισέρχεται το κινητό δεν εξυπηρετείται από τον τρέχοντα). Στην περίπτωση που δεν απαιτείται αλλαγή του κόμβου SGSN, η διαπομπή εκτελείται αποκλειστικά εντός του δικτύου πρόσβασης και εμπλέκει μόνο τα AS πρωτόκολλα. Δηλαδή εκτελείται διαφανώς προς το δίκτυο κορμού. Στην αντίθετη περίπτωση ο μηχανισμός πραγματοποιεί την μεταφορά των αντίστοιχων φορέων από το παλιό SGSN στο νέο (το άλλο άκρο του φορέα διατηρείται σταθερό στο GGSN, το οποίο δεν αλλάζει καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της υπηρεσίας). Περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τη λειτουργία του μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας που προσφέρει η

υπηρεσία GPRS περιέχονται στο [5] και δεν θα αναλυθούν περισσότερο δεδομένου ότι είναι εκτός του βασικού αντικειμένου της διατριβής.

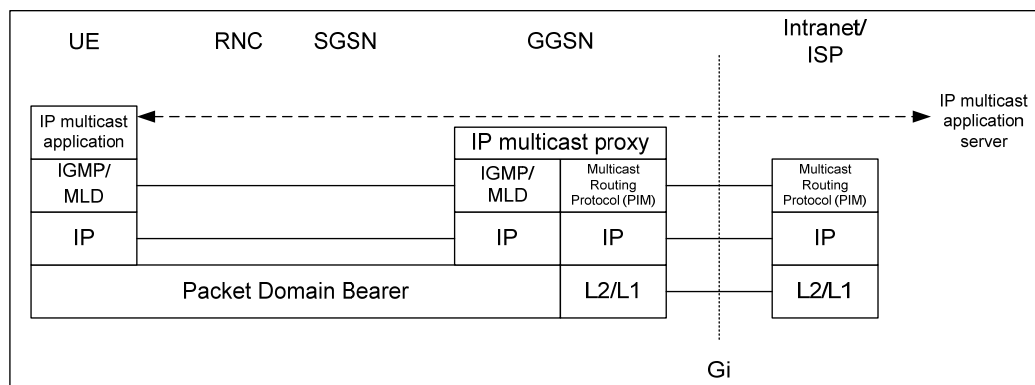
B.2 Παροχή υπηρεσιών IP multicast στο UMTS

Όπως προαναφέρθηκε, η παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου στο UMTS πραγματοποιείται θεωρώντας την εγκατάσταση κατάλληλων συνδέσεων μεταξύ των κινητών τερματικών και του σημείου IP πρόσβασης (για την περιοχή μεταγωγής πακέτου), δηλαδή τον κόμβο GGSN. Αρχικά, η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής στο UMTS, προσφέρθηκε εντός του πλαισίου που ορίζεται από τη λειτουργία της βασικής υπηρεσίας μεταγωγής πακέτων GPRS και θεωρήθηκε σαν μία απλή υπηρεσία IP που προσφέρεται από το δίκτυο UMTS. Για την εκτέλεσή της βασική προϋπόθεση παρέμεινε η λειτουργία των μηχανισμών ελέγχου συμμετοχών και δρομολόγησης πολυεκπομπής που προβλέπεται από τη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP. Εντούτοις με τη χρήση του συγκεκριμένου μηχανισμού, που αναλύεται στην ακόλουθη ενότητα, η μεταφορά των πακέτων κίνησης πολυεκπομπής, αν και είναι συμβατή με την αρχιτεκτονική IP Multicast [11], δεν επιτελεί βασικούς στόχους της όπως η ελαχιστοποίηση των επαναμεταδόσεων κατά την δρομολόγηση πακέτων κίνησης εντός του UMTS. Ως εκ τούτου η χρήση της καθίσταται κάθε άλλο παρά αποδοτική, αν όχι απαγορευτική, σε περιπτώσεις εφαρμογών ευρείας κλίμακας, όπως ισχύει στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, που χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις σε δικτυακούς πόρους (στο ασύρματο ή το ενσύρματο μονοπάτι). Έχοντας αναγνωρίσει τις παραπάνω αδυναμίες και με στόχο να καλυφθεί το κενό της παροχής πολυμεσικών εφαρμογών που απευθύνονται στο σύνολο ή σε κάποια εξουσιοδοτημένη ομάδα χρηστών, οι σχεδιαστές του συστήματος UMTS προχώρησαν στον ορισμό της υπηρεσίας MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service). Η υπηρεσία MBMS ουσιαστικά παρουσιάζει μία εφάμιλλη της GPRS βασικής υπηρεσίας στο πεδίο της επικοινωνίας πολυεκπομπής και αναλύεται στην ενότητα B.2.2. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν με λεπτομέρεια οι παραπάνω δύο εναλλακτικές λύσεις που έχουν θεωρηθεί στα πλαίσια του συστήματος UMTS για την παροχή IP Multicast υπηρεσιών σε τελικούς χρήστες με βάση τις απαιτήσεις που αφορούν στο δίκτυο και τους μηχανισμούς διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας των τελικών χρηστών.

B.2.1 IP Multicast υπερκείμενη προς GPRS βασικής υπηρεσίας

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2,1, η υποστήριξη υπηρεσιών IP multicast ανήκει στην βασική λειτουργικότητα του πρωτοκόλλου IP και γενικότερα στις υπηρεσίες που προσφέρει το στρώμα δικτύου σε συστήματα τα οποία έχουν βασιστεί στο IP. Από την άλλη, η βασική υπηρεσία GPRS, περιγράφεται ως δυνατότητα παροχής IP υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου, εφόσον παρέχεται η δυνατότητα σε κάθε τερματικό να εγκαταστήσει συνδέσεις σημείου-προς-σημείο με τον κόμβο GGSN κατ' απαίτηση. Κατά συνέπεια είναι προφανές ότι από τη στιγμή που το GGSN παίζει το ρόλο του IP δρομολογητή πρόσβασης για τα κινητά τερματικά, κι εφόσον τρέχει σε αυτόν ένα από τα πρωτόκολλα που καθιστούν εφικτή την επικοινωνία του με άλλους δρομολογητές του δικτύου κορμού που υποστηρίζουν IP multicast δρομολόγηση (PIM-DM/SM κλπ.), είναι δυνατό να προσφερθούν στους τελικούς χρήστες υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου πολυεκπομπής σύμφωνες με το μοντέλο IP Multicast [7]. Στο Σχήμα Β - 2 παρουσιάζεται η δομή των

χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων που καθιστούν εφικτή την παροχή IP Multicast υπηρεσιών σε κινητούς χρήστες με χρήση της βασικής υπηρεσίας μεταγωγής πακέτου GPRS. Για την αποστολή πακέτων στα τερματικά από τον GGSN κόμβο απαιτείται η εγκατάσταση μίας επιπλέον αμφίδρομης σύνδεσης μεταξύ του καθενός τερματικού και του κόμβου GGSN στο επίπεδο χρήστη/δεδομένων. Η σύνδεση χρειάζεται για την περιοδική ανταλλαγή των μηνυμάτων των πρωτοκόλλων ελέγχου συμμετοχής σε ομάδες πολυεκπομπής, όπως προβλέπεται από τα πρωτόκολλα IGMP ή MLD.



Σχήμα Β - 2. Παροχή υπηρεσίας IP Multicast ως υπερκείμενη της GPRS

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι αν και η λειτουργικότητα που υποστηρίζεται είναι πλήρης σε ότι αφορά την παροχή IP multicast υπηρεσιών σε τελικούς χρήστες. Εντούτοις πραγματοποιείται πολύ κακή χρήση των πόρων του συστήματος εφόσον, για κάθε τελικό αποδέκτη μίας ροής δεδομένων, απαιτείται η εγκατάσταση μιας σημείου-προς-σημείο σύνδεσης, εντός του δικτύου πυρήνα αλλά και του δικτύου πρόσβασης. Ιδίως στην περίπτωση της ασύρματης ζεύξης η εγκατάσταση πολυάριθμων συνδέσεων για την ίδια ροή δεδομένων μπορεί να οδηγήσει το κανάλι σε κορεσμό ιδίως για δημοφιλείς υπηρεσίες. Από την άλλη, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για η εφαρμογή της δεν απαιτεί καμία απολύτως μεταβολή ή προσθήκη στη λειτουργικότητα του υπάρχοντος δικτύου εφόσον εκτελούνται τα κατάλληλα πρωτόκολλα στους τελικούς χρήστες και τον κόμβο GGSN. Επίσης δε θέτει κάποιο περιορισμό αναφορικά με την διαχείριση κινητικότητας πηγών πολυεκπομπής εφόσον ανεξάρτητα από το σημείο πρόσβασης της πηγής στο σύστημα, η κίνηση μεταφέρεται διαμέσου του κόμβου GGSN (δηλ. το εγκατεστημένο δένδρο διανομής ξεκινά πάντα από αυτόν), που παίζει το ρόλο του MDR για το κινητό.

B.2.2 Η Υπηρεσία MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service)

Η έκδοση 6 των προδιαγραφών για το σύστημα UMTS, συμπεριλαμβάνει την ανάλυση απαιτήσεων και την ανάπτυξη των απαραίτητων προτύπων ώστε να καταστεί δυνατή η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής της περιοχής μεταγωγής πακέτου του UMTS. Για το σκοπό αυτό ορίζεται η *Υπηρεσία Καθολικής Εκπομπής/Πολυεκπομπής για Εφαρμογές Πολυμέσων (Multimedia Broadcast/Multicast Service, MBMS)* [12]-[14]. Η MBMS ορίζεται ως μία υπηρεσία σημείου προς πολλαπλά σημεία, κατά την οποία τα δεδομένα μεταδίδονται από μία μοναδική πηγή³⁷ προς πολλαπλούς αποδέκτες εντός του δικτύου. Η υπηρεσία έχει δύο βασικούς κι εν

³⁷ Ο όρος 'μοναδική πηγή' αφορά το αντίστοιχα μοναδικό σημείο εισόδου της MBMS κίνησης.

μέρει ανεξάρτητους τρόπους λειτουργίας. Ο πρώτος, αφορά τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών καθολικής εκπομπής δεδομένων (broadcast) προς το σύνολο των κινητών χρηστών, ενώ ο δεύτερος αφορά την παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής.

B.2.2.1 Βασική Αρχιτεκτονική

Οι βασικές απαιτήσεις που καλύπτει η υπηρεσία MBMS είναι ότι αφ' ενός πρέπει να είναι συμφυής και συμβατή με τις έννοιες που ορίζονται από την υπηρεσία IP Multicast, κι αφ' ετέρου πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες του συστήματος UMTS αναφορικά με τη διαχείριση συνόδων και κινητικότητα των χρηστών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η υπηρεσία MBMS δεν έρχεται να προστεθεί ως υπερκείμενη της βασικής υπηρεσίας μεταγωγής πακέτου GPRS, προτείνοντας για παράδειγμα μία απλή και συμβατική αναπαραγωγή και μετάδοση των πακέτων κίνησης εντός των κόμβων του δικτύου, με χρήση των ήδη προηγμένων υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου. Αντίθετα προτείνει τη δημιουργία όλων των απαραίτητων μηχανισμών που θα καταστήσουν δυνατή την εγκατάσταση του δένδρου διανομής εντός του δικτύου UMTS, για την προώθηση των πακέτων κίνησης στους τελικούς χρήστες εντός του δικτύου κορμού και του δικτύου πρόσβασης, τόσο για το ενσύρματο κομμάτι του δικτύου, όσο και για το ασύρματο (πραγματοποιώντας χρήση κοινόχρηστων καναλιών μεταφοράς – shared transport channels). Η σχεδίασή της έχει γίνει με γνώμονα το γεγονός ότι το δίκτυο τελικά θα είναι σε θέση να υποστηρίξει ταυτόχρονες συνδέσεις διαφόρων τύπων (ένας-προς-έναν, ένας-προς-πολλούς, ένας-προς-όλους), ώστε οι διαδικασίες να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (π.χ. η εγκατάσταση μίας υπηρεσίας MBMS δεν θα πρέπει να προϋποθέτει την ύπαρξη μίας ήδη εγκατεστημένης σύνδεσης σημείου-προς-σημείο). Επιπλέον βασικό στοιχείο της νέας υπηρεσίας είναι το ότι εισάγει δημιουργεί μία νέα κοινή βάση πληροφοριών του δικτύου (π.χ. προσφερόμενες υπηρεσίες σε συγκεκριμένες περιοχές) και του εκάστοτε χρήστη (προφίλ υπηρεσιών στις οποίες έχει εγγραφεί ή πληροφορίες σχετικές με την κινητικότητα του – mobility management context), που αφορά στη διαχείριση υπηρεσιών πολυεκπομπής αποκλειστικά. Συμπερασματικά, η υπηρεσία MBMS ορίζεται σαν υπηρεσία στρώματος 3, αντίστοιχα σε αυτήν που ορίζεται από την υπηρεσία GPRS.

