



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αλγόριθμος Πρόβλεψης για τη Δρομολόγηση σε Wi-Max Δίκτυα
βασισμένος στις συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό στρώμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Μ. Σαράφη

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αλγόριθμος Πρόβλεψης για τη Δρομολόγηση σε Wi-Max Δίκτυα
βασισμένος στις συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό στρώμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Μ. Σαράφη

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Μήνα Έτος.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

.....
Αγγελική Μ. Σαράφη

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

Copyright © Αγγελική Σαράφη, 2006.

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.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η υλοποίηση ενός αλγορίθμου πρόβλεψης διακοπής της ζεύξης βασισμένου στις συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό στρώμα μετάδοσης. Όταν η ζεύξη διακοπεί, τα πακέτα θα δρομολογούνται από εναλλακτικές ζεύξεις. Το πρόβλημα θα μελετηθεί σε ένα ασύρματο αδόμητο δίκτυο τεχνολογίας WiMax, ενώ ο αλγόριθμος πρόβλεψης θα εφαρμοστεί σε δείγμα αντιπροσωπευτικών πρωτοκόλλων κατάστασης της ζεύξης και διανύσματος απόστασης.

Το πρώτο μέρος της διπλωματικής παρέχει την τεχνική περιγραφή της τεχνολογίας WiMax. Ακολουθεί χωροχρονική μελέτη του φαινομένου της βροχόπτωσης. Παρουσιάζεται η βροχόπτωση ως ένα δυναμικό φαινόμενο που μεταβάλλεται στο χώρο και στο χρόνο, και βάσει στατιστικών στοιχείων και μαρκοβιανής ανάλυσης προβλέπουμε την εξέλιξή της, πόσο μπορεί να επηρεάσει τις υπάρχουσες ζεύξεις, και αν κάποια ζεύξη διακοπεί, για πόσο διάστημα αυτό θα διαρκέσει. Κλείνοντας το θεωρητικό μέρος, παρουσιάζονται οι κατηγορίες πρωτοκόλλων πάνω στις οποίες θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος πρόβλεψης δρομολόγησης και αναλύεται η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί διαστρωματωμένη σχεδίαση.

Το δεύτερο και κύριο μέρος της διπλωματικής, αναφέρεται στην προσομοίωση του παραπάνω συστήματος, κάνοντας χρήση του λογισμικού πακέτου OPNET. Σε μια διάταξη πλέγματος των σταθμών βάσης, εισάγουμε τον αλγόριθμο πρόβλεψης διακοπής της ζεύξης, και μελετώντας το σύστημα πριν και μετά τη χρήση του αλγορίθμου, αντλούμε καμπύλες επίδοσης που αποδεικνύουν τη συνεισφορά του αλγορίθμου στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου.

Λέξεις κλειδιά

Ad hoc δίκτυο, IEEE 802.16a, WiMax, διάδοση σημάτων, OFDM, OPNET, RIP, OSPF, ασύρματη δρομολόγηση, βροχόπτωση, βροχοπυρήνες, διαλείψεις, ασύρματες ζεύξεις, απόσβεση, διαστρωματωμένη σχεδίαση, αλγόριθμος πρόβλεψης

Summary

The object of this diplomatic thesis is the design of a predictive algorithm based on physical layer conditions. When the link is no longer available, the data stream will be routed through the alternative links. The network that will be analyzed is an ad hoc, wireless, WiMax network, while the performance of the predictive algorithm will be studied over link state and distance vector protocols.

The first part, provides the technical design of WiMax technology. The diplomatic thesis continues with the spatio-temporal analysis of rainfall rate. Rainfall rate is described as a dynamic phenomenon that changes continuously in the field of space and time. By using statistical and Markovian analysis we can predict the rain movement, how it affect the existing links, and for how long the rain will be unavailable. At the end of the theoretical analysis, the protocols that will be used during simulation are presented and we analyse the algorithm adopted which is based on cross layer design.

The second and most important part of the thesis is referred to the simulation of this system, using the OPNET software package. Using a Mesh topology of the base stations, we introduce the predictive algorithm of link availability, and simulating the network with and without using the predictive algorithm. Finally, we obtain performance figures that show the contribution of the cross layer design in the overall throughput of the network.

Keywords

Ad hoc network, IEEE 802.16a, WiMax, signal propagation, OFDM, OPNET, RIP, OSPF, wireless routing, rainfall rate, raincells, fadings, wireless links, attenuation, cross layer design, predictive algorithm

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Π. Κωττή, που με εμπιστεύτηκε για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Μηχανικό κ. Μάρκο Αναστασόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του στο σχεδιασμό του προβλήματος της παρούσας διπλωματικής καθώς και για την εποπτεία και καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια αυτής. Ευχαριστώ για την άριστη συνεργασία.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, φίλους και συνεργάτες που με ανέχτηκαν κατά την περίοδο συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

<i>Περίληψη</i>	5
<i>Summary</i>	6
<i>Πίνακας Περιεχομένων</i>	8
<i>Πίνακας Σχημάτων</i>	10
<i>Εισαγωγή</i>	12
Κεφάλαιο 1: Ασύρματα Δίκτυα Πλήρως Διασυνδεδεμένα	14
1.1 Κινητό Αδόμητο Δίκτυο	14
1.2 Ασύρματα δίκτυα τοπολογίας πλήρους γράφου	16
1.3 Παραλλαγές στην αρχιτεκτονική των ασύρματων αδόμητων δικτύων - WMNs	18
1.4 Περιοχές έρευνας και ανάπτυξης	21
1.4.1 Χωρητικότητα Δικτύου	22
1.4.2 Βελτίωση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας.....	23
1.4.3 Διαχείριση Δικτύου	27
1.4.4 Ασφάλεια	29
Κεφάλαιο 2: Τεχνική περιγραφή του πρωτοκόλλου 802.16a	30
2.1 Το μοντέλο αναφοράς του OSI και η έννοια της υποστρωμάτωσης	30
2.2 Σειρά Προτύπων IEEE Std 802	33
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου IEEE 802.16	34
2.3.1 Ορισμός και βασικές εξειδικεύσεις του προτύπου	34
2.3.2 Σύγκριση προτύπων 802.16 και 802.11	36
2.3.3 Βασικά Χαρακτηριστικά του IEEE 802.16 a	37
2.3.4 Αρχιτεκτονική Δικτύου WiMax	38
2.3.5 Διαστρωμάτωση	39
2.4 Υπόστρωμα MAC	41
2.4.1 Δομή πλαισίου	41
2.4.2 Ανάλυση της Μονάδας δεδομένων Πακέτου MAC	45
2.4.3 Λειτουργίες κατάτμησης – επανένωσης	47
2.4.4 Μηχανισμός Αίτησης Αυτόματης Απάντησης	48
2.4.5 Αρχικοποίηση δικτύου και εγκατάσταση σύνδεσης	50
2.5 Φυσικό Στρώμα	56
2.5.1 Εισαγωγή στη διαμόρφωση OFDM	56
2.5.1.1 Ποιοτική περιγραφή της διαμόρφωσης OFDM.....	58
2.5.1.2 Βασικές Παράμετροι	59
2.5.2 Περιγραφή συστήματος μετάδοσης πομπού και δέκτη	62
2.5.3 Κωδικοποίηση καναλιού.....	63
2.5.3.1 Περιπλέκτης (Randomizer / Scrambler).....	63
2.5.3.2 Εκ των προτέρων διόρθωση λαθών.....	64
2.5.4 Διαφύλλωση.....	67
2.5.5 Διαμόρφωση	68
2.5.6 Πιλοτικά φέροντα	72
2.5.7 Τοποθέτηση Preamble.....	72
2.6 Εφαρμογή Τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων στο Φυσικό Στρώμα	73
2.6.1 Τεχνικές ελέγχου της ισοδύναμης ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος.....	75
2.6.2 Προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης	75
2.6.3 Τεχνικές διαφορικής λήψης	78

Κεφάλαιο 3: Ασύρματη Διάδοση σημάτων.....	80
3.1 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	80
3.1.1 Τρόποι διάδοσης σημάτων.....	81
3.1.2 Απώλειες διάδοσης επίγειου δικτύου οπτικής επαφής.....	83
3.1.2.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου	84
3.1.2.2 Απώλειες πολλαπλών διοδεύσεων	85
3.1.2.3 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων	87
3.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά της βροχής.....	91
3.2.1 Επίδραση του μέσου βροχής στις ζεύξεις	91
3.2.2 Πρόβλεψη της διάρκειας διαλείψεων με χρήση Μαρκοβιανής ανάλυσης.....	95
3.2.3 Προσεγγιστικοί τύποι για τη μέτρηση της διάρκειας των διαλείψεων.....	99
Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη αλγορίθμου Δρομολόγησης.....	101
4.1 Επισκόπηση πρωτοκόλλων Δρομολόγησης	101
4.1.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης Πληροφοριών, RIP	102
4.1.2 Πρωτόκολλο ανοιχτή πρώτα η βραχύτερη διαδρομή, OSPF	104
4.1.3 Σύγκριση κατηγοριών Πρωτοκόλλων	107
4.2 Επίδραση Διαλείψεων στη μετάδοση.....	108
4.2.1 Υπολογισμός της Απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης	108
4.2.1.1 Υπολογισμός ειδικής απόσβεσης A_0	108
4.2.1.2 Μοντέλο υπολογισμού της χωρικής δομής της βροχής.....	109
4.2.1.3 Υπολογισμός στατιστικής κατανομής της απόσβεσης	111
4.2.2 Προσομοίωση απλού συστήματος μοναδικού πομπού	112
4.2.2.1 Μελέτη Διέλευσης πακέτων.....	114
4.2.2.2 Μελέτη επίδρασης στην ισχύ λήψης	116
4.2.2.3 Επίδραση στη συνολική καθυστέρηση.....	117
4.3 Διαστρωματωμένη σχεδίαση Αλγορίθμου Δρομολόγησης	118
Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση με χρήση OPNET	122
5.1 Περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης OPNET	122
5.2 Ορισμός της μορφής των ανταλλασσόμενων πακέτων	125
5.3 Είδη χρησιμοποιούμενων κόμβων	125
5.4 Εισαγωγή της απαιτούμενης διαμόρφωσης φυσικού στρώματος	131
5.5 Εισαγωγή προσομοιωτή διαλείψεων.....	134
5.6 Διεξαγωγή της προσομοίωσης.....	136
5.6.1 Μελέτη συστήματος με χρήση πρωτοκόλλου RIP	136
5.6.1.1 Μελέτη ληφθέντων πακέτων.....	139
5.6.1.2 Μελέτη πακέτων ελέγχου.....	141
5.6.1.3 Μελέτη καθυστέρησης	144
5.6.2 Μελέτη συστήματος με χρήση πρωτοκόλλου OSPF	145
5.6.2.1 Μελέτη ληφθέντων πακέτων.....	145
5.6.2.2 Μελέτη πακέτων ελέγχου.....	147
5.6.2.3 Μελέτη καθυστέρησης	148
5.7 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	149
Βιβλιογραφία	151

Πίνακας Σχημάτων

<i>Σχήμα 1.1.1</i>	Δομή κυψελοειδούς συστήματος.....	14
<i>Σχήμα 1.1.2</i>	Δομή ασύρματου αδόμητου συστήματος	15
<i>Σχήμα 1.2.1</i>	Τοπολογία Πλήρους Γράφου και Πλέγματος.....	17
<i>Σχήμα 2.1.1</i>	Το μοντέλο αναφοράς OSI	32
<i>Σχήμα 2.2.1</i>	Αντιστοιχία στρωμάτων OSI και πρωτοκόλλων IEEE 802.....	33
<i>Σχήμα 2.3.4.1</i>	Αρχιτεκτονική Δικτύου WiMax	39
<i>Σχήμα 2.3.2.1</i>	Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλου IEEE 802.16.....	40
<i>Σχήμα 2.4.1.2</i>	Πεδίο FCH επικεφαλίδας.....	43
<i>Σχήμα 2.4.1.3</i>	Δομή πλαισίου MAC με χάρτη DL-MAP	44
<i>Σχήμα 2.4.1.2</i>	Διαστήματα Ανταγωνισμού κατά το υποπλαίσιο άνω ζεύξης.....	45
<i>Σχήμα 2.4.2.1</i>	Συντακτική δομή της MAC Packet Data Unit.....	46
<i>Σχήμα 2.4.3.1</i>	Λειτουργία επανένωσης.....	48
<i>Σχήμα 2.4.4.1</i>	Καταστάσεις μετάδοσης ενός πλαισίου ARQ	49
<i>Σχήμα 2.4.4.2</i>	Παράδειγμα MAC PDU με ARQ Subheader	49
<i>Σχήμα 2.4.5.1</i>	Εύρεση καναλιού και απόκτηση παραμέτρων άνω ζεύξης	52
<i>Σχήμα 2.4.5.2</i>	Διαδικασία συντονισμού και αυτόματης προσαρμογής	53
<i>Σχήμα 2.4.5.3</i>	Διαπραγμάτευση χαρακτηριστικών σύνδεσης.....	54
<i>Σχήμα 2.5.1.1</i>	Σύγκριση της χρησιμοποίησης του διατιθέμενου εύρους ζώνης στις δύο διαμορφώσεις FDM και OFDM.....	57
<i>Σχήμα 2.5.1.1.1</i>	Δομή της χρονικής θυρίδας OFDM.....	60
<i>Σχήμα 2.5.1.1.2</i>	Φασματική περιγραφή OFDM.....	61
<i>Σχήμα 2.5.2.1</i>	Αλυσίδα πομπού και δέκτη WiMax τεχνολογίας	62
<i>Σχήμα 2.5.3.1.1</i>	PRBS για κωδικοποίηση δεδομένων	63
<i>Σχήμα 2.5.2.1.2</i>	Διάνυσμα UL αρχικοποίησης του περιπλέκτη OFDM.....	64
<i>Σχήμα 2.5.2.2.1</i>	Συνελκτικός κωδικοποιητής	66
<i>Σχήμα 2.5.5.1</i>	Διάγραμμα αστερισμού BPSK διαμόρφωσης.	69
<i>Σχήμα 2.5.5.2</i>	Διάγραμμα αστερισμού QPSK Διαμόρφωσης.....	70
<i>Σχήμα 2.5.5.3</i>	Διάγραμμα αστερισμού 16-QAM Διαμόρφωσης.	71
<i>Σχήμα 2.5.5.4</i>	Διάγραμμα αστερισμού 64-QAM Διαμόρφωσης.	71
<i>Σχήμα 2.5.6.1</i>	Διαμορφωτής πιλοτικών σημάτων.....	72
<i>Σχήμα 2.5.7.1</i>	Preamble άνω ζεύξης, μικρού μήκους.....	73
<i>Σχήμα 2.5.7.2</i>	Preamble κάτω ζεύξης, μεγάλου μήκους.....	73
<i>Σχήμα 2.6.1</i>	Λειτουργικό Διάγραμμα των τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων.....	74
<i>Σχήμα 3.1.1</i>	Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.....	81
<i>Σχήμα 3.1.2.1</i>	Κύριες πηγές εξασθένησης ασύρματου καναλιού.....	84
<i>Σχήμα 3.1.2.3.1</i>	Επίδραση ατμοσφαιρικών φαινομένων στις ασύρματες ζεύξεις.....	87
<i>Σχήμα 3.1.2.3.2</i>	Πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής σύμφωνα με στοιχεία του HellasSat (Γωνία Av. 30° Κάθετη Πόλωση).....	88
<i>Σχήμα 3.1.2.3.3</i>	Ειδική Απόσβεση (dB/km) συναρτήσει της συχνότητας.....	89
	A: ατμόσφαιρα πυκνότητας σε υγρασία 7.5gr/m ³ B: ξηρή ατμόσφαιρα	89
<i>Σχήμα 3.1.2.3.4</i>	Εισαγόμενη εξασθένηση σαν συνάρτηση ποσοστού του συνολικού χρόνου λειτουργίας της ζεύξης.	90
<i>Σχήμα 3.2.1.1</i>	Ιστόγραμμα πειραματικών μετρήσεων για την κατανομή του dA στην περιοχή του Μιλάνου και για συχνότητα 40GHz	94
<i>Σχήμα 3.2.2.1</i>	Αναπαράσταση πιθανοτήτων μετάβασης P _{ij}	97
<i>Σχήμα 3.2.2.2</i>	Πιθανότητα υπέρβασης της διάρκειας των διαλείψεων για Athr ίσο με... 98	

<i>Σχήμα 3.2.3.1</i>	Προσεγγιστική Διάρκεια Διαλείψεων για $f=12\text{GHz}$ και διάφορα.....	99
<i>Σχήμα 3.2.3.2</i>	Προσεγγιστική διάρκεια διαλείψεων συναρτήσει της εξασθένησης.....	100
<i>Σχήμα 4.1.1.1</i>	Παράδειγμα πίνακα δρομολόγησης του δρομολογητή D.....	104
<i>Σχήμα 4.1.2.1</i>	Ιεραρχικά Δομημένο ΑΣ OSPF με τέσσερις περιοχές	106
<i>Σχήμα 4.2.1.2.1</i>	(α) Μετρήσεις τις έντασης βροχόπτωσης από παρατήρηση ραντάρ (β) Προσομοίωση σταγόνων βάσει του προτεινόμενου μοντέλου (γ) Προσομοίωση σταγόνων βάσει των μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενων μοντέλων.....	111
<i>Σχήμα 4.2.2.1</i>	Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης.....	113
<i>Σχήμα 4.2.2.2</i>	Κύκλωμα πομπού	113
<i>Σχήμα 4.2.2.2</i>	Κύκλωμα δέκτη	114
<i>Σχήμα 4.2.2.1.1</i>	Διέλευση πακέτων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού	115
<i>Σχήμα 4.2.2.1.2</i>	Διέλευση πακέτων υπό συνθήκες έντονης βροχόπτωσης.....	116
<i>Σχήμα 4.2.2.2.1</i>	Μελέτη λαμβανόμενης ισχύος σε σύστημα παρουσία διαλείψεων.....	117
<i>Σχήμα 4.2.2.3.1</i>	Καθυστερήση ανά πακέτο σε συνθήκες διάλειψης.	118
<i>Σχήμα 4.3.1</i>	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου δρομολόγησης.	120
<i>Σχήμα 5.1.1</i>	Μητροπολιτικό δίκτυο Ελλάδα.....	123
<i>Σχήμα 5.1.2</i>	Δίκτυο Ευρείας Ζώνης που συνδέει την Ελλάδα με την Ιταλία.....	123
<i>Σχήμα 5.2.1</i>	Δομή πακέτου 802.16a	125
<i>Σχήμα 5.3.1</i>	Τοπολογία ασύρματου δικτύου	126
<i>Σχήμα 5.3.2</i>	Δομή του ασύρματου συνοριακού δρομολογητή πρόσβασης.....	127
<i>Σχήμα 5.3.3</i>	Μοντέλο εσωτερικού ασύρματου δρομολογητή	128
<i>Σχήμα 5.3.4</i>	Υποδίκτυο WiFi τεχνολογίας	129
<i>Σχήμα 5.3.5</i>	Μοντέλο ασύρματου σταθμού.....	130
<i>Σχήμα 5.5.1</i>	Πίνακας διαλείψεων για μια διάλειψη ανά ζεύξη (F ζώνη).....	134
<i>Σχήμα 5.5.2</i>	Πίνακας διαλείψεων για έξι διαλείψεις ανά ζεύξη (L ζώνη).....	135
<i>Σχήμα 5.6.1.1</i>	Σχέση σταλμένου και ληφθέντος φορτίου στην κλιματική ζώνη F, χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου πρόβλεψης.....	137
<i>Σχήμα 5.6.1.2</i>	Ληφθέντα πακέτα σε διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης	138
<i>Σχήμα 5.6.1.1.1</i>	Αποσταλμένα πακέτα για κάθε σενάριο συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.....	139
<i>Σχήμα 5.6.1.1.2</i>	Σύνολο ληφθέντων πακέτων συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.	140
<i>Σχήμα 5.6.1.2.1</i>	Σύνολο πακέτων καθολικής εκπομπής συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.....	141
<i>Σχήμα 5.6.1.2.2</i>	Αλλαγές στον πίνακα δρομολόγησης συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.....	143
<i>Σχήμα 5.6.1.3.1</i>	Μελέτη καθυστέρησης επεξεργασίας. συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.....	144
<i>Σχήμα 5.6.2.1.1</i>	Σύνολο ληφθέντων πακέτων για μελέτη του συστήματος για 30s	146
<i>Σχήμα 5.6.2.1.2</i>	Σύνολο ληφθέντων πακέτων για μελέτη του συστήματος για 1h.....	147
<i>Σχήμα 5.6.2.2.1</i>	Σύνολο πακέτων πολλαπλής εκπομπής συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.....	148
<i>Σχήμα 5.6.2.3.1</i>	Μελέτη καθυστέρησης επεξεργασίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.....	149

Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, προτείνεται τη βελτίωση των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης, που χρησιμοποιούνται κατά την ασύρματη μετάδοση σημάτων, υιοθετώντας έναν νέο τρόπο διαστρωματωμένης λογικής κατά τη σχεδίαση του συστήματος. Τελικός στόχος, είναι η σαφής βελτίωση της διέλευσης και η αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου.

Η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί είναι η παρακολούθηση των συνθηκών που επικρατούν στο φυσικό στρώμα και ο αποκλεισμός του καναλιού μετάδοσης από τη διαδικασία της δρομολόγησης, όταν είναι γνωστό ότι το κανάλι επίκειται να τεθεί σύντομα εκτός λειτουργίας, λόγω απότομης χειροτέρευσης στην ποιότητα της ζεύξης. Όπως θα διαπιστωθεί, κάτι τέτοιο στις ζώνες συχνότητας που εξετάζονται, οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αρνητική επίδραση του φαινομένου της βροχής. Αυτό είναι εφικτό αν εκμεταλλευτούμε την προβλεψιμότητα του φαινομένου της βροχής, δεδομένου ότι αυτή έχει εκδηλωθεί. Αυτού του τύπου η σχεδίαση, προϋποθέτει τη συνεχή παρακολούθηση των συνθηκών του φυσικού στρώματος και την ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης όταν το κανάλι μετάδοσης τεθεί εκτός λειτουργίας. Επομένως, πληροφορία από το πρώτο στρώμα του μοντέλου αναφοράς OSI, περνά απευθείας στο τρίτο στρώμα, καταστρατηγώντας τη δομή των πρωτοκόλλων. Αυτό αναφέρεται ως διαστρωματωμένη σχεδίαση και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πιο ευέλικτου, εύκολα προσαρμόσιμου και πιο αποτελεσματικού συστήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται την τεχνολογία του δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του αλγορίθμου. Πρόκειται για ένα ασύρματο, πλήρως διασυνδεδεμένο δίκτυο. Τα δίκτυα αυτού του τύπου συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα τόσο των ασύρματων δικτύων, όσο και των Ad Hoc δικτύων, απαρτίζοντας μια τεχνολογία αρκετά ανταγωνιστική και με πολλά περιθώρια έρευνας και ανάπτυξης.

Έχοντας δεδομένη την τοπολογία του δικτύου και το είδος των κόμβων, ορίζεται στη συνέχεια το πρωτόκολλο βάσει του οποίου θα γίνεται η επικοινωνία των κόμβων. Έχοντας ασύρματο δίκτυο που καλύπτει μεγάλες αποστάσεις, επιλέχθηκε τη χρήση του

πρωτοκόλλου WiMax (IEEE 802.16) το οποίο καλύπτει ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα ευρεία ζώνης. Στο δεύτερο κεφάλαιο, θα γίνει η παρουσίαση της τεχνολογίας αυτής, η οποία είναι η πλέον κατάλληλη για την επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων, αφού ενσωματώνει τεχνικές μείωσης της εξασθένησης, προσαρμογή της μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες του φυσικού στρώματος και έλεγχο ισχύος για παρακολούθηση του καναλιού και αποφυγή παρεμβολών.

Την τεχνική περιγραφή και τις προδιαγραφές λειτουργίας του χρησιμοποιούμενου δικτύου, ακολουθεί η θεωρητική περιγραφή του φαινομένου της ασύρματης διάδοσης σημάτων. Παρουσιάζεται η περιγραφή του φυσικού στρώματος κατά τη μετάδοση καθώς και τα προβλήματα που είναι δυνατόν να ανακύψουν και να θέσουν τη ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων σε διακοπή. Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, διερευνάται η ύπαρξη τρόπων πρόβλεψης των συνθηκών του καναλιού μετάδοσης και κατά πόσο είναι εφικτή η εκ των προτέρων γνώση της διακοπής για κάθε μια από τις ζεύξεις.

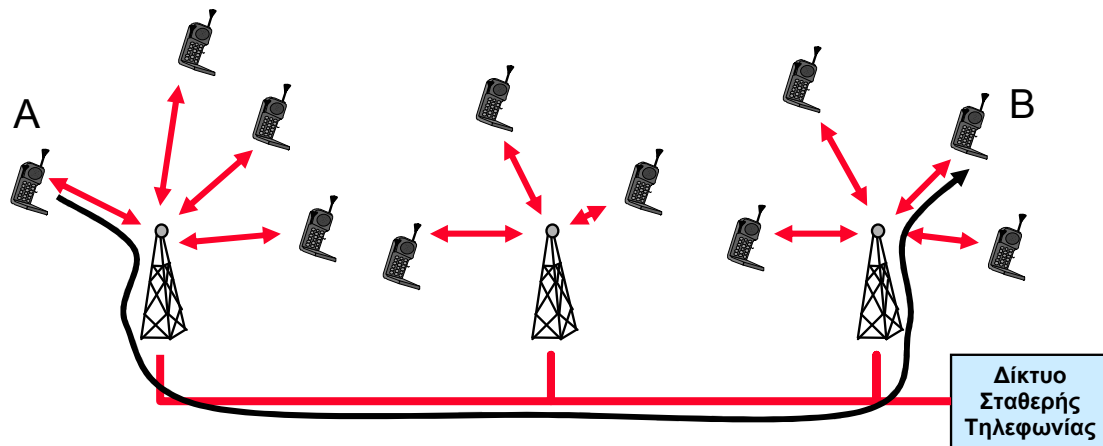
Στο τέταρτο κεφάλαιο, έχοντας αποκτήσει όλη την πληροφορία για τις συνθήκες του φυσικού στρώματος, ακολουθεί η υλοποίηση του αλγορίθμου πρόβλεψης που θα εξασφαλίσει την ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης αμέσως μόλις ληφθεί η πληροφορία και όχι μόλις αρχίσουν να χάνονται πακέτα δεδομένων κατά τη μετάδοση. Στο σημείο αυτό, θα γίνει μια σύντομη επισκόπηση των κατηγοριών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και θα επιλεγθεί το βέλτιστο πρωτόκολλο για την παραπάνω λειτουργία.

Τέλος, έχοντας την θεωρητική όσο και την τεχνική περιγραφή του δικτύου, ακολουθεί η φάση της προσομοίωσης του δικτύου με χρήση του πακέτου λογισμικού OPNET. Υλοποιώντας τον προσομοιωτή βροχής τον οποίον θα ενσωματώσουμε στο OPNET και εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο πρόβλεψης, συλλέγονται καμπύλες διέλευσης και πακέτων ελέγχου που αποδεικνύουν την αποδοτικότερη και την οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου με την εφαρμογή της πρόβλεψης.

Κεφάλαιο 1: Ασύρματα Δίκτυα Πλήρως Διασυνδεδεμένα

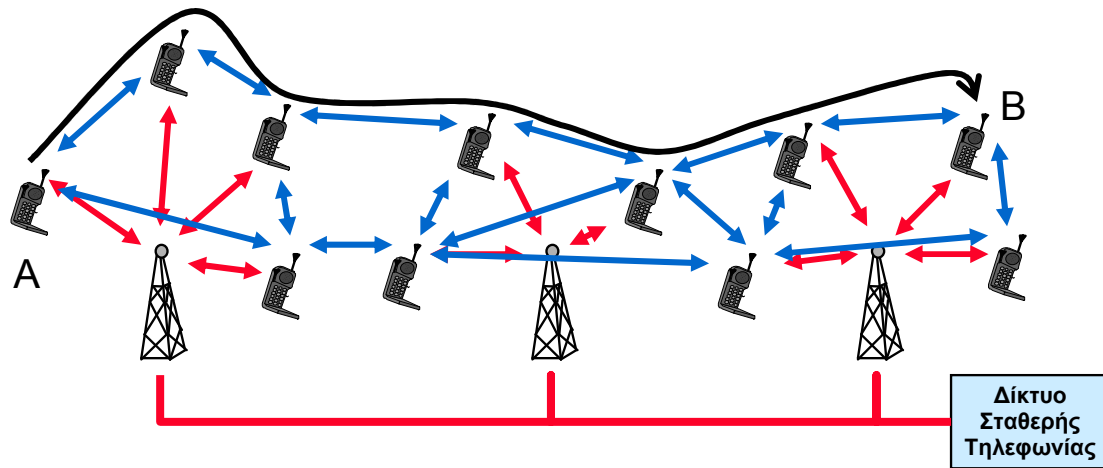
1.1 Κινητό Αδόμητο Δίκτυο

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα, τα κινητά τερματικά επικοινωνούν αποκλειστικά με το σταθμό βάσης, τον οποίο ενημερώνουν για τη θέση τους και ανταλλάσσουν δεδομένα. Δεν είναι επιφορτισμένα με καμία λειτουργία δρομολόγησης και ελέγχου, αναλαμβάνοντας έτσι, πολύ λίγες αρμοδιότητες. Πρόκειται επομένως, για ένα σύστημα κεντρικού ελέγχου, όπου όλες οι διαδικασίες ελέγχου, πραγματοποίησης σύνδεσης και ασφαλείας, πραγματοποιούνται από τους σταθμούς βάσης.



Σχήμα 1.1.1 Δομή κυψελοειδούς συστήματος

Τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα, που είναι γνωστά και ως MANET (Mobile Ad hoc Networks), ακολουθούν μια διαφορετική αρχιτεκτονική. Σχηματίζονται από ασύρματες μονάδες, που μπορεί να είναι και κινητές, χωρίς απαραίτητα να χρησιμοποιούν μια προϋπάρχουσα υποδομή, αυτός είναι και ο λόγος που χαρακτηρίζονται ως αδόμητα. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική τα κινητά τερματικά δημιουργούν ένα εξολοκλήρου ασύρματο δίκτυο και αναλαμβάνουν πολύ περισσότερες αρμοδιότητες, όπως η προώθηση των δεδομένων άλλων τερματικών. Ο έλεγχος του δικτύου γίνεται κατακεντρωμένα αφού όλα τα τερματικά είναι εξίσου επιφορτισμένα με αυτό το ρόλο. Ακολουθείται επομένως σύστημα *κατακεντρωμένης αρχιτεκτονικής και ελέγχου*.



Σχήμα 1.1.2 Δομή ασύρματου αδόμητου συστήματος

Τα πακέτα μιας σύνδεσης δεν ακολουθούν κάποιο προδιαγεγραμμένο μονοπάτι αλλά δυναμικά αποφασίζεται σε κάθε κόμβο (κινητό ή και όχι τερματικό) ποιος θα είναι ο επόμενος κόμβος προκειμένου να φτάσουν στον κόμβο προορισμού. Τα σχηματιζόμενα δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να *αυτο-οργανώνονται* (self-routing networks), αυτή η ιδιότητα αναφέρεται στην αυτο-δρομολόγηση των πακέτων που τελείται σε κάθε κόμβο προκειμένου να αποφασιστεί ο επόμενος κόμβος. Ακολουθούν συνήθως μια *τοπολογική δομή πλήρους γράφου* (mesh topology) αφού αυτή η δομή επιτρέπει την ισότιμη επικοινωνία όλων με όλους, όπως ακριβώς συμβαίνει στην ασύρματη επικοινωνία στο αδόμητο δίκτυο. Οι διαδρομές μεταξύ των κόμβων μπορεί να περιλαμβάνουν πολλαπλές μεταβάσεις (hop), για αυτό και στη βιβλιογραφία συχνά τα ad-hoc δίκτυα αναφέρονται ισοδύναμα και ως δίκτυα *πολλαπλών αλμάτων* (multihop).

Τα MANET έχουν μειωμένη εξάρτηση από σταθερή υποδομή, για αυτό το λόγο και παρέχουν μεγάλη ευκολία και ταχύτητα στην εγκατάσταση. Η μεταφορά δεδομένων γίνεται ασύρματα, οπότε χρησιμοποιούνται εκεί όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σταθερή υποδομή δικτύου, υπάρχει όμως ανάγκη ανταλλαγής δεδομένων και προώθησης πακέτων προς διάφορους κόμβους. Παράλληλα, η ευκολία ανάπτυξης δικτύων MANET καθώς και η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας και μεγάλου εύρους, μέσω του αέρα, τα καθιστούν προτιμητέα για πλήθος εφαρμογών, ενώ παράλληλα συγκεντρώνουν και ερευνητικό ενδιαφέρον για την περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας τους.

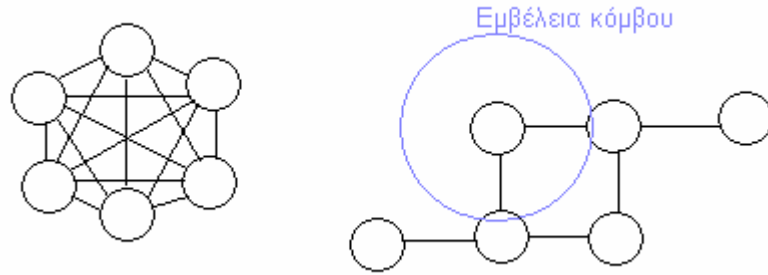
Οι κυριότερες εφαρμογές των ασύρματων ad-hoc δικτύων είναι οι εξής:

- Στρατιωτικές εφαρμογές (Στρατιώτες και άρματα μάχης κινούμενα στο μέτωπο)
- Αντιμετώπιση καταστροφών και επείγουσες επιχειρήσεις
- Καθημερινές εμπορικές εφαρμογές (Χρήστες με laptop και PDA σε δημόσιους χώρους, παροχή υπηρεσιών σε πλοία και μικρά αεροσκάφη)

1.2 Ασύρματα δίκτυα τοπολογίας πλήρους γράφου

Τα *ασύρματα πλήρως διασυνδεδεμένα δίκτυα* (Wireless Mesh Networks - WMNs) αυτο-οργανώνονται και αυτο-προγραμματίζονται ώστε να δημιουργούν αυτόματα ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο, διατηρώντας όμως ταυτόχρονα την *επικοινωνία πλήρους γράφου* (mesh connectivity). Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι επικοινωνούν με όλα τα τερματικά που βρίσκονται μέσα στην απόσταση εμβελείας τους, όπως αυτή καθορίζεται από τη συχνότητα εκπομπής και την ισχύ του πομποδέκτη. Συγκεντρώνουν, όπως είναι φυσικό, όλα τα χαρακτηριστικά των κινητών αδόμητων δικτύων που εξετάστηκαν παραπάνω.

Τα δίκτυα WMNs αποτελούνται από δύο είδη κόμβων: τους *δρομολογητές πλήρους γράφου* (mesh routers) και τους *πελάτες πλήρους γράφου* (mesh clients). Και τα δύο είδη κόμβων, είναι επιφορτισμένα με λειτουργίες δρομολόγησης. Αυτό σημαίνει, ότι κάθε κόμβος έχει να επεξεργαστεί και να προωθήσει στο δίκτυο, εκτός από τη δική του κίνηση και την κίνηση των άλλων κόμβων. Εκτός από τις τυπικές λειτουργίες δρομολόγησης, οι δρομολογητές είναι επιφορτισμένοι με την υποστήριξη της τοπολογίας πλήρους γράφου, επομένως πρέπει να διατηρούν πολλαπλές ασύρματες διεπαφές καθώς και συναρτήσεις που θα επιτρέπουν την ταυτόχρονη διαχείριση των πολλαπλών καναλιών επικοινωνίας. Η ακτίνα μετάδοσης των δρομολογητών είναι ανάλογη της ισχύος μετάδοσης. Μπορούμε επομένως, να εκμεταλλευτούμε την επικοινωνία των *πολλαπλών αλμάτων* (multi-hop) που είναι κύριο χαρακτηριστικό των αδόμητων δικτύων και να πετύχουμε ίδια κάλυψη με μικρότερη όμως ισχύ εκπομπής. Έτσι, η τοπολογία πλήρους γράφου, ανάγεται σε τοπολογία πλέγματος και η επικοινωνία μεταξύ δύο απομακρυσμένων κόμβων πραγματοποιείται με πολλαπλά άλματα – βήματα. Η τοπολογία πλέγματος αναφέρεται στην επικοινωνία του κάθε δρομολογητή με τους γειτονικούς του δρομολογητές και όχι με όλους τους δρομολογητές της διάταξης.



Σχήμα 1.2.1 Τοπολογία Πλήρους Γράφου και Πλέγματος

Σημειώνεται, ότι χρειάζεται μεγάλη προσοχή κατά την επιλογή της ακτίνας μετάδοσης του κάθε κόμβου. Μεγάλη ακτίνα μετάδοσης συνεπάγεται αύξηση των συγκρούσεων και της πιθανότητας παρεμβολών σε γειτονικούς κόμβους, από την άλλη όμως κρατά σχετικά χαμηλό το μέσο αριθμό μεταδόσεων έως ότου η πληροφορία φτάσει τον τελικό προορισμό της. Από την άλλη, η επιλογή μικρότερης ακτίνας, εξασφαλίζει τη χαμηλότερη ισχύ εκπομπής, έχοντας πολύ καλή εκμετάλλευση του συγκεκριμένου πόρου, ο κίνδυνος συγκρούσεων μειώνεται και το δίκτυο γίνεται πολύ εύκολα ελεγχόμενο και αξιόπιστο, αφού η παρουσία κάποιου προβλήματος απομονώνει τον κόμβο και όχι μέρος του δικτύου. Βέβαια, η μικρή ακτίνα μετάδοσης, κρατά υψηλό τον απαιτούμενο αριθμό μεταδόσεων και μειώνει τη διέλευση αφού υπάρχει αύξηση της καθυστέρησης και της πληροφορίας διαχείρισης. Επιπροσθέτως, ο αριθμός των αλμάτων αυξάνεται, γεγονός που μπορεί να καταστήσει το δίκτυο μη συνεκτικό, αφού ορισμένα πρωτόκολλα θεωρούν τον κόμβο απρόσιτο όταν απαιτούνται πολλά άλματα.

Οι δρομολογητές πλέγματος (πλήρους γράφου) έχουν ελάχιστη κινητικότητα και αποτελούν το δίκτυο κορμού για τους πελάτες. Παράλληλα και οι πελάτες πλέγματος είναι εφικτό να πραγματοποιήσουν λειτουργίες δρομολόγησης, μόνο που είναι πολύ πιο απλές, αφού το μόνο που απαιτείται είναι μια ασύρματη διεπαφή που δρα ως πομποδέκτης και επιπλέον έχουν να διαχειριστούν πολύ μικρότερη ποσότητα επικοινωνιακού φορτίου. Επίσης, ο δρομολογητής πλέγματος είναι δυνατόν να περιέχει και πλήθος άλλων διεπαφών που επιτρέπουν τη διασύνδεση μεταξύ ετερογενών δικτύων, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο την επικοινωνία πολύ πιο ευέλικτη.

Επομένως, από τα παραπάνω προκύπτει, ότι τα ασύρματα δίκτυα πλήρους γράφου, επεκτείνουν στην ουσία τις δυνατότητες των ad hoc δικτύων, προσφέροντας σημαντικά

πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό κόστος εγκατάστασης και ενεργοποίησης, εύκολη συντήρηση του δικτύου, αξιόπιστη και σταθερή κάλυψη και υψηλή αξιοπιστία. Για το λόγο αυτό, μπορούν να αντικαταστήσουν τα ad hoc δίκτυα σε όλες τις εφαρμογές τους και επιπλέον να προσφέρουν στην αγορά υπηρεσίες όπως ευρυζωνική κάλυψη τόσο σε επιχειρήσεις όσο και σε οικιακούς χρήστες, κάλυψη σε μητροπολιτικό δίκτυο υψηλών ταχυτήτων, εφαρμογή σε υπηρεσίες αυτοματισμού κτιρίων και παροχή ενός δικτύου κορμού υψηλής ταχύτητας, ευέλικτο και όσο αξιόπιστο επιτρέπει η ασύρματη μετάδοση.

1.3 Παραλλαγές στην αρχιτεκτονική των ασύρματων αδόμητων δικτύων - WMNs

Τα ad hoc δίκτυα παρουσιάζουν σημαντική ανομοιογένεια, αφού κάθε κόμβος μπορεί να διαφέρει από τους υπόλοιπους σε πολλά χαρακτηριστικά, όπως στην υπολογιστική ισχύ, στην ακτίνα εκπομπής ή στη διάρκεια ζωής των μπαταριών (αν π.χ. είναι ένας φορητός υπολογιστής ή ένα PDA). Επιπλέον, τα διάφορα ad hoc δίκτυα μπορεί να διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους, όπως στους χρησιμοποιούμενους ρυθμούς επικοινωνίας, στο αν παρέχουν δυνατότητες πολλαπλής εκπομπής, στο αν συνυπάρχουν ή όχι με άλλα δίκτυα τα οποία έχουν κάποια σταθερή υποδομή ή τέλος, αν υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών και με τι ρυθμούς. Υπάρχουν πολλά κριτήρια βάσει των οποίων προκύπτουν διαφορετικές πολλές παραλλαγές της MANET – WMN αρχιτεκτονικής. Ανάλογα με τις δυνατότητες κάθε κόμβου προκύπτουν:

- *Πλήρως Συμμετρικό Περιβάλλον.*

Οι κόμβοι αυτού του δικτύου αποτελούνται από δρομολογητές πλήρους γράφου, που έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να παρέχουν πολλαπλές ασύρματες διεπαφές (mesh routers). Έχουν όλοι πανομοιότυπες δυνατότητες και ευθύνες και χρησιμοποιούνται κυρίως για το σχηματισμό ενός ασύρματου δικτύου υποδομής (Infrastructure – Backbone WMNs).

Στην περίπτωση όπου οι κόμβοι που απαρτίζουν το δίκτυο παρέχουν, εκτός από λειτουργίες δρομολόγησης και εφαρμογές τελικού χρήστη στους πελάτες, πραγματοποιώντας κάθε φορά συνδέσεις ένα -προς-ένα με τους άλλους κόμβους, προκύπτει το αμιγώς Ad Hoc δίκτυο, που δεν έχει την ανάγκη ασύρματου

δρομολογητή πλήρους γράφου και αποτελείται από κόμβους πελάτες (Client WMNs). Αφού οι κόμβοι είναι ισότιμοι χρήστες του δικτύου, πανομοιότυποι σε τεχνολογία και το περιβάλλον είναι πλήρως συμμετρικό.

- *Ασύμμετρες δυνατότητες.*

Η εμβέλεια μετάδοσης, η ταχύτητα κίνησης, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, οι υπολογιστικοί πόροι (CPU, memory) μπορεί να διαφέρουν από κόμβο σε κόμβο. Μια τέτοια αρχιτεκτονική δικτύου κρίνεται περισσότερο κατάλληλη για ασύρματα δίκτυα κόμβων πελατών, που πραγματοποιούν συνδέσεις σημείου-προς-σημείο, αφού σε αντίθετη περίπτωση ανακύπτουν προβλήματα παρεμβολών, δρομολόγησης, κατανομής φορτίου και ασφάλειας. Χρειάζεται προσεκτικός σχεδιασμός και έρευνα για την εφαρμογή της παραπάνω αρχιτεκτονικής σε ασύρματους δρομολογητές.

- *Ασύμμετρες ευθύνες.*

Στην περίπτωση αυτή, μόνο κάποιοι κόμβοι μπορούν να δρομολογήσουν πακέτα, κάποιοι άλλοι μπορεί να λειτουργήσουν σαν αρχηγό των γειτονικών κόμβων (π.χ. αρχηγός συστάδας) και, τέλος, υπάρχουν και απλοί κόμβοι πελάτες που επικοινωνούν με το τοπικό σημείο πρόσβασης για να προσπελάσουν το υπόλοιπο δίκτυο. Πρόκειται για ένα υβριδικό δίκτυο ιεραρχικής δομής που συγκεντρώνει και τους δύο τύπους κόμβων που παρουσιάστηκαν.

Παράλληλα, διαφοροποιήσεις είναι δυνατόν να υπάρχουν και ως προς τα χαρακτηριστικά του φορτίου των δεδομένων: διαφορετική ταχύτητα μετάδοσης, χρονικοί περιορισμοί, απαιτήσεις αξιοπιστίας, εκπομπή προς έναν ή πολλούς σταθμούς (unicast/ multicast), σύστημα διευθυνσιοδότησης.

Ένα δίκτυο πρέπει να είναι προσαρμοσμένο και στο είδος της κίνησης που καλείται να υποστηρίξει. Τα πρότυπα κινητικότητας των διαφόρων χρηστών, επηρεάζουν τη χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική: άνθρωποι που κάθονται στην αίθουσα αναμονής ενός αεροδρομίου, κινητοί χρήστες σε εθνική οδό, δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών. Όλα τα παραπάνω απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση από το δίκτυο. Εκτός από τα πρότυπα

κινητικότητας, βασικό ρόλο παίζουν και τα χαρακτηριστικά κινητικότητας: ταχύτητα, προβλεψιμότητα – κατεύθυνση κίνησης, ομοιομορφία (ή έλλειψή της) των χαρακτηριστικών κινητικότητας μεταξύ διαφορετικών κόμβων.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες οδηγούν σε διαφορετικό σχεδιασμό του ad-hoc δικτύου και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του. Επίσης, δεδομένου ότι η κύρια χρησιμότητα ενός τέτοιου δικτύου είναι η υποστήριξη υπηρεσιών εκπομπής πακέτων εκεί όπου δεν υπάρχει σταθερή υποδομή δικτύου, πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη πρόνοια για τη συνεργασία του ad-hoc δικτύου με δίκτυα σταθερής υποδομής, εκεί όπου αυτό είναι εφικτό.

Κλείνοντας την παραπάνω παρουσίαση, συμπληρώνουμε ότι κάθε δίκτυο WMN πρέπει ανεξαρτήτως ακολουθούμενης αρχιτεκτονικής και σχεδιασμού, να διαθέτει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Υποστήριξη των ad hoc δυνατοτήτων της αυτο-οργάνωσης, αυτο-συντήρησης και δυναμικής ανάπτυξης.
- Πρόκειται για ασύρματα δίκτυα πολλαπλών βημάτων που όμως διαθέτουν μια ασύρματη υποδομή κορμού που παρέχεται από δρομολογητές πλήρους γράφου.
- Οι δρομολογητές έχουν περιορισμένη δυνατότητα κίνησης και υποστηρίζουν διαδικασίες δρομολόγησης που στόχο έχουν να μειώσουν το φορτίο των κόμβων πελατών.
- Οι τελικοί κόμβοι που δεν απαρτίζουν το δίκτυο κορμού υποστηρίζουν εύκολα κινητικότητα, λόγω της ασύρματης δομής του δικτύου.
- Οι δρομολογητές υποστηρίζουν τη διασύνδεση ετερογενών δικτύων, τόσο ασύρματων όσο και ενσύρματων.
- Οι περιορισμοί στην κατανάλωση ισχύος διαφέρουν από κόμβο πελάτη σε κόμβο δρομολογητή.
- Η λειτουργία των WMNs προϋποθέτει τη συνεργασία με άλλους τύπους ασύρματων δικτύων (π.χ. Wi Fi) προκειμένου να φτάσει η πληροφορία στους τελικούς, κινητούς ή και όχι, χρήστες.

Ως εκ τούτου, τα δίκτυα WMNs εμπλουτίζουν τις δυνατότητες των αδόμητων δικτύων και δεν αποτελούν απλά μια εξειδίκευσή τους. Βέβαια, η υποστήριξη των νέων αυτών δυνατοτήτων και υπηρεσιών προϋποθέτει την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και αλλαγών στην ήδη υπάρχουσα σχεδίαση των ασύρματων δικτύων.

Στην παρούσα διπλωματική θα αντιμετωπιστεί η αρχιτεκτονική του WMN δικτύου, εισάγοντας τη μέθοδο της πρόβλεψης για τη βελτίωση του υπάρχοντος αλγορίθμου δρομολόγησης. Παράλληλα, η χρήση του πρωτοκόλλου Wi Max, η περιγραφή του οποίου βρίσκεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί, υπόσχεται υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών, παρέχοντας αξιοπιστία στην επικοινωνία μέσω τεχνικών δυναμικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του καναλιού. Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, γίνεται παράθεση κάποιων περιοχών έρευνας και ανάπτυξης, ορισμένες από τις οποίες θα αναλυθούν διεξοδικά στη συνέχεια.

1.4 Περιοχές έρευνας και ανάπτυξης

Υπάρχουν πολλά πεδία έρευνας και ανάπτυξης στη θεωρία των δικτύων WMNs που αφορούν την επικοινωνία κάθε επιπέδου αναφοράς. Παραμένουν σημαντικά προβλήματα που εμποδίζουν την ευρεία ανάπτυξη και διάδοσή τους. Η θεωρητική χωρητικότητα του δικτύου παραμένει άγνωστη, δεδομένου ότι το μέσο διάδοσης είναι ασύρματο και κάθε φορά προστίθενται ή αφαιρούνται δυναμικά νέοι κόμβοι. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χρειάζονται βελτιώσεις σε κάθε τομέα ώστε να γίνουν πιο ευέλικτα και λειτουργικά και να εκμεταλλεύονται τις πληροφορίες και των άλλων στρωμάτων καθώς και την προβλεψιμότητα των συνθηκών στο ασύρματο μέσο διάδοσης. Παράλληλα, δεδομένης της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής του δικτύου, που περιλαμβάνει πολλούς ισότιμους κόμβους, είναι αναγκαία η εύρεση ενός νέου σχήματος διοίκησης του συνολικού δικτύου. Τέλος, ιδιαίτερη πρόνοια πρέπει να ληφθεί για το θέμα της ασφάλειας σε ένα ασύρματο μέσο διάδοσης και να υιοθετηθούν νέοι τρόποι κωδικοποίησης και πιστοποίησης της αυθεντικότητας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι παραπάνω τομείς που επιδέχονται έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη.

1.4.1 Χωρητικότητα Δικτύου

Στο θέμα της χωρητικότητας του δικτύου τα δίκτυα WMNs αντιμετωπίζονται ακριβώς όπως τα ad hoc δίκτυα. Κύριο πρόβλημα αποτελεί η αδυναμία του προσδιορισμού του μεγέθους του δικτύου, αφού κάθε τόσο το πλήθος και η πυκνότητα των κόμβων που το αποτελούν μεταβάλλεται. Η παραδοχή πάνω στην οποία μπορεί να βασιστεί μια θεωρητική προσέγγιση για τη χωρητικότητα του δικτύου είναι η εξής: Θεωρούμε ότι ο κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με κοντινούς του κόμβους και όχι απευθείας με όλους τους κόμβους της τοπολογίας. Βασιζόμενοι σε αυτήν την παραδοχή, υπάρχουν δύο τρόποι για να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Ο πρώτος αναφέρεται στην τοποθέτηση υπερκείμενων κόμβων, που λειτουργούν σύμφωνα με τη λογική των υπερκείμενων κυψελών και έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν νέα κανάλια επικοινωνίας σε μια συγκεκριμένη περιοχή κόμβων. Ο δεύτερος τρόπος είναι η ομαδοποίηση των κόμβων σε συστάδες και η αντιπροσώπευσή τους από τον αρχηγό συστάδας που αναλαμβάνει την επικοινωνία με τους πιο απομακρυσμένους κόμβους.

Έχει προταθεί ένα σχέδιο αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου, το οποίο εκμεταλλεύεται την κινητικότητα των κόμβων. Σύμφωνα με το προτεινόμενο σχέδιο, ένας κόμβος δεν μπορεί να στείλει την κίνηση που προορίζεται για κάποιο συγκεκριμένο κόμβο, παρά μόνο όταν αυτοί οι δύο κόμβοι πλησιάσουν αρκετά κοντά. Βέβαια, κάτι τέτοιο είναι κατάλληλο μόνο για υπηρεσίες δεδομένων, με ανοχή στην καθυστέρηση και όχι για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Υπάρχει παράλληλα, ο κίνδυνος για πολύ μεγάλες καθυστερήσεις καθώς και για υπερχειλίση των ενταμιευτών των κόμβων του δικτύου, όταν συσσωρευτούν πολλά πακέτα προς αποστολή.

Συνοψίζοντας, προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί θεωρητικά και με αρκετά μεγάλη ακρίβεια η ήδη υπάρχουσα χωρητικότητα. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό με αναλυτικό τρόπο και με χρήση ασυμπτωτικής ανάλυσης, μόνο για μικρό πλήθος κόμβων και με τη βεβαιότητα ότι αυτό παραμένει σταθερό. Επέκταση της θεωρίας είναι εφαρμόσιμη σε ad hoc δίκτυα και με πιθανές τροποποιήσεις είναι εφικτό να προσαρμοστεί στα δίκτυα WMNs. Επομένως, η έρευνα πάνω σε αυτόν τον τομέα θα έθετε τα θεμέλια στην προσπάθεια της μεγιστοποίησης της διέλευσης που μπορεί να επιτευχθεί, εξασφαλίζοντας παράλληλα την

καλύτερη δυνατή χρησιμοποίηση των πόρων, που σε αυτήν την περίπτωση είναι φάσμα επικοινωνιών και ισχύς μετάδοσης.

