



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Πληροφορική»

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

Τίτλος Διατριβής	<b>Επίδοση χρονοπρογραμματιστή σε WiMAX δίκτυα</b>
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	<b>Αναστάσιος Λάμπας</b>
Πατρώνυμο	<b>Δημήτριος</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΜΠΠΛ/ 07031</b>
Επιβλέπων	<b>Χρήστος Δουληγέρης, Καθηγητής</b>

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Η ασύρματη ευρυζωνικότητα</b>	<b>13</b>
2.1	Τεχνολογίες βασισμένες σε πρότυπα . . . . .	13
2.2	Σταθερό και κινητό WiMAX . . . . .	15
2.3	Σύγκριση του WiMAX με τα δίκτυα 3G . . . . .	16
2.4	Προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα . . . . .	17
2.4.1	Επιχειρηματικές προκλήσεις . . . . .	17
2.4.2	Ασύρματο κανάλι . . . . .	19
2.4.3	Φάσμα . . . . .	20
2.4.4	Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) . . . . .	21
2.4.5	Κινητικότητα/Φορητότητα . . . . .	22
2.4.6	Ασφάλεια . . . . .	23
2.4.7	Ασύρματο IP . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Επισκόπηση του WiMAX</b>	<b>25</b>
3.1	Υπόβαθρο του IEEE 802.16 και του WiMAX . . . . .	25
3.2	Εξέχοντα χαρακτηριστικά του WiMAX . . . . .	27
3.3	Φυσικό επίπεδο . . . . .	29
3.3.1	Τα βασικά του OFDM . . . . .	29
3.3.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του OFDM . . . . .	30
3.3.3	OFDM παράμετροι του WiMAX . . . . .	31
3.3.4	OFDMA . . . . .	32
3.3.5	Δομή χρονοσχισμής και πλαισίου . . . . .	32
3.3.6	Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο WiMAX . . . . .	34
3.3.7	Ρυθμοί δεδομένων στο φυσικό επίπεδο . . . . .	34
3.4	Επισκόπηση του επιπέδου MAC . . . . .	35
3.4.1	Μηχανισμοί πρόσβασης στο κανάλι . . . . .	36
3.4.2	Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) . . . . .	37
3.4.3	Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας . . . . .	39
3.4.4	Υποστήριξη κινητικότητας . . . . .	40
3.4.5	Λειτουργίες ασφάλειας . . . . .	41
3.4.6	Υπηρεσίες Multicast και Broadcast . . . . .	42
3.5	Εξελιγμένες δυνατότητες για ενίσχυση της απόδοσης . . . . .	42

3.5.1	Εξελιγμένα συστήματα κεραίας . . . . .	42
3.5.2	Υβριδικό ARQ . . . . .	43
3.5.3	Βελτιωμένη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων . . . . .	43
3.6	Αρχιτεκτονική δικτύου . . . . .	44
3.7	Επίδοση WiMAX . . . . .	45
3.7.1	Ρυθμαπόδοση (throughput) και φασματική αποδοτικότητα	45
3.7.2	Δείγματα σύνδεσης και κάλυψης . . . . .	46
<b>4</b>	<b>NS2 και NIST Module</b>	<b>49</b>
4.1	Το NS2 . . . . .	49
4.1.1	NAM . . . . .	49
4.1.2	Xgraph . . . . .	50
4.1.3	AWK . . . . .	50
4.2	WiMAX NIST Module . . . . .	50
4.2.1	Πακέτα CS . . . . .	50
4.2.2	Υποεπίπεδο MAC . . . . .	51
4.2.3	Επίπεδο PHY . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX</b>	<b>65</b>
5.1	Περιγραφή του σεναρίου . . . . .	65
5.1.1	Τοπολογία Δικτύου . . . . .	65
5.1.2	Κίνηση δεδομένων και παράμετροι . . . . .	66
5.2	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων . . . . .	66
5.2.1	1 Σταθμός Βάσης . . . . .	67
5.2.2	2 Σταθμοί Βάσης . . . . .	68
5.2.3	3 Σταθμοί Βάσης . . . . .	70
5.2.4	4 Σταθμοί Βάσης . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>77</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Παγκόσμια ανάπτυξη συνδρομών μεταξύ 1990-2006 για κινητή τηλεφωνία, χρήση Διαδικτύου και ευρυζωνική πρόσβαση [2, 3, 4]	10
2.1 Διάταξη σημείο-προς-πολλά-σημεία . . . . .	14
2.2 Εφαρμογές σημείο-προς-πολλά-σημεία . . . . .	15
3.1 Δείγμα της δομής του TDD πλαισίου για το κινητό WiMAX . . . .	33
3.2 Παραδείγματα διάφορων πλαισίων MPDU . . . . .	36
3.3 Μία απλή αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX βασισμένη στο IP . . .	45
4.1 Διάγραμμα κλάσης του ταξινομητή πακέτων . . . . .	52
4.2 Διάγραμμα ροής της κλάσης DestClassifier . . . . .	52
4.3 Διάγραμμα κλάσης του MAC 802.16 . . . . .	53
4.4 Διάγραμμα κλάσης της επικεφαλίδας του MAC . . . . .	54
4.5 Χρονική ακολουθία των μηνυμάτων DL-MAP και UL-MAP . . .	55
4.6 Διάγραμμα κλάσης του χρονοπρογραμματιστή πακέτων . . . .	56
4.7 Χρονοσχισμές ανταγωνισμού και αιτήσεις ανταγωνισμού . . . .	57
4.8 Είσοδος στο δίκτυο . . . . .	58
4.9 Διάγραμμα κλάσης του πλαισίου . . . . .	60
4.10 Επεξεργασία εισερχόμενου πακέτου . . . . .	62
4.11 Επεξεργασία ληφθέντος πακέτου . . . . .	63
4.12 Διάγραμμα κλάσης του OFDM φυσικού επιπέδου . . . . .	64
5.1 Τοπολογία με ένα σταθμό βάσης (κόμβος 0) . . . . .	67
5.2 Ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη . . . . .	68
5.3 Συνολική απώλεια πακέτων τους συστήματος . . . . .	69
5.4 Τοπολογία με δύο σταθμούς βάσης (κόμβοι 0 και 1) . . . . .	69
5.5 Ρυθμαπόδοση του 1 <sup>ου</sup> σταθμού χρήστη του 2 <sup>ου</sup> σταθμού βάσης	70
5.6 Συνολική απώλεια πακέτων τους συστήματος . . . . .	71
5.7 Τοπολογία με τρεις σταθμούς βάσης (κόμβοι 0,1 και 2) . . . .	71
5.8 Συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος με 3 σταθμούς βάσης	72
5.9 Ρυθμαπόδοση του 1 <sup>ου</sup> σταθμού χρήστη του 3 <sup>ου</sup> σταθμού βάσης	72
5.10 Συνολική απώλεια πακέτων με 3 σταθμούς βάσης . . . . .	73
5.11 Τοπολογία με τέσσερις σταθμούς βάσης (κόμβοι 0,1,2 και 3) .	73

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

---

5.12 Συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος με 4 σταθμούς βάσης	74
5.13 Ρυθμαπόδοση της CBR ροής . . . . .	75
5.14 Ρυθμαπόδοση της FTP ροής . . . . .	75
5.15 Ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη του 4 <sup>ου</sup> σταθμού βά- σης . . . . .	76
5.16 Συνολική απώλεια πακέτων με 4 σταθμούς βάσης . . . . .	76

# Κατάλογος Πινάκων

2.1 Σύγκριση του WiMAX με άλλες Τεχνολογίες Ασύρματης Ευρυζωνικότητας. (3GPP: 3G Partnership Project) . . . . .	18
2.2 Σύνοψη των επιλογών φάσματος για την Ασύρματη Ευρυζωνικότητα . . . . .	19
2.3 Παράμετροι για ασύρματες ευρυζωνικές εφαρμογές . . . . .	21
2.4 Επισκόπηση των τεχνικών σχεδιαστικών προκλήσεων της ασύρματης ευρυζωνικότητας . . . . .	24
3.1 Πρότυπα IEEE 802.16 . . . . .	26
3.2 Προφίλ σταθερών και κινητών πιστοποιήσεων . . . . .	27
3.3 OFDM παράμετροι (Οι τιμές με έντονη γραφή αντιστοιχούν στα αρχικά προφίλ του WiMAX) . . . . .	31
3.4 Διαμόρφωση και κωδικοποίηση που υποστηρίζεται από το WiMAX . . . . .	34
3.5 Ρυθμοί δεδομένων του Φυσικού επιπέδου για διάφορα εύρη ζώνης καναλιού . . . . .	35
3.6 Υπηρεσίες ροής που υποστηρίζονται από το MAC . . . . .	37
3.7 Throughput και φασματική απόδοση για το WiMAX . . . . .	46
3.8 Δείγματα σύνδεσης για ένα σύστημα WiMAX . . . . .	47
4.1 Σύνοψη διαθέσιμων και μη χαρακτηριστικών . . . . .	51
4.2 Μηνύματα διαχείρισης που έχουν οριστεί . . . . .	54
5.1 Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων . . . . .	67

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΗ

# Πρόλογος

Μία από τις βασικότερες ανάγκες μίας κοινωνίας είναι η επιθυμία για επικοινωνία. Στη σύγχρονη εποχή υπάρχουν πολλοί και διάφοροι τρόποι ώστε οι άνθρωποι να έρχονται σε επαφή από απόσταση. Ένας από αυτούς τους τρόπους, είναι και το Διαδίκτυο (Internet), που ενώ αρχικά αναπτύχθηκε για να εξυπηρετεί τους σκοπούς των πανεπιστημίων, τώρα αριθμεί εκατοντάδες εκατομμύρια χρήστες. Μία αναδυόμενη τεχνολογία που έρχεται να δώσει νέα ώθηση στο Internet, παρέχοντας τη δυνατότητα ασύρματης πρόσβασης σε αυτό, είναι το WiMAX, η απόδοση του οποίου μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χ. Δουληγέρη, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπληρώσω αυτή τη διπλωματική, αλλά και για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκειά της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω, την κα. Α. Σγώρα, διδάκτορα του Πανεπιστημίου Αιγαίου, τον κ. Δ. Ι. Βέργαδο, Λέκτορα του ΕΜΠ και την κα. Ρ. Μαυροπόδη, διδάκτορα του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην καλύτερη παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΗ

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Σε μία εποχή που η τεχνολογική πρόοδος είναι αλματώδης, η συμβολή των διαφόρων συστημάτων επικοινωνίας είναι τεράστια. Υπάρχει μία αμφίδρομη σχέση ανάμεσα στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, αφού χωρίς τους πρώτους δε θα ήταν εφικτή η ανάπτυξη δικτύων. Αντί στοιχα, χωρίς την ύπαρξη εύκολης πρόσβασης σε τρόπους επικοινωνίας, ώστε να είναι πιο άμεση η έρευνα και πιο έντονος ο ανταγωνισμός, δε θα ήταν τόσο ραγδαία η ανάπτυξη και των υπολογιστών.

Η καθημερινότητα κάθε ανθρώπου είναι συνυφασμένη με συσκευές, οι οποίες του επιτρέπουν να επικοινωνεί, να ενημερώνεται και να ψυχαγωγείται, οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας και μάλιστα τα τελευταία χρόνια, από οποιοδήποτε μέρος, επίσης. Υπάρχουν αναρίθμητα παραδείγματα τέτοιων συσκευών, από τους προσωπικούς μας υπολογιστές, που έχουμε στα σπίτια μας, μέχρι τα κινητά και τα palmtops που έχουμε μαζί μας, εκτός σπιτιού.

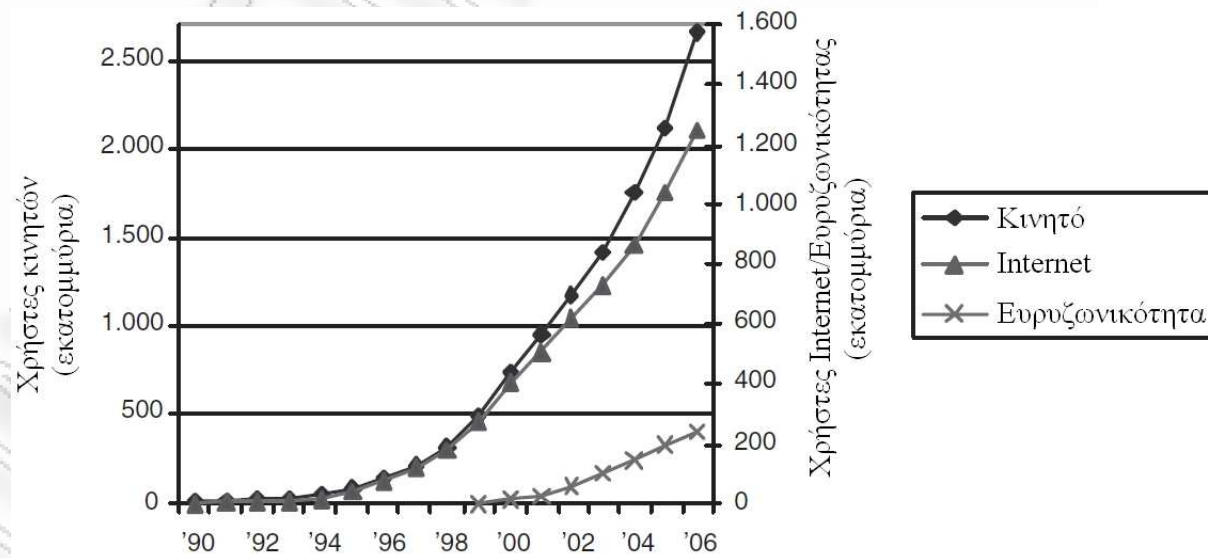
Η αναβάθμιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθοδηγείται και από την αυξανόμενη ανάγκη για καλύτερη ποιότητα των πολυμέσων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τις ταινίες, που αποκτούν ολοένα και υψηλότερη ευκρίνεια με καλύτερο ήχο. Επίσης, η επικοινωνία δεν περιορίζεται πια, μόνο στην ανταλλαγή απλών γραπτών μηνυμάτων, ή έστω στη μετάδοση φωνής χαμηλής ποιότητας. Απαιτείται λοιπόν, μία διαρκώς ποιοτικότερη, ταυτόχρονη και ζωντανή μετάδοση βίντεο, πράγμα που συνεπάγεται στη δημιουργία και εγκατάσταση ευρυζωνικών συνδέσεων.

Η επικρατέστερη τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης που καλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις, είναι το DSL (Digital Subscriber's Line), που συνήθως προσφέρει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων μέχρι μερικά Mbps. Με αυτή την ταχύτητα είναι εφικτή η γρηγορότερη πλοήγηση στο διαδίκτυο, η ταχύτερη λήψη αρχείων, αλλά και η δυνατότητα συμμετοχής σε εφαρμογές πολυμέσων, όπως μετάδοση ήχου (VoIP, Voice over Internet Protocol) και βίντεο σε πραγματικό χρόνο, διασκέψεις και διαδραστικά παιχνίδια. Πιο εξελιγμένα συστήματα ευρυζωνικής πρόσβασης, με ταχύτητες της τάξης των μερικών δεκάδων Mbps, όπως το FTTH (Fiber To The Home) και το VDSL (Very high

data rate DSL), επιτρέπουν ψυχαγωγικές εφαρμογές, όπως το HDTV (High Definition TV) και το VoD (Video on Demand).

Το επόμενο αναπόσπαστο κομμάτι για ένα ολοκληρωμένο τρόπο επικοινωνίας, είναι όλες οι δυνατότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως να μπορεί να τις απολαύσει ο χρήστης, όχι μόνο στο σπίτι του, αλλά και εκτός αυτού. Για την κάλυψη αυτού του πεδίου, υπάρχει η ασύρματη ευρυζωνικότητα, που συνδυάζει τις δύο πιο σημαντικές τεχνολογίες του κλάδου των τηλεπικοινωνιών, τα τελευταία χρόνια. Με τις απεριόριστες ελευθερίες που προσφέρει αυτός ο συνδυασμός τεχνολογιών, παύουν να υπάρχουν οι περιορισμοί που προέκυπταν από την αποχώρηση του χρήστη από το σπίτι ή το γραφείο. Επιπροσθέτως, η ασύρματη ευρυζωνικότητα δεν είναι υποχρεωτικά συνυφασμένη με την κίνηση εκτός κτηρίων, αφού υπάρχουν πλεονεκτήματα στη πρόσβαση σε αυτή από σταθερά σημεία.

Υπάρχουν 2 θεμελιώδεις διαφορετικοί τύποι ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Ο πρώτος τύπος προσφέρει ένα σύνολο από υπηρεσίες παρόμοιες με εκείνες που προσφέρονται στα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα, αλλά χωρίς τη χρήση καλωδίων ως μέσο μετάδοσης. Αυτός ο τύπος, που αποκαλείται σταθερό ασύρματο δίκτυο, μπορεί να θεωρηθεί ως μία ανταγωνιστική εναλλακτική προς το DSL ή το καλωδιακό μόντεμ. Ο δεύτερος τύπος ασύρματου ευρυζωνικού δικτύου, που αποκαλείται κινητό ευρυζωνικό δίκτυο, προσφέρει τις επιπρόσθετες λειτουργίες της φορητότητας, της δυνατότητας σύνδεσης από διαφορετικά σημεία και της δυνατότητας να παραμένει κάποιος συνδεδεμένος ενώ κινείται με κάποιο όχημα.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια ανάπτυξη συνδρομών μεταξύ 1990-2006 για κινητή τηλεφωνία, χρήση Διαδικτύου και ευρυζωνική πρόσβαση [2, 3, 4]

Η ύπαρξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας οφείλεται στον ανταγωνισμό

---

μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών, που οδήγησε να σε μία ασύρματη λύση ώστε να παρακάμφθει η υποχρέωση προς τους παρόχους υπηρεσιών. Κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας, ένα πλήθος συστημάτων ασύρματης πρόσβασης αναπτύχθηκε, τα οποία διαφοροποιούνται αρκετά όσον αφορά τις ικανότητες, τα πρωτόκολλα, το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων, τις εφαρμογές που υποστηρίζουν και από άλλες παραμέτρους.

Η τεχνολογία WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) έχει εξελιχθεί μέσα από τέσσερα στάδια, τα οποία δεν είναι πλήρως ή ξεκάθαρα διαδοχικά. Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο ανήκουν τα συστήματα ασύρματου τοπικού βρόχου στενής ζώνης (Wireless Local Loop, WLL), τα οποία αφορούσαν την τηλεφωνία και ήταν αρκετά επιτυχημένα σε χώρες με μεγάλες εκτάσεις χωρίς υποδομή για τηλεφωνία. Ενώ σε μέρη όπου υπήρχε υποδομή, τέτοια συστήματα έπρεπε να προσφέρουν επιπλέον χρησιμότητα, όπως πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο Ίντερνετ, για να είναι ανταγωνίσιμα. Στο 2<sup>ο</sup> στάδιο ανήκει η πρώτη γενιά ευρυζωνικών συστημάτων, δηλαδή τα αποκαλούμενα τοπικά συστήματα πολλαπλής διανομής (Local Multipoint Distribution Systems, LMDS) με ταχύτητα μερικές εκατοντάδες Mbps. Όμως η απαίτηση για εγκατάσταση κεραιάς στη ταράτσα (ώστε να υπάρχει το λεγόμενο Line Of Sight, LOS) και οι περιορισμένες δυνατότητες, εμπόδισαν την ανάπτυξή τους. Ακολούθησαν συστήματα πολλών καναλιών πολλών σημείων (Multichannel Multipoint Distribution Systems, MMDS), που πρόσφεραν ασύρματη εκπομπή υπηρεσιών καλωδιακού βίντεο και απαιτούσαν τη τοποθέτηση εξωτερικής κεραιάς, επίσης, αλλά ξεπεράστηκαν από τη δορυφορική τηλεόραση. Τα ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς αποτελούν το 3<sup>ο</sup> στάδιο της εξέλιξης του WiMAX και ήταν ικανά να ξεπεράσουν το πρόβλημα του LOS. Αυτό έγινε με τη χρήση κυψελωτής αρχιτεκτονικής και εφαρμογή προχωρημένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, ενώ οι κεραιές μπορούσαν να τοποθετηθούν χαμηλότερα από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις. Το πρόβλημα του NLOS (Non LOS), λύθηκε χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), CDMA (Code Division Multiple Access) και επεξεργασία πολλών κεραιών. Οι τεχνολογίες βασισμένες σε πρότυπα αποτελούν το 4<sup>ο</sup> στάδιο του WiMAX και θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 2.

Η δομή της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής: Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ασύρματη ευρυζωνικότητα και αναλύονται τα χαρακτηριστικά του WiMAX. Δηλαδή, αναφέρεται πως διαφοροποιείται το κινητό έναντι του σταθερού, ποιες οι διαφορές σε σχέση με το 3G και περιγράφονται οι προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει. Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η τεχνολογία WiMAX. Αναλύεται ενδελεχώς το Φυσικό επίπεδο, ως προς τα χαρακτηριστικά του OFDM και του OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Γίνεται επισκόπηση του WiMAX, με αναφορά σε σημαντικές παραμέτρους, όπως η ποιότητα υπηρεσίας, η εξοικονόμηση ενέργειας, η ασφάλεια, ενώ επισημαίνεται η αρχιτεκτονική του δικτύου, καθώς και οι μετρικές επίδοσης.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζουμε το NS2, τα βοηθητικά προγράμματα και την έκδοση που επιτρέπουν τη δημιουργία και μελέτη της προσομοίωσης ενός

## **Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή**

---

δικτύου. Κατόπιν, στο Κεφάλαιο 5, αναλύουμε την επίδοση του WiMAX με βάση το σενάριο που υλοποιήθηκε και παρουσιάζεται. Τέλος, τα συμπεράσματα που εξάγονται από την προσομοίωση που εκτελέστηκε, καταγράφονται στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 2

# Η ασύρματη ευρυζωνικότητα

### 2.1 Τεχνολογίες βασισμένες σε πρότυπα

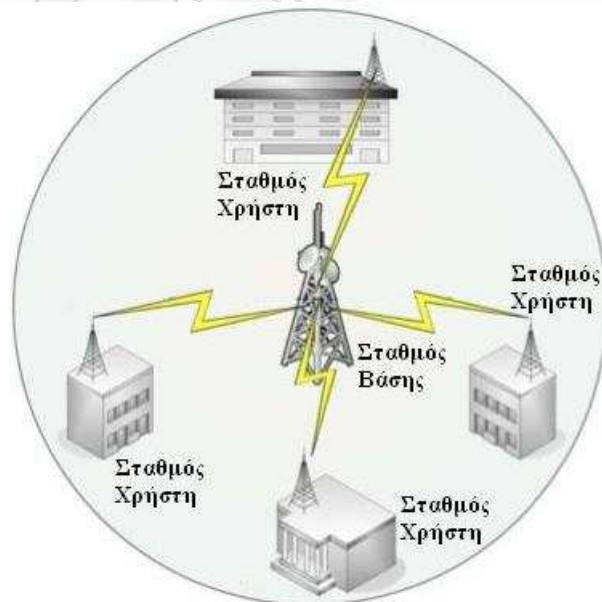
Το 1998, το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) σχημάτισε μία ομάδα με ονομασία 802.16, που θα δημιουργούσε τα πρότυπα για αυτό που αποκαλείτο ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο (WMAN, Wireless Metropolitan Area Network). Αρχικά, αυτή η ομάδα επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη λύσεων στη ζώνη μεταξύ 10GHz και 66GHz, με βασικό σκοπό την παράδοση συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων σε επιχειρήσεις που δεν είχαν πρόσβαση σε οπτικές ίνες. Αυτά τα συστήματα, όπως τα LMDS, είχαν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να παρεμβάλλονται σε δίκτυα οπτικών ινών και να διανέμουν το εύρος ζώνης, μέσω μίας σημείο-προς-πολλά-σημεία διάταξης (βλ Σχήμα 2.1), σε επιχειρήσεις με LOS. Η ομάδα 802.16 του IEEE, παρήγαγε ένα πρότυπο το οποίο εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2001. Αυτό το πρότυπο, Wireless MAN-SC (Metropolitan Area Network - Single Carrier), καθόριζε ένα φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιούσε τεχνικές διαμόρφωσης απλής φέρουσας και ένα επίπεδο MAC (Medium Access Control) με δομή ριπής TDM (Time Division Multiplexing), που υποστήριζε και FDD (Frequency Division Duplexing) και TDM.

Μετά την ολοκλήρωση του προτύπου, η ομάδα άρχισε να ασχολείται με την επέκταση και την τροποποίησή του ώστε να δουλεύει στο πεδίο συχνοτήτων μεταξύ 2GHz και 11GHz, που θα επέτρεπε NLOS εγκαταστάσεις. Αυτή η τροποποίηση, (IEEE 802.16a) ολοκληρώθηκε το 2003, με σχηματικό (schematic) OFDM να προστίθενται ως μέρος του φυσικού επιπέδου για να υποστηρίζονται τα περιβάλλοντα με πολλαπλά μονοπάτια. Εκείνη την εποχή, το OFDM είχε καταστεί μέθοδος επιλογής για την αντιμετώπιση πολλαπλών μονοπατιών για την ευρυζωνικότητα και καθόρισε πρόσθετες επιλογές του επιπέδου MAC, συμπεριλαμβάνοντας υποστήριξη για OFDMA. Επιπλέον αναθεωρήσεις στο 802.16a έγιναν και ολοκληρώθηκαν το 2004. Αυτό το αναθεωρημένο πρότυπο (802.16-2004) έχει υιοθετηθεί ως η βάση για το HIPERMAN (High Performance Metropolitan Area Network), του ETSI (European Telecom-

## Κεφάλαιο 2. Η ασύρματη ευρυζωνικότητα

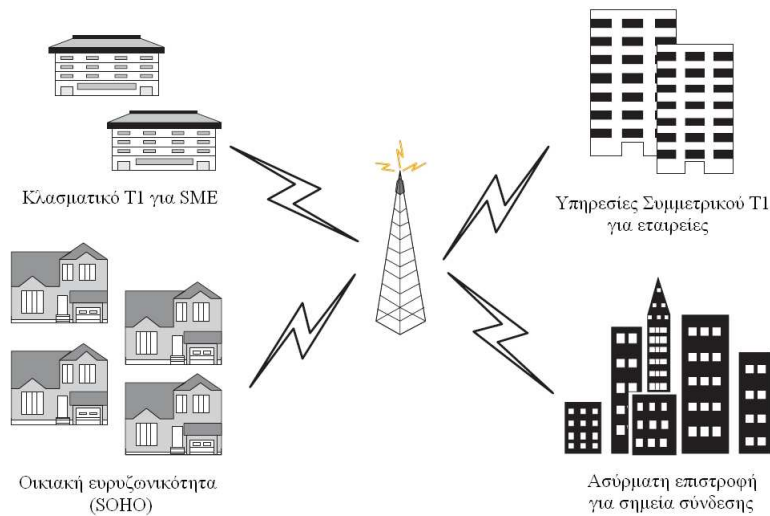
munications Standards Institute). Η ομάδα του 802.16 ολοκλήρωσε το Δεκέμβριο του 2005 την αναθεώρηση (IEEE 802.16e-2005) ώστε να επιτραπεί η χρήση εφαρμογών σε κινούμενα οχήματα, καθόρισε το κλιμακωτό OFDM για το φυσικό επίπεδο και έκανε επιπλέον τροποποιήσεις στο επίπεδο MAC για να φιλοξενήσει τη φορητότητα.

Το 802.16 είναι μία συλλογή από πρότυπα με ένα πολύ ευρύ σκοπό, ενώ για να στεγάσει τις διαφορετικές ανάγκες της βιομηχανίας, συμπεριέλαβε μία μεγάλη γκάμα από επιλογές. Προκειμένου να δημιουργηθούν λύσεις που να είναι διαλειτουργικές, στο πρότυπο υπάρχουν επιλογές που διασφαλίζουν τη διαλειτουργικότητα. Το IEEE ανέπτυξε τις προδιαγραφές, αλλά άφησε στη βιομηχανία τη μετατροπή τους σε ένα διαλειτουργικό πρότυπο που θα μπορούσε να πιστοποιηθεί και για το λόγο αυτό σχηματίστηκε το WiMAX Forum, που προτείνει λύσεις βασισμένες στα πρότυπα του 802.16. Στο WiMAX Forum συμμετέχουν πολλοί διαφορετικοί εκπρόσωποι της βιομηχανίας, συμπεριλαμβάνοντας εταιρείες ημιαγωγών, κατασκευαστές εξοπλισμού, ενωπιητές συστημάτων και πάροχοι υπηρεσιών. Το φόρουμ ξεκίνησε ελέγχους για τη διαλειτουργικότητα και ανακοίνωσε το πρώτο πιστοποιημένο προϊόν βασισμένο στο IEEE 802.16-2004 για καθορισμένες εφαρμογές τον Ιανουάριο του 2006. Πολλοί από τους προμηθευτές που προηγουμένως ανέπτυξαν ιδιόκτητες λύσεις, ανακοίνωσαν τη πρόθεσή τους να μεταφερθούν στο σταθερό ή το κινητό WiMAX. Η έλευση προϊόντων πιστοποιημένων με το WiMAX είναι ένα σημαντικό γεγονός στην ιστορία της ασύρματης ευρυζωνικότητας.