Φάσεις εκτέλεσης υπηρεσίας MBMS

Ο κύκλος εκτέλεσης της υπηρεσίας MBMS αποτελείται από 8 (οκτώ) ξεχωριστές και ανεξάρτητες μεταξύ τους *φάσεις*, σε καθεμία από τις οποίες επιτελείται μία πολύ συγκεκριμένη διαδικασία. Η χρονική αλληλουχία που ακολουθείται κατά την εκτέλεση των διαφόρων αναλύεται στη συνέχεια. Ο Πίνακας Β - 1 παρουσιάζει τις διάφορες φάσεις εκτέλεσης την υπηρεσίας MBMS που αφορούν μία ομάδα πολυεκπομπής (multicast group).

Περίληπτικά, η εκτέλεση της φάσης *Εγγραφή* ουσιαστικά αντιστοιχεί στην δημιουργία μίας καταχώρησης στη βάση δεδομένων του δικτύου, που περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την εξουσιοδότηση των χρηστών της υπηρεσίας MBMS. Πρόκειται δηλαδή για το πρώτο στάδιο κατά το οποίο ο κάθε χρήστης και ο λειτουργός του δικτύου συμφωνούν ως προς τις υποστηριζόμενες/προσφερόμενες από το δίκτυο υπηρεσίες. Δεδομένης της φύσης και του τρόπου εκτέλεσης των υπηρεσιών πολυεκπομπής, η εκτέλεση της υπηρεσίας MBMS προβλέπει τη λειτουργία ενός ανεξάρτητου μηχανισμού, για την πραγματοποίηση ανακοινώσεων σχετικά με

συνόδους πολυεκπομπής που πρόκειται να προσφερθούν στο (άμεσο ή όχι) μέλλον. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός επιτρέπει στους τελικούς χρήστες της υπηρεσίας, να ενημερώνονται για όλη τη γκάμα των προσφερόμενων υπηρεσιών από την πλευρά του δικτύου. Ο βασικός σκοπός ύπαρξης αυτών των ανακοινώσεων και κατ' επέκταση της εκτέλεσης της φάσης *Ανακοίνωση Υπηρεσίας*, είναι η διανομή όλων των απαραίτητων πληροφοριών και παραμέτρων για την αρχικοποίηση της εκάστοτε υπηρεσίας. Για παράδειγμα οι ανακοινώσεις μπορεί περιλαμβάνουν την IP διεύθυνση που αντιστοιχεί στην ομάδα πολλαπλών προορισμών στη οποία θα πρέπει να συμμετάσχουν οι ενδιαφερόμενοι, την ακριβή ώρα εκτέλεσης της υπηρεσίας ή ακόμη πληροφορία σχετική με τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει να έχουν οι συνδέσεις που χρειάζεται να εγκατασταθούν. Η υλοποίηση του μηχανισμού ανακοινώσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση διαφόρων υπηρεσιών δικτύου όπως η υπηρεσία καθολικής εκπομπής κυψέλης (Cell Broadcast Service), μηχανισμούς προώθησης δεδομένων όπως (WAP, SMS, MMS), ή κλασικού μηχανισμούς του Διαδικτύου (χρήση εφαρμογών πρωτοκόλλων όπως τα HTTP και SAP).

Πίνακας Β - 1. Φάσεις παροχής υπηρεσίας MBMS πολυεκπομπής – multicast mode

Φάσεις εκτέλεσης υπηρεσίας MBMS	Εκτέλεση ανά	
	χρήστη	υπηρεσία
Έγγραφο (Subscription)	✓	
Ανακοίνωση υπηρεσίας (Service Announcement)		✓
Αίτηση Συμμετοχής Χρήστη (Joining)	✓	
Έναρξη Συνόδου (Session Start)		✓
Αναγγελία Μετάδοσης Δεδομένων (MBMS Notification)		✓
Μεταφορά Δεδομένων Υπηρεσίας MBMS (Data Transfer)		✓
Τερματισμός Συνόδου (Session Stop)		✓
Αναφορά Αποχώρησης Χρήστη (Leaving)	✓	

Κατά την εκτέλεση της φάσης *Αίτηση Συμμετοχής Χρήστη*, ένας εγγεγραμμένος στην υπηρεσία MBMS γίνεται μέλος της ομάδας πολυεκπομπής. Στη συνέχεια εγκαθίσταται η απαραίτητη πληροφορία στο δίκτυο και δημιουργείται ή επεκτείνεται το δένδρο διανομής ώστε να συμπεριλάβει τους κόμβους από τους οποίους θα περάσουν τα πακέτα προς τον συγκεκριμένο χρήστη. Αντίστοιχα, κατά την εκτέλεση της φάσης *Έναρξη Συνόδου* δεσμεύονται οι απαραίτητοι πόροι στο σύστημα που θα καταστήσουν δυνατή την μετάδοση των πακέτων κίνησης προς τους τελικούς χρήστες. Κατά τη διάρκεια της φάσης *Αναγγελία Μετάδοσης Δεδομένων* πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες διαδικασίες έτσι ώστε να εντοπιστούν και να ενημερωθούν οι κινητοί χρήστες που έχουν αιτηθεί τη συμμετοχή τους στη συγκεκριμένη MBMS

υπηρεσία κι επιπλέον σε συνεννόηση με το δίκτυο να πραγματοποιήσουν τις απαραίτητες ρυθμίσεις που θα καταστήσουν δυνατή την λήψη των δεδομένων της υπηρεσίας που ακολουθεί αμέσως μετά κατά την εκτέλεση της φάσης *Μεταφορά Δεδομένων Υπηρεσίας MBMS*.

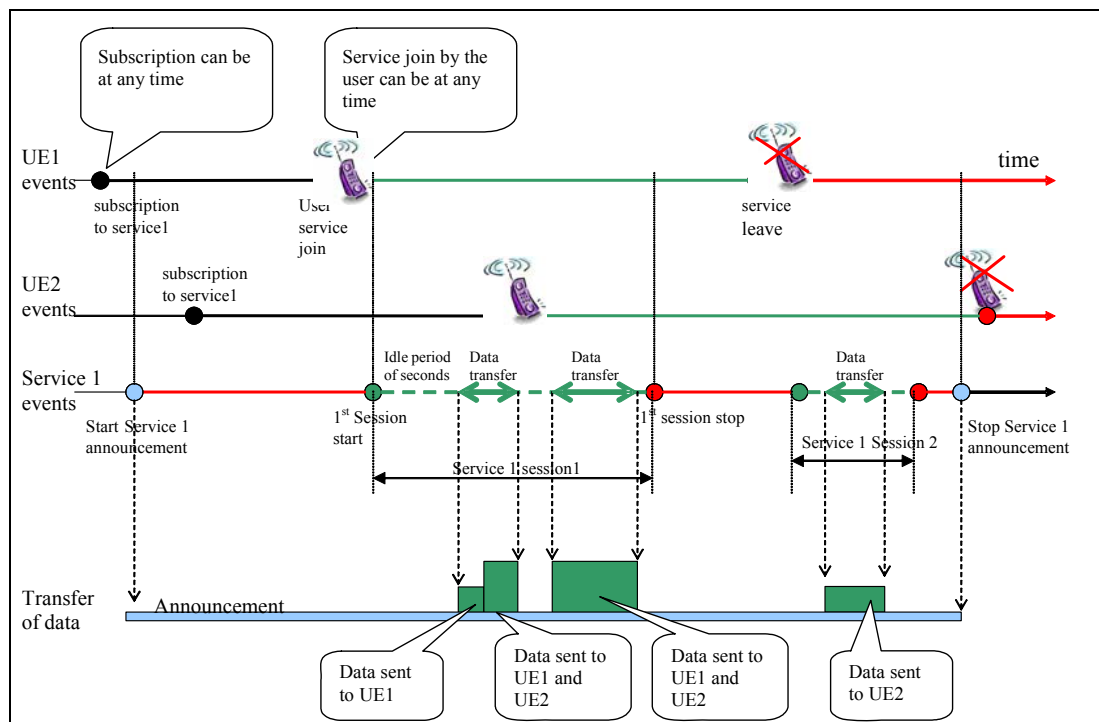
Στις δύο τελευταίες φάσεις (*Τερματισμός Συνόδου* και *Αναφορά Αποχώρησης Χρήστη*), πραγματοποιείται προσωρινός (παύση) ή μόνιμος (κατάλυση) τερματισμός της μεταφοράς δεδομένων προς το σύνολο των αποδεκτών της υπηρεσίας, κι αντίστοιχα η αποχώρηση ενός εγγεγραμμένου χρήστη που δεν επιθυμεί τη λήψη δεδομένων της υπηρεσίας εφεξής από την ομάδα αποδεκτών. Στην πρώτη περίπτωση η εκτέλεση τη διαδικασίας τερματισμού συνόδου σκανδαλίζεται από το γεγονός ότι είτε ολοκληρώθηκε η παράδοση όλων των δεδομένων της υπηρεσίας, είτε από το ότι δεν μεταφέρονται δεδομένα για σημαντικό χρονικό διάστημα επιβάλλοντας έτσι την αποδέσμευση των πόρων που καταναλώνονται για την υποστήριξή της (προσωρινός τερματισμός).

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να γίνουν δυο παρατηρήσεις. Η πρώτη αφορά τις στήλες «Εκτέλεση ανά χρήστη» και «Εκτέλεση ανά υπηρεσία» του Πίνακα Β - 1. Από τις περιγραφές που προηγήθηκαν για τις φάσεις εκτέλεσης μίας υπηρεσίας MBMS, γίνεται σαφές ότι μόνο οι φάσεις *Εγγραφή*, *Αίτηση Συμμετοχής Χρήστη* και *Αναφορά Αποχώρησης Χρήστη* εμπλέκουν άμεσα το χρήστη και μάλιστα η εκτέλεσή τους σκανδαλίζεται από τον ίδιο. Οι υπόλοιπες, εκτελούνται μετά από «πρωτοβουλίες» που αναλαμβάνει το δίκτυο και σχετίζονται με τα διάφορα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα ανά υπηρεσία MBMS, πχ. άφιξη πακέτων κίνησης. Η δεύτερη παρατήρηση αφορά στην διευκρίνιση των όρων *υπηρεσία MBMS* και *σύνοδος MBMS*. Μία *υπηρεσία MBMS* αποτελείται από μία ή περισσότερες *συνόδους MBMS*, οι οποίες δεν επικαλύπτονται χρονικά. Η εκτέλεση μίας συνόδου MBMS εναλλάσσεται μεταξύ ενεργών κι άεργων χρονικών περιόδων, κατά τις οποίες μεταδίδονται ή όχι αντίστοιχα δεδομένα της υπηρεσίας MBMS.

Στο Σχήμα Β - 3 παρουσιάζεται η χρονική αλληλουχία των φάσεων εκτέλεσης μίας υπηρεσίας MBMS με τις διάφορες φάσεις από τις οποίες περνάει. Το παράδειγμα αναφέρεται σε δύο διαφορετικούς χρήστες που έχουν ζητήσει δεδομένα που αντιστοιχούν στην ίδια υπηρεσία. Αναφορικά με τη σειρά εκτέλεσης των διαφόρων φάσεων τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι η φάση *Ανακοίνωση Υπηρεσίας* προηγείται (αρκετά - ώρες, ημέρες) της *Έναρξης Συνόδου*. Οι φάσεις *Αναγγελία Μεταφοράς Δεδομένων* και *Μεταφορά Δεδομένων* εκτελούνται μετά και πριν αντίστοιχα από την *Έναρξη* και *Λήξη Συνόδου*. Για την εκτέλεση των φάσεων *Αίτηση Συμμετοχής* κι *Αναφορά Αποχώρησης* δεν απαιτείται κάποιος συγχρονισμός με τις *Έναρξη* και *Τερματισμός Συνόδου* δεδομένου ότι κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα εφόσον είναι εγγεγραμμένος σε μια MBMS υπηρεσία να ζητήσει κατά βούληση τη συμμετοχή ή αποχώρησή του από την ομάδα πολυεκπομπής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η υπηρεσία MBMS δεν είναι απλά η υλοποίηση της υπηρεσίας IP Multicast στα πλαίσια του UMTS, εφόσον οι διαφορές της με την πρώτη είναι αρκετές και πολύ σημαντικές. Πιο αναλυτικά, η υπηρεσία MBMS προβλέπει την παράδοση πακέτων κίνησης ικανοποιώντας παράλληλα κάποιους περιορισμούς αναφορικά με την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας. Στην περίπτωση του IP Multicast, θεωρείται ότι η δρομολόγηση είναι βέλτιστης προσπάθειας και δεν παρέχεται καμία εγγύηση σχετικά με την ποιότητα των υπηρεσιών που

προσφέρονται. Επιπλέον η MBMS έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύψει τις ανάγκες του συστήματος αναφορικά με το γεγονός ότι οι προσφερόμενες υπηρεσίες αφορούν κινητούς χρήστες παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα εγκατάστασης συνόδων πολυεκπομπής συγκεκριμένης ποιότητας.



