ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (WMAN)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΗΣΤΟΥ του ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΦΟΙΤΗΤΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΚΩΤΣΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: /2008

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2008

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η διπλωματική εργασία με θέμα:

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (WMAN)

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Αργυρόπουλου Χρήστου του Γεωργίου
(Α.Μ. 5282)

παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάσθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών την

Ο Επιβλέπων

Καθηγητής
Σ. Κωτσόπουλος

Ο Διευθυντής
του Τομέα

Καθηγητής
Ν.Φακωτάκης

Να πεθαίνεις κάθε μέρα. Να γεννιέσαι κάθε μέρα. Ν’ αρνιέσαι ό,τι έχεις κάθε μέρα.
Η ανώτατη αρετή δεν είναι να είσαι ελεύτερος, παρά να μάχεσαι για ελευτεριά
Ν.Καζαντζάκης

Ευχαριστώ όλους εκείνους που συμπορεύτηκαν ή στάθηκαν δίπλα μου, με προσμονή και προσδοκία για την συνέχιση της αναζήτησης…

1. Ασύρματη Ευρυζωνική Πρόσβαση.....9
1.1 Εισαγωγή 10
1.2 Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόχου στενής ζώνης (Narrowband Wireless Local-Loop Systems).....11
1.3 Ευρυζωνικά συστήματα 1ης γενιάς (First-Generation Broadband Systems)11
1.4 Ευρυζωνικά συστήματα 2ης γενιάς (Second-Generation Broadband Systems).....12
1.5 Η κάλυψη της ανάγκης για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), αιτία για τη γένεση του 802.16 13
1.6 Η πρώτη ολοκληρωμένη λύση για ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών σε ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα.....17
1.7 Τεχνικές προκλήσεις για επίτευξη ευρυζωνικότητας σε ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN) 20
1.7.1 Ασύρματος ραδιοδίαυλος 21
1.7.2 Η έλλειψη φάσματος.....24
1.7.3 Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) 26
1.7.4 Κινητότητα (Mobility).....28
1.7.5 Φορητότητα (Portability).....29
1.7.6 Ασφάλεια (Security) 30
1.7.7 Υποστήριξη του IP πρωτοκόλλου σε ασύρματες επικοινωνίες.....31
1.8 Βιβλιογραφία 33
2. Το φυσικό επίπεδο του WiMAX.....34
2.1 Εισαγωγή 35
2.2 Κωδικοποίηση καναλιού.....37
2.2.1 Στροβιλοκώδικες (Turbo Codes) 38
2.3 Ορθογωνική πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας - OFDM.....38
2.3.1 Πλεονεκτήματα και τρωτά σημεία της OFDM.....41
2.3.2 OFDM παράμετροι στα προφίλ συστήματος του WiMAX.....42
2.3.3 Υποκανάλια στο OFDMA φυσικό επίπεδο 44
2.4 Δομή θυρίδας και πλαισίου (Slot and Frame structure).....45
2.5 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive modulation and coding) 48
2.6 Ρυθμοί δεδομένων σε φυσικό επίπεδο.....50
2.7 Τεχνολογία Έξυπνων κεραιών (Smart Antenna Technologies).....51
2.7.1 Multiple-input and Multiple-output system (MIMO).....51
2.7.2 Προσαρμοστικό σύστημα κεραίας (Adaptive Antenna System).....52
2.8 Περίληψη και Συμπεράσματα.....53
2.9 Βιβλιογραφία 54
3. Το επίπεδο πρόσβασης μέσου του WiMAX.....55
3.1 Εισαγωγή 56
3.2 Υπόστρωμα Σύγκλισης (Convergence sublayer).....57
3.3 Συνδέσεις και Ροές υπηρεσίας (Connections and Service Flows).....58
3.4 Κατάταξη και Απεικόνιση των MAC SDU (Classification and Mapping of MAC SDU) 60
3.5 Υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού (Scheduling Services) 63
3.5.1 Υπηρεσία ανεπίκλητης χορηγίας (unsolicited grant service-UGS) 63
3.5.2 Υπηρεσία πραγματικόχρονης σταθμοσκόπησης (real time polling service-rtPS).....64
3.5.3 Υπηρεσία εκτεταμένης πραγματικόχρονης σταθμοσκόπησης (extended real time polling service-extended rtPS).....64

3.5.4 Μη πραγματικόχρονη υπηρεσία σταθμοσκόπησης (non real time polling service- nrtPS) 65
3.5.5 Άριστη προσπάθεια (best effort) 65
3.6 Ο χρονοπρογραμματιστής και ο κυρίαρχος ρόλος του στην αποδοτικότητα του δικτύου 67
3.7 MAC διευθύνσεις και MAC πλαίσια 68
3.8 Τεμαχισμός, Πακετοποίηση, Συναλύσωση (Fragmentation, Packing, Concatenation) 70
3.8.1 Τεμαχισμός (Fragmentation) 70
3.8.2 Πακετοποίηση (Packing) 71
3.8.3 Συναλύσωση (Concatenation) 72
3.9 Μηχανισμοί αίτησης και κατανομή εύρους ζώνης 73
3.10 Μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας 75
3.11 Υποστήριξη κινητικότητας (Mobility Suppor) 76
3.12 Λειτουργίες ασφαλείας (Security Functions) 78
3.13 Υπηρεσίες πολυεκπομπής και ευρυεκπομπής (Multicast και Broadcast Services) 79
3.14 Περίληψη και Συμπεράσματα 80
3.15 Βιβλιογραφία 81
4. Αξιολόγηση του MAC επιπέδου του 802.16 με τη χρήση του εξομοιωτή Opnet modeller 82
4.1 Εισαγωγή 83
4.2 Εξομοιωτής Opnet modeler και χαρακτηριστικά του δομοστοιχείου (module) που χρησιμοποιήθηκε στις εξομοιώσεις 83
4.2.1 Χαρακτηριστικά που ενσωματώνει το δομοστοιχείο DOCSIS 84
4.2.2 Μοντέλα κόμβων του δομοστοιχείου DOCSIS του Opnet 85
4.2.3 DOCSIS Configuration Object 86
4.3 Η επίδραση του παραθύρου υποχώρησης στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης 87
4.4 Η επίδραση των προτεραιοτήτων στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης 89
4.5 Η επίδραση του τεμαχισμού και της συναλύσωσης στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης 90
4.6 Η επίδραση της αίτησης επωμισμού στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης 92
4.7 Ευρετικό μοντέλο ελέγχου αποδοχής κλήσεων (A heuristic model for call admission control) 93
4.8 Περίληψη και Συμπεράσματα 94
4.9 Βιβλιογραφία 95
5. Σύγκριση των Ασύρματων Ευρυζωνικών Τεχνολογιών 96
5.1 Εισαγωγή 97
5.2 Κοινά χαρακτηριστικά των WiMAX, EVDO και HSPA 97
5.3 Πλεονεκτήματα του WiMAX έναντι των EVDO και HSPA 99
5.3.1 Μεγαλύτερη ανοχή στην πολυόδευση και στην αυτοπαρεμβολή 99
5.3.2 Κλιμακοθετησιμότητα του εύρους καναλιού (Scalable Channel bandwidth) 100
5.3.3 Πολλαπλή ορθογωνική πρόσβαση άνω ζεύξης (Orthogonal Uplink Multiple Access) 100
5.3.4 Υψηλή ποιότητα υπηρεσίας 101
5.3.5 Έξυπνα συστήματα κεραιών 101

5.4 Ομοιότητες και διαφορές μεταξύ WiMAX και Wi-FI.....103
5.5 Περίληψη και Συμπεράσματα.....106
5.6 Βιβλιογραφία 108
5.7 Συντομογραφίες 109
Περίληψη της Διπλωματικής Εργασίας*.....*111

ΣΧΗΜΑ 1-1: ΠΛΗΘΟΣ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ (MOBILE), INTERNET ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ (BROADBAND) 1990-2006 [1,2,3].....10
ΣΧΗΜΑ 1-2: ΤΟ 802.16 ΚΑΙ ΤΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΩΣ ΑΠΩΤΕΡΟ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ [ΠΗΓΗ INTEL] 13
ΣΧΗΜΑ 1-3 : ΜΠΑΝΤΕΣ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΕΥΡΟΣ 2 GHZ – 11 ΠΟΥ ΘΑ ΜΠΟΡΟΥΣΕ ΝΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΤΟ 802.16 GHZ [ΠΗΓΗ INTEL] 14
ΣΧΗΜΑ 1-4: ΠΡΟΦΙΛ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ WIMAX FORUM 16
ΣΧΗΜΑ 1-5 : ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ , ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ, ΣΥΣΚΕΥΕΣ, ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 16
ΣΧΗΜΑ 1-6: WAYMAX PERFORMANCE @ 3.5 GHZ – SINGLE CELL ENVIRONMENT: ON-AIR CAPACITY [COPYRIGHT © SIEMENS MOBILE COMMUNICATIONS S.P.A. 2006] 17
ΣΧΗΜΑ 1-7**:** ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ ΣΕ KM ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΑΠΟ ΠΛΕΥΡΑΣ ΧΡΗΣΤΩΝ [COPYRIGHT © SIEMENS MOBILE COMMUNICATIONS S.P.A. 2006].....18
ΣΧΗΜΑ 1-8 : ΤΟ 802.16 ΚΑΙ ΟΙ ΛΥΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΟΜΕΙΣ-ΟΜΑΔΕΣ ΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ [ΠΗΓΗ INTEL] 20
ΣΧΗΜΑ 1-9: ΠΟΛΥΚΥΤΤΑΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ @ 3.5 GHZ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ [COPYRIGHT© SIEMENS MOBILE COMMUNICATIONS S.P.A. 2006] 24
ΣΧΗΜΑ 1-10: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΓΙΑ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....27
ΣΧΗΜΑ 1-11 : ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....32
ΣΧΗΜΑ 2-1: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ PHY ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΟΥ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΣΤΟ WIMAX 36
ΣΧΗΜΑ 2-2 : ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ FEC ΜΠΛΟΚ ΣΕ ΜΙΚΡΟΤΕΡΑ, ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΤΟ ΑΝΩ ΟΡΙΟ ΤΩΝ ΥΠΟΚΑΝΑΛΙΩΝ ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ ΓΙΑ ΤΟ FEC ΜΠΛΟΚ [COPYRIGHT© PEARSON EDUCATION, INC 2007] 37
ΣΧΗΜΑ 2-3: Η OFDM ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ [COPYRIGHT© NORTEL 2006] 39
ΣΧΗΜΑ 2-4: ΣΤΟ ΑΝΩ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΣΧΗΜΑ ΒΛΕΠΟΥΜΕ ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ. ΣΤΟ ΑΝΩ ΔΕΞΙΑ ΣΧΗΜΑ ΒΛΕΠΟΥΜΕ ΟΤΙ ΣΕ ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙ ΜΕ ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ ΔΕΝ ΕΠΙΤΡΕΠΕΙ ΤΗΝ ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ. ΜΕ OFDM ΠΟΥ ΕΧΟΥΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΑΡΙΘΜΟ ΥΠΟΦΟΡΕΩΝ ΜΟΝΟ ΕΝΑ ΜΙΚΡΟ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΧΑΝΕΤΑΙ ΛΟΓΩ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ. 40
ΣΧΗΜΑ 2-5: OFDM ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ WIMAX [COPYRIGHT © 2007 PEARSON EDUCATION, INC.] 43
ΣΧΗΜΑ 2-6: ΣΧΕΔΙΟ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΥΠΟΦΟΡΕΩΝ ΣΕ OFDMA DOWNLINK ΡΟΗ ΓΙΑ ΚΑΝΑΛΙ 20 MHZ ΜΕ FFT 2048 ΣΗΜΕΙΩΝ [COPYRIGHT© NORTEL 2006].....44
ΣΧΗΜΑ 2-7: Η ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ TDD ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ MOBILE WIMAX ΕΚΔΟΧΗ [COPYRIGHT © 2007 PEARSON EDUCATION, INC.] 46
ΣΧΗΜΑ 2-8: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ WIMAX 49
ΣΧΗΜΑ 2-9: ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΤΥΠΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΧΡΗΣΙΜΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΤΑ 3.5 GHZ [COPYRIGHT© SIEMENS MOBILE COMMUNICATIONS S.P.A. 2006].....49
ΣΧΗΜΑ 2-10: ΡΥΘΜΟΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ, ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ [COPYRIGHT © 2007 PEARSON EDUCATION, INC.] 50
ΣΧΗΜΑ 2-11: MIMO ΚΕΡΑΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΗ [COPYRIGHT© NORTEL 2006] 52
ΣΧΗΜΑ 2-12: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΤΥΠΙΚΟ ΛΟΒΟ ΚΥΨΕΛΗΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΠΛΕΥΡΑ). ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥΣ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΟΥΣ ΛΟΒΟΥΣ (ΔΕΞΙΑ ΠΛΕΥΡΑ) 53
ΣΧΗΜΑ 3-1: ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ (MAC) ΤΟΥ WIMAX 57
ΣΧΗΜΑ 3-2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΟΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ [COPYRIGHT © 2007 JOHN WILEY & SONS LTD] 60

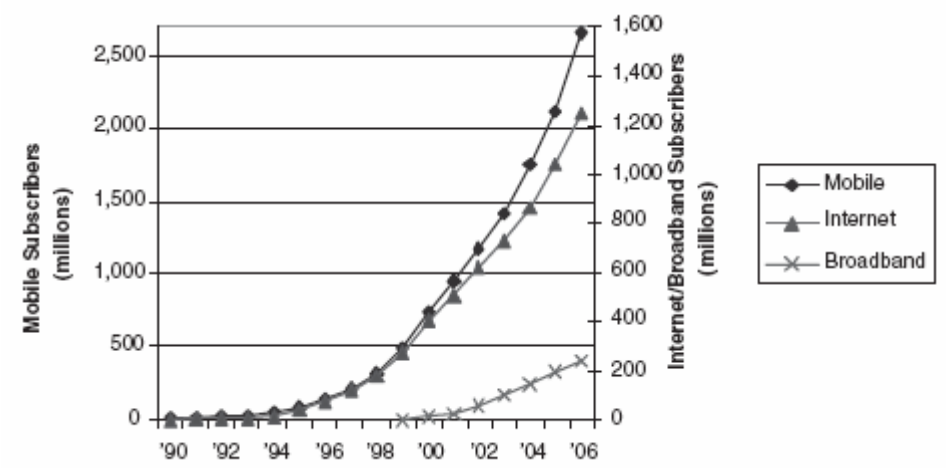
ΣΧΗΜΑ 3-3: CLASSIFICATION AND CID MAPPING. Η ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΙΝΑΙ Η ΙΔΙΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΩ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΩ ΖΕΥΞΗ [COPYRIGHT IEEE 2004, IEEE].....61
ΣΧΗΜΑ 3-4: WIMAX 802.16 QUALITY OF SERVICE ARCHITECTURE [COPYRIGHT© SIEMENS MOBILE COMMUNICATIONS S.P.A. 2006].....63
ΣΧΗΜΑ 3-5: ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΕΣ QOS ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ 65
ΣΧΗΜΑ 3-6: ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΧΟΡΗΓΙΑΣ (GRANT) ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΣΚΟΠΗΣΗΣ (POLL) ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΚΛΑΣΗ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ 65
ΣΧΗΜΑ 3-7: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΕ QOS ΚΛΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΟΥΝ ΕΠΑΡΚΩΣ ΤΙΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΤΩΝ.....66
ΣΧΗΜΑ 3-8: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ SCHEDULER ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΩ ΖΕΥΞΗ.....66
ΣΧΗΜΑ 3-9: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ SCHEDULER ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΩ ΖΕΥΞΗ 67
ΣΧΗΜΑ 3-10: ΣΤΟ ΑΝΩ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ ΤΟ ΜΟΡΦΟΤΥΠΟ ΤΟΥ MAC ΠΛΑΙΣΙΟΥ. ΣΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ ΤΟ ΜΟΡΦΟΤΥΠΟ ΤΟΥ GMH.....69
ΣΧΗΜΑ 3-11: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΥ ΕΝΟΣ MAC SDU ΣΕ ΤΡΙΑ MAC PDUS (ΠΛΑΙΣΙΑ) [COPYRIGHT © 2007 JOHN WILEY & SONS LTD] 71
ΣΧΗΜΑ 3-12: ΠΑΚΕΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ MAC SDUS ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΣΕ ΕΝΑ MAC PDU 72
ΣΧΗΜΑ 3-13: ΠΑΚΕΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΕΜΑΧΙΣΜΟ [COPYRIGHT IEEE 2004, IEEE] 72
ΣΧΗΜΑ 3-14: ΣΥΝΑΛΥΣΩΣΗ MAC PDUS ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ CID.....73
ΣΧΗΜΑ 4-1: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΥ ΕΝΣΩΜΑΤΩΝΕΙ ΤΟ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ DOCSIS ΤΟΥ OPNET 84
ΣΧΗΜΑ 4-2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ DOCSIS ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΗΨΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΟΛΗ ΚΙΝΗΣΗΣ.....85
ΣΧΗΜΑ 4-3: DOCSIS CM PARAMETERS 86
ΣΧΗΜΑ 4-4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ, ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΖΕΥΞΗΣ.....87
ΣΧΗΜΑ 4-5: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ 4 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΣΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ 88
ΣΧΗΜΑ 4-6: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΡΕΙΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ Ο ΚΑΘΕΝΑΣ.....90
ΣΧΗΜΑ 4-7: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΑΛΥΣΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΕΚΠΕΡΑΙΩΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΝΩ ΖΕΥΞΗΣ.....91
ΣΧΗΜΑ 4-8: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΙΤΗΣΗΣ ΕΠΩΜΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΔΙΕΚΠΕΡΑΙΩΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΝΩ ΖΕΥΞΗΣ 92
ΣΧΗΜΑ 4-9: ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ (CAC).....94
ΣΧΗΜΑ 5-1: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ WIMAX, EVDO, HSDPA, HSPA [COPYRIGHT 2006 WIMAX FORUM] 98
ΣΧΗΜΑ 5-2: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ADAPTIVE MIMO SWITCH ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (AMS) [COPYRIGHT 2006 WIMAX FORUM].....102
ΣΧΗΜΑ 5-3: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ WIMAX, EVDO, HSPA, HSPDA [COPYRIGHT 2006 WIMAX FORUM] 102
ΣΧΗΜΑ 5-4: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ WIMAX (802.16A), WI-FI (802.11B), WI-FI (802.11A/G) 104
ΣΧΗΜΑ 5-5: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ FIXED WIMAX, MOBILE WIMAX, HSPA, 1X EV-DO REV A, WI-FI.....105
ΣΧΗΜΑ 5-6: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ PAN, WLAN, WMAN, WAN [DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS, BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY] 106
ΣΧΗΜΑ 5-7: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΛΥΨΗΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ, ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ, ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΗΔΗ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ [COPYRIGHT WIMAX FORUM].....107