Σχήμα 2.1: Διάταξη σημείο-προς-πολλά-σημεία

## 2.2 Σταθερό και κινητό WiMAX



Σχήμα 2.2: Εφαρμογές σημείο-προς-πολλά-σημεία

## 2.2 Σταθερό και κινητό WiMAX

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν καθορισμένες ασύρματες λύσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε: σημείο-προς-σημείο και σημείο-προς-πολλά-σημεία. Εφαρμογές τύπου σημείο-προς-σημείο, περιλαμβάνουν συνδεσιμότητα ανάμεσα στα κτήρια μίας περιοχής όσο ένα κολλέγιο. Εφαρμογές τύπου σημείο-προς-πολλά-σημεία περιλαμβάνουν (1) ευρυζωνικότητα για οικίες, (2) υπηρεσίες προς επιχειρήσεις και (3) ασύρματη επιστροφή για Wi-Fi (Wireless Fidelity) σημεία. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει διάφορες εφαρμογές τύπου σημείο-προς-πολλά-σημεία.

Τα πλεονεκτήματα πρόσβασης για οικίες, μέσω ενός σταθερού ασύρματου δικτύου περιλαμβάνουν το χαμηλότερο κόστος για εισαγωγή και εγκατάσταση στο δίκτυο, τη γρηγορότερη και ευκολότερη εγκατάσταση, τη δυνατότητα δημιουργίας δικτύου βάσει απαιτήσεων, το μικρότερο λειτουργικό κόστος για τη συντήρηση, τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου και την ανεξαρτησία από την ανάγκη για χρήση μεταγωγέων.

Όσον αφορά τον εξοπλισμό του πελάτη (Customer Premise Equipment, CPE) (του σταθμού χρήστη Subscriber Station, SS), δύο μοντέλα εγκατάστασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικίες, το ένα απαιτεί την τοποθέτηση μίας εξωτερικής κεραίας, ενώ το άλλο μοντέλο χρησιμοποιεί ένα ολοκληρωμένο μόντεμ με δυνατότητα ραδιοζεύξης, το οποίο ο πελάτης μπορεί να τοποθετήσει εσωτερικά, όπως τα κλασικά DSL μόντεμ. Στη πρώτη περίπτωση βελτιώνεται η ραδιοζεύξη και αυτό συνεπάγεται μείωση του πλήθους των σταθμών βάσης, αλλά και την ανάγκη ο συνδρομητής να πληρώσει έναν τεχνικό. Στην άλλη περίπτωση δημιουργείται ένα πλήθος εξοπλισμού, που μπορεί να



επιλέξει ο συνδρομητής και να εγκαταστατήσει μόνος του.

Σε αναπτυγμένες χώρες, με καλές υποδομές καλωδίων, η σταθερή ασύρματη ευρυζωνικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αγροτικές περιοχές, όπου οι παραδοσιακοί τρόποι εξυπηρέτησης είναι πιο ακριβοί. Επίσης, σε αυτές τις χώρες το σταθερό WiMAX μπορεί να αποτελέσει μία ανταγωνιστική λύση έναντι του T1/E1 για την αγορά των επιχειρήσεων. Με βάση το γεγονός ότι μόνο ένα μικρό κομμάτι των εμπορικών κτηρίων παγκοσμίως έχουν πρόσβαση σε οπτικές ίνες, υπάρχει μία προφανής ανάγκη για εναλλακτικές λύσεις υψηλού εύρους ζώνης για τους επιχειρηματίες.

Εφόσον οι χρήστες απολαμβάνουν υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο σπίτι ή τη δουλειά, το ίδιο θα απαιτήσουν να έχουν και όταν κινούνται, ωθώντας του παρόχους να στραφούν στο WiMAX. Το πρώτο βήμα προς την κινητικότητα, είναι απλά να προστεθούν νομαδικές ικανότητες στη σταθερή ευρυζωνικότητα. Η παροχή υπηρεσιών του WiMAX σε φορητές συσκευές θα επιτρέψει στους χρήστες να έχουν γρήγορη πρόσβαση και εκτός του σπιτιού ή της δουλειάς. Όμως μέσα σε ένα κινούμενο όχημα, μπορεί να μην είναι συνεχής η σύνδεση, αλλά όταν ο χρήστης είναι πεζός θα μπορεί να κινείται και να παραμένει διαρκώς συνδεδεμένος από οποιοδήποτε σημείο μέσα στη περιοχή κάλυψης.

Η ευελιξία σε εύρος ζώνης και τα πολλαπλά επίπεδα QoS (Quality of Service, ποιότητα υπηρεσίας) που υποστηρίζει το WiMAX, του επιτρέπουν να χρησιμοποιηθεί από παρόχους για διαφοροποιημένες ψυχαγωγικές και μη, εφαρμογές. Δηλαδή εκτός από υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο Internet, το κινητό WiMAX μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικά διάφορες υπηρεσίες, όπως VoIP. Επίσης, καθώς οι εταιρείες κλασικής τηλεφωνίας κινούνται προς το ψυχαγωγικό τομέα με την τηλεόραση IP, το φορητό WiMAX μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν λύση για να επεκταθούν εκτός σπιτιού.

### 2.3 Σύγκριση του WiMAX με τα δίκτυα 3G

Οι δυνατότητες throughput του WiMAX εξαρτώνται από το εύρος ζώνης του καναλιού που χρησιμοποιείται. Σε αντίθεση με τα συστήματα 3G (3rd Generation), που έχουν καθορισμένο εύρος ζώνης, το WiMAX διαλέγει κανάλι από 1,25MHz ως 20MHz, που επιτρέπει ευελιξία. Όταν χρησιμοποιείται το κανάλι 10MHz TDD (Time Division Duplexing), το WiMAX προσφέρει ταχύτητα λήψης (από τον δέκτη) στα 46Mbps και αποστολής 7Mbps. Το ότι το Wi-Fi και το WiMAX βασίζονται στη διαμόρφωση OFDM, τους επιτρέπει να έχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς, σε αντίθεση με το 3G που βασίζεται στο CDMA.

Το γεγονός ότι οι προδιαγραφές του WiMAX προβλέπουν τη χρήση πολλαπλών κεραιών, οδηγεί σε καλύτερη φασματική αποδοτικότητα. Στα συστήματα 3G, η υποστήριξη πολλαπλών κεραιών προστίθεται μετά. Επίσης το OFDM ταιριάζει καλύτερα με υλοποιήσεις τύπου MIMO (Multiple Input Multiple Output), από ότι το CDMA, ενώ έχει και καλύτερη εκμετάλλευση των διαφορετικών συχνοτήτων και χρηστών ώστε να βελτιώσει τη χωρητικότητα.

## **2.4 Προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα**

Έτσι το WiMAX καθίσταται πιο γρήγορο, ευέλικτο και με μεγαλύτερο μέσο throughput και χωρητικότητα, σε σύγκριση με το 3G.

Άλλο ένα πλεονεκτήματα του WiMAX είναι ότι υποστηρίζει ικανοποιητικά περισσότερες συμμετρικές συνδέσεις και ευέλικτη και δυναμική προσαρμογή της σχέσης αποστολής και λήψης. Συνήθως το 3G έχει καθορισμένο ασύμμετρο ρυθμό μεταξύ αποστολής και λήψης.

Το επίπεδο MAC του WiMAX είναι κατασκευασμένο από κάτω προς τα πάνω για να υποστηρίζει ένα πλήθος από διαφορετικές κινήσεις ροών, περιλαμβάνοντας κίνηση πραγματικού και μη χρόνου, σταθερού και μεταβαλλόμενου ρυθμού, δεδομένα με προτεραιότητα και δεδομένα καλύτερης προσπάθειας.

Ίσως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του WiMAX είναι η χαμηλού κόστους απόκτηση και η εύκολη IP αρχιτεκτονική. Η χρήση τέτοιας αρχιτεκτονικής απλοποιεί το δίκτυο και μειώνει τα έξοδα κεφαλαίου και λειτουργίας. Επίσης η καμπύλη απόδοσης-τιμής πλησιάζει αυτή του 'νόμου Moore' που αφορά τους επεξεργαστές, επιτρέπει εύκολη συμπλήρωση από εφαρμογές τρίτων προμηθευτών και διευκολύνει τη σύγκλιση με άλλα δίκτυα και εφαρμογές.

Όσον αφορά την κάλυψη roaming και τη δυνατότητα σύνδεσης σε κινούμενα οχήματα, το 3G ήταν εξ αρχής σχεδιασμένο για τη δεύτερη περίπτωση. Ενώ το WiMAX σχεδιάστηκε σαν σταθερό σύστημα με τις δυνατότητες για εν κινήσει κάλυψη να είναι πρόσθετες. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ του WiMAX (σταθερού και κινητού), του 3G (HSPA: High Speed Packet Access και 1x EV-DO: 1x EVolution Data Optimized) και του Wi-Fi.

## **2.4 Προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα**

Παρά τις αρχικές εκτιμήσεις, η επιτυχία του WiMAX δεν πρέπει να θεωρηθεί δεδομένη. Στην πραγματικότητα, οι ασύρματες τεχνολογίες και ειδικά το WiMAX έχουν ένα πλήθος από προκλήσεις να αντιμετωπίσουν, που θα μπορούσαν να εμποδίσουν απορρόφησή τους από την αγορά. Για να αποκτήσουν ευρεία αποδοχή, θα πρέπει να προσφέρουν πολλά Mbps ταχύτητας στους χρήστες, με καλό QoS, να είναι εύκολη η τοποθέτηση του εξοπλισμού και να παρέχουν ευρυζωνικές εφαρμογές, χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα, η αξιοπιστία και η ασφάλεια και μάλιστα καλύτερα από τον ανταγωνισμό.

Το να καλυφθούν οι απαιτήσεις αυτές και να ξεπεραστούν οι περιορισμοί, καθιστούν την ασύρματη ευρυζωνικότητα μια πρόκληση. Η σχεδίαση των συστημάτων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να καλύπτονται με ισορροπία αντικρουόμενες απαιτήσεις, που θα αναλυθούν παρακάτω. Στον Πίνακα 2.4 συνοψίζονται οι διάφορες τεχνικές προκλήσεις, με τις αντίστοιχες πιθανές λύσεις, που σχετίζονται με τις απαιτήσεις υπηρεσίας.

### **2.4.1 Επιχειρηματικές προκλήσεις**

Όσον αφορά τις σταθερές ευρυζωνικές εφαρμογές, το WiMAX έχει να αντιμετωπίσει το DSL και τη καλωδιακή σύνδεση, τεχνολογίες που εξακολουθούν

## Κεφάλαιο 2. Η ασύρματη ευρυζωνικότητα

Παράμετρος	Σταθερό WiMAX	Κινητό WiMAX	HSPA	1x EV-DO Rev A	Wi-Fi
Πρότυπα	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP Release 6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Μέγιστος ρυθμός λήψης δεδομένων	9,4Mbps στα 3,5MHz με 3:1 αναλογία Λήψης-Αποστολής TDD, 6,1Mbps με 1:1 αναλογία	46Mbps με 3:1 αναλογία Λήψης-Αποστολής TDD, 32Mbps 1:1 αναλογία	14,4Mbps με χρήση 15 κωδικών, 7,2Mbps με χρήση 10 κωδικών	3,1Mbps	54Mbps χρησιμοποιώντας το 802.11a/g, πάνω από 100Mbps χρησιμοποιώντας το 802.11n
Μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων	3,3 Mbps στα 3,5MHz με 3:1 αναλογία Λήψης-Αποστολής, 6,5Mbps με 1:1 αναλογία	7Mbps στα 10MHz με 3:1 αναλογία Λήψης-Αποστολής, 4Mbps με 1:1 αναλογία	1,4Mbps αρχικά, 5,8Mbps ύστερα	1,8Mbps	
Εύρος ζώνης	3,5MHz και 7MHz στη μπάντα 3,5GHz 10MHz στη μπάντα 5,8GHz	3,5MHz 7MHz, 5MHz, 10MHz και 5,75MHz	5MHz	1,25MHz	20MHz με το 802.11n 20/40MHz για το 802.11n
Διαμόρφωση	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Πολυπλεξία	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Διπλεξία	TDD,FDD	TDD αρχικά	FDD	FDD	TDD
Συχνότητα	3,5GHz και 5,8GHz αρχικά	2,3GHz, 2,5GHz και 3,5GHz αρχικά	800/900/1800/1900/2100MHz	800/900/1800/1900MHz	2,4GHz, 5GHz
Κάλυψη	5-8χλμ	3χλμ	1-5χλμ	1-5χλμ	<30μ εσωτερικά, <300μ εξωτερικά
Κινητικότητα	Δεν υποστηρίζεται	Μεσαία	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή

Πίνακας 2.1: Σύγκριση του WiMAX με άλλες Τεχνολογίες Ασύρματης Ευρυζωνικότητας. (3GPP: 3G Partnership Project)

να εξελίσσονται με ταχείς ρυθμούς, προσφέροντας αυξανόμενες ταχύτητες μετάδοσης, λόγω της εξάπλωσης του δικτύου οπτικών ινών έναντι των χάλκινων καλωδίων. Έτσι, θα είναι δύσκολο για τις ασύρματες τεχνολογίες να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις, με το WiMAX να βασίζεται στη φορητότητα για να αντισταθμίσει τους ρυθμούς δεδομένων. Επίσης, το WiMAX έχει το πλεονέκτημα της φτηνής δημιουργίας υποδομών, αλλά οι ενσύρματες τεχνολογίες βρίσκονται σε φθίνουσα πορεία στη καμπύλη κόστους. Έτσι το σταθερό WiMAX είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί για αγροτικές περιοχές σε ανεπτυγμένες χώρες, αλλά σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι υποδομές είναι μικρές, το WiMAX έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να πετύχει. Επιπλέον, για

## 2.4 Προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα

Όνομασία	Κατανομή συχνοτήτων	Ποσότητα φάσματος	Σημειώσεις
Σταθερή ασύρματη πρόσβαση (Fixed Wireless Access, FWA): 3,5GHz	Κυρίως 3,4GHz - 3,6GHz 3,3GHz - 3,3GHz και 3,6GHz - 3,8GHz επίσης διαθέσιμες	Σύνολο 200MHz ποικίλλει από 2 * 5MHz ως 2 * 56MHz	Μη διαθέσιμο στις ΗΠΑ, εκτός από 50MHz μεταξύ 3,65GHz και 3,7GHz
BRS: (Broadband Radio Services): 2,5GHz	2,495GHz-2,690GHz	194MHz συνολικά	Η κατανομή αφορά τις ΗΠΑ. Διαθέσιμη και σε μερικές άλλες χώρες
WCS (Wireless Communications Services): 2,3GHz	2,305GHz-2,320GHz 2,345GHz-2,360GHz	Δύο 2 * 5MHz	Διατίθεται στις ΗΠΑ, Κορέα, Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία
Χωρίς άδειες: 2,4GHz	2,405GHz-2,4835GHz	80MHz	Η κατανομή διατίθεται παγκοσμίως και υπάρχει συμφόρηση επειδή χρησιμοποιείται για το Wi-Fi
Χωρίς άδειες: 5GHz	5,250GHz-5,350GHz, 5,725GHz-5,825GHz	200MHz για τις ΗΠΑ, επιπλέον 255MHz προς κατανομή	Αποκαλείται U-NII στις ΗΠΑ, διατίθεται παγκοσμίως, οι χαμηλές μπάντες έχουν μεγάλους περιορισμούς
UHF (Ultra High Frequency) μπάντα: 700MHz	698MHz-746MHz (χαμηλή), 747MHz- 792MHz (υψηλή)	30MHz (χαμηλή μπάντα), 48MHz (υψηλή μπάντα)	Η κατανομή αφορά τις ΗΠΑ
AWS (Advanced Wireless Services)	1,710GHz-1,755GHz, 2,110GHz-2,155GHz	2 * 45MHz	Χρησιμοποιείται για 3G σε διάφορα μέρη του κόσμου

Πίνακας 2.2: Σύνοψη των επιλογών φάσματος για την Ασύρματη Ευρυζωνικότητα

να είναι επιτυχημένο το WiMAX θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα ικανοποιητικό πλήθος συσκευών (διαφόρων ειδών, όπως: MP3 Players, palmtops κλπ) που θα ενσωματώνουν κυκλώματα που το υποστηρίζουν.

### 2.4.2 Ασύρματο κανάλι

Στα ενσύρματα κανάλια υπάρχει μία φυσική σύνδεση ανάμεσα στο πομπό και τον δέκτη, ενώ τα ασύρματα συστήματα βασίζονται σε πολύπλοκες διαδικασίες μετάδοσης ραδιοκυμάτων. Τα σήματα πρέπει να ταξιδέψουν μέσα από συνθήκες με NLOS, διάφορα μικρά και μεγάλα εμπόδια, εδαφικές ανωμαλίες, μεταβολή της θέσης του πομπού και του δέκτη, με θόρυβο και παρεμβολή από άλλα σήματα. Με αυτές τις συνθήκες το σήμα εξασθενεί, καθυστερεί, εκτρέπεται, καθιστώντας το δύσκολο να κατασκευαστεί ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας που να λειτουργεί αποδοτικά, ειδικά όταν απαιτούνται υψηλές ταχύτητες κίνησης του δέκτη, αλλά και γρήγορους ρυθμούς μετάδοσης.

Σε συνθήκες NLOS το σήμα εξασθενεί πιο γρήγορα από ότι σε συνθήκες LOS, και υπάρχει αντίστροφη αναλογία με το τετράγωνο της συχνότητας φέρουσας. Μεγάλα εμπόδια όπως κτήρια, εμποδίζουν το σήμα με τα ραδιοκύ-

ματα να μεταδίδονται πέρα από τέτοια εμπόδια μέσω της διάθλασης με σοβαρή απώλεια. Έτσι το σήμα μπορεί να φτάσει στο προορισμό μέσω διαφορετικών μονοπατιών, πράγμα που συνεπάγεται σε μεγάλη διακύμανση (δεκάδες db) του πλάτους του σήματος κατά τη λήψη. Επίσης, όταν το σήμα φτάνει από διαφορετικά μονοπάτια και σε διαφορετικές στιγμές, τότε εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο ISI (InterSymbol Interference) που μπορεί να επιλυθεί με το OFDM.

Η κίνηση ανάμεσα στο πομπό και το δέκτη προκαλεί απόκλιση της συχνότητας φέρουσας (διάχυση doppler), που εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος και τη συχνότητα φέρουσας. Για ευρυζωνικά συστήματα, το φαινόμενο αυτό προκαλεί απώλεια SNR (Signal to Noise Ratio) και καθιστά δύσκολη την επανάκτηση της φέρουσας, ενώ προκαλεί προβλήματα και στην τεχνική OFDM. Άλλο ζήτημα του καναλιού είναι ο θόρυβος AWGN (Additive White Gaussian Noise), που είναι από τους πιο βασικούς παράγοντες εξασθένησης του σήματος, αφού στους δέκτες σε ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα παρατηρείται πολύ μεγαλύτερο επίπεδο θορύβου, σε σχέση με αυτούς των παραδοσιακών συστημάτων. Τέλος, περιορισμοί στο διαθέσιμο φάσμα, σημαίνει ότι οι χρήστες θα μοιράζονται το εύρος ζώνης και έτσι μπορεί να υπάρξουν παρεμβολές ανάμεσα στα σήματα των χρηστών. Μάλιστα μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις, η παρεμβολή να είναι πιο σημαντική από το θόρυβο.

### 2.4.3 Φάσμα

Η διαθεσιμότητα του φάσματος συχνοτήτων είναι το κλειδί για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Οι συχνότητες για υλοποιήσεις του WiMAX είναι: 2,3GHz, 2,5GHz, 3,5GHz και 5,7GHz. Η μπάντα λειτουργίας συχνά καθορίζει τα όρια των ρυθμών μετάδοσης που επιτυγχάνονται. Ο Πίνακας 2.2 συνοψίζει τις διάφορες μπάντες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασύρματα συστήματα.

Επίσης, είναι πιθανό το WiMAX να υλοποιηθεί σε συχνότητες του 3G. Ακόμη και στη μπάντα του 1,5GHz που χρησιμοποιείται από τα δορυφορικά τηλέφωνα. Επομένως υπάρχουν πολλές εναλλακτικές επιλογές και το ζητούμενο είναι να αναπτυχθεί με συμβατότητα σε παγκόσμια κλίμακα, ώστε να είναι πιο ορατά τα οικονομικά οφέλη. Αλλά παράλληλα πρέπει να γίνεται και αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος, λόγω της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης από νέους και παλιούς χρήστες για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης

Με την κυψελωτή αρχιτεκτονική, αντί να υπάρχει ένα μεγάλος ενεργόβρος πομπός για μία μεγάλη περιοχή, υπάρχουν πομποί χαμηλότερης ισχύος που καλύπτουν μικρότερες περιοχές (κυψέλες), οι οποίες χωρίζονται σε τομείς με τη χρήση κατευθυνόμενων κεραιών. Συνήθως μερικές κυψέλες συγκροτούν ένα σύμπλεγμα, μέσα στο οποίο το φάσμα χωρίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές, ενώ σε άλλα συμπλέγματα χρησιμοποιείται και πάλι ο ίδιος τρόπος διαχωρισμού του ίδιου φάσματος. Η επαναχρησιμοποίη-

## 2.4 Προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα

ηση συχνοτήτων πρέπει να εξαντληθεί στο έπακρο χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές, σχεδιάζοντας σχήματα αποστολής και λήψης που λειτουργούν με ελάχιστο SINR ή χρησιμοποιώντας επεξεργασία πολλαπλών κεραιών.

Πέρα από τη χρήση της κυψελωτής αρχιτεκτονικής και της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, υπάρχουν και άλλες τεχνικές επεξεργασίας σημάτων που μεγιστοποιούν την απόδοση του φάσματος: (1) Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση ανά χρήστη ή/και ανά πακέτο στο ψηλότερο επίπεδο που μπορεί να υποστηρίξει το SINR, μεγιστοποιώντας τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. (2) Πολυπλεξία, δηλαδή παράλληλη μετάδοση πολλαπλών ξεχωριστών ροών, από πολλές κεραιές και στο χρήστη γίνεται διαχωρισμός με την κατάλληλη επεξεργασία σήματος. Η τεχνική παρέχει ρυθμό μετάδοσης και χωρητικότητα ανάλογη με το πλήθος των κεραιών. (3) Τεχνικές αποδοτικής πολλαπλής πρόσβασης που θα μοιράζουν αποτελεσματικά τους πόρους ανάμεσα στους πολλαπλούς χρήστες.

### 2.4.4 Ποιότητα υπηρεσίας (QoS)

Παράμετρος	Διαδραστικά παιχνίδια	Φωνή	Ροή πολυμέσων	Δεδομένα	Βίντεο
Ρυθμός	50Kbps-85Kbps	4Kbps-64Kbps	5Kbps-384Kbps	0,01Mbps-100Mbps	>1Mbps
Παράδειγμα εφαρμογών	Παιχνίδια	VoIP	Μουσική, ομιλία, βίντεο κλπ	Περιήγηση στον ιστό, αποστολή άμεσων μηνυμάτων, telnet, λήψη αρχείων	IPTV, λήψη ταινιών, peer-to-peer διαμοίραση βίντεο
Κίνηση	Πραγματικού χρόνου	Πραγματικού χρόνου, συνεχής	Συνεχής, σε ριπές	Μη πραγματικού χρόνου, σε ριπές	Συνεχής
Απώλεια πακέτων	Μηδέν	<1%	<1% για ήχο, <2% για βίντεο	Μηδέν	<10 <sup>-8</sup>
Διακύμανση καθυστέρησης	Μη διαθέσιμη	<20ms	<2sec	Μη διαθέσιμη	<2sec
Καθυστερήση	<50-150ms	<100ms	<250ms	Ευέλικτη	<100ms

Πίνακας 2.3: Παράμετροι για ασύρματες ευρυζωνικές εφαρμογές

Το QoS αναφέρεται στην εκπλήρωση κάποιων απαιτήσεων, όπως throughput, ρυθμός λανθασμένων πακέτων, σχετικά με μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα πρέπει να προσφέρουν μία ποικιλία από εφαρμογές οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS, ενώ έχουν και χρήστες των οποίων οι απαιτήσεις σε QoS διαφέρουν.

Η ταυτόχρονη διαχείριση διαφορετικών ροών και απαιτήσεων αποτελεί πρόκληση για το MAC πρωτόκολλο, ενώ είναι χρήσιμος και ένας μηχανισμός

ειδοποίησης για τη διαφοροποίηση των απαιτήσεων QoS. Μάλιστα η ύπαρξη QoS σε μη καθορισμένα ευρυζωνικά δίκτυα είναι πιο δύσκολη από ότι σε σταθερά, αφού ανακύπτουν ζητήματα που αφορούν την εναλλαγή από τη μία κυψέλη στην άλλη, όπου μπορεί να χαθούν πακέτα, κάτι που πρέπει να περιοριστεί.

### 2.4.5 Κινητικότητα/Φορητότητα

Η κινητικότητα και η φορητότητα είναι ένα από τα μεγαλύτερα προτερήματα των ασύρματων δικτύων. Η κινητικότητα δημιουργεί 2 προκλήσεις, η μία αφορά τον τρόπο που θα παράσχει πρόσβαση σε ανενεργούς χρήστες οπουδήποτε και αν βρίσκονται (roaming) και η δεύτερη είναι η διατήρηση συνόδων χωρίς διακοπή (handoff).

Roaming: Χρησιμοποιούνται κεντρικές βάσεις δεδομένων όπου αποθηκεύονται στοιχεία σχετικά με τη τοποθεσία κάθε χρήστη και οι οποίες αναφέρονται μετά από ανταλλαγή μηνυμάτων καθώς μετακινείται από μέρος σε μέρος.

Handoff: Παρέχεται μία μέθοδος ώστε να μη διακόπτεται η σύνδεση κατά την εναλλαγή από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλο. Αυτή η διαδικασία, ερευνά και αποφασίζει πότε πρέπει να γίνει η εναλλαγή, βρίσκοντας τους πόρους και εκτελώντας την. Πρέπει να υπάρχει σωστή τακτική ώστε να μη απορρηφθεί μία σύνδεση λόγω κακής εναλλαγής, αλλά ούτε και να γίνονται περιττές εναλλαγές, προκαλώντας φόρτο στο δίκτυο. Επίσης πρέπει να εξασφαλιστούν επαρκείς πόροι για τις εναλλαγές και να δίνεται προτεραιότητα σε μία εναλλαγή, έναντι μίας έναρξης συνόδου.

Άλλο ένα ζήτημα της διαχείρισης κινητικότητας, είναι η δυνατότητα εναλλαγής ανάμεσα σε ετερογενή δίκτυα, όπως από ένα WiMAX σε ένα Wi-Fi. Αυτό αποκαλείται IP κινητικότητα και αποκρύπτεται από το IP δίκτυο, ενώ το τερματικό διατηρεί σταθερή IP διεύθυνση.

Η φορητότητα αφορά συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία και ο χρήστης μπορεί να κουβαλάει, με αποτέλεσμα να πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν πιο χαμηλή κατανάλωση. Δυστυχώς η πρόοδος στον τομέα των μπαταριών δεν είναι γρήγορη και το πρόβλημα διογκώνεται από την ανάγκη οι φορητές συσκευές να έχουν μεγαλύτερη επεξεργαστική δύναμη και λειτουργικότητα. Έτσι, πρέπει να δημιουργηθούν τρόποι μετάδοσης με χαμηλή κατανάλωση, σε συνδυασμό με τη βελτίωση στους προαναφερθέντες τομείς.

Μία λύση ώστε να βρεθεί τη χρυσή τομή ανάμεσα στην αποδοτικότητα του φάσματος και τη χρήση σχημάτων μετάδοσης με χαμηλή κατανάλωση, είναι τα συστήματα που προσφέρουν ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης.

Εκτός από τον πομπό, μεγάλη κατανάλωση σε μία φορητή συσκευή έχουν και οι επεξεργαστές σήματος. Έτσι είναι καλό να σχεδιαστούν πιο αποδοτικοί αλγόριθμοι. Υπάρχουν μέθοδοι που δίνουν χαμηλή κατανάλωση θέτοντας τη συσκευή σε κατάσταση sleep ή idle, αλλά σε αυτή τη περίπτωση απαιτείται η δυνατότητα γρήγορης αλλαγής από τέτοιες καταστάσεις και μόνο όταν είναι

## **2.4 Προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα**

---

απαραίτητο.

