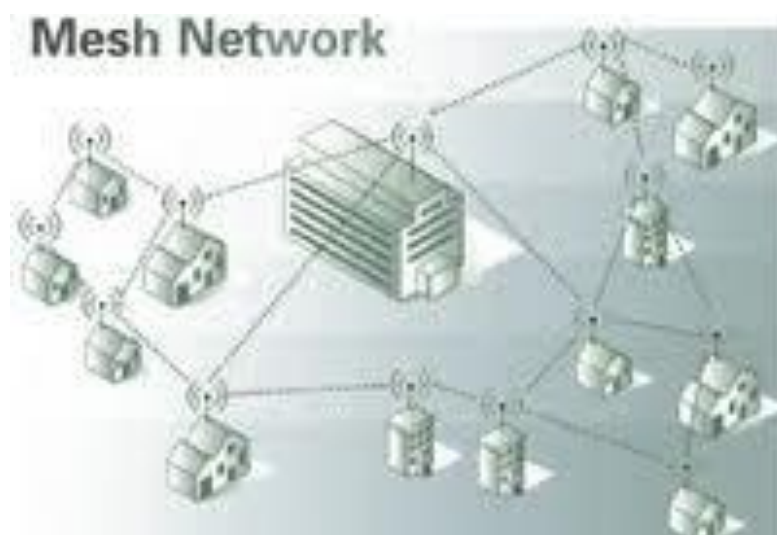




Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»



Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Δρομολόγηση με κριτήριο τη διαθέσιμη ενέργεια για την παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας σε IEEE 802.11s Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Μαρία Ζογκού
Πατρώνυμο	Μιχαήλ
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΣΠ/11015
Επιβλέπων	Δημήτριος Βέργαδος, Επίκουρος Καθηγητής

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Πινάκων.....	6
Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες.....	9
Εισαγωγή.....	10
Κεφάλαιο 1.....	11
1.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα (Wireless Mesh Networks - WMNs).....	11
1.2 Αρχιτεκτονική των Ασυρμάτων Πλεγματικών Δικτύων	11
1.2.1 Infrastructure/Backbone based WMNs.....	11
1.2.2 Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα Πελάτη (Client WMNs)	12
1.2.3 Υβριδικά Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα (Hybrid WMNs).....	13
1.3 Προσέγγιση ανά επίπεδο.....	14
Κεφάλαιο 2.....	17
2.1 Εισαγωγή στο IEEE 802.11s Πρότυπο	17
2.1.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Πλεγματικού Δικτύου IEEE 802.11s	17
2.1.2 Διαδικασία ανακάλυψης MBSS.....	18
2.1.3 Mesh peering management πρωτόκολλο (MPM).....	19
2.2 Medium Access Control (MAC) Αρχιτεκτονική	20
2.3 Mesh Path Selection	21
2.3.1 Γενικά.....	21
2.3.2 Airtime Link Metric	21
2.3.3 Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP).....	21
2.3.3.1 Γενικά.....	21
2.3.3.2 Κατόπιν Αιτήματος λειτουργία (On – demand mode)	22
2.3.3.3 Proactive Mode.....	24
2.4 Μορφή Πλεγματικού Πλαισίου	24
2.5 Συγχρονισμός.....	24
2.6 Beaconing	25
2.7 Διαχείριση Ισχύος (Power Management)	26
2.8 Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control)	27
2.9 Διαλειτουργία με το Σύστημα Κατανομής (Interworking with the Distribution System - DS)	27
2.10 Έργασίες πάνω σε IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks	28
2.10.1 Αρχιτεκτονικές των IEEE 802.11s WMNs	29
2.10.2 QoS στα WMNs	29
2.10.3 Αλγόριθμοι δρομολόγησης στα WMNs.....	29
2.10.4 Εξοικονόμηση Ενέργειας σε WMNs	32
2.10.5 Αποφυγή Συμφόρησης στα WMNs.....	33

2.10.6 QoS και Εκχώρηση Καναλιών στα WMNs.....	34
2.10.7 Διαχείριση Ενέργειας στα WMNs.....	36
2.10.8 Κινητικότητα – Φορητότητα στα WMNs	37
2.10.9 Διαλειτουργικότητα	38
2.11 Εφαρμογές του IEEE 802.11s	41
2.11.1 Το έργο One Laptop Per Child (OLPC).....	41
2.11.2 open80211s.....	41
2.11.3 Meraki	42
Κεφάλαιο 3.....	43
3.1 Cross Layer Design Overview	43
3.2 Μεθοδολογίες Ανάπτυξης Cross Layer Design.....	44
3.3 QoS στα IEEE 802.11s WMNs.....	44
3.4 Related Work	46
3.4.1 Εκχώρηση Καναλιών και δρομολόγηση σε WMNs	46
3.4.2 Εκχώρηση Καναλιών και Παρεμβολές σε WMNs	49
3.4.3 Εκχώρηση Καναλιών και Ισχύς Μετάδοσης σε WMNs	50
3.4.4 Συνθήκες Καναλιού και Δρομολόγηση σε WMNs	50
3.5 Μετρικές στα WMNs.....	52
Κεφάλαιο 4.....	55
4.1 Προτεινόμενη Μετρική.....	55
4.2 Αρχιτεκτονική Δικτύου Προσομοίωσης.....	55
4.3 Προσομοιωτής ns3.....	57
4.3.1 Γενικά.....	57
4.3.2 Διαδικασία Εγκατάστασης του ns-3	59
4.3.3 Βασικές Έννοιες.....	59
4.3.4 Καταγραφή (Logging)	60
4.3.5 Σύστημα Εντοπισμού (Tracing System)	60
4.4 NS-3 Modules	60
4.4.1 Energy Framework	60
4.4.1.1 Energy Source Helper και Device Energy Model Helper	61
4.4.1.2 Basic Energy Source	61
4.4.1.3 WiFi Radio Energy Model.....	61
4.4.2 Mesh Framework	61
4.4.2.1 Mesh Radio Energy Model Helper.....	61
4.4.2.2 MeshHelper	62
4.4.2.3 MeshPointDevice.....	62
4.4.2.4 HWMP	62
4.4.2.5 Peer Management Protocol.....	63
4.4.2.6 Peer Link.....	63

Μεταπτυχιακή Διατριβή	Μαρία Ζογκού
4.4.2.7 Airtime Link Metric	64
4.5 Υλοποίηση Προτεινόμενης Μετρικής.....	64
Κεφάλαιο 5.....	67
5.1 Αποτελέσματα	67
5.2 Αξιολόγηση Επίδοσης	71
Κεφάλαιο 6.....	72
6.1 Συμπεράσματα	72
6.2 Ανοικτά Ζητήματα (Open Issues)	72
7 Αναφορές.....	77
8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	80

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Infrastructure/Backbone Αρχιτεκτονική	σελ 11
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική Πελάτη	σελ 12
Εικόνα 3: Υβριδική Αρχιτεκτονική	σελ 12
Εικόνα 4: Μοντέλο Αναφοράς OSI	σελ 13
Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική IEEE 802.11s WMN	σελ 17
Εικόνα 6: Διαδικασία Εγκατάστασης ενός peering	σελ 18
Εικόνα 7: Διαδικασία Ανακάλυψης Μονοπατιού Δρομολόγησης	σελ 21
Εικόνα 8: Δημιουργία Μονοπατιού Δρομολόγησης	σελ 22
Εικόνα 9: Μορφή Πλεγματικού Πλαισίου	σελ 23
Εικόνα 10: Καταστάσεις Λειτουργίας Πλεγματικού Σταθμού	σελ 25
Εικόνα 11: Λειτουργία του IEEE 802.11s WMN ως Σύστημα Κατανομής	σελ 26
Εικόνα 12: Κατηγορίες Αλγορίθμων Δρομολόγησης	σελ 46
Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική Ασύρματου Πλεγματικού Δικτύου Προσομοίωσης	σελ 55
Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική του ns-3	σελ 49
Εικόνα 15: Κλάσεις Υλοποίησης ενός IEEE 802.11s WMN	σελ 62
Εικόνα 16: Υλοποίηση Προτεινόμενης Μετρικής	σελ 64

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Αντιστοίχιση Εύρους Τιμής PCL με Βαθμό Συμφόρησης	σελ 31
Πίνακας 2: Μορφή IEEE 802.11 Πλαισίου	σελ 36
Πίνακας 3: Έρευνες πάνω σε IEEE 802.11s WMNs	σελ 37 - 39
Πίνακας 4: Έρευνες πάνω σε Cross Layer Design σε WMNs	σελ 48 - 50
Πίνακας 5: Μετρικές σε Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα	σελ 52
Πίνακας 6: Ανοικτά Ζητήματα Πάνω σε WMNs	σελ 71 - 73

Περίληψη

Τα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα αποτελούν πλέον τεχνολογία κλειδί για τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς. Το IEEE 802.11s Standard ορίζει τον τρόπο που οι ασύρματοι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί ένα WLAN πλεγματικό δίκτυο. Επίσης, ορίζει το πρωτόκολλο δρομολόγησης και τη μετρική που χρησιμοποιεί ένα 802.11s πλεγματικό δίκτυο για τη διαδικασία της δρομολόγησης. Η κατανάλωση της ενέργειας των πλεγματικών κόμβων αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα στη βιωσιμότητα του πλεγματικού δικτύου. Η χρήση αλγορίθμων δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τους την ενέργεια μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε αυτή την έρευνα υλοποιήθηκε μία νέα μετρική για τα 802.11s Πλεγματικά Δίκτυα που λαμβάνει υπόψη της τη διαθέσιμη ενέργεια των πλεγματικών κόμβων. Για την αξιολόγηση της προαναφερθείσας μετρικής σε σύγκριση με την πρότυπη μετρική του IEEE 802.11s Standard (airtime link metric) χρησιμοποιήθηκε ο ns3.

Λέξεις Κλειδιά - Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα, IEEE 802.11s, διάρκεια δικτύου, μετρική βασισμένη στη διαθέσιμη ενέργεια, ns3.

Abstract

Wireless Mesh Networks are the key technology for the next generation wireless networks. The IEEE 802.11s Standard defines the procedures that wireless nodes follow in order to interconnect and create a WLAN mesh network. It, also, defines the routing protocol and the metric that are used by a IEEE 802.11s mesh network to route data. The energy consumption of mesh nodes affects the lifetime of a mesh network. By introducing energy - aware routing algorithms, the lifetime of the network may be prolonged. In this research, a new energy - aware metric for the IEEE 802.11s mesh networks have been implemented. The ns3 simulator was used for the evaluation of the aforementioned metric and the default metric used by IEEE 802.11s Standard.

Keywords - Wireless Mesh Networks, 802.11s, network lifetime, energy - aware metric, ns3.

Ευχαριστίες

Στο πρώτο άτομο που θα ήθελα να δώσω τις ευχαριστίες μου είναι ο επιβλέπων καθηγητής μου, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πειραιά, κ.Βέργαδος, για την καθοδήγησή του καθ'όλη την πορεία της μεταπτυχιακής μου διατριβής και για το γεγονός ότι έχει αποτελέσει μέντοράς μου κι έχει πιστέψει σε μένα. Επίσης, ευχαριστώ πολύ την Αγγελική Σγώρα που μου έδινε οδηγίες κι ιδέες για τη διαδικασία περάτωσης της διατριβής μου και τον Μανώλη Σκόνδρα, που αφιέρωσε αρκετό χρόνο στην υλοποίηση του ερευνητικού μέρους της παρούσας διατριβής, καθώς με βοήθησε στο προγραμματιστικό κομμάτι του ns3. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα την τριμελή επιτροπή μου και συγκεκριμένα τον κ.Δουληγέρη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πειραιά και τον κ.Κοτζανικολάου, Λέκτορα του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πειραιά. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στη μανούλα μου που με τόσο κόπο με μεγάλωσε και που στηρίζει τη δρόμο που έχω επιλέξει.

Εισαγωγή

Τα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα αποτελούνται από πλεγματικούς κόμβους που συνδέονται μεταξύ τους και παρέχουν συνδεσιμότητα στους πελάτες. Η ενέργεια των κόμβων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη βιωσιμότητα του δικτύου κι ιδιαίτερα όταν αυτή είναι περιορισμένη. Όταν ένα μεγάλο ποσοστό από τους κόμβους του δικτύου μείνουν χωρίς ενέργεια, τότε το δίκτυο σπάει σε κομμάτια και χάνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Για να εξασφαλιστεί η μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής του δικτύου, πρέπει να εφαρμόζονται σε αυτό μηχανισμοί που θα χρησιμοποιούν αποδοτικά την ενέργεια των κόμβων. Ένας από αυτούς τους μηχανισμούς μπορεί να είναι η διαδικασία της δρομολόγησης.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύει θέματα που αφορούν στα IEEE 802.11s Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα και έχει ως βασικό στόχο την υλοποίηση μίας νέας μετρικής δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη της τη διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα του πλεγματικού δικτύου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, η δομής της πτυχιακής εργασίας είναι η ακόλουθη:

- **Κεφάλαιο 1:** Περιλαμβάνει μία γενική επισκόπηση των Ασύρματων Πλεγματικών Δικτύων, των χαρακτηριστικών τους, τις αρχιτεκτονικές που έχουν αναπτυχθεί για τα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα και τις λειτουργίες τους ανά επίπεδο της στοίβας.
- **Κεφάλαιο 2:** Περιλαμβάνει εισαγωγικές πληροφορίες για τα IEEE 802.11s Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα, την αρχιτεκτονική που ορίζεται από το προαναφερθέν πρότυπο και διάφορες λειτουργίες που υποστηρίζουν τα IEEE 802.11s Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται η διαδικασία ανακάλυψης, η διαδικασία δρομολόγησης, η αρχιτεκτονική του επιπέδου πρόσβασης (MAC), η μορφή των ασύρματων πλεγματικών πλαισίων και πολλές άλλες λειτουργίες που ορίζονται στο IEEE 802.11s Πρότυπο. Τέλος, παρουσιάζονται εργασίες που έχουν υλοποιηθεί πάνω σε IEEE 802.11s Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα κι εφαρμογές αυτών.
- **Κεφάλαιο 3:** Παρουσιάζει το Σχεδιασμό Cross Layer και την παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS) καθώς επίσης, κι έρευνες που έχουν γίνει πάνω σε Cross Layer Design και παροχή QoS σε IEEE 802.11s WMNs. Ακόμα, περιλαμβάνει μετρικές που έχουν προταθεί για το πρωτόκολλο δρομολόγησης που ορίζεται από το IEEE 802.11s Πρότυπο.
- **Κεφάλαιο 4:** Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η προτεινόμενη μετρική δρομολόγησης και παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις. Τέλος, γίνεται μία επισκόπηση του προσομοιωτή δικτύων που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της ενεργειακής μετρικής και την αξιολόγηση της απόδοσής της έναντι της προεπιλεγμένης από το IEEE 802.11s Πρότυπο μετρικής (airtime link metric).
- **Κεφάλαιο 5:** Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος υλοποίησης της ενεργειακής μετρικής, το σενάριο των προσομοιώσεων και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έλαβαν μέρος.
- **Κεφάλαιο 6:** Περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μετά την περάτωση της παρούσας πτυχιακής και τέλος, τα ανοικτά ζητήματα που αφορούν στα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα.

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα (Wireless Mesh Networks - WMNs)

Τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα έχουν ραγδαία εξάπλωση κι αποτελούν μία πρακτική ασύρματη λύση για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης ευρυζωνικού διαδικτύου. Έχουν τη δυνατότητα να οργανώνονται, να αυτό - ρυθμίζονται και να αυτό - αποκαθίστανται διατηρώντας, έτσι, τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Επειδή παρέχουν χαμηλό κόστος ανάπτυξης, ευκολία συντήρησης του δικτύου, αντοχή κι αξιόπιστη υποστήριξη των υπηρεσιών, βρίσκουν εφαρμογή στην οικιακή ευρυζωνική δικτύωση, την κοινοτική δικτύωση, τον αυτοματισμό των κτιρίων, στα μητροπολιτικά δίκτυα υψηλών ταχυτήτων και την επιχειρησιακή δικτύωση. Ένα ασύρματο πλεγματικό δίκτυο αποτελείται από δύο τύπους κόμβων:

- 1) Πλεγματικούς Δρομολογητές (Mesh Routers): μπορεί να είναι είτε πλεγματικά σημεία (Mesh Points – MP), είτε πλεγματικά σημεία πρόσβασης (Mesh Access Points – MAP), είτε πλεγματικές πύλες (Mesh Portal – MPP). Οι πλεγματικοί δρομολογητές είναι υπεύθυνοι για την προώθηση των πακέτων και συνήθως έχουν παραπάνω από μία διεπαφές. Όταν υπάρχουν πολλαπλοί δρομολογητές σε ένα ασύρματο πλεγματικό δίκτυο, τότε μεγαλώνει η περιοχή κάλυψής του με μικρότερη ισχύ εκπομπής στους δρομολογητές. Οι δρομολογητές συνήθως έχουν σύνθετο υλικό και λογισμικό, ελάχιστη κινητικότητα κι ενώνονται μεταξύ τους για να παρέχουν τις υπηρεσίες τους στους πλεγματικούς πελάτες.
- 2) Πλεγματικούς Πελάτες (Mesh Clients): Συνδέονται ασύρματα με τους πλεγματικούς δρομολογητές είτε μέσω ραδιοσυχνοτήτων που είναι κοινές και για τους δύο, είτε μέσω σταθμών βάσεως. Οι πλεγματικοί πελάτες έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα κι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν ως δρομολογητές αλλά διαθέτουν πιο απλό υλικό και λογισμικό σε σχέση με τους δρομολογητές.

Τα χαρακτηριστικά των ασυρμάτων πλεγματικών δικτύων συνοψίζονται ως ακολούθως [1],[2]:

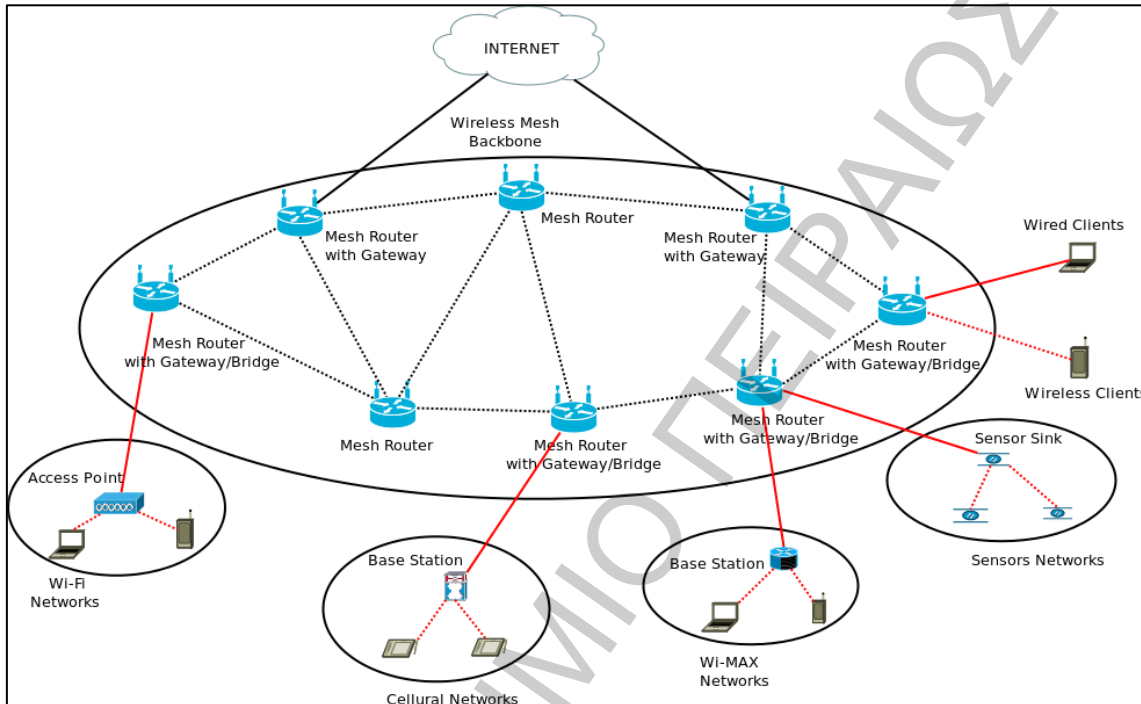
- 1) Υποστηρίζουν την αδόμητη δικτύωση κι έχουν τη δυνατότητα να οργανώνονται και να επιλύουν τα προβλήματα μόνα τους.
- 2) Είναι ασύρματα δίκτυα πολλαπλών βημάτων με μία υποδομή από πλεγματικούς δρομολογητές.
- 3) Οι πλεγματικοί δρομολογητές έχουν περιορισμένη κινητικότητα κι εκτελούν τη δρομολόγηση μειώνοντας έτσι το φορτίο των πλεγματικών πελατών.
- 4) Η κινητικότητα των τερματικών κόμβων υποστηρίζεται εύκολα μέσω της ασύρματης υποδομής.
- 5) Οι πλεγματικοί δρομολογητές παρέχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης με άλλα δίκτυα (ασύρματα ή ενσύρματα).
- 6) Οι πλεγματικοί δρομολογητές έχουν διαφορετικούς περιορισμούς κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τους πελάτες.
- 7) Οι πλεγματικοί δρομολογητές είναι εξοπλισμένοι με πολλαπλές ραδιοσυχνότητες για την εκτέλεση της δρομολόγησης και λειτουργίες πρόσβασης.
- 8) Δεν είναι αυτόνομα δίκτυα και πρέπει να είναι συμβατά και διαλειτουργικά με άλλα ασύρματα δίκτυα.

1.2 Αρχιτεκτονική των Ασυρμάτων Πλεγματικών Δικτύων

1.2.1 Infrastructure/Backbone based WMNs

Στην Infrastructure/Backbone based αρχιτεκτονική, οι πλεγματικοί δρομολογητές συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα δίκτυο κορμού (backbone) για τους πελάτες το οποίο μπορεί να συνδεθεί με τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα μέσω κάποιων πλεγματικών δρομολογητών που

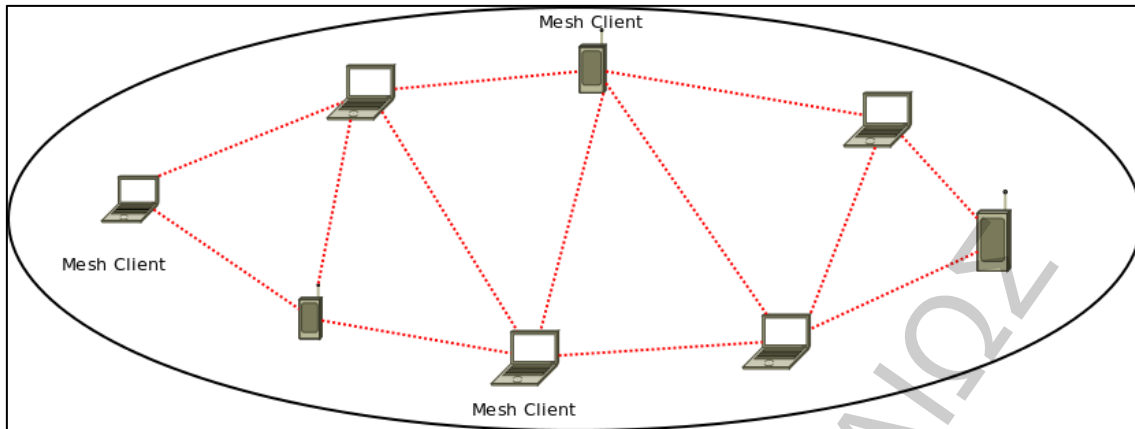
παρέχουν επίσης υπηρεσίες μία πύλης (gateway) (Εικόνα 1). Με την ύπαρξη μίας πλεγματικής πύλης στο WMN, οι δρομολογητές μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να κατασκευαστεί με τη χρήση διαφόρων τύπων ασυρμάτων τεχνολογιών. Όταν ένας πελάτης είναι συνδεδεμένος με ένα πλεγματικό δρομολογητή και χρησιμοποιεί την ίδια ασύρματη τεχνολογία με αυτόν, τότε μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους. Ενώ, όταν χρησιμοποιούν διαφορετική τεχνολογία πρέπει ο πελάτης να επικοινωνήσει πρώτα με το σταθμό βάσης του. Η αρχιτεκτονική αυτή βρίσκει εφαρμογή στις πανεπιστημιοπόλεις, σε κοινοτικό και δημόσιο επίπεδο, σε γραφεία, σε βιομηχανίες και σε Smart Grid συστήματα.



Εικόνα 1: Infrastructure/Backbone based Αρχιτεκτονική

1.2.2 Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα Πελάτη (Client WMNs)

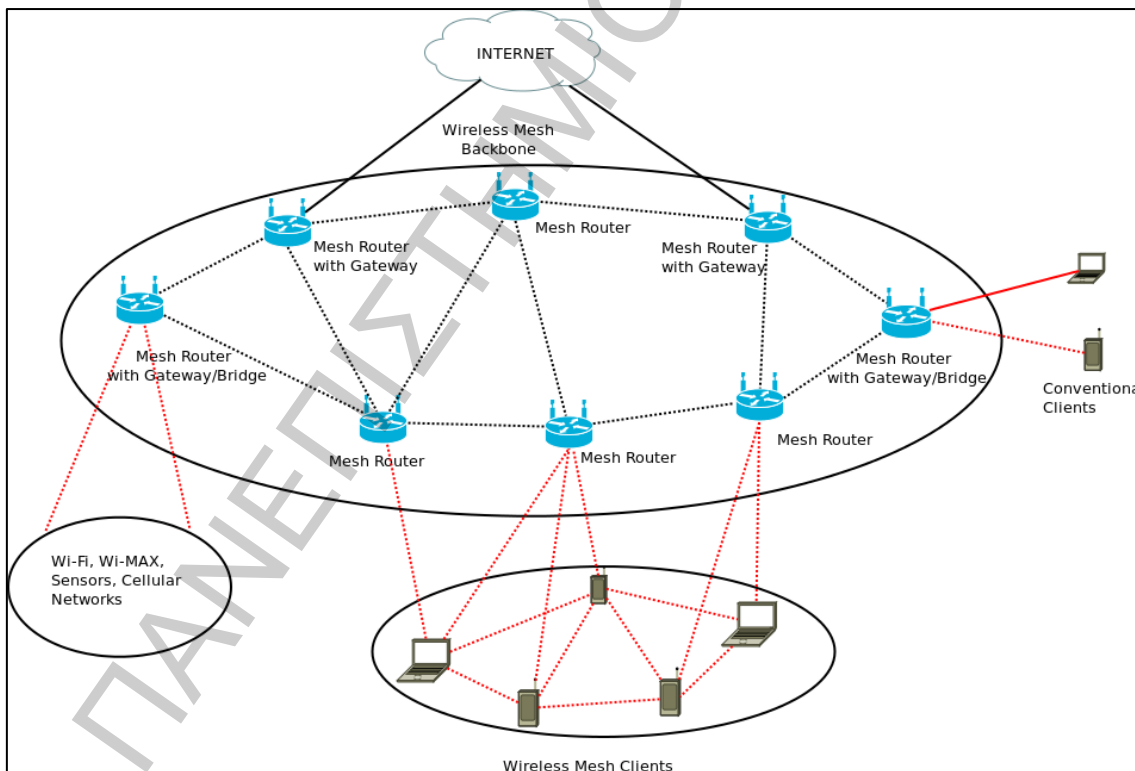
Στην αρχιτεκτονική Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα Πελάτη δεν απαιτείται η ύπαρξη πλεγματικών δρομολογητών. Οι πλεγματικοί πελάτες σχηματίζουν συνδέσμους μεταξύ τους, αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση των δεδομένων και παρέχουν τελικού χρήστη εφαρμογές στους πελάτες (Εικόνα 2). Δηλαδή, όταν ένα πακέτο θέλει να φτάσει στον προορισμό του περνάει μέσω πολλαπλών κόμβων [2]. Συνήθως, οι πλεγματικοί πελάτες είναι εξοπλισμένοι με ένα τύπο ραδιοσυχνότητας. Το πλεονέκτημα των πλεγματικών δικτύων πελάτη είναι ότι οι τελικοί χρήστες αναλαμβάνουν παραπάνω λειτουργίες, όπως η δρομολόγηση κι η αυτό – διαμόρφωση. Η αρχιτεκτονική πελάτη βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε οικιακά δίκτυα, στην επείγουσα και δημόσια ασφάλεια (για παράδειγμα ασθενοφόρα), σε βιομηχανίες και σε Smart Grid συστήματα.



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική Πελάτη

1.2.3 Υβριδικά Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα (Hybrid WMNs)

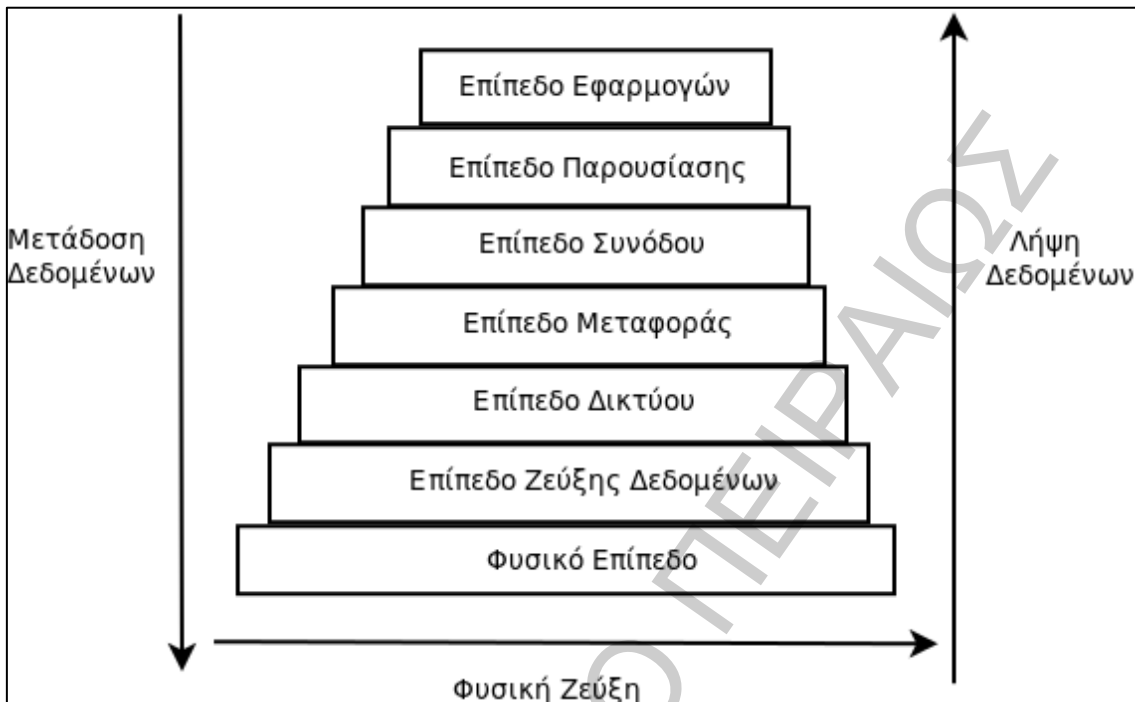
Τα υβριδικά WMNs αποτελούν ένα συνδυασμό των Infrastructure/Backbone based και των Ασύρματων Πλεγματικών Δικτύων Πελάτη αρχιτεκτονικών. Δηλαδή, οι πλεγματικοί πελάτες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους είτε δημιουργώντας απευθείας συνδέσμους είτε μέσω των πλεγματικών δρομολογητών (Εικόνα 3). Με το συνδυασμό των παραπάνω αρχιτεκτονικών επιτυγχάνεται βελτιωμένη συνδεσιμότητα και κάλυψη [2]. Η αρχιτεκτονική των Υβριδικών Ασύρματων Πλεγματικών Δικτύων εφαρμόζεται, κυρίως, σε οικιακά και εταιρικά δίκτυα και στην επείγουσα και δημόσια ασφάλεια.



Εικόνα 3: Υβριδική Αρχιτεκτονική

1.3 Προσέγγιση ανά επίπεδο

Η προσέγγιση ανά επίπεδο θα γίνει βάσει του OSI μοντέλου αναφοράς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Μοντέλο Αναφοράς OSI

1) Φυσικό Επίπεδο: Τα ασύρματα πλεγμιακά δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν πολλαπλή μετάδοση με μεθόδους κωδικοποίησης δεδομένων όπως το Orthogonal Frequency Multiple access (OFDM) [3] διαμόρφωση πολλαπλών φορέων. Για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και τη μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής έχουν αναπτυχθεί συστήματα πολλαπλών κεραιών, όπως η έξυπνη κεραία και τα MIMO συστήματα.

2) MAC Επίπεδο: Οι λειτουργίες του επιπέδου MAC στα WMNs είναι οι παρακάτω:

- Ασχολείται με επικοινωνία πολλαπλών βημάτων,
- Υποστηρίζει multipoint-to-multipoint επικοινωνία,
- Παρέχει αυτόνομη οργάνωση του δικτύου για την επίτευξη της συνεργασίας μεταξύ γειτονικών κόμβων και κόμβων σε αποστάσεις πολλαπλών βημάτων,

Στο επίπεδο MAC μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις που ένα πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για συστήματα με ένα μόνο κανάλι και για συστήματα πολλαπλών καναλιών.

MAC μονού καναλιού: Μία λύση αποτελεί η βελτίωση του CSMA/CA [4] πρωτοκόλλου ρυθμίζοντας είτε το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού είτε των διαδικασιών υποχώρησης (backoff). Το CSMA/CA πρωτόκολλο περιγράφει τους μηχανισμούς πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο. Σύμφωνα με αυτό το πρωτόκολλο, ένας σταθμός μπορεί να ξεκινήσει τη μετάδοση δεδομένων μόνο όταν το κανάλι είναι ελεύθερο για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων που στέλνονται από διαφορετικούς σταθμούς. Όμως, με τον παραπάνω τρόπο δε μειώνονται οι πιθανότητες για ανταγωνισμό του μέσου από τους γειτονικούς κόμβους. Τέλος, η χρήση του CSMA/CA πρωτοκόλλου έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη μικρής απ' άκρη σε άκρη (end – to – end) ρυθμαπόδοσης. Μία δεύτερη λύση αποτελεί η χρήση Cross-Layer Design σχεδιασμού. Πιο

συγκεκριμένα, η εφαρμογή ενός πρωτοκόλλου MAC που λαμβάνει υπόψη του τις κατευθυντικές κεραίες. Η λύση αυτή, περιορίζει τους εκτιθέμενους κόμβους αλλά αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης του προβλήματος των κρυμμένων τερματικών. Τέλος, η χρήση MAC με έλεγχο ισχύος περιορίζει το πρόβλημα των εκτιθέμενων κόμβων και βελτιώνει τον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης του χωρικού φάσματος, όμως, με τη μείωση της ισχύς εκπομπής, είναι πιο δύσκολο να εντοπιστεί ένας παρεμβάλλοντας κόμβος, δηλαδή εξακολουθεί να υπάρχει το πρόβλημα των κρυμμένων τερματικών. Λόγω της έλλειψης ενός αποδοτικού MAC πρωτοκόλλου για τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα, το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει στραφεί προς αυτή την κατεύθυνση κι έχουν προταθεί πολλές λύσεις, χωρίς όμως να έχει προταθεί ένας βέλτιστος μηχανισμός πρόσβασης.

MAC πολλαπλών καναλιών: Η χρήση πολλαπλών καναλιών σε ένα κόμβο αυξάνει τη χωρητικότητα και την απόδοση του δικτύου. Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές για χρήση πολλαπλών καναλιών. Μία από αυτές είναι η χρήση πολλαπλών καναλιών σε ένα μόνο πομποδέκτη. Η λύση αυτή είναι χαμηλού κόστους αφού υπάρχει ένας μόνο πομποδέκτης, κι άρα, ένα μόνο κανάλι είναι ενεργό κάθε φορά. Επειδή, οι κόμβοι ενός ασύρματου πλεγματικού δικτύου μπορεί να λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια, πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός συντονισμού των μεταδόσεων. Στην περίπτωση που οι κόμβοι του δικτύου είναι εξοπλισμένοι με πολλαπλούς πομποδέκτες και λειτουργούν σε πολλαπλά κανάλια, τότε χρειάζεται ένας μηχανισμός επιπέδου MAC για το συντονισμό των λειτουργιών των πολλαπλών καναλιών. Ένας τέτοιος μηχανισμός αποτελεί αντικείμενο μελέτης. Τελευταία περίπτωση αυτής της κατηγορίας αποτελεί η χρήση πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων. Όταν ένας κόμβος διαθέτει πολλαπλές ραδιοσυχνότητες, τότε η επικοινωνία σε αυτές είναι τελειώς ανεξάρτητες.

3) Επίπεδο Δρομολόγησης: Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα [1],[2]:

- Πολλαπλές μετρικές απόδοσης,
- Επεκτασιμότητα, για λόγους ευκολίας στη δημιουργία και τη συντήρηση μονοπατιών δρομολόγησης.
- Ανθεκτικότητα, για την αποφυγή διακοπής της υπηρεσίας πρέπει το δίκτυο να είναι ανθεκτικό σε διακοπές των συνδέσμων και στη συμφόρηση.
- Αποτελεσματική δρομολόγηση με υποδομή πλέγματος.
- Προηγμένη τεχνολογία υλικού.
- Βελτιστοποίηση συνδέσμων και μονοπατιών.
- Ενσωμάτωση της δρομολόγησης με τη διαχείριση της κινητικότητας.

Ένας σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματική δρομολόγηση των δεδομένων στα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα είναι η επιλογή της μετρικής που χρησιμοποιείται από αυτά. Για παράδειγμα, το Link Quality Source Routing (LQSR) πρωτόκολλο επιλέγει το μονοπάτι δρομολόγησης βάσει μετρικών ποιότητας συνδέσμων και συγκεκριμένα των Expected Transmission Count (ETX), per-hop RTT και per-hop packet pair. Μία άλλη μετρική που αναπτύχθηκε για χρήση στο πρωτόκολλο multi-radio LQSR (MR-LQSR) είναι η Weighted Cumulative Expected Transmission Time (WCETT). Η WCETT μετρική λαμβάνει υπόψη της την ποιότητα των συνδέσμων και τον αριθμό των βημάτων επιτυγχάνοντας καλές τιμές καθυστέρησης και ρυθμαπόδοσης. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα δρομολόγησης πολλαπλών μονοπατιών ώστε να γίνεται εξισορρόπηση φορτίου κι επιλογή εναλλακτικών μονοπατιών σε περίπτωση διακοπής κάποιου συνδέσμου. Έτσι, λόγω της άμεσης δρομολόγησης των πακέτων από υπάρχουσες εναλλακτικές διαδρομές, βελτιώνεται η καθυστέρηση, η ρυθμαπόδοση κι η ανοχή σε λάθη. Το μειονέκτημα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολλαπλών μονοπατιών είναι η πολυπλοκότητά τους. Έχουν αναπτυχθεί πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται σε ιεραρχική δομή. Οι κόμβοι του πλεγματικού δικτύου χωρίζονται σε ομάδες και κάθε μία από αυτές έχει ένα κόμβο επικεφαλής. Μέσα στην ομάδα υπάρχουν, επίσης, κόμβοι που επικοινωνούν με άλλες ομάδες για τη διασφάλιση της επικοινωνίας μεταξύ τους. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι αποδοτικά όταν ο αριθμός των πλεγματικών κόμβων ενός δικτύου είναι μεγάλος λόγω της μικρότερης επιβάρυνσης και του

μικρότερου κατά μέσο όρο μονοπατιού δρομολόγησης. Το μειονέκτημα των ιεραρχικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι, επίσης, η πολυπλοκότητά τους. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι παλαιότερα είχαν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που βασίζονταν στην τοπολογία του δικτύου κι ονομάζονταν γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί προωθούσαν τα πακέτα βάσει των πληροφοριών που είχαν για τις θέσεις των κόμβων του δικτύου.

4) Επίπεδο Μεταφοράς: Δεν έχουν αναπτυχθεί, έως τώρα, πρωτόκολλα δρομολόγησης που να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα. Τα WMNs δανείζονται πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς από άλλους τύπους δικτύων, όπως τα ad hoc. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά πρωτόκολλα μεταφοράς. Πρώτο παράδειγμα αποτελούν τα αξιόπιστα πρωτόκολλα μεταφοράς που χωρίζονται σε πρωτόκολλα που βασίζονται στο TCP και σε αυτά που δεν έχουν καμία σχέση με αυτό κι είναι εξ' ολοκλήρου νέα. Τα πρωτόκολλα μεταφοράς που αποτελούν παραλλαγές του TCP έχουν ως στόχο να αντιμετωπίσουν τα παρακάτω προβλήματα:

➤ Απώλειες πακέτων που δεν οφείλονται σε συμφόρηση: το TCP δεν κάνει διαχωρισμό μεταξύ των πακέτων που χάνονται από συμφόρηση κι αυτά που χάνονται για άλλους λόγους. Έτσι, πέφτει η ρυθμαπόδοση του δικτύου λόγω του ότι το δίκτυο τίθεται σε μία κατάσταση αποφυγής της συμφόρησης, που μπορεί να μη συνέβη ποτέ.

➤ Άγνωστη αποτυχία των συνδέσμων: πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός εντοπισμού των αποτυχιών των συνδέσμων.

➤ Ασυμμετρία του δικτύου: όταν το εύρος ζώνης, ο ρυθμός απώλειας κι η καθυστέρηση στην προς τα εμπρός κατεύθυνση είναι διαφορετικά σε σχέση με την αντίστροφη κατεύθυνση.

➤ Μεγάλες διακυμάνσεις στο Round Trip Time (RTT): οι διακυμάνσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στην κινητικότητα, την ύπαρξη διαφορετικής ποιότητας συνδέσμων και το κυμαινόμενο φορτίο κίνησης και υποβαθμίζουν την απόδοση του πρωτοκόλλου TCP.

Έχουν αναπτυχθεί πολλά νέα πρωτόκολλα μεταφοράς για ad hoc δίκτυα (ad hoc transport protocol - ATP), όμως δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο για τα WMNs. Είναι πολλή δύσκολη η ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων μεταφοράς για τα WMNs λόγω του γεγονότος ότι ενσωματώνονται με άλλα ενσύρματα κι ασύρματα δίκτυα που πρέπει να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ τους για να είναι αποτελεσματική η επικοινωνία τους.

