



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

**Ανάπτυξη Νέων Τεχνικών Διαχείρισης Πόρων
σε Ασύρματα Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τερψιχόρη - Ελένη Ν. Βελιβασάκη

Αθήνα, Ιανουάριος 2014



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

Ανάπτυξη Νέων Τεχνικών Διαχείρισης Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τερψιχόρη - Ελένη Ν. Βελιβασάκη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Χρήστος Ν. Καψάλης

Γεώργιος Ι. Φικιώρης

Παναγιώτης Γ. Κωττής

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

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

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

.....
Ιωάννης Τίγκελης
Αν. Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

.....
Τερψιχόρη-Ελένη Ν. Βελιβασάκη

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

Copyright © Τερψιχόρη-Ελένη Ν. Βελιβασάκη, 2014.

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 διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη τεχνικών αποδοτικής διαχείρισης πόρων σε ασύρματα δίκτυα, με έμφαση στα ασύρματα δίκτυα ευρυεκπομπής και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Αρχικά, ερευνάται η διαχείριση των φασματικών πόρων σε ασύρματα δίκτυα ευρυεκπομπής. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει επισκόπηση του προτύπου DVB-T, την υιοθέτησή του κατά τη Συμφωνία της Γενεύης 2006 (GE06) και την ανάγκη για εναρμονισμένο ψηφιακό μέρισμα, που επιτάσσει την τροποποίηση των πλάνων συχνοτήτων της GE06.

Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 3 μελετάται η αναδιάταξη των πλάνων GE06 μέσω μεταεναρμονιστικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μέσω «Γενετικών Αλγορίθμων», «Προσομοιωμένης Ανόπτησης» και «Βελτιστοποίησης Σμήνους Μονάδων». Παράλληλα, διατυπώνεται το πρόβλημα της «εκ νέου απόδοσης διαύλων», καταλήγοντας στην περιγραφή του αλγορίθμου «*Μεταεναρμονιστικώς Βελτιστοποιούμενη Εκχώρηση Διαύλων*» MOCA, ο οποίος χρησιμοποιεί τις ανωτέρω τεχνικές για την εξαγωγή σχεδόν βέλτιστων τροποποιημένων πλάνων συχνοτήτων σε κατάλληλα ορισμένες περιοχές. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου ως προς την τροποποίηση των υπαρχόντων πλάνων συχνοτήτων υπό δεδομένους περιορισμούς επιβεβαιώνεται μέσω προσομοιώσεων.

Στη συνέχεια, τα Κεφάλαια 4 και 5 επικεντρώνονται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) και συγκεκριμένα στην επιλογή βέλτιστων διαδρομών υπό ποικίλες απαιτήσεις κατά τη δρομολόγηση. Το Κεφάλαιο 4 παρέχει μια εισαγωγή στα WSN και αναλύει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων κόμβων και των δικτύων τους. Η μελέτη εντοπίζεται στα πρωτόκολλα δρομολόγησης και ιδιαίτερα στο πρωτόκολλο Δρομολόγησης πάνω από Χαμηλής Ισχύος και με Απώλειες Δίκτυα RPL, καθώς και τα πρωτόκολλα με έμφαση στην ασφάλεια, που διακυβεύεται από πλήθος επιθέσεων του στρώματος δικτύου. Έτσι, διάφορες μετρικές έχουν σχεδιαστεί για την αποφυγή διαφορετικών επιθέσεων ή γενικά δυσμενών καταστάσεων, οδηγώντας στην ανάγκη για σύνθετες μετρικές.

Από την άλλη, οι μετρικές δρομολόγησης δεν είναι πάντα συμβατές με κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης. Το Κεφάλαιο 5 πραγματεύεται τους όρους συμβατότητας μεταξύ μετρικών και πρωτοκόλλων δρομολόγησης μέσω των ιδιοτήτων «μονοτονίας» και «ισοτονικότητας» της «Άλγεβρας Δρομολόγησης». Επίσης, παρουσιάζονται η λεξικογραφική και η αθροιστική τεχνική σύνθεσης και εφαρμόζονται στη νεοεισαχθείσα μετρική εμπιστοσύνης PFI και τη μετρική ποιότητας ζεύξης ETX για την επιλογή αξιόπιστων και υψηλής ποιότητας ζεύξης διαδρομών. Οι σύνθετες μετρικές αποδεικνύονται να πληρούν τις επιθυμητές ιδιότητες της Άλγεβρας Δρομολόγησης. Επίσης, αποδεικνύονται μέσω προσομοιώσεων ανώτερες των απλών, ενώ διαφαίνεται η καταλληλότητα της αθροιστικής σύνθεσης για προβλήματα με πολλαπλές απαιτήσεις.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα συμπεράσματα της διατριβής και τις μελλοντικές εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: Εκχώρηση Διαύλων, Ψηφιακό Μέρισμα, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Προσομοιωμένη Ανόπτηση, Βελτιστοποίηση Σμήνους Μονάδων, Άλγεβρα Δρομολόγησης, MOCA, PFI, WSN

Abstract

The present PhD thesis aims at developing effective resource management techniques in wireless networks, emphasizing on wireless broadcasting and sensor networks.

At first, frequency resource management is considered in wireless broadcasting networks. Chapter 2 briefly overviews the DVB-T standard, its adoption during the Agreement of Geneva in 2006 (GE06) and the need for harmonized digital dividend, calling for GE06 Plan modifications.

Next, the frequency plan modification through metaheuristic methods is studied in Chapter 3. Genetic Algorithms, Simulated Annealing and Particle Swarm Optimization are presented and the “channel rearrangement problem” is formulated. Then, the “Metaheuristically Optimized Channel Allocation” (MOCA) algorithm is presented, using the aforementioned techniques to provide near-optimal modified plans in properly defined areas. The MOCA efficiency on plan modification under specified constraints is confirmed via simulation results.

On the other hand, Chapters 4 and 5 focus on wireless sensor networks (WSN) and specifically on selecting optimal paths under diverse requirements during routing process. Chapter 4 introduces WSN and analyses the node and network special characteristics. Emphasis is placed on routing protocols and especially on the Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks (RPL), as well as protocols based on security, which is threatened by a number of network-layer attacks. As a result, differentiated routing metrics have been designed for capturing and avoiding differentiated types of attacks or generally adverse conditions, urging for composite routing metrics.

On the other hand, routing metrics are not always compatible with any kind of routing protocol. Chapter 5 addresses routing metric and protocol compatibility through “monotonicity” and “isotonicity” properties of the “Routing Algebra”. Moreover, additive and lexical metric composition approaches are defined and applied on the proposed trust metric PFI and link quality metric ETX, to derive trusted and quality paths. The composite metrics through PFI and ETX are proved to hold the desired algebraic properties. Moreover, they are proved via simulations to outperform the single metrics, while the additive approach seems to be the most appropriate one for problems with differentiated requirements.

Finally, Chapter 6 concludes the thesis and presents future work.

Keywords: Channel Allocation, Digital Dividend, Genetic Algorithms, Simulated Annealing, Particle Swarm Optimization, Routing Algebra, MOCA, PFI, WSN

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επισφραγίζει πολυετείς μελέτες και εργασίες, οι οποίες δε θα ήταν δυνατές ή τουλάχιστον οι ίδιες, χωρίς τη συνεισφορά, τη διαρκή στήριξη και παρουσία σημαντικών προσώπων και εξεχουσών προσωπικοτήτων τόσο σε επιστημονικό, αλλά και σε προσωπικό επίπεδο. Στις λίγες γραμμές που ακολουθούν θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε καθένα από αυτά τα πρόσωπα.

Κατ' αρχάς, ιδιαίτερες ευχαριστίες και ευγνωμοσύνη οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κο. Χρήστο Καψάλη. Η δυναμική και αισιόδοξη παρουσία του, σε συνδυασμό με φιλικό προφίλ και έντονα ευχάριστο ταμπεραμέντο διευκόλυναν τη συνεργασία με το διαπρεπή επιστήμονα της Σχολής μας. Από την πρώτη στιγμή της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής στάθηκε ως «Δάσκαλος», όπως τον αποκαλούμε, καθοδηγώντας τις σκέψεις μου, δίνοντας απαντήσεις στα ερωτήματά μου και ενθαρρύνοντας κάθε μου προσπάθεια. Εμένα και του Εργαστηρίου στο σύνολό του. Μας αγκάλιασε και προσπάθησε να μας κάνει μια οικογένεια, με κοινό στόχο, χωρίς διακρίσεις. Είναι ο άνθρωπος που έτρεξε να μας ενθαρρύνει, όταν ξεκίνησε η οικονομική κρίση, αλλά και κατά τη διάρκειά της, να μη σταματήσουμε την προσπάθεια, να παλεύουμε και να πετυχαίνουμε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως το Δρ. Παναγιώτη Τρακάδα, ο οποίος στάθηκε κοντά στα επιστημονικά μου βήματα από τις πρώτες μου απόπειρες, με συμβούλεψε, μου έδωσε θάρρος και με καθοδήγησε. Τον θεωρώ ως μέντορά μου, μετά τον καθηγητή μου, και γι' αυτό τον ευχαριστώ θερμά.

Θα ήταν, επίσης, μεγάλη παράλειψη να μην αναφέρω τους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο, με τους οποίους έτυχα συνεργασίας, καθώς και της τιμής να δεθώ φιλικά μαζί τους. Είναι οι άνθρωποι με τους οποίους γίναμε μια ομάδα, πιστέψαμε στο Εργαστήριο και προσπαθήσαμε να το κάνουμε ακόμα καλύτερο. Ζήσαμε μαζί ευχάριστες και δυσάρεστες καταστάσεις, επαγγελματικές και επιστημονικές, ωστόσο μείναμε δεμένοι και με αμοιβαία αλληλοεκτίμηση. Εύχομαι να είστε καλά και να συνεχίσετε την επιτυχημένη πορεία σας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς μου επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κο. Γεώργιο Φικιώρη και τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κο. Παναγιώτη Κωττή, οι οποίοι είτε άμεσα είτε έμμεσα συνεισέφεραν στην εκπόνηση και βελτίωση των επιστημονικών μου εγχειρημάτων.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους που είναι πάντα δίπλα μου. Κατ' αρχάς, ευχαριστώ τους γονείς μου, Νικόλαο και Μαρία Βελιβασάκη για όλα όσα μου έχουν προσφέρει από τότε που με έφεραν στη ζωή, συχνά με δύσκολες συνθήκες και αντίθετους οiwονούς. Τους ευχαριστώ για τις αξίες που μου δίδαξαν, τη μόρφωση, που μου επέτρεψαν οι θυσίες τους να λάβω, τη στήριξη με κάθε μέσο και τίμημα. Ακόμα, τους

ευχαριστώ για το πείσμα και την επιμονή που μου καλλιέργησαν και τη γλυκιά τους παρουσία δίπλα μου.

Επίσης, ευχαριστώ τον αδερφό μου, Γιώργο. Η διαρκής συναναστροφή, η ευχάριστη διάθεση, η συμπαράσταση και η κριτική του σκέψη χαλαρώνουν το άγχος μου, δίνουν απαντήσεις στα προβλήματά μου, εκφράζουν το ενδιαφέρον και την προστατευτικότητα του μεγάλου μου αδερφού μέσα σε ένα ευχάριστο οικογενειακό και φιλικό κλίμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου, με στήριξαν, άκουσαν τα προβλήματά μου, με συμβούλεψαν, μου είπαν όσα δεν ήθελα να ακούσω, αλλά τα είπαν με αγάπη.

Στους γονείς και τον αδερφό μου

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ψηφιακή Τηλεόραση: Ευκαιρία στο Φάσμα Συχνοτήτων.....	2
1.2	Διαχείριση Εμπιστοσύνης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	5
2	Ασύρματα Δίκτυα Ευρυεκπομπής: Ψηφιακή Τηλεόραση.....	9
2.1	Το Πρότυπο DVB-T	13
2.1.1	Τεχνικές Προδιαγραφές του Προτύπου DVB-T.....	13
2.1.2	Είδη Δικτύων DVB-T (MFN, SFN, Gap Fillers)	16
2.2	Η Συμφωνία GE06.....	21
2.3	Το Ψηφιακό Μέρισμα.....	23
2.3.1	Εναρμόνιση του Ψηφιακού Μερισματος.....	24
2.3.2	Διασυννοριακός Συντονισμός	25
2.3.3	Απαιτούμενο Φάσμα Συχνοτήτων	26
3	Κατανομή Συχνοτήτων σε Ασύρματα Δίκτυα Ευρυεκπομπής.....	27
3.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	28
3.1.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι	28
3.1.2	Προσομοιωμένη Ανόπτηση	32
3.1.3	Βελτιστοποίηση Σμήνους Μονάδων	34
3.2	Σχετικές Εργασίες.....	37
3.3	Το Πρόβλημα της Εκ Νέου Απόδοσης Διαύλων.....	39
3.3.1	Περιγραφή του Προβλήματος	39
3.3.2	Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος	40
3.4	Η Προσέγγιση της Μεθόδου MOCA.....	42
3.4.1	Η Αντικειμενική Συνάρτηση	43
3.4.2	Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στη Μέθοδο MOCA.....	44
3.5	Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα	46
3.5.1	Σενάριο I: Χώρα αποτελούμενη από πέντε ΠΕ.....	46
3.5.2	Σενάριο II: Χώρα αποτελούμενη από είκοσι τρεις ΠΕ.....	50
3.6	Συμπεράσματα	54
4	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	61
4.1	Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	61
4.1.1	Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things)	64

4.2	Ασύρματος Κόμβος-Αισθητήρας.....	65
4.3	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	67
4.4	Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	72
4.5	Δρομολόγηση στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	74
4.5.1	Δεδομενο-κεντρικά και Επίπεδης Αρχιτεκτονικής Πρωτόκολλα.....	76
4.5.2	Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης.....	77
4.5.3	Γεωγραφική Δρομολόγηση.....	79
4.5.4	Πρωτόκολλα βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS).....	80
4.5.5	Δρομολόγηση RPL.....	81
4.6	Ασφάλεια και Εμπιστοσύνη στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	83
4.6.1	Διαχείριση Εμπιστοσύνης.....	85
4.6.2	Μετρικές Εμπιστοσύνης.....	87
5	Σύνθεση Μετρικών Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	91
5.1	Άλγεβρα Δρομολόγησης.....	92
5.1.1	Μοντέλο Γράφου Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων.....	92
5.1.2	Απαιτήσεις Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης.....	93
5.1.3	Διατύπωση της Άλγεβρας Δρομολόγησης.....	94
5.1.4	Ιδιότητες της Άλγεβρας Δρομολόγησης.....	95
5.2	Μετρικές ETX και PFI.....	98
5.2.1	Προσδοκητός Χρόνος Μετάδοσης (Expected Transmission Time – ETX)....	99
5.2.2	Δείκτης Προώθησης Πακέτων (Packet Forwarding Indication – PFI).....	101
5.3	Σύνθεση Μετρικών Δρομολόγησης.....	104
5.3.1	Λεξικογραφική Σύνθεση Μετρικών.....	105
5.3.2	Αθροιστική Σύνθεση Μετρικών.....	106
5.4	Απλές και Σύνθετες Μετρικές Δρομολόγησης.....	107
5.4.1	Απλές μετρικές.....	108
5.4.2	Λεξικογραφικώς Σύνθετη Μετρική.....	109
5.4.3	Αθροιστικώς Σύνθετη Μετρική.....	110
5.5	Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα.....	113
5.5.1	Αξιολόγηση της Απόδοσης της Προσέγγισης Απλής Μετρικής.....	115
5.5.2	Αξιολόγηση της Απόδοσης της Προσέγγισης Σύνθετης Μετρικής.....	119
5.6	Συμπεράσματα.....	125
6	Συμπεράσματα.....	127
	Βιβλιογραφία.....	131
	Κατάλογος Δημοσιεύσεων.....	141
A	Χρήσιμοι Ορισμοί.....	142
B	Δρομολόγηση IP και Πρωτόκολλα Δρομολόγησης IP.....	143

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Η διείδυση της ψηφιακής τηλεόρασης ανά την υφήλιο [25]	12
Σχήμα 2: Ανάγκη διασυνοριακού συντονισμού με βάση τις διαδικασίες της Συμφωνίας GE06.....	23
Σχήμα 3: Προσομοίωση της κάλυψης δύο γειτονικών ΠΕ που λειτουργούν στον ίδιο διάυλο συχνοτήτων. Οι ΠΕ οριοθετούνται από τις μαύρες έντονες γραμμές, τα σημεία εκπομπής σημειώνονται με πράσινες κουκκίδες, ενώ η ευρύτερη περιοχή χρωματίζεται σε μια κλίμακα που αντιστοιχεί στο λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή. Σημαντικά θέματα παρεμβολής αναμένονται μεταξύ των όμορων ΠΕ «Α» και «Β», αλλά, αντιθέτως, μπορούν να λειτουργήσουν στον ίδιο διάυλο, καθώς το γεωγραφικό ανάγλυφο εμποδίζει τη διάδοση των σημάτων που προέρχονται από τη μια περιοχή στην άλλη.....	39
Σχήμα 4: Υποθετική χώρα αποτελούμενη από πέντε ΠΕ.....	47
Σχήμα 5: Υποθετική χώρα του Σεναρίου II. Χωρίζεται σε 12 γεωγραφικές περιοχές, καθεμιά εκ των οποίων εξυπηρετείται από ένα ή περισσότερα SFNs. Σε αυτό το σενάριο, ως ΠΕ λαμβάνεται η περιοχή κάλυψης ενός SFN.....	51
Σχήμα 6: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για την πρώτη περίπτωση στο Σενάριο II ανά επανάληψη για βελτιστοποίηση μέσω GA, SA και PSO.....	52
Σχήμα 7: Το πλήθος των ΠΕ που πέτυχαν το στόχο τους θεωρώντας κάθε φορά χώρα μεταβλητό αριθμό ΠΕ και διαύλων που απαιτούνται (Σενάριο II, δεύτερη περίπτωση).....	53
Σχήμα 8: Το πλήθος των υπολειπόμενων διαύλων ανά ΠΕ για μεταβλητό πλήθος ΠΕ και διαύλων που απαιτούνται (Σενάριο II, δεύτερη περίπτωση).....	53
Σχήμα 9: Εσωτερική αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κόμβου.....	66
Σχήμα 10: Γενική μορφή ασύρματου δικτύου αισθητήρων	67
Σχήμα 11: Γενικευμένη στοίβα πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων αισθητήρων [72]	73
Σχήμα 12: Παράδειγμα γράφου δικτύου	93
Σχήμα 13: Παραδείγματα (α) Δεξιάς ισοτονικότητας (β) Αριστερής ισοτονικότητας	96
Σχήμα 14: Τοπολογία ασύρματου δικτύου αισθητήρων, θεωρώντας ζεύγη τιμών ETX και PFI σε κάθε ζεύξη. Η φορά των ζεύξεων συνάδει με την επιλογή των γονέων, ενώ τα δεδομένα κυκλοφορούν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ο κόμβος u_G εισάγει επιθέσεις γκρίζας τρύπας (Grey Hole – GH), απορρίπτοντας τη μισή από την κίνηση που φτάνει σε αυτόν, ενώ ο κόμβος u_B στέλνει μηνύματα αναγνώρισης για τα μισά μηνύματα που αποστέλλονται σε αυτόν. Επίσης, παρατηρούνται τιμές PFI μεγαλύτερες της μονάδας σε περιπτώσεις μη κακόβουλων κόμβων, όπου ο γονέας προωθεί την κίνηση, αλλά ο κόμβος-τέκνο δεν ανιχνεύει την πρόωθηση.....	107
Σχήμα 15: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων (ATT) όταν χρησιμοποιείται απλή μετρική ETX ή PFI για την απόφαση δρομολόγησης για μεταβλητό πλήθος «ανέντιμων» κόμβων και αναξιόπιστων ζεύξεων, θεωρώντας αναμεταδόσεις στρώματος ζεύξης δεδομένων.....	117

Σχήμα 16: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων, όταν χρησιμοποιείται μόνο το ETX ή το PFI, θεωρώντας ότι δε συμβαίνουν αναμεταδόσεις επιπέδου δικτύου για τα μη προωθημένα πακέτα	118
Σχήμα 17: Μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων, όταν χρησιμοποιείται μόνο ETX ή PFI, θεωρώντας ότι δε συμβαίνουν αναμεταδόσεις λόγω άρνησης προώθησης πακέτων	119
Σχήμα 18: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων για διάφορες προσεγγίσεις σύνθετων μετρικών και για μεταβλητό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων υπό τη θεώρηση αναμεταδόσεων στρώματος ζεύξης και δικτύου.	121
Σχήμα 19: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων πακέτων για διάφορες προσεγγίσεις σύνθετων μετρικών και μεταβλητό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων, όταν υποστηρίζονται αναμεταδόσεις μόνο στο στρώμα ζεύξης δεδομένων.	122
Σχήμα 20: Μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων θεωρώντας διαφορετικές προσεγγίσεις σύνθετων μετρικών δρομολόγησης για μεταβλητό πλήθος κακόβουλων κόμβων και ασταθών ζεύξεων, όταν το δίκτυο υποστηρίζει αναμεταδόσεις μόνο στο στρώμα ζεύξης δεδομένων.....	123

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής τηλεόρασης για την αγορά ευρυεκπομπής, κινητών υπηρεσιών και τον τελικό χρήστη	10
Πίνακας 2: Υπόμνημα για το Σχήμα 1	12
Πίνακας 3: Παραλλαγές του σήματος DVB-T και σχετικοί ρυθμοί μετάδοσης [2]	14
Πίνακας 4: Σύγκριση τεχνολογιών DVB-T και DVB-T2 [28]	16
Πίνακας 5: Αρχικές εκχωρήσεις διαύλων για το Σενάριο I. Η πρώτη στήλη υποδεικνύει τον αριθμό της ΠΕ, ακολουθούμενη από τις στήλες με τους διαύλους που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε καθεμιά, ενώ η τελευταία στήλη δείχνει το πλήθος των διαύλων που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε κάθε ΠΕ.	46
Πίνακας 6: Επιπρόσθετοι διαθέσιμοι δίαυλοι ανά ΠΕ, μετά την εφαρμογή των εξωτερικών περιορισμών στο Σενάριο I. Οι επιπλέον δίαυλοι θεωρείται ότι προκύπτουν μετά από πολυμερείς συμφωνίες μεταξύ όμορων χωρών και μετά από έλεγχο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αυτών.	48
Πίνακας 7: Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MOCA (Τελικό Πλάνο I) για το Σενάριο I, τα οποία αντιπροσωπεύουν τροποποιημένα πλάνα συχνοτήτων λαμβάνοντας μέριμνα για το ψηφιακό μέρισμα και αμελητέα παρεμβολή στις επηρεαζόμενες χώρες. Μία από τις πέντε ΠΕ δεν μπορεί να λάβει οκτώ διαύλους εξαιτίας των εσωτερικών και των εξωτερικών περιορισμών.	49
Πίνακας 8: Εναλλακτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου MOCA (Τελικό Πλάνο II) στο Σενάριο I. Καθώς δεν είναι δυνατή η εκχώρηση οκτώ διαύλων ανά ΠΕ, ο αλγόριθμος MOCA αποζημιώνει με έναν επιπλέον δίαυλο σε άλλη ΠΕ.	49
Πίνακας 9: Αποτελέσματα του αλγορίθμου MOCA (Τελικό Πλάνο III) στο Σενάριο I, αφού μεταβλήθηκαν οι περιορισμοί, υποθέτοντας ότι έλαβαν χώρα πρόσθετες στοχευμένες διαπραγματεύσεις.	50
Πίνακας 10: Εξωτερικοί περιορισμοί για το Σενάριο II. Κάθε στήλη αντιπροσωπεύει μια παρεμβαλλόμενη ΠΕ, ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια παρεμβάλλουσα ΠΕ. Οι ΠΕ i, j μπορούν να λειτουργούν στον ίδιο δίαυλο συχνοτήτων χωρίς να προκαλούν επιβλαβή παρεμβολή η μια στην άλλη, αν το κελί (i, j) περιέχει το σύμβολο \surd	56
Πίνακας 11: Οι αρχικές εκχωρήσεις διαύλων στο Σενάριο II. Η πρώτη στήλη δείχνει τον αριθμό της ΠΕ, οι επόμενες δώδεκα περιέχουν τους διαύλους που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε κάθε ΠΕ σύμφωνα με τη GE06, ενώ η τελευταία στήλη περιέχει το πλήθος των διαύλων που εκχωρούνται σε κάθε ΠΕ συνολικά. Το αρχικό πλάνο συχνοτήτων εκχωρεί από 7 έως 12 διαύλους σε καθεμιά από τις 23 θεωρούμενες ΠΕ.	57
Πίνακας 12: Πρόσθετοι διαθέσιμοι δίαυλοι μετά την επιβολή των εξωτερικών περιορισμών στο Σενάριο II.	58
Πίνακας 13: Παράμετροι προσομοίωσης στο Σενάριο II, πρώτη περίπτωση.	58

Πίνακας 14: Οι εκχωρήσεις διαύλων του αλγορίθμου MOCA στην πρώτη περίπτωση του Σεναρίου II. Η πρώτη στήλη υποδεικνύει τον αριθμό της ΠΕ, ακολουθούμενη από τις στήλες με τους διαύλους που εκχωρούνται τελικά σε αυτήν, καθώς και από το συνολικό τους πλήθος. Όπως παρουσιάζεται, το τελικό πλάνο αποδίδει το αναμενόμενο πλήθος διαύλων σε κάθε ΠΕ.....	59
Πίνακας 15: Επιθέσεις επιπέδου δικτύου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.....	84
Πίνακας 16: Σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των μετρικών δρομολόγησης και των απαιτήσεων δρομολόγησης [108]	97

Αρκτικόλεξα

ΠΕ	Περιοχή Εξυπηρέτησης
ADC	Analog to Digital Converter
APTEEN	Adaptive Periodic TEEN
BAMER	Basic Algorithm for Minimum Energy Routing
CADR	Constrained Anisotropic Diffusion Routing
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
DTV	Digital Television
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
ETT	Expected Transmission Time
ETX	Expected Transmission Count
GA	Genetic Algorithms
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GE06	Geneva Agreement 2006
GEAR	Geographic and Energy-Aware Routing
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Sensor Networks
HC	Hop Count
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
IPv6	Internet Protocol version 6
ITU	International Telecommunications Union
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LLN	Low power and Lossy Networks
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MECN	Minimum Energy Communication Network
MFN	Multi-Frequency Networks
MIC	Metric of Interference and Channel-switching
MIMO	Multiple Input Multiple Output

MOCA	Metaheuristically Optimized Channel Allocation
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
PFI	Packet Forwarding Indication
PLR	Packet Loss Ratio
PSO	Particle Swarm Optimization
QoS	Quality of Service
RFID	Radio-Frequency IDentification
RPC	Reference Planning Configuration
RPL	Routing Protocol for LLNs
SA	Simulated Annealing
SAR	Sequential Assignment Routing
SFN	Single Frequency Network
SMECN	small MECN
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
T-DAB	Terrestrial-Digital Audio Broadcasting
TEEN	Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
WCETT	Weighted Cumulative Expected Transmission Time
WiFi	Wireless Fidelity
WRC	World Radiocommunication Conference

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα έχουν πλέον καθιερωθεί στις επικοινωνίες της σύγχρονης κοινωνίας μέσα από μια πληθώρα εφαρμογών και υπηρεσιών, οι οποίες εμπλουτίζονται με την εισαγωγή νέων πλατφορμών στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα αλλά και με την εμφάνιση νέων τύπων δικτύων. Έτσι, εκτός από τις παραδοσιακές υπηρεσίες ευρυεκπομπής, ήτοι τηλεόραση και ραδιόφωνο, έχουν εδραιωθεί οι κινητές επικοινωνίες, όσον αφορά την κινητή τηλεφωνία αλλά και την υπηρεσία κινητού Διαδικτύου μέσα από δίκτυα τρίτης και τέταρτης γενεάς, ενώ αυξανόμενο ενδιαφέρον εκδηλώνεται για αυτο-οργανούμενα δίκτυα ή «ad hoc», όπως είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, με ευρύ πεδίο εφαρμογών.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής αλλά και στις κινητές επικοινωνίες οδήγησαν στην εισαγωγή ψηφιακών συστημάτων ευρυεκπομπής και την εμφάνιση συστημάτων κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενεάς. Παράλληλα, εμφανίζεται πλήθος συστημάτων που λειτουργούν μέσω των αυτο-οργανούμενων δικτύων. Παρά την έντονα διαφοροποιημένη φύση τους, τα νέα δίκτυα ή οι νέες πλατφόρμες έχουν έναν κοινό παρονομαστή, ο οποίος σχετίζεται με τη βέλτιστη αξιοποίηση των παρεχόμενων πόρων.

Η εισαγωγή νέων προϊόντων, δικτύων και υπηρεσιών θέτει μοναδικές προκλήσεις ως προς την υποστήριξή τους. Για παράδειγμα, οι νέες κινητές υπηρεσίες χαρακτηρίζονται από αυξημένες ανάγκες σε φάσμα, καθώς προϋποθέτουν την υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης αλλά και μεγάλη χωρητικότητα του δικτύου, το οποίο θα φιλοξενήσει ολοένα και περισσότερους χρήστες με ολοένα και αυξανόμενη χρήση των προσφερόμενων υπηρεσιών. Όπως φανερώνεται στο [1], η παγκόσμια κίνηση κινητών δεδομένων παρουσίασε αύξηση κατά 70% το 2012, φτάνοντας συνολικά τα 885 Petabytes μηνιαίως, σε σχέση με το τέλος του 2011, οπότε η αντίστοιχη κίνηση ήταν μόλις 520 Petabytes μηνιαίως. Σύμφωνα με την ίδια πηγή, η κίνηση αυτή αναμένεται να αυξηθεί κατά δεκατρείς φορές μέχρι το 2017. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από νέες πλατφόρμες ικανές να υποστηρίξουν τέτοιου είδους υπηρεσίες, επιβάλλεται η αποδοτική χρήση των πόρων των υπάρχοντων δικτύων, προκειμένου να γίνει βέλτιστη αξιοποίησή τους και να καλυφθούν οι αυξημένες ανάγκες ζήτησης.

Επιπρόσθετα, νέες ανάγκες, εκτός από ευκαιρίες, δημιουργούν και τα ασύρματα αυτο-οργανούμενα δίκτυα. Πρόκειται για δίκτυα, τα οποία δε βασίζονται σε προϋπάρχουσα υποδομή, για παράδειγμα δρομολογητές, για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών κόμβων του δικτύου, αλλά παρουσιάζουν πολυ-βηματική επικοινωνία, που στηρίζεται στη συνεργασία

των κόμβων μεταξύ τους. Έτσι, η επικοινωνία δύο μη γειτονικών κόμβων του δικτύου, που λειτουργούν ως πηγή και προορισμός, πραγματοποιείται προωθώντας πακέτα μέσω των ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι δρουν ως δρομολογητές. Με άλλα λόγια, όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο που δεν προορίζεται για τον ίδιο, το προωθεί σε επόμενο κόμβο, ο οποίος επιλέγεται ανάλογα με το υφιστάμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία αποτελούνται από μικρές συσκευές με χαμηλές δυνατότητες σε υπολογιστικούς πόρους, μνήμη και ενεργειακούς πόρους, δεδομένου ότι τροφοδοτούνται κυρίως από απλές μπαταρίες, οι οποίες ενσωματώνουν μια μονάδα αισθητήρα, π.χ. θερμοκρασίας, υγρασίας, κίνησης, κλπ, επιτρέποντας την παρακολούθηση εσωτερικών ή και υπαίθριων περιοχών. Η απλότητα της κατασκευής τους διατηρεί το κόστος σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, οπότε και είναι δυνατή η ευρεία χρήση τους σε πληθώρα εφαρμογών. Παράλληλα, όμως εμφανίζουν ιδιαιτερότητες, δεδομένων των χαμηλών τους πόρων και της αυτονομίας τους, ως προς τη συνδεσιμότητα, την ασφάλεια, το χρόνο ζωής του δικτύου, κλπ. Δημιουργείται, έτσι η ανάγκη της αποδοτικής διαχείρισης των πόρων τους, προκειμένου να καλυφθούν οι εν λόγω απαιτήσεις. Οι πόροι σε ένα τέτοιο δίκτυο αναφέρονται στην ενέργεια, τους διαύλους επικοινωνίας, την υπολογιστική ισχύ, τη μνήμη, το εύρος ζώνης των διαύλων κλπ.

1.1 Ψηφιακή Τηλεόραση: Ευκαιρία στο Φάσμα Συχνοτήτων

Το φάσμα συχνοτήτων ανέκαθεν θεωρούνταν αγαθό υψηλής ζήτησης, καθώς αποτελεί σπάνιο πόρο, ενώ, ταυτόχρονα, μπορεί να στεγάσει πλήθος υπηρεσιών. Εστιάζοντας στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής και τις σύγχρονες κινητές υπηρεσίες, οι αυξημένες απαιτήσεις, ιδίως των τελευταίων, υπονοούν αυξημένες ανάγκες σε φάσμα συχνοτήτων. Μοναδικές ευκαιρίες ως προς την εξοικονόμηση και την απελευθέρωση φάσματος συχνοτήτων παρουσιάστηκαν με την εμφάνιση της ψηφιακής τηλεόρασης.

Η υπηρεσία επίγειας ευρυεκπομπής τηλεόρασης παραδοσιακά καταλαμβάνει φάσμα στις ζώνες συχνοτήτων III (174-230 MHz) και IV/V (470-862 MHz). Το φάσμα συχνοτήτων στις περιοχές αυτές αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευνοϊκό για πληθώρα υπηρεσιών, καθώς παρουσιάζει ευμενή χαρακτηριστικά διάδοσης. Συγκεκριμένα, παρέχει την επιθυμητή ισορροπία ανάμεσα στην περιοχή κάλυψης με δεδομένη ισχύ εκπομπής και απόσταση διαχωρισμού ανάμεσα στους πομπούς. Έτσι, δεδομένων και των αυξημένων απαιτήσεων σε φάσμα και εύρος ζώνης από την πλευρά της κινητής βιομηχανίας, οι ζώνες III και IV/V εμφανίζονται ιδιαίτερα ελκυστικές και για τις κινητές υπηρεσίες.

Η εμφάνιση της ψηφιακής τηλεόρασης κατέστησε ρεαλιστικές τις απαιτήσεις των κινητών υπηρεσιών στο φάσμα που άλλοτε ανήκε στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής, καθώς μετρίασε τις φασματικές απαιτήσεις των τελευταίων. Προκειμένου να αξιοποιηθούν οι νέες ευκαιρίες, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU)

επανασχεδίασε την κατανομή διαύλων συχνοτήτων στις ζώνες VHF και UHF κατά την Περιοχική Διάσκεψη Τηλεπικοινωνιών (Regional Radiocommunication Conference – RRC) το 2006 στη Γενεύη, καταλήγοντας στη Συμφωνία της Γενεύης 2006 (Geneva Agreement 2006 – GE06) [2].

Η Συμφωνία της Γενεύης του 2006 υιοθέτησε το πρότυπο της Επίγειας Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Βίντεο (Digital Video Broadcasting-Terrestrial – DVB-T) και της Επίγειας Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Ήχου (Terrestrial-Digital Audio Broadcasting – T-DAB) για την παροχή ψηφιακών υπηρεσιών ευρυεκπομπής. Επιπλέον, όρισε ένα πλάνο συχνοτήτων αποτελούμενο από περιοχές κατανομής (allotments) και εκχωρήσεις (assignments) για τη μετάδοση υπηρεσιών DVB-T και T-DAB στη ζώνη III (174-230 MHz), καθώς επίσης υπηρεσιών DVB-T στις ζώνες IV/V (470-862 MHz)¹.

Η εισαγωγή της ψηφιακής τηλεόρασης συνεπάγεται απελευθέρωση φάσματος, καθώς το πρότυπο DVB-T έχει χαμηλότερες φασματικές απαιτήσεις από την αναλογική τηλεόραση λόγω των εξελιγμένων τεχνικών συμπίεσης και πολυπλεξίας που χρησιμοποιεί, αλλά και της εφαρμογής της τεχνολογίας μετάδοσης μέσω δικτύων μοναδικής συχνότητας (Single Frequency Network – SFN). Το διαθέσιμο φάσμα μετά την υιοθέτηση της ψηφιακής τηλεόρασης αναφέρεται ως «ψηφιακό μέρισμα» (digital dividend). Σύμφωνα με την Ομάδα Πολιτικής Ραδιοφάσματος (Radio Spectrum Policy Group – RSPG), «*το ψηφιακό μέρισμα κατανοείται ως το φάσμα που διατίθεται άνω και κάτω του απαιτούμενου για τη στέγαση των υπαρχουσών αναλογικών υπηρεσιών σε ψηφιακή μορφή στις ζώνες VHF (ζώνη III: 174–230 MHz) και UHF (ζώνες IV και V: 470–862 MHz)*» [5]. Εκτός αυτού, οι διάσπαρτες κενές φασματικές περιοχές, οι οποίες δημιουργούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις συμβατότητας, αναφέρονται εν γένει ως λευκά διαστήματα (white spaces) και συχνά θεωρείται ότι περιλαμβάνονται στο ψηφιακό μέρισμα. Επιπρόσθετα, ενδιαφέρον εκδηλώθηκε στη Διεθνή Συνδιάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference – WRC) το 2012 για τη ζώνη των 700 MHz, ώστε να αποτελέσει το «δεύτερο ψηφιακό μέρισμα», το οποίο θα είναι στο επίκεντρο των συζητήσεων στην WRC το 2015.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αλλά και σημαντικές προκλήσεις, παρουσιάζει η επιλογή των διαστημάτων συχνοτήτων προς ελευθέρωση. Η αποδοτική παροχή υπηρεσιών υπαγορεύει την εναρμόνιση του ψηφιακού μερίσματος, ώστε να προκύψουν πλεονεκτήματα ως προς τις διαδικασίες προτυποποίησης αλλά και τα χαρακτηριστικά των συσκευών που θα υποστηρίζουν τις νεοεισαχθείσες υπηρεσίες. Με άλλα λόγια, μια εναρμονισμένη ζώνη συχνοτήτων επιτρέπει την ανάπτυξη οικονομικά συμφερούσων συσκευών με δυνατότητες περιαγωγής (roaming). Διαφορετικά, η ανάγκη υποστήριξης πολλαπλών συχνοτήτων συνεπάγεται απαγορευτικά υψηλά επίπεδα κόστους συσκευών. Από κανονιστικής απόψεως, η WRC το 2007

¹ Σύμφωνα με την GE06, όλες οι συμμετέχουσες χώρες υποχρεούνται να μεταβούν από τις αναλογικές στις ψηφιακές υπηρεσίες ευρυεκπομπής μέχρι το 2015, ενώ το 2005 τα ευρωπαϊκά κράτη-μέλη κλήθηκαν να θέσουν τις αρχές του 2012 ως διορία για την ολοκλήρωση του μεταβατικού σταδίου μεταξύ αναλογικής και ψηφιακής ευρυεκπομπής [3]. Εντούτοις, καθώς δεν επρόκειτο για αντικειμενικό στόχο για όλα τα κράτη-μέλη, αυτά υποχρεούνται να τηρήσουν τη διορία του 2015 [4].

εκχώρησε το άνω τμήμα της ζώνης UHF (790-862 MHz ή διάυλοι 61-69) πρωτίστως στην κινητή υπηρεσία στην Περιοχή 1 (Region 1)².

Συνεπώς, πολυάριθμες μελέτες συμβατότητας κλήθηκαν να διευκολύνουν και να θέσουν τις τεχνικές συνθήκες για την εναρμόνιση του ψηφιακού μερίσματος [6]-[9], καθώς οι συμμετέχουσες στην GE06 χώρες δεν έλαβαν εξαρχής υπόψη την επερχόμενη ανάγκη για όποια εναλλακτική χρήση των διαύλων 61-69. Πρωταρχικής σημασίας για την ομαλή διάθεση του εν λόγω φάσματος σε υπηρεσίες αλλότριες της ευρυεκπομπής είναι η εξασφάλιση φάσματος για την παροχή των ήδη υπάρχουσών υπηρεσιών ευρυεκπομπής. Έτσι, θα προκύψει ομαλή συνύπαρξη των νέων με τις υπάρχουσες υπηρεσίες, ικανοποιώντας ταυτόχρονα το αξίωμα της GE06 για ισότιμη πρόσβαση στο φάσμα συχνοτήτων.

Δημιουργείται, με άλλα λόγια, η ανάγκη τροποποίησης³ των υπάρχοντων πλάνων συχνοτήτων, κατά τρόπον ώστε να «μεταφερθούν» φασματικά οι υπηρεσίες ευρυεκπομπής και να εκκενωθούν έτσι οι συχνότητες του ψηφιακού μερίσματος, αξιοποιώντας τα φασματικά κενά που προκύπτουν σποραδικά τόσο σε φασματικές όσο και γεωγραφικές περιοχές. Η τροποποίηση οφείλει να πραγματοποιηθεί με γνώμονα την απρόσκοπτη λειτουργία των υπάρχουσών υπηρεσιών, αλλά και τη διευκόλυνση της ομαλής εισαγωγής και λειτουργίας νέων υπηρεσιών στο ελεύθερο, πλέον, φάσμα. Στα πλαίσια αυτά, σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο συντονισμός και η αλληλεξάρτηση που διέπουν το Πλάνο GE06. Τα ψηφιακά πλάνα των επιμέρους χωρών που συμμετείχαν στη Συμφωνία GE06 είναι συντονισμένα, ώστε κάθε καταχώρηση τύπου allotment ή assignment να εγγυάται ομαλή λειτουργία των υπολοίπων και έτσι να επιτυγχάνεται ομαλή συνύπαρξη, χωρίς παρεμβολές, μεταξύ των όμορων τηλεπικοινωνιακά χωρών.

Οι λύσεις, επομένως, θα αναζητηθούν μέσα από διμερείς ή και πολυμερείς διαπραγματεύσεις με τις γείτονες χώρες που θα καθορίσουν τους κοινώς αποδεκτούς διαύλους λειτουργίας. Το πρόβλημα των εκάστοτε προτεινόμενων τροποποιήσεων είναι τόσο πολυσύνθετο, ώστε η ανάλυσή του να είναι αδύνατη χωρίς τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων. Παράλληλα, καθώς το φάσμα συχνοτήτων αποτελεί σπάνιο εθνικό πόρο, επιβάλλεται η εκχώρησή του κατά βέλτιστο τρόπο. Επομένως, απαιτείται λεπτομερής μελέτη και ανάλυση των εκάστοτε προβλημάτων, ακολουθούμενη από προσεκτικό σχεδιασμό και ανάπτυξη των προτεινόμενων εργαλείων, που θα εξάγουν αξιόπιστες, κατά το δυνατόν βέλτιστες λύσεις.

☞ Η παρούσα διατριβή παρουσιάζει μια εμπειριστατωμένη μελέτη των προϋποθέσεων που θα εξασφαλίσουν το ψηφιακό μέρισμα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, ορίζονται οι

² Όσον αφορά τα χρονικά όρια της διάθεσης του ψηφιακού μερίσματος, η RSPG καλεί επί τούτου το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο να αναλογιστεί ότι η συντονισμένη διάθεση της ζώνης των 800 MHz για τις Υπηρεσίες Ηλεκτρονικής Επικοινωνίας (Electronic Communication Services – ECS) εκτός των υπηρεσιών ευρυεκπομπής πρέπει να επιτευχθεί σε όλα τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2015 [6], όταν λάβει χώρα η οριστική παύση εκπομπής αναλογικού σήματος, πιθανώς ακολουθούμενη από το «δεύτερο ψηφιακό μέρισμα» μέσα στα επόμενα χρόνια.

³ Σε κανονιστικούς όρους, η τροποποίηση του πλάνου συχνοτήτων μιας χώρας, το οποίο είναι ήδη σε ισχύ ή πρόκειται να εφαρμοστεί, προϋποθέτει ότι η χώρα θα προχωρήσει στην εισαγωγή ή τροποποίηση των καταχωρήσεων στο πλάνο GE06, αναμένοντας την απόκριση –θετική ή αρνητική– των επηρεαζόμενων χωρών. Παρόλα αυτά, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Διοικήσεων Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations – CEPT) έχει καταλήξει ότι «μια τέτοια προσπάθεια συνήθως δε θα είναι επιτυχής σε ευρεία κλίμακα ακολουθώντας αυστηρά τις προτυποποιημένες δομές σχεδιασμού δικτύων της GE06» [8].

περιορισμοί και οι απαιτήσεις για την απρόσκοπτη λειτουργία των υπηρεσιών ενδιαφέροντος. Παράλληλα, το πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων εκφράζεται μαθηματικά και επιλύεται μέσω της μεθόδου *Μεταευριστικώς Βελτιστοποιούμενη Εκχώρηση Διαύλων* (Metaheuristically Optimized Channel Allocation – MOCA). Η μέθοδος παρέχει βελτιστοποίηση των λύσεων, μέσω μεταευριστικών μεθόδων, συγκεκριμένα των Γενετικών Αλγορίθμων, της μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης και της Βελτιστοποίησης Σμήνους Μονάδων. Η μέθοδος MOCA αξιολογείται για δύο περιπτώσεις, μιας χώρας αποτελούμενης από πέντε περιοχές εξυπηρέτησης και μιας πιο ρεαλιστικής περίπτωσης χώρας αποτελούμενης από είκοσι τρεις περιοχές εξυπηρέτησης. Σε κάθε περίπτωση ο αλγόριθμος εξάγει συντονισμένα και εναρμονισμένα πλάνα συχνοτήτων, ενώ παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου ικανοποίησης των εκάστοτε απαιτήσεων.

1.2 Διαχείριση Εμπιστοσύνης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα τελευταία χρόνια, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν ωριμάσει ως βιώσιμες λύσεις σε ένα ευρύ σύνολο καινοτόμων εφαρμογών, οι οποίες εκτείνονται από την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και το αυτοματισμό οικιών έως την κατ' οίκον ασφάλεια και τα ευφυή δίκτυα ενέργειας (Smart Grid) [10]. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν ένα μεγάλο, συνήθως, αριθμό γεωγραφικά διασκορπισμένων κόμβων χαμηλών δυνατοτήτων, οι οποίοι επικοινωνούν κατά πολυ-βηματικό συνεργατικό τρόπο μέσω του αναξιόπιστου ασύρματου μέσου, χωρίς κεντρική διαχείριση ή σταθερή δικτυακή υποδομή. Καθώς η ασφάλεια και η αξιοπιστία των διαύλων επηρεάζουν έντονα την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, επιβάλλεται η λήψη μέριμνας για την εξασφάλισή τους.

Η επικοινωνία μέσω του ασύρματου μέσου διάδοσης εμφανίζει δυσχέρειες και έντονη αναξιοπιστία. Οι διάσπαρτοι κόμβοι βρίσκονται κατά κανόνα σε τυχαία τοπολογία, ούτως ώστε ορισμένοι κόμβοι να απέχουν αρκετά από τους γειτονικούς τους ή να εμφανίζονται εμπόδια μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση, και ανάλογα με τη χρονική μεταβλητότητα των διαύλων επικοινωνίας, δεν είναι πάντοτε δυνατή η παράδοση των πακέτων που ανταλλάσσονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη μετάδοσης εκ νέου του πακέτου, μέχρι αυτό να παραδοθεί, γεγονός που ενδέχεται να καταλήξει σε πολλαπλές επαναλήψεις, ανάλογα με την περίπτωση. Αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική σπατάλη των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και συνεπώς στην πλήρη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων ορισμένων κόμβων για την εξυπηρέτηση, τελικά, περιορισμένης κίνησης.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, έχουν προταθεί διάφορες μετρικές δρομολόγησης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητή-

ρων [11], όπως η αστάθεια των ζεύξεων, η λειτουργία χωρίς επίβλεψη, καθώς και οι περιορισμοί ενέργειας, μνήμης και υπολογιστικών πόρων. Οι μετρικές αυτές ενσωματώνονται στα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης και λαμβάνονται υπόψη σε κάθε κόμβο, προκειμένου να επιλεγεί ο επόμενος κόμβος για την προώθηση της κίνησης. Μερικές από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μετρικές δρομολόγησης είναι το πλήθος των βημάτων (Hop-Count – HC), το αναμενόμενο πλήθος μεταδόσεων (Expected Transmission Count – ETX), το επίπεδο ποιότητας ζεύξης (Link Quality Level – LQL), ο δείκτης ισχύος λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength Indication – RSSI) και η διαθέσιμη ενέργεια (Remaining Energy – RE). Καθεμιά από αυτές τις μετρικές στοχεύει στην αναγνώριση συγκεκριμένων συμπεριφορών, προκειμένου αυτές να αποφευχθούν.

Η συνεργασία μεταξύ των κόμβων, δεδομένων των χαμηλών δυνατοτήτων των κόμβων, εγείρει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, ειδικά όταν πρόκειται για περιβάλλοντα χωρίς επίβλεψη ή εχθρικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, εστιάζοντας στις επιθέσεις του στρώματος δικτύου [12], ένας κόμβος μπορεί να αρνηθεί να προωθήσει μέρος ή και ολόκληρη την κίνηση που λαμβάνει και που προορίζεται για διαφορετικό κόμβο, εισάγοντας επιθέσεις γκρίζας ή μαύρης τρύπας, αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πλήρη απώλεια συνδεσιμότητας προς τους κόμβους-προορισμούς, η κίνηση των οποίων εξυπηρετείται από τους επικίνδυνους κόμβους. Άλλου είδους επιθέσεις είναι πιθανό να στρεβλώσουν την κίνηση, οδηγώντας σε ατέρμονη κυκλοφορία των πακέτων μέσα στο δίκτυο, κατασπαταλώνοντας τους διαθέσιμους πόρους του και οδηγώντας σε πλήρη εξόντωση του δικτύου.

Καθώς η λίστα των απειλών της ασφάλειας είναι εκτεταμένη [13], έχουν προταθεί διάφορα αντίμετρα στη βιβλιογραφία [14]. Οι περισσότερες λύσεις επιχειρούν να θωρακίσουν τη συνδεσιμότητα του δικτύου χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους ασφαλείας, όπως είναι η κωδικοποίηση και η διαχείριση κλειδιών. Παρόλα αυτά, η υλοποίηση τέτοιων μέτρων ασφαλείας απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και μνήμη, αυξάνοντας παράλληλα και την ενεργειακή κατανάλωση. Αντί αυτών, προτείνεται η εισαγωγή μετρικών ασφαλείας στα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί άμυνα εναντίον των επιθέσεων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, επιδιώκεται η διαχείριση εμπιστοσύνης [15]-[17]. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, οι κόμβοι ασύρματων δικτύων αισθητήρων αναπτύσσουν σχέσεις εμπιστοσύνης μεταξύ τους, εμπνευσμένες από τις ανθρώπινες κοινωνικές σχέσεις. Κάθε κόμβος επιλέγει τον επόμενο κόμβο στη διαδρομή ενός πακέτου, βασιζόμενος στις προσδοκίες του ότι ο συγκεκριμένος γείτονας θα συνεργαστεί ειλικρινώς όσον αφορά συγκεκριμένες δραστηριότητες, όπως λόγου χάρη την προώθηση των δεδομένων. Με άλλα λόγια, κάθε κόμβος αξιολογεί τους γείτονές του ως προς την εμπιστοσύνη τους, την οποία χρησιμοποιεί ως μετρική στο πρωτόκολλο δρομολόγησης για την επιλογή του μονοπατιού προς τον προορισμό ή την επιλογή του επόμενου κόμβου.

Ένα σημαντικό θέμα που αναγνωρίστηκε από τους Pirzada κ.ά. στο [19] προκύπτει από το γεγονός ότι για την αξιολόγηση ενός κόμβου, πρέπει να ελεγχθούν πολλαπλές πτυχές της

συμπεριφοράς των κόμβων. Καθεμιά από αυτές στοχεύει στην ανίχνευση ενός τύπου επιθέσεων. Για παράδειγμα, ο κόμβος u_i μπορεί να ελέγχει τη συμπεριφορά του κόμβου u_j όταν βρίσκεται σε λειτουργία παρακολούθησης (promiscuous mode). Συστηματική αποτυχία φανερώνει έναν κακόβουλο κόμβο, ο οποίος εισάγει επιθέσεις γκρίζας ή μαύρης τρύπας. Ομοίως, απαριθμώντας το πλήθος των πακέτων που παραδίδονται χωρίς τροποποιήσεις, μπορούν να ανιχνευτούν σχετικές επιθέσεις. Έτσι, τα σχήματα διαχείρισης εμπιστοσύνης διαφοροποιούν τις συμπεριφορές και αξιολογούν την εμπιστοσύνη του κόμβου, λαμβάνοντας υπόψη μια ή περισσότερες πτυχές της συμπεριφοράς του, ισότιμα ή με κάποιο συντελεστή βαρύτητας.

Κατ' αντιστοιχία, στις πραγματικές εφαρμογές, που απαιτούν την ταυτόχρονη παρακολούθηση και αξιολόγηση πολλαπλών συμπεριφορών, επιβάλλεται ο συνδυασμός των αντιμέτρων [11], όχι μόνο ασφαλείας αλλά και άλλων απαιτήσεων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, π.χ. της αξιοπιστίας της ζεύξης. Παρόλα αυτά, ενώ οι προαναφερθείσες μετρικές δρομολόγησης εξυπηρετούν επιτυχώς, κατά κανόνα, το σκοπό τους, ωστόσο εκλείπει ο αποδοτικός συνδυασμός πολλαπλών μετρικών στα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποιότητα της υπηρεσίας στις σύγχρονες εφαρμογές.

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να προκύψει εν γένει από το συνδυασμό δύο παραγόντων, ήτοι ενός αλγορίθμου υπολογισμού του μονοπατιού και ενός σχήματος προώθησης πακέτων. Επικρατέστεροι αλγόριθμοι του πρώτου παράγοντα είναι οι αλγόριθμοι του Dijkstra [20] και των Bellman-Ford [21], ενώ επικρατέστερες προσεγγίσεις του δεύτερου όρου είναι η δρομολόγηση βήμα-βήμα (hop by hop) και η δρομολόγηση πηγής. Διαφορετικοί συνδυασμοί τους οδηγούν σε διάφορα πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Θέματα συμβατότητας ανάμεσα στα πρωτόκολλα και τις μετρικές δρομολόγησης έχουν εξεταστεί υπό το πρίσμα μιας μη κλασικής άλγεβρας, η οποία αντιστοιχεί τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου δρομολόγησης σε αλγεβρικές ιδιότητες των μετρικών δρομολόγησης. Συγκεκριμένα, ο Sobrinho εισήγαγε την έννοια της «Άλγεβρας Δρομολόγησης» για τη μοντελοποίηση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης και την εξασφάλιση της σύγκλισης, της βέλτιστης διαδρομής και της απώλειας βρόχων μέσω των ιδιοτήτων της μονοτονίας και της ισοτονικότητας για τις μετρικές δρομολόγησης είτε σε πρωτόκολλα κατάστασης ζεύξης [22] είτε πρωτόκολλα ανύσματος διαδρομής [23][24].

☞ Στην παρούσα διδακτορική διατριβή ορίζεται μια νέα σύνθετη μετρική δρομολόγησης, που βασίζεται στην αξιοπιστία της ζεύξης και την εμπιστοσύνη, ικανοποιώντας επιπλέον τη μονοτονία και την ισοτονικότητα της άλγεβρας δρομολόγησης. Επομένως, η συγκεκριμένη μετρική είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε κάθε τύπο πρωτοκόλλου δρομολόγησης προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή απόδοση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Ειδικότερα, η σύνθετη μετρική που προτείνεται προέκυψε από τη σύνθεση του Δείκτη Προώθησης Πακέτων (Packets Forwarding Indication – PFI) και

του αναμενόμενου πλήθους μεταδόσεων ETX. Το PFI ορίζεται ως μια νέα μετρική εμπιστοσύνης, η οποία αποδεικνύεται ότι πληροί τις προϋποθέσεις της άλγεβρας δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, οι ετικέτες των ζεύξεων υπολογίζονται θεωρώντας δύο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι υποστηρίζονται αναμεταδόσεις πακέτων σε περίπτωση μη προώθησης πακέτων, ενώ στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι τέτοιες αναμεταδόσεις στρώματος δικτύου δεν είναι δυνατό να λάβουν χώρα.

Η εργασία στη συνέχεια οργανώνεται ως εξής. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει μια συνοπτική περιγραφή των ψηφιακών συστημάτων ευρυεκπομπής, εστιάζοντας στο πρότυπο DVB-T και το ψηφιακό μέρισμα. Ακολούθως, το Κεφάλαιο 3 ασχολείται με το θέμα του εκ νέου σχεδιασμού των πλάνων συχνοτήτων ψηφιακής τηλεόρασης για την εξασφάλιση του ψηφιακού μέρισματος. Αφού ορίζεται το πρόβλημα, παρουσιάζεται και αναλύεται η μέθοδος *Μεταευριστικώς Βελτιστοποιούμενη Εκχώρηση Διαύλων* (Metaheuristically Optimized Channel Allocation – MOCA), η οποία στηρίζεται σε μεταευριστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, ήτοι Γενετικούς Αλγορίθμους, Προσομοιωμένη Ανόπτηση και Βελτιστοποίηση Σμήνους Μονάδων. Η μέθοδος μελετάται ως προς την αποδοτικότητά της μέσω προσομοιώσεων, οι οποίες αναλύονται στο ίδιο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει μια εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εστιάζοντας στα πρωτόκολλα δρομολόγησης, ενώ παραθέτει και μια σύντομη επισκόπηση των επιθέσεων που εμφανίζονται στο στρώμα δικτύου. Έπειτα, παρουσιάζεται η Άλγεβρα Δρομολόγησης μαζί με τα βασικά της χαρακτηριστικά στο Κεφάλαιο 5. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές μέθοδοι σύνθεσης των μετρικών δρομολόγησης, ενώ ορίζονται οι μετρικές δρομολόγησης ETX, PFI, καθώς και η σύνθετη εξ αυτών μετρική. Η αποδοτικότητα της λύσης αποδεικνύεται μέσα από εκτενείς προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων αναλύονται επίσης στο Κεφάλαιο 5. Τέλος, το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα βασικά συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής και ολοκληρώνει την εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ασύρματα Δίκτυα Ευρυεκπομπής: Ψηφιακή Τηλεόραση

Η ψηφιακή τηλεόραση⁴ αποτελεί την εξέλιξη της αναλογικής ευρυεκπομπής τηλεόρασης. Όπως συμβαίνει γενικότερα με τα ψηφιακά συστήματα έναντι των αναλογικών, η ψηφιακή τηλεόραση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική, τα κυριότερα εκ των οποίων συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Το σήμα της ψηφιακής τηλεόρασης εμφανίζει μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα και στα φαινόμενα υποβάθμισης του σήματος λόγω των μηχανισμών διάδοσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ψηφιακή τηλεόραση μπορεί να οδηγήσει σε επιτυχή λήψη με χαμηλότερη στάθμη σήματος.
- Η ψηφιακή τηλεόραση εν γένει χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες φασματικές απαιτήσεις για δεδομένη ποιότητα υπηρεσίας, ενώ πλέον υψηλές απαιτήσεις συχνοτήτων παρουσιάζουν οι υπηρεσίες υψηλής ευκρίνειας. Αυτό οφείλεται σε εξελιγμένες τεχνικές συμπίεσης, πολυπλεξίας αλλά και νέους τύπους δικτύων, λόγω χάρη των SFN, τα οποία ενσωματώνονται στα πρότυπα της ψηφιακής τηλεόρασης.
- Η ψηφιακή τηλεόραση έρχεται με νέες πρόσθετες διαδραστικές υπηρεσίες, οι οποίες συνοδεύουν την παραδοσιακή υπηρεσία της τηλεόρασης. Μερικές από αυτές είναι οι υπηρεσίες κατά βούληση (on demand), ο ηλεκτρονικός οδηγός προγράμματος, νέες υπηρεσίες για AMEA κλπ.

Τα ανωτέρω τεχνικής φύσεως πλεονεκτήματα συνεπάγονται πληθώρα πλεονεκτημάτων τόσο για το λειτουργό του δικτύου, όσο και για τον πάροχο περιεχομένου και συνεπώς και για τον τελικό χρήστη, όπως υποδηλώνει και ο Πίνακας 1. Η χαμηλότερη απαιτούμενη ισχύς λήψης επιτρέπει χαμηλότερη ισχύ εκπομπής, η οποία υπονοεί οικονομικά οφέλη αλλά και μια στροφή σε «πράσινες» και ενεργειακά πιο αποδοτικές υπηρεσίες, αφού ελαττώνονται οι ηλεκτρικές απαιτήσεις των κέντρων ευρυεκπομπής, ενώ παράλληλα διαχέεται μειωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο περιβάλλον και προς τον άνθρωπο.

⁴ Ο όρος «ψηφιακή τηλεόραση» στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναφέρεται στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, εκτός εάν ρητά ορίζεται άλλως (π.χ. δορυφορική, κλπ.).

Από την άλλη πλευρά, οι μειωμένες απαιτήσεις σε διαύλους συχνοτήτων δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά των υπηρεσιών ευρυεκπομπής αλλά και των κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών, καθορίζοντας έτσι τους βασικούς παίκτες στη διεκδίκηση του ψηφιακού μερίσματος. Το φάσμα που ελευθερώνεται με την υιοθέτηση ενός προτύπου ψηφιακής τηλεόρασης αποτελεί το μήλον έριδος μεταξύ της αγοράς ευρυεκπομπής και της αγοράς των κινητών υπηρεσιών. Στην πρώτη περίπτωση το φάσμα μπορεί να διατεθεί είτε για την εκπομπή επιπλέον προγραμμάτων τηλεόρασης τυπικής ευκρίνειας είτε για την παροχή προγραμμάτων υψηλής ευκρίνειας ή ακόμη και για την παροχή νέων υπηρεσιών ευρυεκπομπής που θα συμπληρώνουν τις τηλεοπτικές υπηρεσίες. Το απελευθερωθέν φάσμα και οι νέες υπηρεσίες οδηγούν στη διάκριση πλέον των παρόχων δικτύου και περιεχομένου και ανοίγουν το δρόμο για νέες και καινοτόμες υπηρεσίες που συνεπάγονται νέα επιχειρηματικά μοντέλα, ανάπτυξη και οικονομικές ευκαιρίες στην αγορά της τηλεόρασης. Παράλληλα, για τους παρόχους κινητών υπηρεσιών, το ψηφιακό μέρισμα αποτελεί το επιθυμητό φάσμα για την ευρύτερη παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών και την εξυπηρέτηση του ολοένα και αυξανόμενου όγκου κινητών συνδέσεων, οι οποίες μάλιστα εμφανίζουν αυξημένες ανάγκες σε κίνηση δεδομένων.