### **2.4.6 Ασφάλεια**

Η ασφάλεια είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας. Από την οπτική του τελικού χρήστη, το σημαντικό είναι να διατηρούνται τα προσωπικά δεδομένα μακριά από άλλους χρήστες αλλά και να εξασφαλίζεται η ακεραιότητά τους, πράγμα που επιτυγχάνεται με τη κρυπτογράφηση. Από τη μεριά του παρόχου, είναι πολύτιμη η αποτροπή της χρήσης του δικτύου από μη πιστοποιημένους χρήστες. Αυτό επιτυγχάνεται με μεθόδους ισχυρής ταυτοποίησης και ελέγχου πρόσβασης, οι οποίες όμως δε θα πρέπει να δυσανασχετούν τους αυθεντικοποιημένους χρήστες κατά την ταυτοποίησή τους. Άλλες πτυχές της ασφάλειας, έχουν να κάνουν με κακόβουλους χρήστες που προσπαθούν να μειώσουν την απόδοση του δικτύου και να στείλουν ιούς.

### **2.4.7 Ασύρματο IP**

Το IP είναι το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο στα ενσύρματα δίκτυα. Συνεπώς η χρήση αυτού του πρωτοκόλλου και για ασύρματα δίκτυα θα βοηθήσει την ευκολότερη υποστήριξη για τις εφαρμογές που βασίζονται σε αυτό, αλλά και τη διασύνδεση με άλλες τεχνολογίες. Τα πρωτόκολλα βασισμένα στο IP είναι επίσης απλά και ευέλικτα, αλλά όχι αποτελεσματικά και εύρωστα. Αυτά τα μειονεκτήματα όμως δεν αποτέλεσαν πρόβλημα για τα ενσύρματα δίκτυα λόγω της φύσης τους. Σε ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να είναι (1) πιο αποτελεσματικά όσον αφορά το εύρος ζώνης, (2) να προσφέρουν το απαιτούμενο QoS και (3) να διαχειρίζονται τερματικά που κινούνται και αλλάζουν θέση στο δίκτυο.



## Κεφάλαιο 2. Η ασύρματη ευρυζωνικότητα

Απαιτήσεις υπηρεσίας	Τεχνική πρόκληση	Πιθανή λύση
NLOS κάλυψη	Μετριασμός της απόσβεσης λόγω πολλαπλών μονοπατιών και της παρεμβολής	Ποικιλία, κωδικοποίηση καναλιού κλπ.
Υψηλός ρυθμός δεδομένων και υψηλή χωρητικότητα	Επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης	Κυβελωτή αρχιτεκτονική, προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση κλπ.
	Αποφυγή παρεμβολής συμβόλου	OFDM κλπ
	Μετριασμός της παρεμβολής	Προσαρμοστικές κεραιές, τμηματοποίηση, δυναμική κατανομή καναλιών, CDMA κλπ.
QoS	Υποστήριξη φωνής, δεδομένων, βίντεο κλπ με ένα δίκτυο πρόσβασης	Πολύπλοκο επίπεδο MAC
	Διαχείριση πόρων ραδιοζεύξης	Αποδοτικοί αλγόριθμοι προγραμματισμού
	Από άκρη σε άκρη ποιότητα υπηρεσίας	IP QoS: DiffServ, IntSev, MPLS, κλπ
Κινητικότητα	Δυνατότητα πρόσβασης ανεξαρτήτως τοποθεσίας	Βάση δεδομένων roaming, ανανέωση τοποθεσίας
	Συνέχιση συνόδου καθώς κινείται από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης σε κάποιο άλλο	Αδιάκοπη εναλλαγή
	Συνέχιση συνόδου σε διαφορετικά δίκτυα	Κινητικότητα βασισμένη στο IP: κινητό IP
Φορητότητα	Μείωση κατανάλωσης ενέργειας της μπαταρίας σε φορητά τερματικά	Ενεργειακά αποδοτική διαμόρφωση, τρόποι λειτουργίας sleep & idle, γρήγορη εναλλαγή ανάμεσα στους τρόπους λειτουργίας, κυκλώματα χαμηλής κατανάλωσης, αποδοτικοί αλγόριθμοι επεξεργασίας σημάτων
Ασφάλεια	Προστασία ιδιωτικότητας και ακεραιότητας των δεδομένων	Κρυπτογράφηση
	Αποτροπή μη εγκεκριμένης πρόσβασης στο δίκτυο	Αυθεντικοποίηση και έλεγχος πρόσβασης
Χαμηλό κόστος	Παροχή αποδοτικής και αξιόπιστης επικοινωνίας με χρήση της αρχιτεκτονικής IP	Προσαρμογή των IP πρωτοκόλλων για ασύρματα δίκτυα

Πίνακας 2.4: Επισκόπηση των τεχνικών σχεδιαστικών προκλήσεων της ασύρματης ευρυζωνικότητας

## Κεφάλαιο 3

# Επισκόπηση του WiMAX

Το WiMAX Forum έχει αρχίσει να πιστοποιεί προϊόντα που είναι συμβατά με το πρότυπο για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Βασίζεται σε πρότυπα των ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων (WMAN) που αναπτύχθηκαν από την ομάδα του IEEE 802.16.

### 3.1 Υπόβαθρο του IEEE 802.16 και του WiMAX

Η ομάδα IEEE 802.16 σχηματίστηκε το 1998 για να αναπτύξει ένα ασύρματο ευρυζωνικό σύστημα που θα βασίζεται στο LOS και θα λειτουργεί στη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 10 και 66GHz. Το πρότυπο που προέκυψε (το Δεκέμβριο του 2001) βασίστηκε στο φυσικό επίπεδο (PHY) απλής φέρουσας και στο MAC επίπεδο με το TDM.

Με την επέκταση του IEEE 802.16a, συμπεριλήφθηκε η μπάντα 2-11GHz με χρήση του OFDM στο φυσικό επίπεδο, ενώ υπήρξαν και προσθήκες στο επίπεδο MAC, όπως το OFDMA. Οι λύσεις του WiMAX που ήταν βασισμένες στο πρότυπο του 2004 στόχευαν σε σταθερές εφαρμογές και αναφέρονται ως σταθερό WiMAX [4]. Το Δεκέμβριο του 2005 προστέθηκε και η υποστήριξη κινητικότητας, φτάνοντας στο πρότυπο που ήταν η βάση για νομαδικές και κινητές εφαρμογές και αποκαλείται κινητό WiMAX [5].

Τα διάφορα πρότυπα του IEEE 802.16 έχουν θεμελιώδεις διαφορές που έχουν να κάνουν με τις επιλογές στο φυσικό επίπεδο, στην αρχιτεκτονική MAC, στη συχνότητα λειτουργίας κλπ. Αυτά τα πρότυπα αναπτύχθηκαν για να ικανοποιήσουν διάφορες εφαρμογές και τύπους υλοποιήσεων και έτσι προσφέρουν μία πληθώρα από επιλογές σχεδίασης, καθιστώντας το IEEE 802.16 ένα σύνολο από πρότυπα και όχι ένα πρότυπο μόνο.

Το WiMAX Forum ορίζει ένα περιορισμένο αριθμό προφίλ συστημάτων και προφίλ πιστοποιήσεων. Το προφίλ συστημάτων ορίζει ένα υποσύνολο υποχρεωτικών και προαιρετικών επιλογών για το φυσικό και το MAC επίπεδο.

### Κεφάλαιο 3. Επισκόπηση του WiMAX

Πρότυπο	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Κατάσταση	Ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2001	Ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2004	Ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2005
Μπάντα συχνοτήτων	10GHz - 66GHz	2GHz - 11GHz	2GHz - 11GHz (για σταθερές), 2GHz - 6GHz (για κινητές εφαρμογές)
Εφαρμογή	Σταθερό LOS	Σταθερό NLOS	Σταθερό και κινητό NLOS
Αρχιτεκτονική MAC	Σημείο-προς-πολλά-σημεία, mesh (πλέγμα)	Σημείο-προς-πολλά-σημεία, mesh	Σημείο-προς-πολλά-σημείο, mesh
Σχήμα μετάδοσης	Απλής φέρουσας μόνο	Απλής φέρουσας, 256 OFDM ή 2048 OFDM	Απλής φέρουσας, 256 OFDM ή κλιμακωτό OFDM με 128, 512, 1024, ή 2048 υποφέρουσες
Διαμόρφωση	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Ρυθμός δεδομένων	32Mbps - 134,4Mbps	1Mbps - 75Mbps	1Mbps - 75Mbps
Πολυπλεξία	TDM/TDMA	TDM/TDMA/OFDMA	TDM/TDMA/OFDMA
Διπλεξία	TDD και FDD	TDD και FDD	TDD και FDD
Εύρος ζώνης καναλιού	20MHz, 25MHz, 28MHz	1,75MHz, 3,5MHz, 7MHz, 14MHz, 1,25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8,75MHz	1,75MHz, 3,5MHz, 7MHz, 14MHz, 1,25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8,75MHz
Περιγραφή διεπαφής αέρα	Ασύρματο MAN-SC	Ασύρματο MAN-SCa Ασύρματο MAN-OFDM Ασύρματο MAN-OFDMA Ασύρματο HUMAN	Ασύρματο MAN-SCa Ασύρματο MAN-OFDM Ασύρματο MAN-OFDMA Ασύρματο HUMAN
Υλοποίηση WiMAX	Καμία	256 - OFDM ως σταθερό WiMAX	Κλιμακωτό OFDMA ως κινητό WiMAX

Πίνακας 3.1: Πρότυπα IEEE 802.16

Μάλιστα μία συγκεκριμένη δυνατότητα των προφίλ συστημάτων του WiMAX μπορεί να διαφέρει από το αρχικό πρότυπο του IEEE. Το προφίλ πιστοποιήσεων ορίζεται ως μία ιδιαίτερη εκδοχή ενός προφίλ συστήματος, όπου δηλώνονται η συχνότητα λειτουργίας, το κανάλι και ο τρόπος πολύπλεξης.

Το WiMAX Forum έχει ορίσει 5 προφίλ σταθερών πιστοποιήσεων και 14 προφίλ κινητών πιστοποιήσεων. Υπάρχουν 2 προφίλ σταθερών πιστοποιήσεων για τα οποία έχει καθοριστεί εξοπλισμός, στο ένα χρησιμοποιείται το FDD, ενώ στο άλλο το TDD.

Μετά το 2005 το ενδιαφέρον της ομάδας του WiMAX μεταφέρθηκε στην ανάπτυξη προφίλ συστημάτων κινητού WiMAX, βασισμένα στο τελευταίο πρότυπο. Όλα τα προφίλ κινητού WiMAX χρησιμοποιούν κλιμακωτό OFDMA σαν φυσικό επίπεδο. Επίσης, όλα τα υποψήφια προφίλ κινητών πιστοποιήσεων

### 3.2 Εξέχοντα χαρακτηριστικά του WiMAX

βασίζονται στο TDD, που αν και προτιμάται, στο μέλλον μπορεί να προκύψει ανάγκη για τη χρήση του FDD.

### 3.2 Εξέχοντα χαρακτηριστικά του WiMAX

Δείκτης μπάντας	Μπάντα συχνοτήτων	Εύρος ζώνης καναλιού	Μέγεθος OFDM FFT	Διπλεξία	Σημειώσεις
Προφίλ Σταθερού WiMAX					
1	3,5GHz	3,5MHz	256	FDD	Προϊόντα που έχουν έγκριση
		3,5MHz	256	TDD	
		7MHz	256	FDD	
		7MHz	256	TDD	
2	5,8GHz	10MHz	256	TDD	
Προφίλ Κινητού WiMAX					
1	2,3 - 2,4GHz	5MHz	512	TDD	Και οι 2 μπάντες πρέπει να υποστηρίζονται από τον κινητό σταθμό
		10MHz	1024	TDD	
		8,75MHz	1024	TDD	
2	2,305 - 2,320 GHz, 2,345 - 2,360GHz	3,5MHz	512	TDD	
		5MHz	512	TDD	
		10MHz	1024	TDD	
3	2,496GHz - 2,69GHz	5MHz	512	TDD	Και οι 2 μπάντες πρέπει να υποστηρίζονται από τον κινητό σταθμό
		10MHz	1024	TDD	
4	3,3 - 3,4GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	10242	TDD	
		10MHz	1024	TDD	
5	3,4 - 3,8GHz 3,4 - 3,6GHz 3,6 - 3,8GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	10242	TDD	
		10MHz	1024	TDD	

Πίνακας 3.2: Προφίλ σταθερών και κινητών πιστοποιήσεων

Το WiMAX προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο από χαρακτηριστικά με μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τις επιλογές υλοποίησης και τις προσφερόμενες υπηρεσίες. Μερικά από τα πιο ξεχωριστά γνωρίσματα είναι:

**Φυσικό επίπεδο βασισμένο στο OFDM:** Το φυσικό επίπεδο είναι βασισμένο στο OFDM, μία μέθοδος που προτιμάται ευρέως διότι προσφέρει αντίσταση στα πολλαπλά μονοπάτια και επιτρέπει τη λειτουργία σε συνθήκες NLOS.

**Πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων:** Ο μέγιστος ρυθμός που μπορεί να φτάσει το WiMAX όταν λειτουργεί στα 20MHz είναι τα 74Mbps. Χρησιμοποιώντας το φάσμα των 10MHz, το TDD και αναλογία λήψης-αποστολής 3 προς 1, ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει δεδομένα με ρυθμό 25Mbps και να στέλνει με 6,7Mbps. Αυτές οι τιμές είναι εφικτές με χρήση της διαμόρφωσης 64 QAM, ενώ σε καλές συνθήκες και με πολλαπλές κεραιές μπορεί να επιτευχθούν ακόμα υψηλότεροι ρυθμοί.

**Κλιμακωτό εύρος ζώνης:** Το WiMAX έχει κλιμακωτή αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο και επιτρέπει στο ρυθμό δεδομένων να προσαρμόζεται ανάλογα με το εύρος ζώνης. Για παράδειγμα, το πλήθος των bit που χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη συχνότητα που έχει το κανάλι. Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί να γίνεται δυναμικά, ώστε να μπορεί ο χρήστης να μεταφέρεται από το ένα δίκτυο σε ένα άλλο με διαφορετικό εύρος ζώνης.

**Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding, AMC):** Υποστηρίζονται διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης και διόρθωσης λαθών. Το AMC είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός για να μεγιστοποιηθεί το throughput σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι. Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος καλεί την καλύτερη μέθοδο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που διατίθεται, ώστε ο κάθε χρήστης να έχει τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει η σύνδεσή του.

**Επαναμεταδόσεις επιπέδου σύνδεσης:** Για ενισχυμένη αξιοπιστία, το WiMAX προσφέρει αυτόματη επαναμετάδοση (Automatic Retransmission Request, ARQ) στο επίπεδο σύνδεσης. Σε τέτοια συστήματα, για κάθε πακέτο που παραλαμβάνει ο λήπτης πρέπει να αποσταλεί ένα μήνυμα επιβεβαίωσης. Αν δεν γίνει αυτό, τότε θεωρείται ότι το πακέτο χάθηκε και επαναμεταδίδεται.

**Υποστήριξη για TDD και FDD:** Τα πρότυπα του IEEE μετά το 2004 υποστηρίζουν τα TDD και FDD καθώς και half-duplex FDD, που απευθύνεται σε χαμηλού κόστους υλοποιήσεις. Το TDD προτιμάται λόγω των πλεονεκτημάτων του: (1) ευελιξία στην επιλογή των ρυθμών μετάδοσης για αποστολή και λήψη, (2) δυνατότητα διαπίστωσης της αμοιβαιότητας του καναλιού, (3) δυνατότητα λειτουργίας σε μοναδικό φάσμα και (4) λιγότερο πολύπλοκη σχεδίαση του πομποδέκτη. Όλα τα αρχικά προφίλ του WiMAX βασίζονται στο TDD, εκτός των 2 καθορισμένων.

**OFDMA:** Το κινητό WiMAX χρησιμοποιεί το OFDM σαν τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Το OFDMA εξερευνά την ποικιλία σε συχνότητες και χρήστες, ώστε να βελτιώνεται η χωρητικότητα.

**Δυναμική και ευέλικτη διανομή πόρων ανά χρήστη:** Η διανομή των πόρων ελέγχεται από τον σταθμό βάσης. Η χωρητικότητα μοιράζεται ανάμεσα σε πολλούς χρήστες ανάλογα με τις απαιτήσεις τους, χρησιμοποιώντας το TDD. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος OFDMA-PHY, γίνεται πολυπλεξία στη συχνότητα. Το πρότυπο επιτρέπει να διανέμονται οι πόροι με βάση το χρόνο, τη συχνότητα και το χώρο.

**Υποστήριξη για αναβαθμισμένες τεχνικές κεραιάς:** Στο WiMAX επιτρέπεται η χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών, που χρησιμοποιούνται για να βελτιωθεί η ολική χωρητικότητα του συστήματος και η αποδοτικότητα του φάσματος.

**QoS:** Το επίπεδο MAC του WiMAX έχει αρχιτεκτονική προσαρμοσμένη στη σύνδεση, που είναι σχεδιασμένη για να υποστηρίξει πολυποικίλες εφαρμογές, όπως υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων. Το σύστημα μπορεί να προσφέρει σταθερό ρυθμό bit, μεταβαλλόμενο, πραγματικού και μη χρόνου ροή κίνησης,

### 3.3 Φυσικό επίπεδο

---

καθώς και best-effort Το επίπεδο είναι σχεδιασμένο ώστε να εξυπηρετεί ένα μεγάλο αριθμό χρηστών, με πολλαπλές συνδέσεις ανά τερματικό, με τις δικές της απαιτήσεις για QoS η κάθε μία.

**Εύρωστη ασφάλεια:** Υποστηρίζεται η ισχυρή κρυπτογράφηση, χρησιμοποιώντας το πρότυπο AES (Advanced Encryption Standard) και υπάρχει πρωτόκολλο προστασίας δεδομένων και διαχείρισης κλειδιών. Το σύστημα επίσης προσφέρει ευέλικτη αρχιτεκτονική ταυτοποίησης βασισμένη στο EAP (Extensible Authentication Protocol), που επιτρέπει μία σειρά από διαπιστευτήρια, όπως όνομα χρήστη και κωδικό, ψηφιακά πιστοποιητικά και έξυπνες κάρτες.

**Υποστήριξη της κινητικότητας:** Το κινητό WiMAX, έχει μηχανισμούς που εξασφαλίζουν αδιάκοπη εναλλαγή κεραιών, αλλά και μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, ώστε να παρατείνεται η διάρκεια της μπαταρίας των φορητών συσκευών.

**Αρχιτεκτονική βασισμένη στο IP:** Το WiMAX Forum έχει ορίσει σαν αναφορά μία αρχιτεκτονική δικτύου που βασίζεται στην πλατφόρμα του IP. Όλες οι υπηρεσίες βασίζονται σε πρωτόκολλα IP για τη μετάδοση από άκρη σε άκρη, το QoS, τη διαχείριση συνόδου, την ασφάλεια και την κινητικότητα. Το IP επιτρέπει στο WiMAX να μην αυξηθεί το κόστος του, να έχει εύκολη διασύνδεση με άλλα είδους δίκτυα και να εκμεταλλευτεί τη πλούσια ποικιλία εφαρμογών που αναπτύχθηκαν με αυτό το πρωτόκολλο.

### 3.3 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX είναι βασισμένο στο OFDM, που είναι ένας τρόπος μετάδοσης που δίνει υψηλή ταχύτητα δεδομένων, βίντεο και πολυμέσων, σε συνθήκες NLOS ή πολλαπλών μονοπατιών.

#### 3.3.1 Τα βασικά του OFDM

Το OFDM είναι διαμόρφωση πολλαπλής φέρουσας, δηλαδή μία ροή με υψηλό ρυθμό bit διαιρείται σε ροές με χαμηλότερο ρυθμό και κάθε μία διαμορφώνεται σε διαφορετική φέρουσα. Με αυτή τη μέθοδο η διάρκεια που χρειάζεται για να μεταδοθεί ένα σύμβολο, ενώ αρχικά είναι πολύ μικρή, χωρίζοντας τις ροές γίνεται μεγαλύτερη.

Το OFDM είναι μία αποδοτική έκδοση της διαμόρφωσης πολλαπλής φέρουσας. Η κατάλληλη επιλογή της συχνότητας της πρώτης βοηθητικής φέρουσας και του εύρους ζώνης ανάλογα με το πλήθος τους, έχει σαν αποτέλεσμα όλες οι φέρουσες να είναι ορθογώνιες η μία προς την άλλη. Μάλιστα το σήμα του OFDM είναι ίσο με τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform) της ακολουθίας δεδομένων, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πολύ εύκολο να υλοποιηθεί.

Ένας τρόπος για να εξαιρεθεί το φαινόμενο ISI είναι με την προσθήκη ενός διαστήματος ασφαλείας, αλλά τότε έχουμε σπατάλη ενέργειας και μείωση

της αποτελεσματικότητας του εύρους ζώνης.

Για ένα δοθέν εύρος ζώνης, ένας μεγάλος FFT, μειώνει το χώρο για τις βοηθητικές φέρουσες και αυξάνει το χρόνο συμβόλου. Έτσι γίνεται εύκολη η αποτροπή της καθυστέρησης λόγω πολλαπλών μονοπατιών, αλλά ένας μειωμένος χώρος για τις φέρουσες κάνει το σύστημα ευάλωτο.

#### 3.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του OFDM

Πλεονεκτήματα :

- Μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα: Το OFDM μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας FFT/IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) και μάλιστα οι επεξεργαστικές απαιτήσεις αυξάνονται ελάχιστα με το ρυθμό δεδομένων ή το εύρος ζώνης. Η πολυπλοκότητα είναι σαφώς πιο χαμηλή σε σύγκριση με ένα σύστημα equalizer.
- Ομαλή μείωση της απόδοσης με μεγαλύτερη καθυστέρηση: Η απόδοση ενός OFDM συστήματος μειώνεται σταδιακά καθώς η καθυστέρηση ξεπερνά την τιμή για την οποία έχει σχεδιαστεί. Το OFDM ταιριάζει στην προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, που επιτρέπει στο σύστημα να εκμεταλλευτεί στο έπακρο τις συνθήκες του διαθέσιμου καναλιού.
- Εκμετάλλευση της ποικιλίας συχνοτήτων: Με το OFDM χρησιμοποιούνται βοηθητικές φέρουσες, έτσι ώστε το σύστημα να είναι ανθεκτικό στα λάθη.
- Πολλαπλή πρόσβαση: Μια εξέλιξη του OFDM είναι το OFDMA, όπου υπάρχει η δυνατότητα να έχουν πρόσβαση πολλοί χρήστες. Με σχετικά αργά μεταβαλλόμενα κανάλια, είναι δυνατό να ενισχυθεί η χωρητικότητα, προσαρμόζοντας το ρυθμό δεδομένων κάθε χρήστη ανάλογα με το SNR.
- Ανθεκτικότητα στις παρεμβολές στενής ζώνης: Με το OFDM υπάρχει ανθεκτικότητα, αφού οι παρεμβολές επηρεάζουν μόνο μία βοηθητική φέρουσα.
- Συνεπής αποδιαμόρφωση: Είναι σχετικά εύκολο να γίνει εκτίμηση του καναλιού σε ένα OFDM σύστημα.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα, τα συστήματα με OFDM έχουν αρνητικά όπως ότι τα σήματα έχουν υψηλή αναλογία κορυφής προς μέσο όρο. Επίσης τέτοια σήματα έχουν μεγάλη ευαισθησία στο θόρυβο φάσης και στη διασκόρπιση συχνότητας.

### 3.3 Φυσικό επίπεδο

Παράμετροι	Σταθερό WiMAX OFDM-PHY	Κινητό WiMAX με κλιμακωτό OFDMA-PHY			
		128	<b>512</b>	1024	2048
Μέγεθος FFT	256	128	<b>512</b>	1024	2048
Πλήθος υποφερουσών δεδομένων	192	72	<b>360</b>	720	1440
Πλήθος πιλοτικών υποφερουσών	8	12	<b>60</b>	120	240
Πλήθος υποφερουσών για προστασία της μπάντας	56	44	<b>92</b>	184	368
Κυκλικό πρόθεμα ή χρόνος προστασίας ( $T_g/T_b$ )	1/32, 1/16, <b>1/8</b> , 1/4				
Ρυθμός υπερδειγματοληψίας ( $F_s/BW$ )	Εξαρτάται από το εύρος ζώνης: 7/6 για 256 OFDM, 8/7 για πολλαπλάσια του 1,75MHz και 28/25 για πολλαπλάσια του 1,25, 1,5, 2 ή 2,75MHz				
Εύρος ζώνης καναλιού (MHz)	3,5	1,25	5	10	20
Συχνότητα υποφέρουσας (KHz)	15,625	<b>10,94</b>			
Χρήσιμος χρόνος συμβόλου ( $\mu$ s)	64	<b>91,4</b>			
Χρόνος προστασίας ( $\mu$ s)	8	<b>11,4</b>			
Διάρκεια συμβόλου OFDM	72	<b>102,9</b>			
Πλήθος συμβόλων OFDM σε πλαίσιο 5ms	69	<b>48,0</b>			

Πίνακας 3.3: OFDM παράμετροι (Οι τιμές με έντονη γραφή αντιστοιχούν στα αρχικά προφίλ του WiMAX)

#### 3.3.3 OFDM παράμετροι του WiMAX

Στο σταθερό WiMAX χρησιμοποιείται OFDM φυσικού επιπέδου με 256 FFT, ενώ στο κινητό WiMAX χρησιμοποιείται φυσικό επίπεδο με κλιμακωτό OFDMA και FFT από 128 μέχρι 2048 bit.

Σταθερό WiMAX: Για αυτή την έκδοση, το FFT είναι σταθερό στα 256, με 192 βοηθητικές φέρουσες, 8 για εκτίμηση και συγχρονισμό και 56 για θωράκιση. Το περιθώριο μεταξύ των βοηθητικών φερουσών, διαφέρει ανάλογα με το εύρος ζώνης. Για μεγάλο εύρος ζώνης, μεγαλώνει το περιθώριο και μικραίνει ο χρόνος συμβόλου, πράγμα που σημαίνει ότι χρειάζεται περισσότερο τμήμα να αποδοθεί ως χρόνος ασφάλειας.

Κινητό WiMAX: Σε αυτή την έκδοση, το FFT κυμαίνεται από 128 μέχρι 2048. Όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνεται, αυξάνεται και το μέγεθος του FFT, έτσι ώστε το περιθώριο των βοηθητικών φερουσών να παραμένει πάντα στα 10,94KHz, έτσι η διάρκεια του OFDM συμβόλου διατηρείται σταθερή. Επομένως, το FFT είναι 128 όταν το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 1,25MHz, 512 για 5Mhz, 1024 για 10Mhz και 2048 για 20Mhz. Αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που για συμβατότητα με άλλα δίκτυα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άλλο εύρος ζώνης, πχ 8,75, τότε το FFT θα είναι 1024, με αλλαγή στο περιθώριο.



### 3.3.4 OFDMA

Οι διαθέσιμες βοηθητικές φέρουσες μπορούν να διαιρεθούν σε διαφορετικές ομάδες που λέγονται υποκανάλια. Στο σταθερό WiMAX βασισμένο στο OFDM, ορίζονται 16 υποκανάλια, από τα οποία 1, 2, 4, 8 ή όλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το σταθμό του χρήστη για αποστολή.

Ωστόσο στο κινητό WiMAX που βασίζεται στο OFDMA επιτρέπεται η τεχνική με τα υποκανάλια και για την αποστολή και για τη λήψη. Σε αυτή τη περίπτωση, διαφορετικά υποκανάλια μπορεί να εκχωρηθούν σε διαφορετικούς χρήστες ώστε να επιτευχθεί η πολλαπλή πρόσβαση.

Τα υποκανάλια μπορούν να αποτελούνται από συνεχόμενες βοηθητικές φέρουσες, ή ψευδοτυχαία κατανομημένες στο φάσμα συχνοτήτων. Στο WiMAX ορίζονται διάφορα είδη αυτής της τεχνικής, μία από αυτές λέγεται PUSC (Partially Used Sub-Channel) και είναι υποχρεωτική για όλες τις υλοποιήσεις κινητού WiMAX.

Όταν τα υποκανάλια έχουν συνεχόμενες βοηθητικές φέρουσες, αποκαλείται AMC μπάντας και επιτρέπει στους σχεδιαστές να εκμεταλλευτούν την ποικιλία των χρηστών, που με τη σειρά της μπορεί να προσφέρει σημαντικές απολαβές στη συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Γενικά, τα συνεχόμενα υποκανάλια είναι πιο κατάλληλα για σταθερές και μικρής κινητικότητας εφαρμογές.

