



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ  
ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ  
ΠΟΛΥΠΛΕΓΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΛΑΖΑΡΑΚΗ ΗΛΙΑ του ΚΥΡΙΑΚΟΥ**

ΦΟΙΤΗΤΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΟΣΧΟΛΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2012**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> - ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
1.1 Γενικά για ασύρματες επικοινωνίες .....	6
1.2 Ορισμός Ασύρματου Πολυπλεγματού Δικτύου (WMN - Wireless Mesh Network).....	7
1.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Χρήσης WMNs .....	8
1.4 Δομή & Εξαρτήματα ενός WMN .....	10
1.5 Προβλήματα – Παρόν και μέλλον WMN .....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> - ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ - ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ</b>	
2.1 Αρχιτεκτονική δικτύου WMN - Εισαγωγή .....	18
2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου WMN - Κατηγορίες.....	20
2.3 Παράγοντες Σχεδιασμού.....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> - ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ - (Routing &amp; Auto configuration Protocols)</b>	
3.1 Physical Layer .....	27
3.2 MAC Layer.....	29
3.3 Routing Layer.....	36
3.4 Transport Layer .....	46
3.5 Application Layer.....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> - ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΠΟΛΥΠΛΕΓΜΑΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (WM_NETWORK OPERATION)</b>	
4.1 Διαχείριση της κινητικότητας (Mobility Management) .....	53
4.2 Διαχείριση της ισχύος (Power Management).....	54
4.3 Εποπτεία δικτύου (Network Monitoring).....	55

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> - ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

5.1 Ο ρόλος και η σημασία της ασφάλειας στα WMNs.....	56
5.2 Απαιτήσεις ασφάλειας σε δίκτυο WMN .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> - Cross - Layer Design.....	59
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	61
ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.2.1 Δομή Ασύρματου Πολυπλεγματού δικτύου WMN .....	7
Σχήμα 1.4.1 Ασύρματες κάρτες Δικτύου (Wireless Mesh Cards) .....	11
Σχήμα 1.4.2 Ασύρματοι δρομολογητές (Wireless Mesh Routers).....	12
Σχήμα 1.4.3 Σημεία πρόσβασης (Access Points) .....	13
Σχήμα 1.4.4 Ελεγκτές Δικτύου (Switching Controllers).....	14
Σχήμα 2.1.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου WMN.....	19
Σχήμα 2.2.1 Υποδομή / Δίκτυο Κορμού WMNs.....	20
Σχήμα 2.2.2 WMNs τελικών χρηστών .....	21
Σχήμα 2.2.3 Hybrid WMNs.....	22

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον λέκτορα κ. Μοσχολιό Ιωάννη κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την υπομονή που έκανε κατά την διάρκεια υλοποίησης της εργασίας, καθώς επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του για την ορθότερη αποτύπωση των διάφορων τεχνικών όρων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μου με κάθε δυνατό τρόπο, φροντίζοντας έτσι για την καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου.

## Περίληψη

Τα ασύρματα πολυπλεγματικά δίκτυα (Wireless Mesh Networks, WMNs) αποτελούν σήμερα ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών.

Ένα ασύρματο πολυπλεγματικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο επικοινωνιών, που αποτελείται από κόμβους οργανωμένους σε μια τοπολογία πλέγματος. Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος συχνά αποτελούνται από τους χρήστες (clients), δρομολογητές (routers) και πύλες (gateways). Οι χρήστες είναι συνήθως φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και άλλες ασύρματες συσκευές. Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος μπορεί να υλοποιηθούν με διάφορες ασύρματες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων 802.11 [1], 802.15 [2], 802.16 [3], κυψελωτά συστήματα [4] ή συνδυασμούς αυτών.

Με την εργασία αυτή θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε την δομή και τον τρόπο λειτουργίας ενός δικτύου πλέγματος.

Επιγραμματικά αναφέρουμε τους τομείς στους οποίους θα δώσουμε έμφαση και είναι η αρχιτεκτονική του δικτύου, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας (routing protocols) που χρησιμοποιεί, η διαχείριση του δικτύου και η ασφάλεια.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά για ασύρματες επικοινωνίες

Η ανάγκη του ανθρώπου για επικοινωνία, έχει παρατηρηθεί από αρχαιοτάτων χρόνων. Η ανταλλαγή πληροφορίας, κυρίως για οικονομικούς και εμπορικούς λόγους, ήταν αυτή που ώθησε την επιστήμη στην προσπάθεια ανακάλυψης νέων τεχνολογιών.

Αρχικά η πληροφορία μεταδιδόταν μέσω της υποδομής που υπήρχε για τις ανθρώπινες ανάγκες και κατά συνέπεια, μεταφερόταν μεταξύ τόπων όπου υπήρχαν εμπορικές δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα μεταξύ πόλεων. Με την ανάπτυξη των επικοινωνιών, η μετάδοση της πληροφορίας δεν χρειαζόταν να ακολουθήσει φυσικά μονοπάτια. Επιπλέον, η ανακάλυψη νέων τεχνολογιών βελτίωσε την απόδοση της μεταφοράς της πληροφορίας. Αρχικά ο τηλεγράφος, στη συνέχεια το τηλέφωνο και τέλος οι ασύρματες επικοινωνίες ήταν αυτές που έδωσαν ώθηση στην τεχνολογία της τηλεπικοινωνίας.

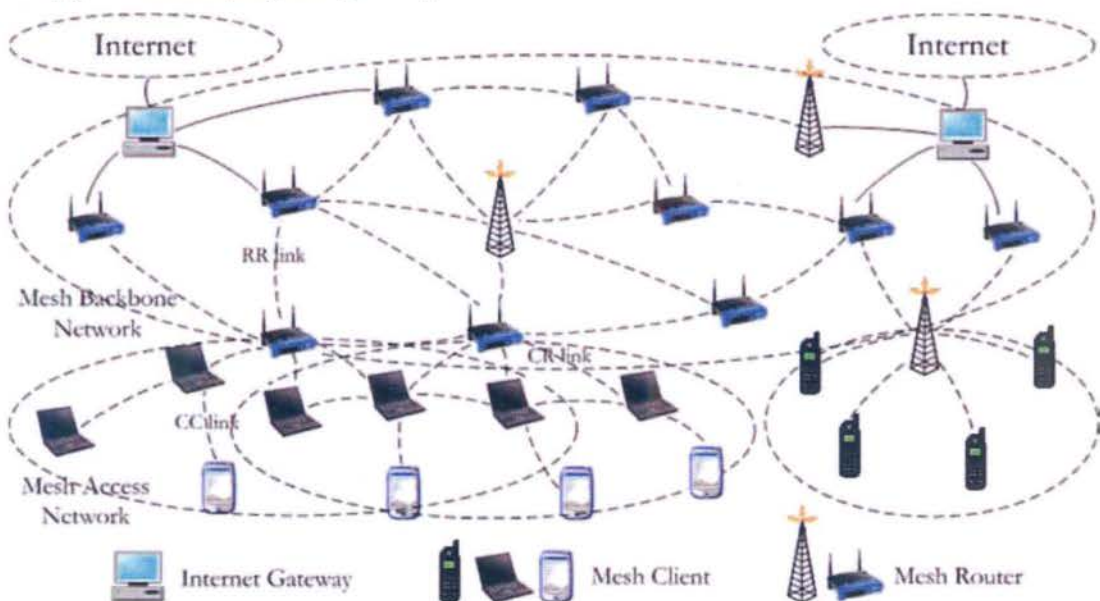
Η μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων γίνεται κατά δύο τρόπους, είτε με χρήση ενσύρματων μέσων (σταθερή τηλεφωνία), είτε με ασύρματη μετάδοση. Η ενσύρματη επικοινωνία (γραμμές μεταφοράς, κυματοδηγοί και οπτικές ίνες) προτιμάται κυρίως για την τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση σημείων που είναι σταθερά και σε μικρή γεωγραφική έκταση. Αντίθετα, η ασύρματη επικοινωνία στηρίζεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και χρησιμοποιεί κεραιές για την εκπομπή και λήψη σημάτων. Στα τέλη του 19ου αιώνα, ο G. Marconi υλοποίησε για πρώτη φορά ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης βασισμένος στην θεωρία που είχε διατυπώσει ο Maxwell. Μέχρι το 1940 χρησιμοποιούνταν συνήθως συχνότητες UHF. Από την δεκαετία του '40 και έπειτα, η αλματώδης ανάπτυξη της πληροφορικής και της ηλεκτρονικής σε συνδυασμό με την αύξηση του όγκου πληροφορίας, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών.

Η προτίμηση των ασύρματων ως προς τις ενσύρματες επικοινωνίες οφείλεται σε ορισμένα προτερήματα που έχουν. Ένα από αυτά είναι η γραμμική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Αντίστοιχα, στα ενσύρματα μέσα, παρατηρείται εκθετική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού

κύματος. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το σχετικά μικρό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου, σε αντίθεση με το μεγάλο κόστος στο ενσύρματο δίκτυο. Τέλος, είναι η δυνατότητα κινητών επικοινωνιών καθώς με τον καιρό αναπτύχθηκε ένας μεγάλος αριθμός ασύρματων δικτύων ανάλογα με το σκοπό και τα αντίστοιχα μέσα που διατίθενται για τη δημιουργία τους.

## 1.2 Ορισμός ασύρματου πολυπλεγματού δικτύου (Wireless Mesh Network WMN)

Wireless Mesh Networking (WMN) είναι μια πολλά υποσχόμενη ασύρματη τεχνολογία για αρκετές αναδυόμενες και εμπορικά ενδιαφέρουσες εφαρμογές, π.χ., η ευρυζωνική δικτύωση στο σπίτι, την κοινότητα και τα μητροπολιτικά δίκτυα, τα ευφυή συστήματα μεταφορών, τα συστήματα αισθητήρων. Κερδίζει σημαντικό έδαφος ως πιθανός τρόπος για τους παρόχους υπηρεσιών Internet (ISP - Internet Service Providers) και άλλους τελικούς χρήστες για τη δημιουργία ισχυρής και αξιόπιστης ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης σε υπηρεσίες με λογικό κόστος. Ένα WMN αποτελείται από δρομολογητές πλέγματος και τους χρήστες, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.1. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, ενώ οι στατικοί δρομολογητές πλέγματος αποτελούν το ασύρματο δίκτυο κορμού, οι χρήστες έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω δρομολογητών καθώς υπάρχει συντονισμός μεταξύ τους.



σχ. 1.2.1 Δομή Ασύρματου Πολυπλεγματού δικτύου WMN [5]



Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, τα WMNs είναι δυναμικά, αυτοοργανώνονται και αυτορυθμίζονται. Με άλλα λόγια, οι κόμβοι του δικτύου πλέγματος, καθιερώνουν και διατηρούν τη συνδεσιμότητα δικτύου αυτόματα. Το χαρακτηριστικό αυτό προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για τους τελικούς χρήστες, όπως το κόστος, η εύκολη συντήρηση του δικτύου, η ευρωστία, και η αξιόπιστη κάλυψη των παρεχόμενων υπηρεσιών. Επιπλέον, με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως πολλαπλές διασυνδέσεις και έξυπνες κεραιές, η χωρητικότητα του δικτύου WMN αυξάνεται σημαντικά.

Επιπρόσθετα, οι λειτουργίες των δρομολογητών πλέγματος επιτρέπουν την ενσωμάτωση ασύρματων δικτύων πλέγματος με διάφορα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ασύρματης υψηλής πιστότητας (Wi-Fi [6]), και WiMAX [7]. Κατά συνέπεια, μέσω ενός ολοκληρωμένου δικτύου WMN, οι τελικοί χρήστες μπορούν να λάβουν το πλεονέκτημα συνδεσιμότητας πολλαπλών ασύρματων δικτύων.

### 1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Χρήσης ενός WMN δικτύου

- Αυξημένη αξιοπιστία: Στα WMNs, οι ασύρματοι δρομολογητές πλέγματος παρέχουν υπεράριθμες διαδρομές μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη της ασύρματης σύνδεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη διασύνδεσης σε πιθανή βλάβη ενός σημείου του δικτύου και σε πιθανές συνδέσεις συμφόρησης. Η συνδεσιμότητα του δικτύου διατηρείται επίσης, με την βοήθεια των πολλαπλών διαδρομών που χρησιμοποιεί το δίκτυο. Ως εκ τούτου, μέσα από την αξιοποίηση του δικτύου WMN, το δίκτυο μπορεί να λειτουργήσει με αξιοπιστία για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμη και με την αποτυχία διασύνδεσης στοιχείου του δικτύου ή συμφόρησης του δικτύου.

- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης: Πρόσφατα, η κύρια προσπάθεια παροχής ασύρματης σύνδεσης σε τελικούς χρήστες είναι μέσω της ανάπτυξης του πρωτοκόλλου 802.11 σε συνδυασμό με ασύρματα (Wi-Fi) σημεία πρόσβασης (APs – Access Points). Για να εξασφαλιστεί η σχεδόν πλήρης κάλυψη σε μια περιοχή μεγάλου βεληνεκού, απαιτείται η χρήση μεγάλου αριθμού σημείων πρόσβασης, λόγω της περιορισμένης εμβέλεια εκπομπής του AP. Το μειονέκτημα αυτής της λύσης έγκειται στο ακριβό



κόστος των υποδομών, δεδομένου ότι κάθε AP απαιτεί ενσύρματη καλωδίωση στο κύριο δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, κατασκευάζοντας ένα ασύρματο πολυπλεγματο δίκτυο το κόστος της υποδομής μειώνεται, δεδομένου ότι το δίκτυο πλέγματος απαιτεί μόνο μερικά σημεία σύνδεσης με το ενσύρματο δίκτυο. Ως εκ τούτου, τα WMNs καθιστούν δυνατή την ταχεία εφαρμογή τους καθώς επίσης υποστηρίζουν πιθανές τροποποιήσεις στο δίκτυο με λογικό κόστος, το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό στη σημερινή ανταγωνιστική αγορά.

• Μεγάλη επιφάνεια κάλυψης: Επί του παρόντος, τα ποσοστά των δεδομένων των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) έχουν αυξηθεί, π.χ., 54 Mbps για 802.11a και 802.11g, με τη χρήση φασματικά αποτελεσματικών συστημάτων διαμόρφωσης (OFDM - **Orthogonal frequency-division multiplexing**) [8]. Αν και τα ποσοστά των δεδομένων των WLANs αυξάνονται, για μια συγκεκριμένη ισχύ εκπομπής, η κάλυψη και η συνδεσιμότητα των WLANs μειώνεται καθώς ο τελικός χρήστης απομακρύνεται από το σημείο πρόσβασης. Από την άλλη πλευρά, η επικοινωνία μέσω πολλαπλών βημάτων (multi-hop) και πολλαπλών καναλιών (multi-channel) των δρομολογητών του δικτύου και η μεγάλη εμβέλεια εκπομπής των στοιχείων WiMAX που έχει αναπτυχθεί στα WMNs επιτρέπει την απομακρυσμένη επικοινωνία χωρίς σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων.

• Αυτόματη Σύνδεση Δικτύου: Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος είναι δυναμικά, αυτοοργανώνονται και αυτορυθμίζονται. Με άλλα λόγια, οι πελάτες και οι δρομολογητές του δικτύου καθιερώνουν και διατηρούν την ικανότητα σύνδεσης τους στο δίκτυο αυτόματα, το οποίο επιτρέπει αδειάληπτη υπηρεσία διασύνδεσης. Για παράδειγμα, όταν οι νέοι κόμβοι θα προστεθούν στο δίκτυο, κάνουν χρήση των λειτουργικών δυνατοτήτων τους για να ανακαλύψουν αυτόματα όλους τους πιθανούς δρομολογητές και να προσδιορίσουν τις βέλτιστες διαδρομές για την ενσύρματη σύνδεση τους στο Διαδίκτυο. Επιπλέον, οι υπάρχοντες δρομολογητές πλέγματος αναδιοργανώνουν το δίκτυο σύμφωνα με τους καινούργιους διαθέσιμους δρόμους, βοηθώντας το δίκτυο να εξαπλωθεί πιο εύκολα.

• Ασφάλεια: Επειδή οι κόμβοι μέσα σε ασύρματο πολυπλεγματο δίκτυο, λειτουργούν και ως δρομολογητές πακέτων - μηνυμάτων προς άλλους κόμβους, η ασφάλεια είναι ένα σημαντικό θέμα. Καθώς ο αριθμός των κόμβων σε ένα τέτοιο δίκτυο αυξάνεται, γίνεται πιο ευάλωτο σε άτομα που μπορούν να μοιραστούν τα δεδομένα σας. Επιπλέον, αν το λογισμικό του δικτύου επιτρέπει εισαγωγή κόμβων χωρίς κεντρικό έλεγχο, πρέπει να προστεθεί ένας μηχανισμός που να διασφαλίζει την νομιμότητα εισόδου ενός χρήστη από μια πιθανή είσοδο ενός χάκερ. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η μέθοδος απόδειξης της γνησιότητας (authentication) (θα γίνει εκτενέστερη αναφορά για την ασφάλεια στο Κεφ. 5<sup>ο</sup>) των κόμβων είναι απαραίτητη καθώς και η εξασφάλιση της ροής των δεδομένων μέσω των κόμβων.

• Καθυστέρηση (Overhead): Επειδή οι κόμβοι πρέπει να αναγνωρίσουν τους γείτονές τους, καθώς και τις διεξόδους σε άλλους κόμβους, πρέπει να δημιουργήσουν και να διατηρήσουν πίνακες δρομολόγησης. Καθώς η κίνηση και ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο αυξάνεται, έτσι διαμοιράζεται το ποσοστό επεξεργασίας που διατίθενται για την δρομολόγηση των πακέτων. Η συνισταμένη των δυο αυτών παραγόντων έχει αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα της δρομολόγησης εφόσον σπαταλείται επεξεργαστική ισχύ για το ίδιο το δίκτυο για αναγνώριση των επιμέρους κόμβων, με τελική συνέπεια την μη αποδοτικότητα του κάθε κόμβου και του δικτύου εν συνεχεία στο να μπορέσει να εκτελέσει άλλες εργασίες.