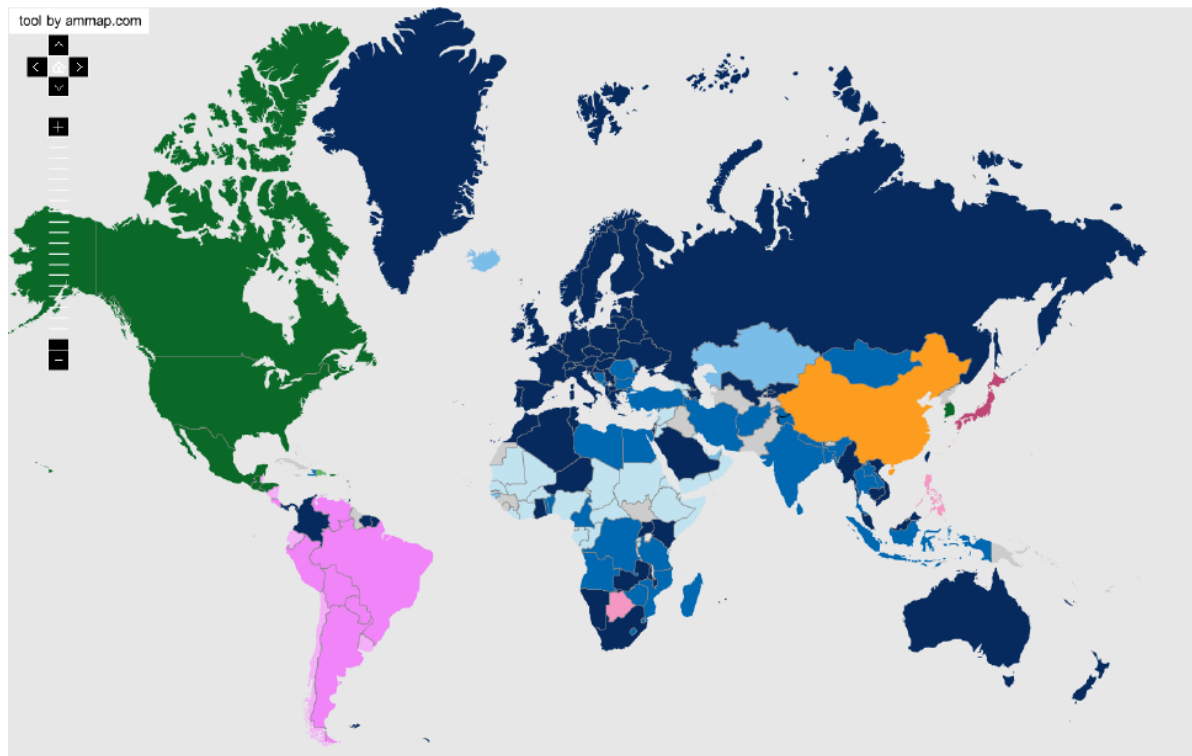
Τέλος, οι νέες υπηρεσίες, εκτός από την καινοτομία που προσφέρουν στους λειτουργούς των υπηρεσιών, είτε αυτές είναι κινητές είτε ευρυεκπομπής, οδηγούν σε βελτιωμένη εμπειρία του χρήστη και μεγαλύτερη διευκόλυνση των καθημερινών δραστηριοτήτων. Η νέα τεχνολογία έφερε νέες υπηρεσίες για τον τηλεθεατή, περιλαμβάνοντας μεταξύ άλλων ευρύτερες επιλογές προγραμμάτων, βελτιωμένη ποιότητα και διαδραστικότητα. Σαφώς, ο τελικός χρήστης ωφελείται επίσης από τις τεχνολογικές καινοτομίες, που επιτρέπουν την παροχή αυτών των υπηρεσιών κατά οικονομικό και οικολογικό τρόπο.

Πίνακας 1: Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής τηλεόρασης για την αγορά ευρυεκπομπής, κινητών υπηρεσιών και τον τελικό χρήστη

Χαρακτηριστικό	Αγορά Ευρυεκπομπής	Αγορά Κινητών Υπηρεσιών	Τελικός Χρήστης
Μεγαλύτερη ανοχή σήματος ψηφιακής τηλεόρασης	Οικονομικά οφέλη, λόγω χαμηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων	-	<ul style="list-style-type: none"> Οικονομικά οφέλη, λόγω χαμηλότερου κόστους λειτουργίας των υπηρεσιών Περιβαλλοντικά οφέλη, λόγω μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης Βιολογικά οφέλη λόγω χαμηλότερης εκπεμπόμενης ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
Χαμηλότερες Φα-	• Δυνατότητα εκπομπής	• Δυνατότητα παροχής	• Βελτιωμένη εμπειρία













Χαρακτηριστικό	Αγορά Ευρυεκπομπής	Αγορά Κινητών Υπηρεσιών	Τελικός Χρήστης
<i>σματικές Απαιτήσεις της Ψηφιακής Τηλεόρασης</i>	<ul style="list-style-type: none"> περισσότερων προγραμμάτων τυπικής ευκρίνειας Δυνατότητα εκπομπής υπηρεσιών υψηλής ευκρίνειας Δυνατότητα παροχής βοηθητικών υπηρεσιών ευρυεκπομπής (π.χ. ηλεκτρονικός οδηγός προγράμματος, λειτουργία κατά βούληση, υπηρεσίες για ΑΜΕΑ, κλπ.) 	<ul style="list-style-type: none"> νέων ευρυζωνικών υπηρεσιών Δυνατότητα κάλυψης του αυξημένου όγκου κίνησης δεδομένων 	<ul style="list-style-type: none"> των παρεχόμενων υπηρεσιών Επιτυχής εξυπηρέτηση των αυξημένων απαιτήσεων Δυνατότητα χρήσης νέων υπηρεσιών και άρα εκσυγχρονισμός της καθημερινότητας Οικονομικά οφέλη από την είσοδο νέων παικτών και ανταγωνιστών στην αγορά
<i>Νέες Υπηρεσίες της Ψηφιακής Τηλεόρασης</i>	<ul style="list-style-type: none"> Δυνατότητα καινοτομίας που θα αποφέρει οικονομικά οφέλη Διαχωρισμός λειτουργιών δικτύου και παρόχων περιεχομένου που επιτρέπει την είσοδο νέων παικτών στην αγορά 	-	<ul style="list-style-type: none"> Βελτίωση της εμπειρίας χρήσης μέσω των νέων υπηρεσιών Οικονομικά συμφέροντες υπηρεσίες





Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι πέραν των πολλαπλών και σημαντικών πλεονεκτημάτων της ψηφιακής τηλεόρασης, η ταχεία και ευρεία υιοθέτησή της ναρκοθετείται από το αυξημένο ύψος της επένδυσης για την αναβάθμιση των δικτύων και των κέντρων εκπομπής αλλά και των δεκτών των τελικών χρηστών. Παρόλα αυτά και υπό την καθοδήγηση διεθνών και διακρατικών οργανισμών, όπως είναι η ITU, η CEPT, η FCC κ.ά., η ψηφιακή τηλεόραση έχει εισχωρήσει στην αγορά, ενώ πολλές χώρες έχουν πραγματοποιήσει πλήρη μετάβαση σε ψηφιακές υπηρεσίες ευρυεκπομπής. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η χρήση της ψηφιακής τηλεόρασης ανά χώρα του κόσμου για τα πρότυπα της ψηφιακής τηλεόρασης που υιοθετούνται, ήτοι DVB-T, DVB-T2, ATSC, ISDB-T, SBTVD-T, DTMB, ενώ ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει το αντίστοιχο υπόμνημα.



Σχήμα 1: Η διείσδυση της ψηφιακής τηλεόρασης ανά την υφήλιο [25]

Πίνακας 2: Υπόμνημα για το Σχήμα 1

Σύστημα	Περιγραφή
 <i>DVB-T/DVB-T2</i>	Η ευρειακπομή μέσω DVB-T/DVB-T2 είναι ενεργή
 <i>Υιοθέτηση DVB-T/DVB-T2</i>	Χώρες που έχουν υιοθετήσει το σύστημα DVB-T/DVB-T2
 <i>Δοκιμές ευρειακπομής DVB-T/DVB-T2</i>	Χώρες που πραγματοποιούν δοκιμές DVB-T/DVB-T2
 <i>RRC06</i>	Χώρες που συμμετέχουν στη Συμφωνία της Γενεύης 2006 της ITU. Μπορεί να θεωρηθεί ότι όλες οι συμμετέχουσες χώρες θα υιοθετήσουν το σύστημα DVB-T/DVB-T2 κατά την ψηφιακή μετάβαση
 <i>ATSC</i>	Η ευρειακπομή μέσω του συστήματος ATSC είναι ενεργή
 <i>Υιοθέτηση ATSC</i>	Χώρες που έχουν υιοθετήσει το σύστημα ATSC
 <i>Δοκιμές ευρειακπομής ATSC</i>	Χώρες που πραγματοποιούν δοκιμές του ATSC
 <i>ISDB-T</i>	Η ευρειακπομή μέσω του συστήματος ISDB-T είναι ενεργή
 <i>Υιοθέτηση ISDB-T</i>	Χώρες που έχουν υιοθετήσει το σύστημα ISDB-T
 <i>Δοκιμές ευρειακπομής ISDB-T</i>	Χώρες που πραγματοποιούν δοκιμές του ISDB-T
 <i>SBTVD-T</i>	Η ευρειακπομή μέσω του συστήματος SBTVD-T είναι ενεργή
 <i>Υιοθέτηση SBTVD-T</i>	Χώρες που έχουν υιοθετήσει το σύστημα SBTVD-T

Σύστημα	Περιγραφή
 <i>DTMB</i>	Η ευρυεκπομπή μέσω του συστήματος DTMB είναι ενεργή
 <i>Υιοθέτηση DTMB</i>	Χώρες που έχουν υιοθετήσει το σύστημα DTMB
 <i>Δοκιμές ευρυεκπομπής DTMB</i>	Χώρες που πραγματοποιούν δοκιμές του DTMB
 <i>Εμπορικές υπηρεσίες DVB-T</i>	Δεν έχει υιοθετηθεί επίσημα κάποιο πρότυπο ψηφιακής τηλεόρασης Αναποφάσιστες χώρες

2.1 Το Πρότυπο DVB-T

Το πρότυπο DVB-T [26] αποτελεί το de facto πρότυπο ψηφιακής τηλεόρασης στην Ευρώπη, ενώ στηρίζεται και από σχετική νομοθεσία στις χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παράλληλα, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών υπό το πρότυπο DVB-T2 [27] φανερώνει τη διαρκή εμπιστοσύνη της βιομηχανίας ευρυεκπομπής στην πλατφόρμα της ψηφιακής τηλεόρασης.

2.1.1 Τεχνικές Προδιαγραφές του Προτύπου DVB-T

Το σύστημα DVB-T [26] επιτρέπει την επίγεια ευρυεκπομπή τηλεοπτικών σημάτων κωδικοποιημένων κατά MPEG-2 και MPEG-4. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα χρονικά και τοπικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του διαύλου, το πρότυπο χρησιμοποιεί την τεχνική της Ορθογωνικής Πολυπλεξίας Διάρθρωσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplex – OFDM), σε συνδυασμό με κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex – COFDM).

Η τεχνική OFDM παρέχει δύο επιλογές για το πλήθος των φερόντων (2k και 8k), τρία σχήματα διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM και 64-QAM) και διάφορα διαστήματα φύλαξης (1/4, 1/8, 1/16 και 1/32). Όσον αφορά το εύρος ζώνης, η προτιμητέα φασματική απόσταση των διαύλων είναι 8 MHz, ενώ είναι δυνατές και φασματικές αποστάσεις των 7 ή και 6 MHz. Με συνδυασμό αυτών των παραμέτρων προκύπτουν εκατόν είκοσι (120) παραλλαγές του συστήματος DVB-T, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 3. Τα σχήματα 16-QAM και 64-QAM μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης σε συνδυασμό με ομοιόμορφους ή μη ομοιόμορφους κανόνες χαρτογράφησης και έτσι οι ροές δεδομένων εισόδου μπορούν να διαχωριστούν σε χαμηλής και υψηλής προτεραιότητας ροές δεδομένων με διαφορετική προστασία λαθών για λόγους ιεραρχικής μετάδοσης.

Πίνακας 3: Παραλλαγές του σήματος DVB-T και σχετικοί ρυθμοί μετάδοσης [2]

Διαμόρφωση	Ρυθμός Κώδικα	Ρυθμός μετάδοσης bit (Mbit/s) για διαφορετικά διαστήματα φύλαξης (GI)			
		GI = 1/4	GI = 1/8	GI = 1/16	GI = 1/32
Παραλλαγές 8MHz					
<i>QPSK</i>	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
<i>QPSK</i>	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
<i>QPSK</i>	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
<i>QPSK</i>	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
<i>QPSK</i>	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
<i>16-QAM</i>	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
<i>16-QAM</i>	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
<i>16-QAM</i>	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
<i>16-QAM</i>	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
<i>16-QAM</i>	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
<i>64-QAM</i>	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
<i>64-QAM</i>	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
<i>64-QAM</i>	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
<i>64-QAM</i>	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
<i>64-QAM</i>	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67
Παραλλαγές 7MHz					
<i>QPSK</i>	1/2	4,35	4,84	5,12	5,28
<i>QPSK</i>	2/3	5,81	6,45	6,83	7,04
<i>QPSK</i>	3/4	6,53	7,26	7,68	7,92
<i>QPSK</i>	5/6	7,26	8,06	8,54	8,80
<i>QPSK</i>	7/8	7,62	8,47	8,97	9,24
<i>16-QAM</i>	1/2	8,71	9,68	10,25	10,56
<i>16-QAM</i>	2/3	11,61	12,90	13,66	14,08
<i>16-QAM</i>	3/4	13,06	14,52	15,37	15,83
<i>16-QAM</i>	5/6	14,52	16,13	17,08	17,59
<i>16-QAM</i>	7/8	15,24	16,93	17,93	18,47
<i>64-QAM</i>	1/2	13,06	14,51	15,37	15,83
<i>64-QAM</i>	2/3	17,42	19,35	20,49	21,11
<i>64-QAM</i>	3/4	19,60	21,77	23,05	23,75
<i>64-QAM</i>	5/6	21,77	24,19	25,61	26,39
<i>64-QAM</i>	7/8	22,86	25,40	26,90	27,71

Η διόρθωση λαθών μπορεί να χωριστεί σε δύο μπλοκ: η εξωτερική κωδικοποίηση και η εξωτερική διεμπλοκή (interleaving) είναι κοινές με τις Προδιαγραφές της Δορυφορικής Και της Καλωδιακής Βάσης (baseline) και η εσωτερική κωδικοποίηση είναι κοινή με την Προδιαγραφή της Δορυφορικής Βάσης. Η χρήση εσωτερικής διεμπλοκής είναι εξειδικευμένη

για το σύστημα DVB-T. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την ευρυεκπομπή ταυτόχρονης εκπομπής (simulcast) διαφορετικών προγραμμάτων με διαφορετική προστασία λαθών και διαφορετικές περιοχές κάλυψης. Για λόγους οικονομίας στο δέκτη υποστηρίζεται η ιεραρχική μετάδοση, αλλά όχι η ιεραρχική κωδικοποίηση.

Επιπλέον, το πρωτόκολλο DVB-T επιτρέπει αποδοτική χρήση των φασματικών πόρων εφαρμόζοντας την τεχνική των Δικτύων Μοναδικής Συχνότητας (Single Frequency Networks – SFN), μέσω της οποίας είναι δυνατή η λήψη του ίδιου προγράμματος από πολλαπλούς πομπούς που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα.

Το σύστημα DVB-T εξελίχθηκε με το σύστημα DVB-T2 [28], το οποίο προσφέρει βελτιωμένη ανθεκτικότητα, ευελιξία και κατά 50% μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σύστημα ψηφιακής τηλεόρασης. Το σύστημα DVB-T2 ήλθε να προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα φάσματος, δεδομένης της ελλιπούς διαθεσιμότητας αυτού.

Όπως και ο προκάτοχός του, DVB-T, το DVB-T2 χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM με μεγάλο αριθμό υπο-φερόντων που μεταφέρουν ένα ανθεκτικό σήμα, ενώ προσφέρεται ευρεία κλίμακα διαφορετικών λειτουργιών. Το DVB-T2 χρησιμοποιεί κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών μέσω του Ελέγχου Ισοτιμίας Χαμηλής Πυκνότητας (Low Density Parity Check – LDPC) σε συνδυασμό με κωδικοποίηση Bose-Chaudhuri-Hocquengham (BCH).

Νέες τεχνολογίες που υιοθετεί το πρότυπο DVB-T2 είναι:

- Πολλαπλοί Οδηγοί Φυσικού Στρώματος (Multiple Physical Layer Pipes) επιτρέπουν μεμονωμένη προσαρμογή κάθε παρεχόμενης υπηρεσίας εντός του διαύλου προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτούμενες συνθήκες λήψης (για παράδειγμα κεραία εσωτερικής λήψης ή κεραία στην κορυφή κτηρίου). Η συγκεκριμένη τεχνολογία υπονοεί εξοικονόμηση ισχύος στο δέκτη, καθώς δεν απαιτείται η αποκωδικοποίηση ολόκληρου του σήματος πολυπλεξίας, αλλά μόνο μιας υπηρεσίας.
- Η κωδικοποίηση Alamouti αποτελεί μια μέθοδο διαφορικότητας πομπών (transmitter diversity) που βελτιώνει την κάλυψη σε μικρής κλίμακας δίκτυα μοναδικής συχνότητας.
- Η Περιστροφή Αστερισμού (Constellation Rotation) παρέχει πρόσθετη ανθεκτικότητα για αστερισμούς χαμηλής τάξης.
- Η Εκτεταμένη Διεμπλοκή (interleaving) που περιλαμβάνει διεμπλοκή bit, κυψέλης, χρόνου και συχνότητας.
- Τα Πλαίσια Μελλοντικής Επέκτασης (Future Extension Frames – FEF) επιτρέπουν μελλοντικές βελτιώσεις του προτύπου.

Έτσι, το πρότυπο DVB-T2 μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από το DVB-T ή πολύ πιο ανθεκτικό σήμα. Όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 4, το σύστημα DVB-T2 επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, θεωρώντας σταθερό σηματοθορυβικό λόγο C/N (ίσο με 20 dB), ενώ αντίστοιχα, για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης απαιτείται χαμηλότερος σηματοθορυβικός λόγος C/N στο σύστημα DVB-T2.

Παράλληλα με την τεχνολογία DVB-T2, το πρότυπο κωδικοποίησης εικόνας και βίντεο MPEG-4 AVC εισχωρεί στην αγορά της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Πρόκειται για εξελιγμένη μέθοδο κωδικοποίησης σε σχέση με το MPEG-2, η οποία προσφέρει ακόμα πιο αποδοτική συμπίεση και άρα καλύτερη εξοικονόμηση των διαθέσιμων πόρων.

Πίνακας 4: Σύγκριση τεχνολογιών DVB-T και DVB-T2 [28]

	DVB-T	DVB-T2
<i>Διόρθωση Λαθών FEC</i>	Συμβατική κωδικοποίηση + Reed Solomon	LPDC + BCH
	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
<i>Τρόποι Λειτουργίας</i>	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
<i>Διάστημα Φύλαξης</i>	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128
<i>Μέγεθος FFT</i>	2k, 8k	1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
<i>Σκεδαζόμενα Πιλοτικά Σήματα</i>	8% του συνολικού	1%, 2%, 4%, 8% του συνολικού
<i>Συνεχόμενα Πιλοτικά Σήματα</i>	2% του συνολικού	0,4%-2,4% (0,4%-0,8% στους τρόπους λειτουργίας 8k-32k)
<i>Εύρος Ζώνης</i>	6, 7, 8 MHz	1,7, 5, 6, 8, 10 MHz
<i>Τυπικός ρυθμός Μετάδοσης</i>	24 Mbit/s	40 Mbit/s
<i>Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης (για C/N 20 dB)</i>	31,7 Mbit/s (για διάυλο των 8 MHz)	45,5 Mbit/s (για διάυλο των 8 MHz)
<i>Απαιτούμενος Λόγος C/N (στα 24 Mbit/s)</i>	16,7 dB	10,8 dB

2.1.2 Είδη Δικτύων DVB-T (MFN, SFN, Gap Fillers)

Σύμφωνα με την πηγή [26], ορίζονται τρία είδη δικτύων για το DVB-T, που σχετίζονται με την κατανομή των συχνοτήτων, ήτοι τα συμβατικά ή Δίκτυα Πολλαπλών Συχνοτήτων (Multi-frequency Networks - MFN), τα Δίκτυα Μοναδικής Συχνότητας (Single-frequency Networks - SFN), και οι πομποί κάλυψης κενών (gap fillers).

2.1.2.1 Συμβατικά Σχεδιασμένα Δίκτυα ή MFN

Τα συμβατικά σχεδιασμένα δίκτυα DVB-T περιλαμβάνουν πολλαπλούς πομπούς με ανεξάρτητα σήματα προγραμμάτων, τα οποία μεταδίδονται σε διαφορετικές συχνότητες. Συνεπώς αναφέρονται και ως Δίκτυα Πολλαπλών Συχνοτήτων (Multi Frequency Networks – MFN). Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόφαση για τους πομπούς και τον αριθμό τους που θα συμπεριληφθούν σε μια περιοχή έναντι κάποιας άλλης αποτελεί περισσότερο διαχειριστικό παρά τεχνικό ζήτημα. Προκειμένου να καλυφθούν εκτεταμένες περιοχές (π.χ. μια επικράτεια ή μια χώρα) από ένα σήμα DVB-T, απαιτείται ένας αριθμός από διαύλους συχνοτήτων. Το πλήθος των απαιτούμενων διαύλων εξαρτάται από την ανθεκτικότητα του μεταδιδόμενου σήματος, ήτοι τον τύπο της διαμόρφωσης σε συνδυασμό με το ρυθμό κώδικα διαύλου που εφαρμόζεται, καθώς και από τις απαιτήσεις κάλυψης (π.χ. απαιτείται η κάλυψη των πυκνοκατοικημένων περιοχών ή πλήρης κάλυψη μιας περιοχής).

➤ **Αποδοτικότητα Φάσματος**

Καθώς η ανθεκτικότητα ενός συστήματος ευρυεκπομπής εκφράζεται εκ γένει με όρους λόγων προστασίας, αναμένεται ότι το πλήθος των διαύλων που απαιτούνται για τη μετάδοση DVB-T είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σχέση με την αναλογική ευρυεκπομπή, καθώς οι λόγοι προστασίας είναι γενικά χαμηλότεροι στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης. Παρόλα αυτά, το πλήθος των διαύλων που απαιτείται για ψηφιακή ευρυεκπομπή, λαμβάνοντας υπόψη και τις τοπικές μεταβολές της ισχύος του σήματος, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για δίκτυα MFN και για δίκτυα αναλογικής ευρυεκπομπής. Οι φασματικοί πόροι, που εκφράζονται ως το πλήθος των διαύλων που απαιτούνται για την παροχή ενός σήματος σε κάθε περιοχή είναι σημαντικά υψηλότερο για τα MFN σε σχέση με τα Δίκτυα Μοναδικής Συχνότητας.

Η εκχώρηση συχνοτήτων και ισχύος εκπομπής σε κάθε πομπό απαιτεί ενδελεχή μελέτη της αμοιβαίας παρεμβολής όλων των πομπών εντός και εκτός του δικτύου σύμφωνα με διεθνώς προκαθορισμένους κανόνες.

➤ **Μη Σύγχρονη Λειτουργία**

Οι πομποί που συμμετέχουν σε ένα MFN δεν εκπέμπουν σε σύγχρονη λειτουργία και έτσι δεν απαιτείται συντονισμός μεταξύ των λειτουργιών των πομπών. Η εγκατάσταση τοπικών ή και περιοχικών υπηρεσιών καθίσταται ευκολότερη κατά την τεχνική MFN σε σχέση με την τεχνική SFN. Στην τεχνική SFN δεν είναι δυνατή η παροχή πρόσθετων υπηρεσιών για ένα τμήμα μόνο μιας κοινής περιοχής εξυπηρέτησης. Εντούτοις, οι περιοχικές υπηρεσίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με την τεχνική SFN, χρησιμοποιώντας κάποιους μόνο πομπούς.

➤ **Αυξημένη Ισχύς Εκπομπής**

Εξαιτίας των φαινομένων της επίγειας διάδοσης, η λαμβανόμενη ισχύς σε δεδομένη απόσταση από τον πομπό ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη θέση και, σε μικρότερο βαθμό, ανάλογα με το χρόνο. Καθώς η ψηφιακή μετάδοση δεν εξασθενεί σταδιακά όσο μειώνεται το επίπεδο ισχύος, αλλά ξαφνικά εμφανίζεται διακοπή της υπηρεσίας, απαιτείται αυξημένη ισχύς για να ξεπεράσει τις επιπτώσεις των μεταβολών του επιπέδου της ισχύος, ειδικά στα όρια της περιοχής εξυπηρέτησης. Εάν η πλήρης κάλυψη της περιοχής εξυπηρέτησης επιτυγχάνεται, επικαλύπτοντας επίσης τις περιοχές εξυπηρέτησης των γειτονικών πομπών, οι μεταβολές λόγω θέσης της έντασης πεδίου από διαφορετικούς πομπούς ενδέχεται να μη σχετίζονται ιδιαίτερα, οπότε δεν αντιλαμβάνονται όλα τα σήματα εκπομπής την ίδια εξασθένιση σε δεδομένο σημείο της επικαλυπτόμενης περιοχής. Έτσι, ο δέκτης μπορεί να επιλέξει το ισχυρότερο σήμα, ενώ δεν απαιτείται η επιπλέον ισχύς που αναφέρθηκε νωρίτερα. Οι μεταβολές λόγω θέσης μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα με την τεχνική SFN, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 2.1.2.2 Δίκτυα Μοναδικής Συχνότητας (SFN).

2.1.2.2 Δίκτυα Μοναδικής Συχνότητας (SFN)

Σε ένα SFN όλοι οι πομποί διαμορφώνονται συγχρονισμένα με ίδιο σήμα και εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Εξαιτίας της πολυδίοδης διάδοσης των σημάτων του συστήματος εκπομπής πολλαπλών φερόντων (COFDM), τα οποία προέρχονται από διάφορους πομπούς και φτάνουν στην κεραία του δέκτη είναι πιθανό να συμβάλουν θετικά στο συνολικό επιθυμητό σήμα.

Παρόλα αυτά, ο περιοριστικός παράγοντας της τεχνικής SFN είναι η λεγόμενη αυτο-παρεμβολή του δικτύου. Εάν τα σήματα από τους μακρινούς πομπούς καθυστερούν περισσότερο από όσο επιτρέπει το διάστημα φύλαξης (guard interval), εκλαμβάνονται ως παρεμβάλλοντα σήματα και όχι ως επιθυμητά. Η ισχύς αυτών των σημάτων εξαρτάται από τις συνθήκες διάδοσης, οι οποίες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες. Η αυτο-παρεμβολή ενός SFN για δεδομένη απόσταση μεταξύ πομπών μειώνεται επιλέγοντας μεγαλύτερο διάστημα φύλαξης. Από την άλλη μεριά, ένα μικρότερο διάστημα φύλαξης οδηγεί σε αυξημένο πλήθος πομπών.

➤ **Αποδοτικότητα Φάσματος**

Με την τεχνική SFN μεγάλες περιοχές μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα κοινό σήμα πολυπλεξίας στην ίδια κεντρική συχνότητα. Συνεπώς, η τεχνική SFN εμφανίζει αυξημένη αποδοτικότητα φάσματος σε σχέση με την τεχνική MFN. Παρόλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία παρόμοιων δικτύων που προσφέρουν σήματα πολυπλεξίας που μεταφέρουν άλλα προγράμματα, απαιτούνται επιπλέον δίαυλοι συχνοτήτων. Επιπλέον, με την τε-

χνική SFN, τα κενά της κάλυψης μπορούν να καλυφθούν με την προσθήκη νέων πομπών, χαμηλής ισχύος κατά κανόνα, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για πρόσθετες συχνότητες.

➤ **Αποδοτικότητα Ισχύος**

Η τεχνική SFN εκτός από αποδοτικότητα φάσματος χαρακτηρίζεται και από αποδοτικότητα ισχύος. Αυτό εξηγείται θεωρώντας τις ισχυρές τοπικές μεταβολές της έντασης του πεδίου ενός δεδομένου πομπού. Στα MFNs και ιδιαίτερα στην περίπτωση μεμονωμένων πομπών, η συνήθης τακτική για την επίτευξη αδιάλειπτης υπηρεσίας σε μεγάλο ποσοστό των περιοχών είναι να συμπεριληφθεί ένα σχετικά μεγάλο περιθώριο εξασθένισης στη ζεύξη και έτσι να αυξηθεί σημαντικά η ισχύς του πομπού. Εντούτοις, με την ομοιοκατευθυντική λήψη στα SFNs, όπου το επιθυμητό σήμα περιλαμβάνει διάφορες συνιστώσες από διάφορους πομπούς, οι μεταβολές των οποίων σχετίζονται ελάχιστα, η εξασθένιση ενός πομπού μπορεί να καλυφθεί από άλλον, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται λιγότερες μεταβολές στην ένταση πεδίου. Συνεπώς, τα SFNs μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλότερης ισχύος πομπούς. Η αποδοτικότητα ισχύος ενός SFN είναι σημαντική στα όρια της περιοχής κάλυψης ενός πομπού και συχνά αποκαλείται «κέρδος δικτύου». Το πλεονέκτημα αυτό είναι αντιληπτό για λήψη μέσω ομοιοκατευθυντικών κεραιών χαμηλού κέρδους, οι οποίες απαντώνται συχνότερα στη φορητή λήψη. Τα MFNs εμφανίζουν αντίστοιχο πλεονέκτημα μόνο αν ο δέκτης συντονιστεί στη συχνότητα του ισχυρότερου σήματος έπειτα από κάθε αλλαγή θέσης.

➤ **Σύγχρονη Λειτουργία**

Το τίμημα για την αποδοτικότητα ισχύος και φάσματος είναι η σύγχρονη λειτουργία όλων των πομπών σε ένα δεδομένο δίκτυο. Ο συγχρονισμός όλων των πομπών είναι ιδιαίτερα απαιτητικός και ποικίλλει ανάλογα με την περίπτωση. Σε δίκτυα με μεγάλη περιοχή κάλυψης με πλήθος φερόντων 8k και διάστημα φύλαξης 1/4 (ή 224 μ s), ανεκτικότητα ± 5 μ s δεν πρέπει να προκαλεί ελάττωση της απόδοσης. Η απαίτηση της σύγχρονης λειτουργίας των πομπών έχει σημαντική επίδραση στην κατανομή του σήματος πολυπλεξίας στους πομπούς. Σε δίκτυα με μη σταθερή απόσταση μεταξύ των πομπών η αυτο-παρεμβολή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μέσω ενός χρονικού περιθωρίου για συγκεκριμένους πομπούς.

Η σύγχρονη λειτουργία των πομπών σε ένα SFN δεν αποκλείει τη μεταβολή οποιουδήποτε τμήματος του σήματος διαμόρφωσης σε οποιονδήποτε πομπό του SFN, προκειμένου να εγκατασταθεί, για παράδειγμα, μια τοπική υπηρεσία εντός του δικτύου. Η διαφορά στο σήμα διαμόρφωσης μετατρέπει τον εν λόγω πομπό σε παρεμβολέα, επηρεάζοντας τους υπόλοιπους πομπούς όσο διαρκεί η διαφορά του σήματος.

2.1.2.3 MFN με Πυκνά Τοπικά SFN γύρω από κάθε Πομπό MFN

Συχνά, ακόμα και σε ένα MFN, η λειτουργία του συστήματος σε SFN μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει μελλοντική σταδιακή βελτίωση της κάλυψης γενικά και της κάλυψης για υπηρεσία φορητής λήψης ειδικότερα, χωρίς να απαιτούνται εκ νέου εκχωρήσεις διαύλων. Εισάγοντας πρόσθετους πομπούς SFN μεσαίας ή υψηλής ισχύος (με ξεχωριστή τροφοδοσία) γύρω από έναν κύριο πομπό, δημιουργείται ένα πυκνό τοπικό SFN. Εν γένει, απαιτείται λειτουργία 8k για τέτοιου είδους εφαρμογές, εκτός εάν η απόσταση μεταξύ των πομπών είναι της τάξης των 15km, όπου είναι αποδεκτή η λειτουργία 2k με διάστημα φύλαξης 56 μs.

2.1.2.4 Πομποί Κάλυψης Κενών (Gap Fillers)

Στην περίπτωση κενού στην περιοχή εξυπηρέτησης, όπως συμβαίνει σε βαθιές κοιλάδες, τούνελ, υπόγειες περιοχές ή στο εσωτερικό κτηρίων, η δυνατότητα πολυδίοδης μετάδοσης του DVB-T επιτρέπει την κάλυψη αυτών των κενών κατά αποδοτικό τρόπο. Επιπλέον, είναι δυνατή η επέκταση της περιοχής εξυπηρέτησης με τέτοιου είδους αναμεταδότες χωρίς πρόσθετες δαπάνες.

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται σε μια κατευθυντική κεραία, η οποία βρίσκεται εκτός του κενού κάλυψης και λαμβάνει το σήμα DVB-T. Στη συνέχεια, το σήμα αναμεταδίδεται στην ίδια συχνότητα στην περιοχή που δεν καλύπτεται, αφού υποστεί το κατάλληλο φιλτράρισμα και ενίσχυση. Σημαντική προϋπόθεση για την επιτυχή χρήση ενός Πομπού Κάλυψης Κενών είναι η επαρκής απομόνωση μεταξύ των κεραιών. Προκειμένου να αποφευχθεί ταλάντωση στον αναμεταδότη, το κέρδος του αναμεταδότη πρέπει να είναι λιγότερο από την ανατροφοδότηση.

➤ **Επαγγελματικοί Πομποί Κάλυψης Κενών**

Ένας επαγγελματικός Πομπός Κάλυψης Κενών πρέπει να έχει επαρκή ισχύ για να παρέχει κάλυψη σε μια περιοχή που δεν καλύπτεται διαφορετικά. Η μέγιστη πιθανή εκπεμπόμενη ισχύς εξαρτάται από την απομόνωση μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης και την απόδοση του ενισχυτή ισχύος του επαναλήπτη. Η απομόνωση των κεραιών εξαρτάται από:

- Το ύψος και τις διαστάσεις του κτηρίου πάνω στο οποίο τοποθετείται ο αναμεταδότης
- Τη θέση των κεραιών
- Το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών
- Τη θέση της περιοχής που δεν καλύπτεται σε σχέση με την κατεύθυνση του πρωτεύοντος πομπού
- Το περιβάλλον γύρω από τον επαναλήπτη.

Επιπλέον του γενικότερου προβλήματος της απομόνωσης, ακόμα και αν η ανατροφοδότηση είναι χαμηλότερη από το κέρδος του ενισχυτή, η ελάττωση της απόδοσης του συστήματος είναι αναμενόμενη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι από τα ανακλώμενα σήματα που φτάνουν στον αναμεταδότη, θα υπάρχει ένα επικρατούν, το οποίο προέρχεται είτε από ελλιπή απομόνωση μεταξύ των κεραιών είτε από ανατροφοδότηση από ανακλαστικές/σκεδαστές γύρω από τον αναμεταδότη. Επιπλέον, παρατηρείται εν γένει καθυστέρηση ανάμεσα στο σήμα εισόδου και το σήμα εξόδου από τον αναμεταδότη, η οποία οφείλεται κυρίως στο πριονωτό φίλτρο της συσκευής. Αυτό οδηγεί σε επιλεκτική ως προς τη συχνότητα εξασθένιση, παρόμοια με την περίπτωση λήψης από δύο ή πολλαπλές διαδρομές, καταλήγοντας σε μείωση της απόδοσης του συστήματος, η οποία, σύμφωνα με πρακτικές δοκιμές, είναι αμελητέα, αν η επιλεκτική ως προς τη συχνότητα εξασθένιση δεν ξεπερνά τα 10 dB.

➤ Οικιακοί Πομποί Κάλυψης Κενών

Ο οικιακός Πομπός Κάλυψης Κενών είναι μια συσκευή που ενισχύει το σήμα από μια οικιακή κεραία λήψης, τοποθετημένη στη στέγη των κτηρίων, και το αναμεταδίδει εντός του κτηρίου, αποφεύγοντας έτσι τις απώλειες λόγω διεύθυνσης σε αυτό ή λόγω ύψους. Κατ' αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η υπηρεσία φορητής λήψης εντός οικιών σε περιοχές με χαμηλή ένταση πεδίου. Επίσης, η τεχνική δε δημιουργεί πρόβλημα λόγω παρεμβολών, καθώς η ένταση πεδίου εντός της οικίας πρέπει να είναι χαμηλότερη σε σχέση με το εξωτερικό των κτηρίων. Επιπλέον αυτού, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι επιτρεπόμενες τιμές της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για τον άνθρωπο. Για τον οικιακό Πομπό Κάλυψης Κενών διακρίνονται δύο περιπτώσεις, ήτοι ο ευρυζωνικός ενισχυτής και η περίπτωση με φίλτρο.

2.2 Η Συμφωνία GE06

Η Συμφωνία GE06 [2] προέκυψε από την Περιφερειακή Διάσκεψη της Γενεύης το 2006 και ορίζει ένα Πλάνο Συχνοτήτων, τόσο αναλογικό όσο και ψηφιακό, όπως φανερώνεται στο Σχήμα 2, εκ των οποίων το πρώτο προστατεύεται μέχρι το 2015. Κύριο μέλημα της GE06 ήταν να ανανεώσει τους θεσμούς, ώστε να υιοθετηθούν τα νέα ψηφιακά πρότυπα σε κατεστημένες υπηρεσίες, όπως είναι αυτές της ευρυεκπομπής. Έτσι, υιοθέτησε το πρότυπο DVB-T για την ψηφιακή τηλεόραση και το πρότυπο T-DAB για το ψηφιακό ραδιόφωνο στις ζώνες ζωνών III και IV/V.

Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, η Λίστα της GE06 περιλαμβάνει τις εκχωρήσεις των επίγειων ψηφιακών υπηρεσιών, οι οποίες μπορεί να είναι τύπου allotments ή assignments. Με βάση το σχεδιασμό κατά allotments, ένας δεδομένος διάλογος αποδίδεται σε μια χώρα προκειμένου να παρέχει κάλυψη σε μια καθορισμένη περιοχή εντός μιας περιοχής εξυπηρέτη-

σης, η οποία καλείται περιοχή απονομής (allotment). Τα κέντρα εκπομπής όπως και τα χαρακτηριστικά τους είναι άγνωστα κατά τη φάση του σχεδιασμού. Στο σχεδιασμό κατά εκχωρήσεις (assignments) ένας συγκεκριμένος διάυλος ανατίθεται σε μια μεμονωμένη θέση εκπομπής με καθορισμένα χαρακτηριστικά εκπομπής, επίσης, για παράδειγμα ισχύς εκπομπής, ύψος ιστού κεραίας κ.ά.

Η Συμφωνία GE06 υιοθετεί τη φασματική μάσκα για να οριοθετήσει τις εκπομπές μιας υπηρεσίας στο φάσμα συχνοτήτων. Οι περιορισμοί που θέτει η προσέγγιση της φασματικής μάσκας αποτελεί ιδιαίτερα ευέλικτο σχεδιασμό, καθώς επιτρέπει την εν δυνάμει τροποποίηση των υπηρεσιών, χωρίς να απαιτείται εκ νέου σχεδιασμός, δεδομένου ότι τηρούνται οι απαιτήσεις της μάσκας συχνοτήτων. Η τήρηση των εν λόγω όρων εξασφαλίζει ότι δεν εμφανίζονται παρασιτικές εκπομπές σε φάσμα συχνοτήτων εκτός του εκχωρημένου στην υπηρεσία ενδιαφέροντος. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι η υπηρεσία δεν προκαλεί επιβλαβή παρεμβολή στις φασματικά όμορες της.

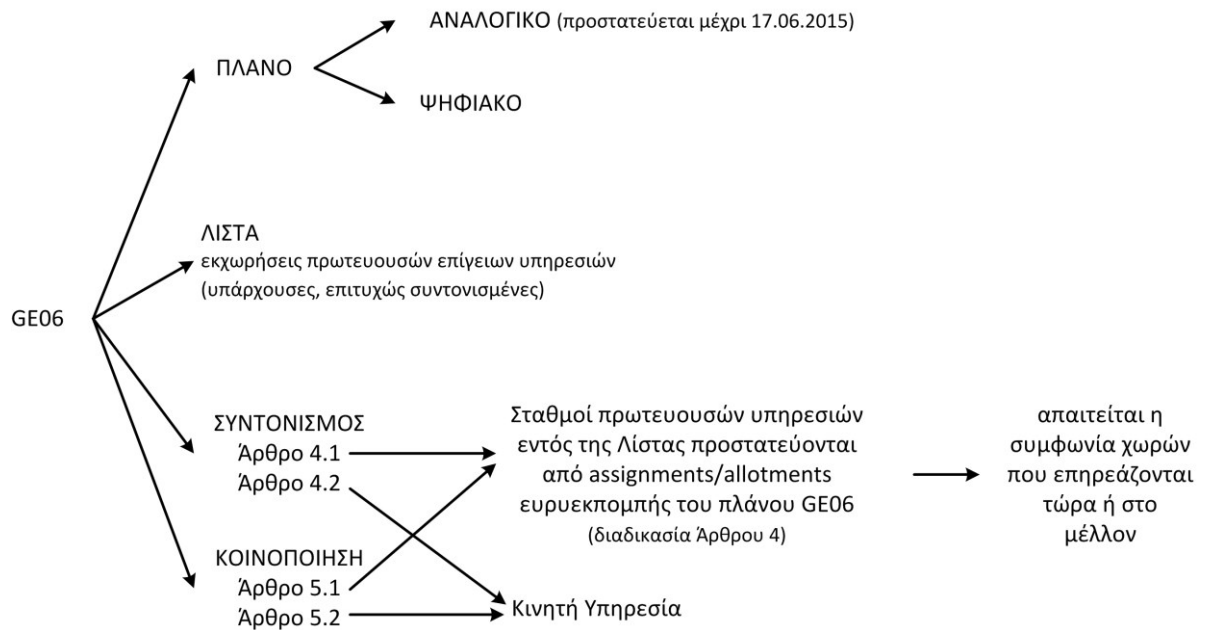
Ο σχεδιασμός του Πλάνου στην GE06 έγινε με γνώμονα την εξασφάλιση ισότιμης πρόσβασης (equitable access). Συνεπώς, η Συμφωνία GE06 εξασφαλίζει ισότιμη πρόσβαση ανά γεωγραφική περιοχή και υπηρεσία. Αυτό σημαίνει ότι τηρείται δικαιοσύνη κατά την παροχή των κύριων υπηρεσιών που ορίζονται στη Συμφωνία, χωρίς να παραγκωνίζονται συγκεκριμένες χώρες ή περιοχές από τις ανάγκες των όμορών τους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα Άρθρα 4 και 5 της Συμφωνίας GE06. Συγκεκριμένα, το Άρθρο 4 προδιαγράφει τις διαδικασίες τροποποιήσεων του Πλάνου, είτε του αναλογικού είτε του ψηφιακού, καθώς και τις διαδικασίες συντονισμού άλλων κύριων επίγειων υπηρεσιών. Οι πιθανές τροποποιήσεις στο Πλάνο είναι οι ακόλουθες:

- Μεταβολή των χαρακτηριστικών ενός allotment ή ενός assignment σε έναν σταθμό ευρυεκπομπής που εμφανίζεται στο Πλάνο (αναλογικό ή ψηφιακό),
- Προσθήκη ενός allotment ή ενός assignment σε έναν σταθμό ευρυεκπομπής στο Πλάνο (αναλογικό ή ψηφιακό),
- Προσθήκη ενός assignment στο ψηφιακό Πλάνο, το οποίο προέρχεται από ένα allotment του ψηφιακού Πλάνου
- Ακύρωση ενός allotment ή ενός assignment σε έναν σταθμό ευρυεκπομπής από το ψηφιακό Πλάνο.

Η διαδικασία του συντονισμού άλλων κύριων επίγειων υπηρεσιών εγείρεται, όταν προτείνεται η μεταβολή των χαρακτηριστικών ενός υπάρχοντος ή η εισαγωγή νέου assignment σε άλλες κύριες επίγειες υπηρεσίες.

Το Άρθρο 5 περιλαμβάνει τις διαδικασίες κοινοποίησης των assignments συχνοτήτων και συγκεκριμένα την κοινοποίηση στο Γραφείο της ITU (Bureau) της εισαγωγής ενός assignment σε έναν σταθμό ευρυεκπομπής.



Σχήμα 2: Ανάγκη διασυνοριακού συντονισμού με βάση τις διαδικασίες της Συμφωνίας GE06

2.3 Το Ψηφιακό Μέρισμα

Το ψηφιακό μέρισμα αφορά το φάσμα συχνοτήτων, το οποίο αναμένεται να απελευθερωθεί μετά την πλήρη μετάβαση στην ψηφιακή ευρυεκπομπή τηλεόρασης, ήτοι το αργότερο μέχρι το 2015 κατά τη Συμφωνία GE06 και τις προτροπές της CEPT για την Ευρώπη (βλ. Ενότητα 1.1).

Το Πλάνο GE06 επιτρέπει τη χρησιμοποίηση των εκχωρημένων συχνοτήτων για υπηρεσίες έτερες της ευρυεκπομπής υπό την έννοια της φασματικής μάσκας (spectrum mask), υπό την προϋπόθεση ότι έχουν κοινοποιηθεί στο πλαίσιο του φακέλου της καταχώρησης ευρυεκπομπής και δεν απαιτούν περαιτέρω προστασία ή δεν προκαλούν μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη παρεμβολή με βάση τη Συμφωνία GE06. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η εισαγωγή κινητών εφαρμογών πολυμέσων. Οι εκχωρήσεις σε άλλες κύριες υπηρεσίες που έχουν ληφθεί υπόψη στην GE06 αφορούν ραδιο-πλοήγηση και σταθερές ή κινητές υπηρεσίες για στρατιωτικές εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνολογικές εξελίξεις σε συνδυασμό με τις μεταβαλλόμενες σύγχρονες απαιτήσεις εισάγουν ολοένα και περισσότερους ενδιαφερόμενους για το ψηφιακό μέρισμα. Ενδεικτικά, πιθανές χρήσεις του ψηφιακού μερίσματος είναι οι ακόλουθες:

- Επίγεια ψηφιακή τηλεόραση (επιπλέον τηλεοπτικά προγράμματα, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, τηλεόραση 3D, κλπ.)
- Συμπληρωματικές υπηρεσίες όσον αφορά την ευρυεκπομπή και τη δημιουργία προγραμμάτων (Services Ancillary to Broadcasting-SAB, Services Ancillary to Programme-SAP).

- Ασύρματες υπηρεσίες ευρυεκπομπής για την προστασία των πολιτών, και την αντιμετώπιση καταστροφών
- Ασύρματες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες
- Υπηρεσίες που προσφέρονται μέσα από το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things)
- Υπηρεσίες ευφυών δικτύων (smart grids)
- Ασύρματα μικρόφωνα
- Ασύρματες γνωστικές υπηρεσίες (Cognitive Radios)

Σε κάθε περίπτωση, η ορθή και αποδοτική χρήση του ψηφιακού μερίσματος από οποιαδήποτε, εν τέλει, υπηρεσία θέτει ορισμένες απαιτήσεις για την ήδη υπάρχουσα υπηρεσία DVB-T, προκειμένου να διευκολυνθεί η διαχείριση και ο συντονισμός του φάσματος. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν:

- Την εναρμόνιση του ψηφιακού μερίσματος, τουλάχιστον εντός της Ευρώπης
- Την εξασφάλιση του διασυνοριακού συντονισμού
- Την εξασφάλιση επαρκούς φάσματος για την ομαλή λειτουργία των παρεχόμενων υπηρεσιών

2.3.1 Εναρμόνιση του Ψηφιακού Μερίσματος

Από τεχνικής απόψεως, η εναρμόνιση του ψηφιακού μερίσματος [8] αναμένεται να αποδειχτεί ωφέλιμη για τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Για παράδειγμα, η απόδοση και η κατασκευή της κεραίας μιας συσκευής λήψης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Εν γένει, αναμένονται βελτιώσεις στο κέρδος μιας κεραίας στενής ζώνης για εύρος συχνοτήτων 10% γύρω από την κεντρική συχνότητα. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση κινητών συσκευών που δέχονται σήματα από πολλαπλές πηγές, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα απαιτούμενα φίλτρα, τα οποία θα εισάγουν λιγότερες απώλειες για στενότερο εύρος συχνοτήτων. Επίσης, η υποστήριξη μικρότερου εύρους λειτουργίας επιτρέπει την ενσωμάτωση μικρών κεραιών στις συσκευές λήψης, βελτιώνοντας την εμφάνιση και το σχεδιασμό τους.

Συνεπώς, η εναρμόνιση του ψηφιακού μερίσματος επηρεάζει το κόστος και τη διαθεσιμότητα των συσκευών. Η ανάπτυξη συσκευών λήψης πολλαπλών ζωνών, που θα επέβαλε η απουσία εναρμονισμένου φάσματος, επηρεάζει άμεσα την απόδοση των συσκευών, καθώς εμφανίζουν αυξημένες απώλειες, χαμηλότερη ευαισθησία και υψηλή πολυπλοκότητα.

Έτσι, η εναρμόνιση του μερίσματος οδηγεί σε συσκευές χαμηλότερου κόστους και κέρδη μέσω οικονομικών κλίμακος, καθώς οι περισσότερες επενδύσεις στις νέες ασύρματες τεχνολογίες πραγματοποιούνται σε ευρωπαϊκό ή διεθνές επίπεδο. Επίσης, εφόσον οι υποψήφιες υπηρεσίες για το ψηφιακό μέρισμα είναι μαζικές υπηρεσίες, μια αποδοτική εσωτερική αγορά, που θα προκύψει ως συντονισμένη ευρωπαϊκή ή και πιο εκτεταμένη κίνηση, θα διε-

γείρει την απαραίτητη επένδυση για την εγκατάσταση των νέων τεχνολογιών. Η εναρμονισμένη διάθεση του ψηφιακού μερίσματος θα δημιουργήσει νέες βιομηχανικές και επαγγελματικές εξελίξεις που θα παρέχουν την απαραίτητη ώθηση στην οικονομία. Αντιθέτως, ένα διαμελισμένο ψηφιακό μέρισμα μπορεί να ωφελήσει μόνο τοπικές εφαρμογές, οι οποίες στερούνται της κλίμακας που απαιτείται προκειμένου να είναι επιτυχείς. Μια εναρμονισμένη προσέγγιση, τουλάχιστον εντός της Ευρώπης, θα συνέτεινε, επίσης, στην εξομάλυνση των κατά τόπους διαφορών σε κατεστημένες πολιτικές, όπως ηλεκτρονική υγεία (e-health), ηλεκτρονική παιδεία (e-education), και άλλες υπηρεσίες δημόσιου ενδιαφέροντος.

Η ανάγκη για την εναρμόνιση του ψηφιακού μερίσματος αναγνωρίστηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση αρχικά με μια πρώτη Επικοινωνία (Communication) [29], η οποία περιγράφει την έννοια και τις ευκαιρίες του ψηφιακού μερίσματος και αναγνωρίζει τα οφέλη από μια κοινή ευρωπαϊκή προσέγγιση. Το 2009 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε μια Σύσταση και Επικοινωνία πάνω στο ψηφιακό μέρισμα, η οποία έθεσε τις βάσεις για την απελευθέρωση της ζώνης (790-862MHz) για ασύρματες διαδικτυακές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων. Επίσης, με την Απόφαση [30], η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αποφάσισε την εναρμονισμένη διάθεση της ζώνης των 800MHz.

Παράλληλα, η WRC-07 εκχώρησε τη ζώνη 790-862 MHz επίσης στην κινητή υπηρεσία, σε πρωτεύουσα βάση από την 17^η Ιουνίου 2015 στην Περιοχή 1, αναγνωρίζοντας τη ζώνη για υπηρεσίες IMT.

2.3.2 Διασυνοριακός Συντονισμός

Η διάθεση της φασματικής περιοχής των 790-862 MHz, αναγνωρισμένης ως εναρμονισμένο ψηφιακό μέρισμα, προϋποθέτει και επισύρει μεταβολές στο Πλάνο GE06, καθώς αυτό περιλαμβάνει καταχωρήσεις στο συγκεκριμένο τμήμα φάσματος. Το Πλάνο GE06 είναι βέλτιστο, προκειμένου να παρέχει ισορροπία ανάμεσα στις εκχωρήσεις όλων των συμμετεχουσών χωρών. Επιπρόσθετα, έχει βελτιστοποιηθεί προκειμένου να εξυπηρετεί τις εθνικές απαιτήσεις όλων των γειτόνων-χωρών. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των καταχωρήσεων στο Πλάνο είναι τέτοια, ώστε κάθε μεταβολή στα χαρακτηριστικά ενός allotment ή assignment, για παράδειγμα ως προς την ισχύ, τη συχνότητα, κλπ., να απαιτεί συνήθως και επακόλουθες μεταβολές στα allotments ή assignments των γειτονικών χωρών.

Από την άλλη μεριά, η έννοια της μάσκας στη Συμφωνία GE06 επιτρέπει την ευέλικτη επαναχρησιμοποίηση των καταχωρήσεων, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για την εισαγωγή νέων υπηρεσιών στο μέλλον, ως φυσική εξέλιξη και χωρίς την ανάγκη για εκ νέου σχεδιασμό. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση της ελευθέρωσης μιας εναρμονισμένης ζώνης συχνοτήτων, απαιτούνται εν γένει μεταβολές στα ήδη καταχωρημένα allotments ή assignments στο Πλάνο GE06, οπότε εφαρμόζονται οι διαδικασίες του Άρθρου 4 της Συμφωνίας GE06, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, για κάθε μια περίπτωση. Επιπρόσθετα, η εν λόγω διαδικασία της εκ νέου σχεδίασης οφείλει τελικά να εξασφαλίζει τον ίδιο βαθμό ισότιμης

πρόσβασης, όπως και η Συμφωνία GE06. Η αναγνώριση μιας εναρμονισμένης ζώνης συχνοτήτων, επίσης, προϋποθέτει ότι οι χώρες που προτίθενται να τη χρησιμοποιήσουν για υπηρεσίες έτερες της ευρυεκπομπής, οφείλουν να τηρήσουν τους περιορισμούς προστασίας των υπηρεσιών ευρυεκπομπής, αλλά και να λάβουν υπόψη την παρεμβολή που θα προκαλέσουν σε αυτές οι υπηρεσίες ευρυεκπομπής.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, η ελευθέρωση του ψηφιακού μερίσματος αποτελεί μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, που περιλαμβάνει πολυεπίπεδες μελέτες των καταχωρήσεων των εκάστοτε επηρεαζόμενων χωρών, καθώς και εμπειριστατωμένη κατάρτιση του τροποποιημένου Πλάνου.

2.3.3 Απαιτούμενο Φάσμα Συχνοτήτων

Σημαντική απαίτηση για την εισαγωγή νέων υπηρεσιών φάσμα, οι οποίες θα είναι βιώσιμες, αποτελεί, η εξασφάλιση επαρκούς φάσματος συχνοτήτων για την παροχή της υπηρεσίας. Η υπηρεσία που θα εγκατασταθεί στο ψηφιακό μέρος είτε θα καλύψει αυξημένες ανάγκες υπαρχουσών υπηρεσιών (π.χ. αυξημένη κίνηση κινητών υπηρεσιών δεδομένων) είτε θα αναφέρεται σε νεοεισαχθείσες υπηρεσίες (π.χ. ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας). Σε κάθε περίπτωση, το παρεχόμενο φάσμα οφείλει να είναι αρκετό, ώστε να φιλοξενήσει τις επιλεγείσες υπηρεσίες και να υποστηρίξει την κίνηση που συνεπάγονται.

Θεωρητικά, μια περιοχή συχνοτήτων εύρους 32 MHz, ήτοι τεσσάρων διαύλων επικοινωνίας, θα μπορούσε να εξυπηρετήσει κινητές υπηρεσίες πολυμέσων σύμφωνα με το σχήμα επαναχρησιμοποίησης 4 και μεγάλες περιοχές εξυπηρέτησης από SFN. Οι περιοχές αυτές ενδέχεται να αναφέρονται σε χώρες, περιοχές κοινής γλώσσας κ.ά., ανάλογα με τις εθνικές ιδιαιτερότητες και τις ανάγκες παροχής τοπικών προγραμμάτων μέσα από τα κινητά δίκτυα πολυμέσων, δεδομένου ότι αυτά παρέχονται και από υπάρχοντα δίκτυα. Οι τέσσερις δίαυλοι θα είναι διαθέσιμοι στο εσωτερικό κάθε περιοχής, αλλά στα σύνορα με άλλες περιοχές SFN απαιτείται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Σύμφωνα με τη θεωρία γράφων, η διαθεσιμότητα τεσσάρων διαύλων θα εξασφαλίσει τη δυνατότητα διαθεσιμότητας τουλάχιστον ενός διαύλου στα σύνορα μεταξύ των θεωρούμενων περιοχών. Παρόλα αυτά, κατά το σχεδιασμό κατανομής συχνοτήτων σε συστήματα ευρυεκπομπής υψηλής ισχύος η θεωρία αυτή παύει να ισχύει. Κατά κανόνα απαιτούνται έξι δίαυλοι για πλήρη κάλυψη.

Επομένως, οι ανάγκες και η φύση του εκάστοτε δικτύου αλλά και των θεωρούμενων υπηρεσιών εισάγουν νέες παραμέτρους στη συνάρτηση του απαιτούμενου φάσματος συχνοτήτων. Το ψηφιακό μέρος της ζώνης των 800 MHz σήμερα περιλαμβάνει τις συχνότητες 790-862 MHz, ήτοι εννέα διαύλους. Παρόλα αυτά, για πολλές χώρες αυτό δε θεωρήθηκε αρκετό, ώστε να εξυπηρετήσει τις νέες ανάγκες. Έτσι, κατά τη Διεθνή Συνδιάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference – WRC) το 2012 τέθηκε το ζήτημα αναγνώρισης του «δεύτερου ψηφιακού μερίσματος» στη ζώνη των 700 MHz, το οποίο θα είναι στο επίκεντρο των συζητήσεων στην WRC το 2015.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Κατανομή Συχνοτήτων σε Ασύρματα Δίκτυα Ευρυεκπομπής

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την παρουσίαση του αλγορίθμου εκχώρησης διαύλων *Μεταεвриστικώς Βελτιστοποιούμενη Εκχώρηση Διαύλων* (Metaheuristically Optimized Channel Allocation – MOCA). Η μέθοδος MOCA βασίζεται στη χρήση μεταεвриστικών μεθόδων, ήτοι Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms – GA), Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing – SA) και Βελτιστοποίησης Σμήνους Μονάδων (Particle Swarm Optimization – PSO), για την εξαγωγή ενός βέλτιστα τροποποιημένου χάρτη συχνοτήτων του δικτύου μιας χώρας ή μιας ευρύτερης περιοχής υπό δεδομένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί εξασφαλίζουν την προστασία από εσωτερική και εξωτερική παρεμβολή, η οποία προκαλείται μεταξύ τηλεπικοινωνιακά όμορων περιοχών εντός ή εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπλέον, οι περιορισμοί παρεμβολής είναι διπλής κατεύθυνσης υπό την έννοια ότι οι προκύπτουσες εκχωρήσεις διαύλων εξασφαλίζουν αμελητέα παρεμβολή από τους γείτονες, ενώ παράλληλα δεν προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές σε αυτούς. Στα πλαίσια της ανάλυσης, οι περιορισμοί παρεμβολής καθορίζονται μέσω ντετερμινιστικών μοντέλων διάδοσης, τα οποία εφαρμόζονται για την προσομοίωση της διάδοσης σε πραγματικά γεωγραφικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

Έχοντας εξασφαλίσει την ομαλή συνύπαρξη της παρεχόμενης υπηρεσίας με τις τηλεπικοινωνιακά όμορές της, ο αλγόριθμος MOCA λαμβάνει επίσης υπόψη τις απαιτήσεις κάλυψης εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως αυτές εκφράζονται από τις υπάρχουσες εκχωρήσεις. Έτσι, το υπάρχον πλάνο συχνοτήτων, καθώς και πρόσθετοι δίαυλοι που πιθανόν διατίθενται προς εκχώρηση, συνιστούν το σύνολο των διαθέσιμων διαύλων που δύναται να συνδυαστούν για την εξαγωγή ενός νέου πλάνου συχνοτήτων, αποδοτικού ως προς τη χρήση του φάσματος. Το σύνολο αυτό τροφοδοτεί το χώρο των πιθανών λύσεων κάθε μεταεвриστικής μεθόδου.

Το νέο τροποποιημένο πλάνο συχνοτήτων προκύπτει θέτοντας τυχαία τις αρχικές εκχωρήσεις διαύλων ανά περιοχή εξυπηρέτησης (ΠΕ) της περιοχής ενδιαφέροντος και εφαρμόζοντας την επαναληπτική διαδικασία που υπαγορεύεται από την εκάστοτε μεταεвриστική μέθοδο. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, η μέθοδος MOCA στοχεύει στην παροχή του επιθυμητού αριθμού διαύλων σε κάθε ΠΕ κατά ομοίομορφο τρόπο. Σύμφωνα με αυτήν

την προσέγγιση, αν οι περιορισμοί ως προς το πλήθος των διαύλων ανά ΠΕ δεν είναι δυνατό να τηρηθούν σε κάθε ΠΕ μετά την επιβολή των κριτηρίων για την αποφυγή της παρεμβολής, τότε οι διαθέσιμοι και χρησιμοποιήσιμοι δίαυλοι κατανέμονται δίκαια μεταξύ των ΠΕ.

Η βασική συνεισφορά του σχεδιασμού και της υλοποίησης της μεθόδου MOCA συνοψίζεται στα εξής:

- Θέτει τους όρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μελέτη και επίλυση του προβλήματος της εκ νέου απόδοσης διαύλων (channel rearrangement problem – CRP).
- Παρουσιάζει μια καινοτόμο μέθοδο για τον προσδιορισμό βέλτιστων ή σχεδόν βέλτιστων (near-optimal) λύσεων στο πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων σε δίκτυα ευρυεκπομπής, η οποία οδηγεί σε εξοικονόμηση φάσματος, επιτρέποντας ευρύτερα ή πυκνότερα λευκά διαστήματα φάσματος, τα οποία θα φιλοξενήσουν νέες υπηρεσίες βασισμένες σε τεχνικές δυναμικής απόδοσης διαύλων [31][32].
- Παρέχει έναν αλγόριθμο, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε εντός μιας χώρας είτε εντός μιας περιοχής, η οποία χωρίζεται σε ομοιόμορφες ή μη ΠΕ, που μπορεί να είναι κυψέλες, περιοχές που καλύπτονται από ένα δίκτυο SFN ή από ένα σταθμό βάσης λειτουργούντα όπως ορίζεται από καταχωρήσεις (assignments) ή από περιοχές απονομής (allotments).
- Πραγματοποιεί εκ νέου απόδοση διαύλων, ικανή να εξασφαλίσει ψηφιακό μέρημα τόσο στη ζώνη των 800 MHz όσο και στη ζώνη των 700 MHz.

3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο επιχειρείται να επιλυθεί μέσω μεταευριστικών αλγορίθμων, ήτοι στοχαστικών διαδικασιών βελτιστοποίησης, οι οποίες εφαρμόζουν μια επαναληπτική διαδικασία μετασχηματισμού σε ένα σύνολο υποψήφιων λύσεων έως ότου ευρεθεί η βέλτιστη. Οι εν λόγω διαδικασίες εμπνέονται συνήθως από φαινόμενα φυσικής εξέλιξης ή φυσικά φαινόμενα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρία αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μεταευριστικών αλγορίθμων, ήτοι οι *Γενετικοί Αλγόριθμοι* (GA), η *Προσομοιωμένη Ανόπτηση* (SA) και η *Βελτιστοποίηση Σμήνους Μονάδων* (PSO).