Τα WMNs υποστηρίζουν πολλές εφαρμογές που απαιτούν τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για τον παραπάνω λόγο πρέπει να αναπτυχθεί ένα Rate Control Protocol (RCP) που να συνεργάζεται με το UDP.

5) Επίπεδο Εφαρμογών: Οι κατηγορίες των εφαρμογών που υποστηρίζουν τα WMNs αναφέρονται παρακάτω.

➤ Πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

➤ Κατανεμημένη αποθήκευση και κοινή χρήση πληροφοριών.

➤ Ανταλλαγή πληροφοριών σε πολλαπλά ασύρματα δίκτυα.

Στο επίπεδο αυτό είναι πολύ σημαντικό να βελτιωθούν τα υπάρχοντα πρωτόκολλα, να αναπτυχθούν καινούρια και να αναπτυχθούν καινοτόμες εφαρμογές για τα WMNs, που μπορούν να επιτύχουν βέλτιστη απόδοση και να παρέχουν πολλά οφέλη στους τελικούς χρήστες.

Κεφάλαιο 2

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την αναλυτική επισκόπηση του IEEE 802.11s Προτύπου, όπως η αρχιτεκτονική που ορίζει, το πρωτόκολλο δρομολόγησης και τους μηχανισμούς λειτουργίας του, το συγχρονισμό και πολλά άλλα. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία παρουσίαση διαφόρων εργασιών που έχουν γίνει πάνω στα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα και των εφαρμογών τους.

2.1 Εισαγωγή στο IEEE 802.11s Πρότυπο

Το IEEE 802.11s [5] είναι μία επέκταση του IEEE 802.11 για ασύρματα πλεγματικά δίκτυα (Wireless Mesh Networks – WMNs). Η IEEE ξεκίνησε ένα Study Group το Σεπτέμβριο του 2003 και τον Ιούλιο του 2004 μετονομάστηκε σε Task Group. Τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν γρήγορη κι οικονομική ανάπτυξη. Επίσης, είναι ικανά να παραμετροποιούνται και να οργανώνονται μόνα τους χωρίς την ανάγκη για ύπαρξη μίας κεντρικής διαχειριστικής οντότητας. Γενικά, τα IEEE 802.11s WMNs είναι ανθεκτικά σε αποτυχία ενός σημείου αφού το δίκτυο εξακολουθεί να είναι λειτουργικό και μετά το κλείσιμο ενός συνδέσμου ή την αποτυχία ενός κόμβου. Δεν υπάρχει καμία μορφή ιεραρχίας και το ασύρματο πλεγματικό δίκτυο μπορεί να επεκταθεί και να τροποποιηθεί με ελάχιστη επιβάρυνση. Τα IEEE 802.11s WMNs υποστηρίζουν την αδόμητη δικτύωση και δεν περιορίζονται από καθυστερήσεις επαναδιαμόρφωσης λόγω της έλλειψης μίας κεντρικής μονάδας διαχείρισης. Ένα IEEE 802.11s WMN αποτελεί ένα ενιαίο τομέα μετάδοσης και υποστηρίζει πρωτόκολλα spanning tree για να εξασφαλίσει την αποφυγή δημιουργίας βρόχων. Τέλος, με τη χρήση των WMNs επιτυγχάνεται αύξηση της περιοχής κάλυψης με μικρό κόστος αφού γίνεται αναμετάδοση δεδομένων μέσω πολλαπλών βημάτων, μέχρι τα δεδομένα να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Τα IEEE 802.11s WMNs χρησιμοποιούνται ευρέως για ευρυζωνική οικιακή δικτύωση, κοινοτική δικτύωση, επιχειρησιακή δικτύωση, αυτοματισμό κτιρίων, μητροπολιτικά δίκτυα υψηλών ταχυτήτων και πολλά άλλα.

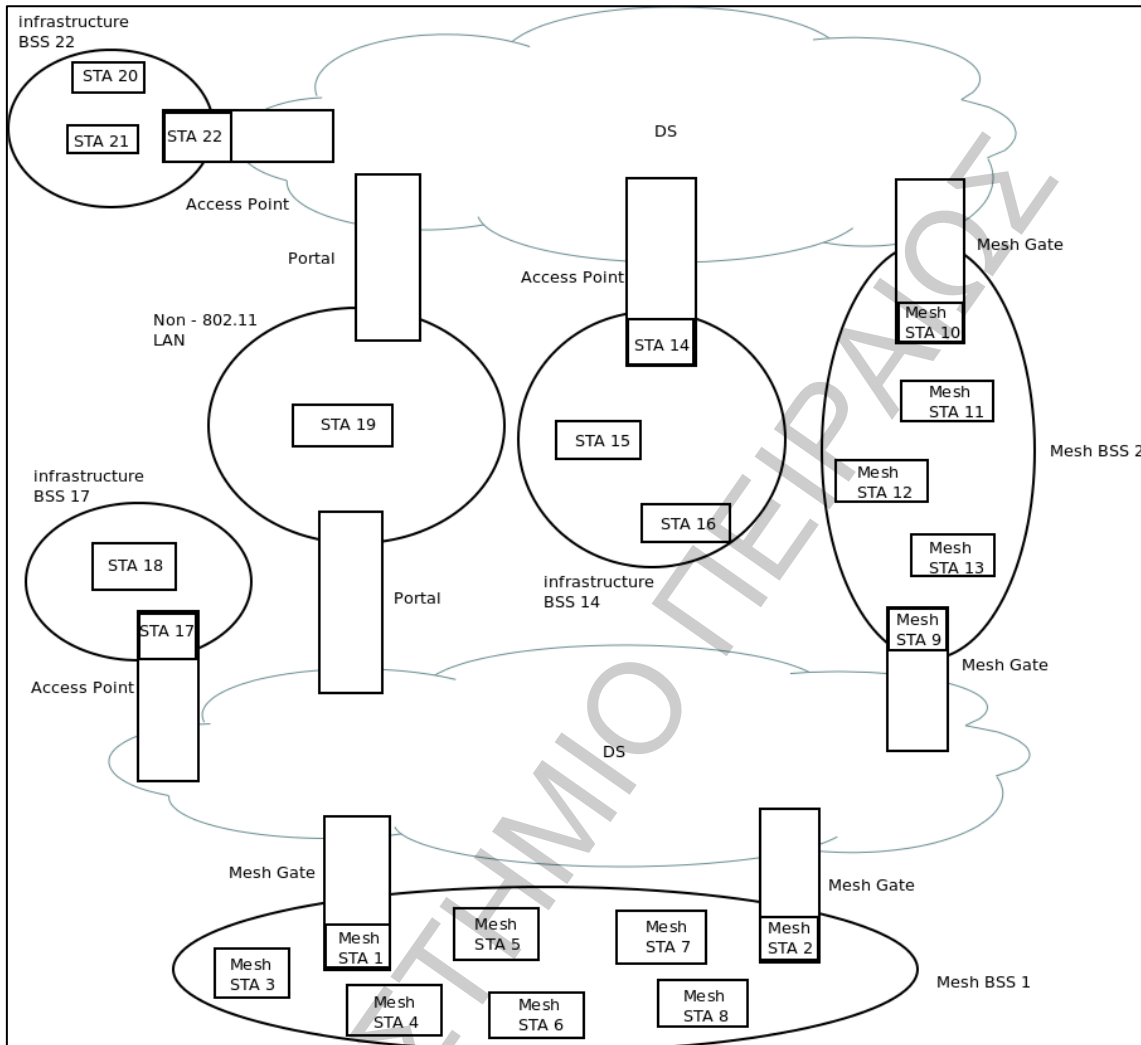
2.1.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Πλεγματικού Δικτύου IEEE 802.11s

Ένα Mesh Basic Service Set (MBSS) [5] αποτελείται από πλεγματικούς σταθμούς (mesh STAs). Ένα MBSS αποτελεί ένα τύπο QoS BSS. Μέσα σε ένα MBSS, οι πλεγματικοί σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους δημιουργώντας συνδέσμους. Σταθμοί που δεν είναι άμεσα συνδεδεμένοι μεταξύ τους, μπορούν να επικοινωνούν μέσω άλλων σταθμών. Οι πλεγματικοί σταθμοί δεν μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα με μη πλεγματικούς σταθμούς. Για αυτό το λόγο υπάρχει το Distribution System (DS), στο οποίο έχει πρόσβαση ένα MBSS προκειμένου να επικοινωνήσει με ένα άλλο BSS. Οι ρόλοι που μπορεί να έχει ένας πλεγματικός σταθμός συνοψίζονται ως εξής:

- 1) **mesh STA:** συμμετέχει μόνο στην προώθηση δεδομένων μέσα στο MBSS,
- 2) **mesh Access Point (MAP):** ένας πλεγματικός σταθμός με λειτουργίες Σημείου Πρόσβασης (Access Point),
- 3) **mesh gate:** ένας πλεγματικός σταθμός που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του MBSS με το DS και κατ' επέκταση με άλλα δίκτυα IEEE 802.11 based,
- 4) **mesh portal:** οντότητα στο DS που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του MBSS με μη IEEE 802.11 based δίκτυα, είναι επίσης, το σημείο όπου τα MSDUs εισέρχονται κι εξέρχονται στο / από το MBSS.

Σε ένα ασύρματο πλεγματικό δίκτυο μπορεί να ανήκουν πλεγματικοί σταθμοί που δεν έχουν τη δυνατότητα προώθησης των δεδομένων. Δηλαδή, μπορεί να είναι είτε κόμβος – πηγή πλαισίων είτε κόμβος – προορισμός πλαισίων και δεν προωθεί πλαίσια σε άλλους πλεγματικούς σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί δε συμμετέχουν στη διαδικασία διάδοσης HWMP μηνυμάτων ελέγχου.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός IEEE 802.11s WMN.



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική IEEE 802.11s WMN

2.1.2 Διαδικασία ανακάλυψης MBSS

Για να συσχετιστεί ένας σταθμός με ένα πλεγματοκό δίκτυο πρέπει πρώτα να ανακαλύψει το δίκτυο κι έπειτα, αν ταιριάζουν κάποια στοιχεία του σταθμού με το πλεγματοκό δίκτυο που σκοπεύει να συσχετιστεί, ο σταθμός γίνεται μέλος του πλεγματοκού δικτύου. Η διαδικασία της ανακάλυψης μπορεί να γίνει είτε με ενεργή σάρωση (μετάδοση πλαισίων probe), είτε με παθητική σάρωση (παρατήρηση πλαισίων beacon). Κάθε MBSS έχει το δικό του πλεγματοκό προφίλ, δηλαδή παραμέτρους που το χαρακτηρίζουν μοναδικά και χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της ανακάλυψης.

Οι παράμετροι αυτοί περιλαμβάνουν έξι αναγνωριστικά που πρέπει να υιοθετήσει ο σταθμός για να γίνει η διαδικασία του peering:

- 1) του πλέγματος (mesh ID),
- 2) του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται για επιλογή του μονοπατιού,
- 3) της μετρικής που χρησιμοποιείται,
- 4) της λειτουργίας ελέγχου συμφόρησης,

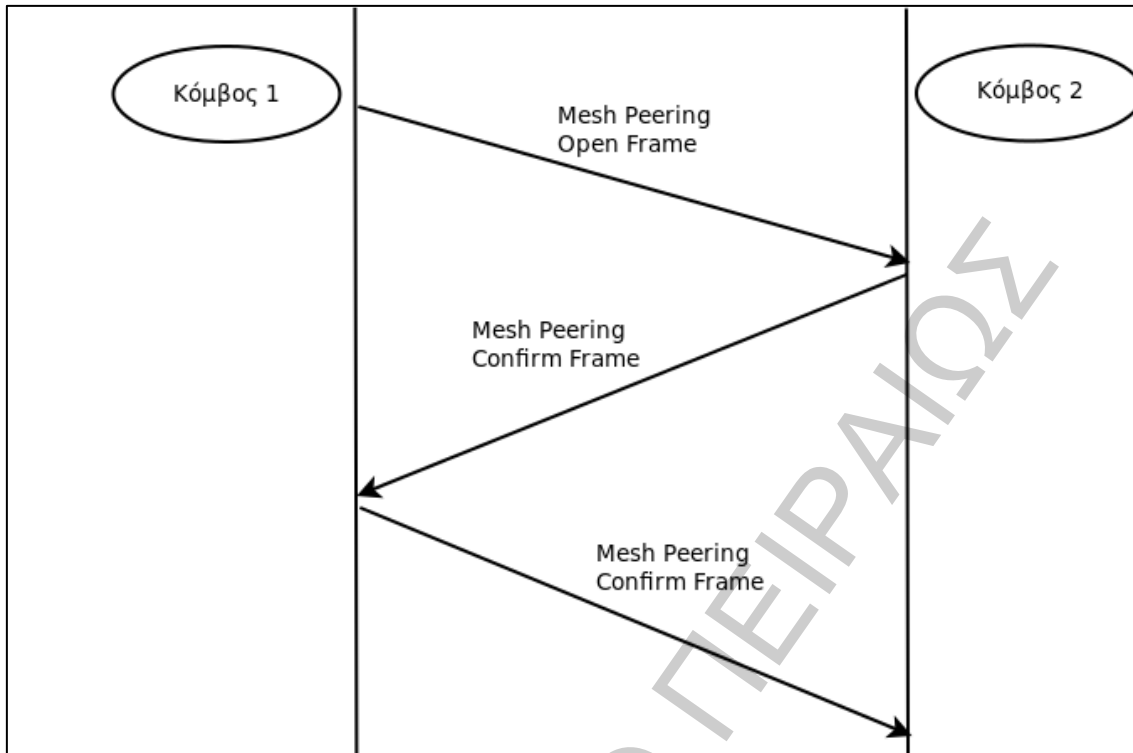
- 5) της μεθόδου συγχρονισμού και
- 6) του πρωτοκόλλου αυθεντικοποίησης.

2.1.3 Mesh peering management πρωτόκολλο (MPM)

Το peering μεταξύ των πλεγματικών κόμβων αποτελεί ένα καταναμημένο, μη ιεραρχικό και μη αποκλειστικό τρόπο επικοινωνίας. Κάθε πλεγματικός σταθμός διαχειρίζεται τα peerings του με κάθε άλλο πλεγματικό σταθμό. Κάθε κόμβος ελέγχει αν ο πλεγματικός κόμβος που πρόκειται να συσχετιστεί πληροί κάποια κριτήρια. Ένας πλεγματικός κόμβος δημιουργεί ένα αίτημα για τη δημιουργία του peering δηλώνοντας κάποια κριτήρια. Ο σταθμός για τον οποίο προορίζεται αυτό το αίτημα μπορεί είτε να το επιβεβαιώσει ή να το απορρίψει. Στην περίπτωση που επιβεβαιώσει το αίτημα, τότε ο σταθμός που ξεκίνησε τη διαδικασία επιβεβαιώνει με τη σειρά του ώστε να δημιουργηθεί το peering. Μόνο όταν κι οι δύο εμπλεκόμενοι πλεγματικοί σταθμοί επιβεβαιώσουν το αίτημα μπορεί να δημιουργηθεί το peering. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η διαδικασία εγκατάστασης ενός peering.

Οι πλεγματικοί σταθμοί μπορούν να ξεκινήσουν ταυτόχρονα τη διαδικασία εγκατάστασης ενός peering στέλνοντας ένα αίτημα ο ένας στον άλλο την ίδια χρονική στιγμή. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε πλεγματικός σταθμός που λαμβάνει το αίτημα μπορεί να στείλει επιβεβαίωση.

Το Mesh Peering Management Protocol (MPM) [5] είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, τη συντήρηση και την καταστροφή των peerings μεταξύ δύο πλεγματικών σταθμών. Μετά τη διαδικασία της ανακάλυψης, που περιγράφηκε παραπάνω, ο νέος πλεγματικός σταθμός μπορεί να αναπτύξει peerings με άλλους σταθμούς που ανήκουν στο ίδιο πλεγματικό δίκτυο με αυτόν. Για να γίνει αυτό στέλνει ένα Mesh Peering Open frame στον σταθμό που επιθυμεί, ο οποίος απαντάει με ένα Mesh Peering Confirm frame αν συμφωνεί να συνάψει peering με αυτό το σταθμό. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία peering ολοκληρώνεται επιτυχώς. Όταν κάποιος πλεγματικός σταθμός επιθυμεί τη διακοπή των peerings με ένα άλλο σταθμό, τότε του στέλνει ένα Mesh Peering Close frame (Εικόνα 5).



Εικόνα 6: Διαδικασία Εγκατάστασης ενός peering

2.2 Medium Access Control (MAC) Αρχιτεκτονική

Η Mesh coordination function (MCF) [5] χρησιμοποιείται από τους πλεγματούς σταθμούς για την πρόσβασή τους στο μέσο και περιλαμβάνει δύο μηχανισμούς πρόσβασης. Ο πρώτος είναι Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), όπου οι πλεγματούς σταθμοί ανταγωνίζονται για να κερδίσουν πρόσβαση στο μέσο, ενώ ο δεύτερος μηχανισμός είναι MCF Controlled Channel Access (MCCA) [3], όπου δεν υπάρχει ανταγωνισμός για την πρόσβαση στο μέσο.

Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός EDCA ορίζει κατηγορίες κίνησης (traffic categories) βάσει των οποίων ελέγχεται η πρόσβαση στο μέσο. Ένας πλεγματούς σταθμός με υψηλή προτεραιότητα κίνησης κερδίζει πιο γρήγορα πρόσβαση στο μέσο έναντι ενός άλλου με χαμηλή προτεραιότητα. Ο σταθμός που κερδίζει την πρόσβαση και πρόκειται να ξεκινήσει τη μετάδοση, έχει στην κατοχή του ένα EDCA Transmit Opportunity (TXOP), κατά τη διάρκεια του οποίου μπορεί να μεταδώσει όλα πλαίσια επιθυμεί χωρίς να υπάρχει ανταγωνισμός.

Στον MCCA μηχανισμό, ο σταθμός που πρόκειται να χρησιμοποιήσει το μέσο έχει στην κατοχή του ένα MCCAOP. Το MCCAOP είναι ένα χρονικό διάστημα για τη μετάδοση των πλαισίων, το οποίο έχει δεσμευτεί μέσω της διαδικασίας ανταλλαγής MCCA πλαισίων. Το MCCAOP έχει συγκεκριμένο χρόνο έναρξης και συγκεκριμένο μήκος, κατά τη διάρκεια του οποίου ο σταθμός που το κατέχει μπορεί να μεταδώσει όλα πλαίσια θέλει. Οι υπόλοιποι σταθμοί απέχουν από το μέσο. Οι πλεγματούς σταθμοί πρέπει να ξεκινήσουν τη διαδικασία κράτησης MCCAOP για να αποκτήσουν ένα MCCAOP και να μπορέσουν να μεταδώσουν. Πρόκειται δηλαδή για μία διαδικασία διαπραγμάτευσης ώστε να καθορισθεί ένα πρόγραμμα MCCAOP κρατήσεων βάσει των οποίων θα γίνεται η μετάδοση. Τέλος, οι MCCAOP κρατήσεις διαφημίζονται μέσω των γειτονικών πλεγματούς σταθμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το IEEE 802.11s πρότυπο δεν προβλέπει τη χρήση του MCCA μηχανισμού από όλους τους πλεγματούς σταθμούς του δικτύου.

Το MCCA Access Fraction (MAF) [5] σε ένα πλεγματούς σταθμό είναι ο λόγος του χρόνου που έχει κρατηθεί για MCCAOPs στο χρονικό διάστημα του DTIM αυτού του πλεγματούς σταθμού προς τη διάρκεια του χρόνου DTIM. Ο λόγος αυτός ενσωματώνεται στα

πλαίσια που στέλλονται για να διαφημιστούν οι MCCAOP κρατήσεις και χρησιμοποιείται για να περιορίσει τη χρήση του MCCA μηχανισμού στη γειτονιά ενός πλεγματού σταθμού.

2.3 Mesh Path Selection

2.3.1 Γενικά

Η επιλογή του μονοπατιού που θα ακολουθήσουν τα πλαίσια από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη είναι μία κρίσιμη διαδικασία κι επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Πρόκειται, ουσιαστικά, για τους ενδιαμέσους πλεγματούς κόμβους, τους οποίους περνάει ένα πλαίσιο στο δρόμο του για τον προορισμό του. Συνήθως, οι ενδιαμέσοι πλεγματούς κόμβοι είναι παραπάνω από ένας. Τα μονοπάτια δρομολόγησης αποθηκεύονται στις πληροφορίες προώθησης. Έχουν αναπτυχθεί πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης και πολλές μετρικές που χρησιμοποιούνται από αυτά. Το IEEE 802.11s Standard αναφέρει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μόνο πρωτόκολλο δρομολόγησης και μία μετρική από ένα πλεγματού κόμβο. Το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο για τη δρομολόγηση των πλαισίων είναι το Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) και η προεπιλεγμένη μετρική το Airtime Link Metric [5].

2.3.2 Airtime Link Metric

Δείχνει το σύνολο των πόρων του καναλιού που καταναλώνεται από τη μετάδοση ενός πλαισίου σε ένα συγκεκριμένο σύνδεσμο κι υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$c_a = \left[0 + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_f} \quad (1)$$

Όπου,

O είναι η επιβάρυνση (overhead) στο κανάλι πρόσβασης κι είναι σταθερός αριθμός,

B_t είναι το μέγεθος σε bits ενός test πλαισίου και συνήθως παίρνει την τιμή 8192,

r είναι ο ρυθμός δεδομένων που θα μετέδιδε ένας πλεγματούς σταθμός ένα πλαίσιο μεγέθους B_t ,

e_f είναι ο ρυθμός λάθους ενός πλαισίου, η πιθανότητα όταν ένα πλαίσιο μεγέθους B_t μεταδίδεται με ρυθμό δεδομένων r και διακόπτεται η μετάδοση λόγω λάθους μετάδοσης.

2.3.3 Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)

2.3.3.1 Γενικά

Το HWMP είναι το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης του IEEE 802.11s προτύπου. Το HWMP ορίζει τέσσερα διαφορετικά στοιχεία [5]:

- 1) Path Request (PREQ)
- 2) Path Reply (PREP)
- 3) Path Error (PERR)
- 4) Root Announcement (RANN)

Χρησιμοποιείται ένας αριθμός ακολουθίας για την αποφυγή δημιουργίας βρόχων και τη διασφάλιση της έγκυρης και επικαιροποιημένης πληροφορίας επιλογής μονοπατιού. Ο αριθμός αυτός διαφημίζεται μέσω των παραπάνω στοιχείων σε άλλους πλεγματούς σταθμούς του δικτύου.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι πολύ ευέλικτο κι έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας.

1) Κατόπιν αιτήματος λειτουργία (On – demand mode): οι πλεγματούς σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας peer - to - peer μονοπάτια και δεν είναι

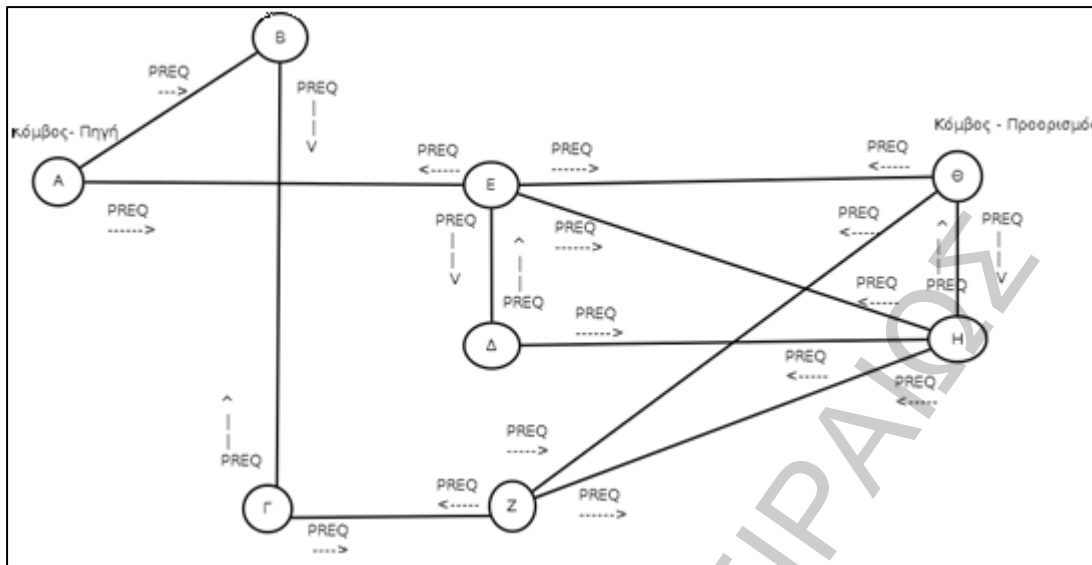
απαραίτητη η ύπαρξη ενός πλεγματού σταθμού με επιπλέον αρμοδιότητες για τον έλεγχο της δρομολόγησης (root mesh STA).

2) Proactive mode: ύπαρξη ενός root πλεγματού σταθμού, ο οποίος χρησιμοποιεί δύο μηχανισμούς για τη διαδικασία της επιλογής του μονοπατιού δρομολόγησης από τους άλλους πλεγματού σταθμούς του δικτύου. Οι δύο μηχανισμοί που παρέχονται όταν το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι σε Proactive mode, και θα περιγραφούν αναλυτικότερα παρακάτω, είναι οι ακόλουθοι:

- proactive PREQ:
- proactive RANN:

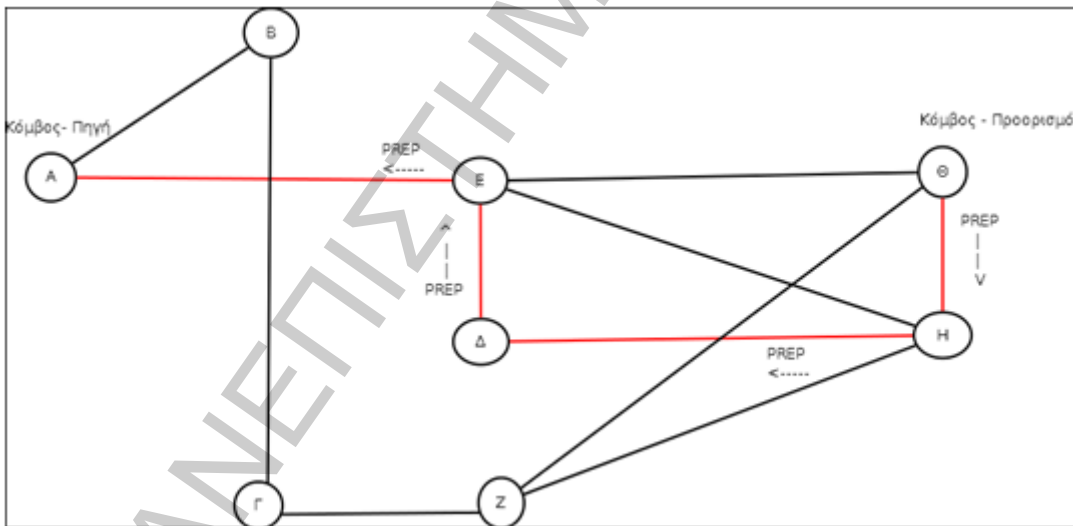
2.3.3.2 Κατόπιν Αιτήματος λειτουργία (On – demand mode)

Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, τα HWMP στοιχεία στέλνονται μετά από αίτημα ενός πλεγματού σταθμού [5]. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας πλεγματού σταθμός θέλει να μάθει ένα μονοπάτι για ένα συγκεκριμένο προορισμό, τότε στέλνει σε όλους τους γείτονές του ένα Path Request (PREQ) έχοντας ορίσει τα εξής: αρχική τιμή στον αριθμό ακολουθίας, τον πλεγματού σταθμό – προορισμό κι αρχική τιμή για τη μετρική. Όταν κάποιος πλεγματού σταθμός λάβει ένα Path Request (PREQ), ελέγχει πρώτα τον αριθμό ακολουθίας του στοιχείου PREQ. Αν είναι μεγαλύτερος ή αν είναι ίσος με το τρέχον μονοπάτι αλλά το ληφθέν PREQ έχει καλύτερη τιμή για τη μετρική από το τρέχον μονοπάτι, τότε ο πλεγματού σταθμός αναβαθμίζει τις πληροφορίες για το μονοπάτι προς τον πλεγματού σταθμό που έστειλε το PREQ και στέλνει το PREQ σε όλους τους γειτονικούς του σταθμούς. Σε αντίθετη περίπτωση απορρίπτει το στοιχείο. Το PREQ που στέλνει έχει νέα τιμή μετρικής ώστε να φαίνεται η αθροιστική τιμή της μετρικής για το μονοπάτι προς τον σταθμό που δημιούργησε το συγκεκριμένο στοιχείο. Όταν το PREQ φτάσει στον προορισμό του, ο πλεγματού σταθμός – προορισμός στέλνει πίσω στον σταθμό, που δημιούργησε το στοιχείο, ένα PREP κι ανανεώνει τις πληροφορίες που έχει για το μονοπάτι προς το συγκεκριμένο πλεγματού σταθμό βάσει των κριτηρίων που προαναφέρθηκαν. Οι ενδιαμέσοι σταθμοί που λαμβάνουν το PREP, το προωθούν σε άλλους πλεγματού σταθμούς μέχρι το στοιχείο να φτάσει στον πλεγματού σταθμό που έστειλε το PREQ, ο οποίος με τη λήψη του PREP, ανανεώνει τις πληροφορίες μονοπατιού που διαθέτει για τον πλεγματού σταθμό – προορισμό. Το PREQ διαθέτει ένα ακόμα πεδίο, το οποίο ονομάζεται Target Only (TO). Η λειτουργία του είναι η εξής: αν έχει την τιμή 1, τότε μόνο ο σταθμός – προορισμός μπορεί να στείλει PREP στον σταθμό – πηγή, αν έχει την τιμή 0, τότε ο ενδιαμέσος σταθμός που θα λάβει το PREQ έχει το δικαίωμα να στείλει στον σταθμό – πηγή ένα PREP αλλάζοντας όμως την τιμή του πεδίου σε 1 πριν διαφημίσει το PREQ στους γείτονές του. Με αυτό τον μηχανισμό επιτυγχάνεται γρήγορη εγκατάσταση ενός μονοπατιού επιτρέποντας την προώθηση MSDUs με μία μικρή καθυστέρηση επιλογής διαδρομής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού δρομολόγησης όταν το HWMP είναι στην κατόπιν αιτήματος λειτουργία. Όταν ο κόμβος – πηγή (A) θέλει να στείλει δεδομένα στον κόμβο – προορισμό (Θ) και δε γνωρίζει το μονοπάτι που πρέπει να ακολουθήσουν τα πακέτα, τότε στέλνει σε όλους τους γειτονικούς σταθμούς του ένα στοιχείο PREQ. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 7), ο κόμβος A στέλνει στους γειτονικούς του κόμβους, δηλαδή τους B και E, ένα στοιχείο PREQ. Όταν κάποιος ενδιαμέσος κόμβος λάβει ένα στοιχείο PREQ και δεν είναι ο κόμβος – προορισμός τότε προωθεί κι αυτός με τη σειρά του το στοιχείο PREQ σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους εκτός από αυτόν που το έλαβε. Άρα, όταν οι κόμβοι B και E του σχήματος λάβουν το στοιχείο PREQ, το προωθούν στους κόμβους Γ και Δ, Η και Θ αντίστοιχο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το στοιχείο να φτάσει στον κόμβο – προορισμό (Θ). Στην Εικόνα 7 ο κόμβος – προορισμός (Θ) λαμβάνει το στοιχείο PREQ στη δεύτερη επανάληψη από τον κόμβο E και στην τρίτη επανάληψη από τον κόμβο A. Ο κόμβος Θ λαμβάνει υπόψη του το στοιχείο PREQ με το μικρότερο αριθμό ακολουθίας.



Εικόνα 7: Διαδικασία Ανακάλυψης Μονοπατιού Δρομολόγησης

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η δημιουργία του μονοπατιού δρομολόγησης. Η δημιουργία του μονοπατιού δρομολόγησης γίνεται με την αντίστροφη διαδικασία. Δηλαδή, μετά τη λήψη του στοιχείου PREQ από τον κόμβο – προορισμό (Θ), ο Θ στέλνει ένα στοιχείο PREP πίσω στον κόμβο από τον οποίο έλαβε το στοιχείο PREQ. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το στοιχείο PREP να φτάσει στον προορισμό του που είναι ο κόμβος – πηγή (Α). Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η μετάδοση των στοιχείων PREQ γίνεται broadcast, σε αντίθεση με τη μετάδοση των στοιχείων PREP που πραγματοποιείται unicast.



Εικόνα 8: Δημιουργία Μονοπατιού Δρομολόγησης

Όπως φαίνεται και στο παράδειγμα της παραπάνω εικόνας, το μονοπάτι δρομολόγησης που έχει δημιουργηθεί για την αποστολή πλαισίων από τον κόμβο Α προς τον κόμβο Θ είναι το Α – Ε – Δ – Η – Θ.

2.3.3.3 Proactive Mode

Proactive PREQ

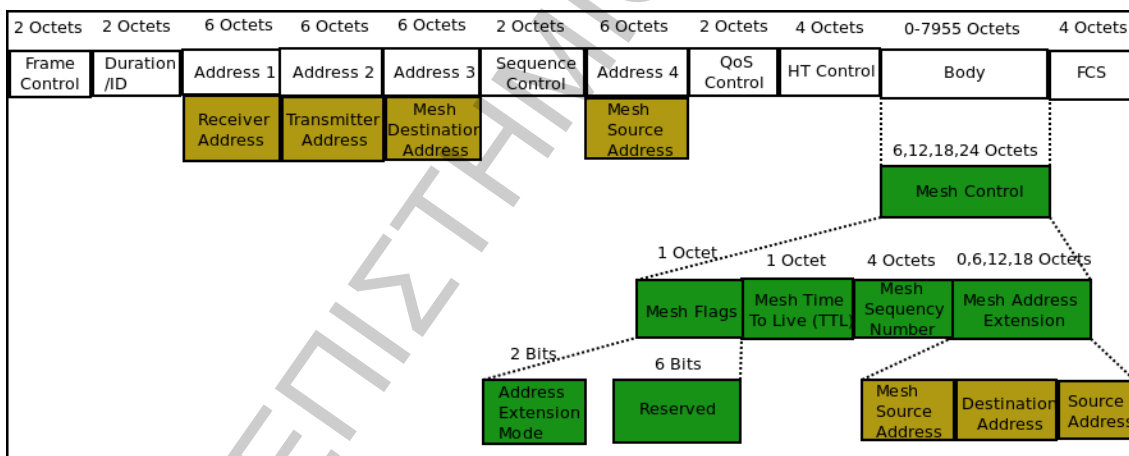
Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, υπάρχει ένας πλεγματικός σταθμός που λειτουργεί ως συντονιστής της διαδικασίας επιλογής μονοπατιού (root). Ο root στέλνει περιοδικά σε όλους τους γειτονικούς πλεγματικούς σταθμούς ένα proactive PREQ με αυξανόμενο αριθμό ακολουθίας κάθε φορά. Εκτός από τον αριθμό ακολουθίας, το proactive PREQ περιλαμβάνει την τιμή 1 στο TO πεδίο και την αρχική τιμή της μετρικής του ενεργού μονοπατιού που έχει θέσει ο root. Κάθε σταθμός που λαμβάνει ένα proactive PREQ, ανανεώνει τις πληροφορίες του μονοπατιού που διαθέτει για τον root εφόσον πληροί τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις και προωθεί το proactive PREQ στους γείτονές του με νέα τιμή για τη μετρική.

Proactive RANN

Ο root στέλνει περιοδικά ένα στοιχείο RANN σε όλους τους γειτονικούς του σταθμούς με σκοπό τη διαφήμιση των μετρικών των μονοπατιών προς τον root. Όταν ένας σταθμός λάβει ένα RANN και θέλει να ανανεώσει τις πληροφορίες που διαθέτει για το μονοπάτι προς τον root στέλνει ένα PREQ στον root μέσω του ενδιάμεσου σταθμού που έλαβε το RANN. Όταν ο root λάβει το PREQ, απαντάει πίσω με ένα PREP κι έτσι δημιουργείται το αμφίδρομο μονοπάτι μεταξύ του πλεγματικού σταθμού και του root.

2.4 Μορφή Πλεγματικού Πλαισίου

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μορφή ενός πλεγματικού πλαισίου [5] (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Μορφή Πλεγματικού Πλαισίου

Αναλυτικότερα, μέσα στο πεδίο Body, που ενσωματώνονται τα δεδομένα προς μετάδοση, έχει προστεθεί ένα ακόμα πεδίο που ονομάζεται Mesh Control. Το πεδίο αυτό παρέχει επέκταση των διευθύνσεων, ένα πεδίο TTL, ένα πεδίο Mesh Flags για τη δήλωση της ύπαρξης ή όχι επιπλέον διευθύνσεων και για μελλοντική χρήση κι ένα πεδίο για τον αριθμό ακολουθίας. Το πεδίο Mesh Control είναι κρυπτογραφημένο αφού αποτελεί μέρος των δεδομένων προς μετάδοση.

2.5 Συγχρονισμός

Το IEEE 802.11s πρότυπο ορίζει τη μέθοδο Neighbor Offset Synchronization [5] ως την προεπιλεγμένη μέθοδο συγχρονισμού μεταξύ των πλεγματικών σταθμών. Δεν υπάρχει ένας

καθολικός χρονομετρητής για το ασύρματο πλεγματοκό δίκτυο. Κάθε πλεγματοκό σταθμός έχει το δικό του χρονομετρητή TFS. Για το συγχρονισμό μεταξύ των πλεγματοκών κόμβων, κάθε κόμβος μεμονωμένα υπολογίζει τη χρονική διαφορά του με τους γειτονικούς του κόμβους. Κάθε πλεγματοκό σταθμός ρυθμίζει το χρονομετρητή του βάσει χρονικών σημάτων που λαμβάνει από Beacon και Probe Response πλαίσια. Με τη χρήση της παραπάνω μεθόδου επιτυγχάνεται διαλειτουργικότητα μεταξύ των πλεγματοκών σταθμών που χρησιμοποιούν MCCA, MBCA ή λειτουργούν σε light ή deep sleep mode. Στην περίπτωση που ένας πλεγματοκό σταθμός αλλάζει μεταξύ της Awake και Doze κατάστασης, μπορεί να μη λαμβάνει τα Beacon πλαίσια των γειτονικών κόμβων με τους οποίους είναι συγχρονισμένος. Ο υπολογισμός της χρονικής διαφοράς μεταξύ των χρονομετρητών των γειτονικών κόμβων δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$T_{\text{offset}} = T_t - T_r \quad (2)$$

όπου T_t είναι η τιμή της χρονικής σήμανσης στο ληφθέν πλαίσιο και T_r είναι ο χρόνος λήψης ενός πλαισίου που έχει μετρηθεί στο χρονομετρητή TFS του πλεγματοκού κόμβου.

Ο πλεγματοκό κόμβος προσαρμόζει το χρόνο που μετρήθηκε από το TFS ενός γειτονικού κόμβου στο δικό του χρόνο (T_{self}) βάσει του δικού του TFS σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$T_{\text{self}} = T_{\text{neighbor}} - T_{\text{offset}} \quad (3)$$

όπου T_{neighbor} είναι ο χρόνος που μετρήθηκε στο χρονομετρητή TFS του γειτονικού κόμβου με τον οποίο συγχρονίζεται.

2.6 Beaconing

Ένας πλεγματοκό σταθμός μεταδίδει πλαίσια beacon που είναι συγκεκριμένα για ένα MBSS κι ορίζει μία σειρά από TBTTs (Target Beacon Transmission Time) [5], δηλαδή τα χρονικά διαστήματα που πρέπει να υπάρχουν μεταξύ δύο διαδοχικών beacon. Επίσης, όταν ένας πλεγματοκό σταθμός λαμβάνει ένα πλαίσιο beacon, μπορεί να αντλήσει πληροφορίες από αυτό που μπορεί να αφορούν είτε στο συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων, είτε στη MBCA, είτε στις διαφημίσεις των MCCAOP είτε όταν απλά έχει αναπτύξει κάποια peerings με ένα γειτονικό κόμβο. Για την ανίχνευση και τον περιορισμό των συγκρούσεων μεταξύ beacons που μεταδίδονται στο ίδιο κανάλι και σε εύρος δύο βημάτων μακριά από τον κόμβο που τα μεταδίδει, έχει αναπτυχθεί το πρωτόκολλο Mesh Beacon Collision Avoidance (MBCA) [5]. Το πρότυπο δεν προβλέπει ότι όλοι οι πλεγματοκοί σταθμοί έχουν ενεργοποιημένο το παραπάνω πρωτόκολλο. Έτσι, όταν ένας πλεγματοκό κόμβος έχει ενεργοποιημένο το μηχανισμό MBCA, διαφημίζει το TBTT και το χρονικό διάστημα των beacon των γειτονικών του κόμβων μέσω των Beacon Timing element. Ο μηχανισμός MBCA αποτελείται από τις διαφημίσεις χρονισμού του beacon, την επιλογή και τη ρύθμιση του TBTT. Για τη διαφήμιση του χρονισμού των beacon, ο πλεγματοκό σταθμός πρέπει να προσθέσει το Beacon Timing element στα Beacon και Probe Response πλαίσια. Ο πλεγματοκό σταθμός δημιουργεί την πληροφορία για το χρονισμό των beacon με τον υπολογισμό των TBTTs των γειτόνων που είναι συγχρονισμένοι και συλλέγει και τις αντίστοιχες πληροφορίες από τους γειτονικούς του κόμβους. Από αυτές τις πληροφορίες που συλλέγει, κρατάει μόνο αυτές με την πιο πρόσφατη τιμή του TBTT και του beacon interval. Ο χρόνος κατά τον οποίο οι πληροφορίες συγχρονισμού beacon θεωρούνται έγκυρες είναι παραμετροποιήσιμες. Κάθε πληροφορία συγχρονισμού beacon διαθέτει ένα αριθμό κατάστασης, ο οποίος αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που μεταδίδεται ένα πλαίσιο που περιλαμβάνει ένα Beacon Timing element και συμπεριλαμβάνεται σε αυτό για τον εντοπισμό πιθανών αλλαγών στις πληροφορίες συντονισμού beacon. Όταν ένας πλεγματοκό κόμβος λαμβάνει ένα πλαίσιο Beacon Timing element, χρησιμοποιεί τις πληροφορίες συγχρονισμού beacon για την επιλογή και τη ρύθμιση του TBTT του.