1.4.2 Βελτίωση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας

Στην παράγραφο αυτή προτείνονται πιθανές βελτιώσεις στα πρωτόκολλα που εξασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων. Η έννοια των πρωτοκόλλων και των στρωμάτων καθώς και η τεχνολογία των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων αναφέρεται και διασαφηνίζεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

- *Φυσικό Στρώμα*

Ξεκινώντας από το φυσικό στρώμα, που αφορά τη διαμόρφωση και μετάδοση των σημάτων, υπάρχουν αρκετές περιοχές που επιδέχονται έρευνα και ανάπτυξη. Τα δύο ζητούμενα που πρέπει να εξασφαλιστούν είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος και η διασφάλιση της ποιότητας στην ασύρματη επικοινωνία. Έτσι, έχει υιοθετηθεί για την ασύρματη μετάδοση η χρήση ορθογώνιας διαμόρφωσης, όπως οι OFDM (Orthogonal Frequency Multiple access) και UWB (Ultra-Wide band). Πλέον, οι παραπάνω τεχνικές πρέπει να προσαρμοστούν σε επικοινωνίες ευρείας ζώνης, γεγονός που θα μπορεί να εξασφαλίσει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές. Παράλληλα, υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης της τεχνολογίας των κεραιών. Προτείνεται η χρήση έξυπνων κεραιών που θα μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλαπλούς χρήστες και η εισαγωγή συστημάτων MIMO (Multiple Input Multiple Output) που μπορούν να διαχειριστούν πολλαπλές συνδέσεις ταυτόχρονα. Επίσης, η εισαγωγή κεραιών προσαρμοσμένων ως προς τη συχνότητα θα πετύχαινε την όσο το δυνατόν καλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος. Για να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω, πρέπει να μειωθεί το κόστος της χρήσης τέτοιας τεχνολογίας κεραιών, ώστε να γίνουν προσιτές για εμπορική χρήση.

Παράλληλα, πρέπει να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της εξασθένησης και των διαλείψεων, εισάγοντας, ήδη από το πρώτο στρώμα πρωτοκόλλων, τεχνικές αντιμετώπισης των δυσμενών συνθηκών μετάδοσης. Η υιοθέτηση πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης και κωδικοποίησης πιο αξιόπιστη

επικοινωνία καθώς οι συνθήκες μετάδοσης επιδεινώνονται. Τελικός στόχος είναι η διατήρηση μιας αποδεκτής πιθανότητας λαθών που θα επιτρέψει την ανασύνθεση της πληροφορίας κατά τη λήψη. Η παραπάνω τεχνολογία προσαρμοστικής μετάδοσης υιοθετείται από το πρότυπο WiMax και περιγράφεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

- *Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων*

Το στρώμα ζεύξης δεδομένων αφορά λειτουργίες πρόσβασης του μέσου (MAC) και σύνδεσης με τα ανώτερα στρώματα. Εκτός από επικοινωνία ενός αλλά και πολλαπλών βημάτων, τα πρωτόκολλα που λειτουργούν στο στρώμα αυτό πρέπει να εξασφαλίζουν, τη δυνατότητα αυτο-οργάνωσης του δικτύου αλλά και να παρέχουν διαχείριση της στοιχειώδους κινητικότητας. Η επικοινωνία γίνεται πάνω από ένα κανάλι ή και πάνω από περισσότερα, τα οποία ο κόμβος καλείται να τα διαχειρίζεται ταυτόχρονα. Η τροποποίηση των υπάρχοντων πρωτοκόλλων που λειτουργούν πάνω από ένα κανάλι, όπως το CSMA/CD, δεν είναι μια προτεινόμενη λύση, αφού ακόμα και αν τροποποιηθεί ο αλγόριθμος διαχείρισης της σύγκρουσης ή μεταβληθεί το διάστημα ανταγωνισμού, η διέλευση του δικτύου δεν πρόκειται να αυξηθεί επαρκώς για ευρυζωνικές επικοινωνίες. Παράλληλα, η μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος των κόμβων, από τη μια πλευρά, οδηγεί σε μείωση της κυκλοφορίας πακέτων στο δίκτυο, σε καταμερισμό του φορτίου και οικονομία στην ισχύ, από την άλλη πλευρά όμως, μειώνεται εντελώς αντίστοιχα η διακριτική ικανότητα του δέκτη που με δυσκολία μπορεί να ξεχωρίσει, αν το σήμα που λαμβάνει από απευθείας μετάδοση, αντιστοιχεί στο εκπεμπόμενο σήμα ή σε παρεμβολές άλλων κόμβων. Αυτό αντιστοιχεί στο πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού που συνδέεται άρρηκτα με τη χαμηλή ισχύ μετάδοσης.

Ένα από τα κύρια προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν και αποτελεί βασική προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάπτυξη των δικτύων WMNs είναι αυτό της επεκτασιμότητας. Στο δίκτυο πρέπει να παρέχεται η δυνατότητα της δυναμικής προσθήκης νέων κόμβων, χωρίς αυτό να υποβαθμίζει τη διατιθέμενη ποιότητα υπηρεσιών. Παράλληλα η λύση των πολλαπλών καναλιών ανά ζεύξη βελτιώνει την απόδοση του δικτύου αφού αυξάνεται η διέλευση ανά κανάλι. Έτσι, χρειάζεται ο σχεδιασμός ενός MAC πρωτοκόλλου που θα μπορεί να διαχειριστεί τα παραπάνω και θα είναι προσανατολισμένο στην αρχιτεκτονική των πολλαπλών καναλιών.

Τέλος και το ίδιο το πρωτόκολλο που θα αναπτυχθεί θα πρέπει να είναι εύκολα επεκτάσιμο, για να μπορεί να εξασφαλίσει την υποστήριξη και τη διασύνδεση του πλήθους των αναπτυσσόμενων ασύρματων τεχνολογιών, όπως είναι το WiFi και WiMax, τα οποία πρέπει να συνεργάζονται με τρόπο που να μην επηρεάζει την απόδοση και την ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου.

- *Στρώμα Δικτύου*

Το στρώμα δικτύου είναι άμεσα συνδεδεμένο με το ζήτημα της δρομολόγησης, που είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στα ad hoc δίκτυα. Χρειάζονται ευέλικτα πρωτόκολλα που μπορούν να διαχειριστούν δρομολόγηση σε ετερογενή δίκτυα, σε πολλαπλά κανάλια και από πολλαπλά μονοπάτια. Επίσης, οι κόμβοι μπορεί να είναι γεωγραφικά απομακρυσμένοι και να εκτείνονται σε μεγάλη γεωγραφική περιοχή ή να είναι ομαδοποιημένοι σε συστάδες και να πρέπει να διεξαχθεί ιεραρχική δρομολόγηση. Και σε αυτήν την περιοχή ανάπτυξης υπάρχει το πρόβλημα της επεκτασιμότητας. Το νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης που θα υλοποιηθεί πρέπει να ενσωματώνει λειτουργίες εύρεσης της θέσης του κόμβου και να βασίζει την επιλογή νέου μονοπατιού σε νέα κριτήρια που έχουν να κάνουν με την ποιότητα της ζεύξης, τα άλματα ανά πακέτο και το πλήθος των διατιθέμενων ζεύξεων ανά κανάλι. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα των κατώτερων στρωμάτων για να βοηθήσουν στην επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής για την πληροφορία.

- *Στρώμα Μεταφοράς*

Στο στρώμα μεταφοράς τελούνται λειτουργίες σχετικά με την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων. Τα πρωτόκολλα που κυριαρχούν εδώ είναι το TCP και UDP. Το TCP αναφέρεται σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που έχουν απαίτηση για αξιόπιστη μετάδοση με χρήση σύνδεσης, ενώ το UDP είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς βέλτιστης προσπάθειας που δεν μπορεί να εγγυηθεί ούτε για την ακέραια ούτε για τη χωρίς καθυστέρηση παράδοση των πακέτων. Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εξετάσει της συνθήκες ασύρματης μετάδοσης, θα γίνει αναφορά μόνο στο TCP

πρωτόκολλο και σε βελτιώσεις αυτού, που έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται για τα ad hoc δίκτυα. Η επιλογή του TCP πρωτοκόλλου για τα ασύρματα δίκτυα έχει επικρατήσει γιατί παρέχει όσο γίνεται μεγαλύτερη αξιοπιστία σε ένα αναξιόπιστο μέσο μετάδοσης όπως είναι ο αέρας.

Στο στρώμα αυτό το κύριο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η διαχείριση της απώλειας πακέτων. Το TCP που εφαρμόζεται στα ενσύρματα δίκτυα υποθέτει ότι η απώλεια δεδομένων παρουσιάζεται λόγω συμφόρησης του καναλιού από πακέτα. Όταν ανιχνευτεί συμφόρηση, ακολουθείται μια μεγάλη περίοδος παύσης των μεταδόσεων έως ότου μειωθεί το μεταδιδόμενο φορτίο. Αυτό στο ασύρματο μέσο μετάδοσης δεν ισχύει απόλυτα, αφού η απώλεια δεδομένων δεν οφείλεται αποκλειστικά στη συμφόρηση του δικτύου, αλλά και σε στην παρουσία διαλείψεων. Ως εκ τούτου, η περίοδος αναμονής είναι χωρίς ουσία. Οι νέες παραλλαγές του TCP πρωτοκόλλου είναι σχεδιασμένες ώστε να περιλαμβάνουν ενσωματωμένο έλεγχο της κατάστασης της ζεύξης και όταν αυτή είναι μη διαθέσιμη, δηλαδή βρίσκεται υπό συνθήκες διαλείψεων, το σύστημα χειρίζεται διαφορετικά τη νέα κατάσταση.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα αναπτυχθεί ο αλγόριθμος ελέγχου της κατάστασης της ζεύξης τα αποτελέσματα του οποίου θα χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη της επόμενης κατάστασης και για ειδοποίηση, στη συνέχεια, του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, ώστε αυτό να ενημερώσει εκ νέου τον πίνακα δρομολόγησης θέτοντας αυτή τη ζεύξη ως μη διαθέσιμη. Βασική επιδίωξη είναι η εξάλειψη της απώλειας που οφείλεται σε μη διαθεσιμότητα της ζεύξης.

Συνιστάται, επομένως, η χρήση των παραλλαγών του TCP πρωτοκόλλου ως το βέλτιστο σενάριο που μπορεί να υιοθετηθεί στο παρόν στρώμα. Επίσης, ερευνάται η εισαγωγή ενός προσαρμοστικού TCP πρωτοκόλλου το οποίο θα δρούσε αποτελεσματικά σε δίκτυα που συνδυάζουν πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες, όπως είναι τα δίκτυα WMNs.

- *Στρώμα Εφαρμογών*

Στο παρόν στρώμα υπάρχει σοβαρή ανάγκη προσαρμογής σημαντικού πλήθους εφαρμογών. Οι εφαρμογές μέχρι τώρα δέχονταν και αντάλλαζαν δεδομένα με μηδενική απώλεια πακέτων και ελάχιστη καθυστέρηση, η οποία είχε σχεδόν σταθερή διακύμανση. Τώρα, τα δεδομένα που θα φτάνουν στο στρώμα εφαρμογής είναι δυνατό να μην τηρούν τις παραπάνω προδιαγραφές. Έτσι νέα όρια καθυστέρησης και απώλειας πρέπει να τεθούν ώστε να μην εκλαμβάνονται τα δεδομένα ως κατεστραμμένα. Επίσης, πρέπει να εισαχθούν πρωτόκολλα διαμοιρασμού πληροφορίας τα οποία θα είναι προσανατολισμένα σε ένα WMN περιβάλλον και όχι στον παραδοσιακό τρόπο μετάδοσης μέσω Internet. Τέλος, πρέπει να αναπτυχθούν νέες εφαρμογές και υπηρεσίες που θα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με δίκτυα WMNs, γεγονός που θα βοηθήσει στην εξάπλωσή τους.

Όλα τα παραπάνω πρέπει να εφαρμόζονται τηρώντας πάντα δύο βασικές αρχές. Αρχικά, κάθε τροποποίηση που συμβαίνει σε ένα στρώμα επηρεάζει και όλα όσα έπονται αυτού, οπότε πρέπει να εξασφαλίζεται η προς τα πάνω συμβατότητα και βελτιστοποίηση. Επιπλέον, νέα στοιχεία που προκύπτουν σε κάθε στρώμα θα πρέπει να αξιοποιούνται από τα επόμενα, κάνοντας τη λειτουργία των πιο πάνω πρωτοκόλλων πιο ευέλικτη και αποδοτική. Συνήθως, τα δεδομένα που ανακύπτουν σε χαμηλότερα στρώματα αναφέρονται στα υψηλότερα. Η σχεδίαση του συστήματος βάση των δύο παραπάνω αρχών ονομάζεται *διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική* (cross-Layered Design). Με τη χρήση μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής η διακριτή δομή των στρωμάτων και κατεπέκταση των πρωτοκόλλων μπορεί να διατηρηθεί, αλλά μπορεί και όχι. Είναι δηλαδή δυνατό να προκύψουν ενοποιημένα πρωτόκολλα που αναλαμβάνουν τη διεκπεραίωση των λειτουργιών περισσότερων στρωμάτων. Στην πρώτη περίπτωση διατηρείται η διαφάνεια των λειτουργιών του κάθε στρώματος, ενώ στη δεύτερη μπορεί να προκύψει πολύ καλύτερη επίδοση μέσω της στενότερης αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρωτοκόλλων.

1.4.3 Διαχείριση Δικτύου

Ο ad hoc χαρακτήρας του WMN δικτύου επιβάλλει το συνεχή έλεγχό του και την υιοθέτηση λειτουργιών διαχείρισης τόσο των επιμέρους κόμβων όσο και του δικτύου

συνολικά. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε στιγμή είναι δυνατό να αλλάζει η τοπολογία του δικτύου, η πυκνότητα των κόμβων, η κίνηση και το φορτίο που πρέπει να εξυπηρετήσει το δίκτυο.

Αρχικά, η κινητικότητα των κόμβων, αν και μικρή λόγω της παρουσίας του δικτύου κορμού, πρέπει να ελέγχεται, αφού η πληροφορία της θέσης του κάθε κόμβου ανά πάσα στιγμή, μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση της ζεύξης και κατεπέκταση για τη δρομολόγηση της πληροφορίας. Σημειώνεται ότι η ανάπτυξη αποτελεσματικών και ευέλικτων αλγορίθμων εύρεσης της θέσης των κόμβων αποτελεί ακόμα ανοιχτό πεδίο έρευνας.

Παράλληλα, πρέπει να γίνεται συνεχής έλεγχος της ισχύος εκπομπής, αφού πιθανή αύξηση είναι δυνατόν να προκαλέσει παρεμβολές σε γειτονικούς κόμβους, ενώ μείωσή της καθιστά πολύ δύσκολο το διαχωρισμό του σήματος από τις παρεμβολές. Επίσης, στην ασύρματη μετάδοση η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος καθορίζει και τους κόμβους με τους οποίους ο πομπός μπορεί να έχει συνδεσιμότητα, ορίζοντας την τοπολογία του δικτύου. Κατεπέκταση, η σωστή διαχείριση της ισχύος περιορίζει την εμβέλεια του κάθε σταθμού στους γειτονικούς του κόμβους, ελέγχοντας ταυτόχρονα και το διακινούμενο φορτίο στο συνολικό δίκτυο. Επομένως, αναπτύσσεται ένα ακόμα πεδίο έρευνας που έχει ως στόχο την αποδοτική διαχείριση της ισχύος, διατηρώντας τη συνδεσιμότητα όλων των κόμβων, όπως ορίζεται από την επιθυμητή τοπολογία.

Τέλος, πρέπει αδιάκοπα να παρακολουθείται το δίκτυο, ώστε να συλλέγονται στατιστικά στοιχεία που αφορούν την επίδοση του δικτύου και να εντοπίζονται πιθανές ανωμαλίες. Η πληροφορία ελέγχου εμπεριέχει επίσης λειτουργίες διαχείρισης συνδέσεων και ελέγχου της τήρησης της προσυμφωνημένης ποιότητας υπηρεσιών. Υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων που θα εξασφαλίζουν τη ροή της πληροφορίας ελέγχου, χωρίς αυτή να επιβαρύνει τη λειτουργία του δικτύου, προκαλώντας τη συνεχή εκπομπή και διακίνηση πακέτων, ή να επιβαρύνει τους κόμβους με την επεξεργασία μεγάλων πακέτων που μειώνουν τη συνολική επίδοση.

1.4.4 Ασφάλεια

Κλείνοντας την παρουσίαση των δυνατοτήτων ανάπτυξης των δικτύων WMNs, γίνεται αναφορά σε ένα βασικό σχεδιαστικό παράγοντα που πρέπει να διασφαλίζεται, αυτόν της ασφάλειας της επικοινωνίας σε ένα ασύρματο περιβάλλον μετάδοσης. Στην αρχιτεκτονική που παρουσιάζουμε, αυτό είναι αρκετά δύσκολο λόγω της κατανεμημένης φύσης του δικτύου, της δυναμικής μεταβολής στην τοπολογία και της ευκολίας στην παραβίαση ενός ασύρματου καναλιού επικοινωνίας. Έτσι, το σχηματιζόμενο δίκτυο είναι ευάλωτο σε επιθέσεις που μπορούν να θέσουν το δίκτυο εκτός λειτουργίας, δηλαδή σε αδυναμία να εξυπηρετήσει τις αιτήσεις των κόμβων. Είναι δυνατό, να εισβάλλουν στο δίκτυο πακέτα που δεν τηρούν τους προβλεπόμενους από τα πρωτόκολλα κανόνες. Τέτοια πακέτα, εισβάλλοντας κατά καταγισμούς, θέτουν τον κόμβο εκτός διαθεσιμότητας, ενώ, παράλληλα, μέσω του πρωτοκόλλου δρομολόγησης μπορεί να προκαλέσουν τη συμπλήρωση των πινάκων δρομολόγησης με ψευδή στοιχεία, γεγονός που σύντομα θα πλήξει το δίκτυο. Για την αντιμετώπιση των επιθέσεων είναι ανάγκη να διασφαλισθούν η αυθεντικότητα και η εξουσιοδότηση. Υπό τον όρο αυθεντικότητα αναφερόμαστε στην πιστοποίηση ότι η πληροφορία που αποστέλλεται είναι από κόμβο-πηγή του δικτύου και όχι από κάποιον εισβολέα. Έτσι, αποφεύγονται εσκεμμένες επιθέσεις με πακέτα που μπορούν να παραπλανήσουν ή να αποσυγχρονίσουν το δίκτυο. Με την έννοια της εξουσιοδότησης, αναφερόμαστε στα συγκεκριμένα δικαιώματα πρόσβασης που έχει κάθε κόμβος. Τα δικαιώματα αυτά αφορούν πλήθος ενεργειών, όπως η ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας, η πρόσβαση σε συγκεκριμένο είδος δεδομένων, ή το δικαίωμα διαχείρισης κάποιων παραμέτρων του συνολικού συστήματος.

Σε μεγάλα συστήματα του διαδικτύου, για την πιστοποίηση της αυθεντικότητας διαμοιράζεται ένα συγκεκριμένο κλειδί από μια κοινώς αποδεκτή τράπεζα κλειδιών. Στην περίπτωση αυτή, η εισβολή κάποιου τρίτου μέρους δεν είναι εφικτή λόγω της κατανεμημένης και επεκτάσιμης δομής του δικτύου. Έτσι, δεν υπάρχει κεντρική εξουσία που να αναλαμβάνει τη διαμοίραση κλειδιών ασφαλείας και κάτι τέτοιο πρέπει να εφαρμοστεί με κατανεμημένο τρόπο, αναπτύσσοντας ένα νέο αλγόριθμο κατανεμημένου ελέγχου για τα δίκτυα WMNs. Για την περαιτέρω διασφάλιση της ασφάλειας, το MAC στρώμα έχει εμπλουτιστεί με λειτουργίες διασφάλισης της αυθεντικότητας κατά την πραγματοποίηση μιας σύνδεσης.

Κεφάλαιο 2: Τεχνική περιγραφή του πρωτοκόλλου 802.16a

Στην αρχή του κεφαλαίου, αποσαφηνίζεται η έννοια της διαστρωματωμένης αρχιτεκτονικής, της υποστρωμάτωσης και των πρωτοκόλλων καθώς και πως αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους. Στη συνέχεια, ακολουθεί η γενική περιγραφή του 802.16 πρωτοκόλλου και αναλύεται πώς αυτό ορίζει τη λειτουργία των δύο κατώτερων στρωμάτων του OSI, του υποστρώματος MAC και του φυσικού στρώματος.

2.1 Το μοντέλο αναφοράς του OSI και η έννοια της υποστρωμάτωσης

Αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων είναι τόσο το υλικό τους, όσο και το λογισμικό τους. Αρχικά, ένα δίκτυο απαρτίζεται από τα ποικίλα συστατικά του μέρη τα οποία πρέπει με κάποιον τρόπο να συγχρονιστούν και να επικοινωνήσουν αξιοποιώντας αποτελεσματικά τους διαθέσιμους και πάντοτε περιορισμένους πόρους του δικτύου. Αυτό γίνεται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού στο οποίο περιέχονται όλοι οι κανόνες και οι συμβάσεις που επιτρέπουν την επιτυχή επικοινωνία των συστημάτων. Οι παραπάνω κανόνες συναποτελούν ένα *πρωτόκολλο*.

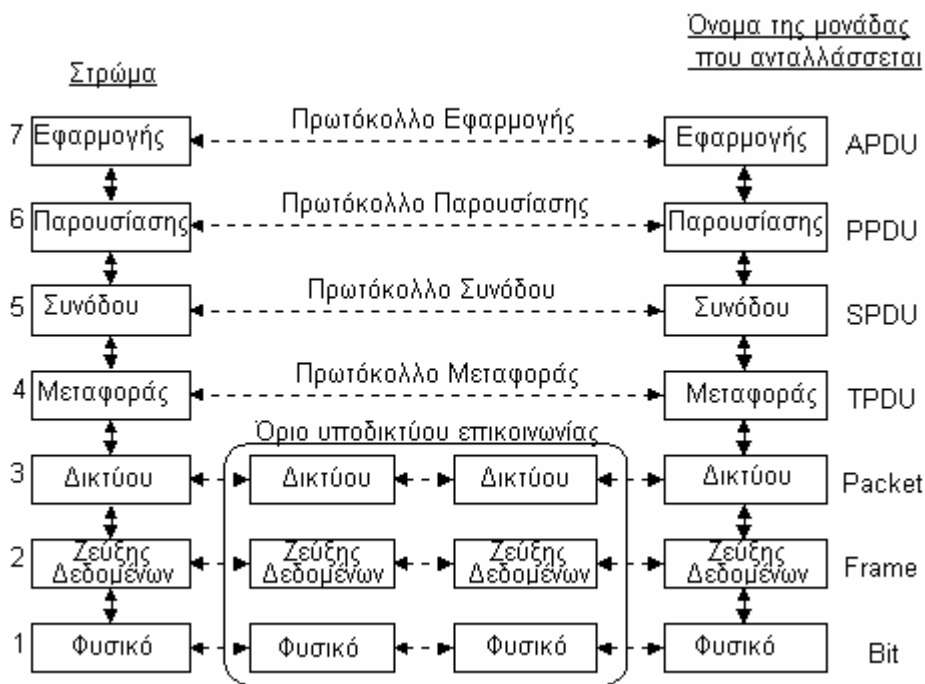
Η μετάδοση της πληροφορίας μέσω ακόμα και του πιο απλού δικτύου, ακολουθεί κάποιες σαφώς καθορισμένες φάσεις. Στέλνοντας κάποιο e-mail στον υπολογιστή του από πάνω ορόφου με τον οποίο συνδεόμαστε αποτελώντας ένα τοπικό δίκτυο, η πληροφορία θα ξεκινήσει από την εφαρμογή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου του υπολογιστή μας, θα οργανωθεί σε μικρά επιμέρους πακέτα προς αποστολή, για να καταλήξει σε ένα συρμό από ψηφία που μεταδίδονται μέσω του καλωδίου. Η αντίστροφη διαδικασία θα πραγματοποιηθεί από την πλευρά του παραλήπτη. Αν ενδιάμεσως παρεμβαλλόταν και ένας δρομολογητής, τότε, πριν μετατραπεί η ακολουθία πακέτων σε ψηφία, πρέπει να αποφασιστεί σε ποια έξοδο του δρομολογητή θα προωθηθούν τα πακέτα.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι ανεξαρτήτως τοπολογίας, μέσου διάδοσης και μεγέθους δικτύου, ακολουθούνται σαφώς καθορισμένες λειτουργίες για την επίτευξη της επικοινωνίας των διαφόρων συστημάτων. Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα της

σχεδίασης των δικτύων, έχει εισαχθεί η έννοια των *στρωμάτων* (layers) και των *επιπέδων* (planes).

Κάθε στρώμα προσφέρει συγκεκριμένες υπηρεσίες στα ανώτερα στρώματα, απομονώνοντάς τα έτσι από τις λεπτομέρειες υλοποίησης των προσφερόμενων υπηρεσιών. Το σημείο μέσω του οποίου ανταλλάσσονται πληροφορίες μεταξύ των N και N+1 διαδοχικών στρωμάτων ονομάζεται N-Σημείο Πρόσβασης Υπηρεσιών (N-Service Access Point ή N-SAP). Οι μονάδες πληροφορίας που ανταλλάσσονται μέσω των N-SAP ονομάζονται Μονάδες Πληροφορίας Πρωτοκόλλου (N-Protocol Data Unit, N-PDU). Μια N-PDU χωρίζεται σε δύο πεδία. Το πρώτο είναι η Μονάδα Πληροφορίας Υπηρεσίας (N-Service Data Unit, N-SDU) η οποία περιέχει την πληροφορία όπως έχει φτάσει από τα ανώτερα επίπεδα. Το δεύτερο πεδίο είναι η Πληροφορία Ελέγχου Πρωτοκόλλου (N-Protocol Control Information, N-PCI) η οποία αποτελεί την επικεφαλίδα που έχει προσθέσει το πρωτόκολλο του N-στρώματος και απευθύνεται στο αντίστοιχο N-στρώμα από την πλευρά του δέκτη, περιέχοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την επεξεργασία των δεδομένων από το αντίστοιχο στρώμα. Μια λίστα πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται από ένα σύστημα, με ένα ή περισσότερα πρωτόκολλα ανά στρώμα, αποκαλείται *στοίβα πρωτοκόλλων*.

Ένα τυπικό παράδειγμα διαστρωματωμένου δικτύου είναι το *Βασικό Πρότυπο Αναφοράς της Διασύνδεσης Ανοιχτού Συστήματος* (Open System Interconnection- OSI). Το μοντέλο OSI αποτελείται από επτά στρώματα κάθε ένα από τα οποία έχει ένα συγκεκριμένο σύνολο λειτουργιών. Κάτω από το χαμηλότερο στρώμα (στρώμα1) βρίσκεται το φυσικό μέσο διάδοσης. Εσωτερικά του υποδικτύου, στους ενδιάμεσους κόμβους, υλοποιούνται τα τρία κατώτερα στρώματα της ιεραρχίας ενώ στους τελικούς κόμβους, δηλαδή στα τερματικά των χρηστών, υλοποιούνται και τα επτά στρώματα. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να είναι δρομολογητές ή μεταγωγείς. Στην τελευταία περίπτωση, το στρώμα δικτύου δεν υλοποιείται αφού δεν παίρνεται καμία απόφαση δρομολόγησης, η οποία είναι η κύρια λειτουργία του στρώματος δικτύου.



Σχήμα 2.1.1. Το μοντέλο αναφοράς OSI

Καθώς αυξάνει η πολυπλοκότητα του δικτύου, αυξάνει και το πλήθος των λειτουργιών που υποστηρίζει κάθε στρώμα. Δεδομένου όμως, ότι οι λειτουργίες που προσφέρονται από τα SAP πρέπει να παραμένουν αναλλοίωτες εισάγεται η έννοια της υποστρωμάτωσης. Πρόκειται για τον οριζόντιο διαχωρισμό ενός στρώματος σε υποστρώματα τα οποία επιτελούν διαφορετικές αλλά αλληλεξαρτώμενες λειτουργίες. Παράλληλα, στον κόσμο των δικτύων εισάγονται ολοένα και περισσότερες νέες υπηρεσίες. Επομένως, το σύνολο των προσφερόμενων υπηρεσιών δεν είναι πλέον ενιαίο για κάθε σύνδεση αλλά εξαρτάται από τις διαφορετικές απαιτήσεις των χρηστών. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα κάθετο διαχωρισμό του στρώματος, στην άκρη του οποίου τοποθετούνται τόσα διαφορετικά SAP όσες είναι και οι προσφερόμενες από το δίκτυο υπηρεσίες.

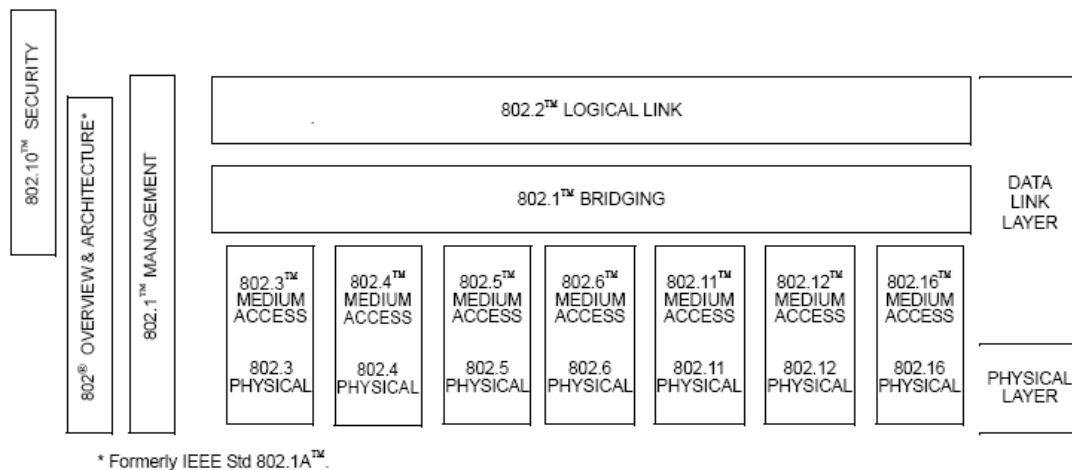
Μια άλλη βασική επέκταση είναι η εισαγωγή επιπέδων (planes). Αναφέρεται σε τεχνολογίες που χρησιμοποιούν εκτός ζώνης σηματοδότηση, όπως η B-ISDN και πρόκειται για έναν κάθετο διαχωρισμό της διαστρωματωμένης δομής πρωτοκόλλων. Κάθε επίπεδο φιλοξενεί χωριστά πρωτόκολλα ή στοίβες πρωτοκόλλων. Η σηματοδότηση εκτός ζώνης σημαίνει ότι η πληροφορία μεταφέρεται ξεχωριστά από το σήμα βασικής ζώνης που περιέχει την πληροφορία του χρήστη. Διακρίνουμε επομένως το επίπεδο του

χρήστη (User Plane), στο οποίο μεταφέρονται τα δεδομένα προς αποστολή και το επίπεδο ελέγχου (Control Plane), όπου μεταφέρεται η πληροφορία ελέγχου και σηματοδότησης. Επιπροσθέτως, υπάρχει ένα ακόμα επίπεδο, το επίπεδο διαχείρισης (Management Plane), για τη μεταφορά της πληροφορίας διαχείρισης.

Παραπάνω τέθηκαν οι βασικές αρχές της διαστρωματωμένης λογικής που ακολουθείται κατά τη σχεδίαση των συστημάτων. Ακολουθεί η παρουσίαση της οικογένειας πρωτοκόλλων IEEE Std 802.

2.2 Σειρά Προτύπων IEEE Std 802

Πρόκειται για μια οικογένεια πρωτοκόλλων που αφορά τους κανόνες που διέπουν το φυσικό στρώμα και το στρώμα ζεύξης δεδομένων. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου και το υπάρχον μέσο μετάδοσης υπάρχουν ανάλογα πρωτόκολλα που καθορίζουν τόσο τη διάδοση και μεταφορά των δυαδικών ψηφίων στο μέσο, όσο και τους κανόνες πρόσβασης του μέσου. Πρόκειται, επομένως, για μια οικογένεια πρωτοκόλλων άμεσα συνδεδεμένη με τη χρησιμοποιούμενο μέσο μετάδοσης.



Σχήμα 2.2.1 Αντιστοιχία στρωμάτων OSI και πρωτοκόλλων IEEE 802

Το στρώμα ζεύξης δεδομένων αποτελείται από δύο υποστρώματα. Αυτά είναι το υπόστρωμα Ελέγχου Πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης (Medium Access Control – MAC) και το υπόστρωμα Ελέγχου Λογικής Σύνδεσης (Logical Link Control – LLC). Αυτό που

ενδιαφέρει να μελετηθεί είναι το υπόστρωμα MAC αφού έχει διαφορετική υλοποίηση για κάθε φυσικό μέσο διάδοσης και διαφορετική υλοποίηση οδηγεί σε διαφορετικό πρωτόκολλο.

Στην περίπτωση που εξετάζεται η ασύρματη μετάδοση, μέσο διάδοσης είναι ο αέρας. Τα πρωτόκολλα που αναλαμβάνουν να τροποποιήσουν κατάλληλα το στρώμα ζεύξης δεδομένων ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί με τις εξειδικευμένες απαιτήσεις της ασύρματης μετάδοσης, είναι τα IEEE 802.11, 802.15 και 802.16. Για υπηρεσίες ευρείας ζώνης με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, το μόνο κατάλληλο πρωτόκολλο ασύρματης μετάδοσης είναι το 802.16. Τα άλλα δύο αναφέρονται σε τοπικά δίκτυα (802.11 ή Wi-Fi) όπου η οπτική επαφή είναι αναγκαία και σε προσωπικές επικοινωνίες (802.15).

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου IEEE 802.16

2.3.1 Ορισμός και βασικές εξειδικεύσεις του προτύπου

Το πρότυπο αυτό υιοθετήθηκε από την IEEE το 2003 και είναι γνωστό και σαν WiMAX ή και «Wireless Man». Περιέχει όλες τις απαιτούμενες εξειδικεύσεις του φυσικού στρώματος καθώς και τον εμπλουτισμό του υποστρώματος MAC, ώστε να εξασφαλισθεί η ασύρματη πρόσβαση ευρυζωνικών υπηρεσιών. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες εξαρτώνται από το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας που εκτείνεται από 2GHz έως 66GHz. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα τοπικά δίκτυα, έτσι και το 802.16 καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις.

Στην αρχική του έκδοση, το πρότυπο IEEE 802.16 λειτουργούσε στη ζώνη συχνοτήτων 10-66GHz. Στις παραπάνω συχνότητες, η επικοινωνία μεταξύ δύο σταθμών επιτυγχάνεται μόνο όταν οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε συνθήκες οπτικής επαφής. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο υποπρότυπο IEEE 802.16c. Η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ σταθμών που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή ήταν το κίνητρο για τη δημιουργία του υποπρωτύπου IEEE 802.16a. Τον Ιανουάριο του 2003, το πρότυπο επεκτάθηκε ώστε να λειτουργεί και στις συχνότητες από 2-11GHz, όπου το μήκος

κύματος είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία συνδέσεων χωρίς οπτική επαφή πομπού - δέκτη. Το υποπρότυπο το οποίο περιγράφει τη διαδικασία αυτή ονομάστηκε IEEE 802.16a. Τα πρώτα προϊόντα WiMAX που σήμερα είναι διαθέσιμα στην αγορά ακολουθούν στη μεγαλύτερή τους πλειοψηφία το υποπρότυπο αυτό.

Καθώς η πολυπλοκότητα των εφαρμογών που πραγματοποιούνται πάνω από ασύρματα δίκτυα ολοένα και αυξάνει, η αντίστοιχη ποιότητα υπηρεσιών γίνεται καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η μετάδοση video σε πραγματικό χρόνο απαιτεί από το δίκτυο συνθήκες πολύ χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης. Παράλληλα, η πολύοδη διάδοση επιτάσσει τον έλεγχο της εκπεμπόμενης ισχύος, για περιορισμό των παρεμβολών και μηχανισμούς διατήρησης της σειράς των πακέτων που καταφθάνουν από διαφορετικές οδεύσεις. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ποιότητα υπηρεσίας ορίστηκε το υποπρότυπο IEEE 802.16d.

Η ένωση των υποπροτύπων IEEE 802.11a,c,d όρισε το πρότυπο IEEE 802.16-2004 το οποίο περιγράφει τη συνολική λειτουργικότητα των επιμέρους υποπροτύπων που προαναφέρθηκαν για συχνότητες λειτουργίας 2-66GHz, ενώ διασφαλίζει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 63Mbps στην κάτω ζώνη και 28Mbps στην άνω, για κάθε κανάλι εύρους 10MHz.

Το πρότυπο IEEE 802.26-2004 ορίζει την επικοινωνία χρηστών οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε μια κυψέλη η οποία καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης . Όταν κάποιος χρήστης κινηθεί σε περιοχή που βρίσκεται εκτός περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης, η σύνδεση χάνεται. Το υποπρότυπο IEEE 802.16 e εισάγει και περιγράφει την έννοια της κινητικότητας των χρηστών από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο. Στο υποπρότυπο αυτό ορίζεται ότι ένας κινητός χρήστης μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμα και όταν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα 120Km/h . Ωστόσο, η παραπάνω τιμή είναι ενδεικτική - πειραματική καθώς μέχρι τη στιγμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο διαθέσιμο προϊόν στην αγορά συμβατό με το IEEE 802.16e υποπρότυπο που να πιστοποιεί την προαναφερθείσα τιμή.

2.3.2 Σύγκριση προτύπων 802.16 και 802.11

Πρόκειται για δύο πρωτόκολλα που απευθύνονται σε διαφορετικές εφαρμογές. Εφαρμόζονται πάνω σε κοινό μέσο μετάδοσης, τον αέρα, καλύπτοντας, όμως, διαφορετική γεωγραφική έκταση το καθένα. Το 802.16 είναι το “Wireless MAN” πρωτόκολλο, που προσφέρει κάλυψη σε μεγαλύτερες αποστάσεις έναντι του 802.11 “Wireless LAN”. Αυτό οφείλεται τόσο στη ζώνη συχνοτήτων που έχει διατεθεί στο 802.16 όσο και στους περιορισμούς εκπεμπόμενης ισχύος που ακολουθούνται.

Στο φυσικό στρώμα, δεδομένου του κοινού μέσου μετάδοσης ακολουθούνται παρεμφερείς OFDM διαμορφώσεις, γεγονός που δεν ισχύει στο στρώμα MAC. Εδώ η προσέγγιση των δύο πρωτοκόλλων είναι τελείως διαφορετική, αφού το 802.16 ακολουθεί το σύστημα του κεντρικού ελέγχου με πληροφορία οργανωμένη σε πλαίσια, ενώ το 802.11 έχει καταναμημένο έλεγχο και περιόδους ανταγωνισμού για τον έλεγχο του φυσικού μέσου μετάδοσης. Ως εκ τούτου, στο WiMax ακολουθείται η μέθοδος πολλαπλής προσπέλασης TDMA, όπου υπάρχει κεντρικός έλεγχος για το ποιος θα ελέγχει κάθε φορά το μέσο, σε αντίθεση με το 802.11, όπου ακολουθείται η καταναμημένου ελέγχου μέθοδος πολλαπλής προσπέλασης CDMA. Πρακτικά, η κεντρικά ελεγχόμενη μέθοδος πρόσβασης του WiMax καταλήγει ουσιαστικά στην αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν. Αυτό συμβαίνει διότι το σχήμα πολλαπλής προσπέλασης TDMA μπορεί να εξυπηρετήσει όσους χρήστες αιτούν εξυπηρέτηση προσαρμόζοντας ανάλογα το χρόνο που διαθέτει στον κάθε χρήστη, δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης. Μια τέτοια ευελιξία δεν μπορεί να δοθεί σε ένα καταναμημένου ελέγχου σύστημα όπως το CDMA, αφού όλοι χρήστες εξυπηρετούνται ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας μέρος του διατιθέμενου εύρους μετάδοσης. Επομένως, η χωρητικότητα του μέσου θέτει ένα σοβαρό περιορισμό που δεν μπορεί να υπερνικηθεί.

Τέλος, σχετικά με την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service – QoS), η υπεροχή του 802.16 είναι σαφής. Στο WiMax υπάρχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας πολυμέσων, τη στιγμή που κάτι τέτοιο απουσιάζει από τις περισσότερες εξειδικεύσεις του 802.11 και παρουσιάζεται μόνο στο 802.11e με τη μορφή των κλάσεων υπηρεσιών.

2.3.3 Βασικά Χαρακτηριστικά του IEEE 802.16a

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής, θα εστιάσουμε στο υποπρότυπο 802.16a, το οποίο είναι το κατάλληλο και το πλέον διαδεδομένο από την οικογένεια προτύπων 802.16. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του προτύπου 802.16a είναι η δυνατότητα υποστήριξης ζεύξεων σημείου προς πολλαπλά σημεία (point – to – multipoint) καθώς και τοπολογιών πλήρους γράφου (Mesh Topologies). Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική δικτύου κατά την οποία ένα σύστημα μπορεί να προωθεί την κίνηση από και προς πολλαπλά σημεία, ώστε όλοι να επικοινωνούν με όλους. Βέβαια, δεν αποκλείεται και η χρήση του για point to point συνδέσεις.

Η διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιείται ονομάζεται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Πρόκειται για μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά το φαινόμενο της πολυόδης διάδοσης ειδικότερα στις συχνότητες πάνω των 2GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ως και 72Mbps στον αέρα ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet υπολογίζεται στα 50Mbps. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16 σε σχέση με το IEEE 802.11 είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής, με ρυθμούς μετάδοσης, όμως, πολύ χαμηλότερους των 50Mbps.

Λόγω των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει και ταυτόχρονα των υψηλών ρυθμών μετάδοσης που μπορεί να παρέχει, το πρότυπο WiMAX βρίσκει πολλές εφαρμογές, λύνοντας σημαντικά προβλήματα που απασχολούσαν του τεχνικούς δικτύων μέχρι σήμερα. Τρεις είναι οι βασικότερες εφαρμογές του:

- **Δίκτυο κορμού στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας.** Η εισαγωγή του προτύπου αυτού αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας αφού αποτελεί μια οικονομικότερη πρόταση για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας συγκρινόμενο με την οπτική ίνα,. Εξασφαλίζει ταυτόχρονα αξιοπιστία και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

- **Broadband on Demand.** Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου κάτι που με το πρότυπο IEEE 802.11 σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό.
- **Παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο να καλυφθούν με χρήση χαλκού ή οπτικής ίνας.** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπλήρωμα δικτύων οπτικών ινών σε περιοχές όπου το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων οπτικών ινών είναι απαγορευτικό.

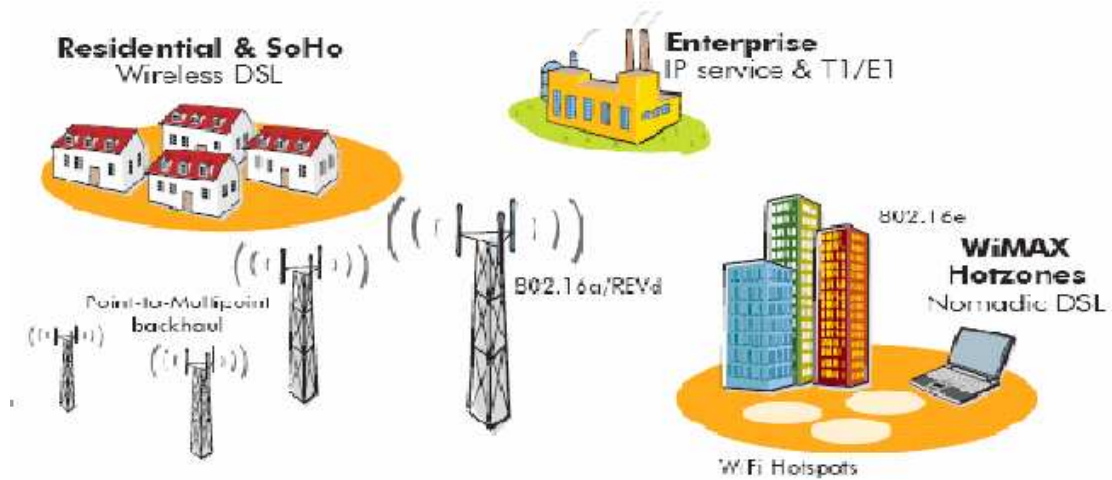
Το πρότυπο IEEE 802.16 παρέχει υψηλού επιπέδου ποιότητα υπηρεσίας. Το επίπεδο MAC του προτύπου είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει στους χρήστες, όταν οι ίδιοι το επιθυμούν, εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης και ταυτόχρονα μετάδοση βέλτιστης προσπάθειας σε χρήστες που καλύπτονται από τον ίδιο σταθμό βάσης κάτι που το πρότυπο IEEE 802.11 δεν μπορούσε να εξασφαλίσει. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι δύο χρήστες καλύπτονται από τον ίδιο σταθμό βάσης, είναι δυνατό ο ένας χρήστης να έχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και ο δεύτερος χρήστης να δέχεται και να στέλνει απλή IP κίνηση βέλτιστης προσπάθειας κάτι που με το πρότυπο 802.11 δεν ήταν δυνατό. Δηλαδή, χρήστες που βρίσκονταν στην κάλυψη ενός Σημείου Πρόσβασης είχαν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.

2.3.4 Αρχιτεκτονική Δικτύου WiMax

Το δίκτυο WiMax αποτελείται από τους Κεντρικούς Σταθμούς Βάσης (Central Base Station – BS), που είναι και ο πάροχος της υπηρεσίας και από τους σταθμούς συνδρομητές (Subscribers Stations – SS). Οι συνδρομητές μπορεί να είναι οικιακοί χρήστες, μικρές ή μεγαλύτερες επιχειρήσεις, ιδιωτικά ή δημόσιας ασφάλειας δίκτυα, υπηρεσίες T1/E1 για εταιρική χρήση καθώς και κυψελωτά δίκτυα που χρησιμοποιούν το δίκτυο WiMax για ασύρματη υποστήριξη.

Οι συνδέσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ των σταθμών είναι σημείου προς πολλαπλά σημεία (PMP), ενώ υποστηρίζεται και η δομή πλήρους γράφου (Mesh deployment). Επίσης, μπορεί να υπάρχουν συνδέσεις οπτικής επαφής (Line-of-sight links) ή και όχι,

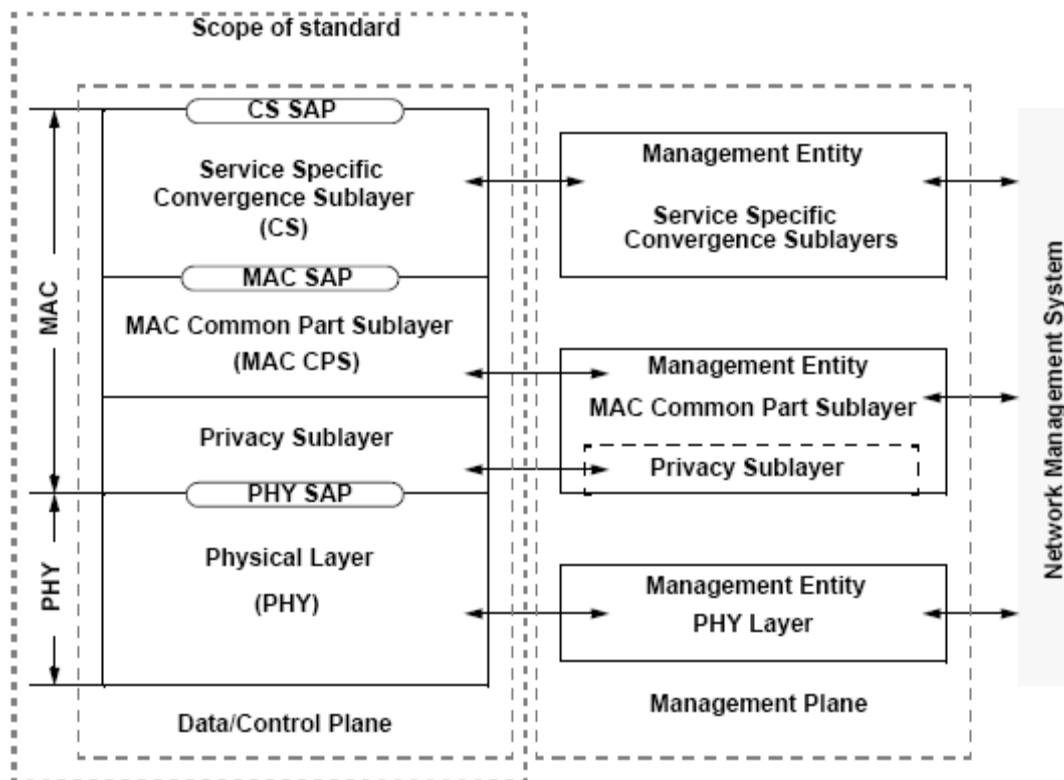
όταν χρησιμοποιείται η εξειδίκευση 802.16a που υποστηρίζει χαμηλότερες συχνότητες με μεγαλύτερο μήκος κύματος.



Σχήμα 2.3.4.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου WiMax

2.3.5 Διαστρωμάτωση

Κλείνοντας τη βασική παρουσίαση του προτύπου 802.16, τίθενται τα επιμέρους στρώματα πάνω στα οποία επιδρά το πρωτόκολλο. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τόσο τα επίπεδα χρήστη και ελέγχου, όσο και το επίπεδο διαχείρισης. Επίσης, φαίνονται και τα σημεία πρόσβασης υπηρεσιών τα οποία υποδηλώνουν τη σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ των στρωμάτων.



Σχήμα 2.3.2.1 Διαστρωμάτωση πρωτοκόλλου IEEE 802.16

Το στρώμα ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC) περιέχει τρία υποστρώματα. Το υπόστρωμα σύγκλισης εξαρτώμενο από την υπηρεσία (Service Specific Convergence Sublayer – CS) αναλαμβάνει να χειριστεί τα πρωτόκολλα ανώτερου επιπέδου. Μετατρέπει όλα τα εξωτερικά δεδομένα δικτύου που λαμβάνονται μέσω του CS service access point (SAR), σε MAC SDUs που λαμβάνονται από το υπόστρωμα κοινού μέσου (MAC Common Part Sublayer - MAC CPS). Αυτό περιλαμβάνει την ταξινόμηση σε κλάσεις των μονάδων Δεδομένων Υπηρεσίας (Service Data Units SDUs) και τη συσχέτισή τους με το αντίστοιχο Αναγνωριστικό Σύνδεσης Connection Identifier CID) και ροή υπηρεσίας (service flow). Παρέχονται τόσες εξειδικεύσεις του υποστρώματος CS, όσα είναι και τα διάφορα πρωτόκολλα με τα οποία πρέπει να προσαρμοστεί μέσω των διεπαφών.

Το MAC CPS παρέχει τις λειτουργίες πυρήνα του MAC υποστρώματος οι οποίες είναι: πρόσβαση στο σύστημα, εξασφάλιση απαιτούμενου εύρους ζώνης, εγκατάσταση, διαχείριση και διατήρηση συνδέσεων. Επιπλέον, λαμβάνει δεδομένα από τα διάφορα

υποστρώματα CSs μέσω των MAC SAP τα οποία είναι ομαδοποιημένα στις αντίστοιχες συνδέσεις.

Υπηρεσίες εξασφάλισης της απαιτούμενης ποιότητας (Quality of Service – QoS) εφαρμόζονται κατά τη μετάδοση των δεδομένων πάνω από το φυσικό στρώμα. Επιπλέον μηχανισμοί ασφαλείας παρέχονται και από το MAC υπόστρωμα στο ξεχωριστό υπόστρωμα *Εξασφάλισης Απορρήτου* (Privacy Sublayer). Το υπόστρωμα αυτό παρέχει λειτουργίες όπως εξασφάλιση αυθεντικότητας, ασφαλή ανταλλαγή μυστικού κλειδιού και κρυπτογράφηση.

Στο φυσικό στρώμα (Physical Layer – PHY) εισέρχονται από το ανώτερο υπόστρωμα MAC CPS, μέσω των PHY SAP, δεδομένα χρήστη, δεδομένα ελέγχου του φυσικού στρώματος καθώς και στατιστικά του συστήματος. Και στο φυσικό στρώμα συναντούμε εξειδικεύσεις ανάλογα με την εφαρμογή και τη χρησιμοποιούμενη ζώνη συχνοτήτων.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται με αρκετή λεπτομέρεια η λειτουργία η λειτουργία του MAC υποστρώματος και του φυσικού στρώματος, όπως αυτή καθορίζεται από τους κανόνες που επιβάλλει το πρότυπο IEEE 802.16 a.