1. Ασύρματη Ευρυζωνική Πρόσβαση

Broadband Wireless Access

1.1 Εισαγωγή

Η αύξηση των υπηρεσιών που απαιτούν μεγάλους ρυθμούς μεταγωγής, δρομολόγησης και μεταφοράς καθώς και η απαίτηση για διασύνδεση στο διαδίκτυο, με ευκολία και από οποιοδήποτε γεωγραφικό σημείο, οδήγησαν σε μια ταχεία ανάπτυξη ευρυζωνικών συνδρομητικών τεχνολογιών. Η ευρυζωνική πρόσβαση μπορεί να καλύψει τις κλασικές ανάγκες πρόσβασης στο Παγκόσμιο Ιστό (world wide web access),της καταφόρτωσης (download) αρχείων, αλλά και να προσφέρει το επικοινωνιακό υπόβαθρο για εφαρμογές πολυμέσων (multimedia applications). Οι ευρυζωνικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται πλέον για τηλεφωνία, χρησιμοποιώντας τεχνολογία voice-over-Internet protocol (VoIP), για υπηρεσίες βίντεο κατά απαίτηση (Video on Demand), υψηλής ευκρίνειας τηλεόραση (high definition television), υπηρεσίες διασκέδασης κλπ. Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι όλες οι παραπάνω υπηρεσίες προσφέρονται ήδη μέσω καλωδιακών ευρυζωνικών συστημάτων οπτικής ίνας (fiber-to-the-home) ή ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (xDSL) που έχουν ως φυσικό μέσο το χαλκό.



Σχήμα 1-1: Πλήθος συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας (mobile), Internet και αριθμός ευρυζωνικών συνδέσεων (broadband) 1990-2006 [1,2,3]

Τι συμβαίνει όμως με την *ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση* και κατά πόσο είναι εφικτό να προσφέρουμε ευρυζωνικές υπηρεσίες πάνω από ασύρματο κανάλι ;

Θα πρέπει αρχικά να αναφέρουμε τους δυο βασικούς τύπους ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης. Ο πρώτος τύπος ασύρματης πρόσβασης αποσκοπεί στο να παράσχει υπηρεσίες εφάμιλλες των υπηρεσιών σταθερής γραμμής (fixed-line broadband) και έχει καθιερωθεί να καλείται *σταθερή ασυρματική πρόσβαση (fixed wireless broadband)*.Ο συγκεκριμένος τύπος πρόσβασης θα μπορούσε να θεωρηθεί εναλλακτικός της xDSL τεχνολογίας και των

καλωδιακών modem. Ο δεύτερος τύπος ασύρματης πρόσβασης καλείται mobile broadband και προσφέρει την δυνατότητα κίνησης των χρηστών της υπηρεσίας πρόσβασης. Ο δεύτερος αυτός τύπος πρόσβασης προσφέρει καινούργιες δυνατότητες και ευκολίες στους χρήστες και παράλληλα δημιουργεί και μια νέα ώθηση στην δημιουργία καινούργιων, αναρίθμητων θα τολμούσαμε να πούμε, υπηρεσιών τελικού χρήστη. Το πρωτόκολλο 802.16 του Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) και η τεχνολογία WiMAX (παγκόσμια διαλειτουργικότητα για την μικροκυματική πρόσβαση) είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εξυπηρετούν και τους δυο τύπους ασύρματης πρόσβασης που προαναφέρθηκαν.

1.2 Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόχου στενής ζώνης (Narrowband Wireless Local-Loop Systems)

Η πρώτη εφαρμογή για ασύρματα συστήματα πρόσβασης χρηστών αποσκοπούσε στην κάλυψη αναγκών κλασσικής τηλεφωνίας. Τα συστήματα αυτά αναφέρονταν ως ασύρματος τοπικός βρόχος (wireless local-loop). Βασίζονταν στην τεχνολογία digital-enhanced cordless telephony (βελτιωμένες ψηφιακές ακόρδονες τηλεπικοινωνίες – DECT) και στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (code division multiple access). Μετά την εμφάνιση της ανάγκης για πρόσβαση στο διαδίκτυο πολλές εταιρείες άρχισαν να προωθούν συστήματα που θα κάλυπταν τις αυξημένες ανάγκες. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το σύστημα PCS (personal communication services) της AT&T,το οποίο ανακοινώθηκε το 1997, που λειτουργούσε στην μπάντα των 1,9 MHz και μπορούσε να προσφέρει δυο κανάλια φωνής και σύνδεση δεδομένων με ταχύτητα 128 Kbps. Συστήματα σαν και αυτό ακολούθησαν να αναπτύσσονται μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας που διανύουμε, χωρίς όμως να έχουν μεγάλη επιτυχία. Όλα αυτά ανήκαν στην κατηγορία των fixed broadband συστημάτων.

1.3 Ευρυζωνικά συστήματα 1^{ης} γενιάς (First-Generation Broadband Systems)

Καθώς άρχισαν να αναπτύσσονται τεχνολογίες όπως το xDSL και το DOCSIS (βασισμένο σε cable modems) οι ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης έπρεπε να γίνουν πιο ανταγωνιστικές απέναντι τους, προσφέροντας υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Ασυρματικά συστήματα υψηλότερων συχνοτήτων λειτουργίας άρχισαν να αναπτύσσονται, για τις μπάντες των 2,5 GHz και 3,5 GHz. Συστήματα πολύ υψηλών ταχυτήτων, που αναφέρονταν ως τοπικά πολυσημειακά συστήματα διανομής (local multipoint distribution

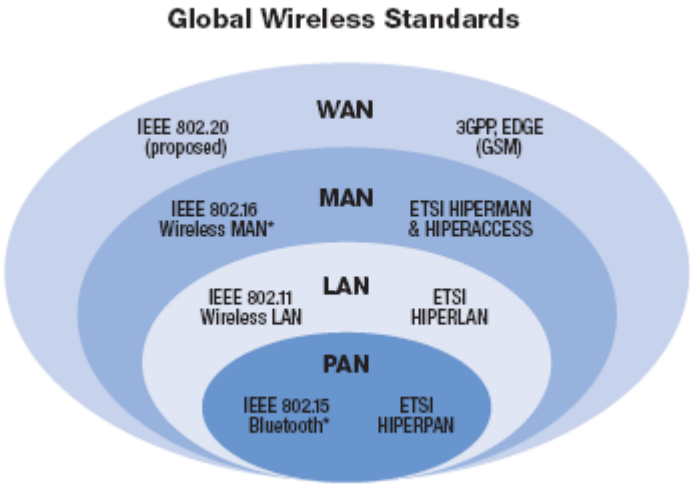
system - LMDS) και υποστήριζαν ταχύτητες εκατοντάδων Mbps αναπτύχθηκαν συγχρόνως στις μπάντες των 24 GHz και 39 GHz. Τα LMDS αναπτύχθηκαν για να καλύψουν ανάγκες μεγάλων πελατών (business users) και γνώρισαν επιτυχία για ένα μικρό διάστημα στο τέλος της δεκαετίας του 1990. Στα τέλη της ίδιας δεκαετίας αναπτύχθηκε ένα άλλο αξιόλογο ασυρματικό σύστημα, ονομαζόμενο μικροκυματικό πολυσημειακό σύστημα διανομής (microwave multipoint distribution system – MMDS) στην μπάντα των 2,5 GHz. Το MMDS χρησιμοποιήθηκε για την παροχή υπηρεσιών video, κυρίως σε ημιαστικές περιοχές που η καλωδιακή τηλεόραση δεν ήταν υπαρκτή (περιοχή ΗΠΑ). Η έλευση της δορυφορικής τηλεόρασης έκανε περιττή την ύπαρξη της MMDS τεχνολογίας για την παροχή υπηρεσιών τηλεόρασης και έτσι έγινε μια προσπάθεια για να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη τεχνολογία για παροχή σύνδεσης με το Internet. Αντίστοιχα ασύρματα συστήματα που απαιτούσαν οπτική επαφή (line-of-sight) αναπτύχθηκαν και εκτός ΗΠΑ, διεθνώς, στην μπάντα των 3,5 GHz.Το μεγάλο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων ήταν ότι απαιτούσαν υποχρεωτικά εξωτερικές κεραίες από πλευράς χρηστών, είχαν μικρή χωρητικότητα λόγω εξυπηρέτησης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών (άρα και χρηστών) από ένα σύστημα βάσης και προϋπέθεταν οπτική επαφή.

1.4 Ευρυζωνικά συστήματα 2ης γενιάς (Second-Generation Broadband Systems)

Τα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς μπορούσαν να υπερπηδήσουν (εν μέρει) την απαίτηση για οπτική επαφή και να προσφέρουν και αξιόλογες χωρητικότητες. Αυτό έγινε εφικτό με την χρησιμοποίηση της αρχιτεκτονικής κυψέλης (cellular architecture) καθώς επίσης και με την εφαρμογή προχωρημένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, που είχαν ως σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση της ζεύξης και του συστήματος σε περιβάλλον πολυόδευσης (multipath environment). Αρχικά πολλές εταιρείες ανέπτυξαν μη τυποποιημένα, ιδιοταγή (proprietary) συστήματα. Προσπάθησαν να αντιμετωπίσουν την πρόκληση της ζεύξης χωρίς οπτική επαφή (non line of sight-NLOS) με την χρησιμοποίηση τεχνικών όπως η ορθογωνική πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplex-OFDM), η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (code division multiple access-CDMA) και η επεξεργασία σήματος από συστήματα πολλαπλών κεραιών. Συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι με τα ευρυζωνικά συστήματα 2ης γενιάς η επικοινωνία με ταχύτητες μερικών Mbps, σε ακτίνα μερικών χιλιομέτρων από το σταθμό βάσης και χωρίς οπτική επαφή έγινε πραγματικότητα.

1.5 Η κάλυψη της ανάγκης για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), αιτία για τη γένεση του 802.16

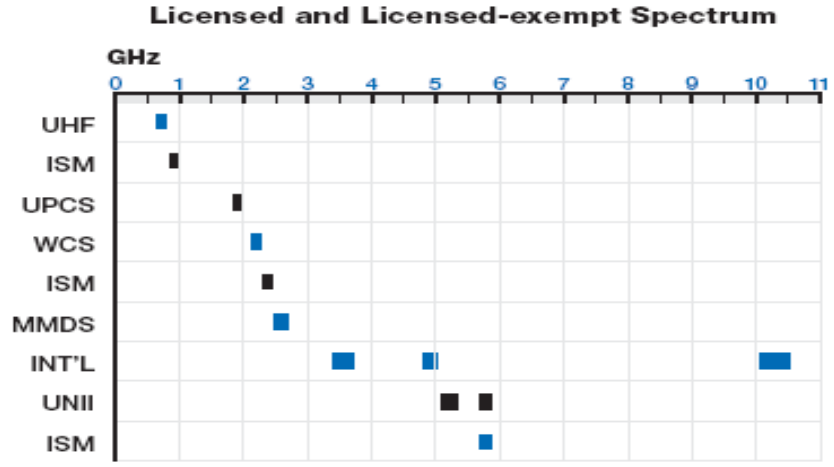
Το 1998 το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών των ΗΠΑ (IEEE) σύστησε μια ομάδα εργασίας με την ονομασία 802.16 για να αναπτύξει ένα νέο πρότυπο που θα κάλυπτε τις ανάγκες των ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων (wireless metropolitan area network-WMAN).



Σχήμα 1-2: Το 802.16 και τα υπόλοιπα πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας που έχουν ως απώτερο σκοπό την διαλειτουργικότητα και την σύγκλιση των δικτύων [πηγή INTEL]

Ο αρχικός σκοπός της ομάδας αυτής ήταν να καλύψει ανάγκες υψηλών ταχυτήτων πάνω από ασύρματο κανάλι, σε περιπτώσεις που δεν υπήρχε αξιόπιστο καλωδιακό δίκτυο, ή οπτικό δίκτυο. Οι λύσεις που προδιαγράφηκαν αρχικά χρησιμοποιούσαν μπάντες που ήταν μεταξύ των 10 GHz και των 66 GHz και αφορούσαν *σταθερή ασυρματική πρόσβαση*. Ο ακριβής τίτλος του πρώτου προτύπου που εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2001 ήταν : ***« IEEE Std. 802.16-2001 IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems »***. Αυτό το πρότυπο προδιέγραφε διαμόρφωση μοναδικού φορέα (single carrier) σε φυσικό επίπεδο (physical layer) και πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (time division multiplexing-TDM) με επιλογή για συχνοδιαιρετική αμφίδρομη επικοινωνία (frequency division duplex-FDD) ή για χρονοδιαιρετική αμφίδρομη επικοινωνία (time division duplex-TDD). Μετά την ολοκλήρωση αυτού του προτύπου η συγκεκριμένη ομάδα άρχισε να εργάζεται πάνω στην επέκταση του προτύπου για μπάντες με ή χωρίς ανάγκη αδειοδότησης μεταξύ 2 GHz και 11

GHz, που θα καθιστούσαν δυνατή και την χρησιμοποίηση NLOS λειτουργίας.