Σχήμα Β - 3. Χρονική αλληλουχία φάσεων εκτέλεσης υπηρεσίας MBMS

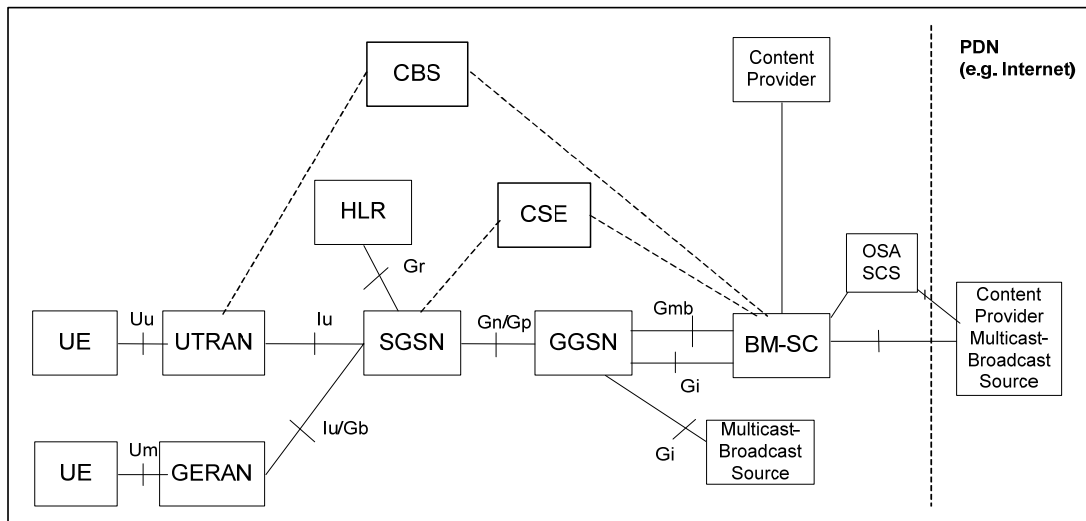
Αρχιτεκτονική UMTS για παροχή υπηρεσιών MBMS - Λειτουργικές Οντότητες

Η παροχή υπηρεσιών φορέων MBMS σε κινητούς χρήστες, στηρίζεται στην εκτέλεση πολλαπλών λειτουργιών από τους διάφορους κόμβους που συνθέτουν το σύστημα UMTS [13]. Το Σχήμα Β - 4 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική δομή των λειτουργικών οντοτήτων για την περιοχή μεταγωγής πακέτου. Η διαφοροποίηση της αρχιτεκτονικής σε σχέση με αυτή που παρουσιάστηκε νωρίτερα (βλ. ενότητα Β.1.1), είναι η εμφάνιση μίας νέας λειτουργικής οντότητας, επονομαζόμενη ως *Κέντρο Ελέγχου Υπηρεσιών Καθολικής Εκπομπής/Πολυεκπομπής* (Broadcast/ Multicast – Service Centre, BM-SC), επιφορτισμένη με τον έλεγχο της υπηρεσίας MBMS αποκλειστικά.

BM-SC (Broadcast Multicast – Service Centre)

Ο κόμβος BM-SC παρέχει την απαραίτητη λειτουργικότητα για την παροχή υπηρεσιών MBMS σε τελικούς χρήστες και λειτουργεί σαν σημείο εισόδου της κίνησης που προέρχεται από εξειδικευμένους παρόχους περιεχομένου πολυεκπομπής, που ελέγχονται ή όχι διοικητικά από το λειτουργό του δικτύου. Επίσης είναι επιφορτισμένος με την εκτέλεση διαδικασιών σχετικών με την *Πιστοποίηση, Εξουσιοδότηση και Χρέωση* (Authentication, Authorization, Accounting, AAA) των χρηστών για υπηρεσίες πολυεκπομπής. Η εκτέλεση των διαδικασιών AAA από την οντότητα BM-SC επίσης περιλαμβάνει τον έλεγχο ακεραιότητας των δεδομένων και την δημιουργία αναφορών χρέωσης. Επιπλέον, είναι υπεύθυνος να καθορίσει τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που χαρακτηρίζουν τους φορείς υπηρεσίας MBMS, να τις γνωστοποιήσει προς το

υπόλοιπο δίκτυο (κόμβο GGSN) και να σηματοδοτήσει την εκτέλεση των φάσεων *Έναρξη* και *Τερματισμός Συνόδου MBMS*. Τα συγκεκριμένα γεγονότα αντιστοιχούν στη δέσμευση και αποδέσμευση των πόρων πριν και μετά τη μετάδοση των δεδομένων της υπηρεσίας MBMS.



Σχήμα Β - 4. Αρχιτεκτονική συστήματος για υποστήριξη της υπηρεσίας MBMS

Αναφορικά με τη μετάδοση των δεδομένων των MBMS υπηρεσιών, το BM-SC είναι σε θέση να χρησιμοποιεί ειδικούς μηχανισμούς κωδικοποίησης, ιδιαίτερα για εφαρμογές ρευμάτων πληροφοριών πραγματικού χρόνου κυρίως (streaming services) και να καθιστά περισσότερο ανθεκτική την υπηρεσία στα λάθη μετάδοσης. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το BM-SC είναι υπεύθυνο για τον προγραμματισμό των μεταδόσεων για συνόδους ανήκουν σε κάθε MBMS υπηρεσία κι επιπλέον την υλοποίηση ενός μηχανισμού υπεύθυνου για την πραγματοποίηση επαναμεταδόσεων³⁸ συνόδων, μεταξύ της πηγής και των κινητών χρηστών. Τέλος το BM-SC είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση των διαδικασιών που σχετίζονται με την τεχνική περιγραφή των υπηρεσιών MBMS και την γνωστοποίησή τους μέσω προς τους τελικούς χρήστες. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν την ακριβή περιγραφή των μέσων που απαιτούνται για την εκτέλεση των υπηρεσιών, την περιγραφή των συνόδων που θα εκτελεστούν κατά τη διάρκεια παροχής της υπηρεσίας (IP διεύθυνση, ώρα μεταδόσεων, έκδοση αναγνωριστικών υπηρεσιών).

GGSN

Ο βασικός ρόλος του κόμβου GGSN στην αρχιτεκτονική της υπηρεσίας MBMS, είναι η μετάδοση IP multicast πακέτων σαν δεδομένα της υπηρεσίας δικτύου MBMS. Για τον λόγο αυτό αναλαμβάνει την εγκατάσταση και τερματισμό των απαραίτητων φορέων μετάδοσης, κατόπιν την απαραίτητης σηματοδότησης που προέρχεται από το BM-SC. Η εγκατάσταση των φορέων πολυεκπομπής γίνεται προς τους κόμβους SGSN που έχουν ζητήσει την εκάστοτε υπηρεσία και πραγματοποιείται με εγκατάσταση διόδων GTP-U με αυτούς.

SGSN

Η κύρια λειτουργία του κόμβου SGSN είναι ο έλεγχος της εγκατάστασης φορέων μεταφοράς δεδομένων μεταξύ των τερματικών και του δικτύου κορμού κι η υποστήριξη των μηχανισμών

³⁸ Κυρίως για υπηρεσίες εγγυημένης μετάδοσης (πχ. μεταφορά αρχείων)

κινητικότητας χρηστών. Η υλοποίηση των συγκεκριμένων διαδικασιών γίνεται με χρήση αντίστοιχων πλαισίων πληροφορίας (MBMS Information Contexts) όπως τα πλαίσια πληροφορίας κινητικότητας ή συνόδων που προδιαγράφει η υπηρεσία GPRS. Τα συγκεκριμένα πλαίσια πληροφορίας αφορούν τη διαχείριση πληροφοριών ανά υπηρεσία MBMS και ανά χρήστη που συμμετέχει στην ομάδα πολυεκπομπής. Όπως και στην περίπτωση του GGSN, ο κόμβος SGSN, ελέγχει την εγκατάσταση βασικών φορέων μεταφοράς δεδομένων με τους γειτονικούς του κόμβους στην αρχιτεκτονική του δικτύου, RNC και GGSN (Iu bearer και Gn/Gp bearer αντίστοιχα). Αντίστοιχα ελέγχει τον τερματισμό των συνόδων (μετά από αίτηση από τον κόμβο GGSN).

UTRAN

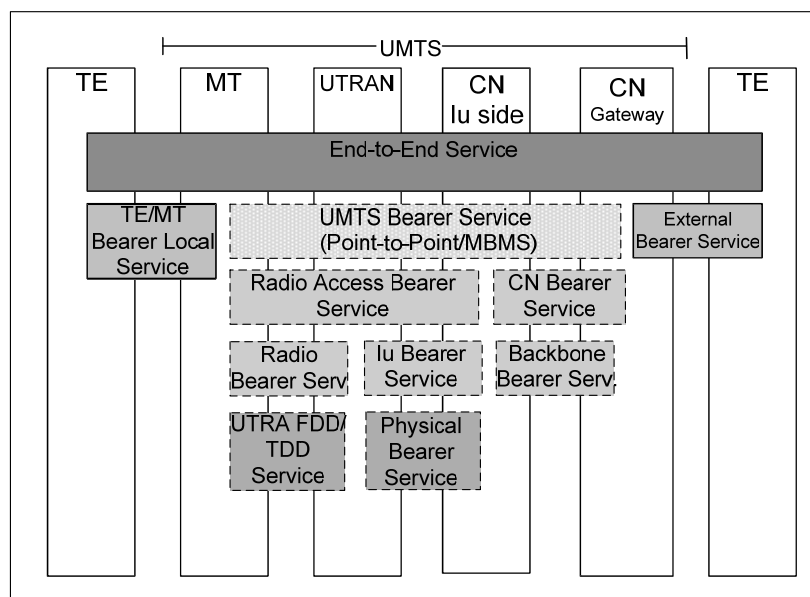
Η παροχή υπηρεσιών MBMS εντός του δικτύου πρόσβασης του UMTS, απαιτεί την ανάπτυξη επιπλέον μηχανισμών για τον έλεγχο της υπηρεσίας, την διαχείριση των πόρων του ραδιοδιαύλου και την ανάθεση καναλιών μεταφοράς σε ομάδες χρηστών. Σε γενικές γραμμές, η ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής MBMS στο δίκτυο πρόσβασης, προβλέπει τη χρήση μοιραζόμενων ή αποκλειστικά χρησιμοποιούμενων από τον κάθε χρήστη φορέων μεταφοράς δεδομένων. Η επιλογή των πρώτων σε σχέση με τα δεύτερα εξαρτάται από το πλήθος των χρηστών που έχουν ζητήσει την υπηρεσία MBMS σε κάθε κυψέλη και την πολιτική διαχείρισης πόρων που θα εφαρμόσει ο λειτουργός του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση πάντως τα πρότυπα δεν καθορίζουν εκ των προτέρων αυστηρά κριτήρια στα οποία θα στηριχθεί η επιλογή. Η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής MBMS εντός του δικτύου πρόσβασης του UMTS, επιβάλλει επιπλέον την εκτέλεση των διαδικασιών από την πλευρά του δικτύου για τον έλεγχο της κινητικότητας χρηστών, οι οποίοι συμμετέχουν σε ενεργές ή μη MBMS συνόδους. Επιπρόσθετα, το δίκτυο πρόσβασης έχει τη δυνατότητα να μεταδίδει ανακοινώσεις σχετικές με τις προσφερόμενες υπηρεσίες σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές (υπηρεσίες βασισμένες στη ευρύτερη γεωγραφική περιοχή στην οποία εντοπίζονται οι χρήστες), να υποστηρίζει τις διαδικασίες εντοπισμού των χρηστών (paging) και να παρέχει τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να κάνουν χρήση άλλων υπηρεσιών του δικτύου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μίας υπηρεσίας MBMS.

UE (User Equipment)

Από την πλευρά του τελικού χρήστη η μόνη απαίτηση είναι η συμμετοχή του στις διαδικασίες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της υπηρεσίας MBMS (κατά την εκτέλεση των φάσεων *Αίτηση Συμμετοχής* κι *Αναφορά Αποχώρησης Χρήστη*, βλέπε ενότητα B.1.2.2). Σημειώνεται πάντως ότι οι τελικοί χρήστες μπορεί να ενημερωθούν για επικείμενες συνόδους χωρίς αυτό να σημαίνει ότι απαιτείται η αποστολή κάποιας ιδιαίτερης αίτησης γι' αυτό το σκοπό από τον καθένα. Βασική απαίτηση επίσης παραμένει η συμμετοχή τους σε διαδικασίες που σχετίζονται με θέματα ασφάλειας. Επιπλέον, με βάση τα χαρακτηριστικά του τερματικού, δίνεται η δυνατότητα λήψης ανακοινώσεων για υπηρεσίες MBMS, πληροφοριών που σχετίζονται με τον εντοπισμό του χρήστη από το δίκτυο, αποθήκευσης δεδομένων της υπηρεσίας στο τερματικό κι όπως προαναφέρθηκε ταυτόχρονης εκτέλεσης υπηρεσιών άλλου τύπου.