3.1.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Ο όρος «Γενετικοί Αλγόριθμοι» [33][34] χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον John Holland [35], ο οποίος μέσα από το βιβλίο του «*Adaptation in Natural and Artificial Systems*» το 1975 δημιούργησε ένα ευρύ πεδίο έρευνας. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μοντελο-

ποιούν τα φυσικά φαινόμενα της γενετικής κληρονομικότητας και τη δαρβίνεια μάχη για επιβίωση. Στα πλαίσια αυτά, θεωρώντας μια συνάρτηση:

$$f: S \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.1)$$

όπου S ένα διακριτό σύνολο αναζήτησης, το πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο καλούνται να επιλύσουν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι:

$$\min_{\hat{x} \in S} f \quad (3.2)$$

όπου \hat{x} το διάνυσμα των μεταβλητών αποφάσεως και f η αντικειμενική συνάρτηση. Προκειμένου να διαχωριστεί ο γενότυπος από το φαινότυπο, το διάνυσμα \hat{x} αντιστοιχίζεται σε μια ακολουθία s μήκους l , η οποία αποτελείται από σύμβολα ενός αλφαβήτου Σ , ως εξής:

$$c: \Sigma^l \rightarrow S \quad (3.3)$$

ενώ είναι δυνατόν ο χώρος αναζήτησης να είναι ένα υποσύνολο S του Σ^l , προκειμένου να εκφραστεί το γεγονός ότι κάποια στοιχεία του Σ^l δεν αντιπροσωπεύουν πιθανές λύσεις του προβλήματος. Το μήκος l της ακολουθίας s εξαρτάται από τις διαστάσεις των S και Σ , ενώ τα στοιχεία της ακολουθίας αντιστοιχούν σε γονίδια, οι τιμές των οποίων δίνουν τα αλληλόμορφα γονίδια⁵. Έτσι προκύπτει η αντιστοιχία μεταξύ γενοτύπου και φαινοτύπου, οπότε το πρόβλημα βελτιστοποίησης καταλήγει:

$$\min_{s \in \Sigma} g(s) \quad (3.4)$$

όπου $g(s) = f(c(s))$. Συνήθως είναι επιθυμητό η συνάρτηση c να είναι ένα-προς-ένα.

Το σύνολο των ακολουθιών που είναι υποψήφιες λύσεις συνιστούν έναν πληθυσμό, ο οποίος συχνά αναφέρεται ως «χρωμοσώματα». Τα χρωμοσώματα ή οι πιθανές λύσεις υφίστανται μετασχηματισμούς από γενιά σε γενιά. Συγκεκριμένα, σε κάθε γενιά εφαρμόζεται μια διαδικασία εξέλιξης στα χρωμοσώματα μέσω διασταυρώσεων και μεταλλάξεων. Σε αυτές τις γενετικές διαδικασίες δε συμμετέχουν όλες οι υποψήφιες λύσεις μιας γενιάς, αλλά μόνον συγκεκριμένο πλήθος των «καλύτερων» εξ αυτών. Έτσι, κάθε υποψήφια λύση αξιολογείται ως προς την καταλληλότητά της σε κάθε γενιά, ώστε να αναδειχθούν οι καλύτερες λύσεις της τρέχουσας γενιάς, οι οποίες θα συμμετάσχουν στη διαμόρφωση της επόμενης. Η καταλληλότητα των λύσεων αξιολογείται με βάση προκαθορισμένα κριτήρια, τα οποία εκφράζονται με τη μορφή μιας αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ ελέγχεται μέσω της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που οι υποψήφιες λύσεις επιτυγχάνουν, θεωρώντας συνήθως τη μηδενική τιμή ως βέλτιστη. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να προκύψει ως σύνθεση $f(c(s))$ ή γενικότερα μέσω μιας σύνθεσης $h(f(c(s)))$, όπου η συνάρτηση $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι μια μονότονη συνάρτηση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να «γεννηθεί» η βέλτιστη λύση ως προς τα προκαθορισμένα κριτήρια καταλληλότητας.

⁵ Σημειώνεται ότι τα αλληλόμορφα γονίδια επηρεάζουν το ίδιο γνώρισμα, αλλά με διαφορετικό τρόπο. Βρίσκονται στην ίδια θέση των ομόλογων χρωμοσωμάτων, ώστε το ζεύγος τους να αποτελεί το γενότυπο, ενώ η έκφρασή τους το φαινότυπο.

Επειδή οι Γενετικοί Αλγόριθμοι δεν εγγυώνται τη σύγκλιση σε μια λύση, συχνά χαλαρώνουν τα κριτήρια ανάδειξης της βέλτιστης, παραδείγματος χάριν με την αποδοχή μιας λύσης η οποία πετυχαίνει τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κάτω από μια σταθερή (αποδεκτή) τιμή, ή με την επιβολή κριτηρίων τερματισμού, όπως ο καθορισμός του μέγιστου πλήθους γενεών οι οποίες μπορεί να παραχθούν, ενώ συχνά χρησιμοποιείται συνδυασμός των ανωτέρω.

3.1.1.1 Γενικευμένη Διαδικασία Γενετικών Αλγορίθμων

Η γενικευμένη διαδικασία που εφαρμόζεται κατά την εκτέλεση των Γενετικών Αλγορίθμων παρουσιάζεται ακολούθως ως Αλγόριθμος 1. Σύμφωνα με αυτόν, πρώτα επιλέγεται ο αρχικός πληθυσμός. Κρίσιμα θέματα που λαμβάνονται υπόψη σε αυτό βήμα είναι το μέγεθος του πληθυσμού και ακολούθως η μέθοδος βάσει της οποίας επιλέγονται τα άτομα του πληθυσμού. Πολύ μικρό μέγεθος πληθυσμού δεν επιτρέπει την αποτελεσματική αναζήτηση στο χώρο αναζήτησης, ενώ πολύ μεγάλος πληθυσμός θα επηρέαζε την αποδοτικότητα της αναζήτησης, ώστε να μην είναι δυνατή η εύρεση λύσης σε λογικά χρονικά πλαίσια. Όσον αφορά την επιλογή του αρχικού πληθυσμού, συνήθως αυτή είναι τυχαία, που αποτελεί και την απλούστερη λύση, ενώ έχουν προταθεί και άλλες, εξελιγμένες στατιστικές μέθοδοι, οι οποίες υπόσχονται αποτελεσματική κάλυψη του χώρου αναζήτησης. Εκτός αυτού, συχνά ο αρχικός πληθυσμός προκύπτει ως έξοδος κάποιας άλλης ευριστικής μεθόδου, οπότε η σύγκλιση στη βέλτιστη λύση είναι ταχύτερη. Σε αυτήν την περίπτωση οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν μέρος μιας υβριδικής μεθόδου αναζήτησης.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, σε αντίθεση με τις απλές μεθόδους «αναζήτησης γειτονιάς», είναι δυνατόν να εκτελούνται επ' αόριστον, εκτός αν εφαρμοστεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Συνήθεις τακτικές για τον τερματισμό των Γενετικών Αλγορίθμων περιλαμβάνουν την ικανοποίηση ενός χρονικού ορίου, την ολοκλήρωση προκαθορισμένου αριθμού αξιολογήσεων καταλληλότητας ή γενεών, την αξιολόγηση της διαφοροποίησης του πληθυσμού, την ικανοποίηση μιας τιμής κατωφλίου για την αντικειμενική συνάρτηση κ.ά.

Η δημιουργία της επόμενης γενεάς χρωμοσωμάτων βασίζεται στις εξελικτικές διαδικασίες της διασταύρωσης ή της μετάλλαξης ή σε συνδυασμό αυτών. Η διασταύρωση αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία μέρος των γονιδίων ενός χρωμοσώματος-γονέα αντικαθίσταται από το αντίστοιχο μέρος των γονιδίων του χρωμοσώματος του άλλου γονέα. Πολλές παραλλαγές μπορούν να προκύψουν ανάλογα με την επιλογή και το πλήθος των μερών που αντικαθίστανται, τη συχνότητα εφαρμογής της διασταύρωσης, η οποία μπορεί να εφαρμόζεται πάντα ή με κάποια πιθανότητα, την επιλογή και το πλήθος των απογόνων κ.ά.

Η μετάλλαξη αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία τμήμα του γονιδιώματος των γονέων μεταβάλλεται. Διαφορετικές παραλλαγές περιλαμβάνουν τον τρόπο και το πλήθος

επιλογής των τμημάτων που μεταλλάσσονται, καθώς και τον τρόπο επιλογής των νέων τιμών των αντίστοιχων γονιδίων.

Αλγόριθμος 1: Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος

```
επιλογή αρχικού πληθυσμού χρωμοσωμάτων;  
while η συνθήκη τερματισμού δεν ικανοποιείται, do  
  repeat  
    if η συνθήκη διασταύρωσης ικανοποιείται then  
      {επιλογή χρωμοσωμάτων γονέων;  
      επιλογή παραμέτρων διασταύρωσης;  
      πραγματοποίηση διασταύρωσης};  
    if η συνθήκη μετάλλαξης ικανοποιείται then  
      {επιλογή σημείων μετάλλαξης;  
      πραγματοποίηση μετάλλαξης};  
    αξιολόγηση καταλληλότητας απογόνων;  
  until δημιουργία κατάλληλου απογόνου;  
επιλογή νέου πληθυσμού;  
endwhile
```

Για την ακριβή εφαρμογή των ανωτέρω διαδικασιών επιλέγονται διάφορες παράμετροι, όπως είναι ο ρυθμός διασταύρωσης, με βάση τον οποίο πραγματοποιείται διασταύρωση όταν μια ψευδο-τυχαία απόκλιση υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου. Ομοίως, η μετάλλαξη μπορεί να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο ακολουθίας ή bit, επιλέγοντας συχνά έναν αντίστοιχο ρυθμό. Επιπρόσθετα, προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής του ποσοστού εφαρμογής των διασταυρώσεων και μεταλλάξεων κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Η επιλογή των εκάστοτε χρωμοσωμάτων στηρίζεται στην καταλληλότητά τους.

Κατά την εφαρμογή της διασταύρωσης και της μετάλλαξης για τη δημιουργία της επόμενης γενεάς είναι πιθανόν να αποκλείονται τα ευνοϊκά άτομα του υπάρχοντος πληθυσμού. Προς τούτο, εισάγονται οι έννοιες του ελιτισμού και της υπερκάλυψης πληθυσμών στη δημιουργία μιας γενεάς. Ο ελιτισμός εγγυάται ότι το μέλος του πληθυσμού με τη μέγιστη καταλληλότητα μέχρι στιγμής επιβιώνει στην επόμενη γενεά. Η υπερκάλυψη πληθυσμών επεκτείνει την έννοια του ελιτισμού μόνο σε ένα κλάσμα του πληθυσμού κάθε φορά, στο οποίο στη σταθερή κατάσταση καταλήγει να μεταβάλλεται μόνο ένα μέλος του πληθυσμού. Επίσης, στην περίπτωση που κατά την αναπαραγωγή προκύπτουν περισσότεροι απόγονοι σε σχέση με το πλήθος των γονέων τους, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας διαδικασίας επιλογής ή διαγραφής των χειρότερων απογόνων.

3.1.2 Προσομοιωμένη Ανόπτηση

Η μέθοδος SA αποτελεί μια πιθανοτική μέθοδο που προτάθηκε από τους Kirkpatrick, Gelett και Vecchi το 1983 και τον Cerny το 1985 για την εύρεση του ολικού ελαχίστου μιας συνάρτησης κόστους, η οποία μπορεί να έχει επίσης τοπικά ελάχιστα. Η μέθοδος SA μοντελοποιεί τη φυσική διαδικασία της ανόπτησης των μετάλλων. Συγκεκριμένα, προσομοιώνεται η φυσική διαδικασία κατά την οποία ένα στερεό ψύχεται αργά, ώστε όταν αυτό τελικά παγώσει, να συμβεί σε κατάσταση ελάχιστης ενέργειας.

Οι βασικές παράμετροι επιλογής κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου Προσομοιωμένης Ανόπτησης είναι οι ακόλουθες [34][36]:

- Ένα σύνολο S , το οποίο αντιπροσωπεύει το χώρο των λύσεων. Στην περίπτωση της κατανομής διαύλων συχνοτήτων είναι διακριτό, αλλά εν γένει δύναται να είναι συνεχές.
- Ένα σύνολο $S(i) \subset S - \{i\}$, που καλείται σύνολο των γειτόνων του i , για κάθε $i \in S$, καθώς και η επιλογή των τυχαίων κινήσεων στο χώρο της γειτονιάς. Η επιλογή της γειτονιάς περιλαμβάνει τη δομή αλλά και το μέγεθος της γειτονιάς. Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η ομοιόμορφη κατανομή ή κατανομή Gauss ως συνάρτηση πιθανότητας δημιουργίας γειτόνων, με βάση το μέγεθος της γειτονιάς. Εκτός αυτού, υιοθετούνται και εναλλακτικές μέθοδοι, όπως η χρήση της κατανομής Cauchy-Lorentz, που μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερη «ψύξη» [37], όπως και «ευφυείς» μέθοδοι δημιουργίας γειτόνων, οι οποίες μεταβάλλουν τη γειτονιά και την κατανομή πιθανότητας επιλογής [38].
- Ένα σύνολο θετικών συντελεστών q_{ij} , για κάθε $i \in S$ και $j \in S(i)$, τέτοιο ώστε $\sum_{j \in S(i)} q_{ij} = 1$. Θεωρείται ότι το $j \in S(i)$ αν και μόνο αν $i \in S(j)$.
- Το σχέδιο ψύξεως, το οποίο περιλαμβάνει την αρχική θερμοκρασία T_0 , τη συνάρτηση ψύξεως $T(t)$, καθώς και τα κριτήρια τερματισμού. Η συνάρτηση ψύξεως ορίζεται ως μια μη αύξουσα συνάρτηση T , τέτοια, ώστε η τιμή της $T(t)$ σε δεδομένη χρονική στιγμή t ονομάζεται «θερμοκρασία κατά τη χρονική στιγμή t ». Διάφορες παραλλαγές σχεδίων ψύξεων απαντώνται στη βιβλιογραφία, ορίζοντας στατικά σχήματα, τα οποία είναι πλήρως καθορισμένα κατά την έναρξη του αλγορίθμου, αλλά και προσαρμοστικά, τα οποία μεταβάλλονται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να ληφθεί υπόψη η ισορροπία μεταξύ σύγκλισης και χρόνου εκτέλεσης. Γι' αυτό το λόγο συχνά προτιμώνται υποβέλτιστες λύσεις, οι οποίες επιτυγχάνουν αποδεκτές τιμές στην πράξη.
- Η αντικειμενική συνάρτηση f , η οποία ορίζεται στο S . Η f μπορεί να εξαρτάται από τη θερμοκρασία, προκειμένου να αντιμετωπιστούν περιπτώσεις στις οποίες λύσεις χαμηλού κόστους έχουν γείτονες υψηλού κόστους. Επιπλέον, είναι δυνα-

τόν να υπολογίζεται απευθείας η διαφορά στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, αντί να υπολογίζονται οι τιμές της αντικειμενικής και έπειτα η διαφορά τους.

- Η συνάρτηση αποδοχής του εξεταζόμενου γείτονα. Συνήθως χρησιμοποιείται μια εκθετική συνάρτηση αποδοχής, όπως περιγράφει ο Αλγόριθμος 2 ($e^{(-\delta f/T)}$). Παρόλα αυτά, παραλλαγές περιλαμβάνουν συνάρτηση αποδοχής ανεξάρτητη της μεταβολής της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εφαρμόζει πιθανοτική εξαντλητική αναζήτηση στο σύνολο των γειτόνων, προκειμένου να εξερευνηθεί μια ευρύτερη περιοχή γειτόνων.
- Μια αρχική κατάσταση $s(0) \in S$.

Για κάθε θερμοκρασία προκύπτει μια διαφορετική κατάσταση, η οποία αντιστοιχεί σε μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κάθε κατάσταση αξιολογείται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος SA κατευθύνει στοχαστικά την αναζήτηση μέσα στο σύνολο των υποψήφιων λύσεων. Εάν μια κατάσταση επιτύχει καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, επιλέγεται ως η τρέχουσα κατάσταση· διαφορετικά, μπορεί να επιλεγεί με μια πιθανότητα που εξαρτάται από τη μεταβολή (variation) της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και από τη θερμοκρασία. Στις πρώτες εκτελέσεις της SA η θερμοκρασία είναι υψηλή και είναι πιθανότερη η αλλαγή κατάστασης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η SA μπορεί να ξεφύγει ευκολότερα από τοπικά βέλτιστες λύσεις.

Ακολούθως περιγράφεται αναλυτικότερα η διαδικασία της αναζήτησης. Έστω $s(t)$ η τρέχουσα κατάσταση που αντιστοιχεί στο στοιχείο i . Τότε η πιθανότητα να επιλεγεί ο γείτονας $j \in S(i)$ ισούται με q_{ij} . Εφόσον επιλεγεί ο j , η επόμενη κατάσταση $s(t+1)$ ορίζεται ως εξής:

- $\underset{v}{A}(j) \leq f(i)$, τότε $s(t+1) = j$ (3.5)

- $\underset{v}{A}(j) > f(i)$, τότε

- $s(t+1) = j$ με πιθανότητα $\exp\left(-\frac{f(j)-f(i)}{T(t)}\right)$ (3.6)

- $s(t+1) = i$, διαφορετικά

Συνοπώς:

$$P[s(t+1) = j | s(t) = i] = q_{ij} \cdot \exp\left[-\frac{1}{T(t)} \max\{0, f(j) - f(i)\}\right], \text{ για } j \neq i, j \in S(i) \quad (3.7)$$

$$\text{Αν } j \neq i \text{ και } j \notin S(i), \text{ τότε } P[s(t+1) = j | s(t) = i] = 0.$$

Αλγόριθμος 2: Βασικός αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης

```
χώρος λύσεων  $S$   
αντικειμενική συνάρτηση  $f$   
δομή γειτονιάς  $N$   
επιλογή αρχικού σημείου  $s_0$   
επιλογή αρχικής θερμοκρασίας  $T_0 > 0$   
επιλογή συνάρτησης ψύξης  $T$   
repeat  
  repeat  
    επιλογή κατά τυχαίο τρόπο ενός σημείου  $s \in N(s_0)$ ;  
     $\delta f = f(s) - f(s_0)$ ;  
    if  $\delta f < 0$  then  
       $s_0 = s$ ;  
    else  
      {δημιουργία ενός τυχαίου αριθμού  $r \in (0,1)$ };  
      if  $r < e^{(-\delta f/T)}$  then  $s_0 = s$ ;  
  until το πλήθος των επαναλήψεων έφτασε το μέγιστο δυνατό;  
  set  $T = T(t)$   
until ικανοποιείται η συνθήκη τερματισμού;  
 $s_0$  η προσέγγιση της ολικής ελάχιστης λύσης
```

Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης, οι οποίες θα εντοπίσουν το ελάχιστο με πολύ χαμηλές τιμές θερμοκρασίας αλλά σε υπερβολικά μεγάλο χρονικό διάστημα, η προσέγγιση SA παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιεί μια βραδέως φθίνουσα συνάρτηση ψύξεως, οπότε επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση. Επιπλέον, η SA μπορεί να θεωρηθεί ως αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης, στον οποίο, σε αντίθεση με τους ντετερμινιστικούς αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης, παρουσιάζονται περιστασιακές κινήσεις που οδηγούν σε αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης, προκειμένου να ξεφεύγει από τοπικά ελάχιστα [36].

3.1.3 Βελτιστοποίηση Σμήνους Μονάδων

Η μέθοδος PSO προτάθηκε από τους R. Eberhart και J. Kennedy το 1995. Πρόκειται για έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο, ο οποίος ακολουθεί το κοινωνικο-ψυχολογικό παράδειγμα, κατά το οποίο ένας πληθυσμός ατόμων, που συχνά αναφέρονται ως «μονάδες», προσαρμόζεται επιστρέφοντας στοχαστικά σε προηγούμενες επιτυχείς περιοχές. Η PSO εμπνέεται από τις συμπεριφορές κοινωνικών ομάδων, όπως η συρροή πτηνών ή ομαδική πλεύση των ψαριών. Ειδικότερα, οι μονάδες που σχηματίζουν ένα σμήνος αναμένεται να παρουσιάσουν

βελτιωμένη συμπεριφορά μέσω της κοινωνικής αλληλεπίδρασης και της αμοιβαίας μίμησης.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, κάθε μονάδα χαρακτηρίζεται από την τρέχουσα θέση και την τρέχουσα ταχύτητά της, ενώ σημαντικό ρόλο κατέχουν η βέλτιστη προσωπική θέση και η βέλτιστη θέση σε επίπεδο γειτονιάς, με βάση κριτήρια απόδοσης σχετικά με το εκάστοτε πρόβλημα. Σε κάθε επανάληψη, κάθε μονάδα βρίσκεται σε νέα θέση, οδηγούμενη από την ταχύτητά της, η οποία ανανεώνεται με βάση την εμπειρία της σχετικά με τις καλύτερες θέσεις, τόσο προσωπικές όσο και της ευρύτερης γειτονιάς στην οποία ανήκει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού, όπως η ολοκλήρωση του μέγιστου πλήθους επαναλήψεων ή η επίτευξη αποδεκτής τιμής σφάλματος. Ο Αλγόριθμος 3 παρουσιάζει σε ψευδοκώδικα την εκτέλεση της μεθόδου PSO. Οι θέσεις των μονάδων αντιστοιχούν στις πιθανές λύσεις του εκάστοτε προβλήματος. Έτσι, κατά την εκτέλεση της PSO, δημιουργείται ένα σμήνος μονάδων, στο οποίο η ταχύτητα κάθε μονάδας ουσιαστικά δηλώνει πόσο αργά ή γρήγορα πραγματοποιείται η κίνηση μέσα στο σύνολο των πιθανών λύσεων.

Με βάση τα ανωτέρω, η μέθοδος PSO χρησιμοποιεί τις ακόλουθες μεταβλητές:

- t , η οποία αντιστοιχεί στο τρέχον βήμα, ενώ το προηγούμενο βήμα σημειώνεται ως $t-1$,
- T_{\max} , που αντιστοιχεί στο μέγιστο πλήθος χρονικών βημάτων που επιτρέπεται να αναζητεί ένα σμήνος,
- $p_i(t)$ είναι η τρέχουσα θέση της μονάδας i ,
- $v_i(t)$ είναι η τρέχουσα ταχύτητα της μονάδας i ,
- $\pm V_{\max}$ είναι τα άνω και κάτω όρια του πεδίου ορισμού της ταχύτητας,
- $pbest_i$ είναι η καλύτερη θέση της μονάδας i ,
- $gbest$ είναι η καλύτερη θέση της γειτονιάς της μονάδας i ,
- c_1, c_2 οι κοινωνικές παράμετροι,
- φ_1, φ_2 δύο θετικοί τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα $[0,1]$, που δρουν ως παράμετροι επιτάχυνσης,
- w , το βάρος αδρανείας, το οποίο εφαρμόζεται στην παλαιά ταχύτητα κατά τον υπολογισμό της νέας.

Σε κάθε επανάληψη ο υπολογισμός της εκάστοτε νέας ταχύτητας $v_i(t)$ της μονάδας i πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση:

$$v_i(t) = w \cdot v_i(t-1) + c_1 \cdot \varphi_1 \cdot [pbest_i(t-1) - p_i(t-1)] + c_2 \cdot \varphi_2 \cdot [gbest(t-1) - p_i(t-1)] \quad (3.8)$$

η οποία οδηγεί σε νέα θέση $p_i(t)$ της μονάδας i με βάση τη σχέση:

$$p_i(t) = p_i(t-1) + \Delta t \cdot v_i(t) \quad (3.9)$$

Αλγόριθμος 3: Βασικός αλγόριθμος Σμήνους Μονάδων

repeat

for όλες τις μονάδες **do**

{εύρεση της καλύτερης θέσης μονάδος μέχρι στιγμής;

εύρεση της καλύτερης θέσης συνολικά;

for όλες τις διαστάσεις **do**

{ανανέωση της ταχύτητας μονάδας;

έλεγχος ταχύτητας μονάδας με βάση το πεδίο ορισμού;

ανανέωση θέσης μονάδας;}

}

until ικανοποιείται η συνθήκη τερματισμού;

Σημειώνεται ότι η μεταβλητή *gbest* προκύπτει από το σύνολο μιας γειτονιάς, βασισμένη στους δείκτες των μονάδων και όχι στη γειτονιά τους στο χώρο των πιθανών λύσεων. Αυτό συμβαίνει κυρίως για δύο λόγους: πρώτον, είναι μια ελαφριά λύση από υπολογιστικής απόψεως, καθώς δεν απαιτείται κάποιου είδους ομαδοποίηση και δεύτερον, επιτρέπει την εξάπλωση της πληροφορίας σε σχέση με τη βέλτιστη λύση σε όλες τις μονάδες, ανεξαρτήτως της τρέχουσας θέσης τους στο χώρο αναζήτησης. Στην περίπτωση που η γειτονιά περιλαμβάνει το σύνολο των μονάδων, τότε η μεταβλητή *gbest* αποτελεί την καλύτερη θέση που εμφανίζεται στο σύνολο των μονάδων [39].

Επιπρόσθετα, προτού εισαχθεί η έννοια της αδράνειας μέσω της παραμέτρου w , προτάθηκε η εισαγωγή μιας περιοριστικής παραμέτρου χ στη σχέση υπολογισμού της ταχύτητας, ώστε να προκύπτει από τη σχέση:

$$v_i(t) = \chi \cdot \{v_i(t-1) + c_1 \cdot \varphi_1 \cdot [pbest_i(t-1) - p_i(t-1)] + c_2 \cdot \varphi_2 \cdot [gbest(t-1) - p_i(t-1)]\} \quad (3.10)$$

Η συγκεκριμένη επιλογή οδηγεί εν γένει σε ταχύτερη σύγκλιση στην πορεία του χρόνου, προκαλώντας απόσβεση των ταλαντώσεων από τη στιγμή που οι μονάδες συγκεντρώνονται στο καλύτερο σημείο μιας βέλτιστης περιοχής. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι μονάδες ακολουθούν μεγαλύτερες διαδρομές, ενώ ενδέχεται να μη συγκλίνουν όταν η προσωπική βέλτιστη θέση είναι μακριά από τη βέλτιστη θέση της γειτονιάς [40].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η PSO αρχικά προτάθηκε για την επίλυση προβλημάτων συνεχών μεταβλητών. Παρ' όλα αυτά, οι βασικές αρχές της PSO μπορούν να εφαρμοστούν σε διακριτούς χώρους αναζήτησης, όπως είναι η δυαδική PSO, κατά την οποία οι πιθανές λύσεις του προβλήματος δύνανται να λάβουν την τιμή 0 ή 1, και, ομοίως, η ακέραια PSO. Επιπρόσθετα, είναι πιθανό να χρησιμοποιούνται μεταβλητές, μέρος εκ των οποίων είναι δυαδικές, ενώ οι υπόλοιπες είναι συνεχείς. Στα πλαίσια των παραλλαγών της PSO ορίζεται το «Υβριδικό Σμήνος», στο οποίο οι βασικές αρχές της PSO συνδυάζονται με τις έννοιες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης των Γενετικών Αλγορίθμων. Επιπλέον, η PSO συνδυάζεται με εξελικτικές μεθόδους, προκειμένου να προκύψουν αυτο-προσαρμοζόμενες τιμές

για τις παραμέτρους της. Επίσης, οι αρχές της Διαφορικής Εξέλιξης αξιοποιούνται για την έξοδο της PSO από τοπικά ελάχιστα, καθώς και για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων για την εκτέλεση της PSO [40]. Τέλος, προκειμένου να αποφευχθούν τοπικά ελάχιστα, τα οποία ενδεχομένως προκληθούν από την επίδραση των παραμέτρων *gbest* και *pbest* στη μεταβολή της ταχύτητας σε πολυδιάστατα προβλήματα, προτείνεται η χρήση ψηφιακών φερομονών, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται βελτιωμένη επικοινωνία μεταξύ των μονάδων του σμήνους [41].

3.2 Σχετικές Εργασίες

Η έλλειψη φάσματος και οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε φάσμα συχνοτήτων για την υποστήριξη των νεοεμφανιζόμενων υπηρεσιών, οι οποίες καλούνται να καλύψουν τις ανάγκες του σύγχρονου ανθρώπου για ολοένα και εντονότερη δικτύωση, εγκαθίδρυσαν τη διαχείριση των πόρων ως φλέγον θέμα στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, η εκχώρηση συχνοτήτων μπορεί να διεξαχθεί είτε σταθερά, άπαξ κατά τη ρύθμιση του δικτύου, είτε δυναμικά. Σε κάθε περίπτωση, υπόκειται σε περιορισμούς απόδοσης, δικαιοσύνης ή/και περιορισμούς παρεμβολών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εκδηλώνεται τελευταία για τη δυναμική εκχώρηση φάσματος σε κυψελωτά κυρίως ετερογενή δίκτυα, αξιοποιώντας συχνά τεχνικές θεωρίας παιγνίων [42]. Η δυναμική εκχώρηση φάσματος μπορεί να υποβοηθείται και από εξελιγμένες τεχνικές συνάθροισης φάσματος [43]. Επιπρόσθετα, στην πηγή [44] εφαρμόζεται διαχείριση πόρων με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων Ορθογωνικής Πολυπλεξίας Διάρθρωσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) υπό την παρουσία παρεμβολής μεταξύ των φερόντων σημάτων, καθώς και πολυδιάσπασης εξασθένισης (multi-path fading). Τέλος, στο [45] προτείνεται μια μέθοδος αξιολόγησης τεχνικών δυναμικής διαχείρισης πόρων.

Παρόλα αυτά, στα συστήματα ευρυεκπομπής, τα οποία αποτελούν την πρωτεύουσα υπηρεσία στις ζώνες VHF και UHF, η σταθερή εκχώρηση διαύλων είναι επιβεβλημένη. Η εκχώρηση διαύλων ανά ΠΕ, που υπόκειται στους θεωρούμενους περιορισμούς, μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο μπορεί να επιλυθεί μέσω μεταευσριστικών αλγορίθμων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία σχετικές εργασίες της σύγχρονης βιβλιογραφίας, οι οποίες χρησιμοποιούν GA, SA και PSO.

Οι GA έχουν εφαρμοστεί σε πληθώρα επιστημονικών προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένων των τηλεπικοινωνιακών προβλημάτων. Ενδεικτικά, στο [46] οι GA χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος απόδοσης διαύλων σε κυψελωτά δίκτυα, θεωρώντας «δανεισμό» διαύλων. Οι συγγραφείς προτείνουν τη λειτουργία «απόσπασης» για την επιλογή χρωμοσωμάτων για την επόμενη γενεά, προκειμένου να βελτιώσουν τη σταθερότητα των λύσεων. Επιπρόσθετα, δύο προσεγγίσεις GA χρησιμοποιούνται για τη δυναμική απόδοση διαύλων σε κυψελωτά δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς ηλεκτρομαγνη-

τικής συμβατότητας στο [47]. Επιπλέον, οι GA αξιοποιούνται σε κυψελωτά δίκτυα για την απόδοση τοπικών (εντός μιας κυψέλης) ή δανεικών διαύλων, λαμβάνοντας υπόψη μετρικές απόδοσης ή/και αξιοπιστίας δικτύου [48][49]. Οι GA χρησιμοποιούνται, επίσης, ως το τρίτο στάδιο του αλγορίθμου που προτείνεται στο [50], ο οποίος επιτυγχάνει ταχεία βελτιστοποίηση σε προβλήματα απόδοσης διαύλων. Επιπρόσθετα, η απόδοση διαύλων διεξάγεται μέσω GA σε δίκτυα WiFi μονού βήματος (single-hop) με πολλαπλά σημεία πρόσβασης στην εργασία [51] και σε ασύρματα προσωπικά δίκτυα στοχεύοντας αποδοτική χρήση των ραδιοδιαύλων με την ταυτόχρονη αύξηση της χωρητικότητας της κίνησης στο [52]. Τέλος, οι GA αξιοποιούνται προκειμένου οι σταθμοί βάσης να πραγματοποιήσουν βέλτιστη εκχώρηση υπο-φερόντων, καθώς και αριθμού bits ανά σύμβολο OFDM, στους χρήστες ενός συστήματος Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογωνικής Διαίρεσης Συχνότητας Πολλαπλών Εισόδων και Εξόδων (MIMO-OFDMA), ενώ ακολούθως καθορίζεται και η ισχύς εκπομπής σε κάθε υπο-φέρον βάσει του αριθμού bits και του σχήματος διαμόρφωσης [53].

Επιπρόσθετα, η μέθοδος SA εφαρμόζεται επιτυχώς στην επίλυση ιδιαίτερα απαιτητικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένου του προβλήματος εκχώρησης διαύλων. Συγκεκριμένα, προτείνεται η απονομή διαύλων μέσω SA σε κυψελωτά κινητά δίκτυα [54] και σε μονοβηματικά δίκτυα 802.11b/g [55], όπου η επιλογή των διαύλων διεξάγεται από σημεία πρόσβασης. Επιπρόσθετα, η μέθοδος SA χρησιμοποιείται για την κοστολόγηση του κοινού προβλήματος της δρομολόγησης, προγραμματισμού της ζεύξης και απόδοσης φάσματος σε δίκτυα ορισμένα μέσω λογισμικού (software-defined networks), με βάση κριτήρια λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή [56]. Τέλος, στο [57] η μέθοδος SA αξιοποιείται για σταθερή εκχώρηση διαύλων και συγκεκριμένα για την επίλυση του προβλήματος εκχώρησης φερόντων σε δίκτυα 2.5G και σταθερά ευρυζωνικά περιβάλλοντα ασύρματης πρόσβασης, τηρώντας περιορισμούς παρεμβολής.

Τέλος, η μέθοδος PSO χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιβλιογραφία για τη βελτιστοποίηση τηλεπικοινωνιακών προβλημάτων. Στο [58] παρουσιάζεται η μέθοδος PSO και υλοποιείται για το σχεδιασμό μιας χοανοκεραίας σύμφωνα με συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογών. Επιπρόσθετα, όσον αφορά προβλήματα σχετικά με τα δίκτυα DVB-T, η μέθοδος PSO χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα εργαλείο πρόβλεψης της διάδοσης για τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών εκπομπής σε δίκτυα μοναδικής συχνότητας, με στόχο τη μεγιστοποίηση της κάλυψης [59]. Επίσης, οι συγγραφείς της πηγής [60] προτείνουν την PSO για τη βελτιστοποίηση της εκχώρησης ισχύος σε χρήστες CDMA, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μεταξύ τους παρεμβολή. Τέλος, η απόδοση φάσματος σε δίκτυα γνωστικών τερματικών (cognitive radios) βελτιστοποιείται μέσω GA, κβαντικών GA και PSO [61].

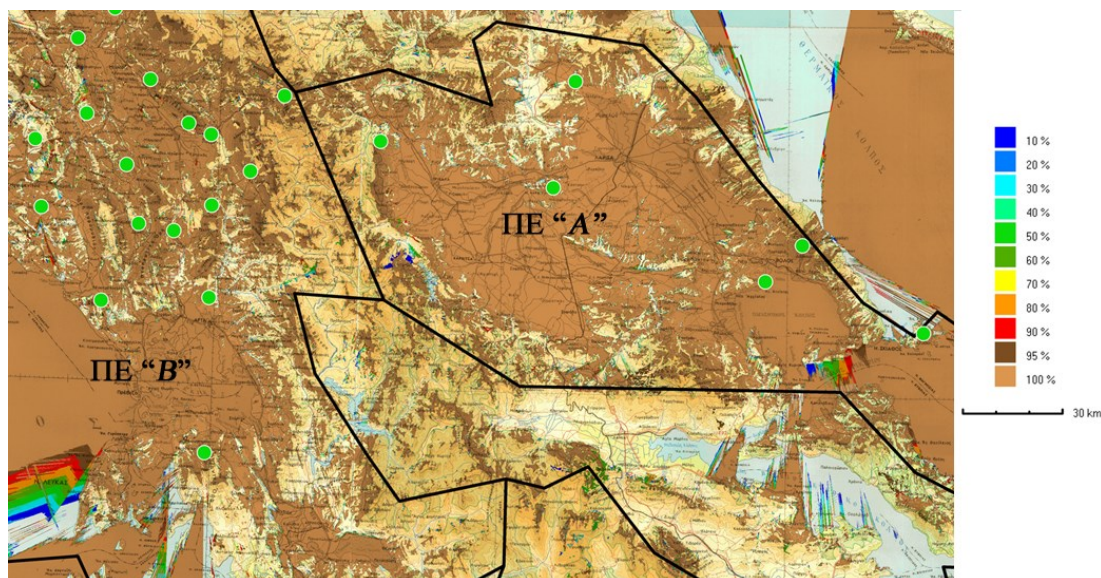
Παρόλ' αυτά και εξ όσων η συγγραφέας είναι σε θέση να γνωρίζει, δεν έχει δημοσιευτεί σχετική εργασία που να επιχειρεί βέλτιστη αναδιάταξη των πλάνων της ψηφιακής τηλεόρασης, φροντίζοντας επίσης για τη συμμόρφωσή τους με τη Συμφωνία GE06. Προς τούτο και με κίνητρο το σύγχρονο και επιτακτικό θέμα του ψηφιακού μερίσματος, προτείνεται ο αλ-

γόριθμος MOCA, μέσω του οποίου αναδιαμορφώνονται τα πλάνα των δικτύων DVB-T, θεωρώντας περιορισμούς παρεμβολής και συντονισμού, αλλά και απαιτήσεις σε διαύλους συχνοτήτων.

3.3 Το Πρόβλημα της Εκ Νέου Απόδοσης Διαύλων

3.3.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Η πλειονότητα των υπαρχόντων πλάνων συχνοτήτων στη GE06 χρησιμοποιούν διαύλους μεταξύ των 21 και 69, προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες ευρυεκπομπής των αντίστοιχων χωρών. Παρόλα αυτά, η γενικότερη τάση για τη δημιουργία ψηφιακού μερίσματος απαιτεί την απελευθέρωση των διαύλων 61-69 για άλλες υπηρεσίες, σύμφωνα με τις προτροπές της ITU και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Από την άλλη, οι ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες ευρυεκπομπής στους εν λόγω διαύλους επιτάσσουν την εκχώρηση κατώτερων διαύλων συχνοτήτων για τη λειτουργία τους. Συνεπώς, απαιτείται η εκ νέου απόδοση των συχνοτήτων, η οποία καλείται να επιλύσει και όσα προβλήματα συμβατότητας ανακύπτουν μεταξύ των τηλεπικοινωνιακά όμορων χωρών. Ο απαιτούμενος εκ νέου σχεδιασμός των δικτύων DVB-T αποτελεί ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, το οποίο αναφέρεται στη συνέχεια ως «πρόβλημα εκ νέου απόδοσης διαύλων».



Σχήμα 3: Προσομοίωση της κάλυψης δύο γειτονικών ΠΕ που λειτουργούν στον ίδιο δίαυλο συχνοτήτων. Οι ΠΕ οριοθετούνται από τις μαύρες έντονες γραμμές, τα σημεία εκπομπής σημειώνονται με πράσινες κουκκίδες, ενώ η ευρύτερη περιοχή χρωματίζεται σε μια κλίμακα που αντιστοιχεί στο λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή. Σημαντικά θέματα παρεμβολής αναμένονται μεταξύ των όμορων ΠΕ «Α» και «Β», αλλά, αντιθέτως, μπορούν να λειτουργήσουν στον ίδιο δίαυλο, καθώς το γεωγραφικό ανάγλυφο εμποδίζει τη διάδοση των σημάτων που προέρχονται από τη μια περιοχή στην άλλη.

Το υπάρχον πλάνο συχνοτήτων GE06 είναι συντονισμένο υπό την έννοια ότι δεν προκαλείται επιβλαβής παρεμβολή μεταξύ των συχνοτήτων του πλάνου μιας χώρας ή μεταξύ συχνοτήτων των πλάνων διαφορετικών χωρών. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε ΠΕ που εξετάζεται εισέρχεται μηδενικό σήμα ή σήμα έντασης εντός των επιτρεπόμενων ορίων, προερχόμενο από άλλες ΠΕ, ώστε να μην υποβαθμίζεται η ποιότητα υπηρεσίας στην ΠΕ ενδιαφέροντος. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνθήκη ομαλής συνύπαρξης των σταθμών εκπομπής διαφορετικών ΠΕ ή χωρών, το πρόβλημα εκ νέου απόδοσης διαύλων υπόκειται τόσο σε εσωτερικούς όσο και εξωτερικούς περιορισμούς.

Οι εσωτερικοί περιορισμοί εξασφαλίζουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα μεταξύ γειτονικών ΠΕ εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, λόγου χάρη μιας χώρας. Οι περιορισμοί αυτού του τύπου συνήθως υπονοούν ότι δεν εκχωρείται ο ίδιος δίαυλος σε γειτονικές ΠΕ. Παρ' όλα αυτά, αυτός ο αυστηρός περιορισμός ενδεχομένως να χαλαρώνει σε πραγματικές καταστάσεις, όπου το γεωγραφικό ανάγλυφο το επιτρέπει. Το Σχήμα 3 παρουσιάζει ένα σχετικό παράδειγμα για ένα δίκτυο DVB-T στην κεντρική Ελλάδα, όπου η υπηρεσία της ψηφιακής τηλεόρασης μπορεί να παρέχεται μέσω του ίδιου διαύλου σε όμορες ΠΕ. Στο σχήμα απεικονίζεται η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των δύο περιοχών «Α» και «Β», οι οποίες διαχωρίζονται με έντονη μαύρη γραμμή στο σχήμα, μέσω του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Interference plus Noise ratio – SINR), θεωρώντας ότι οι σταθμοί, που αναπαριστώνται ως πράσινες κουκκίδες, εκπέμπουν σήμα DVB-T σε κοινό δίαυλο. Οι τιμές SINR, από 0% έως 100%, σε κάθε σημείο του εικονιζόμενου χάρτη αντιστοιχίζονται σε διαφορετικό χρώμα, ακολουθώντας τη χρωματική κλίμακα του υπομνήματος. Από το σχήμα προκύπτει ότι δεν παρατηρείται παρεμβολή μεταξύ των ΠΕ «Α» και «Β» και επομένως, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον ίδιο δίαυλο συχνοτήτων.

Ομοίως, οι εξωτερικοί περιορισμοί θεωρούνται μεταξύ όμορων ΠΕ, οι οποίες ανήκουν σε διαφορετικές χώρες και χρησιμοποιούν κοινούς διαύλους. Η τήρηση των εξωτερικών περιορισμών είναι υψίστης σημασίας για αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας στις εμπλεκόμενες χώρες. Οι εξωτερικοί περιορισμοί αποκλείουν σε κάθε ΠΕ τους διαύλους που παρεμβάλλουν με τις γειτονικές ΠΕ των όμορων χωρών, με βάση τις καταχωρήσεις στο πλάνο GE06.

Τόσο οι εσωτερικοί όσο και οι εξωτερικοί περιορισμοί εξετάζονται λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του γεωγραφικού αναγλύφου, κατά κύριο λόγο εφαρμόζοντας ντετερμινιστικά μοντέλα διάδοσης σε ψηφιακά γεωγραφικά δεδομένα.

3.3.2 Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η μαθηματική έκφραση του προβλήματος της εκ νέου εκχώρησης διαύλων, καθώς επίσης και οι παραδοχές και οι περιορισμοί που λήφθηκαν υπόψη. Κατ' αρχάς, θεωρείται ένα δίκτυο ευρυεκπομπής, το οποίο παρέχει υπηρεσία DVB-T στη ζώνη UHF. Το μοντέλο του συστήματος περιλαμβάνει μια χώρα χωρισμένη σε N_s περιοχές εξυπηρέτησης, ενώ συνολικά διατίθενται N_d δίαυλοι συχνοτήτων σε κάθε περιοχή

εξυπηρέτησης, προτού εφαρμοστούν οποιοιδήποτε περιορισμοί. Με βάση τα υπάρχοντα πλάνα συχνοτήτων, τα οποία χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο φάσμα (διάυλοι 61-69) για υπηρεσίες ευρυεκπομπής, το N_d θα πρέπει να είναι ίσο με 49. Εφόσον ο αλγόριθμος MOCA επικεντρώνεται στην εξασφάλιση του ψηφιακού μερίσματος, το N_d θα θεωρηθεί ίσο με 40, καθώς οι διάυλοι 21-60 θα χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες ευρυεκπομπής, ενώ οι διάυλοι 61-69 διατίθενται για άλλες χρήσεις. Επίσης, θεωρείται ότι στην περιοχή εξυπηρέτησης i , $i \in \{1, 2, \dots, N_s\}$ απαιτούνται N_{lim}^i διάυλοι, ενώ οι συνολικά διαθέσιμοι διάυλοι σε κάθε περιοχή περιλαμβάνουν τους διαύλους του αρχικού πλάνου συν τυχόν διαύλους, οι οποίοι διατίθενται μετά από διαπραγματεύσεις με τις όμορες τηλεπικοινωνιακά χώρες.

Έστω:

- $S = [0, N_s - 1]$
- $\Sigma = \{1, 2, \dots, N_s\}$
- $\Pi = \{0, 1\}$
- $\hat{x} \in S^n$, $n = N_d$: το διάνυσμα μεταβλητών αποφάσεως διάστασης n , κάθε στοιχείο του οποίου μεταβάλλεται από 1 έως N_s
- $\mathbf{x} \in \Sigma^n$: το ενδιάμεσο διάνυσμα μεταβλητών, για κάθε στοιχείο x_i του οποίου ισχύει $x_i \in \{1, 2, \dots, N_s\}$
- Μια συνάρτηση $g: S^n \rightarrow \Sigma^n$, τέτοια ώστε $g(\hat{x}) = \mathbf{x}$
- $\mathbf{A} \in \Pi^{m \times n}$, $m = N_s$, $n = N_d$: ο πίνακας των αρχικών πλάνων συχνοτήτων κατά τη GE06
- $\mathbf{B} \in \Pi^{m \times m}$, $m = N_s$: ο πίνακας των εσωτερικών περιορισμών, ο οποίος για κάθε στοιχείο του $b_{ij} \in \mathbf{B}$, $i, j \in \{1, 2, \dots, N_s\}$ ορίζεται ως εξής:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν οι ΠΕ } i, j \text{ μπορούν να λάβουν τον ίδιο διάυλο} \\ 0, & \text{εναλλακτικά} \end{cases}$$

- $\mathbf{C} \in \Pi^{m \times n}$, $m = N_s$, $n = N_d$: ο πίνακας που εκφράζει τους εξωτερικούς περιορισμούς, παρέχοντας τους διαύλους, οι οποίοι δεν είναι ήδη εκχωρημένοι στη χώρα ενδιαφέροντος, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να προκαλέσουν επιβλαβή παρεμβολή στις όμορες τηλεπικοινωνιακά χώρες. Επομένως, για κάθε στοιχείο του $c_{ij} \in \mathbf{C}$, $i \in \{1, 2, \dots, N_s\}$, $j \in \{1, 2, \dots, N_d\}$ ισχύει:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν η ΠΕ } i \text{ μπορεί να λάβει το διάυλο } j \\ 0, & \text{εναλλακτικά} \end{cases}$$

- $\mathbf{D} \in \Pi^{m \times n}$, $m = N_s$, $n = N_d$: οι εκχωρήσεις των διαύλων ανά ΠΕ τελικά, ώστε:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν στην ΠΕ } i \text{ εκχωρείται ο διάυλος } j \\ 0, & \text{εναλλακτικά} \end{cases} \text{ για κάθε στοιχείο } d_{ij} \text{ του } \mathbf{D},$$

$$i \in \{1, 2, \dots, N_s\}, j \in \{1, 2, \dots, N_d\}$$

- Μια συνάρτηση $c: \Sigma^n \rightarrow \Pi^{m \times n}$, τέτοια ώστε $c(\mathbf{x}) = \mathbf{D}$
- Μια συνάρτηση $f: \Pi^{m \times n} \rightarrow \mathbb{R}$, η οποία είναι η αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση κόστους, η τιμή της οποίας εκφράζει την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε διαύλους συχνοτήτων σε κάθε ΠΕ
- Ο πίνακας $\mathbf{T} = \{\tau_{ij}\}$, διαστάσεων $N_s \times N_d$, ο οποίος είναι ο πίνακας βέλτιστων εκχωρήσεων και περιλαμβάνει τις τελικές εκχωρήσεις διαύλων. Ο πίνακας \mathbf{T} προκύπτει ως ο τελικός πίνακας \mathbf{D} , αφού ολοκληρωθεί η επαναληπτική διαδικασία μιας μεθόδου βελτιστοποίησης. Έτσι, ο πίνακας \mathbf{T} δομείται λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές καταχωρήσεις του πλάνου GE06 και εξασφαλίζοντας ότι ικανοποιούνται όλες οι εσωτερικές και εξωτερικές απαιτήσεις.

Το πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης των εκχωρήσεων, το οποίο υπόκειται στους εσωτερικούς και εξωτερικούς περιορισμούς. Σύμφωνα με αυτό, αναζητείται το διάνυσμα αποφάσεως $\hat{\mathbf{x}} \in S^n$, ώστε να αποδίδονται τελικά N_{lim}^i στην ΠΕ i για κάθε $i \in \{1, 2, \dots, N_s\}$, εξασφαλίζοντας τους περιορισμούς του προβλήματος. Μαθηματικά, το πρόβλημα εκφράζεται ως εξής:

Εύρεση του $\hat{\mathbf{x}} \in S^n$, τέτοιο ώστε $f(\hat{\mathbf{x}}) = \min f(\mathbf{x})$
 υπό τους περιορισμούς: $d_{ij} \cdot d_{kl} \leq b_{lk}$, για κάθε $i, k \in \{1, 2, \dots, N_s\}$ και $j, l \in \{1, 2, \dots, N_d\}$ (3.11)
 $d_{ij} \leq ac_{ij}$, όπου ac_{ij} στοιχείο του πίνακα $\mathbf{A} + \mathbf{C}$

Σημειώνεται ότι η λύση στο ανωτέρω πρόβλημα είναι το διάνυσμα $\hat{\mathbf{x}}$, αλλά το αποτέλεσμα με πρακτική σημασία είναι ο πίνακας \mathbf{D} που περιλαμβάνει το τελικό πλάνο με τις εκχωρήσεις των διαύλων ανά ΠΕ, ο οποίος προκύπτει μέσω του διανύσματος $\hat{\mathbf{x}}$ ως $\mathbf{D} = c(g(\hat{\mathbf{x}}))$ με βάση τα ανωτέρω.

3.4 Η Προσέγγιση της Μεθόδου MOCA

Η προτεινόμενη μέθοδος MOCA μεταχειρίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εκ νέου απόδοσης διαύλων αξιοποιώντας τις τεχνικές GA, SA και PSO. Η διάσταση του προβλήματος περιλαμβάνει $N_d = 40$ μεταβλητές, καθεμιά από τις οποίες κυμαίνεται μεταξύ 1 και N_s και οι οποίες συνολικά αποτελούν ένα χρωμόσωμα ή μια κατάσταση ή μια μονάδα, ανάλογα με τη μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται.

Αρχικά, παράγονται τυχαίες τιμές για τις μεταβλητές, οι οποίες αποθηκεύονται στο διάνυσμα $\hat{\mathbf{x}}$. Καθ' ότι πρόκειται για μεταβλητές με συνεχές πεδίο ορισμού, οι τιμές (βάρη) των

μεταβλητών, οι οποίες τους ανατίθενται σε καθεμιά από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούνται για να συνθέσουν το μεταβλητό διάνυσμα $\mathbf{x} = \{x_j\}$, $j \in \{1, 2, \dots, N_d\}$ και $x_j \in \{1, 2, \dots, N_s\}$. Το διάνυσμα \mathbf{x} στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως εξής: αν $x_j = \lambda$, $\lambda \in \{1, 2, \dots, N_s\}$, τότε ο δίαυλος j εκχωρείται στην ΠΕ με δείκτη λ . Εν συνεχεία, ο δίαυλος j εκχωρείται και σε κάθε άλλη ΠΕ, η οποία μπορεί να λειτουργήσει στην ίδια συχνότητα με την ΠΕ λ σύμφωνα με τους εσωτερικούς περιορισμούς, προκειμένου να σχηματιστεί ο πίνακας $\mathbf{Y} = \{y_{ij}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N_s\}$ και $j \in \{1, 2, \dots, N_d\}$, ως εξής:

$$y_{ij} = \mathbf{B}(i, x(j)) \text{ για κάθε } i \in N_s \text{ και } j \in N_d \quad (3.12)$$

Συνεπώς, ο πίνακας \mathbf{Y} συμμορφώνεται μέχρι στιγμής με τους εσωτερικούς περιορισμούς. Έπειτα, επιβάλλονται οι εξωτερικοί περιορισμοί, καθώς και οι περιορισμοί του αρχικού πλάνου, εκτελώντας την ακόλουθη πράξη:

$$\mathbf{D} = \mathbf{Y} \circ \mathbf{A} + \mathbf{C} \quad (3.13)$$

όπου το σύμβολο \circ αντιπροσωπεύει το γινόμενο Hadamard ανάμεσα σε δύο πίνακες. Ο πίνακας \mathbf{D} , επομένως, συμβαδίζει με τους εσωτερικούς και εξωτερικούς περιορισμούς. Προκειμένου να προκύψει μια αποδεκτή λύση, πρέπει, επιπρόσθετα, να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις κάθε ΠΕ σε διαύλους συχνοτήτων, ήτοι οι λύσεις να είναι «κατάλληλες», γεγονός που αξιολογείται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Εφόσον, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν είναι ικανοποιητική, εφαρμόζεται η επαναληπτική διαδικασία που επιβάλλει η εκάστοτε μέθοδος βελτιστοποίησης.

3.4.1 Η Αντικειμενική Συνάρτηση

Οι απαιτήσεις κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος επιβάλλουν την ανάγκη εξυπηρέτησης της αρχικής ζήτησης διαύλων σε κάθε ΠΕ για το δίκτυο της ενότητας 3.3.1. Σε κάθε ΠΕ στο αρχικό πλάνο εκχωρείται ένα πλήθος διαύλων, το οποίο αντικατοπτρίζει τις ανάγκες κάθε ΠΕ σε διαύλους συχνοτήτων. Έστω N_{lim}^i ο εν λόγω αριθμός, ο οποίος θέτει το κατώτατο όριο αριθμού διαύλων σε κάθε ΠΕ i . Η μαθηματική έκφραση αυτού είναι η ακόλουθη:

$$\sum_{j=1}^{N_d} d_{ij} = N_{\text{lim}}^i, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N_s\} \quad (3.14)$$

Παρόλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις οι περιορισμοί του προβλήματος, καθώς και οι διαθέσιμοι δίαυλοι, όπως αυτοί παρέχονται στους πίνακες \mathbf{A} και \mathbf{C} , δεν επιτρέπουν στην τελική λύση να φτάσει τον αριθμό των αρχικά εκχωρημένων διαύλων σε κάθε ΠΕ. Τότε ο αλγόριθμος παρέχει τον κοντινότερο δυνατό αριθμό διαύλων σε κάθε περιοχή σε σχέση με το επιθυμητό, όπως εκφράζεται και από τη σχέση (3.14).

Επιπρόσθετα, ο συνολικός αριθμός διαύλων που πρόκειται να εκχωρηθούν σε μια χώρα οφείλει να είναι ίσος με το άθροισμα των N_{lim}^i όλων των ΠΕ. Αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_d} d_{ij} = N_{\text{tot}} \quad (3.15)$$

όπου $N_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N_s} N_{\text{lim}}^i$ και αναπαριστά το συνολικό αριθμό διαύλων του αρχικού πλάνου.

Ο αλγόριθμος MOCA στοχεύει στη βελτιστοποίηση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$f(\mathbf{D}) = \sum_{i=1}^{N_s} \left(\left(\sum_{j=1}^{N_d} d_{ij} \right) - N_{\text{lim}}^i \right)^2 + \left(\left(\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_d} d_{ij} \right) - N_{\text{tot}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Όπως φανερώνει η σχέση (3.16), η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει δύο όρους. Ο πρώτος όρος στοχεύει στην εκχώρηση του απαιτούμενου αριθμού διαύλων συχνοτήτων σε κάθε ΠΕ. Ο δεύτερος όρος στοχεύει στην εκχώρηση του συνολικού αριθμού διαύλων σε ολόκληρο το δίκτυο, ανεξαρτήτως του αριθμού των διαύλων σε κάθε ΠΕ. Αυτό σημαίνει ότι η αντικειμενική συνάρτηση επιτυγχάνει μηδενική τιμή, όταν κάθε ΠΕ i λαμβάνει N_{lim}^i διαύλους οπότε και ο συνολικός αριθμός εκχωρημένων διαύλων σε ολόκληρη τη χώρα ισοούται με N_{tot} , καταλήγοντας στην ικανοποίηση των αναγκών κάλυψης σε κάθε ΠΕ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δεύτερος όρος αρχικά δίνει την εντύπωση ότι είναι περιττός, υπό την προϋπόθεση ότι ο πρώτος όρος λαμβάνει μηδενική τιμή. Παρόλα αυτά, έχει πρακτική σημασία σε περιπτώσεις όπου οι περιορισμοί δεν επιτρέπουν σε κάθε ΠΕ να λαμβάνει το επιθυμητό πλήθος διαύλων κατά το αρχικό πλάνο. Τότε, ο αρχικός όρος επιβάλλει την εξαγωγή ενός ισορροπημένου πλάνου συχνοτήτων, χωρίς να επιτυγχάνεται απαραίτητα ο αρχικός συνολικός αριθμός διαύλων. Ο δεύτερος όρος επιτρέπει σε κάποιες ΠΕ να λάβουν περισσότερους διαύλους ούτως, ώστε το δίκτυο να διατηρεί τον αρχικό αριθμό διαύλων του, και μάλιστα εξισορροπημένα μεταξύ των ΠΕ, όπως ορίζει ο πρώτος όρος.

3.4.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στη Μέθοδο MOCA

Ακολούθως παρουσιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας καθεμιά από τις μεθόδους GA, SA και PSO.

Κατ' αρχάς, στη γενετική διαδικασία δημιουργείται ένας τυχαίος αρχικός πληθυσμός χρωμοσωμάτων ακολουθώντας ομοιόμορφη κατανομή. Ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από τυχαία γεννημένα χρωμοσώματα, τα οποία συνιστούν πιθανές λύσεις του προβλήματος, δηλαδή πιθανές τιμές της μεταβλητής \hat{x} από την οποία προκύπτουν κατανομές των διαύλων συχνοτήτων στις ΠΕ. Κάθε πιθανή λύση θεωρείται ως ένα χρωμόσωμα. Η καταλληλότητα κάθε χρωμοσώματος αξιολογείται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης, ως προς τον

αριθμό των διαύλων που εκχωρούνται σε κάθε ΠΕ με βάση τις ανάγκες της. Έτσι, τα καταλληλότερα χρωμοσώματα διατηρούνται για την επόμενη γενεά («εκλεκτά χρωμοσώματα»), ενώ τα υπόλοιπα απορρίπτονται. Τα «εκλεκτά χρωμοσώματα» συμμετέχουν στη δημιουργία χρωμοσωμάτων της επόμενης γενεάς μέσω διασταυρώσεων και μεταλλάξεων, τα οποία αξιολογούνται με τη σειρά τους και ούτω καθ' εξής. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί η βέλτιστη τιμή καταλληλότητας, η οποία πιστοποιεί και το βέλτιστον της επιλογείσας λύσεως, ή άλλως κατά την εκπλήρωση έτερων κριτηρίων τερματισμού.

Στη μέθοδο βελτιστοποίησης SA θεωρείται μια τυχαία αρχική κατάσταση \hat{x} . Η εκάστοτε κατάσταση αξιολογείται, κατ' αντιστοιχία, μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Η νέα κατάσταση δημιουργείται αναδιατάσσοντας με κάποια πιθανότητα γειτονικές τιμές στο διάστημα της κατάστασης, ακολουθώντας τη συνάρτηση ανοπτήσεως. Εάν η νέα κατάσταση συνεπάγεται χαμηλότερη (καλύτερη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, τότε επιλέγεται ως η τρέχουσα για την επόμενη επανάληψη, διαφορετικά μπορεί να επιλεγεί με πιθανότητα $\exp(-(C' - C)/T)$, όπου C' η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της νέας κατάστασης, C η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της τρέχουσας κατάστασης και T η τρέχουσα θερμοκρασία, μια θετική παράμετρος ελέγχου που μειώνεται σταδιακά στο μηδέν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, σύμφωνα με τη συνάρτηση ψύξεως. Η μέθοδος SA τερματίζεται όταν βρεθεί η βέλτιστη λύση ή εκπληρωθούν τα κριτήρια τερματισμού.

Στην τελευταία μέθοδο βελτιστοποίησης που εξετάζεται, την PSO, δημιουργείται ένα τυχαίο αρχικό σμήνος. Κάθε μονάδα του σμήνους αντιστοιχεί σε μια πιθανή λύση του προβλήματος. Αφού επιβληθούν οι περιορισμοί στις μονάδες, αξιολογούνται ως προς την καταλληλότητά τους συγκρινόμενες με τις τιμές καταλληλότητας των ιδίων και των γειτόνων τους μέχρι στιγμής. Εάν ανιχνευτούν καλύτερες τιμές, τότε ανανεώνονται καταλλήλως η προσωπική ($pbest$) και η συνολική ($gbest$) τιμή καταλληλότητας. Επιπρόσθετα, ανανεώνονται η ταχύτητα και η θέση των μονάδων, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_i(t) = w \cdot v_i(t-1) + c_1 \cdot \varphi_1 \cdot [pbest_i(t-1) - p_i(t-1)] + c_2 \cdot \varphi_2 \cdot [gbest(t-1) - p_i(t-1)] \quad (3.17)$$

$$p_i(t) = p_i(t-1) + \Delta t \cdot v_i(t) \quad (3.18)$$

όπου $v_i(t)$ η ταχύτητα της μονάδας i τη χρονική στιγμή t , $p_i(t-1)$ η θέση της μονάδας i τη χρονική στιγμή $t-1$, Δt το χρονικό βήμα, $pbest_i(t-1)$ η θέση της μονάδας i με την καλύτερη ίδια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης που έχει καταγραφεί μέχρι τη χρονική στιγμή $t-1$, $gbest(t-1)$ η θέση της μονάδας με την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης στο σμήνος της μονάδας i μέχρι τη χρονική στιγμή $t-1$, w ένας παράγοντας που εκφράζει την αδράνεια του συστήματος, c_1 , c_2 οι σταθμικοί παράγοντες που εφαρμόζονται στις τιμές $pbest_i$ και $gbest_i$ αντίστοιχα, και φ_1 , φ_2 δύο γεννήτριες τυχαίων αριθμών στο διάστημα $[0,1]$, που δρουν ως παράμετροι επιτάχυνσης.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ευρεθεί η βέλτιστη λύση ή όταν εκπληρωθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού, όπως π.χ. όταν ολοκληρωθεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός των επαναλήψεων ή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζει ελάχιστη μεταβολή μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η λύση η οποία συνεπάγεται μηδενική τιμή αντικειμενικής συνάρτησης είναι βέλτιστη, αλλά δεν μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε πρόβλημα και οποιεσδήποτε μεταβλητές. Τότε, επιλέγεται η λύση με τη χαμηλότερη (καλύτερη) τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία μπορεί να είναι γενικά σχεδόν βέλτιστη (sub-optimal), αλλά η καλύτερη δεδομένων των συνθηκών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εξετάζεται επίσης και η ύπαρξη λύσεων στο πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων.