#### **1.4 Εξαρτήματα (Wireless Mesh Network Components)**

Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε διάφορα στοιχεία του δικτύου (WMN), ξεκινώντας την αναφορά μας από τη γνωστή κάρτα ασύρματου δικτύου LAN που αναφέρεται επίσης ως ασύρματο μόντεμ. Με αυτόν τον τρόπο οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι πολλά εξαρτήματα ασύρματης δικτύωσης πλέγματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν με ειδικό λογισμικό σε περιορισμένη απόσταση ή μπορούν να αναβαθμιστούν με ένα διαφορετικό παρέχοντας ασύρματη τεχνολογία, με μια εκτεταμένη δυνατότητα μετάδοσης. Έτσι, η τελευταία λύση μας παρέχει τη δυνατότητα να κατασκευαστεί ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος σε μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή, με έναν ελάχιστο αριθμό σημείων πρόσβασης ή δρομολογητών που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση των πελατών.

- Ασύρματες κάρτες δικτύου Πλέγματος (Wireless MeshCards)



σχ. 1.4.1 Ασύρματες κάρτες Δικτύου Πλέγματος (Wireless Mesh Cards)[12]

Με το ειδικό λογισμικό που μετατρέπει ένα πελάτη - χρήστη ασύρματου LAN σε έναν συμμετέχοντα δίκτυο πλέγματος, το υλικό (ασύρματες κάρτες) χρησιμοποιεί την τεχνολογία IEEE 802.15.4 [9]. Το εν λόγω υλικό είναι διαθέσιμο σε πολλές μορφές, PCMCIA κάρτες προσαρμογείς που εισάγονται σε ένα laptop ή notebook, PCI κάρτες προσαρμογείς που εισάγονται σε επιτραπέζιο υπολογιστή όπως και USB προσαρμογείς. Με την προσθήκη του λογισμικού που παρέχει δυνατότητες δρομολόγησης και αναμετάδοσης, κάθε χρήστης ασύρματου δικτύου γίνεται ενεργά συμμετοχος σε ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος. Έτσι, καθίσταται δυνατή η διασύνδεση για υπολογιστές-πελάτες μέσα σε ένα κτίριο ή σε μια γειτονιά να μοιράζονται ένα ή περισσότερα υψηλής ταχύτητας δίκτυα πρόσβασης στο Διαδίκτυο.



- Ασύρματος δρομολογητής δικτύου (Wireless Mesh Router)



σχ. 1.4.2 Ασύρματοι δρομολογητές (Wireless Mesh Routers)[12]

Σε ένα ενσύρματο συμβατικό περιβάλλον ένας δρομολογητής λειτουργεί ως συσκευή αναμετάδοσης, ρυθμίζοντας την δρομολόγηση της κυκλοφορίας των πακέτων από το ένα δίκτυο στο άλλο μέχρι τον τελικό τους προορισμό. Σε ένα ασύρματο περιβάλλον δικτύωσης ένας δρομολογητής εκτελεί παρόμοια λειτουργία, ωστόσο, η δρομολόγηση αποτελεί μια από τις πολλές λειτουργίες που επιτελούνται από αυτή τη συσκευή. Άλλες βασικές λειτουργίες περιλαμβάνουν τη χρήση ενός αλγόριθμου ασύρματης κινούμενης δρομολόγησης [10] σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο διόρθωσης σφαλμάτων [11] για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της RF (Radio Frequency) εκπομπής, παράγοντας πιο εμφανής για μια εκτεταμένη ανοιχτού τύπου εμβέλεια εκπομπής σε σχέση με το IEEE 802.11 ενσύρματης δικτύωσης.



- Access Points



σχ. 1.4.3 Σημεία πρόσβασης (Access Points) [12]

Σε ένα πολυπλεγματο δίκτυο ένα σημείο πρόσβασης (AP) παρέχει παρόμοιο επίπεδο λειτουργικότητας με εκείνη του AP που χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό ασύρματο LAN. Δηλαδή, το AP λειτουργεί ως γέφυρα, παρέχοντας τον τρόπο διαβίβασης των δεδομένων από το ασύρματο δίκτυο της RF για το ενσύρματο δίκτυο και αντίστροφα.

Ένα AP Mesh λειτουργεί στο επίπεδο Media Access Control (MAC). Χρησιμοποιεί διευθύνσεις MAC ως κριτήριο απόφασης για να διαβιβάσει, γνωστοποιήσει, ή να φιλτράρει τα δεδομένα μεταξύ των ασύρματων και ενσύρματων δικτύων. Για να εκπληρώσει την αποστολή αυτή το AP μαθαίνει τις διευθύνσεις MAC που συνδέονται με το ασύρματο και ενσύρματο δίκτυο, και οι οποίες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν διαφορετικές θύρες που επιτρέπουν στο AP να κατασκευάσει πίνακες αντιστοιχίας θυρών / διευθύνσεων.

- Switching Controller ( Ελεγκτής Δικτύου )



*σχ. 1.4.4 Ελεγκτές Δικτύου (Switching Controllers)[12]*

Μπορούμε να εντοπίσουμε έναν ελεγκτή ως κεντρικό κόμβο ενός δικτύου πλέγματος δεδομένου ότι μπορεί να διασυνδεθεί ενσύρματα με τα σημεία πρόσβασης (APs). Η λειτουργία του ελεγκτή περιλαμβάνει συνήθως μια σειρά από υπηρεσίες διαχείρισης, όπως παρακολούθηση δεδομένων (monitoring με την βοήθεια συγκεκριμένου λογισμικού Firetide[13], MeshManager[14]) και παροχή στατιστικών που αφορούν τη λειτουργία του δικτύου σε ενδεχόμενη αλλαγή του, ταυτοποίηση και εξουσιοδότηση πελάτη και συσκευής. Επιπρόσθετα λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ των ασύρματων δικτύων πλέγματος με ένα ενσύρματο δίκτυο.

## 1.5 Προβλήματα - Παρόν και μέλλον των WMNs

Η σχεδίαση και η λειτουργία ενός δικτύου WMN εμπεριέχει προβλήματα, ένα μέρος των οποίων είναι τα παραδοσιακά προβλήματα των ασύρματων και κινητών επικοινωνιών, ενώ τα υπόλοιπα προκύπτουν από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δικτύου και την απουσία σταθερών δικτυακών υποδομών.

Λόγω της περιορισμένης εμβέλειας μετάδοσης η ανάπτυξη του δικτύου σε μία μεγάλη γεωγραφική περιοχή απαιτεί τη δρομολόγηση των πακέτων σε διαδρομές με πολλαπλά τμήματα. Ενώ οι ασύρματες επικοινωνίες εξελίσσονται με γρήγορο ρυθμό, η διεκπεραιωτική τους ικανότητα είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη σε σχέση με αυτή των ενσύρματων επικοινωνιών.

Το γεγονός ότι όλοι οι κόμβοι μοιράζονται το ίδιο φυσικό μέσο προκαλεί προβλήματα όπως συγκρούσεις πακέτων, το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου (hidden node problem) [15] και το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου (exposed node problem) [16]. Οι αυξημένες απώλειες πακέτων απαιτούν τον προσεκτικό σχεδιασμό των επιπέδων φυσικού μέσου, του υποεπιπέδου προσπέλασης μέσου καθώς και των πρωτοκόλλων μεταφοράς ώστε να μη δημιουργηθούν δυσλειτουργίες κατά την επικοινωνία.

Η κινητικότητα των κόμβων, οι αλλαγές στην τοπολογία και η πιθανή κατάτμηση του δικτύου που αφορούν κυρίως την δρομολόγηση των πακέτων σ' ένα WMN, αποτελούν τα κύρια προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Οι απαιτήσεις που προκύπτουν για το πρωτόκολλο δρομολόγησης συναντώνται μόνο σε δίκτυα WMN. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη ερευνητική δραστηριότητα και την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για την αντιμετώπισή τους.

Η επεκτασιμότητα σε ένα δίκτυο WMN μπορεί γενικώς να οριστεί ως η ικανότητα του δικτύου να παρέχει ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης πακέτων όταν αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων μέσα σε αυτό. Όπως και στα ενσύρματα δίκτυα αυτή η ικανότητα εξαρτάται από την αύξηση του αριθμού των πακέτων ελέγχου ως συνάρτηση της αύξησης του αριθμού των κόμβων και των αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου. Σε δίκτυα WMN η επεκτασιμότητα συνήθως εξασφαλίζεται με την εισαγωγή ιεραρχικών δομών στην τοπολογία του δικτύου και τη δρομολόγηση των πακέτων, τον περιορισμό του αριθμού των πακέτων ανανέωσης μέσω πινάκων δρομολόγησης σε περιοχές που συμβαίνουν αλλαγές στην τοπολογία ή



χρησιμοποιώντας τεχνικές που μειώνουν το εύρος ζώνης στην οποία γίνεται η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής.

Οι απαιτήσεις για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα δίκτυο WMN είναι ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, πολύ δυσκολότερο σε σχέση με αυτό των παραδοσιακών ασύρματων και κινητών επικοινωνιών. Η αποτελεσματική του λύση δημιουργεί απαιτήσεις στον επανασχεδιασμό όλων των πρωτοκόλλων της επικοινωνιακής διαστρωμάτωσης από το φυσικό επίπεδο ως και το επίπεδο μεταφοράς.

Η ασφάλεια των επικοινωνιών σε αυτά τα δίκτυα παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες οι οποίες προέρχονται κυρίως από την καταναμημένη δομή του δικτύου και την απαίτηση για συνεργασία όλων των κόμβων ώστε να διεκπεραιωθούν λειτουργίες όπως η δρομολόγηση και η διαχείριση του δικτύου. Εκτός από τα προβλήματα ασφαλείας που έχει το ασύρματο φυσικό μέσο, αλγόριθμοι κρυπτογραφίας και απόδειξης αυθεντικότητας (για παράδειγμα, το σύστημα **MD5 - Message-Digest Algorithm** [17]) είναι δύσκολο να εφαρμοστούν λόγω της καταναμημένης φύσης του δικτύου.

Ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί η δυνητική αριθμοδότηση των σταθμών ενός δικτύου WMN. Πρωτόκολλα δυνητικής ανάθεσης IP διευθύνσεων, όπως το DHCP, είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε δίκτυα WMN γιατί απαιτούν την δρομολόγηση των πακέτων ελέγχου του πρωτοκόλλου ανάθεσης στο δίκτυο.

Τα δίκτυα WMN περιπλέκουν ακόμα περισσότερο τις προκλήσεις του QoS λόγω των χαρακτηριστικών του ασύρματου φυσικού μέσου, της δυνητικής τοπολογίας και του ανταγωνισμού των κόμβων για την πρόσβαση στο ίδιο κανάλι επικοινωνίας, ενώ ο καθένας πιθανώς έχει διαφορετικές απαιτήσεις για το QoS.

Σχετικά με τη διαχείριση του δικτύου, οι απαιτήσεις προκύπτουν συνήθως από την εφαρμογή του δικτύου WMN, αλλά και τους χρήστες ή τις διεργασίες των σταθμών που αποτελούν το δίκτυο. Διαχειριστικές λειτουργίες μπορεί να αφορούν, χωρίς να περιορίζονται, την ανεύρεση κόμβων, την τοπολογία του δικτύου ή των υπηρεσιών που παρέχονται από κάποιους κόμβους. Λόγω της καταναμημένης φύσης των δικτύων WMN, πρωτόκολλα διαχείρισης ενσύρματων δικτύων δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτά.

Ωστόσο το πιο βασικό πρόβλημα είναι η έλλειψη καλώς ορισμένων και γενικώς αποδεκτών μοντέλων RF εξασθένησης, επικοινωνιακής κίνησης και κινητικότητας των κόμβων. Αυτά τα *αλληλοσχετιζόμενα* μοντέλα είναι απαραίτητα για την ποιοτική και



ποσοτική σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών πρωτοκόλλων. Γενικώς, τα δίκτυα WMN αποτελούν ένα πολύ πολύπλοκο σύστημα το οποίο είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί και δεν υπάρχουν αρκετές υλοποιήσεις τέτοιων δικτύων ώστε να αξιολογηθούν τα μοντέλα περιγραφής.

Η έρευνα σε δίκτυα WMN και συγκεκριμένα, επάνω σε πρωτόκολλα δρομολόγησης ικανά να αντεπεξέλθουν στις προκλήσεις που παρουσιάζουν αυτά τα δίκτυα, ξεκίνησαν με τις στρατιωτικές εφαρμογές. Σήμερα όμως, στα συγκεκριμένα δίκτυα υπάρχει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα διεθνώς λόγω των παρακάτω λόγων.

Ένα μέρος των προβλημάτων που παρουσιάζονται σε αυτά τα δίκτυα είναι κοινά με άλλες ερευνητικές περιοχές όπως, για παράδειγμα, οι καταναμημένοι αλγόριθμοι, μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (4ης γενεάς) [18], grid networks [19], δίκτυα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ χρηστών στο διαδίκτυο (p2p networks) [20], προσαρμοστικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης σε σταθερά δίκτυα, με αποτέλεσμα οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται να έχουν εφαρμογή και σε άλλους επιστημονικούς τομείς.

Κατά δεύτερον, τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν πολλές παραλλαγές ως προς τις δυνατότητες και λειτουργίες των κόμβων, τα χαρακτηριστικά κίνησης, τα μοντέλα κινητικότητας και τα κριτήρια απόδοσης με αποτέλεσμα να αποτελούν ένα ευρύ ερευνητικό πεδίο το οποίο παρουσιάζει πολλά και δύσκολα προβλήματα και αποτελεί πρόκληση για επιστήμονες που ασχολούνται με δίκτυα υπολογιστών.

Τέλος, η ερευνητική χρηματοδότηση που παρέχεται σε αυτά τα δίκτυα είναι αρκετά υψηλή και αναμένεται να είναι ακόμα πιο μεγάλη την επόμενη δεκαετία.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

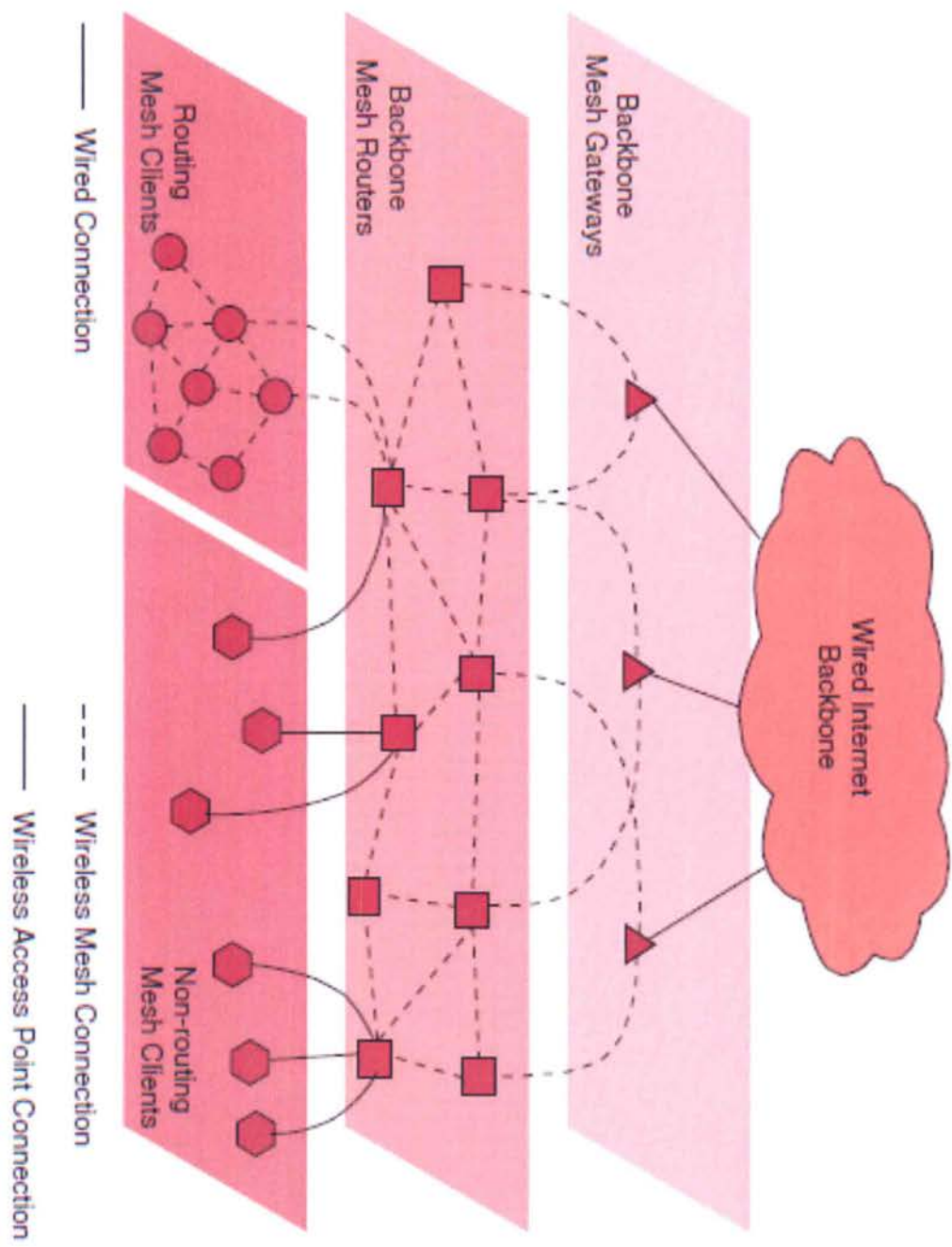
#### **2.1 Αρχιτεκτονική δικτύου WMN - Εισαγωγή**

Η αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου πλέγματος είναι ένα πρώτο βήμα για την παροχή οικονομικότερης, αποτελεσματικότερης και πιο δυναμικής ευρυζωνικής κάλυψης για ένα δίκτυο το οποίο περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Η υποδομή μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής, στην πραγματικότητα, είναι ένα δίκτυο δρομολογητών μείον τα καλώδια μεταξύ των κόμβων. Είναι κατασκευασμένο από ομότιμες ασύρματες συσκευές και δεν χρειάζεται να είναι συνδεδεμένο ενσύρματα σε ένα ενσύρματο δίκτυο όπως τα παραδοσιακά σημεία πρόσβασης WLAN (AP).