UHF	0.75–0.8	Channels 60-69, called the upper 700 MHz, are by congressional statute to be reclaimed for new services (broadband wireless)
ISM	0.9–0.93	Industrial, Scientific & Medical Band – License-exempt Band
UPCS	1.91–1.93	License-exempt Personal Communications Services
WCS	2.3	Wireless Communications Service.
ISM	2.4–2.48	Industrial, Scientific & Medical Band – License-exempt Band
MMDS	2.5–2.7	Multi-channel Multipoint Distribution Service.
INT'L	3.4–3.7 4.8–5 10.15–10.5	Licensed Bands – Europe, Latin America, Asia Japan Latin America
UNNI	5.15–5.35 5.73–7.83	License-exempt National Information Infrastructure Band Lower (5.15–5.25); Mid (5.25–5.35); Upper UNII (5.73–5.83)
ISM	5.73–5.85	Industrial, Scientific & Medical Ban– License-exempt band

Σχήμα 1-3 : Μπάντες στο φασματικό εύρος 2 GHz – 11 που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το 802.16 GHz [πηγή INTEL]

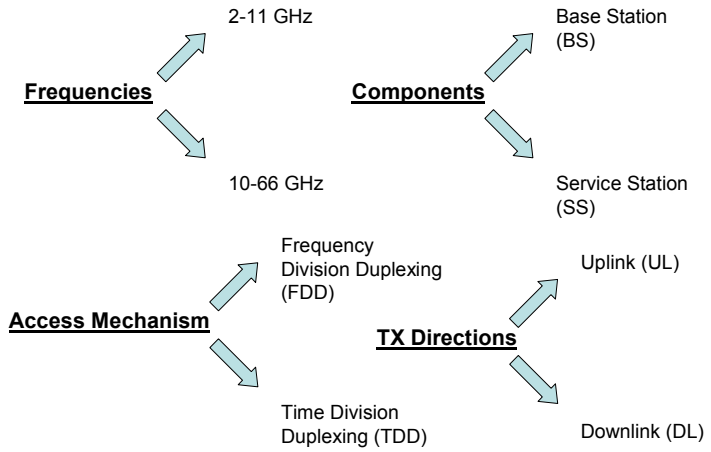
Αυτή η βελτίωση-διασκευή του προτύπου ολοκληρώθηκε το 2003 και πήρε την ονομασία ***802.16a-2003*** ή αναλυτικά : ***« IEEE Standard for Local and metropolitan area networks --- Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems--- Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz »***. Το 802.16a-2003 έθετε το πλαίσιο για την χρησιμοποίηση OFDM τεχνολογίας, με στόχο κυρίως την υπερπήδηση προβλημάτων πολυόδευσης που προέκυπταν από την λειτουργία σε περιβάλλον NLOS. Παράλληλα περιγράφονταν επιπρόσθετες επιλογές στο επίπεδο ελέγχου της πρόσβασης μέσου (medium access control layer-MAC layer) που υποστήριζαν orthogonal frequency division multiple access (OFDMA). Περαιτέρω αναθεωρήσεις έγιναν με τελικό αποτέλεσμα να φτάσουμε σε μια αναθεωρημένη έκδοση το 2004 που περιλαμβάνει και συγχρόνως αντικαθιστά το 802.16, 802.16a και το 802.16c. Η πλήρης ονομασία του 802.16-2004 είναι: « IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems ».

Την συγκεκριμένη διασκευή του προτύπου την υιοθέτησε το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute-ETSI) ως την βάση για το HIPERMAN (high performance metropolitan area network). Το 2003 η ομάδα ανάπτυξης του 802.16 άρχισε να εμπλουτίζει το πρότυπο με προδιαγραφές που θα επέτρεπαν την κινητότητα των χρηστών με ταχύτητες μέχρι 120 Km/h (vehicular mobility). Η συγκεκριμένη διασκευή του προτύπου ονομάστηκε 802.16e: ***« IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1 »***. Εναλλακτικά αναφέρεται και ως ***IEEE 802.16e-2005.*** Προσδιορίζει αλλαγές σε physical και MAC στρώμα που κάνουν δυνατή την κινητότητα. Προβλέπει και την κλιμακωτή OFDM διαμόρφωση. Μετά και από αυτές τις προσθήκες το αντικείμενο του προτύπου έγινε τόσο ευρύ, που θα ήταν δύσκολο κατασκευαστές να υλοποιήσουν το σύνολο αυτών που προβλέπονταν μέσα στο πρότυπο. Φτάνει να αναλογιστούμε ότι υπήρχε πρόβλεψη για λειτουργία σε συχνότητες από 2 GHz έως 66 GHz ! Έτσι λοιπόν ανέκυψε το θέμα της διαλειτουργικότητας (interoperability) μεταξύ των συστημάτων που θα αναπτύσσονταν από τις διάφορες εταιρείας κατασκευής ασύρματων συστημάτων. Το IEEE ανέπτυξε τις προδιαγραφές αλλά άφησε την βιομηχανία να αποφασίσει για την διαδικασία υλοποίησης και το τρόπο με τον οποίο θα εξασφαλιζόταν η διαλειτουργικότητα. Έτσι συστάθηκε τον Ιούνιο του 2001 το WiMAX Forum, που βασίστηκε, ως μοντέλο, στο Wi-Fi Alliance, την αντίστοιχη οντότητα που ήταν υπεύθυνη για την προώθηση και τις δοκιμές διαλειτουργικότητας του προτύπου 802.11. Οι εταιρείες που απαρτίζουν το WiMAX Forum ανέρχονται σε πάνω από 500. Περιλαμβάνει εταιρείες από όλους τους κλάδους των τηλεπικοινωνιών και της πληροφορικής. Το συγκεκριμένο forum εξέδωσε το πρώτο πιστοποιητικό για τεστ διαλειτουργικότητας, βασισμένο πάνω στο IEEE 802.16-2004 τον Ιανουάριο του 2006. Για πρακτικούς λόγους το WiMAX forum προσδιόρισε ένα συγκεκριμένο αριθμό προφίλ συστήματος και πιστοποιήσεων εξοπλισμού. Ένα προφίλ συστήματος προσδιορίζει ένα υποσύνολο υποχρεωτικών και ένα υποσύνολο προαιρετικών χαρακτηριστικών σε PHY επίπεδο, αλλά και σε MAC επίπεδο, που έχουν επιλεγεί από το WiMAX Forum και προδιαγράφονται στο IEEE 802.16-2004 ή στο IEEE 802.16e-2005. Πρέπει να τονισθεί ότι ο χαρακτηρισμός υποχρεωτικών ή προαιρετικών γνωρισμάτων σε ένα προφίλ συστήματος του WiMAX forum μπορεί να είναι διαφορετικός από αυτόν του προτύπου της IEEE. Αυτή την στιγμή υπάρχουν δυο προφίλ συστήματος από το WiMAX forum: ένα βασισμένο στο IEEE 802.16-2004, με OFDM PHY επίπεδο, που καλείται προφίλ σταθερού συστήματος (fixed system profile) και ένα ακόμα που είναι βασισμένο στο IEEE 802.16e-2005, με OFDMA PHY, που καλείται προφίλ συστήματος κινητότητας (mobility system profile). Ένα προφίλ πιστοποίησης καθορίζεται από ένα συγκεκριμένο προφίλ

συστήματος που η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος καναλιού και ο αμφίδρομος τρόπος επικοινωνίας είναι επίσης καθορισμένα. Τα προφίλ πιστοποίησης που υπάρχουν φαίνονται στο σχήμα 1-4.

Band Index	Frequency Band	Channel Bandwidth	OFDM FFT Size	Duplexing	Notes
		Fixed WiMAX Profiles			
1	3.5 GHz	3.5MHz	256	FDD	Products already certified
		3.5MHz	256	TDD	
		7MHz	256	FDD	
		7MHz	256	TDD	
2	5.8GHz	10MHz	256	TDD	
		Mobile WiMAX Profiles			
1	2.3GHz–2.4GHz	5MHz	512	TDD	Both bandwidths must be sup-ported by mobile station (MS)
		10MHz	1,024	TDD	
		8.75MHz	1,024	TDD	
	2.305GHz–	3.5MHz	512	TDD	
2	2.320GHz, 2.345GHz–				
		5MHz	512	TDD	
	2.360GHz	10MHz	1,024	TDD	
3	2.496GHz– 2.69GHz	5MHz	512	TDD	Both bandwidths must be sup-ported by mobile station (MS)
		10MHz	1,024	TDD	
4	3.3GHz–3.4GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	1,024	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	
5	3.4GHz– 3.8GHz, 3.4GHz– 3.6GHz, 3.6GHz–3.8GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	1,024	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	

Σχήμα 1-4: Προφίλ πιστοποίησης του WiMAX forum



Σχήμα 1-5 : Συχνότητες , μηχανισμοί πρόσβασης, συσκευές, κατεύθυνση μετάδοσης

1.6 Η πρώτη ολοκληρωμένη λύση για ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών σε ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα

Η δομή που είχε προβλεφθεί από την αρχή στο πρότυπο 802.16 ήταν η *σταθερή ασυρματική πρόσβαση, με ζεύξεις σημείου προς σημείο (point-to-point) ή σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint).* Η δεύτερη δομή είναι γνωστή σε όλους μας από την ευρύτατη χρησιμοποίηση της σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας και απαιτεί την χρήση σταθερών σταθμών βάσης. Το πρώτο σημαντικό λοιπόν ερώτημα που τίθεται για το κατά πόσο θα μπορέσει το WiMAX να καλύψει επαρκώς τις ανάγκες ενός δικτύου μητροπολιτικού μεγέθους και απαιτήσεων είναι οι ρυθμοί διαμεταγωγής που μπορεί να υποστηρίξει καθώς επίσης και η ακτίνα κάλυψης ενός σταθμού βάσης, που έχει άμεση σχέση με τους συνολικά καλυπτόμενους συνδρομητές. Από τους πίνακες που ακολουθούν μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι στην μπάντα των 3.5 GHz και με εύρος καναλιού 3.5 MHz για ένα τομέα του σταθμού βάσης (one sector) είναι δυνατόν να επιτευχθεί διαμεταγωγή της τάξεως των 10 Mbps.

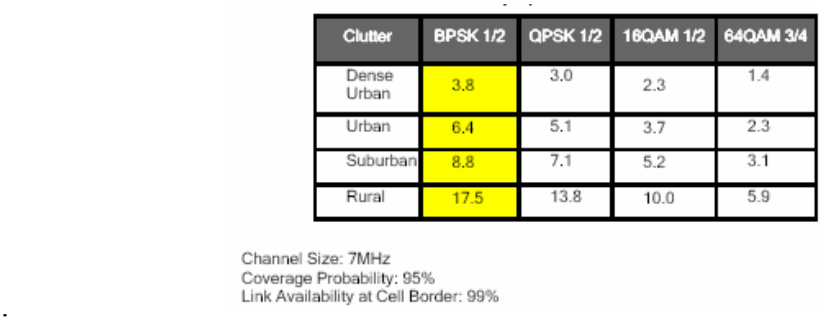
3.5MHz channel Raw Bit Rate (Mbps)*	3.5MHz channel Net Throughput (Mbps)**	7MHz channel Raw Bit Rate (Mbps)*	7MHz channel Net Throughput (Mbps)**	Modulation	Coding Rate
1.5	**1.2**	**2.9**	**2.3**	**BPSK**	**1/2**
2.9	**2.3**	**5.8**	**4.6**	**QPSK**	**1/2**
4.4	**3.5**	**8.7**	**7.0**	**QPSK**	**3/4**
5.8	**4.7**	**11.6**	**9.3**	**16–QAM**	**1/2**
8.7	**7.0**	**17.4**	**14**	**16–QAM**	**3/4**
11.6	**9.3**	**23.2**	**18.6**	**64–QAM**	**2/3**
13.2	**10.5**	**26.2**	**21**	**64–QAM**	**3/4**

Σχήμα 1-6: WayMAX Performance @ 3.5 GHz – Single cell environment: On-Air Capacity [Copyright © Siemens Mobile Communications S.p.A. 2006]

* Above PHY Layer
** Above MAC Layer

Οι ταχύτητες αυτές σε συνδυασμό με ακτίνες κάλυψης βάσεως της τάξεως των 2 Km, για 64QAM ¾ διαμόρφωση δίνουν ένα πολύ καλό υπόβαθρο για την χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου προτύπου σε πληθώρα εφαρμογών.

Το 802.16 αποτελεί μια ιδανική λύση για δίκτυο κορμού ασύρματων τοπικών δικτύων (wireless local area network-WLAN), αφού μπορεί να προσδώσει πολύ μεγάλη ευκινησία σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα κορμού.



Clutter	BPSK 1/2	QPSK 1/2	16QAM 1/2	64QAM 3/4
Dense Urban	3.8	3.0	2.3	1.4
Urban	6.4	5.1	3.7	2.3
Suburban	8.8	7.1	5.2	3.1
Rural	17.5	13.8	10.0	5.9

Channel Size: 7MHz
Coverage Probability: 95%
Link Availability at Cell Border: 99%

Σχήμα 1-7 : Ενδεικτική ακτίνα κυψέλης σταθμού βάσης σε Km με χρήση εξωτερικής κεραίας από πλευράς χρηστών [Copyright © Siemens Mobile Communications S.p.A. 2006]

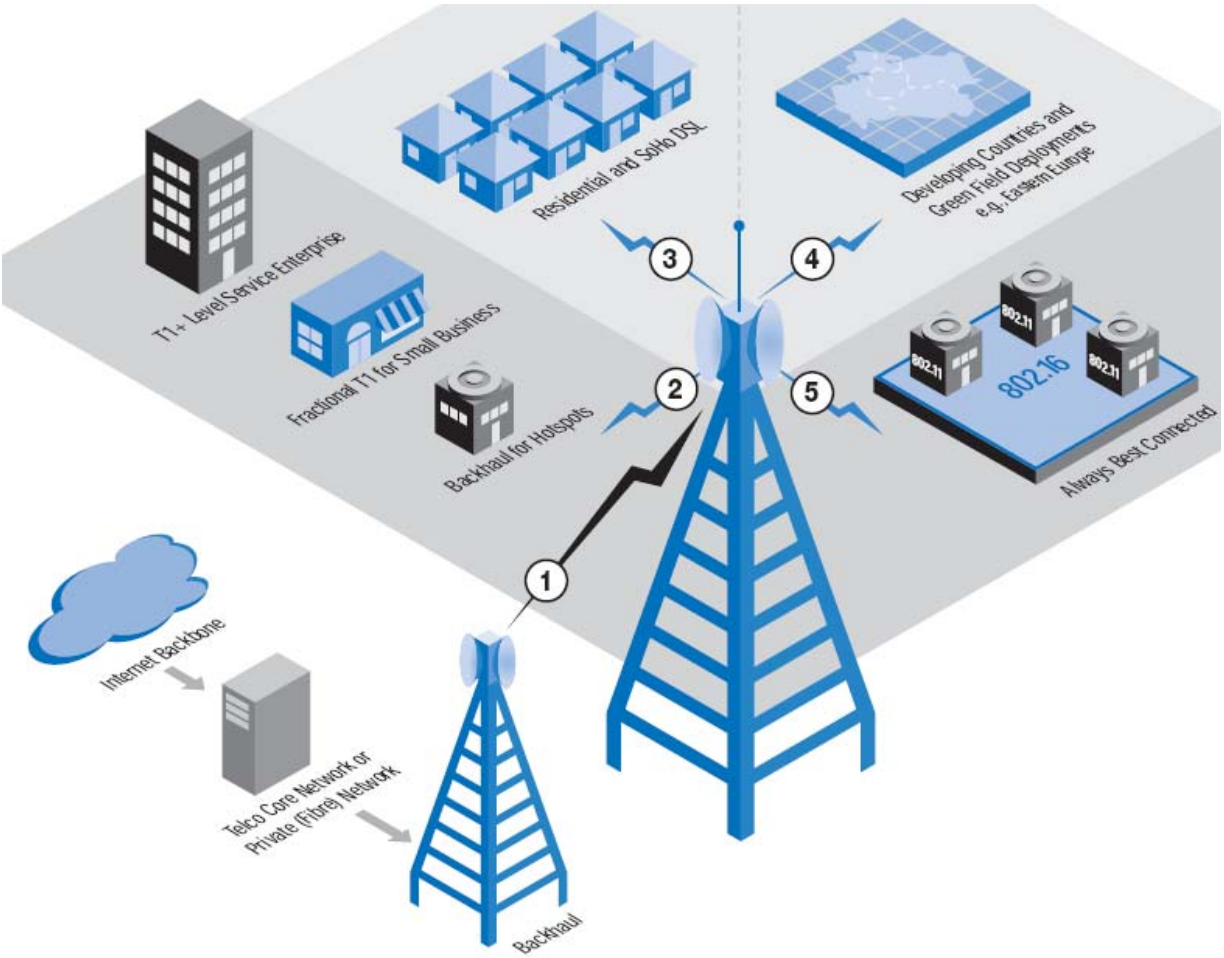
Επίσης με χωρητικότητες 10 Mbps ανά τομέα σταθμού βάσεως ή με την χρησιμοποίηση ζεύξεων σημείο προς σημείο, μπορεί να καλυφθούν ανάγκες επιχειρήσεων που συνήθως απαιτούν μεγάλο ρυθμό ροής δεδομένων, με εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας. Όπως θα αναλυθεί εκτενέστατα σε επόμενο κεφάλαιο ένα κλειδί για την επιτυχία του 802.16 και την καθιέρωση του στην αγορά είναι ότι μπορεί να παράσχει διαβαθμισμένης ποιότητας υπηρεσίες και να καλύψει έτσι και αυστηρές απαιτήσεις καθυστερήσεων (delay), jitter (αυξομείωση καθυστέρησης), εγγυημένου bandwidth. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο MAC επίπεδο που έχει προβλεφθεί να παρέχει Quality of Service (QoS). **Αυτό έχει δημιουργήσει την προσδοκία ότι το 802.16 θα μπορεί να υποστηρίζει ικανοποιητικά και υπηρεσίες VoIP αλλά ακόμα και IPTV**.