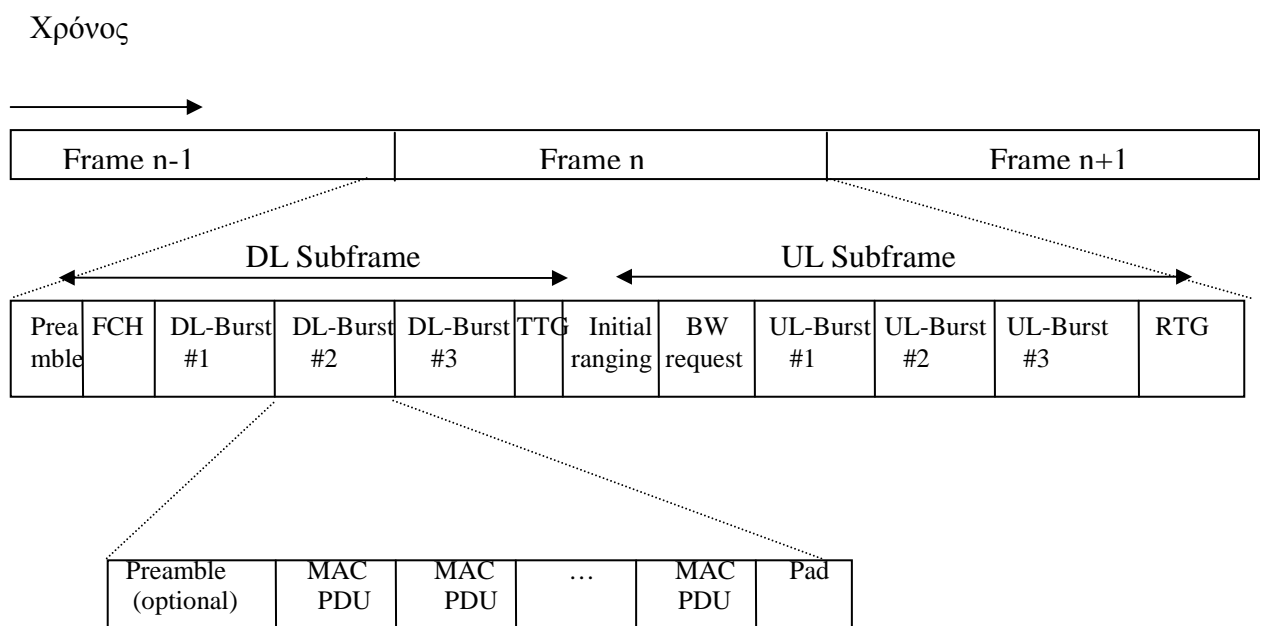
2.4 Υπόστρωμα MAC

2.4.1 Δομή πλαισίου

Στην ανάλυση που ακολουθεί υποθέτουμε ότι έχουμε διαμόρφωση φυσικού στρώματος OFDM και αμφίδρομη διαίρεση χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η άνω και η κάτω ζεύξη είναι χρονικά πολυπλεγμένες στο ίδιο κανάλι εξασφαλίζοντας έτσι χαμηλό κόστος και αποδοτικότερη χρήση της διατιθέμενης ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε να διατηρήσουμε ένα μόνο κύκλωμα αποδιαμόρφωσης και όχι ένα για κάθε ζεύξη. Η έννοια της αμφίδρομης ροής αναφέρεται στην ύπαρξη εντός κάθε μονάδας πληροφορίας, δεδομένων τόσο από την άνω όσο και από την κάτω ζεύξη. Η πολυπλεγμένη, όμως, ροή των δεδομένων από τις δύο ζεύξεις εισάγει συνθετότερες λειτουργίες MAC στρώματος,

αφού η επίτευξη και διατήρηση συγχρονισμού, κρίνεται αναγκαία σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης.

Το MAC υπόστρωμα στέλνει προς το φυσικό στρώμα ένα πλαίσιο το οποίο προκύπτει προσθέτοντας τις απαραίτητες επικεφαλίδες στις μονάδες πληροφορίας του MAC υποστρώματος (MAC PDUs). Στις επικεφαλίδες αυτές περιέχεται όλη η απαιτούμενη πληροφορία που χρειάζεται το αντίστοιχο στρώμα στο δέκτη για να κάνει ανασύνθεση της αρχικής πληροφορίας. Η δομή του πλαισίου MAC που στέλνεται προς το φυσικό στρώμα εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

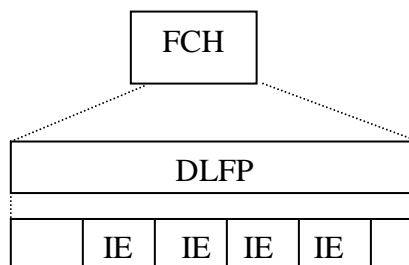


Σχήμα 2.4.1.1 Δομή πλαισίου MAC

Από το παραπάνω σχήμα, προκύπτει ότι τα υποπλαίσια της άνω και της κάτω ζεύξης είναι διαχωρισμένα από τα πεδία TTG και RTG (transmit / receive transition gap), τα οποία συναντούνται στην αμφίδρομη διαίρεση χρόνου και εκφράζουν το κενό μετάδοσης κατά την εκπομπή και τη λήψη αντίστοιχα (πολύπλεξη στο πεδίο του χρόνου). Τα παραπάνω πεδία απουσιάζουν κατά την αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας, όπου τα δεδομένα της άνω και της κάτω ζεύξης μεταφέρονται σε διαφορετικές συχνότητες (πολύπλεξη στο πεδίο της συχνότητας).

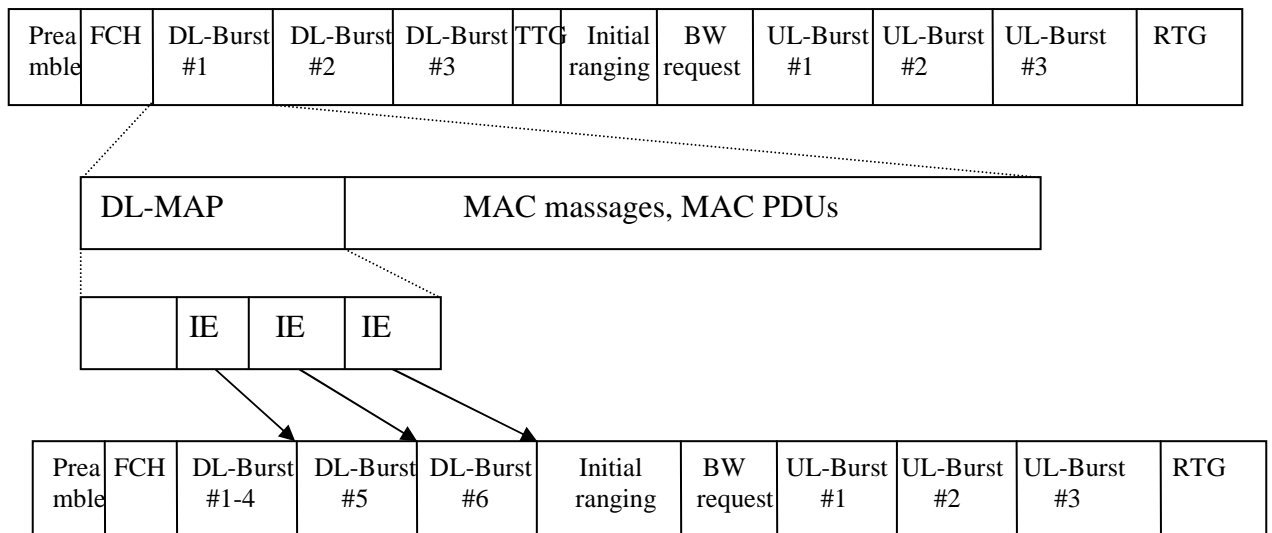
Το μέγεθος των δύο υποπλασίων είναι μεταβλητό αφού εξαρτάται κάθε φορά από το μέγεθος της προς μετάδοση πληροφορίας. Σημειώνεται, ότι το κανάλι είναι ασύμμετρο, δηλαδή η κάτω ζεύξη χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού από την άνω ζεύξη, αφού περιέχει τις πληροφορίες από τον κεντρικό σταθμό βάσης προς τους συνδρομητές. Παίζει δηλαδή το ρόλο του εξυπηρετητή.

Ξεκινώντας την ανάλυση των στοιχείων του πλαισίου συναντάται το πεδίο Preamble (Εισαγωγικό πεδίο). Το πεδίο αυτό της επικεφαλίδας χρησιμοποιείται αποκλειστικά για λόγους συγχρονισμού του φυσικού στρώματος. Έχει μήκος δύο συμβόλων και βοηθά στο συγχρονισμό της φάσης και της επικεφαλίδας. Στη συνέχεια, το πεδίο Frame Control Header (FCH) αποτελεί την επικεφαλίδα ελέγχου του πλαισίου και περιέχει τον ενδείκτη πλαισίου κάτω ζεύξης (DL frame prefix – DLFP) ο οποίος ορίζει μέχρι και τέσσερις καταγισμούς κάτω ζεύξης. Το DLFP έχει μήκος ενός συμβόλου. Περιλαμβάνει τέσσερα Στοιχεία Πληροφορίας (Information Elements, IEs) κάθε ένα από τα οποία ορίζει ένα DL-Burst. Η σημασία των DL-Burst θα αναλυθεί στη συνέχεια. Τα πεδία IE περιλαμβάνουν πληροφορίες για το μήκος και το προφίλ της έκρηξης καθώς και ένα προαιρετικό Preamble για συγχρονισμό.



Σχήμα 2.4.1.2 Πεδίο FCH επικεφαλίδας

Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες εκρήξεις κάτω ζεύξης, αυτές ορίζονται από ένα DL-MAP που ακολουθεί το πεδίο FCH. Ο DL-MAP περιλαμβάνει τους δείκτες IE που δείχνουν στα DL-Bursts που υπολείπονται, τα οποία είναι τοποθετημένα σε κάποιο επόμενο πλαίσιο.

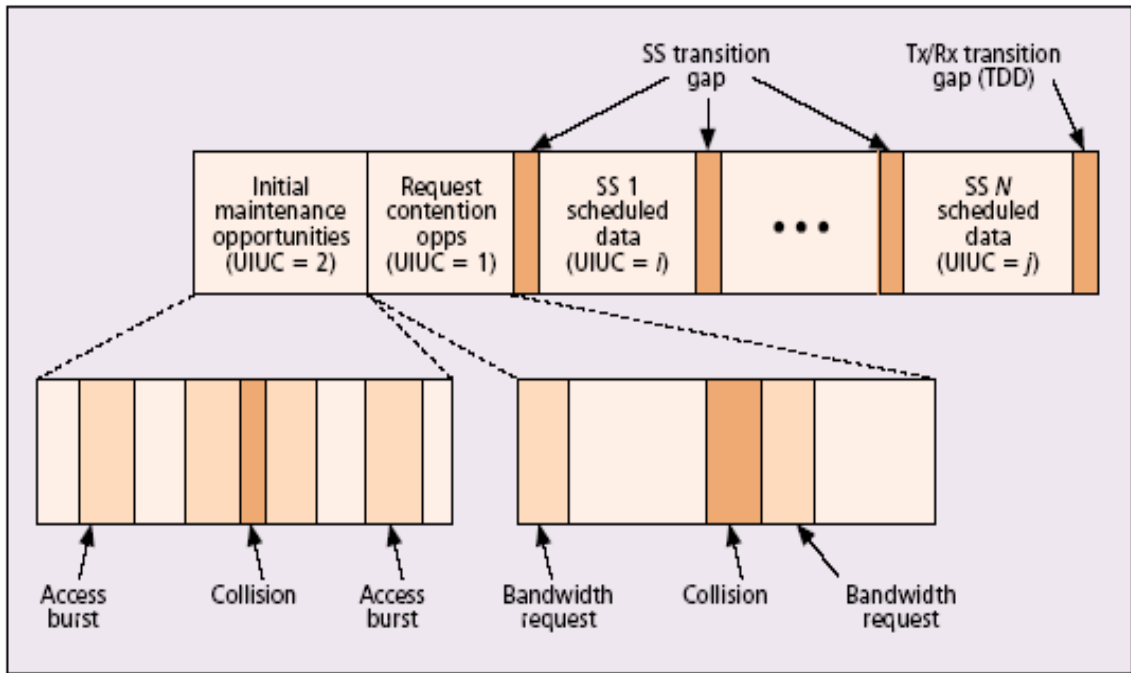


Σχήμα 2.4.1.3 Δομή πλαισίου MAC με χάρτη DL-MAP

Είναι δυνατόν ακριβώς μετά το DL-MAP να ακολουθεί ένας UL-MAP ο οποίος περιέχει αντίστοιχα στοιχεία πληροφορίας IE. Οι δείκτες IE επισημαίνουν την αρχή και το τέλος των UL-Burst καθώς και την έναρξη των χρονοθυρίδων ανταγωνισμού Initial ranging και BW request.

Προχωρώντας, συναντούνται οι καταγισμοί κάτω ζεύξης (DL-Burst). Κύρια λειτουργία των DL-Burst είναι η μεταφορά των MAC PDUs με ίδιο προφίλ εκρηκτικότητας για να απλοποιηθούν οι λειτουργίες του φυσικού στρώματος. Σε κάθε MAC PDU υπάρχει αναγνωριστική ένδειξη της σύνδεσης στην οποία αυτό ανήκει. Παράλληλα, υπάρχει η επιλογή της προσθήκης μιας επιπλέον επικεφαλίδας, του Preamble, το οποίο διαδέχεται κάθε DL-Burst και βοηθάει στο διαχωρισμό τους. Το Preamble σε αυτό το σημείο της επικεφαλίδας έχει μήκος ενός συμβόλου. Το πεδίο Pad αναφέρεται στο «παραγέμισμα» της επικεφαλίδας με επιπλέον ψηφία έως ότου να συμπληρωθεί ακέραιος αριθμός συμβόλων. Αίτηση για αποστολή DL-Burst γίνεται κάθε φορά που οι λειτουργίες του φυσικού στρώματος αδυνατούν να διατηρήσουν το συγχρονισμό.

Στο υποπλαίσιο άνω ζεύξης, υπάρχουν οι χρονοθυρίδες ανταγωνισμού που αντιστοιχούν στα πεδία της επικεφαλίδας Initial ranging και Bandwidth request. Το πρώτο πεδίο περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία για την αρχικοποίηση του δικτύου κατά την είσοδο μιας νέας σύνδεσης στο δίκτυο. Το πεδίο BW request είναι ένδειξη της ύπαρξης δεδομένων προς μετάδοση και περιέχει τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης της νέας σύνδεσης.

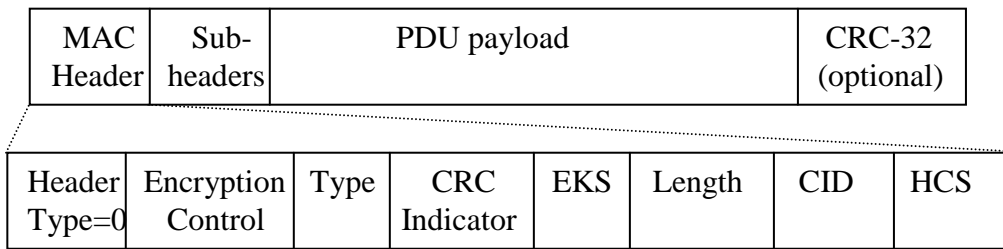


Σχήμα 2.4.1.2 Διαστήματα Ανταγωνισμού κατά το υποπλάισιο άνω ζεύξης

Οι καταιγισμοί άνω ζεύξης, περιέχουν τις MAC PDUs που δημιουργούνται από κάθε σταθμό χωριστά. Υπάρχει και εδώ Preamble που προηγείται κάθε καταιγισμού και, προαιρετικά, μεσολαβούν περιοδικά Midamble πεδία στο ενδιάμεσο του καταιγισμού που έχουν σαν στόχο τη διατήρηση του συγχρονισμού. Εδώ, κάθε UL-Burst προέρχεται από διαφορετικό σταθμό και ανήκει σε διαφορετική σύνδεση όπως έχει καθοριστεί κατά τη φάση του ανταγωνισμού και σύμφωνα με τα πρωτόκολλα πολλαπλής εκπομπής ανώτερου στρώματος. Συνεπώς, υπάρχουν αυστηρότερες απαιτήσεις συγχρονισμού για την αποφυγή συγκρούσεων. Τέλος, κάθε UL-Burst τελειώνει με το πεδίο Pad για τη συμπλήρωση ακέραιου αριθμού συμβόλων.

2.4.2 Ανάλυση της Μονάδας δεδομένων Πακέτου MAC

Η MAC PDU στο στάδιο αυτό δεν αναφέρεται στη συνολική PDU του στρώματος δύο αλλά στην Μονάδα Πληροφορίας PDU που έχει προκύψει από το στρώμα δικτύου και είναι οργανωμένη σε πακέτα. Για αυτόν τον λόγο, στη συντακτική δομή της επικεφαλίδας υπάρχουν πεδία σχετικά με διόρθωση λαθών (CRC), η οποία είναι μια λειτουργία του στρώματος τρία. Η συντακτική της δομή φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.4.2.1 Συντακτική δομή της MAC Packet Data Unit

Αρχικά, η επικεφαλίδα του στρώματος MAC αποτελείται από 6 οκτάδες και υπάρχει ανεξαρτήτως αν μεταφέρονται δεδομένα διαχείρισης ή ελέγχου. Η λειτουργία του κάθε πεδίου είναι η ακόλουθη:

- *Header type = 0*
- *Encryption control*. Αποτελεί ένδειξη του αν η πληροφορία που ακολουθεί είναι κρυπτογραφημένη ή όχι.
- *Type*. Κάθε bit του συγκεκριμένου πεδίου ελέγχει την ύπαρξη ή όχι κάποιας ιδιότητας. Τέτοιες ιδιότητες είναι η ύπαρξη επικεφαλίδας Mesh, σύστημα αυτόματης Απάντησης ARQ, ύπαρξη επικεφαλίδας κατάτμησης ή επανένωσης, ειδική ένδειξη εκτεταμένου τύπου ή όχι, επικεφαλίδα διαχείρισης.
- *Cyclic redundancy check (CRC)*. Ένδειξη του αν χρησιμοποιείται κώδικας ελέγχου κυκλικού πλεονασμού για τον έλεγχο της επικεφαλίδας.
- *Encryption key sequence (EKS)*. Περιέχεται η ακολουθία κλειδιού της κρυπτογράφησης.
- *Length*. Το μήκος της συνολικής MAC PDU.
- *Connection ID*. Αντιστοιχεί στον αναγνωριστικό αριθμό της σύνδεσης.
- *Header Check Sequence*. Έλεγχος λαθών στη MAC Header.

Στο πεδίο Subheader τοποθετούνται τεσσάρων ειδών επικεφαλίδες. Η επικεφαλίδα Mesh αποτελεί ένδειξη της χρησιμοποιούμενης τοπολογίας, η οποία σε περίπτωση που υπάρχει μπαίνει πριν από όλες τις άλλες. Ακολουθεί η επικεφαλίδα διαχείρισης και οι επικεφαλίδες κατάτμησης και επανένωσης, λειτουργίες οι οποίες θα αναλυθούν στην παράγραφο που ακολουθεί.

Τα υπόλοιπα στοιχεία της MAC PDU είναι το Payload το οποίο περιέχει τη μεταφερόμενη πληροφορία και το πεδίο CRC. Η παρουσία του CRC είναι υποχρεωτική σε πλαίσια διαχείρισης, ενώ σε πλαίσια δεδομένων είναι προαιρετική και καθορίζεται στη φάση σηματοδότησης ανάλογα με τη ζητούμενη ποιότητα υπηρεσιών.

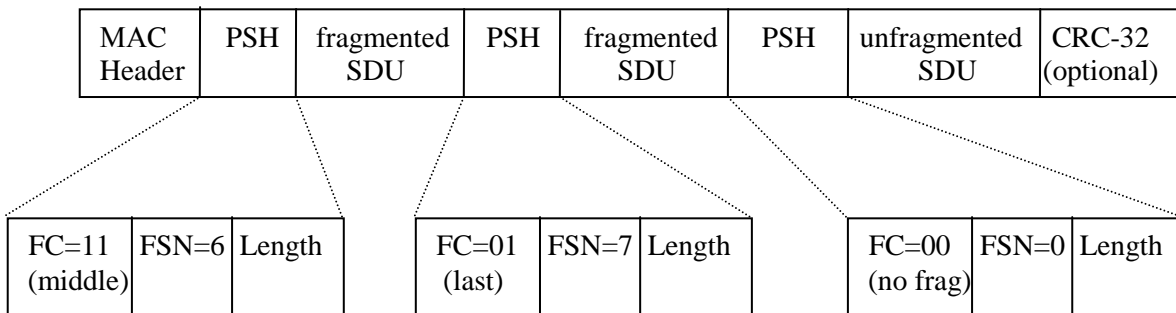
2.4.3 Λειτουργίες κατάτμησης – επανένωσης

Με τον όρο κατάτμηση εννοούμε το διαχωρισμό της SDU σε περισσότερες PDUs όταν αυτή ξεπερνά σε μέγεθος τη μέγιστη μονάδα μεταφοράς του εκάστοτε πρωτοκόλλου. Με αυτόν τον τρόπο κερδίζουμε ευελιξία στη διαχείριση μικρών PDUs σταθερού μεγέθους, οι οποίες δεν χρειάζονται ξεχωριστή ένδειξη μήκους ή μεταβλητού μήκους. Λειτουργίες κατάτμησης και επανένωσης συμβαίνουν συνεχώς στο δίκτυο όταν επίκειται η συνεργασία διαφορετικών πρωτοκόλλων και μέσων μετάδοσης. Για παράδειγμα τα πακέτα Ethernet δεν μπορούν να μεταφέρουν περισσότερα από 1500 bytes δεδομένων, ενώ σε ένα δίκτυο ευρείας ζώνης πολλές ζεύξεις δεν μπορούν να μεταφέρουν πάνω από 576 bytes δεδομένων.

Απαραίτητη είναι η χρήση επικεφαλίδας κατάτμησης (Fragmentation subheader, FSH) που περιέχει τον αναγνωριστικό αριθμό του κάθε νέου πλαισίου έτσι ώστε να διατηρείται η σωστή σειρά των πακέτων κατά την επανένωση. Παράλληλα, στην επικεφαλίδα περιέχεται και ένας ενδείκτης ελέγχου κατάτμησης (Fragmentation Control, FC) μήκους 2 ψηφίων που δείχνει σε ποιο σημείο του κατατμημένου πλαισίου αντιστοιχεί το τρέχον πλαίσιο. Πακέτα που δεν έχουν υποστεί κατάτμηση έχουν μηδενισμένα τα πεδία FC και FSN.

- FC=10 →first
- FC=01 →last
- FC=11 →middle
- FC=00 →no fragmentation

Η αντίστροφη λειτουργία της κατάτμησης είναι η επανένωση η οποία λαμβάνει χώρα στο δέκτη. Πρόκειται για την ανασύνθεση του αρχικού πλαισίου σε μια PDU, επανενώνοντας τις SDUs θραύσματα.



Σχήμα 2.4.3.1 Λειτουργία επανένωσης

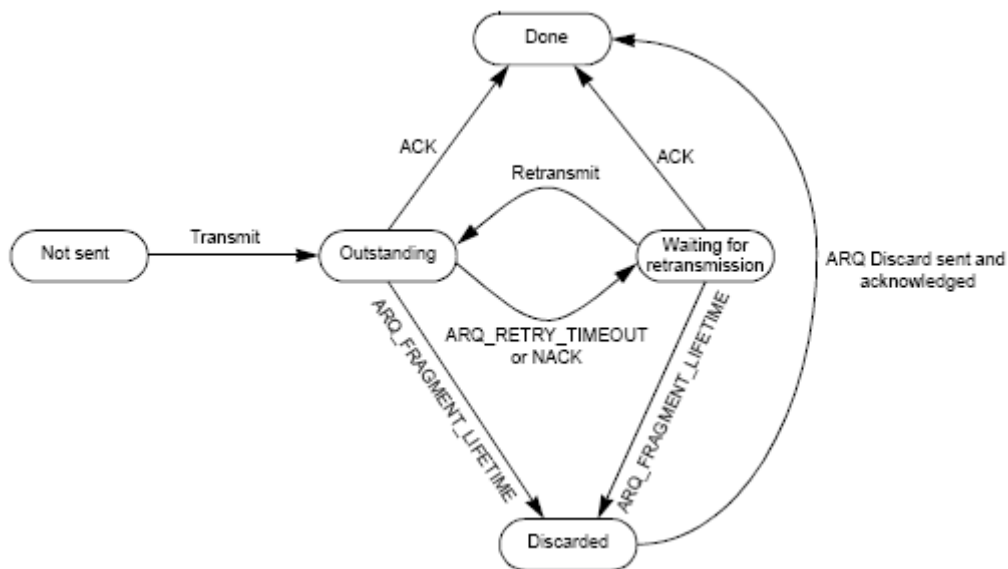
2.4.4 Μηχανισμός Αίτησης Αυτόματης Απάντησης

Ο Μηχανισμός Αίτησης Αυτόματης Απάντησης (Automatic Repeat Request, ARQ) είναι ένας επιπλέον προαιρετικός μηχανισμός ελέγχου σωστής λειτουργίας, που η ύπαρξή του ή όχι διαπραγματεύεται ξεχωριστά για κάθε σύνδεση κατά τη φάση της σηματοδότησης. Οι SDUs διαχωρίζονται σε blocks σταθερού μεγέθους. Το τελευταίο block μπορεί να είναι πιο μικρό από τα υπόλοιπα εφόσον δεν υπάρχουν άλλα SDU προς αποστολή. Κάθε πλαίσιο αριθμείται με τον αντίστοιχο ακολουθιακό αριθμό (Block Sequence Number, BSN) ο οποίος αντιστοιχεί στο πρώτο block του πλαισίου. Δύο διαδοχικά πλαίσια διαφέρουν στον αναγνωριστικό αριθμό τους κατά το πλήθος των block που μεταφέρονται σε ένα πλαίσιο. Το πλήθος αυτών των block δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό αφού καθορίζεται κάθε φορά από το πλήθος των SDUs που χώρεσαν στο καθορισμένου μήκους πλαίσιο. Κατάτμηση επομένως γίνεται μόνο στα όρια του ARQ block εφόσον μια SDU δεν χωράει ακριβώς στον υπολειπόμενο κενό χώρο του block.

Τα αναγνωριστικά ARQ μεταφέρονται είτε στο τέλος κάποιου πλαισίου είτε μόνα τους ως πολύ μικρού μήκους πακέτα. Τα πακέτα ARQ δεν υφίστανται κατάτμηση, λόγω του μικρού μήκους τους. Υπάρχουν τέσσερα είδη πακέτων ανατροφοδότησης ARQ:

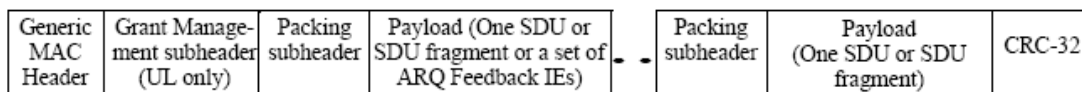
- Επιλεκτικής Επαλήθευσης (Selective Acknowledgement, ACK). Εδώ στέλνεται επαλήθευση για κάθε σωστό block που έλαβε ο δέκτης. Η επαλήθευση αυτή περιέχει τον ακολουθιακό αριθμό του επόμενου block.

- Σωρευτικής Επαλήθευσης (Cumulative ACK). Στέλνεται μόνο ένα ACK για κάθε σωστό λαμβανόμενο πλαίσιο. Η επαλήθευση περιέχει τον αριθμό του τελευταίου block του πλαισίου, αυξημένο κατά ένα. Αυτός ο τύπος ARQ είναι περισσότερο ευαίσθητος σε λάθη.
- Σωρευτική και Επιλεκτικές Επαληθεύσεις. Πρόκειται για συνδυασμό των δύο παραπάνω τύπων. Εφόσον εντοπιστεί λανθασμένο πλαίσιο στέλνονται ξεχωριστές ACK για κάθε block έως ότου αποκατασταθεί ο συγχρονισμός. Στη συνέχεια, στέλνονται ξανά σωρευτικές επαληθεύσεις.



Σχήμα 2.4.4.1 Καταστάσεις μετάδοσης ενός πλαισίου ARQ

- Σωρευτική Επαλήθευση με προσθήκη ACK επόμενου block. Σε περίπτωση που ληφθεί κάποιο εσφαλμένο πλαίσιο τότε στέλνεται ACK που υποδηλώνει το λανθασμένο block.



Σχήμα 2.4.4.2 Παράδειγμα MAC PDU με ARQ Subheader

2.4.5 Αρχικοποίηση δικτύου και εγκατάσταση σύνδεσης

Πριν την εγκατάσταση μιας σύνδεσης προηγείται η φάση της σηματοδότησης. Στο δίκτυο ρέουν πακέτα που ανήκουν τόσο σε ανεξάρτητα δεδομένα, όσο και σε συνδέσεις διαχείρισης. Μια σύνδεση διαχείρισης μπορεί να μεταφέρει στοιχεία για περισσότερες συνδέσεις δεδομένων. Υπάρχουν τριών ειδών συνδέσεις διαχείρισης οι οποίες ορίζουν τρεις διαφορετικές ποιότητες προσφερόμενων υπηρεσιών:

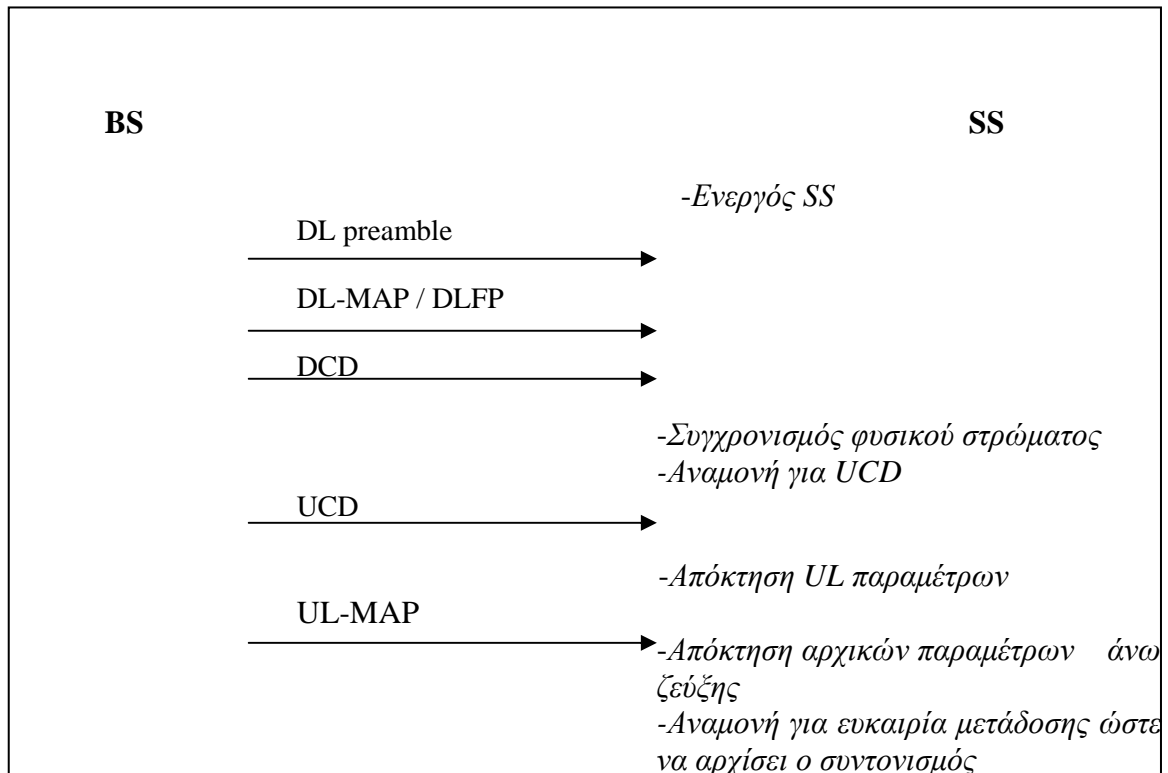
- *Βασική σύνδεση διαχείρισης.* Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση σύντομων και επειγόντων μηνυμάτων. Εξασφαλίζει πολύ γρήγορη και ασφαλή μεταφορά, παρέχοντας το ανώτερο επίπεδο ποιότητας, κατάλληλη για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.
- *Πρωτεύουσα σύνδεση διαχείρισης.* Χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα μηνύματα με μεγαλύτερη ανοχή στην καθυστέρηση.
- *Δευτερεύουσα σύνδεση διαχείρισης.* Αναφέρεται σε μηνύματα με ανοχή στην καθυστέρηση ακολουθώντας νοοτροπία βέλτιστης προσπάθειας ως προς την πολιτική παράδοσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πρωτόκολλα όπως DHCP, TFTP, SNMP.

Οι συνδέσεις διαχείρισης εγκαθίστανται σαν ζευγάρι άνω και κάτω ζεύξης με έναν ενιαίο αναγνωριστικό αριθμό (Connection ID, CID). Το CID έχει μήκος 16 ψηφίων και μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 65278 διαφορετικές συνδέσεις. Επίσης, υποστηρίζεται η ύπαρξη δεσμευμένων CID που υποστηρίζουν λειτουργίες πολλαπλής εκπομπής και αρχικοποίησης δικτύου. Μόλις ολοκληρωθεί η φάση της σηματοδότησης αρχίζουν οι διαδικασίες για την εγκατάσταση της σύνδεσης.

Το πρώτο στάδιο για την αρχικοποίηση της σύνδεσης είναι να βρεθεί ένα ελεύθερο κανάλι κάτω ζεύξης και να επιτευχθεί συγχρονισμός με τον BS. Αρχικά, ο SS ελέγχει αν είναι διαθέσιμο το τελευταίο κανάλι κάτω ζεύξης που χρησιμοποίησε σε προηγούμενη σύνδεση. Αν αυτό δεν συμβαίνει ελέγχει διαδοχικά όλα τα κανάλια κάτω ζεύξης μέχρι τη στιγμή που θα λάβει ένα έγκυρο σήμα κάτω ζεύξης. Μόλις το φυσικό στρώμα επιτύχει συγχρονισμό το υπόστρωμα MAC ξεκινά τις προσπάθειες για τον καθορισμό των παραμέτρων μετάδοσης για τα δύο κανάλια, άνω και κάτω ζεύξης.

Για την απόκτηση των παραμέτρων κίνησης της κάτω ζεύξης, αναζητείται από το υπόστρωμα MAC η ύπαρξη ενός DL-MAP μηνύματος διαχείρισης. Μόλις ληφθεί τουλάχιστον ένα DL-MAP, ο SS έχει έρθει σε συγχρονισμό με τον BS. Στη συνέχεια, ακολουθούν μηνύματα τόσο DL-MAP, όσο και μηνύματα περιγραφείς κάτω ζεύξης (Downlink Channel Descriptor, DCD). Ο SS παραμένει συγχρονισμένος μόνο για όσο διάστημα λαμβάνει αυτούς τους τύπους μηνυμάτων. Διακοπή των μηνυμάτων DL-MAP και DCD σημαίνει αποσυγχρονισμό και έναρξη των διαδικασιών για εκ νέου αποκατάσταση του συγχρονισμού. Το γεγονός ότι η προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας καθορίζεται από τους περιγραφείς κίνησης που ανταλλάσσονται σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης δείχνει ότι είναι εφικτή η αλλαγή της ποιότητας μέσω της σύνδεσης καθώς και η διαφοροποίηση της ποιότητας μεταξύ χρηστών που χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους.

Για την απόκτηση όλων των παραμέτρων μετάδοσης απαραίτητη είναι η απόκτηση και των παραμέτρων άνω ζεύξης. Έτσι, μετά τη φάση του συγχρονισμού, ο SS περιμένει για περιγραφείς κίνησης UDC και UL-MAP. Μόλις βρεθεί κάποιο ελεύθερο κανάλι άνω ζεύξης και ελεγχθούν από τον SS τα πεδία Initial ranging και Bandwidth request που περιγράφουν την κίνηση το κανάλι δεσμεύεται από τον SS, εφόσον βέβαια τηρούνται οι απαιτήσεις ποιότητας του σταθμού. Παράλληλα, ενημερώνεται και ο SS MAC με τα στοιχεία της ζεύξης. Η ζεύξη αυτή παραμένει στο SS MAC μόνο για όσο διάστημα λαμβάνονται μηνύματα UDC και UL-MAP. Μόλις αυτά διακοπούν το συγκεκριμένο κανάλι άνω ζεύξης δε χρησιμοποιείται πλέον για μετάδοση. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



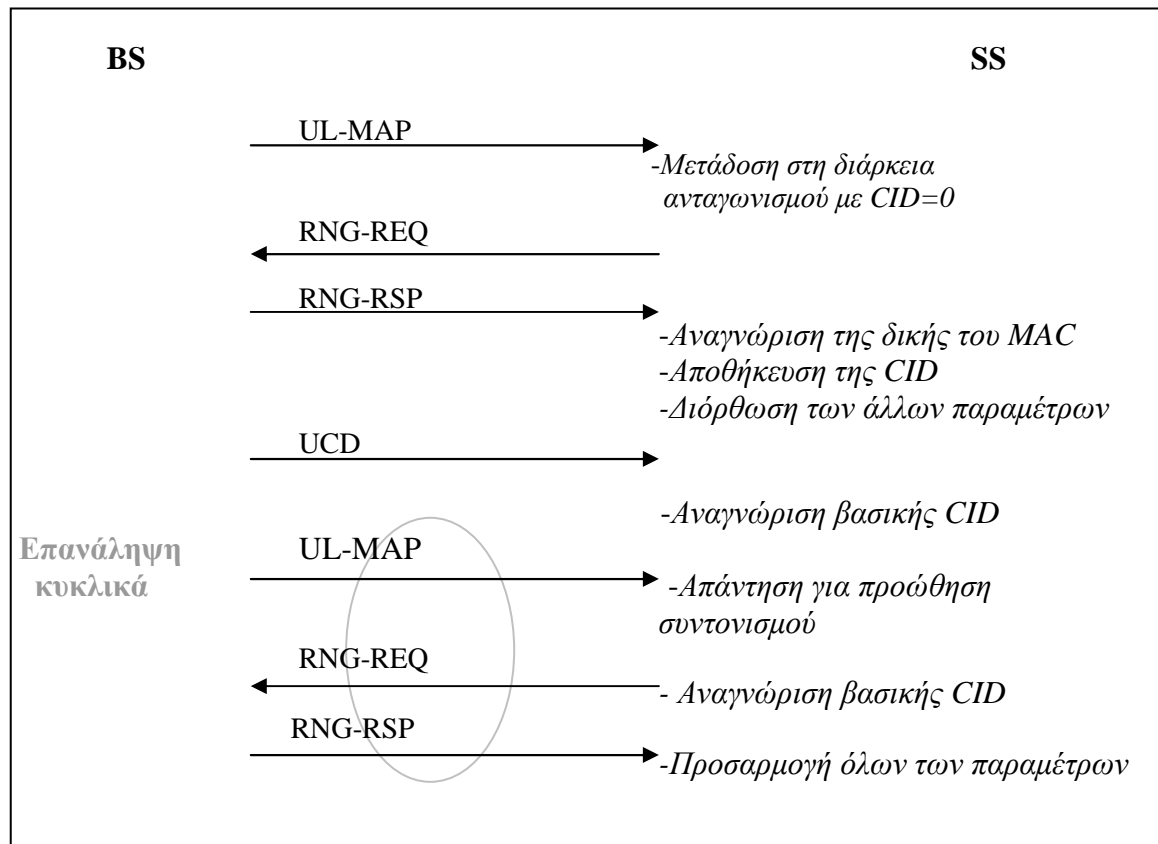
Σχήμα 2.4.5.1 Εύρεση καναλιού και απόκτηση παραμέτρων άνω ζεύξης

Το επόμενο βήμα είναι η εξασφάλιση του συντονισμού SS και BS. Η έννοια του συντονισμού (ranging) αναφέρεται στην απόκτηση της σωστής χρονικής απόστασης στον SS έτσι ώστε κάθε μετάδοση από τον SS να είναι ευθυγραμμισμένη με το σύμβολο έναρξης της χρονοθυρίδας. Ο SS στέλνει αίτηση συντονισμού στον BS (RNG-REQ). Μόλις η ισχύς εκπομπής φτάσει στο επιθυμητό σημείο ο BS απαντά με μήνυμα RNG-RSP που περιέχει απαραίτητα τα εξής στοιχεία:

- Βασικό και Πρωτεύων αναγνωριστικό αριθμό διαχείρισης (management CID)
- Επιτρεπόμενο επίπεδο ισχύος RF και συχνότητα εκπομπής
- Διόρθωση της χρονικής απόστασης συντονισμού
- Πληροφορίες για την εξέλιξη του συντονισμού

Μηνύματα RNG-RSP στέλνονται μέχρι ο SS να ενημερωθεί για επιτυχής εξέλιξη του συντονισμού. Σημειώνουμε ότι σε περίπτωση που ζητηθεί από τον BS μια στάθμη ισχύος υψηλότερη από αυτήν που ο SS μπορεί να παρέχει, τότε ο BS προσαρμόζει τα επίπεδα ισχύων των γειτονικών σταθμών συνδρομητών, ώστε να δοθεί στον SS το επιθυμητό

επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας εκτελείται περιοδικά έλεγχος συντονισμού και αυτόματη προσαρμογή όταν επίκειται αποσυγχρονισμός.



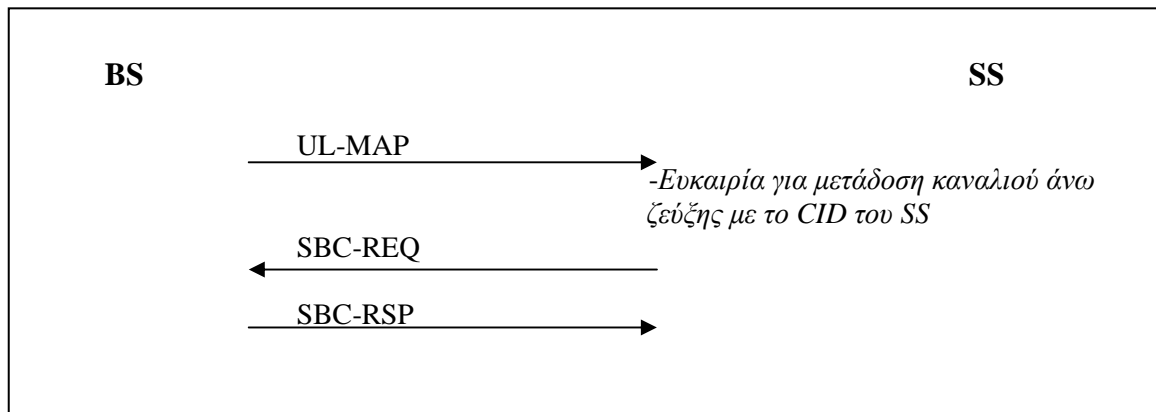
Σχήμα 2.4.5.2 Διαδικασία συντονισμού και αυτόματης προσαρμογής

Την επίτευξη συντονισμού ακολουθεί η διαπραγμάτευση των βασικών ιδιοτήτων της σύνδεσης (Basic Capabilities). Αυτό συμβαίνει με ανταλλαγή μηνυμάτων SBC-REQ και SBC-RSP. Η απάντηση που στέλνει ο BS περιέχει μια ένωση των κοινών ιδιοτήτων SS και BS. Είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της διαπραγμάτευσης χαρακτηριστικών της σύνδεσης, όπως είναι τα εξής:

- Είδος πολύπλεξης FDD ή HFDD
- Μήκος πεδίων TTG και RTG (από 0 έως 100μs)
- Ισχύ μετάδοσης

Στην περίπτωση που η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση φυσικού στρώματος είναι OFDM, οι μεταβλητές υπό διαπραγμάτευση είναι:

- Χαρακτηριστικά διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης (64QAM, χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση, αριθμός πολυπλεγμένων φέροντων)
- Προτεραιότητα σε περιόδους ανταγωνισμού
- Μήκος πεδίου FSN (3 ή 8 bit)



Σχήμα 2.4.5.3 Διαπραγμάτευση χαρακτηριστικών σύνδεσης

Ακολουθούν ενέργειες εξουσιοδότησης και αποδοχής του SS καθώς και η ανταλλαγή κλειδιού ώστε να μπορεί να πραγματοποιήσει ο SS μια ασφαλή σύνδεση. Ο BS, παίζοντας το ρόλο του εξυπηρετητή υπηρεσιών, εφοδιάζει το νέο σταθμό συνδρομητή με ένα αναγνωριστικό πελάτη και του παρέχει ένα κλειδί εξουσιοδότησης για να χρησιμοποιεί κατά την διεξαγωγή των συνδέσεων. Τέλος, ο BS εξασφαλίζει στον SS τη χρήση όλων των βασικών μηχανισμών ασφαλείας και πιστοποίησης αυθεντικότητας.

Έχοντας ολοκληρώσει τις ενέργειες για εξασφάλιση αυθεντικότητας, μένει πλέον η εγγραφή (Registration) του SS στο δίκτυο. Πρόκειται για μια διαδικασία διαχείρισης κατά την οποία ο SS αποκτά όλες τις ιδιότητες του MAC στρώματος καθώς και υπηρεσίες ARQ και CRC για τον έλεγχο λαθών. Στο στάδιο αυτό ο SS εφοδιάζεται με ένα δευτερεύων CID διαχείρισης ώστε να μπορεί πλέον το δίκτυο να τον διαχειριστεί. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται με την ανταλλαγή μηνυμάτων REG-REQ και REG-RSP.

Στην περίπτωση που ο σταθμός έχει εφοδιαστεί με δευτερεύων CID διαχείρισης, γεγονός που σημαίνει ότι οι πληροφορίες διαχείρισης ρέουν μέσω μιας δευτερεύουσας σύνδεσης διαχειρίσεις, τότε ένα επιπλέον σύνολο ενεργειών πρέπει να ακολουθήσει:

- *Εξασφάλιση συνδεσιμότητας σε IP επίπεδο.* Αρχικά, επιλέγεται η έκδοση του πρωτοκόλλου IP που θα χρησιμοποιηθεί. Προς το παρόν αυτό αντιστοιχεί στην ανάθεση του IPv4 στο τμήμα της μεταβλητής έκδοσης IP. Στη συνέχεια, με χρήση του πρωτοκόλλου DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) ο SS εφοδιάζεται με το μηχανισμό δυναμικής απόκτησης IP για σύνδεση στο δίκτυο.
- *Απόκτηση της τρέχουσας μέρας και ώρας.* Η καθολική μέρα και ώρα στο σύστημα, επιτρέπει στον SS την έγκυρη ενημέρωση των πεδίων χρονικής σφραγίδας (time stamp) που υπάρχουν σε κάθε πακέτο που η διαχείρισή του γίνεται από το δίκτυο. Η αρμονική λειτουργία του δικτύου, επιβάλλει τη χρονική σήμανση όλων των γεγονότων που τελούνται σε κάθε SS
- *Μεταφορά των παραμέτρων λειτουργίας.* Η ενέργεια αυτή τελείται με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου TFTP (Trivial File Transfer Protocol). Ο εξυπηρετητής TFTP παρέχει στον SS το αρχείο εγκατάστασης και ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας όλου του εξοπλισμού (Configuration file), ειδοποιεί τον BS για την επιτυχή λήψη του αρχείου από τον SS και τέλος ο BS ενημερώνει τον SS με ένα μήνυμα TFTP-RSP ότι η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία.

Ο Σταθμός έχει πλέον συνδεθεί επιτυχώς στον BS και μπορεί να πραγματοποιήσει σύνδεση. Το αν η σύνδεση θα γίνει αποδεκτή ή όχι εξαρτάται από την υπηρεσία ελέγχου ροής. Πρόκειται για μια υπηρεσία του δικτύου που παρέχει μονοκατευθυντική μεταφορά πακέτων και χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο καθορισμένων παραμέτρων ποιότητας οι οποίες διαπραγματεύονται κατά την έναρξη της σύνδεσης και έναν αναγνωριστικό αριθμό SFID (Service Flow ID). Κάθε σύνδεση που έχει γίνει αποδεκτή ή έχει ενεργοποιηθεί συνδέεται με έναν SFID. Επομένως, μια σύνδεση αντιπροσωπεύεται από τα αναγνωριστικά CID και SFID και προαιρετικά από μια παράμετρο κλάσης υπηρεσίας (Service Class). Οι παράμετροι ποιότητας (QoS parameters) που περιλαμβάνει η υπηρεσία ελέγχου ροής και καθορίζουν μια σύνδεση, είναι οι ακόλουθες:

- Προτεραιότητα κυκλοφορίας
- Μέγιστο σωρευτικό ποσοστό κίνησης (Μέγιστος ρυθμός σε ψηφία μη συμπεριλαμβανομένων των ψηφία επικεφαλίδας)
- Μέγιστο μήκος έκρηξης της κίνησης
- Ελάχιστο δεσμευμένο ποσοστό κίνησης

- Ελεγχόμενη διακύμανση (σε ms)
- Μέγιστη καθυστέρηση (σε ms)
- Είδος χρονοδρομολόγησης της ροής των πακέτων
- Παράμετροι ARQ
- Επιβάρυνση επικεφαλίδας
- Ειδικές παράμετροι QoS του προμηθευτή
- Κτλ

2.5 Φυσικό Στρώμα

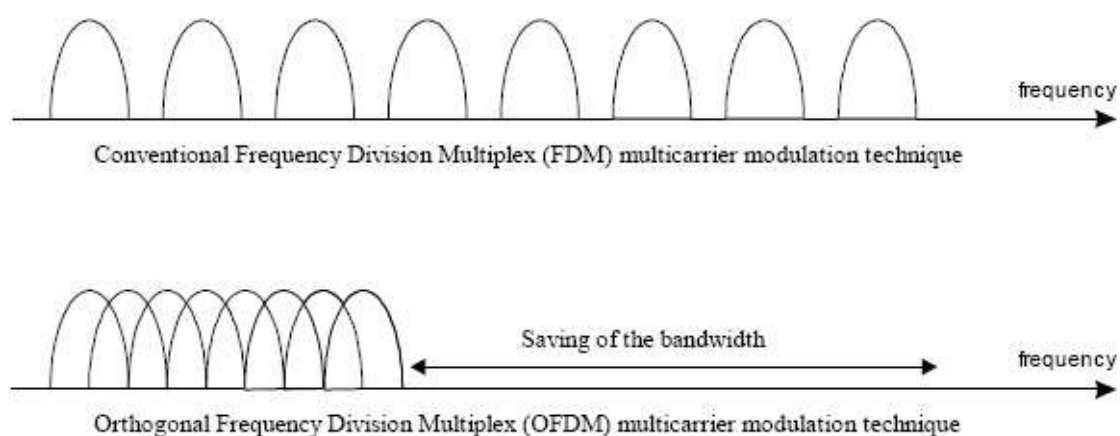
2.5.1 Εισαγωγή στη διαμόρφωση OFDM

Η διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) προέκυψε από την ανάγκη αποτελεσματικής αντιμετώπισης του προβλήματος διάδοσης μέσα από κανάλια επιλεκτικής εξασθένησης ως προς τη συχνότητα. Σε αντίθεση με το κανάλι επίπεδης εξασθένησης (flat fading), ένα κανάλι επιλεκτικής εξασθένησης (frequency-selective fading) είναι εκείνο που επηρεάζει διαφορετικά την κάθε συχνότητα του εύρους του σήματος που μεταφέρει. Αποτέλεσμα αυτού είναι η φασματική αλλοίωση του ψηφιακά διαμορφωμένου σήματος καθώς διέρχεται από κανάλι επιλεκτικής εξασθένησης, γεγονός που οδηγεί στο φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, υπάρχουν δύο λύσεις. Η πρώτη, έγκειται στη χρησιμοποίηση ενός σύνθετου κυκλώματος εξισωτή, που έχει ως στόχο τη μετατροπή του καναλιού σε επίπεδη εξασθένηση στη ζώνη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Όμως, κάτι τέτοιο είναι αρκετά ακριβό και πολύπλοκο στην κατασκευή του, ακριβώς προσαρμοσμένο στο συγκεκριμένο κανάλι και στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων για την οποία έχει κατασκευαστεί. Είναι επόμενο, ότι μια τέτοια λύση, στερείται ευελιξίας και καθολικότητας. Η δεύτερη λύση είναι να χρησιμοποιηθεί μεγάλη διάρκεια συμβόλου, ώστε να γίνει αμελητέο το ποσοστό της διασυμβολικής παρεμβολής. Μεγάλη διάρκεια συμβόλου, δηλαδή διεύρυνση στο πεδίο του χρόνου, οδηγεί σε σύμπτυξη του φάσματος στο πεδίο της συχνότητας. Δηλαδή, στην εκπομπή ενός σήματος

στενής ζώνης, τόσο στενής ώστε η συμπεριφορά του καναλιού δεν προλαβαίνει να αλλάξει.