3.5 Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα αξιολογείται η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος κατανομής συχνοτήτων ως προς το πλήθος των διαύλων που αποδίδονται σε κάθε ΠΕ μέσω μοντελοποίησης και εκτενών προσομοιώσεων. Διερευνούνται δύο σενάρια, εκ των οποίων και τα δύο θεωρούν υποθετικές χώρες, αλλά πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Ως κριτήριο της επίδοσης του αλγορίθμου MOCA θεωρείται το πλήθος των «υπολειπόντων» διαύλων, δηλαδή το πλήθος των διαύλων που δεν έχουν εκχωρηθεί, αλλά απαιτούνται για την ικανοποίηση των φασματικών απαιτήσεων, όπως αυτές εκφράζονται μέσα από την αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση καταλληλότητας.

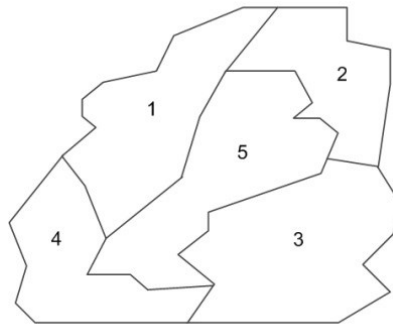
Πίνακας 5: Αρχικές εκχωρήσεις διαύλων για το Σενάριο I. Η πρώτη στήλη υποδεικνύει τον αριθμό της ΠΕ, ακολουθούμενη από τις στήλες με τους διαύλους που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε καθεμιά, ενώ η τελευταία στήλη δείχνει το πλήθος των διαύλων που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε κάθε ΠΕ.

ΠΕ	Αρχικά Εκχωρημένοι Δίαυλοι								Πλήθος Αρχικά Εκχωρημένων Διαύλων
1	21	22	23	24	25	30	61	62	8
2	26	27	32	40	51	66	67	69	8
3	28	31	41	52	55	56	57	68	8
4	29	33	42	48	49	58	60	63	8
5	34	35	36	37	38	39	43	64	8

3.5.1 Σενάριο I: Χώρα αποτελούμενη από πέντε ΠΕ

Στο πρώτο σενάριο εφαρμογής του MOCA, θεωρείται μια χώρα διαιρεμένη σε πέντε ΠΕ, δηλαδή $N_s = 5$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, και η οποία είναι επιθυμητό να καλυφθεί από

υπηρεσία DVB-T. Κάθε ΠΕ σε αυτήν περίπτωση θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μια περιοχή απονομής (allotment). Οι εσωτερικοί περιορισμοί εν προκειμένω υποτίθεται ότι εμποδίζουν γειτονικές ΠΕ να λειτουργήσουν στον ίδιο δίαυλο. Αυτό συνεπάγεται ότι οι ΠΕ 1 και 3, καθώς και οι 2 και 4, μπορούν να λειτουργήσουν στους ίδιους διαύλους συχνοτήτων, ενώ η ΠΕ 5 δεν μπορεί να έχει κοινό δίαυλο με καμιά από τις ανωτέρω περιοχές. Οι φασματικές απαιτήσεις σε κάθε ΠΕ εξάγονται από το αρχικό πλάνο, όπως είναι καταχωρημένο στο πλάνο GE06, δηλαδή πριν από την ανάγκη μέριμνας για το ψηφιακό μέρισμα. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις εν λόγω απαιτήσεις, όπου δίδονται οι δίαυλοι που ήταν αρχικά εκχωρημένοι (στήλες 2 έως 9) καθώς και το πλήθος των διαύλων συνολικά (στήλη 10) σε κάθε ΠΕ (στήλη 1). Όπως φανερώνει ο Πίνακας 5, το αρχικό πλάνο αποδίδει $N_{\text{lim}}^i = 8$ για όλα τα i , δηλαδή για όλες τις ΠΕ.



Σχήμα 4: Υποθετική χώρα αποτελούμενη από πέντε ΠΕ.

Παρατηρώντας το αρχικό πλάνο εξάγεται ότι χρησιμοποιούνται κάποιοι από τους διαύλους 61-69 για να επιτευχθεί η κάλυψη των ΠΕ ενδιαφέροντος, το οποίο σημαίνει ότι αυτοί οι δίαυλοι πρέπει να αντικατασταθούν από διαύλους κατώτερους του 61. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τους υποψήφιους διαύλους για την αντικατάστασή τους, ο οποίος προέκυψε μετά από συμφωνίες με τις τηλεπικοινωνιακά όμορες χώρες. Συγκωνεύοντας τις πληροφορίες που περιέχει ο Πίνακας 5 και ο Πίνακας 6 και αποκλείοντας τους διαύλους 61-69, προκύπτουν οι συνολικά διαθέσιμοι δίαυλοι ανά ΠΕ.

Πίνακας 6: Επιπρόσθετοι διαθέσιμοι δίαυλοι ανά ΠΕ, μετά την εφαρμογή των εξωτερικών περιορισμών στο Σενάριο I. Οι επιπλέον δίαυλοι θεωρείται ότι προκύπτουν μετά από πολυμερείς συμφωνίες μεταξύ όμορων χωρών και μετά από έλεγχο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αυτών.

ΠΕ	Πρόσθετοι Διαθέσιμοι Δίαυλοι			
	1	27	45	50
2	29	33	60	
3	21	22	54	59
4	26	57	59	
5	21	23		

Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο MOCA επ' αυτών, εξάγονται τροποποιημένα πλάνα συχνότητων, τα οποία συμμορφώνονται με τους περιορισμούς και, επιπρόσθετα, μεριμνούν για την απελευθέρωση του ψηφιακού μερίσματος. Ο Πίνακας 7 και ο Πίνακας 8 παρουσιάζουν δύο πλάνα εξ αυτών ως λύσεις για το πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων, βελτιστοποιημένα με τη βοήθεια γενετικών αλγορίθμων. Παρατηρώντας το πλήθος των διαύλων που αποδίδονται συνολικά σε κάθε ΠΕ, όπως παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη, καμιά από τις δύο λύσεις δεν ικανοποιεί πλήρως τις φασματικές απαιτήσεις, καθώς υπάρχει τουλάχιστον μια ΠΕ κάθε φορά στην οποία αποδίδονται λιγότεροι των οκτώ δίαυλοι. Αυτό συμβαίνει, διότι οι περιορισμοί δεν επιτρέπουν την απόδοση οκτώ διαύλων σε όλες τις ΠΕ, δεδομένων των διαθέσιμων διαύλων.

Εξετάζοντας το σενάριο ενδελεχώς, προκύπτει ότι στο Τελικό Πλάνο I (Πίνακας 7), ο στόχος επιτυγχάνεται για όλες τις ΠΕ εκτός της 5. Η συγκεκριμένη ΠΕ αρχικά απασχολούσε μόνο έναν δίαυλο άνω του 61, ενώ μπορεί να χρησιμοποιήσει επιπλέον τους διαύλους 21 και 23, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 6. Επιπλέον, στην ΠΕ 2 εμφανίζονται οκτώ διαθέσιμοι δίαυλοι. Υποθέτοντας ότι όλοι αυτοί εκχωρούνται στην ΠΕ 2, τότε η ΠΕ 1 δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το δίαυλο 27. Επιπρόσθετα, η ΠΕ 1 έχει εννέα διαθέσιμους διαύλους συνολικά, συνεπώς θα πρέπει να λάβει τους εναπομείναντες οκτώ διαύλους, αν εξαιρεθεί ο 27, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι φασματικές απαιτήσεις σε αυτήν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ΠΕ 1 λαμβάνει εκτός των άλλων τους διαύλους 21 και 23. Καθώς η ΠΕ 5 δεν μπορεί να λειτουργήσει στην ίδια συχνότητα με την ΠΕ 1, δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει κανέναν από τους δύο. Επομένως, με βάση τα δεδομένα αποδεικνύεται ότι ο στόχος των οκτώ διαύλων σε κάθε περιοχή δεν είναι εφικτός. Παράλληλα, ο έτερος στόχος της διατήρησης του συνολικού αριθμού διαύλων, 40 εν προκειμένω, επίσης δεν ικανοποιείται, καθώς αποδίδονται 39 δίαυλοι σε όλες τις ΠΕ.

Αντιστοίχως, στο Τελικό Πλάνο II, όπως εκφράζει ο Πίνακας 8, εκχωρούνται οκτώ δίαυλοι στις ΠΕ 1, 3 και 5, επτά δίαυλοι στην ΠΕ 2 και εννέα δίαυλοι στην ΠΕ 4. Αυτό το πλάνο, ενώ δεν ικανοποιεί το στόχο ανά ΠΕ, ωστόσο αποδίδει συνολικά 40 διαύλους σε όλες τις ΠΕ. Η συγκεκριμένη λύση φαίνεται πιο ισορροπημένη από την άποψη ότι, εφόσον δεν μπορούν να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε όλες τις ΠΕ, είναι πιθανή η αποζημίωσή

τους μέσω της απόδοσης επιπλέον διαύλων σε άλλες ΠΕ, αν το επιτρέπουν οι περιορισμοί. Φυσικά, η χρησιμότητα και καταλληλότητα του Τελικού Πλάνου Ι ή ΙΙ προσδιορίζεται από τις εκάστοτε συνθήκες. Παρόλα αυτά, ο ΜΟCΑ καταδεικνύει το πραγματοποιήσιμο των απαιτήσεων, ενώ παράλληλα παρέχει ευελιξία επιλογής στο σχεδιαστή του δικτύου.

Ακολουθώς, θεωρείται μια ακόμη περίπτωση, κατά την οποία οι διαθέσιμοι δίαυλοι ενισχύονται με τον δίαυλο 53 για την ΠΕ 5. Το τελικό πλάνο για αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει ο Πίνακας 9, όπου διαφαίνεται η εκχώρηση του επιθυμητού αριθμού συχνοτήτων σε κάθε ΠΕ.

Τέλος, το πρώτο σενάριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την κατάσταση κατά την οποία απαιτείται συντονισμός μεταξύ όμορων χωρών υπό το πρίσμα της απαίτησης για το ψηφιακό μέρισμα. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, οι πέντε ανωτέρω ΠΕ μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν σε τρεις διαφορετικές όμορες χώρες. Έστω ότι στο Σχήμα 4 η ΠΕ 1 ανήκει σε μια χώρα (Χώρα 1), η ΠΕ 2 σε άλλη χώρα (Χώρα 2), ενώ οι ΠΕ 3, 4 και 5 ανήκουν σε μια τρίτη (Χώρα 3). Υποθέτοντας ότι τα πλάνα συχνοτήτων για την παροχή υπηρεσιών ευρυεκπομπής δεν παρέχουν φάσμα για ψηφιακό μέρισμα, ο αλγόριθμος ΜΟCΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίησή τους.

Πίνακας 7: Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ΜΟCΑ (Τελικό Πλάνο Ι) για το Σενάριο Ι, τα οποία αντιπροσωπεύουν τροποποιημένα πλάνα συχνοτήτων λαμβάνοντας μέριμνα για το ψηφιακό μέρισμα και αμελητέα παρεμβολή στις επηρεαζόμενες χώρες. Μία από τις πέντε ΠΕ δεν μπορεί να λάβει οκτώ διαύλους εξαιτίας των εσωτερικών και των εξωτερικών περιορισμών.

ΠΕ	Τελικός Εκχωρούμενος Δίαυλοι (Ι)								Πλήθος Εκχωρούμενων Διαύλων
1	21	22	23	24	25	30	45	50	8
2	26	27	29	32	33	40	51	60	8
3	21	22	31	41	52	54	55	56	8
4	26	29	48	49	57	58	59	60	8
5	34	35	36	37	38	39	43		7

Πίνακας 8: Εναλλακτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου ΜΟCΑ (Τελικό Πλάνο ΙΙ) στο Σενάριο Ι. Καθώς δεν είναι δυνατή η εκχώρηση οκτώ διαύλων ανά ΠΕ, ο αλγόριθμος ΜΟCΑ αποζημιώνει με έναν επιπλέον δίαυλο σε άλλη ΠΕ.

ΠΕ	Τελικός Εκχωρούμενος Δίαυλοι (ΙΙ)								Πλήθος Εκχωρούμενων Διαύλων	
1	21	22	24	25	27	30	45	50	8	
2	26	29	32	33	40	51	60		7	
3	21	22	28	41	52	54	55	56	8	
4	26	29	33	48	49	57	58	59	60	9
5	23	34	35	36	37	38	39	40	8	

Πίνακας 9: Αποτελέσματα του αλγορίθμου MOCA (Τελικό Πλάνο III) στο Σενάριο I, αφού μεταβλήθηκαν οι περιορισμοί, υποθέτοντας ότι έλαβαν χώρα πρόσθετες στοχευμένες διαπραγματεύσεις.

ΠΕ	Τελικός Εκχωρούμενος Δίαυλοι (III)								Πλήθος Εκχωρούμενων Διαύλων
1	21	22	23	24	25	30	45	50	8
2	26	27	29	32	33	40	51	60	8
3	21	22	28	31	41	52	54	56	8
4	26	33	42	48	49	57	59	60	8
5	34	35	36	37	38	39	43	53	8

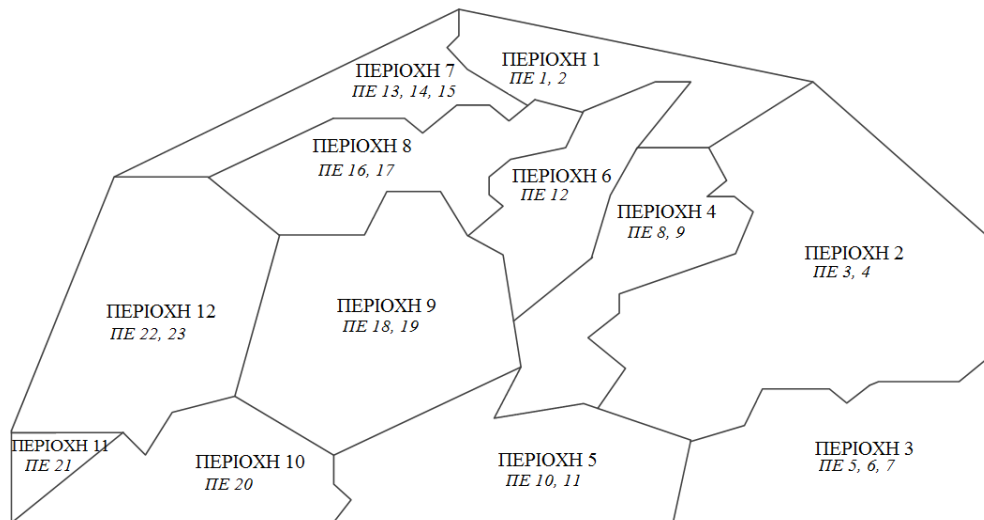
Ως αρχικά πλάνα συχνοτήτων θεωρούνται σε αυτήν την περίπτωση οι εκχωρήσεις συχνοτήτων κατά το πλάνο GE06 σε κάθε μια από τις εν λόγω ΠΕ. Επίσης, οι εσωτερικοί περιορισμοί, όπως εκφράζονται στον πίνακα **B**, εξάγονται από τη μελέτη συμβατότητας των ΠΕ ενδιαφέροντος, ενώ οι εξωτερικοί περιορισμοί του πίνακα **C** αναφέρονται στην αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των πέντε θεωρούμενων ΠΕ και εξωτερικών αυτών ΠΕ. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MOCA, τα οποία παρουσιάζουν ο Πίνακας 7 και ο Πίνακας 8, προσφέρουν ένα συνολικό πλάνο εκχωρήσεων συχνοτήτων και για τις τρεις χώρες. Το εξαχθέν πλάνο διασφαλίζει το ψηφιακό μέρος, καθώς και το συντονισμό στα τηλεπικοινωνιακά σύνορα των χωρών, ενώ παράλληλα φροντίζει για την κάλυψη από υπηρεσία ευρυεκπομπής χρησιμοποιώντας το ίδιο πλήθος διαύλων με του αρχικού πλάνου, εάν αυτό είναι δυνατό. Συνεπώς, ο αλγόριθμος MOCA είναι ευέλικτος και εύκολα επεκτάσιμος, εφόσον τροποποιηθούν κατάλληλα τα αρχικά δεδομένα.

3.5.2 Σενάριο II: Χώρα αποτελούμενη από είκοσι τρεις ΠΕ

Στο δεύτερο σενάριο η θεωρούμενη χώρα χωρίζεται σε δώδεκα γεωγραφικές περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, η οποία καλύπτεται από είκοσι τρία SFNs, τα οποία θα θεωρηθούν εδώ ως ΠΕ, οπότε $N_s = 23$. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της θεωρούμενης χώρας, τους εσωτερικούς περιορισμούς παρέχει ο Πίνακας 10, όπου κάθε στήλη υποδηλώνει μια παρεμβαλλόμενη ΠΕ, ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια παρεμβάλλουσα. Οι ΠΕ i, j μπορούν να λειτουργήσουν στην ίδια συχνότητα χωρίς να προκαλέσουν επιβλαβή παρεμβολή η μια στην άλλη, αν το κελί (i, j) περιέχει το σύμβολο \checkmark . Τις αρχικές κατανομές διαύλων παρουσιάζει ο Πίνακας 11, ενώ τους πρόσθετους διαθέσιμους διαύλους που εκφράζουν τους εξωτερικούς περιορισμούς παρουσιάζει ο Πίνακας 12. Επομένως, οι συνολικοί διαθέσιμοι δίαυλοι προκύπτουν συγχωνεύοντας τις πληροφορίες των δύο πινάκων.

Στη συνέχεια θεωρούνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση ο στόχος είναι η εκχώρηση του αρχικού αριθμού διαύλων ανά ΠΕ (Πίνακας 11) ενώ στη δεύτερη περίπτωση το ίδιο πλήθος διαύλων απαιτείται σε όλες τις ΠΕ για μεταβλητό πλήθος ΠΕ, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ οκτώ και δώδεκα διαύλων. Και στις δύο περιπτώσεις ο αλγόριθμος MOCA αξιολογείται ως προς το πλήθος των «υπολειπόντων» διαύλων, όπως εκφράζε-

ται από την αντικειμενική συνάρτηση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο MOCA επίσης αξιολογείται ως προς το πλήθος των ΠΕ, οι οποίες ικανοποιούν τις απαιτήσεις διαύλων σε αυτές.

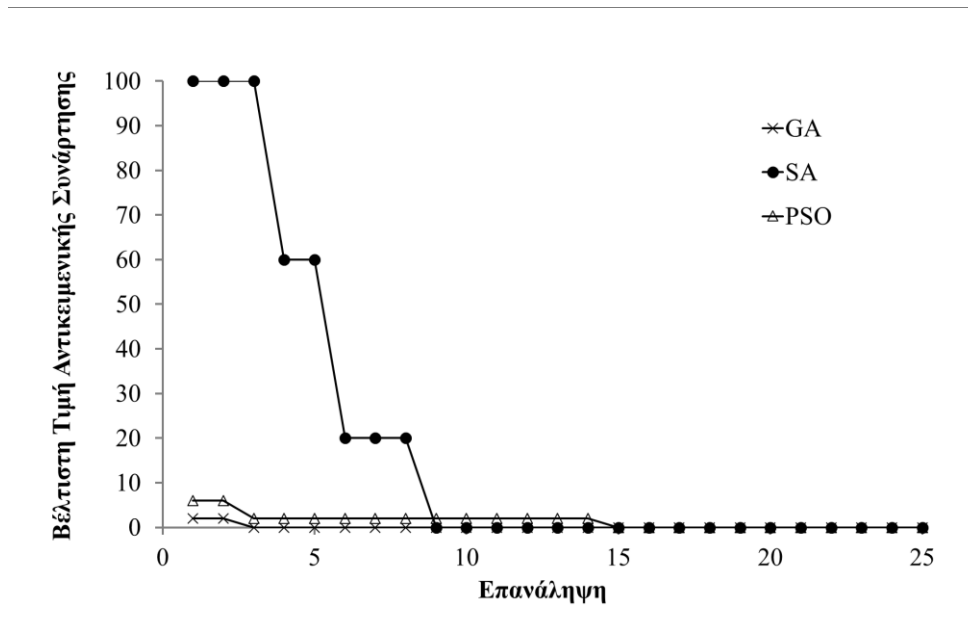


Σχήμα 5: Υποθετική χώρα του Σεναρίου II. Χωρίζεται σε 12 γεωγραφικές περιοχές, καθεμιά εκ των οποίων εξυπηρετείται από ένα ή περισσότερα SFNs. Σε αυτό το σενάριο, ως ΠΕ λαμβάνεται η περιοχή κάλυψης ενός SFN.

Πρώτη περίπτωση: Το αρχικό πλήθος διαύλων απαιτείται σε κάθε ΠΕ

Θεωρώντας ότι οι απαιτήσεις διαύλων σε κάθε ΠΕ προκύπτουν από το πλήθος των διαύλων που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε κάθε μια από αυτές (Πίνακας 11, τελευταία στήλη), ο MOCA εκτελείται εφαρμόζοντας βελτιστοποίηση μέσω GA, SA και PSO με βάση τις παραμέτρους προσομοίωσης, τις οποίες συνοψίζει ο Πίνακας 13. Όλες οι υπό θεώρηση μέθοδοι βελτιστοποίησης ξεκινούν από ένα τυχαίο σημείο και διαδοχικά ελαττώνουν την τιμή καταλληλότητας, στοχεύοντας μηδενική τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Ο πίνακας/διάγραμμα μεταβλητών έχει διάσταση N_d , του οποίου το κάθε στοιχείο κυμαίνεται από 1 έως N_s . Τα αποτελέσματα του MOCA, όταν βελτιστοποιείται μέσω GA, SA ή PSO παραθέτει ο Πίνακας 14, ο οποίος δείχνει ότι ο MOCA επιτυγχάνει το στόχο του. Καθώς διαφορετικές εκτελέσεις των προσομοιώσεων μπορεί να εξάγουν διαφορετικά βέλτιστα plána, εφόσον υπάρχουν περισσότερες της μιας λύσεις στο πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων, ο Πίνακας 10 παρουσιάζει ένα αντιπροσωπευτικό pláno κατά τον MOCA. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο MOCA φαίνεται να τροποποιεί όχι μόνο τις εκχωρήσεις διαύλων στις ΠΕ όπου χρησιμοποιούνταν οι δίαυλοι 61-69, αλλά επίσης και σε ΠΕ (για παράδειγμα στις ΠΕ 2 και 3), οι οποίες ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις για την εξασφάλιση του ψηφιακού μερίσματος. Με άλλα λόγια, απαιτείται η μελέτη πιθανόν εκ νέου εκχώρησης διαύλων και σε αυτές, ώστε να ικανοποιούνται σε όλες οι εσωτερικοί και εξωτερικοί περιορισμοί, αλλά και να εξασφαλίζεται το ψηφιακό μερίσμα κατά βέλτιστο τρόπο.

Όσον αφορά την απόδοση των μεθόδων βελτιστοποίησης, το Σχήμα 6 δείχνει τη μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανά γενεά για τους GA ή ανά επανάληψη για τις SA και PSO. Για κάθε μέθοδο βελτιστοποίησης διεξήχθησαν εκτενείς προσομοιώσεις, εκ των οποίων επελέγησαν οι ταχύτερες ως προς το πλήθος των γενεών ή επαναλήψεων. Στο ίδιο σχήμα αποδεικνύεται ότι οι GA συγκλίνουν νωρίτερα από τις SA και PSO, πετυχαίνοντας μηδενική αντικειμενική συνάρτηση ήδη από την τρίτη γενεά, ενώ η SA συγκλίνει στη βέλτιστη λύση στην ένατη επανάληψη και η PSO στη δέκατη πέμπτη.

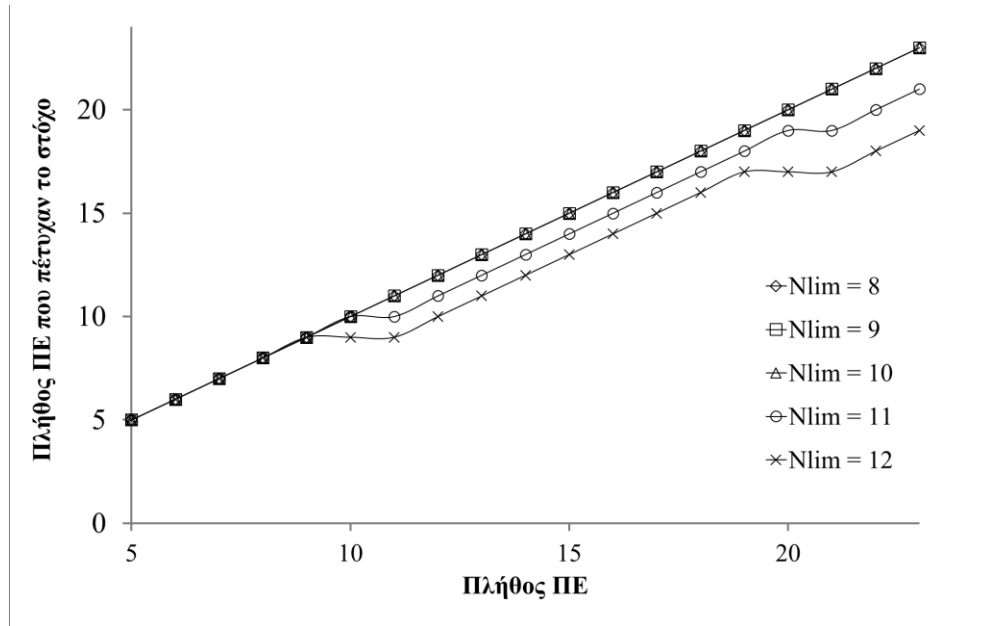


Σχήμα 6: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για την πρώτη περίπτωση στο Σενάριο II ανά επανάληψη για βελτιστοποίηση μέσω GA, SA και PSO.

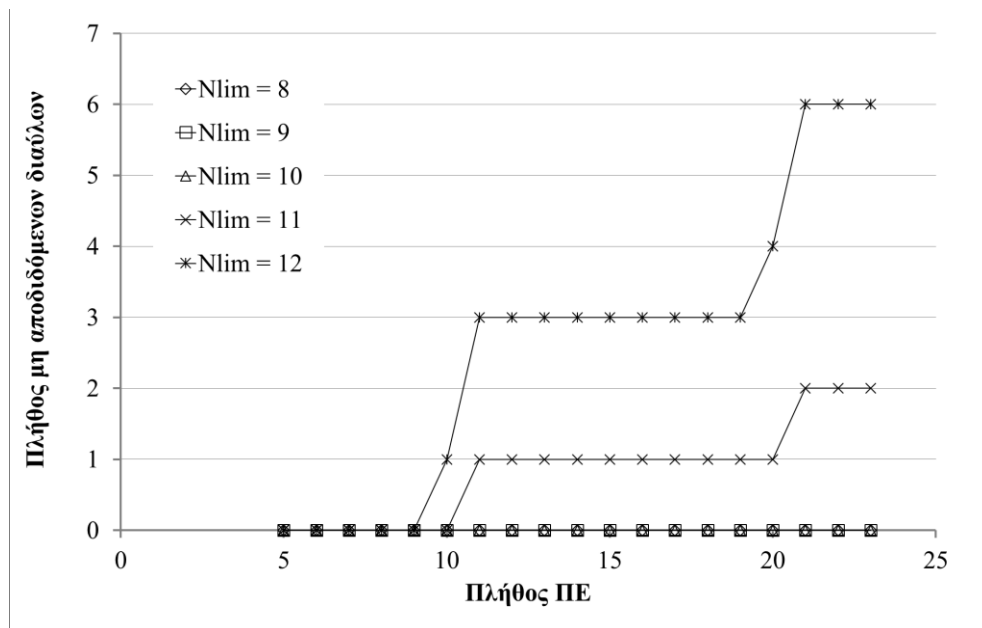
Δεύτερη περίπτωση: Το ίδιο πλήθος διαύλων απαιτείται σε κάθε ΠΕ

Σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται μεταβλητός αριθμός N_s των ΠΕ, καθώς και μεταβλητός αριθμός απαιτούμενων διαύλων N_{lim}^i για κάθε τιμή N_s . Ο αριθμός N_s κυμαίνεται από 5 έως 23 ΠΕ, ξεκινώντας από τις ΠΕ 1 έως 5, ώστε να δημιουργηθεί σταδιακά η ευρύτερη περιοχή στο Σχήμα 5. Για κάθε μεμονωμένο αριθμό ΠΕ που θεωρείται, ο αριθμός N_{lim}^i κυμαίνεται μεταξύ οκτώ και δώδεκα διαύλων που απαιτούνται ανά ΠΕ για κάθε i . Ο στόχος είναι ο προσδιορισμός του μέγιστου πλήθους διαύλων που μπορούν να εκχωρηθούν σε κάθε ΠΕ για μεταβλητό πλήθος ΠΕ. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MOCA για αυτήν την περίπτωση δίνονται στο Σχήμα 7, το οποίο περιλαμβάνει τα γραφήματα του πλήθους των ΠΕ οι οποίες κατόρθωσαν να επιτύχουν το στόχο σαν συνάρτηση του πλήθους των ΠΕ που θεωρούνται για μεταβλητό απαιτούμενο πλήθος διαύλων. Η βέλτιστη περίπτωση επιτυγχάνεται, όταν το γράφημα είναι η διχοτόμος του πρώτου τεταρτημορίου, όπως συμβαίνει για

N_{lim}^i ίσο με 8, 9 ή 10. Αντιθέτως, όταν $N_{lim}^i = 11$ και για 11 έως 20 ΠΕ μόνο μία ΠΕ αδυνατεί να επιτύχει το στόχο, ενώ για 21 έως 23 ΠΕ άλλη μία επίσης αποτυγχάνει. Ομοίως, στο γράφημα για $N_{lim}^i = 12$, οι περιπτώσεις των 10, 11, 20 και 21 ΠΕ δεν μπορούν να λάβουν 12 διαύλους.



Σχήμα 7: Το πλήθος των ΠΕ που πέτυχαν το στόχο τους θεωρώντας κάθε φορά χώρα μεταβλητό αριθμό ΠΕ και διαύλων που απαιτούνται (Σενάριο II, δεύτερη περίπτωση)



Σχήμα 8: Το πλήθος των υπολειπόμενων διαύλων ανά ΠΕ για μεταβλητό πλήθος ΠΕ και διαύλων που απαιτούνται (Σενάριο II, δεύτερη περίπτωση)

Το Σχήμα 8 απεικονίζει το πλήθος των υπολειπόμενων διαύλων για την ικανοποίηση των απαιτήσεων για μεταβλητό πλήθος ΠΕ και για διαφορετικές απαιτήσεις σε διαύλους. Με βάση το σχήμα, όταν οι απαιτήσεις ανέρχονται σε 8, 9 ή 10 διαύλους, τότε δεν καταγράφονται υπολειπόμενοι δίαυλοι, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν απαιτούνται 11 ή 12 δίαυλοι. Ειδικότερα, όταν απαιτούνται 11 δίαυλοι, υπολείπεται ένας δίαυλος για μια περιοχή που αποτελείται από 11 έως 20 ΠΕ, ενώ ο αριθμός αυξάνεται κατά έναν επιπλέον δίαυλο, για μια περιοχή των 21 έως 23 ΠΕ. Επιπρόσθετα, όταν ο στόχος φτάνει τους 12 διαύλους ανά ΠΕ, τότε ένας δίαυλος υπολείπεται για μια περιοχή των 10 ΠΕ, τρεις δίαυλοι για μια περιοχή από 11 έως 19 ΠΕ, τέσσερις δίαυλοι για την περιοχή των 20 ΠΕ και έξι για την περιοχή των 21 έως 23 ΠΕ. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα, οι ΠΕ 11 και 21 μπορούν να λάβουν μόνο δέκα διαύλους, ενώ οι ΠΕ 10 και 20 μπορούν να λάβουν 11 διαύλους. Συνολικά, η χώρα των 23 ΠΕ μπορεί να χρησιμοποιήσει έως 10 διαύλους ανά ΠΕ, όταν σε όλες τις ΠΕ απαιτείται το ίδιο πλήθος διαύλων.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι ίδια, όταν ο αλγόριθμος MOCA βελτιστοποιείται μέσω GA, SA ή PSO. Παρόλα αυτά, συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση με διαφοροποιημένους χρόνους εκτέλεσης και συνεπώς παρουσιάζοντας διαφοροποιημένη κατανάλωση των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, όπως υποδεικνύεται από το πλήθος των γενεών, στην περίπτωση των GA, ή το πλήθος των επαναλήψεων, στην περίπτωση των SA και PSO, οι οποίες απαιτούνται για την επίτευξη της ελάχιστης δυνατής τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Για παράδειγμα, όταν ζητούνται 11 δίαυλοι σε 11 ΠΕ, η ελάχιστη δυνατή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να επιτευχθεί σε λιγότερο από 10 γενεές μέσω των GA, 60 επαναλήψεις μέσω της SA και 20 επαναλήψεις μέσω της PSO, κατά μέσο όρο.

3.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, ο αλγόριθμος MOCA παρουσιάστηκε ως ένα σχήμα εκ νέου απόδοσης διαύλων σε δίκτυα DVB-T, το οποίο παρέχει φάσμα για το ψηφιακό μέρισμα. Το συγκεκριμένο σχήμα θεωρεί μια περιοχή ενδιαφέροντος χωρισμένη σε ΠΕ, καθώς και τις αρχικές εκχωρήσεις διαύλων σύμφωνα με το συντονισμένο Πλάνο που απορρέει από τη Συνθήκη GE06, τους εσωτερικούς περιορισμούς εντός αυτής της περιοχής και εξωτερικούς περιορισμούς με τις γειτονικές περιοχές προκειμένου να παράγει ένα σχεδόν βέλτιστο πλάνο χρησιμοποιώντας GA, SA ή PSO. Το τελικό πλάνο έχει προέλθει από τροποποιήσεις των εκχωρήσεων του φάσματος κατά τρόπο συντονισμένο, ενώ εξασφαλίζει ότι οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις σε διαύλους ικανοποιούνται σε κάθε ΠΕ, εάν αυτό είναι δυνατό.

Ο αλγόριθμος MOCA έχει δοκιμαστεί σε δύο υποθετικές χώρες, εκ των οποίων η μια αποτελείται από πέντε ΠΕ και η άλλη από 23 ΠΕ. Στο πρώτο σενάριο, οι περιορισμοί δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ενός πλάνου που θα ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις και έτσι ο MOCA παράγει ένα πλάνο με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό υπολειπόμενων για το στόχο

διαύλων. Στο δεύτερο σενάριο, ο MOCA χρησιμοποιείται, ώστε να τροποποιηθούν αποτελεσματικά οι φασματικές εκχωρήσεις της χώρας υπό την απαίτηση της διατήρησης του αρχικού πλήθους διαύλων σε όλες τις ΠΕ. Επίσης, στο δεύτερο σενάριο εφαρμόζεται η απαίτηση εκχώρησης του ίδιου πλήθους διαύλων σε όλες τις ΠΕ για μεταβλητό πλήθος διαύλων, υποδεικνύοντας έμμεσα το μέγιστο πλήθος διαύλων που μπορούν να εκχωρηθούν ανά ΠΕ.

Επιπρόσθετα, ο MOCA είναι ανεξάρτητος της τοπολογίας του δικτύου, αλλά και του μεγέθους και του πλήθους των θεωρούμενων ΠΕ, καθώς ο όρος «ΠΕ» μπορεί να αναφέρεται σε μια περιοχή κατανομής (allotment) ή μια περιοχή που εξυπηρετείται από καταχωρήσεις τύπου assignments ή ακόμα και από ένα SFN. Ομοίως, η περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να είναι είτε μια χώρα είτε ένα τμήμα μιας ή περισσότερων χωρών είτε μια ευρύτερη περιοχή. Επιπλέον, ο αλγόριθμος MOCA μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε άλλους τύπους δικτύων, τροποποιώντας κατάλληλα τους περιορισμούς του εκάστοτε προβλήματος. Τα αποτελέσματα του MOCA στηρίζονται βασικά α) στους περιορισμούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που ανακύπτουν με βάση τα ιδιαίτερα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και β) από τις διευθετήσεις διαύλων στο Πλάνο GE06. Επίσης, οι απαιτήσεις σε διαύλους μπορεί να είναι είτε οι ίδιες για ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος είτε να ποικίλλουν ανά ΠΕ. Έτσι, ο αλγόριθμος μπορεί να δώσει τροποποιημένα πλάνα για μια χώρα ή για ορισμένες ΠΕ τηλεπικοινωνιακά όμορων χωρών.

Υπό αυτήν την έννοια, ο MOCA μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο κατά τη διαδικασία του Συντονισμού των πλάνων συχνοτήτων διαφόρων χωρών, διευκολύνοντας διακυβερνητικές διαπραγματεύσεις σχετικά με την παραχώρηση, την τροποποίηση και τη χρήση διαύλων, οι οποίοι αποτελούν σημαντικό εθνικό πόρο. Εκτός αυτού, ο MOCA είναι ικανός να αναδειξεί το μέγιστο δυνατό πλήθος διαύλων στους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί εκπομπή σε κάθε ΠΕ, οδηγώντας σε σαφή και δικαιολογημένη πλέον ζήτηση διαύλων σε κάθε ΠΕ κατά τη διάρκεια του εκ νέου σχεδιασμού του δικτύου. Συμπερασματικά, ο MOCA αποτελεί έναν ευέλικτο αλγόριθμο, ικανό να απελευθερώσει φάσμα για εναλλακτικές χρήσεις. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένων των θεμάτων διαχείρισης ραδιοφάσματος που ανακύπτουν στην πολύτιμη ζώνη UHF που χαρακτηρίζεται από ευμενή χαρακτηριστικά διάδοσης. Με άλλα λόγια, ο MOCA εγγυάται την απελευθέρωση εναρμονισμένου φάσματος για το ψηφιακό μέρισμα, πλήρως συμβατό από ηλεκτρομαγνητικής απόψεως με τις εκχωρήσεις στην υπηρεσία DVB-T. Κατά όμοιο τρόπο ο MOCA μπορεί να εφαρμοστεί για την παροχή του δεύτερου ψηφιακού μερίσματος, το οποίο ανέκυψε στην WRC του 2012 και θα βρίσκεται στο επίκεντρο των συζητήσεων στην WRC του 2015.

Ο MOCA εμφανίζεται σε ένα πεδίο πλούσιο σε προκλήσεις ερευνητικού ενδιαφέροντος, επεκτείνοντας τις ερευνητικές προοπτικές. Εκτός από εκ νέου διευθετήσεις συχνοτήτων, ο MOCA μπορεί να επεκταθεί, ώστε να παρέχει λύσεις στην εκχώρηση φάσματος κατά το σχεδιασμό δικτύων, λαμβάνοντας υπόψη τη συνύπαρξη διαφόρων υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, μπορεί να επεκταθεί σε κυψελωτά συστήματα, εάν οριστούν αναλόγως οι εσωτερικοί

και εξωτερικοί περιορισμοί. Τέλος, οι αρχές του αλγορίθμου MOCA μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα σχήμα δυναμικής εκχώρησης διαύλων, όπως ενδεχομένως επιτάσσει η υποδομή του συστήματος, όπως ενός συστήματος γνωστικών συσκευών (cognitive radios).

Τέλος, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη δημιουργία βέλτιστων πλάνων συχνοτήτων, όταν η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω GA, SA ή PSO, με διαφοροποιημένους χρόνους εκτέλεσης. Οι μεταευσριστικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στο πρόβλημα της εκ νέου απόδοσης διαύλων μπορούν να μελετηθούν περαιτέρω ως προς τις λειτουργίες διασταυρώσεων και μεταλλάξεων, τις συναρτήσεις ανοπτήσεως και θερμοκρασίας ή την εμπειρία, κοινωνική ή ίδια, προκειμένου να εξαχθούν ταχείες βέλτιστες λύσεις, ειδικά για την περίπτωση που αυτές πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε σχήματα δυναμικής εκχώρησης συχνοτήτων.

Πίνακας 10: Εξωτερικοί περιορισμοί για το Σενάριο II. Κάθε στήλη αντιπροσωπεύει μια παρεμβαλλόμενη ΠΕ, ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια παρεμβάλλουσα ΠΕ. Οι ΠΕ i, j μπορούν να λειτουργούν στον ίδιο διάλο συχνοτήτων χωρίς να προκαλούν επιβλαβή παρεμβολή η μια στην άλλη, αν το κελί (i, j) περιέχει το σύμβολο \surd .

ΠΕ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9		✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
13		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓
17	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓	✓
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
19	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
22	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
23	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 11: Οι αρχικές εκχωρήσεις διαύλων στο Σενάριο Π. Η πρώτη στήλη δείχνει τον αριθμό της ΠΕ, οι επόμενες δώδεκα περιέχουν τους διαύλους που είχαν εκχωρηθεί αρχικά σε κάθε ΠΕ σύμφωνα με τη GE06, ενώ η τελευταία στήλη περιέχει το πλήθος των διαύλων που εκχωρούνται σε κάθε ΠΕ συνολικά. Το αρχικό πλάνο συχνότητων εκχωρεί από 7 έως 12 διαύλους σε καθεμιά από τις 23 θεωρούμενες ΠΕ.

ΠΕ	Αρχικός Εκχωρημένοι Δίαυλοι												Πλήθος Αρχικός Εκχωρημένων Διαύλων
1	22	23	24	28	29	33	37	43	51	56	61	62	12
2	21	25	27	30	34	39	41	45	49	52	53	59	12
3	23	25	29	30	31	35	43	44	46	50	56	59	12
4	24	26	27	28	32	39	40	41	47	51	52	55	12
5	24	30	31	32	33	35	36	43	47	58	59	66	12
6	23	26	34	37	38	40	48	49	52	53	60	65	12
7	22	25	27	39	41	51	54	56	61	62	63	64	12
8	22	29	31	35	38	40	42	47	52	53	63	65	12
9	21	36	37	41	44	51	54	58	60	62	64	66	12
10	21	25	33	39	42	46	53	56	64				9
11	27	31	34	35	36	38	44	61	65				9
12	23	24	25	26	30	33	35	37	49	55	57	63	12
13	25	30	31	32	34	42	44	46	47	48	49	53	12
14	21	26	35	36	38	40	45	54	57	59	60	66	12
15	22	24	29	33	37	52	55	56	58	61	63	64	12
16	23	24	28	35	37	39	41	42	44	53	57	58	12
17	21	22	25	40	45	46	55	56	63	64	65	66	12
18	22	23	24	26	27	30	48	52	54	59	61	62	12
19	29	31	32	34	36	38	43	47	49	50	51	60	12
20	21	24	32	39	42	50	52	56	59				9
21	25	27	35	41	49	51	53						7
22	21	24	25	31	37	38	39	41	49	56	57	61	12
23	27	33	34	35	36	44	46	53	54	59	64		11

Πίνακας 12: Πρόσθετοι διαθέσιμοι διάλυοι μετά την επιβολή των εξωτερικών περιορισμών στο Σενάριο II.

ΠΕ	Επιπρόσθετοι Διάλυοι								Πλήθος Επιπλέον Διαλύων
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	30	36	44	49					4
2	26	32	40	51					4
3	22	53							2
4	44	60							2
5	34	41	46	51					4
6	21	27	28	59					4
7	23	31	37	44	49	53	58		7
8	25	30	36	54					4
9	22	31	32	43	52				5
10	35	49	51	58					4
11	24	30	42	49					4
12	32	42	46	54					4
13	40	52	54	56	60				5
14	27	33	42	48					4
15	21	28	38	39	40	51			6
16	43	45	47	59					4
17	26	28	33	44	57				5
18	36	43	49	50	55				5
19	21	25	40	59					4
20	23	34	48						3
21	28	38	46	56					4
22	22	42	53	58					4
23	24	30	40	48	51	60			6

Πίνακας 13: Παράμετροι προσομοίωσης στο Σενάριο II, πρώτη περίπτωση.

GA		SA		PSO	
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Διάσταση του προβλήματος	N_d	Διάσταση του προβλήματος	N_d	Διάσταση του προβλήματος	N_d
Όρια	$[1, N_s]$	Όρια	$[1, N_s]$	Όρια	$[1, N_s]$
Αρχικός Πληθυσμός	Τυχαίος	Αρχική Κατάσταση	Τυχαία	Αρχικό Σμήνος	Τυχαίο
Μέγεθος Πληθυσμού	160	Αρχική Θερμοκρασία	100	Μέγεθος Σμήνου	25
Συντελεστής Διασταύρωσης	0.8	Συνάρτηση Θερμοκρασίας	Εκθετική	Γνωστική Παράμετρος c_1	2.8
Συντελεστής Μετανάστευσης	0.2	Συνάρτηση Ανόπτωσης	Ταχεία (βήμα ίσο με τη θερμοκρασία)	Κοινωνική Παράμετρος c_2	1.3
Όριο Αντικειμενικής Συνάρτησης	0	Όριο Αντικειμενικής Συνάρτησης	0	Όριο Αντικειμενικής Συνάρτησης	0

Πίνακας 14: Οι εκχωρήσεις διαύλων του αλγορίθμου MOCA στην πρώτη περίπτωση του Σεναρίου II. Η πρώτη στήλη υποδεικνύει τον αριθμό της ΠΕ, ακολουθούμενη από τις στήλες με τους διαύλους που εκχωρούνται τελικά σε αυτήν, καθώς και από το συνολικό τους πλήθος. Όπως παρουσιάζεται, το τελικό πλάνο αποδίδει το αναμενόμενο πλήθος διαύλων σε κάθε ΠΕ.

ΠΕ	Τελικός Αποδιδόμενος Δίαυλοι												Πλήθος τελικός εκχωρημένων διαύλων
1	22	23	24	28	29	30	33	37	43	49	51	56	12
2	21	25	26	27	30	32	34	39	41	45	49	51	12
3	22	23	25	29	30	31	35	43	44	46	50	56	12
4	24	26	27	28	32	39	40	41	47	51	52	55	12
5	24	30	31	32	33	34	35	36	41	43	47	51	12
6	23	26	27	28	34	37	38	48	49	52	53	59	12
7	22	23	25	27	31	37	39	41	44	53	54	56	12
8	22	25	29	31	35	36	38	40	47	52	53	54	12
9	21	22	31	36	37	41	43	44	51	54	58	60	12
10	21	25	33	39	42	46	49	51	53				9
11	24	27	30	31	34	35	36	38	42				9
12	23	24	25	26	30	32	33	35	37	42	49	55	12
13	30	31	32	34	42	44	46	48	49	52	53	54	12
14	21	26	33	35	38	40	45	48	54	57	59	60	12
15	21	22	24	28	29	33	37	38	39	40	52	55	12
16	23	24	28	35	37	39	41	42	44	45	47	53	12
17	21	22	25	26	28	33	40	45	46	55	56	57	12
18	22	23	24	26	27	30	36	43	48	50	52	55	12
19	25	29	31	32	36	38	43	47	49	50	51	59	12
20	21	23	24	32	34	39	42	50	52				9
21	25	27	28	35	38	41	46						7
22	21	22	24	25	31	37	38	39	41	49	53	56	12
23	24	27	30	33	34	36	40	44	51	53	54		11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [10][62] βρίσκονται στο επίκεντρο των ερευνών την τελευταία δεκαετία, ως αποτέλεσμα των εξελίξεων στην τεχνολογία των μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων, τις ασύρματες επικοινωνίες και την ψηφιακή ηλεκτρονική που επέτρεψαν την ανάπτυξη πολυ-λειτουργικών κόμβων αισθητήρων. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν κόμβοι με χαμηλές δυνατότητες σε υπολογιστική ισχύ, μνήμη, αποθήκευση κλπ, οι οποίοι όμως είναι χαμηλού κόστους και ισχύος, καθώς επίσης και μικρού μεγέθους. Οι μικροσκοπικές αυτές συσκευές είναι ικανές να ανιχνεύουν, να μετρούν και να συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον τους χωρίς επίβλεψη και, εν τέλει, να τις μεταδίδουν βάσει κάποιας τοπικής διαδικασίας αποφάσεως σε μικρές αποστάσεις.

Μέσω αυτών των συσκευών έγιναν πραγματικότητα τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Πρόκειται για δίκτυα, τα οποία αποτελούνται από πολυάριθμους κόμβους τοποθετημένους κοντά στο φαινόμενο, το οποίο παρατηρούν. Οι πληροφορίες που συλλέγουν διαδίδονται ως αποτέλεσμα της μεταξύ τους συνεργασίας στον τελικό χρήστη, ο οποίος εν γένει είναι απομακρυσμένος από το χώρο όπου εκτυλίσσεται το φαινόμενο ενδιαφέροντος. Τα μεγέθη που μπορούν να παρατηρηθούν από τους ασύρματους κόμβους ποικίλλουν και περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την υγρασία, την κίνηση, το φωτισμό, την πίεση, τη σύσταση του εδάφους, το επίπεδο θορύβου, την ταχύτητα ή/και την κατεύθυνση ενός αντικειμένου ενδιαφέροντος, κλπ.

4.1 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Η δυνατότητα παρακολούθησης του περιβάλλοντος και διοχέτευσης της πληροφορίας γέννησε πληθώρα εφαρμογών για εξωτερικά ή και εσωτερικά περιβάλλοντα, για μεγάλες εργοστασιακές μονάδες ή επιχειρήσεις ή και οικιακούς χώρους, για αστικά ή φυσικά περιβάλλοντα κλπ. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, το οποίο τα καθιστά ευνοϊκά για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών είναι, εκτός από τη δυνατότητα παρακολούθησης φαινομένων, η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων σε συνδυασμό με την παραγωγή και διάδοση μηνυμάτων ειδοποιήσεων. Συνεπώς, τα μηνύματα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να αποτελούν είσοδο για μηχανισμούς αντίδρασης

(actuators) σε περίπτωση ανεπιθύμητων καταστάσεων, ώστε να υπάρχει άμεση αντιμετώπισή τους.

Οι κυριότερες εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων δίνονται στη συνέχεια.

- 1) Στρατιωτικές εφαρμογές: Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αξιοποιήθηκαν αρχικά σε στρατιωτικές εφαρμογές. Εκτός από τα εγγενή πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν για τέτοιου είδους εφαρμογές, όπως είναι η απομακρυσμένη, χωρίς επίβλεψη και αυτόνομη λειτουργία τους, το γεγονός ότι συνίστανται από μικρούς, χαμηλού κόστους κόμβους, έδωσε επιπλέον ώθηση στις στρατιωτικές εφαρμογές τους, καθώς πλέον το κόστος από την καταστροφή ενός μέρους ή και του συνόλου του δικτύου των αισθητήρων δεν είναι ανυπέβλητο, ενώ μπορεί να αντικατασταθεί σχετικά εύκολα. Συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των φιλικών δυνάμεων, του εξοπλισμού και των προμηθειών, καθώς και των πεδίων μαχών, για την αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων και των γεωγραφικών χαρακτηριστικών, την εκτίμηση των ζημιών, την ανίχνευση πυρηνικών, χημικών ή άλλων ουσιών κλπ. [10].
- 2) Περιβαλλοντικές εφαρμογές: Κατά την ευρύτερη διάδοσή τους, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βρήκαν εφαρμογή σε πεδία περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Έτσι, σήμερα, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διασπείρονται σε απροσπέλαστες ή δυσπρόσιτους βιότοπους, όπως είναι οι πόλοι, έρημοι, τροπικά δάση, κλπ, για την άντληση πληροφοριών σχετικά με το φυτικό και το ζωικό βασίλειο που φιλοξενούν, οι οποίες μέχρι σήμερα παρουσίαζαν σημαντικές δυσκολίες και απαιτούσαν ιδιαίτερα υψηλές δαπάνες. Εκτός αυτού, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και πρόληψη φυσικών καταστροφών, όπως είναι οι πυρκαγιές, οι πλημμύρες ή οι σεισμοί, συμβάλλοντας στην ταχύτερη και, συνεπώς, αποδοτικότερη αντιμετώπισή τους.
- 3) Εφαρμογές υγείας: Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ακόμα σε περιπτώσεις αυτόδιάγνωσης, συνθέτοντας τα λεγόμενα *δίκτυα περιοχής σώματος* (body area networks – BAN). Σε αυτά, ένας ή περισσότεροι αισθητήρες τοποθετούνται είτε απευθείας στο σώμα ή μπορούν ακόμα να ενσωματωθούν στο ύφασμα των ενδυμάτων, με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της πίεσης του αίματος, των καρδιακών παλμών κλπ.. Οι πληροφορίες μπορούν να διοχετεύονται ασύρματα σε κάποιο τελικό προορισμό, όπως π.χ. ένας υπολογιστής, ή και να μην διατηρούνται οι μετρήσεις, αλλά να παράγεται μια ειδοποίηση σε περίπτωση υπέρβασης των ενδεδειγμένων τιμών. Επιπρόσθετα, συχνά χρησιμοποιούνται για τέτοιου είδους εφαρμογές οι αισθητήρες που ήδη ενσωματώνονται σε ευφυή κινητά τηλέφωνα, επιτρέποντας την αποθήκευση των μετρήσεων και την παροχή στατιστικών αποτελεσμάτων σε περιόδους άθλησης.

- 4) Οικιακές εφαρμογές: Τα δίκτυα των αισθητήρων βρίσκουν πεδίο εφαρμογή σε οικιακές εφαρμογές, οι οποίες σχετίζονται με την ασφάλεια των οικιακών χώρων, τον αυτοματισμό με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, την παρακολούθηση των αποθηκευμένων προϊόντων, κλπ. Για παράδειγμα, αισθητήρες κίνησης δύνανται να ανιχνεύουν την είσοδο ληστών, να σημάνουν το ανεπιθύμητο γεγονός και να παράγουν ειδοποιήσεις. Ομοίως, ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πυρασφάλεια, όπου οι ειδοποιήσεις δύνανται να συνοδεύονται από κάποιο μηχανισμό αντίδρασης. Επίσης, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εξυπηρετήσουν καθημερινές ανάγκες, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ευκολία και εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να δημιουργήσει ένα ευφυές σπίτι, όπου θα παρακολουθείται η είσοδος και έξοδος τροφίμων από το ψυγείο ή τα ντουλάπια, θα ελέγχεται η κατανάλωση και θα προτείνονται γεύματα, τα οποία μπορούν να ετοιμαστούν με τα υπάρχοντα υλικά και με βάση προκαθορισμένα κριτήρια, όπως διατροφικές απαιτήσεις. Επιπλέον, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα μπορούσε να επικοινωνεί με καταστήματα, για να εξασφαλίσει την προμήθεια των προϊόντων που έχουν εξαντληθεί. Ακόμη, θα μπορούσε να ειδοποιεί σε περίπτωση που η ημερομηνία λήξης κάποιου προϊόντος πλησιάζει ή έχει παρέλθει. Επίσης, στο ίδιο δίκτυο, αισθητήρες θερμοκρασίας, μπορούν να παρακολουθούν τις μεταβολές της θερμοκρασίας και να δίνουν εντολή για την ενεργοποίηση των κλιματιστικών, σε περίπτωση που η καταγραφόμενη θερμοκρασία είναι εκτός των αποδεκτών ορίων. Ομοίως, μπορεί να αναγνωριστεί πληθώρα σεναρίων, όπου τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να συμβάλουν στον αυτοματισμό και τη διευκόλυνση της καθημερινότητας, τα οποία έχουν ήδη υλοποιηθεί ή βρίσκονται στο στάδιο των ερευνών ή της υλοποίησης.
- 5) Άλλες εμπορικές εφαρμογές. Ακολουθώντας το σενάριο του ευφυούς σπιτιού, παρόμοιος αυτοματισμός μπορεί να επέλθει και σε επαγγελματικούς χώρους μέσω των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Έτσι, σε ένα σούπερ μάρκετ μπορεί να ελέγχεται η κατανάλωση των προϊόντων, ώστε να αποστέλλονται ειδοποιήσεις στον υπάλληλο για την αντικατάστασή τους ή στον προμηθευτή για νέες παραγγελίες. Επίσης, και εδώ μπορεί να παράγονται ειδοποιήσεις σύμφωνα με την ημερομηνία λήξης. Εκτός αυτού, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται στις επιχειρήσεις μεταφορών (logistics) για τον έλεγχο της κίνησης των προϊόντων, ενώ το δίκτυο ενδέχεται να περιλαμβάνει αισθητήρα ανίχνευσης θέσης (GPS), ο οποίος θα παρέχει πληροφορία για την τρέχουσα θέση των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας το σχεδιασμό των μεταφορών και ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα. Ομοίως, σε ένα εργοστάσιο, οι ασύρματοι αισθητήρες είναι χρήσιμοι σε διάφορα στάδια, όπως στην παραγωγή, την αποθήκευση, τη φάση των δοκιμών κλπ. Έτσι, αισθητήρες θέσης (GPS) μπορούν να πληροφορούν για τη θέση των προϊόντων, ενώ

αισθητήρες με ενσωματωμένο σύστημα κάμερας μπορούν να συμμετέχουν στη διαδικασία των δοκιμών για την ανίχνευση σφαλμάτων κατά την παραγωγή ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων. Τέλος, αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτός, κλπ., μπορούν να παρακολουθούν τις συνθήκες που επικρατούν στην αποθήκη και να ειδοποιούν σε περίπτωση παραβίασης των ενδεδειγμένων συνθηκών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορούν να προκύψουν σημαντικά οφέλη για την επιχείρηση, η οποία εξοικονομεί σημαντικές δαπάνες, τις οποίες συνεπάγονται τα σφάλματα παραγωγής, η καθυστέρηση εύρεσης προϊόντων σε μια αποθήκη, αλλά και οι δυσμενείς συνθήκες αποθήκευσης. Παράλληλα, τα οφέλη είναι σημαντικά και για το χρήστη, ο οποίος απολαμβάνει προϊόντα με καλύτερες εγγυήσεις ποιότητας.

Τέλος, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα ακόμα εφαρμογών, όπως είναι ο έλεγχος της κυκλοφοριακής κίνησης, η παρακολούθηση των συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, σύσταση εδάφους) για τη γεωργία, τον έλεγχο των συγκοινωνιών και των μεταφορών κλπ.

4.1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things)

Η ιδέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) ξεκίνησε από τον Νικολά Τέσλα, ο οποίος σε μια συνέντευξη για το περιοδικό Colliers το 1926 δήλωσε ότι [63]:

«Όταν η ασύρματη επικοινωνία εφαρμοστεί πλήρως, ολόκληρη η υφήλιος θα μετατραπεί σε έναν τεράστιο εγκέφαλο, όπως είναι στην πραγματικότητα, όλα τα πράγματα θα είναι μέλη ενός πραγματικού και ρυθμικού συνόλου... και τα όργανα μέσω των οποίων θα μπορούμε να το πραγματοποιήσουμε θα είναι εκπληκτικά απλά συγκριτικά με το σημερινό τηλέφωνο. Ο άνθρωπος θα μπορεί να έχει ένα τέτοιο στην τσέπη του γιλέκου του.»

Από τότε μέχρι σήμερα, η επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών ξεκίνησε με την ανταλλαγή ηλεκτρονικών δεδομένων, η οποία έκανε πραγματικότητα τον άμεσο διάλογο μεταξύ δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών. Όλοι οι υπολογιστές που συνδέονται στο Διαδίκτυο μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, ενώ με τη διασύνδεση και κινητών τηλεφώνων, το Διαδίκτυο έγινε κινητό. Με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) η επικοινωνία επεκτείνεται σε όλα τα «πράγματα» που μας περιβάλλουν.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν κόμβους που αποτελούν πηγές πληροφορίας. Παρόλα αυτά, το όραμα της χρήσης τους σε ένα πραγματικό περιβάλλον, όπως φανερώνεται και από τις εφαρμογές τους, συνήθως εμπλέκει και άλλες συσκευές, οι οποίες αντιδρούν σε ένα ερέθισμα του δικτύου των αισθητήρων, ή συσκευές οι οποίες επίσης παράγουν πληροφορία. Ακολουθώντας, επομένως, τις τεχνολογικές εξελίξεις, σημαντικά οφέλη προκύπτουν για εφαρμογές υψηλού επιπέδου από τη συλλογή και ανάλυση πληροφοριών που προέρχονται από έντονα ετερογενείς πηγές, καθώς και από τον αυτοματισμό που

υπονοεί η αίσθηση και αντίδραση. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν τη διασύνδεση διαφορετικών συσκευών και δικτύων μεταξύ τους σε ένα ευρύτερο του Διαδικτύου δίκτυο, οδηγώντας στο IoT.

Το IoT επιτρέπει στα αντικείμενα του περιβάλλοντός μας να γίνουν ενεργοί συμμετέχοι, δηλαδή να μοιράζονται πληροφορία με άλλα μέλη του δικτύου ή άλλους ενδιαφερόμενους και να έχουν την ικανότητα αναγνώρισης γεγονότων και αλλαγών του περιβάλλοντός τους, καθώς επίσης κατάλληλης δράσης και αντίδρασης κατά αυτόνομο τρόπο. Υπό αυτό το πρίσμα, οι προκλήσεις για τη δημιουργία ενός ευφυούς κόσμου είναι τεράστιες· ενός κόσμου, στον οποίο το πραγματικό, το ψηφιακό και το εικονικό συγκλίνουν για τη δημιουργία ευφών περιβαλλόντων, τα οποία οδηγούν σε ευφύστερη ενέργεια, συγκοινωνίες, πόλεις και πολλές ακόμη περιοχές.

Ο στόχος του IoT είναι να δώσει τη δυνατότητα σύνδεσης στα αντικείμενα παντού και πάντα με οποιονδήποτε ή οτιδήποτε που ιδανικά χρησιμοποιεί οποιοδήποτε μονοπάτι ή δίκτυο και οποιαδήποτε υπηρεσία. Το IoT είναι η επανάσταση του Διαδικτύου. Τα αντικείμενα μπορούν να γίνουν αναγνωρίσιμα και να αποκτήσουν γνώση, χάρη στο γεγονός ότι μπορούν να επικοινωνούν πληροφορία σχετικά με τον εαυτό τους και να έχουν πρόσβαση σε πληροφορία που συγκεντρώνεται από άλλα πράγματα. Για παράδειγμα, συστήματα ειδοποιήσεων θα διεγερθούν σύντομα, εάν υπάρχει κίνηση, τα φυρά θα επικοινωνούν με το σύστημα ποτίσματος όταν χρειάζονται νερό, τα αθλητικά παπούτσια μπορούν να επικοινωνούν πληροφορία σχετικά με το χρόνο, την ταχύτητα και την απόσταση, ώστε αυτός που φοράει να μπορεί να συναγωνιστεί με άτομα στην άλλη άκρη του κόσμου. Όλα τα αντικείμενα θα μπορούν να διαδραματίζουν ενεργό ρόλο χάρη στη σύνδεσή τους στο Διαδίκτυο.

Οι κύριες τεχνολογίες που θεωρούνται ως καταλύτες του IoT είναι εκτός από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η τεχνολογία Radio-Frequency IDentification (RFID), τα συστήματα Machine-to-Machine (M2M), το κινητό Διαδίκτυο, η ενσωμάτωση σημασιολογικών δεδομένων (semantic data), η σημασιολογική αναζήτηση, το πρωτόκολλο IPv6, κλπ. Πληθώρα εργασιών και έργων ασχολείται με την ενσωμάτωση και ενοποίηση ετερογενών τεχνολογιών και υλικών (hardware) σε ένα ενιαίο IoT [64]-[67]. Συνεπώς, η έννοια του IoT συνεπάγεται και αντίστοιχες απαιτήσεις από τα πρωτόκολλα των δικτύων των αισθητήρων, προκειμένου να μπορέσουν να ενσωματωθούν σε αυτό.