Αν θέλαμε να συνοψίσουμε σε βασικούς άξονες τις λύσεις που μπορεί να προσφέρει το 802.16 θα μπορούσαμε να υιοθετήσουμε το παρακάτω πλαίσιο :

1. Κυψελωτό οπισθοζευκτικό δίκτυο (cellular backhaul)
   Οι πάροχοι Internet στις ΗΠΑ είναι υποχρεωμένοι να μισθώνουν γραμμές σε τρίτους παρόχους για τη διασύνδεσή τους. Αυτό τείνει να κάνει τις ενσύρματες συνδέσεις συμφέρουσες οικονομικά. Το αποτέλεσμα είναι ότι μόνο ένα ποσοστό 20% των πύργων επικοινωνιών είναι ασύρματα διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο κορμού στις ΗΠΑ. Αντίθετα στην Ευρώπη, που δεν έχει προωθηθεί σε τόσο μεγάλο βαθμό η μίσθωση γραμμών σε τρίτους παρόχους-ανταγωνιστικές εταιρείες, οι εταιρείες επιζητούν τη διασύνδεση των πύργων τους μέσα από το ιδιόκτητο δίκτυο τους. Αυτό έχει οδηγήσει τις εταιρείες στην ασύρματη οπισθοζευκτική δικτύωση των πύργων τους, σε ποσοστό 80%. Η αναμενόμενη μάλιστα άρση της υποχρέωσης για διασύνδεση

μέσω μισθωμένων γραμμών από την FCC εκτιμάται ότι θα δώσει ώθηση για ανάπτυξη και στις ΗΠΑ ενός ευρύτερου ασύρματου οπισθοζευκτικού δικτύου. Το πρότυπο 802.16 μπορεί να καλύψει τις ανάγκες που υπάρχουν για διασυνδέσεις υψηλών ταχυτήτων *σημείο προς σημείο* και να γίνει το δίκτυο κορμού μεταξύ hotspots.

2. Ευρωζωνικές διασυνδέσεις κατά απαίτηση
   Ένα ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο (last-mile broadband wireless network) μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη hotspots που θα βασίζονται στο πρότυπο 802.11. Επίσης συνδέσεις για επαγγελματική χρήση, μακράς ή βραχείας διάρκειας, μπορεί να ικανοποιηθούν μέσα από το WiMAX, ειδικά σε περιπτώσεις που το καλωδιακό δίκτυο είναι ανύπαρκτο ή η διασύνδεση του συγκεκριμένου σημείου προς εξυπηρέτηση είναι σε κάποιο δυσπρόσιτο σημείο κτιρίου. Η εύκολη και άμεση διασύνδεση σε ευρυζωνικές ταχύτητες (> 2 Mbps) είναι μια νέα δυνατότητα που μπορεί να προσφέρει, στα πλαίσια του WMAN το 802.16. Μια δυνατότητα που εξυπηρετεί κυρίως επαγγελματικές ανάγκες.
3. Οικιακοί πελάτες
4. Περιοχές με ανεπαρκή κάλυψη - καλωδιακή υποδομή
   Εκτός από τις καθαρά αστικές περιοχές που έχουν ένα πυκνό δίκτυο χαλκού και οπτικό δίκτυο μέχρι και τον τελευταίο κατανεμητή (υπό ανάπτυξη στην Ελλάδα) υπάρχουν και πολλές περιοχές, κυρίως ημιαστικές και αγροτικές που δεν έχουν αξιόλογη καλωδιακή υποδομή. Αυτές οι περιοχές μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις δεν μπορούν να κάνουν χρήση τεχνολογίας xDSL λόγω μεγάλου μήκους του χαλκού που διασυνδέει τους συνδρομητές με τα τηλεφωνικά κέντρα ή με τους κατανεμητές. Υπό αυτές τις συνθήκες ένα ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο είναι η μόνη εφικτή λύση από τεχνικής αλλά και οικονομικής απόψεως.
5. Η δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης μετατρέπεται σε αναγκαιότητα
   Η ολοένα αυξανόμενη χρήση ασύρματων συσκευών, αλλά και του Internet, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1-1, οδηγεί σε μια νέα κουλτούρα που επιβάλλει την διασύνδεση. Οι πολίτες πλέον νιώθουν την ανάγκη να έχουν πρόσβαση σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα παντού και πάντα. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που η ασύρματη δικτύωση πάνω από υποδομή που μπορεί να προσφέρει το σύνολο των υπηρεσιών είναι επιβεβλημένη.



Σχήμα 1-8 : Το 802.16 και οι λύσεις δικτύωσης σε διαφορετικούς τομείς-ομάδες χρηστών που μπορεί να προσφέρει [πηγή INTEL]

1.7 Τεχνικές προκλήσεις για επίτευξη ευρυζωνικότητας σε ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN)

Αναμφίβολα για να επιτευχθεί ευρεία αποδοχή σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα θα πρέπει αυτό να μπορεί να παρέχει ρυθμούς δεκάδων Mb ανά δευτερόλεπτο και υψηλού επιπέδου υπηρεσίες. Επίσης, δεδομένης της συντριπτικής αποδοχής του πρωτοκόλλου IP, σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα, θα πρέπει ένα ασύρματο δίκτυο να υποστηρίζει πλήρως εφαρμογές που στηρίζονται στο πρωτόκολλο αυτό και φυσικά να μπορεί να παράσχει όλες τις υπηρεσίες που το IP απαιτεί. Θα πρέπει εν ολίγοις να μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο στην στοίβα TCP/IP. Θα πρέπει, σε ιδανικές τουλάχιστον συνθήκες, να μπορεί να εξυπηρετήσει σταθερούς χρήστες με εξοπλισμό μόνο εσωτερικού χώρου και χρήστες που βρίσκονται σε κίνηση, με υψηλές ταχύτητες. Ουσιαστικά θα πρέπει να μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε είδους χρήστη και συσκευή. Και όλα αυτά χωρίς να πρέπει ο τελικός

χρήστης να επωμιστεί εκπτώσεις σε ποιότητα, αξιοπιστία και ενδεχόμενα κενά ασφαλείας. Όλα αυτά δεν μπορούν παρά να αποτελούν μια πρόκληση από τεχνικής απόψεως. Μια βασική κατηγοριοποίηση που θα μπορούσαμε να κάνουμε για τις τεχνικές απαιτήσεις ακολουθεί :

- Ανάπτυξη ενός συστήματος που θα επιτρέπει αξιόπιστη μετάδοση και λήψη δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς ροής μέσα σε ένα εχθρικό ασύρματο περιβάλλον, από άποψη ηλεκτρομαγνητικού θορύβου
- Επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης (spectral efficiency-{bit/sec/Hz}) και κάλυψης χρησιμοποιώντας το μικρότερο δυνατό εύρος συχνοτήτων.
- Υποστήριξη και αποδοτική πολυπλεξία υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις σε επίπεδο υπηρεσίας (throughput, delay, jitter).
- Απροβλημάτιστη διασύνδεση κινητών χρηστών και αρραγής μεταγωγή (handover) και περιαγωγή (roaming)
- Ασφάλεια δεδομένων πάνω από ένα φυσικά μη ασφαλές κανάλι
- Προσαρμογή σε όλα τα πρωτόκολλα που εξυπηρετούνται από το IP πρωτόκολλο, υπό την έννοια της βέλτιστης εξυπηρέτησης αυτών

Όπως γίνεται εμφανές από τα παραπάνω, οι απαιτήσεις που τίθενται για την εξυπηρέτηση ενός WMAN δικτύου είναι συγκρουόμενες και ως εκ τούτου θα πρέπει να υπάρξει ένα " trade-off " μεταξύ αυτών, που στην ιδανική περίπτωση θα καθορίζεται και από το χρήστη, κατά βούληση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κάλυψη και η χωρητικότητα της ζεύξης. Η λύση που προσφέρει το 802.16 σε αυτή τη περίπτωση είναι η δυναμική επιλογή τρόπου διαμόρφωσης φορέα. Όπως μπορούμε να δούμε και στα σχήματα 1-5 και 1-6 υπάρχει μια ανταλλαγή (trade off) μεταξύ χωρητικότητας και εμβέλειας. Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα trade off είναι αυτό της κατανάλωσης ισχύος σε φορητές συσκευές και η επεξεργαστική ισχύ-χρήση αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται μια πιο αναλυτική περιγραφή των απαιτήσεων αυτών, δίχως όμως να εισερχόμαστε σε εξαντλητικές τεχνικές λεπτομέρειες, που λόγω εύρους της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται από το συγκεκριμένο πρότυπο θα ήθελε χιλιάδες σελίδες περιγραφής.

1.7.1 Ασύρματος ραδιοδίαυλος

Η πρώτη και η πιο θεμελιώδης πρόκληση για την ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση προέρχεται από το ίδιο το κανάλι. Στις ενσύρματες επικοινωνίες το σήμα-ηλεκτρομαγνητικό κύμα οδηγείται από το πομπό στο δέκτη μέσα από ένα οδηγό (χάλκινο σύρμα ή γυαλί). Στην περίπτωση της ασύρματης επικοινωνίας που δεν υπάρχει κυματοδηγός τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα βασίζονται σε πολύπλοκους μηχανισμούς διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Ακόμα

πιο δύσκολες γίνονται οι συνθήκες όταν υπάρχουν παρεμβαλλόμενα αντικείμενα (εμπόδια), σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη, ανώμαλη μορφολογία του εδάφους, παρεμβολές, θόρυβος από διάφορες πηγές κλπ. Οι παραπάνω παράγοντες δημιουργούν εξασθένιση του σήματος, καθυστέρηση, παραμόρφωση και χρονική διακύμανση του τρόπου μετάδοσης. Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ψηφιακή ασυρματική μετάδοση, επηρεάζοντας την ποιότητα της ψηφιακής επικοινωνίας, και σχετίζονται με τον ραδιοδίαυλο.

- *Pathloss*

  Σε NLOS περιβάλλοντα, η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος εξασθενεί συναρτήσει της απόστασης με ρυθμό μεγαλύτερο σε σχέση με ένα LOS περιβάλλον. Αυτή η εξασθένιση λόγω απόστασης, που αποκαλείται *pathloss,* εξαρτάται από μεταβλητές όπως τα αντικείμενα-εμπόδια, την απόσταση της ζεύξης, το είδος του εδάφους (ξηρά, θάλασσα), τα φυλλώματα των δένδρων και άλλα. Η εξασθένιση είναι επίσης ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που μεταφέρει την πληροφορία, όπερ σημαίνει ότι ευρυζωνικά συστήματα που δουλεύουν σε συχνότητες άνω των 2 GHz σε NLOS συνθήκες θα αντιμετωπίσουν έντονο *pathloss.*

- *Shadowing*

  Μεγάλα εμπόδια, όπως κτίρια, δημιουργούν τοπικό μπλοκάρισμα του σήματος. Τα ραδιοκύματα διαδίδονται μέσω του φαινομένου της περίθλασης, με σημαντικές όμως απώλειες ισχύος. Αυτού του είδους απώλεια χαρακτηρίζεται ως ραδιοσκίαση (shadowing) και είναι ένα επιπρόσθετο πρόβλημα.

- Multipath Fading

  Η παρουσία πολλών αντικειμένων, που δημιουργούν ανακλάσεις και σκέδαση, προκαλεί λήψη του σήματος στον πομπό από πολλαπλούς δρόμους διαφορετικού μήκους, με αποτέλεσμα την πολλαπλή λήψη του χρήσιμου σήματος με διαφορές φάσης. Αυτό το φαινόμενο, που ονομάζεται διάλειψη πολλαπλής διαδρομής (multipath fading), δημιουργεί μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ του λαμβανόμενου συναρτήσει του χρόνου και της θέσεως λήψεως. Μικρές διαφορές στη θέση ή στη χρονική στιγμή λήψεως δημιουργούν μεγάλες διαφορές στην λαμβανόμενη ισχύ. Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύνεται με τεχνικές διαφορικής λήψεως συχνότητας ή χώρου (diversity) και κατάλληλη επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων.

- *Intersymbol interference*

  Σε ένα περιβάλλον πολυόδευσης, το σήμα ανάλογα με τον δρόμο που ακολουθεί έχει και διαφορετική χρονική καθυστέρηση μέχρι να φτάσει στο δέκτη. Αυτή η χρονική διαφορά λήψεως από τον δέκτη του ίδιου σήματος, λόγω διαφορετικής απόστασης

που έχει διανύσει το σήμα δημιουργεί το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference-ISI) στον δέκτη. Έτσι ένα σύμβολο μπορεί να φτάσει την χρονική περίοδο ενός επόμενου συμβόλου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ροής των συμβόλων τόσο πιο έντονο είναι το πρόβλημα που δημιουργείται. Η μέθοδος για να αντιμετωπισθεί αυτό το φαινόμενο είναι η εξισορρόπηση (equalization), η οποία όμως απαιτεί μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Η μέθοδος της OFDM διαμόρφωσης είναι ένας άλλος τρόπος που έχει αποκτήσει μεγάλη απήχηση τα τελευταία χρόνια και φαίνεται ότι λύνει το συγκεκριμένο πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό. Αυτός είναι και ένας από τους σημαντικότερους λόγους που επελέγη η συγκεκριμένη διαμόρφωση για το WiMAX.

- *Frequency Dispersion*

  Η σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη προκαλεί διασπορά συχνότητας στον φορέα που καλείται φαινόμενο Doppler (Doppler spread). Το φαινόμενο Doppler είναι άμεσα συνδεδεμένο με την σχετική ταχύτητα κίνησης και την συχνότητα του φορέα.. Το φαινόμενο Doppler, στα ευρυζωνικά συστήματα οδηγεί σε υποβάθμιση του λόγου σήματος-προς-θόρυβο (signal-to-noise-ratio-SNR) και μπορεί να οδηγήσει επίσης σε δυσκολία συγχρονισμού μεταξύ πομπού και δέκτη. Το συγκεκριμένο φαινόμενο απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη σε συστήματα που χρησιμοποιούν OFDM διαμόρφωση λόγω του ότι μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της ορθογωνιότητας μεταξύ των υποφερουσών.

- *Noise*

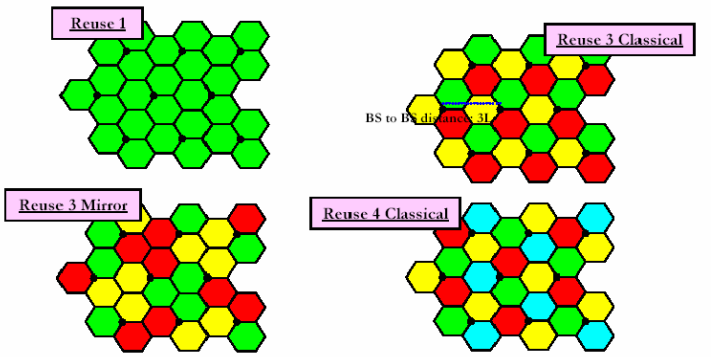
  Ο προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος (additive white Gaussian noise-AWGN) είναι η μεγαλύτερη αιτία υποβάθμισης του σήματος, σε κάθε τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Δεδομένου ότι η ποσότητα του θερμικού θορύβου που συλλέγεται από το δέκτη είναι ανάλογη με το εύρος ζώνης, το δάπεδο θορύβου (noise floor) για ένα ευρυζωνικό δέκτη είναι αρκετά υψηλότερο σε σύγκριση με ένα στενοζωνικό δέκτη. Το υψηλότερο noise floor, σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο pathloss μειώνουν την ακτίνα κάλυψης των ευρυζωνικών συστημάτων.

- *Interference*

  Περιορισμοί στο διαθέσιμο εύρος ζώνης υπαγορεύουν την χρησιμοποίηση αυτού από πολλούς χρήστες. Αυτό δημιουργεί το πρόβλημα της παρεμβολής μεταξύ των χρηστών. Σε συστήματα που γίνεται προσπάθεια αποδοτικής χρήσης του εύρους ζώνης εμφανίζεται έντονο το πρόβλημα της παρεμβολής μεταξύ χρηστών.