2.7 Διαχείριση Ισχύος (Power Management)

Κάθε πλεγματικός σταθμός μπορεί να ρυθμίσει την κατάσταση λειτουργίας ξεχωριστά για κάθε ρεφίρινγκ του. Δηλαδή, μπορεί να επιλέξει την κατάσταση λειτουργίας για ένα συγκεκριμένο ρεφίρινγκ ανάλογα με την κίνηση που υπάρχει σε αυτό.

Η αλλαγή από την ενεργή λειτουργία στη λειτουργία εξοικονόμησης ισχύος είναι αρκετά ασφαλής και δεν οδηγεί σε απώλεια δεδομένων. Στην αντίθετη περίπτωση όμως, μπορεί να έχουμε απώλεια δεδομένων λόγω του γεγονότος ότι ένας γειτονικός πλεγματικός σταθμός μπορεί να μην έχει προλάβει να ενημερωθεί για την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας του πλεγματικού σταθμού.

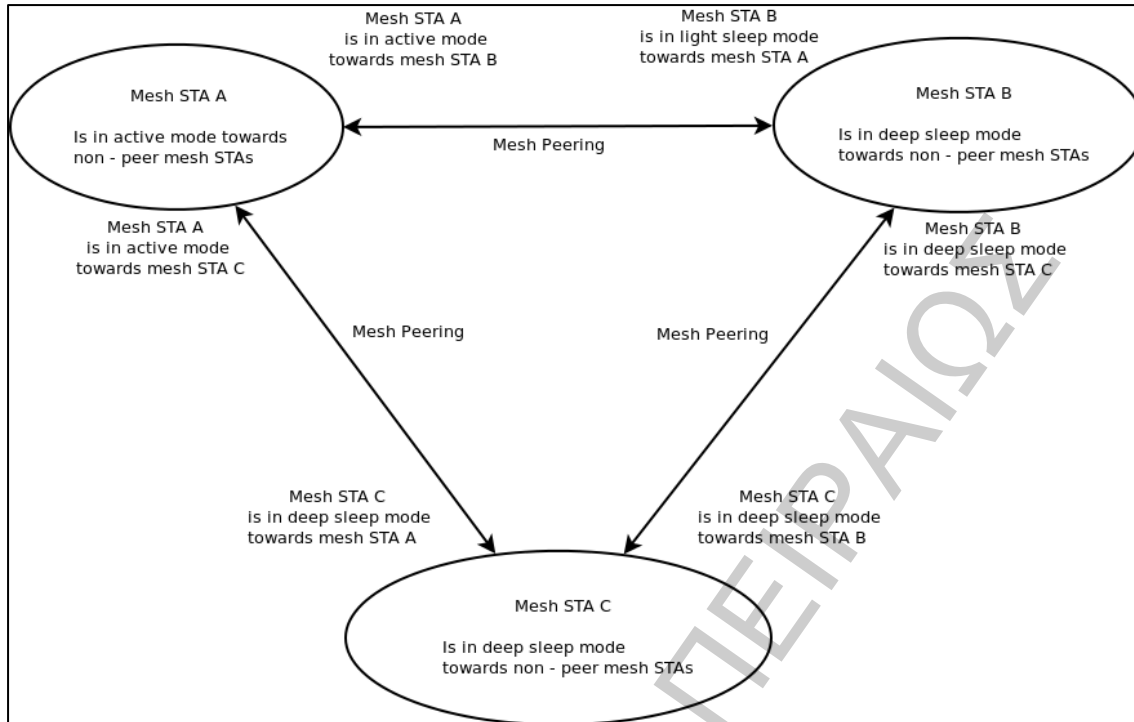
Ένας πλεγματικός σταθμός μπορεί να λειτουργεί σε δύο διαφορετικές καταστάσεις.

- 1) Awake: ο πλεγματικός σταθμός μπορεί να λαμβάνει και να μεταδίδει πλαίσια και καταναλώνει πολλή ισχύ.
- 2) Doze: ο πλεγματικός σταθμός δεν μπορεί να λαμβάνει και να μεταδίδει πλαίσια κι έτσι η κατανάλωση ισχύος είναι περιορισμένη.

Η Διαχείριση Ισχύος είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό του τρόπου εναλλαγής ανάμεσα στις δύο παραπάνω καταστάσεις κι ορίζει δύο καταστάσεις λειτουργίας.

- 1) Active mode: ο πλεγματικός σταθμός βρίσκεται συνεχώς στην Awake κατάσταση.
- 2) Power save mode: ο πλεγματικός σταθμός πότε βρίσκεται σε Awake κατάσταση και πότε σε Doze, ορίζονται δύο υποκατηγορίες:
 - a) light sleep mode: ο πλεγματικός σταθμός μπορεί να λαμβάνει beacons
 - b) deep sleep mode: ο πλεγματικός σταθμός μπορεί να επιλέξει να μη λαμβάνει beacons.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιθανές καταστάσεις που μπορεί να λειτουργεί ένας πλεγματικός σταθμός.



Εικόνα 10: Καταστάσεις Λειτουργίας Πλεγματού Σταθμού

2.8 Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control)

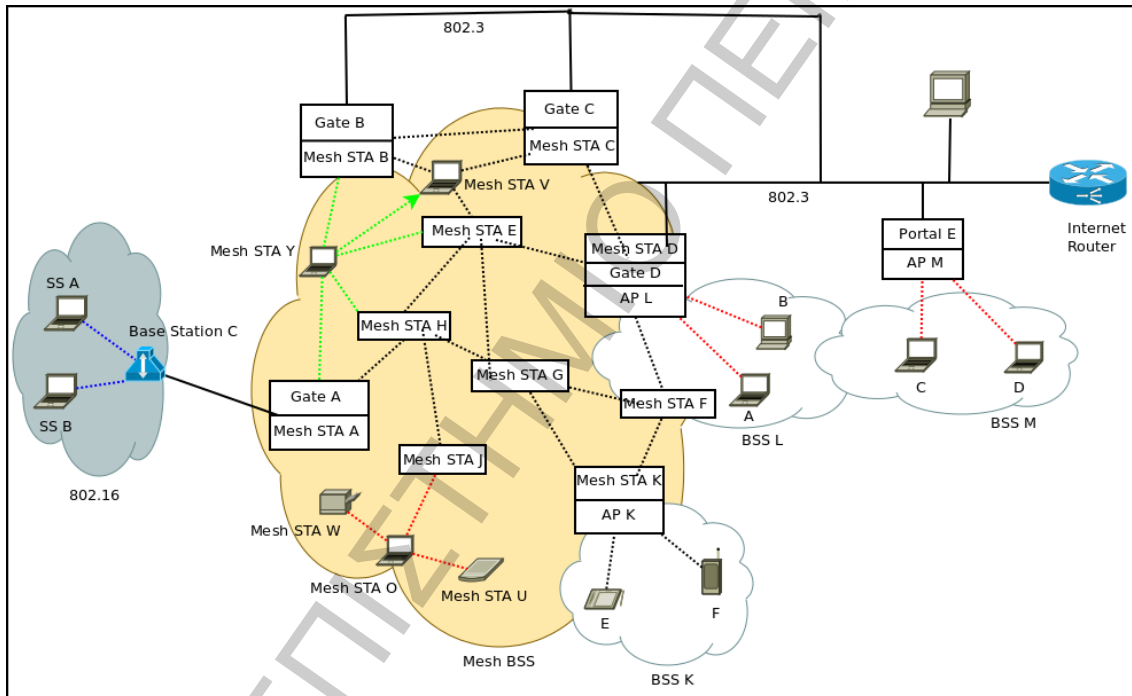
Το IEEE 802.11s Πρότυπο αναφέρει το Congestion Control Signaling Protocol [5] το οποίο καθορίζει τα μηνύματα σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται με τον έλεγχο συμφόρησης μέσα στο πλεγματού δίκτυο. Με τη χρήση των Congestion Control Notification πλαισίων, ένας πλεγματού σταθμός που αντιλαμβάνεται συμφόρηση στο δίκτυο ενημερώνει τους γειτονικούς του σταθμούς, καθώς και τον σταθμό που προκαλεί τη συμφόρηση, για το ποια είναι η πηγή της συμφόρησης και την εκτιμώμενη από τον ίδιο διάρκεια της. Όταν ένας πλεγματού σταθμός αντιλαμβάνεται συμφόρηση στο δίκτυο ή λάβει ένα Congestion Control Notification πλαίσιο, τότε μειώνει το ρυθμό που μεταδίδει ή σταματάει τελείως τη μετάδοση προς τους σταθμούς που υποφέρουν από συμφόρηση. Επίσης, ενημερώνει κι αυτός τους γείτονές του για την ύπαρξη συμφόρησης στο δίκτυο. Μόλις περάσει η εκτιμώμενη διάρκεια της συμφόρησης, επανέρχεται στους προηγούμενους ρυθμούς μετάδοσης πλαισίων.

2.9 Διαλειτουργία με το Σύστημα Κατανομής (Interworking with the Distribution System - DS)

Όταν ένας πλεγματού σταθμός θέλει να στείλει δεδομένα σε ένα σταθμό εκτός δικτύου, τότε προωθεί τα δεδομένα στην πλεγματού πύλη που έχει πρόσβαση στο DS. Όλοι οι πλεγματού σταθμοί που ανήκουν στο δίκτυο πρέπει να είναι ενήμεροι για την ύπαρξη των πλεγματού πυλών του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση ενός από τους proactive μηχανισμούς του HWMP, είτε με τη χρήση του Gate Announcement Protocol [5]. Οι πλεγματού πύλες στέλνουν πλαίσια σε όλους τους γειτονικούς πλεγματού σταθμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους τα προωθούν στους γείτονές τους ώστε να ενημερωθούν όλοι στο δίκτυο.

Όταν ένας πλεγματού σταθμός θέλει να επικοινωνήσει με ένα σταθμό που βρίσκεται εκτός του ασύρματου πλεγματού δικτύου, που καλούνται εξωτερικοί σταθμοί (external stations), μεταχειρίζονται τις MAC διευθύνσεις τους ως εξωτερικές διευθύνσεις. Οι πλεγματού σταθμοί που είναι οι πλεγματού σταθμοί – προορισμοί για δεδομένα που προορίζονται σε εξωτερικούς

σταθμούς ονομάζονται μεσολαβήτριες (πληρεξούσιες) πλεγματικές πύλες (proxy mesh gates) κι οι MAC διευθύνσεις τους καλούνται μεσολαβήτριες (πληρεξούσιες) διευθύνσεις. Οι μεσολαβήτριες (πληρεξούσιες) πλεγματικές πύλες καθώς κι ο πλεγματικός σταθμός – πηγή των MSDUs, που προορίζονται για εξωτερικό σταθμό, διατηρούν πληροφορίες μεσολάβησης. Αυτές οι πληροφορίες περιέχουν την εξωτερική διεύθυνση, την αντίστοιχη διεύθυνση της μεσολαβήτριας, τον αριθμό ακολουθίας της πληροφορίας μεσολάβησης και τον αντίστοιχο χρόνο ζωής της. Όταν περάσει η καθορισμένη διάρκεια ζωής της πληροφορίας μεσολάβησης, τότε αυτή δε θεωρείται πλέον έγκυρη. Οι πλεγματικοί σταθμοί μπορούν μέσω των πληροφοριών μεσολάβησης, που περιέχονται είτε σε μηνύματα ενημέρωσης μεσολάβησης (proxy update - PXU) είτε σε μηνύματα επιλογής μονοπατιού, να μάθουν τις διευθύνσεις των μεσολαβητριών (πληρεξουσιών) πλεγματικών πυλών και των εξωτερικών σταθμών για τους οποίους μεσολαβούν. Οι μεσολαβήτριες (πληρεξούσιες) πλεγματικές πύλες στέλνουν PXU όταν προσθέτουν, ενημερώνουν, διαγράφουν μία εξωτερική διεύθυνση ή ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η λειτουργία του IEEE 802.11s ως σύστημα κατανομής. Πιο αναλυτικά, ένα MBSS μπορεί να συνδέεται με ενσύρματα δίκτυα, 802.16 δίκτυα, 802.11 based δίκτυα, δίκτυα αισθητήρων κι άλλα και να λειτουργεί ως δίκτυο μεσολάβησης ώστε τα πακέτα που προέρχονται εκτός του δικτύου και έχουν ως προορισμό τους, επίσης, σταθμούς εκτός του δικτύου να μπορούν να δρομολογηθούν και να είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ τους.



Εικόνα 11: Λειτουργία του IEEE 802.11s WMAN ως Σύστημα Κατανομής

2.10 Έργασίες πάνω σε IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks

Τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα είναι μία νέα τεχνολογία που απασχολεί έντονα την επιστημονική κοινότητα λόγω του χαμηλού κόστους εφαρμογής τους και της δυνατότητας να ρυθμίζονται μόνα τους. Όμως, το Πρότυπο έχει αφήσει αρκετά ανοιχτά ζητήματα τα οποία χρειάζονται λύση για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης των ασύρματων πλεγματικών δικτύων. Παρακάτω ακολουθούν εργασίες που έχουν γίνει πάνω σε IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks.

2.10.1 Αρχιτεκτονικές των IEEE 802.11s WMNs

Ο τομέας της αρχιτεκτονικής των ασύρματων πλεγματικών δικτύων δεν έχει λάβει την απαραίτητη προσοχή. Πολλές διαφορετικές αρχιτεκτονικές μπορούν να εφαρμοστούν στα IEEE 802.11s WMNs βάσει τοπολογικών διαφορών, την κατανομή των στοιχείων του δικτύου κι άλλα. Οι τοπολογικές αλλαγές του πλεγματικού δικτύου μπορούν να επιφέρουν αλλαγές στο φυσικό επίπεδο του δικτύου και στην απόδοσή του. Τέλος, με τη μελέτη της αρχιτεκτονικής των ασύρματων πλεγματικών δικτύων μπορεί να δοθούν λύσεις σε κάποια προβλήματα όπως, η δρομολόγηση, η διαχείριση κι η απόδοση του δικτύου.

Στην εργασία [6] αναπτύσσονται τρεις διαφορετικές αρχιτεκτονικές για IEEE 802.11s WMNs.

Η πρώτη αρχιτεκτονική που εξετάζεται είναι η πλεγματική πανεπιστημιούπολη που περιέχει μερικά κτίρια εντός του πανεπιστημιακού χώρου με line of sight (LOS) μεταξύ τους και μία κεντρική μονάδα διαχείρισης. Οι πλεγματικοί κόμβοι έχουν ελάχιστη κινητικότητα και όλο το δίκτυο ελέγχεται από ένα Πάροχο Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP). Λόγω της ύπαρξης μίας μονάδας διαχείρισης, είναι εύκολη η παρακολούθηση κι η διαχείριση του δικτύου καθώς και η παρακολούθηση των μηχανισμών δρομολόγησης, συμφόρησης κι ελέγχου των παρεμβολών.

Τέλος, η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει τρία επίπεδα, το πρώτο είναι αυτό που συνδέεται στο διαδίκτυο, το δεύτερο είναι το πλεγματικό δίκτυο και το τρίτο είναι το δίκτυο πρόσβασης.

Η δεύτερη αρχιτεκτονική, που παρουσιάζεται, ονομάζεται πλεγματικό κέντρο πόλης και αποτελείται από πολλά κτίρια που είναι διασκορπισμένα σε διάφορα κομμάτια στο κέντρο μίας πόλης. Σε αυτό τον τύπο αρχιτεκτονικής, δεν υπάρχει πάντα LOS, οι πλεγματικοί κόμβοι κινούνται συνεχώς και τέλος, δεν υπάρχει μία κοινή μονάδα διαχείρισης ή ένας πάροχος υπηρεσιών διαδικτύου. Το φορτίο κι ο τύπος της κίνησης δεδομένων μεταβάλλεται συνεχώς κι είναι δύσκολος ο συντονισμός μεταξύ των παρόχων λόγω των διαφορετικών τύπων υπηρεσιών που παρέχουν στους πελάτες τους. Συνεπώς, τέτοιου τύπου δίκτυα απαιτούν μεγαλύτερη χωρητικότητα και πιο ακριβό εξοπλισμό.

Η τρίτη αρχιτεκτονική ονομάζεται πλεγματικό δίκτυο μεγάλων αποστάσεων. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, δεν υπάρχουν κτίρια κι οι πλεγματικοί κόμβοι είναι διασκορπισμένοι κατά μήκος ενός τμήματος της εθνικής οδού μέσα στην πόλη ή σε προστασιακές περιοχές που δεν υπάρχουν υποδομές. Χρησιμοποιούνται μονοκατευθυντικές κεραίες σε μεγάλα υψόμετρα και σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών πλεγματικών κόμβων. Τέλος, υπάρχει ένα σύνολο από εφεδρικούς πλεγματικούς κόμβους ελαχιστοποιώντας, έτσι, την ανάγκη για δαπανηρές υποδομές.

2.10.2 QoS στα WMNs

Οι περισσότερες εφαρμογές των WMNs απαιτούν διαφορετικές QoS παραμέτρους [7]. Είναι πολύ βασικό οι αλγόριθμοι δρομολόγησης, που εφαρμόζονται στα IEEE 802.11s WMNs, να παρέχουν QoS, μηχανισμούς για εξισορρόπηση φορτίου και να ενσωματώνουν μετρικές του MAC επιπέδου για τη βελτίωση της απόδοσής του. Η προεπιλεγμένη μετρική, που χρησιμοποιείται από το HWMP, λαμβάνει υπόψη την επιβάρυνση του Φυσικού και του MAC επιπέδου, το φορτίο του πλαισίου και το ποσοστό σφάλματος των πακέτων. Όμως θα έπρεπε να συνυπολογίζονται και κάποια χαρακτηριστικά των πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων πολλαπλών καναλιών WMNs, όπως η εξοικονόμηση ενέργειας, η κινητικότητα κι οι λειτουργίες των πολλαπλών καναλιών με σκοπό την πιο αποτελεσματική εύρεση των μονοπατιών δρομολόγησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διάφοροι αλγόριθμοι δρομολόγησης που έχουν προταθεί για τα IEEE 802.11s WMNs.

2.10.3 Αλγόριθμοι δρομολόγησης στα WMNs

Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος δρομολόγησης που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11s παρέχει δύο καταστάσεις λειτουργίας, την on – demand και την proactive tree. Είναι πολύ σημαντικό να

υλοποιηθούν QoS παράμετροι στο πρωτόκολλο αυτό, δηλαδή να αναπτυχθούν μηχανισμοί που θα λαμβάνουν υπόψη τους QoS παραμέτρους για την εύρεση των μονοπατιών δρομολόγησης. Στην εργασία [8] γίνεται μία αξιολόγηση της απόδοσης της proactive tree λειτουργίας του HWMP για τη βελτίωση των QoS απαιτήσεων. Αναλυτικότερα, μελετήθηκε σε δύο διαφορετικές τοπολογίες WMNs (Grid και Waxman), η απόδοση της proactive tree λειτουργίας του HWMP βάσει της μέσης συνολικής ρυθμαπόδοσης, το μέσο συνολικό PDF (Packet Delivery Fraction) και της μέσης συνολικής καθυστέρησης. Στις προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί σε δύο PREQs (PREQ interval) έπαιρνε διαφορετικές τιμές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, οι τιμές αυτές πρέπει να επιλέγονται βάσει τη διάταξη των κόμβων και, συνεπώς, διαφέρουν για τις δύο τοπολογίες. Ο καθορισμός της τιμής του χρονικού διαστήματος ανάμεσα σε δύο PREQ στοιχεία συμβάλλει στη βελτίωση των τριών παραμέτρων που μελετήθηκαν και την παροχή QoS.

Ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης έχει μελετηθεί για εφαρμογή σε πολλαπλών καναλιών και πολλαπλών διεπαφών (multi-channel and multi-interface - MIMC) δικτυακά περιβάλλοντα [9] κι είναι απόλυτα συμβατό με το προεπιλεγμένο (HWMP) πρωτόκολλο δρομολόγησης, που ορίζεται στο IEEE 802.11s πρότυπο. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο επιλέγει μονοπάτια με υψηλή ρυθμαπόδοση βάσει πληροφοριών της ποικιλομορφίας του καναλιού και μειώνει την επιβάρυνση που προκαλείται από τα μηνύματα ελέγχου. Το παραπάνω σχήμα χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση γίνεται επιλογή του μονοπατιού βάσει του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, το HWMP υπολογίζει αθροιστικά το κόστος κάθε συνδέσμου που υπάρχει στο μονοπάτι κι έτσι οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν μπορούν να ξεχωρίσουν ποιο είναι το κόστος του ακριβώς προηγούμενου συνδέσμου. Με την εισαγωγή δύο επιπλέον πεδίων, το κόστος του συνδέσμου και τον αριθμό του καναλιού στα στοιχεία PREQ και PREP, επιλύεται το παραπάνω πρόβλημα. Στη δεύτερη φάση επιτυγχάνεται μείωση των μηνυμάτων ελέγχου με την κατηγοριοποίηση των στοιχείων PREQ σε $PREQ_F$ και $PREQ_R$, η ύπαρξη των οποίων δηλώνεται σε ένα νέο πεδίο. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα $PREQ_F$, ακολουθεί την ίδια διαδικασία που ορίζεται από το HWMP, δηλαδή αναμεταδίδει από όλες τις διεπαφές του το στοιχείο PREQ που έλαβε. Αντίθετα, όταν ένας κόμβος λάβει ένα $PREQ_R$, τότε προωθεί το στοιχείο μόνο από τις απαραίτητες διεπαφές που αντιστοιχούν στα παιδιά – κόμβους.

Στην εργασία [10] οι συγγραφείς εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα των κατευθυντικών κεραιών διατηρώντας ταυτόχρονα την συμβατικότητα του IEEE 802.11 MAC για να επιτύχουν μείωση της επιβάρυνσης από τη δρομολόγηση. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κεραιές χωρισμένες σε τομείς, οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλές beam κεραιές για κάθε κατεύθυνση / τομέα κι όλες μαζί παρέχουν πλήρη κάλυψη (360 μοίρες). Η αλλαγή της κατεύθυνσης της κεραίας είναι δυνατή μόνο με τη φυσική αλλαγή του προσανατολισμού της. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται επίλυση του deafness προβλήματος. Για τη μείωση της επιβάρυνσης από τη δρομολόγηση προτάθηκε ο μηχανισμός με την ονομασία Sector - HWMP. Στο στοιχείο PREQ του HWMP, που στέλνει ένας σταθμός από μία συγκεκριμένη διεπαφή, περιέχεται μόνο το υποσύνολο των διευθύνσεων των πλεγματικών κόμβων -προορισμών που βρίσκονται μέσα στη δέσμη ακτινοβολίας τους. Οι στόχοι για μείωση της επιβάρυνσης συναντώνται λόγω του ότι μερικές διεπαφές μπορεί να έχουν ένα άδειο υποσύνολο (δε χρειάζεται να στείλουν PREQ στοιχεία) κι ο αριθμός των ενδιάμεσων πλεγματικών σταθμών μειώνεται.

Τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα έχουν γίνει μία από τις βασικές τεχνολογίες για την πραγματοποίηση της επόμενης – γενιάς ασύρματων δικτύων με ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο εφαρμογής τους το Smart Grid. Με τον όρο αυτό καλείται ένα ηλεκτρικό σύστημα ή μία υποδομή που συνδυάζεται με τις τεχνολογίες επικοινωνιών με στόχο τη στήριξη της μετάδοσης ηλεκτρικής πληροφορίας και παροχή απομακρυσμένης διαχείρισης της ενέργειας [11]. Σε αυτή τη μελέτη, οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων του μονοπατιού που επιλέγεται από το HWMP. Πιο συγκεκριμένα, προτείνουν την τροποποίηση του υπολογισμού της προεπιλεγμένης μετρικής που χρησιμοποιείται από το IEEE 802.11s πρότυπο υπολογίζοντας το λόγο λάθους για κάθε κόμβο. Επειδή η πλειοψηφία των δεδομένων σε Smart Grid περιβάλλοντα είναι upstream, οι συγγραφείς λαμβάνουν υπόψη τους τον αριθμό MAC αναμεταδόσεων κάθε πακέτου ως τιμή για τον υπολογισμό του ποσοστού αποτυχίας στο δίκτυο. Αυτή η παράμετρος αντιπροσωπεύει όλους τους τύπους των αποτυχιών μετάδοσης που

προκαλούν αναμετάδοση, όπως είναι οι συγκρούσεις πακέτων κι οι κακές συνθήκες του καναλιού. Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει το ποσοστό αποτυχίας του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των αναμεταδόσεων.

$$e_f = \frac{M_n \times \frac{1}{P_n}}{R_{max}} \quad (4)$$

Όπου, M_n ο συνολικός αριθμός των MAC αναμεταδόσεων από τον κόμβο n , P_n είναι ο συνολικός αριθμός των πακέτων που έχει μεταδώσει ο κόμβος n και R_{max} είναι το επιτρεπτό μέγιστο όριο αναμεταδόσεων.

Επίσης, ένα δεύτερο σχήμα που προτείνεται στο [11] είναι η τροποποίηση του HWMP με την εισαγωγή ενός αλγορίθμου για την μείωση του ποσοστού της διακύμανσης λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενα μονοπάτια που έχουν επιλεχθεί. Κάθε κόμβος διατηρεί κι ενημερώνει τη μετρική (airtime link metric) όλων των RANN στοιχείων που λαμβάνει, δηλαδή το τρέχον μονοπάτι που υπολογίζεται από το στοιχείο RANN στο τρέχον χρονικό διάστημα, πολλαπλά αποθηκευμένα μονοπάτια από το στοιχείο RANN στο τρέχον χρονικό διάστημα, το τρέχον μονοπάτι που υπολογίστηκε από το στοιχείο RANN στο προηγούμενο χρονικό διάστημα και πολλαπλά αποθηκευμένα μονοπάτια από το στοιχείο RANN στο προηγούμενο χρονικό διάστημα.

Το Modified HWMP (MHWMP) [12] αποτελεί μία τροποποίηση του HWMP με στόχο την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των έξυπνων κεραιών. Οι πλεγματικοί κόμβοι μπορούν να επιλέξουν για τη μετάδοση των δεδομένων τους μεταξύ της χωρικής πολυπλεξίας και της διαμόρφωσης σε δέσμη ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες του καναλιού. Συγκεκριμένα, για τις μεταδόσεις δεδομένων με χωρική πολυπλεξία, η μετάδοση των RTS/CTS πλαισίων γίνεται με πολυκατευθυντική κεραία. Η παραπάνω τεχνική δεν μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις που η μετάδοση γίνεται με διαμόρφωση σε δέσμη. Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με το τροποποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης, τα RTS/CTS πλαίσια με STBC (To Space – Time Block Code (STBC) [12] είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες για τη μετάδοση πολλαπλών αντιγράφων των δεδομένων σε όλες τις κεραιές) μεταδίδονται σε όλους τους γειτονικούς σταθμούς μόνο όταν το κανάλι είναι ελεύθερο για την επιθυμητή κατεύθυνση της μετάδοσης. Για τη διαδικασία ανακάλυψης, κάθε κόμβος διατηρεί ένα Omnidirectional Neighbor Table (ONT) [12] κι ένα Directional Neighbor Table (DNT) [12] και μεταδίδει σε όλους τους γείτονές του Beacons με ή χωρίς STBC για να βρει ποιοι γείτονές του διαθέτουν κατευθυντικές και ποιοι πολυκατευθυντικές κεραιές αντίστοιχα. Επίσης, κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα Omnidirectional Path Table (OPT) [12] για μετάδοση με χωρική πολυπλεξία κι ένα πίνακα Directional Path Table (DPT) [12] για μετάδοση με διαμόρφωση σε δέσμη. Αναλυτικότερα, ο πρώτος πίνακας διαμορφώνεται βάσει της ελάχιστης air time μετρικής από τους παρακάτω τύπους:

$$c_{opt} = \left[o_{ca} + o_p + \frac{B_t}{r_{mux}} \right] \frac{1}{1 - e_{fr}} \quad (5)$$

$$r_{mux} = \min(M, N) r \quad (6)$$

Αντίστοιχα, ο δεύτερος πίνακας υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους:

$$c_{DAM} = c_{DPT} N_D \quad (7)$$

$$c_{DPT} = \left[o_{ca} + o_p + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{fr}} \quad (8)$$

Παρακάτω αναλύεται το MHWMP όσο αφορά στη διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού δρομολόγησης. Όταν ένας πλεγματικός κόμβος θέλει να στείλει δεδομένα σε ένα άλλο κόμβο ελέγχει αν υπάρχει εγγραφή για το συγκεκριμένο κόμβο και στους δύο πίνακες. Στην περίπτωση που ο αρχικός κόμβος δεν έχει κάποια εγγραφή στους πίνακές του για τον κόμβο που θέλει να στείλει δεδομένα, τότε στέλνει σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους είτε ένα στοιχείο S-PREQ (με STBC) είτε ένα στοιχείο O-PREQ (χωρίς STBC). Τα δύο αυτά στοιχεία περιέχουν ένα επιπλέον πεδίο με την τιμή του DAM. Κάθε φορά που ένας ενδιάμεσος σταθμός λαμβάνει ένα στοιχείο O-PREQ, ελέγχει τον OPT πίνακά του κι αν έχει εγγραφή για το

συγκεκριμένο κόμβο προορισμό, τότε απαντάει με χωρική πολυπλεξία στον κόμβο που ξεκίνησε τη διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού για να τον ενημερώσει για την ύπαρξη του. Στην αντίθετη περίπτωση ανανεώνει τον πίνακά του αν πληροί τις συνθήκες που ισχύουν γενικά για το πρωτόκολλο HWMP και προωθεί το στοιχείο στους γειτονικούς του κόμβους. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος λάβει ένα στοιχείο S-PREQ, ελέγχει τον DPT πίνακά του κι αν βρει εγγραφή για τον κόμβο προορισμό, τότε απαντάει στον αρχικό κόμβο με διαμόρφωση σε δέσμη. Αλλιώς, ανανεώνει τον πίνακά του και προωθεί το στοιχείο βάσει του αριθμού ακολουθίας του και της τιμής του πεδίου DAM. Όταν ο τελικός κόμβος λάβει ένα από τα δύο παραπάνω πλαίσια, τότε στέλνει ένα πλαίσιο PREP στον αρχικό κόμβο εφαρμόζοντας τη μετάδοση που αντιστοιχεί στο στοιχείο που έλαβε. Στην περίπτωση που ο αρχικός πλεγματικός κόμβος έχει εγγραφή για τον κόμβο προορισμό σε ένα από τους δύο πίνακές του, τότε ξεκινάει τη μετάδοση των πλαισίων του βάσει της εγγραφής που διαθέτει και ξεκινάει διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού για τον πίνακα που δε διαθέτει εγγραφή. Για τη μετάδοση των δεδομένων ο αρχικός κόμβος ελέγχει την τιμή της μετρικής και στους δύο πίνακές του και διαλέγει το μονοπάτι που θα χρησιμοποιήσει βάσει της μικρότερης τιμής της μετρικής. Στην περίπτωση που επιλεγεί μονοπάτι από τον DPT πίνακα, ο αρχικός κόμβος στέλνει ένα πλαίσιο O-PREQ σε όλους τους γείτονές του για να αναζητήσει ένα μονοπάτι που να έχει μικρότερη τιμή μετρικής. Η μετάδοση με διαμόρφωση σε δέσμη συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί καλύτερο μονοπάτι που να προσφέρει μετάδοση με χωρική πολυπλεξία. Αυτό συμβαίνει γιατί κάνοντας χρήση της χωρικής πολυπλεξίας για τη μετάδοση των δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης. Ο παραπάνω αλγόριθμος εγγυάται τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης και συνεπώς, αυξάνει τη συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου. Τέλος, για τη διαδικασία συντήρησης του μονοπατιού δρομολόγησης, το MHWMP ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία. Όταν ένας σύνδεσμος διακοπεί κι η μετάδοση σε αυτόν γινόταν με χωρική πολυπλεξία, τότε ο πλεγματικός κόμβος που αντιλαμβάνεται τη διακοπή του συνδέσμου, στέλνει ένα πλαίσιο PERR στον αρχικό κόμβο με χωρική πολυπλεξία. Επίσης, ελέγχει τον DPT πίνακά του κι ελέγχει αν υπάρχει εγγραφή για τον κόμβο που προορίζονται τα πλαίσια που λαμβάνει ώστε να συνεχίσει την προώθηση των πλαισίων μέσω του συγκεκριμένου μονοπατιού με μετάδοση με διαμόρφωση σε δέσμη. Με τη λήψη του PERR από τον κόμβο που έχει ξεκινήσει τη μετάδοση των δεδομένων, γίνεται αλλαγή στη χρήση του μονοπατιού δρομολόγησης και χρησιμοποιείται αυτό που υπάρχει στον DPT πίνακα κι η αντίστοιχη μέθοδος μετάδοσης. Ακόμα, ο κόμβος διαγράφει την εγγραφή στον πίνακα OPT για το μονοπάτι που δηλώνεται στο PERR και στέλνει σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους ένα O-PREQ πλαίσιο. Με τη λήψη του PERR από ενδιαμέσο κόμβο, διαγράφεται η εγγραφή που αντιστοιχεί στον OPT πίνακα και προωθεί το πλαίσιο στους γειτονικούς του κόμβους μέχρι να φτάσει στον αρχικό κόμβο. Στην περίπτωση που στο σύνδεσμο που συνέβη η διακοπή, η μετάδοση γινόταν με χρήση της διαμόρφωσης σε δέσμη, στέλνεται επίσης, ένα PERR προς τον αρχικό κόμβο με μετάδοση με διαμόρφωση σε δέσμη. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος λάβει ένα τέτοιο πλαίσιο, τότε διαγράφει την εγγραφή στον αντίστοιχο πίνακα και προωθεί το στοιχείο στους γείτονές του. Το MHWMP βελτιώνει τη ρυθμαπόδοση του δικτύου και παρέχει εναλλακτική λύση σε περιπτώσεις που κάποιος σύνδεσμος σπάει χωρίς να αναβάλλεται η μετάδοση των δεδομένων.

2.10.4 Εξοικονόμηση Ενέργειας σε WMNs

Τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα έχουν τη δυνατότητα αυτο – διαμόρφωσης και συνεπώς, αποτελούν οικονομική λύση. Όμως, η ενέργεια των πλεγματικών σταθμών, που είναι περιορισμένη, αποτελεί ένα παράγοντα που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη, ιδιαίτερα όταν τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα εφαρμόζονται σε αγροτικές κι απομονωμένες περιοχές που η παροχή ρεύματος είναι πιο δύσκολη. Για την εξάλειψη των ενεργειακών περιορισμών, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος επιλογής μονοπατιού που βασίζεται στην ενεργειακή βελτιστοποίηση [13]. Όταν υπάρχουν πολλαπλά μονοπάτια που μπορούν να επιλεγθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας δρομολόγησης, επιλέγεται το μονοπάτι που παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Το HWMP δε χρησιμοποιεί ένα μονοπάτι για μεταδόσεις πακέτων. Αντίθετα, τα μονοπάτια που έχουν ανακαλυφθεί από τη διαδικασία ανακάλυψης, αποθηκεύονται στους πίνακες δρομολόγησης και χρησιμοποιούνται βάσει πιθανοτήτων για τη δρομολόγηση των δεδομένων. Έτσι, χρησιμοποιούνται διαφορετικά μονοπάτια σε διαφορετικές χρονικές στιγμές έχοντας ως αποτέλεσμα να αποφεύγεται η εξάντληση της ενέργειας σε συγκεκριμένους κόμβους

ώστε να μην πραγματοποιείται τμηματοποίηση του δικτύου. Στόχος του παραπάνω αλγορίθμου αποτελεί η εξισορρόπηση της ενεργειακής δαπάνης μεταξύ των πλεγματικών κόμβων και συνεπώς η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Τα IEEE 802.11s WMNs χαρακτηρίζονται για την ικανότητά τους να παρέχουν συνδεσιμότητα ακόμα κι όταν κάποιος σύνδεσμος διακοπεί με τα εφεδρικά μονοπάτια που διαθέτουν. Παρ' όλα αυτά, η ροή του δικτύου μπορεί να εμποδιστεί με τη δημιουργία παρεμβολών (jamming) [14], κατά τη διάρκεια της οποίας εκπέμπεται σκόπιμος θόρυβος ώστε να διακοπεί η νόμιμη επικοινωνία. Συνήθως, η επίθεση αυτή πραγματοποιείται σε φυσικό επίπεδο, όμως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά πληροφορίες ανωτέρων επιπέδων, ώστε να παρεμποδιστεί η επικοινωνία σε ολόκληρο το δίκτυο. Ένα IEEE 802.11s WMN μπορεί να παρέχει εφεδρικά μονοπάτια παρακάμπτοντας την περιοχή παρεμβολών. Έχουν ερευνηθεί οι επιδράσεις που έχουν αυτές οι παρεμβολές σε ένα IEEE 802.11s WMN κι η ανθεκτικότητα του δικτύου από πρωτόκολλα επιλογής πολλαπλών – μονοπατιών κι ιδιαίτερα του HWMP. Για περιπτώσεις δικτύου που αντιμετωπίζουν παρεμβολή, έχει αναπτυχθεί ένα νέο καταναμημένο πρωτόκολλο επιλογής μονοπατιού που στηρίζεται μόνο σε γνώσεις τοπικού επιπέδου κι όχι ολόκληρου του δικτύου. Όταν δύο κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους, ανταλλάσσουν πληροφορίες για την ισχύ στην οποία εκπέμπουν και μετράνε το δείκτη SINR (signal to interference noise ratio). Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εντοπίσουν ποιος από τους δύο κόμβους είναι περισσότερο επηρεασμένος από παρεμβολές. Η πληροφορία που εξάγεται από το παραπάνω, ενσωματώνεται στο πρωτόκολλο HWMP. Έτσι, κάθε φορά που ένας κόμβος στέλνει δεδομένα λαμβάνει υπόψη τους τις επιπτώσεις από παρεμβολή στον επόμενο κόμβο κι αποφεύγει την προώθηση δεδομένων σε περιοχές που υποφέρουν από παρεμβολές.

2.10.5 Αποφυγή Συμφόρησης στα WMNs

Τα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα αρχίζουν κι υλοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Μερικές από αυτές είναι η επιτήρηση μέσω βίντεο και τα συστήματα παρακολούθησης παρέχοντας υψηλής ταχύτητας λύσεις, μικρό κόστος, ευελιξία κι επεκτασιμότητα [15]. Οι πολυμεσικές κάμερες μπορούν να αναμεταδώσουν τα δεδομένα τους μέσω του ασυρμάτου μέσου με μετάδοση πολλαπλών βημάτων. Στα δίκτυα επιτήρησης μέσω βίντεο, η κίνηση συγκεντρώνεται στις πύλες (gateways) όπου προκαλείται συμφόρηση και συνεπώς, δεν παρέχουν την απαιτούμενη αξιοπιστία και τις απαιτήσεις σε QoS. Το Multi-Gateway Routing with Congestion Avoidance (MGR-CA) [15] αποτελεί ένα νέο μηχανισμό δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη του τη συμφόρηση κι υλοποιεί δρομολόγηση πολλαπλών πυλών σε ένα IEEE 802.11s WMN. Το MGR-CA χρησιμοποιεί τα στοιχεία RANN του HWMP για την ενημέρωση των πλεγματικών σταθμών του δικτύου για την ύπαρξη των πολλαπλών πυλών και τη δημιουργία μονοπατιών δρομολόγησης. Για την καλύτερη παροχή QoS, κάθε πλεγματικός κόμβος διατηρεί τέσσερις ουρές αναμονής με προτεραιότητα βασισμένο στο μηχανισμό EDCA του IEEE 802.11e. Κάθε πλεγματικός κόμβος μπορεί να υπολογίσει το επίπεδο της συμφόρησης που υφίσταται, ελέγχοντας το επίπεδο συμφόρησης σε κάθε ουρά αναμονής. Ως Path Congestion Level (PCL) [15] ορίζεται το επίπεδο συμφόρησης κάθε ουράς αναμονής κι η προτεραιότητά της. Όταν υπολογιστεί το PCL, τότε αντιστοιχίζεται σε μία από της πέντε τιμές βαθμού συμφόρησης, η οποία ενσωματώνεται στο στοιχείο RANN και μεταδίδεται σε όλους τους πλεγματικούς σταθμούς. Κάθε φορά που ένας πλεγματικός σταθμός λαμβάνει ένα στοιχείο RANN, ελέγχει την τιμή του βαθμού συμφόρησης. Αν ο δικός του βαθμός συμφόρησης είναι μεγαλύτερος από αυτόν στο στοιχείο RANN, τότε τον αντικαθιστά και στέλνει πάλι το RANN σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους. Επίσης, αν η τιμή του βαθμού συμφόρησης είναι μεγαλύτερη από μηδέν, τότε συγκρίνει τα επίπεδο συμφόρησης της αρχικής διαδρομής με την εναλλακτική. Στην περίπτωση που το επίπεδο συμφόρησης της εναλλακτικής διαδρομής είναι μικρότερο από την αρχική, θα αναθεωρήσει το μονοπάτι δρομολόγησης υπολογίζοντας το επίπεδο της ανακατεύθυνσης κι αποφασίζοντας ποιες από τις ουρές αναμονής του θα ανακατευθυνθούν προς την εναλλακτική διαδρομή. Για τον υπολογισμό του επιπέδου ανακατεύθυνσης χρησιμοποιείται το *airtime link metric* από το HWMP τόσο για την αρχική, όσο και για την εναλλακτική διαδρομή. Ο Πίνακας 1 δείχνει την αντιστοίχιση του εύρους της τιμής του PCL με το βαθμό συμφόρησης. Δηλαδή, για κάθε βαθμό συμφόρησης έχει δοθεί ένα εύρος τιμών του PCL (κατώτερο κι ανώτερο άκρο του

PCL), ώστε αφού υπολογιστεί η τιμή του PCL, να αντιστοιχίζεται με το βαθμό συμφόρησης στον οποίο βρίσκεται.