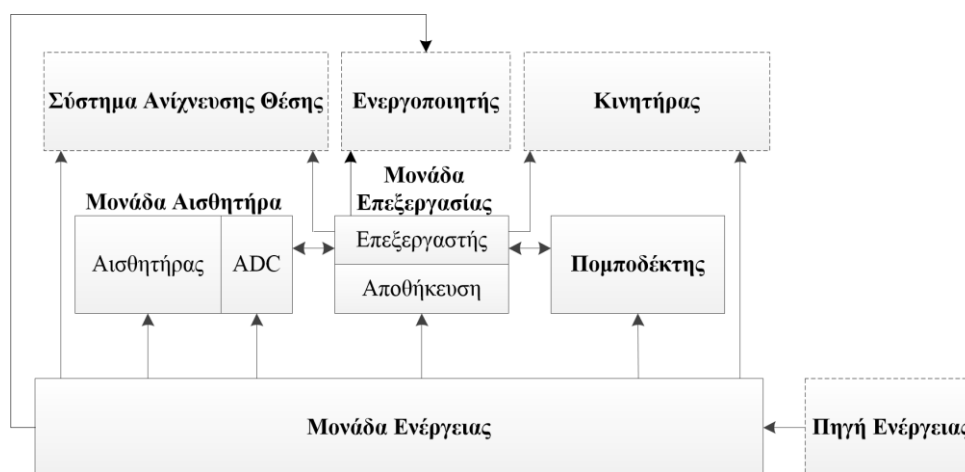
4.2 Ασύρματος Κόμβος-Αισθητήρας

Ένας ασύρματος κόμβος αποτελείται από τέσσερις βασικές μονάδες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 9· τη μονάδα αισθητήρα, τη μονάδα επεξεργασίας, τη μονάδα πομποδέκτη και τη μονάδα ενέργειας. Επίσης, προαιρετικά και ανάλογα με την εφαρμογή, ο κόμβος

μπορεί να περιλαμβάνει ένα σύστημα ανίχνευσης θέσης, έναν κινητήρα, στην περίπτωση κινητών αισθητήρων, μια πηγή ενέργειας και έναν «μηχανισμό αντίδρασης⁶» (actuator).

Η μονάδα αισθητήρα αποτελείται συνήθως από μια ή περισσότερες πλακέτες αισθητήρων και έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC). Το αναλογικό σήμα συλλέγεται από τους αισθητήρες κατά την παρακολούθηση ενός φαινομένου και μετατρέπεται σε ψηφιακό από τον ADC, προκειμένου να οδηγηθεί στη μονάδα επεξεργασίας.

Η βασική μονάδα επεξεργασίας περιλαμβάνει έναν μικρο-ελεγκτή, ο οποίος δύναται να εκτελεί βασικές λειτουργίες επεξεργασίας των συλλεχθέντων πληροφοριών και υλοποίησης των απαραίτητων λειτουργιών για τη συνεργασία των κόμβων. Επιπρόσθετα, η μονάδα επεξεργασίας υποβοηθείται από μνήμη RAM μεγέθους μερικών KB, ανάλογα με την πλατφόρμα κόμβου που χρησιμοποιείται. Παράλληλα, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να αποθηκευτούν σε μνήμη flash ή EEPROM, η οποία κυμαίνεται και μπορεί να είναι της τάξης των KB, MB ή και GB. Πάντως, οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι κόμβοι ενσωματώνουν μνήμη της τάξης των KB.



Σχήμα 9: Εσωτερική αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κόμβου

Εφόσον οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από χαμηλές εν γένει δυνατότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης και επίσης βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία, αποστέλλουν τις πληροφορίες που συλλέγουν σε κάποιο κόμβο-προορισμό, ο οποίος επικοινωνεί απευθείας με έναν σταθμό βάσης, π.χ. υπολογιστή ή οποιαδήποτε άλλη ισχυρή υπολογιστικά ισχυρή συσκευή. Ο πομποδέκτης είναι η μονάδα που επιτρέπει την επικοινωνία του κόμβου με άλλους γειτονικούς και, ουσιαστικά, τη συμμετοχή του στο δίκτυο των αισθητήρων, ώστε να είναι δυνατή η αποστολή των συλλεχθέντων πληροφοριών στον προορισμό. Σε συνδυασμό με τους περιορισμένους ενεργειακούς πόρους, ένας κόμβος χαρακτηρίζεται από περιορι-

⁶ Ο μηχανισμός αντίδρασης είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή, η οποία μπορεί να ελέγχει διαφορετικούς παράγοντες ενός συστήματος. Σε έναν αισθητήρα οι ενεργοποιητές μπορούν να ενεργοποιήσουν διαφορετικές μονάδες αισθητήρων, να προσαρμόσουν τις παραμέτρους τους ή να παρακολουθούν την ενέργεια του ασύρματου κόμβου.

σμένη ακτίνα κάλυψης, εντός της οποίας βρίσκονται κόμβοι με τους οποίους μπορεί να επικοινωνεί απευθείας και χαρακτηρίζονται ως «γειτονικοί».

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο αποτελεί η μονάδα ενέργειας. Συνηθέστερα οι κόμβοι αντλούν ενέργεια από δύο μπαταρίες τύπου AA. Παρόλα αυτά, ανάλογα με την εφαρμογή, η μονάδα ενέργειας μπορεί να υποβοηθείται από συλλέκτες ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι κόμβοι βρίσκονται σε σταθερές θέσεις, ενδέχεται να τροφοδοτούνται συνδεδεμένοι σε κάποιο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Παρόλα αυτά, καθώς η πλειονότητα των περιπτώσεων αναφέρεται σε αισθητήρες τροφοδοτούμενους από απλές μπαταρίες, η ενέργεια αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα σε ένα δίκτυο αισθητήρων και συμπεριλαμβάνεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

4.3 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συντίθενται από μικρό ή μεγάλο πλήθος ασύρματων κόμβων, οι οποίοι παρατηρούν το ίδιο ή διαφορετικά φαινόμενα και είναι διάσπαρτοι στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η οργάνωση των κόμβων σε δίκτυο είναι απαραίτητη, προκειμένου να είναι δυνατή η αποστολή των δεδομένων που συλλέγουν σε έναν προορισμό, ο οποίος έχει τις δυνατότητες να τα προωθήσει σε ανώτερο επίπεδο, ώστε να είναι προσβάσιμες και αξιοποιήσιμες από έναν τελικό χρήστη. Δεδομένου ότι η ακτίνα κάλυψης των κόμβων είναι περιορισμένη, αυτοί συνεργάζονται για την προώθηση μηνυμάτων πληροφορίας στον κόμβο-προορισμό, ακολουθώντας πολυ-βηματική επικοινωνία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.

Η ανταλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στους κόμβους μπορεί να ξεκινά από ή να κατευθύνεται προς τον κόμβο-προορισμό, ο οποίος εξασφαλίζει την επικοινωνία του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με εξωτερικά δίκτυα. Εκτός αυτού, μηνύματα ενδέχεται να ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων, ικανοποιώντας τοπικές ή χρονικές απαιτήσεις του δικτύου. Επομένως, οι κόμβοι είναι δυνατόν να αξιοποιούν τα οφέλη της συνεργασίας για την αποδοτικότερη χρήση πόρων του δικτύου, όπως για παράδειγμα την κατανομή των εργασιών παρακολούθησης ανά γειτονικούς κόμβους, το συνασπισμό τους σε ομάδες, το διαμοιρασμό γνώσης για την κατάσταση του δικτύου ή τη συμπεριφορά των κόμβων κλπ.



Σχήμα 10: Γενική μορφή ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Κατά το σχεδιασμό του δικτύου και των πρωτοκόλλων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων πρέπει να ληφθεί υπόψη το περιβάλλον επικοινωνίας. Στην πλειονότητα των εφαρμογών οι κόμβοι-αισθητήρες βρίσκονται διάσπαρτοι σε εξωτερικό περιβάλλον, χωρίς επίβλεψη. Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων επιτυγχάνεται μέσω του ασύρματου μέσου διάδοσης, το οποίο μπορεί να χαρακτηρίζεται από σφάλματα λόγω των φαινομένων διάδοσης αλλά και ευαισθησία σε ενδεχόμενες σκόπιμες απειλές. Συνεπώς η επικοινωνία μεταξύ δύο οιαδήποτε κόμβων δύναται να διακοπεί, οπότε θα πρέπει να έχει ληφθεί μέριμνα για την εξασφάλιση της συνδεσιμότητας, υιοθετώντας δυναμικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Επιπρόσθετα, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι ένα δυναμικό δίκτυο, το οποίο μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και τοπικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κόμβοι ενδέχεται να εισέρχονται ή να εγκαταλείπουν απρόσμενα το δίκτυο, ως αποτέλεσμα του περιβάλλοντος, της μεταβλητότητας των ασύρματων διαύλων, των περιορισμένων ενεργειακών πόρων ή γενικότερα της αδύναμης φύσης των κόμβων αισθητήρων. Συνεπώς, στην περίπτωση ενός δικτύου που τοποθετείται, για παράδειγμα, σε εξωτερικό περιβάλλον, ενδέχεται να καταστραφούν κάποιοι κόμβοι εξαιτίας των εξωτερικών συνθηκών ή να είναι αδύνατη η επικοινωνία εξαιτίας της ύπαρξης πρόσθετων εμποδίων μεταξύ γεωγραφικά γειτονικών κόμβων. Επίσης, είναι ενδεχόμενη η εξάντληση των ενεργειακών πόρων, οπότε ο κόμβος θεωρείται «νεκρός». Τέλος, είναι πιθανό οι κόμβοι να είναι κινούμενοι, οπότε η γειτονιά του καθενός να μεταβάλλεται κατά τυχαίο τρόπο.

Συνεπώς, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες που τα καθιστούν αρκετά διαφορετικά από τα καθιερωμένα ασύρματα δίκτυα, ακόμα και από τα ad hoc και οι οποίες σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά κάθε μεμονωμένου κόμβου που συμμετέχει στο δίκτυο όσο και με τη φύση του δικτύου συνολικά. Συγκεκριμένα, οι κύριοι λόγοι που διαχωρίζουν το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων από ένα δίκτυο ad hoc είναι οι ακόλουθοι:

- Το πλήθος των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλο σε σχέση με ένα σύνηθες ad hoc δίκτυο, το οποίο μπορεί να μεταφράζεται σε αρκετές τάξεις μεγέθους
- Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι ιδιαίτερα πυκνό συνήθως
- Οι ασύρματοι κόμβοι είναι επιρρεπείς σε αστοχίες
- Η τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι έντονα τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενη
- Οι ασύρματοι κόμβοι-αισθητήρες χαρακτηρίζονται από περιορισμένες υπολογιστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες, χαμηλή μνήμη και περιορισμένη ενέργεια
- Οι ασύρματοι κόμβοι-αισθητήρες πιθανόν να μην έχουν μια καθολικά μοναδική ταυτότητα εξαιτίας του υπερβολικά μεγάλου πλήθους τους σε συνδυασμό με το αυξημένο φορτίο που συνεπάγεται (overhead)

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων κόμβων αποτελούν πρωταρχικό σχεδιαστικό παράγοντα του ιδιότυπου δικτύου, το οποίο συγκροτούν. Συγκεκριμένα, η βιωσιμότητα των εν λόγω δικτύων επιτάσσει την ικανοποίηση των ακόλουθων απαιτήσεων:

1) Αυτονομία: Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν πλήρη απουσία υποδομής. Οι θέσεις των αισθητήρων δεν είναι προκαθορισμένες, γι' αυτό και τα πρωτόκολλα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων οφείλουν να ενσωματώσουν χαρακτηριστικά αυτονομίας. Ένα αυτόνομο σύστημα ενσωματώνει τις ακόλουθες ιδιότητες, σύμφωνα με την IBM (Πρωτοβουλία της IBM για τα Αυτόνομα Υπολογιστικά Συστήματα - IBM Autonomic Computing Initiative, 2001) και τους Kephart & Chess (2003):

- *Αυτο-ρύθμιση (Self-configuration)*: Η δυνατότητα ρύθμισης και μεταβολής των ρυθμίσεων του συστήματος (από το ίδιο) αυτόματα σύμφωνα με υψηλού επιπέδου πολιτικές
- *Αυτο-βελτιστοποίηση (Self-optimization)*: Η δυνατότητα βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος
- *Αυτο-θεραπεία (Self-healing)*: Η δυνατότητα ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων του συστήματος
- *Αυτο-προστασία (Self-protection)*: Η δυνατότητα αναγνώρισης κινδύνων και προστασίας του συστήματος από αυτούς
- *Αυτο-ενημέρωση (Self-awareness)*: Η δυνατότητα αναγνώρισης των στοιχείων του, της τρέχουσας κατάστασής του, τη συνολική δυναμική του και τις συνδέσεις του με άλλα συστήματα
- *Επίγνωση του περιβάλλοντος (Environment-awareness)*: Η δυνατότητα αντίληψης και γνώσης του περιβάλλοντος.

2) Συνεργασία: Σε ένα ασύρματα δίκτυο αισθητήρων δύο κόμβοι ενδέχεται να είναι απομακρυσμένοι, ενώ η ακτίνα κάλυψης ενός κόμβου-αισθητήρα είναι αρκετά περιορισμένη, ώστε να μην είναι δυνατή η απευθείας επικοινωνία μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων του δικτύου. Από την άλλη, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν έχουν σταθερή υποδομή που να συνδέει τον κόμβο-πηγή με τον κόμβο-προορισμό. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος μπορεί να λειτουργήσει ως δρομολογητής της κίνησης που προέρχεται από γειτονικούς του κόμβους, καθώς ενσωματώνει μια υποτυπώδη μονάδα επεξεργασίας. Ο επεξεργαστής του κόμβου επιτρέπει, επίσης, την πραγματοποίηση στοιχειωδών υπολογισμών των δεδομένων που ανιχνεύει ή λαμβάνει, ώστε να μεταδίδει μόνον τα απαραίτητα ή επεξεργασμένα στοιχεία.. Συνεπώς, η επικοινωνία μεταξύ της πηγής και του προορισμού μπορεί να επιτευχθεί μέσω της συνεργασίας των ενδιαφερόμενων και κάποιων ενδιάμεσων κόμβων, ώστε η κίνηση να διέλθει από τους ενδιάμεσους μέχρι να φτάσει στον προορισμό. Η λύση αυτή απαιτεί ιδιαίτερους

χειρισμούς, ώστε να γίνεται αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου και να μην κατασπαταλούνται οι πόροι λίγων μόνο κόμβων. Επίσης, συχνά ενέχει κινδύνους, καθώς οι ενδιάμεσοι κόμβοι ενδέχεται να είναι ελαττωματικοί ή να λειτουργούν κακόβουλα, ώστε να αποπροσανατολίζουν επί τούτου την πορεία των μηνυμάτων που λαμβάνουν, δημιουργώντας περισσή κίνηση στο δίκτυο.

- 3) Ενεργειακή αποδοτικότητα των εργασιών: Οι ενεργειακοί πόροι των ασύρματων κόμβων συνήθως είναι περιορισμένοι, ενώ δεν υπάρχει δυνατότητα ανανέωσής τους. Έτσι, η διάρκεια ζωής του κόμβου και του δικτύου γενικότερα εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια των μπαταριών και τη χρήση τους. Η απότομη παύση της λειτουργίας έστω και ενός κόμβου μπορεί να έχει άμεσο αντίκτυπο στην υγιή λειτουργία του δικτύου, καθώς ενδέχεται η απουσία του συγκεκριμένου κόμβου να δημιουργήσει ισχυρές τοπολογικές μεταβολές, οι οποίες να επισύρουν εκ νέου υπολογισμό και σχεδιασμό της δρομολόγησης της διαθέσιμης κίνησης. Οι εργασίες που θεωρούνται ενεργοβόρες σε έναν κόμβο είναι η αίσθηση (sensing), η επικοινωνία και ο υπολογισμός δεδομένων, ενώ περισσότερη απαιτητική σε ενέργεια είναι η επικοινωνία [10], εννοώντας τη μετάδοση και τη λήψη πακέτων. Αξιολογώντας τη βαρύτητα της απαίτησης για χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, πληθώρα μελετών της τελευταίας δεκαετίας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για διάφορα επίπεδα της αρχιτεκτονικής των δικτύων αισθητήρων [68][69].
- 4) Χαμηλός υπολογιστικός φόρτος: Η μετάδοση και λήψη πακέτων πληροφορίας αποτελεί τον κύριο παράγοντα κατανάλωσης της ενέργειας ενός ασύρματου κόμβου. Συνεπώς, η εκτέλεση τοπικής επεξεργασίας των συλλεχθέντων δεδομένων είναι επιβεβλημένη στους κόμβους, ώστε να μεταδίδονται λιγότερα μηνύματα με ελαφρώς επεξεργασμένη πληροφορία έναντι περισσότερων με ακατέργαστη. Προς αυτήν την κατεύθυνση, έχουν προταθεί τεχνικές σύντηξης ή συνάθροισης της πληροφορίας, αλλά και συνάθροισης των κόμβων κλπ [70][71]. Εκτός αυτού, προκειμένου να εξασφαλιστούν λοιπές απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, οι κόμβοι καλούνται να εκτελούν υπολογισμούς, οι οποίοι σχετίζονται, λόγου χάρη, με την αυτονομία, τη συνεργασία, τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση στο επίπεδο της δρομολόγησης, την ασφάλεια, κλπ. Επομένως, οι κόμβοι επιφορτίζονται με αναπόφευκτους και ζωτικής σημασίας υπολογισμούς. Από την άλλη πλευρά, οι υπολογιστικές δυνατότητες είναι περιορισμένες με έναν μικροεπεξεργαστή και μνήμη RAM συνήθως της τάξης των KB. Άρα τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι που προορίζονται για τους ασύρματους κόμβους οφείλουν να χαρακτηρίζονται από χαμηλή πολυπλοκότητα, ώστε οι διαθέσιμοι πόροι να είναι επαρκείς για όλες τις απαραίτητες λειτουργίες.
- 5) Ασφάλεια: Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν ευρύ πεδίο εφαρμογών, το περιλαμβάνει εφαρμογές με ιδιαίτερες απαιτήσεις σε ασφάλεια, όπως είναι οι στρα-

τιωτικές εφαρμογές, αλλά και εφαρμογές με χαμηλότερες απαιτήσεις ασφαλείας, αλλά με περισσότερη έμφαση στην ιδιωτικότητα, όπως είναι οικιακές εφαρμογές. Σε κάθε περίπτωση, η επικοινωνία διεξάγεται μέσω του ασύρματου μέσου διάδοσης. Τόσο το περιβάλλον λειτουργίας όσο και το μέσο επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε θέματα ασφαλείας και ιδιωτικότητας της επικοινωνίας. Έτσι, είναι πιθανή η εμφάνιση κακόβουλων χρηστών στο δίκτυο, οι οποίοι δύναται να ενταχθούν ως κανονικοί κόμβοι του δικτύου ή να βρίσκονται σε κοντινή γεωγραφικά θέση με αυτό, ώστε να υποκλέπτουν πληροφορίες που μεταδίδονται μέσω του δικτύου ή να συμβάλουν στην σταδιακή απομύζηση των πόρων του. Ανάλογα πάντα με την εφαρμογή, διαφέρουν τα επιθυμητά επίπεδα ασφάλειας και εμπιστευτικότητας, αλλά σε κάθε περίπτωση οι ενδεχόμενες επιθέσεις αντιμετωπίζονται με την ενσωμάτωση μεθόδων διασφάλισης των επικοινωνιών στα πρωτόκολλα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, ιδιαίτερα σε επίπεδο πρόσβασης στο μέσο και επίπεδο δικτύου.

- 6) Αξιοπιστία: Δεδομένου ότι το δίκτυο των αισθητήρων είναι ένα ασύρματο δίκτυο, η επικοινωνία εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες διάδοσης, οι οποίες είναι τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενες. Πιο αναλυτικά, είναι πιθανό η επικοινωνία να παρουσιάζει διαλείψεις λόγω εμποδίων που παρεμβάλλονται μεταξύ γειτονικών κόμβων, λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ τους ή ακόμα και λόγω παρεμβολών από σήματα που κυκλοφορούν στον ίδιο χώρο σε γειτονική συχνότητα. Συνεπώς, η παράδοση των πακέτων που αποστέλλονται από έναν κόμβο δεν είναι εγγυημένη, άρα συχνά η παράδοσή τους ελέγχεται μέσω μηνυμάτων αναγνώρισης (acknowledgements) μεταξύ πηγής και προορισμού, τα οποία μπορεί να συνοδεύονται από εκ νέου μετάδοση των πακέτων ή όχι.
- 7) Συνδεσιμότητα: Βασική απαίτηση για τη βιωσιμότητα και τη λειτουργικότητα του δικτύου είναι η συνδεσιμότητα, υπό την έννοια ότι ο αντίστοιχος γράφος του δικτύου είναι συνδεδεμένος, ήτοι υπάρχει τουλάχιστον ένα μονοπάτι μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων που ανήκουν στο δίκτυο [73]. Το μονοπάτι αυτό μπορεί να είναι μονοβηματικό ή πολυβηματικό, δηλαδή να περιέχει περισσότερες της μιας διαδοχικές ζεύξεις. Σε αυτά τα πλαίσια ορίζεται ο βαθμός της συνδεσιμότητας του δικτύου ως εξής: το δίκτυο φέρεται να είναι συνδεσιμότητας k ή να είναι k -συνδεδεμένο, εάν η απομάκρυνση οποιωνδήποτε (το πολύ) $k-1$ κόμβων από το δίκτυο συνεπάγεται τη διατήρηση ενός συνδεδεμένου δικτύου. Η συνδεσιμότητα, επομένως, εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη μονοπατιών, ενώ επηρεάζεται από την κινητικότητα των κόμβων, την ασφάλεια, την αξιοπιστία, κλπ.
- 8) Κάλυψη: Η αποδοτική παρακολούθηση ενός φαινομένου προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκών κόμβων-αισθητήρων για την επίτευξη αποδοτικής περιοχής κάλυψης. Άμεσα συνδεδεμένος με την έννοια της κάλυψης είναι ο βαθμός κάλυψης, ο οποίος για δεδομένο σημείο αντιστοιχεί στο πλήθος των αισθητήρων των οποίων η εμβέλεια

κάλυψης περιλαμβάνει το σημείο αυτό [73]. Ανάλογα με την εφαρμογή επιδιώκεται και η εξασφάλιση του αντίστοιχου βαθμού κάλυψης. Έτσι, οι στρατιωτικές εφαρμογές προϋποθέτουν εν γένει μεγάλο βαθμό κάλυψης, ώστε η απουσία ενός κόμβου να μην επηρεάσει την κάλυψη του φαινομένου, ενώ η παρακολούθηση ενός βιότοπου είναι πιο ελαστική. Εκτός αυτού είναι δυνατό ο βαθμός κάλυψης να μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με τα σφάλματα ή τις επιθέσεις που παρατηρούνται σε μια περιοχή.

- 9) Επεκτασιμότητα: Τα δίκτυα αισθητήρων ανήκουν στη γενικότερη κατηγορία των δικτύων ad hoc. Ως τέτοια, οφείλουν να υποστηρίζουν τη δυναμική εισαγωγή νέων μελών στο δίκτυο ή την απομάκρυνση κάποιων με βάση κάποιο κριτήριο, όπως για παράδειγμα η εξάντληση των ενεργειακών τους πόρων. Εκτός αυτού, καθώς ο βασικός ρόλος του δικτύου αυτού είναι η παρακολούθηση ενός φαινομένου, αυτό συνεπάγεται συνήθως ότι η περιοχή δράσης του είναι εκτεταμένη και δύναται να επεκταθεί περαιτέρω. Έτσι ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι ικανό να φιλοξενήσει χιλιάδες ή και περισσότερους κόμβους-αισθητήρες. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας σε ένα εργοστάσιο ενδέχεται να πρέπει να επεκταθεί σε ένα νέο κτίριο. Τότε, το υπάρχον δίκτυο των αισθητήρων είναι επιθυμητό να ενσωματωθεί με το νέο και μάλιστα να υποστηρίζει πλήθος ασύρματων κόμβων.

4.4 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι ασύρματοι κόμβοι ενός δικτύου αισθητήρων μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως ενδιάμεσοι κόμβοι είτε ως κόμβοι-προορισμοί. Οι πρώτοι επιφορτίζονται με την παρακολούθηση των φαινομένων και την προώθηση μηνυμάτων, είτε δικών τους είτε άλλων κόμβων, προς τον προορισμό. Οι κόμβοι-προορισμοί συνήθως δεν επιφορτίζονται με καθήκοντα αίσθησης, αλλά με την προώθηση των πληροφοριών που τους διοχετεύει το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σε έναν κόμβο διαχείρισης εργασιών μέσω απευθείας σύνδεσης, μέσω του δικτύου, μέσω δορυφορικών επικοινωνιών κλπ.

Η στοίβα πρωτοκόλλων που χαρακτηρίζει έναν κόμβο, είτε αισθητήρα είτε προορισμό, εμφανίζεται στο Σχήμα 11 και προσφέρει τα μέσα για την κάλυψη εν γένει των απαιτήσεων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων [10]. Συγκεκριμένα, η στοίβα πρωτοκόλλων επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, τη συνεργασία μεταξύ τους, την επικοινωνία πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση των κόμβων, όσον αφορά την ισχύ, τη θέση τους, την εκτέλεση των εργασιών. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η στοίβα δομείται οριζόντια από τα εξής:

- Το φυσικό στρώμα: Είναι υπεύθυνο για την επιλογή της συχνότητας, την ανίχνευση σήματος, τη διαμόρφωση και την κρυπτογράφηση. Βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος.
- Το στρώμα ζεύξης δεδομένων: Οι αρμοδιότητες του στρώματος ζεύξης δεδομένων είναι η πολυπλεξία των ροών δεδομένων, η ανίχνευση πλαισίων δεδομένων, η πρόσβαση στο μέσο και ο έλεγχος σφαλμάτων. Εφόσον το περιβάλλον μπορεί να είναι αρκετά θορυβώδες και οι κόμβοι-αισθητήρες να είναι κινούμενοι, το πρωτόκολλο MAC πρέπει να φροντίζει για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων μεταξύ μηνυμάτων γειτονικών κόμβων.
- Το στρώμα δικτύου: Ενώ το στρώμα ζεύξης δεδομένων εξασφαλίζει τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν δύο κόμβοι μεταξύ τους, το στρώμα δικτύου επιλέγει με ποιον κόμβο θα επιχειρηθεί επικοινωνία. Σε αυτό το στρώμα εκτελείται η βασική λειτουργία της δρομολόγησης. Βασικός σχεδιαστικός παράγοντας είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα, ενώ λοιποί παράγοντες εξαρτώνται από τις ιδιότητες και τις δυνατότητες των κόμβων.
- Το στρώμα μεταφοράς: Το στρώμα αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν το σύστημα απαιτείται να επικοινωνήσει με εξωτερικά συστήματα, οπότε φροντίζει τη διατήρηση της ροής των δεδομένων, εφόσον η εφαρμογή το απαιτεί.
- Το στρώμα εφαρμογής: Το στρώμα εφαρμογής είναι εκείνο που κρύβει την πολυπλοκότητα των χαμηλότερων στρωμάτων, ώστε να είναι διαφανή ως προς το χρήστη της εφαρμογής. Πλήθος εφαρμογών μπορούν να αναπτυχθούν και να φιλοξενηθούν σε αυτό το στρώμα.



Σχήμα 11: Γενικευμένη στοιβή πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων αισθητήρων [72]

Επιπρόσθετα, η στοίβα δομείται από κάθετα επίπεδα, τα οποία βοηθούν στο συντονισμό των κόμβων ως προς την εργασία της αίσθησης και στη συνολική ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, ως εξής:

- Το επίπεδο διαχείρισης ισχύος: Είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της χρήσης της ενέργειας των κόμβων. Για παράδειγμα, ένας κόμβος-αισθητήρας μπορεί να απενεργοποιήσει το δέκτη του μετά τη λήψη ενός μηνύματος. Επίσης, είναι πιθανή η αναγνώριση χαμηλών επιπέδων ενέργειας και η ενημέρωση των γειτονικών κόμβων για τη διακοπή της συμμετοχής στη δρομολόγηση. Φυσικά αυτό εξαρτάται από το εκάστοτε πρωτόκολλο δρομολόγησης.
- Το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας: Αυτό το επίπεδο επιφορτίζεται με την καταγραφή της κίνησης και της εκάστοτε θέσης του κόμβου ούτως ώστε να είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή μία τουλάχιστον διαδρομή προς τον προορισμό, συνδυάζοντας τις πληροφορίες που συλλέγει ο κόμβος για τους γειτονικούς του.
- Το επίπεδο διαχείρισης εργασιών: Σε αυτό το επίπεδο καθορίζονται και προγραμματίζονται εργασίες που πραγματοποιούνται από κοινού από τους κόμβους, όπως είναι η εργασία της αίσθησης. Ένας τέτοιος προγραμματισμός συμβάλλει στην αποδοτικότερη και οικονομικότερη χρήση των πόρων του δικτύου, καθώς δεν είναι απαραίτητο να ελέγχουν το περιβάλλον όλοι οι κόμβοι ταυτοχρόνως, αλλά μόνον ορισμένοι κάθε φορά, ώστε να εξοικονομείται ενέργεια συνολικά.

4.5 Δρομολόγηση στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η δρομολόγηση είναι διαδικασία κατά την οποία το δίκτυο καθορίζει τα μονοπάτια (διαδρομές) μέσω των οποίων τα μηνύματα που προέρχονται από τους κόμβους-αισθητήρες φτάνουν στον προορισμό. Η δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζει έντονες προκλήσεις, εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους που τα διαχωρίζουν από τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα ad hoc ή δίκτυα επικοινωνιών. Κατ' αρχάς, τα δίκτυα των αισθητήρων παρουσιάζουν εγγενείς ιδιαιτερότητες, όπως αναφέρονται στην ενότητα 4.2 και 4.3 και οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Εστιάζοντας το επίπεδο δικτύου, σημαντικά θέματα, τα οποία επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι τα ακόλουθα:

- Η ενεργειακή κατανάλωση: Οι πλέον ενεργοβόρες διεργασίες των ασύρματων κόμβων είναι οι διεργασίες μετάδοσης και λήψης πακέτων μηνυμάτων. Από την άλλη πλευρά, οι κόμβοι καλούνται να ανταλλάσσουν μηνύματα ή να εκπέμπουν μηνύματα ευρυεκπομπής για τον προσδιορισμό των γειτόνων τους. Ανάλογα με τον τύπο του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, τα μηνύματα αυτά μπορεί να αφορούν πληροφορίες θέσης ή περιεχομένου δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η επικοινωνία μεταξύ γειτονικών κόμβων. Συνεπώς, το πρωτόκολλο

δρομολόγησης καλείται να εξασφαλίζει την ελάχιστη δυνατή ανταλλαγή μηνυμάτων.

- Η επεκτασιμότητα: Προκειμένου να υποστηρίζεται η εύκολη επεκτασιμότητα του δικτύου και να είναι δυνατή η παρακολούθηση εκτεταμένων περιοχών, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να είναι πλήρως κατανεμημένα. Αυτό σημαίνει ότι το πρωτόκολλο πρέπει να βασίζονται σε ελάχιστη γνώση της τοπολογίας του δικτύου, ιδανικά περιορισμένη σε μια γειτονιά γύρω από αυτόν, ώστε να είναι επεκτάσιμο.
- Η συνάφεια των δεδομένων: Κατά την εγκατάσταση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, πολλοί κόμβοι τοποθετούνται αρκετά κοντά μεταξύ τους, ούτως ώστε να συλλέγουν παρόμοια δεδομένα. Συνεπώς, πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης λαμβάνουν υπόψη τη συνάφεια των δεδομένων, προκειμένου να έχουν ενεργειακά οφέλη.
- Η διευθυνσιοδότηση: Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης βασίζονται στις μοναδικές διευθύνσεις που αποδίδονται στους κόμβους του δικτύου. Καθώς όμως το δίκτυο των αισθητήρων μπορεί να είναι αρκετά πυκνό, ενώ οι μοναδικές διευθύνσεις για τους κόμβους συνεπάγονται και σημαντικό επιπλέον φορτίο μηνυμάτων, το σχήμα αυτό στην υπάρχουσα μορφή του καθίσταται ακατάλληλο για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.
- Αντοχή και ασφάλεια: Οι χαμηλές προδιαγραφές των κόμβων, ως αποτέλεσμα του χαμηλού κόστους κατασκευής, σε συνδυασμό με την εγκατάστασή τους συχνά σε εξωτερικά περιβάλλοντα, εγκυμονούν σφάλματα ή αστοχίες. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης οφείλει να είναι ανθεκτικό σε τέτοιου είδους εξελίξεις και να φροντίζει για την ασφαλή παράδοση ακριβούς πληροφορίας.
- Τοπολογία: Η τοπολογία του δικτύου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη, ενώ οι κόμβοι ενδέχεται να έχουν πλήρη ή μερική γνώση αυτής. Συνήθως, επιδιώκεται ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων δρομολόγησης που απαιτούν μερική σχετική γνώση των γειτόνων ενός κόμβου. Σε αντίθεση με τα τυπικά δίκτυα, η πλειονότητα των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων απαιτεί τη ροή των συλλεχθέντων πληροφοριών από πολλαπλές πηγές σε έναν συγκεκριμένο, κατά κανόνα, προορισμό. Συνεπώς, η γνώση της γειτονιάς είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό διαδρομών προς τον προορισμό.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης στη βιβλιογραφία, στοχεύοντας στην ικανοποίηση των ανωτέρω χαρακτηριστικών ή εστιάζοντας σε κάποια από αυτά. Τα πρωτόκολλα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μπορούν εν γένει να κατηγοριοποιηθούν σε *δεδομενο-κεντρικά, βασισμένα στη θέση, ιεραρχικά και βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας* [72][74].

4.5.1 Δεδομενο-κεντρικά και Επίπεδης Αρχιτεκτονικής Πρωτόκολλα

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.5, είναι αδύνατον να αποδοθούν μοναδικές διευθύνσεις σε κάθε κόμβο του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Επιπρόσθετα, οι απαιτήσεις υψηλού επιπέδου των τελικών χρηστών των πληροφοριών που συλλέγουν οι ασύρματοι κόμβοι εστιάζονται σε δεδομένα που προέρχονται από αισθητήρες που καλύπτουν μια συγκεκριμένη περιοχή και όχι στην πληροφορία που συλλέγει ένας μεμονωμένος αισθητήρας. Αξιοποιώντας αυτό το γεγονός, τα δεδομενο-κεντρικά πρωτόκολλα βασίζονται σε ιδιότητες δεδομένων, αντί για ταυτότητες κόμβων, ούτως ώστε να ερωτούνται οι ιδιότητες και όχι οι κόμβοι.

Ευρέως γνωστά πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι τα ακόλουθα:

1. Πρωτόκολλο πλημμύρας (flooding) [75], το οποίο είναι το απλούστερο πρωτόκολλο για την προώθηση πακέτων, με βάση το οποίο κάθε κόμβος προωθεί κάθε πακέτο προς όλους τους γείτονές του μέχρι αυτό να φτάσει σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Παρά την απλότητά του, το πρωτόκολλο έχει εγγενή μειονεκτήματα, όπως κατασπατάληση των ενεργειακών πόρων, παραλαβή του ίδιου μηνύματος από πολλαπλές διαδρομές και παραλαβή όμοιας πληροφορίας από κοντινούς κόμβους-αισθητήρες.
2. Πρωτόκολλο gossiping [75], το οποίο αντιμετωπίζει το πρόβλημα των πολλαπλών αντιγράφων του ίδιου μηνύματος, καθώς κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία έναν μόνο κόμβο για την αποστολή πακέτου, αλλά κατ' αυτόν τον τρόπο εισάγεται σημαντική καθυστέρηση μέχρι το μήνυμα να φτάσει στον τελικό του προορισμό.
3. Πρωτόκολλα αισθητήρων για πληροφορία μέσω διαπραγματεύσεων (Sensor Protocols for Information via Negotiation – SPIN) [76]. Πρόκειται για οικογένεια πρωτοκόλλων, που χαρακτηρίζονται εν γένει από τριμερή διαπραγμάτευση. Εάν ένας κόμβος έχει δεδομένα προς αποστολή, στέλνει ένα σχετικό μήνυμα προς ενημέρωση των γειτόνων του, στο οποίο αποκρίνονται οι ενδιαφερόμενοι. Εφόσον βρεθούν ενδιαφερόμενοι, ο κόμβος αποστέλλει τα δεδομένα που συνέλεξε.
4. Πρωτόκολλο προσανατολισμένης διάχυσης (directed diffusion) [77][78], το οποίο ενδείκνυται όταν ο χρήστης της εφαρμογής υψηλού επιπέδου ενδιαφέρεται για συγκεκριμένου τύπου πληροφορία. Το ενδιαφέρον του χρήστη εκδηλώνεται μέσω μηνυμάτων flooding στο δίκτυο, ενώ οι κόμβοι που συλλέγουν σχετική πληροφορία αποκρίνονται ακολουθώντας την αντίστροφη διαδρομή. Δεδομένου ότι σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνονται πολλαπλές διαδρομές προς τον προορισμό, αυτός επιλέγει μια διαδρομή, στέλλοντας ξανά το μήνυμα ενδιαφέροντος μέσω αυτής.
5. Πρωτόκολλο δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη την ενέργεια (energy-aware routing protocol) [79], με βάση το οποίο διατηρείται ένα σύνολο «καλών» διαδρομών προς τον προορισμό ούτως, ώστε να επιλέγεται πιθανοτικά ένα κάθε φο-

ρά, γεγονός που σημαίνει ότι δεν απομυζείται η ενέργεια των κόμβων που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη διαδρομή.

6. Δρομολόγηση φήμης (rumor routing) [80], στην οποία κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα με τα πιθανά γεγονότα (events) και πληροφορία δρομολόγησης σε αυτά. Εάν ένας κόμβος επιθυμεί ενημέρωση περί ενός γεγονότος, αλλά δε διατίθεται πληροφορία δρομολόγησης, τότε ο κόμβος δημιουργεί ένα ερώτημα, το οποίο προωθείται τυχαία, μέχρι να φτάσει στον προορισμό ή να λήξει η διάρκεια ζωής του. Σε αυτήν την περίπτωση επιχειρείται αποστολή εκ νέου ή δρομολόγηση flooding.
7. Δρομολόγηση βασισμένη στην παράγωγο (gradient-based routing) [81], στην οποία, ακολουθώντας τις αρχές της προσανατολισμένης διάχυσης, τα μηνύματα ενδιαφέροντος διαδίδονται στο δίκτυο μέσω flooding, αλλά διατηρείται το πλήθος των βημάτων προς τον προορισμό. Έτσι, κατά τον προσδιορισμό της διαδρομής προς τον προορισμό, επιλέγεται ο γείτονας κόμβος του οποίου η διαφορά βημάτων από τον προορισμό σε σχέση με τον τρέχοντα κόμβο είναι μέγιστη.
8. Περιορισμένη ανιστροπική δρομολόγηση διάχυσης (Constrained Anisotropic Diffusion Routing – CADR) [82], η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί γενίκευση της προσανατολισμένης διάχυσης. Το πρωτόκολλο CADR χρησιμοποιεί κριτήρια κέρδους πληροφορίας και κόστους επικοινωνίας για την επιλογή διαδρομών. Το κόστος επικοινωνίας βασίζεται στην ενεργειακή κατανάλωση και την απόσταση των κόμβων που επικοινωνούν. Επίσης, επιτρέπει την ενεργοποίηση των κόμβων που συλλέγουν «ενδιαφέρουσα» πληροφορία και μόνο εκείνων των σημείων που διαθέτουν χρήσιμη πληροφορία ισορροπημένη με το κόστος επικοινωνίας.

4.5.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα δεδομενο-κεντρικά πρωτόκολλα οδηγούν σε μια επίπεδη αρχιτεκτονική, σύμφωνα με την οποία οι πληροφορίες που συλλέγουν όλοι οι κόμβοι-αισθητήρες του δικτύου προωθούνται προς τον κόμβο-προορισμό. Αυτό σημαίνει ότι, αφενός, παρατηρείται υψηλή κίνηση κοντά στον προορισμό, το οποίο για μεγάλης κλίμακας δίκτυα μπορεί να συνεπάγεται απόλεια πακέτων, και, αφετέρου, ότι οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στον προορισμό, επιφορτίζονται με τη λήψη και μετάδοση σημαντικού αριθμού πακέτων. Καθώς οι λειτουργίες εκπομπής/λήψης είναι οι πλέον ενεργοβόρες του κόμβου, η προώθηση της κίνησης προς τον προορισμό οδηγεί σε ενεργειακή απομύζηση των κόμβων-γειτόνων του προορισμού. Συνεπώς, ακόμα και αν θεωρηθεί ότι ο κόμβος-προορισμός συνδέεται σταθερά με τάση τροφοδοσίας (π.χ. του ηλεκτρικού δικτύου), η παύση λειτουργίας των γειτονικών κόμβων του θα προκαλέσουν κενό στην επικοινωνία μεταξύ αυτού και των κόμβων-αισθητήρων, το οποίο καταλήγει σε σύντομη διάρκεια ζωής του δικτύου των αισθητήρων.

Το πρόβλημα αυτό καλούνται να αντιμετωπίσουν τα ιεραρχικά πρωτόκολλα. Τα πρωτόκολλα αυτού του είδους δημιουργούν πολυ-επίπεδη αρχιτεκτονική, καθώς οι κόμβοι συναθροίζονται σε ομάδες, ενώ για κάθε ομάδα ορίζεται ένας επικεφαλής, ο οποίος επιφορτίζεται με την προώθηση των δεδομένων που συλλέγει η ομάδα του στον κόμβο-προορισμό. Καθώς είναι πιθανό οι κόμβοι επικεφαλής να εκτελούν λειτουργίες σύντηξης ή συνάθροισης δεδομένων, εξοικονομείται ενέργεια από την προώθηση λιγότερων πακέτων στον προορισμό, ενώ δεν υποβαθμίζεται η ποιότητα των υπηρεσιών υψηλού επιπέδου. Στη βιβλιογραφία έχει προταθεί πληθώρα ιεραρχικών πρωτοκόλλων, τα οποία εστιάζουν στο βέλτιστο σχηματισμό ομάδων, βασισμένα σε ενεργειακά ή και άλλα κριτήρια. Πλέον διαδεδομένα ιεραρχικά πρωτόκολλα θεωρούνται:

1. Προσαρμοστική ιεραρχία συνάθροισης χαμηλής ενέργειας (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy – LEACH) [83], κατά την οποία οι κόμβοι του δικτύου αυτο-οργανώνονται σε ομάδες, προκειμένου να κατανεμηθεί ισότιμα η ενεργειακή κατανάλωση ανά τους κόμβους. Η επιλογή των ομάδων και των κόμβων επικεφαλής αυτών είναι δυναμική σε συνδυασμό με τεχνικές σύντηξης δεδομένων εξασφαλίζουν τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης.
2. Ενεργειακά αποδοτική συνάθροιση στα συστήματα πληροφοριών αισθητήρων (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems – PEGASIS) [84], κατά την οποία οι κόμβοι σχηματίζουν μια αλυσίδα, ούτως ώστε κάθε κόμβος να ανταλλάσσει μηνύματα με κοντινούς γείτονες. Τα δεδομένα μεταφέρονται από κόμβο σε κόμβο και υφίστανται σύντηξη, ενώ τελικά ο αρμόδιος κόμβος τα στέλνει στον προορισμό. Οι κόμβοι χρήζονται κατά σειρά αρμόδιοι, ώστε να μειώνεται η μέση ενέργεια που καταναλώνεται από τους κόμβους.
3. Ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δικτύου αισθητήρων ευαίσθητο σε κατώφλι (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol – TEEN) [85], το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο LEACH για τη δημιουργία των ομάδων, ενώ προσθέτει τη λειτουργικότητα της αντίδρασης σε απότομες αλλαγές, βασιζόμενο σε δύο κατώφλια, το αυστηρό και το χαλαρό. Όταν ο κόμβος ανιχνεύσει για πρώτη φορά υπέρβαση του αυστηρού κατωφλίου, ενεργοποιεί τον –μέχρι τότε απενεργοποιημένο- πομποδέκτη του και ενημερώνει τον κόμβο επικεφαλής σχετικά. Εφόσον, στη συνέχεια υπάρχει μεταβολή σε σχέση με την προηγούμενη καταγεγραμμένη τιμή μεγαλύτερη ή ίση με το χαλαρό κατώφλι, ο κόμβος ενημερώνει τον επικεφαλής της ομάδας.
4. Προσαρμοστικό περιοδικό ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δικτύου αισθητήρων ευαίσθητο σε κατώφλι (Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol – APTEEN) [86], οποίο παρέχει περιοδικά μηνύματα για την ενημέρωση του φαινομένου που παρακολουθείται, εκτός από τις προειδοποιήσεις σε σχεδόν πραγματικό χρόνο του TEEN.

4.5.3 Γεωγραφική Δρομολόγηση

Τα πρωτόκολλα γεωγραφικής δρομολόγησης ή βασισμένα στη θέση, χρησιμοποιούν τη γεωγραφική θέση των κόμβων-αισθητήρων υπό τη μορφή συνήθως γεωγραφικών συντεταγμένων για τη δρομολόγηση των πακέτων. Καθώς τα φαινόμενα υπό παρατήρηση είναι στενά συνδεδεμένα με την περιοχή όπου λαμβάνουν χώρα, είναι λογικό να υποθεθεί ότι διατίθεται πληροφορία θέσης των κόμβων. Αυτή μπορεί να παρέχεται από έναν δέκτη GPS, ενσωματωμένο πάνω στον κόμβο, προϋποθέτοντας κόμβους με υψηλά αποθέματα ενέργειας, ιδανικά τροφοδοτούμενους από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Επιπρόσθετα, ενδέχεται κάποιοι κόμβοι, «αγκυροβολημένοι» (anchor nodes), να είναι σταθεροί και εξοπλισμένοι με δέκτη GPS, ενώ οι λοιποί κόμβοι του δικτύου να είναι σταθεροί ή κινητοί χωρίς συσκευή εντοπισμού θέσης. Τότε, οι κόμβοι εφαρμόζουν έναν αλγόριθμο εντοπισμού, βασισμένοι στις συντεταγμένες των «αγκυροβολημένων» κόμβων, ορίζοντας ένα ευρύ πεδίο έρευνας γύρω από τους αλγορίθμους εντοπισμού [87]. Τέλος, στη χειρότερη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι όλοι οι κόμβοι είναι σταθεροί, χωρίς ενσωματωμένο δέκτη GPS, αλλά είναι προγραμματισμένοι εκ των προτέρων με τις συντεταγμένες θέσης τους.

Ευρέως γνωστά πρωτόκολλα βασισμένα στη θέση είναι τα εξής:

1. Άπληστη περιμετρική δρομολόγηση άνευ καταστάσεων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Sensor Networks – GPSR) [88], η οποία εγγυάται την εύρεση διαδρομής προς τον προορισμό, χρησιμοποιώντας μόνο γνώση των θέσεων των γειτόνων σε κάθε κόμβο. Ο αλγόριθμος GPSR χρησιμοποιεί δύο μεθόδους δρομολόγησης, ήτοι την «άπληστη», κατά την οποία επιλέγονται οι κοντινότεροι γείτονες προς τον προορισμό, και την «περιμετρική», η οποία εξασφαλίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου σε περίπτωση που ο κοντινότερος (στον προορισμό) κόμβος είναι απροσπέλαστος.
2. Δίκτυο επικοινωνίας ελάχιστης ενέργειας (Minimum Energy Communication Network – MECN) και μικρό MECN (small MECN – SMECN) [89][90]. Το πρωτόκολλο MECN είναι ένα βασισμένο στη θέση πρωτόκολλο, το οποίο δημιουργεί ένα ενεργειακά αποδοτικό υπο-δίκτυο ενός ασύρματου δικτύου ad hoc, θεωρώντας ότι η ισχύς εκπομπής κάθε κόμβου προς τους γείτονές του, όπως αυτοί ορίζονται μέσα στην ακτίνα κάλυψης υπό μέγιστη ισχύ, είναι ελάχιστη. Το πρωτόκολλο SMECN λαμβάνει υπόψη τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες για τη μεταφορά μηνυμάτων με ελάχιστη χρήση ενέργειας ανάμεσα σε όλες τις διαδρομές που ενώνουν δύο κόμβους.
3. Γεωγραφική προσαρμοστική πιστότητα (Geographic Adaptive Fidelity – GAF) [91], στην οποία κάθε κόμβος χρησιμοποιεί πληροφορία θέσης προκειμένου να συσχετιστεί με ένα εικονικό πλέγμα, μέσα στο οποίο όλοι οι κόμβοι είναι ισοδύναμοι από πλευράς προώθησης πακέτων. Έτσι, οι κόμβοι εντός του πλέγματος

συντονίζονται μεταξύ τους όσον αφορά τον προσδιορισμό των κόμβων που θα είναι ενεργοί ή σε λειτουργία αδρανείας και για πόσο χρονικό διάστημα.

4. Γεωγραφική και ενεργειακά ενήμερη δρομολόγηση (Geographic and Energy-Aware Routing – GEAR) [92], κατά την οποία επιχειρείται η αποστολή πακέτων σε μια περιοχή του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, αντί για έναν μεμονωμένο κόμβο. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί πληροφορία θέσης και ενεργειακής κατανάλωσης για την επιλογή του επόμενου κόμβου για την προώθηση πακέτων, προκειμένου να εξισορροπήσει την ενεργειακή κατανάλωση και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

4.5.4 Πρωτόκολλα βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Η παρούσα κατηγορία πρωτοκόλλων εστιάζει στην παροχή υπηρεσιών που εγγυώνται ένα επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Μέχρι στιγμής, τα περισσότερα πρωτόκολλα που έχουν παρουσιαστεί δίνουν έμφαση στην κατά το δυνατόν ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Δεδομένου όμως ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαρακτηρίζονται από ευρύ πεδίο εφαρμογών, είναι πιθανό ότι οι απαιτήσεις των εφαρμογών είναι αρκετά αυστηρές όσον αφορά συγκεκριμένα μεγέθη. Έτσι, είναι ενδεχόμενο να τίθενται αυστηροί περιορισμοί για την καθυστέρηση, τη διακύμανση φάσης (jitter), τη ρυθμο-απόδοση, την αξιοπιστία κλπ. Συνήθως, οι απαιτήσεις των εφαρμογών εκφράζονται υπό τη μορφή μετρικών δρομολόγησης, οι οποίες συνδυάζονται για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής ή του πιο συμφέροντος γείτονα, ανάλογα με τη μορφή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά πρωτόκολλα βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας:

1. Δρομολόγηση ακολουθιακής ανάθεσης (Sequential Assignment Routing – SAR) [93], η οποία εστιάζει στην ελαχιστοποίηση της σταθμισμένης μετρικής QoS κατά τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Η σταθμισμένη μετρική QoS υπολογίζεται ως το γινόμενο μιας αθροιστικής QoS μετρικής και ενός συντελεστή βαρύτητας, ο οποίος σχετίζεται με την προτεραιότητα των εκάστοτε πακέτων.
2. Προώθηση διαδρομής ελάχιστου κόστους (Minimum Cost Path Forwarding) [94], η οποία προτείνει ένα σχήμα βασισμένο στην έννοια του κόστους πεδίου, προκειμένου να υπολογίσει το κόστος κάθε κόμβου προς τον προορισμό με ένα μόνο μήνυμα. Το κόστος αυτό μπορεί να έχει τη μορφή του πλήθους των βημάτων, της καταναλωθείσας ενέργειας, της καθυστέρησης κλπ.
3. Πρωτόκολλο SPEED [95], το οποίο εισάγει την έννοια της ταχύτητας (speed) παράδοσης των μηνυμάτων για την υποστήριξη μιας υπηρεσίας επικοινωνιών ελαφρά πραγματικού χρόνου, θεωρώντας ότι αυτή είναι ανάλογη με την απόσταση των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, κάτι που δεν ισχύει στα παραδοσιακά δίκτυα. Το πρωτόκολλο SPEED ενσωματώνει, επίσης, πληροφορίες γεωγραφικής θέσης, για να λάβει εντοπισμένες αποφάσεις δρομολόγησης.

Οι ανωτέρω τεχνικές δρομολόγησης αποτελούν πρωτόκολλα-σταθμούς, τα οποία ενέπνευσαν πληθώρα μελετών και εργασιών, που βασίστηκαν σε αυτά και πρότειναν τρόπους βελτίωσής τους. Η περαιτέρω ανάπτυξή τους εκτείνεται πέραν του σκοπού της παρούσας διατριβής.

4.5.5 Δρομολόγηση RPL

Η εμφάνιση πολλαπλών μεμονωμένων δικτύων αποτελούμενα από μεγάλο πλήθος «ευφύων αντικειμένων», τα οποία είναι επιθυμητό να υποστηρίζουν IP, οδήγησε σταδιακά στην έννοια του IoT, το επόμενο κύμα του Διαδικτύου. Τα δίκτυα αυτά, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ανήκουν στην κατηγορία των «Χαμηλής Ισχύος και Με Απώλειες Δικτύων» (Low power and Lossy Networks – LLNs). Στα πλαίσια αυτά, η Ομάδα Έργου Μηχανικής του Διαδικτύου (Internet Engineering Task Force – IETF), λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις των δικτύων ευφύων αντικειμένων, οργάνωσε μια Ομάδα Εργασίας προκειμένου να προτυποποιήσει μια λύση δρομολόγησης βασισμένη στο IPv6, οδηγώντας στο σχηματισμό της Ομάδας Εργασίας «Δρομολόγηση πάνω από Χαμηλής Ισχύος και με Απώλειες Δίκτυα» (Routing Over Low power and Lossy – ROLL – networks) το 2008. Η συμβατότητα με το IPv6 χαρίζει στο πρωτόκολλο τη δυνατότητα διευθυνσιοδότησης, καθώς χαρακτηρίζεται από ευρεία κλίμακα διευθύνσεων, ενώ ενσωματώνει τη δυνατότητα αυτο-ρύθμισης. Το αποτέλεσμα των εργασιών της συγκεκριμένης ομάδας είναι το *Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για τα LLNs (Routing Protocol for LLNs – RPL)*. Το RPL λειτουργεί στο επίπεδο IP σύμφωνα με την αρχιτεκτονική IP, επιτρέποντας τη δρομολόγηση πάνω από διάφορα επίπεδα ζεύξης [96].

Κατά το σχεδιασμό του RPL λήφθηκαν υπόψη οι απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών, όπως αστικά δίκτυα που συμπεριλαμβάνουν ευφύες πλέγμα (smart grid), εργοστασιακό, οικιακό και κτιριακό αυτοματισμό, ώστε να υποστηρίζονται πολλαπλές εφαρμογές και να καλύπτονται οι ανάγκες του IoT. Προκειμένου να εξυπηρετήσει ετερογενείς εφαρμογές, το RPL παρέχει έναν ευέλικτο τρόπο σχηματισμού ενός βασικού παράγοντα, ενώ πρόσθετα χαρακτηριστικά μπορούν να ενεργοποιηθούν όποτε αυτά χρειάζονται, ακολουθώντας σχετικές προδιαγραφές.

Το RPL είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης IPv6 Διανύσματος Απόστασης (βλ. Παράρτημα Β), σχεδιασμένο για LLNs, το οποίο καθορίζει τον τρόπο σχηματισμού ενός Ακυκλικού Κατευθυνόμενου Γράφου Προσανατολισμένου στον Προορισμό (Destination Oriented Directed Acyclic Graph – DODAG) με βάση την αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο μετρικών δρομολόγησης και περιορισμών. Οι μετρικές δρομολόγησης αντιστοιχούν σε βαθμωτά μεγέθη, που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της καλύτερης διαδρομής. Οι περιορισμοί είναι πρόσθετα κριτήρια, με βάση τα οποία αποκλείονται ζεύξεις ή

κόμβοι που δεν τα ικανοποιούν. Η αντικειμενική συνάρτηση συνίσταται από το συνδυασμό μετρικών δρομολόγησης και περιορισμών.

Ο DODAG αποτελείται από ένα σύνολο κορυφών που αντιστοιχούν σε κόμβους και ακμών που αντιστοιχούν σε ζεύξεις μεταξύ γειτονικών κόμβων, οι οποίες διαθέτουν προσανατολισμό ούτως, ώστε να μη δημιουργούνται βρόχοι, και οι οποίες είναι προσανατολισμένες προς έναν ή περισσότερους κόμβους-ρίζες (root nodes). Δεδομένου ότι ο γράφος είναι ακυκλικός, εξ ορισμού θα πρέπει να υπάρχει ένας κόμβος-ρίζα, στον οποίο θα τερματίζονται όλες οι διαδρομές και ο οποίος δε διαθέτει εξερχόμενη ακμή.

Η δόμηση του DODAG ξεκινά από τον ή τους κόμβο(-ους)-ρίζα και προς τούτο το πρωτόκολλο καθορίζει τρία νέα μηνύματα ελέγχου ICMPv6:

- Το μήνυμα Αιτήματος Πληροφορίας DODAG (DODAG Information Solicitation – DIS)
- Το μήνυμα Αντικειμένου Πληροφοριών DODAG (DODAG Information Object – DIO)
- Το μήνυμα Αντικειμένου Διαφήμισης Προορισμού DODAG (DODAG Destination Advertisement Object – DAO)

Ο κόμβος-ρίζα ξεκινά τη διαφήμιση της πληροφορίας σχετικά με το γράφο εκπέμποντας ένα μήνυμα DIO. Οι γειτονικοί κόμβοι λαμβάνουν και επεξεργάζονται το μήνυμα DIO και αποφασίζουν αν θα συμμετέχουν στο γράφο ή όχι, με βάση την αντικειμενική συνάρτηση, τα χαρακτηριστικά του γράφου και πιθανώς την τοπική πολιτική. Εφόσον ένας κόμβος συμμετέχει στο γράφο, έχει διαδρομή προς τον κόμβο-ρίζα, ο οποίος είναι ο κόμβος-γονέας αυτού του κόμβου. Ο κόμβος υπολογίζει μια τιμή, που ονομάζεται «βαθμός» (rank) και αντιστοιχεί στις συντεταγμένες αυτού στην ιεραρχία του γράφου. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζει τον τρόπο κατά τον οποίο οι μετρικές δρομολόγησης, οι στόχοι βελτιστοποίησης και οι σχετικές συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του «βαθμού». Ο «βαθμός» υπολογίζεται κατά τρόπο, ώστε να αυξάνεται στην κατεύθυνση προς τα φύλλα και να μειώνεται προς τη ρίζα. Εάν ο κόμβος πρόκειται να λειτουργήσει ως δρομολογητής κίνησης, δηλαδή δεν είναι κόμβος-φύλλο που απλά συμμετέχει στο γράφο, ξεκινά να διαφημίζει το γράφο μέσω μηνυμάτων DIO στους γείτονές του, έχοντας ενσωματώσει τη νέα πληροφορία. Οι γείτονες επαναλαμβάνουν τη διαδικασία και επιλέγουν γονέα, προστίθενται στη διαδρομή και στέλνουν διαφημιστικά μηνύματα DIO. Η διαδικασία συνεχίζεται και ο γράφος συντίθεται σταδιακά με την προσθήκη ακμών από τη ρίζα μέχρι τα φύλλα, όπου ολοκληρώνεται η διαδικασία. Κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος του γράφου έχει σημείου εισόδου προς το γονέα του ακολουθώντας ένα σχήμα βήμα-βήμα (hop-by-hop), ενώ οι κόμβοι-φύλλα μπορούν να αποστείλουν ένα μήνυμα προς τον κόμβο-ρίζα, προωθώντας το στο γονέα τους.

Το μήνυμα DIS αποστέλλεται για την ανίχνευση γράφων. Συγκεκριμένα, ένας κόμβος που ενεργοποιείται σε περιβάλλον όπου υπάρχει ήδη γράφος αποστέλλει μήνυμα DIS προ-

κειμένου να ζητήσει πληροφορία σχετικά με το γράφο από τους γείτονές του, οι οποίοι ενδεχομένως ανταποκριθούν με μηνύματα DIO.

Τέλος, τα μηνύματα DAO χρησιμεύουν για να διαφημίσουν την πρόσβαση στους κόμβους-φύλλα, σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η δρομολόγηση προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα μηνύματα DAO ενδέχεται να αποσταλούν από κόμβους που συμμετέχουν στο γράφο προς τους γονείς τους ή μετά από σχετική ένδειξη στα μηνύματα DIO. Όταν ένας κόμβος λάβει το μήνυμα DAO, προσθέτει μια σχετική εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησής του. Προαιρετικά, μπορεί να συλλέξει πληροφορία από πολλούς κόμβους και να στείλει ένα μήνυμα DAO στο γονέα του. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν φτάσει μέχρι τον κόμβο-ρίζα.

Τέλος, ο γράφος που δομεί το RPL αποτελεί μια λογική τοπολογία δρομολόγησης πάνω από το φυσικό δίκτυο, η οποία ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, όπως αυτά ορίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση. Ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επιλέξει την ενεργοποίηση πολλαπλών γράφων ταυτοχρόνως, ώστε να δρομολογείται κίνηση με διαφορετικές απαιτήσεις. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, κάθε κόμβος δύναται να συμμετέχει σε περισσότερους του ενός γράφους (ή στιγμιότυπα RPL) και να σηματοδοτεί την κίνηση σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του γράφου μέσω του οποίου μεταφέρεται, ώστε να ικανοποιούνται περιορισμοί και απαιτήσεις QoS και να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα διαφορετικές υπηρεσίες.

4.6 Ασφάλεια και Εμπιστοσύνη στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσφέρονται για μια πληθώρα εφαρμογών, όπως στρατιωτικές, υγείας, παρακολούθησης χώρων, κ.ά., στις οποίες η ασφάλεια αποτελεί κρίσιμο σχεδιαστικό παράγοντα. Έτσι, τα δίκτυα των αισθητήρων μοιράζονται τις απαιτήσεις ασφαλείας με τα παραδοσιακά δίκτυα αντίστοιχων εφαρμογών, ενώ ταυτόχρονα υστερούν αυτών λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως αναλύθηκαν στις ενότητες 4.2 και 4.3.

Εστιάζοντας στο επίπεδο δικτύου, οι απειλές ασφαλείας που παρατηρούνται είναι αρκετές, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 15, καθώς η επικοινωνία δια του ασύρματου μέσου είναι εύκολο να υποκλαπεί, όπως εύκολη είναι και η διάχυση ψευδών πληροφοριών στο δίκτυο. Οι λύσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία για τα ασύρματα δίκτυα εν γένει εφαρμόζουν παραδοσιακές τεχνικές ασφαλείας για να επιτύχουν εμπιστευτικότητα, ακεραιότητα δεδομένων και πιστοποίηση χρηστών. Για παράδειγμα, η κρυπτογράφηση αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις επιθέσεις ιδιωτικότητας των δεδομένων, ενώ η πιστοποίηση είναι de facto λύση για επιθέσεις Sybil. Παρόλα αυτά, τέτοιες λύσεις συνεπάγονται αυξημένο υπολογιστικό φόρτο και ενεργειακή κατανάλωση [97].