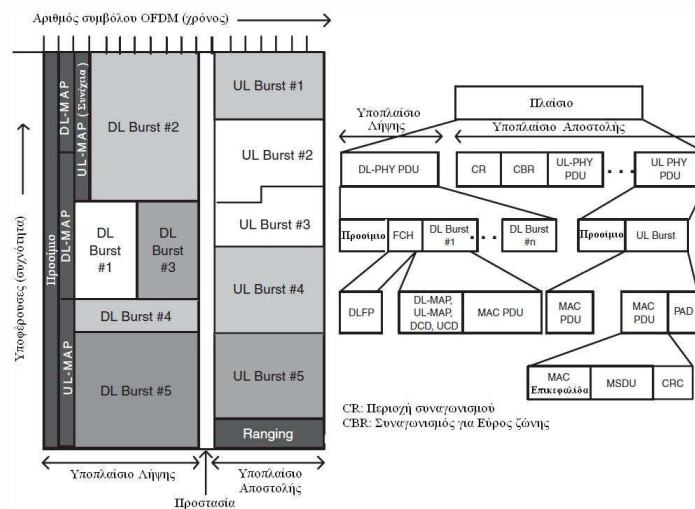
### 3.3.5 Δομή χρονοσχισμής και πλαισίου

Η ελάχιστη ποσότητα χρόνου ή συχνότητας που μπορεί να διανεμηθεί σε ένα σύστημα WiMAX για μία δεδομένη σύνδεση, λέγεται χρονοσχισμή. Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη διανομή των χρονοσχισμών, κάθε μία από τις οποίες αποτελεί ένα υποκανάλι. Μία διαδοχική σειρά από χρονοσχισμές αφιερωμένες σε ένα χρήστη αποκαλείται περιοχή δεδομένων εκείνου του χρήστη. Οι περιοχές δεδομένων μπορούν να δοθούν σε διάφορους χρήστες ανάλογα με τις απαιτήσεις, τις ανάγκες για QoS και τις συνθήκες του καναλιού.

Ένα πλαίσιο του OFDM και του OFDMA με τρόπο λειτουργίας TDD, μπορεί να χωριστεί σε δύο υποπλαίσια, σε ένα πλαίσιο λήψης και σε ένα πλαίσιο αποστολής με ένα κενό ασφάλειας ανάμεσά τους. Η αναλογία ανάμεσα στα 2 υποπλαίσια μπορεί να είναι από 3 : 1 μέχρι 1 : 1. Το WiMAX υποστηρίζει το FDD και στη περίπτωση αυτή η δομή του πλαισίου είναι ίδια, μόνο που κάθε υποπλαίσιο μεταδίδεται ταυτόχρονα από διαφορετικές φέρουσες. Οι περισσότερες υλοποιήσεις του WiMAX υποστηρίζουν τον τρόπο λειτουργίας TDD, επειδή αυτός ο τρόπος επιτρέπει να μοιράζεται το εύρος ζώνης πιο ευέλικτα μεταξύ αποστολής και λήψης, δεν απαιτεί ζευγαρωτό φάσμα και έχει απλούστερο σχεδιασμό πομποδεκτών. Το μειονέκτημα του TDD είναι ότι απαιτεί συγχρονισμό ανάμεσα στους σταθμούς βάσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, το υποπλαίσιο λήψης ξεκινάει με ένα πρόθεμα λήψης που χρησιμοποιείται από το φυσικό επίπεδο για να συντονιστούν

### 3.3 Φυσικό επίπεδο



Σχήμα 3.1: Δείγμα της δομής του TDD πλαισίου για το κινητό WiMAX

ο χρόνος, η συχνότητα και η αρχική εκτίμηση του καναλιού. Το πρόθεμα λήψης ακολουθείται από την επικεφαλίδα ελέγχου του πλαισίου (FCH, Frame Control Header), που δίνει πληροφορίες για το μέγεθος του μηνύματος MAP (μηνύματα χαρτογράφησης), τη διαμόρφωση, τη κωδικοποίηση και τις χρησιμοποιούμενες βοηθητικές φέρουσες. Πολλοί χρήστες κατανέμονται στο ίδιο πλαίσιο, όπως αναφέρεται στα μηνύματα MAP λήψης (DL-MAP, DownLink) και αποστολής (UL-MAP, UpLink). Στα μηνύματα MAP ορίζονται οι περιοχές δεδομένων των χρηστών, ενώ περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη διαμόρφωση και τη κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται στη σύνδεση. Επειδή τα μηνύματα αυτά περιέχουν κρίσιμες πληροφορίες, που πρέπει να φτάσουν σε κάθε χρήστη, αποστέλλονται μέσω μίας πολύ αξιόπιστης σύνδεσης, όπως BPSK (Binary Phase Shift Keying). Από την άλλη φορτώνουν με πολλές πληροφορίες τις επικεφαλίδες, ειδικά όταν υπάρχουν πολλοί χρήστες με μικρά πακέτα (πχ VoIP). Για να εξαιρεθεί αυτό το πρόβλημα, σε συστήματα με κινητό WiMAX, τα μηνύματα ελέγχου μεταδίδονται προς τους διάφορους χρήστες σε υψηλότερους ρυθμούς, ενώ μπορεί να είναι και συμπιεσμένα για επιπλέον αποδοτικότητα.

Το WiMAX είναι αρκετά ευέλικτο όσον αφορά το πως πολυπλέκονται πολλοί χρήστες σε ένα μόνο πλαίσιο. Ένα μόνο πλαίσιο λήψης μπορεί να περιέχει δεδομένα διαφορετικού μεγέθους και τύπου για διαφορετικούς χρήστες. Το μέγεθος του πλαισίου είναι μεταβλητό από 2ms ως 20ms και μπορεί να περιέχει πολλά σταθερού και μεταβλητού μεγέθους πακέτα. Αρχικά το WiMAX υποστήριζε πλαίσια των 5ms.

Το υποπλαίσιο αποστολής είναι φτιαγμένο για αποστολή από διάφορους χρήστες. Ένα μέρος του υποπλασίου αυτού χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς όπως ρυθμίσεις κλειστού βρόχου για τη συχνότητα, το χρόνο και την ενέργεια κατά την είσοδο στο δίκτυο, αλλά και μετά σε περιοδική βάση. Ε-

πίσης το κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αιτήσεις εύρους ζώνης, ενώ μπορούν να αποσταλούν δεδομένα με best-effort τρόπο, όταν έχουν πολύ μικρό μέγεθος. Το υποπλαίσιο αποστολής έχει ένα κανάλι για αποστολή στο σταθμό βάσης από το σταθμό χρήστη, πληροφοριών σχετικές με την ποιότητα του καναλιού, αλλά και αποστολή των ACK (ACKnowledgement).

Το WiMAX διαχειρίζεται τις διακυμάνσεις του χρόνου με επανάληψη των προθεμάτων πιο συχνά. Μικρά προθέματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά από 8, 16 ή 32 σύμβολα, ενώ στο ρεύμα λήψης μπορούν να εισαχθούν στην αρχή κάθε ριπής. Υπολογίστηκε ότι η ύπαρξη ενός μικρού προθέματος κάθε 10 σύμβολα, μπορεί να επιτρέψει κίνηση μέχρι 150 χ/ω.

### 3.3.6 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο WiMAX

Το WiMAX υποστηρίζει μία ποικιλία από τρόπους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και επιτρέπει στο σχήμα να αλλάζει, ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Μπορούν να αποσταλούν πληροφορίες για την ποιότητα του καναλιού λήψης από το κινητό στάθμο προς το σταθμό βάσης. Για το κανάλι αποστολής, ο σταθμός βάσης υπολογίζει την ποιότητα με βάση τη ποιότητα του σήματος. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση αυξάνει σημαντικά την ολική χωρητικότητα του συστήματος.

Στο ρεύμα λήψης, οι τεχνικές QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) και 64 QAM είναι υποχρεωτικές για σταθερό και κινητό WiMAX. Το 64 QAM είναι προαιρετικό για το κανάλι αποστολής. Η κωδικοποίηση FEC (Forward Error Correction), με χρήση πολύπλοκων κωδίκων, είναι υποχρεωτική.

### 3.3.7 Ρυθμοί δεδομένων στο φυσικό επίπεδο

	Λήψη	Αποστολή
Διαμόρφωση	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM (BPSK για OFDMA-PHY προαιρετικά)	BPSK, QPSK, 16 QAM (64 QAM προαιρετικά)
Κωδικοποίηση	Υποχρεωτικά: κώδικες με ρυθμό 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Προαιρετικά: αναβαθμισμένοι κώδικες με ρυθμούς 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και κώδικες επανάληψης με ρυθμούς 1/2, 1/3, 1/5, LDPC, RS-Codes για OFDM-PHY	Υποχρεωτικά: κώδικες με ρυθμό 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Προαιρετικά: αναβαθμισμένοι κώδικες με ρυθμούς 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και κώδικες επανάληψης με ρυθμούς 1/2, 1/3, 1/5, LDPC

Πίνακας 3.4: Διαμόρφωση και κωδικοποίηση που υποστηρίζεται από το WiMAX

Επειδή το φυσικό επίπεδο είναι αρκετά ευέλικτο, οι ρυθμοί δεδομένων έχουν διακυμάνσεις με βάση τις παραμέτρους λειτουργίας. Τέτοιες παράμετροι είναι το εύρος ζώνης του καναλιού και ο τρόπος διαμόρφωσης και κωδικοποιί-

### 3.4 Επισκόπηση του επιπέδου MAC

Εύρος ζώνης καναλιού	3,5MHz		1,25MHz		5MHz		10MHz		8,75MHz	
Τρόπος ΡΗΥ	256 OFDM		128 OFDMA		512 OFDMA		1024		1024	
Υπερδειγματοληψία	8/7		28/25		28/25		28/25		28/25	
Διαμόρφωση και ρυθμός κωδικών	Ρυθμός δεδομένων Φυσικού επιπέδου (kbps)									
	Λ	A	Λ	A	Λ	A	Λ	A	Λ	A
BPSK, 1/2	946	326	Δεν διατίθεται							
QPSK, 1/2	1882	653	504	154	2520	653	5040	1344	4464	1120
QPSK, 3/4	2822	979	756	230	3780	979	7560	2016	6696	1680
16 QAM, 1/2	3763	1306	1008	307	5040	1306	10080	2688	8928	2240
16 QAM, 3/4	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64 QAM, 1/2	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64 QAM, 2/3	7526	2611	2016	614	10080	2611	20160	5376	17856	4480
64 QAM, 3/4	8467	2938	2268	691	11340	2938	22680	6048	20088	5040
64 QAM, 5/6	9408	3264	2520	768	12600	3264	25200	6720	22320	5600

Πίνακας 3.5: Ρυθμοί δεδομένων του Φυσικού επιπέδου για διάφορα εύρη ζώνης καναλιού

ησης που χρησιμοποιείται, ενώ επηρεάζουν και το πλήθος των υποκαναλιών, ο χρόνος ασφάλειας OFDM και ο ρυθμός δειγματοληψίας.

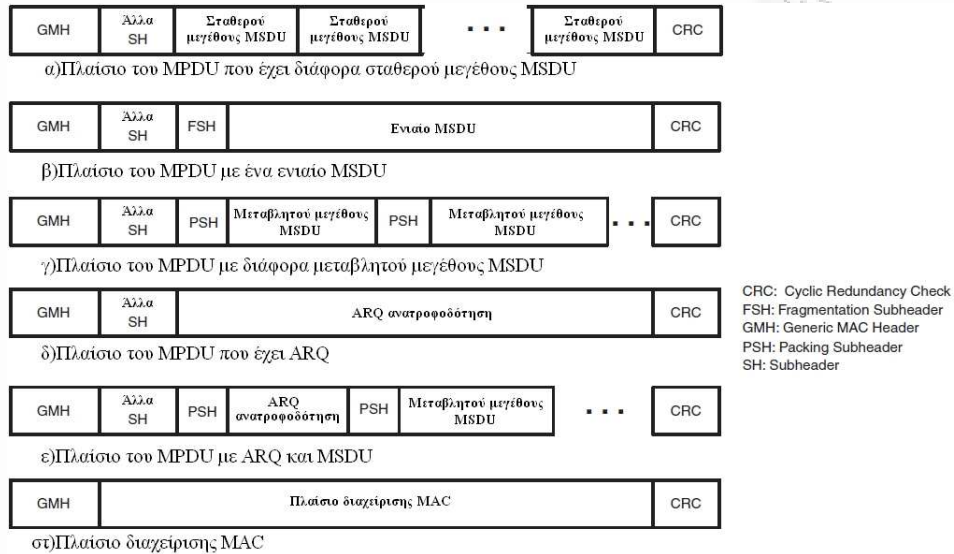
Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει ρυθμούς δεδομένων για διάφορα εύρη ζώνης.

### 3.4 Επισκόπηση του επιπέδου MAC

Ο κύριος σκοπός του επιπέδου MAC είναι να παρέχει αλληλεπίδραση ανάμεσα στα υψηλότερα επίπεδα μεταφοράς και το φυσικό επίπεδο. Το επίπεδο MAC λαμβάνει πακέτα από το ανώτερο επίπεδο (αποκαλούνται MSDU, MAC Service Data Units) και τα οργανώνει σε MPDU (MAC Protocol Data Units) για να μεταδοθούν από τον αέρα. Κατά τη λήψη, γίνεται η αντίστροφη διαδικασία. Στα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και 802.16e-2005 η σχεδίαση του MAC περιλαμβάνει ένα υποεπίπεδο επικάλυψης, που μπορεί να αλληλεπιδράσει με μία ποικιλία πρωτοκόλλων ανώτερων επιπέδων, όπως ο ATM (Asynchronous Transfer Mode), TDM φωνής, Ethernet, IP και άλλα μελλοντικά πρωτόκολλα. Το WiMAX υποστηρίζει το IP και το Ethernet λόγω της εδραιώσής τους. Το υποεπίπεδο επικάλυψης επίσης υποστηρίζει την απομάκρυνση της επικεφαλίδας MSDU, για να μειωθεί ο φόρτος από τις επικεφαλίδες σε κάθε πακέτο.

Το MAC είναι σχεδιασμένο από την αρχή ώστε να υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς bit, καθώς προσφέρει ποιότητα αντίστοιχη αυτής των ATM και DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification). Το MAC χρησιμοποιεί MPDU μεταβαλλόμενου μεγέθους και προσφέρει ευελιξία για την αποδοτική μετάδοση. Για παράδειγμα, πολλά MPDU του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους μπορούν να συνδυαστούν σε μία ριπή, ώστε να έχει μικρότερη επικεφαλίδα

### Κεφάλαιο 3. Επισκόπηση του WiMAX



Σχήμα 3.2: Παραδείγματα διάφορων πλαισίων MPDU

το φυσικό επίπεδο. Παρομοίως, πολλά MSDU μπορούν να συγχωνευθούν σε ένα MPDU, ώστε το MAC να βλέπει μικρότερες επικεφαλίδες. Επίσης, μεγάλα MSDU μπορούν να χωριστούν σε μικρότερα MPDU και να μεταδοθούν σε διαφορετικά πλαίσια.

Το Σχήμα 3.2 δείχνει ένα παράδειγμα για διάφορα πλαίσια MPDU. Κάθε πλαίσιο έχει μία επικεφαλίδα GMH (Generic MAC Header), μία ταυτότητα σύνδεσης (CID, Connection ID), το μέγεθος του πλαισίου, δείκτες για την ύπαρξη CRC (Cyclic Redundancy Check), άλλες επικεφαλίδες, αν το περιεχόμενο είναι κρυπτογραφημένο και με ποια λέξη. Το περιεχόμενο μπορεί να είναι μήνυμα μεταφοράς ή διαχείρισης. Εκτός από το MSDU, το περιεχόμενο μεταφοράς μπορεί να περιέχει αιτήσεις για εύρος ζώνης ή επαναμετάδοση και ο τύπος καθορίζεται από επικεφαλίδα. Το MAC επίσης υποστηρίζει ARQ, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαναμετάδοση MSDU και MPDU. Το μέγιστο μέγεθος πλαισίου είναι 2047, κάτι που δηλώνεται από το GMH.

#### 3.4.1 Μηχανισμοί πρόσβασης στο κανάλι

Το επίπεδο MAC του σταθμού βάσης στο WiMAX, είναι υπεύθυνο για τη διανομή του εύρους ζώνης σε όλους τους χρήστες. Η μόνη στιγμή που ο κινητός σταθμός έχει κάποιο έλεγχο πάνω στο εύρος ζώνης, είναι όταν υπάρχουν πολλαπλές σύνοδοι ή συνδέσεις με το σταθμό βάσης. Σε αυτή τη περίπτωση, ο σταθμός βάσης παραχωρεί στο κινητό σταθμό ένα μεγάλο εύρος ζώνης, το οποίο διαχωρίζει ο κινητός σταθμός ανάμεσα στις συνδέσεις. Για το κανάλι λήψης, ο σταθμός βάσης αφιερώνει εύρος ζώνης σε κάθε κινητό σταθμό, ανάλογα με τις ανάγκες της εισερχόμενης κυκλοφορίας, χωρίς να παρεμβαίνει

### 3.4 Επισκόπηση του επιπέδου MAC

ο κινητός σταθμός. Για το κανάλι αποστολής, η διανομή πόρων πρέπει να γίνεται με βάση τις αιτήσεις του κινητού σταθμού.

Το πρότυπο του WiMAX υποστηρίζει διάφορους μηχανισμούς ώστε ο κινητός σταθμός να αιτηθεί και να λάβει εύρος ζώνης για αποστολή. Ανάλογα με τις εκάστοτε παράμετρους κυκλοφορίας και QoS, περισσότεροι τέτοιοι μηχανισμοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Ο σταθμός βάσης δίνει κατά περιόδους, πόρους σε κάθε κινητό σταθμό, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να αιτηθεί εύρος ζώνης. Η διαδικασία λέγεται polling (δημοσκόπηση) και μπορεί να γίνει για ξεχωριστούς (unicast) είτε για ομάδες σταθμών (multicast). Σε ομάδες γίνεται όταν δεν υπάρχει αρκετό εύρος ζώνης ώστε να γίνει ξεχωριστά στον κάθε ένα και χρησιμοποιείται κοινή χρονοσχισμή από όλους τους κινητούς σταθμούς που επιθυμούν εύρος ζώνης. Το WiMAX ορίζει ένα μηχανισμό για την περίπτωση που κάποιοι κινητοί σταθμοί επιχειρήσουν να χρησιμοποιήσουν τη χρονοσχισμή ταυτόχρονα. Αν ο κινητός σταθμός έχει ήδη εύρος ζώνης, δεν ρωτάται αν θέλει, αλλά του επιτρέπεται να αιτηθεί περισσότερο.

#### 3.4.2 Ποιότητα υπηρεσίας (QoS)

Όνομασία υπηρεσίας ροής	Ορισμός παραμέτρων QoS	Παραδείγματα εφαρμογών
UGS	Μέγιστος ρυθμός που μπορεί να υποστηριχθεί Μέγιστη ανοχή για τη διάρκεια αποστολής ενός πακέτου Ανοχή στις διακυμάνσεις των καθυστερήσεων	VoIP χωρίς αποκοπή της σιωπής
rtPS	Ελάχιστος εξασφαλισμένος ρυθμός Μέγιστος ρυθμός που μπορεί να υποστηριχθεί Μέγιστη διάρκεια για την αποστολή ενός πακέτου Προτεραιότητα κυκλοφορίας	Αποστολή ήχου και βίντεο, κωδικοποίηση MPEG
nrtPS	Ελάχιστος εξασφαλισμένος ρυθμός Μέγιστος ρυθμός που μπορεί να υποστηριχθεί Προτεραιότητα κυκλοφορίας	FTP (File Transfer Protocol)
BE	Μέγιστος ρυθμός που μπορεί να υποστηριχθεί Προτεραιότητα κυκλοφορίας	Περιήγηση στον ιστό, μεταφορά δεδομένων (mail)
ertPS	Ελάχιστος εξασφαλισμένος ρυθμός Μέγιστος ρυθμός που μπορεί να υποστηριχθεί Μέγιστη ανοχή για τη διάρκεια αποστολής ενός πακέτου Ανοχή στις διακυμάνσεις των καθυστερήσεων Προτεραιότητα κυκλοφορίας	VoIP με αποκοπή της σιωπής

Πίνακας 3.6: Υπηρεσίες ροής που υποστηρίζονται από το MAC

Το QoS είναι ένα θεμελιώδες μέρος του σχεδιασμού του επιπέδου MAC. Το WiMAX δανείζεται μερικές από τις βασικές ιδέες για το σχεδιασμό του QoS από το DOCSIS. Επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό QoS με τον έλεγχο των καναλιών αποστολής και λήψης από το σταθμό βάσης. Πριν από οποιαδήποτε μετάδοση δεδομένων, ο σταθμός βάσης και ο κινητός σταθμός δημιουργούν

μία αμφίδρομη λογική ένωση (σύνδεση), μεταξύ των δύο επιπέδων MAC. Κάθε σύνδεση έχει μία ταυτότητα σύνδεσης (CID), που εξυπηρετεί σαν μία προσωρινή διεύθυνση για μεταδόσης δεδομένων στο συγκεκριμένο κανάλι. Επίσης ορίζονται τρεις συνδέσεις διαχείρισης: η βασική, η κύρια και η δευτερεύουσα.

Το WiMAX ορίζει επίσης τη ροή υπηρεσίας, που είναι μία αμφίδρομη ροή πακέτων με συγκεκριμένες παραμέτρους QoS και ταυτοποιείται με την ταυτότητα ροής υπηρεσίας (SFID, Service Flow ID). Οι παράμετροι QoS μπορεί να είναι προτεραιότητα, μέγιστη επιτρεπτή κυκλοφορία, τύπος προγραμματισμού, τύπο ARQ, μέγιστη καθυστέρηση, μηχανισμός αίτησης εύρους ζώνης, κανόνες μετάδοσης PDU (Protocol Data Unit) κλπ. Οι ροές υπηρεσίας μπορεί να προβλεφθούν μέσω ενός συστήματος διαχείρισης του δικτύου ή να δημιουργηθούν μέσω ενός μηχανισμού ειδοποίησης. Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για να εκδίδει το SFID και να το χαρτογραφεί σε μοναδικά CID.

Για να είναι συμβατό με διάφορες εφαρμογές, στο WiMAX ορίζονται 5 υπηρεσίες που πρέπει να υποστηρίζονται από το MAC επίπεδο του σταθμού βάσης, για τη μετάδοση δεδομένων και οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι υπηρεσίες.

1. UGS (Unsolicited Grant Services): έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει σταθερού μεγέθους πακέτα με σταθερό ρυθμό bit, χρησιμοποιείται από το VoIP χωρίς αποκοπή της σιωπής. Οι παράμετροι που ορίζονται είναι η μέγιστη κυκλοφορία που μπορεί να αντέξει και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης.
2. RtPS (Real-Time Polling Services): Υποστηρίζει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως βίντεο, με μεταβλητού μεγέθους πακέτα. Οι παράμετροι είναι ο ελάχιστος ρυθμός κυκλοφορίας, η μέγιστη κυκλοφορία που μπορεί να αντέξει και η πολιτική αίτηση/μετάδοσης.
3. NrtPS (Non-Real-Time Polling Services): Είναι σχεδιασμένη για να υποστηρίζει υπηρεσίες με ανοχές στην καθυστέρηση, όπως το FTP, που απαιτούν μεταβλητού μεγέθους δεδομένα με ελάχιστο εγγυημένο ρυθμό. Οι παράμετροι που ορίζονται για αυτή την υπηρεσία είναι ο ελάχιστος ρυθμός κυκλοφορίας, η μέγιστη κυκλοφορία που μπορεί να αντέξει, η πολιτική κυκλοφορίας και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης.
4. BE (Best-Effort): Προορίζεται για ροές δεδομένων, όπως η περιήγηση στο Internet, χωρίς καμία ελάχιστη εγγύηση. Οι παράμετροι εδώ είναι η μέγιστη κυκλοφορία που μπορεί να αντέξει, η προτεραιότητα κυκλοφορίας και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης.
5. ErtVR (Extended Real-Time Variable Rate): Υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως VoIP με αποκοπή σιωπής, που έχουν μεταβλητούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά απαιτούν εγγύηση για το ρυθμό και τη καθυστέρηση. Αυτή η υπηρεσία ορίζεται στο IEEE 802.16e-2005 και αποκαλείται και ertPS (Extended Real-Time Polling Services).



### 3.4 Επισκόπηση του επιπέδου MAC

---

Το WiMAX ορίζει διάφορες παραμέτρους και επιλογές για ένα αποτελεσματικό χρονοπρογραμματιστή:

- Υποστήριξη για ενδεδειγμένο ορισμό των απαιτήσεων QoS και μία ποικιλία μηχανισμών που ειδοποιούν αποτελεσματικά για τη κυκλοφορία και τις απαιτήσεις του QoS στο κανάλι αποστολής.
- Υποστήριξη για τρισδιάστατη δυναμική κατανομή πόρων στο επίπεδο MAC. Οι πόροι μπορούν να διανεμηθούν σε χρονοσχιστές χρόνου, συχνότητες και στο χώρο (πολλαπλές κεραιές).
- Υποστήριξη για γρήγορη ανατροφοδότηση πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του καναλιού, ώστε ο χρονοπρογραμματιστής να επιλέξει την κατάλληλη διαμόρφωση και κωδικοποίηση για κάθε διανομή.
- Υποστήριξη συνεχόμενων βοηθητικών φερουσών, ώστε ο χρονοπρογραμματιστής να εκμεταλλευτεί την ποικιλία των πολλών χρηστών, θέτοντας κάθε φέρουσα στο δυνατότερο υποκανάλι.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η υλοποίηση ενός αποτελεσματικού χρονοπρογραμματιστή είναι σημαντική για την ολική χωρητικότητα και απόδοση του συστήματος.

#### 3.4.3 Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας

Για την υποστήριξη φορητών συσκευών, το κινητό WiMAX έχει δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας, ώστε οι κινητοί σταθμοί να λειτουργούν για περισσότερη ώρα χωρίς να χρειάζονται επαναφόρτιση. Αυτό επιτυγχάνεται απενεργοποιώντας μέρη του κινητού σταθμού που δεν στέλνουν ή λαμβάνουν δεδομένα. Επίσης υπάρχει ο τρόπος λειτουργίας sleep, όταν η συσκευή είναι ανενεργή, στην οποία μπαίνει από μόνη της και είναι μη διαθέσιμη σε προκαθορισμένες περιόδους. Ορίζονται τρεις κλάσεις: στη πρώτη, το παράθυρο sleep αυξάνεται εκθετικά από μία ελάχιστη τιμή ως μία μέγιστη (για BE και nrtPS). Στη δεύτερη κλάση έχει σταθερού μήκους παράθυρο sleep (για UGS) και στη τρίτη κλάση όπου επιτρέπεται παράθυρο sleep για μία φορά, όταν ο κινητός σταθμός γνωρίζει πότε αναμένεται η επόμενη ροή. Για να γίνει εναλλαγή ενώ ο κινητός σταθμός βρίσκεται σε κατάσταση sleep, του επιτρέπεται να ψάχνει άλλους σταθμούς βάσης και να συλλέγει σχετικές πληροφορίες.

Η κατάσταση idle, επιτρέπει ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και στον κινητό σταθμό να απενεργοποιηθεί και να μην είναι συνδεδεμένος με κάποιο σταθμό βάσης, αλλά παρόλα αυτά να λαμβάνει κυκλοφορία. Όταν φτάσει κυκλοφορία από το κανάλι λήψης και είναι σε αυτή την κατάσταση, ο κινητός σταθμός ειδοποιείται από την ομάδα σταθμών βάσης με τους οποίους ανατέθηκε πριν γίνει idle. Αυτή η κατάσταση εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια από ότι η sleep, επειδή δεν χρειάζεται να κάνει εγγραφές ή εναλλαγές και επίσης βοηθά στο δίκτυο και τους σταθμούς βάσης, αφού υπάρχει



λιγότερη κυκλοφορία λόγω της έλλειψης εναλλαγών από ανενεργούς κινητούς σταθμούς.

#### 3.4.4 Υποστήριξη κινητικότητας

Το WiMAX υποστηρίζει τέσσερις διαφορετικούς τρόπους κινητικότητας:

1. Νομαδικός: Στο χρήστη επιτρέπεται να επανασυνδεθεί από ένα άλλο σημείο
2. Φορητός: Ο νομαδικός τρόπος πρόσβασης είναι διαθέσιμος από μία φορητή συσκευή όπως η κάρτα PC.
3. Απλή κινητικότητα: Ο χρήστης μπορεί να κινηθεί με ταχύτητες μέχρι 60 χ/ω με μικρές διακοπές (κάτω του 1 δευτερολέπτου) κατά τις εναλλαγές.
4. Πλήρης κινητικότητα: Υποστηρίζονται ταχύτητες μέχρι 120 χ/ω και αδιάκοπη εναλλαγή.