B.2.2.2 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) MBMS φορέων

Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση της υπηρεσίας GPRS, η παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου σημείου-προς-σημείο σε κινητούς χρήστες πραγματοποιείται με την εγκατάσταση φορέων, με προκαθορισμένες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας, που εκτείνονται από τους τελικούς χρήστες μέχρι το σημείο IP πρόσβασης (GGSN). Η υπηρεσία MBMS θεωρεί αντίστοιχα την εγκατάσταση φορέων (συνδέσεων, bearers) μεταξύ των τελικών χρηστών και του σημείου IP multicast πρόσβασης. Οι συγκεκριμένοι φορείς, δεν εγκαθίστανται ανά τελικό χρήστη, αλλά ανά υπηρεσία MBMS και χρησιμοποιούνται από το σύνολο των χρηστών που έχουν αιτηθεί τη συμμετοχή τους στη εκάστοτε υπηρεσία. Τα χαρακτηριστικά ποιότητας κάθε MBMS υπηρεσίας είναι προκαθορισμένα. Επίσης ο κάθε φορέας υπηρεσίας MBMS μπορεί να συμπεριλάβει περισσότερους του ενός κόμβους του δικτύου σε καθένα επίπεδο της ιεραρχίας που ακολουθείται στη αρχιτεκτονική δομή του UMTS. Αυτό είναι σε αντίθεση με τη θεώρηση που έχει γίνει σχετικά με τους σημείο-προς-σημείο φορείς όπου μόνο ένας και μοναδικός κόμβος από κάθε επίπεδο συμπεριλαμβάνεται σε καθένα φορέα. Είναι προφανές ότι ενώ οι φορείς σημείου-προς-σημείο αναπτύσσονται κατακόρυφα στην ιεραρχία του συστήματος, οι φορείς υπηρεσιών πολλαπλών αποδεκτών αναπτύσσονται και οριζόντια, ώστε να καθίσταται εφικτή η ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων πολλαπλών προορισμών σε όλες τις περιοχές του δικτύου.



Σχήμα Β - 5. Επέκταση Αρχιτεκτονικής Ποιότητας Υπηρεσίας UMTS για υποστήριξη συνδέσεων μεταγωγής πακέτου πολυεκπομπή και σημείου-προς-σημείο

Στο Σχήμα Β - 5 παρουσιάζεται η διάρθρωση του μοντέλου παροχής ποιότητας υπηρεσίας του UMTS [10]. Στο σχήμα σημειώνονται με διακεκομμένη γραμμή οι φορείς που ουσιαστικά επεκτείνονται για να συμπεριλάβουν τις έννοιες που εισάγει η υπηρεσία MBMS. Από το σχήμα φαίνεται ότι εκτός από την επέκταση των εννοιών που καλύπτονται από τον φορέα υπηρεσίας UMTS (UMTS Bearer Service), που καλύπτει την εγκατάσταση του από άκρο-σε-άκρα φορέα μεταξύ της πύλης (gateway) προς τα εξωτερικά δίκτυα και των τελικών χρηστών, επέκταση χρειάζεται να πραγματοποιηθεί και σε «ενδιάμεσους» στην ιεραρχία φορείς όπως αυτόν που

αφορά την υπηρεσία ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Bearer Service), και τον αντίστοιχό του στο δίκτυο πυρήνα (Core Network Bearer Service). Αντίστοιχα επέκταση απαιτείται και στους κατώτατους φορείς που αφορούν τόσο το ασύρματο κανάλι το οποίο πλέον είναι μοιραζόμενο μεταξύ πολλαπλών τερματικών κι όχι αποκλειστικά χρησιμοποιούμενο από ένα τερματικό αλλά και στις ενσύρματες ζεύξεις επίσης για την υποστήριξη μεταγωγής μοιραζόμενων ρευμάτων κίνησης προς πολλαπλούς κόμβους του δικτύου ταυτόχρονα.

Η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής MBMS προβλέπει την εγκατάσταση συνόδων υπηρεσιών πολυεκπομπής, στις οποίες είναι εφικτός ο έλεγχος της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Σε αυτό το πλαίσιο, υποστηρίζονται μόνο κλάσεις υπηρεσίας Streaming (μετάδοση ροών πληροφορίας πραγματικού χρόνου με αυστηρούς περιορισμούς στη σειρά μετάδοσης και στην καθυστέρηση που υφίσταται το κάθε πλαίσιο κίνησης χρήστη) και Background (υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας μη πραγματικού χρόνου, χωρίς περιορισμό στη σειρά άφιξης και την καθυστέρηση). Επίσης υποστηρίζονται μόνο οι υψηλότερες τιμές αναφορικά με το ρυθμό μετάδοσης χαμένων ή εσφαλμένα μεταδιδόμενων πλαισίων πληροφορίας θεωρούνται κατά τη μετάδοση, πράγμα που σημαίνει ότι οι μηχανισμοί δεν προβλέπουν μεταδόσεις πλαισίων κίνησης χωρίς λάθη κατά την μετάδοση (not lossless transport). Συγκεκριμένα, προβλέπεται ότι μηχανισμοί όπως προσωρινή αποθήκευση πακέτων σε κόμβους του συστήματος (buffering), εξομάλυνση κίνησης (traffic shaping) κι απόρριψη πακέτων (packet dropping) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν με στόχο την προσαρμογή του συστήματος σε συνθήκες όπου παρατηρείται έλλειψη διαθέσιμων πόρων ή γενικότερα αδυναμίας να προσεγγιστεί το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας. Σε κάθε περίπτωση η εγγυημένη μετάδοση δεδομένων θα πρέπει να εξασφαλίζεται από τη λειτουργία μηχανισμών που ενεργούν σε υψηλότερο επίπεδο (από άκρο-σε-άκρο) κι όχι σε όλους τους κόμβους του συστήματος. Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να αφορά κάποιο πρωτόκολλο μεταξύ της πηγής και των τερματικών ή κάποιο μηχανισμό που λειτουργεί εντός του δικτύου κινητών επικοινωνιών κι είναι επιπρόσθετος στην λειτουργία την υπηρεσίας MBMS.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η εγκατάσταση ενός φορέα επιπέδου UMTS για καθεμία υπηρεσία MBMS, υποθέτει ότι τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας στο δένδρο διανομής ταυτίζονται για όλες τις επιμέρους συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου και δεν είναι δυνατό να διαπραγματευτούν ανά χρήστη ή ακόμη κι ανά υπηρεσία (ιδίως όταν έχουν εγκατασταθεί κάποια κομμάτια του δένδρου). Κατά συνέπεια στην περίπτωση ανεπάρκειας διαθέσιμων πόρων δεν είναι εφικτή η εγκατάσταση του δένδρου διανομής για την συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου. Επιπλέον αυτονόητο είναι ότι στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα μετάδοσης μίας υπηρεσίας σε περισσότερα από ένα επίπεδα ποιότητας απαιτείται η εγκατάσταση ξεχωριστών φορέων υπηρεσίας για το καθένα³⁹.

B.2.2.3 Πλαίσια Πληροφορίας Διαχείρισης για την υπηρεσία MBMS

Η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής εν γένει χαρακτηρίζεται από την πολλοί-προς-πολλοί σχέση που υπάρχει μεταξύ των τελικών χρηστών και των φορέων που εγκαθίστανται για την από

³⁹ Για παράδειγμα μετάδοση ενός ρεύματος εικόνας/ήχου (video/audio) με διαφορετικά επίπεδα κωδικοποίησης, για τερματικά με διαφορετικές ικανότητες αναπαραγωγής ή μετάδοση του ρεύματος εικόνων από ένα φορέα και του αντίστοιχου ρεύματος ήχου (απαιτεί μηχανισμό συγχρονισμού στα τερματικά) από δεύτερο φορέα με άλλα χαρακτηριστικά μετάδοσης.

άκρο-σε-άκρο υποστήριξή τους. Από την άλλη η πολλαπλότητα της σχέσης υπηρεσία-προς-φορείς μεταφοράς δεδομένων υπηρεσίας, είναι μία-προς-έναν. Συνεπώς, σύμφωνα με την αρχιτεκτονική MBMS, καθένας φορέας μπορεί να ενεργοποιηθεί από έναν ή περισσότερους τελικούς χρήστες της υπηρεσίας, ενώ αντίστοιχα κάθε τελικός χρήστης μπορεί να ζητήσει την ενεργοποίηση μίας ή περισσότερων υπηρεσιών MBMS. Κατά συνέπεια, για τη διαχείριση των πληροφοριών που αφορούν υπηρεσίες MBMS, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός μεταξύ των πληροφοριών του χρήστη από αυτές της υπηρεσίας. Η ανάγκη υλοποίησης του διαχωρισμού αφορά κυρίως στη ευκολότερη επεξεργασία πληροφοριών κατά την εκτέλεση των διαδικασιών διαχείρισης συνόδων και κινητικότητας. Κατ' επέκταση των αρχών που ακολουθούνται και στην περίπτωση της παροχής υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου GPRS, η αρχιτεκτονική MBMS ορίζει την χρήση δύο ξεχωριστών πλαισίων πληροφορίας διαχείρισης (information contexts): το πρώτο είναι το *Πλαίσιο Πληροφορίας Διαχείρισης Χρήστη Υπηρεσίας MBMS (MBMS UE Context)*, ενώ το δεύτερο το *Πλαίσιο Πληροφορίας Διαχείρισης Φορέα MBMS (MBMS Bearer/Service Context)* [13]. Τα πλαίσια πληροφορίας διαχείρισης ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων του δικτύου που ελέγχουν την εκτέλεση των υπηρεσιών MBMS και διαχειρίζονται τις διαδικασίες εγκατάστασης των φορέων σε σχέση με τις αιτήσεις των χρηστών.

Το MBMS UE Context περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν στην ενεργοποίηση της υπηρεσίας MBMS από τον κάθε χρήστη ξεχωριστά. Δημιουργείται στους κόμβους UE, RNC, SGSN και GGSN κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της φάσης *Αίτηση Συμμετοχής Χρήστη*. Σημειώνεται ότι τόσο στην πλευρά του χρήστη όσο και εντός των κόμβων SGSN και RNC, το MBMS UE Context αποτελεί μέρος της πληροφορίας που αποθηκεύεται και σχετίζεται με τον χρήστη (Mobility Management Context και UE Context αντίστοιχα).

Το MBMS Bearer Context αποτελεί τη βασική δομή πληροφορίας με βάση την οποία στοιχειοθετείται ο μηχανισμός μετάδοσης πολυεκπομπής στο UMTS. Η εγκατάστασή του ή μη σε έναν κόμβο του δικτύου, αποκαλύπτει αν ο συγκεκριμένος κόμβος εμπεριέχεται στο δένδρο διανομής της κίνησης για την κάθε MBMS υπηρεσία. Το MBMS Bearer Context δημιουργείται σε έναν κόμβο όταν γίνεται διαθέσιμο το MBMS UE Context σε αυτόν. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η δημιουργία αμοιτέρων των MBMS Contexts είναι ανεξάρτητη του αν υπάρχει μετάδοση δεδομένων κάποιας υπηρεσίας. Αντίθετα αυτού το είδους η πληροφορία είναι διαθέσιμη από το περιεχόμενο της παραμέτρου *Κατάσταση* του εκάστοτε MBMS Bearer Context. Κατά την δημιουργία του το MBMS Bearer Context είναι σε κατάσταση *Σε Αναμονή* πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποια σύνοδος σε εξέλιξη, δεν έχουν δεσμευτεί οι πόροι του συστήματος αλλά ότι ο φορέας της υπηρεσίας είναι εγκατεστημένος κι η απαιτούμενη πληροφορία είναι διαθέσιμη σε όλους τους κόμβους που συνθέτουν το δένδρο διανομής. Όταν εκτελεστεί η φάση *Έναρξη Συνόδου* η κατάσταση του MBMS Bearer Context αλλάζει σε *Ενεργό* οπότε δεσμεύονται οι πόροι του συστήματος στο ενσύρματο κι ασύρματο κομμάτι του δικτύου και η μετάδοση των δεδομένων της υπηρεσίας μπορεί να εξελιχθεί ομαλά. Στην περίπτωση όπου εκτελεστεί η φάση *Τερματισμός συνόδου*, η κατάσταση επιστρέφει στην *Σε Αναμονή* και οι πόροι αποδεσμεύονται. Η διαδικασία (εναλλαγές της κατάστασης από Ένεργό στην Σε Αναμονή) συνεχίζεται μέχρι τον πλήρη τερματισμό της υπηρεσίας που αντιστοιχεί στην διαγραφή όλων των MBMS Contexts από

όλους τους κόμβους του συστήματος. Ο Πίνακας Β - 2 παρουσιάζει τις παραμέτρους που περιέχουν τα πλαίσια πληροφορίας.