Πίνακας 15: Επιθέσεις επιπέδου δικτύου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Είδος Επίθεσης	Περιγραφή
<i>Επίθεση βρόχου δρομολόγησης (Routing loop attack)</i>	Ατέρμονη δρομολόγηση, ώστε τα πακέτα να μη φτάσουν τον προορισμό τους
<i>Επίθεση σκουληκότρυπας (Wormhole attack)</i>	Ένας αριθμός κακόβουλων κόμβων προσποιούνται ότι συνδέουν δύο απομακρυσμένα σημεία του δικτύου, προκαλώντας επιπλοκές στο φόρτο και τη ροή της κίνησης
<i>Επίθεση μαύρης τρύπας (Black-hole attack)</i>	Αποδοχή όλων των αιτημάτων δρομολόγησης, ακόμα και με ελλιπή στοιχεία δρομολόγησης. Η μαύρη τρύπα απορρίπτει όλα τα πακέτα που φτάνουν σε αυτή
<i>Επίθεση γκριζας τρύπας (Grey-hole attack)</i>	Επιλεκτική απόρριψη πακέτων
<i>Επίθεση τρύπας προορισμού (Sink-hole attack)</i>	Ο κακόβουλος κόμβος φροντίζει να φαίνεται ελκυστικός όσον αφορά τη δρομολόγηση πακέτων προς τον προορισμό, οπότε μετά εφαρμόζει επιθέσεις μαύρης ή γκριζας τρύπας, κλπ.
<i>Επίθεση άρνησης υπηρεσίας (Denial-of-Service – DoS)</i>	Μπλοκάρισμα της φυσιολογικής λειτουργίας ή διαχείρισης των πόρων επικοινωνιών (π.χ. προκαλώντας υπέρμετρη ενεργειακή κατανάλωση)
<i>Παραποίηση/εισαγωγή πακέτου (Packet modification/insertion)</i>	Παραποίηση της πληροφορίας που λαμβάνει ο κακόβουλος κόμβος και προώθηση του παραποιημένου πακέτου ή νέων ψευδών πακέτων
<i>Επίθεση νεοεισερχομένου (Newcomer attack)</i>	Κατάργηση της κακής φήμης ενός κόμβου, εγγεγραμμένου ως νέος χρήστης

Είδος Επίθεσης	Περιγραφή
<i>Επίθεση Sybil</i> (<i>Sybil attack</i>)	Διαρροή πολλαπλών ταυτοτήτων στο δίκτυο επηρεάζοντας τη διατήρηση της τοπολογίας και τα σχήματα ανοχής σε σφάλματα
<i>Επίθεση Αναμετάδοσης</i> (<i>Replay attack</i>)	Αναμετάδοση προηγούμενων πακέτων στο δίκτυο
<i>Επίθεση επιλεκτικής κακής συμπεριφοράς</i> (<i>Selective misbehaving attack</i>)	Επιλεκτική παροχή ή άρνηση υπηρεσιών
<i>Επίθεση διακόπτη</i> (<i>On-off attack</i>)	Διαδοχική εναλλαγή καλής και κακής συμπεριφοράς, προκειμένου να μην ανιχνευτεί η παρεμπόδιση των υπηρεσιών
<i>Επίθεση αντικρουόμενης συμπεριφοράς</i> (<i>Conflicting behavior attack</i>)	Διαφορετική συμπεριφορά σε διαφορετικούς κόμβους
<i>Ψευδής πληροφόρηση ή ψευδής σύσταση ή Σπίλωση ή Κακολόγηση</i> (<i>False information /false recommendation/ Blackmailing/ Badmouthing</i>)	Παροχή ψευδών συστάσεων για την παρεμπόδιση της ομαλής λειτουργίας ενός σχήματος εμπιστοσύνης
<i>Ελλιπής πληροφόρηση</i> (<i>Incomplete information</i>)	Μη συνεργασία κατά την παροχή της κατάλληλης ή πλήρους πληροφορίας

4.6.1 Διαχείριση Εμπιστοσύνης

Ακολουθώντας το πρότυπο της κοινωνικότητας του ανθρώπου και τον τρόπο ανάπτυξης σχέσεων με τους γύρω του, προτείνεται στη βιβλιογραφία η ανάπτυξη σχέσεων μεταξύ των κόμβων του ασύρματου δικτύου αισθητήρων σύμφωνα με τη μεταξύ τους *εμπιστοσύνη*. Συγκεκριμένα ορίζονται οι εξής έννοιες:

- Η «Εμπιστοσύνη» αναφέρεται ως η πεποίθηση μιας οντότητας ότι μια έτερη οντότητα θα εκτελέσει μια συγκεκριμένη εργασία, η οποία εμπίπτει στην περιοχή

ενδιαφέροντος της πρώτης, χωρίς αυτή να μπορεί απαραίτητα να την παρακολουθήσει ή να την ελέγξει.

- Η «Δημιουργία Εμπιστοσύνης» προκύπτει εφαρμόζοντας μια μετρική αξιολόγηση στα δεδομένα εμπιστοσύνης, η οποία μπορεί να είναι είτε άμεση, δηλαδή να προέρχεται από προσωπικές παρατηρήσεις του κόμβου ως αποτέλεσμα παρακολούθησης των αξιολογούμενων, είτε έμμεση, δηλαδή να προκύπτει από πληροφορίες εμπιστοσύνης που δέχεται από άλλους κόμβους.

Η «Εμπιστοσύνη» διαμορφώνεται ακολουθώντας ένα «Μοντέλο Εμπιστοσύνης», που αποτελεί μια συσχέτιση ανάμεσα σε [98]:

- οντότητες, που αντιστοιχούν στο υποκείμενο και αντικείμενο εμπιστοσύνης,
- τιμές εμπιστοσύνης, που εκφράζουν την ποσοτικοποίηση της πεποίθησης μιας οντότητας ότι μια άλλη είναι έμπιστη,
- περιεχόμενο εμπιστοσύνης, καθώς συνδέεται με μια συγκεκριμένη λειτουργία,
- άμεση και έμμεση εμπιστοσύνη, όπως προκύπτει από ίδια γνώμη ή από συστάσεις άλλων,
- ρίζες εμπιστοσύνης, που αντιστοιχούν στα θετικά συμπεράσματα που διαμορφώνουν όλες οι οντότητες για συγκεκριμένες άλλες οντότητες της κοινωνίας.

Ανάλογα με τον τρόπο σχεδιασμού των μοντέλων εμπιστοσύνης, μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες [99]. Έτσι, με βάση τον κόμβο που είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό της εμπιστοσύνης, τα μοντέλα εμπιστοσύνης διακρίνονται σε κεντρικοποιημένα και κατανεμημένα.

Τα κεντρικοποιημένα μοντέλα θεωρούν έναν επικεφαλής κόμβο, ο οποίος επιφορτίζεται με την αξιολόγηση της εμπιστοσύνης των υπολοίπων, βασιζόμενος σε προσωπικές παρατηρήσεις ή και παρατηρήσεις που λαμβάνει από μέρος ή το σύνολο των κόμβων. Ο κόμβος επικεφαλής, ο οποίος θεωρείται έμπιστος, υπολογίζει και ανακοινώνει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης στους λοιπούς κόμβους. Παρόλο που η λύση αυτή δεν απαιτεί την υλοποίηση της λειτουργικότητας αξιολόγησης σε κάθε κόμβο, ωστόσο η ενεργειακή κατανάλωση του επικεφαλής κόμβου είναι ιδιαίτερα αυξημένη, ενώ η παραδοχή ότι είναι έμπιστος μπορεί να θεωρηθεί αυθαίρετη. Επίσης, σε περίπτωση που ο κόμβος επικεφαλής τεθεί εκτός λειτουργίας, χάνεται η λειτουργικότητα του μοντέλου εμπιστοσύνης.

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση και να εξοικονομηθούν πόροι, συχνά τα μοντέλα εμπιστοσύνης ενσωματώνονται σε ιεραρχικές αρχιτεκτονικές δικτύων. Τότε, ο κόμβος επικεφαλής της κάθε ομάδας, αναλαμβάνοντας σημαντικά καθήκοντα για τη λειτουργία της ομάδας, επιλέγεται σύμφωνα με κριτήρια εμπιστοσύνης. Ενδεικτικά, ένα σχήμα επιλογής επικεφαλής κόμβου με βάση την εμπιστοσύνη προτείνεται στο [100]. Σύμφωνα με αυτό, ο τρέχων κόμβος επικεφαλής αναλαμβάνει να συλλέξει πληροφορία εμπιστοσύνης από τους κόμβους και να επιλέξει επικεφαλής κόμβο. Επιπρόσθετα, εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν αξιολόγηση της εμπιστοσύνης τόσο όλων των κόμβων, συμπεριλαμβανομένων των

επικεφαλής και των κόμβων συλλογής πληροφοριών [101], καταλήγοντας σε μια κατανεμημένη μορφή του μοντέλου εντός της ομάδας.

Τέλος, τα πλήρως κατανεμημένα μοντέλα εμπιστοσύνης, λόγω χάρη [102], θεωρούν κάθε κόμβο να επιτηρεί τους γείτονές του, συλλέγοντας σχετική πληροφορία που χρησιμοποιεί για τη δημιουργία εμπιστοσύνης. Στη συνέχεια, η εμπιστοσύνη λαμβάνεται υπόψη κατά την απόφαση δρομολόγησης, ώστε να επιλέγεται κάθε φορά έμπιστος κόμβος για την προώθηση των πακέτων. Σε αυτήν την περίπτωση, η δημιουργία εμπιστοσύνης και το σχετικό κόστος υλοποίησης κατανέμονται ομοιόμορφα στο δίκτυο.

4.6.2 Μετρικές Εμπιστοσύνης

Καθώς η εμπιστοσύνη αναφέρεται σε συγκεκριμένο περιεχόμενο, απαιτείται η παρακολούθηση πολλών ενδεχομένως διαφορετικών πτυχών της συμπεριφοράς των κόμβων. Μάλιστα, κάθε πτυχή συμπεριφοράς συνδέεται και με μια διαφορετικού τύπου επίθεση. Για παράδειγμα, ένας κόμβος κάθε φορά που αποστέλλει ένα πακέτο σε επόμενο κόμβο, μπορεί να μπαίνει σε λειτουργία παρακολούθησης προκειμένου να ελέγξει αν ο δεύτερος κόμβος προώθησε περαιτέρω το πακέτο. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να σημειώνει το ποσοστό των πακέτων που προώθησε ο συγκεκριμένος κόμβος, ώστε να ανιχνεύσει επιθέσεις μαύρης ή γκρίζας τρύπας ή τρύπας προορισμού. Ομοίως, καταγράφοντας το πλήθος των πακέτων που αποστέλλονται ορθά, χωρίς παραποίηση, ο κόμβος μπορεί να ανιχνεύσει επιθέσεις παραποίησης. Σε κάθε περίπτωση, επομένως, ο κόμβος χρησιμοποιεί διαφορετικές μετρικές εμπιστοσύνης, η οποία εν γένει μπορεί να λειτουργήσει και ως μετρική δρομολόγησης, προκειμένου να αξιολογήσει τις διαφορετικές πτυχές συμπεριφορών, να ανιχνεύσει τις παθολόνες και να τις αποφύγει.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται μερικές χαρακτηριστικές μετρικές εμπιστοσύνης, ακολουθούμενες από την πτυχή συμπεριφοράς που παρακολουθούν και τον(-ους) τύπο(-ους) επιθέσεων που αντιμετωπίζουν.

Μετρική Εμπιστοσύνης	Πτυχή Συμπεριφοράς υπό Παρακολούθηση	Επίθεση προς Αποφυγή
<i>Πλήθος πακέτων δεδομένων που προωθήθηκαν</i>	Προώθηση πακέτων δεδομένων	Μαύρης τρύπας Γκρίζας τρύπας Επιλεκτικής προώθησης Τρύπας προορισμού Άρνησης υπηρεσίας

Μετρική Εμπιστοσύνης	Πτυχή Συμπεριφοράς υπό Παρακολούθηση	Επίθεση προς Αποφυγή
<i>Πλήθος πακέτων ελέγχου που προωθήθηκαν</i>	Προώθηση πακέτων ελέγχου	Βρόχος δρομολόγησης Αναμετάδοσης Σκουληκότρυπας Sybil
<i>Ακρίβεια πακέτων δεδομένων</i>	Ακεραιότητα πακέτων δεδομένων	Παραποίησης
<i>Ακρίβεια πακέτων ελέγχου</i>	Ακεραιότητα πακέτων ελέγχου	Sybil Κάθε επίθεση αναφέρεται σε παραποίηση μηνυμάτων του πρωτοκόλλου δρομολόγησης
<i>Πλήθος πακέτων με παραποιημένη διεύθυνση</i>	Παραποίηση διεύθυνσης προωθούμενων πακέτων	Sybil Σκουληκότρυπας
<i>Υποστήριξη κρυπτογραφίας</i>	Δυνατότητα εφαρμογής κρυπτογραφίας	Επιθέσεις πιστοποίησης
<i>Εναπομένουσα ενέργεια</i>	Διαθέσιμοι ενεργειακοί πόροι	Διαθεσιμότητα κόμβου Άρνηση υπηρεσίας
<i>Συνέπεια των αναφερόμενων τιμών/δεδομένων</i>	Ακρίβεια των αποτελεσμάτων παρατήρησης	Συμβιβασμένοι κόμβοι Ψευδής πληροφόρηση
<i>Επικοινωνία των παρατηρήσεων</i>	Αναφορά γεγονότων (που αναφέρονται σε συγκεκριμένη εφαρμογή)	Εγωιστική συμπεριφορά κόμβου στο επίπεδο εφαρμογής
<i>Διαφορά τιμών εμπιστοσύνης για έναν κόμβο μεταξύ του υπό παρακολούθηση και τρίτων</i>	Τιμές εμπιστοσύνης για έναν κόμβο	Σπίλωση

Εξετάζοντας τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι απαιτούνται λιγότεροι υπολογιστικοί πόροι για την επιβεβαίωση προώθησης σε σχέση με αυτούς που απαιτούνται για τον έλεγχο παραποιήσεων ή ακόμα χειρότερα, σε σχέση με τον έλεγχο της συνέπειας των δεδομένων.

Επίσης, εκτός από υπολογιστικούς πόρους, απαιτούνται και ενεργειακοί πόροι για τις συγκεκριμένες λειτουργίες. Ενώ τέτοιες ανησυχίες δε θα απασχολούσαν στην περίπτωση ισχυρότερων συσκευών, ωστόσο είναι πρόβλημα για τα δίκτυα των αισθητήρων. Συνεπώς, κάθε φορά επιλέγεται ένα υποσύνολο των μετρικών εμπιστοσύνης ή δρομολόγησης, ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις της.

Συνήθως, οι μετρικές εμπιστοσύνης που χρησιμοποιεί κάθε κόμβος συνδυάζονται, παράγοντας μια τιμή εμπιστοσύνης για τον υπό εξέταση κόμβο. Η τιμή αυτή στη συνέχεια συνδυάζεται με άλλες μετρικές δρομολόγησης για την επιλογή του επόμενου κόμβου για την προώθηση πακέτων ή της κατάλληλης διαδρομής.

Ενδεικτικά, αναφέρονται οι παρακάτω εργασίες που χρησιμοποιούν την εμπιστοσύνη ως παράμετρο κατά την απόφαση δρομολόγησης.

- Ανάπτυξη εμπιστοσύνης μεταξύ των κόμβων δικτύων ad hoc [102], βασισμένη σε προσωπικές παρατηρήσεις, προκειμένου να αντιμετωπίσει επιθέσεις τύπου μαύρης τρύπας, παραποίησης, εισαγωγής ψευδών πακέτων στο δίκτυο, Sybil, εγωιστικής συμπεριφοράς, κ.ά. Στο προτεινόμενο μοντέλο εμπιστοσύνης οι τιμές εμπιστοσύνης χρησιμοποιούνται ως βάρη ζεύξης και τελικά επιλέγεται το πιο αξιόπιστο μονοπάτι.
- Εμπιστοσύνη που βασίζεται σε προσωπικές παρατηρήσεις και συστάσεις [103], κατά τρόπο, ώστε να εκχωρούνται διαπιστευτήρια σε κόμβους και να ελέγχονται τα δικαιώματα πρόσβασής τους. Το μοντέλο απευθύνεται σε κόμβους με κακή συμπεριφορά εν γένει, χωρίς να εστιάζει σε συγκεκριμένες επιθέσεις.
- Έκφραση εμπιστοσύνης υπό την αλγεβρική μορφή ημιδακτυλίου (semiring) [99], μια μορφή που είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Η μέθοδος βασίζεται στη διάδοση της εμπιστοσύνης, επιχειρώντας να αναπτύξει σχέσεις εμπιστοσύνης ανάμεσα σε κόμβους που δεν είχαν πρότερη αλληλεπίδραση, αξιοποιώντας τις άμεσες σχέσεις μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων που τους ενώνουν.
- Δρομολόγηση αισθητήρων περιβάλλουσας εμπιστοσύνης (Ambient Trust Sensor Routing – ATSR) [104], μια λύση βασισμένη στα γεωγραφικά πρωτόκολλα, η οποία χρησιμοποιεί την εμπιστοσύνη ως μετρική δρομολόγησης μαζί με την απόσταση από τον προορισμό. Η εμπιστοσύνη ενσωματώνει πληροφορίες από προσωπικές παρατηρήσεις και συστάσεις τρίτων, ώστε να αποφεύγονται επιθέσεις μαύρης ή γκρίζας τρύπας, παραποίησης, σπύλωσης, ενώ λαμβάνεται υπόψη και η εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων.

Επιπλέον, έχει προταθεί πλειάδα λύσεων με μοντέλα εμπιστοσύνης στη βιβλιογραφία, όπως παρουσιάζονται σε σχετικές εργασίες έρευνας [105]. Παρόλα αυτά, παρουσιάζει ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον η ενσωμάτωσή τους σε κάποιο δρομολόγησης, λαμβάνοντας υπόψη και έτερες της εμπιστοσύνης απαιτήσεις του δικτύου ή της ενδεχόμενης εφαρμογής. Στα πλαίσια αυτά, παρουσιάζεται η ανάγκη σύνθεσης διαφορετικών μετρικών, οι οποίες

αντανακλούν ανάγκες ποιότητας υπηρεσίας, εξασφαλίζοντας παράλληλα την αποδοτικότητα της λειτουργίας στην οποία ενσωματώνονται, ήτοι τη δρομολόγηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σύνθεση Μετρικών Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η σύνθεση διαφορετικών μετρικών στο επίπεδο δικτύου. Η δυναμική φύση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε συνδυασμό με την ανάγκη αυτονομίας του, επιβάλλει τη συνεχή παρακολούθηση διαφόρων πτυχών της λειτουργίας του. Χρησιμοποιώντας δυναμικές πληροφορίες για τις μεταβολές της δομής του δικτύου, για την ποιότητα των ζεύξεων και των διαύλων, την αξιοπιστία και την ενέργεια των κόμβων κ.ά. καθίσταται δυνατή η προσαρμογή της λειτουργίας του δικτύου στις αλλαγές, επιδιώκοντας τη βελτιστοποίησή του, όπως αυτή εκφράζεται από το σχεδιαστή του δικτύου και μπορεί να αναφέρεται σε ελάχιστα σφάλματα ή/και επιθέσεις, μέγιστη διάρκεια ζωής, κ.λπ.

Σε πρακτικό επίπεδο, στο στρώμα δικτύου οι διαφορετικές πτυχές λειτουργίας ελέγχονται μέσω διαφορετικών μετρικών, που κατέχουν εκτενές τμήμα της βιβλιογραφίας [11]. Οι πληροφορίες που αντλούνται μέσω μιας μετρικής ενσωματώνονται στο πρωτόκολλο δρομολόγησης, συμμετέχοντας στη διαμόρφωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η επιλογή της καλύτερης τιμής γίνεται με βάση τις απαιτήσεις βέλτιστης λειτουργίας. Η χρήση μιας μεμονωμένης μετρικής, ωστόσο, ενώ εποπτεύει αποτελεσματικά το χαρακτηριστικό που εστιάζει, δεν αποτυπώνει άλλα, επίσης σημαντικά, στοιχεία του δικτύου. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση πολλαπλών μετρικών είναι επιβεβλημένη. Παρόλα αυτά, η σύνθεση μετρικών απαιτεί διεξοδική μελέτη, καθώς καλείται να εξυπηρετήσει δύο, συχνά αντικρουόμενες, ανάγκες. Πρώτον, η σύνθεση πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να πληρούνται βασικές απαιτήσεις του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και έτσι να εξυπηρετείται ο πρωταρχικός σκοπός του, που είναι η πρόσβαση στον προορισμό. Δεύτερον, οι μετρικές πρέπει να συντίθενται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην αλλοιώνονται, αλλά να διατηρούν τις ιδιότητές τους και να μπορούν να συλλάβουν τις μεταβολές της λειτουργίας, την οποία στοχεύουν.

Στη συνέχεια, η μελέτη της σύνθεσης διεξάγεται με τη βοήθεια της άλγεβρας δρομολόγησης, η οποία εισήχθη το 2002 από τον J.L. Sobrinho [22]. Αρχικά, παρατίθενται οι βασικές αρχές της άλγεβρας δρομολόγησης και διατυπώνονται οι απαιτήσεις των πρωτοκόλλων δρομολόγησης υπό τη μορφή αλγεβρικών ιδιοτήτων. Ακολούθως, ορίζονται οι μετρικές «Προσδοκητός Χρόνος Μετάδοσης» (Expected Transmission Time – ETX) που εποπτεύει

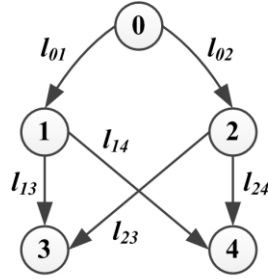
την αξιοπιστία της ζεύξης και «Δείκτης Προώθησης Πακέτων» (Packet Forwarding Indication – PFI) που αξιολογεί την εμπιστοσύνη των κόμβων ως προς την προώθηση πακέτων, ενώ εξετάζονται ως προς τις αλγεβρικές τους ιδιότητες και αποδεικνύονται κατάλληλες για τη χρήση τους σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επίσης, παρουσιάζονται δύο μέθοδοι σύνθεσης, η αθροιστική και η λεξικογραφική, και διατυπώνονται με βάση τις αρχές της άλγεβρας δρομολόγησης. Τέλος, οι δύο μετρικές συντίθενται και με τις δύο μεθόδους, η σύνθεσή τους αποδεικνύεται συμβατή με τη δρομολόγηση και στη συνέχεια εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του ρόλου τους ως μετρικών αξιοπιστίας και εμπιστοσύνης μέσω εκτενών προσομοιώσεων, όταν ενσωματώνονται στο πρωτόκολλο RPL.

5.1 Άλγεβρα Δρομολόγησης

Η άλγεβρα δρομολόγησης εισήχθη από τον J.L. Sobrinho [22] για να εκφράσει τις ιδιότητες μιας συνάρτησης βαρών διαδρομών για πρωτόκολλα κατάστασης ζεύξης [βλ. Παράρτημα B], ώστε να είναι δυνατή η πολυβηματική δρομολόγηση και ο υπολογισμός βέλτιστων διαδρομών τοπικά σε έναν κόμβο. Στη συνέχεια, αξιοποιήθηκε και επεκτάθηκε σε πληθώρα μελετών, για να εκφράσει αποδοτικότερα και άλλες μορφές πρωτοκόλλων [23][24][106]-[108].

5.1.1 Μοντέλο Γράφου Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Για το σκοπό της ανάλυσης, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μοντελοποιείται ως ένας κατευθυνόμενος (directed) γράφος $G(V, E)$, όπου V είναι το σύνολο των κορυφών, που αντιστοιχούν σε κόμβους, και E είναι το σύνολο των ακμών, που αντιστοιχούν σε ασύρματες ζεύξεις μεταξύ γειτονικών κόμβων. Έτσι, η γραφή $\langle u_i, u_j \rangle$ υποδηλώνει την ασύρματη ζεύξη μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων $u_i, u_j \in V$. Μάλιστα, όταν κυκλοφορούν πακέτα από τον κόμβο u_i στον κόμβο u_j , τότε ο u_j λέγεται *εξωτερικός γείτονας* του u_i , ενώ ο u_i *εσωτερικός γείτονας* του u_j . Επιπλέον, το μονοπάτι $p(u_0, u_n)$, το οποίο συμβολίζεται επίσης και ως p_{0n} ή απλά p , από τον u_0 προς τον u_n , ορίζεται ως η ακολουθία των κόμβων $\langle u_0, u_1, \dots, u_{n-1}, u_n \rangle$, όπου $\langle u_i, u_{i+1} \rangle$ είναι μια ζεύξη για κάθε $0 \leq i \leq n-1$, $n > 0$, $u_i \in V$, και όλοι οι κόμβοι είναι διαφορετικοί μεταξύ τους. Τέλος, ένας κόμβος που ανήκει στο μονοπάτι που ενώνει τον κόμβο u_0 με τον κόμβο u_n , ονομάζεται *κόμβος επί του μονοπατιού*.



$$w_{03} = f(a_{03}) = f(a_{01} \oplus l_{13}),$$

$$a_{01} = l_{01}$$

Σχήμα 12: Παράδειγμα γράφου δικτύου

5.1.2 Απαιτήσεις Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης

Στις εργασίες [22]-[24] παρουσιάζονται οι τρεις θεμελιώδεις απαιτήσεις των πρωτοκόλλων δρομολόγησης κατά Sobrinho, ήτοι η σύγκλιση, η εύρεση βέλτιστου μονοπατιού και η απουσία βρόχων, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

1. Σύγκλιση

Για δεδομένο γράφο δικτύου $G(V, E)$, το πρωτόκολλο δρομολόγησης συγκλίνει, αν για κάθε ζεύγος κόμβων πηγής και προορισμού $u_s, u_d \in V$ αντίστοιχα, μπορεί να ευρεθεί ένα μονοπάτι για τη δρομολόγηση της κίνησης. Η σύγκλιση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης υπονοεί ότι μετά από μια μεταβατική περίοδο, οι κόμβοι θα καταστρώσουν τους πίνακες δρομολόγησης (με βάση τον αλγόριθμο κατάστασης της ζεύξης ή διανύσματος απόστασης), έτσι ώστε κάθε κόμβος να μπορεί να στείλει πακέτα σε κάθε κόμβο προορισμού.

2. Εύρεση Βέλτιστης Λύσης

Για δεδομένο γράφο δικτύου $G(V, E)$, το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι βέλτιστο, αν για κάθε ζεύγος κόμβων πηγής και προορισμού $u_s, u_d \in V$ αντίστοιχα, η κίνηση δρομολογείται μέσω του βέλτιστου μονοπατιού. Με άλλα λόγια, το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι βέλτιστο, αν για κάθε κόμβο-πηγή $u_s \in V$ και κάθε κόμβο-προορισμό $u_d \in V$ επιλέγεται μονοπάτι, τέτοιο, ώστε κάθε κόμβος επί του μονοπατιού $u_k \in V$ να προωθεί πακέτα που προέρχονται από τον κόμβο u_s και προορίζονται προς τον κόμβο u_d σαν να ήταν ο u_k ο κόμβος-πηγή. Τότε οι αποφάσεις για την προώθηση πακέτων που λαμβάνονται από κάθε κόμβο ενός μονοπατιού θα είναι συνεπείς μεταξύ τους. Για παράδειγμα, αν ο κόμβος u_s αποφασίσει ότι η κίνηση προς τον κόμβο u_d πρέπει να ακολουθήσει το βέλτιστο μονοπάτι $p(u_s, u_k, \dots, u_d)$, τότε για κάθε κόμβο u_k επί του μονοπατιού p , το $p'(u_k, u_{k+1}, \dots, u_d)$ είναι το

βέλτιστο μονοπάτι από τον u_k στον u_d . Με βάση αυτόν τον ορισμό, όλα τα ενδιάμεσα μονοπάτια που προκύπτουν κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι επίσης βέλτιστα.

3. Απουσία Βρόχων

Για δεδομένο γράφο δικτύου $G(V, E)$, το πρωτόκολλο δρομολόγησης στερείται βρόχων, αν για κάθε ζεύγος κόμβων πηγής και προορισμού $u_s, u_d \in V$ αντίστοιχα, και οποιουσδήποτε κόμβους επί του μονοπατιού $u_i, u_j \in V$, συμπεριλαμβανομένων των u_s και u_d , ισχύει $u_i \neq u_j$. Η απουσία βρόχων υπονοεί ότι η κίνηση δρομολογείται μέσω μονοπατιών ούτως, ώστε να μην επιστρέφει προς τα πίσω.

5.1.3 Διατύπωση της Άλγεβρας Δρομολόγησης

Ακολουθώντας τη διατύπωση της άλγεβρας δρομολόγησης [22]-[24], ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά σύμφωνα με τις ορολογίες μιας μη-κλασικής άλγεβρας βασισμένης στην εξάδα $(L, \Sigma, W, f, \oplus, \preceq)$, όπου L το σύνολο των ετικετών (labels) που αποδίδονται στις ζεύξεις, Σ είναι το σύνολο υπογραφών (signatures) που αποδίδονται στα μονοπάτια, W είναι το σύνολο των βαρών που υπολογίζονται για τα μονοπάτια εφαρμόζοντας τη συνάρτηση f στις υπογραφές, \oplus η πράξη που εφαρμόζεται στις υπογραφές και τις ετικέτες για τον υπολογισμό της υπογραφής ενός μονοπατιού και το σύμβολο \preceq υποδηλώνει τη σχέση διάταξης ανάμεσα στα βάρη των μονοπατιών. Η ετικέτα της ζεύξης $\langle u_i, u_j \rangle$ συμβολίζεται ως $l(u_i, u_j)$ ή l_{ij} (βλ. Σχήμα 12). Η υπογραφή a_{nk} του μονοπατιού p_{nk} υπολογίζεται ως εξής:

$$a_{nk} = l_{n,n+1} \oplus \dots \oplus l_{k-1,k} \quad \text{ή} \quad (5.1)$$

$$a_{nk} = a_{n,k-1} \oplus l_{k-1,k}, \quad \text{ή} \quad (5.2)$$

$$a_{nk} = a_{n,k-1} \oplus a_{k-1,k}, \quad a_{nk} \in \Sigma \quad \text{και} \quad l_{n,n+1} \dots l_{k-1,k} \in L \quad (5.3)$$

Η υπογραφή μιας διαδρομής αποτελούμενης από μια ζεύξη συμπίπτει με την ετικέτα της ζεύξης, δηλαδή:

$$a_{ij} = l_{ij}, \quad a_{ij} \in \Sigma \quad \text{και} \quad l_{ij} \in L \quad (5.4)$$

Το βάρος w του μονοπατιού p , το οποίο έχει υπογραφή a υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης f , ως ακολούθως:

$$w = f(a), \quad a \in \Sigma \quad \text{και} \quad w \in W \quad (5.5)$$

Επιπρόσθετα, η σχέση διάταξης \preceq εφαρμόζεται στη σύγκριση διαφορετικών τιμών βαρών διαδρομών, ούτως ώστε να επιλεγεί η διαδρομή με το ελάχιστο βάρος, ήτοι το βέλτιστο μονοπάτι.

Υπό την έννοια της μη-κλασικής άλγεβρας, η πράξη \oplus χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Το σύνολο Σ είναι κλειστό υπό το \oplus : $a_1 \oplus a_2 \in \Sigma, \forall a_1, a_2 \in \Sigma$
- Η πράξη \oplus είναι προσεταιριστική: $a_1 \oplus (a_2 \oplus a_3) = (a_1 \oplus a_2) \oplus a_3, \forall a_1, a_2, a_3 \in \Sigma$
- Υπάρχει ουδέτερο στοιχείο, το $\bar{0}$, τέτοιο ώστε $a \oplus \bar{0} = a, \forall a \in \Sigma$
- Υπάρχει απορροφητικό στοιχείο, το $\bar{\infty}$, τέτοιο ώστε $a \oplus \bar{\infty} = \bar{\infty} \oplus a = \bar{\infty}, \forall a \in \Sigma$

Επιπλέον, η σχέση διάταξης \preceq κατέχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Το \preceq είναι ανακλαστικό (reflexive): $w \preceq w, \forall w \in W$
- Το \preceq είναι αντι-συμμετρικό: αν $w_1 \preceq w_2$ και $w_2 \preceq w_1$, τότε $w_1 = w_2, \forall w_1, w_2 \in W$
- Το \preceq είναι μεταβατικό: αν $w_1 \preceq w_2$ και $w_2 \preceq w_3$, τότε $w_1 \preceq w_3, \forall w_1, w_2, w_3 \in W$
- Για κάθε $w_1, w_2 \in W$ ισχύει είτε $w_1 \preceq w_2$ είτε $w_2 \preceq w_1$.

5.1.4 Ιδιότητες της Άλγεβρας Δρομολόγησης

Προκειμένου να ερμηνεύσει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις δρομολόγησης σε αλγεβρικές έννοιες, ο Sobrinho εισήγαγε δύο βασικές ιδιότητες στην άλγεβρα δρομολόγησης, τη μονοτονία και την ισοτονικότητα. Παρακάτω δίνονται οι δυο αυτές ιδιότητες σύμφωνα με τους ορισμούς που απαντώνται στα [22]-[24]:

1. Μονοτονία

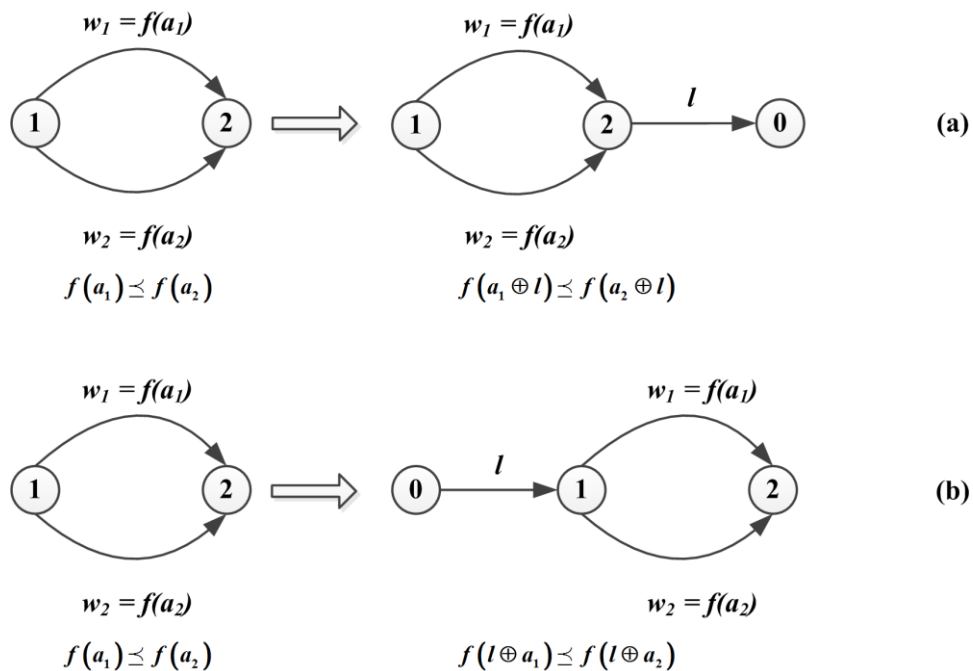
Η άλγεβρα είναι *εκ δεξιών μονότονη*, αν και μόνο αν $f(a) \preceq f(b)$ για όλα τα $a \in \Sigma$ και $l \in L$. Ομοίως, η άλγεβρα είναι *εξ αριστερών μονότονη*, αν και μόνον αν $f(a) \preceq f(b)$ για όλα τα $a \in \Sigma$ και $l \in L$. Αν η άλγεβρα είναι εκ δεξιών και εξ αριστερών μονότονη, τότε είναι *μονότονη*. Η άλγεβρα είναι *αυστηρά δεξιά μονότονη*, αν και μόνο αν $f(a) \prec f(b)$ για όλα τα $a \in \Sigma$ και $l \in L$. Ομοίως ορίζονται η *αυστηρά αριστερή μονότονη* και η *αυστηρά μονότονη* άλγεβρα.

Με άλλα λόγια, η μονοτονία υπονοεί ότι το βάρος του μονοπατιού δε μειώνεται, όταν το μονοπάτι προσαυξάνεται κατά μία ζεύξη (ή άλλο μονοπάτι) είτε προς τη μεριά της πηγής είτε του προορισμού. Συνεπώς, σε μια μονότονη άλγεβρα, ένα μονοπάτι αποκτά μεγαλύτερο ή ίσο βάρος σε σχέση με οποιοδήποτε των επιμέρους μονοπατιών που προκύπτουν από αυτό.

2. Ισοτονικότητα

Η άλγεβρα είναι εκ δεξιών ισότονη, αν και μόνο αν η σχέση $f(a_1) \preceq l$ υπονοεί ότι $f(a_1 \oplus l) \preceq l$ για όλα τα $a_1, a_2 \in \Sigma$ και $l \in L$. Αντίστοιχα, η άλγεβρα είναι εκ αριστερών ισότονη, αν και μόνο αν η σχέση $f(a_1) \preceq l$ υπονοεί ότι $f(l \oplus a_1) \preceq l$ για όλα τα $a_1, a_2 \in \Sigma$ και $l \in L$. Αν η άλγεβρα είναι εκ δεξιών και εκ αριστερών ισότονη, τότε είναι ισότονη. Η άλγεβρα είναι αυστηρά δεξιά ισότονη, αν και μόνο αν η σχέση $f(a_1) \prec l$ υπονοεί ότι $f(l \oplus a_1) \prec l$ για όλα τα $a_1, a_2 \in \Sigma$ και $l \in L$. Ομοίως ορίζονται η αυστηρά αριστερή ισοτονικότητα και η αυστηρή ισοτονικότητα.

Η ισοτονικότητα εκφράζει ότι η σχέση διάταξης των βαρών ανάμεσα σε δυο μονοπάτια διατηρείται, αν τα μονοπάτια προσαυξηθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση κατά την ίδια ζεύξη ή μονοπάτι (βλ. Σχήμα 13).



Σχήμα 13: Παραδείγματα (α) Δεξιάς ισοτονικότητας (β) Αριστερής ισοτονικότητας

Συμπερασματικά, ο Sobrinho απέδειξε ότι η **μονοτονία** και η **αυστηρή ισοτονικότητα** είναι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για την εξασφάλιση του βέλτιστου μονοπατιού, της σύγκλισης και της απουσίας βρόχων. Στη συνέχεια, οι Yang et al. [106]-[108] συγκεκριμενοποίησαν τις ανωτέρω συνθήκες για κάθε τύπο πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης αποτελείται εν γένει από δύο παράγοντες, ήτοι έναν αλγόριθμο υπολογισμού της διαδρομής και ένα σχήμα προώθησης πακέτων. Τα αποτελέσματα της εργασίας των τελευταίων συνοψίζει ο Πίνακας 16 για πρωτόκολλα δρομολόγησης που

προκύπτουν από το συνδυασμό των αλγορίθμων υπολογισμού διαδρομής Dijkstra και Bellman-Ford με δρομολόγηση πηγής ή βήμα-προς-βήμα.

Πίνακας 16: Σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των μετρικών δρομολόγησης και των απαιτήσεων δρομολόγησης [108]

Πρωτόκολλο Δρομολόγησης	Βέλτιστη Διαδρομή	Σύγκλιση	Απουσία Βρόχων
<i>Dijkstra</i> Δρομολόγηση πηγής	Δεξιά ισοτονικότητα	-	-
	Δεξιά μονοτονία		
<i>Dijkstra</i> Βήμα προς βήμα (hop by hop)	Δεξιά ισοτονικότητα	Δεξιά ισοτονικότητα	Δεξιά ισοτονικότητα
	Δεξιά μονοτονία	Δεξιά μονοτονία	Δεξιά μονοτονία
	Αυστηρά αριστερή ισοτονικότητα	Αυστηρά αριστερή ισοτονικότητα	Αυστηρά αριστερή ισοτονικότητα
<i>D* Bellman-Ford</i> Δρομολόγηση πηγής	Αριστερή ισοτονικότητα	-	-
<i>D Bellman-Ford</i> Βήμα προς βήμα (hop by hop)	Αριστερή ισοτονικότητα	Αριστερή μονοτονία	Αριστερή μονοτονία
	Αριστερή μονοτονία		

Τέλος, αποδεικνύεται [107] ότι οι μετρικές δρομολόγησης:

- Πλήθος Βημάτων (Hop Count - HC),
- Αναμενόμενο Πλήθος Μεταδόσεων (Expected Transmission Count - ETX) [109],
- Αναμενόμενος Χρόνος Μετάδοσης (Expected Transmission Time - ETT) [110],
- Σταθμισμένος Αθροιστικός Αναμενόμενος Χρόνος Μετάδοσης (Weighted Cumulative Expected Transmission Time - WCETT) [110],
- Βασικός Αλγόριθμος για Δρομολόγηση Ελάχιστης Ενέργειας (Basic Algorithm for Minimum Energy Routing - BAMER) [111] και
- Μετρική Παρεμβολής και Εναλλαγής Διαύλου (Metric of Interference and Channel-switching - MIC) [112]

δεν είναι όλες κατάλληλες για να συμπεριληφθούν σε οποιοδήποτε τύπο πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Για παράδειγμα, το WCETT είναι μονότονο, αλλά δεν είναι ούτε δεξιά ούτε αριστερά ισοτονικό. Έτσι, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι κανένα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που παρουσιάζει ο Πίνακας 16 δεν μπορούν να επιτύχουν βέλτιστη δρομολόγηση χρησιμοποιώντας WCETT. Επιπρόσθετα, το BAMER κατέχει τις ιδιότητες της δεξιάς ισοτονικότητας και μονοτονίας, αλλά δεν είναι αριστερά ισοτονικό. Έτσι, αν αυτή η μετρική συνδυαστεί με το πρωτόκολλο δρομολόγησης Bellman-Ford, η βέλτιστη διαδρομή δεν είναι εγγυημένη. Αντιθέτως, τα HC, ETX και ETT είναι ισότονα και έτσι μπορούν να εξασφαλίσουν την απουσία βρόχων.

Η διατύπωση της άλγεβρας δρομολόγησης έχει επίσης εξεταστεί περαιτέρω και επεκταθεί για διάφορους τύπους ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, μερικά από τα οποία περιλαμβάνουν γεωγραφική δρομολόγηση [113], ομορτυνιστικά δίκτυα [114], γνωστικά δίκτυα [115] και δρομολόγηση ευρυεκπομπής [116].

5.2 Μετρικές ETX και PFI

Καθώς η ασφάλεια και η αξιοπιστία των ζεύξεων επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης της εφαρμογής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, η περαιτέρω μελέτη εστιάζεται στη σύνθεση μετρικών αξιοπιστίας ζεύξης και εμπιστοσύνης. Με τον όρο «αξιοπιστία ζεύξης» υπονοείται η δυνατότητα παράδοσης πακέτων σε σχέση με την ποιότητα του διαύλου ή τη δυνατότητα πρόσβασης του γειτονικού κόμβου που επιλέγεται. Αντίστοιχα, ο όρος «εμπιστοσύνη» χρησιμοποιείται σύμφωνα με τον ορισμό της ενότητας 4.6.1. Η επιλογή και ορθή σύνθεση των μετρικών είναι κρίσιμη για την απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου.

Στη βιβλιογραφία ορίζεται πλήθος μετρικών εμπιστοσύνης, καθεμιά από τις οποίες ενσωματώνει διαφορετικές αλγεβρικές ιδιότητες. Ενδεικτικά, συνεχείς ή διακριτές αριθμητικές τιμές χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την εμπιστευτικότητα γειτονικών κόμβων. Για παράδειγμα, στο [19] η μετρική εμπιστοσύνης ορίζεται στο διάστημα $[0,1]$. Επιπρόσθετα, στο [118] χρησιμοποιούνται διακριτοί ακέραιοι αριθμοί, ενώ στο [119] η εμπιστοσύνη ορίζεται στο διάστημα $[-1,+1]$. Με βάση τον ορισμό τους προκύπτει ότι κάποιες μετρικές δεν ικανοποιούν απαραίτητα την ιδιότητα της μονοτονίας, όταν π.χ. η μετρική εμπιστοσύνης ορίζεται στο διάστημα $[-1,+1]$. Αντίστοιχα, κάποιες άλλες δεν ικανοποιούν την ιδιότητα της ισοτονικότητας, όταν λόγω χάρη το πεδίο ορισμού τους είναι το διάστημα $[0,1]$. Συνεπώς, οι απαιτήσεις σύγκλισης, βέλτιστης διαδρομής και χωρίς βρόχους δεν ικανοποιούνται απαραίτητα από κάθε μετρική εμπιστοσύνης.

Επιπρόσθετα, όταν πρόκειται να συνδυαστούν με άλλες μετρικές, π.χ. αξιοπιστίας ζεύξης, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητές του από κοινού. Προκειμένου να

αποδειχτεί αποδοτική μια τέτοια σύνθεση, οι ιδιότητες και οι στόχοι των θεωρούμενων μετρικών οφείλουν να συμβαδίζουν μεταξύ τους. Για παράδειγμα, δεν έχει νόημα η σύνθεση μιας μετρικής της οποίας θεωρείται βέλτιστη η μέγιστη τιμή με μια μετρική, η οποία είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθεί.

Στη συνέχεια ορίζονται δύο μετρικές δρομολόγησης, εκ των οποίων η πρώτη στοχεύει στην εξασφάλιση αξιοπιστίας των θεωρούμενων ζεύξεων, ενώ η δεύτερη φροντίζει για την επιλογή έμπιστων κόμβων στη διαδικασία της δρομολόγησης. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι μετρικές ETX και PFI και εξετάζονται ως προς τις αλγεβρικές τους ιδιότητες, καθώς και τους τρόπους σύνθεσής τους. Τόσο το ETX όσο και το PFI ακολουθούν τους ίδιους κανόνες και έχουν κοινές ιδιότητες, ήτοι είναι αθροιστικές μετρικές, ελαχιστοποιήσιμες και ορίζονται στο διάστημα $[1, +\infty]$. Επιπρόσθετα, αποδεικνύεται ότι είναι μονότονες και ισοτονικές και μπορούν, επομένως, να οδηγήσουν σε βέλτιστη δρομολόγηση, χωρίς βρόχους, η οποία επίσης συγκλίνει. Τέλος, οι δύο μετρικές ETX και PFI επιτρέπουν τον εύκολο συνδυασμό τους είτε μέσω της αθροιστικής είτε της λεξικογραφικής μεθόδου.

5.2.1 Προσδοκητός Χρόνος Μετάδοσης (Expected Transmission Time – ETX)

Η μετρική ETX αξιοποιείται ευρέως ως μετρική αξιοπιστίας των ζεύξεων κατά τη δρομολόγηση. Σύμφωνα με το [109], η τιμή ETX που υπολογίζεται από τον κόμβο u_i για τον κόμβο u_j ορίζεται ως το αντίστροφο γινόμενο της πιθανότητας άφιξης πακέτων από τον κόμβο u_i στον κόμβο u_j επί την πιθανότητα αποστολής επιβεβαίωσης επιτυχούς λήψης πακέτου (acknowledgement) από τον κόμβο u_j στον κόμβο u_i , ως εξής:

$$ETX_{ij} = \frac{1}{p_r^{ij} \times p_a^{ij}} \quad (5.6)$$

όπου p_r^{ij} η μετρηθείσα πιθανότητα επιτυχούς άφιξης ενός πακέτου από τον κόμβο u_i στον κόμβο u_j (ευθύς προσανατολισμός), ενώ p_a^{ij} η μετρηθείσα πιθανότητα ότι ένα πακέτο επιβεβαίωσης (ACK) θα φτάσει επιτυχώς στον κόμβο u_i (αντίστροφος προσανατολισμός). Χρησιμοποιώντας το αντίστροφο του γινομένου τους, ο υπολογισμός του ETX αποδίδει ένα κόστος ελάχιστου βάρους στις αξιόπιστες ζεύξεις. Σύμφωνα με το μαθηματικό του ορισμό, το ETX εκφράζει τον προσδοκητό αριθμό μεταδόσεων που απαιτούνται προκειμένου ένα πακέτο να φτάσει στον προορισμό του, όταν οι χαμηλής ποιότητας ζεύξεις εισάγουν αποτυχίες μεταδόσεων.

Το ETX αποτελεί μια από τις συνηθέστερες μετρικές δρομολόγησης, η οποία εφαρμόζεται σε διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η απλότητα

και η αποτελεσματικότητά του αποδεικνύεται σε πληθώρα εφαρμογών, ενώ έχει εκτενώς μελετηθεί, συνδυαστεί και τροποποιηθεί προκειμένου να εντοπίσει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του δικτύου και να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση του δικτύου. Ενδεικτικά αναφέρονται [110] το τροποποιημένο ETX (modifiedETX – mETX), το Ενεργό Πλήθος Μεταδόσεων (Effective Number of Transmissions – ENT), ο Προσδοκητός Ρυθμός Μετάδοσης (Expected Data Rate – EDR), ο Προσδοκητός Χρόνος Μετάδοσης (Expected Transmission Time – ETT), ο Σταθμισμένος Άθροιστικός ETT (Weighted Cumulative ETT – WCETT), η Πολυ-κάναλη Δρομολόγηση (Multi-Channel Routing – MCR), η Μετρική Παρεμβολής και Εναλλαγής Διαύλων (Metric of Interference and Channel-Switching – MIC).

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί το ETX μπορεί να περιγραφεί από την αλγεβρική πλειάδα:

$$(L_{ETX}, \Sigma_{ETX}, W_{ETX}, f_{ETX}, +, \leq) \quad (5.7)$$

όπου L_{ETX} το σύνολο των ετικετών των ζεύξεων ή αλλιώς οι τιμές ETX των ζεύξεων που ορίζονται στο διάστημα $[1, +\infty]$, Σ_{ETX} το σύνολο των υπογραφών ή οι τιμές ETX των μονοπατιών που ορίζονται επίσης στο διάστημα $[1, +\infty]$, W_{ETX} το σύνολο των βαρών των μονοπατιών που προκύπτουν εφαρμόζοντας τη συνάρτηση f_{ETX} στις υπογραφές, το σύμβολο $+$ υποδεικνύει ότι οι ετικέτες και οι υπογραφές προστίθενται προκειμένου να προκύψει η υπογραφή του μονοπατιού, ενώ η σχέση διάταξης είναι \leq . Το σύνολο W_{ETX} συνδέεται στενά με την επιλογή της συνάρτησης f_{ETX} . Εάν η συνάρτηση έχει τύπο $f_{ETX}^1(\alpha) = \alpha$, όπου $\alpha \in \Sigma$, τότε, εφόσον το βάρος του μονοπατιού ισούται με το άθροισμα των τιμών ETX των ζεύξεών του, το σύνολο των βαρών ορίζεται στο διάστημα $W_{ETX} = [1, +\infty]$. Ο υπολογισμός του βάρους των μονοπατιών βάσει της άθροισης των τιμών ETX των επιμέρους ζεύξεων στηρίζεται στη ρεαλιστική υπόθεση ότι το σύστημα υποστηρίζει αναμεταδόσεις του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Με άλλα λόγια, κάθε κόμβος που ανήκει στο μονοπάτι θα μεταδώσει εκ νέου ένα πακέτο, για το οποίο δεν έχει λάβει επιβεβαίωση, προκειμένου η λήψη του τελικά να είναι εγγυημένη.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι αλγεβρικές ιδιότητες του ETX, πρέπει να εξεταστούν η μονοτονία και η αυστηρή ισοτονικότητα για την άλγεβρα που περιγράφεται από την πλειάδα $([1, +\infty], [1, +\infty], [1, +\infty], f_{ETX}^1, +, \leq)$. Σύμφωνα με αυτήν τη διατύπωση, η τήρηση της μονοτονίας \leq επιβάλλει ότι για $a, l \in [1, +\infty]$:

$$f_{ETX}^1(a) \leq f_{ETX}^1(l + a) \quad (5.8)$$

το οποίο ισχύει. Έτσι, η άλγεβρα αποδεικνύεται αριστερά μονότονη. Ομοίως μπορεί να αποδειχτεί ότι είναι δεξιά μονότονη. Κατ' αντιστοιχία, η αυστηρή ισοτονικότητα υπονοεί ότι για $a, b, l \in [1, +\infty]$:

$$f_{ETX}^1(a) < f_{ETX}^1(b) \Rightarrow f_{ETX}^1(a+l) < f_{ETX}^1(b+l) \quad (5.9)$$

το οποίο ισχύει, αφού:

$$f_{ETX}^1(a) < f_{ETX}^1(b) \Rightarrow a < b \Rightarrow \quad (5.10)$$

$$a+l < b+l \Rightarrow f_{ETX}^1(a+l) < f_{ETX}^1(b+l) \quad (5.11)$$

Έτσι, η άλγεβρα είναι επίσης αυστηρά δεξιά μονότονη. Ομοίως αποδεικνύεται ότι είναι και αριστερά ισότονη.

5.2.2 Δείκτης Προώθησης Πακέτων (Packet Forwarding Indication – PFI)

Ο «Δείκτης Προώθησης Πακέτων» (Packet Forwarding Indication – PFI) ορίζεται ως μια αποτελεσματική μετρική εμπιστοσύνης, η οποία αξιολογεί την προθυμία προώθησης πακέτων των εμπλεκόμενων κόμβων. Ως τέτοια, στοχεύει σε επιθέσεις που σχετίζονται με την προώθηση πακέτων, όπως μαύρης ή γκριζας τρύπας, επιλεκτικής προώθησης κλπ. Ακολουθώντας τον ορισμό του ETX, το PFI ορίζεται ως το αντίστροφο της πιθανότητας ότι ο κόμβος u_j θα προωθήσει περαιτέρω ένα πακέτο που προέρχεται από τον κόμβο u_i και εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$PFI_{ij} = \frac{1}{p_f^{ij}} \quad (5.12)$$

όπου p_f^{ij} η πιθανότητα του κόμβου u_j να προωθεί πακέτα που δέχεται από τον κόμβο u_i .

Τότε, η πιθανότητα p_f^{ij} ορίζεται ως εξής:

$$p_f^{ij} = \frac{N_s^{ij}}{N_t^{ij}} \quad (5.13)$$

όπου N_s^{ij} το πλήθος των επιτυχώς προωθημένων πακέτων (που προέρχονται από τον κόμβο u_i) από τον κόμβο u_j και N_t^{ij} το συνολικό πλήθος πακέτων που έστειλε ο κόμβος u_i στον κόμβο u_j για περαιτέρω προώθηση. Το PFI εκφράζει το προσδοκητό πλήθος των μεταδόσεων που απαιτούνται για να φτάσει ένα πακέτο στον προορισμό του, όταν οι αποτυχίες μετάδοσης οφείλονται σε άρνηση προώθησης. Η τιμή PFI που υπολογίζεται για μια διαδρομή εξαρτάται από την αντίδραση του κόμβου μετά τη συνειδητοποίηση ότι ο γείτονας του δεν προώθησε το πακέτο που του έστειλε. Συγκεκριμένα, οι τιμές βαρών PFI ενός μονοπατιού εξαρτώνται από τη δυνατότητα αναμεταδόσεων σε επίπεδο δικτύου κάθε πακέτου που δεν έχει προωθηθεί περαιτέρω. Στη συνέχεια το PFI διατυπώνεται σύμφωνα με τις αρχές της άλγεβρας δρομολόγησης και για τις δύο περιπτώσεις, είτε θεωρηθεί ότι υποστηρίζονται αναμεταδόσεις είτε όχι.

5.2.2.1 *PFIadd*: Με Αναμεταδόσεις Στρώματος Δικτύου

Σε αυτήν την περίπτωση, θεωρείται ότι αφού ένας κόμβος u_i στείλει ένα πακέτο στον κόμβο u_j , μετά εισέρχεται σε λειτουργία παρακολούθησης, προκειμένου να αντιληφθεί τυχόν μετάδοση του πακέτου που απέστειλε από τον κόμβο u_j . Εφόσον κάτι τέτοιο δε συμβεί, τότε ο κόμβος u_i στέλνει εκ νέου το πακέτο μέχρι να ανιχνεύσει περαιτέρω προώθηση από τον επόμενο κόμβο. Η συγκεκριμένη περίπτωση χαρακτηρίζεται και ως «καλοπροαίρετου κόμβου», καθώς ο κόμβος u_i θεωρεί ότι η αποτυχία αποστολής οφείλεται σε αδυναμία, π.χ. υπερχειλίση ουράς αναμονής, και όχι σε κακόβουλη συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τον ορισμό, το προσδοκητό πλήθος μεταδόσεων κατά μήκος μιας διαδρομής προκύπτει ως το άθροισμα των τιμών PFI των μεμονωμένων ζεύξεων, οπότε το PFI συμβολίζεται ως *PFIadd*. Έτσι, το PFI θα οδηγήσει τα πακέτα μέσω διαδρομών που διαφημίζουν το ελάχιστο πλήθος μεταδόσεων. Αυτό σημαίνει ότι ένας κακόβουλος κόμβος θα παρακαμφθεί, μόνο εφόσον υπάρχει μονοπάτι προς τον προορισμό που απαιτεί λιγότερες μεταδόσεις, αφού ούτως ή άλλως το πακέτο δεν πρόκειται να χαθεί. Έτσι, αν για παράδειγμα ο κόμβος u_j εισάγει επίθεση γκρίζας τρύπας, απορρίπτοντας τη μισή κίνηση που καταφτάνει σε αυτόν, τότε απαιτούνται δύο μεταδόσεις κατά μέσο για να προωθήσει τα πακέτα που δέχεται. Αν το επόμενο μονοπάτι (από άποψης μεταδόσεων) περιέχει έμπιστους κόμβους, αλλά περιέχει δύο επιπλέον βήματα, τότε η επιλογή του μονοπατιού που περιέχει τον κόμβο u_j είναι συμφέρουσα.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί σαν μετρική δρομολόγησης το *PFIadd*, περιγράφεται από την αλγεβρική πλειάδα:

$$(L_{PFIadd}, \Sigma_{PFIadd}, W_{PFIadd}, f_{PFIadd}, +, \leq) \quad (5.14)$$

όπου L_{PFIadd} το σύνολο των ετικετών ή των τιμών PFI των ζεύξεων που ταυτίζεται με το $[1, +\infty]$, Σ_{PFIadd} το σύνολο των υπογραφών ή τιμών PFI των μονοπατιών που επίσης ταυτίζεται με το $[1, +\infty]$, W_{PFIadd} το σύνολο βαρών μονοπατιών που προκύπτουν εφαρμόζοντας τη συνάρτηση f_{PFIadd} στις υπογραφές των αντίστοιχων μονοπατιών, το σύμβολο $+$ δηλώνει ότι οι ετικέτες και οι υπογραφές προστίθενται για να εξάγουν την υπογραφή ενός μονοπατιού και η σχέση διάταξης είναι \leq . Η συνάρτηση f_{PFIadd} μπορεί να πάρει τη μορφή $f_{PFIadd}^1(\alpha) = \alpha$, όπου $a \in \Sigma$ και $W_{PFIadd} = [1, +\infty]$. Τότε, η άλγεβρα είναι μονότονη και ισοτονική, όπως αποδεικνύεται και για το ETX.

5.2.2.2 *PFImulti*: Χωρίς Αναμεταδόσεις Στρώματος Δικτύου

Σε αυτήν περίπτωση, θεωρείται ότι δεν υποστηρίζονται αναμεταδόσεις πακέτων που δεν προωθήθηκαν από ενδιάμεσους κόμβους. Έτσι, σε περίπτωση που ο κόμβος u_i αντιληφθεί απόρριψη πακέτου, το γεγονός αυτό καταγράφεται και το πακέτο θεωρείται χαμένο. Η περίπτωση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί και ως περίπτωση «πονηρού κόμβου», καθώς θεωρεί ότι το πακέτο απορρίφθηκε επί τούτου και έτσι δεν επιχειρεί εκ νέου αποστολή.

Οι δύο περιπτώσεις εκφράζουν το συμβιβασμό ανάμεσα σε δύο απαιτήσεις, ήτοι την κατανάλωση ενέργειας και την παράδοση των πακέτων. Σε περίπτωση που δίνεται έμφαση στην παράδοση των πακέτων, προτιμάται η πρώτη περίπτωση κατά την οποία το πακέτο μεταδίδεται μέχρι να φτάσει στον προορισμό του ή μέχρι ένα όριο αναμεταδόσεων. Στην περίπτωση κατά την οποία δίδεται έμφαση στην κατανάλωση ενέργειας, ενώ μπορούν να γίνουν υποχωρήσεις στην παράδοση των μηνυμάτων, τα χαμένα πακέτα δεν αναμεταδίδονται, οπότε δεν καταναλώνεται ενέργεια με πρόσθετες μεταδόσεις.

Η τιμή PFI μιας διαδρομής σε δίκτυο χωρίς αναμεταδόσεις στρώματος δικτύου εκφράζεται ως ο προσδοκητός αριθμός μεταδόσεων κατά μήκος μιας διαδρομής και εξάγεται με τη βοήθεια της αθροιστικής πιθανότητας προώθησης κατά μήκος αυτής. Δεδομένου ότι η αποτυχία προώθησης σε μια ζεύξη συνεπάγεται απώλεια του πακέτου, η τιμή αυτή προκύπτει υπό την έννοια μιας πολλαπλασιαστικής μετρικής. Για λόγους της ανάλυσης, έστω το μονοπάτι $(u_i, u_{i+1}, u_{i+2}, u_{i+3})$, στο οποίο οι πιθανότητες προώθησης που υπολογίζονται για τους κόμβους $u_{i+1}, u_{i+2}, u_{i+3}$ και αφορούν το επόμενο βήμα επί του μονοπατιού, είναι $p_f^{i,i+1}$, $p_f^{i+1,i+2}$, $p_f^{i+2,i+3}$, αντίστοιχα. Τότε, η πιθανότητα προώθησης της διαδρομής δίδεται από τη σχέση:

$$p_f^{path} = p_f^{i,i+1} \cdot p_f^{i+1,i+2} \cdot p_f^{i+2,i+3} \quad (5.15)$$

Επίσης, ο προσδοκητός αριθμός μεταδόσεων κατά μήκος του μονοπατιού είναι:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p_f^{path}} &= \frac{1}{p_f^{i,i+1} \cdot p_f^{i+1,i+2} \cdot p_f^{i+2,i+3}} && \text{ή} \\ \frac{1}{p_f^{path}} &= \frac{1}{p_f^{i,i+1}} \cdot \frac{1}{p_f^{i+1,i+2}} \cdot \frac{1}{p_f^{i+2,i+3}} \end{aligned} \quad (5.16)$$

το οποίο οδηγεί στο εξής:

$$PFI_{multi\ path} = PFI_{i,i+1} \cdot PFI_{i+1,i+2} \cdot PFI_{i+2,i+3} \quad (5.17)$$

Επομένως, η τιμή του PFI κατά μήκος της διαδρομής προκύπτει ως το γινόμενο των τιμών PFI των μεμονωμένων ζεύξεων και συμβολίζεται στο εξής ως PFI_{multi} για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Σύμφωνα με τους ορισμούς της άλγεβρας δρομολόγησης, το PFI_{multi} φαίνεται να είναι μονότονο και ισοτονικό, αλλά όχι αυστηρά ισοτονικό. Αυτό σημαίνει ότι το PFI_{multi} σαν μετρική δρομολόγησης οδηγεί σε βέλτιστα μονοπάτια από πλευράς εμπιστοσύνης κόμβων, τα οποία όμως δε συγκλίνουν πάντα. Συνεπώς, δεν είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός δρομολόγησης στην παρούσα μορφή του.