Είναι πιθανό, τα αρχικά δίκτυα WiMAX να υλοποιηθούν για σταθερές και νομαδικές εφαρμογές και μετά να εξελιχθούν για να υποστηρίζουν πλήρη κινητικότητα με τη πάροδο του χρόνου.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 ορίζει μηχανισμούς ειδοποίησης για εντοπισμό σταθμών χρήστη καθώς κινούνται από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης σε μία άλλη περιοχή όταν είναι ενεργοί, ή από μία ομάδα ειδοποίησης σε μία άλλη όταν είναι σε idle. Επίσης έχει πρωτόκολλα που επιτρέπουν την αδιάκοπη εναλλαγή ανάμεσα σε σταθμούς βάσης. Το WiMAX Forum έχει εξελίξει αυτό το πλαίσιο εργασίας, ενώ η αρχιτεκτονική του υποστηρίζει κινητικότητα στο επίπεδο IP.

Τρεις μέθοδοι εναλλαγής υποστηρίζονται: μία υποχρεωτική και δύο προαιρετικές. Η υποχρεωτική μέθοδος αποκαλείται HHO (Hard HandOver), υλοποιείται αρχικά στο κινητό WiMAX και προϋποθέτει αδιάκοπη μεταφορά της σύνδεσης από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλο. Οι αποφάσεις παίρνονται από το σταθμό βάσης, το κινητό σταθμό ή κάποιον άλλο με βάση τις αναφορές του κινητού σταθμού. Αφού ο κινητός σταθμός ψάξει τις συχνότητες και μετρήσει την ποιότητα σήματος των γειτονικών σταθμών βάσης σε ειδικά χρονικά περιθώρια, αποφασίζει ποια εναλλαγή θα γίνει, ξεκινάει το συγχρονισμό με το κανάλι λήψης του επιλεγμένου σταθμού βάσης και τερματίζει τη σύνδεση με τον προηγούμενο.

Οι δύο προαιρετικές μέθοδοι εναλλαγής, αποτελούν γρήγορη αλλαγή σταθμού βάσης (FBSS, Fast Base Station Switching), όπου ο κινητός σταθμός διατηρεί ταυτόχρονα έγκυρες συνδέσεις με περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης, οι οποίοι λέγονται ενεργό σύνολο. Ο κινητός σταθμός να παρατηρεί το ενεργό σύνολο αλλά μόνο με ένα σταθμό επικοινωνεί, ο οποίος αποκαλείται υπεύθυνος σταθμός βάσης. Όταν χρειαστεί αλλαγή του υπεύθυνου σταθμού, η σύνδεση αλλάζει από τον ένα σταθμό στον άλλο χωρίς ειδοποίηση εναλλαγής.

### 3.4 Επισκόπηση του επιπέδου MAC

---

Στην άλλη προαιρετική μέθοδο, ο κινητός σταθμός επικοινωνεί με όλους τους σταθμούς βάσης του ενεργού συνόλου, ταυτόχρονα. Στο κανάλι λήψης τα πολλαπλά αντίγραφα που λαμβάνονται συνδυάζονται στο κινητό σταθμό με γνωστές τεχνικές. Για το κανάλι αποστολής, ο κινητός σταθμός στέλνει δεδομένα σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης και επιλέγεται το καλύτερο κανάλι.

Και οι δύο προαιρετικές μέθοδοι, προσφέρουν καλύτερη απόδοση από την ΗΗΟ, αλλά απαιτείται οι σταθμοί του ενεργού συνόλου να είναι συγχρονισμένοι, να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα φέρουσας και να μοιράζονται τις ίδιες πληροφορίες δικτύου.

#### 3.4.5 Λειτουργίες ασφάλειας

Σε αντίθεση με το Wi-Fi, τα συστήματα του WiMAX σχεδιάστηκαν εξ αρχής ώστε να παρέχουν ασφάλεια. Το πρότυπο περιέχει εκκλεπτυσμένες μεθόδους που εξασφαλίζουν τη προστασία των δεδομένων και αποτρέπουν τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

Προστασία δεδομένων: Τα δεδομένα των χρηστών κρυπτογραφούνται για να υπάρχει προστασία. Υποστηρίζεται η μέθοδος AES, που προτιμάται γιατί είναι ευκολότερο να υλοποιηθεί, αλλά και η 3DES (Triple Data Encryption Standard). Χρησιμοποιούνται κλειδιά των 128 και 256 bit που δημιουργούνται κατά την αυθεντικοποίηση και ανανεώνονται περιοδικά για περισσότερη ασφάλεια.

Αυθεντικοποίηση συσκευών/χρηστών: Το WiMAX προσφέρει ευέλικτη αυθεντικοποίηση των σταθμών χρήστη, με την παροχή χαρακτηριστικών όπως το όνομα, ο κωδικός, ψηφιακά πιστοποιητικά και έξυπνες κάρτες. Οι τερματικές συσκευές του WiMAX έχουν ενσωματωμένα πιστοποιητικά X.509 που περιέχουν το δημόσιο κλειδί τους και τη διεύθυνση MAC. Οι πάροχοι του WiMAX μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πιστοποιητικά για αυθεντικοποίηση των συσκευών, αλλά και το όνομα και τον κωδικό ή την αυθεντικοποίηση της έξυπνης κάρτας για επιπλέον αυθεντικοποίηση του χρήστη.

Πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιών: Το πρωτόκολλο PKMv2 (Privacy and Key Management protocol Version 2) χρησιμοποιείται για την ασφαλή μεταφορά των κλειδιών από το σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό. Ο κινητός σταθμός συμπεριφέρεται σαν client και ο σταθμός βάσης ως server. Επίσης χρησιμοποιούνται X.509 πιστοποιητικά και αλγόριθμοι RSA (Rivest-Shamer-Adleman) για να γίνουν με ασφάλεια ανταλλαγές κλειδιών μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού.

Προστασία των μηνυμάτων ελέγχου: Προστατεύεται η ακεραιότητα των μηνυμάτων ελέγχου με μεθόδους όπως CMAC (Cipher-based Message Authentication Code) και HMAC (Hash-based Message Authentication Code).

Υποστήριξη γρήγορης εναλλαγής: Επιτρέπεται στον κινητό σταθμό να χρησιμοποιεί προ-αυθεντικοποίηση για ένα σταθμό βάσης, ώστε να επιτευχθεί γρηγορότερη επάνοδος. Μία χειραψία τριών μερών χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό, αποτρέποντας τις επιθέσεις από μεσάζοντες.

### 3.4.6 Υπηρεσίες Multicast και Broadcast

Το επίπεδο MAC του κινητού WiMAX υποστηρίζει υπηρεσίες Multicast και Broadcast (MBS, Multicast and Broadcast Services), που περιλαμβάνουν:

- Μηχανισμοί ειδοποίησης από τον κινητό σταθμό για να αιτηθεί και να εγκατασταθεί MBS
- Πρόσβαση ενός σταθμού χρήστη με ένα ή πολλούς σταθμούς βάσης στις MBS, ανάλογα με την χωρητικότητα και την επιθυμία του
- Χρήση ενός παγκοσμίου κλειδιού κρυπτογράφησης κυκλοφορίας
- Μέθοδοι για την παράδοση κυκλοφορίας MBS σε σταθμούς χρήστη που είναι σε κατάσταση idle
- Ξεχωριστή περιοχή στο πλαίσιο MAC με δικές της πληροφορίες για την κυκλοφορία MBS
- Υποστήριξη ποικιλίας για να ενισχυθεί η απόδοση της παράδοσης κυκλοφορίας MBS

### 3.5 Εξελιγμένες δυνατότητες για ενίσχυση της απόδοσης

Προβλέπονται διάφορες προαιρετικές δυνατότητες για την ενίσχυση της απόδοσης, μερικές από τις οποίες είναι η τεχνική πολλαπλών κεραιών, το hybrid ARQ και ενισχυμένη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.

#### 3.5.1 Εξελιγμένα συστήματα κεραιάς

Το πρότυπο του WiMAX παρέχει υποστήριξη στην υλοποίηση της τεχνικής πολλαπλών κεραιών. Μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά κέρδη στην ολική χωρητικότητα του συστήματος και τη φασματική αποδοτικότητα, ενώ υποστηρίζονται και λύσεις όπως:

**Ποικιλία μετάδοσης:** Ορίζεται ένα πλήθος από σχήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν ποικιλία μετάδοσης στο κανάλι λήψης, δηλαδή να υπάρχουν 2 ή περισσότερες κεραιές για μετάδοση και μία ή περισσότερες για λήψη. Επίσης η ποικιλία μετάδοσης έχει το πλεονέκτημα της μεταφοράς της πολυπλοκότητας στο σταθμό βάσης, διατηρώντας το κόστος του κινητού σταθμού χαμηλό.

**Μορφοποίηση δέσμης:** Οι πολλαπλές κεραιές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μεταδώσουν το ίδιο σήμα κατάλληλα, ώστε να δημιουργείται μία δέσμη προς τον δέκτη, χωρίς παρεμβολές, για τα κανάλια αποστολής και λήψης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της λύσης είναι η βελτίωση της περιοχής κάλυψης, της χωρητικότητας και της αξιοπιστίας. Για να είναι επιτυχής

### **3.5 Εξελιγμένες δυνατότητες για ενίσχυση της απόδοσης**

η τεχνική θα πρέπει ο πομπός να γνωρίζει ακριβώς το κανάλι, το οποίο στη περίπτωση του TDD είναι εύκολα εφικτό, αλλά όχι για το FDD.

Πολυπλεξία: Πολλαπλές ξεχωριστές ροές μεταδίδονται από πολλαπλές κεραιές. Αν ο δέκτης έχει και αυτός πολλαπλές κεραιές, οι ροές μπορούν να διαχωριστούν. Σε αυτή τη περίπτωση οι κεραιές χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ο ρυθμός των δεδομένων ή η χωρητικότητα του συστήματος.

#### **3.5.2 Υβριδικό ARQ**

Το υβριδικό ARQ είναι ένα σύστημα ARQ που υλοποιείται στο φυσικό επίπεδο μαζί με το FEC, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση της σύνδεσης. Η πιο απλή έκδοση του H-ARQ (Hybrid-ARQ) είναι συνδυασμός του FEC και του ARQ, όπου μπλοκ από δεδομένα κωδικοποιούνται με βάση το FEC πριν μεταδοθούν και γίνεται επαναμετάδοση αν ο αποκωδικοποιητής δεν καταφέρει να τα αποκωδικοποιήσει. Αν ένα μπλοκ επαναμεταδοθεί, τότε οι δύο εκδόσεις του συνδυάζονται, βελτιώνοντας τις πιθανότητες να γίνει σωστή αποκωδικοποίηση.

Το πρότυπο του WiMAX υποστηρίζει αυτή την τεχνική με συνδυασμό του stop and wait ARQ και μίας ποικιλίας από κώδικες FEC. Τα παράλληλα κανάλια H-ARQ βελτιώνουν το throughput, αφού όταν μία διαδικασία H-ARQ περιμένει για επιβεβαίωση, μία άλλη διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιήσει το κανάλι για να στείλει μερικά δεδομένα. Στο WiMAX υπάρχουν μηχανισμοί που επιτρέπουν την ασύγχρονη λειτουργία του H-ARQ και διαθέτουν ειδικό κανάλι για αποστολή επιβεβαιώσεων ACK/NACK (Non ACKnowledgement).

Για να βελτιωθεί περαιτέρω η αξιοπιστία μετάδοσης, υπάρχει και ο τύπος II H-ARQ, όπου κάθε (ανα)μετάδοση κωδικοποιείται διαφορετικά για καλύτερη απόδοση, ενώ ο ρυθμός κωδικοποίησης μειώνεται σε κάθε αναμετάδοση.

#### **3.5.3 Βελτιωμένη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων**

Αν και γίνεται να λειτουργήσουν συστήματα WiMAX με ένα σχέδιο επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία λειτουργίας του δικτύου. Αυτό αποφεύγεται επιτρέποντας το συντονισμό της διανομής των υποκαναλιών στους χρήστες στα όρια των κυψελών. Αυτό οδηγεί σε πιο δυναμική διανομή συχνοτήτων. Οι χρήστες με καλές συνθήκες SINR λειτουργούν με μία επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Ενώ αυτοί που δεν έχουν καλές συνθήκες, λειτουργούν σε διπλή, τριπλή ή τετραπλή επαναχρησιμοποίηση. Τα διάφορα σχήματα δημιουργίας υποκαναλιών που προβλέπονται από το WiMAX, βοηθούν ώστε ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης να είναι μεγαλύτερος από 1. Το μειονέκτημα είναι ότι οι χρήστες στα όρια μίας κυψέλης δεν έχουν πρόσβαση στο πλήρες εύρος ζώνης του καναλιού και έτσι οι ρυθμοί τους είναι μειωμένοι.

### 3.6 Αρχιτεκτονική δικτύου

Η ομάδα εργασίας δικτύου του WiMAX Forum (WiMAX NWG, Network Working Group), είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη των απαιτήσεων του δικτύου end-to-end, της αρχιτεκτονικής και των πρωτοκόλλων του WiMAX, χρησιμοποιώντας το IEEE 802.16e-2005.

Το WiMAX NWG έχει αναπτύξει ένα μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί ως η αρχιτεκτονική για υλοποιήσεις του WiMAX και θα εξασφαλίζει διαλειτουργικότητα ανάμεσα στα διάφορα κέντρα λειτουργίας. Ο στόχος είναι η δημιουργία μίας ενωποιημένης αρχιτεκτονικής δικτύου ώστε να υποστηρίζονται οι σταθερές, νομαδικές και κινητές υλοποιήσεις και η οποία να βασίζεται στο IP. Το Σχήμα 3.3 δείχνει μια απλή αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX βασισμένη στο IP. Το ολικό δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη: (1) κινητοί σταθμοί που έχουν πρόσβαση στο δίκτυο, (2) το ASN (Access Service Network) που αποτελείται από 1 ή και άλλους σταθμούς βάσης και 1 ή περισσότερα ASN gateways και (3) το CSN (Connection Service Network), που προσφέρει σύνδεση IP.

Η αρχιτεκτονική επιτρέπει τρεις διαφορετικές επιχειρηματικές κατευθύνσεις: (1) πάροχος πρόσβασης στο δίκτυο (NAR, Network Access Provider), (2) πάροχος υπηρεσιών (NSP, Network Service Provider) και (3) πάροχος εφαρμογών (ASP, Application Service Provider). Ο διαχωρισμός ανάμεσα σε αυτά τα 3 γίνεται έτσι ώστε να υπάρχουν πολλές δυνατότητες, δηλαδή περισσότερος ανταγωνισμός και καλύτερες υπηρεσίες.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από το WiMAX Forum NWG ορίζει κάποιες λειτουργικές οντότητες και αλληλεπιδράσεις ανάμεσά τους.

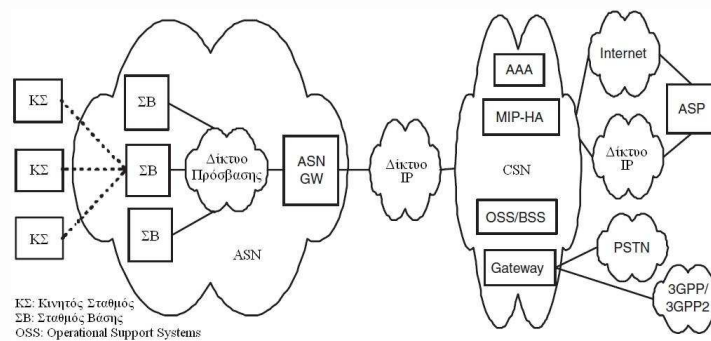
Σταθμός βάσης: Είναι υπεύθυνος για την παροχή της αλληλεπιδράσης μέσω αέρα στο κινητό σταθμό. Άλλες λειτουργίες είναι η διαχείριση μικροκινητικότητας, διαχείριση πόρων ραδιοσυχνοτήτων, πολιτική επιβολής QoS, διαχείριση κλειδιών, DHCP (Dynamic Host Control Protocol) και διαχείριση πολλαπλών ομάδων.

Πύλη υπηρεσιών πρόσβασης δικτύου (ASN-GW, ASN-GateWay): Λειτουργεί ως συσσωρευτής κυκλοφορίας επιπέδου 2. Άλλες λειτουργίες είναι η διαχείριση εντοπισμού εντός του ASN, η διαχείριση πόρων και έλεγχος αποδοχής, η αποθήκευση των στοιχείων των χρηστών και τα κλειδιά κρυπτογράφησης.

Υπηρεσία συνδεσιμότητας δικτύου (CSN): Προσφέρει συνδεσιμότητα στο Internet, το ASP και άλλα δημόσια δίκτυα. Περιέχει εξυπηρετητές AAA (Authentication, Authorization, Accounting) που αυθεντικοποιούν συσκευές, χρήστες και συγκεκριμένες υπηρεσίες, αλλά προσφέρει και πολιτική διαχείρισης του QoS και της ασφάλειας ανά χρήστη. Είναι επίσης υπεύθυνο για τη διαχείριση των διευθύνσεων IP, την περιαγωγή μεταξύ διαφορετικών NSP, την διαχείριση τοποθεσιών μεταξύ ASP και κινητικότητα και περιαγωγή μεταξύ ASN, ενώ μπορεί να προσφέρει πύλες για άλλα δίκτυα όπως το PSTN (Public Switched Telephone Network), το 3GPP και το 3GPP2.

Η αρχιτεκτονική του WiMAX επιτρέπει την ευέλικτη διαχώριση ή συνδυασμό των λειτουργιών, για παράδειγμα το ASN μπορεί να χωριστεί σε πομπο-

### 3.7 Επίδοση WiMAX



Σχήμα 3.3: Μία απλή αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX βασισμένη στο IP

δέκτες σταθμού βάσης, σε ελεγκτές σταθμού βάσης και σε ASN-GW. Είναι επίσης δυνατό να ενωθεί ο σταθμός βάσης και το ASN-GW σε μία μονάδα. Αυτή η διαρρύθμιση λέγεται κατανεμημένη ή επίπεδη αρχιτεκτονική.

Επίσης στην αρχιτεκτονική αναφοράς ορίζονται αλληλεπιδράσεις που λέγονται σημεία αναφοράς. Οι αλληλεπιδράσεις έχουν πρωτόκολλα ελέγχου και διαχείρισης, για να υποστηρίξουν διάφορες λειτουργίες, όπως κινητικότητα, ασφάλεια και QoS.

Ορίζονται στο μοντέλο αναφοράς δικτύου, σημεία αναφοράς μεταξύ: (1) κινητού σταθμού και του ASN - R1, (2) κινητού σταθμού και CSN - R2, (3) ASN και CSN - R3, (4) ASN και ASN - R4, (5) CSN και CSN - R5, (6) σταθμού βάσης και ASN-GW - R6 και (7) δύο σταθμών βάσης - R7.

### 3.7 Επίδοση WiMAX

Το WiMAX προσφέρει ένα ευρύ σύνολο από επιλογές σχεδίασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να βελτιστοποιηθεί το σύστημα για τις επιθυμητές απαιτήσεις υπηρεσίας.

#### 3.7.1 Ρυθμαπόδοση (throughput) και φασματική αποδοτικότητα

Ο Πίνακας 3.7 δείχνει ένα μικρό μέρος των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της απόδοσης του συστήματος. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τροποποιήσεις: κεραία MIMO ανοιχτού βρόχου με 2 κεραίες μετάδοσης και 2 κεραίες λήψης, αλλά και ένα σύστημα MIMO κλειστού βρόχου με 4 κεραίες μετάδοσης και 2 κεραίες λήψης.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι με χρήση 1024 FFT OFDMA-PHY με 10MHz TDD κανάλι και AMC με αναλογία λήψης-αποστολής 1:3, ενώ θεωρείται ότι η υλοποίηση είναι πολλών κυψελών με τρεις σταθμούς βάσης, σε απόσταση 2 χιλιομέτρων μεταξύ τους. Επίσης, ο συγκεκριμένος πίνακας δείχνει τα αποτελέσματα όσον αφορά τη φασματική απόδοση. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το WiMAX με MIMO μπορεί να πετύχει σημαντικά

### Κεφάλαιο 3. Επισκόπηση του WiMAX

Παράμετρος		Ρύθμιση κεραίας				
		2x2 MIMO ανοιχτού βρόχου	2x4 MIMO ανοιχτού βρόχου	4x2 MIMO ανοιχτού βρόχου	4x2 MIMO κλειστού βρόχου	
Μέσο throughput (Mbps) ανά τομέα, σε κανάλι 10MHz	Σταθερό οικιακό σύστημα (CPE)	Λ	16,31	27,25	23,25	35,11
		A	2,62	2,50	3,74	5,64
	Κινητή συσκευή	Λ	14,51	26,31	22,25	34,11
		A	2,34	2,34	3,58	5,48
Φασματική απόδοση (bps/Hertz)	Σταθερό οικιακό σύστημα (CPE)	Λ	2,17	3,63	3,10	4,68
		A	1,05	1,00	1,50	2,26
	Κινητή συσκευή	Λ	1,95	3,51	2,97	4,55
		A	0,94	0,94	1,43	2,19

Πίνακας 3.7: Throughput και φασματική απόδοση για το WiMAX

μεγαλύτερη φασματική απόδοση από ότι τα συστήματα 3G.

#### 3.7.2 Δείγματα σύνδεσης και κάλυψης

Ο Πίνακας 3.8 παρουσιάζει 2 σενάρια: στο πρώτο, το κινητό WiMAX προσφέρεται σε μία φορητή συσκευή, ενώ στο δεύτερο, η υπηρεσία φτάνει σε ένα οικιακό χρήστη. Ο σταθερός χρήστης θεωρείται ότι έχει κατευθυνόμενη κεραία. Τα νούμερα που παρατίθενται είναι για ένα βασικό σύστημα WiMAX. Ο συγκεκριμένος πίνακας δίνει αποτελέσματα για αστικά, καθώς και προαστικά μοντέλα.

### 3.7 Επίδοση WiMAX

Παράμετρος	Κινητή συσκευή για υπαίθριο σενάριο		Σταθερό σύστημα για εσωτερικό σενάριο		Σημειώσεις
	Λήψη	Αποστολή	Λήψη	Αποστολή	
Ενισχυτής, ισχύς εξόδου	43,0dB	27,0dB	43,0dB	27,0dB	A1
Πλήθος κεραιών μετάδοσης	2	1	2	1	A2
Ενισχυτής	0dB	0dB	0dB	0dB	A3
Κέρδος κεραιάς	18dBi	0dBi	18dBi	6dBi	A4
Απώλειες πομπού	3,0dB	0dB	3,0dB	0dB	A5
Αποτελεσματική ιστροπική ισχύς	61dBm	27dBm	61dBm	33dBm	$A6 = A1 + \log_{10} A2 - A3 + A4 - A5$
Εύρος ζώνης καναλιού	10MHz	10MHz	10MHz	10MHz	A7
Πλήθος υποκαναλιών	16	16	16	16	A8
Επίπεδο θορύβου στο δέκτη	-104dBm	-104dBm	-104dBm	-104dBm	$A9 = -174 + 10 \log_{10}(A7 * le6)$
Θόρυβος δέκτη	8dB	4dB	8dB	4dB	A10
Απαιτούμενο SNR	0,8dB	1,8dB	0,8dB	1,8dB	A11
Κέρδος πολυπλοκότητας	0dB	0dB	0dB	0dB	A12
Κέρδος δημιουργίας υποκαναλιών	0dB	12dB	0dB	12dB	$A13 = 10 \log_{10}(A8)$
Ρυθμός ανά υποκανάλι (Kbps)	151,2	34,6	151,2	34,6	A14
Ευσαιθησία δέκτη (dBm)	-95,2	-110,2	-95,2	-110,2	$A15=A9+A10+ A11+A12-A13$
Κέρδος κεραιάς δέκτη	0dBi	18dBi	6dBi	18dBi	A16
Κέρδος συστήματος	156,2dB	155,2dB	162,2dB	161,2dB	$A17=A6-A15+A16$
Περιθώριο εξασθένησης	10dB	10dB	10dB	10dB	A18
Απώλεια διείσδυση σε	0dB	0dB	10dB	10dB	A19
Περιθώριο σύνδεσης	146,2dB	145,2dB	142,2dB	141,2dB	$A20=A17-A18-A19$
Περιοχή κάλυψης	1,06χμ		0,81χμ		Αστικό μοντέλο
Περιοχή κάλυψης	1,29χμ		0,99χμ		Προαστιακό μοντέλο

Πίνακας 3.8: Δείγματα σύνδεσης για ένα σύστημα WiMAX



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΗ

## **Κεφάλαιο 4**

# **NS2 και NIST Module**

Το NS2 (Network Simulator 2) αποτελεί μία πλατφόρμα για την ανάπτυξη και προσομοίωση δικτύων από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Διανέμεται δωρεάν και έχει δημιουργηθεί για να λειτουργεί σε περιβάλλον Unix. Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται το NS2, αλλά και τα βοηθητικά προγράμματά του, ενώ στις ενότητες που έπονται αναλύεται το module που υλοποιεί το WiMAX.

### **4.1 Το NS2**

Οι προσομοιώσεις που εκτελούνται από το NS2 πρέπει να είναι γραμμένες στη γλώσσα προγραμματισμού TCL (Tool Command Language). Ανάλογα με τις εντολές που έχουμε χρησιμοποιήσει στο σενάριο (πρόγραμμα TCL), μετά την εκτέλεσή του δημιουργούνται τα αντίστοιχα αρχεία. Τα αρχεία αυτά περιέχουν δεδομένα που περιγράφουν τι συνέβη κατά την εκτέλεση του σεναρίου και τα οποία μπορούμε να διαβάσουμε με τα βοηθητικά προγράμματα.

#### **4.1.1 NAM**

Το NAM (Network Animation), με χρήση των κατάλληλων εντολών, απεικονίζει με γραφικά το δίκτυο, δηλαδή σχεδιάζει τους κόμβους, τις συνδέσεις μεταξύ των, τα πακέτα δεδομένων που ανταλλάχθηκαν κλπ. Μάλιστα παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού διαφόρων παραμέτρων, που βοηθούν στην καλύτερη παρακολούθηση και μελέτη του σεναρίου. Δηλαδή, μεταξύ άλλων, μπορούμε να παγώσουμε την εικόνα, να αλλάξουμε το ρυθμό προβολής και να παρακολουθήσουμε την πορεία ενός συγκεκριμένου πακέτου από ένα κόμβο σε ένα άλλο.

### 4.1.2 Xgraph

Άλλο ένα βοηθητικό πρόγραμμα είναι το Xgraph. Για να το αξιοποιήσουμε, χρειάζονται οι κατάλληλες εντολές στο κώδικα του σεναρίου μας, με τις οποίες δημιουργείται ένα αρχείο με δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά συνήθως αφορούν την απόδοση του συστήματος, δηλαδή το εύρος ζώνης κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, το πρόγραμμα παίρνει σαν είσοδο το συγκεκριμένο αρχείο και απεικονίζει την αντίστοιχη γραφική παράσταση.

### 4.1.3 AWK

Τα γεγονότα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μίας προσομοίωσης, μπορούν να καταγραφούν σε ένα αρχείο. Πρόκειται για συμβάντα όπως, η χρονική στιγμή που ξεκίνησε ένα πακέτο από κάποιο κόμβο, πότε έφτασε στο προορισμό, ή πότε απορρίφθηκε κλπ. Ένα τέτοιο αρχείο μπορούμε να το επεξεργαστούμε με ένα άλλο πρόγραμμα, το οποίο θα το έχουμε γράψει στη γλώσσα AWK (Aho, Weinberger and Kernighan), ώστε να φιλτράρουμε τα αποτελέσματα και να εξαχθούν τα συμπεράσματα.

## 4.2 WiMAX NIST Module

Το μοντέλο που έχει υλοποιηθεί βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16 (802.16-2004) και την επέκταση 802.16e-2005 για την κινητικότητα [7]. Να σημειωθεί ότι αρκετά συστατικά δεν έχουν καθοριστεί στο πρότυπο, έτσι το μοντέλο υλοποιεί μία λύση, ενώ είναι σχεδιασμένο ώστε να είναι σχετικά επεκτάσιμο. Στον Πίνακα 4.1 απαριθμούνται τα χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα αλλά και αυτά που λείπουν.