Στην αρχιτεκτονική WMN η ισχύς του σήματος διατηρείται από το σπάσιμο των μεγάλων αποστάσεων του δικτύου σε μια σειρά από μικρότερες (λιγότερα βήματα - hops). Οι ενδιάμεσοι κόμβοι όχι μόνο φροντίζουν για την ενίσχυση του σήματος, αλλά συνεργατικά προωθούν αποφάσεις με βάση τις γνώσεις τους σχετικά με το δίκτυο, δηλαδή εκτελούν δρομολόγηση. Μια τέτοια αρχιτεκτονική μπορεί με προσεκτικό σχεδιασμό να παρέχει υψηλό εύρος ζώνης, φασματική απόδοση και οικονομικό όφελος πάνω από την περιοχή κάλυψης.

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος έχουν μια σχετικά σταθερή τοπολογία εκτός από την περιστασιακή αποτυχία των κόμβων ή την προσθήκη νέων κόμβων. Η διαδρομή της κίνησης, που συγκεντρώνεται από μεγάλο αριθμό τελικών χρηστών, αλλάζει σπάνια. Σχεδόν όλη η κυκλοφορία σε ένα δίκτυο πλέγματος υποδομών διαβιβάζεται προς ή από μια πύλη, ενώ σε ad hoc δίκτυα [21] ή δίκτυα πλέγματος πελάτη τη ροή της κυκλοφορίας μοιράζονται αυθαίρετα ζευγάρια κόμβων.



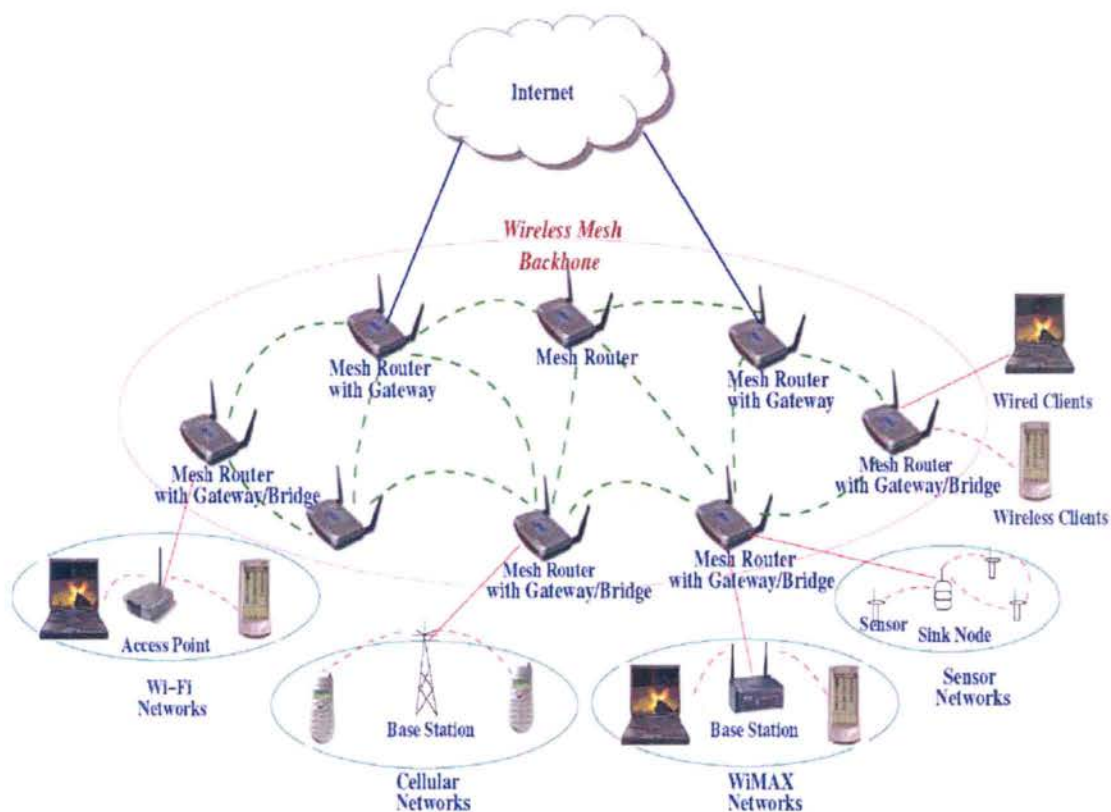
σχ. 2.1.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου WMN[5]



## 2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου WMN - Κατηγορίες

Η αρχιτεκτονική των WMNs ταξινομείται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση την λειτουργικότητα των κόμβων:

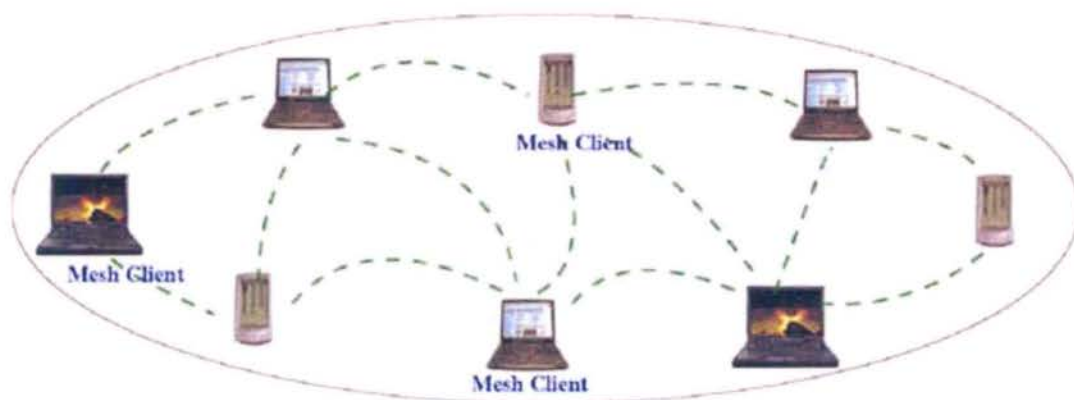
• Υποδομή / Δίκτυα Κορμού WMNs: Η αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα 2.2.1, όπου παύλες και συμπαγείς γραμμές δείχνουν ασύρματες και ενσύρματες συνδέσεις, αντίστοιχα. Αυτός ο τύπος WMNs περιλαμβάνει δρομολογητές πλέγματος που αποτελούν την υποδομή για τους πελάτες - χρήστες που συνδέονται με αυτά. Η υποδομή του WMN / του κορμού μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας διαφόρων τύπων τεχνολογιών ραδιοσυχνότητας, IEEE 802.11 [1], 802.15 [2], 802.16 [3], κυψελωτά συστήματα [4]. Οι δρομολογητές πλέγματος αποτελούν ένα πλέγμα αυτορυθμιζόμενο (ρύθμιση των παραμέτρων), αυτοαποκαθιστώντας τις συνδέσεις μεταξύ τους. Η κατηγορία αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη.



σχ. 2.2.1 Υποδομή / Δίκτυο Κορμού WMNs[22]

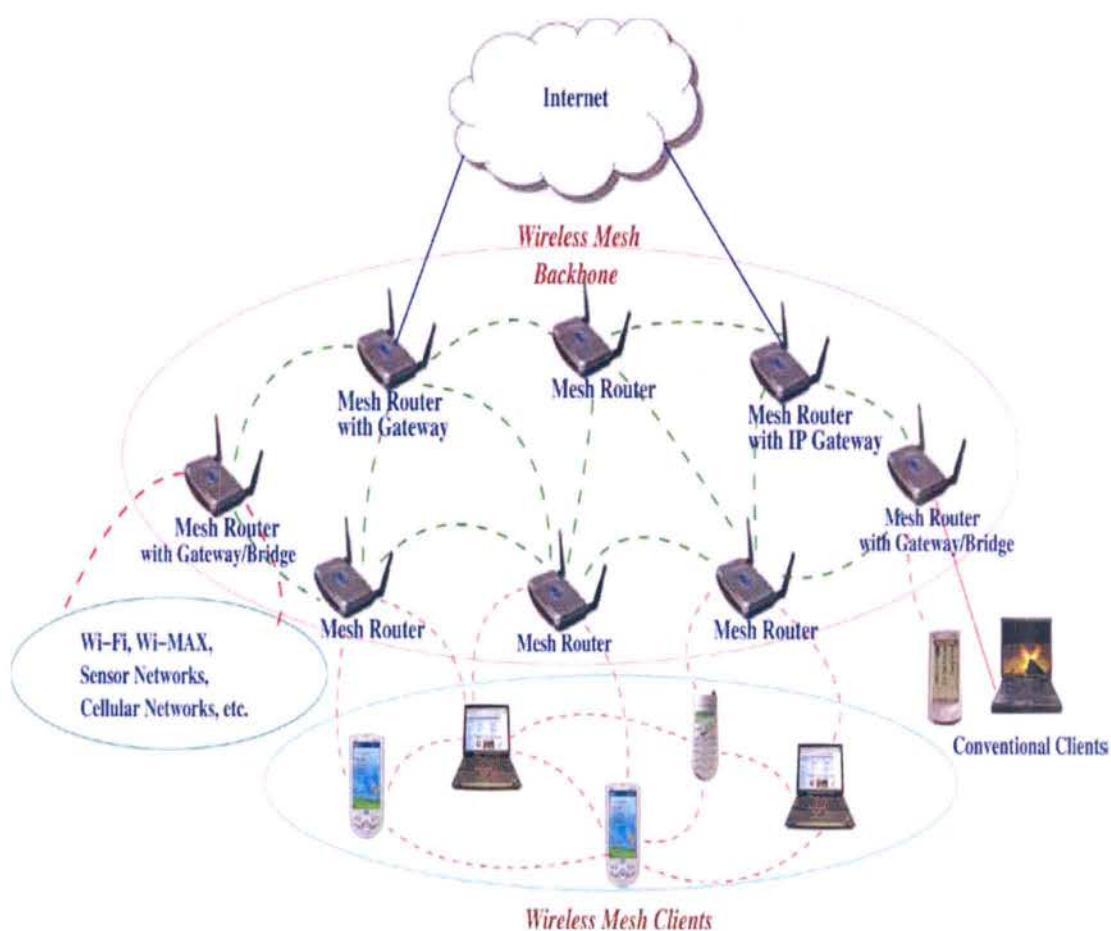


• WMNs τελικών χρηστών: Ο συγκερασμός των πελατών παρέχει peer-to-peer δίκτυα [17] μεταξύ των συσκευών πελάτη. Σε αυτό το είδος της αρχιτεκτονικής, οι χρήστες αποτελούν το πραγματικό δίκτυο για την εκτέλεση της δρομολόγησης και την διαμόρφωση λειτουργιών καθώς και την παροχή των εφαρμογών τελικού χρήστη προς τους πελάτες. Ως εκ τούτου, παρακάμπτεται το ενδιάμεσο δίκτυο των δρομολογητών πλέγματος. Η βασική αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα. 2.2.2. Σε WMNs χρηστών, ένα πακέτο που προορίζεται για έναν κόμβο στο δίκτυο μεταπηδά μέσω πολλαπλών κόμβων για να φτάσει στον προορισμό του. Η τοπολογία WMNs χρηστών συνήθως σχηματίζεται με τη χρήση ενός τύπου ραδιοσυχνότητας στις συσκευές. Επιπλέον, οι απαιτήσεις τελικού χρήστη, αυξάνονται σε σύγκριση με την προηγούμενη κατηγορία WMN, δεδομένου ότι, στην κατηγορία WMNs χρηστών, οι τελικοί χρήστες πρέπει να επιτελέσουν τα πρόσθετα καθήκοντα, όπως η δρομολόγηση και η αυτο-ρύθμιση.



σχ. 2.2.2 WMNs τελικών χρηστών[22]

• Hybrid WMNs: Αυτή η αρχιτεκτονική είναι ο συνδυασμός της υποδομής και του πελάτη WMN, όπως φαίνεται στο σχήμα. 2.2.3. Οι πελάτες πλέγματος μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω δρομολογητών πλέγματος καθώς και άμεσα εφόσον υπάρχει συντονισμός με άλλους πελάτες πλέγματος. Ενώ η κατηγορία υποδομής παρέχει δυνατότητα σύνδεσης με άλλα δίκτυα όπως το Internet, Wi-Fi, WiMAX, κυψελωτά δίκτυα, και δίκτυα αισθητήρων, οι δυνατότητες δρομολόγησης στην κατηγορία των πελατών παρέχουν βελτιωμένη συνδεσιμότητα και σύγκλιση στο εσωτερικό της WMN.



σχ. 2.2.3 Hybrid WMNs[22]

### 2.3 Αρχιτεκτονική δικτύου WMN - Παράγοντες Σχεδίασης

Αν και τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος φέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, υπάρχουν πολλά ανοιχτά ζητήματα έρευνας που πρέπει να διερευνηθούν για την αρχιτεκτονική του δικτύου:

Δίκτυο Προγραμματισμού: Στα WMNs, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί ο προγραμματισμός των πόρων του υλικού από την άποψη της θέσης και του αριθμού των ασύρματων διεπαφών, και των περιορισμών της τεχνολογίας. Στην πραγματικότητα πρέπει να υπάρχει μια εξισορρόπηση μεταξύ του αριθμού των δρομολογητών/διεπαφών (δηλαδή στο χρηματικό κόστος του δικτύου) και της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

Παροχή δικτύου: Ένα εξελιγμένο εργαλείο για τη διαχείριση του δικτύου (παράδειγμα αποτελεί το λογισμικό Firetide & MeshManager) θα πρέπει να αναπτυχθεί και για τα δύο μέρη, τους δρομολογητές - χρήστες και τους πελάτες - χρήστες για τη δημιουργία δυναμικών μεταξύ τους συνδέσεων και να παρακολουθούν στενά τη δυναμική του κυκλοφοριακού φόρτου και της κινητικότητας των χρηστών.

Δίκτυο Ενσωμάτωσης: Ο σχεδιασμός μιας χαμηλού κόστους μεθόδου για την ενσωμάτωση των IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 και IEEE 802.16 τεχνολογιών είναι απαραίτητος, έτσι ώστε ένας δρομολογητής πλέγματος μιας εκ των άνω τεχνολογιών να μπορεί να έχει πρόσθετες διασυνδέσεις.

Οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν τις επιδόσεις των WMNs μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Εξελιγμένες Ασύρματες Τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών: Έχουν προταθεί πολλές λύσεις για να βελτιωθεί η ικανότητα απόδοσης των WMNs. Χαρακτηριστικά παραδείγματα, αποτελούν η επαναπροσδιοριζόμενη ραδιοεπικοινωνία, ραδιοεπικοινωνίες συχνότητας, κατευθυντικές και έξυπνες κεραιές [23], Multiple Input Multiple Output (MIMO [24]) συστήματα, καθώς και συστήματα πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων και πολυκαναλικά.



Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και το κόστος των τεχνολογιών αυτών είναι ακόμη υπερβολικά υψηλό για να γίνει ευρέως αποδεκτή η εμπορική αξιοποίησή τους. Ως εκ τούτου, όλες αυτές οι προηγμένες ασύρματες τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών απαιτούν ένα επαναστατικό σχεδιασμό της γκάμας πρωτοκόλλων επικοινωνίας, προκειμένου να διευκολύνουν την ανάπτυξη των WMNs και την εμπορευματοποίηση των προϊόντων.

• Διαλειτουργικότητα και ενσωμάτωση ετερογενών δικτύων: Ακριβώς επειδή ένα WMN έχει την ιδιαιτερότητα να απολαμβάνει συνδεσιμότητα πολλαπλών δικτύων-τεχνολογιών (LAN, WLAN, ad-hoc, WiMax) είναι απαραίτητο τα στοιχεία του δικτύου να είναι σε θέση να ενσωματώνουν τις διαφορές αυτές. Δηλαδή θα πρέπει η λειτουργία των δρομολογητών του δικτύου, παροχής ασύρματων διεπαφών και αντιστοιχίας πύλης-γέφυρας να βελτιωθεί.

• Ασφάλεια δικτύου: Αποτροπή παροχής υπηρεσιών (DoS) και επιθέσεις (intrusions) στα WMNs μπορεί να προκαλέσουν σοβαρή βλάβη της λειτουργίας του αναπτυσσόμενου δικτύου. Αν και υπάρχουν πολλά συστήματα ασφαλείας που προτείνονται για ασύρματα τοπικά δίκτυα όπως και δίκτυα ad hoc, οι περισσότερες από αυτές τις λύσεις ασφαλείας είτε δεν είναι πρακτικές ή παρουσιάζουν χαμηλές επιδόσεις στα WMNs λόγω της έλλειψης μιας αξιόπιστης κεντρικής αρχής (Mesh MiSC) για να διανείμει ένα δημόσιο κλειδί στην αρχιτεκτονική WMN. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για νέα συστήματα ασφαλείας τα οποία θα παρέχουν αποτελεσματική κρυπτογράφηση, μηχανισμούς για αποτροπή εισβολών και μηχανισμούς ελέγχου ταυτότητας για τη διασφάλιση κατανομής σωστών και έγκυρων κλειδιών (θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο Κεφ. 5<sup>ο</sup>).

• Επεκτασιμότητα: Το αναπτυσσόμενο δίκτυο πλέγματος πρέπει να είναι σε θέση να ασχοληθεί με μεγάλες τοπολογίες δικτύων, χωρίς την αύξηση του αριθμού των λειτουργιών του δικτύου εκθετικά. Επιπλέον, η απόδοση του δικτύου δεν θα πρέπει να υποβαθμιστεί καθώς ο αριθμός των μεταπηδήσεων (hops) μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη αυξάνεται. Για να γίνει αυτό εφικτό είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων MAC, δρομολόγησης και μεταφοράς με ελάχιστο επίβαρο διαδρομής-path overhead (θα γίνει αναφορά στο Κεφ. 3<sup>ο</sup>).