Πίνακας 1: Αντιστοίχιση Εύρους Τιμής PCL με Βαθμό Συμφόρησης

Congestion Degree (CD) Value	Equivalent PCL Range
No congestion (0)	$PCL_{min} \leq PCL \leq PCL_{int0}$
Weakly congested (1)	$PCL_{int0} \leq PCL \leq PCL_{int1}$
Med. Congested (2)	$PCL_{int1} \leq PCL \leq PCL_{int2}$
Highly congested (3)	$PCL_{int2} \leq PCL \leq PCL_{int3}$
Fully congested (4)	$PCL_{int3} \leq PCL$

2.10.6 QoS και Εκχώρηση Καναλιών στα WMNs

Το επίπεδο MAC κι οι μηχανισμοί πρόσβασης στο μέσο παίζουν σημαντικό ρόλο στη συνολική απόδοση του πλεγματοκτικού δικτύου. Για το λόγο αυτό τα πρωτόκολλα MAC πρέπει να παρέχουν επεκτασιμότητα, μηχανισμούς για την ομαλή συνεργασία με τους άλλους τύπους δικτύων, διαφορετικά επίπεδα QoS και προσαρμοστικούς μηχανισμούς εκχώρησης καναλιών. Παρακάτω ακολουθούν μηχανισμοί MAC επιπέδου που έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογή σε IEEE 802.11s περιβάλλοντα κι ασχολούνται με την πρόσβαση στο μέσο, την εκχώρηση και αλλαγή των καναλιών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το IEEE 802.11s Πρότυπο δεν απαιτεί όλοι οι πλεγματοκτικοί κόμβοι του δικτύου να έχουν ενεργοποιημένο το MCCA μηχανισμό. Αυτό σημαίνει ότι μέσα στο πλεγματοκτικό δίκτυο υπάρχουν σταθμοί με ενεργοποιημένο το μηχανισμό (MCCA κόμβοι στο εξής) κι άλλοι που δεν το έχουν ενεργοποιημένο (μη-MCCA κόμβοι στο εξής). Το γεγονός αυτό προκαλεί υποβάθμιση του μηχανισμού λόγω του ότι οι μη-MCCA κόμβοι δεν είναι ενήμεροι για τις κρατήσεις που έχουν κάνει οι MCCA κόμβοι κι έτσι έχουν αντίστοιχες ευκαιρίες πρόσβασης στο μέσο κατά τη διάρκεια ενός MCCAOP. Έτσι, σε μερικές περιπτώσεις, ο κάτοχος του MCCAOP μπορεί να καθυστερήσει ή να μην καταφέρει να αποκτήσει ποτέ πρόσβαση στο δίκτυο. Για τον παραπάνω λόγο αναπτύχθηκε ο μηχανισμός Enhanced Mesh Coordinated Channel Access (eMCCA) [16] που λειτουργεί σε συνδυασμό με τον MCCA μηχανισμό και περιλαμβάνει δύο κομμάτια.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο κομμάτι, που ονομάζεται πρόσβαση κατά προτεραιότητα (prioritized access), εισαγάζεται ένας νέος χρόνος μεταξύ των πλαισίων για τον κάτοχο του MCCAOP που ονομάζεται MCCA inter frame space (MIFS) κι υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$MIFS = SIFS + aSlotTime \quad (9)$$

Όπου, SIFS είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών πλαισίων και

$$aSlotTime = DIFS/2$$

Με την έναρξη του MCCAOP, ο κάτοχος του MCCAOP περιμένει για MIFS χρονικό διάστημα κι αν το μέσο είναι ελεύθερο ξεκινάει τη μετάδοση χωρίς να ξεκινήσει τη διαδικασία υποχώρησης (backoff). Οι μη-MCCA κόμβοι χρησιμοποιούν τον EDCA μηχανισμό για να αποκτήσουν πρόσβαση στο μέσο και πρέπει να περιμένουν AIFS χρονικό διάστημα πρώτου ξεκινήσουν τη διαδικασία υποχώρησης (backoff). Η τιμή του AIFS δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$AIFS = SIFS + AIFSN[AC] \cdot aSlotTime \quad (10)$$

Έτσι, όλοι οι μη-MCCA κόμβοι πρέπει να περιμένουν τουλάχιστον $2aSlotTime$ μετά το πέρας του SIFS για να ξεκινήσουν τη διαδικασία υποχώρησης (backoff). Ως εκ τούτου, αν ο κάτοχος του MCCAOP ξεκινήσει να μεταδίδει με τη λήξη του MIFS, όλοι οι μη-MCCA κόμβοι που

ανταγωνίζονται πρόσβαση στο δίκτυο θα εντοπίσουν ότι το μέσο είναι κατειλημμένο και θα αναβάλλουν τη μετάδοσή τους.

Το δεύτερο κομμάτι του eMCCA μηχανισμού περιορίζει την προσπάθεια των μη-MCCA κόμβων να ξεκινήσουν μετάδοση που θα μπορούσε να συντομεύσει μία MCCAOP κράτηση. Όταν το κανάλι γίνεται και πάλι διαθέσιμο μετά τη μετάδοση ενός μη-MCCA κόμβου, ο κάτοχος του επόμενου MCCAOP προαγοράζει κι αποκτά πρόσβαση στο μέσο νωρίτερα αν το εκτιμώμενο χρονικό διάστημα απασχόλησης του μέσου για τον επόμενο μη-MCCA κόμβο που πρόκειται να μεταδώσει είναι μεγαλύτερο από το χρόνο προαγοράς (preemption time). Ο χρόνος αυτός ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ του τέλους της προηγούμενης μετάδοσης από ένα μη-MCCA κόμβο και την έναρξη του επόμενου MCCAOP.

Λόγω της έλλειψης ενός πιο αποδοτικού MAC πρωτοκόλλου για τα IEEE 802.11s WMNs, πολλοί ερευνητές έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στη βελτίωση των μηχανισμών πρόσβασης στο μέσο ώστε να αυξάνουν τη χωρητικότητα του πλεγματού δικτύου και την απόδοσή του. Στο εργασία [17] εισάγεται ένα νέο πρωτόκολλο για πρόσβαση στο μέσο που ονομάζεται Multi-hop Reservation Protocol (MRP). Το MRP χρησιμοποιεί το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης (HWMP) για την επιλογή του μονοπατιού, ώστε να δημιουργεί κρατήσεις κατά μήκος του επιλεγμένου μονοπατιού και να ελέγχει τις αλλαγές που μπορεί να προκύπτουν στην περίπτωση που συμβεί κάποια αλλαγή στο μονοπάτι. Το πρωτόκολλο αυτό υστερεί στο γεγονός ότι σε μερικές περιπτώσεις δεν μπορεί να δημιουργήσει τις κρατήσεις κατά μήκος πολλών βημάτων. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις όπου είτε το όριο MAF ξεπερνιέται είτε υπάρχει αδυναμία εισαγωγής των MCCAOP κρατήσεων μεταξύ κρατήσεων που έχουν ήδη εισαχθεί.

Στην εργασία [18] παρουσιάζονται τρεις μηχανισμοί για εκχώρηση καναλιών σε IEEE 802.11s WMN. Ο πρώτος ονομάζεται Breath First Search Channel Assignment (BFSCA) [18] και χρησιμοποιεί ένα πλεγματού κόμβο ως συντονιστή που είναι υπεύθυνος για την εκχώρηση των καναλιών στις ραδιοσυχνότητες των κόμβων όλου του δικτύου. Μία ραδιοσυχνότητα χρησιμοποιείται για μηνύματα ελέγχου. Οι κόμβοι που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός συνδέσμου χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Κάθε κόμβος υπολογίζει την εξωτερική παρεμβολή (παρακολουθώντας τα πακέτα), το ποσοστό των δεδομένων και τον αριθμό των συσκευών που χρησιμοποιούν το κανάλι. Τα αποτελέσματα στέλνονται στο κόμβο – συντονιστή μέσω του καναλιού για τα μηνύματα ελέγχου. Ο συντονιστής εκχωρεί στους συνδέσμους τα κανάλια κι ενημερώνει τους πλεγματού κόμβους για την εκχώρηση που έχει κάνει. Όταν οι πλεγματού κόμβοι ενημερωθούν για την εκχώρηση των καναλιών, πρέπει πρώτα να ανακατευθύνουν την κίνηση στο κανάλι ελέγχου και μετά να χρησιμοποιήσουν το νέο κανάλι που τους ανατέθηκε για να μη συμβεί διακοπή της μετάδοσης των δεδομένων. Ο BFSCA ταξινομεί όλους τους συνδέσμους βάσει της απόστασής τους από τον κόμβο – συντονιστή και την ποιότητά τους βάσει της καθυστέρησης κι έπειτα κάνει εκχώρηση των καναλιών.

Ο δεύτερος μηχανισμός ανάθεσης, που παρουσιάζεται στην εργασία [18], ονομάζεται Urban-X και χρησιμοποιεί τρεις ραδιοσυχνότητες για κάθε κόμβο, μία για λήψη (R), μία για μετάδοση (T) κι ένα κανάλι για όλους τους κόμβους του δικτύου που δεν αλλάζει. Ο Urban-X εκχωρεί διαφορετικά κανάλια στη ραδιοσυχνότητα λήψης κάθε κόμβου. Όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει δεδομένα σε ένα άλλο κόμβο, τότε πρέπει να αλλάξει τη ραδιοσυχνότητα μετάδοσής του στο κανάλι λήψης του άλλου κόμβου. Ο Urban-X λαμβάνει υπόψη του την ποσότητα των δεδομένων που έχει να στείλει ένας κόμβος και την εκτιμώμενη εξωτερική παρεμβολή στα κανάλια. Οι κόμβοι συγχρονίζονται μεταξύ τους μέσω μηνυμάτων ελέγχου που στέλνονται στο κοινό για όλους κανάλι. Επίσης, στέλνουν μεταξύ τους την ποσότητα της κίνησης που έχουν να στείλουν και τη διαφημίζουν στους γείτονές τους που βρίσκονται έως και δυο βήματα μακριά. Με αυτό τον τρόπο ο Urban-X δίνει προτεραιότητες σε κάθε κόμβο. Ο κόμβος με την υψηλότερη προτεραιότητα έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα μετάδοσης.

Ο τρίτος μηχανισμός της εργασίας [18] για εκχώρηση καναλιών ονομάζεται Semi-dynamic Interference aware Channel Assignment (SICA) και χρησιμοποιεί δύο ραδιοσυχνότητες, μία για λήψη (R) και μία για μετάδοση (T). Ο SICA αλγόριθμος εκχωρεί ένα κανάλι στη ραδιοσυχνότητα λήψης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές στο κανάλι λήψης, ενώ παράλληλα οι κόμβοι ελέγχουν τη ραδιοσυχνότητα μετάδοσης δυναμικά. Ο

συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων πετυχαίνεται μέσω της αποστολής μηνυμάτων ελέγχου σε όλα τα κανάλια στους γειτονικούς κόμβους.

Η χωρητικότητα ενός IEEE 802.11s WMN μονής ραδιοσυχνότητας μπορεί να περιοριστεί την παροχή QoS για δεδομένα που προέρχονται από πραγματικού χρόνου εφαρμογές. Αντίθετα, τα IEEE 802.11s WMNs πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων με τη δυνατότητα παροχής πολλαπλών συνδέσμων, υποστηρίζουν περισσότερο την παροχή QoS. Για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ένας μηχανισμός για αλλαγή των καναλιών στα IEEE 802.11s WMNs. Ένας νέος ημί - κεντρικός μηχανισμός για αλλαγή καναλιών προτείνεται στο [19]. Όταν υπάρχει ένας κεντρικός μηχανισμός για τη διαδικασία αλλαγής των καναλιών, τότε όταν ένας πλεγματοκός σταθμός επιθυμεί να αλλάξει κανάλι, πρέπει να στείλει ένα αίτημα για αλλαγή καναλιού (CS) στους πλεγματοκούς σταθμούς με τους οποίους σχετίζεται. Όταν υπάρχει μόνο ένας πλεγματοκός σταθμός, τότε όλα τα μεμονωμένα αιτήματα για αλλαγή καναλιού μαζεύονται σε ένα συλλογικό αίτημα αλλαγής καναλιού (collective CS request - CCSR) και στέλνονται στον πιο κοντινό πλεγματοκό σταθμό που είναι υπεύθυνος για την προώθηση των αιτημάτων στον επόμενο πλεγματοκό σταθμό που προσδιορίζεται στο CCSR. Έπειτα, μεταδίδονται CSAs ώστε να ενημερωθούν οι πλεγματοκοί σταθμοί για τις πιθανές διακοπές των συνδέσμων λόγω της διαδικασίας αλλαγής καναλιών. Όταν σταλούν επιβεβαιώσεις για όλα τα CSAs, τότε δημιουργείται ένα πρόγραμμα για την αλλαγή των καναλιών. Άρα, με το συγκεκριμένο μηχανισμό αλλαγής καναλιών, ένας πλεγματοκός σταθμός μπορεί να μεταβεί σε ένα νέο κανάλι λειτουργίας, πολλοί πλεγματοκοί σταθμοί να συγχωνευτούν σε ένα κανάλι και τέλος, πολλοί πλεγματοκοί σταθμοί να μεταβούν σε διαφορετικά κανάλια. Με την ύπαρξη των CCSR, επιτυγχάνεται μείωση της καθυστέρησης αφού η αλλαγή καναλιών γίνεται αμέσως μετά τη λήψη επιβεβαίωσης για όλα τα CSAs. Τέλος, με την ύπαρξη του CCSR μειώνονται και τα CSAs που χρειάζονται για να ενημερωθούν οι πλεγματοκοί σταθμοί για την αλλαγή των καναλιών και συνεπώς, η διαδικασία αλλαγής καναλιών γίνεται με αξιοπιστία κι αποτελεσματικότητα.

2.10.7 Διαχείριση Ενέργειας στα WMNs

Η διαχείριση της ενέργειας μπορεί να επηρεάσει την κάλυψη του δικτύου, τη ρυθμιζόμενη, την από άκρη σε άκρη (end – to – end) καθυστέρηση και τη δρομολόγηση [20]. Με την αύξηση της ισχύος ενισχύεται το λαμβανόμενο σήμα κι η κάλυψη του δικτύου. Παράλληλα όμως, ενισχύονται κι οι παρεμβολές.

Μία πρωτότυπη έρευνα που αναπτύχθηκε πάνω στα IEEE 802.11s WMNs, διατυπώνει το πρόβλημα της διαχείρισης της ενέργειας σε μία στρατηγική συνεργατικού παιχνιδιού (Cooperative Game Strategy). Τα σημεία πρόσβασης της τοπολογίας αποκτούν μία κατάταξη βάσει της συμφόρησης, του αριθμού των βημάτων που απέχουν από την πύλη και του δείκτη SINR. Ο στόχος της στρατηγικής του παιχνιδιού είναι η μεγιστοποίηση του μέσου όρου της ταχύτητας των δεδομένων του χρήστη στο δίκτυο. Η διαχείριση της ενέργειας κατηγοριοποιείται σε:

- 1) σύνδεσμο ανόδου ή σύνδεσμο καθόδου
- 2) συνεργατική ή μη – συνεργατική
- 3) κεντρική ή κατανεμημένη
- 4) κλειστού ή ανοιχτού βρόχου
- 5) συνδυασμός αυτών.

Η μελέτη σε αυτή την έρευνα έγινε πάνω σε σύνδεσμο καθόδου, συνεργατική κι ανοικτού βρόχου διαχείριση ενέργειας. Κάθε σημείο πρόσβασης έχει μία αρχική κατάταξη σύμφωνα με την ισχύ μετάδοσής του. Επίσης, κάθε σημείο πρόσβασης διατηρεί ένα πίνακα κατάταξης όλων των σημείων πρόσβασης της τοπολογίας. Έτσι, όταν ένα σημείο πρόσβασης αντιληφθεί ότι είναι το πρώτο στην κατάταξη, μειώνει το επίπεδο ισχύος του κατά 2db. Η μείωση της ισχύος παραλείπεται σε περιπτώσεις που μπορεί να οδηγήσει σε απομόνωση του σημείου πρόσβασης κι επομένως σε προβλήματα συνδεσιμότητας του δικτύου. Σύμφωνα με την προτεινόμενη λειτουργία κατάταξης, εκχωρείται σε κάθε σημείο πρόσβασης ένας αριθμός κατάταξης. Το σημείο πρόσβασης με το μεγαλύτερο αριθμό κατάταξης μειώνει, όπως

αναφέρθηκε και παραπάνω, το επίπεδο ισχύος του κατά 2dB. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μερικές φορές και στο τέλος, σε κάθε σημείο πρόσβασης θα έχει εκχωρηθεί το ελάχιστο επίπεδο ισχύος που μπορεί να υποστηρίξει.

Η επικοινωνία μεταξύ πελατών σε ένα WMNs γίνεται μέσω των πλεγματοκτικών σταθμών που παρέχουν υπηρεσίες δικτύωσης πολλαπλών βημάτων για λογαριασμό των πελατών με τους οποίους συνδέονται. Συνήθως, οι πελάτες είναι κινητοί κόμβοι, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τους πλεγματοκτικούς σταθμούς για την ορθή δρομολόγηση της κίνησης και την αποφυγή πακέτων που χάνονται. Ένα ανοικτό ζήτημα πάνω στα IEEE 802.11s WMNs αποτελεί η έλλειψη ενός μηχανισμού διαχείρισης κινητικότητας. Στο [21] παρουσιάζεται ένα σύστημα διαχείρισης της κινητικότητας των κληρονόμων πελατών που χρησιμοποιεί πρότυπα του IEEE 802.11s προτύπου για τον εντοπισμό της κίνησης των κληρονόμων πελατών και τη διάδοση σωστών πληροφοριών μεσολάβησης. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση που ένας κληρονόμος πελάτης μετακινηθεί από ένα πλεγματοκτικό σταθμό σε ένα άλλο πλεγματοκτικό σταθμό μέσα στο ίδιο δίκτυο, ο νέος πλεγματοκτικός σταθμός ενημερώνει τον προηγούμενο για την κίνηση του κληρονόμου πελάτη. Κάθε πλεγματοκτικός σταθμός ενημερώνει περιοδικά τους γειτονικούς πλεγματοκτικούς σταθμούς για τις πληροφορίες μεσολάβησης των κληρονόμων πελατών, που είναι συσχετισμένοι με τον ίδιο. Έτσι, όταν ένας νέος κληρονόμος πελάτης συνδέεται με ένα πλεγματοκτικό σταθμό, τότε ο πλεγματοκτικός σταθμός μπορεί να καθορίσει, βάσει των πληροφοριών μεσολάβησης που έχει λάβει, αν ο κληρονόμος πελάτης έχει μετακινηθεί ή όχι από άλλο πλεγματοκτικό σταθμό. Στην περίπτωση που ο κληρονόμος πελάτης έχει μετακινηθεί από άλλο πλεγματοκτικό σταθμό εντός του δικτύου, ο νέος πλεγματοκτικός σταθμός στέλνει αμέσως ένα PXU στον προηγούμενο πλεγματοκτικό σταθμό για να τον ενημερώσει για την κίνηση του κληρονόμου πελάτη.

2.10.8 Κινητικότητα – Φορητότητα στα WMNs

Στην εργασία [22] οι συγγραφείς ασχολούνται με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός IEEE 802.11s WMN κι αναπτύσσουν μία επέκταση λογισμικού για εμπορικά off-the-shelf WLAN chipsets. Για τη βελτίωση της φορητότητας του IEEE 802.11s πακέτου λογισμικού απαιτείται ένα νέο μοντέλο. Το σχέδιο που προτείνεται σε αυτή τη μελέτη, ξεχωρίζει τις λειτουργίες ανεξαρτήτως πλατφόρμας από τον πυρήνα και τις υλοποιεί ως ένα daemon πρόγραμμα σε Linux που ονομάζεται daemon επιλογής μονοπατιού. Με αυτό τον τρόπο, απλοποιείται η ανάπτυξη των αλγορίθμων του HWMP και παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία στην αλλαγή των αλγορίθμων δρομολόγησης. Επίσης, ο daemon επιλογής μονοπατιού βελτιώνει τη σταθερότητα του συστήματος αφού μειώνει την πιθανότητα κατάρρευσης του πυρήνα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του συστήματος. Μερικές κρίσιμες συναρτήσεις υλοποιούνται στον πυρήνα και ενσωματώνονται στον IEEE 802.11 driver. Τα modules που ενσωματώνονται αφορούν στην ακολουθία εκκίνησης, την προώθηση των δεδομένων και το χειριστή των πλαισίων δράσης (action frame handler). Τέλος, ο daemon ενημερώνει τους πίνακες δρομολόγησης, συμπεριλαμβανομένων του πίνακα επιλογής μονοπατιού και του πίνακα πληροφοριών μεσολάβησης, στον πυρήνα και παρέχει τα αντίστοιχα πλαίσια ελέγχου στους γείτονές του μέσω του χειριστή των πλαισίων δράσης.

Έχουν γίνει πολλά συστήματα δοκιμών πάνω σε IEEE 802.11s WMNs. Τα συστήματα δοκιμών μπορεί να είναι είτε εργαστηριακά είτε σε κάποιο πεδίο, κυρίως υπαίθριο. Έχει αναπτυχθεί ένας συνδυασμός από μεθόδους ανάπτυξης στο εργαστήριο και συστήματα δοκιμών εσωτερικού πεδίου με σκοπό τη δημιουργία οδηγιών για την ανάπτυξη εσωτερικών IEEE 802.11s WMNs [23]. Αρχικά, έγιναν προσομοιώσεις σε περιβάλλον εργαστηρίου για να αξιολογηθούν οι ικανότητες του δικτύου κι η απόδοσή του. Σε δεύτερη φάση, δημιούργησαν ένα περιβάλλον που αποτελείται από εννέα πλεγματοκτικούς κόμβους σε ένα τρία – επί – τρία πλέγμα σε τρεις ορόφους. Με αυτή την έρευνα καθορίζουν το ρεύμα κίνησης που μεταδίδεται από την πλεγματοκτική πύλη (MPP) στο πλεγματοκτικό σημείο πρόσβασης (MAP) ως κίνηση συνδέσμου καθόδου. Τόσο για τα εργαστηριακά, όσο και για τα εσωτερικά συστήματα δοκιμών, εξέτασαν τα αποτελέσματα σε σχέση με διαμορφώσεις πάνω στο RTS/CTS, στο 802.11 PHY και στο beacon interval. Από αυτά τα αποτελέσματα προκύπτουν οι παρακάτω οδηγίες - συμβουλές για την ανάπτυξη των IEEE 802.11s WMNs σε εσωτερικό χώρο:

- 1) Ενεργοποίηση του μηχανισμού RTS/CTS σε εσωτερικό χώρο.
- 2) Προτείνεται το 802.11n για πολλαπλές - ροές, πολλαπλά – βήματα (multi – flow, multi – hop).
- 3) Παίζει σημαντικό ρόλο το beacon interval.
- 4) Οι σταθεροί ρυθμοί δε βοηθούν.
- 5) Η συμφόρηση είναι η κατάσταση του καναλιού.
- 6) Ο αριθμός των βημάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα τέσσερα.
- 7) Το μέγεθος του πλέγματος καθορίζεται από τη χωρητικότητα του MPP και το μέγιστο αριθμό των βημάτων.
- 8) Οι συνδέσεις μεταξύ ορόφων είναι ασταθείς.
- 9) Η γωνία κι η κατεύθυνση του ζεύγους κεραιών είναι κρίσιμες.
- 10) Αποφυγή των συνδέσμων με ασύμμετρες Received Signal Strength (RSS) τιμές.

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του IEEE 802.11s είναι ότι το ασύρματο πλεγματοεικό δίκτυο υλοποιείται στο επίπεδο δύο της στοιβάς, δηλαδή στηρίζεται στις MAC διευθύνσεις κι όχι στις IP διευθύνσεις. Έτσι, είναι εφικτός ο σχεδιασμός κι η ανάπτυξη ανεξαρτήτως CPU (CPU - free) συσκευές δικτύου που να παρέχουν επιπέδου δύο, πολλαπλών βημάτων επικοινωνία. Μέσω πραγματικών συστημάτων δοκιμών, στο [24] παρέχεται μία λεπτομερής ανάλυση της 802.11s κίνησης με ιδιαίτερη έμφαση στη διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού δρομολόγησης. Όταν μία κάρτα δικτύου έχει τη δυνατότητα να προωθεί κίνηση σε ένα ασύρματο πλεγματοεικό δίκτυο χωρίς να χρειάζεται να περάσει από όλη την TCP/IP στοιβά, τότε μπορούν να υλοποιηθούν νέες λύσεις. Οι επιλογές που γίνονται πάνω σε θέματα σχεδιασμού του δικτύου επηρεάζουν την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία των ασύρματων πλεγματοεικών δικτύων.

Ακόμα ένα πραγματικό σύστημα δοκιμής πάνω σε IEEE 802.11s ερευνήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση των επιδόσεων της συγκεκριμένης τεχνολογίας για χρήση σε πανεπιστημιούπολη [25]. Μία πανεπιστημιούπολη είναι, συνήθως, ένας μεγάλης έκτασης χώρος με πολλούς διάσπαρτους χώρους. Σε αυτούς τους απομονωμένους χώρους, η μόνη επιλογή για σύνδεση στο διαδίκτυο ήταν το ADSL. Τα παραδοσιακά ασύρματα συστήματα παρέχουν συνδεσιμότητα μέσω σημείων πρόσβασης που πρέπει να είναι συνδεδεμένα στο ενσύρματο δίκτυο και να διατίθενται μεταγωγείς. Για τους παραπάνω λόγους, η δημιουργία ενός ασύρματου πλεγματοεικού δικτύου χωρίς την ανάγκη καλωδίωσης ήταν μία πρόκληση. Η πλεγματοεική δικτύωση έγινε με Ορίνοσο πλεγματοεικά σημεία πρόσβασης που υποστηρίζουν δομημένη πλεγματοεική δικτύωση. Τα σημεία πρόσβασης χρησιμοποιούν το ORiNOCO Mesh Creation Protocol (OMCP) [25] για τη δημιουργία του ασύρματου πλεγματοεικού δικτύου και τον καθορισμό των μονοπατιών δρομολόγησης λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο της κίνησης, την ταχύτητα του συνδέσμου, την ισχύ του σήματος, των αριθμών των βημάτων κι άλλες παραμέτρους. Το ασύρματο πλεγματοεικό δίκτυο που αναπτύχθηκε, μπορεί να εφαρμοστεί και για ασύρματη παρακολούθηση βίντεο σε κοντινές πόλεις και ασύρματα δίκτυα με εμβέλεια μίας πόλης.

2.10.9 Διαλειτουργικότητα

Ένα χαρακτηριστικό των WMNs αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να συνδέσουν πολλά ετερογενή δίκτυα, όπως Wi-Fi, Wi-Max, κυψελωτά δίκτυα, δίκτυα αισθητήρων κι άλλα. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα που σημαίνει ότι πρέπει να αναπτυχθούν διάφοροι μηχανισμοί που να κάνουν ομαλή τη διασυνεργασία μεταξύ των διαφορετικών δικτύων. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος που αναγνωρίζει τους τύπους των πλαισίων σε ένα ετερογενές σύστημα κι ένας αλγόριθμος για τη μετατροπή των IEEE 802.11 πλαισίων σε IEEE 802.11s. Στον Πίνακα 2 φαίνεται η δομή ενός IEEE 802.11 πλαισίου.

Πίνακας 2: Μορφή IEEE 802.11 Πλαισίου

Octates:2					2		2	- 2312	0
-----------	--	--	--	--	---	--	---	--------	---

Frame Control	ur	Add 1	Add 2	Add 3	Seq Control	Add 4	QoS Control	Payload	CS
---------------	----	-------	-------	-------	-------------	-------	-------------	---------	----

Συγκεκριμένα, έχει προταθεί ένας αλγόριθμος στην FPGA πλατφόρμα που μετατρέπει τα IEEE 802.11 πλαίσια σε IEEE 802.11s πλαίσια και εφαρμόζεται στα πλεγματικά σημεία πρόσβασης [26]. Η μορφή ενός IEEE 802.11s πλαισίου φαίνεται στην Εικόνα 9. Όταν ένα πακέτο φτάνει στο πλεγματικό σημείο πρόσβασης και διαπιστωθεί ότι προέρχεται από κάποιο σταθμό εκτός του ασύρματου πλεγματικού δικτύου, τότε κάνει χρήση τριών modules για τον προσδιορισμό του πλαισίου, την αποκωδικοποίηση διεύθυνσης και τη μετατροπή των πλαισίων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ο ανιχνευτής πλαισίων που ελέγχει αν το ληφθέν πλαίσιο προέρχεται από το πλεγματικό δίκτυο ή εκτός αυτού. Μετά την αποκωδικοποίηση της MAC επικεφαλίδας, και τον προσδιορισμό της διεύθυνσης προορισμού, τα αντίστοιχα σήματα ελέγχου λαμβάνονται από τον μετατροπέα των πλαισίων για περαιτέρω επεξεργασία. Αν το πλαίσιο έχει διεύθυνση πηγής ή διεύθυνση προορισμού που ανήκει στο πλεγματικό δίκτυο τότε περνάει στο υπό – επίπεδο MAC. Αν όμως το πλαίσιο προέρχεται από ετερογενές δίκτυο με διεύθυνση προορισμού μέσα στο πλεγματικό δίκτυο, τότε περνάει πρώτα από τον προτεινόμενο αλγόριθμο για τη μετατροπή σε IEEE 802.11s πλαίσιο κι έπειτα στο υπό – επίπεδο MAC. Στην περίπτωση που το πλαίσιο προέρχεται από εξωτερικό δίκτυο και προορίζεται επίσης σε εξωτερικό δίκτυο, τότε περνάει κατευθείαν στο Wi – Fi Network Register. Τέλος, το Module για τη διαθεσιμότητα του καναλιού επαληθεύει τη διαθεσιμότητα του μέσου στέλνοντας το σήμα του Φυσικού Επιπέδου και την τιμή του Network Allocation Vector (NAV). Το Module για τη μετάδοση των πλαισίων στέλνει το πλαίσιο αν το κανάλι δεν είναι κατειλημμένο αλλιώς περιμένει για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προτού στείλει το πλαίσιο. Οι παραπάνω έρευνες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3: Έργασίες πάνω σε IEEE 802.11s WMNs

Πεδίο Εφαρμογής	Όνομασία Προτεινόμενου Σχήματος	Προτεινόμενη Λύση - Χαρακτηριστικά
Αρχιτεκτονική WMNs	Πλεγματική Πανεπιστημιούπολη	Εύκολη παρακολούθηση και διαχείριση του δικτύου.
	Πλεγματικό Κέντρο Πόλης	Κινητικότητα κόμβων και δυσκολία συντονισμού μεταξύ των διαφορετικών παρόχων.
	Πλεγματικό Δίκτυο Μεγάλων Αποστάσεων	Χρήση μονοκατευθυντικών κεραιών κι εφεδρικών κόμβων. Χαμηλό κόστος υποδομών.
Αλγόριθμοι	Αξιολόγηση της proactive λειτουργίας του HWMP σε δύο διαφορετικές τοπολογίες (Grid και Waxman)	Αξιολόγηση βάσει της μέσης συνολικής ρυθμιζόμενης, του μέσου συνολικού Packet Delivery Fraction και της μέσης συνολικής καθυστέρησης. Καθορισμός της βέλτιστης τιμής του interval.
	Πρωτόκολλο δρομολόγησης για multi-channel and multi-interface (MIMC) συστήματα	Επιλογή Μονοπατιού βάσει της ποικιλομορφίας του καναλιού και μείωση μηνυμάτων ελέγχου.
	Sector – HWMP	Μείωση της επιβάρυνσης με χρήση κατευθυντικών κεραιών.
	Αντιμετώπιση διακυμάνσεων μονοπατιού δρομολόγησης σε Smart Grid περιβάλλοντα	Υπολογισμός του λόγου λάθους για κάθε κόμβο για τη μετρική του HWMP και υπολογισμός μετρικής για προηγούμενα επιλεγμένα μονοπάτια.
	Αλγόριθμος επιλογής μονοπατιού βάσει της	Εξισορρόπηση ενέργειας με χρήση διαφορετικών μονοπατιών που έχουν

Δρομολόγησης	ενεργειακής βελτιστοποίησης	επιλεχθεί από το HWMP σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
	Κατανομημένο πρωτόκολλο επιλογής μονοπατιού βάσει των παρεμβολών	Υπολογισμός του δείκτη SINR κι ενσωμάτωση αυτής της πληροφορίας στα στοιχεία του HWMP.
	Multi-Gateway Routing with Congestion Avoidance (MGR-CA)	Κάθε κόμβος διατηρεί τέσσερις ουρές αναμονής με προτεραιότητα και υπολογίζει το Path Congestion Level (PCL) για εξαγωγή του επιπέδου συμφόρησης κι ένταξή του στο RANN στοιχείο.
	MHWMP	Τροποποίηση του HWMP για επιλογή μεταξύ της χωρικής πολυπλεξίας και της διαμόρφωσης σε δέσμη για τη μετάδοση των δεδομένων με χρήση δύο επιπλέον πινάκων.
Πρόσβαση στο Μέσο	Enhanced Mesh Coordinated Channel Access (eMCCA)	Πρόσβαση κατά Προτεραιότητα για τους κατόχους MCCAOP βάσει του MCCA inter frame space (MIFS) και preemption time για περιορισμό των μη – MCCA κόμβων.
	Multi-hop Reservation Protocol (MRP)	Δημιουργία κρατήσεων κατά μήκος του μονοπατιού που έχει επιλεχθεί από το HWMP κι έλεγχος αλλαγών μονοπατιού.
Εκχώρηση Καναλιών	<p>1) Breath First Search Channel Assignment (BFSCA),</p> <p>2) Urban-X και</p> <p>3) Semi-dynamic Interference aware Channel Assignment (SICA)</p>	<p>1) Ύπαρξη κόμβου – συντονιστή που εκχωρεί τα κανάλια βάσει των παρεμβολών, το ποσοστό των δεδομένων και τον αριθμό των συσκευών που χρησιμοποιούν το κανάλι.</p> <p>2) Ποσότητα των δεδομένων κάθε κόμβου κι εκτιμώμενη εξωτερική παρεμβολή στα κανάλια.</p> <p>3) Ένα κανάλι στη ραδιοσυχνότητα λήψης, οι κόμβοι ελέγχουν τη ραδιοσυχνότητα μετάδοσης δυναμικά. Συγχρονισμός μέσω μηνυμάτων ελέγχου.</p>
Αλλαγή Καναλιών	Ημί - κεντρικός μηχανισμός για αλλαγή καναλιών	Χρήση του συλλογικού αιτήματος αλλαγής καναλιού CCSR και των CSAs για ενημέρωση των κόμβων.
Διαχείριση Ενέργειας	Διαχείριση της Ενέργειας σε Cooperative Game Strategy	Κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα κατάταξης όλων των κόμβων του δικτύου βάσει της συμφόρησης, του αριθμού των βημάτων από την πύλη και του δείκτη SINR κι αναλόγως μειώνουν την ισχύ που εκπέμπουν.
Διαχείριση Κινητικότητας	Μηχανισμός Διαχείρισης Κινητικότητας	Προσδιορίζεται αν ο πλεγματικός σταθμός προέρχεται ή όχι από το ίδιο δίκτυο κι ο τρέχον σταθμός ενημερώνει τον προηγούμενο για την αλλαγή.

Συστήματα Δοκιμών	Σχεδιασμός κι ανάπτυξη ενός IEEE 802.11s δικτύου σε σύστημα δοκιμών	Επέκταση λογισμικού για εμπορικά WLAN chipsets.
	Προσομοίωση δικτύου IEEE 802.11s σε εργαστήριο και σε εσωτερικό χώρο	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων βάσει ρυθμίσεων στο RTS/CTS, στο 802.11 PHY και στο beacon interval.
	Ανάλυση 802.11s κίνησης για τη διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού δρομολόγησης	Ανάλυση πραγματικής πολλαπλών βημάτων MAC κίνησης και παρουσίαση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της επιπέδου δύο προσέγγισης σε σύγκριση με την επιπέδου τρία προσέγγιση.
	Αξιολόγηση της IEEE 802.11s τεχνολογίας για χρήση σε πανεπιστημιούπολη	ORiNOCO Mesh Creation Protocol (OMCP) δρομολόγηση βάσει του φορτίου κίνησης, την ταχύτητα του συνδέσμου, την ισχύ του σήματος, των αριθμών των βημάτων κ.α.
Διαλειτουργικότητα	Ετερογενή IEEE 802.11s Based Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα	Αναγνώριση πλαισίων και μετατροπή IEEE 802.11 πλαισίων σε IEEE 802.11s πλαίσια.

2.11 Εφαρμογές του IEEE 802.11s

2.11.1 Το έργο One Laptop Per Child (OLPC)

Το OLPC έργο [27] αναπτύχθηκε από το ίδρυμα OLPC (OLPC Foundation). Ο φορητός υπολογιστής XO έχει ως στόχο να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο εκμάθησης για παιδιά που ζουν σε αναπτυσσόμενες χώρες. Ο XO φορητός υπολογιστής έχει ενσωματωμένο το WLAN κι εφαρμόζεται το 802.11s. Παραλείπει, όμως, μερικές λειτουργίες του 802.11s, όπως η κρυπτογράφηση κι η proactive δρομολόγηση. Το πλέγμα του OLPC δεν εφαρμόζει κανένα μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης. Κάθε κόμβος μπορεί να λαμβάνει και να προωθεί δεδομένα από / προς οποιονδήποτε άλλο πλεγματικό κόμβο, αποφεύγοντας έτσι μία πιθανή κατάτμηση του δικτύου που θα μπορούσε να προκληθεί από ασύμβατα κριτήρια πρόσβασης. Η πλεγματική στοίβα πρωτοκόλλου είναι ενσωματωμένη στην κάρτα ασύρματου δικτύου. Έτσι, ολόκληρος ο 802.11s κώδικας μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα από τη CPU. Με αυτό τον τρόπο, ο XO φορητός υπολογιστής λειτουργεί ως πλεγματικός σταθμός, ακόμα κι όταν βρίσκεται σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας. Δηλαδή, ο XO φορητός υπολογιστής που βρίσκεται σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, δε θα επηρεάσει αρνητικά άλλους μαθητές που στηρίζονται στην παροχή συνδεσιμότητας στο Διαδίκτυο μόνο από αυτό το φορητό υπολογιστή. Οι XO φορητοί υπολογιστές εφαρμόζουν μόνο την κατόπιν αιτήματος λειτουργία δρομολόγησης λόγω της κατανεμημένης φύσης τους. Το OLPC έργο έχει διαθέσει πάνω από 1.2 εκατομμύρια XO φορητούς υπολογιστές σε όλο τον κόσμο.

2.11.2 open80211s

Το open80211s [28] είναι μία εφαρμογή του IEEE 802.11s στο Linux λειτουργικό σύστημα. Εφόσον το IEEE 802.11s εισάγει ελάχιστες αλλαγές στο επίπεδο MAC, η 802.11s στοίβα μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν πλήρως στο λογισμικό και να το κάνει να τρέξει σε κληρονόμους 802.11 κάρτες. Η 802.11s στοίβα αποτελεί μέρος του πυρήνα του Linux από την έκδοση 2.6.26, τον Ιούλιο του 2008. Ο στόχος του open80211s έργου είναι να παρακολουθεί συνεχώς το IEEE 802.11s Πρότυπο και να υποστηρίζει τη διαλειτουργικότητα των διαφορετικών 802.11s υλοποιήσεων. Η διαθεσιμότητα του πηγαίου κώδικα βοηθάει στον εντοπισμό και την επίλυση σχεδιαστικών προβλημάτων. Πριν από κάθε έκδοση λαμβάνονται μετρήσεις απόδοσης. Χωρίς

μηχανισμούς επιλογής μονοπατιών εμφανίζονται μη ιδανικά μήκη μονοπατιού ή ανεπιθύμητες αυξήσεις του μήκους του μονοπατιού. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται στο IEEE 802.11s επιλύει μονοπάτια που περιορίζονται μόνο σε ένα ή δύο βήματα μακριά.

2.11.3 Meraki

Στόχος του έργου Meraki [29] είναι να κάνει το Διαδίκτυο προσιτό για τους επόμενους δισεκατομμύρια ανθρώπους. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει υλικό και λογισμικό (hardware - software) που βοηθούν μεμονωμένα άτομα, κοινότητες ή άλλους οργανισμούς να αναπτύξουν μόνοι τους το δικό τους ασύρματο πλεγματο δίκτυο παρέχοντας μία φτηνή λύση για να μοιράζονται ευρυζωνικές συνδέσεις. Το Meraki δεν προσπαθεί να χτίσει μία παγκόσμια ομοσπονδιακή ευρυζωνική υποδομή. Οι στόχοι του είναι να αντιμετωπίσει τις ανάγκες των αγορών παγκοσμίως προτρέποντας τις κοινότητες να αναπτύξουν τις δικές τους ευρυζωνικές υποδομές σε χαμηλό κόστος και με απλή τεχνολογία. Τα δίκτυα του είναι λειτουργικά σε περισσότερες από 100 χώρες. Τα δίκτυα χτίζονται χρησιμοποιώντας υλικό του έργου, το οποίο συνδέεται αυτόματα στους εξυπηρετητές του έργου Meraki για τη διαχείριση του δικτύου. Τα δίκτυα του Meraki είναι σχεδιασμένα να κατανέμουν τα ασύρματα σήματα μέσα σε κτίρια, παρέχοντας συνδεσιμότητα σε ανθρώπους στο σπίτι τους κι όχι έξω σε hotspots. Το κύριο χαρακτηριστικό του Meraki πλεγματο δίκτυου είναι ότι μία σύνδεση διαδικτύου είναι κατανομημένη μέσα σε μία γεωγραφική περιοχή από ένα σύνολο επαναληπτών. Αυτοί οι επαναλήπτες συνδέονται αυτόματα μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο. Αυτό το δίκτυο έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζεται μόνο του όταν προστίθενται ή όταν αφαιρούνται επαναλήπτες. Ένας από αυτούς τους επαναλήπτες πρέπει να είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο ώστε να μεταδίδεται το σήμα και στους υπολοίπους που σχηματίζουν το πλεγματο δίκτυο κι επομένως να αποκτούν κι αυτοί συνδεσιμότητα. Η έκταση του δικτύου μπορεί να αυξάνεται καθώς προστίθενται νέοι επαναλήπτες στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 3

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι αδυναμίες της παραδοσιακής πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής κι ο σχεδιασμός Cross Layer. Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα του Cross Layer σχεδιασμού και διάφορες μεθοδολογίες ανάπτυξής του. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, περιγράφονται οι δύο μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται από το Πρότυπο IEEE 802.11s για παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS). Τέλος, το κεφάλαιο αυτό παρέχει μία επισκόπηση των ερευνών που έχουν γίνει από την ερευνητική κοινότητα πάνω σε θέματα Cross Layer Design για παροχή QoS σε WMNs, συμπεριλαμβανομένων και των μετρικών που έχουν υλοποιηθεί για τα WMNs.