Πίνακας Β - 2. Πλαίσια Πληροφορίας Διαχείρισης υπηρεσίας MBMS (MBMS Information Contexts)

Παράμετρος	Περιγραφή	Context	
		UE	Bearer
IP Multicast Διεύθυνση	IP Multicast διεύθυνση που ταυτοποιεί το φορέα στον οποίο συμμετέχει ο χρήστης ή έχει εγκατασταθεί για την υπηρεσία	✓	✓
Access Point Name (Ονομασία Σημείου Πρόσβασης)	Σημείο IP πρόσβασης στο οποίο ορίζεται η παραπάνω διεύθυνση	✓	✓
TMGI (Temporary Mobile Group Identity, Προσωρινό Αναγνωριστικό Κινητής Ομάδας)	Προσωρινό αναγνωριστικό που χρησιμοποιείται για ταυτοποίηση της ομάδας χρηστών που χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη υπηρεσία	✓	✓
Linked NSAPI (Network Service Access Point Identifier, Αναγνωριστικό Σημείου Πρόσβασης Υπηρεσίας Δικτύου)	NSAPI για το PDP Context που χρησιμοποιείται για την μεταφορά της IP σηματοδότησης συμμετοχής για την συγκεκριμένη ομάδα χρηστών	✓	
IMSI (International Mobile Subscriber Identity)	Διεθνής αριθμός αναγνώρισης χρήστη	✓	
TI (Transaction Identifier)	Αναγνωριστικό Συναλλαγής Τερματικού-Δικτύου	✓	
MBMS_NSAPI	Αναγνωριστικό Σημείου Πρόσβασης Υπηρεσίας Δικτύου για την αναγνώριση του συγκεκριμένου πλαισίου Πληροφορίας Διαχείρισης Χρήστη	✓	
Κατάσταση (State)	Κατάσταση δέσμευσης πόρων δικτύου ('Ενεργή', 'Σε Αναμονή')		✓
Απαιτούμενα Χαρακτηριστικά Φορέα MBMS	Ελάχιστα Χαρακτηριστικά Φορέα MBMS που πρέπει να ικανοποιούν τα τερματικά		✓
Χαρακτηριστικά QoS Φορέα MBMS	Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υπηρεσίας (κλάση κίνησης, εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης, ρυθμός μετάδοσης εσφαλμένων πλαισίων κίνησης) για τον φορέα		✓
MBMS Service Area	Περιοχή δικτύου στην οποία η υπηρεσία φορέα MBMS πρέπει να παραδοθεί		✓
Λίστα υποκείμενων κόμβων	Λίστα υποκείμενων στην ιεραρχία κόμβων δικτύου στους οποίους θα πρέπει να παραδοθούν οι αναγγελίες επικείμενων συνόδων και τα πακέτα κίνησης που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη υπηρεσία MBMS		✓
Πλήθος Τελικών Χρηστών	Πλήθος τελικών χρηστών οι οποίοι έχουν αιτηθεί επιτυχώς τη συμμετοχή τους στη ομάδα χρηστών που λαμβάνουν τα δεδομένα υπηρεσίας και βρίσκονται εντός της περιοχής δικτύου που εξυπηρετεί ο κόμβος.		✓

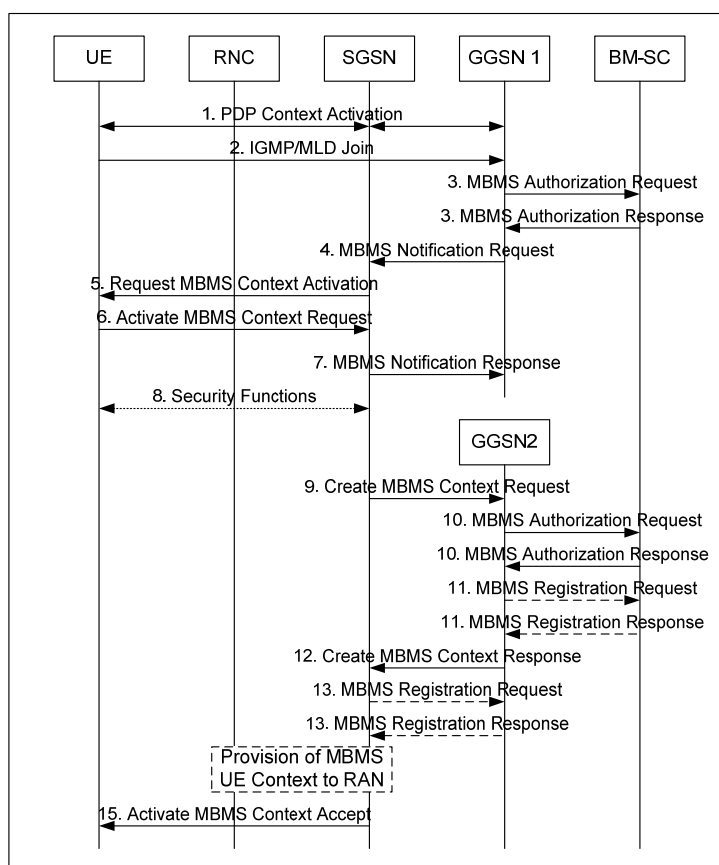
B.2.2.4 Διαχείριση Συνόδων Χρηστών Υπηρεσίας MBMS

Η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής MBMS, στηρίζεται στην εγκατάσταση ενός δένδρου διανομής μεταξύ του σημείου εισόδου της κίνησης (GGSN ή BM-SC) και των τερματικών χρηστών. Το δένδρο διανομής χτίζεται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των διαδικασιών διαχείρισης συνόδων και μεταβάλλεται κατά την εκτέλεση των διαδικασιών διαχείρισης κινητικότητας χρηστών ώστε να συμπεριληφθούν σε αυτό όλοι οι κόμβοι που συμμετέχουν στη διαδικασία παροχής της υπηρεσίας. Πολύ σημαντικό ρόλο στη διαδικασία παίζουν τα *Πλαίσια Πληροφορίας Διαχείρισης* που περιέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία της υπηρεσίας MBMS που αφορά τους τελικούς χρήστες και τους φορείς που εγκαθίστανται. Στα επόμενα θα περιγραφούν οι επιμέρους διαδικασίες που υλοποιούν στην πράξη το σύνολο της αρχιτεκτονικής για την παροχή MBMS υπηρεσιών μέσα από την ανάλυση των επί μέρους ροών πληροφορίας που ανταλλάσσονται μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων.

Προτού προχωρήσουμε στην λεπτομερή ανάλυση των διαδικασιών θα πρέπει να τονίσουμε μερικά σημεία σχετικά με την δημιουργία και διαγραφή των πλαισίων πληροφορίας διαχείρισης κατά τη διάρκεια των φάσεων εκτέλεσης των υπηρεσιών MBMS. Σε γενικές γραμμές η επιτυχής εγκατάσταση μοιραζόμενων φορέων υπηρεσιών MBMS προϋποθέτει την ύπαρξη των πλαισίων πληροφορίας στο σύνολο των κόμβων του δικτύου που ανήκουν στο δένδρο διανομής/μεταφοράς των πακέτων κίνησης. Η δημιουργία καθενός MBMS UE Context πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της φάσης *Αίτηση Συμμετοχής Χρήστη* στην MBMS υπηρεσία και η διαγραφή/καταστροφή του, κατά την εκτέλεση της *Αναφορά Αποχώρησης Χρήστη* από την MBMS υπηρεσία. Επιπρόσθετα η αποθήκευση του καθενός πλαισίου πληροφορίας πραγματοποιείται σε καθέναν από τους κόμβους που συμμετέχουν σε αυτές ή κατά την εκτέλεση διαδικασιών κινητικότητας. Στην περίπτωση κατά την οποία ένας κόμβος είναι μέλος του μοιραζόμενου φορέα MBMS (υπάρχει δηλαδή διαθέσιμο σε αυτόν το MBMS Bearer Context), αρκεί μόνο η προσθήκη του MBMS UE Context στο αντίστοιχο mobility management context που αφορά τον χρήστη και τίποτα περισσότερο. Αν αυτό δεν ισχύει, τότε απαιτείται η εκτέλεση μιας διαδικασίας *εγγραφής* του κόμβου στο ιεραρχικό δένδρο διανομής που αντιστοιχεί στην απόκτηση του απαραίτητου πλαισίου πληροφορίας διαχείρισης από τον αμέσως υπερκείμενο κόμβο στην ιεραρχία του δικτύου. Η διαδικασία συνεχίζεται προς τα πάνω μέχρι να βρεθεί ένας κόμβος ο οποίος να περιέχει το απαραίτητο MBMS Bearer Context. Στην περίπτωση ένας κόμβος καταλήξει να μην εξυπηρετεί χρήστες μίας συγκεκριμένης υπηρεσίας MBMS διότι ο τελευταίος χρήστης της υπηρεσίας είτε λόγω διακομής εξυπηρετείται από κάποιον άλλο κόμβο είτε διότι ζήτησε την αποχώρηση του από την ομάδα πολυεκπομπής, εκτελείται μία διαδικασία *διαγραφής*, η οποία κοινοποιεί στους υπερκείμενους στην ιεραρχία κόμβους ότι δεν είναι μέλος του κοινόχρηστου φορέα MBMS. Εφόσον δεν πρόκειται για τον τελευταίο χρήστη τον οποίο εξυπηρετούσε ο κόμβος τότε αρκεί χρειάζεται μόνο η διαγραφή των MBMS UE Contexts από τους κόμβους που έπαψαν να τον εξυπηρετούν. Υπενθυμίζεται ότι η ύπαρξη των MBMS contexts που αντιστοιχεί στην κατάσταση *‘εγκατάστασης’* του φορέα, είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση *‘ενεργοποίησης’* των συνόδων της υπηρεσίας και κατ’ επέκταση του φορέα που χρησιμοποιεί.

Διαδικασίες Ενεργοποίησης & Απενεργοποίησης Υπηρεσίας MBMS Πολυεκπομπής

Κατά την εκτέλεση της φάσης *Αίτηση Συμμετοχής Χρήστη* στην MBMS Υπηρεσία, ουσιαστικά ζητείται η ενεργοποίηση της υπηρεσίας από τον χρήστη με αποτέλεσμα την εγκατάσταση του φορέα MBMS στους κόμβους του δικτύου τουλάχιστον που θα τον εξυπηρετήσουν. Στο Σχήμα Β - 6 παρουσιάζεται η διαδικασία εγκατάστασης μίας MBMS υπηρεσίας για την περίπτωση που ζητείται η ενεργοποίηση ενός multicast φορέα. Η διαδικασία ξεκινά με την αποστολή ενός μηνύματος *Αναφορά Συμμετοχής* σε μία ομάδα πολυεκπομπής, το οποίο προέρχεται από την εφαρμογή που πρόκειται να κάνει χρήση του υπό εγκατάσταση φορέα. Το μήνυμα στέλνεται μέσω μίας ειδικά εγκατεστημένης σύνδεσης μεταξύ του τερματικού και του δικτύου πυρήνα (η σύνδεση αυτή ενεργοποιείται όπως όλες οι συνδέσεις σημείου-προς-σημείο, και ενδέχεται να μεταφέρει κι άλλου είδους μηνύματα για σηματοδότηση μεταξύ τερματικών και κόμβων του UMTS - για παράδειγμα SIP σηματοδότηση για το IMS). Ο κόμβος GGSN (GGSN 1 στο Σχήμα Β - 6) επιβεβαιώνει μέσω μηνυμάτων που ανταλλάσσει με τον κόμβο BM-SC, ότι ο χρήστης που έστειλε την αίτηση συμμετοχής στην ομάδα πολυεκπομπής, είναι εξουσιοδοτημένος για τη λήψη δεδομένων της υπηρεσίας. Στη θετική περίπτωση συντάσσει κι αποστέλλει επιπλέον την παράμετρο APN η οποία κατά βάση προσδιορίζει τον εντεταλμένο κόμβο GGSN από τον οποίο πρόκειται να παραδοθεί η υπηρεσία στον χρήστη κι ουσιαστικά από τον οποίο θα ξεκινήσει η εγκατάσταση του φορέα MBMS για το δίκτυο πυρήνα (GGSN2 στο Σχήμα Β - 6).