Με αυτή τη νέα θεώρηση εκπομπής σημάτων στενής ζώνης, το διαθέσιμο φάσμα μπορεί να χωριστεί σε πολλά υποκανάλια στα οποία αντιστοιχεί διαφορετική φέρουσα συχνότητα και τα οποία μεταφέρουν ταυτόχρονα ξεχωριστά σήματα πληροφορίας. Μεταφέρουν δηλαδή πολυπλεγμένα σήματα στο πεδίο της συχνότητας. Αυτή ακριβώς είναι η βασική ιδέα Πολύπλεξης Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing, FDM). Σε κάθε κανάλι όμως, είναι εφικτή η μεταφορά δύο σημάτων ορθογώνιων μεταξύ τους, χωρίς να κινδυνεύει η φασματική ακεραιότητα κανενός εκ των δύο. Αυτή η επέκταση οδήγησε στην OFDM διαμόρφωση, που χρησιμοποιείται από πλήθος νέων τεχνολογιών, όπως οι κινητές τηλεπικοινωνίες, το ADSL, τεχνολογίες IEEE 802.11 και WiMax. Επομένως, στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, επιλέγεται διαμόρφωση φυσικού στρώματος OFDM και με αυτήν την υπόθεση θα εξεταστεί η υλοποίηση του φυσικού στρώματος από το 802.16a πρωτόκολλο.



Σχήμα 2.5.1.1 Σύγκριση της χρησιμοποίησης του διατιθέμενου εύρους ζώνης στις δύο διαμορφώσεις FDM και OFDM

Βέβαια, παρόλα τα προφανή πλεονεκτήματα που κάνουν την OFDM διαμόρφωση προτιμητέα σε πλήθος εφαρμογών, η OFDM θέτει και κάποιους περιορισμούς. Είναι πολύ ευαίσθητη σε οποιοδήποτε σφάλμα φάσης μπορεί να επηρεάσει την ορθογωνιότητα των δύο σημάτων που πολυπλέκονται ανά φέρον. Και η πιο μικρή απόκλιση στη φάση των αποκωδικοποιητών στο δέκτη, μπορεί να αυξήσει πάρα πολύ την πιθανότητα λάθους και να καταστήσει αδύνατη την αποκωδικοποίηση. Επίσης, οι υψηλές απαιτήσεις σε

ισχύ, απαιτούν τη λειτουργία του ενισχυτή στη μη γραμμική περιοχή, οδηγώντας έτσι σε παραμόρφωση του σήματος.

2.5.1.1 Ποιοτική περιγραφή της διαμόρφωσης OFDM

Στο περιβάλλον ψηφιακής μετάδοσης επικοινωνίας πολυμέσων υπάρχει η απαίτηση για μετάδοση δεδομένων σε υψηλή ταχύτητα και με υψηλή ποιότητα. Τα απλά ψηφιακά συστήματα πομποδεκτών δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις παραπάνω απαιτήσεις αφού πλήττονται από το φαινόμενο της πολύοδης διάδοσης με αποτέλεσμα τα σήματα να καταφθάνουν στο δέκτη εξασθενημένα και σε πολλαπλά αντίγραφα.

Στο συμβατικό τρόπο σειριακής μετάδοσης, τα σύμβολα μεταδίδονται ακολουθιακά και κάθε σύμβολο στο χρόνο μετάδοσης που του αντιστοιχεί είναι ελεύθερο να καταλάβει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ο παράλληλος τρόπος μετάδοσης, εισάγοντας την ταυτόχρονη μετάδοση συμβόλων, αντιμετωπίζει πολλά από τα προβλήματα της σειριακής μετάδοσης. Στην OFDM διαμόρφωση, τα δεδομένα διαμοιράζονται σε ένα μεγάλο πλήθος φερόντων, δικαιολογώντας το χαρακτηρισμό της πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας. Η διαμόρφωση OFDM, επομένως, δεν αφορά μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης του μέσου, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κοινό μέσο με πεπερασμένο εύρος ζώνης για να διαμοιραστεί. Πρόκειται για μια παράλληλη μετάδοση της πληροφορίας, η οποία διαμοιράζεται εξίσου στα πολλαπλά φέροντα έτσι ώστε κάθε φέρον σήμα να μεταφέρει μικρή ποσότητα της προς αποστολή πληροφορίας. Αυτό επιτρέπει τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας ανά φέρον σήμα, με αποτέλεσμα τον σημαντικό περιορισμό του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής. Επισημαίνεται, ότι μείωση στο ρυθμό μετάδοσης του κάθε φέροντος δε σημαίνει μείωση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, ο οποίος είναι τόσες φορές ταχύτερος όσο είναι το πλήθος των φερόντων σημάτων.

Η παραπάνω υλοποίηση, διαμοιράζοντας την πληροφορία σε πολλαπλά κανάλια, βοηθά στην αποφυγή λαθών σε καταιγισμούς πληροφορίας, γεγονός που θα έκανε αδύνατη την ανασύνθεση μέρους της πληροφορίας αν αυτό για κάποιο λόγο καταστρεφόταν. Παράλληλα, το μικρό εύρος που διατηρεί κάθε φέρον, αφού μεταφέρει σήματα στενής

ζώνης, αποτρέπει την επιλεκτική ως προς τη συχνότητα εξασθένηση. Τα παραπάνω, αν εφαρμοστούν σε συνδυασμό με έναν απλό αλγόριθμο εξισορρόπησης μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τη μέση τετραγωνική διασπορά σε κάθε ένα από τα κανάλια μετάδοσης. Εναλλακτική λύση της χρήσης εξισορροπιστή, είναι η χρήση διαφορικής κωδικοποίησης. Με την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων γίνεται εφικτή η ακριβής ανασύνθεση της πληροφορίας στο δέκτη, ακόμα και χωρίς τη χρήση άλλου μηχανισμού διόρθωσης λαθών

Η ορθογώνια διαμόρφωση που αναφέρεται στο OFDM αναφέρεται στην ακριβή μαθηματική σχέση που συνδέει τις συχνότητες των φερόντων του συστήματος. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν FDM διαμόρφωση είναι απαραίτητη η εισαγωγή των διαστημάτων φύλαξης, δηλαδή κενών διαστημάτων μεταξύ του φάσματος δύο διαδοχικών καναλιών που εξασφαλίζουν τον περιορισμό της διασυμβολικής παρεμβολής. Στην OFDM διαμόρφωση τα φασματικά περιεχόμενα δύο διαδοχικών καναλιών μπορούν να υπερκαλύπτονται, αρκεί να ισχύουν συνθήκες ορθογωνιότητας μεταξύ των δύο φερόντων. Η απαίτηση για ορθογωνιότητα εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση

$$\int_a^b \Psi_p(t) \Psi_q^*(t) dt = \begin{cases} K & \text{για } p = q \\ 0 & \text{για } p \neq q \end{cases}$$

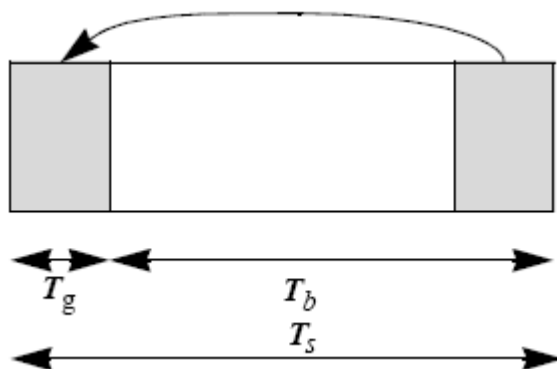
όπου το Ψ αναφέρεται σε ένα σύνολο από σήματα, και το Ψ_p αναφέρεται στο p-ιοστό στοιχείο του συνόλου.

2.5.1.2 Βασικές Παράμετροι

Η διαμόρφωση OFDM είναι κατάλληλη για δίκτυα που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 2-11 GHz, όπου δεν υπάρχει απαίτηση οπτικής επαφής.

Στο πεδίο του χρόνου, η κυματομορφή OFDM προκύπτει από τον Αντίστροφο Μετασχηματισμό Fourier. Η διάρκειά της αντιστοιχεί στο χρόνο T_b , που είναι ο χρόνος μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου. Τα τελευταία T_g μs, ονομάζονται κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix, CP) και αντίγραφό τους τοποθετείται στην αρχή του συμβόλου. Αυτό συμβαίνει για να σχηματιστεί μια αρχική περίοδο μη ωφέλιμης πληροφορίας στην αρχή της χρονοθυρίδας, η οποία θα συγκεντρώνει τα διάφορα αντίγραφα προηγούμενων

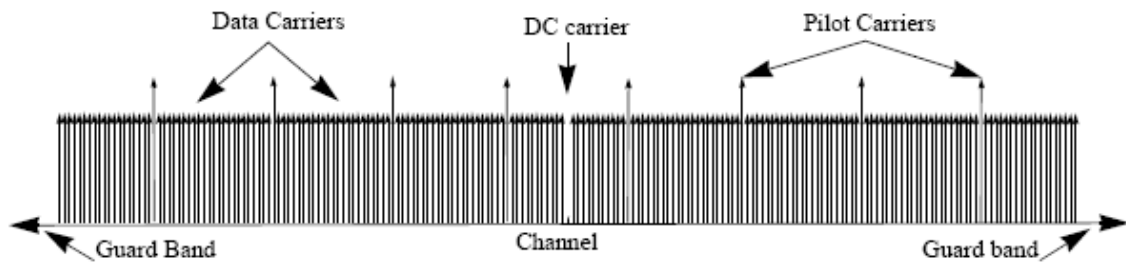
συμβόλων που, λόγω της πολύοδης διάδοσης, έχουν εισχωρήσει στη χρονοθυρίδα του επόμενου συμβόλου. Παράλληλα, συντελεί στην εξασφάλιση της ορθογωνιότητας των καναλιών. Το άθροισμα των δύο περιόδων $T_g + T_b$ αποτελεί την περίοδο T_s που αντιστοιχεί στη διάρκεια του συμβόλου.



Σχήμα 2.5.1.1.1 Δομή της χρονικής θυρίδας OFDM

Μελετώντας το πεδίο της συχνότητας, προκύπτει ένα σύνολο από φέροντα κύματα, το πλήθος των οποίων αντιστοιχεί στο πλήθος των δειγμάτων Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) που έχουν χρησιμοποιηθεί. Τα φέροντα κύματα που συναντώνται μπορεί να είναι:

- Φέροντα δεδομένων: Διαμορφώνουν τη ροή δεδομένων.
- Πιλοτικά φέροντα: Μεταφέρουν πληροφορίες άσχετες με τη ροή της καθαρής πληροφορίας. Αυτό περιλαμβάνει τις ροές δεδομένων διαχείρισης και άλλες πληροφορίες.
- Κενά φέροντα: Δεν επιτελούν κανενός είδους μετάδοση, είναι τα φέροντα που εκπέμπονται κατά τα κενά διαστήματα φύλαξης (guard band) ή κατά τη μεταφορά του φέροντος DC. Τα κενά διαστήματα φύλαξης είναι απαραίτητα για την αποφυγή της παρεμβολής μεταξύ γειτονικών φερόντων (Inter-Carrier-Interference, ICI).

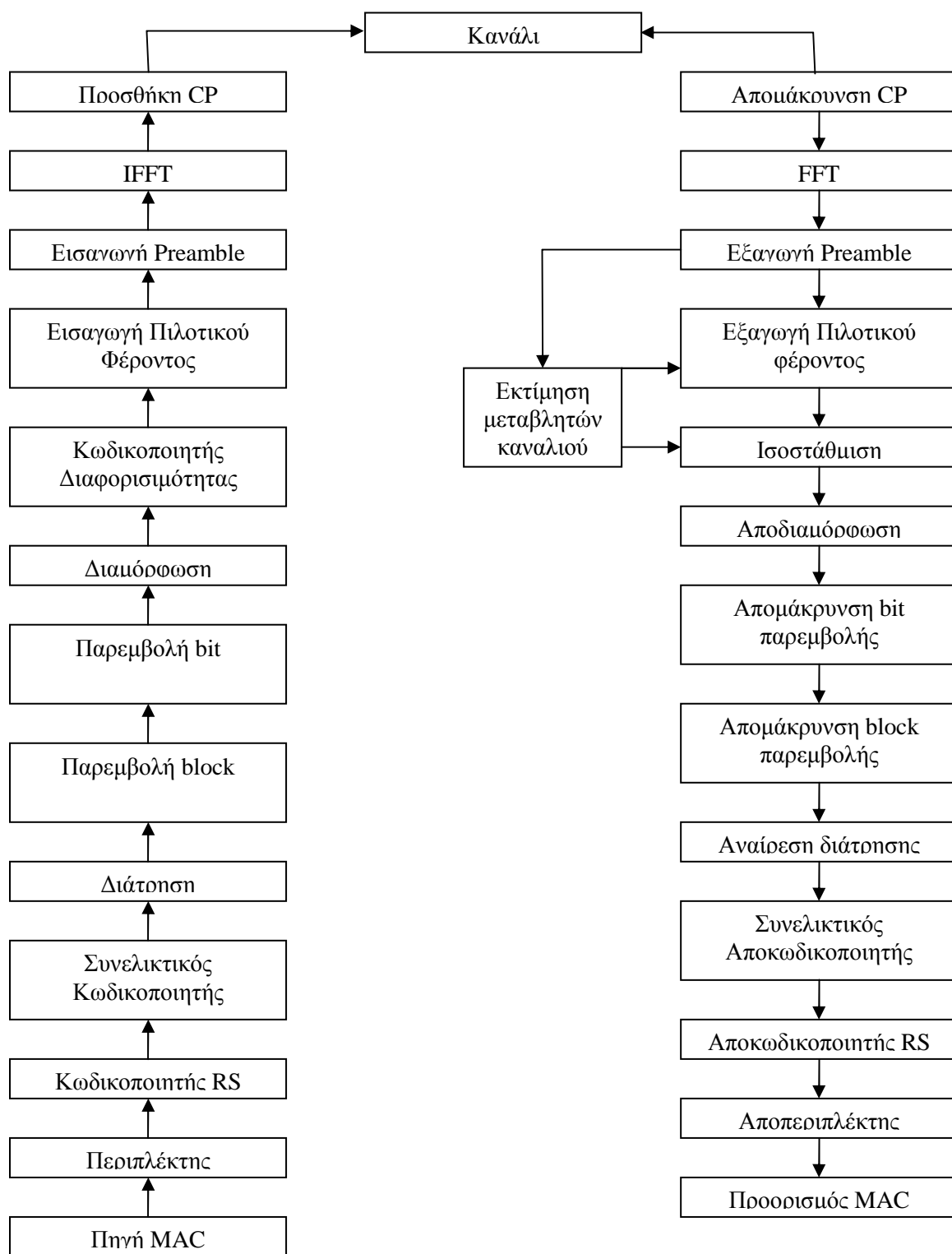


Σχήμα 2.5.1.1.2 Φασματική περιγραφή OFDM

Οι βασικές μεταβλητές και τεχνικές προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν την OFDM διαμόρφωση είναι οι εξής:

- Εύρος Ζώνης (BW): Είναι το ονομαστικό εύρος ζώνης που έχει ανατεθεί στο κανάλι
- Συχνότητα Δειγματοληψίας (F_s): Εξαρτάται από το εύρος ζώνης, είναι μια παραγόμενη μεταβλητή
- Παράμετρος $\frac{F_s}{BW}$: Είναι βασική παράμετρος της OFDM διαμόρφωσης και παίρνει τιμές για κανάλια χωρίς εξουσιοδότηση που είναι πολλαπλάσια των 1.75 MHz $\frac{F_s}{BW}=8/7$, ενώ για κάθε άλλη περίπτωση παίρνει την τιμή $7/6$
- Πλήθος Φέροντων : $N_{FFT} = 256$
- Χρησιμοποιούμενα φέροντα : $N_{used} = 200$
- Απόσταση Υπο-φερόντων: $\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}}$
- Φέροντα δεδομένων = 192
- Φέροντα φύλαξης / Πιλοτικά / DC = 55 / 8 / 1
- Ωφέλιμος Χρόνος : $T_b = 256 \cdot T$ όπου το T ορίζεται από τη σχέση $F_s = \frac{1}{T}$
- Μήκος Κυκλικού προθέματος : $T_g \geq 2\mu s$ για συνθήκες NLOS
- Μήκος Συμβόλου : $T_s = T_g + T_b$
- $\frac{T_g}{T_b} = \{1/4, 1/8, 1/16, 1/32\}$

2.5.2 Περιγραφή συστήματος μετάδοσης πομπού και δέκτη



Σχήμα 2.5.2.1 Αλυσίδα πομπού και δέκτη WiMax τεχνολογίας

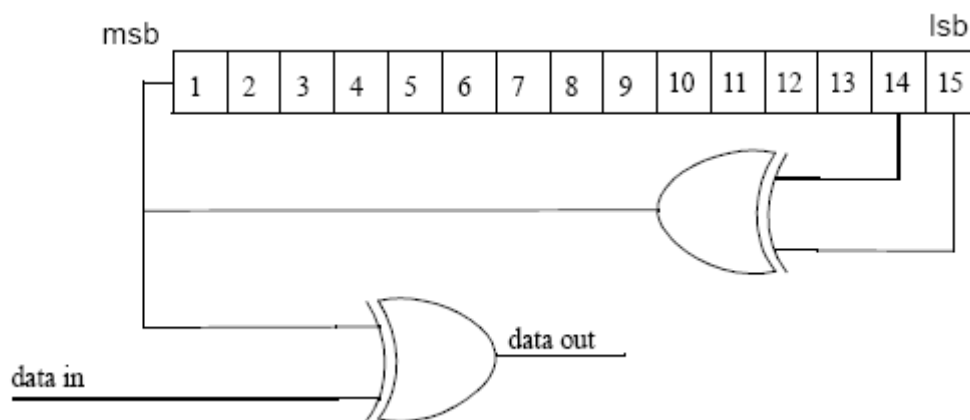
Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζονται οι βαθμίδες ενός πομπού και δέκτη που κάνουν χρήση OFDM διαμόρφωσης. Τα επιμέρους στάδια της επεξεργασίας του σήματος πληροφορίας μέχρι να προκύψει το προς μετάδοση σήμα, αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

2.5.3 Κωδικοποίηση καναλιού

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: Την περίπλεξη, την εκ των προτέρων διόρθωση λαθών και την παρεμβολή. Κατά την εκπομπή, οι παραπάνω λειτουργίες τελούνται με τη σειρά που αναφέρθηκαν, ενώ το αντίθετο συμβαίνει κατά τη λήψη.

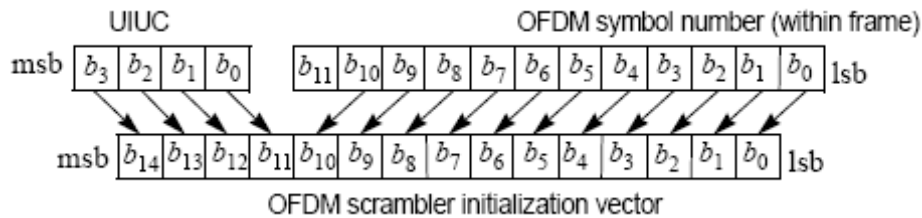
2.5.3.1 Περιπλέκτης (Randomizer / Scrambler)

Ο Περιπλέκτης είναι ένας κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται και στα δύο κανάλια άνω και κάτω ζεύξης χωριστά. Πρόκειται για την πρόσθεση μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων, ώστε η κωδικοποιημένη λέξη που προκύπτει να μην περιέχει μεγάλες σειρές από μηδενικά ή μονάδες, που δυσχεραίνουν την απόδοση της κωδικοποίησης. Είναι στην ουσία μια προληπτική μέθοδος αποφυγής λαθών. Αποτελείται από μια γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών (Pseudo Random Binary Sequence, PRBS) με χαρακτηριστικό πολυώνυμο $1 + X^{14} + X^{15}$.



Σχήμα 2.5.3.1.1 PRBS για κωδικοποίηση δεδομένων

Τα εισαγωγικά πεδία Preambles δεν κωδικοποιούνται. Στο σήμα κάτω ζεύξης, ο κωδικοποιητής αρχικοποιείται με την ακολουθία 100101010000000, ενώ στο σήμα άνω ζεύξης η αρχική ακολουθία είναι η εξής:



Σχήμα 2.5.2.1.2 Διάγραμμα UL αρχικοποίησης του περιπλέκτη OFDM

2.5.3.2 Εκ των προτέρων διόρθωση λαθών

Κατά τη φάση αυτή (Forward Error Correction, FEC) συμβαίνουν κατά σειρά οι εξής ενέργειες: Εφαρμόζεται ο εξωτερικός κώδικας Reed-Solomon και ακολουθεί υποχρεωτικά ένας συνελκτικός εσωτερικός κώδικας. Οι παραπάνω λειτουργίες γίνονται και στα δύο κανάλια, άνω και κάτω ζεύξης. Τα πλεονεκτήματα των συνελκτικών κωδίκων είναι πολλά. Μειώνουν την πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης, μπορούν να παράγουν μια μακρά ακολουθία συνενώνοντας δύο μικρότερες και εξασφαλίζουν άμεση διόρθωση λαθών τόσο σε μεμονωμένα δυαδικά ψηφία, όσο και σε ολόκληρους καταγισμούς ψηφίων.

Ο κωδικοποιητής Reed-Solomon (RS) επιτελεί τη διόρθωση λαθών καταγισμού, διορθώνοντας ολόκληρα bytes δεδομένων. Είναι πολύ χρήσιμος σε ζεύξεις OFDM για την αντιμετώπιση των προβλημάτων λόγω της πολύοδης διάδοσης. Η κωδικοποίηση Reed-Solomon πηγάζει από το συστηματικό RS κώδικα με μήκος συμβόλου $m=8$ ψηφία για τον οποίο ισχύει:

- Μήκος κωδικής λέξης: $N = 2^m - 1 = 255$
- Μήκος πληροφορίας: $K = 2^m - 1 - 2 \cdot T = 239$
- Ικανότητα διόρθωσης λαθών: $T = 8$
- Ελάχιστη απόσταση: $D_{\min} = 2 \cdot T + 1 = 17$

Διαμόρφωση	Συνολικός Ρυθμός Κωδικοποίησης	Μέγεθος ακωδικοποιημένου RS Block	Μέγεθος κωδικοποιημένου RS Block	Διορθωτική Ικανότητα
BPSK	1/2	12 byte	12 byte	0 byte
QPSK	1/2	24 byte	32 byte	4 byte
	3/4	36 byte	40 byte	2 byte
16 QAM	1/2	48 byte	64 byte	8 byte
	3/4	72 byte	80 byte	4 byte
64 QAM	2/3	96 byte	108 byte	6 byte
	3/4	108 byte	120 byte	6 byte

Πίνακας 2.5.2.2.1: Παράμετροι RS κωδικοποίησης ανάλογα με το είδος διαμόρφωσης

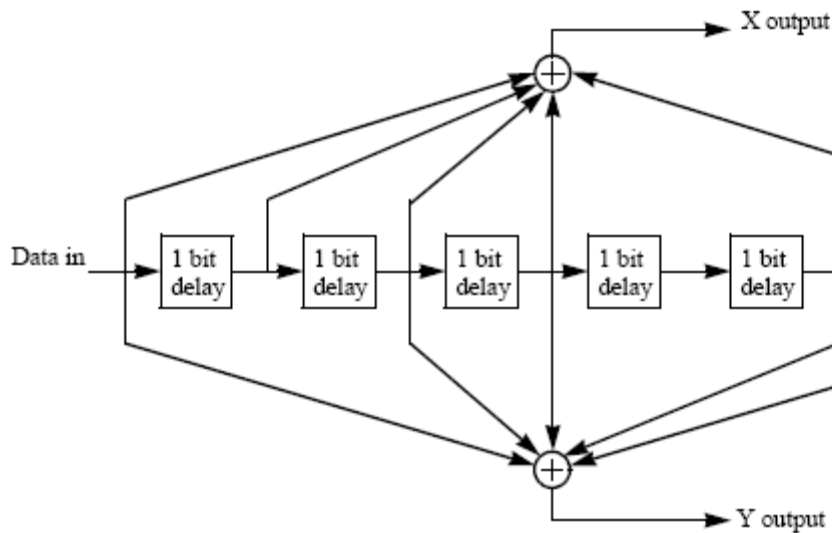
Στη συνέχεια η κωδικοποιημένη λέξη διέρχεται από το συνελκτικό κωδικοποιητή, ο οποίος έχει σταθερό ρυθμό κωδικοποίησης $1/2$ και μήκος περιορισμού ίσο με 6. Αρχικοποιείται και τελειώνει στη μηδενική κατάσταση. Επιδιώκει τη μέγιστη δυνατή πιθανότητα σωστής αποκωδικοποίησης με τη βοήθεια του αλγορίθμου Viterbi. Τα πολυώνυμα γεννήτορες που χρησιμοποιεί για να εξάγει τα δύο ψηφία κωδικοποίησης, είναι τα εξής:

$$G_1 = 1111001_{BIN} \quad \text{για } X$$

$$G_2 = 1011011_{BIN} \quad \text{για } Y$$

Ο αντίστοιχος κωδικοποιητής φαίνεται στο Σχήμα 1.5.2.2.1

Το τελευταίο στάδιο στην κωδικοποίηση καναλιού είναι η χρήση κάποιων προτύπων διάτρησης, τα οποία αφαιρώντας με χρήση δειγματοληψίας κάποιον αριθμό ψηφίων, επιτυγχάνουν συμπίεση της πληροφορίας και συμβάλλουν στην απλοποίηση του αποκωδικοποιητή στο δέκτη. Ο πίνακας 1.5.2.2.2 περιέχει το μέγεθος των blocks και τους ρυθμούς κωδικοποίησης για κάθε διαμόρφωση που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 2.5.2.2.1 Συνελκτικός κωδικοποιητής

Διαμόρφωση	Συνολικός Ρυθμός Κωδικοποίησης	Μέγεθος ακωδικοποιήτου Block	Μέγεθος κωδικοποιημένου Κώδικας Block	Κώδικας RS	Ρυθμός CC Κωδικοποίησης
QPSK	1/2	24 bytes	48 bytes	(32,24,4)	2/3
	3/4	36 bytes	48 bytes	(40,36,2)	5/6
16 QAM	1/2	48 bytes	96 bytes	(64,48,8)	2/3
	3/4	72 bytes	96 bytes	(80,72,4)	5/6
64 QAM	2/3	96 bytes	144 bytes	(108,96,6)	3/4
	3/4	108 bytes	144 bytes	(120,108,6)	5/6

Πίνακας 2.5.2.2.2: Κωδικοποίηση καναλιού ανάλογα με διαμόρφωση

Στο στάδιο αυτό, μπορούν να συμπεριληφθούν προαιρετικά δύο είδη επιπλέον κωδικοποίησης. Η πρώτη είναι η μέθοδος κωδικοποίησης με χρήση του Block Turbo Coding (BTC) κώδικα, ο οποίος βασίζεται στο γινόμενο δύο απλών κωδικών αντικειμένων, που μπορεί να είναι δυαδικά επεκτεταμένοι κώδικες Hamming ή κώδικες ελέγχου ισοτιμίας. Το δεύτερο είδος κωδικοποίησης που μπορεί να συμπεριληφθεί είναι ο συνελκτικός κώδικας Convolutional Turbo Code (CTC) ο οποίος κάνει χρήση ενός διπλού δυαδικού συστηματικού συνελκτικού κώδικα, που χρησιμοποιεί κυκλική αναδρομή. Η λειτουργία των παραπάνω σχημάτων κωδικοποίησης δεν θα αναλυθεί περαιτέρω, αφού η χρήση τους είναι προαιρετική και η περιγραφή τους υπερβαίνει το στόχο της παρούσας διπλωματικής. Σημειώνεται, ότι στην ασύρματη μετάδοση υπό δύσκολες καιρικές συνθήκες, τα παραπάνω σχήματα

κωδικοποίησης κρίνονται απαραίτητα σε εφαρμογές όπου η απαίτηση για αξιοπιστία είναι υψηλή.

2.5.4 Διαφύλλωση

Οι κώδικες διόρθωσης λαθών είναι αποτελεσματικοί όταν τα λάθη μετάδοσης εμφανίζονται σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Η απόδοσή τους είναι προβληματική όταν τα λάθη εμφανίζονται κατά ριπές, δηλαδή όταν ολόκληροι συνεχόμενοι καταιγισμοί δεδομένων είναι κατεστραμμένοι. Τέτοιου τύπου λάθη δημιουργούν διαλείψεις. Η *Διαφύλλωση* (Interleaving) χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η συγκέντρωση των σφαλμάτων σε ομάδες. Η βασική ιδέα είναι οι αντιμεταθέσεις των συμβόλων που παράγει κάποιος κώδικας.

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται δύο αντιμεταθέσεις των δεδομένων μέσα στο block, οι οποίες είναι πλήρως αντιστρέψιμες στο δέκτη. Η πρώτη, γνωστή ως παρεμβολή block, έχει ως στόχο τη μεταφορά γειτονικών ψηφίων, σε μη γειτονικά υπο-φέροντα. Αυτό αποσκοπεί στην αποφυγή καταστροφής ολόκληρων καταιγισμών, λόγω του φαινομένου της επιλεκτικής εξασθένησης του καναλιού ανάλογα με τη συχνότητα. Η δεύτερη αντιμετάθεση που πραγματοποιείται αναφέρεται ως παρεμβολή ψηφίων, αφού αντιμετατίθενται γειτονικά ψηφία, εντός του ίδιου block, σε θέσεις υψηλότερης ή χαμηλότερης προτεραιότητας. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται μακρές ακολουθίες ψηφίων χαμηλής αξιοπιστίας και σημαντικότητας. Η δεύτερη αντιμετάθεση αναφέρεται αποκλειστικά σε διαμόρφωση 16-QAM ή 64-QAM.

Οι κανόνες των δύο αντιμεταθέσεων είναι οι εξής:

$$m = \frac{N_{cbps}}{16} \cdot k_{\text{mod}(16)} + \text{floor}\left(\frac{k}{16}\right) \quad \text{για } k = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

$$j = s \cdot \text{floor}\left(\frac{m}{s}\right) + \left(m + N_{cbps} - \text{floor}\left(\frac{16 \cdot m}{N_{cbps}}\right) \right)_{\text{mod } s} \quad \text{για } m = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

Η διαδικασία αναίρεσης της παρεμβολής στο δέκτη, είναι και αυτή σαφώς ορισμένη από δύο κανόνες που κάνουν το παραπάνω αποτέλεσμα πλήρως αντιστρεπτό:

$$m = s \cdot \text{floor}\left(\frac{j}{s}\right) + \left(j + \text{floor}\left(\frac{16 \cdot j}{N_{cbps}}\right) \right)_{\text{mod } s} \quad \text{για } j = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

$$k = 16 \cdot m - (N_{cbps} - 1) \cdot \text{floor}\left(\frac{16 \cdot m}{N_{cbps}}\right) \quad \text{για } m = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

Η τιμή N_{cbps} αναφέρεται στο πλήθος των κωδικοποιημένων ψηφίων ανά παρεμβαλλόμενο block και εξαρτάται από το είδος της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης:

Modulation	Coded bits per bit interleaved block (N_{cbps})		
	Default (4 subchannels)	2 subchannels	1 subchannel
QPSK	384	192	96
16-QAM	768	384	192
64-QAM	1152	576	288

Πίνακας 2.5.2.2.3: Μέγεθος παρεμβαλλόμενων block

2.5.5 Διαμόρφωση

Η διαμόρφωση που ακολουθείται για τα σήματα πληροφορίας, είναι ψηφιακή διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων. Στην περίπτωση που ακολουθείται σηματοδοσία M επιπέδων, ο συρμός των ψηφίων του σήματος πληροφορίας $m(t)$ δεν παίρνει τιμές $\{0,1\}$, αλλά όποια τιμή περιέχεται στο σύνολο $\{0,1,\dots,M-1\}$. Για το M ισχύει: $M=2^k$ όπου k =αριθμός bits/symbol.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων είναι η οικονομία φάσματος. Η πληροφορία μεταδίδεται με το ρυθμό μετάδοσης των ψηφίων $R_b = 1/T_b$, όπου T_b είναι η διάρκεια του ενός bit. Αντιθέτως, το εύρος φάσματος είναι

ανάλογο του ρυθμού μετάδοσης συμβόλων $R_s = 1/T_s$, όπου T_s είναι η διάρκεια του ενός συμβόλου. Για κάθε σύμβολο μεταδίδεται ένας μόνο παλμός.

Το διαμορφωμένο προς αποστολή σήμα έχει τη μορφή:

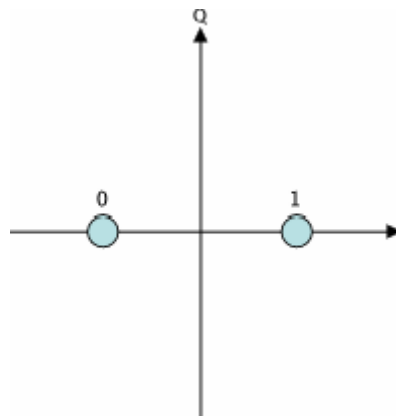
$$s(t) = A_c \cdot \cos\left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M} m(t)\right]$$

όπου $m(t) \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ και A_c συμβολίζει το πλάτος του σήματος.

Στην περίπτωση όπου $M=2$, προκύπτει η διαμόρφωση BPSK όπου το σήμα μπορεί να πάρει δύο δυνατές τιμές:

$$s(t) = \begin{cases} A_c \cdot \cos(2\pi f_c t) & \text{για } m(t) = 0 \\ A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \pi) = -A_c \cdot \cos(2\pi f_c t) & \text{για } m(t) = 1 \end{cases}$$

Τα πιθανά ενδεχόμενα δείγματα που προκύπτουν κατά τη λήψη του σήματος απεικονίζονται στα διαγράμματα αστερισμού. Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν έναν εποπτικό τρόπο για να αποφασιστεί το λαμβανόμενο ενδεχόμενο, απεικονίζοντας τα πιθανά ενδεχόμενα (με τη μορφή αστεριών) καθώς και τις περιοχές εμβέλειας του κάθε ενδεχομένου. Η ισχύς του κάθε σήματος είναι ανάλογη της απόστασης του σημείου από την αρχή των αξόνων. Η απόφαση για το ποιο ενδεχόμενο του σήματος στάλθηκε εξαρτάται από την απόσταση του λαμβανόμενου σήματος από τα σημεία αστερισμού. Το σημείο αστερισμού που βρίσκεται εγγύτερα στο λαμβανόμενο σήμα είναι το ενδεχόμενο που έχει σταλεί. Για τη διαμόρφωση BPSK το παραπάνω διάγραμμα έχει τη μορφή:



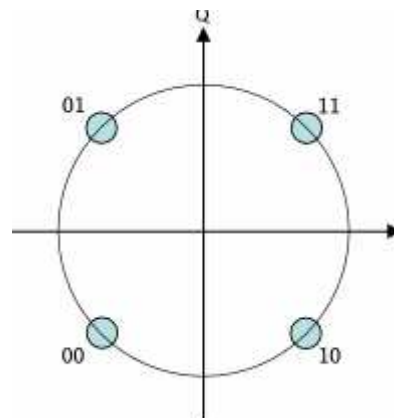
Σχήμα 2.5.5.1 Διάγραμμα αστερισμού BPSK διαμόρφωσης.

Αν ένα δείγμα βρίσκεται στο αριστερό ημιεπίπεδο, τότε έχει σταλεί 0, ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχει σταλεί 1. Σε ένα τέτοιο σχήμα διαμόρφωσης, επιτυγχάνεται η χειρότερη δυνατή εκμετάλλευση εύρους ζώνης και για το λόγο αυτόν δεν επιλέγεται ως διαμόρφωση φυσικού στρώματος στο πρότυπο 802.16a. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα λάθους είναι μικρή αφού υπάρχουν μόνο δύο περιοχές απόφασης, όσα και τα ενδεχόμενα που μπορεί να σταλούν.

Με μικρή αύξηση στην πολυπλοκότητα και την πιθανότητα λάθους, συνιστάται η αύξηση του αριθμού των ψηφίων ανά σύμβολο, επιλέγοντας $M=4$ και υλοποιώντας τη διαμόρφωση QPSK (Quadrature PSK), όπου υπάρχει η δυνατότητα αποστολής τεσσάρων διαφορετικών συμβόλων. Το διαμορφωμένο σήμα έχει τη μορφή

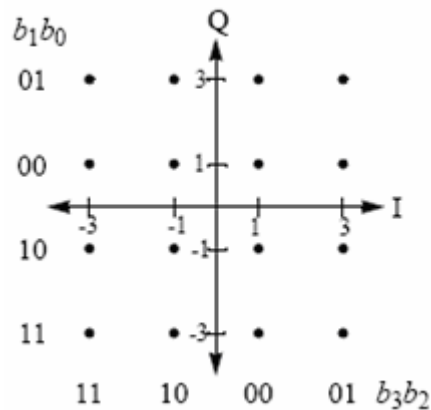
$$s(t) = \begin{cases} A_c \cdot \cos(2\pi f_c t) & , m(t) = 0 \\ A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}) = -A_c \cdot \sin(2\pi f_c t) & , m(t) = 1 \\ A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \pi) = -A_c \cdot \cos(2\pi f_c t) & , m(t) = 2 \\ A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{2}) = A_c \cdot \sin(2\pi f_c t) & , m(t) = 3 \end{cases}$$

Το διάγραμμα αστερισμού που προκύπτει εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Μια τέτοια διαμόρφωση, αν και έχει σχεδόν διπλάσια πιθανότητα λάθους συμβόλου από αυτήν της BPSK, είναι προτιμότερη, λόγω των φασματικών πλεονεκτημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα λάθους του ενός ψηφίου παραμένει ίδια και στις δύο διαμορφώσεις.

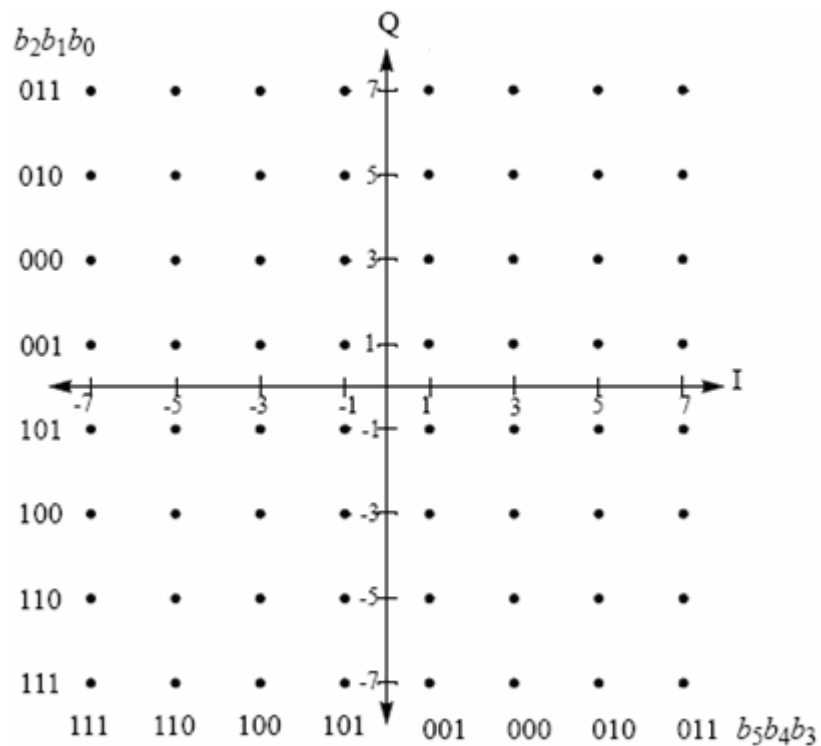


Σχήμα 2.5.5.2 Διάγραμμα αστερισμού QPSK Διαμόρφωσης.

Αν, εκτός από τη φάση, μεταβληθεί και το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος, τότε τα διαγράμματα αστερισμού που προκύπτουν έχουν σημεία αστερισμού, πάνω σε ομόκεντρους κύκλους. Έτσι, προκύπτουν τα σχήματα διαμόρφωσης QAM (Quadrature amplitude modulation). Στο φυσικό στρώμα του 802.16a, χρησιμοποιούνται οι διαμορφώσεις 16-QAM και 64-QAM τα διαγράμματα των οποίων εικονίζονται στις ακόλουθες εικόνες



Σχήμα 2.5.5.3 Διάγραμμα αστερισμού 16-QAM Διαμόρφωσης.

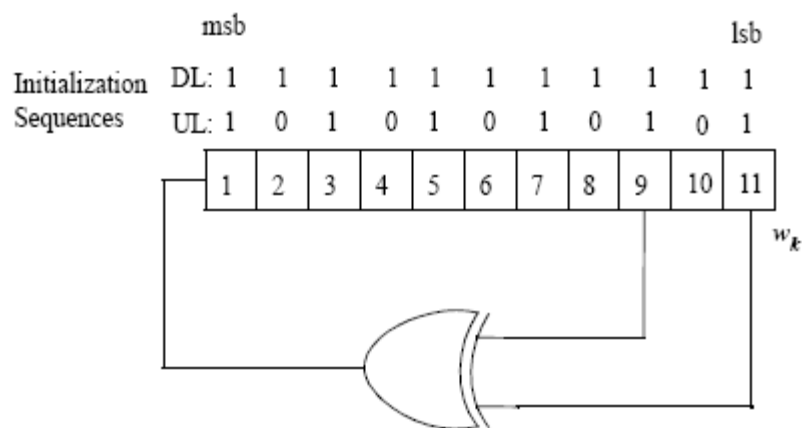


Σχήμα 2.5.5.4 Διάγραμμα αστερισμού 64-QAM Διαμόρφωσης.

Όπως θα διαπιστωθεί και από την περιγραφή των τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων που ακολουθεί, το είδος της επιλεγόμενης διαμόρφωσης δεν είναι μοναδικό αλλά οφείλει να είναι προσαρμόσιμο στις συνθήκες του φυσικού στρώματος μετάδοσης, με κύριο γνώμονα πάντοτε τις απαιτήσεις σε αξιοπιστία και σε ποιότητα υπηρεσιών που έχει η κάθε ζεύξη. Επομένως, δεν υπάρχει προτεινόμενο είδος διαμόρφωσης, αλλά συνιστώμενο για κάθε συνδυασμό ποιότητας- συνθηκών μετάδοσης.

2.5.6 Πιλοτικά φέροντα

Χρησιμοποιούνται 8 πιλοτικά φέροντα τα οποία δεν μεταφέρουν δεδομένα, αλλά έχουν ως λειτουργία τον υπολογισμό των παραμέτρων απόδοσης του καναλιού και τη διατήρηση συγχρονισμού. Η διαμόρφωση των πιλοτικών σημάτων είναι BPSK και γίνεται από μια ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία. Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει μετάδοση για τα διαστήματα φύλαξης και το υπο-φέρον DC.

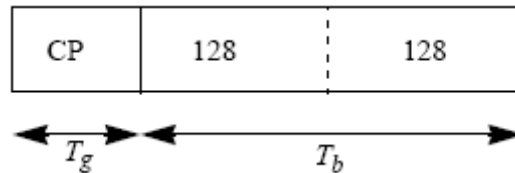


Σχήμα 2.5.6.1 Διαμορφωτής πιλοτικών σημάτων

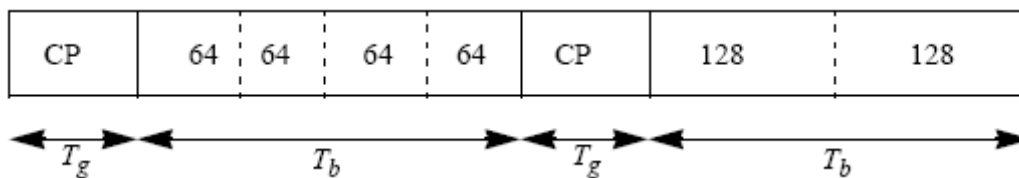
2.5.7 Τοποθέτηση Preamble

Η προσάρτηση του Preamble γίνεται στο πεδίο του χρόνου ή και της συχνότητας. Χρησιμοποιείται για την παροχή λειτουργιών συγχρονισμού, όπως ο ορισμός μιας καθολικής ώρας για το σύστημα καθώς και για τον υπολογισμό των στατιστικών χρήσης του καναλιού.

Υπάρχουν δύο είδη Preamble. Το Preamble μεγάλου μήκους, που χρησιμοποιείται στα υποπλαίσια κάτω ζεύξης και στα μηνύματα αρχικού συντονισμού και το Preamble μικρού μήκους που χρησιμοποιείται στους καταιγισμούς άνω ζεύξης και προαιρετικά στους καταιγισμούς κάτω ζεύξης.



Σχήμα 2.5.7.1 Preamble άνω ζεύξης, μικρού μήκους



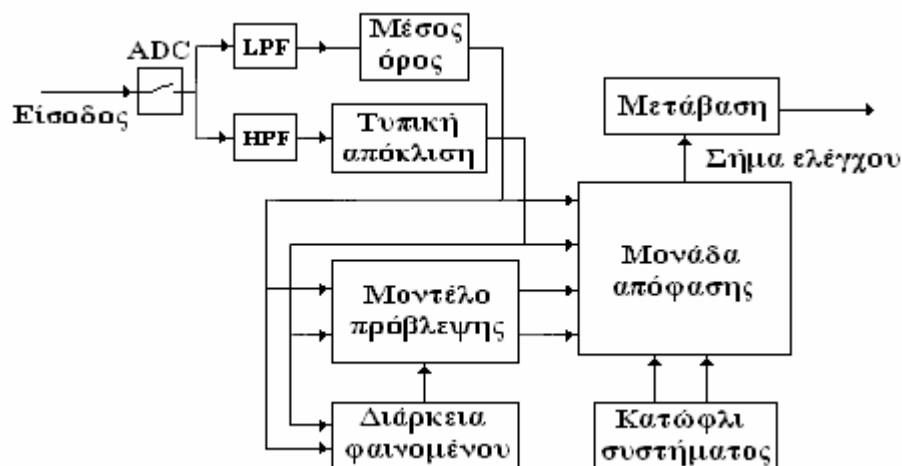
Σχήμα 2.5.7.2 Preamble κάτω ζεύξης, μεγάλου μήκους

2.6 Εφαρμογή Τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων στο Φυσικό Στρώμα

Στην προηγούμενη ανάλυση παρουσιάστηκε πλήθος διαθέσιμων ρυθμών κωδικοποίησης και είδη διαμορφώσεων. Η τελική επιλογή εξαρτάται από το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών που απαιτείται. Στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται προσαρμοστικά συστήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, που έχουν ως στόχο τη διατήρηση του προσυμφωνημένου ανά σύνδεση, ποσοστού λαθών. Παράλληλα, το περιβάλλον των δικτύων WMNs εισάγει δύο σημαντικούς παράγοντες μείωσης της αξιοπιστίας της ζεύξης. Ο πρώτος είναι το ασύρματο περιβάλλον μετάδοσης, το οποίο ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες μπορεί να καταστήσει την επικοινωνία πολύ δύσκολη. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η επικοινωνία του κάθε κόμβου με τους γειτονικούς του, σε ένα σύστημα πολλαπλών χρηστών και κατεπέκταση πολλαπλών εκπεμπόμενων σημάτων που μπορεί να απευθύνονται σε διαφορετικούς χρήστες ή και στον ίδιο (συστήματα MIMO). Όλα αυτά δυσχεραίνουν την επικοινωνία και δημιουργούν την ανάγκη για χρήση πολύ

αξιόπιστων συνθηκών μετάδοσης, όταν αυτό δεν μπορεί να εξασφαλιστεί από το φυσικό μέσο μετάδοσης.

Έτσι, στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών υιοθετούνται προσαρμοστικές τεχνικές που αποσκοπούν στην παροχή επιπλέον αξιοπιστίας όταν αυτό χρειάζεται. Ως αντάλλαγμα, προσφέρεται επικοινωνιακό φάσμα και υπολογιστική ισχύς των κόμβων, δηλαδή οι τηλεπικοινωνιακοί πόροι του δικτύου.



Σχήμα 2.6.1 Λειτουργικό Διάγραμμα των τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων

Τα βασικά βήματα που χρησιμοποιούν οι τεχνικές άμβλυνσης φαίνονται στο παραπάνω διάγραμμα και αποτελούνται από τα εξής διακριτά βήματα:

- Παρατήρηση / καταγραφή της ποιότητας της ζεύξης εκτελώντας διαρκείς μετρήσεις των συνθηκών διάδοσης.
- Παροχή μιας βραχυπρόθεσμης εκτίμησης / πρόβλεψης της συμπεριφοράς και της σχετικής διάρκειας της επόμενης κατάστασης του δορυφορικού καναλιού.
- Καθορισμός / προσαρμογή των παραμέτρων του συστήματος με βάση την προηγούμενη βραχυπρόθεσμη εκτίμηση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές και προτείνεται ο τρόπος εφαρμογής τους στη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία δικτύου με κύριο στόχο τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας της ζεύξης.

2.6.1 Τεχνικές ελέγχου της ισοδύναμης ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος

Η *ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ* (Effective isotropic radiated power, EIRP) είναι το βασικότερο χαρακτηριστικό κάθε πομπού και ορίζεται ως το γινόμενο της εκπεμπόμενης ισχύος από την κεραία επί το κέρδος της

$$EIRP = G_T \cdot P_T$$

Μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος του EIRP μεταβάλλοντας το κέρδος της κεραίας ή την εκπεμπόμενη ισχύ. Στην περίπτωση των δικτύων WMN, η αυξομείωση της εκπεμπόμενης ισχύος οδηγεί σε μεταβολή της τοπολογίας του συστήματος, αφού περισσότεροι ή λιγότεροι κόμβοι βρίσκονται στη νέα εμβέλεια του πομπού. Παράλληλα, αυτό προκαλεί παρεμβολές στους γειτονικούς κόμβους, μειώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου.

Από την άλλη, στην περίπτωση όπου επιλεγεί η μεταβολή του κέρδους της κεραίας, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με στροφή προς συγκεκριμένη κατεύθυνση του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Όμως, κάτι τέτοιο κάνει το σύστημα πολύ δύσκολο στη διαχείρισή του, αφού οι χρησιμοποιούμενοι κόμβοι χειρίζονται πολλαπλά κανάλια και δέχονται δεδομένα από πλήθος άλλων κόμβων. Επομένως, σε ένα ad hoc δίκτυο που πρέπει να αποτελείται από απλούς σε τεχνολογία και ανεξάρτητους στη λειτουργία κόμβους και, παράλληλα, να διατηρεί μια τόσο σύνθετη τοπολογία πλέγματος με τους γειτονικούς του κόμβους, η λύση της EIRP προσαρμογής δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη. Παρουσιάστηκε για λόγους πληρότητας, καίτοι η προτυποποίηση του WiMax δεν προϋποθέτει κάποιον τέτοιο έλεγχο.

2.6.2 Προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης

Οι προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης αναφέρονται στην τροποποίηση του τρόπου επεξεργασίας και μετάδοσης των σημάτων, όταν η ποιότητα της ζεύξης υποβαθμίζεται και η πιθανότητα λάθους κινδυνεύει να αυξηθεί πάνω από τα αποδεκτά επίπεδα, όπως αυτά καθορίζονται από την προσυμφωνημένη ποιότητα της σύνδεσης. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες προσαρμοστικών τεχνικών: η προσαρμοστική

διαμόρφωση, η προσαρμοστική κωδικοποίηση και η μείωση του ρυθμού δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται επιγραμματικά ο τρόπος που αυτές υλοποιούνται.

➤ *Προσαρμοστική Διαμόρφωση*

Η προσαρμοστική διαμόρφωση αυξάνει τον απαιτούμενο λόγο (E_b/n_0) για συγκεκριμένη στάθμη BER μειώνοντας τη φασματική απόδοση σε bps/Hz. Αυτό συμβαίνει όταν ο σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται λόγω των φαινομένων διάδοσης. Τα φαινόμενα αυτά αναφέρονται σε ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και θα παρουσιαστούν με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Η φασματική απόδοση αναφέρεται στο πλήθος των μεταδιδόμενων ψηφίων προς το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης RF. Αύξηση της φασματικής απόδοσης επιτυγχάνεται με τη μετάδοση περισσότερων ψηφίων στο διατιθέμενο εύρος ζώνης RF. Όπως προέκυψε και κατά την παρουσίαση των σχημάτων διαμόρφωσης, όσο αυξάνεται η απόδοση του φάσματος, τόσο μειώνεται η στάθμη BER, γιατί γίνεται πιο δύσκολη η απόφαση στο δέκτη για το ψηφίο που εστάλη. Αύξηση φασματικής απόδοσης σημαίνει αύξηση του M στο σχήμα διαμόρφωσης M-PSK ή M-QAM ($M=2,4,8,16,32,64$).

Σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση υπό συνθήκες καθαρού ουρανού χρησιμοποιούνται 16-PSK, 64-PSK, 256-QAM ενώ χρησιμοποιούνται πιο ανθεκτικές και εύρωστες διαμορφώσεις BPSK, QPSK, 16QAM όταν υπάρχουν ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Συνεπώς, με την τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης επιτυγχάνεται η τήρηση των απαιτούμενων ορίων αξιοπιστίας, ενώ παράλληλα μειώνεται το πλήθος των μεταδιδόμενων ψηφίων ανά σύμβολο και μένει σταθερός ο ρυθμός μετάδοσης και το εύρος ζώνης RF. Η χρήση της παραπάνω τεχνικής προβλέπεται από το WiMax και η εφαρμογή της είναι προαιρετική, εφόσον ενσωματωθεί σύστημα ελέγχου κλειστού ή ανοιχτού βρόχου που θα μελετά την κατάσταση της ζεύξης στη θέση του κάθε κόμβου. Στα επόμενα κεφάλαια, παρατίθεται η θεωρητική περιγραφή ενός τέτοιου συστήματος που θα πραγματοποιεί τη μελέτη και πρόβλεψη των συνθηκών διάδοσης.