3.1 Cross Layer Design Overview

Η παραδοσιακή – συμβατική πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων αντιμετωπίζει κάθε επίπεδο μεμονωμένα κι έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- 1) Η πληροφορία που περνάει μεταξύ των επιπέδων είναι περιορισμένη λόγω της ανεξαρτησίας του κάθε επιπέδου.
- 2) Πρωτόκολλα που ανήκουν σε ένα επίπεδο μπορούν να αλλάξουν ή να καταργηθούν χωρίς αυτό να έχει κάποια επιρροή στα υπόλοιπα επίπεδα.
- 3) Βοηθάει στην καλύτερη ανάπτυξη κι αντιμετώπιση σφαλμάτων των πρωτοκόλλων σε κάθε επίπεδο.

Τα μειονεκτήματα της κλασσικής πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής είναι

- 1) Η επιβάρυνση του δικτύου
- 2) Η χαμηλή ενεργειακή απόδοση
- 3) Η έλλειψη ενός μηχανισμού για βελτιστοποίηση της απόδοσης μεταξύ πρωτοκόλλων διαφορετικών επιπέδων.

Ιδιαίτερα στα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα, η παραπάνω αρχιτεκτονική δεν επιτυγχάνει μέγιστη απόδοση. Για το λόγο αυτό προέκυψε η ανάγκη για ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών. Cross layer design αποτελεί μία νέα αρχιτεκτονική και μπορεί να πετύχει βέλτιστη απόδοση δικτύου με την ανάπτυξη πρωτοκόλλων που λαμβάνουν χαρακτηριστικά από διαφορετικά επίπεδα.

Παρακάτω ακολουθούν μερικοί λόγοι που δείχνουν την αναγκαιότητα για την ανάπτυξη cross layer design σε WMNs [30]:

- 1) Έχουν αναπτυχθεί πολλές προηγμένες τεχνολογίες φυσικού επιπέδου για τα WMNs ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν διάφορες εφαρμογές. Αναφορικά, κάποιες από αυτές είναι οι παρακάτω: α) Multirate - τεχνολογία μετάδοσης, β) προηγμένη τεχνολογία κεραιών, γ) τεχνολογία πολλαπλών καναλιών – πολλαπλών radios. Όλες αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να έχουν καλύτερη επίδοση αν συνδυαστούν με πρωτόκολλα άλλων επιπέδων.
- 2) Το επίπεδο πρόσβασης δεδομένων είναι, ίσως, το σημαντικότερο επίπεδο για τα ασύρματα δίκτυα. Λόγω του γεγονότος ότι ο αέρας αποτελεί το μέσο μετάδοσης της πληροφορίας, είναι δύσκολη η ανάπτυξη ενός βέλτιστου πρωτοκόλλου για το επίπεδο πρόσβασης (MAC). Ιδιαίτερα για τα WMNs, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η ενσωμάτωση της διαδικασίας δρομολόγησης στο MAC κι η αποδοτική εφαρμογή της.
- 3) Τα WMNs υποστηρίζουν πολλές διαφορετικές υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες αυτές έχουν διαφορετικούς τύπους κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και διαφορετικές απαιτήσεις.

3.2 Μεθοδολογίες Ανάπτυξης Cross Layer Design

Στις χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές Cross Layer εξετάζεται ανεξάρτητα ένα πρωτόκολλο ενός επιπέδου λαμβάνοντας, όμως, υπόψη παραμέτρους από πρωτόκολλα άλλων επιπέδων. Πληροφορίες από πολλαπλά επίπεδα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα επίπεδο για να εφαρμοστεί το Cross Layer Design. Οι πληροφορίες των άλλων επιπέδων λειτουργούν ακριβώς σαν μία παράμετρος ενός αλγορίθμου σε ένα επίπεδο. Η απόδοση, όμως, αυτού του αλγορίθμου βελτιώνεται λόγω του ότι χρησιμοποιείται μία πιο ακριβής κι αξιόπιστη παράμετρος. Η αλλαγή της παραμέτρου που χρησιμοποιείται δεν προβλέπει και τροποποίηση στον ίδιο τον αλγόριθμο. Σύμφωνα όμως με μία άλλη μέθοδο που χρησιμοποιείται, οι πληροφορίες που προέρχονται από πολλαπλά επίπεδα χρησιμοποιούνται από αλγορίθμους ενός πρωτοκόλλου που πρέπει να υποστεί τροποποιήσεις. Η αρχιτεκτονική αυτή δεν εγκαταλείπει πλήρως τη διαφάνεια μεταξύ των επιπέδων.

Στις στενά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές Cross Layer, η ανταλλαγή πληροφοριών μέσω πολλαπλών επιπέδων δεν είναι αρκετή. Οι αλγόριθμοι από διαφορετικά επίπεδα βελτιστοποιούνται συνολικά. Μία ακραία περίπτωση αυτής της αρχιτεκτονικής αποτελεί η συγχώνευση πολλαπλών επιπέδων σε ένα, η οποία περιορίζει την επιβάρυνση που προκαλείται από την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων.

Για την επίτευξη καλύτερης απόδοσης δικτύου σε ασύρματα πλεγμικά δίκτυα υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί Cross layer [31]. Ένας από αυτούς είναι η συλλογή πληροφοριών επιπέδου MAC από το πρωτόκολλο δρομολόγησης για τον καθορισμό του καλύτερου μονοπατιού δρομολόγησης πακέτων. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να είναι η ποιότητα του συνδέσμου (link quality), το επίπεδο των παρεμβολών (interference level) κι ο φόρτος κίνησης (traffic-load information). Ένα MAC πρωτόκολλο προσφέρει μηχανισμούς για πρόσβαση στο μέσο είτε με ανταγωνισμό (τυχαία πρόσβαση στο μέσο) είτε χωρίς ανταγωνισμό (ελεγχόμενη πρόσβαση στο δίκτυο με κρατήσεις). Η πρώτη κατηγορία πρωτοκόλλων στερείται απόδοσης και μπορεί να μειώσει ακόμα περισσότερο τη συνολική απόδοση του συστήματος όταν εφαρμοστεί ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που δε λαμβάνει υπόψη του πληροφορίες επιπέδου MAC για τη δημιουργία των μονοπατιών δρομολόγησης. Μία λύση στο παραπάνω πρόβλημα αποτελεί το IEEE 802.11e hybrid channel-access control, που περιλαμβάνει ένα μηχανισμό για προγραμματισμό και κράτηση. Στη δεύτερη κατηγορία πρωτοκόλλων λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί όπως QoS, οι παρεμβολές κι η τοπολογία του δικτύου, που είναι όλα συσχετισμένα με ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης. Δηλαδή, τα μονοπάτια δρομολόγησης κι η κατανομή των πόρων καθορίζονται στον ίδιο αλγόριθμο δρομολόγησης.

Ένα συνηθισμένο cross layer design μεταξύ MAC και Routing είναι αυτό που ασχολείται με την εκχώρηση των καναλιών και τη δρομολόγηση. Η εκχώρηση των καναλιών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο ασύρματο πλεγμικό δίκτυο και χωρίζεται σε δύο υποπρόβληματα. Το πρώτο υποπρόβλημα αποτελείται από την εκχώρηση των διεπαφών στους συνδέσμους ανάμεσα στους κόμβους που επικοινωνούν. Το δεύτερο υποπρόβλημα αποτελείται από την εκχώρηση των καναλιών σε διεπαφές. Στόχος των μηχανισμών εκχώρησης καναλιών αποτελεί η εκχώρηση καναλιών σε κάθε κόμβο από ένα σύνολο μη επικαλυπτόμενων καναλιών έτσι ώστε, το άθροισμα των φορτίων σε συνδέσμους που παρεμβάλλουν να ελαχιστοποιείται.

Ένας δεύτερος μηχανισμός Cross Layer Design που έχει απασχολήσει πολύ την επιστημονική κοινότητα είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων για κοινή (joint) κατανομή των καναλιών και της δρομολόγησης. Δηλαδή για τη δημιουργία του μονοπατιού δρομολόγησης, το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται λαμβάνει υπόψη του τις εκχωρήσεις των καναλιών στο πλεγμικό δίκτυο.

3.3 QoS στα IEEE 802.11s WMNs

Η Ποιότητα της Υπηρεσίας (QoS) είναι ένα σύνολο από απαιτήσεις, όπως η καθυστέρηση κι η απώλεια πακέτων, που πρέπει να πληρούνται από το δίκτυο κατά τη μεταφορά μίας συγκεκριμένης ροής δεδομένων [32]. Έχει ενσωματωθεί το IEEE 802.11e σε όλα τα IEEE 802.11 – based δίκτυα, το οποίο ενισχύει το Φυσικό και το MAC επίπεδο για την παροχή QoS.

Το IEEE 802.11s χρησιμοποιεί επίσης το IEEE 802.11e για παροχή QoS παρόλο που δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα πολλαπλών βημάτων.

Η παροχή QoS σε ασύρματα πλεγμιακά δίκτυα για τη στήριξη πραγματικού χρόνου εφαρμογών, όπως ήχου και βίντεο, αποτελεί μία μεγάλη πρόκληση λόγω της απρόβλεπτης κίνησης των κόμβων, της ασύρματης πολλαπλών βημάτων επικοινωνίας, του ανταγωνισμού για την πρόσβαση στο μέσο, της περιορισμένης μπαταρίας και της ασύρματης εμβέλειας των κινητών συσκευών και της απουσίας μίας κεντρικής μονάδας συντονισμού [1].

Για τον παραπάνω λόγο έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τους διάφορες παραμέτρους QoS. Το Q-HWMP [33] αποτελεί μία βελτίωση του HWMP που λαμβάνει υπόψη του παραμέτρους QoS για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Οι μορφοποιήσεις πάνω στο πρωτόκολλο HWMP αφορούν στη διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού και στη συντήρηση του. Αρχικά, οι υπηρεσίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- 1) Υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας (best effort service)
- 2) Υπηρεσία πραγματικού χρόνου

Για τον καθορισμό της ποιότητας του συνδέσμου χρησιμοποιούνται ο τρέχον ρυθμός μετάδοσης κι ο ρυθμός σφάλματος πλαισίου βάσει του τρέχοντα ρυθμού μετάδοσης. Οι πληροφορίες αυτές συμπεριλαμβάνονται στα πλαίσια που ενημερώνουν τους γειτονικούς κόμβους για την κατάσταση κάθε συνδέσμου. Για τη δημιουργία μονοπατιών δρομολόγησης βάσει QoS παραμέτρων, έχουν τροποποιηθεί τα στοιχεία PREQ με την προσθήκη πέντε παραπάνω πεδίων, τα οποία είναι:

- 1) Η μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης, (Delaymax)
- 2) Το QoSTag
- 3) Η επιθυμητή ρυθμαπόδοση (Lamda)
- 4) Το μέγεθος του πακέτου
- 5) Η μέγιστη μετρική για ένα μονοπάτι (MaxPathMetric)

Για το διαχωρισμό των υπηρεσιών, χρησιμοποιείται το QoSTag πεδίο που με την τιμή 1 δηλώνονται οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ενώ με την τιμή 0 οι υπηρεσίες καλύτερης προσπάθειας. Επίσης, στον πίνακα δρομολόγησης προστίθεται ένα πεδίο (QoSRouteTag) που δείχνει αν ικανοποιούνται οι QoS παράμετροι για το μονοπάτι δρομολόγησης. Όταν η υπηρεσία έχει δηλωθεί ως καλύτερης προσπάθειας, τότε το παραπάνω πεδίο παίρνει την τιμή 0 για όλα τα μονοπάτια δρομολόγησης κι η διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού δρομολόγησης είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που ορίζεται από το HWMP πρωτόκολλο. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν πρόκειται για υπηρεσία πραγματικού χρόνου, τότε ο πλεγμιακός κόμβος συγκρίνει την τιμή του πεδίου Delaymax με την εκτιμώμενη καθυστέρηση του κόμβου ενός βήματος μακριά, Delayhop. Από τα παραπάνω προκύπτουν δύο περιπτώσεις:

- 1) Αν το Delaymax είναι μεγαλύτερο από το Delayhop, τότε ο κόμβος που λαμβάνει το PREQ στοιχείο ανανεώνει τις πληροφορίες του αν πληρούνται τα κριτήρια που έχουν τεθεί από το HWMP πρωτόκολλο.
- 2) Αν το Delaymax είναι μικρότερο από το Delayhop, τότε το στοιχείο PREQ απορρίπτεται.

Το πεδίο MaxPathMetric, που αναφέρθηκε προηγουμένως, χρησιμοποιείται για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και για τη σύγκρισή του με την ποιότητα του συνδέσμου. Πιο συγκεκριμένα, ο κόμβος με τη μεγαλύτερη διεύθυνση MAC για κάθε μονοπάτι που πληροί τις παραμέτρους QoS σε αυτό το σύνδεσμο κι έχει καλύτερη τιμή μετρικής από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τότε ο κόμβος δηλώνει το σύνδεσμο ως σπασμένο κι ενημερώνει τους γείτονες με ένα στοιχείο PERR.

Σύμφωνα με προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το Q-HWMP πρωτόκολλο αυξάνει την απόδοση του HWMP μειώνοντας την από άκρη – σε – άκρη καθυστέρηση χωρίς να αυξάνει σημαντικά την επιβάρυνση.

Οι μηχανισμοί που υπάρχουν στο IEEE 802.11s για παροχή βελτιώσεων σε QoS είναι ο MCCA, για χωρίς ανταγωνισμό πρόσβαση στο μέσο και ο έλεγχος συμφόρησης εντός του πλέγματος (Intra – mesh congestion control).

3.4 Related Work

Η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης στα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα αποτελεί ένα θέμα που απασχολεί πολύ την επιστημονική κοινότητα. Για το λόγο αυτό οι έρευνες στρέφονται στη μη παραδοσιακή πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική και συγκεκριμένα στην Cross layer αρχιτεκτονική. Η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μεταξύ διαφόρων επιπέδων και στα πλεγματικά δίκτυα. Ιδιαίτερα όμως, έχουν μελετηθεί κι αναπτυχθεί πολλά πρωτόκολλα που εφαρμόζουν cross layer design μεταξύ:

- Φυσικού (PHY) και MAC επιπέδου
- MAC και Routing
- Φυσικού και Επιπέδου Μεταφοράς (Transport Layer)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται έρευνες που έχουν γίνει πάνω σε Cross layer design για τους παραπάνω συνδυασμούς.

3.4.1 Εκχώρηση Καναλιών και δρομολόγηση σε WMNs

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι υπεύθυνα για την καλύτερη κατανομή της κίνησης στο δίκτυο κι επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Η σωστή κατανομή των καναλιών παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της απόδοσης του δικτύου. Ο Υάκινθος [34] είναι ένας αλγόριθμος κοινής κατανομής καναλιών και δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία κατασκευής του δέντρου δρομολόγησης γίνεται χρησιμοποιώντας τον αριθμό των βημάτων, τη χωρητικότητα του συνδέσμου της πύλης και τη χωρητικότητα του μονοπατιού ως μετρικές. Οι μετρικές αυτές λαμβάνουν υπόψη τους το φορτίο κίνησης κατά μήκος του δέντρου για την επίτευξη της εξισορρόπησης του φορτίου. Για την εκχώρηση των καναλιών δίνεται μεγαλύτερη προτεραιότητα στους κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στη ρίζα του δέντρου. Έτσι, όταν ένας κόμβος θέλει να χρησιμοποιήσει ένα κανάλι, χρησιμοποιεί ένα κανάλι που δεν χρησιμοποιείται από γειτονικούς κόμβους με υψηλότερη προτεραιότητα. Ο Υάκινθος συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της ρυθμαπόδοσης και παρέχει γρήγορους μηχανισμούς για ανάκτηση μονοπατιών δρομολόγησης.

Τα μειονεκτήματα του παραπάνω αλγορίθμου είναι τα εξής:

- 1) Η εξάρτηση στα Spanning trees κι η αδυναμία εφαρμογής σε άλλες ροές κίνησης,
- 2) Η εξάρτηση των καναλιών στους κόμβους που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο του Spanning tree,
- 3) Μη συγκλίνουσα διαδικασία ανάθεσης καναλιών λόγω της τυχαίας κατανομής των κόμβων στο δίκτυο κι επομένως ύπαρξη παρεμβολών μεταξύ των κόμβων,
- 4) Ασυνέπεια στην εκχώρηση καναλιών και στην εξισορρόπηση φορτίου δρομολόγησης. Στη διαδικασία εκχώρηση καναλιών εκ νέου σε άλλους κόμβους στο ίδιο μονοπάτι δρομολόγησης, αλλάζουν το πραγματικό φορτίο για αυτό το μονοπάτι κι η χωρητικότητα των άλλων συνδέσμων μεταξύ κόμβων.
- 5) Το εκτιμώμενο φορτίο κίνησης δεν αντιπροσωπεύει πάντα το πραγματικό φορτίο κίνησης.

Άλλος ένας αλγόριθμος για εκχώρηση καναλιών και δρομολόγηση από κοινού, που έχει αναπτυχθεί, χωρίζει το πρόβλημα σε τρία επιμέρους υποπρόβληματα κι έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης [35]. Το πρώτο υποπρόβλημα περιλαμβάνει μία κατανομημένη μέθοδο εκχώρησης καναλιών στην οποία η επιλογή του καναλιού από κάθε κόμβο γίνεται βάσει της μικρότερης παρεμβολής. Όταν δημιουργείται μία σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων, τότε κάθε κόμβος στέλνει τις πληροφορίες χρησιμοποίησης για το τρέχον κανάλι σε γειτονικούς κόμβους που παρεμβάλουν. Έτσι, κάθε κόμβος επιλέγει το κανάλι που θα χρησιμοποιήσει βάσει των πληροφοριών αυτών που στέλνονται από τους γειτονικούς του κόμβους και εν τέλει διαμορφώνεται η τοπολογία. Το δεύτερο υποπρόβλημα αφορά στη διαδικασία δρομολόγησης (QoS routing). Η επιλογή του μονοπατιού γίνεται βάσει του αριθμού

των βημάτων, το οποίο πρέπει να είναι σχετικά μικρό (να μην υπερβαίνει το συνολικό αριθμό των κόμβων), λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις συνθήκες παρεμβολών του συνδέσμου. Στο τρίτο υποπρόβλημα γίνεται εκ νέου εκχώρηση καναλιών αν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης δεν ικανοποιούνται στο μονοπάτι από την πηγή προς τον προορισμό. Όσοι κόμβοι βρίσκονται ενδιάμεσα στο μονοπάτι, επιλέγουν από τα διαθέσιμα κανάλια αυτό με τη μικρότερη παρεμβολή και τέλος, ένας κόμβος μπορεί να αλλάξει το κανάλι του, αν μειώνει τη συνολική τιμή παρεμβολής του δικτύου.

Στα IEEE 802.11s WMNs είναι πολύ σημαντικό η εκχώρηση των καναλιών να γίνεται με αποτελεσματικό τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ο ανταγωνισμός κι οι ομοδιαυλικές παρεμβολές. Παρακάτω παρουσιάζονται πρωτόκολλα / αλγόριθμοι που υπολογίζουν από κοινού τη δρομολόγηση και την εκχώρηση των καναλιών.

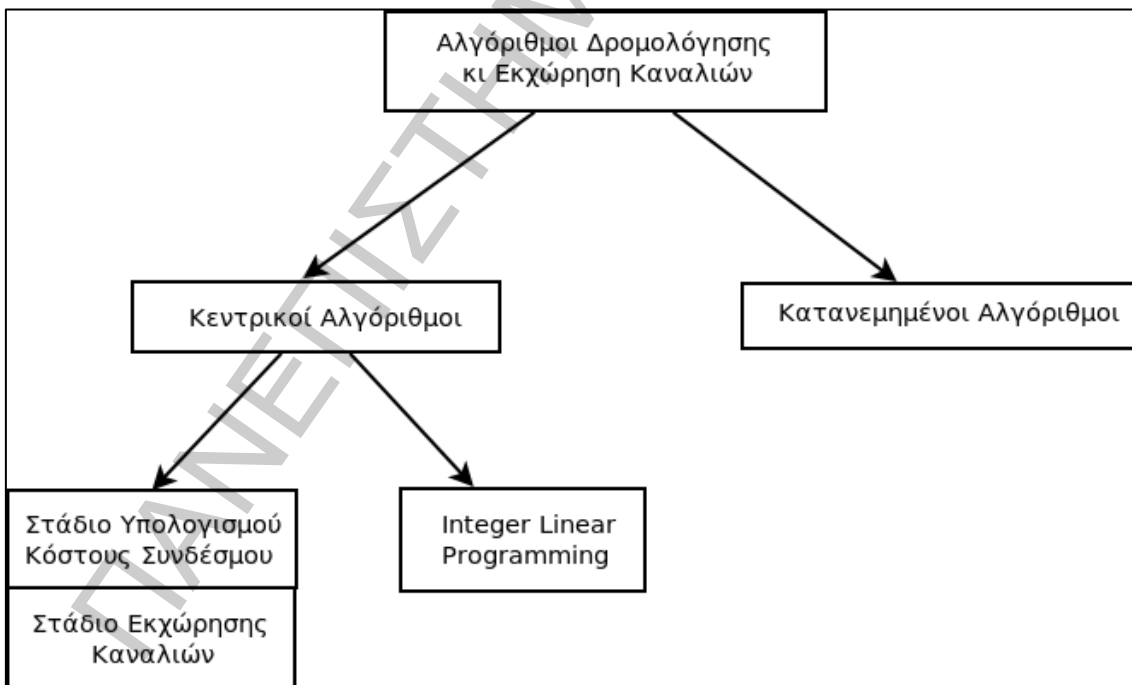
Στην εργασία [36] παρουσιάζεται, επίσης, ο Clustered based multipath topology control and channel assignment schemes (CoMTaC) αλγόριθμος που εκμεταλλεύεται τα μερικής επικαλυπτόμενα κανάλια. Πιο συγκεκριμένα, οι πλεγματοκομβοί ομαδοποιούνται σε μικρές ομάδες κι ορίζουν μία κοινή προεπιλεγμένη διεπαφή για κάθε ομάδα, που εκχωρείται στην προεπιλεγμένη διεπαφή κάθε κόμβου μέσα στην ομάδα. Ένας αλγόριθμος κατασκευής (spanner construction algorithm) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό δυνατών μονοπατιών που χρησιμοποιούν μη προεπιλεγμένες διεπαφές. Ο CoMTaC χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό για εκτίμηση της παρεμβολής βάσει του μέσου μήκους της ουράς αναμονής του επιπέδου δύο και του αριθμού των συνδέσμων που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη του το φορτίο κίνησης των συνδέσμων που παρεμβάλλουν.

Ο Joint Routing and Channel Assignment Protocol (JRCAP) [37] χρησιμοποιεί ένα προσαρμοστικό αλγόριθμο ομαδοποίησης, Density based Clustering algorithm for Channel Allocation (DCCA), για να χωριστούν οι πλεγματοκομβοί του πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων και πολλαπλών καναλιών δικτύου σε ομάδες, εκχωρώντας ένα σταθερό κανάλι (FC) για κάθε ομάδα. Το σταθερό κανάλι εκχωρείται σε μία από τις διεπαφές του πλεγματοκομβού ώστε να εξασφαλίζεται η συνδεσιμότητα και να ανταλλάσσονται μηνύματα ελέγχου. Με την ομαδοποίηση των κόμβων και τη χρήση πολλαπλών καναλιών, περιορίζεται η επιβάρυνση από μηνύματα ελέγχου. Οι ομάδες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των κόμβων αναμετάδοσης. Για την εκχώρηση των καναλιών χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος χρωματισμού, ο DSATUR. Αναλυτικότερα, η πλεγματοκομβική πύλη (mesh portal) στέλνει ένα μήνυμα PDEC (Portal DEClaration), το οποίο λαμβάνεται από τους επικεφαλής της κάθε ομάδας που στέλνουν πίσω ένα μήνυμα PREG (Portal REGistration). Το PREG περιλαμβάνει πληροφορίες όπως των αριθμό των βημάτων μεταξύ της πλεγματοκομβικής πύλης και του επικεφαλής της ομάδας και τις διευθύνσεις όλων των επικεφαλής των γειτονικών ομάδων. Έπειτα, η πλεγματοκομβική πύλη χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο DSATUR κι εκχωρεί σε κάθε κόμβο που είναι επικεφαλής της ομάδας, ένα σταθερό κανάλι. Μετά την εκχώρηση των σταθερών καναλιών στέλνει ένα μήνυμα Ρύθμισης Καναλιών σε όλους τους κόμβους. Έτσι, κάθε πλεγματοκομβός ρυθμίζει μία από τις διεπαφές του στο σταθερό κανάλι της ομάδας του. Οι κόμβοι αναμετάδοσης ρυθμίζουν τις διεπαφές τους και στα κανάλια των γειτονικών ομάδων για να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα. Στη συνέχεια, το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα εκχωρήσει κανάλια στις διεπαφές που έμειναν ελεύθερες. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης χρησιμοποιεί την κατόπιν αιτήματος λειτουργία δρομολόγησης. Όταν ένας πλεγματοκομβός θέλει να βρει ένα μονοπάτι για ένα προορισμό, στέλνει ένα PREQ στο σταθερό κανάλι. Τα στοιχεία PREQ έχουν τροποποιηθεί για να καλύπτουν τις ανάγκες του JRCAP για την επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας στα μονοπάτια δρομολόγησης. Το πρώτο πεδίο, που προστέθηκε, δηλώνει αν υπάρχει ή όχι ελεύθερο κανάλι, ενώ το δεύτερο πεδίο δείχνει ποιο είναι το καλύτερο κανάλι για το συγκεκριμένο σύνδεσμο που υπολογίζεται από κάθε κόμβο όταν λαμβάνει ένα PREQ. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι που λαμβάνουν το PREQ, επιλέγουν το κανάλι για την αντίστροφη διαδρομή και προωθούν το PREQ. Έτσι, κάθε κόμβος τοποθετεί στο τέλος του PREQ το κανάλι που θα χρησιμοποιηθεί. Όταν το PREQ φτάσει στον κόμβο προορισμό, τότε αυτός απαντάει με ένα PREP μήνυμα που περιλαμβάνει το κανάλι που θα χρησιμοποιηθεί στο αντίστροφο μονοπάτι. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι που λαμβάνουν αυτό το PREP, αλλάζουν τις διεπαφές τους στο επιλεγμένο κανάλι που δηλώνεται στο PREP στοιχείο. Το πρωτόκολλο JRCAP χρησιμοποιεί μία νέα μετρική MRC (Maximum Residual Capacity) για τη δρομολόγηση των πακέτων, που λαμβάνει υπόψη της την ποικιλομορφία του

καναλιού και τη χωρητικότητα του συνδέσμου. Η μετρική αυτή υπολογίζει την υπολειπόμενη χωρητικότητα της διαδρομής και το πρωτόκολλο δρομολόγησης επιλέγει τα μονοπάτια με τη μικρότερη τιμή της MRC.

Στην εργασία [38], προτείνεται ο Token Distribution and Target Programming routing Algorithm (TDTPA) αλγόριθμος για δρομολόγηση. Πιο συγκεκριμένα, στα WMNs με υποδομή, όλοι οι πλεγματικοί σταθμοί χωρίζονται σε ομάδες (clusters). Στα WMNs πελάτη, οι πλεγματικοί σταθμοί έχουν ίση αξία και μπορούν να δημιουργήσουν αυτόματα μία ομάδα και να επιλέξουν ένα πλεγματικό σταθμό που να έχει το ρόλο του επικεφαλής της ομάδας (cluster header - CH). Σε δίκτυα που οι πλεγματικοί σταθμοί διαθέτουν μία μόνο ραδιοσυχνότητα (single - radio), ο CH είναι υπεύθυνος για την κίνηση στο κανάλι ελέγχου ενώ οι πλεγματικοί σταθμοί που ανήκουν σε αυτόν το CH βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου όταν δεν έχουν δεδομένα να λάβουν ή να στείλουν. Στην περίπτωση που οι πλεγματικοί σταθμοί διαθέτουν πολλαπλές ραδιοσυχνότητες (multiple - radio), τότε διαθέτουν μία ραδιοσυχνότητα για να καταγράφουν την κίνηση στο κανάλι ελέγχου κι όταν θέλουν να χρησιμοποιήσουν το κανάλι ελέγχου για να στείλουν δεδομένα, στέλνουν ένα πλαίσιο beacon στον CH τους. Όταν ένα CH λαμβάνει ένα πλαίσιο beacon, καταγράφει την κίνηση στο κανάλι ελέγχου για λογαριασμό τους κι αν αυτό είναι ελεύθερο, τότε τους επιτρέπει να στείλουν δεδομένα. Όταν ένας πλεγματικός σταθμός τελειώσει την μετάδοση δεδομένων, ενημερώνει τον CH για την ολοκλήρωση της μετάδοσης στέλνοντας πάλι ένα πλαίσιο beacon. Στον TDTPA αλγόριθμο, ο CH έχει πληροφορίες δρομολόγησης για όλους τους πλεγματικούς σταθμούς της ομάδας του σε αντίθεση με τους υπόλοιπους πλεγματικούς σταθμούς που έχουν πληροφορίες μόνο για τους γείτονές τους.

Υπάρχουν κεντρικοί αλγόριθμοι για joint channel assignment and routing οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους αλγόριθμους που χωρίζονται σε δύο ξεχωριστά στάδια, το στάδιο του υπολογισμού του κόστους του συνδέσμου και το στάδιο της εκχώρησης των καναλιών. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αλγόριθμους που υπολογίζονται βάσει του Integer Linear Programming (ILP), οι οποίοι είναι υπολογιστικά πολύπλοκοι. Έχουν, επίσης, αναπτυχθεί κατανεμημένοι αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τους δυναμικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Η Εικόνα 12 παρουσιάζει τις κατηγορίες των αλγορίθμων για δρομολόγηση κι εκχώρηση καναλιών από κοινού.



Εικόνα 12: Κατηγορίες Αλγορίθμων Δρομολόγησης

Στην εργασία [39] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για joint channel assignment and proactive routing (MCCA-AODV) σε πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων πολλαπλών καναλιών

ασύρματα πλεγματικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος εκχωρεί ένα ξεχωριστό κανάλι σε κάθε κόμβο κατά μήκος του ίδιου μονοπατιού. Οι κόμβοι που απέχουν δύο βήματα μακριά κι ανήκουν σε διαφορετικό μονοπάτι, χρησιμοποιούν, επίσης, ξεχωριστό κανάλι. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να μειωθούν οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών κόμβων που ανήκουν στο ίδιο ή σε διαφορετικό μονοπάτι. Η δρομολόγηση γίνεται με τη χρήση του AODV routing protocol, που είναι ένα proactive πρωτόκολλο δρομολόγησης, δηλαδή οι κόμβοι δεν έχουν ενημερωμένες πληροφορίες δρομολόγησης για όλους τους κόμβους αλλά η εγκατάσταση ενός μονοπατιού γίνεται μετά από αίτηση κάποιου κόμβου. Το πεδίο time-to-live (TTL) του RREP στοιχείου ορίζεται ίσο με δύο.

3.4.2 Εκχώρηση Καναλιών και Παρεμβολές σε WMNs

Ο BFS Channel Assignment Algorithm (BFS-CA) [36] διασφαλίζει ότι η εκχώρηση των καναλιών δεν προκαλεί αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Για να το επιτύχει αυτό, κάθε πλεγματικός κόμβος λειτουργεί σε ένα προεπιλεγμένο κανάλι ώστε να παρέχεται συνεχής συνδεσιμότητα μεταξύ των πλεγματικών κόμβων. Η κίνηση ανακατευθύνεται στο προεπιλεγμένο κανάλι κάθε φορά που ο σύνδεσμος μεταξύ δύο πλεγματικών κόμβων κόβεται. Η ανακατεύθυνση της κίνησης γίνεται μέχρι να επιτευχθεί η εκχώρηση των καναλιών μεταξύ των κόμβων. Ο BFS-CA λαμβάνει την εκτιμώμενη από τους πλεγματικούς κόμβους παρεμβολή κι επιλέγει ένα κανάλι για τις προεπιλεγμένες ραδιοσυχνότητες. Ο BFS-CA βελτιώνει την απόδοση των ασύρματων πλεγματικών δικτύων με την επίτευξη της ελαχιστοποίησης των παρεμβολών μεταξύ των πλεγματικών σταθμών και των γειτονικών ασύρματων δικτύων. Όμως, το μειονέκτημα του BFS-CA είναι ότι δεσμεύει πάντα ένα μη επικαλυπτόμενο κανάλι και μία ραδιοσυχνότητα του πλεγματικού κόμβου για το προεπιλεγμένο κανάλι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη αποδοτική χρήση των διαθέσιμων διεπαφών και καναλιών.

Άλλος ένας αλγόριθμος για εκχώρηση καναλιών είναι ο Clustered Channel Assignment (CCA) [36] που ομαδοποιεί τους κόμβους κι ορίζει τον κόμβο που διαθέτει τους περισσότερους συνδέσμους επικεφαλής της ομάδας. Ο CCA συλλέγει πληροφορίες από τους επικεφαλής των ομάδων κι εκχωρεί ισομερώς τα διαθέσιμα κανάλια στις ομάδες με τέτοιο τρόπο που σε δύο γειτονικές ομάδες εκχωρούνται μη συνεχή σύνολα καναλιών (η απόσταση που πρέπει να πληρείται είναι οι δύο ομάδες). Αυτός ο αλγόριθμος δε λαμβάνει υπόψη του την κίνηση σε κάθε σύνδεσμο που είναι υπεύθυνη για τις παρεμβολές που προκαλούνται μεταξύ των συνδέσμων. Τέλος, ο CCA αλγόριθμος δεν κάνει σωστή χρήση των καναλιών.

Ο Cluster-based Channel Assignment Protocol (CCAP) [36] αλγόριθμος χωρίζει λογικά το δίκτυο σε μη επικαλυπτόμενες ομάδες. Στους κόμβους που αποτελούν μία ομάδα εκχωρείται ένα κοινό κανάλι. Για την αποφυγή των παρεμβολών μεταξύ των γειτονικών ομάδων, το κανάλι που εκχωρείται σε μία ομάδα, εκχωρείται πάλι σε άλλη ομάδα που διαχωρίζεται από το carrier sensing range. Για τους συνδέσμους μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται στην ίδια ομάδα, εκχωρούνται κανάλια που ελαχιστοποιούν τη μη συντονισμένη παρεμβολή.

Τέλος, στην εργασία [36] παρουσιάζεται ο Distributed Cluster-based Interference-Traffic Aware connectivity preserving CA (DCITCA) αλγόριθμος. Σε αυτόν τον αλγόριθμο ορίζεται ως r η μέγιστη απόσταση βημάτων κάθε πλεγματικού κόμβου από τον κόμβο που έχει τη μεγαλύτερη επικεφαλής της ομάδας. Αρχικά, γίνεται σύνδεση της διεπαφής με το σύνδεσμο, ενώ τελικά, τα κανάλια εκχωρούνται στις διεπαφές επιλέγοντας τα κανάλια με τις λιγότερες παρεμβολές. Οι παρεμβολές υπολογίζονται βάσει του φορτίου κίνησης της γειτονιάς.

Το MesTiC [40], [41] είναι ένας σταθερός, πολυωνυμικού χρόνου άπληστος αλγόριθμος για κεντρική εκχώρηση καναλιών κι έχει ως στόχο τη μείωση των παρεμβολών σε πολλαπλών ραδιοσυχνότητων πλεγματικά δίκτυα και την αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης στο δίκτυο. Σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο, ένα κοινό προεπιλεγμένο κανάλι εκχωρείται σε μία συγκεκριμένη κάρτα δικτύου στον κάθε κόμβο και χρησιμοποιείται για να διασφαλίζει τη συνδεσιμότητα και τη διαχείριση του δικτύου. Η εκχώρηση των καναλιών στους παραλήπτες γίνεται βάσει του βαθμού (rank) του κόμβου και το εκτιμώμενο εκ των προτέρων φορτίο στους συνδέσμους του κόμβου. Ως εκ τούτου, οι κόμβοι με υψηλό φορτίο έχουν μεγαλύτερη ευελιξία στην εκχώρηση των καναλιών.

3.4.3 Εκχώρηση Καναλιών και Ισχύς Μετάδοσης σε WMNs

Η εκχώρηση των καναλιών σε ένα ασύρματο πλεγματοειδές δίκτυο είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα που είναι στενά συνδεδεμένο με τη δρομολόγηση και την ομοδιαυλική παρεμβολή. Για τη μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής και την αύξηση της χωρητικότητας ενός πολλαπλών καναλιών πολλαπλών διεπαφών δικτύου, έχει αναπτυχθεί ένας ενεργειακά αποδοτικός επαναχρησιμοποιούμενου χώρου μηχανισμός εκχώρησης καναλιών (power-efficient spatial reusable channel assignment) [42]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του την ποικιλομορφία του καναλιού και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του χώρου, μειώνοντας, έτσι, την ομοδιαυλική παρεμβολή με την παράλληλη ρύθμιση των καναλιών, της ισχύς μετάδοσης και της δρομολόγησης. Πιο αναλυτικά, οι πλεγματοειδείς κόμβοι επιλέγουν την ισχύ μετάδοσής τους σύμφωνα με τις μεταξύ τους αποστάσεις ώστε να μπορούν να μεταδώσουν παράλληλα. Για να γίνει αυτό, οι κόμβοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες κατά την περίοδο διαπραγμάτευσης στην αρχή κάθε χρονικού διαστήματος beacon. Με τη λήξη της περιόδου διαπραγμάτευσης οι κόμβοι υπολογίζουν την ισχύ μετάδοσής τους. Επιλέγοντας την ισχύ μετάδοσης με αυτό τον τρόπο, μειώνεται η παρεμβολή, αυξάνεται η ρυθμιζόμενη ισχύς και μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας. Για το μηχανισμό εκχώρησης καναλιών, το πρώτο κανάλι χρησιμοποιείται ως κανάλι ελέγχου για την ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου. Τα υπόλοιπα κανάλια χρησιμοποιούνται ως κανάλια δεδομένων για τη μετάδοση και λήψη πακέτων. Κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα με τις καταστάσεις των καναλιών των γειτονικών του κόμβων και κάθε φορά που ένα κόμβος αλλάζει το κανάλι του, ενημερώνει τους γείτονές τους για την αλλαγή μέσω μηνυμάτων ελέγχου. Ο αλγόριθμος εκχώρησης καναλιών λαμβάνει υπόψη του την παρεμβολή μεταξύ των κόμβων, το μηχανισμό ελέγχου ισχύος και το φορτίο των συνδέσμων. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης, που χρησιμοποιείται, υπολογίζει κατά προσέγγιση το φορτίο κάθε συνδέσμου και το πιο κατάλληλο κανάλι εκχωρείται σε κάθε σύνδεσμο. Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος χτίζει τη δρομολόγηση υπολογίζοντας το αναμενόμενο φορτίο, το αναμενόμενο διαθέσιμο φορτίο και την αναμενόμενη μείωση του φορτίου κάθε συνδέσμου. Ο αλγόριθμος αρχικά εκχωρεί τα πιο κατάλληλα κανάλια σε κόμβους που έχουν επιλεγθεί κι εν τέλει, εκχωρεί τα κανάλια που μένουν στους υπόλοιπους συνδέσμους. Δηλαδή, στους κόμβους με τη μεγαλύτερη παρεμβολή εκχωρείται το κανάλι με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα και τη μικρότερη παρεμβολή ώστε να μειωθεί η παρεμβολή μεταξύ των κόμβων.