### 4.2.1 Πακέτα CS

Το επίπεδο CS (Convergence Sublayer, Υποεπίπεδο Σύγκλισης) βρίσκεται πάνω από το επίπεδο MAC και εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Λαμβάνει PDU από υψηλότερο επίπεδο
- Πραγματοποιεί ταξινόμηση
- Παραδίδει τα CS PDU στο MAC SAP (Service Access Point)
- Δέχεται CS PDU από την ισοδύναμη οντότητα

Στη παρούσα υλοποίηση, το CS Πακέτο πραγματοποιεί ταξινόμηση μόνο. Η μέθοδος της ταξινόμησης των πακέτων εξαρτάται από την υλοποίηση, ενώ είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές λύσεις για να βρεθεί η κατάλληλη σύνδεση.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η δομή κλάσης του ταξινομητή.

## 4.2 WiMAX NIST Module

Διαθέσιμα χαρακτηριστικά	Χαρακτηριστικά που δεν έχουν υλοποιηθεί
Φυσικό επίπεδο WirelessMAN-OFDM με ρυθμιζόμενη διαμόρφωση	WirelessMAN-OFDMA
	FDD
	ARQ
TDD	
Μηνύματα διαχείρισης για την είσοδο στο δίκτυο (χωρίς αυθεντικοποίηση)	Ροή υπηρεσίας και προγραμματισμός QoS
Προκαθορισμένος προγραμματισμός με round robin καταμερισμό σε κινητούς σταθμούς ανάλογα με την ανάγκη για εύρος ζώνης	Περιοδική διακύμανση και ρυθμίσεις ενέργειας
	Χωρισμός σε πακέτα
	Διόρθωση λαθών
Επεκτάσεις του 802.16e-2005 για την υποστήριξη σαρώσεων και εναλλαγών	
Τμηματοποίηση και ανασύσταση πλαισίων	

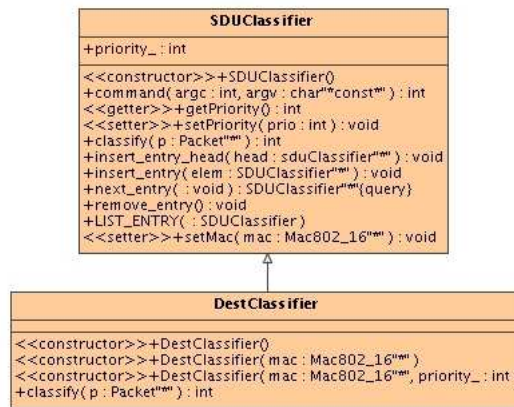
Πίνακας 4.1: Σύνοψη διαθέσιμων και μη χαρακτηριστικών

Η κλάση DestClassifier, που ταξινομεί τα πακέτα με βάση την IP διεύθυνση του προορισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πιο πολύπλοκων ταξινομητών πακέτων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2, η κλάση καθορίζει το κατάλληλο CID χρησιμοποιώντας τη MAC διεύθυνση του προορισμού και τον τύπο του πακέτου.

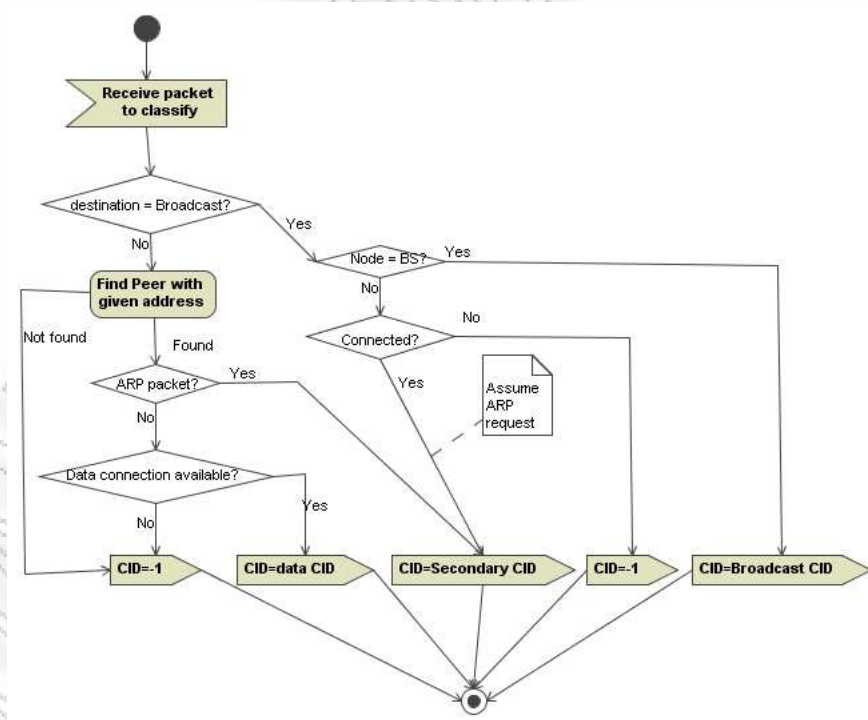
### 4.2.2 Υποεπίπεδο MAC

Το υποεπίπεδο MAC υποστηρίζει το PMP (Point-to-MultiPoint, Σημείο-πολλά-σημεία). Η δομή της κλάσης φαίνεται στο Σχήμα 4.3 και τα διάφορα στοιχεία της περιγράφονται παρακάτω.

- Η υποκλάση Mac802\_16 είναι μία αφηρημένη κλάση που αποτελεί τη διεπαφή με τα υπόλοιπα επίπεδα για την αποστολή και λήψη πακέτων
- Η λίστα με ταξινομητές πακέτων, SDUClassifier, δίνουν σε κάθε εξερχόμενο πακέτο το κατάλληλο CID με βάση την IP διεύθυνση προορισμού
- Το ServiceFlowHandler διαχειρίζεται τις αιτήσεις και αποκρίσεις
- Η κλάση PeerNode περιέχει πληροφορίες για τις συνδέσεις και την κατάσταση του ισοδύναμου κόμβου
- Μέσω του ConnectionManager δίνεται πρόσβαση στις συνδέσεις (Connections), αφού περιέχει μία λίστα με εισερχόμενες και εξερχόμενες συνδέσεις

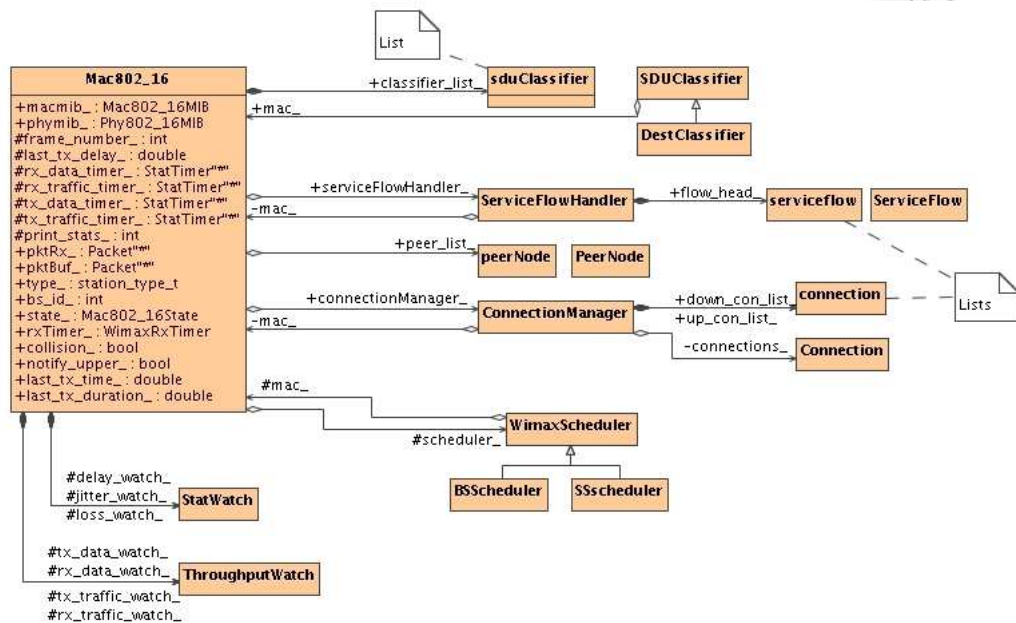


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα κλάσης του ταξινομητή πακέτων



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής της κλάσης DestClassifier

## 4.2 WiMAX NIST Module



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα κλάσης του MAC 802.16

- Η κλάση WimaxScheduler συμβάλλει στη δημιουργία μίας διεπαφής με το MAC
- Τα αντικείμενα StatWatch και ThroughputWatch χρησιμοποιούνται ώστε να υπολογιστούν τα στατιστικά της κίνησης

### MAC PDU

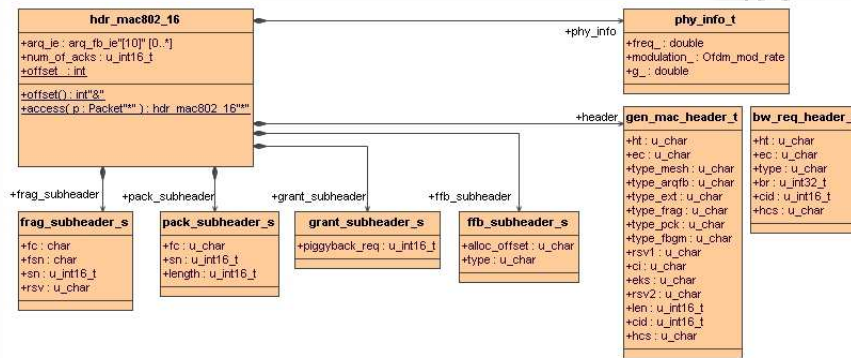
Η επικεφαλίδα του MAC, της οποίας το διάγραμμα κλάσης φαίνεται στο Σχήμα 4.4, περιέχει 3 κύρια στοιχεία:

- phy\_info\_t: Αυτή η δομή μεταφέρει πληροφορίες όπως συχνότητα, διαμόρφωση και κυκλικό πρόθεμα
- gen\_mac\_header\_t: Περιέχει γενικές πληροφορίες για το MAC
- Άλλες δομές που αποθηκεύουν διάφορες δευτερεύουσες επικεφαλίδες

Όταν μεταδίδεται ένα ARQ, η επικεφαλίδα περιέχει επίσης δεδομένα ανατροφοδότησης.

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα μηνύματα διαχείρισης που έχουν οριστεί.

Επειδή στο μοντέλο εφαρμόζεται το TDD, η μετάδοση για την αποστολή, γίνεται αμέσως μετά με την μετάδοση λήψης στο ίδιο πλαίσιο. Τα μηνύματα



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα κλάσης της επικεφαλίδας του MAC

Κατηγορία	Μηνύματα
Συγχρονισμός	DL-MAP / DCD UL-MAP / UCD RNG-REQ/RSP REG-REQ/RSP
Ροές υπηρεσίας	DSA-REQ/RSP/ACK
Κινητικότητα	MOB_NBR_ADV MOB_SCN-REQ/RSP MOB_BSHO-REQ/RSP MON_SSHO-REQ MOB_HO-IND MOB_SCN-REP MOB_ASC-REP

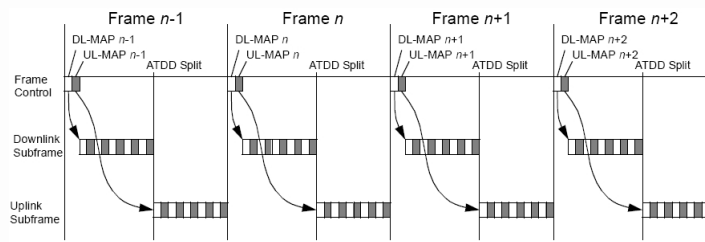
Πίνακας 4.2: Μηνύματα διαχείρισης που έχουν οριστεί

DL-MAP και UL-MAP που μεταδίδονται στην αρχή κάθε πλαισίου, καθορίζουν την κατανομή της ριπής και τις δυνατότητες μετάδοσης για κάθε σταθμό. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται σχηματικά μία σειρά από πλαίσια.

Η δημιουργία και η μετάδοση πακέτων MAC PDU χωρίζεται σε 3 στάδια :

1. Λήψη εξερχόμενων πακέτων από υψηλότερο επίπεδο: Το MAC αναζητεί ανάμεσα στους ταξινομητές για το κατάλληλο CID. Αν βρεθεί ένα έγκυρο CID, προσαρτίζει μία προκαθορισμένη MAC επικεφαλίδα και τοποθετεί το πακέτο στην ουρά σύνδεσης.
2. Χρονοπρογραμματισμός: Για κάθε πλαίσιο διατρέχεται η λίστα των συνδέσεων ώστε να βρεθούν τα πακέτα που θα μεταδοθούν. Στο σταθμό βάσης, ο χρονοπρογραμματιστής κάνει κατανομή σε ριπές και μεταφέρει το πακέτο από την ουρά σύνδεσης στη ριπή. Στον κινητό σταθμό, χρησιμοποιείται το UL MAP για να βρεθεί η ριπή που ανήκει το πακέτο.

## 4.2 WiMAX NIST Module



Σχήμα 4.5: Χρονική ακολουθία των μηνυμάτων DL-MAP και UL-MAP

3. Μετάδοση: Μεταδίδονται τα πακέτα που είναι αποθηκευμένα στις ουρές ριπών.

Όταν χρονοπρογραμματίζονται τα πακέτα που θα μεταδοθούν, ο χρονοπρογραμματιστής ελέγχει αν η τμηματοποίηση είναι ενεργοποιημένη για μία σύνδεση και χωρίζει το πακέτο για να χωράει σε μία ριπή. Η τμηματοποίηση μπορεί να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί για κάθε σύνδεση, ενώ στην αρχική της κατάσταση είναι ενεργοποιημένη.

### Χρονοπρογραμματισμός υπηρεσιών

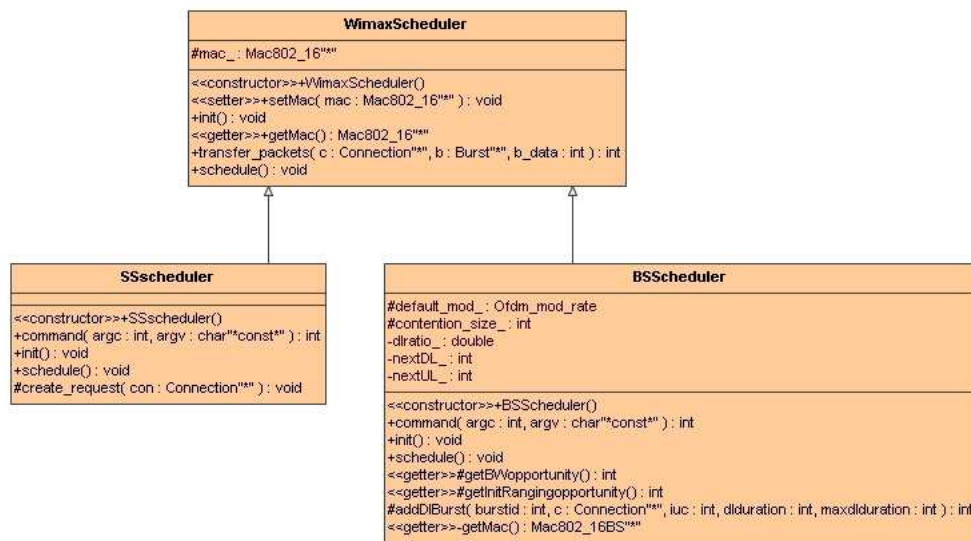
Η δομή της κλάσης επιτρέπει την ύπαρξη διαφορετικών υπηρεσιών δεδομένων, που είναι οι UGS, rtPS, nrtPS και BE και οι οποίες ορίζονται στη κλάση ServiceFlow. Στο πλαίσιο εργασίας ορίζονται δομές που επιτρέπουν την υλοποίηση χρονοπρογραμματισμών για διαφορετικούς τύπους υπηρεσίας. Κάθε Connection μπορεί να συσχετιστεί με μία ServiceFlow (βλ. Σχήμα 4.3) και τις αντίστοιχες παράμετρους QoS.

Ο χρονοπρογραμματιστής αναλαμβάνει το χρονοπρογραμματισμό των πακέτων, αλληλεπιδρώντας με το MAC. Διαφορετικοί τύποι κόμβων χρειάζονται διαφορετικούς χρονοπρογραμματιστές πακέτων. Στο IEEE 802.16, ο σταθμός βάσης ελέγχει την κατανομή του εύρους ζώνης, ενώ υπάρχει ένα πεπερασμένο πλήθος υλοποιήσεων. Το μοντέλο περιλαμβάνει την αφηρημένη κλάση WimaxScheduler, ώστε να χρησιμοποιούνται εύκολα διαφορετικοί χρονοπρογραμματιστές πακέτων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6, αυτή η κλάση έχει δυο υλοποιήσεις, την SSScheduler για τους σταθμούς χρήστη και την BSScheduler για τους σταθμούς βάσης. Συνήθως υπάρχει ένας χρονοπρογραμματιστής για το σταθμό βάσης και ένας για το σταθμό χρήστη.

Η δημιουργία ενός νέου χρονοπρογραμματιστή πρέπει να περιλαμβάνει τις μεθόδους:

- `init()`: αρχικοποίηση του χρονοπρογραμματιστή
- `process(Packet*)`: μέθοδος για την επεξεργασία των πακέτων που δέχεται ο χρονοπρογραμματιστής





Σχήμα 4.6: Διάγραμμα κλάσης του χρονοπρογραμματιστή πακέτων

- start\_ulsubframe(): εκτελείται στην αρχή ενός νέου υποπλαισίου αποστολής
- start\_dlsubframe(): εκτελείται στην αρχή ενός νέου υποπλαισίου λήψης

### Κατανομή και μηχανισμοί αίτησης εύρους ζώνης

Ο σταθμός βάσης κατανέμει χρονοσχισμές, όπου μπορεί να συμβούν συγκρούσεις και οι οποίες χρησιμοποιούνται σε δύο περιπτώσεις, για την αίτηση αρχικής διακύμανσης και την αίτηση εύρους ζώνης.

Στο μοντέλο υπάρχει τρόπος για τη διεκπεραίωση του ανταγωνισμού και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7. Η κλάση ContentionSlot παρέχει τους βασικούς μηχανισμούς που σχετίζονται με τον ανταγωνισμό.

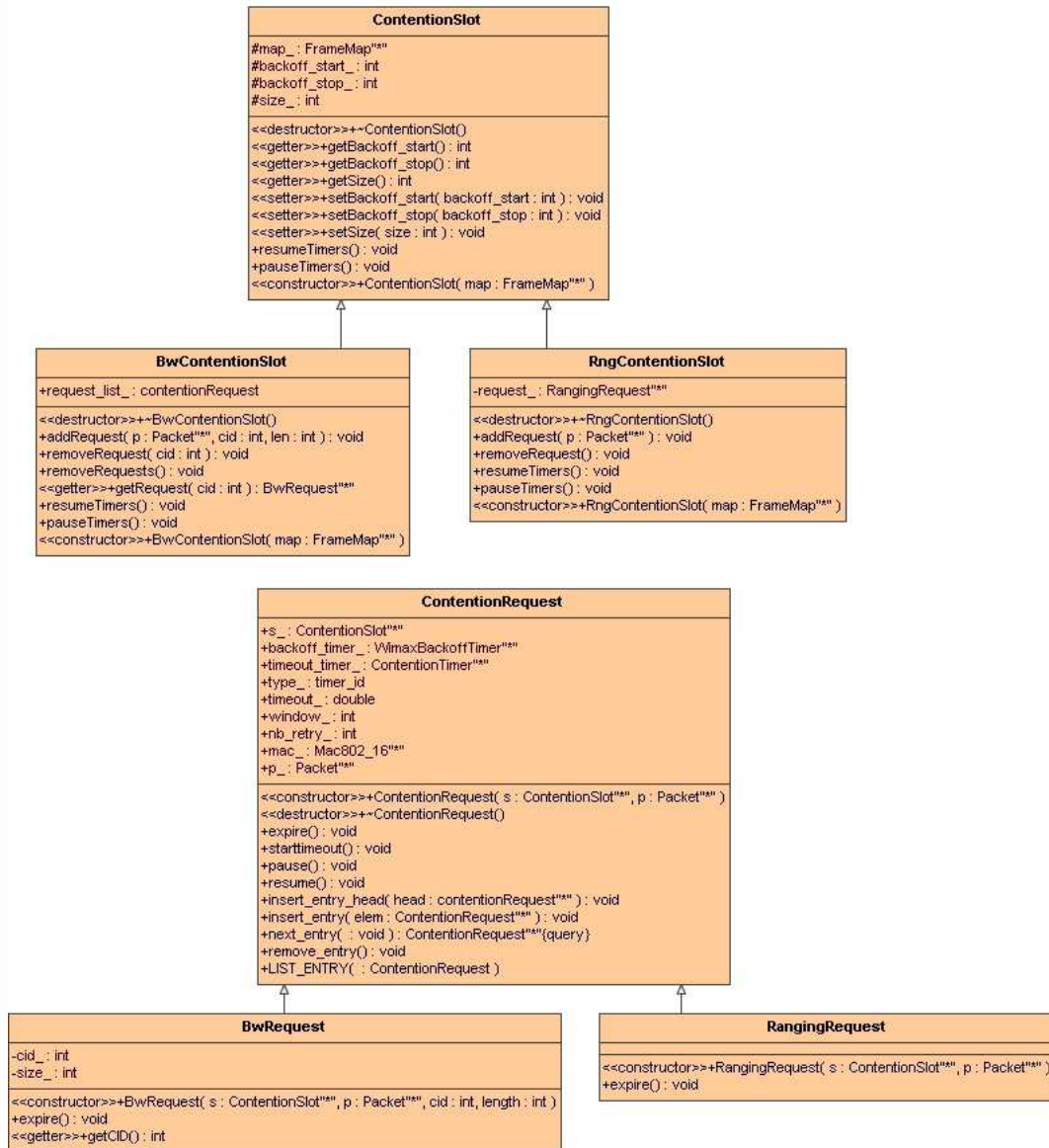
Κατά την είσοδο στο δίκτυο, ο σταθμός χρήστη πραγματοποιεί διακύμανση για να ρυθμίσει την ενέργεια μετάδοσης. Μετά, χρησιμοποιεί ένα μετρητή που μειώνει κάθε φορά που εντοπίζει μία χρονοσχισμή ανταγωνισμού στο πλαίσιο. Όταν ο μετρητής μηδενιστεί, τότε μεταδίδεται το πακέτο.

### Είσοδος στο δίκτυο και αρχικοποίηση

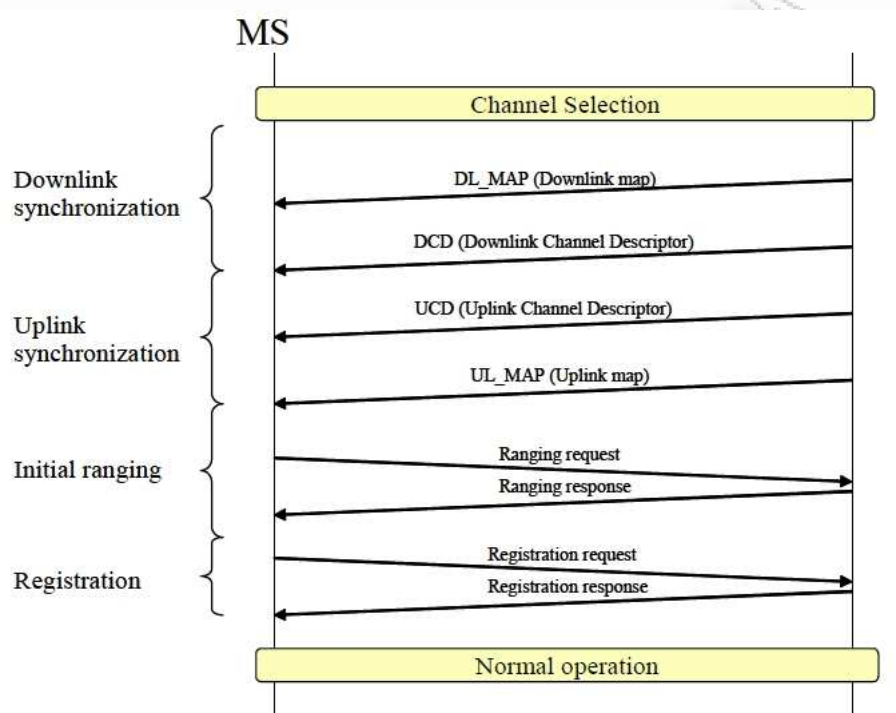
Όταν ένας σταθμός χρήστη θέλει να συνδεθεί με ένα δίκτυο, τότε εκτελεί είσοδο στο δίκτυο που, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, απαιτεί τα παρακάτω στοιχεία:

- Σάρωση του καναλιού λήψης
- Απόκτηση παραμέτρων μετάδοσης

## 4.2 WiMAX NIST Module



Σχήμα 4.7: Χρονοσχισμές ανταγωνισμού και αιτήσεις ανταγωνισμού



Σχήμα 4.8: Είσοδος στο δίκτυο

- Αρχική διακύμανση
- Εγγραφή

Οι παρακάτω παράμετροι μπορούν να τροποποιηθούν:

- Τα χρονόμετρα που εκτελούν τη σάρωση καναλιού
- Συχνότητα των μηνυμάτων DCD (Downlink Channel Descriptor) και UCD (Uplink Channel Descriptor)
- Παράμετροι για την αρχική διακύμανση
- Κατανομή καναλιού

Η διακύμανση είναι ένας μηχανισμός που επιτρέπει στο σταθμό χρήστη να διατηρήσει μία καλή ποιότητα σύνδεσης ρυθμίζοντας την ενέργεια μετάδοσης και τη διαμόρφωση. Κατά την αρχική διακύμανση, ο σταθμός χρήστη χρησιμοποιεί το προκαθορισμένο προφίλ DIUC (Downlink Interval Usage Code) για μετάδοση. Αυτό επιτρέπει στους κόμβους τη μετάδοση σε διαφορετικού ρυθμούς.

## 4.2 WiMAX NIST Module

---

### Διαδικασίες εναλλαγής στο επίπεδο MAC

Το μοντέλο υποστηρίζει κινητικότητα και ανάλογα με τη παραμετροποίηση, ο κινητός σταθμός διενεργεί σάρωση και εναλλαγή ανάμεσα στους σταθμούς βάσης.

Όταν η ποιότητα σύνδεσης μειώνεται, ο κινητός σταθμός μπορεί να στείλει το μήνυμα MOB-SCN\_REQ στο σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί, ώστε να σαρώσει τη περιοχή σε αναζήτηση άλλων σταθμών βάσης. Ο κινητός σταθμός παρακολουθεί το επίπεδο σήματος των εισερχόμενων πακέτων και όταν το επίπεδο ξεπεράσει το κάτω όριο, τότε στέλνει αυτό το μήνυμα.

Κατά τη διάρκεια της σάρωσης της περιοχής, ο κινητός σταθμός συλλέγει τις RSSI (Received Signal Strength Indication) τιμές των εισερχόμενων πακέτων. Αυτές τις τιμές επεξεργάζεται ο τρέχων σταθμός βάσης και επιλέγει τον καλύτερο σταθμό βάσης για να τον αντικαταστήσει. Αφού ο κινητός σταθμός ενημερωθεί για τον επόμενο σταθμό βάσης που θα τον εξυπηρετήσει, περιμένει μερικά πλαίσια πριν γνωστοποιήσει ότι θέλει να κάνει εναλλαγή. Εισάγεται αυτή η καθυστέρηση ώστε να ανταλλαχθεί η κίνηση που αποθηκεύτηκε προσωρινά κατά τη σάρωση, πριν γίνει η αλλαγή.