• Ετερογενής απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας (QoS): Η ποιότητα δικτυακών υπηρεσιών που παρέχονται από WMNs είναι ένα αποτέλεσμα συνόλου, εφόσον ένα WMN διαχειρίζεται διαφορετικές τεχνολογίες με διαφορετικούς δείκτες απόδοσης. Έτσι, εκτός από την κλασική διεκπεραιωτικότητα δικτύου (throughput), πρέπει να εξεταστούν πληρέστερες μετρήσεις απόδοσης όπως το jitter καθυστέρησης [25] και τα ποσοστά απώλειας πακέτων packet loss [26].

• Δυναμική Συνδεσιμότητα δικτύου και αυτο-ρύθμισης παραμέτρων: Σε WMNs, για την εξάλειψη αποτυχίας μονού σημείου (single point failure) και πιθανές συνδέσεις συμφόρησης, η ασύρματη ραχοκοκαλιά (backbone) πρέπει να παρέχει εναλλακτικές διαδρομές μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη [27], δηλαδή mesh συνδεσιμότητα. Ωστόσο, η τοπολογία και η συνδεσιμότητα του δικτύου μπορεί να διαφέρουν συχνά λόγω των αποτυχιών διαδρομής και εξάντλησης της ενέργειας. Ως εκ τούτου, για να λάβει όλα τα πλεονεκτήματα της αυτόνομης συνδεσιμότητας πλέγματος το WMN, απαιτούνται αλγόριθμοι αυτο-ρύθμισης δικτύου, ελέγχου τοπολογίας και αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας.

• Υποστήριξη της κινητικότητας: Για την υποστήριξη πελατών εν κινήσει σε WMNs, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένα πιο προηγμένο φυσικό επίπεδο διαστρωμάτωσης (physical layer-γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο Κεφ. 3<sup>ο</sup>) και τεχνικές δικτύωσης, που να προσαρμόζονται γρήγορα σε αλλαγές όπως εξασθένιση σήματος (fast fading [28]) φαινόμενο που είναι συχνό σε κινητούς χρήστες. Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητη η δημιουργία αλγορίθμων διαχείρισης της θέσης όπως και βελτίωσης της ποιότητας των υπηρεσιών κατά την διάρκεια της κινητικότητας του χρήστη.

• Εργαλεία διαχείρισης δικτύου: Για την παρακολούθηση της συνολικής απόδοσης και τη διατήρηση της λειτουργίας του δικτύου, απαιτείται για τα WMNs ένα ευέλικτο και κλιμακούμενο δυνατοτήτων διαχείρισης δίκτυο. Στις δυνατότητες διαχείρισης του δικτύου WMN εμπεριέχονται: i) η σωστή αξιοποίηση του εύρους ζώνης, ii) η εγκατάσταση των πολιτικών της ασφάλειας και της ποιότητας, iii) η στήριξη επιπέδου υπηρεσιών, iv) ο εντοπισμός της βλάβης και η ανάλυση της, v) η προσθήκη και αφαίρεση φορέων από το δίκτυο, vi) η αλλαγή των λειτουργιών του δικτύου, vii) η λογιστική, η τιμολόγηση και η υποβολή εκθέσεων. Όλες αυτές οι δυνατότητες μπορούν

να αυτοματοποιήσουν την λειτουργία των WMNs και να καταστεί έτσι δυνατή η ταχεία ανάπτυξη τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των ασύρματων πολυπλεγματικών δικτύων και αυτό είναι η δρομολόγηση και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν. Παρακάτω διαχωρίζουμε τα επίπεδα διαστρωμάτωσης και παραθέτουμε τα πιο σημαντικά.

#### 3.1 ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ - PHYSICAL LAYER

##### Προηγμένες τεχνικές φυσικού επιπέδου διαστρωμάτωσης

Μερικές προηγμένες τεχνικές φυσικού επιπέδου διαστρωμάτωσης έχουν γίνει διαθέσιμες για τα WMNs. Τα ασύρματα ραδιοσυστήματα των υφιστάμενων WMNs είναι σε θέση για την υποστήριξη πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης μετά από ένα συνδυασμό διαφόρων συντελεστών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

Μέσω αυτών των τρόπων, η προσαρμοστική ανθεκτικότητα λάθους μπορεί να παρέχεται μέσω της προσαρμογής σύνδεσης. Τεχνικές όπως η OFDM - (Orthogonal frequency-division multiplexing [7]) και τεχνικές ευρείας ζώνης UWB (Ultra-wideband [29]), χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης.

Προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η χωρητικότητα και να μειωθούν φαινόμενα όπως, διαλείψεις (fading) [30], εξάπλωση καθυστέρησης (delay-spread) [31] και ομοκαναλικές παρεμβολές (co-channel interference) [32], έχουν προταθεί συστήματα συστοιχίας κεραιών (antenna diversity, smart antenna, και MIMO συστήματα).

Αν και αυτές οι τεχνικές είναι επιθυμητές και από άλλα ασύρματα δίκτυα, είναι ένα πιο δύσκολο πρόβλημα για την ανάπτυξη τέτοιων τεχνικών για τα WMNs.

Για παράδειγμα, η δικτύωση πλέγματος μεταξύ πολλών κόμβων καθιστά το σύστημα μοντέλο πολύ πιο περίπλοκο από εκείνη του συμβατικού συστήματος MIMO σε ασύρματα τοπικά δίκτυα ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Προκειμένου να επιτευχθεί πολύ καλύτερη χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων και να γίνει βιώσιμος ο σχεδιασμός συχνοτήτων για WMNs, αναπτύσσονται ευέλικτες



συχνότητες (frequency-agile) και ραδιοσυστήματα για να συλλαμβάνουν δυναμικά το μη κατειλημμένο φάσμα.

Αυτό γίνεται εφαρμόζοντας την πλατφόρμα SDR - (Software-defined\_radio [33]), επειδή όλα τα συστατικά ενός ραδιοσυστήματος, όπως οι RF μπάντες, οι τρόποι πρόσβασης του καναλιού, οι διαμορφώσεις, είναι προγραμματιζόμενες.

### ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Πρώτον, είναι απαραίτητο να βελτιωθεί περαιτέρω ο ρυθμός μετάδοσης και η απόδοση των τεχνικών φυσικού επιπέδου διαστρωμάτωσης. Νέα ευρυζωνικά συστήματα μετάδοσης πρέπει να υλοποιηθούν, εκτός από OFDM ή UWB, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερο ποσοστό μετάδοσης σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο. Συστήματα πολλαπλών-κεραιών έχουν ερευνηθεί για χρόνια. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και το κόστος τους είναι ακόμη πολύ υψηλό για να γίνουν ευρέως αποδεκτά για WMNs.

Δεύτερον, για να αξιοποιηθούν καλύτερα οι προηγμένες δυνατότητες που παρέχονται από φυσικό επίπεδο διαστρωμάτωσης, τα πρωτόκολλα ανώτερων επιπέδων, ειδικά τα πρωτόκολλα MAC, θα πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να αλληλεπιδρούν με το φυσικό επίπεδο.

### 3.2 MAC LAYER

Τα MAC πρωτόκολλα για τα WMNs έχουν τις ακόλουθες διαφορές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα για τα ασύρματα δίκτυα:

- Τα πρωτόκολλα MAC για τα WMNs ασχολούνται με περισσότερες από μία επικοινωνίες.

Τα κλασικά πρωτόκολλα MAC περιορίζονται σε επικοινωνία one-hop, ενώ το πρωτόκολλο δρομολόγησης φροντίζει επικοινωνία multihop. Η υπόθεση αυτή κάνει το σχεδιασμό του πρωτοκόλλου ευκολότερη, αφού MAC και δρομολόγηση είναι λειτουργίες διαφανείς η μια στην άλλη.

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν λειτουργεί καλά στα WMNs, επειδή η μετάδοση και λήψη των δεδομένων σε έναν κόμβο δεν επηρεάζεται μόνο από τους κόμβους εντός ενός hop, αλλά δύο ή και περισσότερων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο κρυφός κόμβος (hidden-node) σ' ένα πολλαπλών βημάτων (multi-hop) ασύρματο δίκτυο.

- Το πρωτόκολλο MAC διαπλέκεται, συνεργάζεται και λειτουργεί σε multipoint-to-multipoint επικοινωνία.

Η λειτουργία του στρώματος MAC πραγματοποιείται με ένα κατανεμημένο τρόπο, δηλαδή, το MAC πρωτόκολλο πρέπει να εξασφαλίζει όλους τους κόμβους να συνεργαστούν στη μετάδοση. Επιπλέον, κάθε κόμβος του δικτύου με δυνατότητα δικτύωσης πλέγματος είναι σε θέση να επικοινωνήσει με όλους τους γειτονικούς κόμβους του πλέγματος. Έτσι, multipoint-to-multipoint επικοινωνία μπορεί να δημιουργηθεί ανάμεσα σε αυτούς τους κόμβους.

- Δίκτυο αυτο-οργάνωσης είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του στρώματος MAC.

Το MAC πρωτόκολλο πρέπει να έχει τη γνώση για την τοπολογία του δικτύου γεγονός το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη συνεργασία μεταξύ των γειτονικών κόμβων και κόμβων σε πολλαπλών βημάτων (multi-hop) αποστάσεις. Αυτό μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του πρωτοκόλλου MAC σε ένα περιβάλλον multi-hop. Σε περιπτώσεις, που το δίκτυο αυτο-οργάνωσης βασίζεται σε έλεγχο της ισχύος, είναι σε θέση να βελτιστοποιήσει την τοπολογία του δικτύου [34],

να ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών κόμβων, και ως εκ τούτου, να βελτιώσει την χωρητικότητα του δικτύου.

- Η κινητικότητα επηρεάζει την απόδοση του πρωτοκόλλου MAC.

Η κινητικότητα αλλάζει δυναμικά την διαμόρφωση του δικτύου, και ως εκ τούτου, ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του MAC πρωτοκόλλου. Ουσιαστικά η κινητικότητα αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου και αυτό συμβαίνει διότι με μεγαλύτερη κινητικότητα υπάρχει η δυνατότητα να κατανεμηθεί περισσότερο τυχαία η κίνηση στους κόμβους αναμετάδοσης. Για να είναι προσαρμοστικό στην κινητικότητα ή ακόμα και να αξιοποιήσει την κινητικότητα [35] το πρωτόκολλο, θα πρέπει οι επιμέρους κόμβοι του δικτύου να ανταλλάσσουν συνεχώς πληροφορίες τοπολογίας.

Η επεκτασιμότητα του WMN μπορεί να αντιμετωπιστεί από το στρώμα MAC με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος είναι η ενίσχυση των υφιστάμενων πρωτοκόλλων MAC ή η πρόταση νέων πρωτοκόλλων MAC για την αύξηση της από σημείο σε σημείο (end-to-end) απόδοσης, όταν μόνο ένα κανάλι είναι διαθέσιμο σε έναν κόμβο του δικτύου.

Ο δεύτερος τρόπος είναι να επιτρέπεται η μετάδοση σε πολλαπλά κανάλια σε κάθε κόμβο του δικτύου. Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στις δυο αυτές περιπτώσεις.

### 3.2.1 Single-κανάλι MAC

Υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις σε αυτή την περίπτωση:

- Βελτίωση των υφιστάμενων πρωτοκόλλων MAC.

Αρκετά πρωτόκολλα MAC (CSMA, MACA, FAMA, IEEE 802.11 DSF [36]) έχουν προταθεί για multi-hop ad hoc δίκτυα με την ενίσχυση του CSMA / CA [37] πρωτοκόλλου. Στα πρωτόκολλα αυτά συνήθως ρυθμίζονται παράμετροι ( window size, backoff procedures) του CSMA / CA. Αυτό βελτιώνει την απόδοση για συστήματα one-hop επικοινωνιών. Ωστόσο, για multi-hop περιπτώσεις, όπως στα WMNs, οι λύσεις αυτές δεν έχουν ακόμη επιτύχει υψηλή end-to-end απόδοση, επειδή δεν μπορεί να μειωθεί η πιθανότητα διαμάχης - σύγκρουσης μεταξύ γειτονικών κόμβων.



### ***CSMA MAC protocol***

Στην περίπτωση αυτή ο κόμβος για να μεταδώσει πληροφορία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα.

1. Ακούει το επιθυμητό κανάλι.
2. Εάν το κανάλι είναι ελεύθερο μεταδίδει τα πακέτα.
3. Εάν το κανάλι είναι απασχολημένο ο κόμβος περιμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση για ένα συγκεκριμένο χρόνο (contention period).
4. Εν συνεχεία, μετά το πέρας της περιόδου αν το κανάλι είναι ελεύθερο επιτρέπεται η μετάδοση αλλιώς ακολουθείται το προηγούμενο βήμα μέχρι που ο κόμβος να βρει ελεύθερο το κανάλι.

### ***MACA protocol (Multiple Access with Collision Avoidance Protocol)***

Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα για την αποφυγή συγκρούσεων πακέτων κατά την μετάδοση, οι οποίες προκαλούνται λόγω του φαινομένου (hidden node).

Η βασική αρχή του πρωτοκόλλου είναι ότι ανακοινώνει μια επικείμενη αποστολή δεδομένων για να ενημερωσει τους άλλους κόμβους να μην μεταδώσουν. Η διαδικασία μετάδοσης που ακολουθείται είναι: ο αποστολέας στέλνει ένα σήμα RTS-Request to send πακέτο ενημερώνοντας τον παραλήπτη για το μέγεθος του πακέτου αποστολής. Εάν ο παραλήπτης επιτρέπει την μετάδοση στέλνει ένα σήμα CTS-Clear to send με το μέγεθος του πακέτου που είναι έτοιμος να παραλάβει. Κατά την διάρκεια και μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας αποστολής-παραλαβής ένας κόμβος που ακούει σήμα RTS/CTS πρέπει να μένει ανενεργός.

### ***FAMA protocol (Floor Acquisition Multiple Access Protocol)***

Ένα πιο εξελιγμένο πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιεί την αντιστοιχία RTS-CTS με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε μια πιθανή σύγκρουση RTSs - CTSs, η δρομολόγηση των πακέτων να μένει ανεπηρέαστη από το φαινόμενο αυτό.

### ***IEEE 802.11 DCF protocol***

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου είναι συνυφασμένη με τον μηχανισμό CSMA/CA με την διαφορά ότι το πρωτόκολλο αυτό λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιεί DCF -

Distributed Coordination Function, χρησιμοποιείται για ασύγχρονη μεταφορά δεδομένων.

- Cross-layer σχεδίαση με προηγμένες τεχνικές φυσικού επιπέδου διαστρωμάτωσης.

Δύο σενάρια υπάρχουν σε αυτή την κατηγορία: MAC το οποίο βασίζεται σε κατευθυντική κεραία [38] και MAC που χρησιμοποιεί έλεγχο ισχύος [39, 40].

Το πρώτο εξαλείφει τους εκτεθημένους κόμβους με την προϋπόθεση ότι η δέσμη ακτινοβολίας της κεραίας είναι τέλεια. Ωστόσο, λόγω της μονομερούς κατεύθυνσης μετάδοσης, περισσότεροι κρυφοί κόμβοι (hidden nodes) εμφανίζονται. Επιπλέον, τα MAC πρωτόκολλα που βασίζονται σε κατευθυντικές κεραίες αντιμετωπίζουν και άλλες δυσκολίες, όπως το κόστος, την πολυπλοκότητα του συστήματος, και την πρακτικότητα που έχουν οι κατευθυντικές κεραίες.

Το δεύτερο έχει αναπτυχθεί με σκοπό τη μείωση των καταναλώσεων ρεύματος [40]. Αυτά τα συστήματα μειώνουν το πρόβλημα των εκτεθημένων κόμβων, ειδικά σε ένα πυκνό δίκτυο, και κατά συνέπεια, βελτιώνουν το φάσμα του παράγοντα χωρικής-επαναχρησιμοποίησης (spectrum spatial-reuse) στα WMNs. Ωστόσο, το φαινόμενο των κρυμμένων κόμβων εξακολουθεί να υπάρχει και μπορεί να γίνει χειρότερο, επειδή ένα χαμηλότερο επίπεδο ισχύος μετάδοσης μειώνει την πιθανότητα ανίχνευσης των εν δυνάμει κόμβων παρεμβολής.

- Υποβολή προτάσεων για καινοτόμα πρωτόκολλα MAC.

Για να επιλυθεί ριζικά το πρόβλημα της χαμηλής απόδοσης end-to-end σε ένα multi-hop ad hoc περιβάλλον, όπως τα WMNs, καινοτόμες λύσεις είναι αναγκαίες. Καθορισμένα από την κακή επεκτασιμότητα τους σε ένα δίκτυο ad hoc multi-hop, τα πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης, όπως το CSMA / CA δεν είναι αποτελεσματική λύση. Έτσι, η επανεξέταση σχεδιασμού πρωτοκόλλων MAC τα οποία βασίζονται σε TDMA (Time division multiple access [41]) ή CDMA (Code division multiple access [42]) είναι ένα σημαντικό ζήτημα έρευνας. Μέχρι σήμερα, λίγα TDMA [43], ή CDMA [44] MAC πρωτόκολλα έχουν προταθεί για WMNs. Αυτό είναι πιθανώς λόγω δύο παραγόντων. Ο ένας είναι η πολυπλοκότητα και το κόστος ανάπτυξης ενός καταναεμημένου και συνεργάσιμου MAC πρωτοκόλλου με TDMA ή CDMA. Ο άλλος είναι η συμβατότητα του TDMA (ή CDMA) MAC με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα MAC.