3.4.4 Συνθήκες Καναλιού και Δρομολόγηση σε WMNs

Η αστάθεια των μονοπατιών δρομολόγησης κι ιδιαίτερα η διακοπή των συνδέσμων οδηγούν σε υποβάθμιση της απόδοσης του ασύρματου πλεγματοειδούς δικτύου. Ο μηχανισμός Efficient Route Maintenance (ERM) [43] αποτελεί ένα σχήμα συντήρησης της διαδρομής δρομολόγησης για κατόπιν αιτήματος πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως τη μία από τις δύο καταστάσεις λειτουργίας του HWMP. Ο ERM είναι αυτός που δηλώνει ποιοι σύνδεσμοι είναι σπασμένοι και το πότε θα το δηλώσει. Χωρίζει τους συνδέσμους σε καλούς και κακούς ανάλογα με το αν έχουν ή όχι προβλήματα στη μετάδοση. Επίσης, ο μηχανισμός ERM αποτελείται από δύο στοιχεία. Το πρώτο στοιχείο του ονομάζεται Αξιολόγηση της Ποιότητας του Συνδέσμου (Link Quality Assessment) κι είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της ποιότητας του συνδέσμου σε βάθος χρόνου. Τέλος, χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες:

- Listen Link Quality Assessment
- Hello Link Quality Assessment

Το δεύτερο στοιχείο του ERM μηχανισμού ονομάζεται Απόφαση Διακοπής Συνδέσμου (Link Breakage Decision) και αναλύει τους υπολογισμούς του πρώτου στοιχείου. Όταν ένα πακέτο δε φτάνει στον προορισμό του, τότε το επίπεδο MAC αναφέρει την αποτυχία μετάδοσης στο Link Breakage Decision δηλώνοντας ή όχι το σύνδεσμο σπασμένο ανάλογα με πληροφορίες που έχει από το φυσικό και το MAC επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, η απόφαση που παίρνει το δεύτερο στοιχείο βασίζεται σε προκαθορισμένες τιμές κατωφλίου για το δείκτη SINR. Αν η τιμή του δείκτη SINR σε βάθος χρόνου είναι κάτω από το κατώτερο κατώφλι που απαιτείται για τη διατήρηση ενός συγκεκριμένου ρυθμού δεδομένων, τότε η ποιότητα του συνδέσμου θεωρείται κακή. Ένα αντίστοιχο κατώφλι υπάρχει για το MAC επίπεδο με σκοπό τη δήλωση της

ποιότητας των συνδέσμων ως καλή ή κακή. Ο παραπάνω μηχανισμός προσφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα στο πρωτόκολλο δρομολόγησης προλαβαίνει προβλήματα που μπορεί να προκύψουν λόγω παροδικών αλλαγών του δικτύου και τέλος, αυξάνει τη διάρκεια ζωής των διαδρομών δρομολόγησης.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 4) συνοψίζει τα προτεινόμενα ερευνητικά σχήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Πίνακας 4: Έρευνες πάνω σε Cross Layer Design σε WMNs

Εκχώρηση καναλιών – δρομολόγηση από κοινού (joint channel allocation and routing protocol)	Υάκινθος [34]	Χρήση μετρικών για την κατασκευή του δέντρου δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη το φορτίο κίνησης κι εκχώρηση των καναλιών στους κόμβους με υψηλότερη προτεραιότητα (πιο κοντά στη ρίζα του δέντρου).
	[35]	Εκχώρηση καναλιών βάσει της μικρότερης παρεμβολής από μηνύματα μεταξύ των κόμβων, δρομολόγηση βάσει αριθμού βημάτων και συνθηκών παρεμβολών του συνδέσμου κι εκ νέου εκχώρηση καναλιών κατά μήκος του μονοπατιού βάσει των παρεμβολών.
	Clustered based multipath topology control and channel assignment schemes(CoMTaC) [36]	Χωρισμός των κόμβων σε ομάδες με κοινή προεπιλεγμένη διεπαφή και χρήση του spanner construction algorithm για εύρεση των μονοπατιών δρομολόγησης.
	Joint Routing and Channel Assignment Protocol (JRCAP) [37]	Ομαδοποίηση των κόμβων με τον DCCA αλγόριθμο, αποστολή μηνυμάτων μεταξύ της πύλης και των επικεφαλής των ομάδων για ρύθμιση των καναλιών και εκχώρηση των καναλιών βάσει πληροφοριών στο PREQ (ύπαρξη ελεύθερου καναλιού και προσδιορισμός του καλύτερου).
	Token Distribution and Target Programming routing Algorithm (TDTPA) [38]	Χωρισμός των κόμβων σε ομάδες κι ανάδειξη ενός επικεφαλής κόμβου που είναι υπεύθυνος για την εκχώρηση των καναλιών όταν ένας κόμβος της ομάδας του θέλει να μεταδώσει και διατήρηση πληροφοριών για δρομολόγηση.
	MCCA-AODV [39]	Εκχώρηση ξεχωριστού καναλιού σε κάθε κόμβο κατά μήκος του ίδιου μονοπατιού και σε κόμβους διαφορετικού μονοπατιού με απόσταση δύο βημάτων. Χρήση της κατόπιν αιτήματος λειτουργίας του HWMP για τη δρομολόγηση.

Εκχώρηση καναλιών βάσει παρεμβολών	BFS Channel Assignment Algorithm (BFS-CA) [36]	Χρήση της εκτιμώμενης από τους κόμβους παρεμβολής για επιλογή των καναλιών κι ανακατεύθυνση της κίνησης για την επίτευξη της εκχώρησης των καναλιών.
	Clustered Channel Assignment (CCA) [36]	Ομαδοποίηση των κόμβων κι εκχώρηση των καναλιών βάσει των παρεμβολών.
	Distributed Cluster-based Interference-Traffic Aware connectivity preserving CA (DCITCA) [36]	Εκχώρηση των καναλιών επιλέγοντας αυτά με τις μικρότερες παρεμβολές που υπολογίζονται από το φορτίο κίνησης της γειτονιάς.
	MesTiC [40], [41]	Εκχώρηση καναλιών στους παραλήπτες βάσει του βαθμού του κόμβου και το εκτιμώμενο εκ των προτέρων φορτίο στους συνδέσμους του κόμβου.
Ισχύς μετάδοσης – Εκχώρηση Καναλιών - Δρομολόγηση	Power-Efficient Spatial Reusable Channel Assignment [42]	Υπολογισμός ισχύς μετάδοσης κάθε κόμβου μέσω μηνυμάτων με γειτονικούς, διατήρηση πινακων με τα κανάλια κάθε κόμβου κι ενημέρωση σε αλλαγές και η δρομολόγηση γίνεται υπολογίζοντας το φορτίο κάθε συνδέσμου κι εκχωρώντας ανάλογα τα κανάλια.
Φυσικό – MAC - Δρομολόγηση	Efficient Route Maintenance (ERM) [43]	Πληροφορίες για την ποιότητα του σήματος και του καναλιού για συντήρηση ή όχι του συνδέσμου κι επομένως και του μονοπατιού δρομολόγησης.

3.5 Μετρικές στα WMNs

Η εύρεση της καλύτερης μετρικής στο πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στα ασύρματα δίκτυα. Έχουν γίνει πολλές έρευνες και προτάσεις υπολογισμού των μετρικών. Για παράδειγμα, η Expected Forwarding Time (EFT) [44] υπολογίζει την από άκρο - σε - άκρο καθυστέρηση που αντιμετωπίζει ένα πακέτο για τα διαθέσιμα μονοπάτια δρομολόγησης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο προώθησης ενός πακέτο σε ένα κόμβο είναι οι εξής:

- 1) ο ρυθμός μετάδοσης,
- 2) ο ρυθμός επιτυχίας (ο αριθμός των προσπαθειών μετάδοσης μέχρι την επιτυχή μετάδοση του πακέτου),
- 3) οι γειτονικοί κόμβοι που ανταγωνίζονται την πρόσβαση στο κανάλι και τα φορτία τους,

- 4) γνώση του φορτίου και
- 5) η προτεραιότητα της κίνησης.

Ο χρόνος προώθησης ενός πακέτου εξαρτάται από τον αριθμό των προσπαθειών μετάδοσης μέχρι την επιτυχή αποστολή του πακέτου και το ρυθμό μετάδοσης. Η καθυστέρηση πρόσβασης στο κανάλι εξαρτάται από την προτεραιότητα κίνησης του πακέτου που πρόκειται να μεταδοθεί. Συμπεριλαμβάνοντας το χρόνο αναβολής της μετάδοσης στο χρόνο προώθησής του επιτυγχάνεται η επιλογή του μονοπατιού δρομολόγησης με τη μικρότερη καθυστέρηση για τη συγκεκριμένη κλάση κίνησης. Όταν ένας κόμβος θέλει να αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι για τη μετάδοση ενός πακέτου, μπορεί να χρειαστεί να αναβάλλει τη μετάδοσή του λόγω άλλων κόμβων που κερδίζουν την πρόσβαση στο μέσο. Επίσης, μπορεί να αναβάλλει τη μετάδοσή του λόγω του μεγάλου φορτίου του κόμβου που μεταδίδει. Οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα κανάλι και το μέγεθος του πακέτου του ανταγωνιστή κόμβου επηρεάζουν το χρόνο μετάδοσης. Για τους παραπάνω λόγους το EFT λαμβάνει υπόψη του και τους ρυθμούς μετάδοσης των γειτονικών κόμβων καθώς και το μέγεθος του πακέτου προς μετάδοση. Ακόμα το EFT ενσωματώνει στην τιμή του και την καθυστέρηση που αντιμετωπίζει ένα πακέτο όταν βρίσκεται σε ουρά αναμονής. Δηλαδή, το EFT είναι το άθροισμα των παρακάτω χρόνων:

- 1) του χρόνου μετάδοσης
- 2) του idle χρόνου μέχρι να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο
- 3) του χρόνου αναμονής λόγω άλλων πακέτων με μεγαλύτερη προτεραιότητα κίνησης
- 4) του χρονικού διαστήματος λόγω του χρόνου αναβολής και της διάρκειας της διακοπής της μετάδοσης
- 5) του χρόνου παραμονής του πακέτου στην ουρά αναμονής

Οι παραπάνω χρόνοι αφορούν στους χρόνους που απαιτεί ένα πακέτο για τις επιτυχημένες κι αποτυχημένες προσπάθειες μετάδοσης. Για τον υπολογισμό της τιμής της μετρικής χρησιμοποιείται η τεχνική Automatic Rate Fallback (ARF) κι η Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης και τον αριθμό των διακοπών και τη διάρκεια αυτών, αντίστοιχα. Για την εισαγωγή της EFT μετρικής στο HWMP χρησιμοποιείται η τιμή του αναγνωριστικού της μετρικής. Πιο συγκεκριμένα, η μετρική *airtime link* έχει την τιμή 0 ως αναγνωριστικό ενώ οι τιμές 1–254 είναι δεσμευμένες για μελλοντική χρήση. Έτσι, δίνοντας την τιμή 1 ως αναγνωριστικό για την EFT μετρική, το πρωτόκολλο μπορεί να καταλάβει ποια μετρική θα χρησιμοποιήσει για την επιλογή του μονοπατιού δρομολόγησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στην εργασία [45], η συγκεκριμένη μετρική έχει καλύτερη απόδοση από την υπάρχουσα προεπιλεγμένη μετρική.

Η Expected Transmission Energy (ETE) [45] είναι μία μετρική που λαμβάνει υπόψη της την ενέργεια για τη δρομολόγηση των πακέτων στο πλεγματο δίκτυο. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου θεωρούνται εξίσου σημαντικοί γιατί αν κάποιος από αυτούς σταματήσει να λειτουργεί λόγω έλλειψης ενέργειας, τότε χάνεται ο έλεγχος της περιοχής που κάλυπτε ο συγκεκριμένος κόμβος. Βασικός στόχος της παραπάνω μετρικής είναι να εξασφαλίζεται ο ίσος ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας από όλους τους κόμβους του δικτύου διατηρώντας παράλληλα το μέσο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα.

Η Estimated Channel Occupancy Time (ECOT) που προτάθηκε στο [46] είναι μία μετρική που λαμβάνει υπόψη της τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για πρόσβαση στο μέσο και υπολογίζει τον απαιτούμενο χρόνο που πρόκειται να απασχολήσει το κανάλι ένα πλαίσιο μέχρι να αποσταλεί επιτυχώς και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$ECOT \triangleq \frac{E_t}{E_n} \quad (11)$$

Όπου, E_t είναι ο αναμενόμενος χρόνος απασχόλησης του μέσου κατά τη διάρκεια του οποίου μεταδίδεται ένα πλαίσιο και E_n είναι ο αναμενόμενος αριθμός των επιτυχώς απεσταλμένων πλαισίων ανά προσπάθεια μετάδοσης. Η προαναφερθείσα μετρική μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα ασύρματα πλεγματο δίκτυα κι έχει ως στόχο την αναζήτηση των από – άκρη – σε – άκρη μονοπατιών με τη μέγιστη ρυθμ απόδοση.

Η Expected Transmission Count (ETX) [47] είναι μία μετρική που υπολογίζει τον αναμενόμενο αριθμό των μεταδόσεων ενός κόμβου μέχρι την επιτυχή αποστολή ενός πακέτου

στον κόμβο - προορισμό. Η εν λόγω μετρική δε λαμβάνει υπόψη της το μέγεθος των πακέτων ούτε κάνει διαχωρισμό των ζεύξεων βάσει του εύρους ζώνης. Για το λόγο αυτό παρουσιάζει επιβάρυνση ελέγχου και συνεπώς, χαμηλή απόδοση. Ο λόγος παράδοσης πακέτου υπολογίζεται από τη μετρική Minimum Loss (ML) [47] που αναζητάει το μονοπάτι δρομολόγησης με τη μικρότερη πιθανότητα απώλειας από άκρη - σε - άκρη. Η Expected Transmission Time (ETT) [47] μετρική σχεδιάστηκε για να καλύψει τα κενά του ETX. Συγκεκριμένα, υπολογίζει το χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο ώστε να ληφθεί επιτυχώς. Όταν στο δίκτυο υπάρχουν πολλαπλά κανάλια, τότε προκύπτουν προβλήματα από τις παρεμβολές που δημιουργούνται όταν δύο κόμβοι μεταδίδουν στο ίδιο κανάλι (intra - flow interference) και τις παρεμβολές που δημιουργούνται όταν δύο κόμβοι μεταδίδουν παράλληλα σε διαφορετικά κανάλια (inter - flow interference). Η Weighted Cumulative ETT (WCETT) [47] είναι μία από άκρη - σε - άκρη μετρική που λαμβάνει υπόψη της την intra - flow παρεμβολή και υπολογίζεται από το άθροισμα των από άκρη - σε - άκρη καθυστερήσεων και της ποικιλομορφίας του καναλιού. Η συγκεκριμένη μετρική δεν βρίσκει πάντα τα συντομότερα μονοπάτια και δεν παρέχει λύση για τις inter - flow παρεμβολές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε επιλογή μονοπατιών που υποφέρουν από συμφόρηση. Με σκοπό την αντιμετώπιση της επιλογής μονοπατιών που υποφέρουν από συμφόρηση, εισήχθη η μετρική Metric of Interference and Channel-switching (MIC) [47]. Έτσι, η τελευταία μετρική επιτυγχάνει τον υπολογισμό της inter - flow παρεμβολής με τον υπολογισμό από κάθε κόμβο του δικτύου των κόμβων που παρεμβάλλουν. Η modified ETX (mETX) [47] αποτελεί μία παραλλαγή της ETX και υπολογίζει την πιθανότητα σφάλματος bit χωρίς να λαμβάνει υπόψη της τις intra - flow και inter - flow παρεμβολές. Ακόμα μία μετρική που έχει παρουσιαστεί από την ερευνητική κοινότητα είναι η Effective Number of Transmissions (ENT) [47], η οποία λογαριάζει τις μεταβολές στην ποιότητα της ζεύξης και υπολογίζει τον αριθμό των επιτυχημένων αναμεταδόσεων ανά ζεύξη. Όπως και η mETX, έτσι κι η ENT μετρική δε λογαριάζει τις intra - flow και inter - flow παρεμβολές. Τέλος, στο [47] παρουσιάζεται η μετρική interference Aware (iAWARE) που υπολογίζει τον μέσο χρόνο που το κανάλι παραμένει απασχολημένο λόγω των μεταδόσεων κάθε γειτονικού κόμβου που παρεμβάλλει κάνοντας χρήση του SNR και SINR για τις μεταβολές των παρεμβολών των γειτονικών κόμβων. Η iAWARE μετρική λαμβάνει υπόψη της το χρόνο μετάδοσης, τις intra - flow και inter - flow παρεμβολές και την αστάθεια του καναλιού.

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλες τις έρευνες που έχουν γίνει για μετρικές στα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα.

Πίνακας 5: Μετρικές σε Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα

Μετρική	Κριτήριο Επιλογής Μονοπατιού Δρομολόγησης
EFT [44]	Από άκρο - σε - άκρο καθυστέρηση του πακέτου για όλα τα μονοπάτια δρομολόγησης
ETE [45]	Ρυθμός κατανάλωσης της ενέργειας των κόμβων του δικτύου
ECOT [46]	Απαιτούμενος χρόνος απασχόλησης του καναλιού από ένα πλαίσιο μέχρι να αποσταλεί επιτυχώς
ETX [47]	Αναμενόμενος αριθμός των μεταδόσεων ενός πακέτου μέχρι την επιτυχή αποστολή του
ML [47]	Λόγος παράδοσης πακέτου
ETT [47]	Χρόνος μέχρι ένα πακέτο να ληφθεί επιτυχώς
WCETT [47]	Άθροισμα των από άκρη - σε - άκρη καθυστερήσεων και της ποικιλομορφίας του καναλιού
MIC [47]	Inter - flow παρεμβολή
mETX [47]	Πιθανότητα σφάλματος bit
ENT [47]	Αριθμός επιτυχημένων αναμεταδόσεων ανά ζεύξη
iAWARE [47]	Μέσος χρόνος που το κανάλι είναι απασχολημένο από τις μεταδόσεις γειτονικών κόμβων

Κεφάλαιο 4

4.1 Προτεινόμενη Μετρική

Ένα ζήτημα που αφορά στα ασύρματα πλεγματοικά δίκτυα και γενικά στα ασύρματα δίκτυα είναι η ενέργεια των κόμβων. Συνήθως, οι ασύρματοι κόμβοι έχουν περιορισμένη ενέργεια και συνεπώς, περιορισμένη διάρκεια ζωής. Για να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα του δικτύου κι η παροχή υπηρεσιών στους χρήστες, είναι αναγκαία η ύπαρξη μηχανισμών που λαμβάνουν υπόψη τους την ενέργεια των κόμβων και συνολικά του δικτύου. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να υποστηρίξουν τέτοιους μηχανισμούς. Υλοποιώντας μία μετρική δρομολόγησης που υπολογίζει το κόστος της ενέργειας των κόμβων, η δρομολόγηση γίνεται πιο αποδοτική ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται τα εξής:

- 1) Δε χάνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων
- 2) Παρατείνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου
- 3) Το δίκτυο δε χωρίζεται σε κομμάτια
- 4) Παρατείνεται η συνδεσιμότητα των χρηστών κι η παροχή υπηρεσιών από το δίκτυο

Στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ανάπτυξη μίας νέας μετρικής για τα IEEE 802.11s Ασύρματα Πλεγματοικά Δίκτυα, η οποία διασφαλίζει τη μικρότερη δυνατή συνολική κατανάλωση ενέργειας στο πλεγματοικό δίκτυο και συνεπώς, την παράταση της ζωής του δικτύου. Η διάρκεια ζωής του δικτύου (lifetime) αναφέρεται ως το χρονικό διάστημα που έχει περάσει μέχρι να εξαντληθεί τελείως η ενέργεια ενός κόμβου του δικτύου. Η προτεινόμενη μετρική λαμβάνει υπόψη της την εναπομένουσα ενέργεια σε ένα κόμβο για τον υπολογισμό του κόστους ενέργειας. Μείωση στην εναπομένουσα ενέργεια του κάθε κόμβου έχουμε κάθε φορά που ο κόμβος βρίσκεται σε μία από τις παρακάτω καταστάσεις:

- **IDLE**: ο κόμβος δε στέλνει και δε λαμβάνει πακέτα
- **CCA_BUSY**: ο κόμβος είτε στέλνει ή λαμβάνει πακέτα
- **TX**: ο κόμβος στέλνει πακέτα
- **RX**: ο κόμβος λαμβάνει πακέτα
- **SWITCHING**: ο κόμβος μεταβαίνει από μία κατάσταση σε μία άλλη

Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μετρική υπολογίζει το κόστος ενέργειας και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$Con_{ni} = \frac{1}{R_{ni}} \quad (12)$$

Όπου, n_i είναι ο κόμβος για τον οποίο υπολογίζεται η μετρική και R_{ni} είναι η εναπομένουσα ενέργεια στον κόμβο n_i .

Το συνολικό κόστος ενέργειας για μία διαδρομή R, μήκους l, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$Con_R = \sum_{i=0}^{l-1} Con_{ni} \quad (13)$$

Έστω R_x η διαδρομή που επιλέγεται από ένα σύνολο V διαδρομών. Τότε η διαδρομή που επιλέγεται πρέπει να πληροί το εξής:

$$R_x = \min\{Con_R : R \in V\} \quad (14)$$

4.2 Αρχιτεκτονική Δικτύου Προσομοίωσης

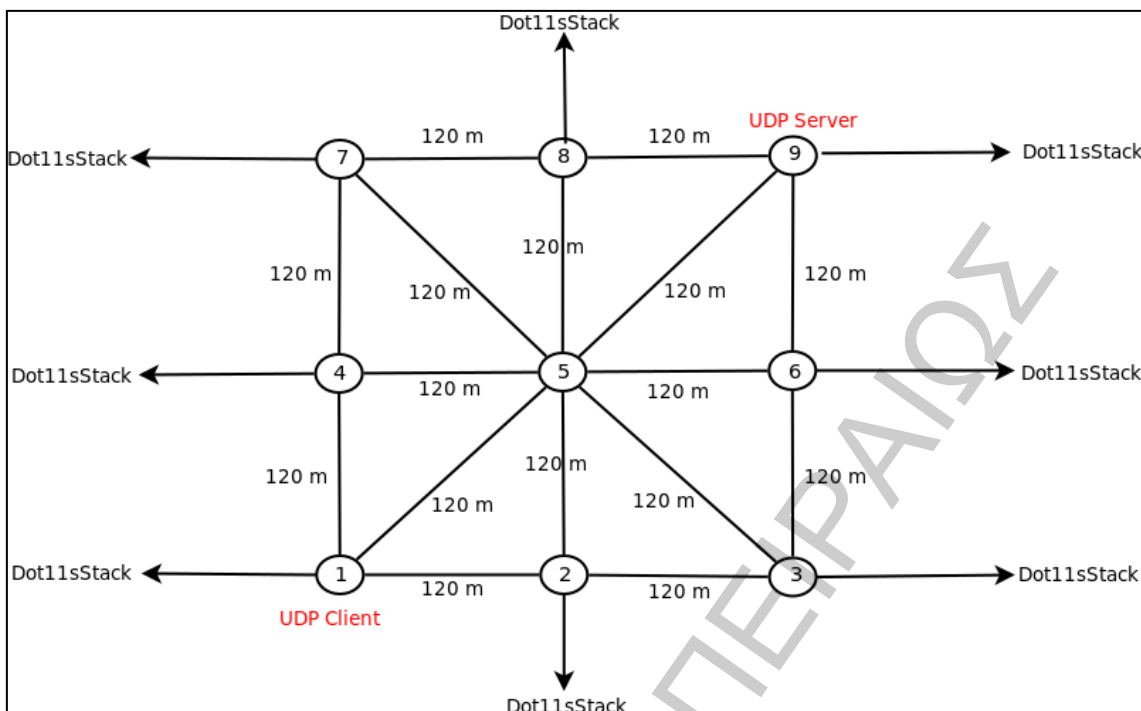
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η αρχιτεκτονική του πλεγματοικού δικτύου που

εξετάστηκε κι αξιολογήθηκε η προτεινόμενη μετρική. Η ίδια αρχιτεκτονική δικτύου, που αναλύεται στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε και σε πλεγματοεικό δίκτυο που χρησιμοποιεί την *airtime link* μετρική για σκοπούς αξιολόγησης της απόδοσης της προτεινόμενης μετρικής έναντι της *airtime link* μετρικής όσο αφορά στη συνολική κατανάλωση της ενέργειας του δικτύου και συνεπώς, στη διάρκεια ζωής του.

Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου περιγράφεται από τα παρακάτω:

- Αριθμός κόμβων: 4, 9, 16, 25, 36, 49 και 64
- Οι κόμβοι είναι στατικοί και τοποθετημένοι σε πλέγμα
- Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων είναι ίση με 120 μέτρα
- Χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο 802.11a
- Σε όλους τους κόμβους είναι εγκατεστημένα τα πρωτόκολλο της 802.11s Στοίβας
- Όλοι οι κόμβοι έχουν μία διεπαφή
- Υπάρχει ένα κανάλι μετάδοσης των δεδομένων
- Δεν υπάρχει root κόμβος, άρα το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι σε *reactive* λειτουργία
- Η αρχική ενέργεια των κόμβων είναι 0.3 Joules
- Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 240 secs
- Υπάρχει ένας κόμβος που στέλνει UDP κίνηση σε ένα άλλο κόμβο αντιδιαμετρικά του δικτύου
- Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών πλαισίων είναι 10 secs
- Η μετάδοση των δεδομένων ξεκινάει τη χρονική στιγμή 5 secs και τελειώνει στα 230 secs
- Η ισχύς της κεραίας των κόμβων είναι 18db
- Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι ίσος με 150kbps
- Το μέγεθος των πακέτων είναι είτε 512 είτε 1024 bytes
- Το μοντέλο απώλειας διάδοσης που χρησιμοποιείται είναι το Log Distance Propagation Loss Model
- Η μετάδοση των πακέτων γίνεται με OFDM Rate 6Mbps
- Χρησιμοποιείται ο μηχανισμός RTS/CTS μόνο όταν το μέγεθος του πακέτου μαζί με τις επικεφαλίδες που προστίθενται ξεπεράσει τα 2500 bytes

Η Εικόνα 13, που ακολουθεί, αναπαριστά την τοπολογία του δικτύου για 9 κόμβους.



Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική Ασύρματου Πλεγματικού Δικτύου Προσομοίωσης

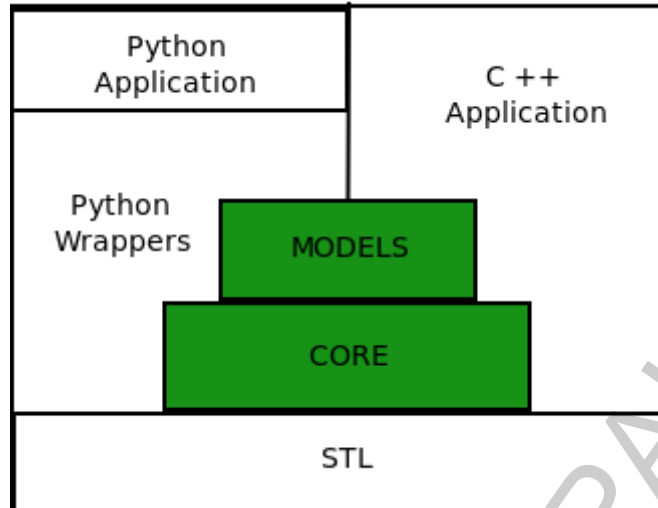
4.3 Προσομοιωτής ns3

4.3.1 Γενικά

Ο ns-3 είναι ένας διακριτών γεγονότων προσομοιωτής δικτύων για συστήματα Διαδικτύου στον οποίο ο πυρήνας και τα μοντέλα της προσομοίωσης έχουν υλοποιηθεί σε C++ και χρησιμοποιείται κυρίως για εκπαιδευτικούς κι ερευνητικούς σκοπούς [48]. Είναι ελεύθερο λογισμικό σύμφωνα με την άδεια GNU GPLv2. Είναι χτισμένος ως μία βιβλιοθήκη που μπορεί να συνδεθεί στατικά ή δυναμικά με ένα C++ πρόγραμμα που ορίζει την τοπολογία της προσομοίωσης και ξεκινάει τον προσομοιωτή. Επίσης, ο ns-3 εξάγει σχεδόν όλα του τα APIs στην Python επιτρέποντας έτσι στα Python προγράμματα να εισάγουν μία “ns-3” ενότητα με το ίδιο τρόπο που η ns-3 βιβλιοθήκη συνδέεται με εκτελέσιμα στη C++. Δεν αποτελεί επέκταση του ns-2 και δεν υποστηρίζει το API του ns-2 παρόλο που είναι επίσης γραμμένος σε C++.

Στόχος του έργου ns-3 είναι να αναπτυχθεί ένα ανοικτό περιβάλλον προσομοίωσης που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της σύγχρονης έρευνας και να ενθαρρύνει τη συμβολή της επιστημονικής κοινότητας. Επίσης, στοχεύει στην δημιουργία πλήρους τεκμηρίωσης (documentation) που να είναι εύκολη στη χρήση και τον εντοπισμό σφαλμάτων για τις ρυθμίσεις των προσομοιώσεων καθώς επίσης, και της συλλογής κι ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Υποστηρίζει την έρευνα σε IP και μη IP – based δίκτυα κι ένα πραγματικού χρόνου χρονοπρογραμματιστή για αλληλεπίδραση με πραγματικά συστήματα.

Η Εικόνα 14 αναπαριστά την αρχιτεκτονική του ns-3.



Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική του ns-3

Σε σύγκριση με παρόμοιους προσομοιωτές δικτύων, ο ns-3 διακρίνεται από τα παρακάτω.

- 1) **Έμφαση στη C++ και Python:** Οι περισσότεροι προσομοιωτές χρησιμοποιούν μία ειδική γλώσσα μοντελοποίησης για την περιγραφή των μοντέλων και των ροών του προγράμματος. Με τη χρήση των C++ και Python, οι χρήστες επωφελούνται από όλα όσα υποστηρίζει η κάθε γλώσσα.
- 2) **Γεγονότα και συνδέσεις με γνώμονα την επανάκληση:** Τα γεγονότα προσομοίωσης είναι απλά κλήσεις συναρτήσεων - λειτουργιών που είναι προγραμματισμένες να εκτελούνται σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Κάθε συνάρτηση μπορεί να φτιαχτεί σε ένα γεγονός και να προγραμματιστεί με τη χρήση της συνάρτησης επανάκλησης. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με συναρτήσεις που συγκεντρώνουν την επεξεργασία γεγονότων σε κάθε αντικείμενο προσομοίωσης. Οι επανακλήσεις χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για να μειώσουν τις εξαρτήσεις του χρόνου μεταγλώττισης μεταξύ των αντικειμένων της προσομοίωσης.
- 3) **Ευέλικτος πυρήνας με βοηθητικά επίπεδα:** Ο ns-3 διαθέτει ένα ισχυρό, χαμηλού επιπέδου API που επιτρέπει στους χρήστες να ρυθμίσουν τα πράγματα με διαφορετικούς τρόπους. Στην κορυφή των επιπέδων είναι ένα σύνολο "βοηθός" APIs που παρέχει ευκολότερες στη χρήση συναρτήσεις.
- 4) **Έμφαση στην εξομίωση:** Ο σχεδιασμός προσομοίωσης είναι προσανατολισμένος σε περιπτώσεις χρήσης που επιτρέπουν στον προσομοιωτή να αλληλεπιδράσει με τον πραγματικό κόσμο. Τα ns-3 αντικείμενα αποθηκεύονται εσωτερικά ως packet byte buffers, έτοιμα να αποσταλούν σε ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου.
- 5) **Εναρμόνιση με το πραγματικό περιβάλλον:** Οι ns-3 κόμβοι είναι σχεδιασμένοι μετά την αρχιτεκτονική δικτύωσης των Linux και οι βασικές διεπαφές και τα αντικείμενα εναρμονίζονται με αυτά σε ένα υπολογιστή με Linux. Αυτό διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση του κώδικα, κάνει πιο ρεαλιστικά τα μοντέλα και κάνει τη ροή ελέγχου του προσομοιωτή ευκολότερη στη σύγκριση με πραγματικά συστήματα.
- 6) **Διαχείριση Παραμετροποιήσεων:** Ο ns-3 διαθέτει ένα ενσωματωμένο σύστημα για τη διαχείριση προεπιλεγμένων κι ανά περιπτώσεις τιμές για τις παραμέτρους της προσομοίωσης. Όλες οι παραμετροποιήσιμες προεπιλεγμένες τιμές για τις παραμέτρους διαχειρίζονται από αυτό το σύστημα, το οποίο έχει ενισχυθεί με την επεξεργασία ορισμάτων από τη γραμμή εντολών, την τεκμηρίωση Doxygen, ένα XML-based και προαιρετικά ένα GTK-based υποσύστημα παραμετροποίησης.
- 7) **Έλλειψη ενός Ενσωματωμένου Περιβάλλοντος Ανάπτυξης (Integrated Development Environment - IDE):** Ο ns-3 δε διαθέτει ένα IDE για τη ρύθμιση, τη

διόρθωση, την εκτέλεση και την απεικόνιση των προσομοιώσεων σε ένα ενιαίο παράθυρο εφαρμογής όπως σε άλλους προσομοιωτές.

Ο ns-3 είναι ένα ανοικτού κώδικα έργο που βασίζεται στη συμβολή των χρηστών και των ερευνητών.

Μερικοί από τους τρόπους που μπορεί κάποιος να συμβάλει είναι οι παρακάτω:

- Λίστες συζητήσεων,
- Αναφορά σφαλμάτων,
- Παροχή εγχειριδίων εκμάθησης,
- Συμβολή κώδικα και
- Συντήρηση του προσομοιωτή.

Πολλοί χρήστες κάνουν προσομοιώσεις βασιζόμενοι στα υπάρχοντα παραδείγματα του ns-3. Όταν κάποιο παράδειγμα δεν καλύπτει τις ανάγκες του μοντέλου, τότε ο χρήστης πρέπει να κάνει τροποποιήσεις σε υπάρχον μοντέλο ή να δημιουργήσει ένα νέο από την αρχή. Πολλοί χρήστες έρχονται σε επαφή με την ερευνητική κοινότητα του ns-3 και πολλές φορές συμβάλλουν στην ανάπτυξή του.

4.3.2 Διαδικασία Εγκατάστασης του ns-3

Αρχικά, γίνεται λήψη από την κεντρική σελίδα του ns-3 της τελευταίας σταθερής έκδοσης. Υπάρχει ένα πακέτο, που ονομάζεται ns-3-allinone, για τη διευκόλυνση της εγκατάστασης. Τις περισσότερες φορές γίνεται λήψη του development tree ns-3-dev. Με αυτό τον τρόπο απαιτείται η χρήση του Mercurial που είναι ένα δωρεάν, καταμεμημένου ελέγχου εργαλείο διαχείρισης. Αφού ολοκληρωθεί η λήψη της έκδοσης του ns-3, ξεκινάει η διαδικασία συντονισμένης κατασκευής με την εντολή build.py. Έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία εγκατάστασης κι ο χρήστης μπορεί να τρέξει τα παραδείγματα που υπάρχουν ή να δημιουργήσει νέα προσθέτοντάς τα στο scratch.

4.3.3 Βασικές Έννοιες

- 1) **Κόμβος (Node):** είναι η βασική υπολογιστική συσκευή του ns-3 και παρουσιάζεται στη C++ από την κλάση Node, η οποία παρέχει διαχείριση των υπολογιστικών συσκευών στις προσομοιώσεις. Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει εφαρμογές, περιφερειακές κάρτες και πρωτόκολλα για να ενισχύσει τη λειτουργικότητά τους.
- 2) **Εφαρμογή (Application):** δημιουργεί τη δραστηριότητα που πρόκειται να προσομοιωθεί και παρουσιάζεται στη C++ από την κλάση Application.
- 3) **Κανάλι (Channel):** είναι το κανάλι επικοινωνίας στο οποίο μπορεί να συνδεθεί ένας κόμβος και παρουσιάζεται στη C++ από την κλάση Channel, που παρέχει μεθόδους για τη διαχείριση αντικειμένων του δικτύου επικοινωνίας και τη σύνδεση των κόμβων με αυτά.
- 4) **Συσκευή Δικτύου (NetDevice):** εγκαθίστανται σε ένα Κόμβο προκειμένου να μπορέσει να επικοινωνήσει με άλλους Κόμβους μέσω του Καναλιού. Παρουσιάζεται στη C++ από την κλάση NetDevice που παρέχει μεθόδους για τη διαχείριση των συνδέσεων μεταξύ Κόμβων και Καναλιών. Ένας Κόμβος μπορεί να συνδεθεί με περισσότερα του ενός Καναλιού μέσω πολλαπλών Συσκευών Δικτύου.
- 5) **Βοηθοί Τοπολογίας (Topology Helpers):** συνδυάζουν πολλές διαφορετικές εργασίες για τη διευκόλυνση του χρήστη. Κανονίζουν τις συνδέσεις μεταξύ Κόμβων, Καναλιών και Συσκευών Δικτύου αναλαμβάνοντας συγκεκριμένες εργασίες, όπως η διευθυνσιοδότηση και πολλά άλλα.

4.3.4 Καταγραφή (Logging)

Ο ns-3 παρέχει μία πολυεπίπεδη προσέγγιση για την καταγραφή μηνυμάτων. Η καταγραφή μηνυμάτων μπορεί να απενεργοποιηθεί τελείως, να ενεργοποιηθεί μερικώς ή καθολικά παρέχοντας τη δυνατότητα επιλογής του επιπέδου καταγραφής. Υπάρχουν επτά επίπεδα καταγραφής μηνυμάτων με αυξανόμενη λεπτομέρεια. Η καταγραφή μηνυμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική και βοηθάει στον εντοπισμό σφαλμάτων σε πληροφορίες, προειδοποιήσεις, μηνύματα λάθους και την άμεση άντληση πληροφοριών από το σενάριο ή το μοντέλο που προσομοιώνεται.

4.3.5 Σύστημα Εντοπισμού (Tracing System)

Είναι πολύ σημαντική η ύπαρξη Συστήματος Εντοπισμού σε έναν προσομοιωτή λόγω της δυνατότητας για περαιτέρω μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Το Σύστημα Εντοπισμού που διαθέτει ο ns-3 επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν ένα τυπικό σύστημα εντοπισμού που να μπορούν να ρυθμίσουν ποια είναι τα αντικείμενα που θα παράγουν τον εντοπισμό. Οι ενδιαμέσοι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επεκτείνουν το σύστημα εντοπισμού ώστε να διαμορφώσουν τη μορφή εξόδου που παράγεται και να εισάγουν νέες πηγές εντοπισμού χωρίς να διαμορφώνουν τον πυρήνα του προσομοιωτή. Μόνο για τους προχωρημένους χρήστες υπάρχει η δυνατότητα διαμόρφωσης του πυρήνα του προσομοιωτή.

Το Σύστημα Εντοπισμού του ns-3 έχει ανεξάρτητο Εντοπισμό για τις πηγές κι ανεξάρτητο Εντοπισμό για τους αποδέκτες, αλλά ένα ενιαίο μηχανισμό για τη σύνδεση μεταξύ τους. Οι πηγές (trace sources) είναι οντότητες που μπορούν να σηματοδοτήσουν τα γεγονότα που συμβαίνουν σε μία προσομοίωση, ενώ οι αποδέκτες (trace sinks) είναι αυτοί που αποδέχονται τα γεγονότα και τα δεδομένα που τους παρέχουν οι πηγές. Ο ns-3 υποστηρίζει τον εντοπισμό ASCII κάνοντας χρήση του AsciiTraceHelper για τη δημιουργία ASCII αρχείων. Τέλος, υποστηρίζει τη δημιουργία .pcap (packet capture) αρχείων εντοπισμού. Το Wireshark χρησιμοποιείται για την ανάγνωση κι εμφάνιση αυτής της μορφής αρχείων.

4.4 NS-3 Modules

4.4.1 Energy Framework

Η κατανάλωση ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στις ασύρματες συσκευές και στα ασύρματα δίκτυα. Το Energy Framework του ns-3 παρέχει μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και της πηγής της ενέργειας σε ένα κόμβο και αποτελείται από το Energy Source και το Device Energy Model. Ο πηγαίος κώδικας βρίσκεται στο φάκελο src/energy/models.

Ως πηγή της ενέργειας (Energy Source) ορίζεται η πηγή παροχής ισχύος σε κάθε κόμβο του δικτύου. Κάθε κόμβος μπορεί να έχει παραπάνω από μία πηγή ενέργειας και κάθε μία από αυτές μπορεί να είναι συνδεδεμένη με πολλά ενεργειακά μοντέλα συσκευής. Όταν συνδέουμε μία πηγή ενέργειας σε ένα ενεργειακό μοντέλο συσκευής, τότε η συσκευή αυτή αντλεί ενέργεια από την πηγή. Η πηγή της ενέργειας είναι υπεύθυνη και για την ενημέρωση των συσκευών ενός κόμβου για την εξάντληση της ενέργειάς του. Επίσης, υπολογίζει ανά περιοδικά χρονικά διαστήματα την τρέχουσα άντληση ενέργειας από μία συσκευή κι έτσι υπολογίζει την κατανάλωση της ενέργειας. Κάθε φορά που μία συσκευή αλλάζει κατάσταση, το αντίστοιχο ενεργειακό μοντέλο συσκευής θα ειδοποιήσει την πηγή της ενέργειας για την αλλαγή της κατάστασης της συσκευής ώστε να υπολογιστεί η νέα συνολική άντληση ενέργειας. Μέσω μίας λίστας, που περιλαμβάνει όλες τις συσκευές που αντλούν ενέργεια από μία συγκεκριμένη πηγή ενέργειας, οι συσκευές που βρίσκονται στη λίστα ενημερώνονται όταν εξαντληθεί τελείως η ενέργεια.

Το ενεργειακό μοντέλο συσκευής βασίζεται στις καταστάσεις που μπορεί να βρίσκεται μία συσκευή για να υπολογιστεί η κατανάλωση της ενέργειας από αυτή. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κατάσταση σχετίζεται με μία συγκεκριμένη τιμή κατανάλωσης ενέργειας, ώστε κάθε φορά που συμβαίνει μία αλλαγή κατάστασης στη συσκευή να μπορεί να ενημερώνεται η πηγή της

ενέργειας και να υπολογίζει την τρέχουσα άντληση ενέργειας και την εναπομένουσα ενέργεια. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί κι η κατανάλωση της ενέργειας από μία συσκευή.

Για να είναι πρακτικό το Energy Framework του ns-3, ο χρήστης πρέπει να εγκαταστήσει στους κόμβους, που επιθυμεί, μία πηγή ενέργειας και το αντίστοιχο ενεργειακό μοντέλο συσκευής στις συσκευές.

4.4.1.1 Energy Source Helper και Device Energy Model Helper

Ο Energy Source Helper ενσωματώνει την πηγή της ενέργειας σε ένα κόμβο κι ο Device Energy Model Helper συνδέει το ενεργειακό μοντέλο συσκευής με τις συσκευές.

4.4.1.2 Basic Energy Source

Έχει ως parent class την EnergySource και τις εξής παραμέτρους:

- 1) BasicEnergySourceInitialEnergyJ: Η αρχική ενέργεια σε Joules που είναι αποθηκευμένη στη Βασική Πηγή Ενέργειας (Basic Energy Source),
- 2) BasicEnergySourceRemainingEnergyJ: Η εναπομένουσα ενέργεια σε Joules που είναι αποθηκευμένη στη Βασική Πηγή Ενέργειας (Basic Energy Source),
- 3) BasicEnergySupplyVoltageV: Η αρχική παροχή τάσης σε Volts στη Βασική Πηγή Ενέργειας (Basic Energy Source) και
- 4) PeriodicEnergyUpdateInterval: Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών περιοδικών ενημερώσεων για την ενέργεια,
κι ως Trace Source: RemainingEnergy: Η εναπομένουσα ενέργεια στη Βασική Πηγή Ενέργειας (Basic Energy Source).