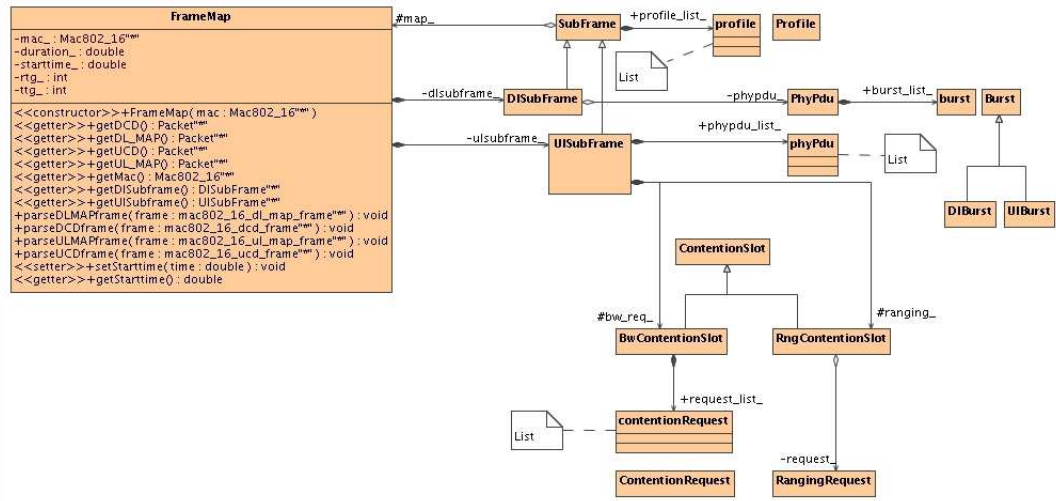
Διαφορετικοί τρόποι σάρωσης έχουν υλοποιηθεί:

- Σάρωση χωρίς συνεργασία: Ο κινητός σταθμός υπολογίζει την ποιότητα του σήματος και προσπαθεί να ταυτοποιήσει και να συγχρονιστεί με ένα ή περισσότερους σταθμούς βάσης.
- Με συνεργασία (επίπεδο 0): Ο υποψήφιος νέος σταθμός βάσης δεν έχει πληροφορίες για τον κινητό σταθμό που κάνει σάρωση, Αφού στείλει αίτηση, ο κινητός σταθμός περιμένει την απόκριση για 50ms.
- Με συνεργασία (επίπεδο 1): Ο τρέχων σταθμός βάσης διαπραγματεύεται με τον υποψήφιο σταθμό βάσης. Αφού στείλει αίτηση, ο κινητός σταθμός περιμένει την απόκριση για 50ms.

Για να λειτουργήσουν οι τρόποι σάρωσης και οι γρήγορες εναλλαγές, απαιτείται η κλάση WiMAXCtrlAgent, που εκτελεί 3 λειτουργίες. Η πρώτη είναι η ανταλλαγή πληροφοριών DCD/UCD μεταξύ των γειτονικών σταθμών βάσης. Η δεύτερη είναι η έναρξη αποστολής μηνυμάτων NBR-ADV (Neighbor Advertisement) προς τους κινητούς σταθμούς. Η τρίτη λειτουργία είναι ο συγχρονισμός του τρέχοντα και του υποψήφιου σταθμού βάσης όταν εκτελείται σάρωση (στο επίπεδο 1). Αυτά τα μηνύματα ανταλλάσσονται μέσω ενσύρματων συνδέσεων, χρησιμοποιώντας τα τυποποιημένα IP πακέτα.

### Δομή πλαισίου

Η δομή ενός πλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Ένα πλαίσιο (κλάση FrameMap) αποτελείται από δύο υποπλαίσια, ένα για την αποστολή και ένα για τη λήψη



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα κλάσης του πλαισίου

(κλάσεις SubFrame, DSubFrame και USubFrame). Τα υποπλαισία χωρίζονται σε τμήματα PHY PDU, σε κάθε ένα από τα οποία κατανέμεται εύρος ζώνης σε ριπή για κάθε σταθμό. Κάθε ριπή μπορεί να έχει διαφορετική διαμόρφωση και συχνότητα και αυτό αποτελεί το αποκαλούμενο προφίλ (κλάση Profile).

Συνήθως ο σταθμός βάσης κατανέμει εύρος ζώνης για ένα σταθμό, ώστε να μεταδοθούν τα δεδομένα του. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως στην αρχική διακύμανση και την αίτηση εύρους ζώνης, οι σταθμοί χρήστη ανταγωνίζονται ο ένας τον άλλο για να αποκτήσουν πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης. Τμήματα για αυτό το σκοπό (κλάση ContentionSlot) υπάρχουν μόνο στο κανάλι αποστολής, αφού για το κανάλι λήψης, ο σταθμός βάσης έχει τον πλήρη έλεγχο.

Ο χρονοπρογραμματιστής του σταθμού βάσης δημιουργεί τη δομή με βάση ένα αλγόριθμο κατανομής και μετά καλεί τις λειτουργίες getDL\_MAP, getUL\_MAP, getDCD και getUCD για να επιλέξει τα πακέτα που περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες που θα σταλούν στο σταθμό χρήστη. Ο χρονοπρογραμματιστής του σταθμού χρήστη καλεί τις αντίστροφες λειτουργίες parseDL\_MAP, parseUL\_MAP, parseDCD και parseUCD ώστε να ανασυσταθεί η κατάλληλη δομή για τη μετάδοση και αποδοχή πακέτων.

### Επεξεργασία πακέτων

Ένα πακέτο που λαμβάνεται από υψηλότερο επίπεδο, ταξινομείται με τη χρήση ταξινομητών. Επειδή υπάρχουν διάφοροι ταξινομητές, το MAC τους ελέγχει όλους, μέχρι να βρεθεί ένα έγκυρο CID. Αν τελικά βρεθεί ένα έγκυρο CID, τότε το πακέτο προστίθεται στην ουρά, αλλιώς απορρίπτεται. Όταν ένα νέο πακέτο λαμβάνεται εκτελείται από το πρώτο bit η διαδικασία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10, ενώ όταν ολοκληρωθεί η παραλαβή του, ακολουθεί η επεξεργασία

## 4.2 WiMAX NIST Module

---

του όπως δείχνει το Σχήμα 4.11.

### 4.2.3 Επίπεδο PHY

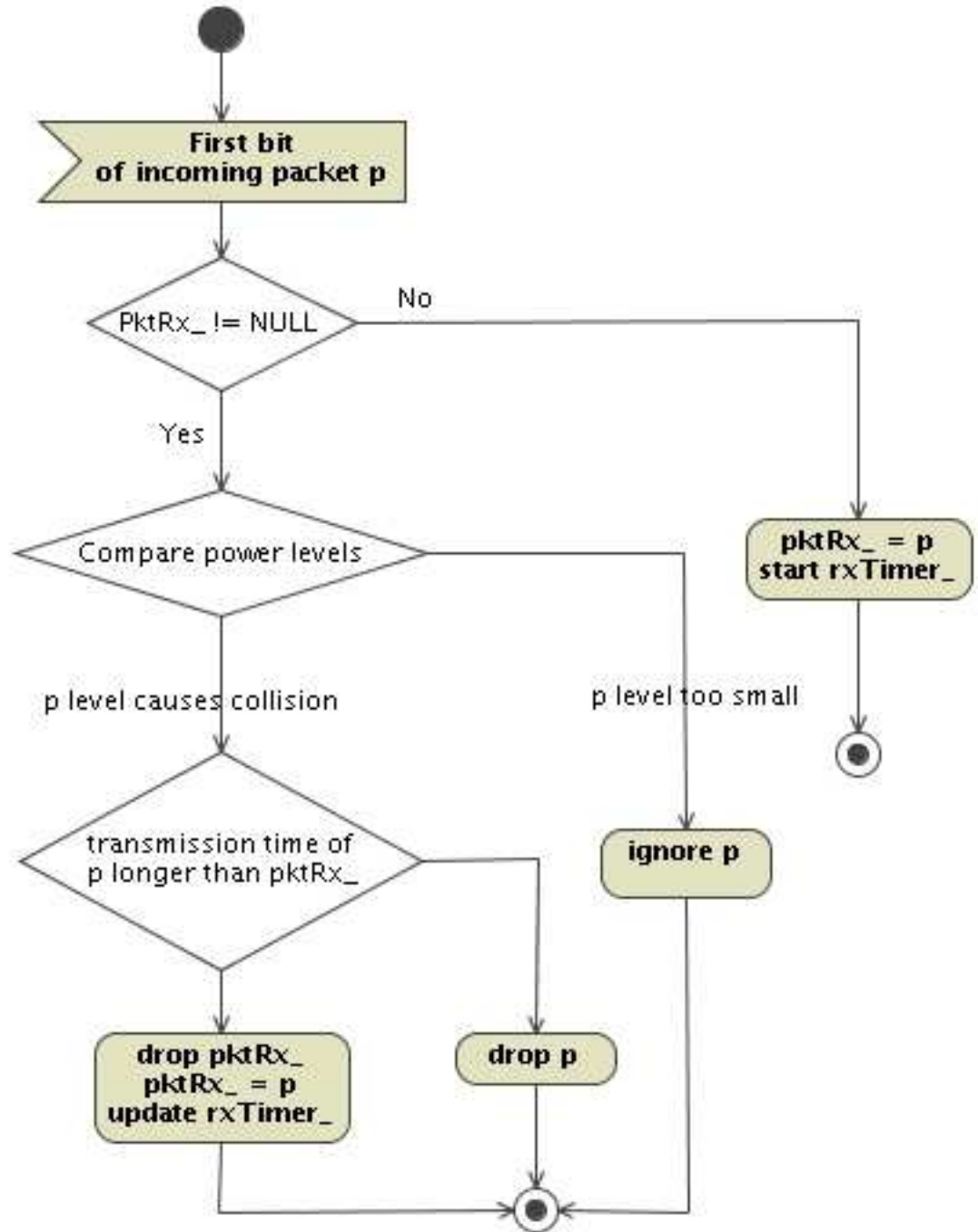
Το OFDM φυσικό επίπεδο χρησιμοποιείται για να μεταδοθούν πακέτα στο υλοποιημένο μοντέλο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12, το φυσικό επίπεδο μπορεί να είναι σε διαφορετικές καταστάσεις ( `Ofdm_phy_state` ). Όταν βρίσκεται στη κατάσταση όπου στέλνει πακέτα, τότε όλα τα εισερχόμενα πακέτα αγνοούνται. Αντίστροφα, όταν είναι στη κατάσταση όπου λαμβάνει πακέτα, τότε δε γίνεται να στείλει κάποιο πακέτο. Επιπλέον, η επικεφαλίδα του πακέτου περιέχει πληροφορίες, όπως η συχνότητα, η διαμόρφωση και το κυκλικό πρόθεμα, που χρησιμοποιούνται για να φιλτραριστούν τα εισερχόμενα πακέτα.

Το μοντέλο υποστηρίζει διαφορετικές διαμορφώσεις. Το επίπεδο MAC κατανέμει ριπές όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετική διαμόρφωση, ανάλογα με την απόσταση του σταθμού και την παρεμβολή, γεγονός που επηρεάζει το χρόνο και το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Το φυσικό επίπεδο συμπεριλαμβάνει και τις παρακάτω βοηθητικές λειτουργίες, τις οποίες καλεί το εκάστοτε επίπεδο MAC κατά τη μετάδοση δεδομένων:

- Η λειτουργία `getTrxTime` επιστρέφει το χρόνο που χρειάζεται για να σταλεί ένα πακέτο, βάσει του μεγέθους του και της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης.
- Η `getMaxPktSize` εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία. Δηλαδή επιστρέφει το μέγιστο μέγεθος του πακέτου, βάσει του πλήθους των OFDM συμβόλων που χρειάστηκε και της διαμόρφωσης.

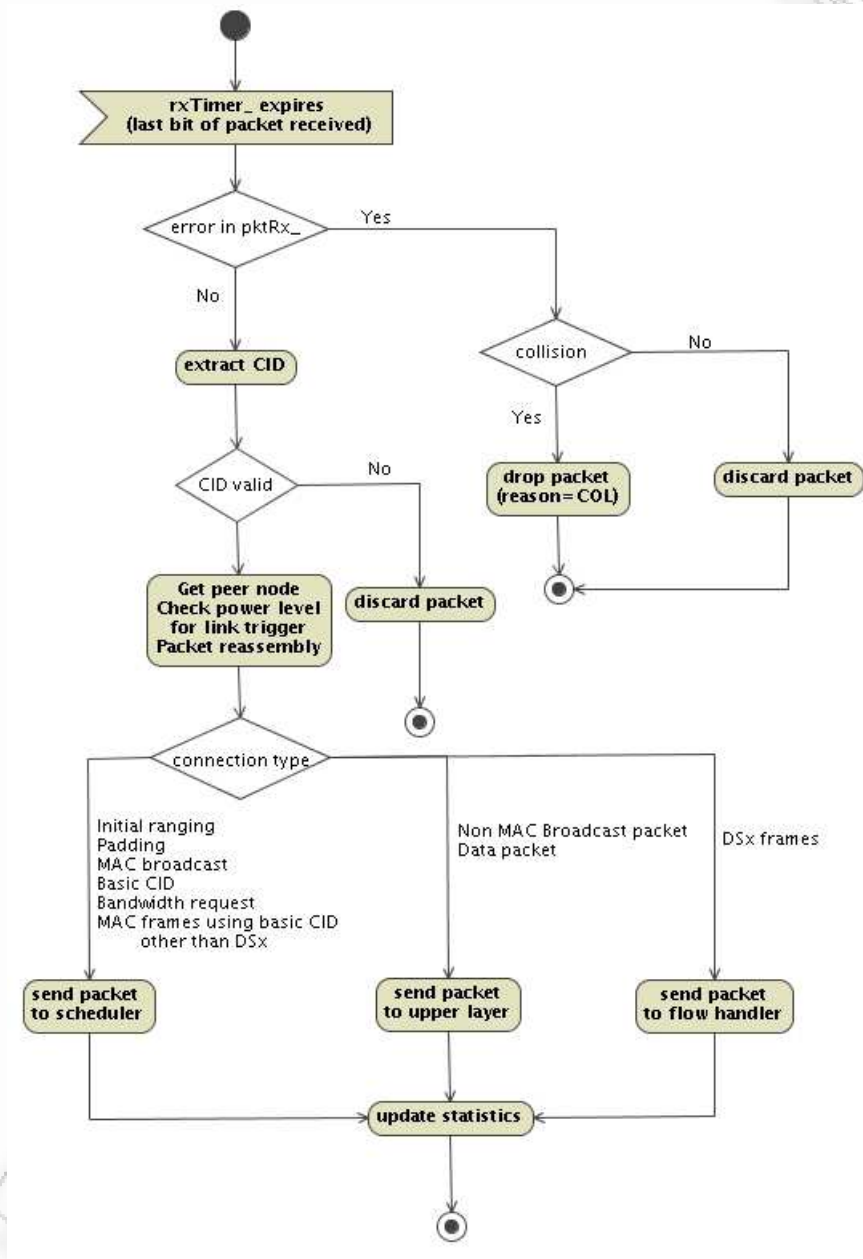
Οι OFDM χρονοπρογραμματιστές πακέτων του σταθμού βάσης ακολουθούν τεχνική BE με χρήση του αλγόριθμου Round Robin, για να διανέμουν τις κατανομές εύρους ζώνης ανάμεσα στους χρήστες. Κατά το BE, ο σταθμός χρήστη στέλνει αιτήσεις εύρους ζώνης, αναφέροντας το μέγεθος των δεδομένων που θέλει να μεταδώσει.





Σχήμα 4.10: Επεξεργασία εισερχόμενου πακέτου

## 4.2 WiMAX NIST Module



Σχήμα 4.11: Επεξεργασία ληφθέντος πακέτου





Σχήμα 4.12: Διάγραμμα κλάσης του OFDM φυσικού επιπέδου

## **Κεφάλαιο 5**

# **Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX**

Η διαδικασία για την ανάλυση της επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX NIST module εμπεριέχει τη δημιουργία διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης, τα οποία εκτελούνται από το πρόγραμμα NS2. Κάθε σενάριο, καθώς εκτελείται, επιστρέφει κάποια αποτελέσματα που αφορούν τη μετάδοση των δεδομένων ανάμεσα στους διάφορους σταθμούς και τα οποία καταγράφονται. Ύστερα, αυτά τα αποτελέσματα αναλύονται, ώστε να καταλήξουμε στα συμπεράσματα. Ο σκοπός είναι να καταμετρηθούν πόσα από τα πακέτα που αποστέλλονται, παραδίδονται στους παραλήπτες και με βάση αυτό τον αριθμό να υπολογιστεί η ρυθμαπόδοση.

### **5.1 Περιγραφή του σεναρίου**

#### **5.1.1 Τοπολογία Δικτύου**

Στο πρώτο σενάριο, η τοπολογία του δικτύου αποτελείται από ένα σταθμό βάσης (ΣΒ) και μερικούς σταθμούς χρήστη (ΣΧ) γύρω του. Όλοι οι σταθμοί χρήστη (σε αυτό αλλά και στα επόμενα σενάρια), είναι σταθεροί. Ανάμεσα σε κάθε σταθμό χρήστη και το σταθμό βάσης, δημιουργούνται συνδέσεις για τη μετάδοση δεδομένων. Επίσης, ορίζεται πόση θα είναι η διάρκεια της προσομοίωσης, που θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να προσομοιωθεί επαρκώς η λειτουργία του δικτύου, αλλά και να μην προκύψει υπερβολικά μεγάλος όγκος δεδομένων που θα είναι δύσκολο να αναλυθεί και δε θα συνεισφέρει περισσότερο στην εκπόνηση συμπερασμάτων.

Σε κάθε σενάριο, μεταβάλλεται το πλήθος των σταθμών. Αυτό γίνεται είτε προσθέτοντας έναν ή περισσότερους σταθμούς χρήστη, που να συνδέονται με κάποιον από τους υπάρχοντες σταθμούς βάσης, είτε με την προσθήκη ενός

## **Κεφάλαιο 5. Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX**

νέου σταθμού βάσης μαζί με ένα σταθμό χρήστη.

Πρέπει να αναφέρουμε, ότι στο σενάριο δημιουργείται μία ιεραρχία ανάμεσα στους σταθμούς. Δηλαδή οι σταθμοί χωρίζονται σε domains και clusters. Έτσι, όλοι οι σταθμοί, είτε βάσης είτε χρήστη, αποκτούν μία διεύθυνση που είναι μοναδική και η οποία συγκροτείται από 3 ψηφία. Το πρώτο ψηφίο υποδεικνύει το domain, το δεύτερο το cluster, ενώ το τρίτο αφορά τον ίδιο το σταθμό. Σε κάθε domain ανήκει μόνο ένας σταθμός βάσης, συμπεριλαμβανομένου των σταθμών χρήστη με τους οποίους συνδέεται. Επίσης, κάθε domain περιέχει ένα μόνο cluster. Για παράδειγμα, ο πρώτος σταθμός βάσης έχει τη διεύθυνση 1.0.0 και οι τέσσερις σταθμοί χρήστη που συνδέονται με αυτόν έχουν διευθύνσεις: 1.0.1, 1.0.2, 1.0.3 και 1.0.4. Ο δεύτερος σταθμός βάσης έχει διεύθυνση 2.0.0 και ομοίως ισχύει για τους υπόλοιπους σταθμούς.

### **5.1.2 Κίνηση δεδομένων και παράμετροι**

Ανάμεσα στους σταθμούς χρήστη και τον εκάστοτε σταθμό βάσης, δημιουργούνται δύο ειδών κινήσεις δεδομένων, μία FTP (File Transfer Protocol) και μία CBR (Constant Bit Rate).

Το FTP είναι ένα πρωτόκολλο για τη μετάδοση αρχείων. Το χαρακτηριστικό μίας τέτοιας ροής δεδομένων είναι ότι τα δεδομένα δεν μεταδίδονται σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Επίσης τα πακέτα που μεταφέρουν την πληροφορία, δεν έχουν σταθερό μέγεθος. Παρόλα αυτά, υπάρχουν δύο παράμετροι που πρέπει να οριστούν και αυτές είναι ο χρόνος έναρξης και χρόνος λήξης της κίνησης. Αυτού του είδους η κίνηση προσαρτάται σε όλους τους σταθμούς χρήστη, ενώ τα δεδομένα αποστέλλονται προς το σταθμό βάσης.

Κατά τη κίνηση CBR τα δεδομένα μεταδίδονται με σταθερό ρυθμό, δηλαδή τα κάθε πακέτο έχει συγκεκριμένο μέγεθος, ενώ είναι συγκεκριμένη και η χρονική απόσταση που μεσολαβεί ανάμεσα στην αποστολή κάθε πακέτου. Αυτοί οι δύο συντελεστές πρέπει να οριστούν από εμάς, κατά τη δημιουργία μίας τέτοιας σύνδεσης, εκτός φυσικά από τα χρονικά σημεία έναρξης και λήξης των ροών. Η κατεύθυνση που έχουν τα πακέτα σε αυτή τη περίπτωση δεν είναι η ίδια με αυτή των πακέτων FTP, αφού τώρα μεταδίδονται από τον σταθμό βάσης προς τους σταθμούς χρήστη. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι μία τέτοιου είδους κίνηση παραπέμπει σε λήψη ήχου (ή βίντεο), όπου απαιτείται να υπάρχει σταθερός ρυθμός αποστολής δεδομένων.

Στον Πίνακα 5.1 αναφέρονται συνοπτικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

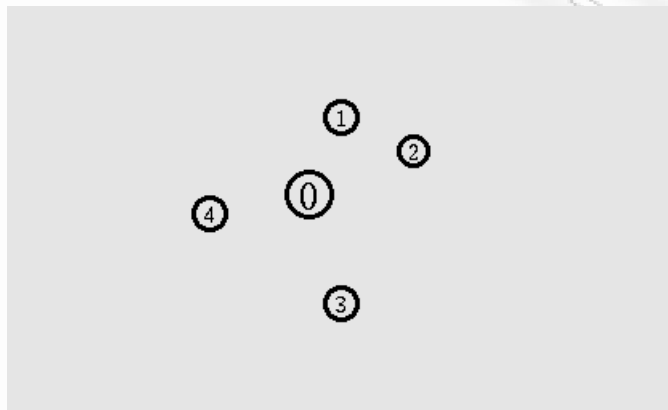
## **5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων**

Με βάση το σενάριο που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, προχωράμε στη λήψη των αποτελεσμάτων.

## 5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Παράμετρος	Τιμή	Επεξήγηση
opt(x)	1100	πλάτος της τοπολογίας
opt(y)	1100	μήκος της τοπολογίας
num_bs	1 έως 4	σύνολο σταθμών βάσης
packet_size	1500	μέγεθος πακέτου CBR
gap_size	0.01	χρονική διαφορά ανάμεσα στην εκπομπή δύο πακέτων CBR
traffic_start	13	χρονική στιγμή έναρξης κίνησης δεδομένων
traffic_stop	100	χρονική στιγμή λήξης κίνησης δεδομένων
opt(mac)	Mac/802_16/BS	καθορίζει τον τύπο του MAC
opt(netif)	Phy/WirelessPhy/OFDM	καθορίζει τον τύπο αλληλεπίδρασης του δικτύου

Πίνακας 5.1: Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων

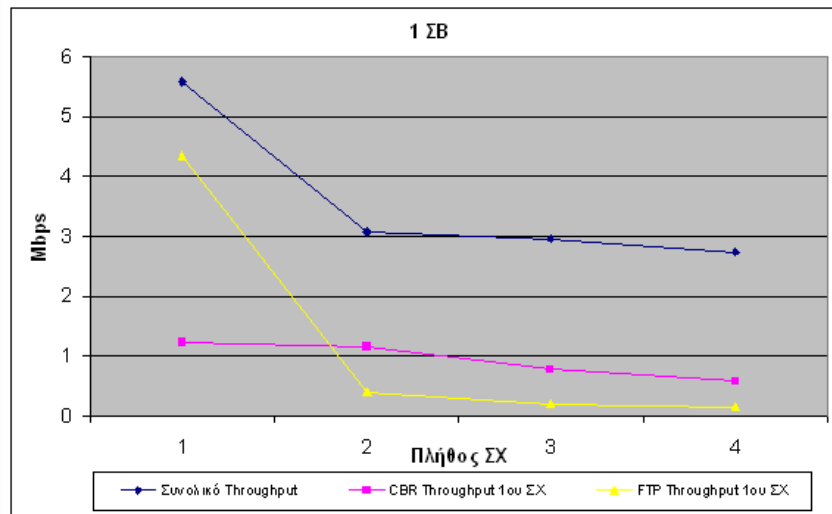


Σχήμα 5.1: Τοπολογία με ένα σταθμό βάσης (κόμβος 0)

### 5.2.1 1 Σταθμός Βάσης

Η τοπολογία του πρώτου σεναρίου φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει τις καμπύλες για τη συνολική ρυθμαπόδοση (σε Mbps) του συστήματος, καθώς και για τη ρυθμαπόδοση των ροών δεδομένων τύπου CBR και FTP του πρώτου σταθμού χρήστη, συναρτήσει του πλήθους των σταθμών χρήστη. Η ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη, είναι αντιπροσωπευτική και για τους υπόλοιπους σταθμούς που υπάρχουν στην εκάστοτε περίπτωση. Από αυτό το σχήμα συμπεραίνουμε ότι όταν υπάρχει ένας σταθμός χρήστη, τότε η κίνηση CBR δεν ξεπερνάει σε ρυθμαπόδοση το 1,2Mbps. Αυτού του είδους η κίνηση, επειδή είναι σταθερού ρυθμού (με σταθερό μέγεθος πακέτου και σταθερή χρονική διάρκεια ανάμεσα στην αποστολή 2 πακέτων), εκμεταλλεύεται όσο εύρος ζώνης χρειάζεται. Το υπόλοιπο αποδίδεται στο άλλο είδος κίνησης δεδομένων, την FTP, που δεν έχει σταθερό μέγεθος πακέτων, ούτε σταθερή χρονική διαφορά ανάμεσα στα πακέτα και έτσι εκμεταλλεύεται όσο εύρος ζώνης διατίθεται. Το αποτέλεσμα είναι η FTP κίνηση να έχει πολύ μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση από τη CBR. Καθώς τοποθετούνται και άλλοι σταθμοί

## Κεφάλαιο 5. Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX



Σχήμα 5.2: Ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη

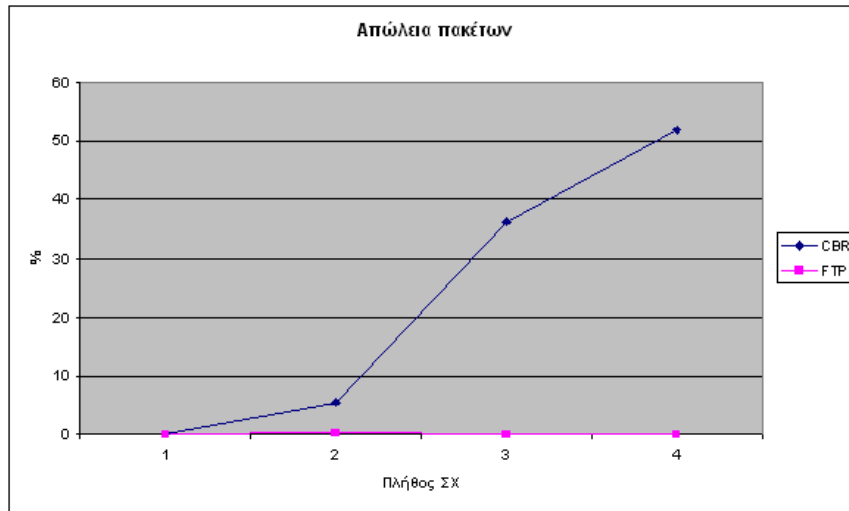
χρήστη, η ρυθμαπόδοση και των δύο ροών μειώνεται. Στην περίπτωση της κίνησης FTP παρουσιάζεται δραστική μείωση της ρυθμαπόδοσης, επειδή δίνεται προτεραιότητα στην κίνηση CBR.

Οι καμπύλες των ποσοστών απώλειας πακέτων των ροών CBR και FTP φαίνονται στο Σχήμα 5.3. Αρχικά, ο μοναδικός σταθμός χρήστη που υπάρχει στο σύστημα, παραλαμβάνει όλα τα πακέτα της ροής CBR χωρίς να υπάρχουν απώλειες. Με την προσθήκη του δεύτερου σταθμού χρήστη, σε αυτή τη κίνηση παρατηρείται απώλεια πακέτων, η οποία αυξάνεται καθώς αυξάνεται το πλήθος των σταθμών χρήστη (το οποίο φτάνει συνολικά τους τέσσερις). Αντίθετα, η κίνηση FTP έχει διαρκώς μηδενικές απώλειες (ή πολύ κοντά στο μηδέν), διότι αυτού του είδους η κίνηση εκμεταλλεύεται όσο εύρος ζώνης μένει διαθέσιμο από τη ροή CBR.