### 3.2.2 Multi-channel MAC

Ένα multi-channel MAC μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές διαφορετικές πλατφόρμες υλικού, το οποίο επηρεάζει και το σχεδιασμό της MAC. Ένα multi-channel MAC μπορεί να ανήκει σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- Multi-channel single-πομποδέκτη MAC. Η προτιμώμενη πλατφόρμα υλικού-hardware υπολογίζοντας το κόστος και τη συμβατότητα, είναι ένας πομποδέκτης σε ένα ραδιοσύστημα. Δεδομένου ότι μόνο ένας πομποδέκτης είναι διαθέσιμος, μόνο ένα κανάλι είναι ενεργό κάθε φορά σε κάθε κόμβο του δικτύου. Ωστόσο, οι διαφορετικοί κόμβοι μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια ταυτόχρονα, προκειμένου να βελτιωθεί η ικανότητα του συστήματος. Για το συντονισμό μετάδοσης μεταξύ των κόμβων του δικτύου βάσει της παρούσας κατάστασης, χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα, όπως το multi-channel MAC [45] και το SSCH - (seed-slotted channel hopping) [46].

- Multi-channel multi-πομποδέκτη MAC. Σε αυτό το σενάριο, ένα ραδιοσύστημα περιλαμβάνει πολλαπλές παράλληλες RF front-end chips και μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης για την υποστήριξη πολλών ταυτόχρονων καναλιών. Στην κορυφή του φυσικού επιπέδου, υπάρχει μόνο ένα στρώμα MAC για να συντονιστεί η λειτουργία των πολλαπλών καναλιών.

#### *Multi-channel MAC protocol*

Οι βασικές λειτουργίες που επιτελεί το πρωτόκολλο αυτό είναι:

1. Διατήρηση της δομής των δεδομένων όλων των διαθέσιμων καναλιών σε κάθε κόμβο.
2. Ενδοεπικοινωνία των διαθέσιμων καναλιών (διαμέσου ενός γνωστού προαποφασισμένου καναλιού επικοινωνίας) κατά την διάρκεια ειδοποίησης μέσω μηνύματος επικείμενης μεταφοράς δεδομένων (ATIM-ad hoc traffic indication message).
3. Επιλογή του καναλιού με κριτήριο επιλογής το μικρότερο πλήθος ζευγαριών (αποστολέα-παραλήπτη) που έχει επιλέξει το συγκεκριμένο κανάλι.



• Multi-ραδιοσύστημα MAC. Σε αυτό το σενάριο, κάθε κόμβος του δικτύου έχει πολλαπλά ραδιοσυστήματα καθένα με το δικό του MAC και φυσικό επίπεδο διαστρωμάτωσης. Οι επικοινωνίες σε αυτά τα ραδιοσυστήματα είναι εντελώς ανεξάρτητες. Έτσι, ένα εικονικό MAC πρωτόκολλο, όπως το multi-radio unification protocol (MUP) [47] απαιτείται στην κορυφή της MAC για το συντονισμό των επικοινωνιών σε όλα τα κανάλια.

Στην πραγματικότητα ένα ραδιοσύστημα μπορεί να έχει πολλαπλά κανάλια. Ωστόσο, για την απλότητα του σχεδιασμού και της εφαρμογής, ένα μόνο κανάλι συνήθως χρησιμοποιείται σε κάθε ραδιοσύστημα.

### ***MUP - Multi-radio unification protocol***

Σε κάθε κόμβο υπάρχουν αρκετές κάρτες δικτύου (NICs-Network interface cards).

Οι βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου αυτού είναι:

1. Εύρεση των γειτονικών κόμβων.
2. Επιλογή κάρτας δικτύου NIC βάσει υπολογισμών του χρόνου που χρειάζεται ένα πακέτο να σταλεί από ένα κόμβο σ' ένα γειτονικό RTT-round trip time. Ο μικρότερος χρόνος RTT μεταξύ κόμβου και των γειτονικών του υπερισχύει.
3. Χρήση της επιλεγμένης κάρτας για μια χρονική περίοδο της τάξεως 10-20s.
4. Εναλλαγή καναλιών. Μετά το πέρας του χρόνου χρήσης μιας επιλεγμένης κάρτας γίνεται επαναπροσδιορισμός με την βοήθεια μηνυμάτων ώστε να επιλεγεί η καλύτερη δυνατή NIC για την μετάδοση.

### **ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

#### **Επεκτάσιμο MAC**

Το θέμα της επεκτασιμότητας σε multi-hop δίκτυα ad hoc δεν έχει πλήρως επιλυθεί ακόμη. Περισσότερα από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα MAC επιλύουν μερικώς το πρόβλημα, αλλά εγείρουν άλλα προβλήματα. Η δημιουργία του νέου πρωτοκόλλου MAC θα πρέπει να πιστοποιεί την απόδοση του δικτύου σε συνδυασμό παραμέτρων όπως delay & delay jitter ή σε επίπεδο ενδεχόμενης αύξησης του δικτύου. Είναι φανερό ότι ένα multi-channel MAC θα αποδίδει περισσότερο, ωστόσο για την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος είναι απαραίτητη η συνολική βελτίωση επίδοσης ενός συστήματος.

### Σχεδιασμός συνδυαστικά MAC-Physical Layer

Θα πρέπει να υπάρχει συνεργασία MAC-Physical Layer.

Με την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών στο επίπεδο φυσικής διαστρωμάτωσης, όπως MIMO και γνωστικά ραδιοσυστήματα, ειδικά τότε μια γκάμα MAC πρωτοκόλλων είναι απαραίτητη με έμφαση στο multi-channel MAC, έτσι ώστε να αξιοποιούνται κατάλληλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το φυσικό επίπεδο.

### Ενοποίηση του δικτύου στο MAC Layer

Οι δρομολογητές πλέγματος είναι υπεύθυνοι για την ένταξη των διαφόρων ασύρματων τεχνολογιών. Έτσι, προηγμένες λειτουργίες γεφύρωσης πρέπει να αναπτυχθούν στο στρώμα MAC, έτσι ώστε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες, όπως IEEE 802.11, 802.16, 802.15, κλπ., να μπορούν να λειτουργούν άψογα μαζί.

### 3.3 ROUTING LAYER

Τα WMNs είναι στενά συνδεδεμένα με το Internet, το IP πρωτόκολλο έχει γίνει αποδεκτό ως ένα πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου για πολλά ασύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των WMNs. Ωστόσο, πρωτόκολλα δρομολόγησης για WMNs είναι διαφορετικά από εκείνα στα ενσύρματα δίκτυα και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Επειδή τα WMNs μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά με τα ad hoc δίκτυα, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναπτύχθηκαν για τα δίκτυα ad hoc μπορούν να εφαρμοστούν στα WMNs.

Ωστόσο, παρά τα κοινά χαρακτηριστικά τους και την γκάμα πρωτοκόλλων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα υπάρχουν αδυναμίες λόγω της φύσης των WMNs. Με βάση την απόδοση των υπαρχόντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ad hoc δίκτυα και τις ειδικές απαιτήσεις ενός WMN, πιστεύουμε ότι μια βέλτιστη έκδοση πρωτοκόλλου δρομολόγησης για WMNs πρέπει να εμπερικλείει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μετρήσεις απόδοσης.

Πολλά υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούν ελάχιστο βήμα μέτρησης (hop-count) ως κριτήριο για να επιλέξουν το επικείμενο μονοπάτι δρομολόγησης. Αυτό έχει αποδειχθεί ότι δεν ισχύει σε πολλές περιπτώσεις. Ας υποθέσουμε ότι ένας σύνδεσμος, για το ελάχιστο μονοπάτι hop-count μεταξύ δύο κόμβων έχει κακή ποιότητα. Εάν το ελάχιστο βήμα χρησιμοποιείται ως η απόδοση μέτρησης, τότε η απόδοση μεταξύ αυτών των δύο κόμβων θα είναι πολύ χαμηλή. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, απαιτούνται μετρήσεις επιδόσεων που σχετίζονται με την ποιότητα σύνδεσης. Επίσης αν υπάρχει συμφόρηση σε συγκεκριμένο κόμβο, τότε το ελάχιστο βήμα-hop count δεν θα είναι μια ακριβής μέτρηση των επιδόσεων. Συνήθως το RTT [48] (round trip time-χρόνος που κάνει το σήμα να σταλεί μαζί με τον χρόνο επιβεβαίωσης αποστολής του) χρησιμοποιείται ως πρόσθετη λειτουργία μέτρησης της απόδοσης. Καταλήγουμε στο ότι ένα μονοπάτι δρομολόγησης πρέπει να επιλεγεί με την εξέταση και αξιολόγηση πολλαπλών παραγόντων μέτρησης της απόδοσης.



• Ανοχή σφαλμάτων με αποτυχίες σύνδεσης.

Ένας από τους στόχους για την ανάπτυξη των WMNs είναι να διασφαλιστεί η αξιοπιστία σε αποτυχίες συνδέσμου (link failures). Αν ένας σύνδεσμος σπάσει, το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να είναι σε θέση να επιλέξει γρήγορα μια άλλη πορεία για να αποφευχθεί η διακοπή των υπηρεσιών.

• Εξισορρόπηση φόρτου.

Ένας από τους στόχους των WMNs είναι να μπορούν να διαμοιράζονται τους πόρους του δικτύου. Όταν ένα μέρος ενός WMN τυγχάνει κυκλοφοριακής συμφόρησης, η ροή των πακέτων δεν θα πρέπει να δρομολογείται μέσα από αυτό το μέρος. Μετρήσεις απόδοσης, όπως το RTT συμβάλουν στην επίτευξη εξισορρόπησης φορτίου, αλλά δεν είναι πάντα αποτελεσματικές, επειδή το RTT μπορεί να επηρεαστεί από την ποιότητα σύνδεσης (link quality).

• Δυνατότητα κλιμάκωσης.

Η δημιουργία ενός μονοπατιού δρομολόγησης σε ένα πολύ μεγάλο ασύρματο δίκτυο μπορεί να διαρκέσει μεγάλο χρονικό διάστημα, και η συνολική (end-to-end) καθυστέρηση μπορεί να γίνει μεγάλη. Επιπλέον, ακόμα και όταν ο δρόμος είναι εγκατεστημένος, στην πορεία μπορεί να αλλάξει με μια πιθανή αλλαγή ενός ενδιάμεσου κόμβου. Έτσι, η επεκτασιμότητα ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι κρίσιμη στα WMNs.

• Προσαρμοστική υποστήριξη και των δύο οικογενειών Δρομολογητών και Πελατών.

Λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη κινητικότητα και κανένα περιορισμό στην κατανάλωση ενέργειας σε δρομολογητές πλέγματος, ένα απλό πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να αναπτυχθεί για δρομολογητές πλέγματος. Το αντίθετο θα πρέπει να ισχύσει για τους πελάτες πλέγματος, εφόσον λόγω της κινητικότητας το πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να έχει την πλήρη λειτουργία των ad hoc πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένα αποτελεσματικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για WMNs που να μπορεί να υποστηρίξει προσαρμοστικά δρομολογητές /πελάτες πλέγματος.

### **Πολυραδιοκυματική δρομολόγηση**

Σε WMNs, πολυραδιοκυματική δρομολόγηση ανά κόμβο μπορεί να είναι μια προτιμώμενη αρχιτεκτονική, επειδή χωρίς να τροποποιεί το MAC πρωτόκολλο επιτυγχάνει αύξηση της χωρητικότητας. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός νέου κριτηρίου WCETT-(weighted cumulative expected transmission time) [49] το οποίο λαμβάνει υπόψη τόσο την ποιότητα σύνδεσης όσο και το ελάχιστο βήμα μέτρησης (hop-count), παρέχοντας έτσι μια καλύτερη απόκριση μεταξύ καθυστέρησης (delay) και απόδοσης (throughput).

### **Πολυραδιοκυματική δρομολόγηση για την εξισορρόπηση φορτίου και την ανοχή σε σφάλματα**

Ο κύριος σκοπός της χρήσης πολλαπλών διαδρομών δρομολόγησης είναι να παρέχουν καλύτερες επιδόσεις στην εξισορρόπηση φορτίου και την ανοχή σφαλμάτων. Οι πολλαπλές διαδρομές επιλέγονται μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Όταν ο σύνδεσμος δεν λειτουργεί σε μια πορεία και αυτό οφείλεται στην κακή ποιότητα του καναλιού ή της κινητικότητας, ένα άλλο μονοπάτι από το σύνολο των υφιστάμενων μονοπατιών μπορεί να επιλεγεί. Έτσι, με την άμεση επιλογή του νέου μονοπατιού δρομολόγησης, η συνολική καθυστέρηση, η απόδοση και η ανοχή σε σφάλματα μπορεί να βελτιωθεί. Ωστόσο, η βελτίωση εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των μονοπατιών μεταξύ της πηγής και προορισμού.

Ένα μειονέκτημα της πολλαπλής διαδρομής δρομολόγησης είναι η πολυπλοκότητά της.

### **Ιεραρχική δρομολόγηση**

Στην ιεραρχική δρομολόγηση, το σύστημα χωρίζεται σε επιμέρους ομάδες κόμβων (clusters). Κάθε ομάδα κόμβων έχει ένα ή περισσότερους κόμβους επικεφαλής. Δεδομένου ότι η συνδεσιμότητα είναι απαραίτητη μεταξύ των ομάδων, μερικοί κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν με περισσότερα από ένα συμπέγματα και να λειτουργούν ως πύλες (gateways). Όταν η χρησιμότητα του κόμβου είναι υψηλή, τα πρωτόκολλα ιεραρχικής δρομολόγησης επιτυγχάνουν πολύ καλύτερη απόδοση λόγω της μικρότερης

καθυστερήσης, του μικρότερου μέσου όρου δρομολόγησης ανά μονοπάτι, και της ταχύτερης εκκίνησης διαδικασίας δρομολόγησης της διαδρομής.

Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της διατήρησης της ιεράρχησης ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Στα WMNs, η ιεραρχική δρομολόγηση μπορεί να αντιμετωπίσει την δυσκολία εφαρμογής της, επειδή όταν ένας κόμβος επιλέγεται ως επικεφαλής, μπορεί να μην έχει κατ'ανάγκη μεγαλύτερη ικανότητα επεξεργασίας και χωρητικότητας καναλιών από έναν άλλο, φαινόμενο το οποίο μπορεί να χρήσει ένα κόμβο ως σημείο κυκλοφοριακής συμφόρησης δεδομένων δημιουργώντας έτσι πρόβλημα και στο υπόλοιπο δίκτυο.

### **Γεωγραφική δρομολόγηση**

Σε σύγκριση με την δρομολόγηση που βασίζεται σε συστήματα τοπολογίας, το μοντέλο γεωγραφικής δρομολόγησης, προωθεί πακέτα χρησιμοποιώντας μόνο τις πληροφορίες θέσης των κόμβων της περιοχής και του κόμβου προορισμού.

Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια αλγορίθμων [50] για τους οποίους βέβαια ένα θέμα είναι πάντα ανοικτό, το ότι δεν εγγυώνται ασφαλή δρομολόγηση ακόμα και αν το μονοπάτι δρομολόγησης παραμένει το ίδιο μεταξύ έναρξης και λήξης αποστολής των δεδομένων.

### **ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

Η επεκτασιμότητα είναι το πιο κρίσιμο ζήτημα στα WMNs. Τα πρωτόκολλα ιεραρχικής δρομολόγησης μπορούν εν μέρει να λύσουν αυτό το ζήτημα αυτό λόγω της πολυπλοκότητάς τους και της δυσκολίας τους στην διαχείριση. Η γεωγραφική δρομολόγηση βασίζεται στην ύπαρξη του GPS ή παρόμοιων τεχνολογιών εντοπισμού θέσης, η οποία αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα των WMNs. Επιπλέον, η έρευνα της θέσης προορισμού παράγει επιπλέον ωφέλιμο φορτίο.

Οι υφιστάμενες μετρήσεις απόδοσης που ενσωματώνονται σε πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να επεκταθούν. Επιπλέον, να ενσωματώνονται πολλαπλές μετρήσεις απόδοσης σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη συνολική απόδοση του.



Τέλος, ο cross-layer σχεδιασμός μεταξύ δρομολόγησης και πρωτοκόλλων MAC είναι ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα έρευνας.

### **Routing Protocols**

- *AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector)*

Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για κινητά ad hoc δίκτυα (MANETs) και άλλα ασύρματα δίκτυα ad-hoc. Είναι ένα πρωτόκολλο έμμεσης δρομολόγησης, με την έννοια ότι θεσπίζει μια διαδρομή προς έναν προορισμό μόνο κατά παραγγελία. Σε αντίθεση, τα πιο κοινά πρωτόκολλα δρομολόγησης του Διαδικτύου βρίσκουν τα μονοπάτια δρομολόγησης, ανεξάρτητα από τη χρήση των διαδρομών.

- *B.A.T.M.A.N. (Better Approach To Mobile Adhoc Networking)*

Η Better Approach To Adhoc Networking Mobile Adhoc Δικτύωση (BATMAN), είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο βρίσκεται υπό ανάπτυξη από το "Freifunk" Community και προορίζεται να αντικαταστήσει το OLSR (θα αναφερθούμε παρακάτω).

Βασικό και κρίσιμο σημείο του είναι η αποκέντρωση της γνώσης σχετικά με την καλύτερη διαδρομή μέσω του δικτύου - κανένας μεμονωμένος κόμβος δεν διαθέτει όλα τα δεδομένα. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική, την ανάγκη για τη διάδοση πληροφοριών σχετικά με αλλαγές στο δίκτυο σε κάθε κόμβο στο δίκτυο καθίσταται περιττή. Ο κάθε επιμέρους κόμβος αποθηκεύει μόνο πληροφορίες σχετικά με την «κατεύθυνση» που έλαβε τα δεδομένα και στέλνει τα δεδομένα του αναλόγως, δημιουργώντας δυναμικές διαδρομές. Ένα δίκτυο συλλογικής νοημοσύνης δημιουργείται.

- *Babel (protocol) (a distance-vector routing protocol for IPv6 and IPv4 with fast convergence properties)*

Το Babel πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ένα distance-vector πρωτόκολλο δρομολόγησης για τα δίκτυα του Internet πρωτοκόλλου μεταγωγής πακέτων που έχει σχεδιαστεί για να είναι εύρωστο και αποτελεσματικό και στα δύο, ασύρματα δίκτυα πλέγματος και ενσύρματα δίκτυα.