4.4.1.3 WiFi Radio Energy Model

Έχει ως parent class την DeviceEnergyModel και τις εξής παραμέτρους:

- 1) IdleCurrentA: Η προεπιλεγμένη ένταση σε Ampere όταν η συσκευή βρίσκεται σε Idle κατάσταση,
- 2) CcaBusyCurrentA: Η προεπιλεγμένη ένταση σε Ampere όταν η συσκευή βρίσκεται σε CcaBusy κατάσταση,
- 3) TxCurrentA: Η προεπιλεγμένη ένταση σε Ampere όταν η συσκευή βρίσκεται σε Tx κατάσταση,
- 4) RxCurrentA: Η προεπιλεγμένη ένταση σε Ampere όταν η συσκευή βρίσκεται σε Rx κατάσταση,
- 5) SwitchingCurrentA: Η προεπιλεγμένη ένταση σε Ampere όταν η συσκευή αλλάζει κατάσταση
κι ως Trace Source: TotalEnergyConsumption: Η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε μία συσκευή.

4.4.2 Mesh Framework

4.4.2.1 Mesh Radio Energy Model Helper

Ο Mesh Radio Energy Model Helper δημιουργήθηκε με σκοπό να εγκαθιστά σε κάθε πλεγματοκόμβο το Wifi Radio Energy Model.

4.4.2.2 MeshHelper

Ο MeshHelper περιλαμβάνει τις παρακάτω συναρτήσεις:

- 1) `SetSpreadInterfaceChannels (ChannelPolicy)`: Η πολιτική του καναλιού που θα εφαρμοστεί μπορεί να πάρει τις τιμές `SPREAD CHANNELS` ή `ZERO CHANNEL`. Αν επιλεγθεί η `SPREAD CHANNELS`, τότε διαφορετικά μη επικαλυπτόμενα κανάλια 20MHz συχνότητας θα ανατεθούν σε δύο διαφορετικές διεπαφές ενός πλεγματοκού κόμβου.
- 2) `SetStackInstaller (std::string type, std::string n0, const AttributeValue &n0....)`: Εγκατάσταση όλων των πρωτοκόλλων του 802.11s Προτύπου.
- 3) `SetNumberOfInterfaces (Interfaces)`: Δυνατότητα να οριστεί ο αριθμός των διεπαφών που θα έχουν οι κόμβοι του πλεγματοκού δικτύου.
- 4) `NetDeviceContainer MeshHelper::Install (const WifiPhyHelper &phyHelper, NodeContainer c)`: Περιλαμβάνει μία λίστα με τους κόμβους (c) στους οποίους πρόκειται να γίνει εγκατάσταση των πρωτοκόλλων του 802.11s Προτύπου. Επιστρέφει τη λίστα με όλες τις πλεγματοκές συσκευές που έχουν δημιουργηθεί.
- 5) `SetMacType (std::string n0, const AttributeValue &n0...)`: Χρησιμοποιεί τις παραμέτρους που ορίζει η κλάση `MeshWifiInterfaceMac` και συγκεκριμένα το `BeaconInterval` (το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο Beacons), `RandomStart` (το παράθυρο όταν ξεκινά η δημιουργία των Beacons) και `BeaconGeneration` (αν θα στέλνονται ή όχι Beacons, προεπιλεγμένη τιμή η ενεργοποιημένη).
- 6) `SetRemoteStationManager (std::string type, std::string n0, const AttributeValue &n0...)`: parent class είναι η `WifiRemoteStationManager` και παρέχει τη δυνατότητα να οριστούν διάφορες τιμές όπως ο μέγιστος αριθμός προσπαθειών αναμετάδοσης ενός σταθμού.
- 7) `SetStandard (WifiPhyStandard)`: Δυνατότητα να προσδιοριστεί το Standard που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, 802.11a,b (το προεπιλεγμένο είναι το 802.11a).
- 8) `Report ()`:

όπου n0 είναι το όνομα της παραμέτρου που ορίζεται και n0 η τιμή της παραμέτρου που ορίζεται.

4.4.2.3 MeshPointDevice

Η MeshPointDevice είναι μία συσκευή στην οποία έχουν εγκαταστηθεί όλα τα πρωτόκολλα του 802.11s Προτύπου και η κλάση της περιλαμβάνει τις παρακάτω παραμέτρους:

- 1) `Mtu`: Η μέγιστη μονάδα μετάδοσης επιπέδου MAC (προεπιλεγμένη τιμή είναι η 0xffff).
- 2) `RoutingProtocol`: Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται από το συγκεκριμένο πλεγματοκόμβο.

4.4.2.4 HWMP

Το HWMP είναι το πρωτόκολλο δρομολόγησης που ορίζει το 802.11s Πρότυπο. Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά που μπορούν να παραμετροποιηθούν:

- 1) `RandomStart`: Η τυχαία καθυστέρηση του πρώτου proactive PREQ.
- 2) `MaxQueueSize`: Ο μέγιστος αριθμός των πακέτων που μπορούν να αποθηκευτούν στην ουρά αναμονής κατά την επίλυση μίας διαδρομής.
- 3) `Dot11MeshHWMPmaxPREQretries`: Ο μέγιστος αριθμός PREQ στοιχείων που μπορεί να στείλει ένας σταθμός μέχρι να συνειδητοποιήσει ότι δεν μπορεί να φτάσει στον προορισμό του.
- 4) `Dot11MeshHWMPnetDiameterTraversalTime`: Ο χρόνος που χρειάζεται ένα πακέτο για να φτάσει από τη μία άκρη του δικτύου ως την άλλη.

- 5) Dot11MeshHWMPpreqMinInterval: Ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ δύο επιτυχώς σταλθέντων PREQs.
- 6) Dot11MeshHWMPperrMinInterval: Ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ δύο επιτυχώς σταλθέντων PERRs.
- 7) Dot11MeshHWMPactiveRootTimeout: Ο χρόνος ζωής της proactive πληροφορίας δρομολόγησης.
- 8) Dot11MeshHWMPactivePathTimeout: Ο χρόνος ζωής της reactive πληροφορίας δρομολόγησης.
- 9) Dot11MeshHWMPpathToRootInterval: Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο επιτυχώς σταλθέντων proactive PREQs.
- 10) Dot11MeshHWMPrannInterval: Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο RANNs.
- 11) MaxTtl: Η αρχική τιμή του Time To Live Field.
- 12) UnicastPerrThreshold: Ο μέγιστος αριθμός των κόμβων που μπορούν να παραλάβουν ένα PERR Unicastly.
- 13) UnicastPreqThreshold: Ο μέγιστος αριθμός των κόμβων που μπορούν να παραλάβουν ένα PREQ Unicastly.
- 14) UnicastDataThreshold: Ο μέγιστος αριθμός των κόμβων που μπορούν να παραλάβουν ένα στοιχείο broadcastly.
- 15) DoFlag: Destination only HWMP flag.
- 16) RfFlag: Reply and forward flag.

κι ως Trace Source: RouteDiscoveryTime: Ο χρόνος που διαρκεί η διαδικασία ανακάλυψης της διαδρομής δρομολόγησης.

4.4.2.5 Peer Management Protocol

Το Peer Management Protocol είναι το πρωτόκολλο που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία των peers μεταξύ δύο κόμβων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του.

- 1) MaxNumberOfPeerLinks: Ο μέγιστος αριθμός των peers που μπορεί να δημιουργήσει ένας κόμβος σε όλες τις διεπαφές του.
- 2) MaxBeaconShiftValue: Ο μέγιστος χρόνος των χρονικών μονάδων για τη μετατόπιση των Beacons.
- 3) EnableBeaconCollisionAvoidance: Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της αποφυγής συγκρούσεων μεταξύ Beacons.

κι ως Trace Source: LinkOpen και LinkClose: Δήλωση των peers που δημιουργούνται και καταστρέφονται.

4.4.2.6 Peer Link

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των Peer Links του Peer Management Protocol.

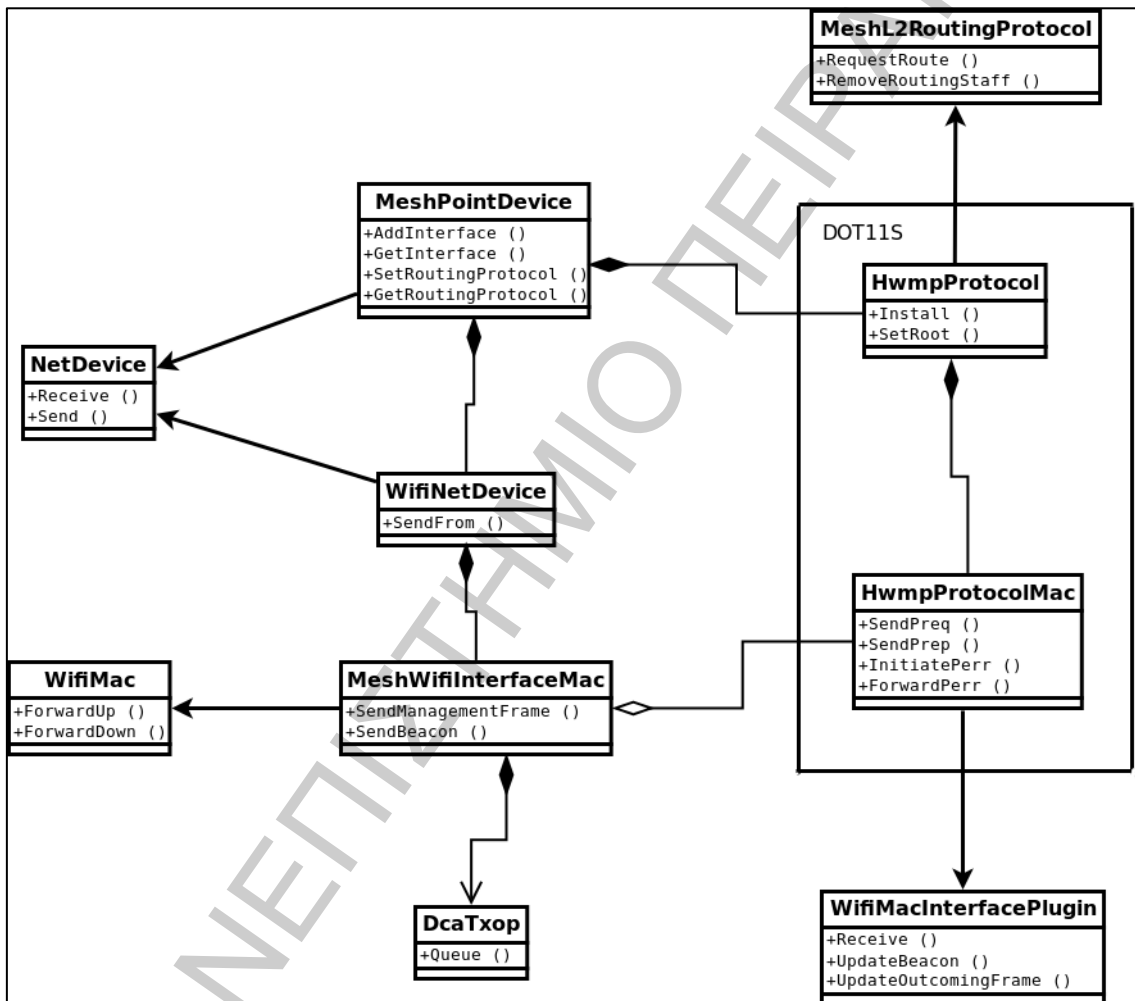
- 1) RetryTimeout
- 2) HoldingTimeout
- 3) ConfirmTimeout
- 4) MaxRetries: Ο μέγιστος αριθμός των προσπαθειών που μπορούν να γίνουν για τη δημιουργία ενός Peer μεταξύ δύο πλεγματικών κόμβων,
- 5) MaxBeaconLoss: Ο μέγιστος αριθμός των χαμένων Beacons πριν την καταστροφή του Peer.
- 6) MaxPacketFailure: Ο μέγιστος αριθμός των χαμένων πακέτων πριν την καταστροφή του Peer.

4.4.2.7 Airtime Link Metric

Η μετρική που χρησιμοποιεί το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο του 802.11s Προτύπου είναι η Airtime Link. Τα χαρακτηριστικά της φαίνονται παρακάτω.

- 1) TestLength: Το μήκος του πακέτου για τον υπολογισμό των ρυθμών που χρησιμοποιούνται από τη μετρική.
- 2) Dot11MetricTid: Το TID που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού δεδομένων (data rate).
- 3) Dot11sMeshHeaderLength: Το μήκος της επικεφαλίδας ενός πλεγματού πλαισίου.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές κλάσεις για την υλοποίηση ενός IEEE 802.11s WMN.



Εικόνα 15: Κλάσεις Υλοποίησης ενός IEEE 802.11s WMN

4.5 Υλοποίηση Προτεινόμενης Μετρικής

Στα πλαίσια της υλοποίησης της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής επιλέχθηκε η τροποποίηση της προεπιλεγμένης από το Πρότυπο μετρικής. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα πάνω στη χρησιμοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται από ένα πλεγματού κόμβο ως μετρικής από το HWMP πρωτόκολλο δρομολόγησης κι η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την προεπιλεγμένη μετρική, οδήγησαν στη δημιουργία μίας νέας μετρικής με τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) TestLength: Το μήκος του πακέτου για τον υπολογισμό των ρυθμών που χρησιμοποιούνται από τη μετρική.
- 2) Dot11MetricTid: Το TID που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού δεδομένων (data rate).
- 3) Dot11sMeshHeaderLength: Το μήκος της επικεφαλίδας ενός πλεγματοπλαισίου.
- 4) Metric: Η τιμή της μετρικής.

Όπως φαίνεται παραπάνω, τα τρία πρώτα χαρακτηριστικά είναι ίδια με την Airtime Link μετρική. Η νέα μετρική υπολογίζει τη συνολική κατανάλωση της ενέργειας σε κάθε κόμβο. Αναλυτικότερα, σε κάθε κόμβο της πλεγματοπλαισίου είναι εγκατεστημένο το μοντέλο Wifi-Radio-Energy-Model μέσω του Mesh-Radio-Energy-Model-Helper. Το μοντέλο αυτό ορίζει ποια είναι η πηγή της ενέργειας (Energy Source) για κάθε κόμβο και λαμβάνοντας υπόψη το Basic-Energy-Source, υπολογίζει την κατανάλωση της ενέργειας του κόμβου κάθε φορά που αλλάζει κατάσταση. Συγκεκριμένα, οι καταστάσεις που ορίζονται στο Wifi-Radio-Energy-Model είναι οι ακόλουθες:

- 1) IDLE,
- 2) CCA_BUSY,
- 3) TX,
- 4) RX και
- 5) SWITCHING.

Στο αρχείο Basic-Energy-Source ορίζονται

- 1) η αρχική ενέργεια του κόμβου,
- 2) το χρονικό διάστημα ενημέρωσης της ενέργειας,
- 3) η εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου,
- 4) ο λόγος εναπομένουσας ενέργειας προς αρχική ενέργεια κι
- 5) ο υπολογισμός της ενέργειας που καταναλώθηκε από ένα κόμβο.

Κάθε κόμβος που είναι μέλος του WMN έχει εγκατεστημένη τη Dot11sStack, δηλαδή πρωτόκολλα που ορίζει το IEEE 802.11s Πρότυπο, όπως το HWMP και το Peer Management Protocol. Άρα, μέσω του HWMP που είναι εγκατεστημένο σε όλους τους κόμβους, έχουμε πρόσβαση στη μετρική που ορίζεται στο πρωτόκολλο. Η μετρική που υλοποιήθηκε, περιλαμβάνει τη Μέθοδο CalculateEnergyConsumption που υπολογίζει την τιμή της μετρικής. Παρακάτω φαίνεται η σύνδεση των παραπάνω για την υλοποίηση της νέας μετρικής. Η τιμή της μετρικής είναι ίση με την ενέργεια που καταναλώνεται και δίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.

$$\text{Metric} = 1 / \text{residual energy} \quad (15)$$

$$\text{Total Energy Consumption} += \text{initial energy} - \text{residual energy} \quad (16)$$

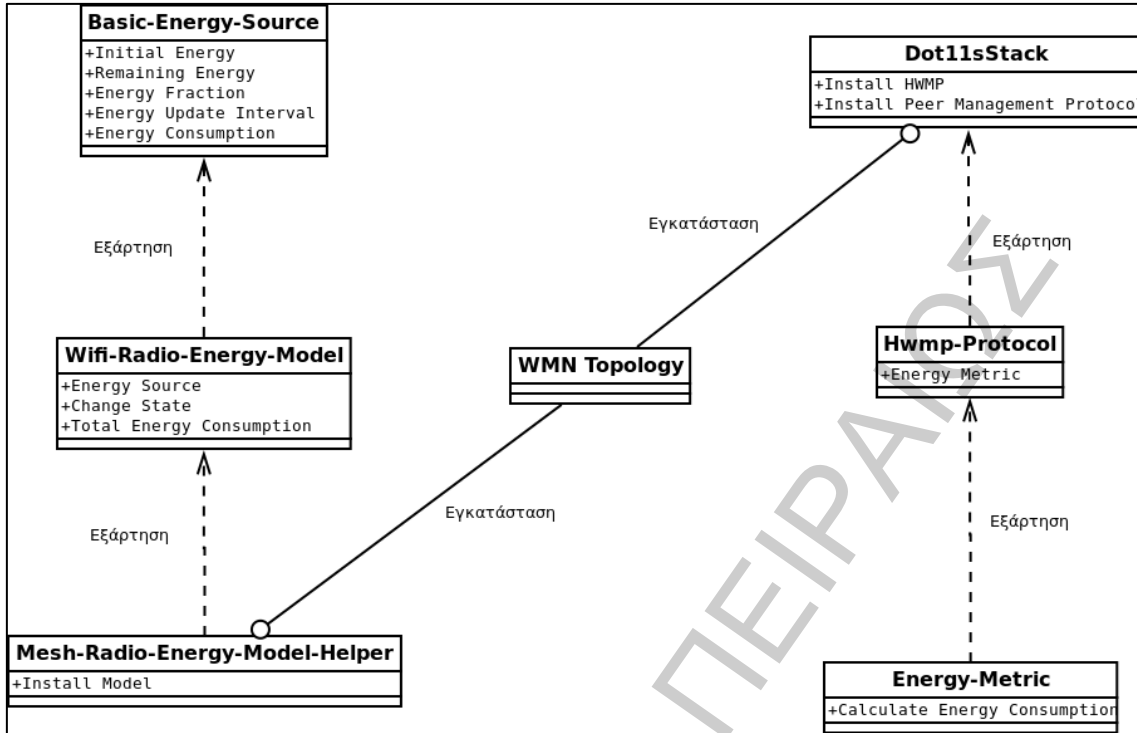
ή

$$\text{Total Energy Consumption} += \text{initial energy} - \text{energy to decrease} \quad (17)$$

Όπου, initial energy είναι η αρχική ενέργεια του κόμβου και energy to decrease είναι η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος όταν βρίσκεται σε μία από τις παραπάνω καταστάσεις.

Για να γίνεται πιο σωστά ο υπολογισμός της μετρικής κι επομένως η διαδικασία επιλογής του μονοπατιού δρομολόγησης, έχει τεθεί ένα κατώφλι (threshold). Όταν η εναπομένουσα ενέργεια ενός κόμβου γίνεται μικρότερη από την τιμή του threshold, τότε η τιμή της μετρικής γίνεται 1000000. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο συγκεκριμένος κόμβος να μην επιλέγεται για τη δρομολόγηση των πακέτων από τους υπολοίπους κόμβους του δικτύου. Συνεπώς, δεν μένει χωρίς ενέργεια παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής ολόκληρου του πλεγματοπλαισίου δικτύου.

Στην Εικόνα 16, που ακολουθεί, φαίνεται ο τρόπος υλοποίησης της νέας μετρικής



Εικόνα 16: Υλοποίηση Προτεινόμενης Μετρικής

Κεφάλαιο 5

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έλαβαν μέρος με σκοπό τη σύγκριση της προτεινόμενης μετρικής με την *airtime link* μετρική ως προς τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο και τη διάρκεια ζωής του.

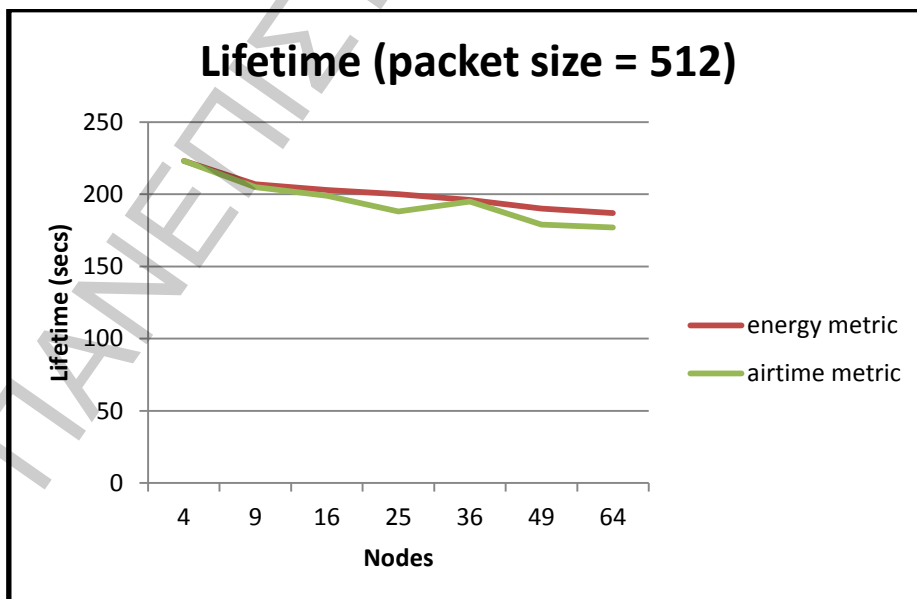
5.1 Αποτελέσματα

Στις ενότητες 4.1, 4.2 και 4.5 του 4^{ου} Κεφαλαίου έγινε αναλυτική περιγραφή της προτεινόμενης μετρικής, της αρχιτεκτονικής του δικτύου που προσομοιώθηκε κι η διαδικασία υλοποίησης της μετρικής.

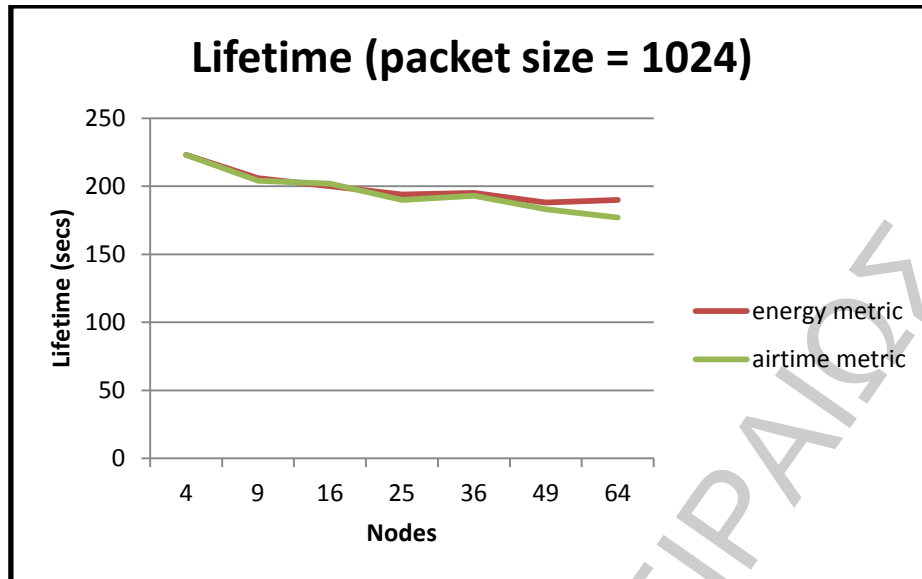
Στα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η ενέργεια που καταναλώνεται από ένα κόμβο κι η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Με τη μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας επιτυγχάνεται η παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου και συνεπώς, παρατείνεται η παροχή συνδεσιμότητας. Έτσι, το πλεγματικό δίκτυο συνεχίζει για περισσότερο χρονικό διάστημα να παρέχει τις υπηρεσίες του στους χρήστες.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται κι αναλύονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις ενός IEEE 802.11s WMN που χρησιμοποιεί ως αλγόριθμο δρομολόγησης το HWMP με την *airtime link* μετρική κι ενός IEEE 802.11s WMN που χρησιμοποιεί το HWMP με την προτεινόμενη μετρική.

Το Διάγραμμα 1 παρουσιάζει τη χρονική στιγμή που εξαντλείται τελείως η ενέργεια ενός κόμβου στα πλεγματικά δίκτυα με τις δύο προς σύγκριση μετρικές ως προς το χρόνο (secs) και τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Όπως φαίνεται κι στο Διάγραμμα 1, η προτεινόμενη μετρική παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε σχέση με την *airtime link* μετρική. Μπορούμε, επίσης, να παρατηρήσουμε πως η προτεινόμενη μετρική λειτουργεί καλύτερα σε σχέση με την *airtime link* μετρική καθώς ο αριθμός των κόμβων του δικτύου αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν υπάρχουν λίγοι κόμβοι στο δίκτυο, το μονοπάτι δρομολόγησης των πακέτων είναι μικρό, χρησιμοποιούνται αναγκαστικά οι ίδιοι κόμβοι για προώθηση των πακέτων κι από τις δύο μετρικές. Αντίθετα, όταν υπάρχουν πολλοί κόμβοι στο δίκτυο, το μονοπάτι δρομολόγησης των πακέτων είναι μεγαλύτερο κι η προτεινόμενη μετρική προσαρμόζει τη δρομολόγηση βάσει της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας ενός κόμβου, επιλέγοντας αυτόν με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, δε χρησιμοποιούνται συνεχώς οι ίδιοι κόμβοι για την προώθηση των πακέτων και το μονοπάτι δρομολόγησης αλλάζει δυναμικά βάσει της κατανάλωσης ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο παρατείνεται η διάρκεια ζωής του πλεγματικού δικτύου.

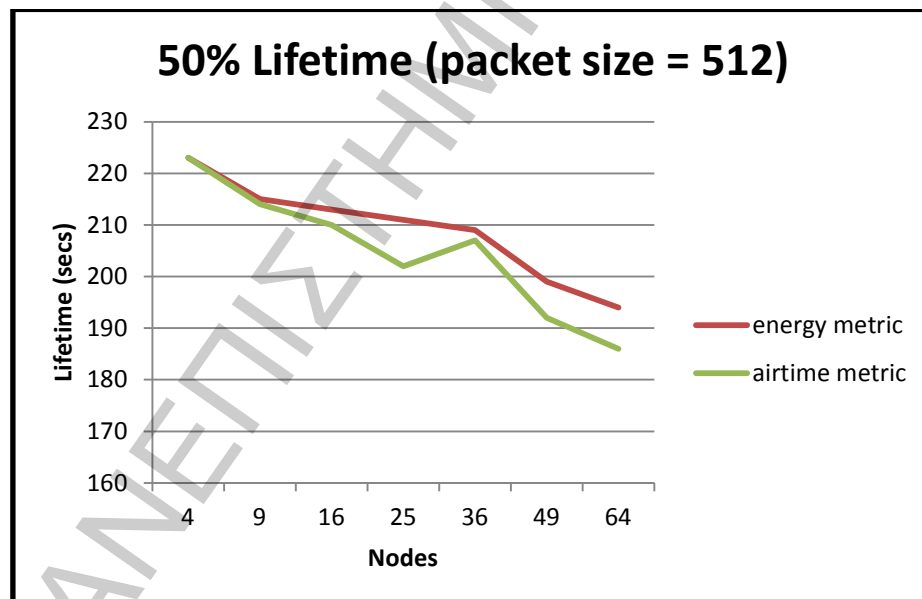


Διάγραμμα 1: Διάρκεια Ζωής του Δικτύου

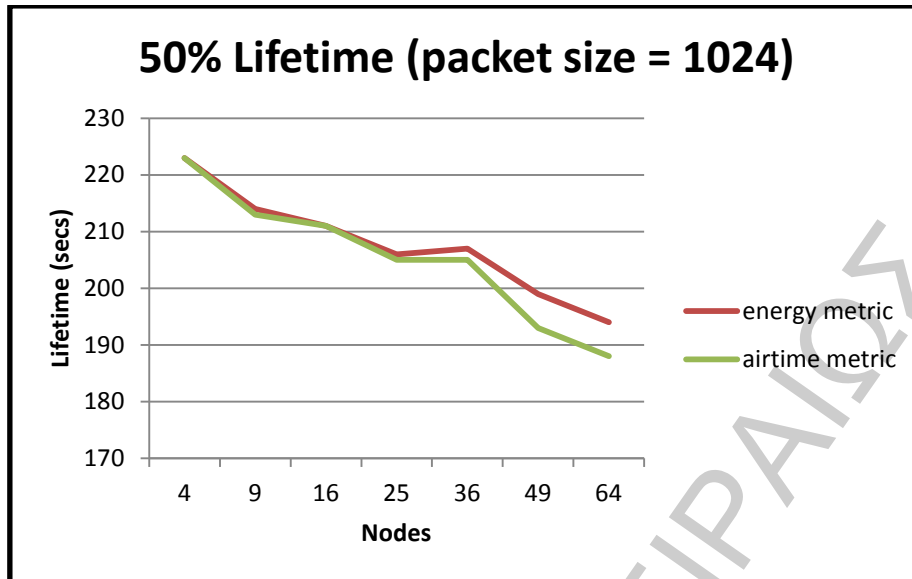


Διάγραμμα 2: Διάρκεια Ζωής του Δικτύου

Εκτός από τη χρονική στιγμή που εξαντλείται η ενέργεια ενός κόμβου, εξετάστηκε κι η χρονική στιγμή που οι μισοί κόμβοι στο δίκτυο δεν έχουν ενέργεια (Διάγραμμα 3). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις, η προτεινόμενη μετρική έχει ακόμα καλύτερη απόδοση σε σχέση με την προεπιλεγμένη μετρική. Με την προτεινόμενη μετρική γίνεται πιο «δίκαιη» δρομολόγηση στο δίκτυο όσο αφορά στην κατανάλωση της ενέργειας των κόμβων, επιτυγχάνοντας, έτσι, την παράταση της εξάντλησης της ενέργειας στους κόμβους.

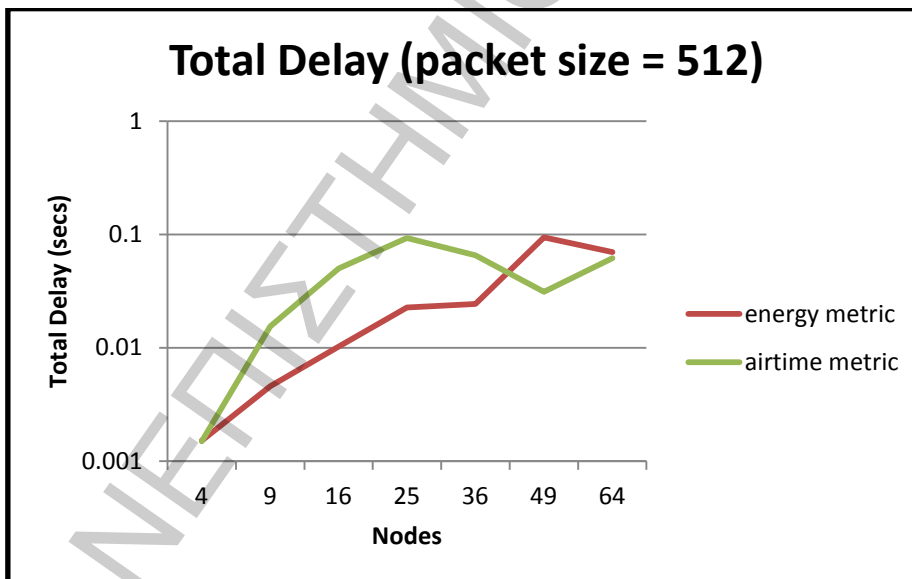


Διάγραμμα 3: Χρονική στιγμή που εξαντλείται η ενέργεια στους μισούς κόμβους του δικτύου

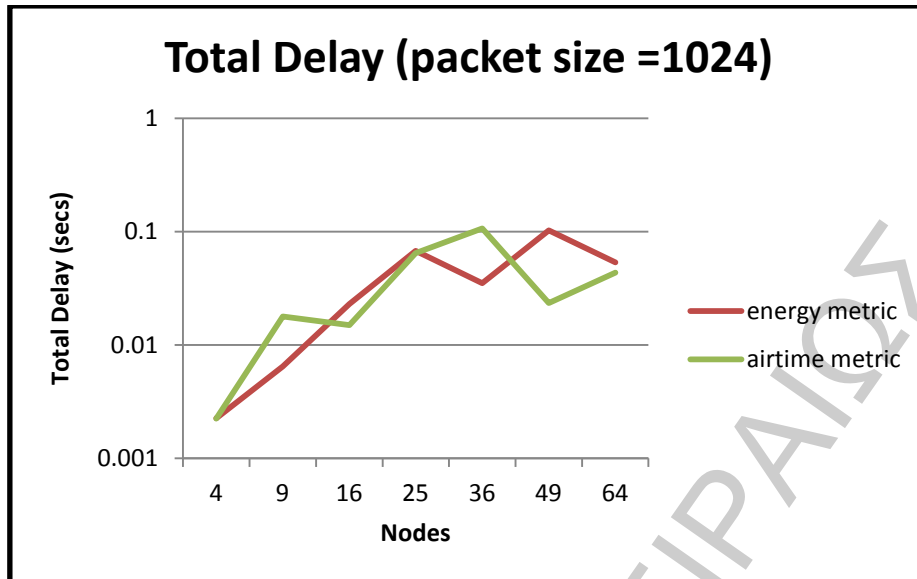


Διάγραμμα 4: Χρονική στιγμή που εξαντλείται η ενέργεια στους μισούς κόμβους του δικτύου

Η καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου είναι ένα σημαντικό ζήτημα στα ασύρματα δίκτυα. Στα Διαγράμματα 5,6 παρουσιάζεται η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης. Όπως φαίνεται στα 2 διαγράμματα, η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων είναι μεγαλύτερη στην τοπολογία που χρησιμοποιείται η προτεινόμενη μετρική. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι με τη νέα μετρική πολλές φορές επιλέγονται μεγαλύτερα σε μήκος μονοπάτια, ως αποτέλεσμα την αύξηση στην καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων.

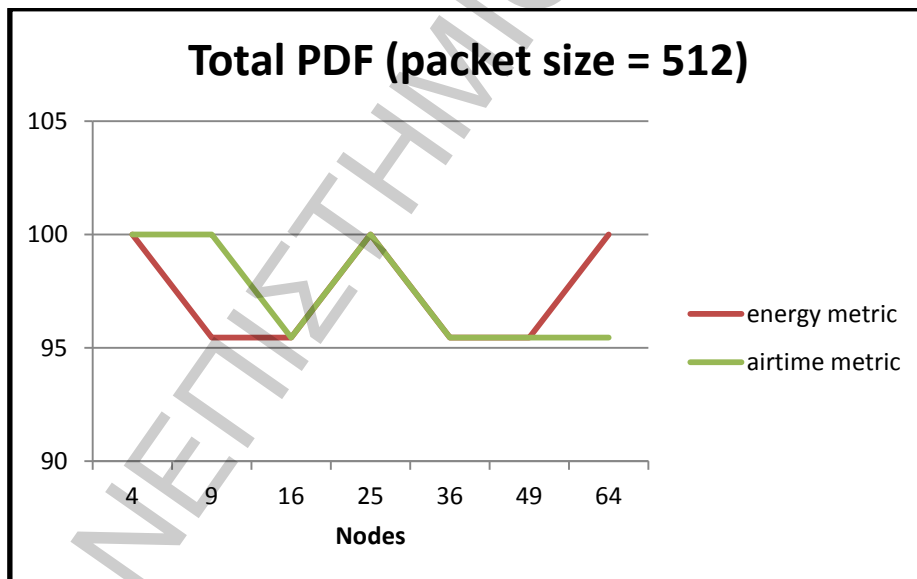


Διάγραμμα 5: Συνολική Καθυστέρηση Μετάδοσης Πακέτου

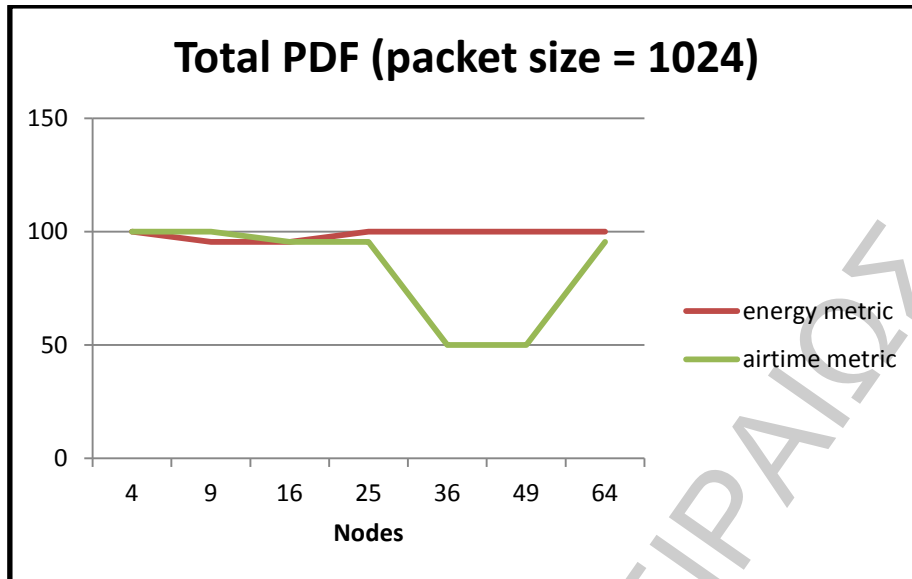


Διάγραμμα 6: Συνολική Καθυστέρηση Μετάδοσης Πακέτου

Στα ασύρματα δίκτυα είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζεται η επιτυχής παράδοση των πακέτων. Τα Διαγράμματα 7,8 δείχνουν το συνολικό λόγο παράδοσης πακέτου (Packet Delivery Fraction). Σύμφωνα με αυτά η προτεινόμενη μετρική επιτυγχάνει μεγαλύτερα ποσοστά παράδοσης πακέτου. Αυτό συμβαίνει γιατί η προτεινόμενη μετρική παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, οπότε η συνδεσιμότητα χάνεται αργότερα σε σχέση με την προεπιλεγμένη μετρική. Έτσι, τα πακέτα συνεχίζουν να λαμβάνονται επιτυχώς από τον κόμβο – προορισμό.



Διάγραμμα 7: Packet Delivery Fraction



Διάγραμμα 8: Packet Delivery Fraction

5.2 Αξιολόγηση Επίδοσης

Στο σημείο αυτό γίνεται μία γενική αξιολόγηση της επίδοσης της προτεινόμενης μετρικής βάσει των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις.

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα, η προτεινόμενη μετρική επιτυγχάνει το στόχο της, δηλαδή, την αύξηση της διάρκειας της ζωής του δικτύου. Όταν το HWMP πρωτόκολλο χρησιμοποιεί την προτεινόμενη μετρική για δρομολόγηση, τα μονοπάτια που επιλέγονται κάθε φορά για τη μετάδοση των πακέτων έχουν τη συνολικά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Το παράπανω γεγονός εξηγεί την αναμενόμενη απόδοση της μετρικής, που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, ως προς τη διάρκεια της ζωής του δικτύου.

Όσο αφορά στη συνολική καθυστέρηση που υπάρχει στο πλεγματοκό δίκτυο που χρησιμοποιεί την προτεινόμενη μετρική, παρατηρούμε μία μικρή αύξηση έναντι της συνολικής καθυστέρησης που αντιμετωπίζει το πλεγματοκό δίκτυο με τις προεπιλεγμένες από το IEEE 802.11s Πρότυπο ρυθμίσεις. Η αύξηση αυτή ήταν, επίσης, αναμενόμενη λόγω του γεγονότος ότι η προτεινόμενη μετρική, στα πλαίσια εύρεσης της διαδρομής με τη μικρότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας, μπορεί να επιλέξει μία μεγαλύτερη (σε αριθμό ενδιάμεσων κόμβων που πρέπει να διανύσει ένα πακέτο για να φτάσει στον προορισμό του) διαδρομή και συνεπώς, να είναι λίγο αυξημένη η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων.

Εξήχθει, επίσης, το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μετρική εξασφαλίζει την παράδοση των πακέτων. Επιλέγοντας μονοπάτια δρομολόγησης βάσει της κατανάλωσης της ενέργειας των κόμβων, τα μονοπάτια αλλάζουν συνεχώς με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, η ενέργεια των κόμβων εξαντλείται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με την airtime link μετρική, επιτυγχάνοντας παράταση της ζωής τους. Η παράταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συνέχεια της επικοινωνίας των κόμβων και την παροχή υπηρεσιών στους χρήστες. Οπότε, η μετάδοση των πακέτων συνεχίζεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, γεγονός που εξηγεί την καλύτερη απόδοση της προτεινόμενης μετρικής ως προς το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν επιτυχώς.

Κεφάλαιο 6

6.1 Συμπεράσματα

Η εξοικονόμηση ενέργειας κι η παράταση της ζωής του δικτύου είναι πολύ σημαντικά ζητήματα στα Ασύρματα Πλεγματικά Δίκτυα. Διασφαλίζοντας τη μικρότερη δυνατή συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, το δίκτυο παραμένει λειτουργικό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και είναι σε θέση να συνεχίζει να παρέχει συνδεσιμότητα κι υπηρεσίες στους χρήστες του. Με την εισαγωγή στο HWMP πρωτόκολλο δρομολόγησης των IEEE 802.11s WMNs μίας μετρικής που λαμβάνει υπόψη της τη συνολική κατανάλωση της ενέργειας στο δίκτυο, επιτυγχάνεται η παράταση της ζωής του πλεγματικού δικτύου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής έδειξαν ότι η προτεινόμενη μετρική παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, ενώ παράλληλα, κρατάει τα ποσοστά παράδοσης των πακέτων (PDF) σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την *airtime link* μετρική με λίγο μεγαλύτερες τιμές στη συνολική καθυστέρηση της μετάδοσης (Total Delay).