1.7.2 Η έλλειψη φάσματος

Η έλλειψη διαθέσιμου φάσματος, σε όλες τις ανεπτυγμένες τεχνολογικά χώρες και τα κανονιστικά πλαίσια αυτών, που ρυθμίζουν με πολύ συγκεκριμένο τρόπο την χρήση του, δημιουργούν ακόμα μεγαλύτερες δυσκολίες. Η ανάγκη για την εξυπηρέτηση όλο και περισσότερων χρηστών με όλο και πιο απαιτητικές υπηρεσίες σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, χρησιμοποιώντας περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων οδηγούν σε μια συνεχή προσπάθεια για αποδοτικότερη χρήση του διατιθέμενου φάσματος. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος-τεχνική για την επίτευξη μεγάλης φασματικής απόδοσης, σε επίπεδο συστήματος, είναι η χρήση της κυψελωτής αρχιτεκτονικής (cellular architecture). Η βασική ιδέα της αρχιτεκτονικής αυτής υπαγορεύει την χρήση πολλαπλών σταθμών βάσεως με μικρότερη ισχύ εκπομπής, στη θέση ενός σταθμού βάσεως που εκπέμπει σε υψηλή ισχύ για να καλύψει μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή. Η κάθε περιοχή που καλύπτει ο σταθμός βάσεως ονομάζεται κυψέλη. Πολλές φορές η περιοχή που καλύπτει ο σταθμός βάσεως χωρίζεται σε τομείς (sectors) που εξυπηρετούνται από τις κατευθυντικές κεραίες του εκάστοτε σταθμού βάσεως. Κάθε συστάδα σταθμών βάσης που χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη ομάδα συχνοτήτων ονομάζεται cluster. Ο επιμερισμός συχνοτήτων ανά σταθμό και κεραία γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν οι παρεμβολές. Ο επιμερισμός των διαθέσιμων συχνοτήτων σε γειτονικά clusters γίνεται με τέτοιο τρόπο που οι ίδιες συχνότητες να χρησιμοποιούνται από σταθμούς που απέχουν μεγάλη απόσταση. Αυτό οδηγεί στην λεγόμενη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (frequency reuse).



Σχήμα 1-9: Πολυκυτταρικό περιβάλλον @ 3.5 GHz Τοπολογίες δικτύου και επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων [Copyright© . Siemens Mobile Communications S.p.A. 2006]

Για μεγαλύτερες χωρητικότητες και φασματική απόδοση η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Αυξάνοντας όμως την επαναχρησιμοποίηση οδηγούμαστε σε δυνητικά περισσότερες παρεμβολές. Για να εντείνουμε την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων πρέπει να σχεδιάσουμε συστήματα πομπών και δεκτών που θα μπορούν να λειτουργούν υπό συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (signal-to-interference-plus-noise ratio-SINR) ή να υλοποιήσουμε αποδοτικές μεθόδους αντιμετώπισης των παρεμβολών. Μια αποτελεσματική μέθοδος είναι η επεξεργασία σήματος, προερχόμενο από πολλαπλές κεραίες (multiple antenna processing).

Τεχνικές που μεγιστοποιούν την φασματική αποδοτικότητα και την χωρητικότητα του συστήματος, πέραν της κυψελωτής αρχιτεκτονικής, αξιοποιώντας την πληροφορία καναλιού, αναφέρονται ενδεικτικά παρακάτω.

- *Adaptive modulation and coding*

  Μια μέθοδο για την επίτευξη του σκοπού που περιγράφηκε παραπάνω είναι η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (adaptive modulation and coding) ανά χρήστη ή ανά ομάδα πακέτων συναρτήσει των SINR συνθηκών που επικρατούν στην ζεύξη. Χρησιμοποιώντας εκείνη τη διαμόρφωση και κωδικοποίηση που προσφέρουν τον μεγαλύτερο ρυθμό ροής πληροφορίας για ένα δεδομένο φάσμα συχνοτήτων και SINR ο ρυθμός ροής πληροφορίας για το χρήστη, ως εκ τούτου και η χωρητικότητα, μεγιστοποιούνται. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση έχουν υιοθετηθεί από το WiMAX - αποτελούν φυσικά κομμάτι του 802.16 .

- *Spatial multiplexing*

  Η ιδέα της χωρικής πολύπλεξης (spatial multiplexing) βασίζεται στην παράλληλη μετάδοση ρευμάτων πληροφορίας (streams) από πολλαπλές κεραίες που διαχωρίζονται στον δέκτη χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Η χωρική πολύπλεξη παρέχει βελτίωση στο ρυθμό ροής και τη χωρητικότητα , που αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των κεραιών που χρησιμοποιούνται. Στη χωρική πολύπλεξη χρησιμοποιούνται κεραιοσυστήματα πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (multiple input-multiple output-MIMO)

- *Efficient multi-access techniques*

  Εκτός από την αποδοτική χρήση του παρερχομένου φάσματος ανά χρήστη αναγκαίος είναι και ο σχεδιασμός για την αποδοτική κατανομή των πόρων του δικτύου ανάμεσα στους χρήστες. Η συγκεκριμένη εργασία και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτού βαραίνουν το MAC επίπεδο του πρωτοκόλλου 802.16 .

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι η χωρητικότητα και η φασματική αποδοτικότητα δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να διαχωριστούν από τον παράγοντα της κάλυψης. Εάν θέλουμε να επιτύχουμε μεγάλες χωρητικότητες και καλή φασματική αποδοτικότητα θα

πρέπει να μειώσουμε την ακτίνα του κελιού και να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους σταθμούς βάσεως ανά μονάδα επιφάνειας. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι θα πρέπει να γίνει σωστός σχεδιασμός και εξισορρόπηση μεταξύ της ανάγκης κάλυψης και της χωρητικότητας, έτσι ώστε να μπορεί να εξασφαλισθεί υψηλή αξιοπιστία και καλή ποιότητα επικοινωνίας στον τελικό χρήστη.

1.7.3 Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service-QoS)

QoS είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την επίτευξη των επιδιωκόμενων επιδόσεων ποιότητας και διαθεσιμότητας καθώς και την ικανοποίηση του πελάτη για μια συγκεκριμένη υπηρεσία. Χρησιμοποιείται ευρύτατα για να καθορίσει το πόσο ικανοποιητικά λειτουργεί ένα δίκτυο και να ορίσει συνθήκες λειτουργίας. Αντικατοπτρίζει την εμπορικότητα των εφαρμογών της ασύρματης επικοινωνίας. Είναι μέρος της προσπάθειας να προσαρμοστούν τα ασύρματα δίκτυα στις απαιτήσεις των χρηστών. Θα μπορούσαμε να κάνουμε την παρακάτω, πιο αναλυτική, περιγραφή του QoS :

- ***Intrinsic QoS*** **(** εγγενής ποιότητα υπηρεσιών)

  Χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς ως κριτήριο ορθής σχεδίασης, υλοποίησης και λειτουργίας του δικτύου. Στα πλαίσια της εγγενούς ποιότητας, ορίζονται τεχνικοί παράμετροι ποιότητας που είναι χαρακτηριστικά του δικτύου**.**

- ***Perceived QoS*** (αντιλαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσιών)

  Εκφράζει την ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης του δικτύου. Είναι δηλαδή μια υποκειμενική έννοια και αντίστοιχα οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται λαμβάνουν υπόψη την υποκειμενικότητα αυτή.

- ***Assessed QoS*** (καθοριζόμενη ποιότητα υπηρεσιών)

  Είναι η αίσθηση της ποιότητας που έχει στο μυαλό του ένας πελάτης μιας υπηρεσίας τη στιγμή που πρέπει να αποφασίσει αν θα συνεχίσει να μισθώνει τον ίδιο πάροχο υπηρεσιών. Είναι ένα μέγεθος που απασχολεί τους υπεύθυνους πωλήσεων και τους marketing managers.

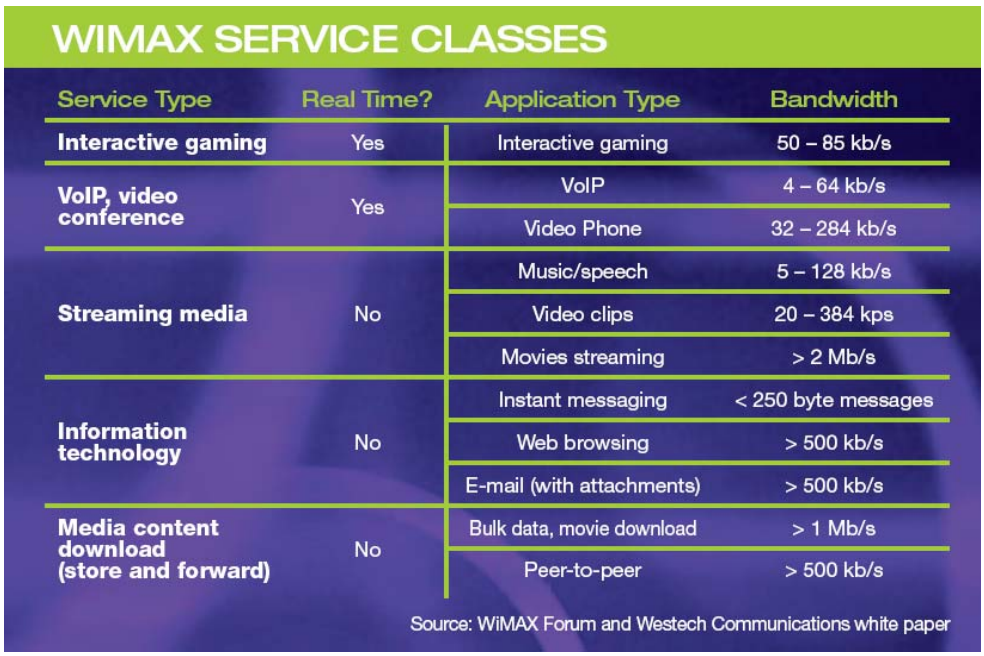
  Τα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν μια πληθώρα υπηρεσιών, που η καθεμιά από αυτές έχει διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και κατανομή κίνησης. Στο σχήμα 1-9 μπορούμε να δούμε κάποιες ενδεικτικές παραμέτρους κίνησης για διάφορες εφαρμογές. Επιπροσθέτως, των συγκεκριμένων απαιτήσεων QoS που δημιουργούνται από την φύση των εφαρμογών, πολλές φορές απαιτείται η διαφοροποίηση των υπηρεσιών βάσει του συμβολαίου μεταξύ χρήστη και παρόχου. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρήστης, ανάλογα με το συμβόλαιο του, μπορεί να λαμβάνει και διαφορετική ποιότητα εξυπηρέτησης. Ο συνδυασμός των παραπάνω

στοιχείων σε ένα και μόνο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης σίγουρα δεν είναι εύκολη υπόθεση.

Το πρόβλημα της παροχής QoS σε ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα εντοπίζεται κυρίως στην αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων συχνοτήτων. Αποδοτικοί αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού που ικανοποιούν τις QoS απαιτήσεις των χρηστών και των εφαρμογών, χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους ραδιοπόρους,

Εφαρμογές **Παράμετροι**	**Διαδραστικά Παιχνίδια** (Interactive Gaming)	**Φωνή** (Voice)	**Μεσική ροοθήκευση** (Streaming media)	**Δεδομένα** (Data)	**Βίντεο** (Video)
Ρυθμός Δεδομένων (Data Rate)	50-85 Kbps	4-64 Kbps	5-384 Kbps	0.01-100 Mbps	>1 Mbps
Ενδεικτικές Εφαρμογές (Applications)	Διαδραστικά Παιχνίδια	VoIP	Μουσική, φωνή, video clips	Web Browsing, e-mail, telnet, file downloads	IPTV, peer-to-peer video sharing
Ροή Κίνησης (Traffic flow)	Πραγματικού χρόνου	Πραγματικού χρόνου-Συνεχής	Συνεχής-ριπαία (bursty)	Μη πραγματικού χρόνου, ριπαία	Συνεχής
Απώλεια Πακέτων (Packet Loss)	Μηδενική	<1%	<1% ήχος <2% εικόνα	Μηδενική	$<10^{-8}$
Απόκλιση Καθυστέρησης (Delay Variation)	Άνευ ουσίας	<20 msec	<2 sec	Άνευ ουσίας	<2 sec
Καθυστέρηση (Delay)	<50-100 msec	<100 ms	<250 msec	Ευέλικτο	<100 msec

Σχήμα 1-10: Παράμετροι εγγενούς ποιότητας υπηρεσιών για ενδεικτικές μορφές κίνησης



πρέπει να αναπτυχθούν. Πρέπει δηλαδή η χωρητικότητα να κατανεμηθεί σε σωστή αναλογία ανάμεσα στους χρήστες και στις εφαρμογές, ανά χρονική περίοδο, έτσι ώστε να έχουμε πάντα την μέγιστη δυνατή ποιότητα και συγχρόνως εμπορική εκμετάλλευση του δικτύου μας.

Αυτή είναι η μεγάλη πρόκληση που αντιμετωπίζει το MAC επίπεδο κάθε πρωτοκόλλου που φιλοδοξεί να καλύψει τις ανάγκες ενός μητροπολιτικού δικτύου. Πρέπει συγχρόνως να μπορεί να διαχειρίζεται πολλαπλούς τύπους ροών κίνησης -συνεχείς και κατά ριπές- με διαφορετικές απαιτήσεις σε throughput και καθυστερήσεις. Απαιτείται επίσης ένας αποδοτικός μηχανισμός σηματοδοσίας για τους διάφορους χρήστες και εφαρμογές που να υποδεικνύει τις QoS απαιτήσεις τους και να διαχωρίζει τις μέσα στο δίκτυο τις διάφορες ροές δεδομένων.

Η παροχή QoS είναι πολύ μεγαλύτερη πρόκληση στην περίπτωση των κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών, συγκριτικά με αυτή των σταθερών ευρυζωνικών επικοινωνιών. Τα προβλήματα της χρονικής μεταβλητότητας και η αδυναμία πρόβλεψης του καναλιού γίνονται πιο έντονα, λόγω της ανάγκης για μεταγωγή από κυψέλη σε κυψέλη. Οι μεταγωγές εισάγουν μεγαλύτερες καθυστερήσεις και επιπρόσθετες απώλειες πακέτων. Η μείωση των καθυστερήσεων και των απωλειών πακέτων είναι επιβεβλημένη για την αύξηση της ποιότητας υπηρεσιών. Η μεταγωγή απαιτεί συντονισμό των ραδιοπόρων επί των πολλαπλών κυψελών.

Μέχρι στιγμής έχει γίνει αναφορά για QoS, που αναφέρεται μόνο σε επίπεδο ασύρματης ζεύξεως . Η αντιλαμβανόμενη όμως ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει ο χρήστης εξαρτάται από την συνολική λειτουργία του δικτύου, από την άκρη-σε-άκρη επικοινωνία. Έτσι λοιπόν το QoS από άκρη-σε-άκρη εξαρτάται και από λειτουργίες όπως αυτή της δρομολόγησης (routing), της μεταγωγής στο δίκτυο κορμού (core switching), της συνάθροισης κυκλωμάτων (aggregation). Σε επίπεδο δικτύου κορμού των WMAN κυρίαρχο ρόλο θα διαδραματίσει το IP πρωτόκολλο. Το QoS που μπορεί να εξασφαλίσει το IP-layer στο κορμό του δικτύου είναι καθοριστικής σημασίας για την από άκρη-σε-άκρη ποιότητα υπηρεσίας.

1.7.4 Κινητότητα (Mobility)

Το γεγονός ότι οι συνδρομητές κινούνται σε μια ευρεία περιοχή δημιουργεί σοβαρές απαιτήσεις από την πλευρά της δικτυακής υποδομής. Οι δυο κύριες λειτουργίες που εγείρουν δυσκολίες είναι η επικοινωνία με ανενεργούς χρήστες για εκκίνηση συνεδρίας (service initiation) και παράδοση πακέτων, ανεξαρτήτως της θέσεως που βρίσκονται μέσα στο δίκτυο και η συνέχιση μιας συνεδρίας χωρίς διακοπή κατά την κίνηση του χρήστη. Η πρώτη αποτελεί την λεγόμενη περιαγωγή (roaming) και η δεύτερη αποτελεί την λεγόμενη μεταπομπή (handoff). Οι δυο αυτές λειτουργίες είναι καθοριστικής σημασίας για την αντιλαμβανομένη ποιότητα υπηρεσίας από το χρήστη.

Roaming: Η αποστολή του εντοπισμού περιαγόμενων χρηστών είναι έργο, συνήθως, κεντρικοποιημένων βάσεων δεδομένων που αποθηκεύουν πληροφορίες για την θέση των

χρηστών. Αυτές οι βάσεις δεδομένων κρατούνται ενήμερες για τη θέση του κάθε χρήστη μέσω μηνυμάτων που εκπέμπουν οι συσκευές των χρηστών, καθώς κινούνται από την μια τοποθεσία στην άλλη. Η κινητικότητα του χρήστη είναι παράγοντας του πόσο συχνά στέλνονται αυτά τα μηνύματα. Και το ερώτημα που γεννάται σε αυτό το σημείο είναι αν θα επιλεγεί ένας μεγάλος αριθμός μηνυμάτων αναγνώρισης θέσεως που θα στέλνεται σε λίγους σταθμούς βάσεως ή ένας μικρότερος αριθμός μηνυμάτων που θα στέλνεται σε περισσότερους σταθμούς βάσεως, με απώτερο σκοπό την ενημέρωση τους για την ύπαρξη του εκάστοτε χρήστη μέσα στη περιοχή που καλύπτουν.