Βασίζεται στις ιδέες που υπάρχουν στο Destination-Sequenced Distance Vector routing (DSDV), Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV), και στο Cisco's Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP), αλλά χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του Αναμενόμενου Κόστους Μεταφοράς (ETX - Expected Transmission Count).

- *DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector Routing)*

Είναι ένας πίνακας δρομολόγησης για ad hoc δίκτυα κινητής με βάση τον Bellman-Ford αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος αυτός αναπτύχθηκε από τους C. Perkins και Π. Bhagwat το 1994. Η κύρια συμβολή του αλγορίθμου ήταν να λύσει το πρόβλημα δρομολόγησης από βρόχο σε βρόχο.

- *DSR (Dynamic Source Routing)*

«Δυναμική δρομολόγηση προέλευσης» (DSR) είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα πλέγματος. Είναι παρόμοιο με το AODV στο ότι θεσπίζει μια διαδρομή κατ' απαίτηση (on-demand) όταν αυτό ζητηθεί. Ωστόσο, χρησιμοποιεί τη δρομολόγηση προέλευσης, αντί να βασίζεται σε πίνακα δρομολόγησης σε κάθε ενδιάμεση συσκευή.

- *HSLs (Hazy-Sighted Link State)*

Το HSLs είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πολυπλεγματικών δικτύων που αναπτύχθηκε από το Ίδρυμα CUWiN. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο που επιτρέπει την επικοινωνία μέσω υπολογιστών ασύρματα σε ένα δίκτυο πλέγματος διαβιβάζοντας μηνύματα στους υπολογιστές που βρίσκονται μακριά από την άμεση επαφή ασυρμάτου δικτύου.

- *OLSR (Optimized Link State Routing protocol)*

Η OLSR δρομολόγηση είναι ένα πρωτόκολλο IP routing βελτιστοποιημένο για κινητά ad-hoc δίκτυα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα ασύρματα δίκτυα ad-hoc. Το OLSR είναι ένα ενεργής ζεύξης (link state) πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο χρησιμοποιεί μηνύματα (hello) και τοπολογία ελέγχου (Topology control), για να ανακαλύψει και στη συνέχεια να διαδώσει πληροφορίες κατάστασης της σύνδεσης σε όλο το κινητό ad-hoc δίκτυο.



- *OORP (OrderOne Routing Protocol) (OrderOne Networks Routing Protocol)*

Το OrderOne MANET Routing πρωτόκολλο είναι ένας αλγόριθμος για υπολογιστές οι οποίοι επικοινωνούν με ψηφιακό σήμα σε ένα δίκτυο πλέγματος για να βρουν ο ένας τον άλλο, και στέλνουν μηνύματα ο ένας στον άλλο κατά μήκος μιας εύλογα αποδοτικής διαδρομής. Σχεδιάστηκε και διαφημίζεται ως συμβατό με τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος.

Οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου πιστοποιούν ότι μπορεί να χειριστεί χιλιάδες κόμβους, όταν τα περισσότερα άλλα πρωτόκολλα για WMNs χειρίζονται λιγότερο από εκατό. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί ιεραρχικά αλγόριθμους για να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό ποσό των μεταδόσεων που απαιτούνται για τη δρομολόγηση. Δρομολόγηση επιβάρυνσης (overhead) περιορίζεται σε ποσοστό μεταξύ 1% έως 5% από κόμβο σε κόμβο (bandwidth) σε οποιοδήποτε δίκτυο και δεν αναπτύσσεται καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται.

- *OSPF (Open Shortest Path First Routing)*

Το OSPF είναι ένα Link State πρωτόκολλο δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα Link State διαφέρουν από τα distance vector στο ότι διαχέουν πληροφορία κατάστασης καναλιού και επιτρέπουν σε κάθε δρομολογητή να έχει πλήρη εικόνα της τοπολογίας δικτύου. Ο αλγόριθμος του πρωτοκόλλου OSPF (ανακαλύφθηκε από τον Dijkstra) καθορίζει την καλύτερη διαδρομή σε μία σύνδεση βάσει μιας τιμής, του κόστους (cost). Αρχικά ξεκίνησε ως ένας αλγόριθμος για point-to-point συνδέσεις δικτύου. Για να υλοποιηθεί το πρωτόκολλο OSPF στην ποικιλομορφία των διαθέσιμων σημερινών δικτύων, χρειάζεται να γνωρίζει τον τύπο του δικτύου στον οποίο λειτουργεί.

Το πρωτόκολλο OSPF ξεπερνά τους περιορισμούς άλλων πρωτοκόλλων (RIP) κι έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα δυνατό και κλιμακωτό πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάλληλο για τα σημερινά δίκτυα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία χωριστή περιοχή (single area) για μικρά δίκτυα και σε πολλαπλές περιοχές (multiple areas) για μεγάλα δίκτυα.

- *PWRP (Predictive Wireless Routing Protocol)*

Το PWRP-προγνωστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ένα ιδιόκτητο σύστημα που δημιουργήθηκε από την εταιρεία Tropos Networks. Πρόκειται για μια εξωτερική ασύρματη δρομολόγηση συστήματος που βασίζεται στο Open Shortest Path First (OSPF) πρωτόκολλο δρομολόγησης.



Το PWRP χρησιμοποιεί τα "link state" χαρακτηριστικά του OSPF. Σε αντίθεση με τα περισσότερα συστήματα δρομολόγησης, το PWRP δεν περιλαμβάνει έναν πίνακα των πιθανών διαδρομών. Συγκρίνει τα ποσοστά σφάλματος πακέτων και τους λοιπούς όρους του δικτύου για να καθορίσει ένα καλύτερο μονοπάτι δρομολόγησης.

- *TORA (Temporally-Ordered Routing Algorithm)*

Πρόκειται για ένα αλγόριθμο δρομολόγησης εξαιρετικά προσαρμοστικό, αποδοτικό και επεκτάσιμο. Είναι ένα source-initiated on-demand πρωτόκολλο και βρίσκει πολλαπλές διαδρομές μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Είναι ένα αρκετά περίπλοκο πρωτόκολλο, αλλά κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι όταν ένας σύνδεσμος δεν λαμβάνει τα μηνύματα ελέγχου τότε η αποτυχία περιορίζεται στον σύνδεσμο αυτό χωρίς να επηρεαστεί το υπόλοιπο δίκτυο-διαδρομή. Ενώ άλλα πρωτόκολλα πρέπει να ξεκινήσουν εκ νέου εύρεση μιας διαδρομής όταν ένας σύνδεσμος αποτύχει, το TORA είναι σε θέση να επιδιορθώσει το λάθος γύρω από το σημείο της αποτυχίας.

- *DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)*

Το DHCP είναι ένα πρωτόκολλο πελάτη - εξυπηρετητή (client - server). Ένας πελάτης που έχει μόλις φτάσει σε ένα δίκτυο επιθυμεί να λάβει μια IP διεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή το πρωτόκολλο DHCP είναι μια διαδικασία τεσσάρων βημάτων:

- i. Ανακάλυψη Εξυπηρετητή DHCP: Η πρώτη εργασία ενός μόλις αφικνούμενου πελάτη είναι να βρει έναν Εξυπηρετητή DHCP με τον οποίο θα αλληλεπιδράσει. Αυτό το επιτυγχάνει στέλνοντας ένα μήνυμα ανακάλυψης DHCP προς όλους τους υπολογιστές του δικτύου.

- ii. Προσφορά Εξυπηρετητή DHCP: Ένας DHCP Εξυπηρετητής, που έχει λάβει το μήνυμα ανακάλυψης DHCP από τον πελάτη, του απαντά με ένα μήνυμα προσφοράς DHCP, το οποίο περιέχει μεταξύ άλλων πληροφοριών την προσφερόμενη IP διεύθυνση και το χρόνο για τον οποίο θα είναι έγκυρη. Δεδομένου ότι υπάρχει δυνατότητα το μήνυμα ανακάλυψης DHCP να έχει ληφθεί από περισσότερους του ενός DHCP εξυπηρετητές, ο πελάτης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε πολλά μηνύματα προσφοράς DHCP.

- iii. Αίτηση DHCP: Ο πελάτης επιλέγει μία προσφορά εξυπηρετητή DHCP και ενημερώνει τον αντίστοιχο εξυπηρετητή.

iv. Βεβαίωση λήψης DHCP (DHCP ACK): Ο DHCP εξυπηρετητής απαντά στον πελάτη βεβαιώνοντας τις παραμέτρους της προσφοράς του προς εκείνον.

Όταν ο πελάτης λάβει τη βεβαίωση λήψης DHCP, η αλληλεπίδραση με τον DHCP εξυπηρετητή έχει ολοκληρωθεί και ο πελάτης μπορεί να χρησιμοποιήσει την IP διεύθυνση για όσο χρόνο είναι έγκυρη. Επειδή ωστόσο ο πελάτης ενδέχεται να επιθυμεί τη χρήση της συγκεκριμένης διεύθυνσης περισσότερο χρόνο από όσο του έχει εκχωρηθεί, το πρωτόκολλο DHCP παρέχει έναν μηχανισμό που του επιτρέπει να ανανεώσει το χρόνο χρήσης της IP διεύθυνσης.

Επειδή το πρωτόκολλο DHCP δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της σύνδεσης σε ότι αφορά ζητήματα που σχετίζονται με το δίκτυο, συχνά αποκαλείται ως πρωτόκολλο plug-and-play. Το DHCP τυγχάνει ευρείας χρήσης, ειδικά στα ασύρματα δίκτυα και σε τοπικά δίκτυα πρόσβασης στο Internet.

- *IPv6 stateless auto configuration*

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του IPv6 είναι ότι επιτρέπει plug & play επιλογή για τις συσκευές του δικτύου, επιτρέποντάς τους να αυτορυθμίζονται ανεξάρτητα. Καθίσταται δυνατή η σύνδεση ενός κόμβου σε ένα δίκτυο IPv6 χωρίς να απαιτείται καμία απολύτως ανθρώπινη παρέμβαση. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι απαραίτητο σε δίκτυο με αυξανόμενο αριθμό κινητών συσκευών.

Η εξάπλωση του δικτύου επιτρέπει σε κινητές συσκευές που ικανοποιούν τις απαιτήσεις μιας φορητής συσκευής να αλλάζουν αυθαίρετα θέσεις σε ένα δίκτυο IPv6 διατηρώντας παράλληλα τις υπάρχουσες συνδέσεις τους. Για να προσφέρουμε αυτή τη δυνατότητα, σε κάθε φορητή συσκευή έχει εκχωρηθεί μια διεύθυνση σπιτιού το οποίο παραμένει πάντα προσβάσιμο. Όταν η φορητή συσκευή είναι σε εμβέλεια δικτύου σπιτιού, η σύνδεση πραγματοποιείται με την παραπάνω διεύθυνση. Όταν η φορητή συσκευή είναι μακριά από το σπίτι, ένας δρομολογητής λειτουργεί ως διάυλος ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ της κινητής συσκευής και των άλλων συσκευών διατηρώντας τη σύνδεση.

- *Ad-Hoc Configuration Protocol (AHCP)*

Το AHCP είναι ένα πρωτόκολλο αυτόματης διαμόρφωσης για το IPv6 και συνδυασμού IPv6/IPv4 σε δίκτυα με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή, εύρεσης του δρομολογητή και χρήσης του DHCP σε δίκτυα όπου είναι δύσκολο ή αδύνατο να

ρυθμίζονται οι παράμετροι ενός διακομιστή σε κάθε τομέα εκπομπής διαστρωμάτωσης, για παράδειγμα διαφήμιση σε κινητά ad-hoc δίκτυα.

Το AHCIP θα ρυθμίσει αυτόματα το IPv4 και IPv6, τους DNS (Domain Name Servers) διακομιστές και του NTP (Name Time Servers) εξυπηρετητές. Δεν θα ρυθμίσει τις προκαθορισμένες δρομολογήσεις, δεδομένου ότι έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί μαζί με ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης (όπως Babel ή OLSR).



### 3.4 TRANSPORT LAYER

Στην ενότητα αυτή, θα εξηγήσουμε τα υπάρχοντα πρωτόκολλα μεταφοράς με επίκεντρο τα ad hoc δίκτυα, καθώς τα WMNs μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά με τα δίκτυα ad hoc, παρά τις διαφορές τους.

#### Πρωτόκολλα για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων

Μέχρι σήμερα, ένας μεγάλος αριθμός αξιόπιστων πρωτοκόλλων μεταφοράς έχουν προταθεί για τα ad hoc δίκτυα. Μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: *TCP παραλλαγές* και εντελώς νέα πρωτόκολλα μεταφοράς.

Οι πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μια βελτιωμένη έκδοση της κλασικής TCP για τα ενσύρματα δίκτυα. Σε ένα εντελώς νέο πρωτόκολλο μεταφοράς, ο αξιόπιστος μηχανισμός μεταφοράς έχει σχεδιαστεί από την αρχή, με στόχο να αποφευχθούν τα θεμελιώδη προβλήματα του TCP.

#### 3.4.1 TCP παραλλαγές

Η απόδοση του TCP υποβαθμίζεται σημαντικά στα ad hoc δίκτυα. Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε διάφορα ενισχυμένα πρωτόκολλα TCP για την αντιμετώπιση των θεμελιωδών προβλημάτων στο TCP και τις αντίστοιχες λύσεις.

Ένας από τους γνωστούς λόγους για την υποβάθμιση των επιδόσεων TCP είναι ότι το κλασικό TCP δεν είναι σε θέση να κάνει διάκριση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και μη των λαθών-απωλειών (congestion losses). Ως αποτέλεσμα, όταν συμβαίνει μη κυκλοφοριακή συμφόρηση απωλειών, η απόδοση του δικτύου πέφτει γρήγορα. Αποτυχία σύνδεσης διασπά επίσης την απόδοση του TCP. Αποτυχίες σύνδεσης μπορεί να συμβαίνουν συχνά σε κινητά ad hoc δίκτυα από όλους τους κόμβους που είναι κινητοί. Στην περίπτωση των WMNs, η αποτυχία σύνδεσης δεν είναι τόσο κρίσιμη, όπως στα κινητά ad hoc δίκτυα, επειδή η υποδομή ενός WMN αποφεύγει το θέμα αποτυχίας σύνδεσης κόμβου (single-point-of failure).

Ωστόσο, λόγω των ασύρματων καναλιών και της κινητικότητας των πελατών πλέγματος, συχνό φαινόμενο είναι η αδυναμία σύνδεσης. Για την ενίσχυση απόδοσης του TCP, τα δυο αυτά φαινόμενα, απώλειες λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης και

αποτυχία συνδέσμου πρέπει να διαφοροποιούνται. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός αλγορίθμου ELFN [52] - (Explicit Link failure notification).

Το TCP εξαρτάται δραματικά από τις γνωστοποιήσεις (ACKs - Acknowledgements), με αποτέλεσμα οι επιδόσεις του να μπορούν να επηρεασθούν σημαντικά από την ασυμμετρία του δικτύου. Στα WMNs, τα TCP δεδομένα και τα TCP ACK πακέτα μπορεί να λάβουν διαφορετικά μονοπάτια, και έτσι βιώνουν κατά την διάρκεια αποστολής - λήψης δεδομένων διαφορετικό ρυθμό απώλειας πακέτων, διαφορετική καθυστέρηση και διαφορετικό εύρος ζώνης. Ωστόσο, ακόμη και αν το ίδιο μονοπάτι χρησιμοποιηθεί, το πρόβλημα ασυμμετρίας του δικτύου υφίσταται και πάλι, επειδή η κατάσταση των καναλιών και το εύρος ζώνης στο μονοπάτι κυμαίνεται από το χρόνο. Κατά συνέπεια, το TCP έχει κακή απόδοση για τα ασύρματα δίκτυα πολλών βημάτων multihop ad hoc. Για την επίλυση του προβλήματος της ασυμμετρίας του δικτύου, έχουν προταθεί συστήματα όπως ACK filtering [53] και ACK congestion control [53].

Στα WMNs, οι δρομολογητές πλέγματος και οι πελάτες διασυνδέονται όπως σε ένα δίκτυο ad hoc, έτσι δυναμική αλλαγή της δρομολόγησης είναι υπαρκτή. Λαμβάνοντας υπόψη την κινητικότητα, τις μεταβολές της ποιότητας σύνδεσης, το ωφέλιμο φορτίο, η αλλαγή (δρομολόγησης) μπορεί να είναι συχνή και μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διακυμάνσεις του RTT. Αυτό θα υποβαθμίσει την απόδοση του TCP, γιατί η κανονική λειτουργία του TCP βασίζεται σε μια ομαλή μέτρηση του RTT.

### **3.4.2 Εντελώς νέα πρωτόκολλα μεταφοράς**

Όπως αναφέρθηκε πριν, πολλά προβλήματα υπάρχουν στο TCP. Ως εκ τούτου, ορισμένοι ερευνητές έχουν αρχίσει την ανάπτυξη εντελώς νέων πρωτοκόλλων μεταφοράς για ad hoc δίκτυα.

Ένα τέτοιο πρωτόκολλο είναι το ATP [54] (Ad-hoc Transport Protocol) και προτείνεται για τα ad hoc δίκτυα. Χρησιμοποιώντας μια εντελώς νέα σειρά μηχανισμών για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, το ATP επιτυγχάνει πολύ καλύτερη απόδοση (π.χ., στην καθυστέρηση, στη διακίνηση και τη δικαιοσύνη) από τις παραλλαγές του κλασσικού TCP που προαναφέραμε. Παρά τα πλεονεκτήματα όμως, ένα εντελώς νέο πρωτόκολλο μεταφοράς δεν ευνοείται από τα WMNs λόγω του ζητήματος της συμβατότητας. Το ATP υποθέτει ότι το ασύρματο δίκτυο μπορεί να είναι αυτόνομο.



Ενώ αυτό μπορεί να ισχύει για κινητά ad hoc δίκτυα, είναι άκυρο για τα WMNs, αφού κάθε WMN θα ενσωματωθεί με το Internet και πολλά άλλα ασύρματα δίκτυα.