Άρα, το PFI_{multi} πρέπει να μεταβληθεί, προκειμένου να:

- Καταλήγει σε μονοπάτια που συγκλίνουν και είναι βέλτιστα
- Διατηρεί την πολλαπλασιαστική φύση του, όπως εξήχθη από την πιθανότητα προώθησης πακέτων
- Μπορεί να συμπεριληφθεί ως μετέχουσα μετρική σε αθροιστική σύνθεση
- Εγγυάται τις συγκριτικές ιδιότητες του PFI κατά μήκος των θεωρούμενων μονοπατιών.

Η μορφή PFI που εξυπηρετεί τις ανωτέρω απαιτήσεις προκύπτει από λογαριθμοποίηση της υπάρχουσας τιμής PFI κάθε ζεύξης, οπότε παράγεται το PFI_{log} ως εξής:

$$PFI_{log} = \log(10 \cdot PFI) \quad (5.18)$$

Η τιμή PFI του μονοπατιού με βάση το PFI_{log} υπολογίζεται ως εξής:

$$PFI_{log_{path}} = \log(10 \cdot PFI_{i,i+1}) + \log(10 \cdot PFI_{i+1,i+2}) + \log(10 \cdot PFI_{i+2,i+3}) \quad (5.19)$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, το PFI_{log} θα επιχειρήσει να προσπεράσει τους κακόβουλους κόμβους και να οδηγήσει τα πακέτα μέσω πιθανώς μακρύτερων μονοπατιών, που όμως αποτελούνται από πιο έμπιστους κόμβους.

Υπό το πρίσμα της άλγεβρας δρομολόγησης, το πρωτόκολλο δρομολόγησης που στηρίζεται στο PFI_{log} για τον υπολογισμό των βαρών των μονοπατιών περιγράφεται από την άλγεβρα:

$$(L_{PFI_{log}}, \Sigma_{PFI_{log}}, W_{PFI_{log}}, f_{PFI_{log}}, +, \leq) \quad (5.20)$$

όπου $L_{PFI_{log}}$ το σύνολο των ετικετών των ζεύξεων ή τιμών PFI_{log} που ταυτίζεται με το $[1, +\infty]$, $\Sigma_{PFI_{log}}$ το σύνολο των υπογραφών των μονοπατιών (επίσης $[1, +\infty]$), $W_{PFI_{log}}$ το σύνολο των βαρών των μονοπατιών που προκύπτουν εφαρμόζοντας τη συνάρτηση $f_{PFI_{log}}$ στις υπογραφές, το σύμβολο $+$ δηλώνει ότι οι τιμές των υπογραφών προκύπτουν ως το άθροισμα των ετικετών ή των υπογραφών των επιμέρους ζεύξεων ή μονοπατιών και η σχέση διάταξης μεταξύ των βαρών PFI_{log} διαφορετικών μονοπατιών είναι \leq . Τέλος, θεωρώντας, για παράδειγμα, τη συνάρτηση $f_{PFI_{log}}^1(\alpha) = \alpha$, όπου $\alpha \in \Sigma$ και $W_{PFI_{log}} = [1, +\infty]$, η άλγεβρα (5.23) είναι μονότονη και αυστηρά ισοτονική, γεγονός που εξασφαλίζει τη σύγκλιση και το βέλτιστον της χωρίς βρόχους λύσης.

5.3 Σύνθεση Μετρικών Δρομολόγησης

Οι μετρικές δρομολόγησης στοχεύουν στην ανίχνευση συγκεκριμένων συμπεριφορών ή χαρακτηριστικών των ζεύξεων. Διαφορετικές μετρικές εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς. Ως αποτέλεσμα, μια μετρική μπορεί να παρατηρεί μια συγκεκριμένη συμπεριφορά, αλλά μπορεί να αδυνατεί να αποφύγει διαφοροποιημένες συμπεριφορές. Παρόλα αυτά, στις

πραγματικές εφαρμογές συνήθως είναι επιθυμητό να αποφευχθούν διάφοροι τύποι συμπεριφορών, οπότε μια μεμονωμένη μετρική δεν είναι κατάλληλη για να καλύψει μια ευρεία γκάμα απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας, ειδικά όταν αυτές προσανατολίζονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Συνεπώς, η χρήση πολλαπλών μετρικών είναι επιβεβλημένη στην πράξη. Η σύνθεση πολλαπλών μετρικών αποτελεί ένα πεδίο πρόκλησης, ειδικά εφόσον απαιτείται και η ικανοποίηση των απαιτήσεων δρομολόγησης. Τότε, το αποτέλεσμα της σύνθεσης έχει διττό σκοπό· αφενός την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας κάθε μεμονωμένης μετρικής που θεωρείται και αφετέρου την κάλυψη των απαιτήσεων του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται δύο κύριες εναλλακτικές μέθοδοι συνδυασμού πολλαπλών μετρικών, ήτοι η *λεξικογραφική σύνθεση μετρικών* και η *αθροιστική σύνθεση μετρικών* [117].

5.3.1 Λεξικογραφική Σύνθεση Μετρικών

Έστωσαν δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης, καθένα εκ των οποίων ενσωματώνει μια μόνο μετρική για τον υπολογισμό του βάρους των υποψήφιων διαδρομών, τα οποία περιγράφονται από τις άλγεβρες $(L_1, \Sigma_1, W_1, f_1, \oplus_1, \preceq_1)$ και $(L_2, \Sigma_2, W_2, f_2, \oplus_2, \preceq_2)$ αντίστοιχα. Τότε, το πρωτόκολλο δρομολόγησης με σύνθετη μετρική, η οποία προκύπτει μέσω της λεξικογραφικής προσέγγισης, περιγράφεται από την εξάδα:

$$(L_{lex}, \Sigma_{lex}, W_{lex}, f_{lex}, \oplus_{lex}, \preceq_{lex}) \quad (5.21)$$

όπου $L_{lex} = L_1 \times L_2$ το σύνολο των ετικετών που αποδίδονται στις ζεύξεις, $\Sigma_{lex} = \Sigma_1 \times \Sigma_2$ το σύνολο των υπογραφών, $W_{lex} = W_1 \times W_2$ το σύνολο των βαρών των μονοπατιών, \oplus_{lex} η πράξη που εφαρμόζεται σε ετικέτες και υπογραφές, και \preceq_{lex} η σχέση διάταξης ανάμεσα στα βάρη των μονοπατιών. Η συνάρτηση f_{lex} , η οποία έχει πεδίο ορισμού $\Sigma_1 \times \Sigma_2$ και σύνολο τιμών W_{lex} , ορίζεται ως εξής:

$$f_{lex} : \Sigma_1 \times \Sigma_2 \rightarrow W_{lex} \quad (5.22)$$

$$f_{lex}(a_1, a_2) = (f_1(a_1), f_2(a_2)), \text{ για } a_1 \in \Sigma_1 \text{ και } a_2 \in \Sigma_2$$

Η πράξη \oplus_{lex} ανάμεσα στις ετικέτες και τις υπογραφές ορίζεται ως εξής:

$$(l_1, l_2) \oplus_{lex} (a_1, a_2) = (l_1 \oplus_1 a_1, l_2 \oplus_2 a_2) \quad (5.23)$$

όπου $(l_1, l_2) \in L_{lex}$ and $(a_1, a_2) \in \Sigma_{lex}$.

Η σχέση διάταξης \preceq_{lex} ορίζεται ως η λεξικογραφική σύνθεση του ζεύγους (\preceq_1, \preceq_2) .

Ειδικότερα, για $w_a, w_b \in W$:

$$w_a \preceq_{lex} w_b \iff w_a \preceq_1 w_b \text{ και } w_a \preceq_2 w_b \quad (5.24)$$

$$\iff (w_1^a < w_1^b) \vee (w_1^a = w_1^b \wedge (w_2^a \preceq_2 w_2^b)) \quad (5.25)$$

για $w_1^a, w_1^b \in W_1$ και $w_2^a, w_2^b \in W_2$.

Συνεπώς, κατά τη σύγκριση δύο σύνθετων μετρικών, ο κόμβος πρέπει να επιλέξει ως πατέρα τον κόμβο με την καλύτερη τιμή της πρώτης μετρικής που συμμετέχει στη σύνθεση και, εφόσον οι τιμές των δύο μονοπατιών είναι ίσες για την πρώτη μετρική, ο κόμβος θα επιλέξει το μονοπάτι με την καλύτερη τιμή της δεύτερης μετρικής.

5.3.2 Αθροιστική Σύνθεση Μετρικών

Έστωσαν $(L_1, \Sigma_1, W_1, f_1, \oplus_1, \preceq_1)$ και $(L_2, \Sigma_2, W_2, f_2, \oplus_2, \preceq_2)$ οι άλγεβρες που περιγράφουν δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης, καθένα εκ των οποίων ενσωματώνει μια μόνο μετρική δρομολόγησης. Τότε, η σύνθετη μετρική που απορρέει με την αθροιστική προσέγγιση σύνθεσης δίνεται από την εξίσωση:

$$(L_{add}, \Sigma_{add}, W_{add}, f_{add}, \oplus_{add}, \preceq_{add}) \quad (5.26)$$

όπου $L_{add} = L_1 \times L_2$ το σύνολο των ετικετών των ζεύξεων, $\Sigma_{add} = \Sigma_1 \times \Sigma_2$ το σύνολο των υπογραφών, W_{add} το σύνολο των βαρών των μονοπατιών, \oplus_{add} η πράξη που εφαρμόζεται στις ετικέτες και τις υπογραφές και \preceq_{add} η σχέση διάταξης ανάμεσα στα βάρη. Η συνάρτηση f_{add} με πεδίο ορισμού $\Sigma_1 \times \Sigma_2$ και σύνολο τιμών W_{add} ορίζεται ως εξής:

$$f_{add} : \Sigma_1 \times \Sigma_2 \rightarrow W_{add} \quad (5.27)$$

$$f_{add}(a_1, a_2) = f_1(a_1) + f_2(a_2), \text{ για } a_1 \in \Sigma_1 \text{ και } a_2 \in \Sigma_2 \quad (5.28)$$

Η πράξη \oplus_{add} ορίζεται με όμοιο τρόπο με τη λεξικογραφική προσέγγιση:

$$(l_1, l_2) \oplus_{add} (a_1, a_2) = (l_1 \oplus_1 a_1, l_2 \oplus_2 a_2) \quad (5.29)$$

όπου $(l_1, l_2) \in L_{add}$ και $(a_1, a_2) \in \Sigma_{add}$.

Η σχέση διάταξης \preceq_{add} ορίζεται ως ακολούθως για $w_a, w_b \in W_{add}$:

$$w_a \preceq_{add} w_b \Leftrightarrow w_1^a + w_2^a \leq w_1^b + w_2^b, \quad (5.30)$$

για $w_1^a, w_1^b \in W_1$ και $w_2^a, w_2^b \in W_2$.

Γενικεύοντας τον παραπάνω ορισμό, μπορεί να εφαρμοστεί ένα διάνυσμα στάθμισης c στις συνθέτουσες συναρτήσεις, οπότε η συνάρτηση f ορίζεται ως εξής:

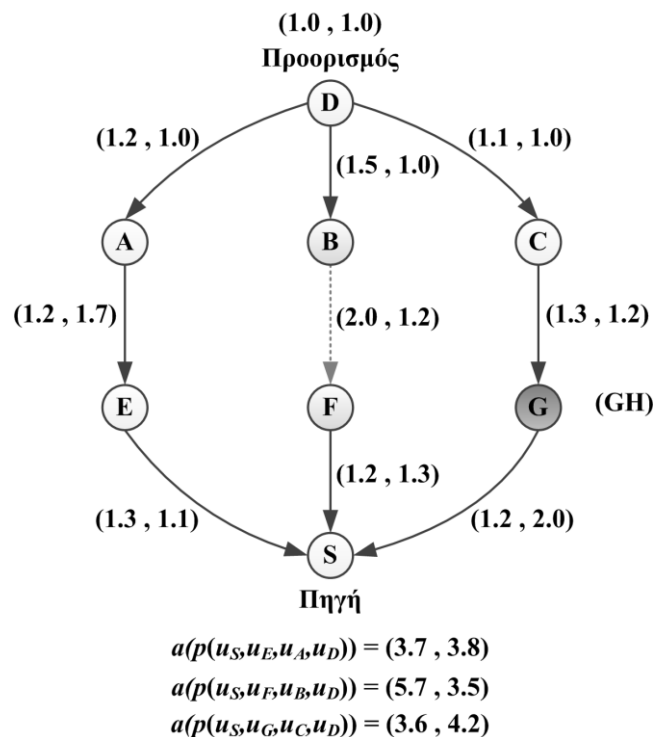
$$f_{add}(a_1, a_2) = c_1 f_1(a_1) + c_2 f_2(a_2) = c_1 w_1 + c_2 w_2 \quad (5.31)$$

όπου $c = (c_1, c_2) \in W_1 \times W_2$ και τα c_1, c_2 δεν μπορούν να είναι ίσα με $\bar{0}$ ταυτόχρονα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις εργασίες [22]-[24], [117], αν δύο μετρικές δρομολόγησης είναι μονότονες και αυστηρά ισότονες, τότε η λεξικογραφική τους σύνθεση είναι επίσης μονότονη και ισότονη. Παρ' όλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν ισχύει στη γενική περίπτωση για την αθροιστική σύνθεση δύο οποιωνδήποτε μετρικών δρομολόγησης.

5.4 Απλές και Σύνθετες Μετρικές Δρομολόγησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρήση μιας απλής μετρικής αδυνατεί να συλλάβει διαφορετικές πτυχές της λειτουργίας του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η χρησιμοποίηση απλών και σύνθετων μετρικών, οι οποίες προκύπτουν με σταθμισμένο συνδυασμό απλών μετρικών ούτως, ώστε κάθε μετρική να αποκτά τη δέουσα προσοχή. Για τους σκοπούς της ανάλυσης χρησιμοποιείται ενδεικτικά το δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Τοπολογία ασύρματου δικτύου αισθητήρων, θεωρώντας ζεύγη τιμών ETX και PFI σε κάθε ζεύξη. Η φορά των ζεύξεων συνάδει με την επιλογή των γονέων, ενώ τα δεδομένα κυκλοφορούν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ο κόμβος u_G εισάγει επιθέσεις γκρίζας τρύπας (Grey Hole – GH), απορρίπτοντας τη μισή από την κίνηση που φτάνει σε αυτόν, ενώ ο κόμβος u_B στέλνει μηνύματα αναγνώρισης για τα μισά μηνύματα που αποστέλλονται σε αυτόν. Επίσης, παρατηρούνται τιμές PFI μεγαλύτερες της μονάδας σε περιπτώσεις μη κακόβουλων κόμβων, όπου ο γονέας προωθεί την κίνηση, αλλά ο κόμβος-τέκνο δεν ανιχνεύει την προώθηση.

Έστω, λοιπόν, το εν λόγω δίκτυο (βλ. Σχήμα 14), όπου u_S είναι ο κόμβος-πηγή, που αντιστοιχεί σε κόμβο-αισθητήρα που αποστέλλει δεδομένα στον κόμβο u_D , που είναι ο κόμ-

βος-προορισμός. Τα διατεταγμένα ζεύγη αριθμών στις παρενθέσεις αναπαριστούν ζεύγη τιμών (ETX, PFI) τα οποία διαφημίζονται στην κατεύθυνση προς τα κάτω μέσω μηνυμάτων ελέγχου (DIO) προκειμένου να δομηθεί ο γράφος του δικτύου. Τα ζεύγη τιμών σε κάθε ζεύξη δηλώνουν τις τιμές των ετικετών που υπολογίζει κάθε κόμβος για τη ζεύξη προς τους εξωτερικούς του γείτονες, όπως για παράδειγμα ο κόμβος u_F για τον κόμβο u_B . Έτσι, κατά τη δόμηση του γράφου, ο κόμβος u_F υπολογίζει το βαθμό του, συνδυάζοντας τις τιμές (ETX, PFI) που υπολογίζει για τη ζεύξη του με τον κόμβο u_B με το βαθμό που έχει λάβει από αυτόν. Στη συνέχεια, ο κόμβος u_F διαφημίζει τον προκύπτοντα βαθμό στον κόμβο u_S για την πρόσβαση προς τον προορισμό. Σημειώνεται ότι ο βαθμός ενός κόμβου κατά το RPL ταυτίζεται με την υπογραφή του μονοπατιού του κόμβου προς τον προορισμό κατά τις ορολογίες της άλγεβρας δρομολόγησης. Επίσης, ο κόμβος-προορισμός u_D αρχικά διαφημίζει τις τιμές αναφοράς (1.0, 1.0), μιας και δεν έχει εξωτερικό γείτονα (προς τα άνω). Επιπλέον, οι τιμές PFI που ανατίθενται στον προορισμό είναι εξ ορισμού ίσες με 1.0.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, στο παρόν δίκτυο ο κόμβος u_G λειτουργεί ως κακόβουλος γκρίζας τρύπας (GH), το οποίο σημαίνει ότι προωθεί επιλεκτικά την κίνηση απορρίπτοντας τα μισά πακέτα που δέχεται, ενώ ο κόμβος u_B στέλνει μηνύματα αναγνώρισης για τα μισά από τα πακέτα που αποστέλλονται σε αυτόν, υπονοώντας ότι η ζεύξη $\langle u_F, u_B \rangle$ χαρακτηρίζεται από 50% πιθανότητα παράδοσης πακέτου και, επομένως, είναι αναξιόπιστη.

5.4.1 Απλές μετρικές

Με βάση τις πρότερες αναφορές, η χρησιμοποίηση απλών μετρικών σημαίνει ότι μόνο ένας τύπος ανεπιθύμητων καταστάσεων λαμβάνεται υπόψη κατά τη δρομολόγηση, αγνοώντας διαφορετικούς τύπους συμπεριφορών.

Έστω ότι το ETX είναι η μοναδική απλή μετρική, η οποία λαμβάνεται υπόψη κατά τη δρομολόγηση στο δίκτυο που απεικονίζει το Σχήμα 14. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κόμβος u_S έχει να επιλέξει ανάμεσα στα μονοπάτια

- $p_1 \equiv p(u_S, u_E, u_A, u_D)$, για το οποίο η τιμή ETX είναι 3.7,
- $p_2 \equiv p(u_S, u_F, u_B, u_D)$, για το οποίο η τιμή ETX είναι 4.7,
- $p_3 \equiv p(u_S, u_G, u_C, u_D)$, για το οποίο η τιμή ETX είναι 3.6.

Μεταξύ αυτών ο κόμβος u_S θα προτιμήσει το μονοπάτι p_3 για την προώθηση των δεδομένων που συλλέγει, εφόσον επιτυγχάνει την ελάχιστη τιμή ETX. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο κόμβος αδυνατεί να αντιληφθεί την κακόβουλη συμπεριφορά του κόμβου u_G , γεγονός που σημαίνει ότι με αυτήν την επιλογή του περισσότερο από τα μισά πακέτα του θα απορριφθούν για το *PFIadd* ή θα αναμεταδοθούν για το *PFIlog* λόγω κακόβουλης συμπεριφοράς.

Έστω τώρα ότι το δίκτυο στηρίζεται στην μετρική PFI για τη δρομολόγηση πληροφορίας προς τον προορισμό. Τώρα ο κόμβος u_S έρχεται αντιμέτωπος με τις εξής επιλογές:

- p_1 με τιμή PFI 3.8,

- p_2 με τιμή PFI 3.5,
- p_3 με τιμή PFI 4.3.

Σε αυτήν την περίπτωση ο κόμβος u_S επιλέγει το μονοπάτι p_3 , αγνοώντας την ασταθή ζεύξη $\langle u_F, u_B \rangle$ που περιέχει. Έτσι, ενώ με την παρούσα επιλογή ο λόγος παράδοσης πακέτων (packet delivery ratio) πλησιάζει το 100%, ωστόσο θα πραγματοποιούνται πολλαπλές μεταδόσεις στην ασταθή ζεύξη, υπονοώντας αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και καθυστέρηση.

Συνεπώς, σε καμιά από τις δύο περιπτώσεις δεν επιλέγεται το μονοπάτι p_1 , το οποίο παρουσιάζει μια ισορροπημένη λύση και για τις δύο μετρικές. Επομένως, η χρησιμοποίηση απλών μετρικών δρομολόγησης αδυνατεί να παρέχει την ευρέως αποδεκτή λύση.

5.4.2 Λεξικογραφικώς Σύνθετη Μετρική

Έστω, τώρα, ένα λεξικογραφικό σχήμα σύνθεσης μετρικών, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη τόσο η αξιοπιστία της ζεύξης όσο και η εμπιστευτικότητα των κόμβων για το δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 14. Θεωρώντας τις αλγεβρικές πλειάδες (5.7), (5.14) και (5.20) της ενότητας 5.2, η πράξη για τον υπολογισμό των υπογραφών είναι $+$ για το ETX, αλλά και για το PFI, άρα οι τιμές ETX και PFI ενός μονοπατιού εξάγονται προσθέτοντας τις τιμές ETX και PFI (ετικέτες) των επιμέρους ζεύξεων. Σύμφωνα με την ορολογία της μη κλασικής άλγεβρας, η λεξικογραφική σύνθεση περιγράφεται από την πλειάδα (5.21), όπου $L_{lex} \equiv [1, +\infty] \times [1, +\infty]$ το σύνολο των ετικετών που αποδίδονται στις ζεύξεις, $\Sigma_{lex} \equiv [1, +\infty] \times [1, +\infty]$ το σύνολο των υπογραφών, $W_{lex} \equiv [1, +\infty] \times [1, +\infty]$ το σύνολο των βαρών μονοπατιού, Θ_{lex} είναι η πράξη που εφαρμόζεται ανάμεσα σε ετικέτες και υπογραφές και \leq_{lex} η σχέση διάταξης των βαρών των μονοπατιών. Η συνάρτηση f_{lex} έχει πεδίο ορισμού το $[1, +\infty] \times [1, +\infty]$ και σύνολο τιμών το $[1, +\infty] \times [1, +\infty]$ ως εξής:

$$f_{lex} : [1, +\infty] \times [1, +\infty] \rightarrow [1, +\infty] \times [1, +\infty] \quad (5.32)$$

Η συνάρτηση f_{lex} εφαρμόζεται στο ζεύγος (ETX, PFI) ενός μονοπατιού, για να προκύψει το βάρος αυτού. Εφόσον οι απλές μετρικές ETX και PFI είναι μονότονες και αυστηρά ισοτονικές, τότε, σύμφωνα με την ενότητα 5.3, η λεξικογραφική τους σύνθεση είναι επίσης μονότονη και ισότονη. Για δύο μετρικές προκύπτουν οι ακόλουθες λεξικογραφικώς σύνθετες μετρικές:

- Πιο έμπιστη-πιο αξιόπιστη, που υπονοεί ότι ένας κόμβος θα επιλέξει να προωθήσει την κίνησή του μέσω του κόμβου με την ελάχιστη τιμή PFI μέσα από ένα σύνολο γειτόνων με ελάχιστη τιμή ETX.

- Πιο αξιόπιστη-πιο έμπιστη, στην οποία κάθε κόμβος επιλέγει να δρομολογήσει την κίνησή του μέσω του κόμβου με την αξιόπιστη ζεύξη ανάμεσα σε ένα σύνολο μέγιστα έμπιστων κόμβων.

Στην πρώτη περίπτωση ο κόμβος u_S επιλέγει το μονοπάτι p_3 , καθώς η τιμή του ETX είναι εκείνη που ουσιαστικά καθορίζει την απόφαση της δρομολόγησης. Η τιμή του PFI λαμβάνεται υπόψη μόνο εφόσον υπάρχει αβεβαιότητα λόγω του ETX, δηλαδή εμφανίζονται περισσότερα του ενός μονοπάτια με τιμή ETX ίση με την ελάχιστη παρατηρηθείσα. Αντίστοιχα, στη δεύτερη περίπτωση ο κόμβος u_S επιλέγει τον κόμβο u_F ως κόμβο-γονέα, παρόλο που σε αυτήν τη διαδρομή απαιτούνται πολλαπλάσιες μεταδόσεις συγκριτικά με άλλες διαδρομές.

Συνεπώς, σε καμία από τις προσεγγίσεις λεξικογραφικής σύνθεσης, δεν επιλέγεται το μονοπάτι p_1 που είναι ελεύθερο από κακόβουλους κόμβους και ασταθείς ζεύξεις. Συγκεκριμένα, απουσία ίσων τιμών για την εκάστοτε πρώτη μετρική, η λεξικογραφική μέθοδος σύνθεσης εκφυλίζεται σε δρομολόγηση απλής μετρικής.

5.4.3 Αθροιστικώς Σύνθετη Μετρική

Έστω ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο χρησιμοποιεί τις μετρικές ETX και PFI υπό την αθροιστική μέθοδο σύνθεσης. Ακολουθώντας τις πλειάδες (5.7), (5.14) και (5.20) για την αλγεβρική αναπαράσταση των απλών μετρικών και την (5.26) για την αναπαράσταση της αθροιστικής μεθόδου σύνθεσης, το θεωρούμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης χαρακτηρίζεται από $L_{add} \equiv [1, +\infty] \times [1, +\infty]$, $\Sigma_{add} \equiv [1, +\infty] \times [1, +\infty]$, $W_{add} \equiv [1, +\infty]$. Η συνάρτηση f_{add} έχει πεδίο ορισμού $\Sigma_{add} \equiv [1, +\infty] \times [1, +\infty]$ και σύνολο τιμών $W_{add} \equiv [1, +\infty]$ ως εξής:

$$f : \Sigma_1 \times \Sigma_2 \rightarrow W_{add} \quad (5.33)$$

$$f_{add}(a_1, a_2) = c_1 f_{ETX}(a_1) + c_2 f_{PFI}(a_2) = c_1 w_1 + c_2 w_2 \quad (5.34)$$

όπου a_1 ο όρος ETX της υπογραφής του θεωρούμενου μονοπατιού, a_2 ο όρος PFI, $f_{ETX}(a_1) = w_1$, $f_{PFI}(a_2) = w_2$ και $a_1, a_2 \in [1, +\infty]$.

Η πράξη $+$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της υπογραφής $(a_1^b, a_2^b)^7$ του μονοπατιού b , το οποίο προκύπτει όταν το μονοπάτι a με υπογραφή (a_1^a, a_2^a) επεκτείνεται με τη ζεύξη c που έχει ετικέτα (l_1^c, l_2^c) ως εξής:

⁷ Στο εξής οι συμβολισμοί υπογραφών, ετικετών και βαρών σε δίκτυο με δύο μετρικές ακολουθούν τον εξής κανόνα: ο δείκτης προσδιορίζει τη μετρική ούτως, ώστε ο δείκτης «1» αντιπροσωπεύει τιμές της πρώτης (εδώ ETX), ενώ ο δείκτης «2» τιμές της δεύτερης μετρικής (εδώ PFI) σύμφωνα με το διατεταγμένο ζεύγος ετικετών σε κάθε ζεύξη, ενώ ο εκθέτης προσδιορίζει το θεωρούμενο μονοπάτι ή ζεύξη. Για παράδειγμα, ο συμβολισμός a_1^b αναφέρεται στον όρο ETX της υπογραφής του μονοπατιού b .

$$(a_1^b, a_2^b) = (a_1^a + l_1^c, a_2^a + l_2^c) \quad (5.35)$$

για $a_1^a, a_1^b, a_2^a, a_2^b, l_1^c, l_2^c \in [1, +\infty]$

Η σχέση διάταξης \leq ορίζεται ως εξής για τα βάρη $w_a, w_b \in [0, 1]$ των μονοπατιών a και b , αντίστοιχα, όπου $w_a = (w_1^a, w_2^a)$ και $w_b = (w_1^b, w_2^b)$:

$$w_a \leq w_b \Leftrightarrow (w_1^a, w_2^a) \leq (w_1^b, w_2^b) \Leftrightarrow w_1^a + w_2^a \leq w_1^b + w_2^b \quad (5.36)$$

για $w_1^a, w_1^b, w_2^a, w_2^b \in [1, +\infty]$

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο προτάσεις με τις αποδείξεις τους στα πλαίσια της μελέτης της μονοτονίας και της ισοτονικότητας του πρωτοκόλλου που ενσωματώνει τη σύνθετη μετρική.

Πρόταση 1

Έστω $(L_1, \Sigma_1, W_1, f_1, \oplus_1, \leq)$ και $(L_2, \Sigma_2, W_2, f_2, \oplus_2, \leq)$, όπου $W_1, W_2 \subseteq \mathbb{R}$, οι άλγεβρες που περιγράφουν δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης, το καθένα εκ των οποίων χρησιμοποιεί μια απλή μετρική για τον υπολογισμό των βαρών των εκάστοτε μονοπατιών. Έστω, επίσης, $(L, \Sigma, W, f, \oplus, \leq)$, η άλγεβρα που περιγράφει το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί αθροιστικώς σύνθετη μετρική, όπου $L, \Sigma, W \subseteq \mathbb{R}$, η πράξη \oplus ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση $(l_1, l_2) \oplus (a_1, a_2) = (l_1 \oplus_1 a_1, l_2 \oplus_2 a_2)$ και η συνάρτηση f ορίζεται ως $f(a_1, a_2) = c_1 f_1(a_1) + c_2 f_2(a_2)$, όπου $c = (c_1, c_2) \in \mathbb{R}$ και τα c_1, c_2 δε γίνονται ίσα με $\bar{0}$ ταυτόχρονα. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί τη σύνθετη μετρική είναι μονότονο, αν τα αρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι μονότονα.

Απόδειξη

Η μονοτονία υποδηλώνει ότι για $(a_1, a_2) \in \Sigma$ και $(l_1, l_2) \in L$:

$$f((a_1, a_2)) \leq f((l_1, l_2) \oplus (a_1, a_2)) \quad (5.37)$$

$$c_1 f_1(a_1) + c_2 f_2(a_2) \leq c_1 f_1(l_1 \oplus_1 a_1) + c_2 f_2(l_2 \oplus_2 a_2) \quad (5.38)$$

Επίσης, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης απλής μετρικής είναι μονότονα. Αυτό σημαίνει ότι:

$$\left. \begin{array}{l} f_1(a_1) \leq f_1(l_1 \oplus_1 a_1) \\ f_2(a_2) \leq f_2(l_2 \oplus_2 a_2) \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} c_1 f_1(a_1) \leq c_1 f_1(l_1 \oplus_1 a_1) \\ c_2 f_2(a_2) \leq c_2 f_2(l_2 \oplus_2 a_2) \end{array} \right\} \Rightarrow \quad (5.39)$$

(εφόσον $c_1, c_2 \geq 0$ και $W_1, W_2 \subseteq \mathbb{R}$)

$$c_1 f_1(a_1) + c_2 f_2(a_2) \leq c_1 f_1(l_1 \oplus_1 a_1) + c_2 f_2(l_2 \oplus_2 a_2) \quad (5.40)$$

η οποία ταυτίζεται με τη σχέση (5.38).

Συνεπώς, το πρωτόκολλο σύνθετης μετρικής είναι αριστερά μονότονο. Ομοίως αποδεικνύεται ότι είναι και δεξιά μονότονο. ■

Πρόταση 2

Έστω $(L_1, \Sigma_1, W_1, f_1, +, \leq)$ και $(L_2, \Sigma_2, W_2, f_2, +, \leq)$, όπου $L_1, L_2, \Sigma_1, \Sigma_2, W_1, W_2 \subseteq \mathbb{R}$ και $f_1(a_1) = a_1$, $a_1 \in \Sigma_1$, $f_2(a_2) = a_2$, $a_2 \in \Sigma_2$ οι αλγεβρικές αναπαραστάσεις δύο πρωτοκόλλων δρομολόγησης, καθένα εκ των οποίων χρησιμοποιεί μια απλή μετρική για τον υπολογισμό των βαρών. Έστω, επίσης, $(L, \Sigma, W, f, +, \leq)$ η αλγεβρική αναπαράσταση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης που βασίζεται στην αθροιστικώς σύνθετη μετρική, όπου $L, \Sigma, W \subseteq \mathbb{R}$ και η συνάρτηση f ορίζεται από τον τύπο $f(a_1, a_2) = c_1 f_1(a_1) + c_2 f_2(a_2) = c_1 a_1 + c_2 a_2$, όπου $\mathbf{a} = (a_1, a_2) \in \Sigma$, $\mathbf{c} = (c_1, c_2) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ και $\mathbf{c} \neq (\bar{0}, \bar{0})$. Το ανωτέρω πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί τη σύνθετη μετρική μέσω της αθροιστικής προσέγγισης είναι αυστηρά ισοτονικό, αν τα αρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι αυστηρά ισοτονικά.

Απόδειξη

Έστω $(a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \Sigma$ οι υπογραφές δύο μονοπατιών a και b , αντίστοιχα, και $(l_1, l_2) \in L$ η ετικέτα της ζεύξης l , σύμφωνα με το πρωτόκολλο σύνθετης μετρικής. Προκειμένου να ισχύει η ισοτονικότητα σε αυτό, πρέπει:

$$f((a_1, a_2)) < f((b_1, b_2)) \Rightarrow f((a_1 + l_1, a_2 + l_2)) < f((b_1 + l_1, b_2 + l_2)) \quad (5.41)$$

- Ξεκινώντας από την αριστερή ανίσωση της συνεπαγωγής:

$$f((a_1, a_2)) < f((b_1, b_2)) \Rightarrow c_1 a_1 + c_2 a_2 < c_1 b_1 + c_2 b_2 \quad (5.42)$$

- Επίσης, από τη δεξιά ανίσωση προκύπτει:

$$\begin{aligned} f((a_1 + l_1, a_2 + l_2)) < f((b_1 + l_1, b_2 + l_2)) &\Rightarrow \\ c_1(a_1 + l_1) + c_2(a_2 + l_2) < c_1(b_1 + l_1) + c_2(b_2 + l_2) &\Rightarrow \\ c_1 a_1 + c_1 l_1 + c_2 a_2 + c_2 l_2 < c_1 b_1 + c_1 l_1 + c_2 b_2 + c_2 l_2 &\quad (5.43) \end{aligned}$$

το οποίο ισχύει λόγω της (5.42) και επίσης $c_1, c_2, l_1, l_2 \geq 0$. ■

Σύμφωνα με τις παραπάνω προτάσεις, η σύνθετη μετρική δρομολόγησης που προκύπτει από σταθμισμένη αθροιστική σύνθεση των μετρικών ETX και PFI με $f_{ETX}(a_1) = a_1$, $a_1 \in [1, +\infty]$, και $f_{PFI}(a_2) = a_2$, $a_2 \in [1, +\infty]$ οδηγεί σε πρωτόκολλο δρομολόγησης που περιγράφεται από μονότονη και αυστηρά ισοτονική άλγεβρα. Επομένως, το προκύπτον πρωτόκολλο συγκλίνει, είναι βέλτιστο και δε σχηματίζει βρόχους.

Επιπρόσθετα, η σύνθετη μετρική που προκύπτει από άθροισμα της μορφής $f(a_1, a_2) = c_1 f_1(a_1) + c_2 f_2(a_2) = c_1 w_1 + c_2 w_2$ με κατάλληλη επιλογή των τιμών των c_1 και c_2 οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τις δύο λεξικογραφικές προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.4.2. Έστω, για παράδειγμα, $f_1(a_1) = a_1$, $a_1 \in [1, +\infty]$, $f_2(a_2) = a_2$, $a_2 \in [1, +\infty]$ και $c_1 = c_2 = 1$. Τότε, σύμφωνα με την αθροιστικώς σύνθετη μετρική, η τιμή βάρους κάθε μονοπατιού προκύπτει αθροίζοντας τους όρους ETX και PFI της υπογραφής του. Έτσι, στο Σχήμα 14 προκύπτουν οι παρακάτω τιμές για τα βάρη των μονοπατιών:

- $w(p(u_S, u_E, u_A, u_D)) = 7.5$
- $w(p(u_S, u_F, u_B, u_D)) = 9.2$
- $w(p(u_S, u_G, u_C, u_D)) = 7.8$

Επομένως, υπό αυτές τις συνθήκες επιλέγεται το μονοπάτι $p(u_S, u_E, u_A, u_D)$, το οποίο αποτελεί τον καλύτερο συμβιβασμό ανάμεσα στις δύο θεωρούμενες μετρικές. Άρα, η αθροιστική μέθοδος αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική ως προς την αποτύπωση ετερογενών χαρακτηριστικών στο πρωτόκολλο δρομολόγησης, σε αντίθεση με τη λεξικογραφική μέθοδο, στην οποία η πρώτη μετρική σχεδόν μονοπωλεί την απόφαση δρομολόγησης.

5.5 Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα αξιολογούνται και συγκρίνονται οι προαναφερθείσες μετρικές δρομολόγησης ETX και PFI, καθώς και η σύνθετη εξ αυτών μετρική κατά το λεξικογραφικό και τον αθροιστικό τρόπο. Η αξιολόγηση γίνεται με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων εκτενών προσομοιώσεων στην πλατφόρμα προσομοίωσης J-Sim [120], η οποία επεκτάθηκε, προκειμένου να συμπεριλάβει τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου RPL [121][122].

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αφορούν σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι υποστηρίζονται αναμεταδόσεις του στρώματος ζεύξης σε περίπτωση που δε ληφθεί μήνυμα αναγνώρισης για την άφιξη ενός σταλμένου πακέτου, καθώς επίσης και αναμεταδόσεις του στρώματος δικτύου σε περίπτωση που ο επόμενος κόμβος φέρεται να μην προώθησε το πακέτο που δέχτηκε. Συνεπώς, η κατάλληλη μετρική εμπιστοσύνης σε αυτήν την περίπτωση είναι το *PFIadd*. Στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται

ότι αναμεταδόσεις πακέτων υποστηρίζονται μόνο στο στρώμα ζεύξης δεδομένων και όχι στο στρώμα δικτύου, οπότε ως μετρική εμπιστοσύνης σε αυτήν την περίπτωση ενδείκνυται το $PFIlog$.

Σκοπός των προσομοιώσεων είναι η εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων, χρήσιμων για τη διερεύνηση των πλεονεκτημάτων των σύνθετων μετρικών έναντι των απλών. Επιπλέον, επιδιώκεται η αξιολόγηση της αθροιστικής σύνθεσης μετρικών, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.4.3, καθώς και η σύγκριση της απόδοσής της σε σχέση με τις δύο εκδοχές της λεξικογραφικής προσέγγισης. Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας γίνεται με τη βοήθεια δύο μετρικών απόδοσης:

- του ρυθμού απωλειών πακέτων (packet loss ratio – PLR), που ορίζεται ως ο λόγος του πλήθους των πακέτων που χάθηκαν N_l , δηλαδή δεν έφτασαν στον προορισμό, προς το πλήθος των πακέτων N_s που εστάλησαν από τον κόμβο-πηγή:

$$PLR = \frac{N_l}{N_s} \quad (5.44)$$

- του μέσου αριθμού συνολικών μεταδόσεων (average number of total transmissions – ATT), που ορίζεται ως η μέση τιμή του αριθμού των συνολικών μεταδόσεων που έλαβαν χώρα σε ένα δίκτυο ανά επανάληψη προσομοίωσης, θεωρώντας ίδιες τιμές παραμέτρων. Ως μεταδόσεις νοούνται οι μεταδόσεις των πακέτων κατά τη διαδρομή που ακολουθούν από την πηγή προς τον προορισμό συμπεριλαμβανομένων τυχόν αναμεταδόσεων.

$$ATT = \frac{\sum_{i=1}^N N_T}{N} \quad (5.45)$$

όπου N_T το πλήθος των συνολικών μεταδόσεων σε μια επανάληψη και N το πλήθος των επαναλήψεων.

Η τοπολογία προσομοίωσης περιλαμβάνει 100 κόμβους τοποθετημένους σε ένα τετραγωνικό πλέγμα των 10×10 κόμβων. Στο θεωρούμενο δίκτυο λειτουργούν τέσσερις ενεργές ροές (sessions) υπό την έννοια ότι τέσσερις κόμβοι της περιμέτρου του πλέγματος δρουν ως πηγές και αποστέλλουν 500 πακέτα δεδομένων ο καθένας προς έναν κοινό κόμβο-προορισμό σε κάθε προσομοίωση. Οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν για διαφορετικό πλήθος αναξιόπιστων ζεύξεων και κακόβουλων κόμβων. Η αστάθεια των ζεύξεων (link instability – LI) συλλαμβάνεται από τη μετρική ETX, καθώς συνεπάγεται αδυναμία παράδοσης πακέτων και επομένως απουσία μηνυμάτων αναγνώρισης, που εγείρει μια νέα μετάδοση, αυξάνοντας την τιμή ETX των συγκεκριμένων ζεύξεων. Εν προκειμένω, οι κόμβοι που συμμετέχουν σε μια ασταθή ζεύξη θεωρείται ότι λαμβάνουν τη μισή κίνηση από αυτήν που αποστέλλεται σε αυτούς μέσω της συγκεκριμένης ζεύξης. Από την άλλη, η κακόβουλη συμπεριφορά γίνεται αντιληπτή μέσω της μετρικής PFI. Ως κακόβουλοι κόμβοι θεωρούνται οι κόμβοι γκρίζας τρύπας (GH), οι οποίοι απορρίπτουν το μισό της κίνησης που δέχονται, επηρεάζοντας την

τιμή του PFI. Σημειώνεται ότι η ανίχνευση επιθέσεων γκρίζας τρύπας είναι δυσκολότερο να ανιχνευτούν σε σχέση με τις επιθέσεις μαύρης τρύπας, καθώς στις τελευταίες απορρίπτεται ολόκληρη η κίνηση, οδηγώντας απευθείας σε μεγάλες τιμές PFI. Το ίδιο ισχύει και για τις αδυναμίες του στρώματος ζεύξης δεδομένων, όπου θεωρείται ότι αδυνατεί να παραδοθεί το ήμισυ και όχι το σύνολο της κίνησης.

Οι «ανέντιμοι» κόμβοι και οι ασταθείς ζεύξεις κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα στο δίκτυο, το οποίο εμπεριέχει ίσο πλήθος κόμβων GH και ασταθών ζεύξεων (LI). Εκτενείς προσομοιώσεις έλαβαν χώρα για καθένα από τα θεωρούμενα σενάρια μετρικών και για τις περιπτώσεις 10, 20, 30 και 40 κακόβουλων κόμβων και ασταθών ζεύξεων⁸ που επαναλήφθηκαν επί 50 φορές εκάστη. Τα σενάρια προσομοίωσης μετρικών περιλαμβάνουν:

- Απλή μετρική ETX
- Απλή μετρική PFI
- Λεξικογραφικώς σύνθετη μετρική ETX και PFI
- Λεξικογραφικώς σύνθετη μετρική PFI και ETX
- Αθροιστικώς σύνθετη μετρική μεταξύ ETX και PFI για διαφορετικούς παράγοντες στάθμισης των ETX και PFI

5.5.1 Αξιολόγηση της Απόδοσης της Προσέγγισης Απλής Μετρικής

Αρχικά, οι προσομοιώσεις λαμβάνουν χώρα θεωρώντας μια απλή μετρική, είτε ETX είτε PFI, προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης υπό αυτές τις συνθήκες. Η προσέγγιση απλής μετρικής, παρόλο που αποτελεί μια απλούστερη υπολογιστικά λύση, αναμένεται να παρουσιάσει χαμηλή απόδοση, καθώς αδυνατεί να διακρίνει πολλαπλούς τύπους ανεπιθύμητων καταστάσεων του δικτύου. Στη συνέχεια θεωρούνται δύο σενάρια, το ένα με αναμεταδόσεις στρώματος ζεύξης, που εγείρονται λόγω ασταθών ζεύξεων, και δικτύου, που προκαλούνται λόγω άρνησης προώθησης, και το άλλο με αναμεταδόσεις μόνο του στρώματος ζεύξης.

5.5.1.1 Σενάριο 1^ο: Με Αναμεταδόσεις Στρώματος Ζεύξης και Δικτύου

Στο συγκεκριμένο σενάριο θεωρείται ότι το δίκτυο διαθέτει τη δυνατότητα αναμετάδοσης πακέτων, εφόσον ανιχνευτεί είτε αδυναμία παράδοσης είτε άρνηση προώθησης πακέτων. Η αδυναμία παράδοσης ανιχνεύεται μέσω των μηνυμάτων αναγνώρισης που αποστέλλονται στον αμέσως προηγούμενο κόμβο για να επιβεβαιώσουν μια επιτυχή παράδοση. Εφόσον αυτά δεν παραληφθούν, τότε ο πρώτος κόμβος θεωρεί, μετά από ένα προκαθορισμένο διάστημα, ότι το πακέτο δεν παρελήφθη και το αναμεταδίδει. Από την άλλη, η άρνηση

⁸ Οι αριθμοί αντιστοιχούν στο πλήθος των GH και LI συνολικά. Για παράδειγμα, στην πρώτη περίπτωση, το πλήθος 10 αντιστοιχεί σε 5 κακόβουλους κόμβους και 5 ασταθείς ζεύξεις.

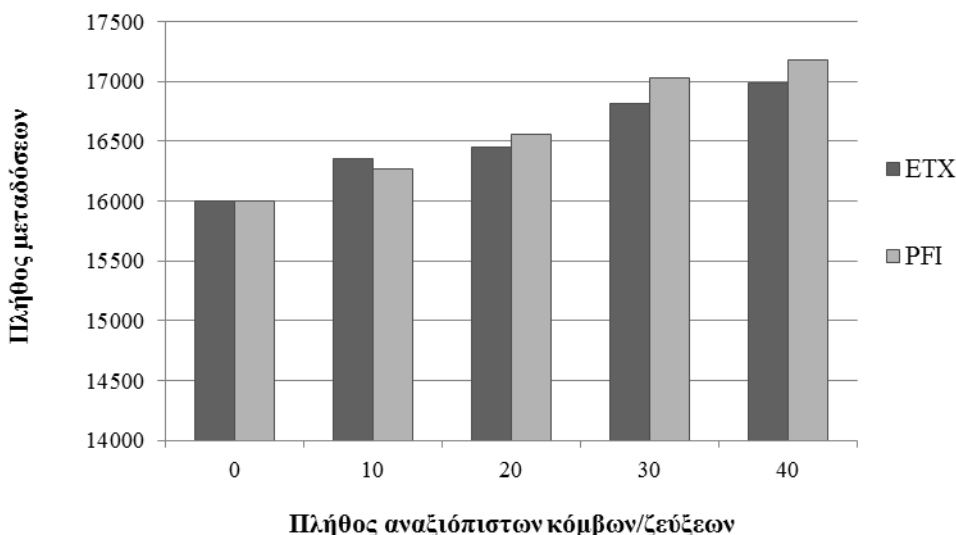
προώθησης πακέτων δεν είναι δυνατόν να ανιχνευτεί με αυτόν τον τρόπο, καθώς ο επόμενος κόμβος στέλνει μήνυμα αναγνώρισης στον πρώτο, αλλά στη συνέχεια δεν προωθεί το πακέτο. Προς τούτο, ο πρώτος κόμβος μετά την αποστολή του μηνύματος εισέρχεται σε κατάσταση παρακολούθησης (promiscuous mode), προκειμένου να αφουγκραστεί την επόμενη αποστολή. Εφόσον αυτό δε συμβεί εντός του προκαθορισμένου διαστήματος, ο πρώτος κόμβος θεωρεί ότι συνέβη άρνηση προώθησης και αναμεταδίδει το πακέτο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να αποσταλεί ή μέχρι τις τέσσερις απόπειρες.

Εφόσον η απώλεια παράδοσης και η άρνηση προώθησης πακέτων αντιμετωπίζεται ομοίως με αναμετάδοση πακέτου, το δίκτυο θα αντιληφθεί πολύ χαμηλή απώλεια πακέτων, αλλά θα υποφέρει από σημαντική ενεργειακή κατανάλωση λόγω των επιβεβλημένων αναμεταδόσεων. Η τιμή ΑΤΤ αντικατοπτρίζει εμμέσως την ενεργειακή κατανάλωση, καθώς επηρεάζεται από τις αναμεταδόσεις που προκλήθηκαν είτε από κακόβουλους κόμβους είτε από αστάθειες των ζεύξεων. Σημειώνεται ότι η μετρική απόδοσης PLR δεν ενδείκνυται στη δεδομένη περίπτωση, καθώς υποστηρίζεται αναμετάδοση πακέτων μέχρις ότου αυτά παραδοθούν ή μέχρι να σταλούν τέσσερις φορές. Επίσης, εφόσον υποστηρίζονται αναμεταδόσεις του στρώματος δικτύου, η κατάλληλη μορφή του PFI είναι το *PFIadd*.

Το Σχήμα 15 αποτυπώνει σε ιστόγραμμα την τιμή ΑΤΤ για μεταβλητό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο η μετρική ETX ή PFI. Η ιδανική περίπτωση αντιστοιχεί στις δύο πρώτες στήλες, όπου το δίκτυο περιέχει μόνο έμπιστους κόμβους και σταθερές συνδέσεις. Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται αύξηση των μεταδόσεων, καθώς αυξάνονται οι αδυναμίες του δικτύου. Μάλιστα, οι τιμές είναι συγκρίσιμες για τις δύο μετρικές, γεγονός που φανερώνει ότι σε κάθε περίπτωση δεν είναι δυνατόν να ξεπεραστούν και οι δύο τύπου αδυναμίες που θεωρούνται. Έτσι, στην περίπτωση του ETX δεν μπορούν να ανιχνευτούν οι επιθέσεις γκρίζας τρύπας, οπότε το μονοπάτι που ενδεχομένως συμβαίνουν, να μη μεταβάλλεται. Αντίστοιχα, το PFI δεν είναι δυνατό να διακρίνει μια ασταθή ζεύξη, διαιωρίζοντας τις αναμεταδόσεις του στρώματος ζεύξης.

Συνολικά, η απόδοση της προσέγγισης απλής μετρικής είναι βέλτιστη ως προς τη συμπεριφορά που παρακολουθεί, αλλά αδυνατεί να εντοπίσει άλλες, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση των μεταδόσεων. Αυτό το γεγονός, φυσικά, δεν μπορεί να παραβλεφθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στα οποία οι ενεργειακοί πόροι είναι ούτως ή άλλως περιορισμένοι. Έτσι, καθώς τίθεται θέμα περιορισμού της διάρκειας ζωής του δικτύου, δεν ενδείκνυται η χρήση απλών μετρικών στο πρωτόκολλο δρομολόγησης, όταν υποστηρίζονται αναμεταδόσεις του στρώματος ζεύξης και του στρώματος δικτύου.

Προσέγγιση Απλής Μετρικής, Σενάριο 1^ο
Μέσος Αριθμός Συνολικών Μεταδόσεων
(ATT)



Σχήμα 15: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων (ATT) όταν χρησιμοποιείται απλή μετρική ETX ή PFI για την απόφαση δρομολόγησης για μεταβλητό πλήθος «ανέντιμων» κόμβων και αναξιόπιστων ζεύξεων, θεωρώντας αναμεταδόσεις στρώματος ζεύξης δεδομένων

5.5.1.2 Σενάριο 2^ο: Με Αναμεταδόσεις Μόνο του Στρώματος Ζεύξης

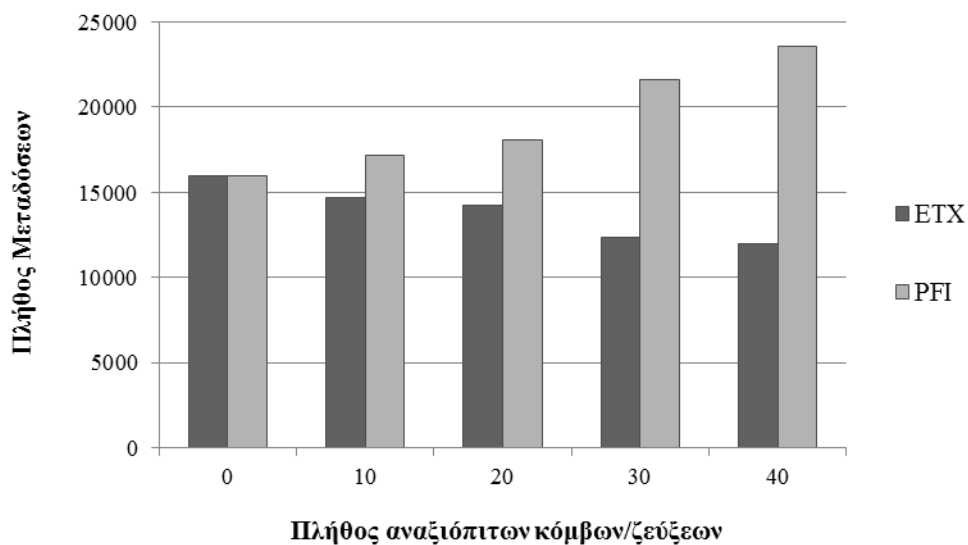
Σε αυτό το σενάριο, η άρνηση προώθησης πακέτου δεν ακολουθείται από αναμετάδοσή του, γεγονός που οδηγεί σε απώλειες πακέτων. Αντιθέτως, αναμεταδόσεις του στρώματος ζεύξης δεδομένων θεωρείται ότι υποστηρίζονται στις περιπτώσεις που δε λαμβάνονται μηνύματα αναγνώρισης. Συνεπώς, η αξιολόγηση της απόδοσης στηρίζεται στις μετρικές PLR και ATT. Η πρώτη, PLR, αποτυπώνει το πλήθος των πακέτων που απωλέσθηκαν λόγω κακόβουλης συμπεριφοράς, ενώ η δεύτερη, ATT, σκιαγραφεί το πλήθος των αναμεταδόσεων που εισάγονται λόγω των ασταθών ζεύξεων. Τέλος, η απουσία αναμεταδόσεων του στρώματος δικτύου οδηγεί στη μορφή *PFIlog* για το PFI.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση στην οποία θεωρείται μόνο το ETX ή το PFI ως μετρική δρομολόγησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 16. Από το σχήμα προκύπτει ότι στην περίπτωση του ETX πραγματοποιούνται λιγότερες μεταδόσεις σε σχέση με την ιδανική περίπτωση (ουδείς αναξιόπιστος). Αυτό συμβαίνει, καθώς η μετρική ETX δε δύναται να αναγνωρίσει τις επιθέσεις GH, με συνέπεια να μην αλλάζει μονοπάτι, όποτε αυτές συμβαίνουν. Από την άλλη, συμβαίνουν κάποιες αναμεταδόσεις που οφείλονται σε ασθενείς ζεύξεις, αλλά εφόσον αυτές γίνουν αντιληπτές, επιχειρείται να ευρεθεί διαδρομή με

λιγότερες μεταδόσεις. Συνεπώς, οι αναμεταδόσεις δε συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση του ATT.

Όταν το PFI είναι εκείνο που κατευθύνει την απόφαση της δρομολόγησης, παρατηρούνται σημαντικά αυξημένες μεταδόσεις σε σχέση τόσο με την ιδανική περίπτωση όσο και με το ETX. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αποφεύγονται οι επιθέσεις των κακόβουλων κόμβων, αλλά δεν είναι δυνατό να γίνουν αντιληπτές οι αστάθειες της ζεύξης, που οδηγούν σε διαδοχικές αναμεταδόσεις.

Προσέγγιση Απλής Μετρικής, Σενάριο 2^ο Μέσος Αριθμός Συνολικών Μεταδόσεων (ATT)



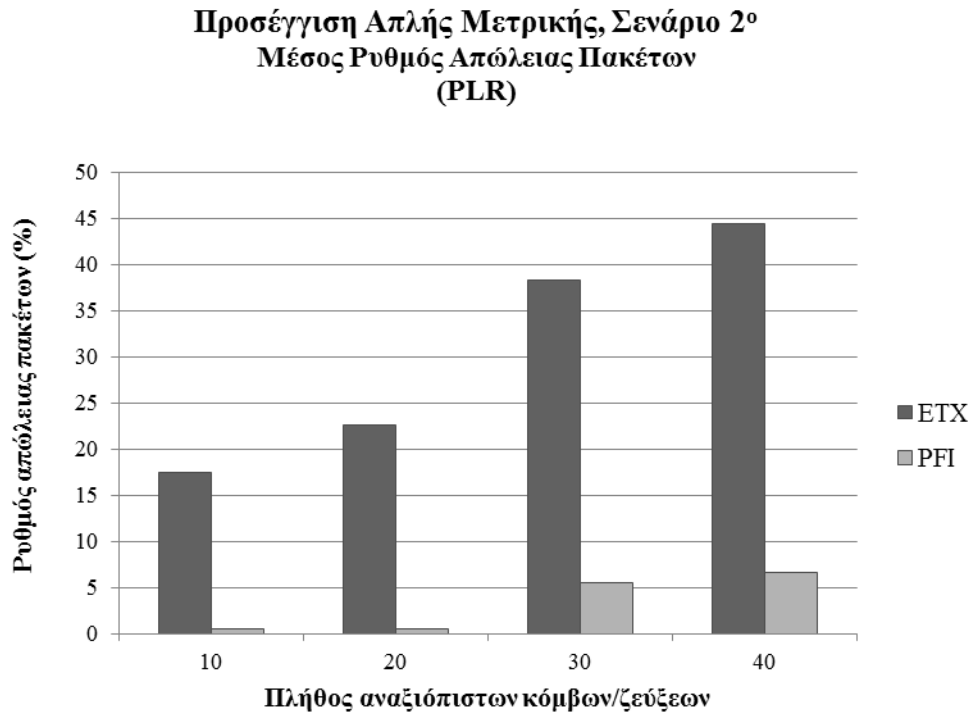
Σχήμα 16: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων, όταν χρησιμοποιείται μόνο το ETX ή το PFI, θεωρώντας ότι δε συμβαίνουν αναμεταδόσεις επιπέδου δικτύου για τα μη προωθημένα πακέτα

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται το πλήθος των νοσηρών στοιχείων, η κατάσταση εντείνεται τόσο για το ETX όσο και για το PFI. Έτσι, στην περίπτωση του ETX καταγράφονται λιγότερες μεταδόσεις αυξανόμενου του πλήθους των αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων, ενώ για το PFI σημειώνεται αύξηση.

Εκτός αυτού, το Σχήμα 17 απεικονίζει το μέσο PLR για την περίπτωση του ETX και του PFI. Όπως είναι αναμενόμενο, όταν το πρωτόκολλο δρομολόγησης ενσωματώνει τη μετρική ETX, καταγράφονται σημαντικές απώλειες πακέτων, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 17,5% και 44,4% ανάλογα με το πλήθος κόμβων GH που εισάγονται στο δίκτυο. Αντιθέτως, στην περίπτωση του PFI παρατηρούνται χαμηλές τιμές PLR, που κυμαίνονται μεταξύ 0,5% και 6,5%. Σημειώνεται ότι ακόμα και με μικρό πλήθος κόμβων GH καταγράφεται μια τιμή PLR, έστω ελάχιστη, καθώς απορρίπτονται κάποια πακέτα έως ότου γίνουν αντιληπτοί οι κακόβουλοι κόμβοι. Παρόλα αυτά, η απώλεια είναι αρκετά χαμηλή ακόμα και για μεγά-

λο ποσοστό κακόβουλων χρηστών στο δίκτυο (20%). Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σχήματος έρχονται να συμπληρώσουν και να επιβεβαιώσουν το Σχήμα 16, όπου η συμπεριφορά του ETX εξηγήθηκε βασισμένη στην απώλεια των πακέτων.

Συνολικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το ETX υστερεί ως προς τις επιθέσεις των κακόβουλων χρηστών, ενώ το PFI ως προς τις αυξημένες μεταδόσεις. Συνεπώς, όπως και στο σενάριο 1 της ενότητας 5.5.1.1, διαφαίνεται η ανάγκη χρησιμοποίησης σύνθετων μετρικών δρομολόγησης.



Σχήμα 17: Μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων, όταν χρησιμοποιείται μόνο ETX ή PFI, θεωρώντας ότι δε συμβαίνουν αναμεταδόσεις λόγω άρνησης προώθησης πακέτων

5.5.2 Αξιολόγηση της Απόδοσης της Προσέγγισης Σύνθετης Μετρικής

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε η αδυναμία των προσεγγίσεων απλών μετρικών ως προς την ανίχνευση και αποφυγή πολλαπλών τύπων ανεπιθύμητων γεγονότων. Στην παρούσα ενότητα οι μετρικές ETX και PFI συνδυάζονται σε μια σύνθετη μετρική μέσω της λεξικογραφικής και της αθροιστικής μεθόδου και προσομοιώνονται και για τις δύο περιπτώσεις αναμεταδόσεων. Η λεξικογραφική σύνθεση αντιμετωπίζεται ως *πιο αξιόπιστη-πιο έμπιστη* ($lexPFIETX$) και *πιο έμπιστη-πιο αξιόπιστη* ($lexETXPFI$) κατά τον ορισμό της ενότητας 5.4.2, ενώ η αθροιστική μέθοδος εξετάζεται για μεταβλητές τιμές βαρών c_1 , c_2 των ETX και PFI αντίστοιχα, τα οποία κυμαίνονται από 0,1 έως 0,9 με βήμα 0,1 ($addETXPFI$

c_1-c_2 ⁹). Κατά αυτόν τον τρόπο διαφαίνεται η ευελιξία της αθροιστικής μεθόδου, αποδίδοντας διαφορετικό βάρος σε καθεμιά από τις θεωρούμενες απλές μετρικές ανάλογα με τις απαιτήσεις των εκάστοτε εφαρμογών.

Ήδη στην ενότητα 5.4 παρουσιάστηκε η αδυναμία των απλών μετρικών και η υπεροχή της αθροιστικής μεθόδου έναντι των λεξικογραφικών μέσω ενός απλού παραδείγματος. Έτσι, σκοπός των προσομοιώσεων της παρούσας ενότητας είναι η αξιολόγηση των σύνθετων μετρικών σε σχέση με τις απλές, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, καθώς και η μεταξύ τους σύγκριση με γνώμονα το ρυθμό απώλειας πακέτων και το μέσο πλήθος μεταδόσεων, ώστε να εξαχθούν γενικευμένα συμπεράσματα για τις θεωρούμενες προσεγγίσεις. Όλες οι προσομοιώσεις μοιράζονται τα ίδια χαρακτηριστικά δικτύου ανά σενάριο, ενώ το μόνο που αλλάζει είναι η προσέγγιση δρομολόγησης.

5.5.2.1 Σενάριο 1^ο: Με Αναμεταδόσεις Στρώματος Ζεύξης και Δικτύου

Σε ακολουθία με την ενότητα 5.5.1.1 οι σύνθετες μετρικές θα αξιολογηθούν ως προς την τιμή του ATT, ενώ δεν ενδείκνυται η χρήση του PLR ως μετρική αξιολόγησης, καθώς οι αναμεταδόσεις φροντίζουν για την εξάλειψη των απωλειών πακέτων. Υπενθυμίζεται ότι στο παρόν σενάριο η τιμή του PFI υπολογίζεται μέσω του *PFIadd*.

Στο Σχήμα 18 δίνεται ο μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων πακέτων (ATT) για τις διάφορες εκδοχές της αθροιστικής προσέγγισης και για τις δύο λεξικογραφικές εκδοχές για μεταβλητό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων. Επίσης, με διακομμένη γραμμή σημειώνεται η ιδανική περίπτωση, κατά την οποία το δίκτυο απαρτίζεται από υγιείς κόμβους και σταθερές ζεύξεις.