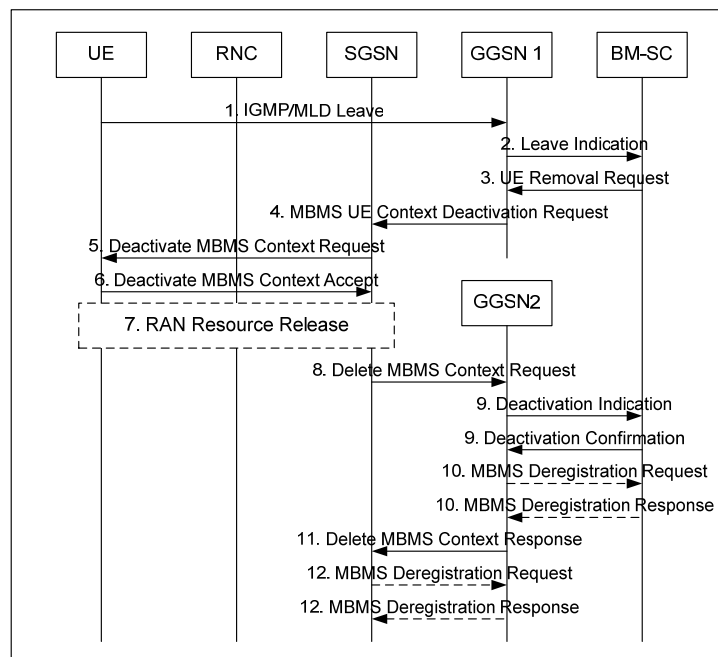


Σχήμα Β - 6. Ενεργοποίηση υπηρεσίας MBMS πολυεκπομπής

Η διαδικασία συνεχίζεται με την ενημέρωση του κόμβου SGSN και την συγκέντρωση των απαραίτητων πληροφοριών για την σύνταξη του πλαισίου πληροφορίας διαχείρισης της

υπηρεσίας MBMS από το τερματικό μετά την λήψη του μηνύματος *Request MBMS Context Activation*. Στην περίπτωση κατά την οποία ο υποδεικνυόμενος από την παράμετρο APN GGSN κόμβος, είναι διαφορετικός από αυτόν που παρέλαβε το μήνυμα Join, η διαδικασία συνεχίζεται μέσω του υποδεικνυόμενου κόμβου στον οποίο θα εγκατασταθεί ο φορέας. Τα περιεχόμενα των παραμέτρων MBMS_NSAPI και Linked_NSAPI που περιέχονται στο MBMS UE Context, καθορίζουν ποιος GGSN κόμβος συμμετέχει στην εγκατάσταση του MBMS φορέα και ποιος στον φορέα σηματοδοσίας IP. Η αποστολή του μηνύματος 9 *Create MBMS Context Request*(IP Multicast Address, APN, MBMS_NSAPI), σηματοδοτεί την αίτηση δημιουργίας του MBMS Bearer Context από τον SGSN προς τον εντεταλμένο GGSN κι από εκεί προς τον BM-SC μέσω των μηνυμάτων 11-13. Τέλος ο κόμβος SGSN στέλνει το MBMS UE Context στον κόμβο RNC που εξυπηρετεί τον χρήστη και ακολούθως τον ενημερώνει για το τερματικό αποστέλλοντας του μέσω του μηνύματος *Activate MBMS Context Accept* το MBMS Bearer Context που έχει συνταχθεί για την υπηρεσία που ζητήθηκε.

Η διαδικασία απενεργοποίησης μίας υπηρεσίας MBMS για έναν χρήστη είναι αντίστοιχη με την διαδικασία ενεργοποίησης. Η εκτέλεσή της μπορεί να ξεκινήσει από τους κόμβους UE, SGSN, GGSN ή BM-SC και το αποτέλεσμα της είναι η διαγραφή του MBMS UE Context ενός χρήστη από τους κόμβους του δικτύου που τον εξυπηρετούσαν γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην ενημέρωση του δένδρου διανομής της υπηρεσίας όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Στο Σχήμα Β - 7 απεικονίζεται η σηματοδοσία για τη διαδικασία απενεργοποίησης μίας υπηρεσίας MBMS.



Σχήμα Β - 7. Διαδικασία Απενεργοποίησης Υπηρεσίας MBMS πολυεκπομπής

Διαδικασίες Έναρξης και Τερματισμού Συνόδου Υπηρεσίας MBMS Πολλαπλών Προορισμών

Στο Σχήμα Β - 8 απεικονίζεται η διαδικασία σηματοδοσίας που υλοποιεί την εκτέλεση της φάσης *Έναρξη Συνόδου*. Η διαδικασία ξεκινά από το BM-SC και προχωρά προς την ενημέρωση των υποκείμενων του κόμβων με ανταλλαγή μηνυμάτων *Αίτησης - Απόκρισης*. Όλοι οι κόμβοι

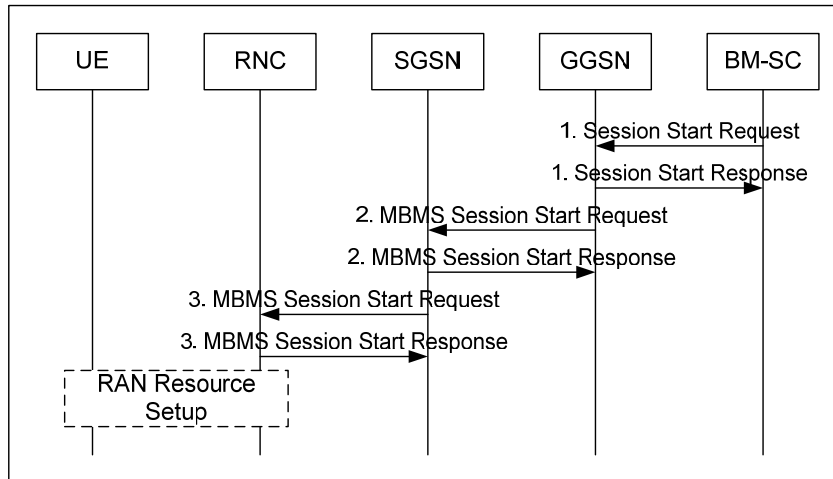
αποστέλλουν τα μηνύματα *Αίτησης* προς το σύνολο των κόμβων που περιέχονται στη 'λίστα υποκείμενων κόμβων' (που έχει συνταχθεί κατά την διαδικασία εγκατάστασης του MBMS φορέα της υπηρεσίας). Σαν αποτέλεσμα το δένδρο διανομής που δημιουργείται έχει ρίζα το BM-SC και εκτείνεται μέχρι τους τελικούς χρήστες. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος υποχρεούται να αλλάξει την κατάσταση του φορέα MBMS από 'Σε Αναμονή' σε 'Ενεργό'.

Η διαδικασία *Τερματισμού Συνόδων MBMS*, είναι παρόμοια με αυτήν της έναρξης. Παρόμοια μηνύματα *Αίτησης* κι *Απόκρισης* τερματισμού μιας MBMS συνόδου ανταλλάσσονται με στόχο την αποδέσμευση των πόρων. Αντίστοιχη είναι κι η επιστροφή της παραμέτρου «Κατάσταση» του MBMS Bearer Context στην τιμή 'Σε Αναμονή'.

Διαδικασίες Εγγραφής και Διαγραφής Κόμβου από τον φορέα MBMS

Η δυναμική ανανέωση της δομής του δένδρου διανομής, που δημιουργείται για την παροχή υπηρεσιών σε κινητούς χρήστες, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που αντιμετώπισε η αρχιτεκτονική MBMS. Η λύση που προτάθηκε είναι η εκτέλεση των διαδικασιών *εγγραφής* και *διαγραφής* κόμβων από τον *φορέα υπηρεσίας MBMS*. Στην περίπτωση εκτέλεσης της διαδικασίας εγγραφής κόμβου στον φορέα MBMS, κάθε κόμβος που δεν είναι μέλος του φορέα μιας MBMS υπηρεσίας, ζητά από τον αμέσως υπερκείμενό του στην ιεραρχία του δικτύου να του αποστείλει το MBMS Bearer Context με βάση τα αναγνωριστικά που περιέχονται στο αντίστοιχο MBMS UE Context το οποίο απέκτησε μέσω της διαδικασία ενεργοποίησης συνόδων ή υποστήριξης κινητικότητας. Εφόσον ο υπερκείμενος κόμβος δεν κατέχει κάποια αναφορά για το συγκεκριμένο MBMS Bearer Context η διαδικασία επαναλαμβάνεται προς τον αντίστοιχο υπερκείμενο κόμβο μέχρι το BM-SC που ελέγχει το σύνολο των προσφερόμενων υπηρεσιών από το δίκτυο, αλλιώς επιστρέφεται προς τα κάτω το ζητούμενο πλαίσιο πληροφορίας διαχείρισης και η διαδικασία ολοκληρώνεται. Εάν τη χρονική στιγμή εγγραφής του κόμβου στον φορέα η σύνοδος της υπηρεσίας είναι σε κατάσταση 'Ενεργή' (δηλαδή πραγματοποιείται μετάδοση των δεδομένων της υπηρεσίας), κατόπιν της αποστολής των μηνυμάτων της διαδικασίας *εγγραφής*, αποστέλλονται και τα μηνύματα ενεργοποίησης της συνόδου ώστε να δεσμευτούν οι πόροι του συστήματος και να πραγματοποιηθεί η μετάδοσή τους.

Κάθε κόμβος του συστήματος έχει τη δυνατότητα να ζητήσει την εξαίρεσή του από το δένδρο διανομής μιας υπηρεσίας MBMS, εκτελώντας τη διαδικασία *διαγραφής* από τον φορέα MBMS. Σε αντιστοιχία με την διαδικασία *εγγραφής*, ένας κόμβος ενημερώνει τον αμέσως υπερκείμενο του ότι επιθυμεί τη διαγραφή του από το δένδρο διανομής. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την αποστολή ενός μηνύματος επιβεβαίωσης από τον δεύτερο στον πρώτο. Προϋπόθεση για την εκτέλεση της διαδικασίας είναι ο κόμβος να μην εξυπηρετεί κάποιον κινητό χρήστη και το αποτέλεσμα της διαγραφής είναι η παύση της λήψης μηνυμάτων σηματοδότησης και πακέτων κίνησης για την συγκεκριμένη υπηρεσία MBMS. Τα γεγονότα σκανδαλισμού για την διαδικασία διαγραφής είναι η εκτέλεση της διαδικασίας απενεργοποίησης ή αντίστοιχα, γεγονότα που σχετίζονται με την κινητικότητα του χρήστη.



Σχήμα Β - 8. Διαδικασία Έναρξης Συνόδου Υπηρεσίας MBMS πολλαπλών Προορισμών

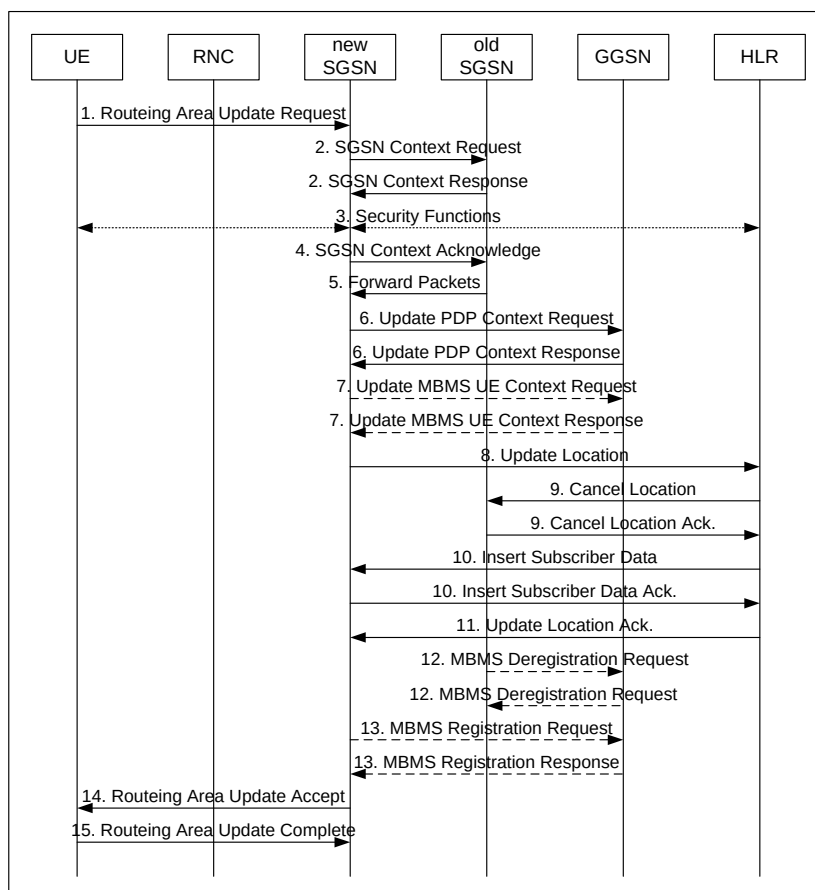
B.2.2.5 Διαχείριση Κινητικότητας Χρηστών Υπηρεσίας MBMS

Όπως προαναφέρθηκε η παροχή υπηρεσιών πολλαπλών προορισμών σε κινητούς χρήστες του UMTS θεωρείται στο πλαίσιο που έχει οριστεί η παροχή υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου. Στην περίπτωση των μηχανισμών διαχείρισης κινητικότητας, η αρχιτεκτονική MBMS επεκτείνει τις υπάρχουσες διαδικασίες με στόχο την προδιαγραφή ενός μηχανισμού που θα καλύπτει το σύνολο των περιπτώσεων τόσο για συνδέσεις σημείου-προς-σημείο όσο και για συνδέσεις πολυεκπομπής. Ανάλογα με την κατάσταση κινητικότητας (mobility management context) στην οποία βρίσκεται το κάθε τερματικό, που φανερώνει αν πραγματοποιείται ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων, εκτελούνται κι οι διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας. Οι τελευταίες, εκτός από την ενημέρωση των καταχωρήσεων που αφορούν τη θέση του τερματικού εντός του δικτύου, καθιστούν δυνατή την απρόσκοπτη, ομαλή και βέλτιστη, από άποψη απώλειας πακέτων, μεταφορά των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων του δικτύου και των τερματικών εφόσον υπάρχουν. Στα επόμενα αναλύονται οι διαδικασίες *Routeing Area Update* και *Serving RNC Relocation*, που υλοποιούνται για την περίπτωση των υπηρεσιών πολυεκπομπής. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διαδικασίες κινητικότητας διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν εμπλέκουν περισσότερους του ενός κόμβους του δικτύου κορμού για την εκτέλεση τους. Επίσης διαφοροποίηση υπάρχει ανάλογα με την κατάσταση των συνόδων στις οποίες συμμετέχει ο χρήστης (ενεργές ή όχι).