Handoff: Το σύστημα πρέπει να παρέχει ένα τρόπο έτσι ώστε η μεταπομπή από σταθμό βάσης σε σταθμό βάσης να γίνεται χωρίς να διακόπτεται η συνεδρία ή οι συνεδρίες που έχει εγκαθιδρύσει η συσκευή του χρήστη με άλλες συσκευές του δικτύου. Η διαδικασία μεταπομπής περιλαμβάνει τον εντοπισμό του επόμενου σταθμού βάσης που θα περιέλθει ο χρήστης, την απόφαση για το πότε ακριβώς θα γίνει η μεταπομπή και την εκτέλεση της μεταπομπής. Οι μεταπομπές πρέπει να γίνονται κατά το δυνατόν πιο σπάνια. Θα πρέπει να βρεθεί όμως ο κατάλληλος αλγόριθμος μεταπομπής γιατί σε περίπτωση μεγάλου χρονικού διαστήματος μέχρι να γίνει η μεταπομπή μπορεί η συνεδρία να έχει διακοπεί, λόγω χαμηλού σήματος. Επίσης κατά την μεταπομπή από τον ένα σταθμό στον άλλο, θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί η ύπαρξη διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων από τον νέο σταθμό βάσης, για να μην έχουμε απώλεια κλήσεων. Κάποια συστήματα κάνουν κράτηση εύρους για είσοδο νέων χρηστών, που προέρχονται από μεταπομπή, κάποια άλλα δίνουν προτεραιότητα σε συνεδρίες από χρήστες που προέρχονται από μεταπομπή, σε σχέση με αυτούς που κάνουν αίτηση για νέα συνεδρία και βρίσκονται μέσα στο τομέα κάλυψης τους. Μια άλλη πτυχή της διαχείρισης της κινητότητας που γίνεται ολοένα και πιο σημαντική είναι η IP κινητότητα (IP mobility). Παραδοσιακά στα κινητά δίκτυα η διαχείριση της κινητότητας των χρηστών γίνεται από το δεύτερο επίπεδο (2nd layer) και σε επίπεδο IP η κίνηση του χρήστη παραμένει “αόρατη”. Η συσκευή συνεχίζει να έχει την ίδια IP διεύθυνση, ασχέτως που αλλάζει σταθμό βάσης. Για τις περισσότερες εφαρμογές αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, αλλά υπάρχουν και μερικές όπως η πολυεκπομπή και το web-caching που κάτι τέτοιο δεν είναι αποδεκτό. Η διαχείριση της κινητότητας βασισμένη στο IP πρωτόκολλο, αν και είναι δύσκολη υπόθεση, απαιτείται σε περιπτώσεις που έχουμε περιαγωγή και μεταπομπή μεταξύ ετερογενών δικτύων, όπως για παράδειγμα από Wi-Fi σε WiMAX.

1.7.5 Φορητότητα (Portability)

Η φορητότητα είναι ένα ακόμα ασυναγώνιστο προτέρημα των ασύρματων επικοινωνιών. Η φορητότητα είναι επιθυμητή όχι μόνο για τις πλήρως κινητές εφαρμογές, που η κίνηση του

χρήστη μπορεί να θεωρηθεί συνεχής, αλλά και για νομαδικές εφαρμογές - στις νομαδικές εφαρμογές μπορεί ένα τερματικό να συνδεθεί στο δίκτυο από διαφορετικές περιοχές, χωρίς όμως να υπάρχει δυνατότητα μεταπομπής. Η φορητότητα επιβάλλει ότι η συσκευή του χρήστη θα πρέπει να έχει αυτονομία ενέργειας και σχετικά μικρό βάρος, έτσι ώστε να μπορεί να μετακινηθεί με άνεση. Είναι κατανοητό από τα παραπάνω ότι για επίτευξη μεγαλύτερης αυτονομίας και συγχρόνως ικανοποιητικής φορητότητας θα πρέπει η ενεργειακή κατανάλωση να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό. Αυτή η απαίτηση δημιουργεί την ανάγκη για αποδοτική μετάδοση σήματος, πρωτόκολλα κατανάλωσης χαμηλής ενέργειας, αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος με μικρή υπολογιστική απαίτηση, ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής κατανάλωσης και μπαταρίες μεγαλύτερης ενεργειακής χωρητικότητας.

Η χρήση όμως ενεργειακά οικονομικών λύσεων στις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου (physical layer), όπως για παράδειγμα της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης, δημιουργεί μη αποδοτική χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων για επικοινωνία. Δεδομένου όμως ότι στις ευρυζωνικές επικοινωνίες είναι υψηλής προτεραιότητας ζήτημα η αποδοτική χρήση του φάσματος θα πρέπει να γίνει μια επιλογή που θα προσφέρει ικανοποιητική λύση και απόδοση και στα δυο αυτά αντίρροπα χαρακτηριστικά. Μια τεχνική που υιοθετείται για την εξυπηρέτηση ενός βέλτιστου αποτελέσματος σε κατανάλωση και φασματική απόδοση συγχρόνως είναι η ασύμμετρη μετάδοση δεδομένων. Στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) επιλέγουμε να έχουμε υψηλούς ρυθμούς ροής δεδομένων, με υψηλή ενεργειακή κατανάλωση στο σταθμό βάσης και υψηλή φασματική απόδοση, ενώ στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink) χρησιμοποιούμε χαμηλή ροή δεδομένων, με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και χαμηλή φασματική απόδοση. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας επίσης μπορούν να συνδράμουν στον επιθυμητό στόχο, ενεργοποιώντας τη συσκευή μόνο όταν αυτό είναι αναγκαίο.

1.7.6 Ασφάλεια (Security)

Το θέμα ασφαλούς επικοινωνίας αποτελεί μείζων παράγοντα για την σχεδίαση και επιτυχία κάθε τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα ασύρματα μάλιστα επικοινωνιακά συστήματα έχουν εγγενώς μεγαλύτερες δυσκολίες στην εξασφάλιση του απορρήτου της επικοινωνίας, λόγω του κοινού μέσου επικοινωνίας που χρησιμοποιείται και είναι ο ατμόσφαιρα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο μηχανισμοί ασφαλείας θα πρέπει να ενσωματώνονται εξαρχής στα συστήματα ασύρματων ευρυζωνικών επικοινωνιών.

Το απόρρητο και η ακεραιότητα των δεδομένων είναι εκείνες οι δυο πτυχές ασφαλείας που ενδιαφέρουν περισσότερο τον τελικό χρήστη. Ο τελικός χρήστης θέλει να κρατήσει προσωπική την επικοινωνία του και φυσικά ο δέκτης να λάβει ακριβώς αυτά που ο

αποστολέας απέστειλε, χωρίς να υπάρχει η περίπτωση να αλλοιωθούν τα αρχικά δεδομένα. Η συγκεκριμένη απαίτηση συνήθως επιτυγχάνεται με κωδικοποίηση δεδομένων (encryption).
Από την πλευρά του παρόχου σημαντικό θέμα ασφαλείας είναι ο έλεγχος πρόσβασης των χρηστών. Σε αυτή την περίπτωση το επιθυμητό είναι η σύνδεση στο δίκτυο μόνο πιστοποιημένων χρηστών. Η πιστοποίηση και ο έλεγχος πρόσβασης μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορα επίπεδα του δικτύου: φυσικό επίπεδο, επίπεδο δικτύου, επίπεδο εφαρμογών. Ο πάροχος όμως πρέπει να εξασφαλίσει και υψηλή διαθεσιμότητα του δικτύου, που πολλές φορές κινδυνεύει από κακοήθεις χρήστες του δικτύου που κάνουν επιθέσεις τύπου denial-of-service ή άλλου τύπου επιθέσεις που αποσκοπούν στον να βλάψουν την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου.

1.7.7 Υποστήριξη του IP πρωτοκόλλου σε ασύρματες επικοινωνίες

Το IP πρωτόκολλο έχει γίνει αναμφισβήτητα το πρωτόκολλο δικτύωσης των σύγχρονων επικοινωνιακών συστημάτων. Η απαίτηση για σύγκλιση των επικοινωνιών, σε συνδυασμό με την ήδη κυρίαρχη θέση του IP στην δικτύωση, έχει οδηγήσει στην χρήση αυτού και για μεταφορά φωνής, video, πολυμεσικών υπηρεσιών. Το γεγονός αυτό υπαγορεύει την χρησιμοποίηση του και στις ασύρματες ευρυζωνικές επικοινωνίες.
Δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ήδη ευρέως μπορεί να υλοποιηθεί σε συσκευές με πολύ συμπιεσμένο κόστος, λόγω οικονομίας κλίμακας που μπορεί να επιτευχθεί. Επίσης μπορεί να εξασφαλίσει γρήγορη ανάπτυξη υπηρεσιών, που θα βασίζονται πάνω σε αυτό, καθώς και σε εφαρμογές. Το IP επίσης έχει την δυνατότητα για πολυεκπομπή ή ευρεία εκπομπή, στοιχείο χρήσιμο στις ασύρματες επικοινωνίες.
Η άλλη βέβαια πλευρά του IP νομίσματος περιλαμβάνει κάποια χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να θεωρηθούν πλεονεκτήματα. Το IP πρωτόκολλο μπορεί να είναι απλό και ευέλικτο, αλλά δεν είναι αποδοτικό και στιβαρό. Η αποδοτικότητα του μπορεί να μην μας απασχόλησε ιδιαίτερα σε καλωδιακά δίκτυα που το εύρος ζώνης ήταν αρκετό, ειδικά σε δίκτυα οπτικών ινών, αλλά σίγουρα αποτελεί μια πρόκληση για τα ασύρματα δίκτυα. Επίσης θέματα εξασφάλισης ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο δικτύου είναι ένα άλλο αδύναμο σημείο του IP πρωτοκόλλου, αφού δεν έχει την δυνατότητα να τα λύσει επαρκώς από την σχεδίαση του.

Απαιτήσεις Υπηρεσιών	***Τεχνολογικές Προκλήσεις***	***Δυνητικές Λύσεις***
Επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή (Non-line-of-sight)	Μετριασμός των διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών (multi-path fading) και των παρεμβολών (interference)	Διαφορισμός (diversity), κώδικες καναλιού (channel coding) κλπ.
Υψηλός ρυθμός δεδομένων, χωρητικότητα (High Data Rate and Capacity)	Επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης (high spectral efficiency)	Αρχιτεκτονική κυψέλης, προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (adaptive modulation and coding), χωρική πολύπλεξη (spatial multiplexing) κλπ.
	Αντιμετώπιση διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference)	OFDM, εξισορρόπηση (equalization) κλπ.
	Μετριασμός διαλείψεων (interference mitigation)	Προσαρμοστικές κεραίες (adaptive antennas), προσαρμοστική καταχώριση καναλιών (dynamic channel allocation), CDMA κλπ.
Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service)	Υποστήριξη φωνής, δεδομένων, video πάνω από ένα δίκτυο	Πολύπλοκο MAC επίπεδο
	Διαχείριση ραδιοπόρων (radio resource management)	Αποδοτικοί αλγόριθμοι προγραμματισμού (efficient scheduling algorithm)
	Διατερματική ποιότητα υπηρεσίας (end-to-end quality of service)	IP QoS : DiffServ, IntServ, MPLS κλπ.
Κινητότητα (Mobility)	Δυνατότητα προσέγγισης ανεξαρτήτως περιοχής	Βάση δεδομένων περιαγωγής, παρακολούθηση θέσης
	Συνέχιση συνόδου κατά την κίνηση από κυψέλη σε κυψέλη	Αρραγής μεταπομπή (seamless handover)
	Συνέχιση συνόδου κατά την χρησιμοποίηση διαφορετικών δικτύων	IP-based mobility: mobile IP
Φορητότητα (Portability)	Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση σε φορητές συσκευές	Αποδοτική-ενεργειακά-διαμόρφωση, χαμηλής ισχύος κυκλώματα, αποδοτική επεξεργασία σήματος
Ασφάλεια (Security)	Προστασία προσωπικών δεδομένων χρήστη	Κρυπτογράφηση
	Προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στο δίκτυο	Πιστοποίηση και έλεγχος πρόσβασης
Χαμηλό Κόστος	Παροχή αποδοτικών υπηρεσιών με χρήση IP αρχιτεκτονικής κ' πρωτόκολλου	Προσαρμογή των πρωτοκόλλων του 2ου επιπέδου για χρήση σε συνδυασμό με το IP

Σχήμα 1-11 : Τεχνικές Προκλήσεις για τις Ασύρματες Επικοινωνίες

1.8 Βιβλιογραφία

[1] ITU. Telecommunications indicators update—2004. www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/.

[2] In-stat Report. Paxton. The broadband boom continues: Worldwide subscribers pass 200 million, No.IN0603199MBS, March 2006.

[3] Schroth. The evolution of WiMAX service providers and applications. *Yankee Group Report*. September 2005.

[4] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed: Fundamentals of WiMAX-Understanding Broadband Wireless Networking, Copyright © 2007 Pearson Education, Inc.

[5] IEEE 802.16 and WiMAX-Broandband Wireless Access for Everyone, White paper, Copyright © 2003 Intel Corporation

[6] *IEEE Std. 802.16-2001 IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*

[7] *802.16a-2003 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks --- Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems--- Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz*

[8] IEEE. Standard 802.16-2004. Part16: Air interface for fixed broadband wireless access systems. October 2004

[9] 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

[10] Σημειώσεις μαθήματος: " Δορυφορικές και Κινητές Επικοινωνίες ", Καθηγ. Σταύρος Κωτσόπουλος, 2007

[11] G. Mulas, WayMAX System Performance FDD 3.5 GHz, Copyright © Siemens Mobile Communications S.p.A. 2006

[12] www.moto-teleterm.gr

2. Το φυσικό επίπεδο του WiMAX

Physical layer of WiMAX

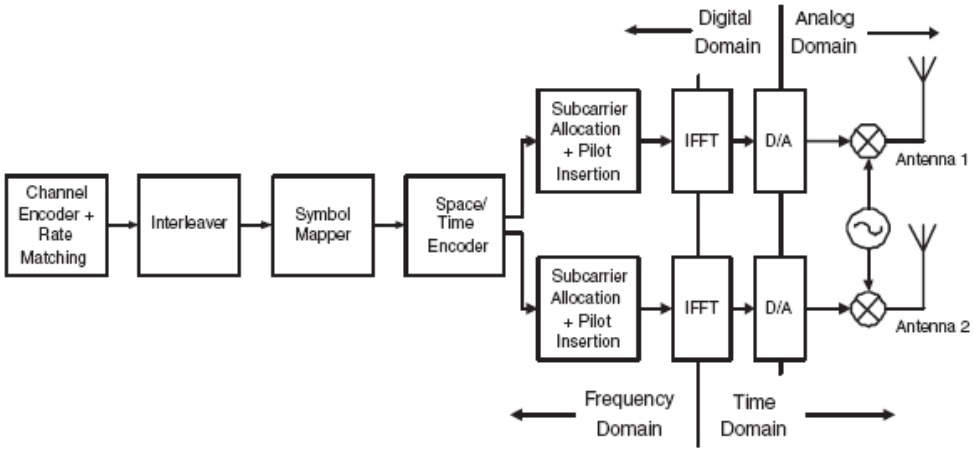
2.1 Εισαγωγή

Το φυσικό επίπεδο (physical layer-PHY) του WiMAX είναι βασισμένο στο IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005 πρότυπο και σχεδιάσθηκε κληρονομώντας κάποια στοιχεία από το Wi-Fi και πιο συγκεκριμένα από το 802.11a. Παρόλο που πολλές πτυχές των δυο τεχνολογιών είναι διαφορετικές εξαιτίας των διαφορετικών αναγκών και εφαρμογών που φιλοδοξούν να ικανοποιήσουν μερικές βασικές τεχνολογίες είναι αρκετά όμοιες. Η πιο βασική, κοινή τεχνική που έχει υιοθετήσει το WiMAX και το Wi-Fi αφορά την διαμόρφωση και δεν είναι άλλη από την OFDM. Η OFDM θεωρείται κατάλληλη τεχνική διαμόρφωσης για NLOS περιβάλλοντα και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Ωστόσο οι διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με το φυσικό επίπεδο όπως οι υποφέρουσες, οι πιλότοι, οι ζώνες φύλαξης και άλλα, είναι διαφορετικές στο WiMAX, λόγω διαφορετικού περιβάλλοντος χρήσεως των δυο αυτών συστημάτων.