### **3.4.3 Πρωτόκολλα για παράδοση σε πραγματικό χρόνο**

Για την υποστήριξη ολοκληρωμένης (end-to-end) παράδοσης σε πραγματικό χρόνο κυκλοφορίας πακέτων-κίνησης, το UDP - (User Datagram Protocol) [55] αντί του TCP συνήθως εφαρμόζεται ως πρωτόκολλο μεταφοράς. Ωστόσο, ο απλός μηχανισμός UDP δεν μπορεί να εγγυηθεί πραγματικό χρόνο παράδοσης. Έτσι, πρόσθετα πρωτόκολλα, όπως το πρωτόκολλο RTP - (Real-time Transport Protocol) [56] και το RTCP - (Real-time Transport Control Protocol) [56] απαιτούνται για την συνεργασία με το UDP.

### **ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

Προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις λόγω ασυμμετρίας του δικτύου στην απόδοση του TCP, μια αποτελεσματική λύση είναι ο cross-layer σχεδιασμός, δεδομένου ότι όλα τα προβλήματα της υποβάθμισης απόδοσης του TCP στην πραγματικότητα συνδέονται με τα πρωτόκολλα στα χαμηλότερα στρώματα. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι αυτό που καθορίζει τη διαδρομή και για τα δύο στοιχεία, δηλαδή τα TCP και ACK πακέτα. Για να αποφευχθεί η ασυμμετρία μεταξύ των TCP δεδομένων και ACK πακέτων, είναι επιθυμητή για ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης η επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού τόσο για τα δεδομένα όσο και για ACK πακέτα.

Γνωρίζουμε επίσης ότι η απόδοση του στρώματος ζεύξης (link layer) έχει άμεσες επιπτώσεις στο ποσοστό απώλειας πακέτων. Έτσι, προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα ασυμμετρίας του δικτύου, το στρώμα MAC ίσως χρειαστεί να διαχειριστεί με διαφορετικό τρόπο τα TCP δεδομένα και τα ACK πακέτα.

Για τα WMNs, είναι κοινό ότι ένας κόμβος του δικτύου θα επικοινωνεί με άλλους κόμβους του δικτύου εκτός του πλέγματος των δικτύων, όπως το Internet καθώς και με διάφορων ειδών ασύρματα δίκτυα όπως το IEEE 802.11, 802.16, 802.15, κλπ. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών μπορεί να είναι πολύ ετερογενή λόγω διαφορετικότητας τους. Αυτή η ανομοιογένεια καθιστά την μέθοδο TCP αναποτελεσματική για όλα τα δίκτυα. Από την άλλη εφαρμόζοντας διαφορετικές



τεχνικές TCP σε αυτά τα δίκτυα θα κάνει την ένταξη τους πιο περίπλοκη και δαπανηρή. Κατά συνέπεια, μια προσαρμοστική μέθοδος TCP είναι η πλέον υποσχόμενη λύση για τα WMNs. Μια πιθανή λύση είναι το ολοκαίνουργιο RCP - Rate Control Protocol [57] προσαρμοσμένο στις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες ενός WMN.

### 3.5 APPLICATION LAYER

Οι εφαρμογές καθορίζουν την αναγκαιότητα για την ανάπτυξη των WMNs. Έτσι, είναι πάντα ένα βασικό βήμα για να μάθουμε τι υπάρχουσες εφαρμογές μπορούν να υποστηριχθούν με WMNs και ποιες νέες εφαρμογές θα πρέπει να αναπτυχθούν.

#### Εφαρμογές που υποστηρίζονται από WMNs

Επειδή πολλές εφαρμογές μπορεί να υποστηριχθούν από WMNs, είναι ανέφικτο να έχουμε μια πλήρη λίστα αυτών. Παρακάτω, ανάλογα με τις λειτουργίες για τα WMNs, έχουμε ταξινομήσει τις εφαρμογές αυτών σε διάφορες κατηγορίες:

- **Πρόσβαση στο Internet.** Διάφορες εφαρμογές του Διαδικτύου παρέχουν σημαντική και έγκαιρη πληροφόρηση για τους ανθρώπους, κάνουν τη ζωή τους πιο άνετη και αυξάνουν την αποδοτικότητα της εργασίας και την παραγωγικότητά τους. Για παράδειγμα, το e-mail, μηχανή αναζήτησης όπως το Google, on-line ενέργειες, όπως το eBay, on-line αγορά, συζήτηση-chatting, το video streaming, κλπ., έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Έτσι, οι άνθρωποι ενδιαφέρονται να εγγραφούν στο Διαδίκτυο. Σε ένα σπίτι ή ένα μικρό / μέσο επιχειρηματικό περιβάλλον, το πιο δημοφιλές δίκτυο πρόσβασης εξακολουθεί να είναι μέσω DSL ή μέσω καλωδιακού μόντεμ, μαζί με τα σημεία πρόσβασης IEEE 802.11. Ωστόσο, σε σύγκριση με την προσέγγιση αυτή, τα WMNs έχουν πολλά πλεονεκτήματα: χαμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη ταχύτητα και πιο εύκολη εγκατάσταση.

- **Κατανεμημένη αποθήκευση πληροφοριών και κοινή χρήση μέσα σε WMNs.** Για αυτόν τον τύπο εφαρμογών, προϋπάρχουσα πρόσβαση στο Διαδίκτυο δεν είναι απαραίτητη. Οι χρήστες αυτών των εφαρμογών επικοινωνούν μέσω των WMNs. Ένας χρήστης μπορεί να θέλει να αποθηκεύσει μεγάλο όγκο δεδομένων σε δίσκους που ανήκουν σε άλλους χρήστες, να κατεβάσει αρχεία από άλλους χρήστες. Αυτό με βάση το μηχανισμό δικτύωσης peer-to-peer και την αναζήτηση / ανάκτηση πληροφοριών που βρίσκονται σε κατανεμημένους servers βάσεων δεδομένων γίνεται εφικτό. Οι χρήστες μέσα στα WMNs μπορούν επίσης αν θελήσουν να κάνουν chat, να μιλήσουν με τα τηλέφωνα βίντεο και να παίξουν παιχνίδια με τον άλλον. Για να έχουν οι εφαρμογές

αυτές λειτουργία σε τελικούς χρήστες, ορισμένα πρωτόκολλα πρέπει να υπάρχουν στο επίπεδο εφαρμογής.

• **Ανταλλαγή πληροφοριών σε πολλαπλά ασύρματα δίκτυα.** Και πάλι, αυτό το είδος των εφαρμογών δεν χρειάζεται προϋπάρχουσα πρόσβαση στο Internet. Για παράδειγμα, όταν ένα κινητό τηλέφωνο συνομιλεί σε δίκτυο Wi-Fi μέσω WMNs, το Internet δεν είναι απαραίτητο.

### ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

1. Υλοποίηση εφαρμογών του Διαδικτύου να εργάζονται υπό την αρχιτεκτονική του WMN.

Λόγω της ad hoc και multi-hop ασύρματης αρχιτεκτονικής του δικτύου του WMN, δεν υπάρχει τρόπος για πρωτόκολλα στα κάτω στρώματα να παρέχουν τέλεια υποστήριξη για το επίπεδο εφαρμογών. Για παράδειγμα, όπως γίνεται αντιληπτό από το επίπεδο εφαρμογών, η απώλεια πακέτων δεν μπορεί πάντα να είναι μηδέν, η καθυστέρηση πακέτου μπορεί να είναι μεταβλητή με ένα μεγάλο jitter, κλπ. Τέτοια προβλήματα μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα σε ορισμένες εφαρμογές ενώ λειτουργούν ομαλά σε ένα ενσύρματο δίκτυο. Ως εκ τούτου, οι αλγόριθμοι στο επίπεδο εφαρμογής πρέπει να αναπτυχθούν για να βελτιωθούν οι επιδόσεις των εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο διαμέσου του Internet πάνω στα WMNs.

2. Μελέτη πρωτοκόλλων εφαρμογής για διανομή ανταλλαγής πληροφοριών σε WMNs. Για παράδειγμα, για ενσύρματα δίκτυα, τα πρωτόκολλα εφαρμογής είναι διαθέσιμα για peer-to-peer ανταλλαγή πληροφοριών, on-line gaming, κ.λπ. Ωστόσο, τα WMNs έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα ενσύρματα δίκτυα. Αυτά τα πρωτόκολλα πρέπει να δοκιμαστούν πάνω στα WMNs. Σε περίπτωση που η απάντηση είναι αρνητική, τα νέα πρωτόκολλα εφαρμογής πρέπει να αναπτυχθούν.

3. Καινοτόμες εφαρμογές που χρησιμοποιούν τα πλεονεκτήματα της WMN δικτύωσης. Η αίτηση αυτή μπορεί να φέρει τεράστια οφέλη για τους πελάτες. Επιπλέον, οι λειτουργίες τους δεν μπορεί να επιτευχθούν με άλλα υπάρχοντα δίκτυα. Με τον τρόπο αυτό, ένα WMN θα είναι σε θέση να είναι μια μοναδική λύση δικτύωσης και όχι μόνο μια άλλη επιλογή της ασύρματης δικτύωσης. Για παράδειγμα, αν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ενσωματωθούν με WMN, εργαλεία λογισμικού μπορούν πραγματικά να αναπτυχθούν για τους χρήστες σε περιβάλλον οικιακού δικτύου για την



απομακρυσμένη παρακολούθηση, ρύθμιση και έλεγχο όλων των ηλεκτρονικών συσκευών, γεγονός που καθιστά το σενάριο οικιακού αυτοματισμού να γίνει πραγματικότητα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας σημαντικός τομέας με πολλές εκφάνσεις είναι και η διαχείριση/λειτουργία του ασύρματου πολυπλεγματού δικτύου (WMN).

Η αρχή είναι παρόμοια με τον τρόπο που τα πακέτα ταξιδεύουν σε όλο το ενσύρματο Internet-τα δεδομένα θα προωθηθούν από τη μία συσκευή στην άλλη μέχρι να φτάσουν στον προορισμό τους. Δυναμικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που εφαρμόζονται σε κάθε συσκευή επιτρέπουν να συμβεί αυτό. Για την εφαρμογή των εν λόγω δυναμικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης, κάθε συσκευή θα πρέπει να μεταδίδει πληροφορίες δρομολόγησης στις άλλες συσκευές του δικτύου. Κάθε συσκευή καθορίζει στη συνέχεια τι να κάνει με τα δεδομένα που λαμβάνει - είτε να τα μεταβιβάσει στην επόμενη συσκευή ή να τα κρατήσει, ανάλογα με το πρωτόκολλο.

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που χρησιμοποιείται θα πρέπει να προσπαθεί να εξασφαλίζει πάντοτε ότι τα δεδομένα ακολουθούν την πλέον κατάλληλη (πιο γρήγορη) διαδρομή προς τον προορισμό τους.

Στη συνέχεια παραθέτουμε τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα διαχείρισης του δικτύου μας.

#### 4.1 Διαχείριση της Κινητικότητας (Mobility Management)

Η διαχείριση κινητικότητας αποτελείται από δύο σημαντικά καθήκοντα: την γεωγραφική θέση και τη διαχείριση διακοπτικής ελεγχόδοτης - handoff. Η διαχείριση τοποθεσίας χειρίζεται την καταχώρηση της τοποθεσίας και την παράδοση των κλήσεων, ενώ η διαχείριση handoff είναι υπεύθυνη για την έναρξη handoff, νέας γενιάς σύνδεση και των δεδομένων ελέγχου ροής για handoff κλήσεων.

Τα συστήματα διαχείρισης της κινητικότητας που αναπτύχθηκαν για κυψελοειδή [cellular] ή κινητά δίκτυα IP θα μπορούσε να είναι χρήσιμα για τα WMNs. Ωστόσο, το συγκεντρωτικό καθεστώς είναι γενικά μη εφαρμόσιμο για WMNs που βασίζονται σε κατανεμημένη και ad hoc αρχιτεκτονική. Έτσι, η κατανεμημένη διαχείριση της κινητικότητας είναι η προτιμώμενη λύση για WMNs.

Τα συστήματα διαχείρισης της κινητικότητας των ad hoc δικτύων κυρίως αποτελούνται από δύο τύπους: την διανομή και την ιεραρχική διαχείριση της κινητικότητας. Αυτά τα συστήματα δεν μπορούν να εφαρμοστούν επαρκώς για τα WMNs λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών των WMNs.

Πιο συγκεκριμένα, η ραχοκοκαλιά της WMN δικτύωσης δεν έχει υψηλή κινητικότητα, όπως το κινητό στους κόμβους σε ad hoc δίκτυα, ωστόσο οι συνδέσεις μεταξύ όλων των δρομολογητών πλέγματος είναι ασύρματες. Στους πελάτες πλέγματος ενδέχεται διαρκώς η κίνηση να περιφέρεται.

Ως αποτέλεσμα, τα νέα προγράμματα διαχείρισης της κινητικότητας πρέπει να περιλαμβάνουν υπηρεσίες τοποθεσίας (Location service). Οι πληροφορίες θέσης μπορούν να βελτιώσουν τις επιδόσεις του MAC και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Επιπρόσθετα μια τέτοια λειτουργία θα βοηθήσει την ανάπτυξη των ελπιδοφόρων εφαρμογών που σχετίζονται με την τοποθεσία.

#### **4.2 Διαχείριση της Ισχύος (Power Management)**

Ο στόχος της διαχείρισης της ισχύος για τα WMNs ποικίλλει. Συνήθως, οι δρομολογητές πλέγματος δεν έχουν περιορισμό στην κατανάλωση ενέργειας, ωστόσο η διαχείριση της ενέργειας έχει ως στόχο να ελέγχει τη συνδεσιμότητα, τις παρεμβολές, το φάσμα χωρικής-επαναχρησιμοποίησης και την τοπολογία του δικτύου. Εάν ένα μόνο κανάλι χρησιμοποιείται σε κάθε κόμβο του δικτύου, οι παρεμβολές μεταξύ των κόμβων επηρεάζουν άμεσα τον συντελεστή χωρικής-επαναχρησιμοποίησης. Μείωση στο επίπεδο ισχύος μειώνει την παρεμβολή και αυξάνει το φάσμα χωρικής-επαναχρησιμοποίησης (παράγοντας επαναχρησιμοποίησης).

Ωστόσο, κρυφοί κόμβοι μπορεί να προκαλέσουν υποβάθμιση των επιδόσεων σε επίπεδο MAC. Για τον λόγο αυτό τα θέματα διαχείρισης ισχύος είναι συνδεδεμένα με τα πρωτόκολλα MAC Layer.

Επιπλέον, δεδομένου ότι συνδεσιμότητα επηρεάζει την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, η ορθή διαχείριση ενέργειας είναι επίσης ζωτικής σημασίας για το δίκτυο (Network Layer).



### 4.3 Εποπτεία Δικτύου (Network Monitoring)

Πολλές λειτουργίες εκτελούνται σε ένα πρωτόκολλο διαχείρισης δικτύου. Τα στατιστικά στοιχεία των MIBs - Management Information Bases (διαχείριση της βάσης πληροφοριών) των κόμβων του πολυπλεγματού δικτύου, ειδικά οι δρομολογητές, πρέπει να αναφέρονται σε έναν ή περισσότερους servers, ώστε να παρακολουθούν-αξιολογούν συνεχώς την απόδοση του δικτύου. Με την βοήθεια αλγορίθμων επεξεργασίας δεδομένων που επιτελείται στο λογισμικό του διακομιστή, σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία μπορεί να καθοριστεί πιθανή ανωμαλία στο δίκτυο. Σε μια τέτοια περίπτωση (ανωμαλίας), ο διακομιστής δεν λαμβάνει απαντήσεις, ενεργοποιώντας ένα συναγερμό (alarm). Με βάση τις στατιστικές πληροφορίες που συλλέγονται από στις MIBs, αλγόριθμοι επεξεργασίας δεδομένων μπορούν να ολοκληρώσουν και πολλές άλλες λειτουργίες όπως η παρακολούθηση της τοπολογίας του δικτύου (network monitoring).

Η τοπολογία του δικτύου WMN δεν είναι πάντα σταθερή, λόγω της κινητικότητας των χρηστών ή λόγω ανεπάρκειας δρομολόγησης σε μια πιθανή δυσλειτουργία ενός ή και περισσότερων δρομολογητών. Έτσι, η παρακολούθηση της τοπολογίας του δικτύου είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό για τα WMNs.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 5.1 Ο ρόλος και η σημασία της ασφάλειας στα WMN δίκτυα

Η ασφάλεια στα ασύρματα δίκτυα, είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της ευρωστίας των δικτύων και της λειτουργίας τους. Ένα δίκτυο, εκτός από τις λειτουργίες της δημιουργίας και μετάδοσης μηνυμάτων, για να μπορέσει να εκτελέσει την αποστολή του ομαλά, πρέπει να μπορεί να είναι ασφαλές κατά την διάρκεια της λειτουργίας του. Και όταν λέμε ασφαλές, πρέπει να μπορεί κάθε κομμάτι του δικτύου να στέλνει και να δέχεται ασφαλή μηνύματα. Η ασφάλεια στα WMN δίκτυα είναι δύσκολο να επιτευχθεί, λόγω της αδυναμίας των ασύρματων ζεύξεων, της περιορισμένης φυσικής προστασίας των κόμβων του δικτύου, της δυναμικά μεταβαλλόμενης τοπολογίας, της έλλειψης μιας αρχής πιστοποίησης και της έλλειψης ενός κεντρικού σημείου ελέγχου και διαχείρισης. Για να μπορέσουμε να εξασφαλίσουμε ότι ένα πολυπλεγματο δίκτυο είναι ασφαλές, πρέπει να διασφαλίσουμε ότι το κάθε κομμάτι που αποτελεί το δίκτυο αυτό είναι ασφαλές.

Όπως προαναφέραμε, τα WMN δίκτυα αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων. Η ασφάλεια του δικτύου επιβάλλει να είναι κάθε κόμβος ασφαλής ώστε να μπορεί να ανταλλάσει μηνύματα με τους γειτονικούς του κόμβους και με τον σταθμό βάσης.