➤ Προσαρμοστική Κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων σε ψηφία προσθέτοντας πλεονάζοντα ψηφία στο σήμα πληροφορίας. Όσο αυξάνουν τα πλεονάζοντα ψηφία, η πιθανότητα λάθους μειώνεται αλλά το απαιτούμενο εύρος ζώνης αυξάνεται. Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί κωδικοποίησης που προδιαγράφονται και χρησιμοποιούνται από το WiMax. Αυτοί εξετάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο και είναι η χρήση πεδίων FEC (Forward Error Correction), το σύστημα Αυτόματης Αίτησης Επανάληψης ARQ (Automatic Repeat Request) και η χρήση αποτελεσματικών κωδίκων διόρθωσης λαθών, που αποσκοπούν στην καταπολέμηση τυχαίως κατανεμημένων λαθών που οφείλονται στο θερμικό θόρυβο. Με τη χρήση συχνοτήτων υψηλότερων των 10GHz, τα λάθη στις ασύρματες ζεύξεις οφείλονται στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και παρουσιάζονται με παροξυσμικό τρόπο (bursts) και όχι ανεξάρτητα. Για το λόγο αυτό, η διαθεσιμότητα μιας δορυφορικής ζεύξης αυξάνεται με κατάλληλη μεταβολή του ρυθμού κωδικοποίησης.

Τα πιο συνηθισμένα σχήματα κωδικοποίησης είναι οι αλυσιδωτοί κώδικες (Concatenated Codes), δηλαδή συνδυασμός συμπαγών κωδίκων με τους συνελκτικούς (block codes & convolutional codes). Το πιο διαδεδομένο παράδειγμα χρήσης concatenated codes είναι ο συνδυασμός των κωδίκων Reed&Solomon (block) ως εξωτερικών (outer) κωδίκων και συνελκτικής κωδικοποίησης στον εσωτερικό (inner) κώδικα με αποκωδικοποίηση Viterbi στον δέκτη. Μια τελευταία εξέλιξη στη περιοχή των κωδίκων είναι η χρήση των παραλλήλων αλυσιδωτών συνελκτικών κωδίκων με χρήση της τεχνικής interleaving, που είναι γνωστοί ως κώδικες turbo (turbo codes). Το σύνολο αυτών των τεχνολογιών εφαρμόζεται στο WiMax και την εισαγωγή μεγαλύτερης καθυστέρησης αποκωδικοποίησης και υπολογιστικού κόστους, το σημαντικό κέρδος κωδικοποίησης έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των επικοινωνιών που λειτουργούν σε ένα τόσο μεταβλητό περιβάλλον, όπως αυτό των ad hoc και mesh δικτύων.

➤ *Μείωση του ρυθμού δεδομένων*

Η τεχνική Data Rate Reduction (DDR) σχετίζεται με τη μείωση του ρυθμού δεδομένων πληροφορίας όταν το σύστημα ελέγχου που παρακολουθεί το κανάλι προβλέψει πιθανή μεγάλη διάλειαση. Το εύρος ζώνης και ο συγχρονισμός στην τιμή του BER κατωφλίου παραμένουν σταθερά συνδυάζοντας το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας με μια ψευδοτυχαία ακολουθία κατάλληλου ρυθμού. Η εφαρμογή της DDR εξαρτάται από το πόσο η υπηρεσία μπορεί να αντέξει τη μείωση του ρυθμού πληροφορίας. Αυτό μπορεί να γίνει σε μετάδοση video και δεδομένων, γιατί τα παραπάνω στρώματα δεν επηρεάζονται καθόλου, ενώ σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως η μετάδοση φωνής η χρήση του δε συνιστάται.

2.6.3 Τεχνικές διαφορικής λήψης

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη διαφορικής λήψης. Η τεχνική αυτή αναφέρεται στην ταυτόχρονη λήψη του σήματος μέσω δύο, ή σπανιότερα μέσω τριών, διαφορετικών οδεύσεων. Επιλέγεται το σήμα εκείνο που έχει την καλύτερη σηματοθορυβική σχέση. Τα είδη διαφορικής λήψης είναι: χώρου, συχνότητας, τροχιάς και χρόνου. Στη διαφορική λήψη χώρου, υπάρχουν δύο κεραίες λήψης του εκπεμπόμενου σήματος και επιλέγεται το αντίγραφο εκείνο του σήματος που δέχθηκε τις λιγότερες διαλείψεις. Στη διαφορική λήψη συχνότητας, τα αντίγραφα του σήματος εκπέμπονται και λαμβάνονται σε δύο διαφορετικές συχνότητες, αξιοποιώντας τη διαφορετική ανταπόκριση της κάθε ζώνης συχνοτήτων στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Στη διαφορική λήψη χρόνου λαμβάνονται αντίγραφα του σήματος χρονικώς διαχωρισμένα, ενώ στη διαφορική λήψη τροχιάς, λαμβάνονται αντίγραφα σήματος από διαφορετικούς σταθμούς εκπομπής και επιλέγεται το βέλτιστο.

Είναι φανερό, ότι τεχνικές διαφορικής λήψης, είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστούν στα WMNs δίκτυα, αφού αυτό θα απαιτούσε την ύπαρξη διπλού εξοπλισμού ή διπλού φάσματος. Κάτι τέτοιο γίνεται ασύμφορο, όταν αναφερόμαστε στη δυναμική ανάπτυξη ενός δικτύου του οποίου το μέγεθος και η πυκνότητα δεν είναι σταθερά. Η

χρήση αυτών των τεχνικών δεν είναι καθόλου επεκτάσιμη και για αυτό δεν την συναντάμε στα ad hoc δίκτυα.

Κεφάλαιο 3: Ασύρματη Διάδοση σημάτων

Το κυριότερο αντικείμενο μελέτης κατά την ασύρματη εκπομπή και λήψη σημάτων, είναι αυτό της διάδοσης των σημάτων μέσω του αέρα. Αυτό συμβαίνει γιατί η συμπεριφορά του ασύρματου μέσου είναι απρόβλεπτη και δεν ελέγχεται από τεχνολογικά μέσα. Κάθε ζώνη συχνοτήτων επηρεάζεται από φαινόμενα διάδοσης αλλά κατά διαφορετικό τρόπο. Αρχικά, παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών σημάτων που είναι κοινά για όλα τα σήματα. Στη συνέχεια, μελετούνται οι τρόποι διάδοσης και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το διαδιδόμενο σήμα ανάλογα με τη συχνότητα ταλάντωσης που έχει. Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, αναλύεται το φαινόμενο της βροχόπτωσης αφού αυτό αποτελεί την πιο συνηθισμένη αιτία διαλείψεων και παρουσιάζεται το πως η διάρκεια της βροχής μπορεί να προβλεφθεί προς όφελος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Τελικός στόχος είναι η εξάλειψη της απώλειας πακέτων λόγω βροχόπτωσης καταφέροντας να προβλέψουμε τα χαρακτηριστικά της.

3.1 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

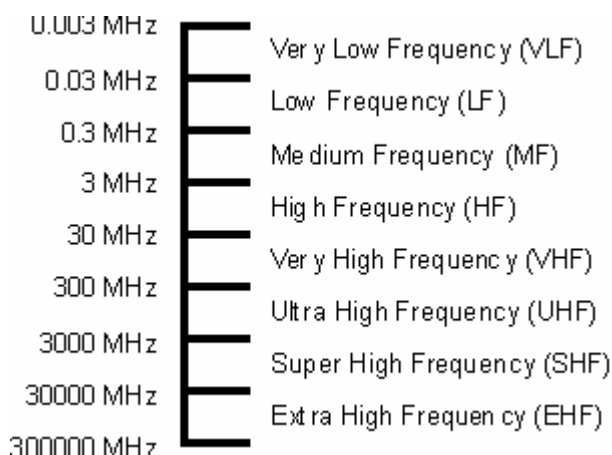
Η διαφορές δυναμικού στα άκρα μιας κεραίας παράγουν φορτία που αποτελούν ένα ηλεκτρικό κύμα που διαδίδεται σε ευθείες γραμμές μέσα στον κενό χώρο. Η προσανατολισμένη κίνηση των φορτίων συντελεί στο σχηματισμό ρεύματος από όπου πηγάζει και η μαγνητική φύση των διαδιδόμενων σημάτων. Επόμενο είναι, κάθε παρεμβολή μορίων ατμόσφαιρας που συναντά το κύμα στη διαδρομή του προς τον δέκτη να προκαλεί μεταβολή του σήματος δηλαδή εκτροπή ή εξασθένηση αυτού. Κάθε κύμα έχει ένα βασικό χαρακτηριστικό που τα διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα και του προσδίδει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Πρόκειται για τη συχνότητα του κύματος ή το μήκος κύματος αυτού αφού είναι δύο άμεσα συνδεδεμένα μεγέθη (αντιστρόφως ανάλογη σχέση).

Κύματα με μεγάλο μήκος κύματος, δηλαδή χαμηλή συχνότητα, έχουν τη δυνατότητα να περνούν πάνω από τα εμπόδια καθώς ταλαντώνονται αποκτώντας μεγάλη εμβέλεια καθώς και τη δυνατότητα να διαδίδονται σε συνθήκες μη οπτικής επαφής. Όμως,

ακριβώς επειδή τα κύματα αυτά διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις, δέχονται πολλαπλές ανακλάσεις και φτάνουν στο δέκτη εξασθενημένα. Παράλληλα, ο δέκτης λαμβάνει πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου σήματος που είναι τα προϊόντα των πολλαπλών ανακλάσεων. Σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, έχουμε να αντιμετωπίσουμε φαινόμενα πολλαπλών διοδεύσεων.

Αντίστοιχα, κύματα υψίσυχνα, με μικρό μήκος κύματος απαιτούν συνθήκες οπτικής επαφής για τη διάδοσή τους, αφού το μικρό μήκος κύματος δεν καταφέρνει να υπερνικήσει τα παρεμβαλλόμενα εμπόδια. Συγκρουόμενα αυτά τα κύματα με τα μόρια της ατμόσφαιρας εξασθενούν σε μεγάλο βαθμό και εκδηλώνεται το φαινόμενο της απορρόφησης από τα ατμοσφαιρικά αέρια.

Από τα παραπάνω προκύπτει η άμεση εξάρτηση των χαρακτηριστικών ενός σήματος από τη συχνότητα εκπομπής του. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση των τρόπων διάδοσης και των διαλείψεων, εξετάζεται ξεχωριστά για κάθε ζώνη συχνοτήτων.



Σχήμα 3.1.1 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

3.1.1 Τρόποι διάδοσης σημάτων

Οι συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό στρώμα κατά τη μετάδοση των σημάτων είναι καθοριστικές για την κατάσταση της ζεύξης αφού επηρεάζουν την ποιότητα και την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Το σήμα μέχρι να φτάσει στον τελικό προορισμό του, είναι πιθανό, να υποστεί ανακλάσεις, διάθλαση ή περίθλαση.

Επιπλέον, το σήμα μπορεί να είναι συνδυασμός περισσότερων αντιγράφων του σήματος που έχουν φτάσει στο δέκτη μέσω διαφορετικών οδεύσεων και μπορεί να δράσουν άλλοτε προσθετικά ενισχύοντας το σήμα και άλλοτε αρνητικά εξαφανίζοντας το λαμβανόμενο σήμα. Ότι από τα παραπάνω και αν συμβεί, το σήμα φθάνει στο δέκτη εξασθενημένο και παραμορφωμένο κατά μη προβλέψιμο τρόπο.

Ανάλογα με την απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα σήμα και τη συχνότητά του διακρίνουμε πλήθος διαφορετικών τρόπων ασύρματης διάδοσης. Αυτό σχετίζεται με τη διαφορετική επίδραση που έχει το μέσο διάδοσης στα σήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα διακρίνουμε τους εξής τρόπους διάδοσης.

- *Διάδοση Ελευθέρου χώρου*

Το σήμα στην περίπτωση αυτή ταξιδεύει στον ελεύθερο χώρο απουσία οποιουδήποτε παρεμβαλλόμενου εμποδίου. Το μόνο που επιδρά στην ισχύ του λαμβανομένου σήματος είναι η απόσταση πομπού και δέκτη. Πρόκειται για μια ιδανική περίπτωση διάδοσης, που συναντάται μόνο κατά τη μετάδοση σημάτων μεταξύ δορυφόρων όπου δεν παρεμβάλλεται η επίδραση της ατμόσφαιρας.

- *Κύματα Εδάφους*

Τα κύματα εδάφους επηρεάζονται έντονα από τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο όπου διαδίδονται. Η διάδοση με αυτόν τον τρόπο απαιτεί οπτική επαφή και το λαμβανόμενο σήμα είναι συνήθως προϊόν πολλαπλών διοδεύσεων. Αφορά σήματα που εκπέμπονται στη χαμηλότερη από τις ζώνες λειτουργίας του Wi Max, αυτή των μεσαίων συχνοτήτων (κάτω από 1MHz). Συνήθως, η μελέτη της διάδοσης με κύματα εδάφους πρέπει να συμπεριλαμβάνει σε κάθε υπολογισμό και την καμπυλότητα της γης, αφού η φορά των διαδιδόμενων κυμάτων ακολουθεί τη φορά αυτή.

- *Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ιονόσφαιρα*

Σε αυτόν τον τρόπο διάδοσης η αλληλεπίδραση με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των ανώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας είναι έντονη. Η υψηλή συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων στην περιοχή αυτή δρα ως ένα αγωγίμο στρώμα, πάνω στο οποίο προσπίπτουν και ανακλώνται τα διαδιδόμενα κύματα. Αναφέρεται σε

σήματα βρίσκονται στη ζώνη συχνοτήτων από 1MHz έως 30MHz και μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

- *Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην τροπόσφαιρα*

Η διάδοση γίνεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της γης, περιοχή όπου διακρίνεται από έντονες μεταβολές του δείκτη διάθλασης, οπότε το διαδιδόμενο σήμα είναι πλήρως εκτεθειμένο στην επίδραση των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Αποτελεί τον κύριο τρόπο διάδοσης για σήματα άνω των VHF συχνοτήτων (30MHz) και επιτυγχάνει τη διάδοσή τους σε μακρινές αποστάσεις.

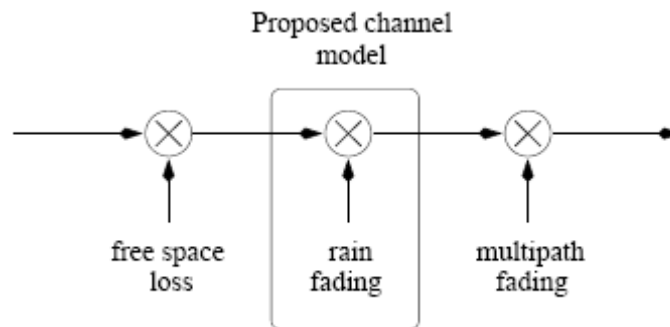
Η τεχνολογία των Ad hoc ασύρματων δικτύων που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιεί διάδοση σε συστήματα οπτικής επαφής και για μια ζώνη συχνοτήτων που εκτείνεται από 2 έως 66GHz. Έτσι, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, δεν μπορεί να ακολουθήσει ένα από τους παραπάνω διακριτούς τρόπους μετάδοσης για αυτό και εξετάζεται ξεχωριστά. Πρόκειται, στην ουσία, για ένα συνδυασμό των παραπάνω τρόπων διάδοσης σε ένα ρεαλιστικό σενάριο μετάδοσης.

Δεδομένης της άρσης της απαίτησης οπτικής επαφής για τις συχνότητες 2-10GHz, λόγω του επαρκώς μεγάλου μήκους κύματος, η ζώνη αυτή είναι η πιο δημοφιλής για πλήθος εφαρμογών στενής ζώνης όπως είναι η ραδιοφωνικές υπηρεσίες και τα κινητά συστήματα εδάφους. Ο κορεσμός όμως σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων που να μπορούν να λειτουργήσουν σε ακόμα μεγαλύτερες φέρουσες, όπως στις ζώνες SHF (3-30GHz) και EHF (>30GHz). Πάνω στις συχνότητες αυτές σχεδιάστηκε πλήθος εφαρμογών ευρείας ζώνης, όπως είναι τα ολοκληρωμένα σταθερά συστήματα και τα Ad Hoc δίκτυα που παρέχουν επικοινωνία και πλήθος ευρυζωνικών υπηρεσιών μεταξύ των χρηστών.

3.1.2 Απώλειες διάδοσης επίγειου δικτύου οπτικής επαφής

Το είδος των απωλειών που θα μελετηθούν αφορά τη μετάδοση σημάτων σε συχνότητες άνω των 300MHz, ανεξαρτήτως χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα είδη απωλειών που μπορούν να πλήξουν το ασύρματο

κανάλι μετάδοσης και επισημαίνεται η πιο ευπαθής ζώνη συχνοτήτων για κάθε είδος απώλειας.



Σχήμα 3.1.2.1 Κύριες πηγές εξασθένησης ασύρματου καναλιού

3.1.2.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου

Υποθέτουμε ότι υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, γεγονός που μπορεί να εξασφαλιστεί λόγω της πυκνότητας των κόμβων του δικτύου WMN που εξετάζεται. Στην περίπτωση αυτή, όπου δεν μεσολαβούν εμπόδια που δυσχεραίνουν την ασύρματη επικοινωνία, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ακολουθεί τη γνωστή εξίσωση ελευθέρου χώρου

$$P_R = P_T G_T G_R \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \text{ (εξίσωση του Friis).}$$

Οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου δίνονται από τη σχέση:

$$L(dB) = 10 \log G_T + 10 \log G_R - 20 \log_{10} f - 20 \log_{10} d + 147.6$$

Πρόκειται για αναπόφευκτες απώλειες που οφείλονται αποκλειστικά στην απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και ο μόνος τρόπος περιορισμού τους είναι μεταβάλλοντας το κέρδος των κεραιών. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η τιμή τους και η συνεισφορά τους στην εξασθένηση του σήματος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις υπόλοιπες πηγές απόσβεσης. Αναφέρονται στην ιδανική κατάσταση ζεύξης.

3.1.2.2 Απώλειες πολλαπλών διοδεύσεων

Στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης δεν είναι ο ελεύθερος χώρος, εμφανίζεται το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων να πλήξει τη μετάδοση. Το σήμα που καταφθάνει στο δέκτη είναι το διανυσματικό άθροισμα των πολλαπλών αντιγράφων του σήματος. Αυτό συμβαίνει διότι το σήμα κατά τη μετάδοσή του συναντά εμπόδια, που προκαλούν πολλαπλές ανακλάσεις, καθώς απότομες μεταβολές του δείκτη διάθλασης. Το αποτέλεσμα είναι να φτάνουν στο δέκτη περισσότερα του ενός αντίγραφα του σήματος τα οποία έχουν διανύσει διαφορετικές διαδρομές και έτσι φτάνουν στο δέκτη σε διαφορετικές, τυχαίες, χρονικές στιγμές. Κάθε συνιστώσα έχει τυχαία διακύμανση στο πλάτος και στη φάση, για αυτό και η διανυσματική τους άθροιση έχει σαν αποτέλεσμα την αθροιστική ή την αφαιρετική συμβολή των ραδιοκυμάτων ανάλογα με την κατανομή των φάσεων στα επιμέρους κύματα.

Έτσι, στο δέκτη εκτός από την απευθείας συνιστώσα φτάνουν σήματα που έχουν προκύψει από τους παρακάτω μηχανισμούς διάδοσης του ασύρματου συστήματος επικοινωνιών.

- *Ανάκλαση (Reflection)*
Συμβαίνει όταν ένα εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε μια λεία επιφάνεια με πολύ μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος (λ) του σήματος.
- *Περίθλαση (Diffraction)*
Συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη υπάρχει φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο με μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος λ , το οποίο προκαλεί την εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων πίσω από το εμπόδιο σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο που ερμηνεύει τη μεταφορά RF ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη χωρίς απευθείας μονοπάτι μεταξύ τους. Συχνά αποκαλείται σκίαση, γιατί το σήμα φθάνει στον δέκτη ακόμα και όταν «σκιάζεται» από ένα αδιαπέραστο εμπόδιο.

- *Σκέδαση (Scattering)*

Συμβαίνει όταν ένα σήμα προσκρούει είτε σε μια μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του λ ή μικρότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Σε αστικό περιβάλλον συνηθισμένοι σκεδαστές είναι οι προβολείς των δρόμων, οι σηματοδότες και το φύλλωμα των δέντρων.

Ανάμεσα στους παραπάνω μηχανισμούς διάδοσης γίνεται να ελεγχθεί και να περιοριστεί αυτός της περίθλασης, φροντίζοντας τη σχεδίαση του συστήματος ώστε να εξασφαλίζεται η καθαρότητα, δηλαδή η χωρίς παρεμβαλλόμενα εμπόδια, της πρώτης ζώνης Fresnel. Οι ζώνες Fresnel αναφέρονται σε ελλειψοειδείς περιοχές με κέντρα τον πομπό και το δέκτη στις οποίες η παρεμβολή εμποδίων, οδηγεί σε εμφάνιση περίθλασης κατά τη μετάδοση σημάτων. Η απουσία εμποδίων στην πρώτη ζώνη Fresnel είναι ικανή να εξασφαλίσει ασφαλή μετάδοση και η ακτίνα της ορίζεται από τη σχέση:

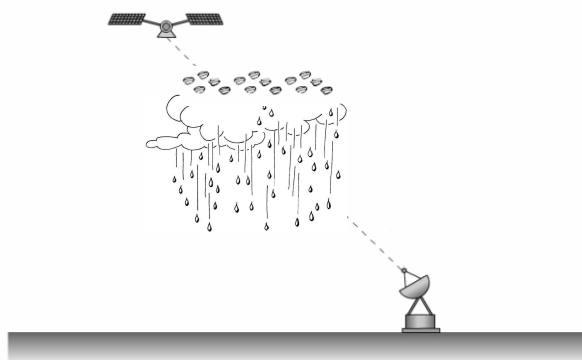
$$h_1 = \left[\frac{\lambda}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}} \right]^{1/2}$$

όπου d_1, d_2 είναι οι αποστάσεις του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα, από το αμέσως κοντινότερο εμπόδιο στην ευθεία μετάδοσης.

Επισημαίνεται, ότι οι διαλείψεις λόγω του φαινομένου των πολλαπλών διοδεύσεων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων, αλλά μόνο για συχνότητες κάτω των 10GHz. Κύματα υψηλότερων συχνοτήτων δεν πλήττονται από το συγκεκριμένο φαινόμενο, αφού έχουν μικρότερο μήκος κύματος το οποίο δεν μπορεί να αντέξει τις πολλαπλές ανακλάσεις και τη διάνυση μεγαλύτερων αποστάσεων μέχρι να φτάσει στο δέκτη.

3.1.2.3 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Στις συχνότητες άνω των 10GHz οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχή, χιόνι, χαλάζι, παγοκρύσταλλοι) επηρεάζουν ουσιαστικά τις ασύρματες ζεύξεις. Τα ρεύματα μετατόπισης που επάγονται στους υδρομετεωρίτες κατά τη διάδοση ενός ραδιοκύματος έχουν ως αποτέλεσμα τη σκέδαση και την απορρόφηση μέρους της ενέργειας του σήματος. Επίσης, η σύγκρουση των σημάτων με τους υδρομετεωρίτες, είναι πιθανό να προκαλέσει φαινόμενα σκέδασης και, κατεπέκταση, παρεμβολών, στις περιπτώσεις εκείνες που το μήκος κύματος των διαδιδόμενων σημάτων είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των υδρομετεωριτών. Παράλληλα, για μήκη κύματος αρκετά μεγάλα σε σχέση με το μέγεθος της σταγόνας, η εξασθένηση του κύματος λόγω απορρόφησης θα υπερτερεί έναντι της σκέδασης. Στη συνέχεια, αναλύονται τα σημαντικότερα τροποσφαιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν τις ζεύξεις με κεντρική συχνότητα άνω των 10GHz.

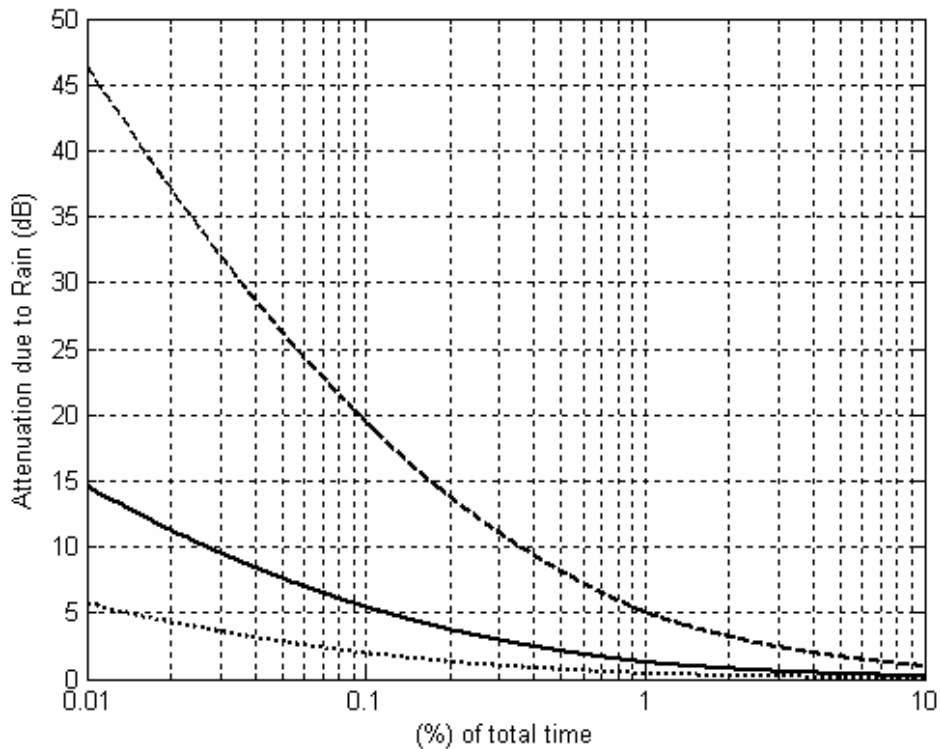


Σχήμα 3.1.2.3.1 Επίδραση ατμοσφαιρικών φαινομένων στις ασύρματες ζεύξεις

- *Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης*

Αναφέρεται στο φαινόμενο της σκέδασης των σημάτων από τους διάφορους υδρομετεωρίτες, που είναι το κυρίαρχο φαινόμενο σε συχνότητες άνω των 30GHz (EHF band) καθώς και στην απορρόφηση των σημάτων από τους υδρομετεωρίτες που συμβαίνει για συχνότητες 10 έως 30GHz. Το συνδυασμένο αποτέλεσμα της σκέδασης και της απορρόφησης είναι η σημαντική μείωση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε ποσοστό ανάλογο του τετραγώνου της συχνότητας. Αυτό αποτελεί το κυριότερο μειονέκτημα των συστημάτων που λειτουργούν σε

αυτές τις συχνότητες. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η αναπαράσταση της εξασθένησης σαν συνάρτηση του ποσοστού του συνολικού χρόνου λειτουργίας. Τα διαγράμματα αυτού του τύπου μας βοηθούν στον υπολογισμό της διαθεσιμότητας μιας ζεύξης, δηλαδή του ποσοστού αξιοπιστίας της διατιθέμενης υπηρεσίας.



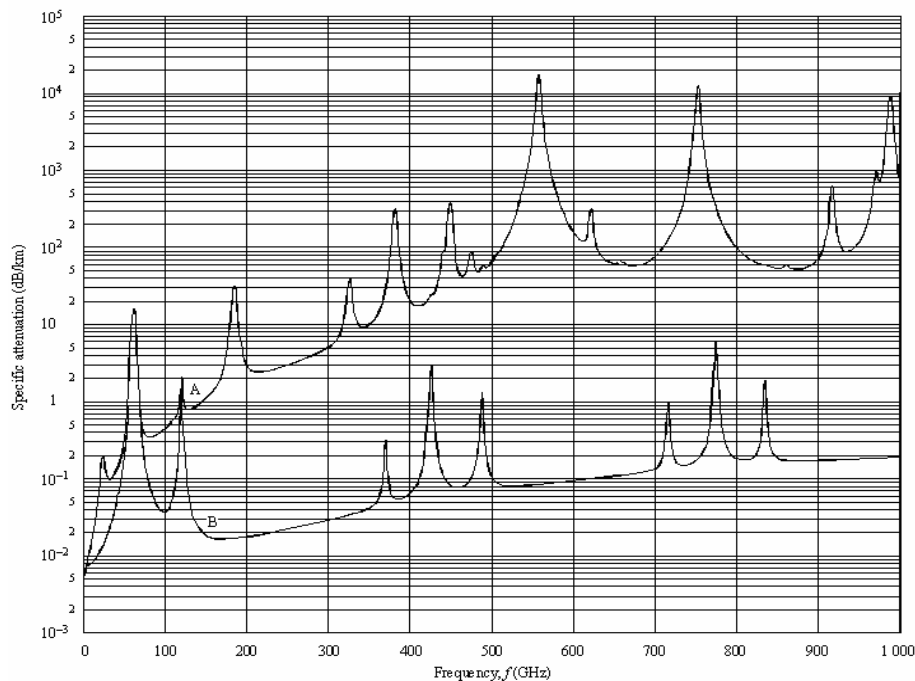
- Ku band συχνότητα κάτω ζεύξης (12GHz)
- Ka band συχνότητα κάτω ζεύξης (20GHz)
- V band συχνότητα κάτω ζεύξης (40GHz)

Σχήμα 3.1.2.3.2 Πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής σύμφωνα με στοιχεία του HellasSat (Γωνία Αν. 30° Κάθετη Πόλωση)

- *Απόσβεση λόγω απορρόφησης αερίων*

Τα ατμοσφαιρικά αέρια που δυσχεραίνουν τη μετάδοση είναι κυρίως το οξυγόνο και οι υδρατμοί. Όσο πιο μακρύ είναι το μονοπάτι διάδοσης μέσα στην ατμόσφαιρα τόσο πιο έντονη είναι η εξασθένηση του λαμβανόμενου σήματος. Όπως φαίνεται και από το σχήμα που ακολουθεί η εξασθένηση που εισάγουν τα ατμοσφαιρικά αέρια είναι πολύ μικρή σε σχέση με την απόσβεση λόγω βροχόπτωσης που εξετάστηκε πιο πάνω.

Παρατηρείται μέγιστη απορρόφηση λόγω υδρατμών στη συχνότητα των 22.5GHz. Πάνω από τα 30GHz ο παράγοντας υδρατμοί εισάγει αμελητέα εξασθένηση. Το οξυγόνο παρουσιάζει μέγιστη απορρόφηση στα 60GHz μέσα στη ζώνη συχνοτήτων που ενδιαφέρει την παρούσα τεχνολογία δικτύου.



Σχήμα 3.1.2.3.3 Ειδική Απόσβεση (dB/km) συναρτήσει της συχνότητας

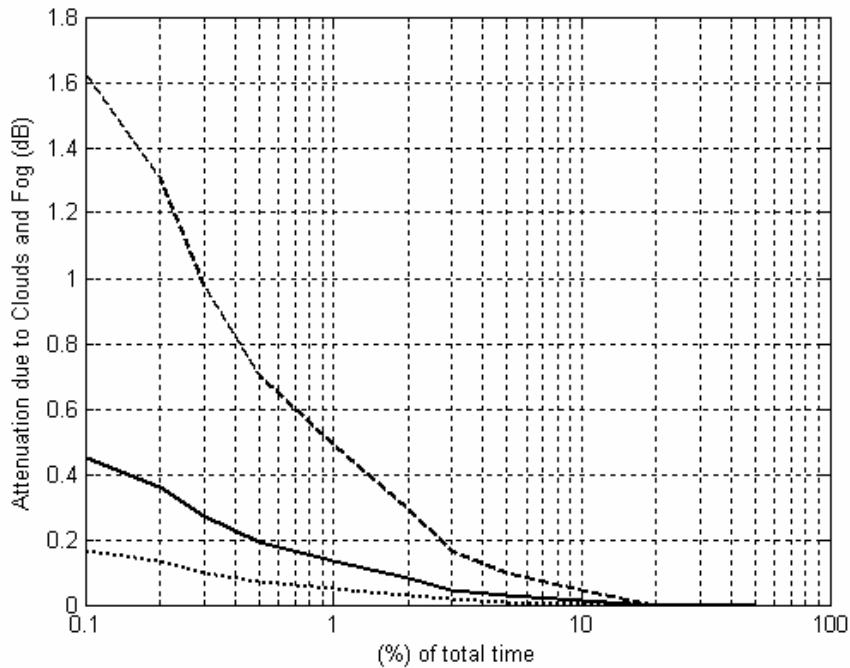
A: ατμόσφαιρα πυκνότητας σε υγρασία 7.5gr/m3 B: ξηρή ατμόσφαιρα

- *Απόσβεση οφειλόμενη στα σύννεφα και στην ομίχλη*

Το υγρό περιεχόμενο των νεφώσεων είναι η φυσική αιτία της απόσβεσης που οφείλεται στα σύννεφα και την Ομίχλη. Και εδώ εισάγεται πολύ μικρή εξασθένηση σε σχέση με της συνέπειες της βροχόπτωσης. Ενδεικτικές καμπύλες της εισαγόμενης εξασθένησης για κάθε ζώνη συχνοτήτων φαίνονται στο Σχήμα 3.1.2.3.4 που ακολουθεί.

Άλλα φαινόμενα που πλήττουν τη ζεύξη αλλά η ανάλυση τους ξεπερνά το σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αύξηση του κοσμικού θορύβου, η αποπόλωση λόγω βροχής, οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί και η υγροποίηση του

ανώτερου στρώματος της ατμόσφαιρας. Το τελευταίο αναφέρεται στην υγροποίηση του πάγου και του χιονιού σε υψόμετρο ίσο με το ενεργό ύψος βροχής. Το στρώμα αυτό δεν δρα πλέον ως τέλειος αγωγός αλλά εισάγει απώλειες λόγω της παρουσίας των υγρών μορίων. Τέλος, οποιαδήποτε σκέδαση και εκτροπή του σήματος μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε άλλα συστήματα, που να συντελέσουν με τη σειρά τους στην υποβάθμιση της παρεχόμενης υπηρεσίας.



Σχήμα 3.1.2.3.4 Εισαγόμενη εξασθένιση σαν συνάρτηση ποσοστού του συνολικού χρόνου λειτουργίας της ζεύξης.

Όπως προέκυψε από την παραπάνω ανάλυση, ο κύριος παράγοντας που συντελεί στην παρουσία διαλείψεων είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και κυρίως η παρουσία της βροχόπτωσης. Η εξασθένιση που εισάγει, όπως προκύπτει και από τα διαγράμματα, μπορεί να γίνει έως και 50 φορές μεγαλύτερη από την επίδραση όλων των άλλων ατμοσφαιρικών αερίων. Στην παράγραφο που ακολουθεί, θα περιγραφεί χωροχρονικά το φαινόμενο της βροχής με τελικό στόχο την επίτευξη της πρόβλεψης του φαινομένου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα απώλειας πακέτων λόγω μη διαθεσιμότητας της ζεύξης.

3.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά της βροχής

Οι ψηφιακές επικοινωνίες επηρεάζονται από τον τυχαίο τρόπο εμφάνισης διαλείψεων. Οι διαλείψεις αυτές στις συχνότητες άνω των 10GHz οφείλονται κυρίως στην καταλυτική επίδραση της βροχής, ενώ σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες, άνω των 60 GHz, σημαντική επίδραση στις διαλείψεις έχουν και οι σπινθηρισμοί. Οι σπινθηρισμοί, προσθέτουν στο σήμα φασματικό περιεχόμενο σε υψηλότερες συχνότητες και μπορεί η επίδρασή τους να εξαλειφθεί με χρήση βαθυπερατού φίλτρου στο δέκτη. Την ίδια στιγμή, όμως, δεν είναι εφικτή η εφαρμογή μιας παρόμοιας μεθοδολογίας για την εξάλειψη των διαλείψεων λόγω της βροχόπτωσης, αφού πρόκειται για μια τυχαία και δυναμική διαδικασία που επηρεάζει το σήμα προκαλώντας τυχαία αλλοίωση του φασματικού περιεχομένου του.

Έτσι, η μελέτη στατιστικών του ποσοστού βροχόπτωσης και της διάρκειας βροχόπτωσης κρίνεται αναγκαία, δεδομένου ότι η βροχή είναι ένα μια τυχαία χωρο-χρονική διαδικασία που μπορεί να μελετηθεί μόνο με χρήση στατιστικής ανάλυσης. Κύριος στόχος στην ανάλυση που ακολουθεί, είναι η μετάβαση από τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία της διάρκειας των βροχοπτώσεων σε στοιχεία διάρκειας των διαλείψεων που μπορούν να συμβούν σε μια ζεύξη, δεδομένου ότι η βροχόπτωση είναι σε εξέλιξη.

3.2.1 Επίδραση του μέσου βροχής στις ζεύξεις

Η βροχή αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος σταγόνων των οποίων οι θέσεις, τα σχήματα και οι κατευθύνσεις είναι τυχαίες ποσότητες. Το μοντέλο που έχει γίνει αποδεκτό για μια σταγόνα που πέφτει είναι αυτό του πεπλατυσμένου σφαιροειδούς που παρουσιάζει μια γωνία κλίσης ως προς τον ορίζοντα. Οι αποστάσεις μεταξύ των σταγόνων είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τις διαστάσεις τους, ενώ, παράλληλα, οι διαστάσεις των σταγόνων είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος οπότε και είναι εφικτή η υιοθέτηση της υπόθεσης της ανεξάρτητης σκέδασης.

Κύριο χαρακτηριστικό μέτρησης της βροχόπτωσης αποτελεί η ένταση βροχόπτωσης (rainfall rate) που καθορίζει το ύψος νερού που φθάνει στη γη ανά μονάδα χρόνου και δίνεται από τη σχέση

$$R = 0.6 \cdot 10^{-3} \pi \int D^3 V(D) n(D) dD \quad (\text{mm/hr})$$

όπου $V(D)$ (m/s) είναι η τελική ταχύτητα πτώσης σταγόνων διαμέτρου D , ενώ η ολοκλήρωση τελείται σε όλα τα μεγέθη των σταγόνων.

Για τη σχεδίαση ενός συστήματος που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz είναι απαραίτητη η γνώση της κατανομής του R που οδηγεί στον υπολογισμό της εισαγόμενης απόσβεσης λόγω βροχής. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα ο Διεθνής Τηλεπικοινωνιακός Οργανισμός CCIR προτείνει τη χρήση δεκαπέντε κλιματικών ζωνών (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q), κάθε μια από τις οποίες περιέχει περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά βροχόπτωσης. Για κάθε κλιματική ζώνη, παρέχεται η αθροιστική κατανομή υπέρβασης του R για διάφορα ποσοστά του χρόνου.

Στην περίπτωση που υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, είναι εφικτό να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την ένταση της βροχόπτωσης, υιοθετώντας την υπόθεση της λογαριθμοκανονικής κατανομής του R . Η υπόθεση αυτή επαληθεύεται από τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν την Ευρώπη και τη Β.Αμερική και μπορεί να χρησιμοποιείται με ασφάλεια κατά τη σχεδίαση ραδιοζεύξεων στις περιοχές αυτές. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) της τυχαίας μεταβλητή (τ.μ.) R δίνεται από τη σχέση:

$$f_A(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_r} \cdot \frac{1}{R} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\ln R - \ln R_m}{\sqrt{2} \cdot S_r}\right)^2\right)$$

όπου R_m και S_r είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του $\ln R$.

Υιοθετώντας την παραπάνω συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, είναι εφικτό να υπολογιστεί η δεσμευμένη σωρευτική πυκνότητα πιθανότητας που εκφράζει την πιθανότητα η διάρκεια των διαλείψεων d να ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή D , δεδομένου ότι υπάρχει διάλειψη, δηλαδή η τιμή της εισαγόμενης εξασθένησης λόγω βροχής A είναι μεγαλύτερη από το επιτρεπόμενο όριο A_{th} . Η παραπάνω πιθανότητα δίνεται από τη σχέση:

$$P_{A_{thr}} [d \geq D | A(t) \geq A_{thr}] = \exp \left[-\frac{d_A \exp(-u_{thr}^2 / 2)}{\text{perfc}(u_{thr} / \sqrt{2})} D \right]$$

$$\text{όπου } u_{thr} = \frac{\ln(A_{thr}) - \ln(A_m)}{S_\alpha}$$

όπου A_m και S_α αποτελούν τις στατικές παραμέτρους του ποσοστού βροχόπτωσης και μπορούν να εκφραστούν σε όρους R_m και S_r

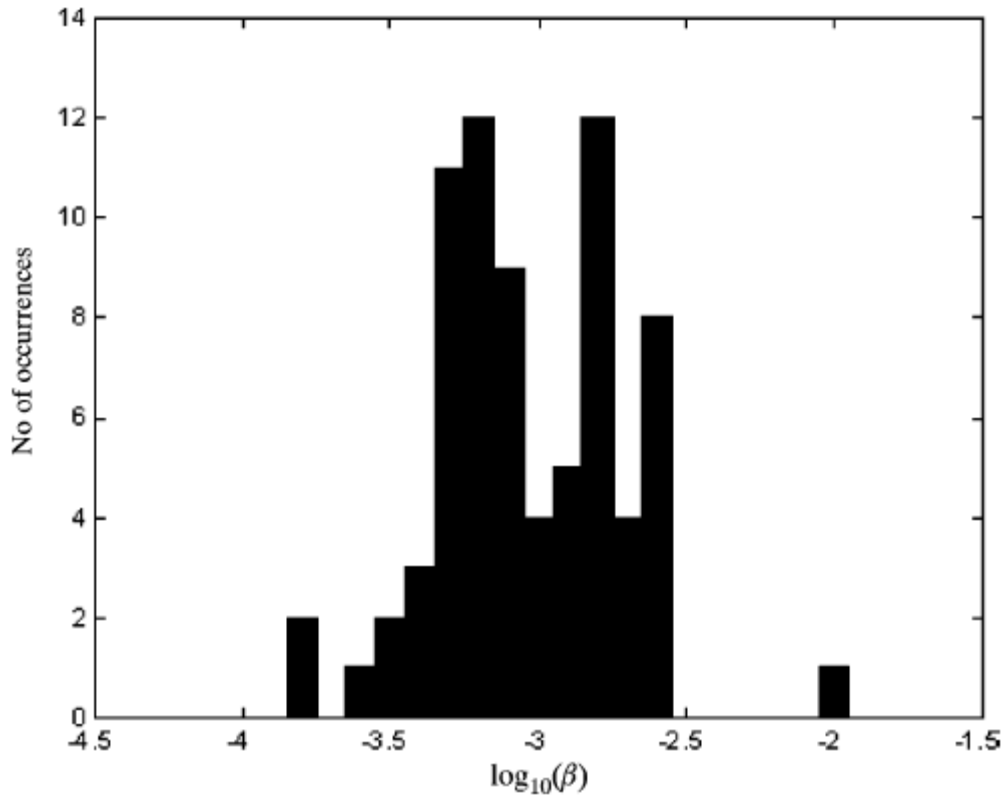
Επίσης, το d_A αποτελεί τη δυναμική παράμετρο του ποσοστού βροχόπτωσης που περιγράφει τη χρονική μεταβολή της εξασθένησης και μπορεί να υπολογιστεί από το φάσμα της εξασθένησης με χρήση αριθμητικής ανάλυσης. Μπορεί να οριστεί ως η σύνθετη χρονική σταθερά που ενσωματώνει τις χωρικές ιδιότητες, την δυναμική παρουσία και εξαφάνιση των σταγόνων και εξαρτάται έντονα από το τοπικό κλίμα. Η εξίσωση ορισμού της είναι

$$d_A = \frac{\bar{V}}{L} + d_2 \approx \frac{\bar{V}}{L}$$

όπου το \bar{V} αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα των σταγόνων, το L αναφέρεται στο χαρακτηριστικό μέγεθος των σταγόνων και το d_2 που μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά αμελητέο αναφέρεται στην ρυθμό εμφάνισης και καταστροφής των σταγόνων. Τυπικές τιμές για το d_A είναι

$$3.16 \times 10^{-4} \leq d_A \leq 3.16 \times 10^{-3}.$$

Η κατανομή του σε μια συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να μην είναι σταθερή, όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του ιστογράμματος που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2.1.1 Ιστόγραμμα πειραματικών μετρήσεων για την κατανομή του d_A στην περιοχή του Μιλάνου και για συχνότητα 40GHz

Επίσης, με τη βοήθεια της παραπάνω πιθανότητας υπέρβασης είναι δυνατόν να καταλήξουμε σε έναν προσεγγιστικό τύπο υπολογισμού του d_A ο οποίος δίνεται από τη σχέση

$$d_A \approx \left(\frac{\pi \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{th}}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{R_{th}^2}{2}\right)}{D_{th1} - D_{th2}} \right) \cdot \ln\left(\frac{P[D > D_{th1} | R > R_{th1}]}{P[D > D_{th2} | R > R_{th2}]}\right)$$

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, ο δέκτης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος μόλις αντιληφθεί ότι η ισχύς του σήματος αρχίζει να μειώνεται, μπορεί να προβλέψει τη διάρκεια της επικείμενης διάλειψης ώστε να προβεί στις απαραίτητες ενέργειες για την αποφυγή απώλειας πακέτων.

3.2.2 Πρόβλεψη της διάρκειας διαλείψεων με χρήση Μαρκοβιανής ανάλυσης

Καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες της ατμόσφαιρας, το λαμβανόμενο σήμα δεν μπορεί πλέον να αναπαρασταθεί με σταθερές παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, έχει προταθεί η αναπαράσταση του καναλιού μετάδοσης με μια αλυσίδα Μαρκοβ X(n) διακριτού χρόνου – διακριτής έντασης. Η τυχαία μεταβλητή X(n) αντιστοιχεί στην ισχύ της εξασθένησης που εισάγεται στη ζεύξη λόγω των βροχοπτώσεων και μπορεί να πάρει διακριτές τιμές από το σύνολο $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ dB. Η εξέλιξη της εξασθένησης μπορεί τώρα να περιγραφεί απόλυτα κάνοντας χρήση του πίνακα μεταβάσεων **P**, του οποίου τα στοιχεία δίνονται από τη δεσμευμένη πιθανότητα:

$$P_{ij} = \text{Pr ob} \{ X(n+1) = j \mid X(n) = i \} \quad \text{όπου } i, j \in \Omega$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει την πιθανότητα το σύστημα που τη χρονική στιγμή n βρίσκεται στην κατάσταση i, να βρεθεί την επόμενη χρονική στιγμή n+1 στην κατάσταση j. Ως εκ τούτου θα ισχύει

$$\sum_{j=1}^N P_{ij} = 1.$$

Σημειώνεται ότι το i αντιστοιχεί στις γραμμές του πίνακα μετάβασης, ενώ το j στις στήλες.

Το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης που αντιστοιχεί στον πίνακα μεταβάσεων **P** περιγράφεται από το διάνυσμα στήλη **π**, υποθέτοντας τυχαία αρχική κατάσταση **π**₀ το οποίο υπολογίζεται βάση της σχέσης:

$$\pi_0 \pi = \lim_{n \rightarrow \infty} \pi_0 P^n$$

Με τη βοήθεια των ιδιοτήτων των αλυσίδων Μαρκοβ για τον υπολογισμό του π μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} \pi(I - P) &= 0 \\ \pi e &= 1 \end{aligned}$$

όπου **I** είναι ο μοναδιαίος πίνακας και **e**=[1 1 ...]^T. Κάθε στοιχείο του π αντιστοιχεί στο ποσοστό του συνολικού χρόνου, που το σύστημα παραμένει στην κατάσταση i.

Προχωρώντας στον υπολογισμό των \mathbf{P}_{ij} , μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι πιθανότητες αυτές αντιστοιχούν στην πιθανότητα μετάβασης του συστήματος στην j κατάσταση, δεδομένου ότι πριν βρισκόταν στην κατάσταση i . Δηλαδή, το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό της δεσμευμένης πιθανότητας $f(j|i)$ όπου η συνάρτηση $f(i)$ αντιστοιχεί στην συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) της κατανομής της έντασης βροχόπτωσης που υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οπότε από τη θεωρία πιθανοτήτων για τον υπολογισμό της δεσμευμένης πιθανότητας θα ισχύει

$$P_{ij} = f(j|i) = \frac{f(i, j)}{f(i)}$$

$$f(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 ij \sqrt{1-r_A^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-r_A^2)} \left(\frac{(\ln i - m)^2}{\sigma^2} - \frac{2r_A(\ln i - m)(\ln j - m)}{\sigma^2} + \frac{(\ln j - m)^2}{\sigma^2} \right) \right]$$

$$r_A = \exp(\sigma^2 \cdot e^{-d_A}) - \frac{1}{e^{\sigma^2}} - 1$$

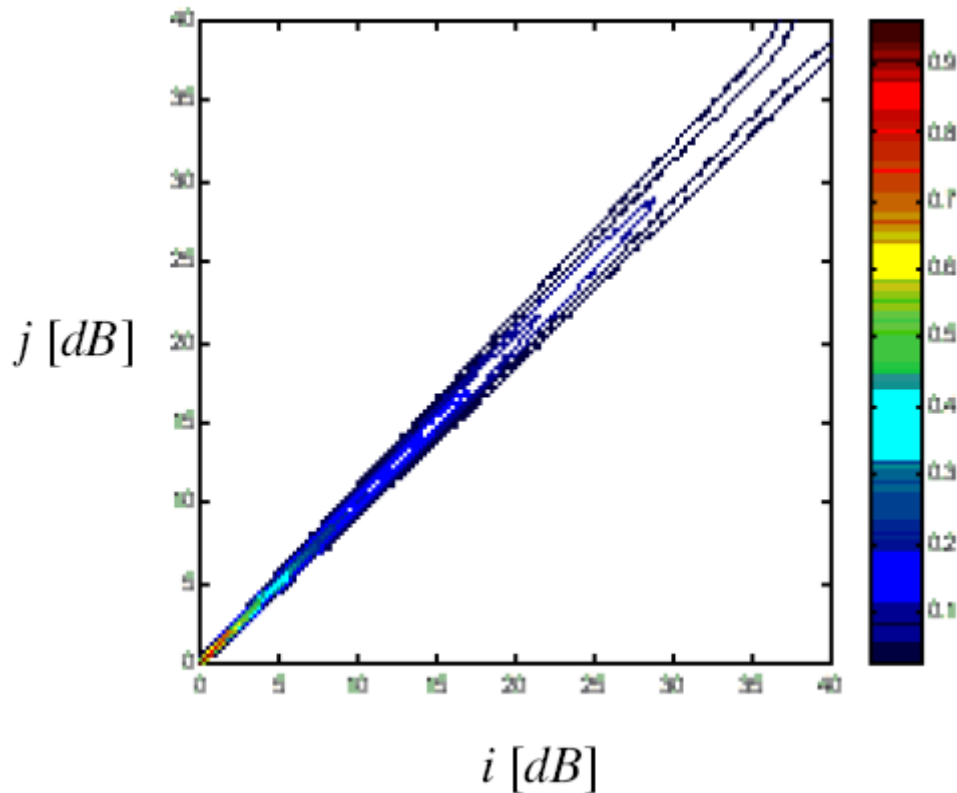
όπου θεωρήσαμε $R_m=m$ και $S_r=\sigma$ σταθερά και κοινά για κάθε κατάσταση.

Επίσης $A_i = i, A_j = j, \forall i, j \in \Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ που αντιστοιχούν στις διαφορετικές καταστάσεις του συστήματος.

Από το θεώρημα του Bayes, ολοκληρώνοντας για όλη τη διάρκεια της κάθε κατάστασης, προκύπτουν οι ζητούμενες πιθανότητες μετάβασης \mathbf{P}_{ij}

$$P_{ij} = \int_{i-0.5}^{i+0.5} \int_{j-0.5}^{j+0.5} f(i, j) didj \Bigg/ \int_{i-0.5}^{i+0.5} f_i(m, \sigma) di$$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται σχεδιασμένες οι παραπάνω πιθανότητες, για $M=-1.40$, $\Sigma=1.498$ και $d_A=1.65 \cdot 10^{-4}$.



Σχήμα 3.2.2.1 Αναπαράσταση πιθανοτήτων μετάβασης P_{ij}

Όπως αναμενόταν τα περισσότερα στοιχεία του πίνακα μεταβάσεων είναι μηδενικά, εκτός από αυτά κοντά στη διαγώνιο. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι πιθανότερο το επίπεδο λαμβανομένης ισχύος να μη μεταβληθεί ή να μεταβληθεί λίγο στο διάστημα ενός δευτερολέπτου, δηλαδή ενός βήματος.