6.2 Ανοικτά Ζητήματα (Open Issues)

Τα IEEE 802.11s WMNs έχουν λάβει την προσοχή των ερευνητών και έχουν υποστεί αρκετές βελτιώσεις. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ακόμα πολλά ζητήματα που θα πρέπει να διευθετηθούν για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση από αυτά τα δίκτυα. Τα θέματα που πρέπει να διευθετηθούν παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα κι αναλυτικά εν συνεχεία.

Πίνακας 6: Ανοικτά Ζητήματα πάνω σε WMNs

Επίπεδο – Κατηγορία Ανοικτού Ζητήματος	Χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι τεχνολογίες κι οι μηχανισμοί	Προτεινόμενο Σχήμα
Φυσικό Επίπεδο	Προηγμένες τεχνολογίες κεραιών [10]	Χρήση κατευθυντικών κεραιών.
	Πολλαπλών διεπαφών και πολλαπλών καναλιών συστήματα [9]	Εκμετάλλευση των οφελών που παρέχουν για αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης του δικτύου.
	Διαχείριση των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων	Περιορισμός του προβλήματος του κρυμμένου τερματικού, κατανομημένη διαχείριση κι ελαχιστοποίηση κι εντοπισμός των δυναμικών αλλαγών της τοπολογίας.

MAC Επίπεδο	Επεκτασιμότητα [7]	Ανάπτυξη πρωτοκόλλου που να λαμβάνει υπόψη του τη συνολική βελτίωση της απόδοσης.
	Συνεργασία μεταξύ ετερογενών δικτύων [7]	Προηγμένες λειτουργίες γεφύρωσης.
	Προσαρμογή στις αλλαγές του δικτύου [7]	Προσαρμοστικοί αλγόριθμοι εκχώρησης καναλιών.
	Αποδοτικοί μηχανισμοί Πρόσβασης στο μέσο [16]	Παραμετροποίηση του MCCA μηχανισμού.
Επίπεδο Δρομολόγησης	Δρομολόγηση βάσει QoS και εξισορρόπησης φορτίου [7]	Ανάπτυξη μετρικών από MAC επίπεδο.
	Χρήση μετρικών που να λαμβάνουν πληροφορίες από το MAC επίπεδο [7], [11]	Εισαγωγή νέων μετρικών που να λαμβάνουν υπόψη τους παραμέτρους MAC επιπέδου, παραμετροποίηση της airtime link μετρικής και προσδιορισμός του υπολογισμού του ποσοστού λάθους.
	Σταθερότητα του επιλεγμένου μονοπατιού δρομολόγησης [11]	Ανάπτυξη μηχανισμού αντιμετώπισης αστάθειας διαδρομής δρομολόγησης.
	Ακριβείς πληροφορίες μεσολάβησης κατά την κίνηση των πελατών και τη μεταφορά τους σε άλλο πλεγματικό κόμβο [21]	Ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης της κινητικότητας.

Γενικά	Εξασφάλιση παροχής ενέργειας [13]	Αποδοτικός μηχανισμός διαχείρισης της ενέργειας των κόμβων.
	Αρχιτεκτονική Δικτύου [24]	Ανάπτυξη υποδομών που να εκπροσωπείται από ένα πλεγματοσύννεφο από κινητές συσκευές.
	Παροχή QoS σε όλα τα επίπεδα [15]	Ανάπτυξη μεθοδολογιών για παροχή QoS ή μηχανισμών για αποτελεσματικότερη χρήση του IEEE 802.11e από το IEEE 802.11s.

Όσο αφορά στο Φυσικό Επίπεδο και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, η τρέχουσα έκδοση του IEEE 802.11s Προτύπου χρησιμοποιεί πολυκατευθυντικές (omnidirectional) κεραίες. Πρόσφατα, έχουν γίνει πολλές έρευνες για τη χρήση κατευθυντικών (directional) κεραιών στα ασύρματα πλεγματοσύννεφα λόγω των πολλαπλών οφελών που μπορεί να προσφέρει στις ασύρματες επικοινωνίες κι αναμένεται να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις [10].

Επίσης, το IEEE 802.11s Πρότυπο δε λαμβάνει υπόψη του τις δυνατότητες χρήσης των πολλαπλών διεπαφών και πολλαπλών καναλιών (multi-interfaces and multi-channels - MIMC) συστημάτων που μπορούν να επιτύχουν αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης των ασύρματων πλεγματοσύννεφων δικτύων [9]. Ακόμα, η προεπιλεγμένη μετρική και το πρωτόκολλο που ορίζονται στο Πρότυπο δε λαμβάνουν υπόψη τους την ποικιλομορφία των καναλιών που εκχωρούνται σε κάθε σύνδεσμο, καθιστώντας τα, έτσι, ακατάλληλα για πολλαπλών διεπαφών και πολλαπλών καναλιών συστήματα.

Η διαχείριση των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων είναι μία μεγάλη πρόκληση για τα ασύρματα δίκτυα. Ο περιορισμός του προβλήματος του κρυμμένου τερματικού αποτελεί μία κατηγορία του παραπάνω προβλήματος. Η προτεινόμενη λύση από το IEEE 802.11s Πρότυπο είναι ο μηχανισμός Mesh Beacon Collision Avoidance (MBCA) που βοηθάει στον περιορισμό των συγκρούσεων μεταξύ των beacons που στέλνονται από κρυμμένους κόμβους. Όμως, ο μηχανισμός αυτός προσφέρει προστασία για εύρος δύο βημάτων μακριά από τον κόμβο που μεταδίδει. Για αυτό το λόγο ο μηχανισμός MBCA πρέπει να βελτιωθεί ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν λιγότερες συγκρούσεις μεταξύ των beacon πλαισίων, και συνεπώς, μείωση της επιβάρυνσης από αναμεταδόσεις κι αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Στην αντιμετώπιση του προβλήματος του κρυμμένου τερματικού συμβάλλει κι ο μηχανισμός πρόσβασης MCCA, τα ανοικτά ζητήματα του οποίου αναφέρονται παρακάτω.

Ένα πολύ σοβαρό ανοιχτό ζήτημα που αφορά στα IEEE 802.11s ασύρματα πλεγματοσύννεφα δίκτυα είναι η πρόσβαση στο μέσο. Μερικές από τις προκλήσεις που αφορούν αυτό το επίπεδο παρουσιάζονται παρακάτω. Ένα πρωτόκολλο MAC επιπέδου πρέπει να παρέχει επεκτασιμότητα και να λαμβάνει υπόψη του τη συνολική βελτίωση της απόδοσης σε πολλαπλά κανάλια [7]. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι τα ασύρματα πλεγματοσύννεφα δίκτυα συνεργάζονται με πολλές διαφορετικές ενσύρματες κι ασύρματες τεχνολογίες, πρέπει να αναπτυχθούν προηγμένες λειτουργίες γεφύρωσης ώστε η συνεργασία να πραγματοποιείται με διαφάνεια κι αποτελεσματικότητα. Ένα χαρακτηριστικό που πρέπει να διαθέτουν τα πρωτόκολλα MAC επιπέδου είναι η προσαρμοστικότητά τους. Λόγω της κινητικότητας των πελατών, η μορφή των ασύρματων πλεγματοσύννεφων δικτύων συνεχώς αλλάζει. Για την ομαλή λειτουργία του δικτύου και την αποφυγή της υποβάθμισης της απόδοσής του πρέπει να χρησιμοποιείται ένας

προσαρμοστικός μηχανισμός εκχώρησης των καναλιών. Ο EDCA μηχανισμός πρόσβασης έχει υιοθετηθεί από το IEEE 802.11s Πρότυπο αλλά δεν είναι κατάλληλος για πλεγματικά περιβάλλοντα, που υποστηρίζουν υψηλό φορτίο κίνησης, λόγω των πολλαπλών συγκρούσεων που συμβαίνουν στο μέσο από τον ανταγωνισμό για την πρόσβαση σε αυτό [16]. Παρ' όλο που στο πρότυπο ορίζεται ο MCCA μηχανισμός, που παρέχει χωρίς συγκρούσεις κι εγγυημένη πρόσβαση στο μέσο κατά τη διάρκεια των MCCAOP, δεν είναι αποδοτικό σε περιπτώσεις που δεν είναι όλοι οι πλεγματικοί σταθμοί MCCA κόμβοι. Για το λόγο αυτό πρέπει να αναπτυχθεί ένα νέο πρωτόκολλο ή να παραμετροποιηθεί το υπάρχον ώστε να επιτυγχάνει βέλτιστη συνολική απόδοση του δικτύου.

Στα ασύρματα πλεγματικά δίκτυα η δρομολόγηση των δεδομένων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Το HWMP του IEEE 802.11s προτύπου δεν παρέχει επεκτασιμότητα και βελτιστοποίηση της διαδρομής. Επίσης, υπάρχουν πολλά ανοικτά ζητήματα πάνω στη δρομολόγηση, τα οποία αναφέρονται παρακάτω. Οι περισσότερες εφαρμογές των IEEE 802.11s συστημάτων έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται σε IEEE 802.11s WMNs πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους διάφορες QoS παραμέτρους και να κάνουν εξισορρόπηση φορτίου. Τέλος, οι μετρικές που χρησιμοποιούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, πρέπει να προέρχονται από το MAC επίπεδο και να λαμβάνουν υπόψη τους τις ιδιαιτερότητες των πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων και πολλαπλών καναλιών ασύρματων πλεγματικών δικτύων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προεπιλεγμένο μετρική που χρησιμοποιείται από το IEEE 802.11s Πρότυπο είναι το *airtime link*. Παρ' όλο που δίνεται η εξίσωση υπολογισμού της, δεν αναφέρεται πούθενά ο τρόπος υπολογισμού του ποσοστού λάθους e_f [11]. Το Open11S Project χρησιμοποιεί το λόγο λάθους των unicast πακέτων για τον υπολογισμό του ποσοστού λάθους. Η χρησιμοποίηση αυτής της μετρικής δεν είναι τόσο αποδοτική για εφαρμογή σε Smart Grid περιβάλλοντα όπου υποστηρίζουν μεγάλη ποικιλία εφαρμογών με διαφορετικό μέγεθος πακέτων. Για το λόγο αυτό πρέπει να αναπτυχθεί μία νέα μέθοδος υπολογισμού του ποσοστού λάθους του *airtime link metric*.

Το πρόβλημα της αστάθειας της διαδρομής δρομολόγησης στο HWMP είναι άλλο ένα ανοικτό ζήτημα πάνω στα 802.11s ασύρματα πλεγματικά δίκτυα. Η αστάθεια της διαδρομής συμβαίνει όταν το μονοπάτι δρομολόγησης ενός κόμβου αλλάζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων, η οποία προκαλεί υποβάθμιση του κόστους συνδέσμου [11]. Συνεπώς πρέπει να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός που να αντιμετωπίζει το πρόβλημα της αστάθειας της διαδρομής δρομολόγησης ώστε να μην χάνονται πακέτα κι η δρομολόγηση να είναι πιο αποδοτική.

Το IEEE 802.11s πρότυπο ορίζει τις διαδικασίες που ακολουθούνται από τους πλεγματικούς σταθμούς ώστε αυτοί να προσφέρουν ασύρματες πλεγματικές υπηρεσίες σε άλλους πλεγματικούς σταθμούς και στους κληρονόμους πελάτες (*legacy clients*). Όταν οι κληρονόμοι πελάτες θέλουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους μέσω των IEEE 802.11s ασύρματων πλεγματικών δικτύων, οι πλεγματικοί σταθμοί που σχετίζονται πρέπει να γνωρίζουν τις MAC διευθύνσεις των πηγών και των προορισμών κληρονόμων πελατών [21]. Οι πληροφορίες μεσολάβησης στα PXUs, που ανταλλάσσονται μεταξύ των πλεγματικών σταθμών, περιέχουν τις παραπάνω διευθύνσεις. Όμως, όταν οι κληρονόμοι πελάτες είναι κινητοί, οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι ανακριβείς. Όταν κάποιος κληρονόμος πελάτης μετακινείται από ένα πλεγματικό σταθμό σε ένα άλλο εντός του δικτύου, τότε ο πρώτος πλεγματικός σταθμός μπορεί να στείλει ανακριβείς πληροφορίες μεσολάβησης ενημερώνοντας τους υπόλοιπους πλεγματικούς σταθμούς ότι ο κληρονόμος πελάτης είναι ακόμα συσχετισμένος μαζί του. Έτσι, πακέτα που προορίζονται στο συγκεκριμένο κληρονόμο πελάτη, δε φτάνουν ποτέ στον προορισμό τους. Ενώ έχουν προταθεί μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας των πελατών, κανένας από αυτούς δεν έχει ενσωματωθεί στο πρότυπο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα κι οι κληρονόμοι πελάτες να μη χάνουν τα πακέτα που προορίζονται για αυτούς, πρέπει να αναπτυχθεί ένα σύστημα διαχείρισης της κινητικότητας που να δουλεύει σε επίπεδο δύο, για λόγους συμβατότητας με το IEEE 802.11s πρότυπο και να είναι αποδεκτό από αυτό.

Σε αστικές περιοχές η εξασφάλιση παροχής ενέργειας στους πλεγματικούς σταθμούς είναι εύκολη. Όμως, σε αγροτικές ή πιο απομονωμένες περιοχές η παροχή ρεύματος μπορεί να είναι δύσκολη υπόθεση [13]. Για το λόγο αυτό πρέπει οι πλεγματικοί σταθμοί ενός δικτύου να

καταναλώνουν όσο λιγότερη ενέργεια μπορούν. Πρέπει να αναπτυχθεί ένας αποδοτικός μηχανισμός διαχείρισης ενέργειας που να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου και να μην απομονώνει μέρη αυτού.

Έχει μελετηθεί αρκετά η αρχιτεκτονική των IEEE 802.11s ασύρματων πλεγμάτων δικτύων. Σύμφωνα με το [24], αν η απόσταση μεγαλώσει και το ασύρματο πλεγματο δίκτυο γίνει πολύ αραιό, τότε η συνδεσιμότητα χάνεται. Υποστηρίζεται ότι όταν το δίκτυο είναι αρκετά πυκνό, τότε δεν υπάρχει λόγος ύπαρξης ενός μηχανισμού ανακάλυψης μονοπατιού για τη δρομολόγηση των πακέτων. Για την αποφυγή αυτής της επιβάρυνσης, υποστηρίζεται ότι είναι πιο αποδοτικό το δίκτυο να αλλάξει σε δίκτυο υποδομής κι οι κόμβοι να συνδέονται στα σημεία πρόσβασης. Ένα σενάριο, που δεν έχει υλοποιηθεί έως τώρα, είναι η ελεύθερη ανάπτυξη υποδομών που να εκπροσωπείται από ένα πλεγματο σύννεφο από κινητές συσκευές. Το παραπάνω σενάριο, ίσως, ενισχύσει τη συνδεσιμότητα σε αυτοεξυπηρετούμενες περιοχές και βοηθήσει στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος σε αυτές τις περιοχές.

Τα WMNs υποστηρίζουν πολλές διαφορετικές υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες αυτές έχουν διαφορετικούς τύπους κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και διαφορετικές απαιτήσεις. Η ανάπτυξη μεθοδολογιών για παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας (QoS) σε IEEE 802.11s WMNs έχει απασχολήσει πολύ την ερευνητική κοινότητα λόγω της έλλειψης ορισμένων μηχανισμών από το Πρότυπο [15]. Όμως, σε εφαρμογές που απαιτείται παροχή QoS χρησιμοποιώντας κατηγορίες πρόσβασης, που αντιστοιχίζονται σε πολλαπλές ουρές δεδομένων, τα IEEE 802.11s χρησιμοποιούν τις κλάσεις QoS που ορίζονται στο IEEE 802.11e γιατί το ίδιο το πρότυπο δεν παρέχει μηχανισμούς για παροχή QoS.

7 Αναφορές

- [1] I. Akyildiz, X. Wang, "A Survey on Wireless Mesh Networks", Communications Magazine, IEEE, Vol. 43, No. 9, pp. S23 - S30, 2005.
- [2] S. Rao, Y. K. Krishna, K. Rao, "A Survey of Design Issues for Routing Protocols in WMNs", International Journal of Research and Reviews in Ad Hoc Networks (IJRRAN), Vol. 1, No. 2, pp. 43 – 47, 2011.
- [3] OFDM, http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing
- [4] CSMA/CA, http://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_sense_multiple_access_with_collision_avoidance
- [5] "IEEE P802.11s/d12.00. draft amendment to Standard-IEEE 802.11s: Mesh Networking", 2011. 5
- [6] A. POUR, N. NASSER, T. TALEB, "TOPOLOGICAL-BASED ARCHITECTURES FOR WIRELESS MESH NETWORKS", Wireless Communications, IEEE, Vol. 18, No. 1, pp. 74 – 81, 2011.
- [7] A. Sgora, D. D. Vergados, P. Chatzimisios "IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks: Challenges and Perspectives", In Proceedings of MOBILIGHT, pp.263-271, 2009.
- [8] M. GUESMIA, M. GUEZOURI, N. MBAREK, "Performance evaluation of the HWMP proactive tree mode for IEEE 802.11s based Wireless Mesh Networks", Communications and Networking (ComNet), 2012 Third International Conference, pp. 1 – 7, 2012.
- [9] S. Lee, Y. Ko, Y. Hong, H. Kim, "A New MIMC Routing Protocol Compatible with IEEE 802.11s based WLAN Mesh Networks", Information Networking (ICOIN), 2011 International Conference, pp. 126 – 131, 2011.
- [10] J. Ben-Othman , L. Mokdad, M. O. Cheikh, "A new architecture of wireless mesh networks based IEEE 802.11s directional antennas", Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference, pp. 1 – 5, 2011.
- [11] J. Jung, K. Lim, J. Kim, Y. Ko, Y. Kim, S. Lee, "Improving IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks for Reliable Routing in the Smart Grid Infrastructure", Communications Workshops (ICC), 2011 IEEE International Conference, pp. 1 – 5, 2011.
- [12] M. Rafique, M. Porsch, T. Bauschert, "Modified HWMP for Wireless Mesh Networks with Smart Antennas", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), pp. 1 – 6, 2011.
- [13] M. Mhlanga, T. Olwal, M. Mutanga, M. Adigun, "Energy Optimization based Path Selection Algorithm for IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks", IEEE Africon 2011 - The Falls Resort and Conference Centre, Livingstone, Zambia, pp. 1 – 6, 2011.
- [14] Y. Kim, P. Tague "Jamming-resistant Distributed Path Selection on Wireless Mesh Networks",
- [15] K. Lim, Y. Ko, S. Lee, S. Park, "Congestion-aware Multi-Gateway Routing for Wireless Mesh Video Surveillance Networks", Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference, pp. 152 – 154, 2011.
- [16] Md. S. Islam, M. M. Alam, C. S. Hong, S. Lee, "eMCCA: An Enhance Mesh Coordinated Channel Access Mechanism for IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks", Journal of Communications and Networks, Vol. 13, No. 6, pp. 639 – 654, 2011.
- [17] A. Krasilov, A. Lyakhov, A. Safonov, "Interference, even with MCCA channel access method in IEEE 802.11s mesh networks", 2011 Eighth IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, pp. 752 – 757, 2011.
- [18] M. Nezhad, B. Bellalta, M. Zapata, L. Cerd´a-Alabern, "Should Next Generation Wireless Mesh Networks consider Dynamic Channel Access?", In New Trends in Next Generation WLANs (Special Session at BCFIC 2012, The Baltic Congress on Future Internet Communications), pp. 1 – 8, 2012.

- [19] C. Roy, Z. Dziong, J. Gregoire, "Fast Multichannel Switching for IEEE 802.11s Multiradio Wireless Mesh Networks", 6th IEEE International Workshop on Heterogeneous, Multi-Hop, Wireless and Mobile Networks, pp. 303 – 308, 2011.
- [20] M. Esam, M. Ashour, "Cooperative Game Strategy for IEEE 802.11s Mesh WLAN Power Management", Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference, pp. 1 – 5, 2011.
- [21] S. Lee, H. Jeong, D. Kim, "Mobility Management Scheme for Supporting Legacy Clients in IEEE 802.11s WMNs", 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 102 – 103, 2012.
- [22] Y. Lin, S. Tsao, S. Chang, S. Cheng, C. Ku, "DESIGN ISSUES AND EXPERIMENTAL STUDIES OF WIRELESS LAN MESH", IEEE Wireless Communications, Vol. 17, No. 2, pp. 32 – 40, 2010.
- [23] Y. Lin, S. Chang, J. Yeh, S. Cheng, "Indoor deployment of IEEE 802.11s mesh networks: Lessons and guidelines", Journal Ad Hoc Networks, Vol. 9, No. 8, pp. 1404-1413, 2011.
- [24] R. Carrano, L. C. S. Magalhães, D. C. M. Saade, C. V. N. Albuquerque, "IEEE 802.11s Multihop MAC: A Tutorial", Communications Surveys & Tutorials, IEEE, Vol. 13, No. 1, pp. 52 – 67, 2011.
- [25] D. Bansal, S. Sofat, P. Chawla, P. Kumar, "Deployment and Evaluation of IEEE 802.11 based Wireless Mesh Networks in Campus Environments", Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011, 2011, London, U.K.
- [26] A. Prasina, M. A. Bhagyaveni, "Heterogeneous IEEE 802.11s Based Wireless Mesh Networks", European Journal of Scientific Research, Vol. 75 No. 1 pp. 66-74, 2012.
- [27] G. Hiertz, D. Denteneer, S. Max, R. Taori, J. Cardona, L. Berlemann, B. Walke, "IEEE 802.11S: THE WLAN MESH Standard", Wireless Communications, IEEE, Vol. 17, No. 1, pp. 104 – 111, 2010.
- [28] G. Hiertz, S. Max, Y. Zang, T. Junge, D. Denteneer, "IEEE 802.11s MAC Fundamentals", MeshTech'07 – First IEEE International Workshop on Enabling Technologies and Standards for Wireless Mesh Networking, 2008.
- [29] C. Middleton, A. Potter, "Is it Good to Share? A Case Study of FON and Meraki Approaches to Broadband Provision", International Telecommunication Society 17th Biennial Conference Montreal, pp. 1 – 36, 2008.
- [30] I. F. Akyildiz, X. Wang, "Cross-Layer Design in Wireless Mesh Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 2, pp. 1061 – 1076, 2008.
- [31] Q. Zhang, Y. Zhang, "Cross-Layer Design for QoS Support in Multihop Wireless Networks", Proceedings of the IEEE, Vol. 96, pp. 64 – 76, 2008.
- [32] S. Marwaha, J. Indulska, M. Portmann, "Challenges and recent advances in QoS provisioning in wireless mesh networks", Computer and Information Technology, 2008. CIT 2008, pp. 618 – 623, 2008.
- [33] J. Ben-Othman, L. Mokdad, M. Cheikh, "Q-HWMP: improving end-to-end QoS for 802.11s based mesh networks", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), pp. 1 – 6, 2010.
- [34] I. F. Akyildiz, X. Wang, "Cross-Layer Design in Wireless Mesh Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 2, pp. 1061 – 1076, 2008.
- [35] Y. Liu, G. Dan, "Cross-layer Design for Channel Assignment with Connectivity Maintenance in Wireless Mesh Networks", International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), pp. 1996 – 2000, 2011.
- [36] V. Kapse, U. Shrawanakar, "Survey of channel assignment schemes in wireless mesh network", Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference, Vol. 3, pp. 103 – 107, 2011.
- [37] S. Ghannay, S. Gammar "Joint routing and channel assignment protocol for multi-radio multi-channel IEEE 802.11s mesh networks", Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2011 4th Joint IFIP, pp. 1 – 8, 2011.

- [38] X. Zhu, "Cross-Layer Routing Algorithm Design for QoS Provisionings over 802.11s Wireless Mesh Networks", Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), pp. 1 – 5, 2009.
- [39] G. Shui, S. Shen, "A Cross-Layer Design for Distributed Channel Assignment over Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks", Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2008. ICINIS '08, pp: 209 – 212, 2008.
- [40] H. Skalli, S. Ghosh, S. K. Das, L. Lenzini, M. Conti, "Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions", IEEE Communications Magazine, Vol. 45, pp. 86 – 95, 2007.
- [41] F. Kaabi, S. Ghannay, F. Filali, "Channel Allocation and Routing in Wireless Mesh Networks: A survey and qualitative comparison between schemes", International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN), Vol.2, No.1, 2010.
- [42] R. Zhu, J. Wang, "Power-Efficient Spatial Reusable Channel Assignment Scheme in WLAN Mesh Networks", Journal Mobile Networks and Applications, Vol. 17, No. 1, pp. 53-63, 2012.
- [43] U. Ashraf, S. Abdellatif, G. Juanole, "Route Maintenance in IEEE 802.11 wireless mesh networks", Journal Computer Communications, Vol 34, No. 13, pp. 1604-1621, 2011.
- [44] M. Islam, M. Alam, M. Hamid, C. Hong, S. Lee, "EFT: a high throughput routing metric for IEEE 802.11s wireless mesh networks", Springer-Verlag, DOI. 10.1007/s12243-009-0130-1, Vol.65, pp. 247-262, 2009.
- [45] Y. Jin, H. Miao, Q. Ge, C. Zhou, "Expected Transmission Energy Route Metric for Wireless Mesh Sensor Networks", International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, Vol. 2011 pp. 1 – 7, 2011.
- [46] S. Kim, O. Lee, S. Choi, S. Lee, "MAC-aware routing in wireless mesh networks", Wireless on Demand Network Systems and Services, WONS '07, Oberguyrgl, DOI. 10.1109/WONS.2007.340470, pp. 46 – 49, 2007.
- [47] M. Campista, P. Esposito, I. Moraes, L. Costa, O. Duarte, "Routing Metrics and Protocols for Wireless Mesh Networks", Network, IEEE, DOI. 10.1109/MNET.2008.4435897, Vol. 22, pp. 6 – 12, 2008.
- [48] ns-3, <http://www.nsnam.org/>

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρατίθενται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της τοπολογίας που αναλύθηκε.

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/wifi-module.h"
#include "ns3/mesh-module.h"
#include "ns3/mesh-helper.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/mesh-module.h"
#include "ns3/wifi-phy.h"
#include "ns3/application.h"
#include "ns3/flow-monitor.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"
#include "ns3/ipv4-flow-classifier.h"
#include "ns3/random-variable.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/energy-module.h"
#include "ns3/mesh-radio-energy-model-helper.h"
#include "ns3/basic-energy-source-helper.h"
#include <iostream>
#include <sstream>
#include <fstream>
#include <vector>

#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"

using namespace ns3;

class MeshTest
{
public:
    // Init test
    MeshTest ();
    // Configure test from command line arguments
    void Configure (int argc, char ** argv);
    // Run test
    int Run ();
private:
    int m_xSize; //x size of the grid
    int m_ySize; //y size of the grid
    double m_step; //separation between nodes
    double m_randomStart;
    double m_totalTime;
    double m_packetInterval;
    uint16_t m_packetSize;
    uint32_t m_nIfaces;
    bool m_chan;
    bool m_pcap;
    std::string m_stack;
    std::string m_txrate;
    //to calculate the length of the simulation
    float m_timeTotal, m_timeStart, m_timeEnd;
    // List of network nodes
    NodeContainer nodes;
    // List of all mesh point devices
    NetDeviceContainer meshDevices;
    // Addresses of interfaces:
    Ipv4InterfaceContainer interfaces;
    // MeshHelper. Report is not static methods
    MeshHelper mesh;
private:
    // Create nodes and setup their mobility
    void CreateNodes ();
```



```

// Install internet m_stack on nodes
void InstallInternetStack ();
// Install applications randomly
void InstallApplicationRandom ();
// Print mesh devices diagnostics
void Report ();
void Progress ();
};

MeshTest::MeshTest () :

    m_xSize (2),
    m_ySize (2),
    m_step (120),
    m_randomStart (0.1),
    m_totalTime (240),
    m_packetInterval (10.0),
    m_packetSize (1024),
    m_nIfaces (1),
    m_chan (false),
    m_pcap (false),
    m_stack ("ns3::Dot11sStack"),
    m_txrate ("150kbps")
{
}

void
MeshTest::Configure (int argc, char *argv[])
{
    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("m_xSize", "m_xSize", m_xSize);
    cmd.AddValue ("m_ySize", "m_ySize", m_ySize);
    cmd.AddValue ("m_txrate", "m_txrate", m_txrate);
    cmd.Parse (argc, argv);
}

void MeshTest::CreateNodes ()
{
    int i, j;
    double m_txpower = 18.0; // dbm
    // Calculate m_ySize*m_xSize stations grid topology
    double position_x = 0;
    double position_y = 0;
    ListPositionAllocator myListPositionAllocator;
    for (i = 1; i <= m_xSize; i++){
        for (j = 1; j <= m_ySize; j++){
            //std::cout << "Node at x = " << position_x << ", y = " <<
position_y << "\n";
            Vector3D n_pos (position_x, position_y, 0.0);
            myListPositionAllocator.Add(n_pos);
            position_y += m_step;
        }
        position_y = 0;
        position_x += m_step;
    }

    // Create the nodes
    nodes.Create (m_xSize*m_ySize);
    // Configure YansWifiChannel
    YansWifiPhyHelper WifiPhy = YansWifiPhyHelper::Default ();
    WifiPhy.Set ("EnergyDetectionThreshold", DoubleValue (-89.0) );
    WifiPhy.Set ("CcaModelThreshold", DoubleValue (-62.0) );
    WifiPhy.Set ("TxGain", DoubleValue (1.0) );
    WifiPhy.Set ("RxGain", DoubleValue (1.0) );
    WifiPhy.Set ("TxPowerLevels", UIntegerValue (1) );
    WifiPhy.Set ("TxPowerEnd", DoubleValue (m_txpower) );
    WifiPhy.Set ("TxPowerStart", DoubleValue (m_txpower) );
    WifiPhy.Set ("RxNoiseFigure", DoubleValue (7.0) );

    YansWifiChannelHelper WifiChannel;
    WifiChannel.SetPropagationDelay
("ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel");

```

```

    WifiChannel.AddPropagationLoss
("ns3::LogDistancePropagationLossModel", "Exponent", StringValue ("2.7"));
    WifiPhy.SetChannel (WifiChannel.Create ());
    // Configure the parameters of the Peer Link
    Config::SetDefault ("ns3::dot11s::PeerLink::MaxBeaconLoss",
UIntegerValue (20));
    Config::SetDefault ("ns3::dot11s::PeerLink::MaxRetries", UIntegerValue
(4));
    Config::SetDefault ("ns3::dot11s::PeerLink::MaxPacketFailure",
UIntegerValue (5));
    // Configure the parameters of the Peer Management Protocol
    //Config::SetDefault
("ns3::dot11s::PeerManagementProtocol::m_enableBca", BooleanValue (false));
    // Config::SetDefault
("ns3::dot11s::PeerManagementProtocol::EnableBeaconCollision-
Avoidance", BooleanValue (false));
    // Configure the parameters of the HWMP
    Config::SetDefault
("ns3::dot11s::HwmpProtocol::Dot11MeshHWMPActivePathTimeout", TimeValue
(Seconds (100)));
    Config::SetDefault
("ns3::dot11s::HwmpProtocol::Dot11MeshHWMPActiveRootTimeout", TimeValue
(Seconds (100)));
    Config::SetDefault
("ns3::dot11s::HwmpProtocol::Dot11MeshHWMPmaxPREQretries", UIntegerValue (5));
    Config::SetDefault
("ns3::dot11s::HwmpProtocol::UnicastPreqThreshold", UIntegerValue (10));
    Config::SetDefault
("ns3::dot11s::HwmpProtocol::UnicastDataThreshold", UIntegerValue (5));
    Config::SetDefault ("ns3::dot11s::HwmpProtocol::DoFlag", BooleanValue
(true));
    Config::SetDefault ("ns3::dot11s::HwmpProtocol::RfFlag", BooleanValue
(false));
    // Stack installer creates all protocols and install them to mesh point
device
    mesh = MeshHelper::Default ();
    mesh.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211a);
    mesh.SetMacType ("RandomStart", TimeValue (Seconds(m_randomStart)));
    mesh.SetRemoteStationManager ("ns3::ConstantRateWifiManager", "DataMode",
StringValue ("OfdmRate6Mbps"), "RtsCtsThreshold", UIntegerValue (2500));
    // Set number of interfaces - default is single-interface mesh point
    mesh.SetNumberOfInterfaces (m_nInterfaces);
    mesh.SetStackInstaller (m_stack);
    //If multiple channels is activated
    if (m_chan) {
        mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::SPREAD_CHANNELS);
    }
    else {
        mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::ZERO_CHANNEL);
    }
    // Install protocols and return container if MeshPointDevices
    meshDevices = mesh.Install (WifiPhy, nodes);
    // Place the protocols in the positions calculated before
    MobilityHelper mobility;
    mobility.SetPositionAllocator (&myListPositionAllocator);
    mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
    mobility.Install(nodes);

    // Energy Model
    // energy source
    BasicEnergySourceHelper basicSourceHelper;
    // configure energy source
    basicSourceHelper.Set ("BasicEnergySourceInitialEnergyJ", DoubleValue
(0.3));
    // install source
    EnergySourceContainer sources = basicSourceHelper.Install (nodes);

    // device energy model
    MeshRadioEnergyModelHelper meshRadioEnergyModelHelper;
    // configure radio energy model
    meshRadioEnergyModelHelper.Set ("TxCurrentA", DoubleValue (0.0174));
    // install device model

```

```

DeviceEnergyModelContainer deviceModels =
meshRadioEnergyModelHelper.Install (meshDevices, sources);
}

void MeshTest::InstallInternetStack ()
{
    //Install the internet protocol stack on all nodes
    InternetStackHelper internetStack;
    internetStack.Install (nodes);
    //Assign IP addresses to the devices interfaces
    Ipv4AddressHelper address;
    address.SetBase ("192.168.1.0", "255.255.255.0");
    interfaces = address.Assign (meshDevices);
}
void MeshTest::InstallApplicationRandom ()
{
    //int m_dest_port;

    // Set the parameters of the onoff application
    //Config::SetDefault ("ns3::OnOffApplication::PacketSize",
UIntegerValue(m_packetSize));
    //Config::SetDefault ("ns3::OnOffApplication::DataRate", StringValue
(m_txrate));

    int port = 49000;
    UdpServerHelper server(port);
    ApplicationContainer apps = server.Install(nodes.Get(3));
    apps.Start(Seconds(1.0));
    apps.Stop(Seconds(230.0));

    UdpClientHelper client(interfaces.GetAddress(3), port);
    //client.SetAttribute("MaxPackets", UIntegerValue(maxPacketCount));
    client.SetAttribute("Interval", TimeValue(Seconds(m_packetInterval)));
    client.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(m_packetSize));
    ApplicationContainer apps2 = client.Install(nodes.Get(0));
    apps2.Start(Seconds(5.0));
    apps2.Stop(Seconds(220.0));
}

void MeshTest::Progress (){
    double interval = 0.1;
    Simulator::Schedule (Seconds(interval), & MeshTest::Progress, this);
    //std::cout << "Time " << (Simulator::Now()).GetSeconds() << std::endl;
}

int MeshTest::Run ()
{
    CreateNodes ();

    //std::cout<<"nodes created"<<"\n";
    InstallInternetStack ();
    InstallApplicationRandom ();
    //std::cout<<"before flowmonitor"<<"\n";
    // Install FlowMonitor on all nodes
    FlowMonitorHelper flowmon;
    Ptr<FlowMonitor> monitor = flowmon.InstallAll();
    m_timeStart=clock();
    // std::cout<<"before schedule"<<"\n";
    Simulator::Schedule (Seconds(m_totalTime), & MeshTest::Report, this);
    Simulator::Schedule (Seconds(0.0), & MeshTest::Progress, this);
    Simulator::Stop (Seconds (m_totalTime));

    //std::cout<<"before run"<<"\n";
    Simulator::Run ();
    //std::cout<<"after run"<<"\n";
    // Define variables to calculate the metrics
    int k=0;
    int totalTxPackets = 0;
    int totalRxPackets = 0;
    double totalTxbytes = 0;
    double totalRxbytes = 0;

```

```

double totaldelay = 0;
double totalrxbitrate = 0;
double difftx, diffrx;
double pdf_value, rxbitrate_value, txbitrate_value, delay_value;
double pdf_total, rxbitrate_total, delay_total;
//Print per flow statistics
monitor->CheckForLostPackets ();
Ptr<Ipv4FlowClassifier> classifier =
DynamicCast<Ipv4FlowClassifier>(flowmon.GetClassifier ());
std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> stats = monitor->GetFlowStats
();
//std::cout<<"before metrics calculation"<<"\n";
for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator i =
stats.begin (); i != stats.end (); ++i)
{
    Ipv4FlowClassifier::FiveTuple t = classifier->FindFlow (i->first);

    difftx = i->second.timeLastTxPacket.GetSeconds() -i-
>second.timeFirstTxPacket.GetSeconds();
    diffrx = i->second.timeLastRxPacket.GetSeconds() -i-
>second.timeFirstRxPacket.GetSeconds();
    pdf_value = (double) i->second.rxPackets / (double) i->second.txPackets
* 100;
    txbitrate_value = (double) i->second.txBytes * 8 / 1024 / difftx;
    if (i->second.rxPackets != 0){
        rxbitrate_value = (double) i->second.rxPackets *
m_packetSize * 8 / 1024 / diffrx;
        delay_value = (double) i->second.delaySum.GetSeconds()
/(double) i->second.rxPackets;
    }
    else{
        rxbitrate_value = 0;
        delay_value = 0;
    }
    // We are only interested in the metrics of the data flows
    if
    ((!t.destinationAddress.IsSubnetDirectedBroadcast("255.255.255.0")))
    {
        k++;
        // Plot the statistics for each data flow
        std::cout << "\nFlow " << k << " (" << t.sourceAddress << " ->
"<< t.destinationAddress << ")\n";
        std::cout << "Tx Packets: " << i->second.txPackets << "\n";
        std::cout << "Rx Packets: " << i->second.rxPackets << "\n";
        std::cout << "Lost Packets: " << i->second.lostPackets << "\n";
        std::cout << "Dropped Packets: " << i->second.packetsDropped.size()
<< "\n";
        std::cout << "PDF: " << pdf_value << " %\n";
        std::cout << "Average delay: " << delay_value << "s\n";
        std::cout << "Rx bitrate: " << rxbitrate_value << " kbps\n";
        std::cout << "Tx bitrate: " << txbitrate_value << "
kbps\n\n";
        // Accumulate for average statistics
        totaltxPackets += i->second.txPackets;
        totaltxbytes += i->second.txBytes;
        totalrxPackets += i->second.rxPackets;
        totaldelay += i->second.delaySum.GetSeconds();
        totalrxbitrate += rxbitrate_value;
        totalrxbytes += i->second.rXBytes;
    }
}
// Average all nodes statistics
if (totaltxPackets != 0){
    pdf_total = (double) totalrxPackets / (double) totaltxPackets *
100;
}
else{
    pdf_total = 0;
}
if (totalrxPackets != 0){
    rxbitrate_total = totalrxbitrate;
    delay_total = (double) totaldelay / (double) totalrxPackets;
}

```

```

    }
    else{
        rxbitrate_total = 0;
        delay_total = 0;
    }
    //print all nodes statistics
    std::cout << "\nTotal PDF: " << pdf_total << " %\n";
    std::cout << "Total Rx bitrate: " << rxbitrate_total << " kbps\n";
    std::cout << "Total Delay: " << delay_total << " s\n";
    //print all nodes statistics in files
    std::ostream os;
    os << "1_HWMP_PDF.txt";
    std::ofstream of;
    //aggeliki
    of.open (os.str ().c_str ());
    if (!of.is_open ())
    {
        std::cerr << "Error: Can't open file " << os.str () << "\n";
        return -1;
    }
    //std::ofstream of(os.str().c_str(), ios::out | ios::app);
    of << pdf_total << "\n";
    of.close ();
    std::ostream os2;
    os2 << "1_HWMP_Delay.txt";
    //aggeliki
    std::ofstream of2;
    of2.open (os2.str ().c_str ());
    if (!of2.is_open ())
    {
        std::cerr << "Error: Can't open file " << os2.str () << "\n";
        return -1;
    }

    //std::ofstream of2 (os2.str().c_str(), ios::out | ios::app);
    of2 << delay_total << "\n";
    of2.close ();
    std::ostream os3;
    os3 << "1_HWMP_Throu.txt";
    //aggeliki
    std::ofstream of3;
    of3.open(os3.str ().c_str ());
    if (!of3.is_open ())
    {
        std::cerr << "Error: Can't open file " << os3.str () << "\n";
        return -1;
    }

    //std::ofstream of3 (os3.str().c_str(), ios::out | ios::app);
    of3 << rxbitrate_total << "\n";
    of3.close ();
    Simulator::Destroy ();
    m_timeEnd=clock();
    m_timeTotal=(m_timeEnd - m_timeStart)/(double) CLOCKS_PER_SEC;
    std::cout << "\n*** Simulation time: " << m_timeTotal << "s\n\n";
    return 0;
}
void MeshTest::Report ()
{
    // Using this function we print detailed statistics of each mesh point
    // device
    // These statistics are used later with an AWK files to extract routing
    // metrics
    unsigned n (0);
    for (NetDeviceContainer::Iterator i = meshDevices.Begin (); i !=
    meshDevices.End (); ++i, ++n)
    {
        std::ostream os;
        //os << "mp-report1-" << n << ".xml";
        os << "mp-report.xml";
        std::ofstream of;
        of.open (os.str ().c_str ());

```

```
//of.open(os.str().c_str(), ios::out | ios::app);
if (! of.is_open ())
{
    std::cerr << "Error: Can't open file " << os.str() << "\n";
    return;
}
mesh.Report (*i, of);
of.close ();
}
n = 0;
}
int main (int argc, char *argv[])
{
    MeshTest t;
    t.Configure (argc, argv);
    return t.Run();
}
```