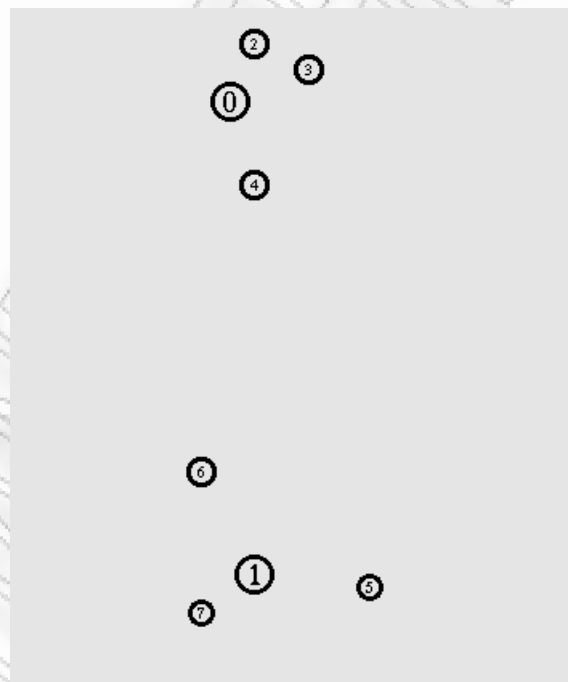
### 5.2.2 2 Σταθμοί Βάσης

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία της Ενότητας 5.2.1, θέτοντας το πλήθος των σταθμών χρήστη του πρώτου σταθμού βάσης σταθερά ίσο με 3 και μεταβάλλοντας το πλήθος των σταθμών που συνδέονται με το δεύτερο σταθμό βάσης, με μέγιστο τους 4 (βλ Σχήμα 5.4). Στο Σχήμα 5.5 εμφανίζονται οι καμπύλες ρυθμαπόδοσης του συστήματος και των ροών του πρώτου σταθμού χρήστη του δεύτερου σταθμού βάσης, συναρτήσεως του συνόλου των σταθμών. Σε παρένθεση αναφέρεται κάθε φορά το σύνολο των σταθμών του τελευταίου σταθμού βάσης. Παρατηρούμε, ότι η συνολική ρυθμαπόδοση έχει αυξηθεί, όπως ήταν φυσιολογικό και οι επιμέρους καμπύλες (για τις ροές δεδομένων) δείχνουν ότι το σύστημα του δεύτερου σταθμού βάσης συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο

## 5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

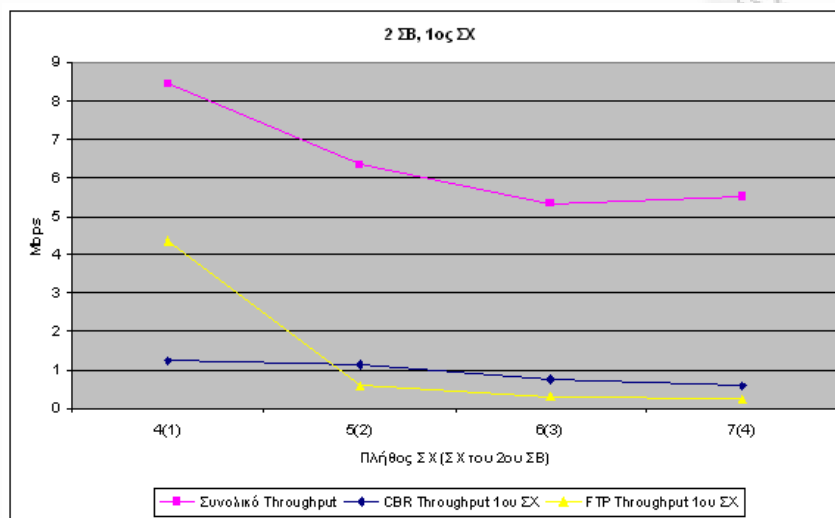


Σχήμα 5.3: Συνολική απώλεια πακέτων τους συστήματος



Σχήμα 5.4: Τοπολογία με δύο σταθμούς βάσης (κόμβοι 0 και 1)

## Κεφάλαιο 5. Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX



Σχήμα 5.5: Ρυθμαπόδοση του 1<sup>ου</sup> σταθμού χρήστη του 2<sup>ου</sup> σταθμού βάσης

με τον πρώτο σταθμό βάσης.

Το ποσοστό απώλειας πακέτων, που διευκρινίζεται στο Σχήμα 5.6, αν και δεν είναι μηδέν για τη ροή FTP, είναι πολύ χαμηλό, ανεξαρτήτως του πλήθους των σταθμών χρήστη. Στη περίπτωση της κίνησης CBR, το ποσοστό αυτό αυξάνεται, συναρτήσει του πλήθους των σταθμών.

### 5.2.3 3 Σταθμοί Βάσης

Με την προσθήκη και τρίτου σταθμού βάσης (βλ Σχήμα 5.7), οι σταθμοί χρήστη κυμαίνονται συνολικά από 8 μέχρι 13 (3 για τον 1<sup>ο</sup>, 4 για τον 2<sup>ο</sup> και 1-6 για τον 3<sup>ο</sup> ΣΒ). Η συνολική ρυθμαπόδοση φαίνεται στο Σχήμα 5.8, η οποία είναι και πάλι αυξημένη, αλλά μειώνεται καθώς αυξάνονται οι σταθμοί χρήστη.

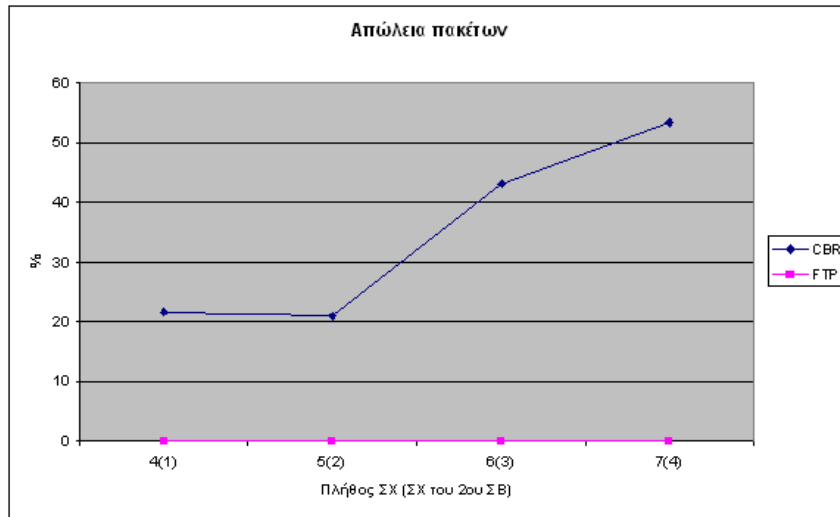
Η ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη φαίνεται στο Σχήμα 5.9, όπου παρατηρούμε ότι ενώ η ρυθμαπόδοση της κίνησης CBR μειώνεται σαφώς με τη προσθήκη κάθε νέου σταθμού, δεν ισχύει το ίδιο και για την κίνηση FTP, η καμπύλη της οποίας σταθεροποιείται στην τιμή 0,1Mbps.

Η συνολική απώλεια πακέτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10. Όπως βλέπουμε, η απώλεια πακέτων τύπου CBR είναι βελτιωμένη και έχει χαμηλότερα ποσοστά σε σύγκριση με την απώλεια πακέτων με 2 σταθμούς βάσης. Τα ποσοστά απώλειας είναι και σε αυτή περίπτωση μηδενικά για πακέτα τύπου FTP.

### 5.2.4 4 Σταθμοί Βάσης

Για το τελευταίο σενάριο της προσομοίωσης, το πλήθος των σταθμών βάσης είναι 4. Το πλήθος των σταθμών χρήστη του τελευταίου σταθμού βάσης, κυ-

## 5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων



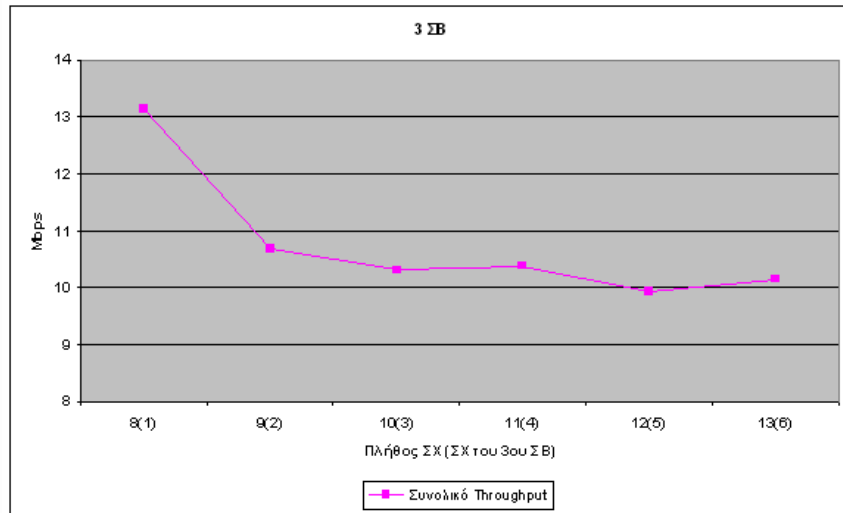
Σχήμα 5.6: Συνολική απώλεια πακέτων τους συστήματος



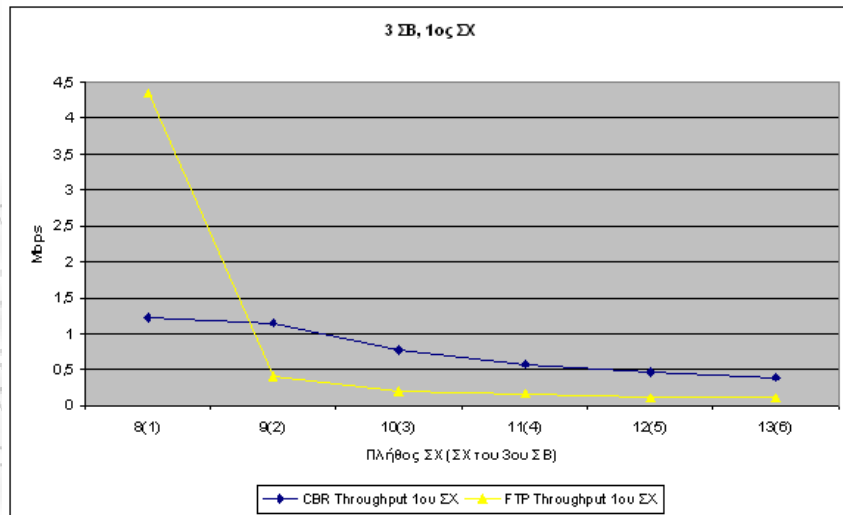
Σχήμα 5.7: Τοπολογία με τρεις σταθμούς βάσης (κόμβοι 0,1 και 2)



## Κεφάλαιο 5. Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX

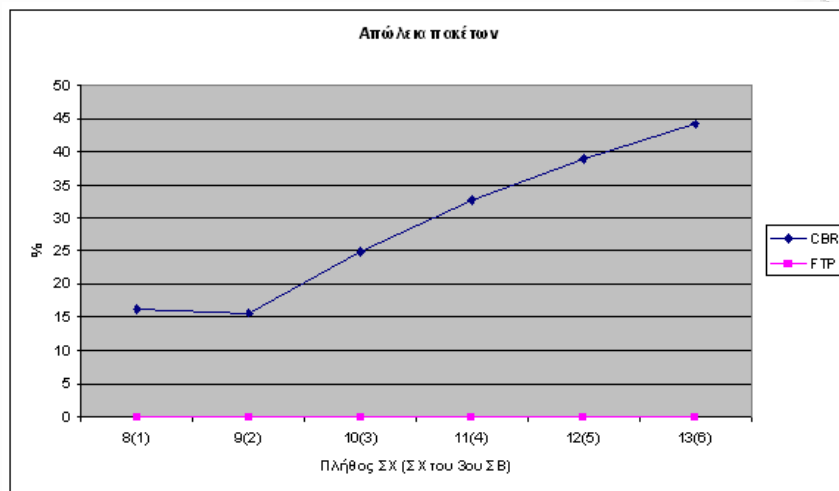


Σχήμα 5.8: Συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος με 3 σταθμούς βάσης

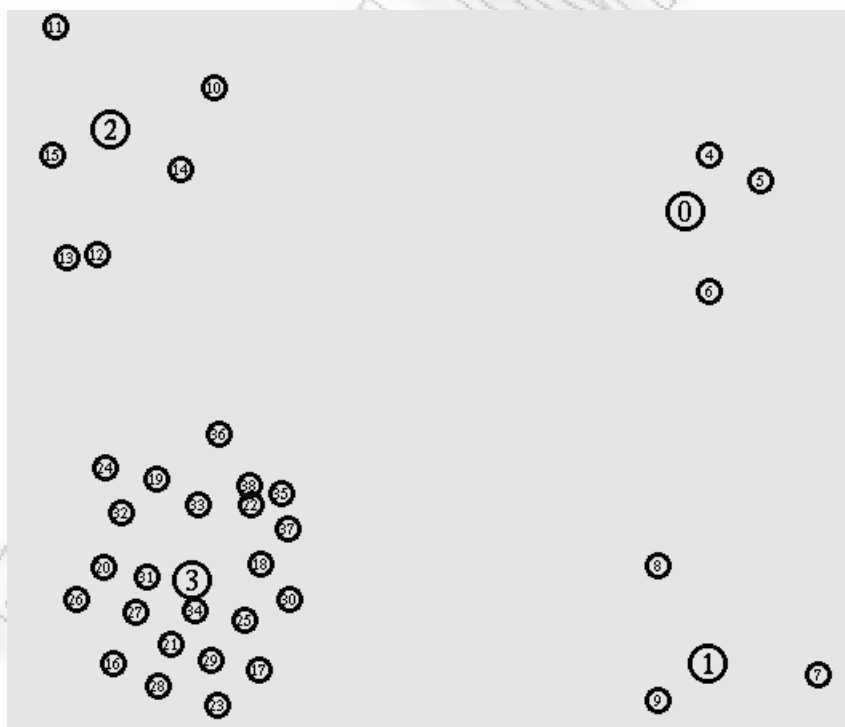


Σχήμα 5.9: Ρυθμαπόδοση του 1<sup>ου</sup> σταθμού χρήστη του 3<sup>ου</sup> σταθμού βάσης

## 5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

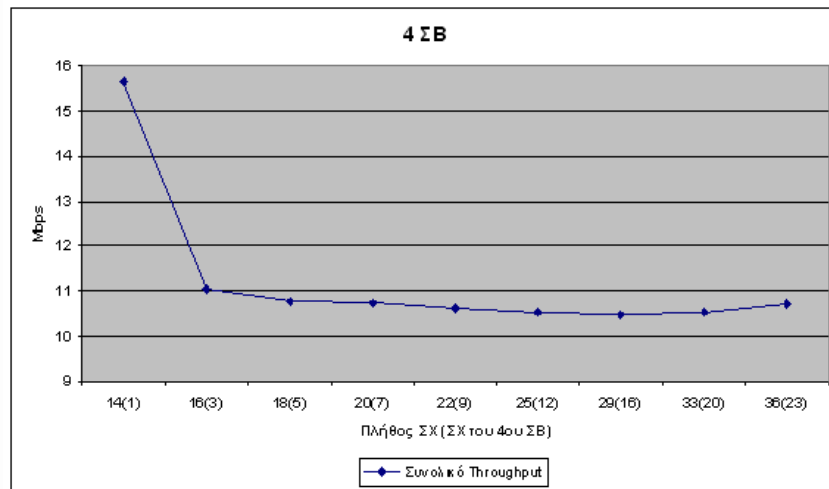


Σχήμα 5.10: Συνολική απώλεια πακέτων με 3 σταθμούς βάσης



Σχήμα 5.11: Τοπολογία με τέσσερις σταθμούς βάσης (κόμβοι 0,1,2 και 3)

## Κεφάλαιο 5. Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX



Σχήμα 5.12: Συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος με 4 σταθμούς βάσης

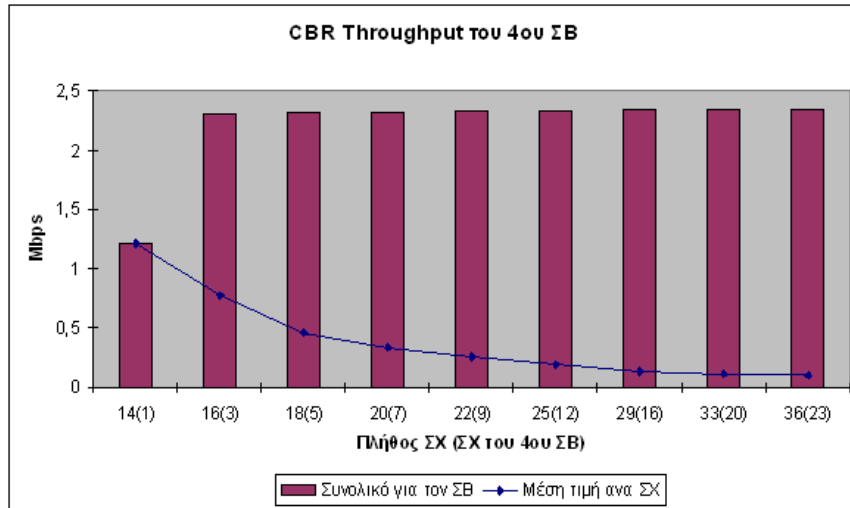
μείνεται από 1 μέχρι 23, αυξανόμενο κάθε φορά κατά 2, 3, ακόμα και 4 σταθμούς. Επισημαίνεται ότι οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης έχουν 3, 4 και 6 σταθμούς χρήστη, ενώ την τελική τοπολογία μπορούμε να τη δούμε στο Σχήμα 5.11. Η γραφική παράσταση της συνολικής απόδοσης του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 5.12, όπου βλέπουμε ότι η ρυθμαπόδοση κύμαίνεται περίπου στα 10,5Mbps, όταν συνδέονται περισσότεροι από πέντε σταθμοί χρήστη με τον τελευταίο σταθμό βάσης.

Τα Σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζουν τη συνολική ρυθμαπόδοση, αλλά και τη μέση τιμή για κάθε σταθμό, των ροών CBR και FTP, αντίστοιχα. Στη περίπτωση της ροής CBR, η τιμή της συνολικής ρυθμαπόδοσης είναι σχεδόν σταθερή και ίση με 2,3Mbps, όταν τοποθετήσουμε περισσότερους από 3 σταθμούς. Όμως, η μέση τιμή ρυθμαπόδοσης για κάθε σταθμό χρήστη ακολουθεί καθοδική πορεία. Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα για τη ροή FTP. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή της συνολικής ρυθμαπόδοσης με παραπάνω από 7 σταθμούς, σταθεροποιείται σε 0,2Mbps, χωρίς να λείπουν οι διακυμάνσεις.

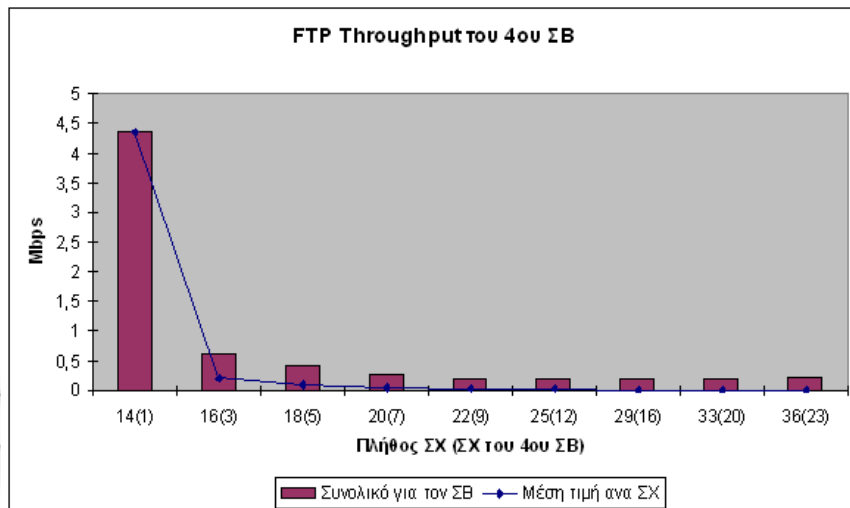
Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη, όπου φαίνεται ότι με την ύπαρξη πολλών σταθμών χρήστη στο δίκτυο η ρυθμαπόδοση και των δύο ροών πλησιάζει στο μηδέν.

Τέλος, το Σχήμα 5.16 δείχνει το ποσοστό απώλειας πακέτων του συστήματος, το οποίο για τη ροή CBR παίρνει μεγάλες τιμές όταν τοποθετηθούν πολλοί σταθμοί. Αλλά ακόμα και με πολλούς σταθμούς, το ποσοστό απώλειας πακέτων τύπου FTP παραμένει σχεδόν μηδέν.

## 5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

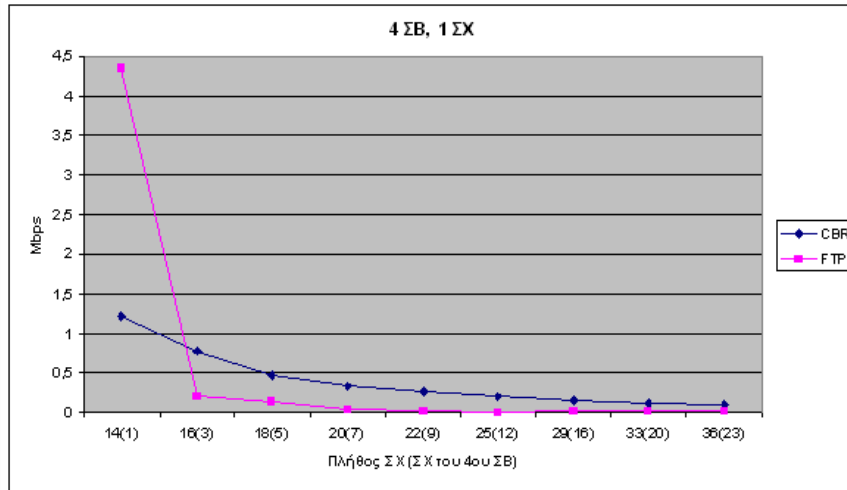


Σχήμα 5.13: Ρυθμαπόδοση της CBR ροής

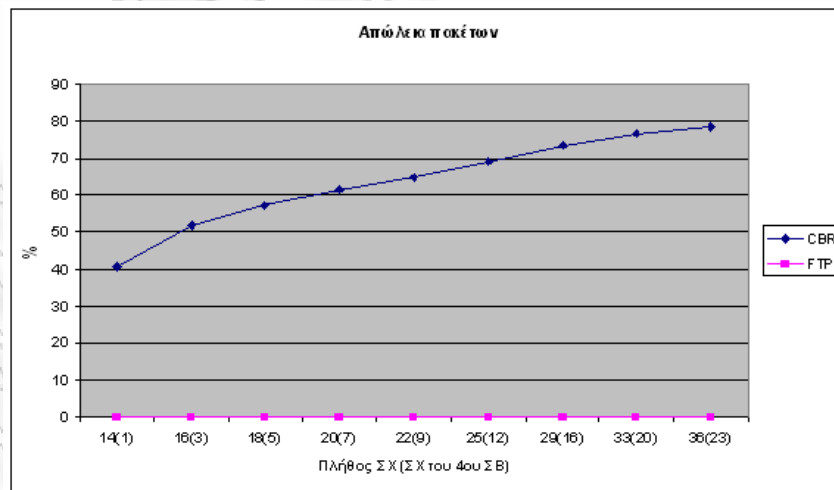


Σχήμα 5.14: Ρυθμαπόδοση της FTP ροής

## Κεφάλαιο 5. Ανάλυση επίδοσης του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX



Σχήμα 5.15: Ρυθμαπόδοση του πρώτου σταθμού χρήστη του 4<sup>ου</sup> σταθμού βάσης



Σχήμα 5.16: Συνολική απώλεια πακέτων με 4 σταθμούς βάσης

## Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα

Το WiMAX είναι μία τεχνολογία που μπορεί να προσφέρει πολλά οφέλη, όπως παραδείγματος χάριν σύνδεση απομακρυσμένων χρηστών με υψηλές ταχύτητες χωρίς την ανάγκη ύπαρξης μεγάλων υποδομών, αλλά και τη δυνατότητα σύνδεσης εν κινήσει. Ωστόσο η επίδοση ενός τέτοιου δικτύου εξαρτάται από το εύρος ζώνης του καναλιού, τον αριθμό των χρηστών, καθώς επίσης και τις ροές κίνησης του δικτύου. Για τη μελέτη της επίδοσης χρησιμοποιήθηκε το NS2 με το NIST module.

Όταν ένας σταθμός χρήστη στέλνει και λαμβάνει δεδομένα από το σταθμό βάσης του, μπορεί να εκμεταλλευτεί όλο το εύρος ζώνης. Στις προσομοιώσεις, η λήψη των δεδομένων είναι σταθερού ρυθμού, με αποτέλεσμα ο μοναδικός σταθμός χρήστη να παραλαμβάνει όλα τα πακέτα αυτής της ροής (CBR) χωρίς να υπάρχουν απώλειες. Όμως, αυτή η κίνηση δεν είναι αρκετή ώστε να αξιοποιηθεί όλο το εύρος ζώνης του καναλιού. Έτσι, το υπόλοιπο εύρος ζώνης αφιερώνεται στην αποστολή από τον σταθμό χρήστη προς τον σταθμό βάσης, πακέτων τύπου FTP. Το αποτέλεσμα είναι η FTP κίνηση να έχει σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση από τη CBR κάτι που οφείλεται στο ότι η πρώτη εκμεταλλεύεται όσο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο, ενώ η δεύτερη εκμεταλλεύεται όσο εύρος ζώνης χρειάζεται.

Με την προσθήκη δεύτερου σταθμού, με ίδιες απαιτήσεις, η απόδοση του συστήματος μειώνεται. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, εξ αιτίας των περισσότερων μηνυμάτων MAC που μεταδίδονται στο δίκτυο, ώστε να συγχρονιστούν οι ενέργειες της αποστολής και λήψης των πακέτων πληροφορίας. Έτσι, το εύρος ζώνης μοιράζεται ισόποσα στους σταθμούς χρήστη. Κάθε σταθμός χρήστη δίνει προτεραιότητα στη λήψη δεδομένων, έτσι αφιερώνει το μεγαλύτερο μέρος του εύρους ζώνης του για τη CBR ροή. Όμως δεν το διαθέτει όλο για τη συγκεκριμένη ροή, παρότι δεν είναι αρκετό για να καλύψει τις ανάγκες της. Αντιθέτως, αφιερώνει και ένα μικρό μέρος για την κίνηση των πακέτων FTP, με αναλογία περίπου 1 προς 5. Δηλαδή η ρυθμαπόδοση της κίνησης CBR είναι περίπου πενταπλάσια της FTP.

Όσο προσθέτουμε επιπλέον σταθμούς χρήστη, η συνολική ρυθμαπόδοση

του σταθμού βάσης σταθεροποιείται γύρω από μία τιμή. Όταν ο σταθμός βάσης συνδέεται με περισσότερους από 7 σταθμούς χρήστη, η συνολική ρυθμαπόδοση των σταθμών για τη CBR κίνηση είναι περίπου 2,3Mbps. Στη περίπτωση της FTP ροής, η ρυθμαπόδοση όλων των σταθμών είναι περίπου 0,2Mbps και κατ'επέκταση το συνολικό throughput είναι 2,5Mbps.

Από τις γραφικές παραστάσεις προκύπτει ότι οι απώλειες των FTP πακέτων είναι πάντα μηδενικές, σε αντίθεση με τα πακέτα CBR, των οποίων το ποσοστό απώλειας διαρκώς αυξάνεται, με την αύξηση των σταθμών. Αυτό οφείλεται στη μη επανεκπομπή των πακέτων, αφού αν υποθέσουμε ότι η ροή CBR αποτελεί τη μετάδοση ζωντανού βίντεο, η επανεκπομπή πακέτων δε θα είχε νόημα.

Οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει ένα δίκτυο σαν το WiMAX είναι μεγάλες και συνεπώς το καθιστούν ιδιαίτερα ενδιαφέρον στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Παράλληλα προκύπτουν και πολλές προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν, ώστε να καταστεί ανταγωνιστικό και να αποδείξει τα πλεονεκτήματά του, έναντι των άλλων τεχνολογιών.

Η ανάλυση των παραπάνω δεν γίνεται να περιοριστεί στα πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάστηκαν οι επιδόσεις του χρονοπρογραμματιστή του WiMAX όταν λειτουργεί ως σταθερό ασύρματο δίκτυο. Έτσι, τα θέματα που μπορούν να αναλυθούν σχετικά με αυτή την αναδυόμενη τεχνολογία είναι ανεξάντλητα, θα λέγαμε.

Το αντικείμενο μίας μελλοντικής εργασίας θα μπορούσε να είναι η δημιουργία ενός χρονοπρογραμματιστή WiMAX που θα λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις σε QoS, για κάθε χρήστη.

## Βιβλιογραφία

- [1] Andrews, Ghosh, Muhamed, Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall. 2007.
- [2] ITU. Telecommunications indicators update - 2004. [www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/](http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/).
- [3] In-stat Report. Paxton. The broadband boom continues: Worldwide subscribers pass 200 million, No. IN0603199MBS, March 2006.
- [4] Schroth. The evolution of WiMAX service providers and applications. Yankee Group Report. September 2005.
- [5] IEEE. Standard 802.16-2004. Part16: Air interface for fixed broadband wireless access systems. October 2004.
- [6] IEEE. Standard 802.16e-2005. Part16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems-Amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed band. December 2005.
- [7] The Network Simulator NS-2 NIST add-on, IEEE 802.16 model (MAC+PHY), January 2009.