Για την ανάλυση διαθεσιμότητας της ασύρματης ζεύξης που μελετάται, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται όχι σε όλα τα επίπεδα ισχύος, αλλά στις μεταβάσεις εκείνες που οδηγούν σε υπέρβαση του αποδεκτού ορίου εξασθένησης A_{thr} . Επομένως, οι καταστάσεις του συστήματος με την παραπάνω παρατήρηση χωρίζονται σε καταστάσεις καλής λήψης (Good states, G-states), όπου $G = \{1, 2, \dots, A_{thr}\}$ και σε καταστάσεις κακής λήψης (Bad states, B-states), όπου $B = \{A_{thr}+1, \dots, N\}$. Επομένως, ορίζεται ως περίοδος κακής λήψης $T_B \equiv d$ (sec) η διάρκεια η οποία ξεκινάει με τη μετάβαση από μια κατάσταση καλής λήψης G, σε μια κατάσταση κακής λήψης B, η οποία ακολουθείται από d-1 συνεχόμενες μεταβάσεις σε B-κατάσταση και διαρκεί μέχρι την επιστροφή σε κατάσταση G. Έχοντας αντιστοιχίσει το ένα βήμα - άλμα σε ένα δευτερόλεπτο, προκύπτει αμέσως η συνολική διάρκεια διάλειτουργίας ίση με τόσα

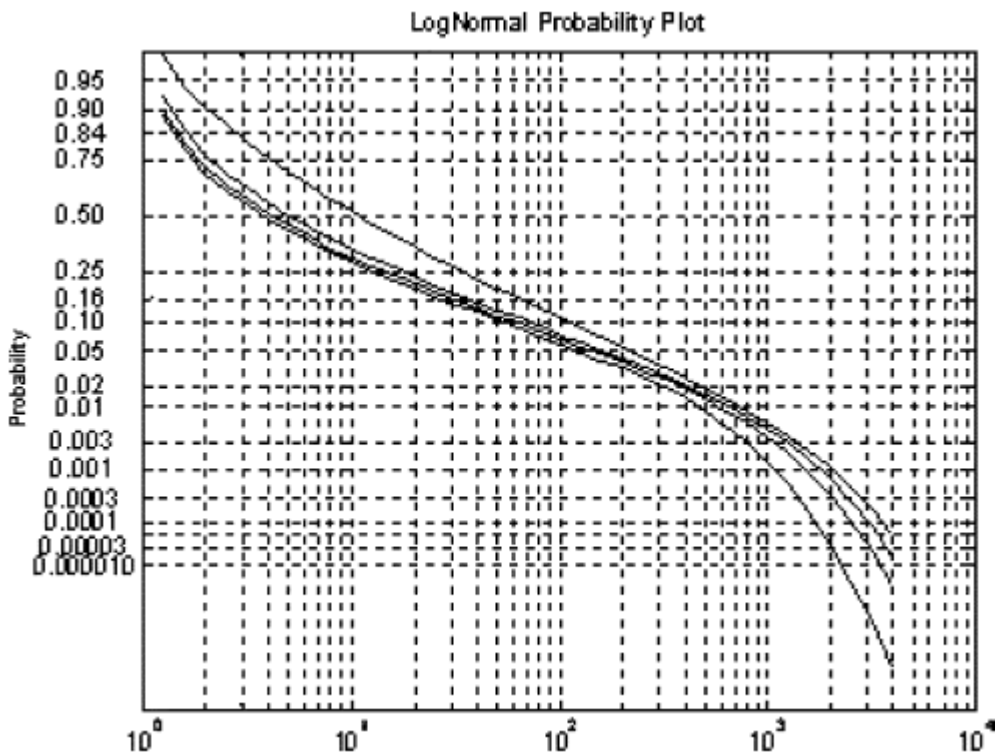
δευτερόλεπτα όσες οι μεταβάσεις που χρειάστηκαν για την επιστροφή του συστήματος σε κατάσταση καλής λήψης. Έχει αποδειχθεί ότι η πιθανότητα η διάρκεια διάλειψης T_B να διαρκεί παραπάνω από ένα καθορισμένο αριθμό αλμάτων d , δηλαδή δευτερολέπτων, δίνεται από τη σχέση:

$$\Pr\{T_B \geq d \mid A_i \geq A_{thr}\} = \frac{\pi_G^T P_B^{d-1} P e_B}{\pi_G^T P e_B}$$

όπου ισχύει:

- π_G αντιστοιχεί στο διάνυσμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζοντας τις πιθανότητες που δεν ανήκουν σε G καταστάσεις
- P_B αντιστοιχεί στον πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης μηδενίζοντας όλες τις πιθανότητες P_{ij} για τις οποίες ισχύει $j \in G$
- e_B είναι το διάνυσμα στήλη του οποίου η i -οστή θέση είναι 1 αν $i \in B$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η πιθανότητα υπέρβασης της εξασθένησης λόγω βροχόπτωσης, που ακολουθεί όπως αναμενόταν, λογαριθμοκανονική κατανομή μεταξύ 10 και 1000sec και είναι απόλυτα σύμφωνη με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 3.2.2.2 Πιθανότητα υπέρβασης της διάρκειας των διαλείψεων για A_{thr} ίσο με 1(πάνω), 3, 5 και 7(κάτω)dB

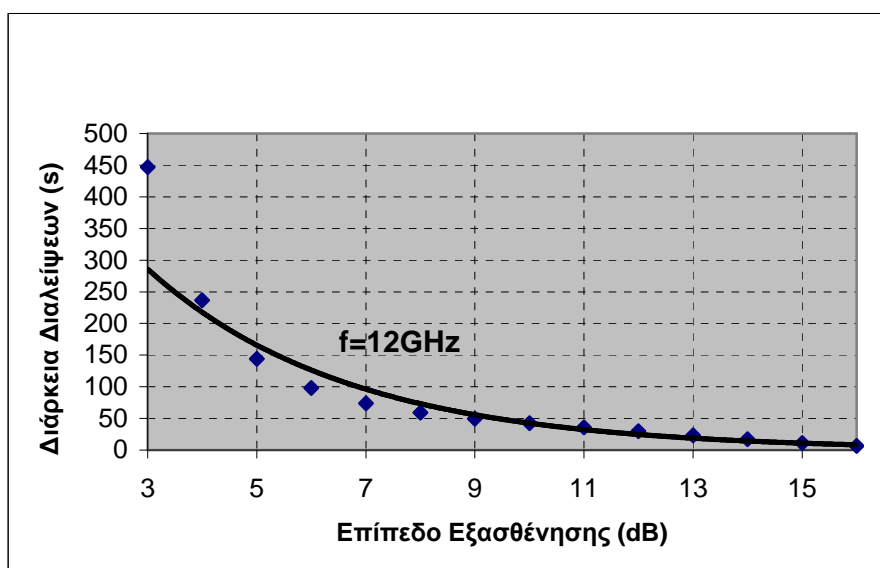
3.2.3 Προσεγγιστικοί τύποι για τη μέτρηση της διάρκειας των διαλείψεων

Παράλληλα με την προσέγγιση της Μαρκοβιανής ανάλυσης για τη μοντελοποίηση του καναλιού, έχουν αναπτυχθεί πλήθος προσεγγιστικών μοντέλων που μπορούν να συνδέσουν την κατανομή της διάρκειας των διαλείψεων ως συνάρτηση της εξασθένησης του σήματος. Αυτοί οι τύποι παρουσιάζουν τη διάρκεια των διαλείψεων με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί από τους σχεδιαστές των συστημάτων στην προσπάθειά τους να βρουν τη βέλτιστη τιμή για το περιθώριο διαλείψεων του συστήματος. Σημειώνεται, ότι πολύ μικρό περιθώριο οδηγεί σε μη ανεκτή ποιότητα προσφερόμενων υπηρεσιών, ενώ πολύ μεγάλο περιθώριο οδηγεί σε αύξηση του κόστους χωρίς να παρέχεται ανάλογη αύξηση στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας.

Όπως αναπτύσσει ο F.Davarian στην αναφορά [14], είναι δυνατή η αντιστοίχιση της παρουσίας διαλείψεων συγκεκριμένης διάρκειας, με το επιτρεπόμενο όριο εξασθένησης στο δέκτη. Έτσι, έχει αναπτυχθεί προσεγγιστικός τύπος ο οποίος αντιστοιχεί το δεδομένο επίπεδο εξασθένησης στο δέκτη, με το συνολικό χρόνο διάλειψης, για δεδομένη και σταθερή συχνότητα. Για τη συχνότητα των 12GHz η παραπάνω σωρευτική διάρκεια διαλείψεων υπολογίζεται από τον τύπο

$$FT_{12} = 8900 \exp(-1.315A + 0.118A^2 - 0.004A^3)$$

όπου η εξασθένηση A παίρνει τιμές $3 \leq A \leq 16$ dB.

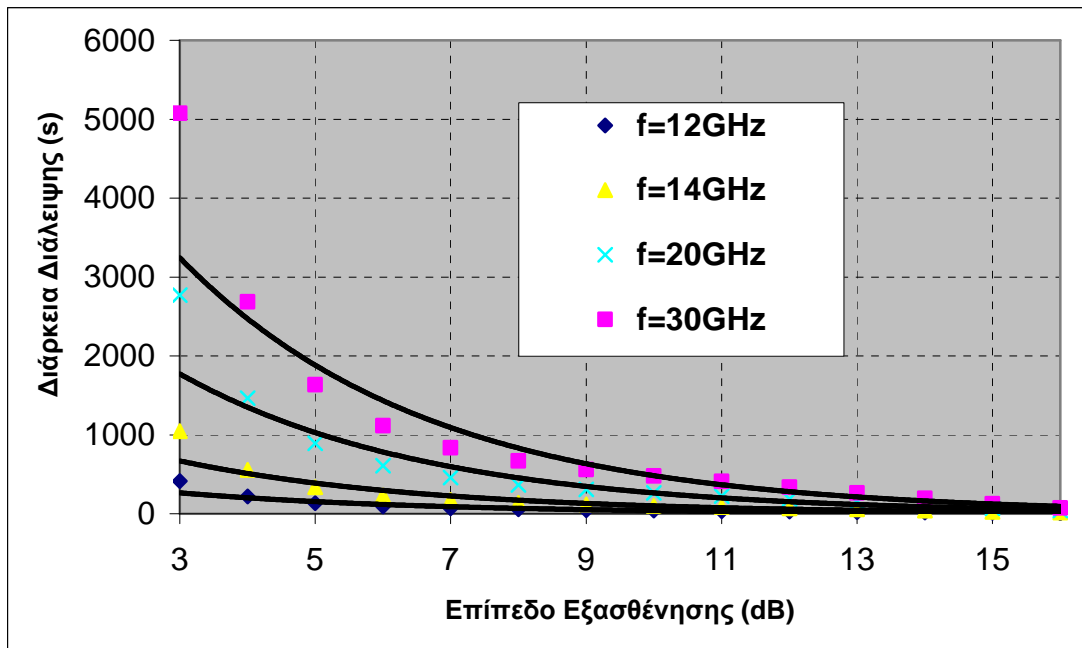


Σχήμα 3.2.3.1 Προσεγγιστική Διάρκεια Διαλείψεων για $f=12$ GHz και διάφορα επίπεδα εξασθένησης.

Επέκταση του παραπάνω τύπου για τις συχνότητες έως 30GHz δίνεται από τη σχέση:

$$FT_{12} = 8900(-8.899 + 0.915f - 0.008f^2) \exp(-1.315A + 0.118A^2 - 0.004A^3)$$

Η υπολογιζόμενη διάρκεια διαλείψεων αναφέρεται στο συνολικό χρόνο διάλειψης, δηλαδή μη διαθεσιμότητας της ζεύξης, για τη διάρκεια ενός χρόνου, δεδομένου ότι η μέση τιμή της μιας διάλειψης δεν υπερβαίνει τα 60s.



Σχήμα 3.2.3.2 Προσεγγιστική διάρκεια διαλείψεων συναρτήσει της εξασθένησης

Σημειώνεται ότι η ανάπτυξη προσεγγιστικών τύπων απαιτεί μελέτη του συστήματος για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και για πλήθος παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση. Η παραπάνω ανάλυση βασίστηκε σε μελέτη του συστήματος επί ένα έτος και για γωνία ανύψωσης 51 μοιρών και ως εκ τούτου επιδέχεται περαιτέρω ανάπτυξη.

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη αλγορίθμου Δρομολόγησης

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα μελετηθεί η λειτουργία δρομολόγησης, όπως αυτή υλοποιείται από το στρώμα δικτύου. Θα παρουσιαστούν αντιπροσωπευτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης από τις δύο κύριες κατηγορίες, των πρωτοκόλλων *διανύσματος απόστασης* (distance vector) και των πρωτοκόλλων *κατάστασης της ζεύξης* (link state). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο νέος βελτιωμένος αλγόριθμος δρομολόγησης που προτείνεται και, τέλος, εξετάζεται η εφαρμογή του στις παραπάνω κατηγορίες πρωτοκόλλων και συζητούνται τα δυνατά οφέλη στη διέλευση και τους πόρους του δικτύου που μπορούν να υπάρξουν από την εφαρμογή του.

4.1 Επισκόπηση πρωτοκόλλων Δρομολόγησης

Η έννοια της *δρομολόγησης* (routing) αναφέρεται στην εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού ανάμεσα στο πλήθος δρομολογητών που απαρτίζουν το διαδίκτυο. Οι δρομολογητές συνδέουν μεταξύ τους διαφορετικά υποδίκτυα, που δεν θα μπορούσαν να επικοινωνήσουν με άλλον τρόπο, και λαμβάνουν αποφάσεις δρομολόγησης εξετάζοντας την IP διεύθυνση προορισμού του κάθε πακέτου. Τα διαφορετικά δίκτυα μπορεί να ανήκουν στο ίδιο ή σε διαφορετικά *αυτόνομα συστήματα* (ΑΣ). Η έννοια του αυτόνομου συστήματος αναφέρεται σε μια συλλογή δρομολογητών που βρίσκονται κάτω από τον ίδιο διαχειριστικό και τεχνικό έλεγχο και εκτελούν όλοι το ίδιο πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταξύ τους. Τα πρωτόκολλα που διασφαλίζουν τη δρομολόγηση εντός του ίδιου αυτόνομου συστήματος αναφέρονται ως *πρωτόκολλα εσωτερικής πύλης* (Interior Gateway Protocols, IGP), ενώ τα πρωτόκολλα που διασφαλίζουν τη διασύνδεση διαφορετικών αυτόνομων συστημάτων ονομάζονται *πρωτόκολλα εξωτερικής πύλης* (Exterior Gateway Protocols, EGP) και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μεταξύ δρομολογητών συνόρου (border routers), που συνδέουν, δηλαδή, δύο διαφορετικά αυτόνομα συστήματα. Η επίδοση της λειτουργίας της δρομολόγησης εξαρτάται από την επίδοση των πρωτοκόλλων εσωτερικής πύλης, αφού, όχι μόνο έχουν να λάβουν πιο πολύπλοκες αποφάσεις δρομολόγησης, αλλά καθορίζουν απόλυτα την επίδοση και τη σύγκλιση ενός ολόκληρου αυτόνομου συστήματος, γεγονός που ενδιαφέρει τους σχεδιαστές

τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Επομένως, η ανάλυση που ακολουθεί επικεντρώνεται στη μελέτη των IGP πρωτοκόλλων, αφού αυτά καθορίζουν τη διέλευση και την απόδοση του συστήματος.

Τα IGP πρωτόκολλα έχουν δύο κύριες λειτουργίες. Αρχικά, υπολογίζουν ποιο είναι το βέλτιστο μονοπάτι για να δρομολογηθεί η πληροφορία και, στη συνέχεια, ενημερώνει τους πίνακες δρομολόγησης για την εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού. Η δεύτερη αυτή λειτουργία περιλαμβάνει τόσο την ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης του ίδιου του δρομολογητή όσο και την ενημέρωση των υπόλοιπων δρομολογητών του δικτύου. Κάθε πρωτόκολλο χειρίζεται τα παραπάνω ζητήματα με μοναδικό τρόπο και ακριβώς αυτός ο διαφορετικός χειρισμός είναι που διαφοροποιεί τα πρωτόκολλα μεταξύ τους. Γενικά, διακρίνονται δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων που ακολουθούν τις ίδιες βασικές κοινές αρχές κατά την επίλυση των παραπάνω ζητημάτων. Αυτές οι κατηγορίες είναι τα πρωτόκολλα *διανύσματος απόστασης* (distance vector) και τα πρωτόκολλα *κατάστασης της ζεύξης* (link state). Στη συνέχεια εξετάζονται δύο βασικοί αντιπρόσωποι των πρωτοκόλλων αυτών, το RIP (Routing Information Protocol - Πρωτόκολλο Δρομολόγησης Πληροφοριών) και το OSPF (Open Shortest Path First - Ανοικτή Πρώτα η Βραχύτερη Διαδρομή).

4.1.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης Πληροφοριών, RIP

Το RIP είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναπτύχθηκαν για τη δρομολόγηση εντός ενός αυτόνομου συστήματος και χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι και σήμερα. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου μονοπατιού χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος εύρεσης του κοντύτερου μονοπατιού Bellman-Ford, ο οποίος χρησιμοποιείται σε όλα τα πρωτόκολλα διανύσματος απόστασης. Η λειτουργία του αλγορίθμου βασίζεται στα εξής βήματα:

- Κάθε κόμβος διατηρεί ένα σύνολο τριάδων της μορφής (Προορισμός, Επόμενο βήμα, Κόστος) οι οποίες φυλάσσονται στον τοπικό πίνακα δρομολόγησης που διατηρεί κάθε ένας από τους δρομολογητές.

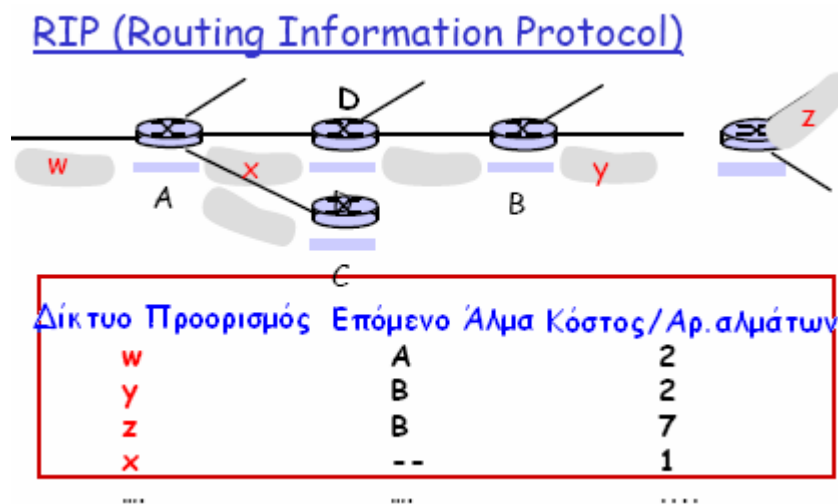
- Το κόστος υπολογίζεται βάσει του αριθμού αλμάτων μέχρι τον προορισμό. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός αλμάτων είναι 15. Πέρα από αυτόν, το δίκτυο θεωρείται μη προσεγγίσιμο.
- Ανταλλάσσει μηνύματα απόκρισης (δημοσιοποιήσεις) με τους γειτονικούς, απευθείας συνδεδεμένους δρομολογητές κάθε φορά που συμβαίνει αλλαγή στο δίκτυο ή κάθε 30 δευτερόλεπτα, αν δεν έχει μεσολαβήσει αλλαγή.
- Κάθε μήνυμα απόκρισης περιλαμβάνει ένα σύνολο από ζεύγη της μορφής: (Προορισμός, Κόστος)
- Σε περίπτωση που ο δρομολογητής λάβει μήνυμα που περιέχει τον προορισμό που υπάρχει καταγεγραμμένος στον πίνακα δρομολόγησης που διατηρεί, αλλά με χαμηλότερο κόστος, τότε αντικαθιστά την τοπική καταχώρηση με την καλύτερη που μόλις έλαβε από το γειτονικό δρομολογητή.
- Σε περίπτωση που παρέλθουν 180 δευτερόλεπτα και ο δρομολογητής δεν έχει λάβει μήνυμα δημοσιοποίησης από το γειτονικό δρομολογητή, ο γειτονικός δρομολογητής θεωρείται μη προσεγγίσιμος και αφαιρείται από τον πίνακα δρομολόγησης.

Επομένως, ανά 30 δευτερόλεπτα το αργότερο, συμβαίνει ανταλλαγή δημοσιοποιήσεων μεταξύ γειτονικών δρομολογητών. Στα μηνύματα που ανταλλάσσονται ο δρομολογητής, στέλνει ολόκληρο τον πίνακα δρομολόγησης, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει έως και 24 δίκτυα. Επομένως, πρόκειται για ανταλλαγή μεγάλης ποσότητας πληροφορίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η οποία είναι συνήθως ήδη γνωστή.

Παράλληλα, το μέγιστο επιτρεπόμενο κόστος είναι 15 άλματα, γεγονός που δεν ευνοεί την επεκτασιμότητα του δικτύου. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται στη δεύτερη έκδοση του RIP που έχει αναπτυχθεί και επιτρέπει έως και 224 άλματα, μετατρέποντας το πρωτόκολλο σε πλήρως επεκτάσιμο.

Το κυριότερο πρόβλημα του πρωτοκόλλου RIP είναι η συμπεριφορά του στην περίπτωση όπου κάποιο υποδίκτυο σταματήσει να είναι διαθέσιμο. Τα άσχημα νέα στο παρόν πρωτόκολλο μαθαίνονται πολύ αργά στην άλλη άκρη του δικτύου, γεγονός που όχι μόνο κάνει πολύ αργή τη σύγκλιση, αλλά μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο σε ατέρμονες βρόχους δρομολόγησης και σε λανθασμένη εικόνα του συνολικού δικτύου.

Αυτό συμβαίνει διότι ο κάθε δρομολογητής ενημερώνει μόνο τους γειτονικούς του δρομολογητές, με αποτέλεσμα η είδηση να αργεί πολύ να διαδοθεί σε όλους τους κόμβους. Παράλληλα, οι δρομολογητές που δεν έχουν ειδοποιηθεί για τη μη διαθεσιμότητα του υποδικτύου, διαμηνύουν το υποδίκτυο ως διαθέσιμο, παραπλανώντας όλο το δίκτυο. Το αποτέλεσμα είναι η άσκοπη κυκλοφορία πακέτων προς κάποιο δίκτυο που ουσιαστικά δεν υπάρχει πλέον. Το τελευταίο αυτό πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τον αλγόριθμο του *διαιρεμένου ορίζοντα* (split horizon) που απαγορεύει στο δρομολογητή να στείλει πληροφορίες για ένα υποδίκτυο, πίσω στον δρομολογητή που τον πληροφόρησε για την ύπαρξη του υποδικτύου αυτού. Η παραπάνω μέθοδος λύνει το πρόβλημα των ατέρμωνων βρόχων, χωρίς να μειώνει βέβαια το χρόνο που απαιτείται για τη σύγκλιση του δικτύου, που παραμένει αργή.



Σχήμα 4.1.1.1 Παράδειγμα πίνακα δρομολόγησης του δρομολογητή D

4.1.2 Πρωτόκολλο ανοιχτή πρώτα η βραχύτερη διαδρομή, OSPF

Το OSPF αποτελεί το διάδοχο του RIP πρωτοκόλλου και έρχεται να αντιμετωπίσει τις αδυναμίες του. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο κατάστασης της ζεύξης που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ελαχίστου κόστους του Dijkstra για να καθορίσει ένα δένδρο βραχύτερης διαδρομής προς όλα τα δίκτυα, με το συγκεκριμένο δρομολογητή ως κόμβο ρίζας. Ο πίνακας δρομολόγησης του κάθε κόμβου λαμβάνεται κατόπιν από το δέντρο βραχύτερης διαδρομής.

Κύρια στρατηγική του OSPF είναι η αποστολή μηνυμάτων κατάστασης της ζεύξης (Link State Advertisements – LSAs) σε όλους τους κόμβους του δικτύου που αφορούν αποκλειστικά τα άμεσα συνδεδεμένα δίκτυα του δρομολογητή. Αυτό είναι απαραίτητο για το σχηματισμό του δένδρου δρομολόγησης και επιτρέπει σε κάθε δρομολογητή να έχει πλήρη εικόνα για την τοπολογία του δικτύου. Παράλληλα τα μηνύματα που ανταλλάσσονται είναι μικρά σε μέγεθος, αφού περιέχουν πληροφορίες μόνο για τα άμεσα συνδεδεμένα δίκτυα και στέλνονται εφόσον συμβεί αλλαγή στην τοπολογία, ή άλλως κάθε 30 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, αποστέλλονται πολύ τακτικά (κάθε 10 δευτερόλεπτα) μηνύματα Hello για τον έλεγχο της κατάστασης της ζεύξης, τα οποία επιτρέπουν στο δρομολογητή την άμεση πληροφόρηση των αλλαγών του δικτύου και συμβάλλουν στην πολύ γρήγορη σύγκλιση του πρωτοκόλλου. Για την αποστολή των μηνυμάτων κατάστασης της ζεύξης χρησιμοποιείται η μέθοδος της *πλημμύρας*, δηλαδή ο κάθε δρομολογητής αποστέλλει μηνύματα καθολικής εκπομπής που λαμβάνονται από κάθε κόμβο του δικτύου. Μόλις ο δρομολογητής λάβει τα μηνύματα όλων των κόμβων του δικτύου, αρχίζει τον υπολογισμό του αλγορίθμου κατάστασης ζεύξης για να σχηματίσει τον τοπικό πίνακα δρομολόγησης.

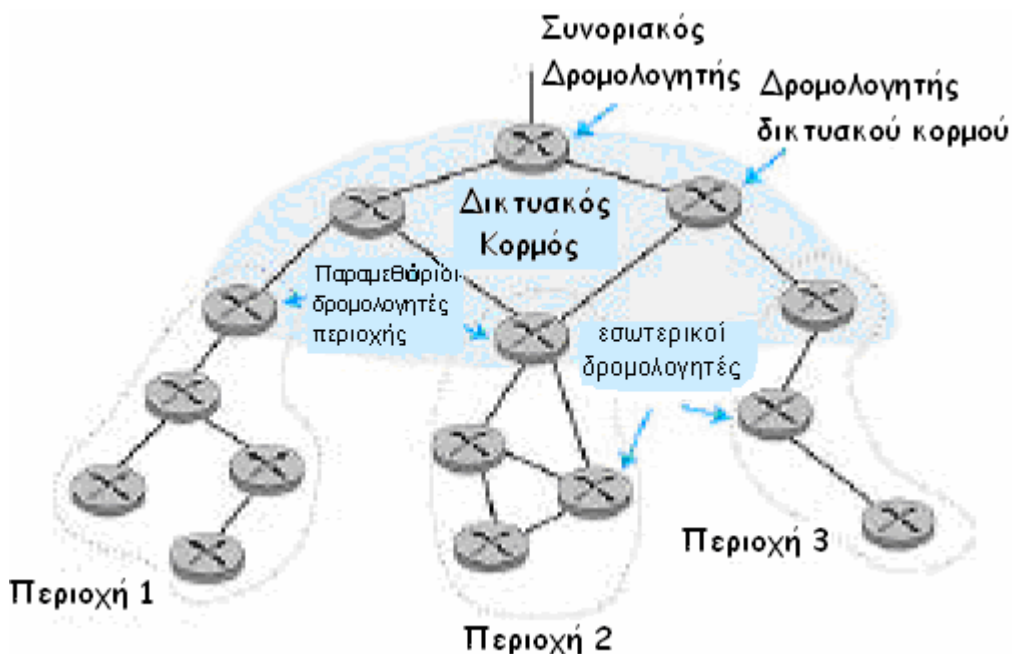
Το κόστος των ζεύξεων καθορίζεται όχι από το πλήθος αλμάτων αλλά από το εύρος μετάδοσης των ζεύξεων, ενώ παράλληλα παρέχεται στο διαχειριστή του δικτύου να ρυθμίσει ο ίδιος το κόστος της κάθε ζεύξης, παρέχοντας καλύτερο έλεγχο του δικτύου. Παράλληλα, δεν υπάρχει όριο αλμάτων πέραν του οποίου το δίκτυο να θεωρείται μη προσεγγίσιμο, γεγονός που προσδίδει επεκτασιμότητα στο OSPF και το κάνει κατάλληλο για πολύ μεγάλα δίκτυα. Σημειώνεται ότι τα μηνύματα κατάστασης της ζεύξης είναι αριθμημένα, έτσι ώστε ο δρομολογητής να γνωρίζει αν η ενημέρωση που λαμβάνει για κάποια ζεύξη είναι πιο πρόσφατη από αυτή που ήδη έχει, οπότε και πρέπει να ενημερωθεί εκ νέου ο πίνακας δρομολόγησης σε περίπτωση αλλαγής, ή αν είναι πιο παλιά, οπότε και αγνοείται.

Παράλληλα με τα παραπάνω το OSPF ενσωματώνει και κάποια εντελώς νέα χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:

- *Ασφάλεια*. Υπάρχουν λειτουργίες πιστοποίησης αυθεντικότητας που διασφαλίζουν την προφύλαξη του δικτύου από κακόβουλους εισβολείς.

- *Πολλαπλές διαδρομές ίδιου κόστους.* Το OSPF έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ των εναλλακτικών ζεύξεων ίσου κόστους. Επιτρέπονται έως και τέσσερις διαδρομές.
- *Δρομολόγηση σημείου προς σημείο και πολλαπλής εκπομπής.* Επιτρέπονται οι λειτουργίες πολυεκπομπής, αφού αυτές είναι απαραίτητες για τη διάχυση των μηνυμάτων κατάστασης των ζεύξεων.
- *Υποστήριξη ιεραρχίας μέσα σε ένα μόνο τομέα δρομολόγησης.* Αυτό αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του OSPF, αφού εντός του ίδιου αυτόνομου συστήματος, είναι δυνατόν οι δρομολογητές να είναι ιεραρχικά οργανωμένοι σε περιοχές. Κάθε μια από τις περιοχές αυτές είναι ανεξάρτητη και χρησιμοποιεί διαφορετικό στιγματότυπο του πρωτοκόλλου. Η περιοχή που περιλαμβάνει το δίκτυο κορμού καλείται Area 0 και όλες οι υπόλοιπες πρέπει να είναι συνδεδεμένες στην περιοχή αυτή.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το ιεραρχικά δομημένο αυτόνομο σύστημα που δρομολογεί την πληροφορία με χρήση OSPF. Διακρίνονται τέσσερα είδη δρομολογητών ανάλογα με τη θέση τους στην ιεραρχική δομή.



Σχήμα 4.1.2.1 Ιεραρχικά Δομημένο ΑΣ OSPF με τέσσερις περιοχές

4.1.3 Σύγκριση κατηγοριών Πρωτοκόλλων

Κλείνοντας τη σύντομη παρουσίαση των πρωτοκόλλων, παρουσιάζονται τα βασικά τους χαρακτηριστικά προκειμένου να επιλεγεί το καταλληλότερο πρωτόκολλο για κάθε εφαρμογή []:

- *Πολυπλοκότητα ανταλλασσόμενων μηνυμάτων.* Τα πρωτόκολλα διανύσματος κατάστασης ανταλλάσσουν σαφώς πολυπλοκότερα μηνύματα από αυτά των πρωτοκόλλων κατάστασης της ζεύξης. Το RIP στέλνει ολόκληρο τον πίνακα δρομολόγησης σε κάθε μήνυμα δημοσίευσης, προκαλώντας την κυκλοφορία μεγάλου όγκου πληροφορίας και επιβαρύνοντας το δίκτυο. Ανταλλάσσει παράλληλα, μηνύματα μόνο με τους γειτονικούς κόμβους. Από την άλλη το OSPF στέλνει μικρά μηνύματα που εμπεριέχουν την κατάσταση μόνο των γειτονικών ζεύξεων σε όλους τους δρομολογητές του δικτύου. Πριν την κατασκευή του πίνακα δρομολόγησης, τα μηνύματα όλων των δρομολογητών πλημμυρίζουν το δίκτυο προκαλώντας προσωρινή έλλειψη διαθεσιμότητας του δικτύου, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Μετά την αρχικοποίηση του δικτύου, το OSPF έχει πολύ καλύτερη επίδοση από το RIP
- *Εποπτικότητα τοπολογίας.* Κάθε κόμβος στο OSPF γνωρίζει τη δομή όλου του δικτύου, γεγονός που δεν συμβαίνει στο RIP όπου ο κόμβος πληροφορείται μόνο για τους γειτονικούς δρομολογητές. Αυτό αποκλείει την πιθανότητα εμφάνισης ατέρμωνων βρόχων στο OSPF.
- *Σύγκλιση.* Τα πρωτόκολλα διανύσματος κατάστασης συγκλίνουν, ύστερα από κάποια αλλαγή τοπολογίας, με πολύ αργούς ρυθμούς, γεγονός που δεν συμβαίνει με το OSPF, όπου ενημερώνονται ταυτόχρονα όλοι οι κόμβοι.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου εξετάζεται η ασύρματη δρομολόγηση. Εδώ η σύγκλιση και η εύρυθμη λειτουργία του δικτύου δεν εξαρτάται τόσο από την επίδοση των πρωτοκόλλων, αλλά από τις συνθήκες του φυσικού στρώματος, που μπορούν να θέσουν εκτός διαθεσιμότητας κάποιες ζεύξεις, χωρίς να ενημερώνονται για το γεγονός τα πρωτόκολλα των ανωτέρων στρωμάτων, δηλαδή τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

4.2 Επίδραση Διαλείψεων στη μετάδοση

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης μπορούν να προκαλέσουν προσωρινή διακοπή μιας ζεύξης και να πλήξουν με αυτόν τον τρόπο τη μετάδοση. Η παρουσία της βροχής επηρεάζει την κατάσταση στο φυσικό στρώμα μετάδοσης, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και κάθε επόμενο στρώμα. Στις επόμενες παραγράφους εξετάζεται το μέγεθος της εισαγόμενης απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης και μελετάται η επίδραση των διαλείψεων στη λειτουργία του δικτύου, παρουσιάζοντας τη μεταβολή των κρίσιμων παραμέτρων επίδοσης του δικτύου.

4.2.1 Υπολογισμός της Απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης

Υπάρχει πλήθος μοντέλων που προβλέπουν την αθροιστική κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης θεωρώντας ως δεδομένα τη γεωμετρία της ζεύξης, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, τις παραμέτρους του μέσου βροχής καθώς και την κατανομή υπέρβασης βροχόπτωσης στη συγκεκριμένη περιοχή []. Πρώτο βήμα για κάθε μεθοδολογία είναι ο υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής, ένα μέγεθος που αναφέρεται σε ομογενές μέσο βροχής μήκους 1km, ενώ η βασική διαφορά είναι ο τρόπος μοντελοποίησης της χωρικής δομής της βροχής. Για τη μοντελοποίηση της χωρικής δομής της βροχής υιοθετείται το νέο υβριδικό μοντέλο HYCELL [] το οποίο προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τη χωρική δομή της έντασης βροχόπτωσης.

4.2.1.1 Υπολογισμός ειδικής απόσβεσης A_0

Για χωρικά ομοιογενείς βροχοπτώσεις, σύμφωνα με την αναφορά [3], η απόσβεση λόγω βροχόπτωσης είναι ανάλογη της διαδρομής που διανύει το κύμα. Επίσης, εξαρτάται από ένα πλήθος άλλων παραγόντων όπως η ένταση R της βροχόπτωσης, η συχνότητα, η πόλωση των κυμάτων και από παράγοντες που εκφράζουν τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής. Το μέγεθος αυτό, βέβαια, στερείται πραγματικής υπόστασης, αφού στην πράξη η κατανομή της έντασης βροχόπτωσης

είναι ανομοιόμορφη. Για πρακτικές εφαρμογές η εξασθένηση λόγω χωρικά ομοιόμορφης βροχής υπολογίζεται από τη σχέση

$$A_L = aR^b L(\text{dB})$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για πολύ μικρά μήκη $L(1 \text{ km})$ προκύπτει ο τύπος υπολογισμού της ειδικής απόσβεσης ο οποίος ισχύει και για συνθήκες ανομοιόμορφης κατανομής της έντασης της βροχόπτωσης και δίνεται από τη σχέση

$$A_0 = aR^b (\text{dB} / \text{km})$$

Οι συντελεστές a, b εξαρτώνται από τη συχνότητα $f(\text{GHz})$, το είδος της πόλωσης και τις παραμέτρους που αναφέρονται στη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής και υπολογίζονται για τυχαία πόλωση από τις σχέσεις

$$a = [(a_h + a_v) + (a_h - a_v) \cos^2 \Phi \cos 2\tau] / 2$$

$$b = [a_h b_h + a_v b_v + (a_h b_h - a_v b_v) \cos^2 \Phi \cos 2\tau] / 2a$$

όπου Φ είναι η γωνία ανύψωσης του ραδιοβήματος και τ η γωνία πόλωσης του κύματος ως προς τον ορίζοντα.

Οι τιμές των (a_h, b_h) και (a_v, b_v) που αναφέρονται στις τιμές των συντελεστών a, b για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση υπολογίζονται προσεγγιστικά με χρήση παλινδρόμησης και με σχέσεις τις μορφής:

$$a_h = A_I f^{B_I}, a_v = A_{II} f^{B_{II}}$$

$$b_h = A_{III} + B_{III} \ln f, b_v = A_{IV} + B_{IV} \ln f$$

όπου οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης είναι οι εξής:

$$A_I = 2.1114 \cdot 10^{-5} \quad B_I = 2.71896$$

$$A_{II} = 1.6953 \cdot 10^{-5} \quad B_{II} = 2.76183$$

$$A_{III} = 1.79764 \cdot 10^{-5} \quad B_{III} = -0.23203$$

$$A_{IV} = 1.83761 \cdot 10^{-5} \quad B_{IV} = -0.25536$$

4.2.1.2 Μοντέλο υπολογισμού της χωρικής δομής της βροχής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα νέο φυσικό μοντέλο των βροχοπυρήνων, όπως αυτό περιγράφεται στην αναφορά [13]. Το μαθηματικός προσδιορισμός του μοντέλου αναφέρεται στο συνδυασμό μιας γκαουσιανής και μιας εκθετικής συνάρτησης, σε

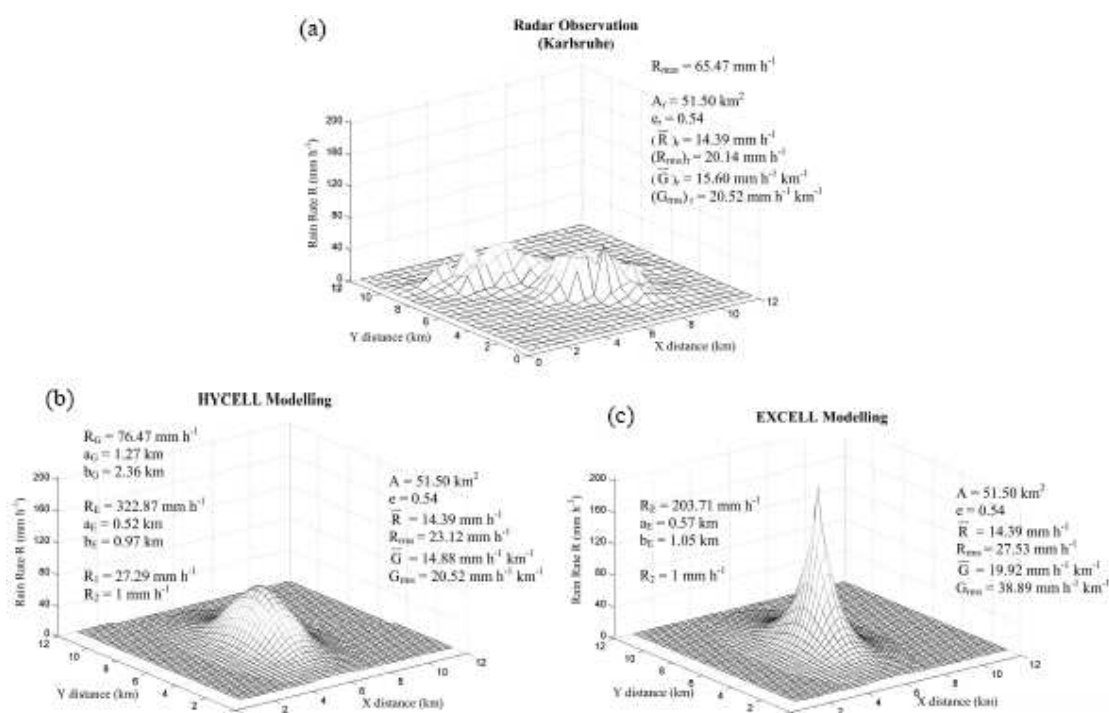
αντίθεση με τα έως τώρα χρησιμοποιούμενα μοντέλα που ακολουθούσαν αποκλειστικά εκθετική προσέγγιση της κατανομής της βροχόπτωσης υπερεκτιμώντας την ένταση της βροχής. Στη μελέτη που ακολουθεί, ως βροχοπυρήνας ορίζεται η περιοχή μέσα στην οποία η ένταση της βροχόπτωσης ξεπερνά το όριο $\tau=1\text{mm h}^{-1}$.

Το φυσικό μοντέλο του βροχοπυρήνα αποτελείται από δύο κύριες παραμέτρους που καλούνται να περιγραφούν. Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί το σχήμα της σταγόνας για το οποίο ακολουθείται η παραδοχή του πεπλατυσμένου ελλειψοειδούς, το οποίο περιγράφεται από τη γωνία προσανατολισμού και τη θέση του ως προς τους άξονες συντεταγμένων. Η δεύτερη παράμετρος, αφορά την οριζόντια κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης στο εσωτερικό του βροχοπυρήνα. Έχει ευρέως υιοθετηθεί ο χωρισμός των βροχοπυρήνων σε δύο είδη ανάλογα με την ένταση βροχόπτωσης στο εσωτερικό τους. Η πρώτη ομάδα βροχοπυρήνων παρουσιάζει ένα μέγιστο ρυθμό βροχόπτωσης και μετά ο ρυθμός αυτός φθίνει, ενώ παράλληλα το μέγιστο δεν ξεπερνά την τιμή $R=10\text{mm h}^{-1}$ (στατικές σταγόνες). Η δεύτερη ομάδα αναφέρεται στους βροχοπυρήνες στο εσωτερικό των οποίων η ένταση βροχόπτωσης ξεπερνά τα 10mm h^{-1} (σταγόνες μεταφοράς).

Τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα υποθέτουν ότι η οριζόντια δομή των βροχοπυρήνων έχει εκθετική εξάρτηση από τη θέση της σταγόνας και ακολουθεί σφαιρική συμμετρία. Ένα τέτοιο μοντέλο όμως αδυνατεί να περιγράψει με καλή προσέγγιση τα φαινόμενα των μουσώνων, τις βροχοπτώσεις στα τροπικά κλίματα καθώς και τις καλοκαιρινές βροχοπτώσεις. Τα αποτελέσματα βάσει της εκθετικής προσέγγισης προκύπτουν πολύ μεγαλύτερα από τις πειραματικές μετρήσεις. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση προτείνεται η χρήση του υβριδικού μοντέλου που αντιμετωπίζει την ένταση βροχόπτωσης όχι ενιαία για κάθε περίπτωση, αλλά ξεχωριστά για κάθε ένα από τα δύο είδη σταγόνων που περιγράφηκαν. Επομένως, για ένα βροχοπυρήνα ελλειπτικού σχήματος η ένταση βροχόπτωσης δίνεται από τον τύπο

$$R(x, y) = \begin{cases} R_G \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a_G^2} + \frac{y^2}{b_G^2} \right) \right] & \text{για } R \geq R_1 \\ R_E \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a_E^2} + \frac{y^2}{b_E^2} \right)^{1/2} \right] & \text{για } R_2 \leq R < R_1 \end{cases}$$

όπου το R_2 αναφέρεται στο ελάχιστο όριο της έντασης της βροχόπτωσης, δηλαδή 1mm h^{-1} , ενώ το R_1 αναφέρεται στην ένταση που αποτελεί το όριο μεταξύ εμφάνισης εκθετικών ή γκαουσιανών χαρακτηριστικών. Στην παραπάνω σχέση υπάρχουν επτά άγνωστες παράμετροι, οι οποίες προσδιορίζονται για κάθε βροχοπυρήνα από την επίλυση 7 υπερβατικών εξισώσεων και με τη βοήθεια των μετρήσεων που παρέχονται από χρήση ραντάρ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των βροχοπυρήνων φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Από τα διαγράμματα προκύπτει η σαφώς ρεαλιστικότερη προσομοίωση της έντασης βροχόπτωσης, αφού το αποτέλεσμα προσεγγίζει καλύτερα τις παρατηρούμενες από ραντάρ τιμές.



Σχήμα 4.2.1.2.1 (α) Μετρήσεις της έντασης βροχόπτωσης από παρατήρηση ραντάρ (β) Προσομοίωση σταγόνων βάσει του προτεινόμενου μοντέλου (γ) Προσομοίωση σταγόνων βάσει των μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενων μοντέλων.

4.2.1.3 Υπολογισμός στατιστικής κατανομής της απόσβεσης

Η μελέτη της προηγούμενης ενότητας προσδιόρισε αποκλειστικά τη χωρική κατανομή της έντασης της βροχόπτωσης χωρίς να εξετάσει καθόλου τη χρονική της εξάρτηση. Για τον προσδιορισμό της χρονικής ανάλυσης της έντασης της

βροχόπτωσης, γίνεται χρήση του συντελεστή συσχέτισης του $R(t)$ [], ο οποίος δίνεται από τη σχέση

$$r = \frac{e^{r' \Sigma_1 \Sigma_2} - 1}{\sqrt{e^{\Sigma_1^2} - 1} \sqrt{e^{\Sigma_2^2} - 1}} \equiv g(r') \quad , r' \in [0,1]$$

Ο παράγοντας $r' = f(x,y,t)$ εξαρτάται από τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά των βροχοπυρήνων και μπορεί να επιλεγεί ίσος με

$$r' = \exp\left(-\frac{|\bar{V}|}{L} |t| - \beta_2 |t|\right) \Rightarrow r' = \exp(-d_A |t|)$$

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει και τη χρονική εξάρτηση της έντασης της βροχόπτωσης και συνεπώς και της εξασθένησης λόγω βροχής.

Συνεπώς ισχύει

$$R(x, y, t) = \begin{cases} \exp(-d_A |t|) \cdot R_G \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a_G^2} + \frac{y^2}{b_G^2}\right)\right] & \text{για } R \geq R_1 \\ \exp(-d_A |t|) R_E \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a_E^2} + \frac{y^2}{b_E^2}\right)^{1/2}\right] & \text{για } R_2 \leq R < R_1 \end{cases}$$

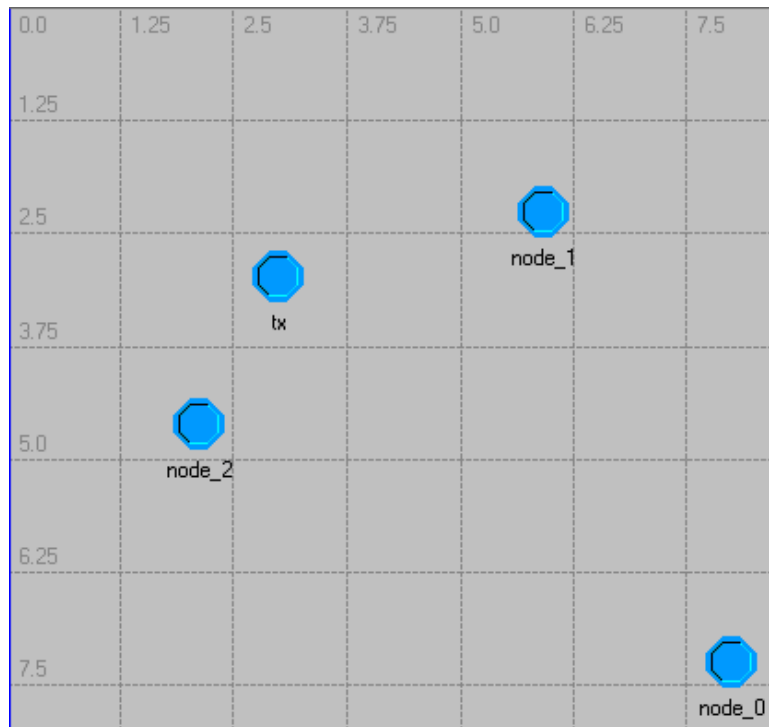
Έχοντας υπολογίσει τις παραμέτρους των προηγούμενων ενοτήτων, η συνολική απόσβεση που εισάγεται σε μια ζεύξη προκύπτει από τον τύπο

$$A = \int_0^L A_0 dl$$

όπου το L αναφέρεται στο συνολικό μήκος της διαδρομής που διανύει το ραδιοκύμα μέσα στις συνθήκες βροχόπτωσης.

4.2.2 Προσομοίωση απλού συστήματος μοναδικού πομπού

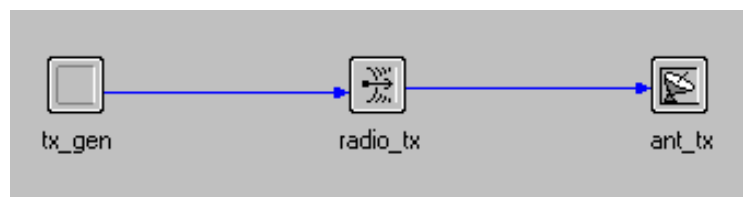
Στη συνέχεια, με χρήση του πακέτου λογισμικού OPNET πραγματοποιήθηκε προσομοίωση ενός απλού συστήματος με πολλούς δέκτες και μοναδικό πομπό. Δημιουργώντας συνθήκες διαλείψεων που προκάλεσαν την αύξηση του BER που μετράται στο δέκτη, εξετάστηκε ο επηρεασμός κρίσιμων παραμέτρων επίδοσης σε σχέση με τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 4.2.2.1 Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης

- Παρουσίαση κόμβου πομπού.

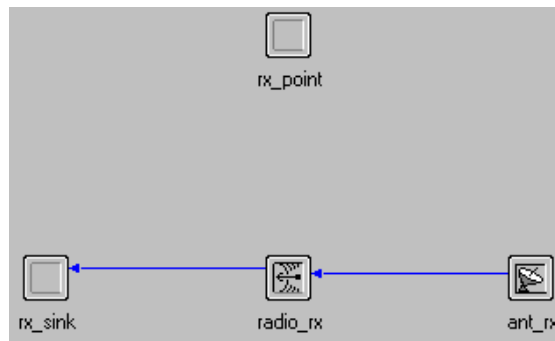
Η δομή του κόμβου που υλοποιήθηκε απαρτίζεται από μια γεννήτρια που παράγει πακέτα ανά προκαθορισμένα σταθερά διαστήματα, το κύκλωμα του πομπού και την κεραία, που θεωρήθηκε ιστροπική για το παρόν μοντέλο.



Σχήμα 4.2.2.2 Κύκλωμα πομπού

- Παρουσίαση κόμβου δέκτη

Ο κόμβος του δέκτη αποτελείται από την κεραία και το κύκλωμα του πομπού. Στη συνέχεια, τα πακέτα προωθούνται για επεξεργασία από τις υπόλοιπες εφαρμογές στο δέκτη. Εδώ έχει τοποθετηθεί ένας κόμβος βύθισης, με στόχο την καταστροφή των πακέτων που λαμβάνονται.

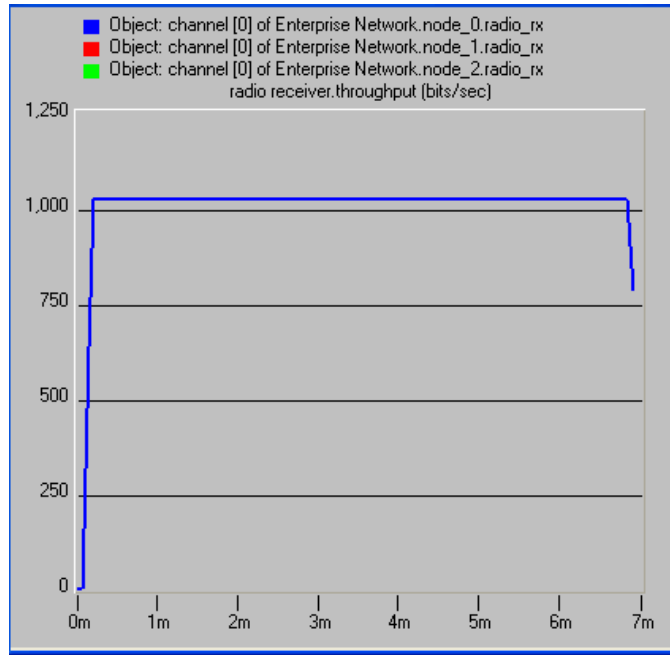


Σχήμα 4.2.2.2 Κύκλωμα δέκτη

Η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι BPSK γιατί εξασφαλίζει τη μικρότερη πιθανότητα λάθους, γεγονός απαραίτητο κατά την ασύρματη μετάδοση. Εξετάζονται οι παράμετροι επίδοσης του συστήματος, αρχικά σε συνθήκες καθαρού ουρανού και στη συνέχεια σε συνθήκες διάλειψης.