Το IEEE 802.16 προδιαγράφει τέσσερα PHY επίπεδα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το MAC επίπεδο που προδιαγράφει το ίδιο πρότυπο. Τα PHY επίπεδα που ορίζονται είναι τα εξής :

- ***WirelessMAN SC***, απλής φέρουσας, σχεδιασμένο για χρήση σε συχνότητες άνω των 11 GHz, με οπτική επαφή.
- ***WirelessMAN SCa***, απλής φέρουσας, για συχνότητες μεταξύ των 2 GHz και των 11 GHz για λειτουργία point-to-multipoint.
- ***WirelessMAN OFDM***, βασισμένο σε ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT) 256 σημείων. Σχεδιασμένο για λειτουργία point-to-multipoint για συχνότητες μεταξύ των 2 GHz και των 11 GHz σε NLOS περιβάλλον. Το συγκεκριμένο PHY επίπεδο περιλαμβάνεται ολοκληρωμένο στο IEEE 802.16-2004 και έγινε αποδεκτό από το WiMAX για περιπτώσεις *σταθερής ασυρματικής πρόσβασης*.
- ***WirelessMAN OFDMA***, βασισμένο σε ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT) 2048 σημείων. Σχεδιασμένο για λειτουργία point-to-multipoint για συχνότητες μεταξύ των 2 GHz και των 11 GHz σε NLOS περιβάλλον. Το συγκεκριμένο PHY επίπεδο περιλαμβάνεται ολοκληρωμένο στο IEEE 802.16e-2005. Αυτό το φυσικό επίπεδο επιτρέπει την επιλογή FFT μεταξύ 128, 512, 1024 και 2048 σημείων. Το μεταβλητό μέγεθος FFT επιτρέπει την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος σε μια ευρεία περιοχή εύρους ζώνης καναλιού και συνθηκών ραδιοδιαύλου. Αυτό το φυσικό επίπεδο έγινε αποδεκτό από το WiMAX για κινητή και φορητή λειτουργία.

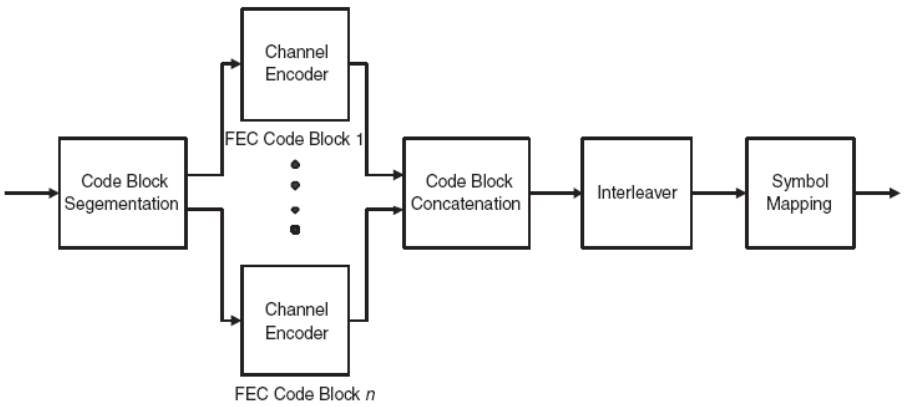
Το σχήμα 2-1 δείχνει τα διάφορα λειτουργικά επίπεδα ενός WiMAX PHY επιπέδου. Η πρώτη ομάδα λειτουργικών επιπέδων σχετίζεται με την εμπροσθόδοτη διόρθωση σφάλματος (Forward Error Correction-FEC) και περιλαμβάνει κωδικοποίηση καναλιού, προσαρμογή ρυθμού (rate matching), διεμπλοκή (interleaving) και απεικόνιση συμβόλων (symbol mapping). Η επόμενη ομάδα λειτουργικών επιπέδων σχετίζεται με την κατασκευή των OFDM συμβόλων στο πεδίο της συχνότητας. Στο επίπεδο αυτό τα δεδομένα αντιστοιχίζονται στα κατάλληλα υποκανάλια (subchannel) και υποφέρουσες (subcarriers). Τα σύμβολα πιλότοι εισάγονται στις υποφέρουσες πιλότους, που επιτρέπουν στον δέκτη να εκτιμήσει και να παρακολουθήσει την πληροφορία κατάστασης καναλιού (channel state information-CSI). Αυτό το επίπεδο είναι επίσης υπεύθυνο για κάθε κωδικοποίηση χώρου/χρόνου για διαφορισμό εκπομπής ή για MIMO, εάν αυτό είναι υλοποιημένο. Το τελευταίο επίπεδο περιλαμβάνει τις απαιτούμενες λειτουργίες για μετατροπή των OFDM συμβόλων από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου και τελικά σε αναλογικό σήμα που μπορεί να μεταδοθεί στον αέρα. Αν και το σχήμα 2-1 δείχνει μόνο τα λογικά υποσυστήματα του πομπού, αντίστοιχα λογικά υποσυστήματα υπάρχουν και στον δέκτη, σε αντίθετη σειρά, που αναλαμβάνουν να αναδομήσουν την αλληλουχία της μεταδοθείσας πληροφορίας. Όπως γίνεται με όλα τα πρότυπα, έτσι και στο WiMAX, ορίζονται μόνο τα υποσυστήματα του δέκτη. Τα υποσυστήματα του πομπού υλοποιούνται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται κάποια πολύ βασικά στοιχεία για το PHY επίπεδο, καθώς περαιτέρω ανάλυση του συγκεκριμένου επιπέδου είναι πέραν των στόχων αυτού του πονήματος.



Σχήμα 2-1: Λειτουργικά επίπεδα του PHY επιπέδου που προδιαγράφονται στο WiMAX

2.2 Κωδικοποίηση καναλιού

Στο IEEE 802.16e-2005 πρότυπο το στάδιο της κωδικοποίησης καναλιού αποτελείται από τα εξής βήματα : τυχαιοποίηση (randomization) δεδομένων, κωδικοποίηση καναλιού, προσαρμογή ρυθμού, hybrid-automatic repeat request (h-ARQ), εάν αυτή χρησιμοποιείται και την διεμπλοκή. Η τυχαιοποίηση των δεδομένων πραγματοποιείται στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας την έξοδο μιας σειράς shift-register που αρχικοποιείται στην αρχή κάθε FEC μπλοκ. Αυτοί οι shift-registers είναι τύπου modulo 2 {αντικατάσταση αριθμού με το υπόλοιπο της διαίρεσής του δια 2} και συμπληρώνονται με την ακολουθία των δεδομένων για να δημιουργήσουν τα "τυχαία" δεδομένα. Ο σκοπός της τυχαιοποίησης των δεδομένων είναι για να παρέχει κρυπτογράφηση φυσικού επιπέδου και να αποτρέψει πιθανή αποκωδικοποίηση των δεδομένων από έναν κακοήθη δέκτη (rogue receiver). Η κωδικοποίηση καναλιού πραγματοποιείται σε κάθε FEC μπλοκ, που αποτελείται από ένα ακέραιο αριθμό υποκαναλιών. Ένα υποκανάλι είναι η βασική μονάδα καταμερισμού πόρων στο PHY επίπεδο και περιέχει διαφορετικά δεδομένα και υποφέρουσες πιλότους. Ο ακριβής αριθμός δεδομένων και υποφερουσών πιλότων εξαρτάται από τη μετάθεση των υποφερουσών. Ο μέγιστος αριθμός υποκαναλιών σε ένα FEC μπλοκ εξαρτάται από την κωδικοποίηση καναλιού και το τύπο της διαμόρφωσης. Εάν ο αριθμός των υποκαναλιών που χρειάζονται για το FEC μπλοκ είναι μεγαλύτερος από το άνω όριο το μπλοκ τεμαχίζεται σε πολλαπλά υπομπλόκ. Αυτά τα υπομπλόκ κωδικοποιούνται και προσαρμόζονται στον ρυθμό ροής χωριστά και μετά συνδέονται αλυσιδωτά, σε σειρά, όπως δείχνει το σχήμα 2-2 για να σχηματίσουν ένα μοναδικό κωδικοποιημένο μπλοκ δεδομένων. Η κατάτμηση των μπλοκ πραγματοποιείται για μεγαλύτερα FEC μπλοκ έτσι ώστε να αποφευχθεί η υψηλή πολυπλοκότητα και μεγάλες απαιτήσεις μνήμης του αλγορίθμου αποκωδικοποίησης στον δέκτη.



Σχήμα 2-2 : Κατάτμηση FEC μπλοκ σε μικρότερα, σε περίπτωση που το άνω όριο των υποκαναλιών δεν αρκεί για το FEC μπλοκ [Copyright© Pearson Education, Inc 2007]

2.2.1 Στροβιλοκώδικες (Turbo Codes)

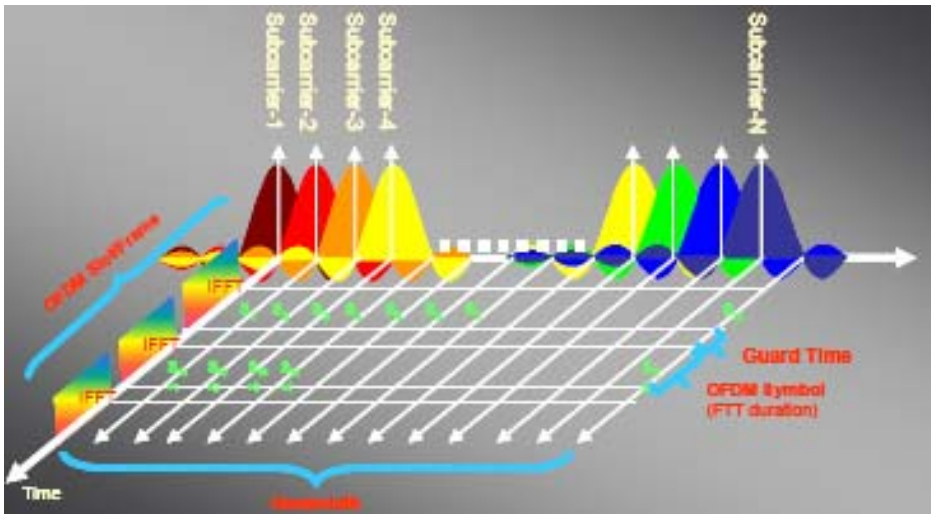
Η υποχρεωτική κωδικοποίηση που πρέπει να υποστηρίζουν οι πομποδέκτες που υποστηρίζουν το IEEE 802.16e-2005 πρότυπο είναι η δυαδική μη αναδρομική συνελικτική κωδικοποίηση (binary non recursive convolutional coding). Εκτός όμως από αυτή την υποχρεωτική κωδικοποίηση, μπορούν να ακολουθηθούν και άλλες, προαιρετικές στην υλοποίηση τους,, όπως η low density parity check (LDPC), block turbo code και η convolutional turbo code (CTC). Από αυτές τις υποχρεωτικές κωδικοποιήσεις η CTC αξίζει ιδιαίτερης προσοχής λόγω πολύ καλής απόδοσης και χρήσης της και σε άλλα ευρυζωνικά επικοινωνιακά συστήματα, όπως το High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και του 1xEV-DO και HSDPA. Το WiMAX χρησιμοποιεί διπλοδυαδικούς turbo codes. Οι διπλοδυαδικοί turbo codes είναι μια ειδική περίπτωση των μη δυαδικών turbo codes, που έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς δυαδικούς turbo codes. Τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Καλύτερη σύγκλιση: Η καλύτερη σύγκλιση της δυσδιάστατης επαναληπτικής διαδικασίας μπορεί να εξηγηθεί βάσει της μικρότερης πυκνότητας των λανθασμένων μονοπατιών σε κάθε διεύθυνση, μειώνοντας τα φαινόμενα συσχέτισης μεταξύ των υποσυστημάτων των αποκωδικοποιητών.
- Μεγαλύτερες ελάχιστες αποστάσεις: Η μη δυαδική φύση του κώδικα προσθέτει ένα ακόμα βαθμό ελευθερίας στο σχεδιασμό της μετάθεσης που έχει αποτέλεσμα ένα μεγαλύτερο ελάχιστο μεταξύ των κωδικολέξεων.
- Μικρότερη ευαισθησία σε σχηματομορφές διάτρησης (puncturing patterns)
- Στιβαρότητα του αποκωδικοποιητή

2.3 Ορθογωνική πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας - OFDM

Η OFDM ανήκει σε μια ομάδα τεχνικών μετάδοσης, που ονομάζεται διαμόρφωση πολλαπλών φερουσών (multicarrier modulation), και είναι βασισμένη στην ιδέα της διαίρεσης ενός υψηλού ρυθμού ροής ρεύματος δυφίων (bits) σε πολλαπλά ρεύματα δυφίων χαμηλότερου ρυθμού ροής. Κάθε τέτοιο ρεύμα δυφίων διαμορφώνεται σε ξεχωριστό φορέα, που συνηθίζεται να ονομάζεται υποφορέας (subcarrier) ή τόνος (tone). Η διαμόρφωση πολλαπλών φερουσών εξαλείφει ή περιορίζει την διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference-ISI) κάνοντας το χρόνο του εκάστοτε συμβόλου αρκετά μεγάλο ώστε οι καθυστερήσεις που προξενούνται από το

κανάλι διάδοσης να είναι ένα ασήμαντο κλάσμα της διάρκειας του συμβόλου. Για αυτό το λόγο σε υψηλού ρυθμού συστήματα η διαίρεση της ροής των δεδομένων σε πολλές παράλληλες ροές αυξάνει την διάρκεια του συμβόλου της κάθε ροής έτσι ώστε η εξάπλωση καθυστέρησης να είναι ένα μικρό μόνο κλάσμα της διάρκειας του συμβόλου.

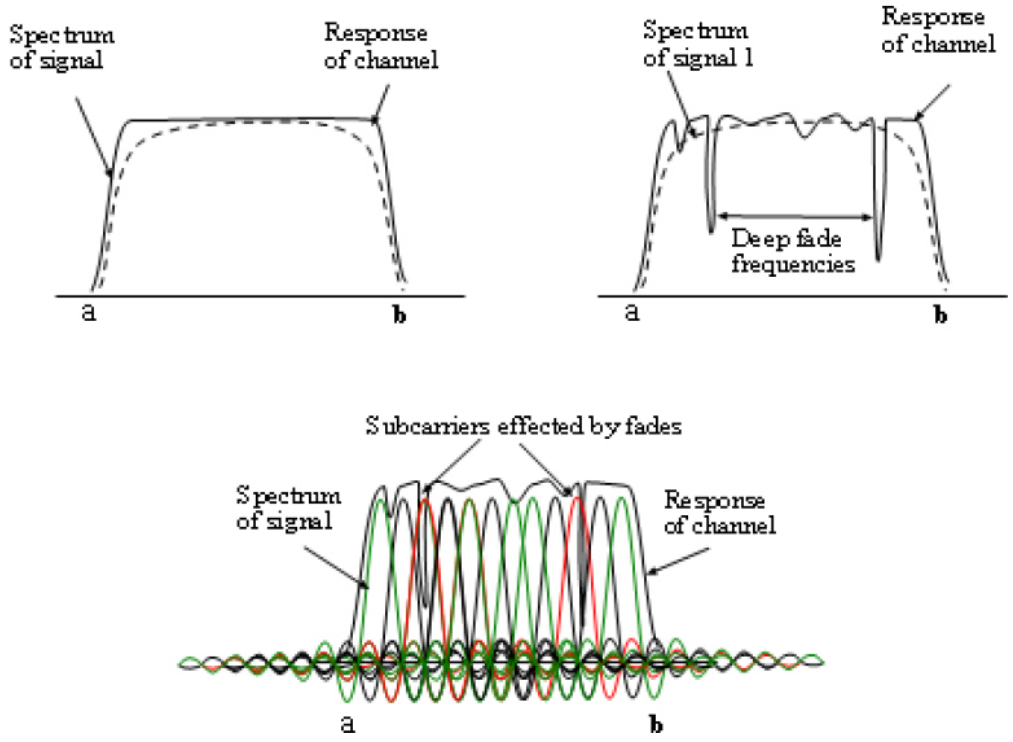


Σχήμα 2-3: Η OFDM τεχνική στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας [Copyright© Nortel 2006]

Η OFDM (διαμόρφωση) είναι φασματικά αποδοτική όπου οι υποφορείς επιλέγονται να είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους κατά την διάρκεια του συμβόλου. Με αυτό τον τρόπο αποτρέπεται η ανάγκη για μη επικαλυπτόμενους υποφορείς για την εξάλειψη της διαφεροντικής παρεμβολής (intercarrier interference). Επιλέγοντας τον πρώτο υποφορέα να έχει συχνότητα που να είναι ακέραιος αριθμός των κύκλων σε μια περίοδο συμβόλου και ρυθμίζοντας την απόσταση μεταξύ των γειτονικών υποφορέων να είναι $B_{SC} = B/L$, όπου το B είναι το ονομαστικό εύρος ζώνης και L ο αριθμός των υποφορέων, διασφαλίζεις ότι όλοι οι υποφορείς είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους την περίοδο του συμβόλου. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το OFDM σήμα είναι ισοδύναμο με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (inverse discrete Fourier transformation-IDFT) της αλληλουχίας δεδομένων σε χρόνο L. Αυτό κάνει πολύ εύκολη υπόθεση την υλοποίηση OFDM πομπών και δεκτών διακριτού χρόνου που χρησιμοποιούν αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (inverse fast Fourier-IFFT) και ταχύ μετασχηματισμό Fourier (fast Fourier transformation) αντίστοιχα.