Διαδικασία Routeing Area Update (RAU) για MBMS συνόδους

Με την εκτέλεση της διαδικασίας RAU ουσιαστικά πραγματοποιείται ενημέρωση των καταχωρήσεων που υπάρχουν στο δίκτυο κορμού κι αφορούν την περιοχή δρομολόγησης (Routeing Area, RA) στην οποία βρίσκεται το τερματικό. Η διαδικασία εκτελείται ανεξάρτητα με την κατάσταση ενεργοποίησης των συνδέσεων μεταγωγής πακέτου (unicast PDP connections ή MBMS). Στο Σχήμα Β - 9 παρουσιάζεται η αλληλουχία των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται κατά την διάρκεια της εκτέλεσής της. Με διακεκομμένη γραμμή έχουν σημειωθεί τα μηνύματα που αφορούν τις MBMS συνδέσεις, μέσω των οποίων πραγματοποιείται ενημέρωση του κόμβου GGSN από τον SGSN ο οποίος αλληλεπιδρά με τον χρήστη με στόχο την ανανέωση του δένδρου διανομής για τις υπηρεσίες MBMS. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε πρώτη φάση ο νέος κόμβος

SGSN αποκτά τα πλαίσια πληροφορίας κινητικότητας και συνόδων (MM, PDP, MBMS UE contexts) από τον παλιό SGSN. Στη συνέχεια ενημερώνει τον GGSN ώστε να εγκατασταθούν οι απαραίτητη φορείς που θα χρησιμοποιηθούν για την μεταφορά των δεδομένων (εφόσον ο χρήστης είναι σε κατάσταση PMM-IDLE, δεν δεσμεύονται πόροι του συστήματος). Ακολουθώντας ενημερώνεται ο κόμβος HLR (αναγνωριστικό χρήστη, εξυπηρετών SGSN) και εκτελούνται οι διαδικασίες εγγραφής και διαγραφής του νέου και του παλιού SGSN κόμβου αντίστοιχα, από το δένδρο διανομής των MBMS υπηρεσιών που έχει ενεργοποιήσει ο χρήστης. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την ενημέρωση του χρήστη για την επιτυχή έκβαση των παραπάνω, δεδομένων και των δικαιωμάτων του για πρόσβαση στην συγκεκριμένη RA.



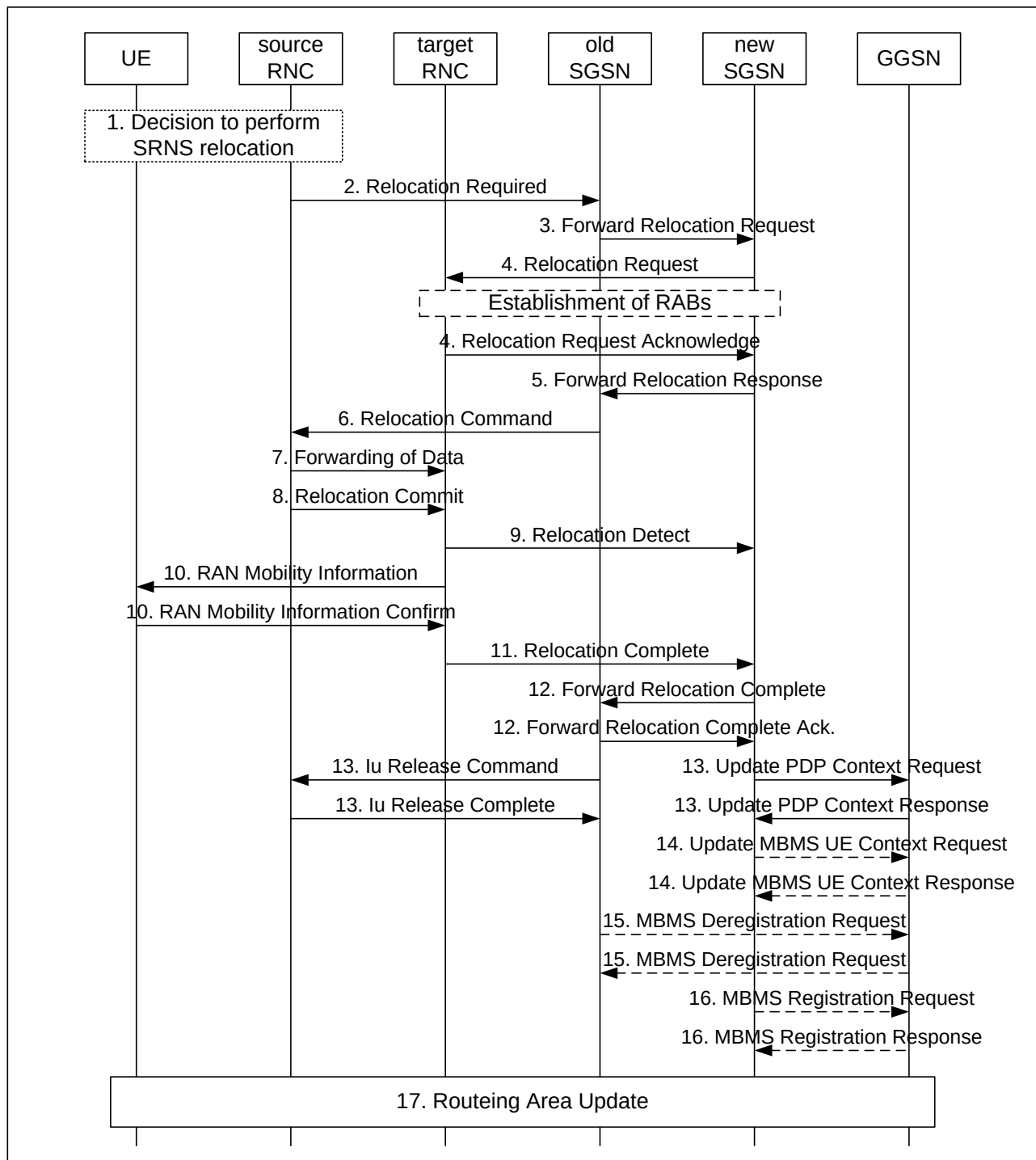
Σχήμα Β - 9. Διαδικασία Routeing Area Update για MBMS συνόδους

Διαδικασία Serving RNC relocation για MBMS συνόδους

Η εκτέλεση της διαδικασίας *Serving RNC Relocation* για MBMS φορείς υπηρεσίας, που παρουσιάζεται στο Σχήμα Β - 10, έχει βασιστεί στην αντίστοιχη διαδικασία που προδιαγράφηκε για την υπηρεσία GPRS. Η διαδικασία εκτελείται στις περιπτώσεις που η διαπομπή ενός χρήστη με μία τουλάχιστο ενεργή υπηρεσία MBMS απαιτεί την ταυτόχρονη αλλαγή τόσο του κόμβου RNC στο δίκτυο πρόσβασης, όσο και του κόμβου SGSN στο δίκτυο κορμού. Στην περίπτωση της GPRS υπηρεσίας και με βάση τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας των εκτελούμενων υπηρεσιών, εγκαθίσταται μία προσωρινή δίοδος στη διεπαφή μεταξύ των δικτύων πρόσβασης και πυρήνα για την μεταφορά των δεδομένων μεταξύ του παλαιού και του νέου σημείων πρόσβασης (απρόσκοπτες διαπομπές). Για τη περίπτωση των MBMS συνόδων η εγκατάσταση των

συγκεκριμένων διόδων δεν έχει προδιαγραφεί. Αυτό σημαίνει ότι η εκτέλεση της διαδικασίας κατά πάσα πιθανότητα θα προκαλέσει απώλεια πακέτων, η έκταση της οποίας εξαρτάται από το πόσο γρήγορα εκτελούνται οι επιμέρους διαδικασίες μεταφοράς και εγκατάστασης των πλαισίων πληροφορίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Για παράδειγμα αν το κινητό διαπεμφθεί σε μία περιοχή του δικτύου στην οποία προσφέρεται ήδη η ίδια υπηρεσία MBMS τότε η απώλεια θα είναι πολύ μικρή (ακόμη και μηδαμινή). Στην αντίθετη περίπτωση όπου ο κόμβος SSGN και οι υποκείμενοί του (RNC) δεν συμμετέχουν στο δένδρο διανομής, τότε η απώλεια θα είναι μεγαλύτερη, εφόσον χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για την ανταλλαγή των κατάλληλων μηνυμάτων σηματοδότησης που προβλέπει η παραπάνω διαδικασία.

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία στην πράξη πραγματοποιεί μεταφορά και εγκατάσταση των κατάλληλων πλαισίων πληροφορίας MBMS (UE και φορέα) στους κόμβους του δικτύου που εξυπηρετούν το διαπεμπόμενο τερματικό. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Β - 10, αμέσως μετά την απόφαση εκτέλεσης διαπομπής μεταφέρεται το MBMS UE Context στο νέο κόμβο SGSN, και ξεκινά η διαδικασία εγκατάστασης των φορέων του δικτύου πρόσβασης (Radio Access Bearers, RABs). Σαν αποτέλεσμα το MBMS UE Context μεταφέρεται προς αυτό επίσης. Όταν ολοκληρωθεί η τελευταία η διαδικασία είναι εφικτή η εκτέλεση της διαπομπής του τερματικού στο νέο κόμβο RNC. Η διαδικασία αλλαγής του εξυπηρετούντος κόμβου RNC εκτελείται αποκλειστικά εντός του δικτύου UTRAN και περιλαμβάνει την εγκατάσταση των κατάλληλων ασυρμάτων ζεύξεων μέσω των οποίων είναι εφικτή η παροχή της υπηρεσίας MBMS το τερματικό. Μόλις ολοκληρωθεί η εγκατάσταση νέων ασύρματων ζεύξεων, ενημερώνεται ο νέος κόμβος SGSN μπορεί να ξεκινήσει η παροχή της υπηρεσίας MBMS από την πλευρά του δικτύου κορμού. Εφόσον ο κόμβος SGSN δεν συμμετέχει στο δένδρο διανομής, ξεκινά η διαδικασία Εγγραφής που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, που στην πράξη έχει σαν αποτέλεσμα την εγκατάσταση του αντίστοιχου MBMS Bearer Context σε αυτόν. Αντίστοιχα μπορεί να έχει ξεκινήσει και η εγγραφή του κόμβου target RNC. Εφόσον τη στιγμή της διαπομπής η σύνοδος είναι ενεργή η προώθηση των πακέτων κίνησης πραγματοποιείται αμέσως μετά τη διαδικασία εγγραφής. Παράλληλα οι κόμβοι που εξυπηρετούσαν το τερματικό πριν τη διαπομπή, προχωρούν στην εκτέλεση της διαδικασίας διαγραφής εφόσον δεν εξυπηρετούν άλλα τερματικά για την ίδια υπηρεσία MBMS.



Σχήμα Β - 10 Διαδικασία Inter-SGSN Serving RNC Relocation για MBMS συνόδους

B.3 Βιβλιογραφία

- [1] Almeroth, K.C., Ammar, M.H., "Multicast group behavior in the Internet's multicast backbone (Mbone)," Communications Magazine, IEEE, Vol. 35, No. 6, pp. 124 – 129, June 1997
- [2] Hans Eriksson, "MBONE: the multicast backbone," Communications of the ACM, Vol. 37 no. 8, pp. 54-60, Aug. 1994
- [3] 3GPP TS 23.002 "Network Architecture", June 2007
- [4] H. Kaaranen, A. Ahtiainen, L. Laitinen, S. Naghian, V. Niemi, "UMTS Networks, Architectures, Mobility and Services," John Wiley and Sons, Ltd., ISBN 0-471-48654, 2001
- [5] 3GPP TS 23.060 "General Packet Radio Service (GPRS); Service description", March 2007
- [6] 3GPP TS 29.060, "General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunneling Protocol (GTP) across the Gn and Gp interface," June 2007
- [7] 3GPP TS 29.061, "Interworking between the Public Land Mobile Network (PLMN) supporting packet based services and Packet Data Networks (PDN)," June 2007
- [8] 3GPP TS 23.346 "3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking; System description", March 2007
- [9] 3GPP TS 23.246 "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description", June 2007
- [10] 3GPP TS 23.107, "Quality of Service (QoS) concept and architecture," June 2007
- [11] S. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting", IETF RFC 1112, August 1989
- [12] 3GPP TS 22.146, "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Stage 1," July 2007
- [13] 3GPP TS 22.246, "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) user services; Stage 1," June 2007
- [14] 3GPP TS 25.346, "Introduction of Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) in the Radio Access Network (RAN); Stage 2," July 2007