4.2.2.1 Μελέτη Διέλευσης πακέτων

Σε συνθήκες καθαρού ουρανού, η διέλευση πακέτων στο σύστημα ήταν ίση με το πλήθος πακέτων που έστειλε ιστροπικά ο δέκτης. Πρόκειται για πακέτα σταθερού μήκους 1024bits που στέλνονται κάθε δευτερόλεπτο. Στο σχήμα που ακολουθεί ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στο πλήθος των ψηφίων ανά δευτερόλεπτο ενώ οριζόντιος στα λεπτά που θα διαρκέσει η προσομοίωση



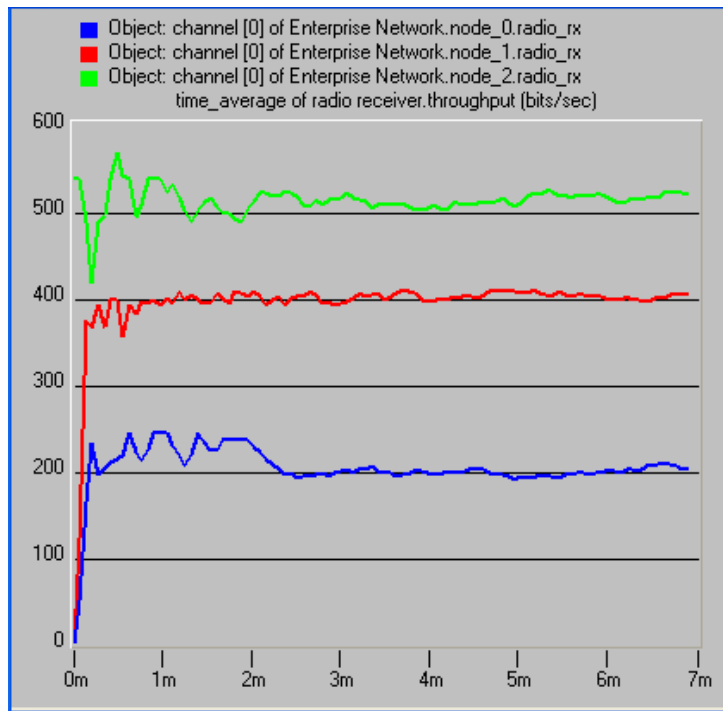
Σχήμα 4.2.2.1.1 Διέλευση πακέτων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού

Στη συνέχεια, εξετάστηκε το παρόν σύστημα υπό συνθήκες διάλειψης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας τη συνάρτηση BER, δηλαδή του ποσοστού λανθασμένων ψηφίων που φτάνουν στο δέκτη, η οποία μεταβλήθηκε κατά την τιμή

$$BER' = BER / A_{rain}$$

όπου A_{rain} αναφέρεται στην εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης.

Παρατηρήθηκε άμεση μείωση της διέλευσης πακέτων, αφού το μεγαλύτερο μέρος των ψηφίων έφθανε αλλοιωμένο. Στη συνέχεια, είναι αρμοδιότητα του δέκτη να αποφασίσει αν έχει καταστραφεί μεγαλύτερο πλήθος ψηφίων από το επιτρεπόμενο δυνατό, οπότε και θα απορρίψει το πακέτο, ή αν το ποσοστό απώλειας είναι αποδεκτό, οπότε το πακέτο δεν θα απορριφθεί.



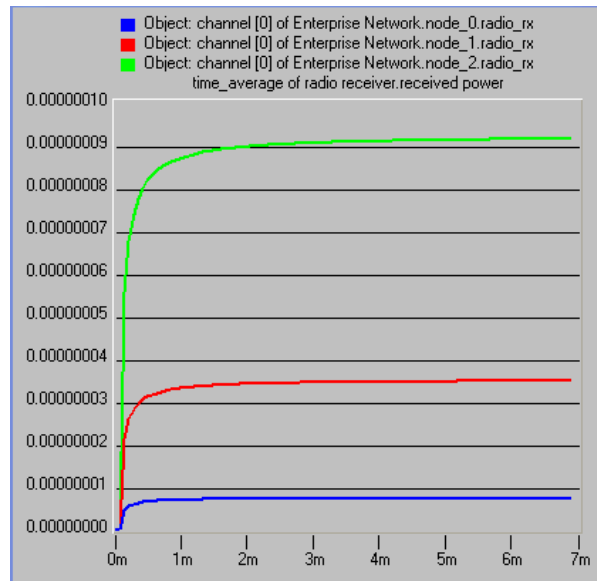
Σχήμα 4.2.2.1.2 Διέλευση πακέτων υπό συνθήκες έντονης βροχόπτωσης

Γίνεται φανερό από το παραπάνω σχήμα ότι, όσο μεγαλύτερη διαδρομή διανύει το κύμα υπό βροχή, τόσο περισσότερο αλλοιωμένο φθάνει το σήμα στο δέκτη. Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στον κόμβο node0 που όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.2.1 είναι ο πιο απομακρυσμένος κόμβος, επομένως το σήμα έχει να διανύσει τη μακρύτερη διαδρομή μέχρι να φθάσει στο δέκτη. Εντελώς αντίστοιχα, ο κόμβος που βρίσκεται κοντύτερα στον πομπό, δηλαδή ο κόμβος node2, παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη διέλευση. Αυτό φαίνεται στο σχήμα από το γεγονός ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στον κόμβο 2 βρίσκεται ψηλότερα από όλες τις άλλες.

4.2.2.2 Μελέτη επίδρασης στην ισχύ λήψης

Δεδομένου ότι στο παρόν σύστημα δεν υπάρχει σχήμα αναμετάδοσης πακέτων σε περίπτωση απώλειας, η ισχύ εκπομπής δεν παρουσιάζει μεταβολή λόγω αποτυχημένης μετάδοσης. Αν είχε εισαχθεί σχήμα αναμετάδοσης πλαισίων, ο πομπός πραγματοποιώντας την επαναμετάδοση, θα ξόδευε διπλάσια ισχύ από ότι ξοδεύει για ένα πακέτο που φθάνει επιτυχώς στο δέκτη κατά την πρώτη προσπάθεια αποστολής.

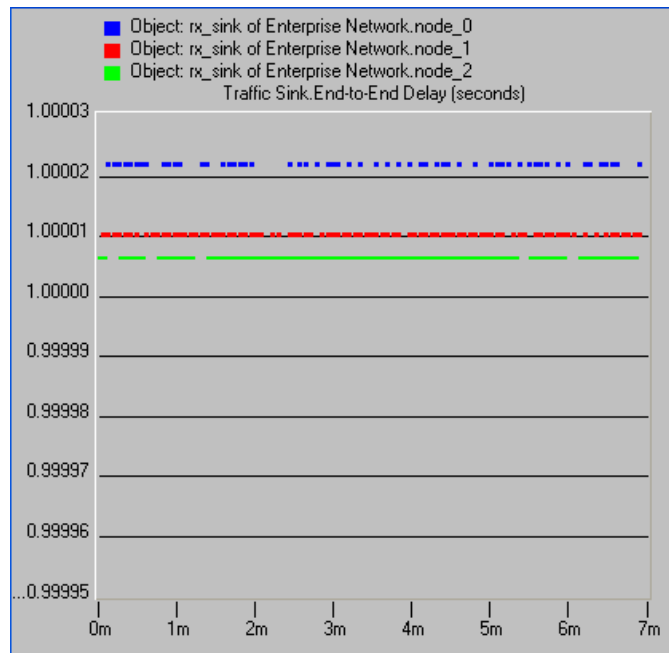
Στο σχήμα που ακολουθεί η διαφοροποίηση στη λαμβανομένη ισχύ οφείλεται αποκλειστικά στη διαφορά θέσης των κόμβων στο δίκτυο, για αυτό το λόγο και δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο πιο απομακρυσμένος κόμβος του δικτύου (node0) λαμβάνει ένα πιο εξασθενημένο σήμα, και η καμπύλη ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.2.2.1., αντιστοιχεί στη χαμηλότερη από τις τρεις καμπύλες. Αντίστοιχα ο πιο κοντινός κόμβος στον πομπό λαμβάνει και τη μεγαλύτερη ισχύ.



Σχήμα 4.2.2.2.1 Μελέτη λαμβανόμενης ισχύος σε σύστημα παρουσία διαλείψεων.

4.2.2.3 Επίδραση στη συνολική καθυστέρηση

Υπό την παρουσία διαλείψεων αυξάνεται η καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων. Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η τιμή της καθυστέρησης για κάθε λαμβανόμενο πακέτο. Για κάθε πακέτο η καθυστέρηση είναι σταθερή και ανάλογη με την καθυστέρηση μετάδοσης από τον πομπό στο δέκτη. Το μέγεθος αυτό είναι ανάλογο της μεταξύ τους απόστασης. Σε περίπτωση που υπήρχε σχήμα αναμετάδοσης πακέτων στον πομπό, η καθυστέρηση θα είχε διαφοροποιήσεις ανάλογα με το πλήθος των απαιτούμενων αναμεταδόσεων προκειμένου να επιτευχθεί επιτυχής μετάδοση.



Σχήμα 4.2.2.3.1 Καθυστέρηση ανά πακέτο σε συνθήκες διάλειψης.

Παρατηρούμε ότι όσο απομακρύνεται ο δέκτης από τον πομπό, η καμπύλη γίνεται διακεκομμένη, με όλο και μεγαλύτερα κενά. Η καμπύλη που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καθυστέρηση (βρίσκεται ψιλότερα) αντιστοιχεί στον πιο απομακρυσμένο κόμβο του δικτύου. Το γεγονός ότι είναι έντονα διακεκομμένη εκφράζει το πλήθος των λαμβανόμενων πακέτων που όλο και ελαττώνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση πομπού και δέκτη. Δηλαδή κάποια πακέτα δεν φθάνουν στο δέκτη, για αυτό και δεν υπάρχει και καταχώριση για τη συνολική καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων αυτών. Στην ιδανική περίπτωση η καθυστέρηση θα ήταν μια συνεχόμενη γραμμή αφού θα είχε τιμή μέτρησης καθυστέρησης για κάθε λαμβανόμενο πακέτο.

4.3 Διαστρωματωμένη σχεδίαση Αλγορίθμου Δρομολόγησης

Στην προηγούμενη ενότητα διαπιστώθηκε η έντονη επίδραση των διαλείψεων, οι οποίες επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του δικτύου. Στην παράγραφο που ακολουθεί προτείνεται μια νέα σχεδίαση διαστρωματωμένη (cross-layer) ώστε, με εκμετάλλευση της προβλεψιμότητας του μέσου, να επιτευχθεί βελτίωση της επίδοσης των ad hoc ασύρματων δικτύων.

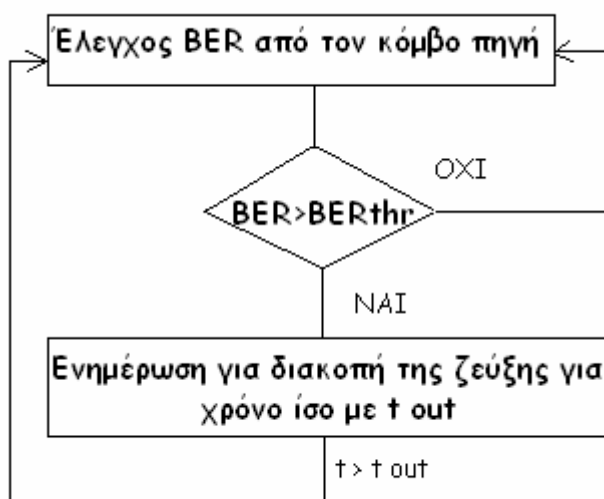
Ο όρος διαστρωματωμένη σχεδίαση, αναφέρεται στην ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε πρωτόκολλα μη διαδοχικών στρωμάτων του OSI. Αυτό απεικονίζεται λογικά με την τοποθέτηση νέων σημείων πρόσβασης υπηρεσιών (Service Access Point – SAP), όπου το στρώμα N θα παρέχει υπηρεσίες, όχι αποκλειστικά στο στρώμα N+1, αλλά και σε όποιο από τα ανώτερα στρώματα χρειάζεται.

Ο αλγόριθμος που προτείνεται, εκμεταλλεύεται την πληροφορία του φυσικού στρώματος και ενημερώνει αυτόματα τους πίνακες δρομολόγησης ανάλογα με την κατάσταση της ζεύξης. Επομένως, οι συνθήκες που επικρατούν στο ασύρματο μέσο μετάδοσης επηρεάζουν αποφάσεις δρομολόγησης, δηλαδή λειτουργίες που ανήκουν αποκλειστικά στο στρώμα δικτύου. Επομένως, γνωρίζοντας τις συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό στρώμα μετάδοσης, ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι σε θέση να γνωρίζει πριν δρομολογήσει το πακέτο μέσω κάποιας ζεύξης αν θα υπάρξει επιτυχής μετάδοση. Αυτό βέβαια, προϋποθέτει το χωρισμό των καταστάσεων στο φυσικό στρώμα μετάδοσης σε «καλές» και «κακές», κάτι που έχει ήδη υλοποιηθεί στην προηγούμενη ανάλυση. Ανάλογα με την επιλεγόμενη κατάσταση ο νέος αλγόριθμος δρομολόγησης πραγματοποιεί τα εξής:

- Στην περίπτωση όπου η κατάσταση μιας ζεύξης είναι κακή, ο δρομολογητής απλώς αφαιρεί την καταχώριση της συγκεκριμένης ζεύξης από τον πίνακα δρομολόγησης. Πλέον, είναι αρμοδιότητα του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης να υπολογίσει εκ νέου τη βέλτιστη διαδρομή προς τον τελικό δέκτη. Μόλις περάσει χρόνος ίσος με τη διάρκεια της διάλειψης, η ζεύξη γίνεται ξανά διαθέσιμη και γρήγορα ανακαλύπτεται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Αν δεν είχε ειδοποιηθεί ο αλγόριθμος δρομολόγησης, το πακέτο θα είχε σταλεί κανονικά, αφού η συγκεκριμένη διαδρομή θα εκλαμβάνόταν όχι μόνο ως διαθέσιμη αλλά και ως η βέλτιστη δυνατή. Το αποτέλεσμα θα ήταν το πακέτο να μην έφθανε ποτέ στον προορισμό του προκαλώντας μείωση της συνολικής διέλευσης πακέτων. Στην περίπτωση όπου γίνει από τα ανώτερα στρώματα χρήση πρωτοκόλλου που πραγματοποιεί έλεγχο λαθών, όπως άλλωστε συμβαίνει κατά την ασύρματη μετάδοση, αυτό θα οδηγούσε σε επανεκπομπή του πακέτου, γεγονός που αυξάνει την ισχύ εκπομπής.

- Στην περίπτωση όπου η κατάσταση μιας ζεύξης είναι καλή, το στρώμα δικτύου συνεχίζει κανονικά τη μετάδοση χωρίς να ενημερώσει το πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Η παραπάνω διαδικασία εικονίζεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί



Σχήμα 4.3.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου δρομολόγησης.

Έχοντας ολοκληρώσει τη θεωρητική περιγραφή του αλγορίθμου, ακολουθεί η προσομοίωση ενός συστήματος που κάνει χρήση της τεχνολογίας που περιγράφηκε προηγουμένως. Αναμένεται σαφής βελτίωση της διέλευσης πακέτων, αφού το ποσοστό λανθασμένων πακέτων μειώνεται αισθητά. Ο λόγος είναι ότι η πιθανότητα απώλειας πακέτων γίνεται πολύ χαμηλή, δεδομένου ότι τα πακέτα δεν χάνονται αλλά επαναδρομολογούνται. Η αποστολή μιας ροής πακέτων σε συνθήκες έντονης βροχόπτωσης, θα οδηγούσε στην απώλεια μέρους των πακέτων μόλις το μετρούμενο BER υπερβεί το όριο που εξασφαλίζει αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας. Αυτό θα οδηγούσε στη μείωση της διέλευσης και την αύξηση της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής. Επιπλέον, κάποια πακέτα θα καθυστερούσαν πολύ να φτάσουν στον προορισμό τους.

Με την προτεινόμενη σχεδίαση, υπό συνθήκες έντονης βροχόπτωσης, η ζεύξη διακόπτεται. Ο εκάστοτε χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος δρομολόγησης ενημερώνεται αυτόματα για τη νέα κατάσταση και συνεχίζει τη δρομολόγηση από τις εναλλακτικές διαδρομές. Δεδομένης της αρχιτεκτονικής πλέγματος του δικτύου, ορισμένες εναλλακτικές διαδρομές θα βρίσκονται εκτός της ζώνης έντονης βροχόπτωσης και θα είναι διαθέσιμες. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί και ολοκληρώνει την παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται όλα τα προηγούμενα λεπτομερώς με χρήση του πακέτου λογισμικού OPNET, στο οποίο προσομοιώνεται το ad hoc ασύρματο δίκτυο που έχει μελετηθεί.

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση με χρήση OPNET

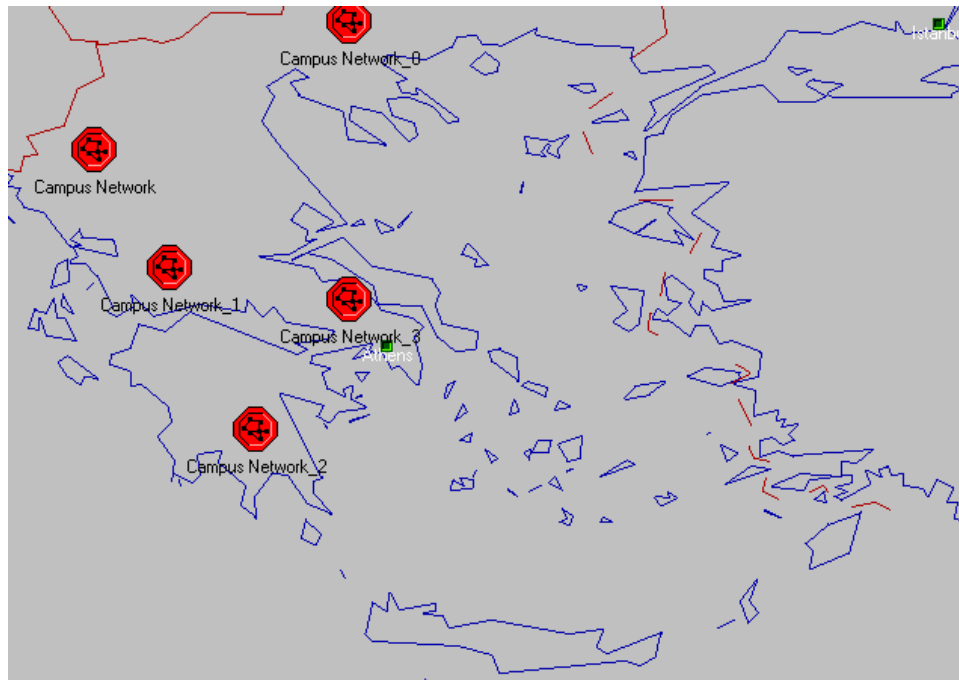
Το δίκτυο, η λειτουργία του οποίου προσομοιώνεται στο παρόν κεφάλαιο, είναι ένα δίκτυο τοπολογίας πλέγματος, που απαρτίζεται από κόμβους δύο ειδών ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε κόμβου. Μελετάται η επίδοση του αλγορίθμου που σχεδιάστηκε για τις δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων, διανύσματος απόστασης και κατάστασης της ζεύξης και εξετάζεται η αποτελεσματικότητά του σε διάφορες κλιματικές ζώνες. Η ανάλυση ξεκινά με μια σύντομη περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης και συνεχίζει με την παρουσίαση της τοπολογίας και των καμπυλών επίδοσης του συστήματος που πιστοποιούν τη βελτίωση στη συνολική διέλευση πακέτων του δικτύου.

5.1 Περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης OPNET

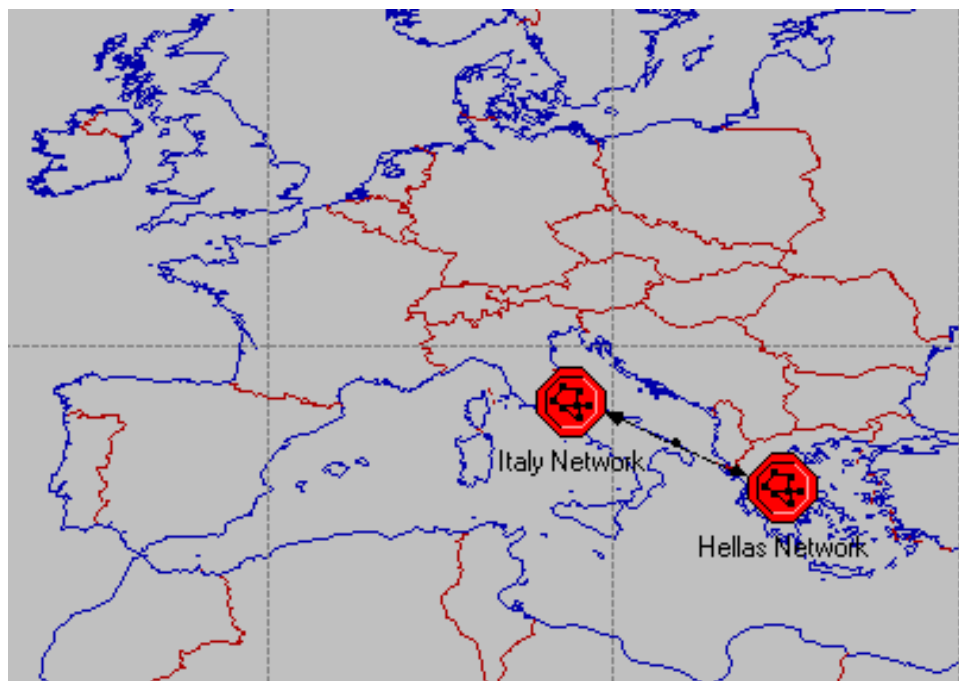
Το OPNET είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων που περιέχει κάθε χρησιμοποιούμενη τεχνολογία τόσο σε επίπεδο πρωτοκόλλων όσο και σε επίπεδο εξοπλισμού. Το σημαντικό είναι ότι ο χρήστης έχει πλήρη πρόσβαση στα χαρακτηριστικά και στις προδιαγραφές λειτουργίας του κάθε αντικείμενου, αφού μπορεί να επεξεργαστεί και να τροποποιήσει τον κώδικα που προσομοιώνει τη λειτουργία του αντικείμενου. Με τον όρο αντικείμενο αναφέρεται κάθε δομικό στοιχείο του δικτύου, σε επίπεδο τόσο τεχνολογίας, όσο και λογισμικού. Ο κώδικας για το κάθε αντικείμενο είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C, γεγονός το οποίο προσφέρει στον χρήστη μεγάλα επίπεδα προσαρμοστικότητας των αντικείμενων στις επιθυμίες και ανάγκες του, αφού κάθε αντικείμενο γίνεται αυτομάτως πλήρως παραμετροποιήσιμο.

Επίσης, είναι εφικτή η προσομοίωση μεγάλης κλίμακας γεωγραφικά διασπαρμένων δικτύων. Μπορεί να μελετηθεί ένα τοπικό δίκτυο στο κτίριο μιας εταιρείας καθώς και το μητροπολιτικό δίκτυο που σχηματίζεται στη Στερεά Ελλάδα από το σύνολο των δικτύων της εν λόγω εταιρείας. Τέλος, είναι εφικτή η μελέτη του δικτύου ευρείας

ζώνης που διασυνδέει το μητροπολιτικό δίκτυο με το δίκτυο των υπόλοιπων παραρτημάτων σε οποιοδήποτε γεωγραφικό μήκος και πλάτος βρίσκεται αυτό.



Σχήμα 5.1.1 Μητροπολιτικό δίκτυο Ελλάδας



Σχήμα 5.1.2 Δίκτυο Ευρείας Ζώνης που συνδέει την Ελλάδα με την Ιταλία

Το δίκτυο στο οποίο έγινε η προσομοίωση αναφέρεται σε ένα μητροπολιτικό δίκτυο που έχει τη δυνατότητα να εκτείνεται κατά μήκος του Ελλαδικού χώρου. Η πραγματοποίηση βέβαια, της προσομοίωσης για πλήθος κλιματικών ζωνών δίνει τη δυνατότητα της γεωγραφικής μεταφοράς ενός τέτοιου δικτύου οπουδήποτε, αρκεί να ορίζεται κάθε φορά κατάλληλα η κλιματική ζώνη στην οποία πρόκειται να τοποθετηθεί.

Η έκδοση του OPNET που χρησιμοποιήθηκε δεν είχε ενσωματωμένη την τεχνολογία WiMax, δεδομένου ότι είναι μια αρκετά πρόσφατη τεχνολογία για την οποία οι θεωρητικές προδιαγραφές δεν έχουν ακόμα ολοκληρωθεί. Για το λόγο αυτό το κύριο αρχικό ζήτημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η εισαγωγή της τεχνολογίας WiMax στο OPNET modeler. Αυτό είχε τα εξής στάδια:

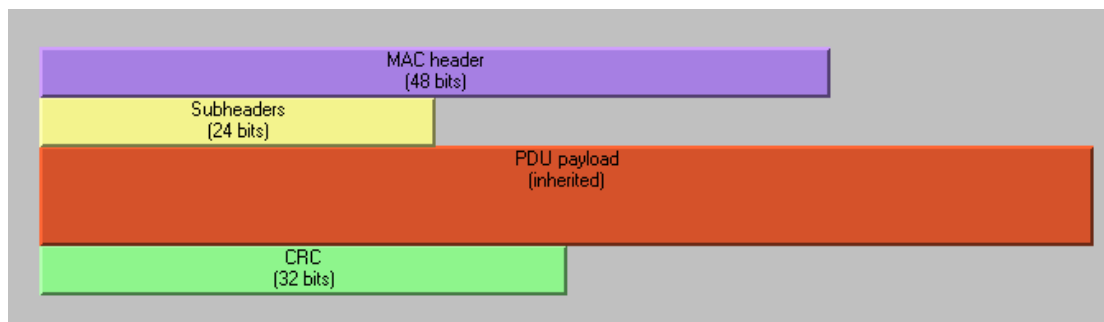
- Εισαγωγή του MAC υποστρώματος, όπως αυτό περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 της διπλωματικής και ορισμός της μορφής των ανταλλασσόμενων πακέτων δεδομένων και πακέτων ελέγχου. Το βήμα αυτό ολοκληρώνει την περιγραφή MAC της ανταλλασσόμενης πληροφορίας.
- Ορισμός της κεντρικής συχνότητας μετάδοσης της πληροφορίας στα 12GHz, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η επικοινωνία με χρήση WiMax αλλά και να εξασφαλιστεί η ισχυρή επίδραση των βροχοπτώσεων ώστε να μπορεί να μελετηθεί και η επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου. Παράλληλα, ορίστηκε η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση του σήματος κατά την εκπομπή και λήψη. Το βήμα αυτό ολοκληρώνει την περιγραφή του φυσικού στρώματος.
- Τροποποίηση των ήδη υλοποιημένων από το OPNET κόμβων ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν ασύρματη επικοινωνία κορμού κάτι που δεν προβλεπόταν από την ήδη υλοποιημένη τεχνολογία WiFi.
- Εισαγωγή του προσομοιωτή βροχής. Το βήμα αυτό εξασφαλίζει τη διάκριση των δύο καταστάσεων της ζεύξης από τον κάθε κόμβο δρομολογητή.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα παραπάνω βήματα που έθεσαν τις προδιαγραφές για την προσομοίωση του WiMax δικτύου.

5.2 Ορισμός της μορφής των ανταλλασσόμενων πακέτων

Μόλις το OPNET τεθεί σε λειτουργία, παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να ορίσει όχι μόνο νέα έργα (project) αλλά και πλήθος άλλων συναρτήσεων, όπως νέα είδη κόμβων και ζεύξεων, νέες συναρτήσεις και διαδικασίες.

Επιλέχθηκε να δημιουργηθεί ένας νέος τύπος πακέτων τα WiMax πακέτα, των οποίων ο συντακτικός σχεδιασμός έχει παρουσιαστεί κατά την τεχνική περιγραφή του πρωτοκόλλου. Επισημαίνεται ότι το πεδίο των Ειδικών Επικεφαλίδων (Subheader) είναι μεταβλητού μήκους, αφού μπορεί να λάβει τις τιμές 8, 16 ή 24 ψηφία ανάλογα με το αν εκτελούνται λειτουργίες κατάτμησης, επανένωσης ή αίτησης αυτόματης απάντησης. Κατά τη σχεδίαση δεσμεύθηκε το υπερσύνολο των παραπάνω πεδίων που είναι τα 24 ψηφία. Η μορφή του τελικού πλαισίου του MAC υποστρώματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



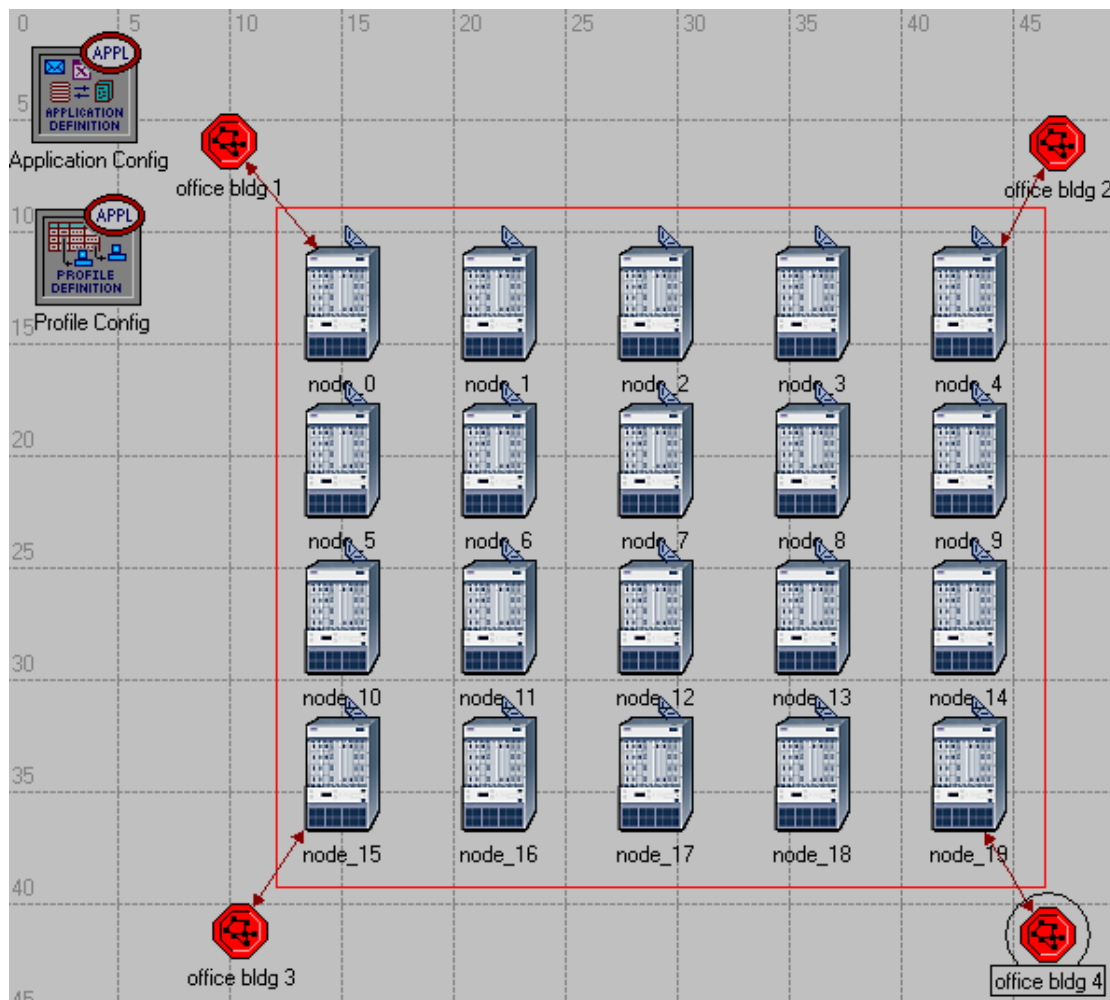
Σχήμα 5.2.1 Δομή πακέτου 802.16a

5.3 Είδη χρησιμοποιούμενων κόμβων

Στο παράδειγμα δικτύου που υλοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε τοπολογία πλέγματος που αποτελείται από πλήθος κόμβων που επικοινωνούν με ασύρματο τρόπο. Το ασύρματο ad hoc δίκτυο που μελετήθηκε εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Διακρίνονται τα ακόλουθα είδη κόμβων.

- Δρομολογητές με ασύρματες διεπαφές.

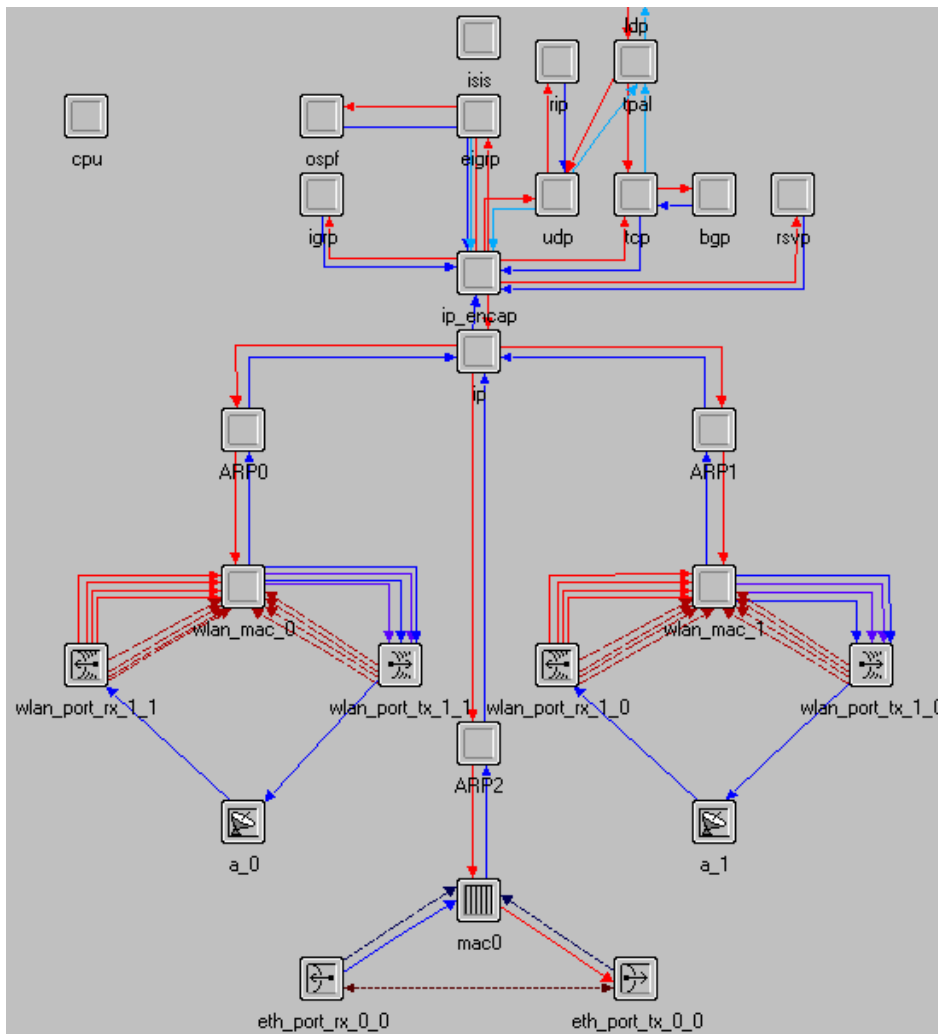
Το υλοποιημένο μοντέλο ασύρματων δρομολογητών στο OPNET αποτελούνταν από δύο ασύρματες διεπαφές οι οποίες απαρτίζονται από ένα κύκλωμα πομποδέκτη και μια κεραία που χρησιμοποιείται για εκπομπή και λήψη. Παράλληλα υπάρχουν και επαφές Ethernet που εξασφαλίζουν τη διασύνδεση στο ασύρματο δίκτυο απλών σταθμών εργασίας. Αυτή η υλοποίηση ήταν κατάλληλη για ασύρματη επικοινωνία σημείου προς σημείο ή και για τοπολογία δακτυλίου. Αυτό δεν ήταν αρκετό για την υλοποίηση της ασύρματης τοπολογίας πλέγματος. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η τροποποίηση των ήδη υπάρχοντων αντικείμενων.



Σχήμα 5.3.1 Τοπολογία ασύρματου δικτύου

Για την υλοποίηση των συνοριακών κόμβων του δικτύου, όπου διασυνδέονται με ενσύρματο τρόπο τα τοπικά δίκτυα, χρησιμοποιήθηκαν οι κόμβοι δρομολογητών με

δύο ασύρματες διεπαφές και μια επαφή Ethernet. Δεδομένου ότι επιδιώκεται επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις χρειάστηκε να προστεθεί μια κατευθυντική κεραία σε κάθε ασύρματη διεπαφή ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικά η επικοινωνία. Η δομή του κόμβου αυτής της μορφής φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

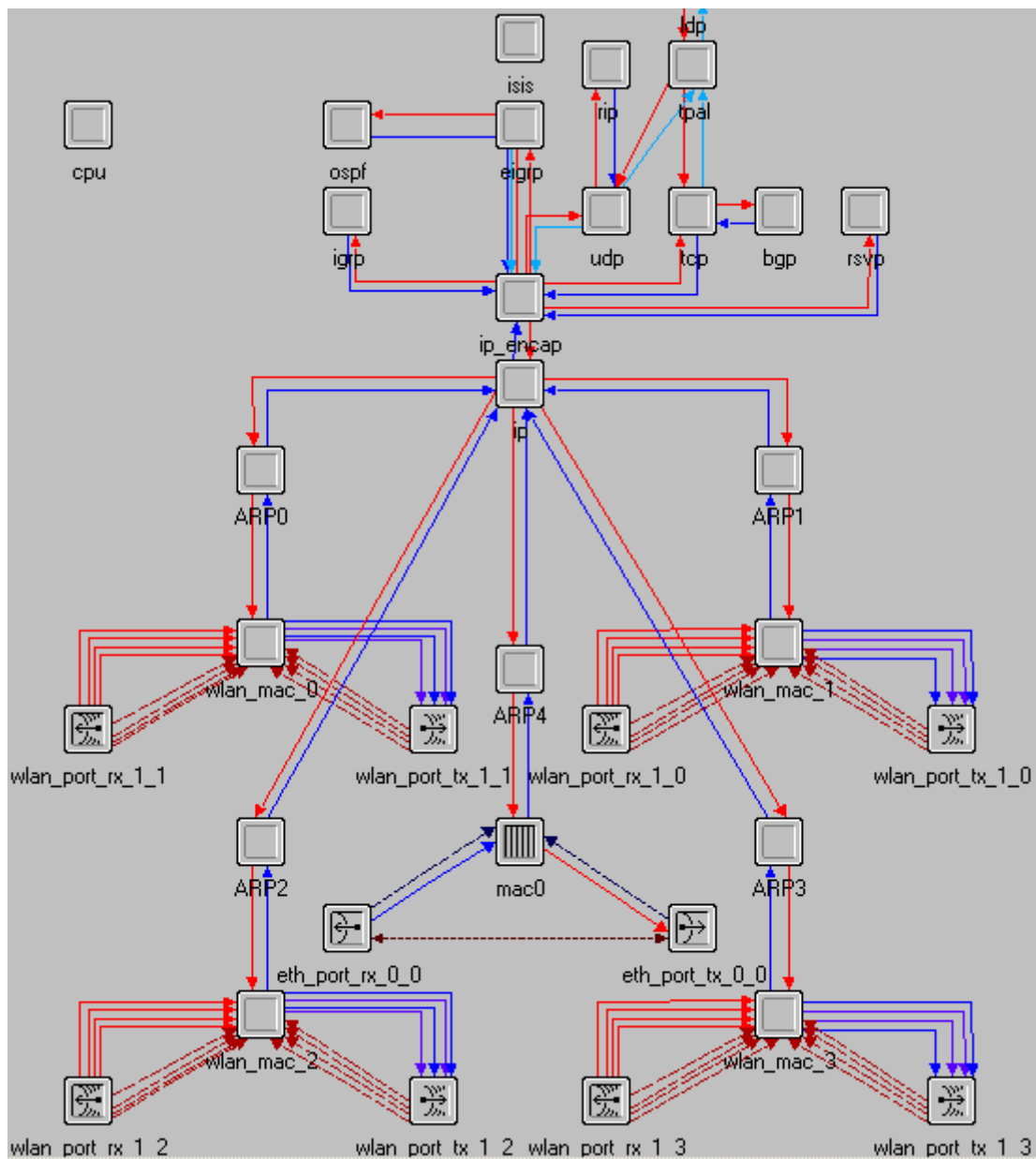


Σχήμα 5.3.2 Δομή του ασύρματου συνοριακού δρομολογητή πρόσβασης

Εκτός από τον ασύρματο συνοριακό δρομολογητή πρόσβασης των τοπικών δικτύων, χρησιμοποιήθηκαν και συνοριακοί δρομολογητές οι οποίοι καλούνται να επικοινωνήσουν με τρεις γειτονικούς δρομολογητές, τον ασύρματο δρομολογητή πρόσβασης του τοπικού δικτύου και τους δύο γειτονικούς δρομολογητές της δομής πλέγματος με τους οποίους συνορεύει. Ο παραπάνω κόμβος δεν μπορούσε να εξασφαλίσει επαρκές πλήθος συνδέσεων, οπότε και τροποποιήθηκε ώστε να

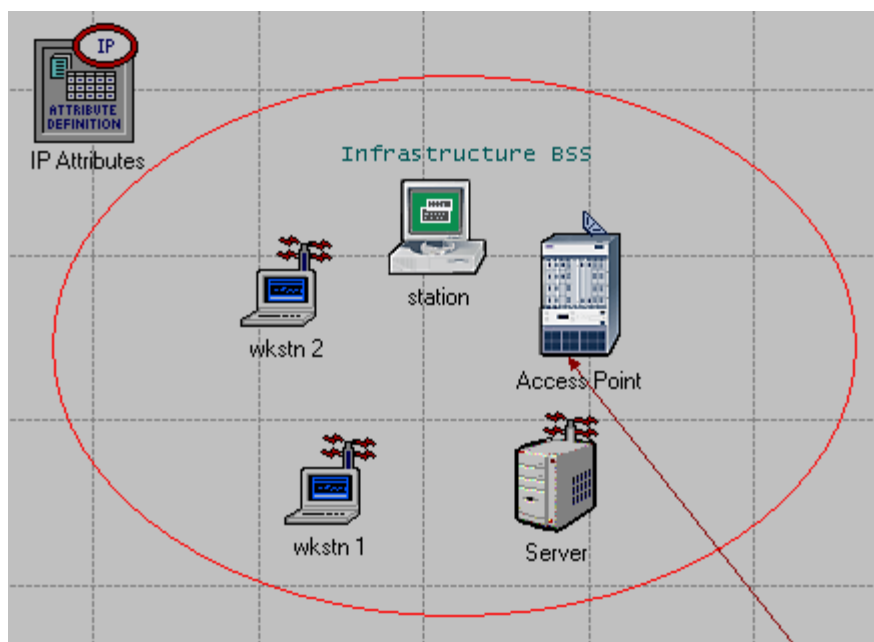
ενσωματώνει τρεις ασύρματες διεπαφές. Οι ενσύρματες διεπαφές συνέχισαν να υπάρχουν, αφού είναι απαραίτητες για την κλιμάκωση και διασύνδεση του δικτύου με άλλα ενσύρματα δίκτυα, ή και ασύρματα τοπικά δίκτυα WiFi.

Τέλος, για την υλοποίηση των εσωτερικών ασύρματων δρομολογητών, υπήρχε ανάγκη προσθήκης και μιας τέταρτης ασύρματης διεπαφής για να επιτευχθεί η ανταλλαγή πακέτων πάνω σε τέσσερα διαφορετικά ασύρματα κανάλια. Τελικά, η δομή του τροποποιημένου εσωτερικού δρομολογητή είναι η ακόλουθη.



Σχήμα 5.3.3 Μοντέλο εσωτερικού ασύρματου δρομολογητή

- Δομή των υποδικτύων που συνδέονται στους συνοριακούς δρομολογητές.
Τα υποδίκτυα αυτά αποτελούνται από ένα σημείο πρόσβασης το οποίο διασυνδέεται ενσύρματα με το δρομολογητή WiMax τεχνολογίας. Απαρτίζονται, επίσης, και από μια ασύρματη WiFi διεπαφή στην οποία μπορεί να συνδεθούν δυναμικά ασύρματοι σταθμοί εργασίας που δεν διαθέτουν οι ίδιοι λειτουργίες δρομολόγησης. Ένα παράδειγμα υποδικτύου που συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη ποικιλία συνδεδεμένων κόμβων είναι το ακόλουθο.

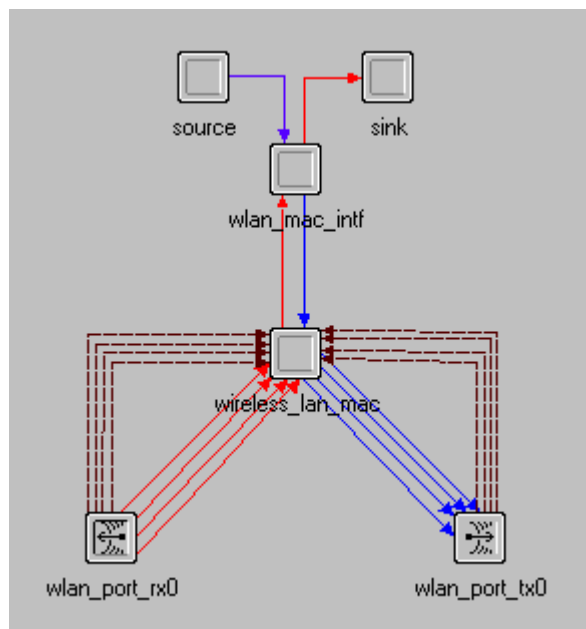


Σχήμα 5.3.4 Υποδίκτυο WiFi τεχνολογίας

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνουμε τέσσερα είδη κόμβων τα οποία επιτελούν τις εξής λειτουργίες

- *Σημείο Πρόσβασης*. Πρόκειται για ένα κόμβο δρομολογητή που απαρτίζεται από μια ενσύρματη διεπαφή για την επικοινωνία του με το δίκτυο κορμού και μια ασύρματη διεπαφή που υποστηρίζει WiFi επικοινωνία.
- *Σταθμοί Εργασίας*. Πρόκειται για απλούς στην τεχνολογία σταθμούς εργασίας που μπορούν να πραγματοποιήσουν πλήθος εφαρμογών που παρέχονται απαραίτητα από τον εξυπηρετητή (Server) του δικτύου. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι δεν είναι ικανοί να παράγουν και να διοχετεύουν κίνηση προς το υπόλοιπο δίκτυο, δέχονται όμως την κίνηση που φθάνει στο σημείο πρόσβασης και απευθύνεται προς το τοπικό δίκτυο.

- *Ασύρματος σταθμός βάσης.* Πρόκειται για το μοναδικό κόμβο που μπορεί να παράγει, να λαμβάνει και να διοχετεύει κίνηση προς το υπόλοιπο δίκτυο, αφού περιέχει κόμβο πηγής πακέτων. Με κατάλληλες τροποποιήσεις, κόμβοι αυτού του είδους μπορούν να σχηματίσουν ένα υποτυπώδες ασύρματο δίκτυο στο οποίο ανταλλάσσεται πληροφορία μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων. Όμως, αυτό δεν αποτελεί δρομολόγηση πληροφορίας, αφού οι πηγές και οι αποδέκτες της κίνησης είναι σταθεροί. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί, δηλαδή, κανενός είδους πρωτόκολλο δρομολόγησης. Τα παραπάνω προκύπτουν μελετώντας τη δομή του συγκεκριμένου κόμβου, όπως αυτή εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.3.5 Μοντέλο ασύρματου σταθμού

Πλέον, έχει ολοκληρωθεί η παρουσίαση της τοπολογίας του ασύρματου δικτύου και η περιγραφή των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν. Στην προσομοίωση που θα ακολουθήσει, τα υποδίκτυα δεν παίζουν ουσιαστικό ρόλο, αφού μελετάται η επίδοση του αλγορίθμου στο δίκτυο κορμού, το οποίο είναι ως επί το πλείστον εκτεθειμένο στις βροχοπτώσεις. Παρουσιάστηκαν όμως για λόγους πληρότητας. Στη συνέχεια, το ενδιαφέρον θα εστιαστεί στους κόμβους δρομολογητές του δικτύου κορμού και θα μελετηθεί η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ αυτών κάνοντας χρήση τεχνολογίας

WiMax για το φυσικό στρώμα και το MAC υπόστρωμα και εφαρμόζοντας OSPF και RIP πρωτόκολλα στο στρώμα δικτύου.

5.4 Εισαγωγή της απαιτούμενης διαμόρφωσης φυσικού στρώματος

Η διαμόρφωση φυσικού στρώματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν BPSK, αφού η OFDM διαμόρφωση που περιγράφηκε θεωρητικά δεν είναι υλοποιημένη στο OPNET και η εισαγωγή της θα πρόσφερε επιπλέον υπολογιστικό κόστος χωρίς να συνεισφέρει στη μελέτη επίδοσης του αλγορίθμου. Ορίστηκε, επιπλέον, το εύρος ζώνης του καναλιού στα 20MHz ενώ η ισχύς του πομπού και του δέκτη ρυθμίστηκαν στο 1W. Ως ελάχιστο όριο λαμβανομένης ισχύος τέθηκαν τα 0,316W, που αντιστοιχούν σε εξασθένηση 5dB.

Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι, στο συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης, η μόνη αλληλεπίδραση του δέκτη με το φυσικό στρώμα μετάδοσης, είναι μέσω του BER που υπολογίζεται ανά πακέτο σε μια μόνο συνάρτηση. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι παράμετροι που εκφράζουν το επίπεδο θορύβου και των συνθηκών φυσικού στρώματος χρησιμοποιούνται από τη συνάρτηση BER. Ο δέκτης ενημερώνεται απευθείας για την τιμή του BER, ενώ δε χρησιμοποιεί καμία άλλη παράμετρο που επηρεάζεται δυναμικά από τις συνθήκες φυσικού στρώματος. Για τον υπολογισμό αυτό, η συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμοποιεί ένα σύνολο σταθερών, των σταθερών προσομοίωσης, που υπολογίζονται αυτόματα από το OPNET κατά την εκτέλεση προσομοίωσης. Τέτοιες σταθερές είναι οι ακόλουθες

- OPC_TDA_RA_SNR. Τα αρχικά σημαίνουν ότι πρόκειται για μια συμβολική σταθερά του OPNET (OPC) που αφορά την ιδιότητα της μεταφοράς δεδομένων (TDA – Transmission Data Attribute) κατά ασύρματο τρόπο (RA – radio). Μετρά το ποσοστό σήματος προς θόρυβο (SNR – Signal to Noise Ratio) και είναι αποκλειστικά μόνο για ανάγνωση.
- OPC_TDA_RA_RX_MOD. Η σταθερά αυτή μετράται αφορά το δέκτη (RX) και φυλάσσει τον αριθμό του πίνακα διαμόρφωσης της πληροφορίας.

- OPC_TDA_RA_PROC_GAIN. Αναφέρεται στο κέρδος επεξεργασίας (Processing Gain) του καναλιού στο δέκτη.
- OPC_TDA_RA_BER. Η συνάρτηση υπολογισμού του BER του συστήματος ολοκληρώνεται τοποθετώντας τιμή στη συμβολική αυτή σταθερά.

Ο κώδικας τις παραπάνω συνάρτησης συστήματος είναι ο ακόλουθος:

```
#include "opnet.h"
#include "math.h"

#ifdef (__cplusplus)
extern "C"
#endif

void dra_ber (Packet * pkptr)
{
    Objid subnet_id,          /* subnetwork object identifier */
    tx_node_id,              /* transmitter node object identifier */
    rx_node_id;

    double      ber, snr, proc_gain, eff_snr, x_pos1;
    Vartype     modulation_table;

    /** Calculate the average bit error rate affecting given packet. **/
    FIN (dra_ber (pkptr));

    /** Determine current value of Signal-to-Noise-Ratio (SNR). */
    snr = op_td_get_dbl (pkptr, OPC_TDA_RA_SNR);
    /** Determine address of modulation table. */
    modulation_table = op_td_get_ptr (pkptr, OPC_TDA_RA_RX_MOD);
    /** Determine processing gain on channel. */
    proc_gain = op_td_get_dbl (pkptr, OPC_TDA_RA_PROC_GAIN);
```

```

/* Calculate effective SNR incorporating processing gain. */
eff_snr = snr + proc_gain;

/* Derive expected BER from effective SNR. */
ber= op_tbl_mod_ber (modulation_table, eff_snr);
/* Place the BER in the packet's transmission data. */
op_td_set_dbl (pkptr, OPC_TDA_RA_BER, ber);

FOUT;
}

```

Με την τροποποίηση του παραπάνω αρχείου, είναι εφικτό να εισαχθούν στο OPNET συνθήκες έντονης εξασθένησης που μεταβάλλονται τόσο με την απόσταση όσο και με το χρόνο της προσομοίωσης. Για τη λήψη των παραπάνω μεγεθών και την εισαγωγή τους στη συνάρτηση BER χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των συμβολικών σταθερών του OPNET

- OPC_TDA_RA_RX_REL_X. Παρέχει τη σχετική απόσταση πομπού και δέκτη ως προς τον x άξονα
- OPC_TDA_RA_RX_REL_Y. Παρέχει τη σχετική απόσταση πομπού και δέκτη ως προς τον y άξονα
- op_sim_time(). Δεν είναι σταθερά αλλά συνάρτηση που περιέχεται στη βιβλιοθήκη του OPNET και παρέχει κάθε φορά το σχετικό χρόνο από την έναρξη της προσομοίωσης.