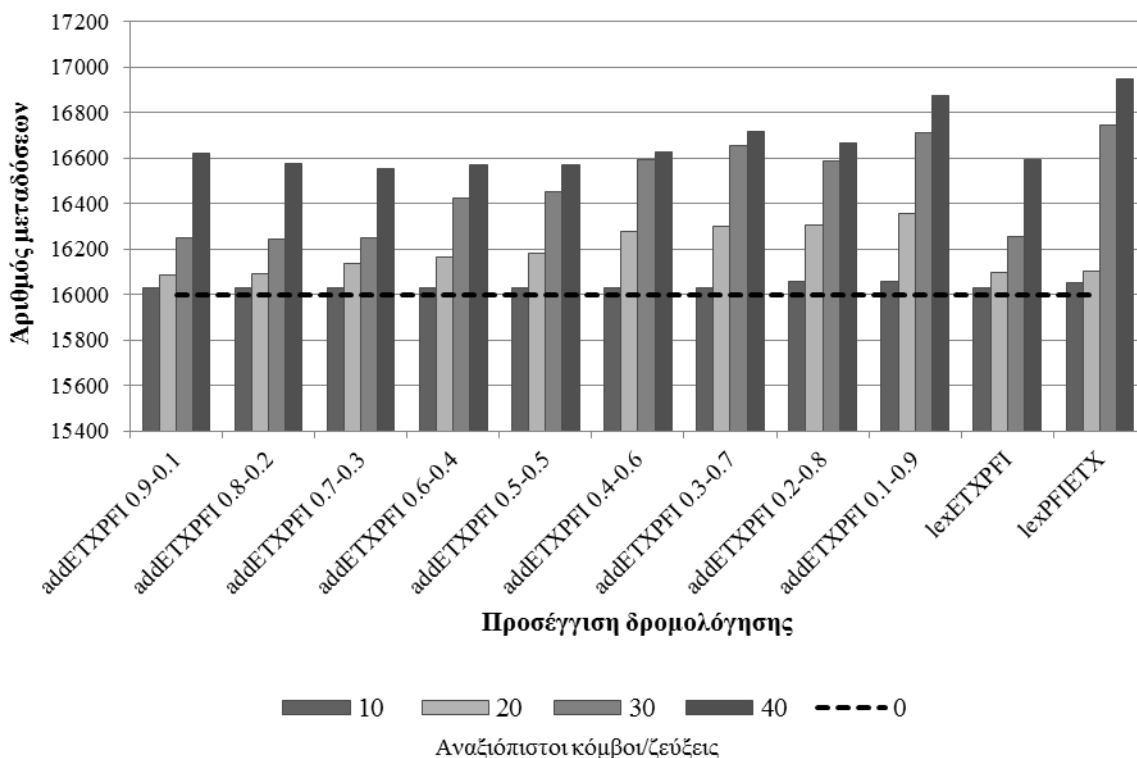
Κατ' αρχάς, συγκρίνοντας το Σχήμα 15 με το Σχήμα 18, παρατηρείται ότι όλες οι σύνθετες προσεγγίσεις απαιτούν λιγότερες μεταδόσεις για την παράδοση των πακέτων στον κόμβο-προορισμό σε σχέση με τις απλές μετρικές. Ενδεικτικά, για 20 αναξιόπιστους κόμβους και ζεύξεις η απλή μετρική ETX απαιτεί γύρω στις 16.450 μεταδόσεις και η μετρική PFI 16.560 μεταδόσεις, ενώ η μεγαλύτερη τιμή σύνθετης μετρικής παρουσιάζεται για το *addETXPFI 0.1-0.9* και ανέρχεται σε 16.350 μεταδόσεις περίπου. Αυτό το γεγονός υποδηλώνει ότι όλες οι σύνθετες προσεγγίσεις είναι πιο αποδοτικές από τις απλές στην ανίχνευση κακόβουλων κόμβων ή νοσηρών ζεύξεων.

Όσον αφορά την απόδοση των σύνθετων μετρικών συγκρινόμενες μεταξύ τους, για μικρό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Καθώς αυξάνονται οι νοσηρές περιπτώσεις, η αθροιστική μέθοδος επιτυγχάνει τις χαμηλότερες τιμές ATT για τιμές βαρών c_1 και c_2 από 0,8-0,2 έως 0,5-0,5. Εφόσον τόσο οι ασταθείς ζεύξεις όσο και οι κακόβουλες συμπεριφορές οδηγούν σε 50% αναμεταδόσεις κατά μέσο όρο, όπου παρατηρούνται, θα ήταν αναμενόμενο η βέλτιστη συμπεριφορά να καταγράφεται για ίσες

⁹ Για παράδειγμα, ο συμβολισμός «*addETXPFI 0.6-0.4*» αντιστοιχεί στη σύνθετη μετρική που ορίζεται ως «0,6·ETX + 0,4·PFI».

τιμές βαρών. Παρόλα αυτά, οι αναμεταδόσεις του στρώματος δικτύου είναι δυνατόν να συμβούν το πολύ τέσσερις φορές ανά ζεύξη, ενώ δεν υπάρχει τέτοιος περιορισμός για τις αναμεταδόσεις του στρώματος ζεύξης, οδηγώντας σε κάποιες περιπτώσεις σε ανάγκη για αυστηρότερη επίβλεψη της αξιοπιστίας της ζεύξης.

Προσέγγιση Σύνθετης Μετρικής, Σενάριο 1^ο Μέσος Αριθμός Συνολικών Μεταδόσεων (ATT)



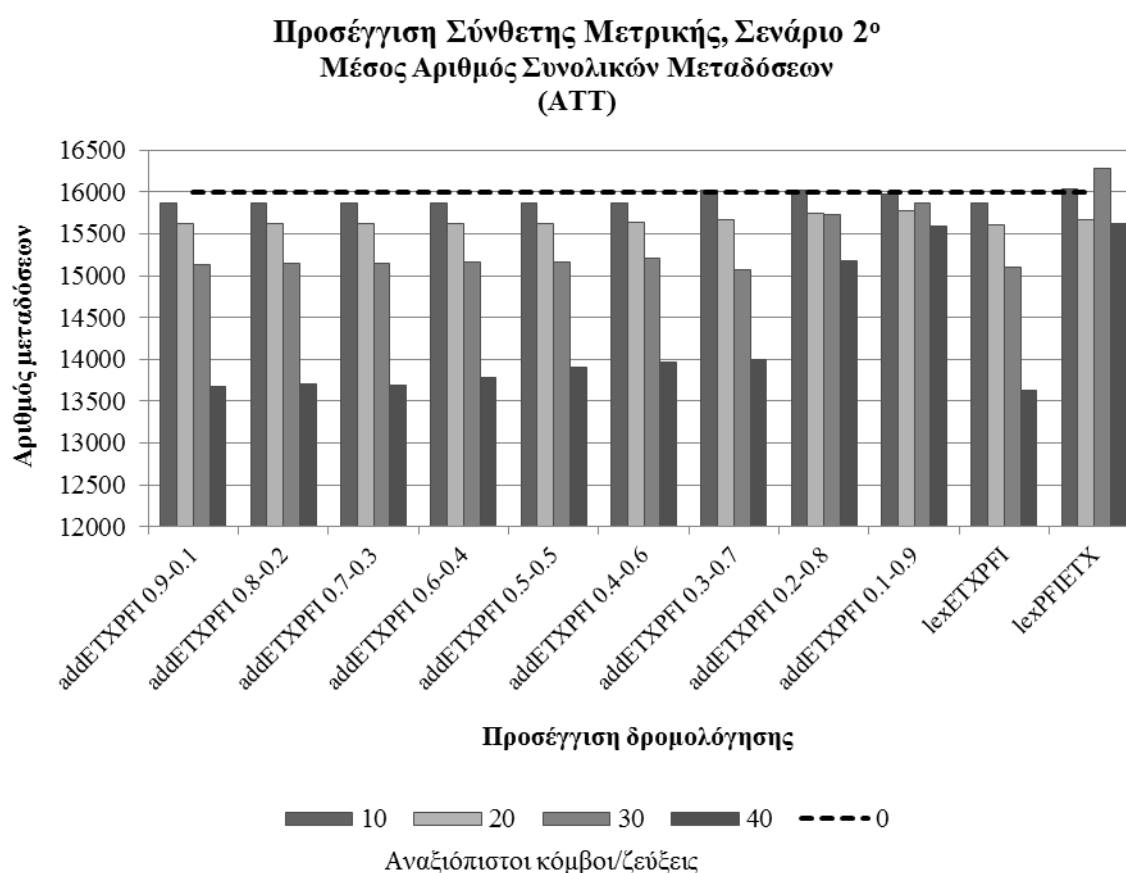
Σχήμα 18: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων για διάφορες προσεγγίσεις σύνθετων μετρικών και για μεταβλητό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζευξιών υπό τη θεώρηση αναμεταδόσεων στρώματος ζεύξης και δικτύου.

Σε κάθε περίπτωση, η αθροιστική μέθοδος φέρεται να παρέχει μια ισορροπημένη λύση ανάμεσα στα ETX και PFI, λαμβάνοντας και τα δύο υπόψη. Αντιθέτως, οι λεξικογραφικές μέθοδοι τείνουν να εκφυλίσουν τη σύνθετη μετρική σε απλή, φαινόμενο που είναι εντονότερο όταν εμφανίζεται μεγαλύτερο πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζευξιών. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται η πιθανότητα διέλευσης μέσω ενός νοσηρού μονοπατιού ακόμα και μετά από εναλλαγή, καθώς η δεύτερη μετρική ενεργοποιείται μόνο εφόσον υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την πρώτη. Έτσι, εάν από την αξιολόγηση της πρώτης μετρικής δεν προκύψει αβεβαιότητα, το μονοπάτι επιλογής έχει αυξημένες πιθανότητες να περιέχει αρνητικό χαρακτηριστικό που καταγράφεται από τη δεύτερη μετρική και που δεν γίνεται επομένως αντιληπτό. Αυτός ο ισχυρισμός ενισχύεται από τα αποτελέσματα, καθώς στην περίπτω-

ση 40% αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων η εξισορρόπηση μεταξύ ETX και PFI παρουσιάζει τη βέλτιστη τιμή ATT.

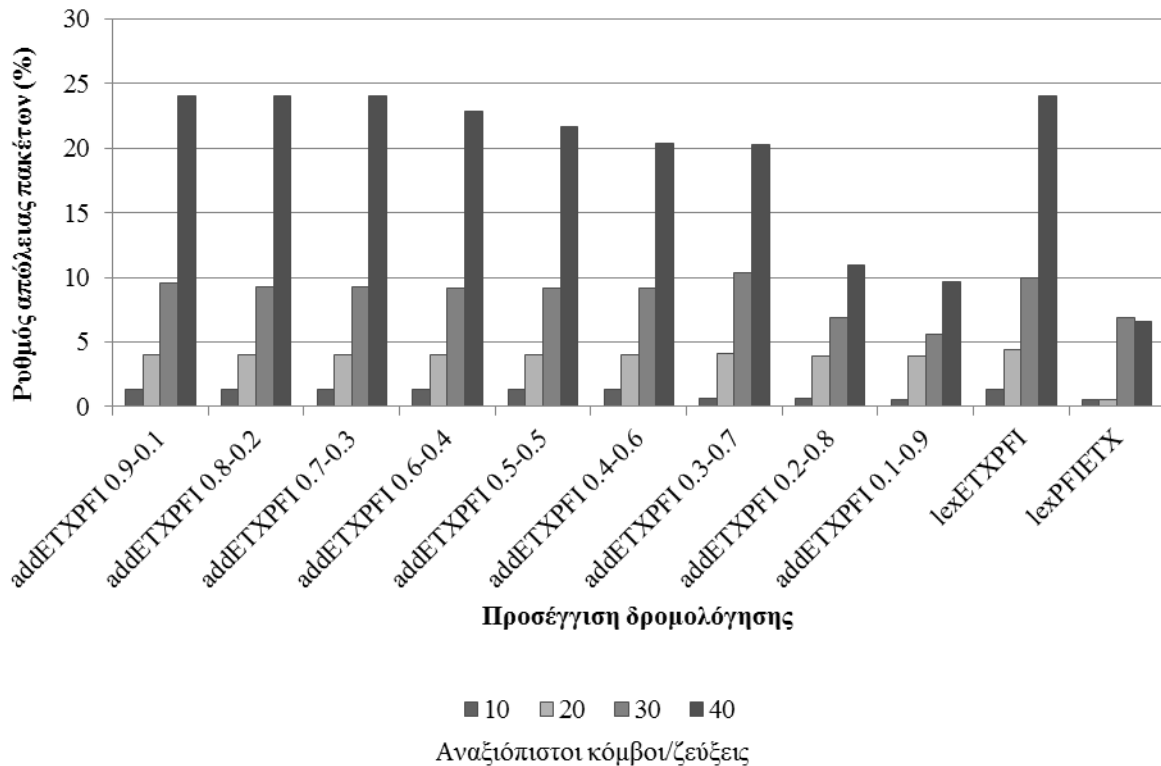
5.5.2.2 Σενάριο 2^ο: Με Αναμεταδόσεις Μόνο του Στρώματος Ζεύξης

Όμοια με την ενότητα 5.5.1.2 για τις απλές μετρικές, οι σύνθετες μετρικές αυτής της περίπτωσης αξιολογούνται ως προς τα κριτήρια απόδοσης ATT και PLR. Σε αυτήν την περίπτωση που θεωρείται ότι δε συμβαίνουν αναμεταδόσεις πακέτων στους κακόβουλους κόμβους, το PFI υπολογίζεται ως *PFIlog*. Το μέσο πλήθος μεταδόσεων ATT παρατίθεται στο Σχήμα 19, ενώ ο μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων δίνεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 19: Μέσος αριθμός συνολικών μεταδόσεων πακέτων για διάφορες προσεγγίσεις σύνθετων μετρικών και μεταβλητό πλήθος αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων, όταν υποστηρίζονται αναμεταδόσεις μόνο στο στρώμα ζεύξης δεδομένων.

Προσέγγιση Σύνθετης Μετρικής, Σενάριο 2^ο
Μέσος Ρυθμός Απώλειας Πακέτων
(PLR)



Σχήμα 20: Μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων θεωρώντας διαφορετικές προσεγγίσεις σύνθετων μετρικών δρομολόγησης για μεταβλητό πλήθος κακόβουλων κόμβων και ασταθών ζεύξεων, όταν το δίκτυο υποστηρίζει αναμεταδόσεις μόνο στο στρώμα ζεύξης δεδομένων.

Κατ’ αρχάς, συγκρίνοντας το Σχήμα 19 με το Σχήμα 16, παρατηρείται ότι οποιαδήποτε προσέγγιση σύνθετης μετρικής υπερτερεί των απλών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της απλής μετρικής ETX αγνοούνται οι επιθέσεις GH, οδηγώντας σε σημαντικές απώλειες πακέτων. Έτσι, παρατηρούνται αριθμοί συνολικών μεταδόσεων από περίπου 14.650 έως 11.959 ανάλογα με το πλήθος των κόμβων GH, ενώ η χαμηλότερη τιμή για τις σύνθετες προσεγγίσεις εμφανίζεται για τη λεξικογραφική προσέγγιση lexETXPF1 και για 20% κακόβουλους κόμβους και ανέρχεται σε 13.626 μεταδόσεις περίπου. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της απλής μετρικής PFI αγνοείται η επίδραση των ασταθών ζεύξεων, με αποτέλεσμα να καταγράφονται τιμές ATT από 17.180 έως 23.588 περίπου. Κατά τη δρομολόγηση μέσω σύνθετων μετρικών η μέγιστη τιμή ATT που εμφανίζεται είναι μόλις 16.282 για τη λεξικογραφική μέθοδο lexPFIETX.

Όσον αφορά τις απώλειες πακέτων, στην περίπτωση του ETX (βλ. Σχήμα 17) παρατηρούνται απώλειες από 17,5% έως 44,4% περίπου, ενώ με τις σύνθετες μετρικές η τιμή PLR ανέρχεται το πολύ το 24%. Στην περίπτωση του PFI παρατηρούνται ιδιαίτερα χαμηλές τιμές PLR, καλύτερες από κάθε σύνθετη προσέγγιση. Παρόλα αυτά, μπορεί πάντα να επιλεγεί μια

μέθοδος σύνθετης μετρικής με σχετικά χαμηλό ρυθμό απωλειών, που όμως λαμβάνει υπόψη και την κατάσταση της ζεύξης, παρέχοντας τον αποδεκτό συμβιβασμό ανάμεσα στα δύο. Συνεπώς, αποδεικνύεται ότι και για την παρούσα περίπτωση δικτύου, προτιμάται η χρήση σύνθετων μετρικών έναντι των απλών.

Αναλύοντας τη συμπεριφορά των σύνθετων προσεγγίσεων, το Σχήμα 19 αποκαλύπτει, επίσης, ότι όταν ενυπάρχουν περισσότεροι κακόβουλοι κόμβοι στο δίκτυο, εμφανίζεται χαμηλότερη τιμή ΑΤΤ, καθώς αυτοί εισάγουν απώλειες πακέτων. Έτσι, στην πλειονότητα των περιπτώσεων παρατηρείται χαμηλότερη τιμή ΑΤΤ σε σχέση με την ιδανική τιμή των 16.000 πακέτων, που αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου δεν παρατηρούνται κακόβουλοι κόμβοι ή ζεύξεις. Εν γένει οι χαμηλότερες τιμές, χαμηλότερες μάλιστα από την ιδανική, παρατηρούνται για αυξημένο πλήθος κακόβουλων κόμβων και για σχήματα δρομολόγησης που αποδίδουν μικρότερη έμφαση στη μετρική PFI. Αυτό συμβαίνει, διότι η επίδραση των πακέτων που απορρίπτονται στην τιμή του ΑΤΤ είναι εντονότερη σε σχέση με την επίδραση των ασταθών ζεύξεων, καθώς η απώλεια ενός πακέτου καταργεί τη μετάδοση σε τουλάχιστον μία ζεύξη, ενώ η κακή ποιότητα διαύλου επηρεάζει ακριβώς μία ζεύξη. Έτσι, το φαινόμενο GH που συμβαίνει, για παράδειγμα, στην πρώτη ζεύξη ενός μονοπατιού έχει ως αποτέλεσμα να μη μεταδοθεί το πακέτο σε καμιά από τις επόμενες ζεύξεις της διαδρομής, ενώ στην περίπτωση μιας ασταθούς ζεύξης οι επόμενες μεταδόσεις συμβαίνουν κανονικά.

Τα συγκεκριμένα συμπεράσματα είναι σε συμφωνία με το Σχήμα 20, που απεικονίζει το ρυθμό απωλειών. Έτσι, παρατηρείται υψηλός ρυθμός απωλειών για περισσότερους κακόβουλους χρήστες και για σχήματα που δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στο ETX. Αντίθετα, λιγότερες απώλειες συμβαίνουν υπό τη μετρική lexPFIETX , στην οποία η δρομολόγηση βασίζεται πρωτίστως στην ελαχιστοποίηση των φαινομένων GH και δευτερευόντως στην προτίμηση ζεύξεων καλύτερης ποιότητας. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη προσέγγιση συνοδεύεται και από το μεγαλύτερο αριθμό μεταδόσεων, καθώς συχνά παραβλέπει το ETX. Το αντίστροφο συμβαίνει με την προσέγγιση lexETXPFI , στην οποία εμφανίζονται αυξημένες απώλειες, αλλά και καλύτερες τιμές για τις συνολικές μεταδόσεις.

Συνολικά, η αθροιστική μέθοδος προσφέρει ένα συμβιβασμό ανάμεσα στο πλήθος των μεταδόσεων και των απωλειών πακέτων εν συγκρίσει με τις ακραίες τιμές που δίνουν οι λεξικογραφικές μέθοδοι. Όσον αφορά τώρα την καλύτερη αθροιστική μέθοδο, προτιμώνται οι εκδοχές που αποδίδουν μεγαλύτερο βάρος στο PFI, ήτοι 0,8 ή 0,9. Αυτό συμβαίνει, διότι στον υπολογισμό του PFI εφαρμόζεται λογαριθμοποίηση, γεγονός που ελαττώνει την τιμή της μετρικής PFI για τα θεωρούμενα μονοπάτια σε σχέση με τη μετρική ETX. Γι' αυτό είναι έντονη η επίδραση των απωλειών στα σχήματα δρομολόγησης που δίνουν μικρή έμφαση στο PFI. Αντίθετα, όταν το βάρος του PFI αυξάνεται, τότε μπορεί να επηρεάσει την απόφαση δρομολόγησης από κοινού με το ETX, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά και τις δύο δυσάρεστες καταστάσεις τις οποίες στοχεύουν οι δύο μετρικές.

Συμπερασματικά, η χρήση σύνθετων μετρικών δρομολόγησης υπερτερεί των απλών για κάθε ποσοστό αναξιόπιστων κόμβων και ζεύξεων και για οποιαδήποτε μορφή σύνθεσης,

είτε λεξικογραφική είτε αθροιστική. Παρόλα αυτά, η αθροιστική μέθοδος προτιμάται σε σχέση με τη λεξικογραφική, καθώς παρέχει ισορροπημένες λύσεις για πολλαπλές μετρικές, καθώς και ευελιξία στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας.

5.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε διεξοδικά η χρήση μετρικών δρομολόγησης. Προς τούτο, αναλύθηκαν οι έννοιες της άλγεβρας δρομολόγησης, ενώ επεκτάθηκαν προκειμένου να μπορούν να αναπαραστήσουν πρωτόκολλα δρομολόγησης που ενσωματώνουν απλές ή σύνθετες μετρικές σε σχέση με τον καθορισμό των βαρών των διαθέσιμων μονοπατιών και τα κριτήρια επιλογής του βέλτιστου βάρους. Επιπρόσθετα, αναγνωρίστηκε η ανάγκη για διαφορετικές και πιθανώς άνισα σταθμισμένες μετρικές δρομολόγησης για την ταυτόχρονη κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων QoS, η οποία μεταφράζεται σε ανάγκη για σύνθετες μετρικές δρομολόγησης.

Στην παρούσα εργασία η εμπιστοσύνη και η αξιοπιστία της ζεύξης θεωρήθηκαν ως απαιτήσεις QoS. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε μια νέα μετρική εμπιστοσύνης, το PFI, προκειμένου να διαμορφωθούν σχέσεις αμοιβαίας εμπιστοσύνης μεταξύ των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετρική δρομολόγησης. Ο υπολογισμός του PFI ορίστηκε για δύο περιπτώσεις, όταν αναμεταδόσεις του στρώματος δικτύου εξασφαλίζουν την παράδοση πακέτων σε δίκτυα που υποφέρουν από πλήρη ή επιλεκτική άρνηση υπηρεσίας και όταν δεν υποστηρίζονται οι αναμεταδόσεις αυτού του τύπου. Όσον αφορά την αξιοπιστία της ζεύξης, η ευρέως χρησιμοποιούμενη μετρική ETX θεωρήθηκε για την εξασφάλιση μονοπατιών με την καλύτερη δυνατή ποιότητα ζεύξης.

Το ETX και το PFI συνδυάστηκαν μέσω λεξικογραφικής και αθροιστικής σύνθεσης, προκειμένου να εξάγουν μια σύνθετη μετρική εμπιστοσύνης και αξιοπιστίας ζεύξης, υπό τους ορισμούς της άλγεβρας δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, η αθροιστικώς σύνθετη μετρική εκ των ETX και PFI αποδείχτηκε ότι κατέχει τις ιδιότητες μονοτονίας και ισοτονικότητας της άλγεβρας, οι οποίες εξασφαλίζουν σύγκλιση σε βέλτιστες διαδρομές και χωρίς βρόχους του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του πρωτοκόλλου RPL, όταν χρησιμοποιείται ως μετρική δρομολόγησης μια απλή, είτε το ETX είτε το PFI, ή μια σύνθετη εκ των δύο, λεξικογραφική ή αθροιστική. Οι σύνθετες μετρικές των ETX και PFI αποδείχτηκαν αποδοτικότερες των απλών, ενώ μεταξύ των σύνθετων η αθροιστική μέθοδος υπερτερεί, παρέχοντας ισορροπημένες λύσεις ανάμεσα στις θεωρούμενες καταστάσεις αλλά και ευελιξία στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας. Στην περίπτωση που αναδεικνύεται μια απαίτηση QoS ως κύρια, ενδείκνυται η χρήση της λεξικογραφικής μεθόδου.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η απόδειξη της μονοτονίας και της ισοτονικότητας της αθροιστικής προσέγγισης σύνθεσης δύο απλών μονότονων και ισοτονικών μετρι-

κών δρομολόγησης ισχύει για κάθε μετρική δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, η οποία δύναται να περιγραφεί κατά τον τρόπο που ορίζουν οι Προτάσεις 1 και 2, όπως HC, ETT, καθυστέρηση, κλπ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις και ανάγκες καλούν ολοένα και περισσότερο για νέες και βελτιωμένες ασύρματες υπηρεσίες και συνακόλουθα για αυξημένη ζήτηση των ασύρματων πόρων. Δεδομένου ότι οι πόροι είναι εν γένει περιορισμένοι, δημιουργείται ταυτόχρονα και η ανάγκη εξοικονόμησης και προσεκτικής διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων. Καθώς η ασύρματη τεχνολογία είναι ήδη καθιερωμένη, προκύπτουν διαφορετικές ανάγκες διαχείρισης για τα υπάρχοντα και τα νέα ασύρματα δίκτυα. Από τη μια, τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα εφαρμόζουν πεπαλαιωμένα σχήματα διαχείρισης, σχεδιασμένα για την κάλυψη χαλαρότερων αναγκών, ώστε να απαιτείται η αναδιάταξη των υπαρχόντων δομών διαχείρισης με στόχο την παροχή περισσότερων υπηρεσιών καλύτερης ποιότητας σε χαμηλότερα λειτουργικά κόστη. Από την άλλη, νεοεμφανιζόμενα δίκτυα χαμηλότερων δυνατοτήτων και κόστους υπόσχονται να προσφέρουν νέες υπηρεσίες, δημιουργώντας εξ αρχής την ανάγκη για αποδοτική διαχείριση πόρων με σκοπό την εξασφάλιση της απαραίτητης ποιότητας υπηρεσίας κατά βέλτιστο τρόπο.

Κλασική περίπτωση υπαρχόντων δικτύων στα οποία απαιτείται αναδιοργάνωση είναι τα ασύρματα δίκτυα ευρυεκπομπής, τα οποία παρέχουν υπηρεσίες τηλεόρασης και ραδιοφώνου μέσω αναλογικών σημάτων. Τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων δικτύων συνοψίζονται στην παροχή υπηρεσιών χαμηλής ποιότητας για την εποχή και τις αυξημένες φασματικές απαιτήσεις. Έτσι, η Συμφωνία GE06 καθιέρωσε τα πρότυπα DVB-T για την ψηφιακή τηλεόραση και T-DAB για το ψηφιακό ραδιόφωνο, ενσωματώνοντας μεταξύ άλλων υψηλή ανθεκτικότητα σε σφάλματα, υψηλή ποιότητα υπηρεσίας και χαμηλότερες απαιτήσεις σε φάσμα συχνοτήτων. Η υιοθέτηση των εν λόγω προτύπων παρέχει ευελιξία ως προς την επιλογή της χρήσης του φάσματος, καθώς το άλλοτε φάσμα υπηρεσιών ευρυεκπομπής μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για την παροχή του προγραμμάτων ευρυεκπομπής ίσου ή μεγαλύτερου πλήθους, τυπικής ή υψηλής ευκρίνειας, καθώς και άλλων υπηρεσιών που δε σχετίζονται με την ευρυεκπομπή, όπως είναι η παροχή κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών.

Η Συμφωνία της Γενεύης καθόρισε επίσης τα πλάνα συχνοτήτων ευρυεκπομπής των συμμετεχουσών χωρών, τα οποία εκτείνονταν σε ολόκληρο το τέως φάσμα ευρυεκπομπής, καταλαμβάνοντας όμως λιγότερους διαύλους. Αργότερα, σύμφωνα με τις προτροπές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αναγνωρίστηκε η ανάγκη διάθεσης ενός εναρμονισμένου τμήματος,

της ζώνης των 800 MHz (790-862 MHz), ως ψηφιακού μερίσματος, καθώς και της αναδιάρθρωσης του Πλάνου GE06, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χωρών.

Στα πλαίσια αυτά, στην παρούσα εργασία προτάθηκε ο ευέλικτος αλγόριθμος «Μεταευστικώς Βελτιστοποιούμενη Εκχώρηση Διαύλων» (Metaheuristically Optimized Channel Allocation – MOCA), ο οποίος ενδείκνυται για την ανακατανομή των συχνοτήτων σε ασύρματα δίκτυα ευρυεκπομπής και την παροχή του ψηφιακού μερίσματος με την ταυτόχρονη εξασφάλιση της απαραίτητης ποσότητας φάσματος ανά ενδιαφερόμενο μέλος. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης για την εξαγωγή του νέου πλάνου συχνοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας τόσο στο εσωτερικό των εμπλεκόμενων μελών όσο και μεταξύ τους. Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι η ευελιξία που παρέχει ως προς την επιλογή της μεθόδου βελτιστοποίησης ανάμεσα σε GA, SA και PSO, καθώς επίσης και την επιλογή των εμπλεκόμενων μελών, τα οποία μπορεί να είναι χώρες ή ευρύτερες ή και πιο περιορισμένες περιοχές. Οι ηλεκτρομαγνητικοί περιορισμοί μπορούν να υπολογιστούν μέσω εξειδικευμένων προς τούτο λογισμικών και να εισαχθούν στη συνέχεια στον αλγόριθμο. Η απόδοση του αλγορίθμου αξιολογήθηκε μέσω προσομοιώσεων, οι οποίες περιελάμβαναν ρεαλιστικά στοιχεία και συνέκλιναν σύντομα σε ικανοποιητικές λύσεις.

Παράλληλα, εξετάστηκαν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία έχουν προσφάτως εισχωρήσει σε πολλούς τομείς εφαρμογών, αλλά αποτελούν πεδίο έρευνας με ιδιαίτερες προκλήσεις. Τα εγγενή τους χαρακτηριστικά προτρέπουν για ελαφρές υπολογιστικά και ενεργειακά λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον λειτουργίας και επικοινωνίας. Σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σχετίζονται με την ασφάλεια, καθώς η αναγκαστική συνεργασία της επιβεβλημένης πολυ-βηματικής επικοινωνίας οδηγεί σε κόμβους ευάλωτους σε ένα πλήθος επιθέσεων του στρώματος δικτύου. Επιπλέον, οι κόμβοι τοποθετούνται συχνά σε αφιλόξενα και δυσπρόσιτα περιβάλλοντα, στα οποία η επικοινωνία γειτονικών κόμβων είναι δυσχερής. Εν γένει, εμφανίζονται διαφοροποιημένες απαιτήσεις για την παροχή ικανοποιητικής ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες αντιμετωπίζονται μέσω κατάλληλων μετρικών, που ενσωματώνονται στα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ωστόσο, η χρήση μεμονωμένων μετρικών αδυνατεί να αντιμετωπίσει όλες τις απαιτούμενες πτυχές συμπεριφορών ή λειτουργίας του δικτύου.

Επιπλέον, ο συνδυασμός μιας μετρικής με το πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν είναι πάντοτε αποδοτικός ως προς την κάλυψη του ρόλου της μετρικής και του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Στα πλαίσια αυτά, οι μετρικές δρομολόγησης εκφράζονται με τη βοήθεια της άλγεβρας δρομολόγησης, ενώ οι απαιτήσεις των πρωτοκόλλων δρομολόγησης μεταφράζονται στις ιδιότητες της μονοτονίας και της ισοτονικότητας. Παρόλα αυτά, η υπάρχουσα βιβλιογραφία υστερεί ως προς την αποδοτική χρησιμοποίηση πολλαπλών μετρικών σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Στην παρούσα εργασία προτάθηκε μια νέα μετρική, PFI, που αξιολογεί την εμπιστοσύνη μεταξύ των κόμβων, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η κίνηση δρομολογείται μέσω διαδρομών

που περιέχουν τους κατά το δυνατόν πιο έμπιστους κόμβους και έτσι να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα κακόβουλων συμπεριφορών, όπως απώλεια πακέτων ή ενεργειακή απομύζηση. Το PFI συνδυάζεται μέσω της αθροιστικής και της λεξικογραφικής μεθόδου με τη μετρική ETX, η οποία ποσοτικοποιεί την αξιοπιστία των ζεύξεων. Παράλληλα, αποδείχτηκε ότι και η αθροιστική σύνθεσή τους ικανοποιεί τις επιθυμητές ιδιότητες μονοτονίας και ισοτονικότητας, οπότε η σύνθετη μετρική ενδείκνυται ως μετρική δρομολόγησης.

Η αποδοτικότητα των απλών και των σύνθετων μετρικών ως μέρος του πρόσφατου πρωτοκόλλου δρομολόγησης για δίκτυα χαμηλής ισχύος και απωλειών RPL εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων, οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι οι σύνθετες υπερτερούν των απλών μετρικών. Επίσης, μέσω των προσομοιώσεων εξάγεται ότι η λεξικογραφική μέθοδος ενδείκνυται στην περίπτωση που αναγνωρίζεται μια απαίτηση ως κύρια. Παρόλα αυτά, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, όπου δίδεται βαρύτητα σε περισσότερες της μιας απαιτήσεις, η αθροιστική μέθοδος είναι κατάλληλη για την παροχή σταθμισμένων λύσεων σύμφωνα με την επιθυμητή βαρύτητα.

Αναφορικά με τα μελλοντικά πεδία σχετικής έρευνας, εμφανίζονται σημαντικές προκλήσεις τόσο στα υπάρχοντα δίκτυα όσο και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κατ' αρχάς, η απόδοση φασματικών διαύλων μπορεί να επεκταθεί και σε δίκτυα δυναμικής εκχώρησης συχνοτήτων, όπως είναι τα γνωστικά δίκτυα (cognitive radios). Από την άλλη, παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον η ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών υπό κοινή δικτυακή και φασματική υποδομή, εφαρμόζοντας εικονικοποίηση φάσματος και υπηρεσιών. Τότε, υπηρεσίες θα μπορούν να συντονίζονται ως προς τη χρησιμοποίηση των φασματικών πόρων στο πεδίο του χρόνου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί επίσης να εφαρμοστεί τόσο σε υπάρχοντα δίκτυα σταθερών εκχωρήσεων όσο και σε δίκτυα δυναμικού χαρακτήρα.

Στον τομέα της δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μελλοντικά μπορεί να μελετηθεί η απόδοση των σύνθετων μετρικών, που αποτελούνται από συνδυασμούς και άλλων μετρικών δρομολόγησης και μάλιστα από μεγαλύτερο πλήθος αυτών. Μερικές από αυτές είναι το HC, ο δείκτης ποιότητας ζεύξης (link quality indication – LQI) και κυρίως η ενέργεια, η οποία ορίζεται ως κοίλη μετρική (concave) και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στα δίκτυα των αισθητήρων. Επιπλέον, η άλγεβρα δρομολόγησης μπορεί να επεκταθεί για να περιγράψει σύνθετες μετρικές που ενσωματώνουν αθροιστικές, πολλαπλασιαστικές ή/και κοίλες μετρικές. Τέλος, μπορεί να μελετηθεί η υποστήριξη διαφορετικών κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας, ώστε η κίνηση που ανήκει σε διαφορετικές κλάσεις να δρομολογείται μέσω διαφορετικών διαδρομών που συνάδουν με την εκάστοτε ποιότητα υπηρεσίας.

Τέλος, μια ολοκληρωμένη λύση διαχείρισης πόρων μπορεί να διαχειρίζεται παράλληλα το φάσμα, το δίκτυο, τις υπηρεσίες και τις κλάσεις υπηρεσιών, οδηγώντας σε μια άρτια ευέλικτη λύση.

Βιβλιογραφία

- [1] Cisco, “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012–2017,” white paper, Feb. 2013.
- [2] ITU. (2006). Final acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of regions 1 and 3, in the frequency bands 174–230 MHz and 470–862 MHz. In RRC-06. Geneva.
- [3] Commission of the European Communities. (2005). Communication from the commission to the council, the European parliament, the European economic and social committee and the committee of the regions on accelerating the transition from analogue to digital broadcasting. Brussels: Belgium.
- [4] Radio Spectrum Policy Group. (2010). Opinion on the Radio Spectrum Policy Programme. RSPG10-330 final.
- [5] Radio Spectrum Policy Group. (2007). Opinion on the EU spectrum policy implications of the digital dividend document. RSPG07-161final, RSPG opinion # 7.
- [6] European Commission. (2010). RSPG opinion on the Radio Spectrum Policy Programme. DG INFSO/B4/RSPG secretariat.
- [7] Commission of the European Communities. (2009). Facilitating the release of the digital dividend in the European Union. Brussels: Belgium.
- [8] Electronic Communications Committee. (ECC). Within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). CEPT reports 21, 22, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 138, 142, 148.
- [9] Electronic Communications Committee (ECC). (2009). ECC decision on harmonised conditions for mobile/fixed communications networks (MFCN) operating in the band 790–862 MHz.
- [10] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayicri, “Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Computer Networks*, Vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [11] R. Baumann, S. Heimlicher, M. Strasser, A. Weibel, “A Survey on Routing Metrics”, TIK Report 262, ETH-Zentrum, Computer Engineering and Networks Laboratory February 2007.
- [12] B. Kannhavong, H. Nakayama, Y. Nemoto, N. Kato, A. Jamalipour, “A Survey of Routing Attacks in Mobile Ad Hoc Networks”, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 14, No 5, pp. 85-91, 2007.
- [13] D. Djenouri, L. Khelladi, A.N. Badache, “A Survey of Security Issues in Mobile Ad Hoc and Sensor Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 7, No. 4, pp. 2-28, 2005.

- [14] N. Labraoui, M. Gueroui, M. Aliouat, “Secure DV-Hop Localization Scheme against Wormhole Attacks in Wireless Sensor Networks”, *Trans. Emerging Tel. Tech.*, Vol. 23, pp. 303-316, 2012.
- [15] J.-H. Cho, A. Swami, I.-R. Chen, “A Survey on Trust Management for Mobile Ad Hoc Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE , Vol.13, No.4, pp.562-583, Fourth Quarter 2011. doi: 10.1109/SURV.2011.092110.00088.
- [16] D. Umuhzoza, J.I. Agbinya, C.W. Omlin, “Estimation of Trust Metrics for MANET Using QoS Parameter and Source Routing Algorithms”, in *Proc. of the IEEE Aus-Wireless 2007*, Sydney, Australia, August 2007.
- [17] J. Lopez, R. Roman, I. Agudo, C. Fernandez-Gago, “Trust Management Systems for Wireless Sensor Networks: Best Practices”, *Computer Communications*, Vol. 33, pp. 1086-1093, 2010.
- [18] T. Zahariadis, H.C. Leligou, P. Trakadas, S. Voliotis, “Trust Management in Wireless Sensor Networks”, *Eur. Trans. Telecomms*, Vol. 21, pp. 386-395, 2010.
- [19] A.A. Pirzada, C. McDonald, “Trust Establishment in Pure Ad-hoc Networks” *Wireless Personal Communications*, Vol. 37, pp. 139-163, 2006.
- [20] E. Dijkstra, “A Note on Two Problems in Connection with Graphs”, *Numerical Mathematics*, Vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- [21] R. Bellman, “On a Routing Problem”, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 16, pp. 87-90, 1958.
- [22] J. L. Sobrinho, “Algebra and Algorithms for QoS Path Computation and Hop-by-Hop Routing in the Internet”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 10, No. 4, pp. 541-550, 2002.
- [23] J. L. Sobrinho, “Network Routing with Path Vector Protocols”, in *Proc. of the ACM SIGCOMM 2003*, pp. 49-60, Karlsruhe, Germany, August 2003.
- [24] J. L. Sobrinho, “An Algebraic Theory of Dynamic Network Routing”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 13, No. 5, pp. 1160-1173, 2005.
- [25] <http://www.dtvstatus.net/map/map.html> - τελευταία ανανέωση: Ιανουάριος 2013
- [26] ETSI TR 101 190 V1.3.2, Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects, May 2011.
- [27] http://www.digitag.org/DTTResources/DVB-T2_Handbook.pdf
- [28] DVB Fact Sheet, DVB-T2, 2nd Generation Terrestrial: The World’s Most Advanced Digital Terrestrial TV System, March 2013.
- [29] Commission of the European Communities, COM (2007) 700, “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions”, 2007.
- [30] European Commission, “Commission Decision of 6 May 2010 on Harmonised Technical Conditions of Use in the 790-862 MHz Frequency Band for Terrestrial

- Systems Capable of Providing Electronic Communications Services in the European Union”, Official Journal of the European Union, pp. 95-101, 2010.
- [31] D. Wang, H. Leung, M. Fattouche, F. Ghannouchi, “Efficient Spectrum Allocation and Time of Arrival Based Localization in Cognitive Networks”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 66, No. 4, pp. 813-831, 2011. doi:10.1007/s11277-011-0365-9.
- [32] C.-H. Jiang, R.-M. Weng, “Access Control Engine with Dynamic Priority Resource Allocation For Cognitive Radio Networks”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 68, No. 2, pp. 473-487, 2013. doi:10.1007/s11277-011-0463-8.
- [33] Z. Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, Berlin: Springer, 1999.
- [34] F. Glover, G. Kochenberger, “Handbook of Metaheuristics”, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [35] J.H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975, re-issued by MIT Press (1992).
- [36] D. Bertsimas, J. Tsitsiklis, “Simulated Annealing”, *Statistical Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 10-15, 1993.
- [37] H. Szu, R. Hartley, *Phys. Lett. A*122, 157, 1987.
- [38] B. Fox, “Integrating and Accelerating Tabu Search, Simulated Annealing, and Genetic Algorithms”, *Annals of Operations Research*, Vol. 41, pp. 47-67, 1993.
- [39] F. Van den Bergh, “An Analysis of Particle Swarm Optimizers”, PhD Thesis, University of Pretoria, 2006.
- [40] Y. del Valle, G. Kumar Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, R. Harley, “Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 12, No. 2, 2008.
- [41] V. Kalivarapu, J.-L. Foo, E. Winer, “Improving Solution Characteristics Of Particle Swarm Optimization Using Digital Pheromones”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 37, No. 4, pp. 415-427, 2009.
- [42] V. Le, Z. Feng, D. Bourse, P. Zhang, “A Cell Based Dynamic Spectrum Management Scheme with Interference Mitigation for Cognitive Networks”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 49, 275–293, 2009.
- [43] O. Cabral, F. Meucci, A. Mihovska, F.J. Velez, N.R. Prasad, R. Prasad, “Integrated Common Radio Resource Management with Spectrum Aggregation over Non-Contiguous Frequency Bands”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 59, pp. 499-523, 2011.
- [44] J.-H. Wen, C.-H. Chiang, T.-J. Hsu, H.-L. Hung, “Resource Management Techniques for OFDM Systems with the Presence of Inter-Carrier Interference”, *Wireless*

- Personal Communications, Vol. 65, No. 3, pp. 515-535, 2012. doi:10.1007/s11277-011-0270-2.
- [45] A. Gelonch, X. Revés, V. Marojevic, J. Nasreddine, J. Pérez-Romero, O. Sallent, “A Real Time Emulator Demonstrating Advanced Resource Management Solutions”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 54, pp. 123-136, 2010.
- [46] S.S.M. Patra, K. Roy, S. Banerjee, D.P. Vidyarthi, “Improved Genetic Algorithm for Channel Allocation with Channel Borrowing in Mobile Computing”, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol. 5, No.7, pp. 884-892, 2006.
- [47] M.A.C. Lima, A.F.R. Araújo, A.C. César, “Adaptive Genetic Algorithms for Dynamic Channel Assignment in Mobile Cellular Communication Systems”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 56, No. 5, pp. 2685-2696, 2007.
- [48] L.M.O. Khanbary, D.P. Vidyarthi, “A GA-based Effective Fault-Tolerant Model for Channel Allocation in Mobile Computing”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 57, No. 3, pp. 1823-1833, 2008.
- [49] L.M.O. Khanbary, D.P. Vidyarthi, “Reliability-based Channel Allocation Using Genetic Algorithm in Mobile Computing”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 58, No. 8, pp. 4248-4256, 2009.
- [50] X. Fu, A.G. Bourgeois, P. Fan, Y. Pan, “Using a Genetic Algorithm Approach to Solve the Dynamic Channel-Assignment Problem”, *International Journal of Mobile Communications*, Vol. 4, No. 3, pp. 333-353, 2006.
- [51] J. Chen, S. Olafsson, X. Gu, “A Biologically Inspired Dynamic Channel Allocation Technique in 802.11 WLANs with Multiple Access Points”, in *Proc. of PIMRC, Athens*, 2007.
- [52] X. Wu, B.S. Sharif, O.R. Hinton, “Adaptive Channel Allocation Schemes for Wireless PCN: A Genetic Algorithm Approach”, in *Proc. of the 10th Asia-Pacific conference on communications and 5th international symposium on multi-dimensional mobile communications*, Vol. 1, pp. 76-79, Beijing, 2004.
- [53] N. Sharma, K.R. Anupama, “A Novel Genetic Algorithm for Adaptive Resource Allocation in MIMO-OFDM Systems with Proportional Rate Constraint”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 61, pp. 113-128, 2011.
- [54] S.-H. Kim, K.-N. Chang, S. Kim, “A channel allocation for cellular mobile radio systems using simulated annealing”, *Telecommunication Systems*, Vol. 14, No. 1/4, pp. 95-106, 2000.
- [55] J. Chen, S. Olafsson, X. Gu, “Observations on Using Simulated Annealing for Dynamic Channel Allocation in 802.11 WLANs”, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1801-1805, Marina Bay, 2008.
- [56] M. F. Uddin, H.M.K. AlAzemi, C. Assi, “Optimal Flexible Spectrum Access in Wireless Networks with Software Defined Radios”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 10, No. 1, pp. 314-324, 2011.

- [57] P.P. Demestichas, E.C. Tzifa, M.E. Theologou, M.E. Anagnostou, "Interference-Oriented Carrier Assignment in Wireless Communications" IEEE Communications Letters, Vol. 7, No. 1, pp. 7-9, 2003.
- [58] J. Robinson, Y. Rahmat-Samii, "Particle Swarm Optimization in Electromagnetics", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 2, pp. 397-407, 2004.
- [59] J. R. Pérez, J. Basterrechea, J. Morgade, A. Arrinda, P. Angueira, "Optimization of the Coverage Area for DVB-T Single Frequency Networks Using A Particle Swarm Based Method", in Proc. of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), pp. 1-5, Barcelona, 2009.
- [60] K. Zielinski, P. Weitkemper, R. Laur, K.-D. Kammeyer, "Optimization of Power Allocation for Interference Cancellation with Particle Swarm Optimization", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 13, No. 1, pp. 128-150, 2009.
- [61] Z. Zhao, Z. Peng, S. Zheng, J. Shang, "Cognitive Radio Spectrum Allocation Using Evolutionary Algorithms", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 9, pp. 4421-4425, 2009.
- [62] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless Sensor Network Survey", Computer Networks, No. 52, pp. 2292-2330, 2008.
- [63] I. Smith, O. Vermesan, P. Friess, A. Furness, "The Internet of Things 2012 New Horizons", Halifax, UK, 2012.
- [64] <https://www.iot-at-work.eu/>
- [65] <http://www.iot6.eu/>
- [66] <http://www.iot-a.eu/public>
- [67] <http://www.vitro-fp7.eu/>
- [68] T.Q.S. Quek, D. Dardari, M.Z. Win, "Energy Efficiency of Dense Wireless Sensor Networks: To Cooperate Or Not To Cooperate", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25, No. 2, pp. 459-470, February 2007. doi: 10.1109/JSAC.2007.070220
- [69] J.-W. Lee, J.-J. Lee, "Ant-Colony-Based Scheduling Algorithm for Energy-Efficient Coverage of WSN", IEEE Sensors Journal, Vol. 12, No. 10, pp. 3036-3046, Oct. 2012. doi: 10.1109/JSEN.2012.2208742
- [70] A. del Coso, U. Spagnolini, C. Ibars, "Cooperative Distributed MIMO Channels in Wireless Sensor Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25, No. 2, pp. 402-414, February 2007. doi: 10.1109/JSAC.2007.070215
- [71] J. Fang, H. Li, "Power Constrained Distributed Estimation With Cluster-Based Sensor Collaboration", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 7, pp. 3822-3832, July 2009. doi: 10.1109/TWC.2009.081438
- [72] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

- [73] A. Ghosh, S. Das, *Mobile, Wireless, and Sensor Networks: Technology, Applications, and Future Directions*, Chapter 9: Coverage and Connectivity Issues in Wireless Sensor Networks, John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [74] A. Mohammed, Z. Yang, “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”, *Sustainable Wireless Sensor Networks*, chapter 1, ISBN 978-953-307-297-5, December 14, 2010.
- [75] S. Hedetniemi, A. Liestman. “A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks”, *Networks*, Vol. 18, No. 4, pp. 319–349, 1988.
- [76] W. R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, “Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks”, in *Proc. of MobiCom’99*, pp. 174–185, Seattle, WA, USA, August 1999.
- [77] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar, “Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks”, in *Proc. of ACM/IEEE MobiCom’99*, pp. 263–270, Seattle, WA, USA, August 1999.
- [78] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, “Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks”, in *Proc. of MobiCom’00*, pp. 56–67, Boston, MA, USA, August 2000.
- [79] R. C. Shah, J. Rabaey, “Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, March 17-21, 2002, Orlando, FL.
- [80] D. Braginsky, D. Estrin, “Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks”, in *Proc. of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA’02)*, pp. 22–31, Atlanta, GA, USA, September 2002.
- [81] C. Schurgers, M.B. Srivastava, “Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks”, in the *MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean, VA, 2001.
- [82] M. Chu, H. Haussecker, F. Zhao, “Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for Ad Hoc Heterogeneous Sensor Networks”, *International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 16, No. 3, pp. 293-313, 2002.
- [83] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, in *Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000, 1-10.
- [84] S. Lindsey, C.S. Raghavendra, “PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems”, in *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, March 2002.
- [85] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, “TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks”, in *Proc. of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001.

- [86] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, “APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks”, in Proc. of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, Ft. Lauderdale, FL, April 2002.
- [87] L. Cheng, C.Wu, Y. Zhang, H. Wu, M. Li, C. Maple, “A Survey of Localization in Wireless Sensor Network”, International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2012, 2012. doi:10.1155/2012/962523
- [88] B. Karp, H.T. Kung, “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Sensor Networks”, in Proc. of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom ‘00), Boston, MA, August 2000.
- [89] V. Rodoplu, T.H. Ming, “Minimum Energy Mobile Wireless Networks”, IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 17, No. 8, 1999, pp. 1333–1344.
- [90] L. Li, J. Y Halpern, “Minimum Energy Mobile Wireless Networks Revisited”, in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC ‘01), Helsinki, Finland, June 2001.
- [91] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, “Geography-Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing”, in Proc. of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom ‘01), Rome, Italy, July 2001.
- [92] Y. Yu, D. Estrin, R. Govindan, “Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks”, UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.
- [93] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G.J. Pottie, “Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network”, IEEE Personal Communications, Vol. 7, No. 5, pp. 16–27, October, 2000.
- [94] F. Ye, A. Chen, S. Lu, L. Zhang, “A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks”, in Proc. of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks, 2001, Scottsdale, AZ, pp. 304-309.
- [95] T. He, J. A Stankovic, C. Lu, T. Abdelzaher, “SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks”, in Proc. of the Distributed Computing Systems, 2003, Providence, RI, USA, pp. 46-55.
- [96] J.P. Vasseur, N. Agarwal, J. Hui, Z. Shelby, P. Bertrand, C. Chauvenet, “RPL: The IP Routing Protocol Designed For Low Power and Lossy Networks”, IPSO Alliance, April 2011.
- [97] D. Meidanis, I. Papaefstathiou, “On the Power Consumption of Security Algorithms Employed in Wireless Networks”, in Proc. of the IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC09), Las Vegas, Nevada, 10-13 January, 2009.
- [98] G. Mahoney, W. Myrvold, G.C. Shoja. “Generic Reliability Trust Model”, in Proc. of the 3rd Annual Conference on Privacy, Security and Trust, St. Andrews, New Brunswick, Canada, October 2005.

- [99] G. Theodorakopoulos, J. S. Baras, "On Trust Models and Trust Evaluation Metrics for Ad-Hoc Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, Vol. 24, No. 2, pp. 318-328, Feb. 2006.
- [100] G.V. Crosby, N. Pissinou, "Cluster-based Reputation and Trust for Wireless Sensor Networks", in *Proc. of the Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2007.
- [101] W. Zhang, S. K. Das, Y. Liu, "A Trust Based Framework for Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks", in *Proc. of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, Reston, VA, USA, Sept. 25-28, 2006.
- [102] A.A. Pirzada, C. McDonald, A. Datta, "Performance Comparison of Trust-Based Reactive Routing Protocols", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 6, June 2006.
- [103] A. Boukerche, Y. Ren, "A Trust-Based Security System for Ubiquitous and Pervasive Computing Environments", *Computer Communications*, Vol. 31, No. 18, pp. 4343-4351, Dec. 2008.
- [104] T. Zahariadis, H. Leligou, S. Voliotis, S. Maniatis, P. Trakadas, P. Karkazis, "An Energy and Trust-aware Routing Protocol for Large Wireless Sensor Networks", in *Proc. of 9th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications (AIC '09)*, Moscow, August 2009, pp. 216-224.
- [105] K. Govindan, P. Mohapatra, "Trust Computations and Trust Dynamics in Mobile Adhoc Networks: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 14, No. 2, pp. 279-298, 2012.
- [106] Y. Yang, J. Wang, "Routing Metrics Design for Multi-Hop Wireless Networks", *UKC 2007*, Reston, Virginia, USA, August 2007.
- [107] Y. Yang, J. Wang, R. Kravets, "Designing Routing Metrics for Mesh Networks", *IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, Santa Clara, California, USA, September 2005.
- [108] Y. Yang, J. Wang, "Design Guidelines for Routing Metrics in Multihop Wireless Networks, in *Proc. of the IEEE INFOCOM 2008*, pp. 1615-1623, Phoenix, Arizona, USA, April 2008.
- [109] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing", in *Proc. of the ACM MobiCom '03*, San Diego, California, September 2003.
- [110] R. Draves, J. Padhye, B. Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks", in *Proc. of the ACM MobiCom 2004*, Philadelphia, USA, September-October 2004.

- [111] Q. Dong, S. Banerjee, M. Adler, A. Misra, “Minimum Energy Reliable Paths Using Unreliable Wireless Links”, in Proc. of the ACM MobiHoc 2005, Urbana-Champaign, Illinois, USA, May 2005.
- [112] Y. Yang, J. Wang, R. Kravets, “Interference-Aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks”, Technical Report, Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
- [113] Y. Li, Y. Yang, X. Lu, “Routing Metric Designs for Greedy, Face and Combined-Greedy-Face Routing”, in Proc. of the IEEE INFOCOM 2009, pp. 64-72, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009.
- [114] M. Lu, J. Wu, “Opportunistic Routing Algebra and its Applications”, in Proc. of the IEEE INFOCOM 2009, pp. 2374-2382, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009.
- [115] S. Zheng, P. Kong, C. Tham, “A Novel Routing Metric for Multi-Hop Cooperative Wireless Networks”, in Proc. of the IEEE PIMRC 2009, pp. 2911-2915, Tokyo, Japan, September 2009.
- [116] C. Han, Y. Li, Y. Yang, “Compatibility between Optimal Tree-Based Broadcast Routing and Metric Design”, in Proc. of the IEEE GLOBECOM 2009, Honolulu, Hawaii, USA, November-December 2009.
- [117] M.G. Gouda, M. Schneider, “Maximizable Routing Metrics”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, No. 4, pp. 663-675, 2003.
- [118] A. Abdul-Rahman, S. Hailes, “A Distributed Trust Model”, New Security Paradigms Workshop, pp. 48-60, 1998.
- [119] G.P. Navarrete, M. Momani, J. Agbinya, M. Akache, “A New Algorithm of Trust Formation in Wireless Sensor Networks”, in Proc. of the 1st IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, Sydney, Australia, March 2006.
- [120] A. Sobeih, J.C. Hou, L. Kung, N. Li, H. Zhang, W.P. Chen, H.Y. Tyan, H. Lim, “J-Sim: A Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks”, IEEE Wireless Communications, Vol. 13, No. 4, pp. 104-119, 2006.
- [121] P. Karkazis, P. Trakadas, T. Zahariadis, A. Hatziefremidis, K.H. Leligou, “RPL Modeling in J-Sim Platform”, in Proc. of the 9th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS), 11-14 June 2012.
- [122] <http://code.google.com/p/rpl-jsim-platform/downloads/list>
- [123] J.N. Al-Karaki, A.E. Kamal, “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey,” IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [124] IBM, “TCP/IP Tutorial and Technical Overview”, Chapter 4, IBM Redbooks publication, 2006.

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

1. T.H. Velivasaki, S.D. Kakarakis, N. Kapsalis, C. Capsalis, “Metaheuristic Channel Assignment in DVB-T Networks in Conformity with Digital Dividend Requirements”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 70, No. 2, pp. 709-730, 2013.
2. T.H. Velivasaki, P. Karkazis, T. Zahariadis, P. Trakadas, C. Capsalis, “Trust-aware and Link-reliable Routing Metric Composition for Wireless Sensor Networks”, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2012, doi: 10.1002/ett.2592
3. V. Kalogirou, T.H. Velivasaki, C. Capsalis, “Performance Measurements of a DVB-T System Affected by 5-MHz Generic Adjacent Channel Interference”, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 17, pp. 1-15, 2010.
4. P. Karkazis, H.C. Leligou, L. Sarakis, T. Zahariadis, P. Trakadas, T.H. Velivasaki, C. Capsalis, “Design of Primary and Composite Routing Metrics for RPL-compliant Wireless Sensor Networks”, *International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU)*, pp.13-18, July-Aug. 2012. doi: 10.1109/TEMU.2012.6294705
5. T.H. Velivasaki, T. Zahariadis, P. Trakadas, C. Capsalis, “Interference Analysis of Cognitive Radio Networks in a Digital Broadcasting Spectrum Environment”, *16th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, 2009, IWSSIP 2009.
6. V. Kalogirou, E. Nanou, N. Capsalis, T.H. Velivasaki, C. Capsalis, “Compatibility of DVB-T Services and IMT-2000 Compliant Mobile Telecommunications in the UHF Band of 470-862 MHz”, *9th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services*, TELSIKS '09, 2009.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Χρήσιμοι Ορισμοί

Allotment: Κατά το σχεδιασμό μέσω περιοχών απονομής, ένας συγκεκριμένος διάυλος αποδίδεται σε μια διοίκηση προκειμένου να παρέχει κάλυψη σε καθορισμένη περιοχή εντός της περιοχής κάλυψής της, που καλείται περιοχή απονομής. Τα κέντρα εκπομπής καθώς και τα χαρακτηριστικά τους δεν είναι γνωστά στο στάδιο του σχεδιασμού και πρέπει να καθοριστούν κατά τη μετατροπή του allotment σε μια ή περισσότερες καταχωρήσεις τύπου assignment.

Assignment: Κατά το σχεδιασμό με καταχωρήσεις τύπου assignment, ένας συγκεκριμένος διάυλος αποδίδεται σε ένα μοναδικό κέντρο εκπομπής με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας (για παράδειγμα ισχύς εκπομπής, ύψος ιστού κεραίας κλπ.).

Single Frequency Network: Ένα δίκτυο συγχρονισμένων οι οποίοι εκπέμπουν πανομοιότυπα σήματα στον ίδιο διάυλο ραδιοσυχνοτήτων.

Multi Frequency Network: Ένα δίκτυο σταθμών εκπομπής που χρησιμοποιούν διαφορετικούς διαύλους ραδιοσυχνοτήτων.

Ψηφιακό μέρισμα: Το ψηφιακό μέρισμα κατανοείται ως το φάσμα που διατίθεται άνω και κάτω του απαιτούμενου για τη στέγαση των υπάρχουσών αναλογικών υπηρεσιών σε ψηφιακή μορφή στις ζώνες VHF (ζώνη III: 174–230 MHz) και UHF (ζώνες IV και V: 470–862 MHz)

Συντονισμός: Η διαδικασία αμοιβαίων διαπραγματεύσεων κατά τη μεταβολή καταχωρήσεων του Πλάνου GE06, η οποία ορίζεται στο Άρθρο 4 της GE06.

Μεταεναρτιστικοί αλγόριθμοι: Στοχαστικές διαδικασίες βελτιστοποίησης που εφαρμόζουν μια επαναληπτική διαδικασία σε ένα σύνολο υποψηφίων λύσεων, μέχρι να προσδιοριστεί η βέλτιστη εξ αυτών. Εμπνέονται συχνά από φαινόμενα φυσικής εξέλιξης ή και κοινωνικά.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Δρομολόγηση IP και Πρωτόκολλα Δρομολόγησης IP

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης IP [124] χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του πίνακα δρομολόγησης IP σε κάθε έναν από τους κόμβους δρομολόγησης. Εν γένει, διακρίνονται δύο κατηγορίες δόμησης του πίνακα δρομολόγησης:

- Στατική δρομολόγηση: Χρησιμοποιούνται a priori προγραμματισμένοι ορισμοί που αναπαριστούν διαδρομές εντός του δικτύου
- Δυναμική δρομολόγηση: Οι αλγόριθμοι δυναμικής δρομολόγησης επιτρέπουν στους δρομολογητές να ανακαλύπτουν αυτόματα και να έχουν επίγνωση των διαδρομών του δικτύου. Κατά τη διαδικασία της αυτόματης ανακάλυψης μπορεί να χρησιμοποιούνται διάφορα πρωτόκολλα δυναμικής δρομολόγησης. Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στον τρόπο που ανακαλύπτουν και υπολογίζουν νέες διαδρομές προς τους εκάστοτε προορισμούς. Γενικά, τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:
 - Πρωτόκολλα ανύσματος απόστασης: Κάθε δρομολογητής διατηρεί την απόσταση ή το κόστος του σε σχέση με κάθε γνωστό προορισμό, που αντιστοιχεί στην προτίμηση που δείχνει για το κάθε μονοπάτι. Προτιμώνται οι διαδρομές με το μικρότερο κόστος.
 - Πρωτόκολλα κατάστασης ζεύξης: Η κατάσταση ζεύξης είναι η περιγραφή της διεπαφής ενός δρομολογητή (π.χ. διεύθυνση IP, μάσκα υποδικτύου, τύπος δικτύου) και τη σχέση της με τους γειτονικούς δρομολογητές σε όρους κόστους. Διαφημίζοντας την κατάσταση ζεύξης, τελικά κάθε δρομολογητής διατηρεί πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου, ώστε να υπολογίζει τα κόστη των διαδρομών προς κάθε προορισμό του δικτύου.
 - Υβριδικά πρωτόκολλα: Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Όπως τα πρωτόκολλα ανύσματος απόστασης, τα υβριδικά πρωτόκολλα χρησιμοποιούν μετρικές για να εκφράσουν την προτίμηση σε μια διαδρομή, χρησιμοποιώντας όμως πιο ακριβείς μετρικές. Αντίστοιχα με τα πρωτόκολλα κατάστασης ζεύξης, τα υβριδικά εγείρονται από γεγονότα, αντί να είναι περιοδικά. Εν τέλει, τα υβριδικά πρωτόκολλα συγκλίνουν νωρί-

τερα από τα πρωτόκολλα ανύσματος απόστασης, ενώ συνεπάγονται πιθανή ελάττωση του φόρτου λόγω των μηνυμάτων ενημέρωσης της κατάστασης ζεύξης ή των διαφημίσεων των πρωτοκόλλων ανύσματος απόστασης.