AKRONYMIA

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
AIPN	All-IP Network
AP	Access Point
AR	Access Router
ASM	Any Source Multicast
BAck	Binding Acknowledge
BU	Binding Update
CN	Correspondent Node
CoA	Care-of Address
DAD	Duplicate Address Detection
FA	Foreign Agent
FBack	Fast Binding Acknowledge
FBU	Fast Binding Update
FMIPv6	Fast Mobile IPv6 / Fast Handovers for Mobile IPv6 (Protocol)
FNA	Fast Neighbor Advertisement
GGSN	Gateway GPRS Supporting Node
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HA	Home Agent
HAck	Handover Acknowledge
HI	Handover Initiate
HMIPv6	Hierarchical Mobile IPv6 / Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (Protocol)
HO	Handover / Handoff
HoA	Home Address
ICMP	Internet Control Messages Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internet Protocol
IP-M	IP Multicast
IPMA	IP Multicast Architecture
IRTF	Internet Research Task Force
LD	Link Down (trigger)
LGD	Link Going Down (trigger)
LLHO	Link Layer Handover
LQCT	Link Quality Crosses Threshold (trigger)
LU	Link Up (trigger)

MAC	Medium Access Control
MAP	Mobility Anchor Point
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MDR	Multicast Designated Router
M-FMIPv6	Multicast-FMIPv6 – Fast Multicast Protocol for Mobile IPv6 in the Fast Handovers Environment
M-FMIPv6/FTB	Multicast-FMIPv6 with Flow Tunneling and Buffering
MH	Mobile Host
M-HMIPv6	Multicast-HMIPv6 – Seamless Multicast Handover in a Hierarchical Mobile IPv6 Environment (Protocol)
MIH	Media Independent Handover Services
MIP	Mobile IP
MLD	Multicast Listener Discovery (Protocol)
M-MAP	Multicast MAP
MN	Mobile Node
MSSMSv6	Supporting Mobile SSM Sources for IPv6
MT	Mobile Terminal
NA	Neighbor Advertisement
NAACK	Neighbor Advertisement Acknowledgment
NAR	New Access Router
nCoA	New Care-of Address
ND	Neighbor Discovery
NS	Neighbor Solicitation
NUD	Neighbor Unreachability Detection
PAR	Previous Access Router
pCoA	Previous Care-of Address
PDP	Protocol Data Packet
PDU	Protocol Data Unit
PrRtAdv	Proxy Router Advertisement
QoS	Quality of Service
RA	Router Advertisement
RNC	Radio Network Controller
RS	Remote Subscriptions
RS	Router Solicitation
RtSolPr	Router Solicitation for Proxy
RTT	Round-Trip Time
RWP	Random Waypoint
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDU	Service Data Unit
SGSN	Serving GPRS Supporting Node

SIP	Session Initiation Protocol
SSM	Source Specific Multicast
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WLAN	Wireless Local Area Network

ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΌΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ

<i>Address Prefix</i>	Πρόθημα Διεύθυνσης
<i>Address Suffix</i>	Επίθημα Διεύθυνσης
<i>Application Layer</i>	Στρώμα Εφαρμογής
<i>Buffer / Buffering</i>	Καταχωρητής Προσωρινής Αποθήκευσης / Διαδικασία Προσωρινής Αποθήκευσης
<i>Correspondent Node</i>	Ανταποκριτής – Κόμβος Ανταπόκρισης
<i>Correspondent Registration</i>	Καταχώρηση/Εγγραφή σε κόμβο Ανταποκριτή
<i>Datagram</i>	Δεδομενόγραμμα (πακέτο/PDU στρώματος δικτύου για συστήματα βασισμένα στο πρωτόκολλο IP)
<i>Duplicate Address Detection</i>	Επισήμανσης Διπλής Διεύθυνσης
<i>Fast Handover</i>	Ταχεία Διαπομπή
<i>Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6)</i>	Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου έκδοσης 6 για υποστήριξη Ταχέων Διαπομπών
<i>Foreign Agent (FA)</i>	Ξένος Αντιπρόσωπος – Αντιπρόσωπος Ξένου Δικτύου
<i>Foreign Network</i>	Ξένο (ως προς το Οικείο) Δίκτυο
<i>Frame</i>	Πλαίσιο (πακέτο/PDU στρώματος σύνδεσης δεδομένων)
<i>Handoff (HO)</i>	Διαπομπή
<i>Handover (HO)</i>	Διαπομπή
<i>Hard/Soft</i>	Οξεία/Αμβλεία
<i>Predictive/Reactive</i>	Προ-δραστική/Μετα-δραστική
<i>Inter-/Intra-Domain</i>	Δια-/Ενδο-τομεακή
<i>Hard Handover</i>	Οξεία Διαπομπή
<i>Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6)</i>	Ιεραρχικό Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου έκδοσης 6
<i>Home Agent (HA)</i>	Οικείος Αντιπρόσωπος – Αντιπρόσωπος Οικείου Δικτύου
<i>Home Network</i>	Οικείο Δίκτυο
<i>Home Registration</i>	Οικεία Εγγραφή
<i>Information Context</i>	Πλαίσιο πληροφορίας
<i>Inter/Intra-domain multicast routing protocol</i>	Πρωτόκολλο Δια/Ενδο-τομεακής δρομολόγησης Πολυεκπομπής
<i>Interface</i>	Σημείο Προσαρμογής / Διεπαφή
<i>Interface identifier</i>	Αναγνωριστικό Διεπαφής
<i>Internet Protocol (IP)</i>	Πρωτόκολλο Διαδικτύου
<i>Link Layer</i>	Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων
<i>Media Independent Handover Services</i>	Υπηρεσίες Υποστήριξης Διαπομπών Ανεξαρτήτως Φυσικού Μέσου
<i>M-FMIPv6 – Fast Multicast Protocol for Mobile IPv6 in the Fast Handovers Environment</i>	Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου για υποστήριξη Ταχέων Διαπομπών Πολυεκπομπής

<i>M-FMIPv6/FTB – Multicast FMIPv6 with Flow Tunneling and Buffering</i>	Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου για υποστήριξη Ταχέων Διαπομπών Πολυεκπομπής με χρήση μηχανισμών Προώθησης Ροών Πληροφορίας και Προσωρινής Αποθήκευσης
<i>M-HMIPv6 – Seamless Multicast Handover in a Hierarchical Mobile IPv6 Environment</i>	Απρόσκοπτες Διαπομπές Υπηρεσιών Πολυεκπομπής με χρήση του Ιεραρχικού Πρωτοκόλλου Διαδικτύου
<i>MIP Binding Acknowledge</i>	Επιβεβαίωση Ανανέωσης Αντιστοίχισης Κινητού Πρωτοκόλλου Διαδικτύου
<i>MIP Binding Update (BU)</i>	Ανανέωση Αντιστοίχισης Κινητού Πρωτοκόλλου Διαδικτύου
<i>Mobile IP (MIP)</i>	Πρωτόκολλο Διαδικτύου για Κινητούς Χρήστες ή Κινητό Πρωτόκολλο Διαδικτύου
<i>Mobility Anchor Point</i>	Σημείο Πρόσδεσης Κινητικότητας
<i>Mobile Internet</i>	Κινητό Διαδίκτυο
<i>Multicast</i>	Πολυεκπομπή
<i>Multicast Designated Router</i>	Εντεταλμένος Δρομολογητής Πολυεκπομπής
<i>Neighbor Advertisement</i>	Ανακοίνωση Γειτονικού Κόμβου
<i>Neighbor Discovery</i>	Ανακάλυψη Γειτονικού Κόμβου
<i>Neighbor Solicitation</i>	Πρόσκληση (αποστολής ανακοίνωσης) Γειτονικού Κόμβου
<i>Network Domain</i>	Περιοχή Δικτύου, Τομέας Δικτύου
<i>Network Layer</i>	Στρώμα Δικτύου
<i>Predictive Handover</i>	Προ-δραστική διαπομπή
<i>Random Waypoint Mobility</i>	Κινητικότητα Τυχαίας Κατεύθυνσης
<i>Reactive Handover</i>	Μετα-δραστική διαπομπή
<i>Round-Trip Time</i>	Χρόνος Πλήρους Διαδρομής
<i>Routeing/Routing Area Update (Procedure)</i>	(Διαδικασία) Ενημέρωση(ς) Περιοχής Δρομολόγησης
<i>Router Advertisement</i>	Ανακοίνωση Δρομολογητή
<i>Router Discovery</i>	Ανακάλυψη Δρομολογητή
<i>Router Solicitation</i>	Πρόσκληση (αποστολής ανακοίνωσης) Δρομολογητή
<i>Seamless Handover</i>	Απρόσκοπτη Διαπομπή
<i>Serving RNC Relocation (Procedure)</i>	(Διαδικασία) Επαναπροσδιορισμού του εξυπηρετούντος κόμβου RNC
<i>Soft Handover</i>	Αμβλεία Διαπομπή
<i>Traffic Burst</i>	Ριπή Κίνησης
<i>Wireless Internet</i>	Ασύρματο Διαδίκτυο

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Περιοδικά

- [1] G. Leoleis, I. Venieris, "Fast MIPv6 Extensions Supporting Seamless Multicast Handovers", Computer Networks, Vol. 51, No. 9, pp. 2379-2396, June 2007
- [2] G. Leoleis, G. Prezerakos, I. Venieris, "Seamless Multicast Mobility Support using Fast MIPv6 Extensions", Computer Communications, Vol. 29, No. 18, pp. 3745-3765, November 2006
- [3] L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. Venieris, "Fast Handover Support in a WLAN Environment: Challenges and Perspectives", IEEE Network Magazine, vol. 19, no. 3, May 2005

Συνέδρια

- [4] G. Leoleis, I. Venieris, "Fast MIPv6 Extensions Supporting Seamless Multicast Handovers", in proc. of the 12th European Wireless Conference (EW '06), Athens, Greece, April 2006
- [5] L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. Venieris, "Analysis and Evaluation of Layer 2 Assisted Fast Mobile IPv6 Handovers in a WLAN Environment", in proc the of 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2005), Cartagena, Spain, June 2005
- [6] V. Nikas, G. Lioudakis, G. Leoleis, I. Venieris, "IP-based Video Streaming service provision over Satellite UMTS", in proc. of the 7th International Symposium on Communications Interworking (INTERWORKING 2004), Ottawa, Canada, December 2004
- [7] L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. Venieris, "Fast Handoff Support in an IP-evolved UMTS Architecture," in proc. of the Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility Conference 2004 (NETCON 2004), Palma de Mallorca, Spain, November 2004
- [8] L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. Venieris, "Introducing a Hybrid Fast and Hierarchical MIPv6 Scheme in a UMTS-IP Converged Architecture", in proc of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN 2004), pp. 42-49, Tampa, USA, November 2004
- [9] G. Leoleis, L. Dimopoulou, V. Nikas, I. Venieris, "Mobility Management for Multicast Sessions in a UMTS-IP Converged Environment," in proc. of The 9th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2004) Alexandria, Egypt, July 2004
- [10] L. Dimopoulou, V. Nikas, G. Leoleis, G. Lioudakis, I. Venieris, "Mobility Management using SIP in a beyond 3G System," in proc. of the IST Mobile & Wireless Communications Summit 2004, Lyon, France, June 2004
- [11] V. Nikas, G. Lioudakis, L. Dimopoulou, G. Leoleis, I. Venieris, "QoS provision for real time services over Satellite UMTS", in proc. of the IST Mobile & Wireless Communications Summit 2004, Lyon, France, June 2004

- [12] F. Del Sorbo, F. Delli Priscoli, L. Dimopoulou, A. Giralda, G. Leoleis, G. Lombardi, J. Sanchez Delgado, "SAILOR project general architecture: simulation and emulation of an integrated T/S-UMTS system based on an innovative fully IP core network," in proc. of the 1st International Conference on Advanced Satellite Mobile Systems (ASMS 2003), Frascati, Italy, July 2003
- [13] S. H. Oh, M. Albani, C. Arbib, M. Servilio, J. Sanchez, Georgios Leoleis, F. Del Sorbo, G. Lombardi, A. Giralda, "Framework of Resource Management for S-UMTS," in proc. of the IST Mobile & Wireless Communications Summit 2003, 15-18 June 2003 Aveiro, Portugal, June 2003
- [14] Starlite consortium, "STARLITE, a success story for Parlay", in proc of the Parlay Meeting, Montreal, Canada, July 2002
- [15] E. Chaniotakis, A. Papadakis, N. Tselikas, G. Leoleis, I. Venieris "Parlay and Mobile Agents in a Homogenized Service Provision Architecture", in proc. of the 2nd European Conference on Universal Multiservice Networks IEEE (ECUMN02), pp. 150-154, Colmar, France, April 2002.
- [16] P. Giannakakis, N. Tselikas, G. Leoleis, I. Venieris, "Architectural framework for the development of an integrated PSTN and Internet network environment, in proc of the 8th International Conference on Advances in Communications and Control (COMCON8), Crete, Greece, June 2001

Βιβλία

- [17] Ι. Βενιέρης, Ε. Νικολούζου, "Τεχνολογίες Διαδικτύου", Εκδόσεις Τζιόλα, 2η έκδοση, 2006 (συμμετοχή στη συγγραφή του κεφαλαίου 4 - Υπηρεσία Πολλαπλών Προορισμών στο Διαδίκτυο)