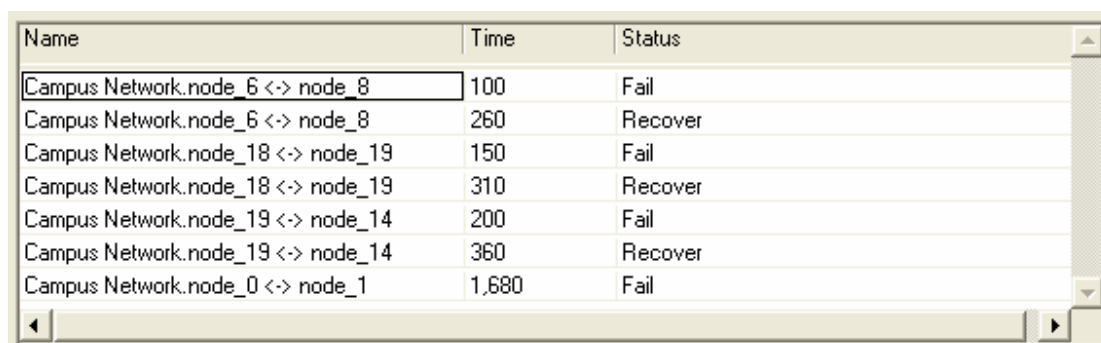
Με τροποποίηση τις τιμές του BER ώστε να είναι ευθέως εξαρτώμενη από την απόσταση, προέκυψαν οι καμπύλες του απλού παραδείγματος ενός πομπού του προηγούμενου κεφαλαίου. Όμως, επειδή ο στόχος της παρούσας διπλωματικής δεν ήταν ο ακριβής θεωρητικός υπολογισμός του BER, αλλά η πειραματική προσομοίωση αυτού δεδομένης της προβλεψιμότητας του μέσου, η συνάρτηση του συστήματος διατηρήθηκε αμετάβλητη κατά την προσομοίωση, ενώ η τιμή της μεταβλήθηκε έμμεσα από τις επιπτώσεις των προβλεπόμενων διαλείψεων στο SNR και, πιο συγκεκριμένα, στο ποσοστό της λαμβανόμενης ισχύος.

5.5 Εισαγωγή προσομοιωτή διαλείψεων

Επόμενο βήμα για την υλοποίηση της προσομοίωσης, είναι η πρόβλεψη του πλήθους των διαλείψεων που θα πλήξουν μια ζεύξη και η πρόβλεψη της διάρκειας μη διαθεσιμότητας της ζεύξης αυτής. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν αυτοί οι υπολογισμοί για περιοχές με χαμηλό ποσοστό βροχοπτώσεων (κλιματική ζώνη F) και για τροπικές περιοχές που πλήττονται από σφοδρές ξαφνικές βροχοπτώσεις (κλιματική ζώνη P).

Με χρήση του μαθηματικού εργαλείου MATLAB εισάγοντας τους τύπους που προκύπτουν από τον υπολογισμό της εξασθένησης με χρήση του μοντέλου βροχοπυρήνων Hycell, προέκυψε ότι για την κλιματική ζώνη F θα συμβεί το πολύ μια διάλειψη ικανή να προκαλέσει πτώση της ζεύξης λόγω βροχόπτωσης. Αντιθέτως, για περιοχές με τροπικό κλίμα, το πλήθος των διαλείψεων αυξάνεται αρκετά και φθάνει κατά προσέγγιση τις έξι. Οι παραπάνω μετρήσεις προέκυψαν για χρόνο προσομοίωσης ίσο με 30s.

Συγκεντρωτικά, οι πίνακες διαλείψεων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διεξαγωγή της προσομοίωσης έχουν την εξής μορφή



Name	Time	Status
Campus Network.node_6 <-> node_8	100	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	260	Recover
Campus Network.node_18 <-> node_19	150	Fail
Campus Network.node_18 <-> node_19	310	Recover
Campus Network.node_19 <-> node_14	200	Fail
Campus Network.node_19 <-> node_14	360	Recover
Campus Network.node_0 <-> node_1	1,680	Fail

Σχήμα 5.5.1 Πίνακας διαλείψεων για μια διάλειψη ανά ζεύξη (F ζώνη)

Name	Time	Status
Campus Network.node_6 <-> node_8	100	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	260	Recover
Campus Network.node_6 <-> node_8	400	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	560	Recover
Campus Network.node_6 <-> node_8	700	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	860	Recover
Campus Network.node_6 <-> node_8	900	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	1,060	Recover
Campus Network.node_6 <-> node_8	1,200	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	1,360	Recover
Campus Network.node_11 <-> node_12	1,100	Fail
Campus Network.node_11 <-> node_12	1,260	Recover
Campus Network.node_12 <-> node_13	1,700	Fail
Campus Network.node_6 <-> node_8	1,650	Fail

Σχήμα 5.5.2 Πίνακας διαλείψεων για έξι διαλείψεις ανά ζεύξη (L ζώνη)

Από το Σχήμα 5.5.1 προκύπτει ότι μια ζεύξη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (30s) δέχεται το πολύ μια σφοδρή διάλειψη που οδηγεί στη διακοπή της ζεύξης. Ο πίνακας εικονίζει την κατάσταση διακοπής τεσσάρων ζεύξεων μεταξύ των κόμβων node 6 και node , node και node, node και node και μεταξύ των κόμβων node και node. Σημειώνεται ότι ο χρόνος της διάλειψης της κάθε ζεύξης, για τη συχνότητα των 12GHz που χρησιμοποιείται, έχει τεθεί ίσος με 160s, όπως προκύπτει από τη γραφική παράσταση του Σχήματος 3.2.3.1 και επαληθεύεται από τους θεωρητικούς τύπους του κεφαλαίου 3 και 4. Δηλαδή, ισχύει ότι για $f=12$ GHz ο χρόνος διακοπής είναι $t_{out} = 160s$

Στο Σχήμα 5.5.2, όπου μελετάται η κλιματική ζώνη L, αναμένονται κατά μέσο όρο έξι διαλείψεις στη ζεύξη η οποία πλήττεται από βροχόπτωση. Έτσι, στον πίνακα διαλείψεων που εφαρμόζεται η ζεύξη μεταξύ των κόμβων node6 και node διακόπτεται και επανέρχεται έξι φορές. Η διάρκεια της διάλειψης έχει τεθεί και σε αυτήν την περίπτωση ίση με 160s.

5.6 Διεξαγωγή της προσομοίωσης

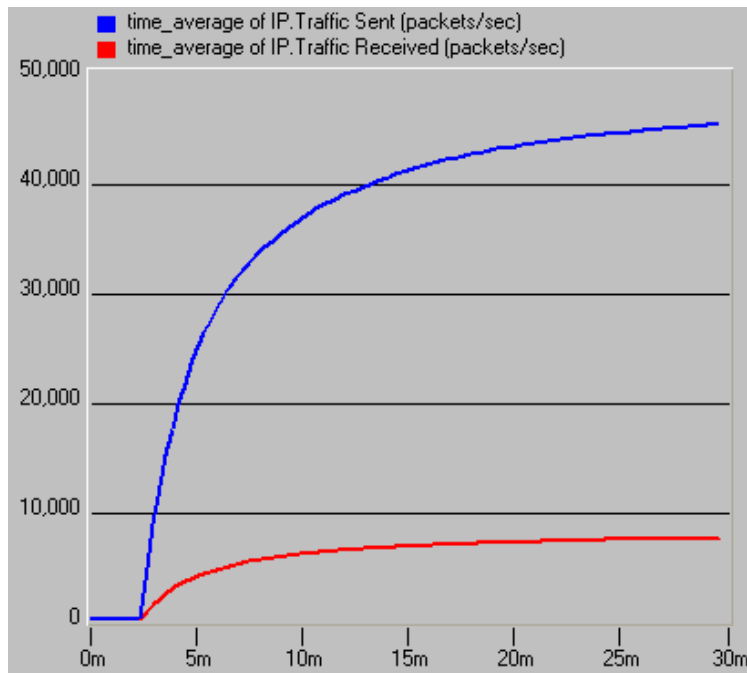
Στο σημείο αυτό έχουν εισαχθεί όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές λειτουργίας και μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση του συστήματος. Το σύστημα μελετήθηκε εφαρμόζοντας δύο διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, το RIP και το OSPF, για δύο διαφορετικές κλιματικές ζώνες όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η προσομοίωση κράτησε συνολικά 30s, ενώ μελετήθηκε η ανταλλαγή WiMax πακέτων μεταξύ των κόμβων node0 και node19, δηλαδή μεταξύ των ακραίων δρομολογητών του δικτύου (βλέπε Σχήμα 5.3.1). Κάθε ένας από τους δύο κόμβους στέλνει ίσο πλήθος πακέτων. Επομένως, στην ιδανική περίπτωση χωρίς καθόλου διαλείψεις θα έπρεπε να λαμβάνει όσα ακριβώς πακέτα στέλνει.

5.6.1 Μελέτη συστήματος με χρήση πρωτοκόλλου RIP

Στην προσομοίωση που ακολουθεί μελετώνται τρία διαφορετικά σενάρια:

a) Σύστημα χωρίς διαστρωματωμένη σχεδίαση.

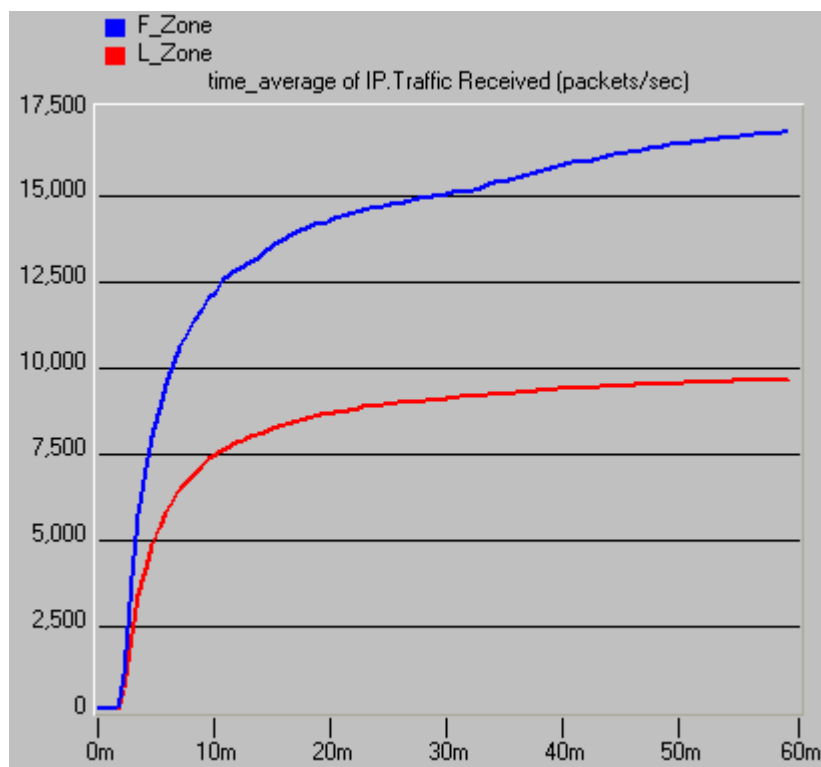
Το πρώτο σενάριο, αναφέρεται σε συνθήκες ασύρματης μετάδοσης χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου. Στο σενάριο αυτό, στις ζεύξεις που πλήττονται από βροχόπτωση εισάγεται μεγάλο κόστος ζεύξης και τα πακέτα καθυστερούν αρκετά, με αποτέλεσμα να φτάνουν πολύ λιγότερα πακέτα από όσα στέλνονται. Το κόστος της ζεύξης είναι μια παράμετρος που φυλάσσεται τοπικά στον κάθε δρομολογητή, για κάθε ζεύξη που διατηρεί. Η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου ενημερώνεται αυτόματα από το πρωτόκολλο δρομολόγησης που είναι σε λειτουργία, και εξαρτάται από την απόσταση, το ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας και το BER, στην περίπτωση που πρόκειται για ασύρματη μετάδοση. Το σενάριο αυτό μελετά τις συνθήκες στην κλιματική ζώνη F. Με την προσομοίωση λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα



Σχήμα 5.6.1.1 Σχέση σταλμένου και ληφθέντος φορτίου στην κλιματική ζώνη F, χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου πρόβλεψης

Στο Σχήμα 5.6.1.1 ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ ο κατακόρυφος στο πλήθος των πακέτων που στάλθηκαν και λήφθηκαν αντίστοιχα. Προκύπτει ότι τα ληφθέντα πακέτα (κόκκινη καμπύλη) είναι πολύ λιγότερα από τα σταλμένα πακέτα (μπλε καμπύλη). Αυτό συμβαίνει διότι οι δρομολογητές αντιλαμβάνονται τις διαλείψεις αφού αρχίσει η απώλεια πακέτων, τα οποία δεν ξαναστέλνονται, αφού δεν έχει οριστεί κάποιο τέτοιο σχήμα. Παρατηρείται, επομένως, αρκετά μειωμένη διέλευση πακέτων πληροφορίας.

Σε περίπτωση που οι συνθήκες γίνουν δυσμενέστερες, δηλαδή μεταφέροντας την προσομοίωση από την κλιματική ζώνη F στην κλιματική ζώνη L, ο αριθμός ληφθέντων πακέτων γίνεται ακόμα μικρότερος αφού περισσότερα πακέτα χάνονται μέχρι να φτάσουν στον προορισμό τους λόγω των σφοδρότερων διαλείψεων. Αυτή η κατάσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.1.2, όπου η καμπύλη που βρίσκεται υψηλότερα (μπλε καμπύλη) αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη F ενώ η καμπύλη που βρίσκεται χαμηλότερα, δηλαδή εξασφαλίζει χαμηλότερη διέλευση, αντιπροσωπεύει την κατάσταση που επικρατεί στην κλιματική ζώνη L.



Σχήμα 5.6.1.2 Ληφθέντα πακέτα σε διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης

b) Μελέτη συστήματος στην F κλιματική ζώνη με χρήση του αλγορίθμου πρόβλεψης

Το σενάριο αυτό μελετά την επίδοση του συστήματος στην κλιματική ζώνη F, δηλαδή με χαμηλές συνθήκες βροχόπτωσης. Μια ζεύξη προέκυψε ότι δέχεται το πολύ μια διάλειψη που οδηγεί σε προσωρινή μη διαθεσιμότητα αυτής, η οποία διαρκεί 160s, όσο περίπου διαρκεί η διάλειψη στη συγκεκριμένη κλιματική ζώνη. Εφαρμόζεται, επομένως, ο πίνακας διακοπών των ζεύξεων που εικονίζεται στο Σχήμα 5.5.1 και αναπαριστά μια διάλειψη ανά ζεύξη στο χρόνο της προσομοίωσης.

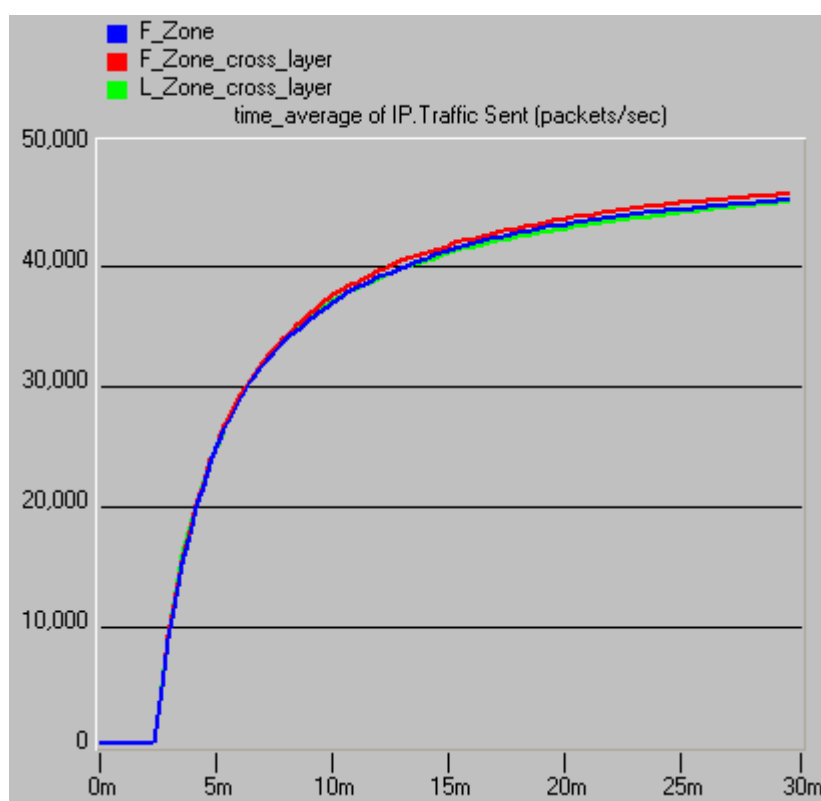
c) Μελέτη συστήματος στην κλιματική ζώνη L με χρήση του αλγορίθμου πρόβλεψης

Το σενάριο αυτό είναι πανομοιότυπο με το προηγούμενο, με τη διαφορά ότι εφαρμόζεται στην κλιματική ζώνη L και ως αποτέλεσμα το πλήθος των διαλείψεων να αυξάνεται αισθητά. Επομένως, αυξάνεται και το πλήθος των απαιτούμενων

διακοπών των ζεύξεων, όπως φαίνεται και από το χρησιμοποιούμενο πίνακα διακοπών του Σχήματος 5.5.2.

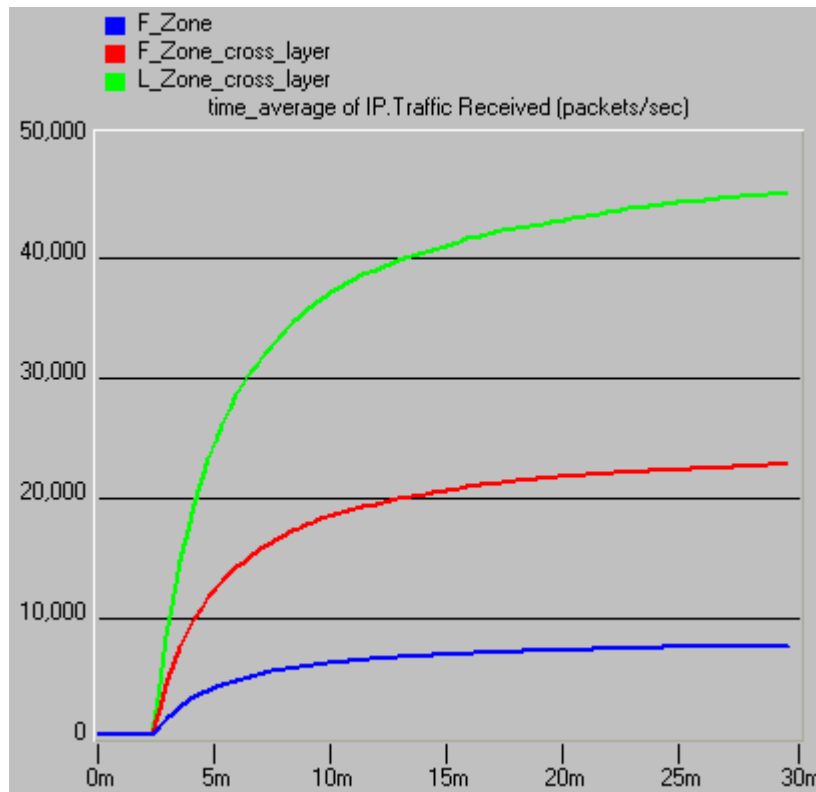
5.6.1.1 Μελέτη ληφθέντων πακέτων

Εκτελώντας προσομοίωση για τα παραπάνω σενάρια και ενώ σε κάθε περίπτωση το πλήθος της εκπεμπόμενης κίνησης είναι σταθερό, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δύο κλιματικές ζώνες ήταν τα εξής:



Σχήμα 5.6.1.1.1 Αποσταλμένα πακέτα για κάθε σενάριο συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης

Στο Σχήμα 5.6.1.1 ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ ο κατακόρυφος στο πλήθος των πακέτων που στάλθηκαν. Από τη μελέτη του σχήματος προκύπτει ότι σε κάθε σενάριο προσομοίωσης ο αριθμός των πακέτων που στέλνονται είναι κοινός. Οπότε σε ίδιες συνθήκες το πλήθος των ληφθέντων από το δέκτη πακέτων θα ήταν το ίδιο.



Σχήμα 5.6.1.1.2 Σύνολο ληφθέντων πακέτων συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης

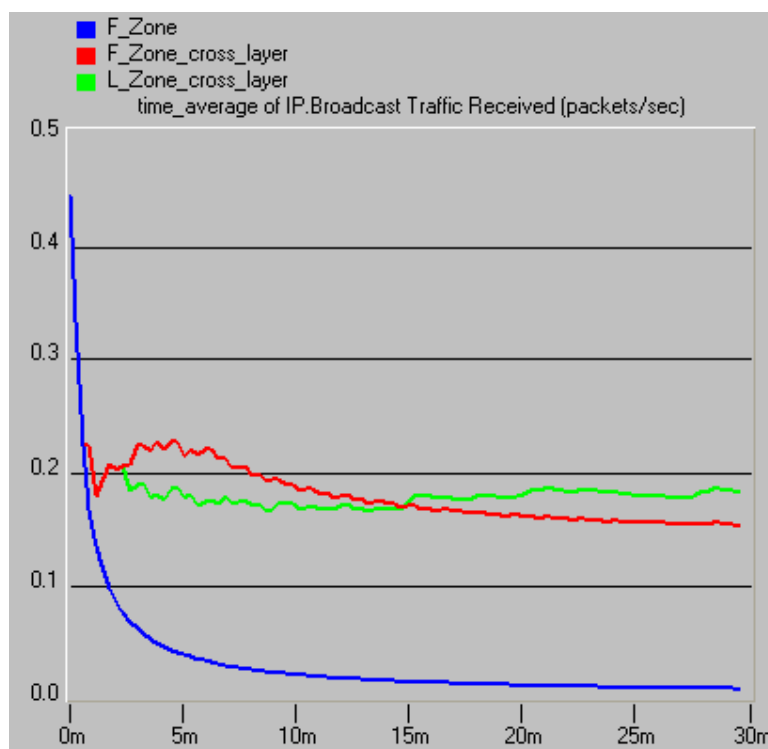
Από τη μελέτη του παραπάνω σχήματος προκύπτει ότι με τη χρήση του αλγορίθμου αυξάνεται η συνολική διέλευση πακέτων και ο τελικός δέκτης λαμβάνει πολύ περισσότερα πακέτα από ότι θα ελάμβανε χωρίς τη χρήση του αλγορίθμου πρόβλεψης. Η χαμηλότερη καμπύλη αντιστοιχεί στις συνθήκες της κλιματικής ζώνης F απουσία διαστρωματωμένης σχεδίασης. Αυτό συμβαίνει διότι με την εκ των προτέρων διακοπή της ζεύξης μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα να χαθούν πακέτα λόγω της μη διαθεσιμότητας της ζεύξης. Χωρίς τη χρήση του αλγορίθμου η ζεύξη που πλήττεται από βροχόπτωση δεν τίθεται εκτός λειτουργίας, παρά μόνο όταν αρχίσουν να χάνονται πακέτα. Με τη νέα σχεδίαση, η ζεύξη τίθεται εκτός λειτουργίας λίγο πριν το αποδεκτό ποσοστό λαθών φθάσει την κρίσιμη τιμή και η πληροφορία δρομολογείται από τις εναλλακτικές διαδρομές του δικτύου που αυτή τη στιγμή είναι διαθέσιμες.

Παράλληλα, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου στην κλιματική ζώνη L (πράσινη καμπύλη), εξασφαλίζουν υψηλότερη διέλευση από την κλιματική ζώνη F (κόκκινη καμπύλη). Δηλαδή, παρατηρείται καλύτερη συμπεριφορά του αλγορίθμου όσον αφορά τη διέλευση πακέτων όσο αυξάνει το πλήθος των

διαλείψεων. Σε μια τέτοια περίπτωση, το όφελος είναι πολύ μεγαλύτερο, αφού το πλήθος των πακέτων που δρομολογούνται από εναλλακτικές διαδρομές αυξάνει σημαντικά.

5.6.1.2 Μελέτη πακέτων ελέγχου

Ο όρος πακέτα ελέγχου αναφέρεται στα πακέτα που ανταλλάσσονται μεταξύ των δρομολογητών του δικτύου και περιέχουν στοιχεία για την κατάσταση της κάθε ζεύξης. Τα πακέτα αυτά μπορεί να είναι καθολικής ή πολλαπλής εκπομπής. Πακέτα καθολικής εκπομπής ανταλλάσσονται μεταξύ δρομολογητών στους οποίους εφαρμόζεται πρωτόκολλο διανύσματος απόστασης. Αυτό σημαίνει ότι αν ένας δρομολογητής ανιχνεύσει μεταβολή σε κάποια από τις ζεύξεις επικοινωνίας, θα ενημερώσει όλους τους υπόλοιπους δρομολογητές για την αλλαγή αυτή. Αντιθέτως, στην περίπτωση πολλαπλής εκπομπής, ο δρομολογητής ενημερώνει αποκλειστικά τους γειτονικούς δρομολογητές με τους οποίους συνορεύει και αυτοί με τη σειρά τους αναλαμβάνουν την υποχρέωση να ενημερώσουν τους δικούς τους γείτονες. Αυτός ο μηχανισμός εκπομπής συναντάται στα πρωτόκολλα κατάστασης της ζεύξης.

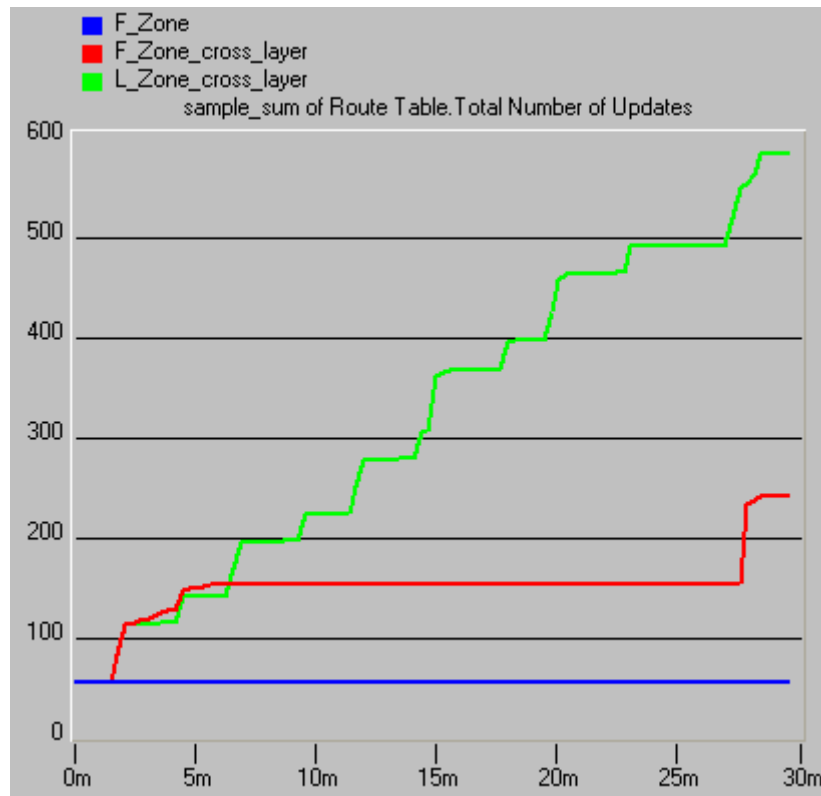


Σχήμα 5.6.1.2.1 Σύνολο πακέτων καθολικής εκπομπής συναρτήσεως του χρόνου προσομοίωσης

Επισημαίνεται, ότι στην περίπτωση αυτή τα πακέτα καθολικής εκπομπής αναφέρονται στα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των δρομολογητών με χρήση πρωτοκόλλου RIP. Τα μηνύματα ελέγχου που στέλνει ένας δρομολογητής που χρησιμοποιεί RIP απευθύνονται σε όλους τους υπόλοιπους δρομολογητές και, ως εκ τούτου, είναι καθολικής εκπομπής.

Από τη μελέτη του Σχήματος 5.6.1.2.1 προκύπτει αύξηση των πακέτων καθολικής εκπομπής όσο αυξάνει το πλήθος των διακοπών στις ζεύξεις. Η μπλε καμπύλη, που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη από τις τρεις καμπύλες που εικονίζονται, αντιστοιχεί στο πλήθος των ανταλλασσόμενων πακέτων χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου και στην κλιματική ζώνη F. Οι άλλες καμπύλες αναφέρονται στα αποτελέσματα με τη χρήση του αλγορίθμου, όπου και παρατηρείται οριακά καλύτερη συμπεριφορά του αλγορίθμου όσο αυξάνει το πλήθος των διαλείψεων. Αυτό φαίνεται στο σχήμα από το γεγονός ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη L (πράσινη) είναι υψηλότερα από την καμπύλη που αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη F (κόκκινη καμπύλη).

Είναι επόμενο, ότι περισσότερες διακοπές στη ζεύξη οδηγούν σε αύξηση του πλήθους των αλλαγών στον πίνακα δρομολόγησης του κάθε δρομολογητή, το οποίο συνεπάγεται και αύξηση του πλήθους των ανταλλασσόμενων πακέτων ελέγχου. Η παραπάνω διαπίστωση επαληθεύεται και ως προϊόν της προσομοίωσης, εξετάζοντας το αθροιστικό πλήθος των αλλαγών στον πίνακα δρομολόγησης των δρομολογητών του δικτύου.

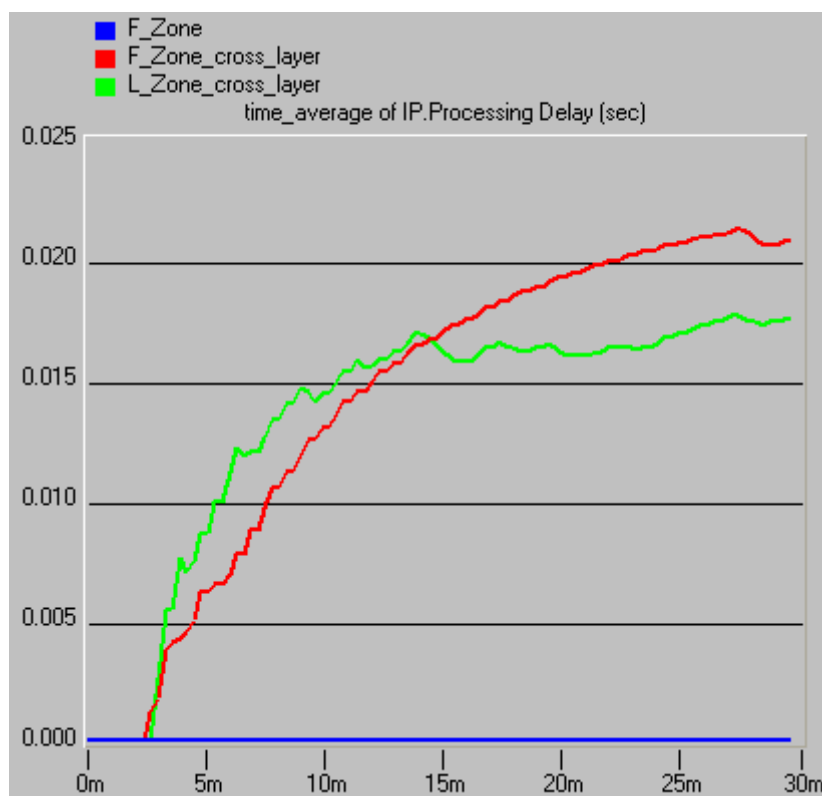


Σχήμα 5.6.1.2.2 Αλλαγές στον πίνακα δρομολόγησης συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης

Οι χρονικές στιγμές των νέων ενημερώσεων του πίνακα δρομολόγησης, που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές μεταβολής στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, εξαρτώνται αποκλειστικά από τις στιγμές όπου έχει επιλεγεί η διακοπή της ζεύξης και όχι από τις παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου, αφού κάθε αλλαγή που συμβαίνει στις ζεύξεις επηρεάζει αυτόματα το συνδεδεμένο δρομολογητή. Τα μηνύματα ελέγχου δηλαδή, στέλνονται όποτε που παρουσιάζονται αλλαγές στην τοπολογία. Ο λόγος που δεν υπάρχουν αλλαγές στον πίνακα δρομολόγησης του πρώτου σεναρίου, είναι διότι έτσι έχει οριστεί κατά τη φάση της προσομοίωσης για λόγους ταχύτερης εκτέλεσής της. Δηλαδή, έχει οριστεί να μην αποστέλλονται πακέτα ελέγχου, αν δεν εντοπίζεται αλλαγή στην τοπολογία. Σε αντίθετη περίπτωση, ανά 30s οι δρομολογητές θα εξέπεμπαν τον πίνακα δρομολόγησης τους προσθέτοντας μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, χωρίς αυτό να προσφέρει τίποτα στη μελέτη της επίδοσης του αλγορίθμου.

5.6.1.3 Μελέτη καθυστέρησης

Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο, οι εκ νέου υπολογισμοί του πίνακα δρομολόγησης σε κάθε κόμβο δρομολογητή σε κάθε αλλαγή τοπολογίας, δηλαδή διακοπή της ζεύξης, συντελούν στην αύξηση του υπολογιστικού κόστους, το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με αύξηση στην συνολική καθυστέρηση επεξεργασίας.



Σχήμα 5.6.1.3.1 Μελέτη καθυστέρησης επεξεργασίας. συναρτήσεως του χρόνου προσομοίωσης

Και στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το πλήθος των διαλείψεων τόσο μειώνεται η καθυστέρηση αφού το όφελος στο συνολικό δίκτυο είναι μεγαλύτερο. Μια ζεύξη που τίθεται συνεχώς εκτός λειτουργίας δύσκολα επιλέγεται ως βέλτιστη, οπότε και δεν δρομολογεί πληροφορία. Έτσι, από κάποιο σημείο και μετά όσο και να αυξάνονται οι διαλείψεις στη συγκεκριμένη ζεύξη, το τελικό αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται, αφού η συγκεκριμένη ζεύξη, σε κάθε περίπτωση, δεν είναι πλέον βέλτιστη.

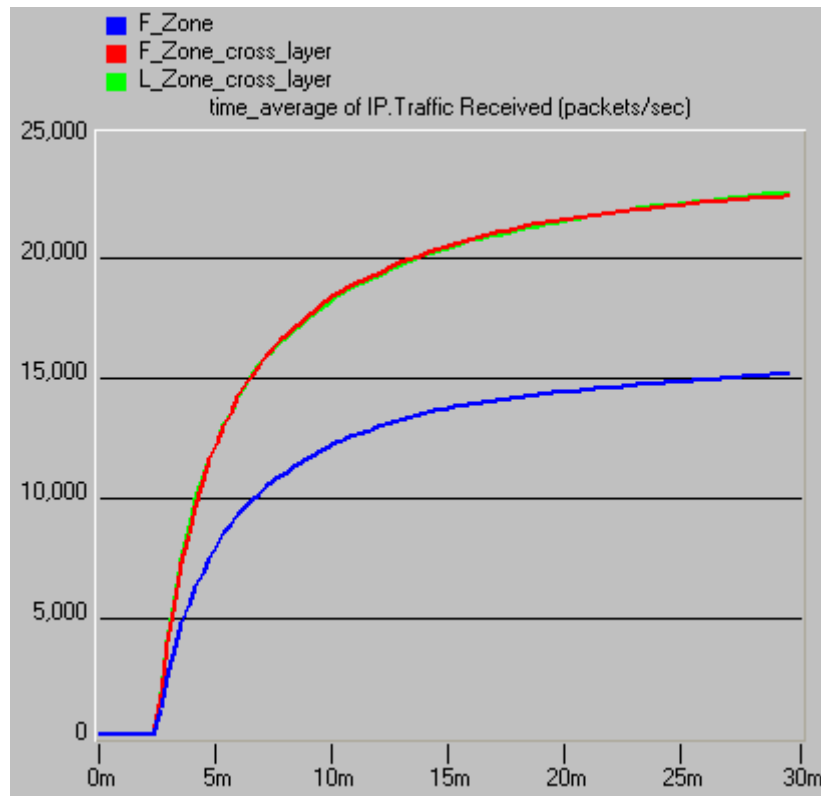
Στο σημείο αυτό ολοκληρώθηκε η μελέτη της επίδοσης του αλγορίθμου με χρήση πρωτοκόλλου RIP και ακολουθεί η μελέτη της επίδοσης με χρήση OSPF. Αναμένονται παρεμφερή αποτελέσματα, ενώ θα συζητηθούν οι όποιες διαφοροποιήσεις.

5.6.2 Μελέτη συστήματος με χρήση πρωτοκόλλου OSPF

Τα σενάρια προσομοίωσης είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ το μόνο που μεταβάλλεται είναι το εφαρμοζόμενο πρωτόκολλο. Επισημαίνεται, ότι το OSPF ανήκει στα πρωτόκολλα κατάστασης της ζεύξης που κατά κανόνα συγκλίνουν γρηγορότερα από τα πρωτόκολλα διανύσματος απόστασης, όπως είναι το RIP, εφόσον παρέλθει η αρχική περίοδος λειτουργίας, όπου το δίκτυο πλημμυρίζει από τα μηνύματα καταστάσεων των ζεύξεων που αποστέλλονται από όλους τους δρομολογητές. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

5.6.2.1 Μελέτη ληφθέντων πακέτων

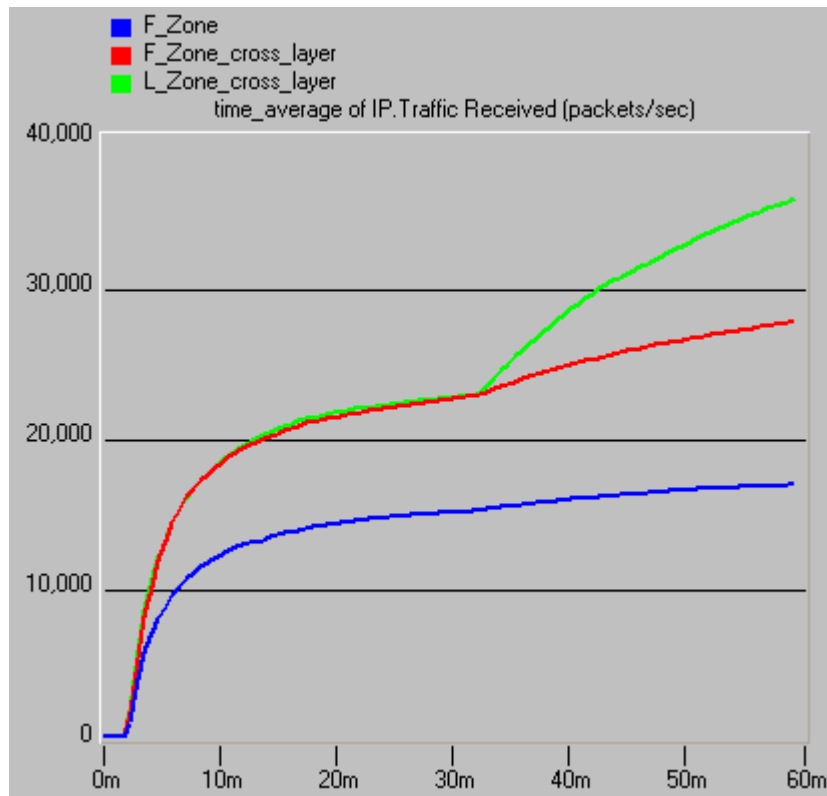
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ότι δεν υπάρχει έντονη διαφοροποίηση καθώς αυξάνει το πλήθος των διαλείψεων. Δεδομένου, όμως, ότι έχει εφαρμοστεί ένα πρωτόκολλο κατάστασης της ζεύξης που αργεί να συγκλίνει, κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της επίδοσης του αλγορίθμου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αφού συμβεί η πρώτη διάλειψη.



Σχήμα 5.6.2.1.1 Σύνολο ληφθέντων πακέτων για μελέτη του συστήματος για 30s

Στο παραπάνω σχήμα, η χαμηλότερη καμπύλη (μπλε χρώματος) αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη F, χωρίς να έχει εφαρμοστεί ο αλγόριθμος πρόβλεψης.

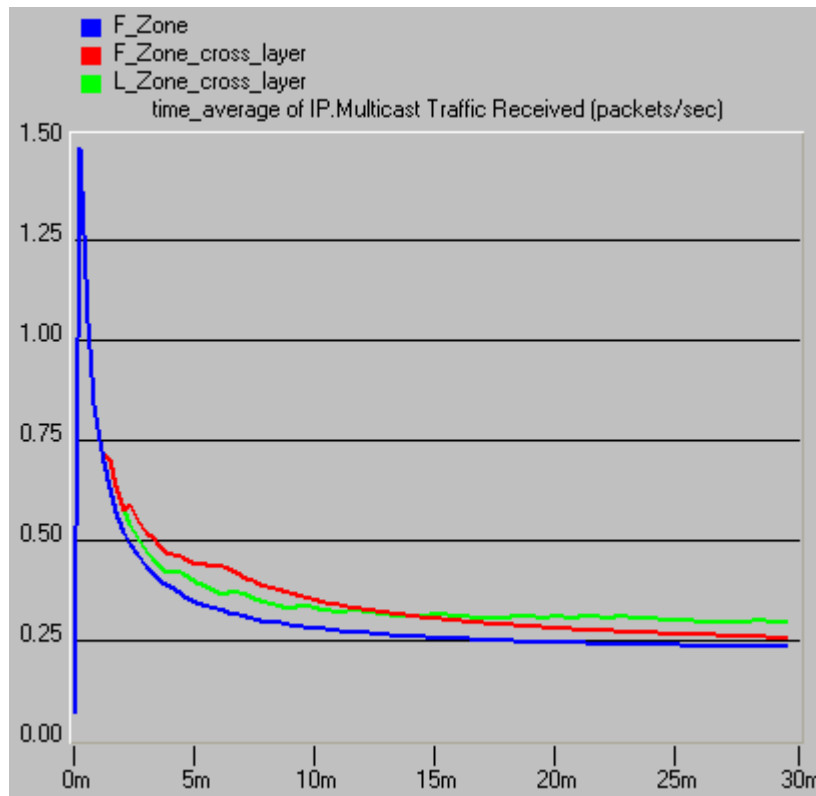
Μεγαλώνοντας τη διάρκεια της προσομοίωσης, παρατηρείται στο Σχήμα 5.6.2.1.1. ότι αυξάνει και το ποσοστό των λαμβανομένων πακέτων καθώς αυξάνει και το πλήθος διακοπών της ζεύξης. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι διαφοροποιούνται οι δύο καμπύλες που είχαν ταυτιστεί στην προηγούμενη περίπτωση και η καμπύλη που αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη L βρίσκεται υψηλότερα από την καμπύλη που αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη F, δηλαδή εξασφαλίζει υψηλότερα επίπεδα διέλευσης πακέτων πληροφορίας. Άρα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες βροχόπτωσης και με χρήση πρωτοκόλλου OSPF, η συμπεριφορά του δικτύου που έχει ενσωματωμένο τον αλγόριθμο πρόβλεψης, εξασφαλίζει καλύτερη επίδοση και μεγαλύτερη διέλευση πακέτων του δικτύου.



Σχήμα 5.6.2.1.2 Σύνολο ληφθέντων πακέτων για μελέτη του συστήματος για 1h

5.6.2.2 Μελέτη πακέτων ελέγχου

Τα πακέτα ελέγχου που ανταλλάσσονται στο πρωτόκολλο OSPF είναι πολλαπλής και όχι καθολικής εκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι ανταλλάσσονται πακέτα ελέγχου μεταξύ γειτονικών κόμβων και όχι μεταξύ όλων των δρομολογητών του δικτύου. Όπως συνέβη και κατά τη μελέτη του δικτύου με RIP πρωτόκολλο, τα πακέτα ελέγχου αυξάνονται καθώς αυξάνεται το πλήθος διακοπών στη ζεύξη.

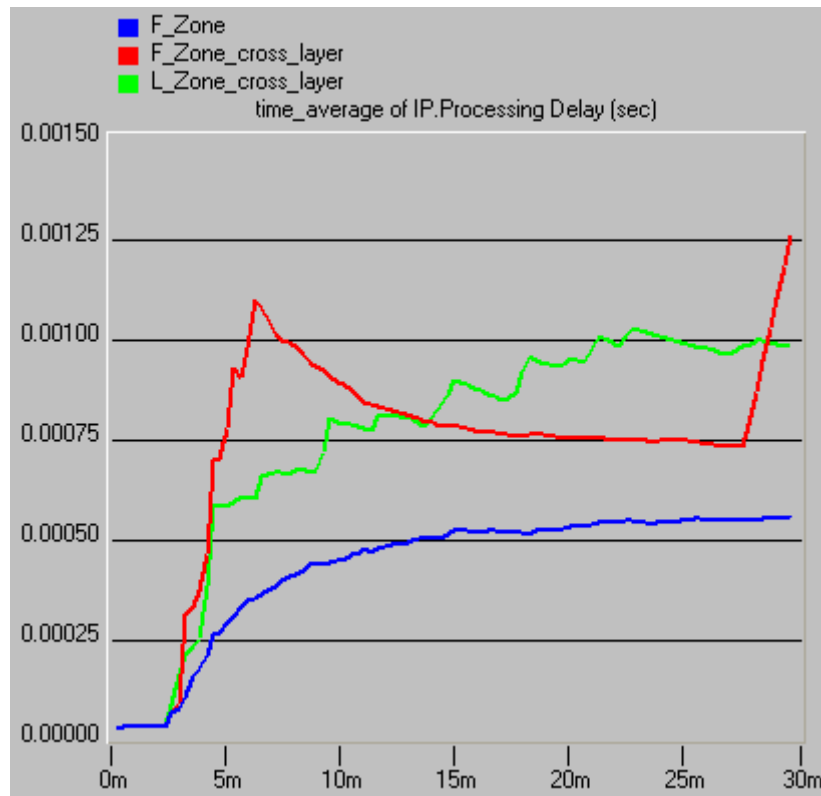


Σχήμα 5.6.2.2.1 Σύνολο πακέτων πολλαπλής εκπομπής συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης

Παρατηρείται ότι η καμπύλη που βρίσκεται υψηλότερα από τις άλλες δύο, αντιστοιχεί στην κλιματική ζώνη L με την εφαρμογή του αλγορίθμου πρόβλεψης.

5.6.2.3 Μελέτη καθυστέρησης

Δεδομένης της πιο συχνής τροποποίησης του πίνακα δρομολόγησης καθώς αυξάνονται οι διαλείψεις, αυξάνεται και η καθυστέρηση που εισάγεται σε κάθε κόμβο. Παρατηρείται πολύ καλύτερη συμπεριφορά του αλγορίθμου για αύξηση των διαλείψεων, αφού το δίκτυο ύστερα από την αρχική περίοδο συγκλίνει ταχύτερα από την προηγούμενη περίπτωση.



Σχήμα 5.6.2.3.1 Μελέτη καθυστέρησης επεξεργασίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.

5.7 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει την προσομοίωση του δικτύου, διαπιστώθηκε ότι η εισαγωγή του αλγορίθμου πρόβλεψης των συνθηκών του φυσικού στρώματος βελτίωσε κατά πολύ τη συνολική διέλευση των πακέτων από το δίκτυο, ελαχιστοποιώντας το ποσοστό χαμένων πακέτων λόγω απροσδόκητης διακοπής της ζεύξης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η σαφώς καλύτερη επίδοση αυτού όσο το πλήθος των διαλείψεων αυξάνει.

Τα παραπάνω οφέλη εξασφαλίστηκαν με την εισαγωγή μικρής καθυστέρησης στην επεξεργασία των πακέτων, μειονέκτημα όμως, που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση δρομολογητών με ισχυρότερο επεξεργαστή που να μπορούν να υποστηρίξουν τέσσερις ασύρματες διεπαφές. Επισημαίνεται ότι, για τη διεξαγωγή της παρούσας προσομοίωσης, καίτοι αυξήθηκε ο αριθμός των ασύρματων διεπαφών, δεν αυξήθηκε

ανάλογα και η ισχύς της μονάδας επεξεργασίας του δρομολογητή, γεγονός που εξηγεί μερικώς την εισαγωγή της καθυστέρησης.

Επομένως, με μελέτη και πρόβλεψη των συνθηκών που επικρατούν στο φυσικό στρώμα μετάδοσης, δηλαδή με την πρόβλεψη των διαλείψεων και την εκ των προτέρων διακοπή της ζεύξης, κατέστη δυνατό να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη επίδοσης για το σύνολο του δικτύου. Ένα επόμενο βήμα έρευνας και ανάπτυξης είναι ο θεωρητικός υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας πακέτων με και χωρίς τη χρήση του αλγορίθμου διαστρωματωμένης σχεδίασης. Σε περίπτωση που υλοποιηθεί ο θεωρητικός αυτός υπολογισμός των δύο αυτών πιθανοτήτων, θα καταστεί πολύ εύκολη η καθολική πρόβλεψη της συμπεριφοράς του δικτύου. Πλέον, δεν θα απαιτείται ξεχωριστός υπολογισμός του πλήθους και της διάρκειας των διαλείψεων, αλλά ο κάθε κόμβος θα είναι σε θέση να διαπιστώνει πότε η τιμή του BER πλησιάζει το όριο σωστής λειτουργίας, οπότε η ζεύξη θα θεωρείται άμεσα μη διαθέσιμη. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη τροποποίηση του αρχείου συστήματος υπολογισμού του BER, το οποίο θα δέχεται απευθείας τη θεωρητική τιμή που έχει υπολογιστεί, δεχόμενο ως παραμέτρους τη σχετική θέση πομπού και δέκτη και το χρόνο από την αρχή της προσομοίωσης. Αυτό θα μετέτρεπε το παρόν μοντέλο σε καθολικά επεκτάσιμο μοντέλο.

Πάντως και η παρούσα υλοποίηση εξασφάλισε τα προβλεπόμενα αποτελέσματα, δηλαδή την αύξηση της επίδοσης με ελάχιστο κόστος, αυτό της αύξησης της καθυστέρησης επεξεργασίας, που όμως μπορεί να εξαλειφθεί με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού.

Βιβλιογραφία

- [1] Βενιέρης Ι.Στ. (2003). *Δίκτυα Ευρείας Ζώνης*. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [2] Panagopoulos A.D., Arapoglou P.D.M., Cottis P.G. (2004). Satellite communications at Ku, Ka and V bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, Third Quarter.
- [3] Κανελλόπουλος Ι.Δ. (2003). *Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον*. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [4] Grémont B. C., Filip M. (2004). Spartio – Temporal Rain Attenuation Model for Application to Fade Mitigation Techniques. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol 52, NO. 5.
- [5] Tanenbaum A.S. (2000). *Δίκτυα Υπολογιστών (3^η έκδοση)*. Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [6] Akyildiz I.F. , Wang X. (2005). A Survey on Wireless Mesh Networks. *IEEE Radio Communications*.
- [7] Grémont B. C. (2002). Simulation of Rainfield Attenuation for Satellite Communication Networks. *1st COST 280 International Workshop*.
- [8] Pham P.P., Perreau S., Jayasuriya A. (2005). New Cross-Layer Design Approach to Ad Hoc Networks Under Rayleigh Fading. *IEEE Journal on selected areas in communications*, Vol 23, NO. 1.
- [9] Panagopoulos A.D., Kanellopoulos J.D. (2003). On the rain attenuation dynamics: spatial – temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics. *International Journal of Satellite Communications and Networking*.
- [10] Piyas M. (2003). *The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks*. CRC Press LLC, New York.
- [11] Kurose J.F., Ross K.W. (2004). *Δικτύωση Υπολογιστών: Προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω με έμφαση στο διαδίκτυο (2^η έκδοση)*. Γκιουρδας, Αθήνα.
- [12] Grémont B. C. (2002). Generalized Model of the Satcomm channel for Applications to fade countermeasures. *International Union of Radio Science*.
- [13] Féral L., Lemorton J., Castanet L., Sauvageot H. (2003). HYCELL: A new model of rain fields and rain cells structure. *COST Action 280, 2nd International Workshop*.

- [14] Davarian F. (1995). Earth-Space Links and Fade-Duration Statistics. *19th NASA Propagation Experimenters Meeting (NAPEX 19) and the 7th Advanced Communications Technology Satellite (ACTS) Propagation Studies Workshop (APSW 7)* p 7-12.
- [15] Fiebig U.C. (2002). A Time Series Generator Modelling Rain Fading. *1st COST 280 International Workshop*.
- [16] Choi J.P., Chan V.W.S. (2001). Prediction and Adaptation of Satellite Channels with Weather-Induced Impairments. *Proceedings of the IEEE, 0-7803-6599-2/01*.
- [17] Panagopoulos A.D., Kanellopoulos J.D. (2001) Spatio-Temporal Analysis of Rainfall rate for the Prediction of Slant Path Fade Duration Statistics. *Proceedings of the IEEE, 0-7803-7070-8/01*.
- [18] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks (2003). Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz. *LAN/MAN Standards Committee, New York*.
- [19] Dušan Matiaè (1998) OFDM as a possible modulation technique for multimedia applications in the range of mm waves. *Introduction to OFDM 10/30/98TUD/TVS*.