#### 5.2 Απαιτήσεις ασφαλείας σε δίκτυο WMN

Η ασφάλεια είναι πάντα ένα κρίσιμο βήμα για την ανάπτυξη και διαχείριση δικτύων (LANs, WLANs, WMNs). Για κάθε εφαρμογή (και όχι απαραίτητως στα WMNs), οι ακόλουθοι γενικοί στόχοι είναι επιθυμητοί για την εξασφάλιση της ασφάλειας.

**1.Εμπιστευτικότητα ή προστασίας προσωπικών δεδομένων:** Η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών πρέπει να πραγματοποιείται κατά τρόπο ώστε οι πληροφορίες να μην μπορούν να αποκαλυφθούν σε οποιαδήποτε ωτακουστές.

**2.Ακεραιότητα:** Τα μονοπάτια μετάδοσης πρέπει να προστατεύονται για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα μετάδοσης και αναπαραγωγής των μηνυμάτων. Δηλαδή προϋποτίθεται:

- Πιστοποίηση επικύρωσης ότι το μήνυμα δρομολόγησης αποστέλλεται από ένα θεμιτό κόμβο.

- Έλεγχος της ακεραιότητας του ληφθέντος μηνύματος δρομολόγησης για την επικύρωση ότι δεν έχει τροποποιηθεί από κάποιο εισβολέα.

Τέτοιου είδους μηχανισμοί συχνά επιτυγχάνονται με τη χρησιμοποίηση κρυπτογραφικών λύσεων, Asymmetric/Symmetric Cryptography Approach [58]

- Ασφαλές πρωτόκολλο δρομολόγησης

Η δρομολόγηση και η προώθηση των δεδομένων είναι βασικές λειτουργίες ενός δικτύου για την επικοινωνία. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα όπου η λειτουργία της δρομολόγησης εκτελείται από συγκεκριμένους κόμβους και δρομολογητές, στα εξεταζόμενα δίκτυα η δρομολόγηση εκτελείται από όλους τους κόμβους.

**3.Διαθεσιμότητα:** Οι εφαρμογές θα πρέπει να παρέχουν αξιόπιστη παράδοση των μηνυμάτων σε περίπτωση Denial of Service (DoS).

Οι επιθέσεις Denial of Service (DoS) μπορεί να μειώσουν την διαθεσιμότητα των πόρων και να οδηγήσουν σε μαζική διακοπή παροχής υπηρεσίας. Μια ισχυρή εφαρμογή WMN θα πρέπει να είναι ανθεκτική στις επιθέσεις DoS και να είναι σε θέση να υπερασπιστεί έναντι αυτών των επιθέσεων που ξεκίνησε είτε από τις συσκευές νόμιμων χρηστών ή μη. DoS επιθέσεις θα μπορούσαν να συμβούν σε όλα τα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλου από το φυσικό μέχρι το επίπεδο εφαρμογών. Διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στα διάφορα στρώματα του πρωτοκόλλου. Για παράδειγμα, στο φυσικό επίπεδο, η πιο κοινή άμυνα ενάντια DoS (π.χ., εμπλοκές) είναι η χρήση διασκορπισμένου φάσματος (spread spectrum). Στο MAC επίπεδο, ορισμένα ειδικά μέτρα, όπως περιορισμός στο ρυθμό και το λάθος κώδικα διόρθωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπερασπιστεί επιθέσεις DoS. Αν και τα περισσότερα από τα συστήματα δρομολόγησης σε WMNs υιοθετήθηκαν από τα ad hoc δίκτυα, τα χαρακτηριστικά του WMN, ειδικά η δρομολόγηση πολλών βημάτων (multihop), θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τους μηχανισμούς άμυνας στο επίπεδο δικτύου. Ειδικότερα, ένα κακώς σχεδιασμένο multihop δρομολόγησης σύστημα μπορεί να εισάγει λανθασμένη έως και καθόλου κυκλοφορία δεδομένων, η οποία οδηγεί ακόμη



και σε διακοπή των υπηρεσιών (DoS) για κάποιο τμήμα δικτύου που βρίσκεται κοντά στο δίκτυο κορμού.

Ακόμα κι αν δεν υπάρχει καθολικός τρόπος για την αντιμετώπιση ενάντια σε επιθέσεις DoS, ένα συστηματικό πλαίσιο που μπορεί να εξετάσει διεξοδικά όλα αυτά τα ζητήματα στην αρχική φάση του σχεδιασμού του δικτύου θα ήταν πιο αποτελεσματικό.

**4.Authentication:** Όταν ένας χρήστης στέλνει μηνύματα, πρέπει να υπάρχουν κάποιες διαδικασίες για την αναγνώριση του χρήστη να διασφαλίσει τα μηνύματα που πραγματικά απέστειλε ο ίδιος διαχωρίζοντας τα από άλλα μηνύματα τα οποία έχουν υποστεί τροποποίηση. Για τον έλεγχο ταυτότητας χρησιμοποιούμε δυο μηχανισμούς, PKI-(Public key infrastructure) [59] και CA-( certification authority) [60].

**5.Εξουσιοδότηση:** Πριν από την έγκριση κάθε χρήστη να εκτελέσει κάποιες εργασίες, θα πρέπει να υπάρχει μηχανισμός για την εξασφάλιση της δικαιοδοσίας και της νομιμότητας αυτού.

**6.Λογιστική:** Όταν ένας χρήστης χρησιμοποιεί ορισμένες υπηρεσίες, κάποια διαδικασία θα πρέπει να είναι σε θέση να μετρήσει τους πόρους που καταναλώνει ο χρήστης για τα στοιχεία χρέωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### CROSS LAYER DESIGN

Η μεθοδολογία του στρωματοειδούς σχεδιασμού πρωτοκόλλων δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι οδηγεί σε μια βέλτιστη λύση. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στα WMNs. Το φυσικό κανάλι στο WMN είναι μεταβλητό από την άποψη της χωρητικότητας, του ποσοστού σφάλματος (bit error rate), κλπ. Αν και διαφορετική κωδικοποίηση, διαμόρφωση και συστήματα ελέγχου σφαλμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης του φυσικού καναλιού, δεν υπάρχει τρόπος να εγγυηθεί σταθερή χωρητικότητα, μηδενικό συντελεστή απώλεια πακέτων, ή αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Προκειμένου να παρασχεθεί ικανοποιητική απόδοση του δικτύου, πρωτόκολλα επιπέδου MAC, δρομολόγησης και μεταφοράς πρέπει να συνεργαστούν διαδραστικά με το φυσικό επίπεδο.

Στα WMNs, λόγω της ad hoc φύσης τους, η τοπολογία του δικτύου συνεχώς υπόκεινται αλλαγές που οφείλονται στην κινητικότητα των χρηστών και σε απώλειες σύνδεσης. Μια τέτοια δυναμική τοπολογία δικτύου έχει επιπτώσεις σε πολλαπλά στρώματα πρωτοκόλλου.

Έτσι, προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου, ο cross-layer σχεδιασμός είναι απαραίτητος και μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Η πρώτη προσέγγιση είναι η βελτίωση της απόδοσης ενός στρώματος πρωτοκόλλου λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους σε άλλα στρώματα πρωτοκόλλου. Συνήθως, οι παράμετροι στα κάτω στρώματα πρωτοκόλλου αναφέρονται στα υψηλότερα επίπεδα. Για παράδειγμα, το ποσοστό απώλειας πακέτων στο MAC στρώμα μπορεί να αναφερθεί και στο στρώμα των μεταφορών έτσι ώστε ένα TCP πρωτόκολλο να είναι σε θέση να διαφοροποιήσει τη συμφόρηση από την απώλεια πακέτων. Ως άλλο παράδειγμα, το φυσικό επίπεδο μπορεί να αναφέρει την ποιότητα σύνδεσης σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης ως πρόσθετη απόδοση μέτρησης για αλγορίθμους δρομολόγησης.

Η δεύτερη προσέγγιση του σχεδιασμού cross-layer είναι η συγχώνευση των διαφόρων πρωτοκόλλων σε ένα στοιχείο.

Για παράδειγμα, σε ad hoc δίκτυα, MAC και πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να συνδυάζονται σε ένα πρωτόκολλο προκειμένου να εξετάσουν προσεκτικά τις μεταξή

τους αλληλεπιδράσεις. Η πρώτη προσέγγιση διατηρεί τη διαφάνεια μεταξύ των στρωμάτων του πρωτοκόλλου, ενώ η δεύτερη προσέγγιση μπορεί να επιτύχει πολύ καλύτερη απόδοση με τη στενότερη συνεργασία μεταξύ των πρωτοκόλλων.

Ορισμένα θέματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διεξαγωγή cross-layer πρωτόκολλου σχεδιασμού: cross-layer σχέδια εγκυμονούν κινδύνους λόγω της σύπτηξής των διαστρωμάτων, της ασυμβατότητας με τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα, αναμενόμενες απρόβλεπτες επιπτώσεις στο μελλοντικό σχεδιασμό του δικτύου, και δυσκολία στην συντήρηση και διαχείριση του.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Παρά το γεγονός ότι ένα WMN μπορεί να οικοδομηθεί με βάση τις υπάρχουσες τεχνολογίες, επιτόπιες δοκιμές και πειράματα με τα υπάρχοντα WMNs αποδεικνύουν ότι η απόδοση των WMNs εξακολουθεί να είναι πολύ κατώτερη των προσδοκιών. Όπως αναφέραμε, παραμένουν πολλά προβλήματα στο επίπεδο της έρευνας. Μεταξύ αυτών, το πιο σημαντικό και επείγον από αυτά είναι η δυνατότητα κλιμάκωσης-επέκτασης και η ασφάλεια.

**Επεκτασιμότητα.** Με βάση τα υπάρχοντα MAC, δρομολόγησης, και μεταφοράς πρωτοκόλλα, η απόδοση του δικτύου δεν είναι επεκτάσιμη είτε με τον αριθμό των κόμβων ή τον αριθμό μεταπηδήσεων (hops) στο δίκτυο. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μετριαστεί με την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου μέσω της χρησιμοποίησης πολλαπλών καναλιών / ραδιοσυστημάτων ανά κόμβο ή την ανάπτυξη ασύρματων ραδιοσυστημάτων με υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις δεν βελτιώνουν πραγματικά την επεκτασιμότητα του WMN, γιατί η αξιοποίηση των πόρων στην πραγματικότητα δεν αξιοποιείται βέλτιστα. Ως εκ τούτου, προκειμένου να επιτευχθεί κλιμάκωση, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων MAC, δρομολόγησης και μεταφοράς.

**Ασφάλεια.** Τα WMNs είναι ευάλωτα σε επιθέσεις ασφαλείας σε διάφορα στρώματα του OSI. Η σημερινή προσέγγιση της ασφάλειας μπορεί να είναι αποτελεσματική σε μια συγκεκριμένη επίθεση σε ένα ειδικό στρώμα πρωτοκόλλου. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για ένα ολοκληρωμένο μηχανισμό για την πρόληψη και αντιμετώπιση επιθέσεων σε όλα τα στρώματα του πρωτοκόλλου. Επιπλέον, η ικανότητα αυτο-οργάνωσης και αυτο-ρύθμισης είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό για τα WMNs. Απαιτεί τα πρωτόκολλα στα WMNs να είναι δυναμικά. Οι τρέχουσες ρυθμίσεις για τα WMNs μπορούν μόνο εν μέρει να καλύψουν την υλοποίηση αυτού του στόχου. Επιπλέον, τα WMNs εξακολουθούν να έχουν πολύ περιορισμένες δυνατότητες ενσωμάτωσης ετερογενών ασύρματων δικτύων, λόγω της δυσκολίας κατασκευής πολλαπλών ασύρματων διεπαφών με την αντίστοιχη πύλη / γέφυρα να λειτουργεί στον ίδιο δρομολογητή.

Εν κατακλείδι, παρόλα τα ανοιχτά θέματα που εκκρεμούν για τα WMNs πιστεύουμε ότι είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και κάτω από τις κατάλληλες μελέτες και

έρευνες που πρέπει να γίνουν, είναι σε θέση να καταστούν η νέα γενιά ασύρματης δικτύωσης.

## **ΑΡΧΗΤΙΚΟΛΟΓΕΙΑ**

<b>WMN</b>	Wireless Mesh Network
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant
<b>MD5</b>	Message-Digest Algorithm
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>SIR</b>	Signal to Interference Ratio
<b>CTS</b>	Clear to Send
<b>RTC</b>	Request to Send
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>ACK</b>	Acknowledgement



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

- [1] 802.11 [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)
- [2] 802.15 [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15)
- [3] 806.16 [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.16](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network)
- [5] Sudip Misra, Subhas Chandra Misra, Isaac Woungang, Guide to Wireless Mesh Networks, ISBN: 978-1-84800-908-0
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/WiFi>
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDM>
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/802.15.4>
- [10] <http://rboutaba.cs.uwaterloo.ca/Papers/Journals/2009/Rami09-2.pdf>
- [11] <http://nms.csail.mit.edu/~sachin/papers/mixitsc08.pdf>
- [12] [http://nothingfornow.com/websites/14\\_Mesh\\_Networks\\_v3/pages/products/mea\\_qdma\\_product\\_line.htm](http://nothingfornow.com/websites/14_Mesh_Networks_v3/pages/products/mea_qdma_product_line.htm)
- [13] <http://www.firetide.com>
- [14] [http://www.motorola.com/Business/XL-EN/Product+Lines/Motorola+Wireless+Broadband/MeshManager+EMS++Mesh+Network+Element+Management+System\\_\\_](http://www.motorola.com/Business/XL-EN/Product+Lines/Motorola+Wireless+Broadband/MeshManager+EMS++Mesh+Network+Element+Management+System__)  
Loc:XL-EN
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden\\_node\\_problem](http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_node_problem)
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Exposed\\_node\\_problem](http://en.wikipedia.org/wiki/Exposed_node_problem)
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/MD5>
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/4G>
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Grid\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Grid_network)
- [20] [http://en.wikipedia.org/wiki/P2P\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/P2P_network)
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Ad-hoc\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Ad-hoc_network)
- [22] I. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless Mesh Networks: A Survey", Computer Networks, vol. 47, no. 47, 2005, pp. 445–87.
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Directional\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Directional_antenna)
- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [25] [http://en.wikipedia.org/wiki/Delay\\_jitter](http://en.wikipedia.org/wiki/Delay_jitter)
- [26] [http://en.wikipedia.org/wiki/Packet\\_loss](http://en.wikipedia.org/wiki/Packet_loss)
- [27] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Self-form-self-heal.gif>

- [28] [http://en.wikipedia.org/wiki/Fast\\_fading](http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_fading)
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-wideband>
- [30] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fading>
- [31] [http://en.wikipedia.org/wiki/Delay\\_spread](http://en.wikipedia.org/wiki/Delay_spread)
- [32] [http://en.wikipedia.org/wiki/Co-channel\\_interference](http://en.wikipedia.org/wiki/Co-channel_interference)
- [33] [http://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined\\_radio](http://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio)
- [34] L. Li, J.Y. Halpern, P. Bahl, Y-M. Wang, R. Wattenhofer, A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 13, issue 1, pp. 147-159, February 2005.
- [35] D.N.C. Tse, M. Grossglauser, Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 10, issue 4, pp.477-486, 2002.
- [36] E. Royer, S. Lee and C. Perkins, The Effects of MAC Protocols on Ad hoc Network Communications. Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Chicago, IL, September 2000.
- [37] [http://en.wikipedia.org/wiki/Carrier\\_sense\\_multiple\\_access\\_collision\\_avoidance](http://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_sense_multiple_access_collision_avoidance)
- [38] [http://uc.cse.cau.ac.kr/thesis/Directional\\_MAC\\_Paper/30.pdf](http://uc.cse.cau.ac.kr/thesis/Directional_MAC_Paper/30.pdf)
- [39] <http://pdos.csail.mit.edu/decouto/papers/jung02.pdf>
- [40] <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6089/1/ICECS06-Proc.pdf>
- [41] [http://en.wikipedia.org/wiki/Time\\_division\\_multiple\\_access](http://en.wikipedia.org/wiki/Time_division_multiple_access)
- [42] <http://en.wikipedia.org/wiki/CDMA>
- [43] [http://www.ent.mrt.ac.lk/TDMA\\_based\\_MAC\\_protocol](http://www.ent.mrt.ac.lk/TDMA_based_MAC_protocol)
- [44] <http://www.sigmobile.org/mobihoc/2003/papers/p153-muqattash.pdf>
- [45] <http://www.cs.sunysb.edu/~hgupta/ps/multi-mac.pdf>
- [46] [research.microsoft.com/pubs/73485/SSCH\\_mobicom.pdf](http://research.microsoft.com/pubs/73485/SSCH_mobicom.pdf)
- [47] <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/alecw/broadnets-2004.pdf>
- [48] <http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/fs-1037c.htm>
- [49] [research.microsoft.com/~padhye/publications/mobicom2004.ppt](http://research.microsoft.com/~padhye/publications/mobicom2004.ppt)
- [50] [www.site.uottawa.ca/~ivan/gredy%20emulation.pdf](http://www.site.uottawa.ca/~ivan/gredy%20emulation.pdf)
- [51] [http://docwiki.cisco.com/wiki/Routing\\_Information\\_Protocol](http://docwiki.cisco.com/wiki/Routing_Information_Protocol)
- [52] J.P. Monks, P. Sinha and V. Bharghavan, "Limitations of TCP-ELFN for ad hoc networks", Proc. of MoMuc 2000, Tokyo, Japan, October 2000.
- [53] [nms.lcs.mit.edu/talks/tcp-asym/tcp-asym.ppt](http://nms.lcs.mit.edu/talks/tcp-asym/tcp-asym.ppt)
- [54] [dl.acm.org/ft\\_gateway.cfm?id=778424&type=pdf](http://dl.acm.org/ft_gateway.cfm?id=778424&type=pdf)
- [55] <http://searchsoa.techtarget.com/definition/UDP>
- [56] <http://reeves.csc.ncsu.edu/Classes/csc573/rtp-rtcp.pdf>