Για να εξαλειφθεί εξολοκλήρου η διασυμβολική παρεμβολή (ISI), χρησιμοποιούνται διαστήματα προστασίας μεταξύ των OFDM συμβόλων. Κάνοντας τα διαστήματα προστασίας μεγαλύτερα από την αναμενόμενη εξάπλωση καθυστέρησης λόγω πολυόδευσης η ISI μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως. Το διάστημα προστασίας βέβαια σημαίνει σπατάλη ισχύος και μείωση της απόδοσης φάσματος. Η ποσότητα ισχύος που χάνεται εξαρτάται από το πόσο μεγάλος είναι ο χρόνος προστασίας.

Το μέγεθος του FFT σε μια σχεδίαση OFDM πρέπει να επιλεχθεί προσεκτικά, με κυρίαρχους παράγοντες λήψης της σχεδιαστικής απόφασης την προστασία έναντι πολυόδευσης, την μετατόπιση Doppler και το κόστος/πολυπλοκότητα. Για ένα καθορισμένο εύρος ζώνης η επιλογή μεγάλου μεγέθους FFT μπορεί να μειώσει την απόσταση των υποφορέων και να αυξήσει την περίοδο συμβόλου. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα προστασίας από την πολυόδευση άρα και την εξάπλωση καθυστέρησης. Ένα μειωμένο όμως διάστημα μεταξύ των υποφορέων κάνει το σύστημα μας πιο ευάλωτο στην διαφεροντική παρεμβολή που οφείλεται στην εξάπλωση Doppler στα κινητά συστήματα επικοινωνίας. Η ανταγωνιστική επιρροή της εξάπλωσης καθυστέρησης του σήματος λόγω πολυόδευσης και της εξάπλωσης Doppler σε ένα OFDM σύστημα απαιτεί προσεκτική εξισορρόπηση στη σχεδίαση που θα ακολουθηθεί.



Σχήμα 2-4: Στο άνω αριστερά σχήμα βλέπουμε το φάσμα του σήματος προς αποστολή και την απόκριση του καναλιού στην περίπτωση προσαρμογής. Στο άνω δεξιά σχήμα βλέπουμε ότι σε ορισμένες συχνότητες ένα κανάλι με διαλείψεις δεν επιτρέπει την διέλευση του σήματος. Με OFDM που έχουμε μεγάλο αριθμό υποφορέων μόνο ένα μικρό μέρος της πληροφορίας χάνεται λόγω των διαλείψεων.

2.3.1 Πλεονεκτήματα και τρωτά σημεία της OFDM

Η OFDM παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες διαμορφώσεις που μπορούν να υιοθετηθούν για υψηλής ταχύτητας μεταδόσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά από αυτά:

- **Μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα**: Η OFDM μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας FFT/IFFT και μάλιστα οι επεξεργαστικές απαιτήσεις μεγαλώνουν σχεδόν γραμμικά με το ρυθμό δεδομένων ή το εύρος ζώνης. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα της OFDM μπορεί να αποδοθεί από την συνάρτηση $O(\ B\mathbf{log}BT_m\ )$, όπου το B είναι το εύρος ζώνης και το T_m είναι η εξάπλωση καθυστέρησης. Αυτή η πολυπλοκότητα είναι πολύ χαμηλότερη από την πολυπλοκότητα ενός συστήματος εξισορρόπησης, που έχει συνάρτηση πολυπλοκότητας $O(\ B^2T_m\ )$.
- **Μικρή υποβάθμιση της επίδοσης υπό συνθήκες έντονης καθυστέρησης:** Η επίδοση ενός OFDM συστήματος υποβαθμίζεται ανώδυνα καθώς η εξάπλωση καθυστέρησης ξεπερνά την τιμή-όριο για την οποία το σύστημα έχει σχεδιασθεί. Καλύτεροι κώδικες και μικρότεροι σε μέγεθος αστερισμοί συμβόλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης που είναι όμως πιο ανθεκτικοί στην εξάπλωση καθυστέρησης. Η OFDM δηλαδή είναι κατάλληλη για προσαρμοστικές-δυναμικές διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις, με αποτέλεσμα να γίνεται η καλύτερη δυνατή χρησιμοποίηση του καναλιού, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Τα συστήματα απλής φέρουσας, αντιθέτως, εάν η εξάπλωση καθυστέρησης ξεπεράσει την τιμή-όριο για την οποία έχει σχεδιασθεί ο ισοσταθμιστής αντιμετωπίζουν ραγδαία υποβάθμιση του σήματος.
- **Αξιοποίηση του διαφορισμού συχνότητας:** Η OFDM διευκολύνει την κωδικοποίηση και την διεμπλοκή επί των υποφορέων στο πεδίο της συχνότητας, γεγονός που παρέχει ανθεκτικότητα στα σφάλματα κατά ριπές που οφείλονται σε ισχυρές διαλείψεις σε κομμάτια του μεταδιδόμενου φάσματος (βλέπε σχήμα 2-4).
- **Χρήση της OFDM για πολλαπλή πρόσβαση:** Οι διάφοροι υποφορείς μπορούν να εξυπηρετήσουν διαφορετικούς χρήστες. Αυτή η τεχνική ονομάζεται OOFDM πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA) . Η συγκεκριμένη τεχνική έχει υιοθετηθεί από το WiMAX forum.
- **Ανθεκτικότητα έναντι στενοζωνικών παρεμβολών:** Η OFDM είναι σχετικά ανθεκτική σε στενοζωνικές παρεμβολές, από την στιγμή που αυτές οι παρεμβολές επηρεάζουν μόνο ένα κλάσμα των υποφορέων.

- **Κατάλληλη για σύμφωνη αποδιαμόρφωση:** Είναι σχετικά εύκολο να γίνει εκτίμηση του καναλιού από πιλότους που προβλέπονται σε OFDM συστήματα , γεγονός που βοηθά στην σύμφωνη αποδιαμόρφωση. Η σύμφωνη αποδιαμόρφωση είναι ενεργειακά αποδοτική.

Αν και η OFDM παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα υπάρχουν και κάποια τρωτά σημεία σε αυτή την τεχνική διαμόρφωσης. Τα OFDM σήματα έχουν υψηλό λόγο κορυφής προς μέση τιμή (peak-to average ratio), στοιχείο που δημιουργεί μη γραμμικότητες και παραμορφώσεις (nonlinearities and clipping distortions).

Αυτό προξενεί προβλήματα στους ενισχυτές εκπομπής. Τα OFDM σήματα είναι ευπαθή σε θόρυβο φάσης και στην διασπορά συχνότητας, Ως εκ τούτου η σχεδίαση θα πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε να αντιμετωπίζονται τα προβλήματα αυτά. Επίσης πρέπει να υπάρχει ακριβής συγχρονισμός συχνότητας

2.3.2 OFDM παράμετροι στα προφίλ συστήματος του WiMAX

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο οι δυο εκδοχές του WiMAX (fixed και mobile) έχουν κάποιες διαφορές στην υλοποίηση του OFDM φυσικού επιπέδου. Η fixed WiMAX έκδοση χρησιμοποιεί OFDM φυσικό επίπεδο, βασισμένο σε FFT 256 σημείων. Η mobile WiMAX εκδοχή επιτρέπει την επιλογή FFT μεταξύ 128, 512, 1024 και 2048 σημείων και χρησιμοποιεί την OFDM για πολλαπλή πρόσβαση (OFDMA). Το σχήμα 2-5 παρουσιάζει τις παραμέτρους για το OFDM και το OFDMA φυσικό επίπεδο. Οι παράμετροι που παρουσιάζονται στον πίνακα αφορούν μόνο ένα περιορισμένο αριθμό προφίλ που είναι πιθανό να αναπτυχθούν για εμπορική χρήση.

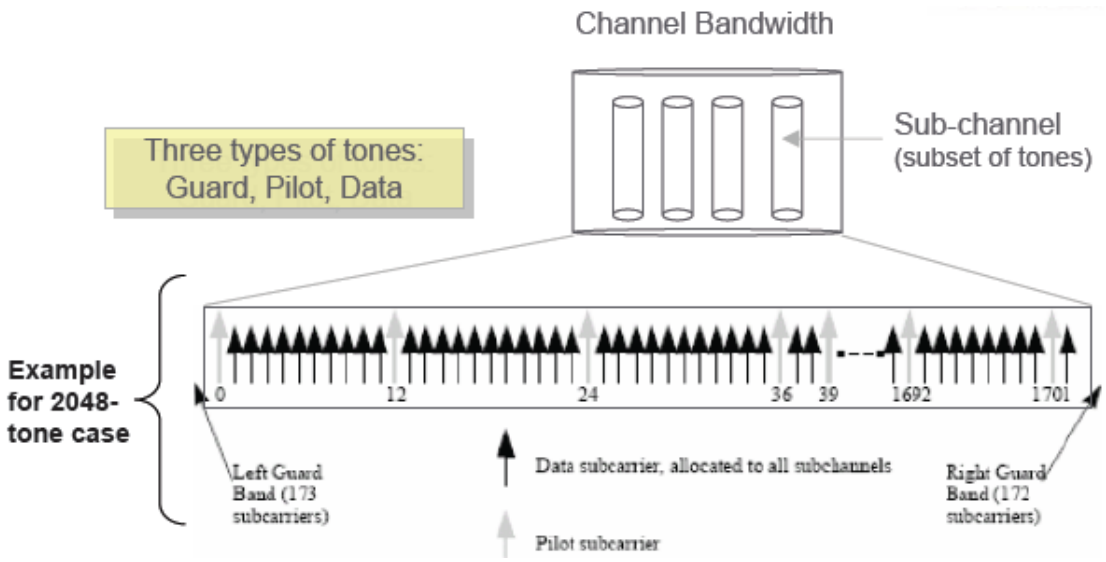
Fixed WiMAX OFDM-PHY: Για αυτήν την εκδοχή του φυσικού επιπέδου χρησιμοποιείται FFT 256 σημείων, με 192 υποφορείς να χρησιμοποιούνται για μεταφορά δεδομένων, 8 ως υποφορείς πιλότοι για εκτίμηση καναλιού και συγχρονισμό και οι υπόλοιποι ως ζώνη φύλαξης αριστερά και δεξιά των χρήσιμων υποφορέων. Δεδομένου ότι το FFT μέγεθος είναι καθορισμένο η απόσταση μεταξύ των υποφορέων ποικίλει ανάλογα με το εύρος του καναλιού. Όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα εύρη ζώνης η απόσταση μεταξύ των υποφορέων αυξάνει και ο χρόνος των συμβόλων μειώνεται. Μειώνοντας το χρόνο συμβόλου συνεπάγεται ότι ένα μεγαλύτερο κλάσμα πρέπει να αφιερωθεί ως χρόνος φύλαξης (guard time) για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του delay spread. Το σχήμα 2-5 δείχνει ότι το WiMAX forum επιτρέπει την χρήση μιας ευρείας γκάμας χρόνων φύλαξης που επιτρέπουν στον σχεδιαστή του συστήματος να κάνουν την κατάλληλη εξισορρόπηση μεταξύ της φασματικής αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας έναντι της εξάπλωσης της καθυστέρησης. Για μέγιστη ανθεκτικότητα το χρόνος φύλαξης μπορεί να φτάσει στο 25% το χρόνου του

συμβόλου, ποσοστό που μπορεί να εξομαλύνει delay spread 16 μs όταν έχουμε λειτουργία με κανάλι 3.5 MHz και 8 μs όταν έχουμε λειτουργία με κανάλι των 7 MHz.

Parameter	Fixed WiMAX OFDM-PHY	Mobile WiMAX Scalable OFDMA-PHY			
FFT size	256	128	512	1,024	2,048
Number of used data subcarriers	192	72	360	720	1,440
Number of pilot subcarriers	8	12	60	120	240
Number of null/guardband subcarriers	56	44	92	184	368
Cyclic prefix or guard time (Tg/Tb)	1/32, 1/16, 1/8, 1/4				
Oversampling rate (Fs/BW)	Depends on bandwidth: 7/6 for 256 OFDM, 8/7 for multiples of 1.75MHz, and 28/25 for multiples of 1.25MHz, 1.5MHz, 2MHz, or 2.75MHz.				
Channel bandwidth (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Subcarrier frequency spacing (KHz)	15.625		10.94		
Useful symbol time (μs)	64	91.4			
Guard time assuming 12.5% (μs)	8	11.4			
OFDM symbol duration (μs)	72	102.9			
Number of OFDM symbols in 5 ms frame	69	48.0			

Σχήμα 2-5: OFDM παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο WiMAX [Copyright © 2007 Pearson Education, Inc.]

Mobile WiMAX OFDMA-PHY: Στην mobile WiMAX εκδοχή που επιτρέπει την επιλογή FFT μεταξύ 128, 512, 1024 και 2048 σημείων όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνει ο αριθμός των FFT σημείων επίσης αυξάνει έτσι που να διατηρείται η απόσταση μεταξύ των φορέων στα 10.94 KHz. Αυτό κρατά την διάρκεια των OFDM συμβόλων, που είναι η βασική μονάδα πόρων, σταθερή, με αποτέλεσμα η επίδραση της κλιμακοθέτησης (scaling) διατηρείται μικρή στα υψηλότερα επίπεδα. Η κλιμακοθέτηση κρατά, επίσης, το κόστος χαμηλά. Το διάστημα των 10.94 KHz έχει επιλεγεί ως μια μέση λύση για να ικανοποιούνται οι ανάγκες που πηγάζουν από το delay spread και το Doppler spread για λειτουργία σταθερών και κινητών ασύρματων συσκευών. Αυτό το διάστημα μεταξύ των υποφορέων μπορεί να ανταποκριθεί σε τιμές καθυστέρησης εξάπλωσης 20μs και σε ταχύτητα οχημάτων της τάξεως των 125 Km/h, όταν έχουμε λειτουργία στα 3.5 GHz. Το συγκεκριμένο διάστημα των 10.94 KHz συνεπάγεται την χρησιμοποίηση των 128, 254, 512, 1024 και 2048 FFT όταν το εύρος ζώνης είναι 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, και 20MHz αντίστοιχα.



Σχήμα 2-6: Σχέδιο αποτύπωσης υποφορέων σε OFDMA Downlink ροή για κανάλι 20 MHz με FFT 2048 σημείων [Copyright© Nortel 2006]

2.3.3 Υποκανάλια στο OFDMA φυσικό επίπεδο

Οι διαθέσιμοι υποφορείς μπορούν να χωριστούν σε αρκετές ομάδες, που ονομάζονται υποκανάλια. Η fixed WiMAX εκδοχή που βασίζεται στο OFDM φυσικό επίπεδο επιτρέπει μια περιορισμένη χρήση της μεθόδου αυτής, μόνο στην άνω ζεύξη. Το πρότυπο ορίζει 16 υποκανάλια που μπορούν ανά 1, 2, 4, 8 ή όλα μαζί να ανατεθούν σε ένα σταθμό χρήστη (subscriber station-SS) στην άνω ζεύξη. Ο διαχωρισμός των υποφορέων σε υποκανάλια στην άνω ζεύξη επιτρέπει στους σταθμούς των χρηστών να μεταδίδουν χρησιμοποιώντας μόνο ένα κλάσμα του εύρους ζώνης που έχει εκχωρηθεί σε αυτούς από το σταθμό βάσης. Αυτό προσφέρει βελτιώσεις στον προϋπολογισμό της ζεύξεως (link budget) και άρα βελτίωση της ακτίνας λειτουργίας ή στην κατανάλωση ισχύος του σταθμού του χρήστη. Στην περίπτωση των 16 ξεχωριστών υποκαναλιών, με χρήση μόνο του ενός, επιτυγχάνεται βελτίωση 12 dB.
Η εκδοχή του mobile WiMAX, που βασίζεται στο OFDMA φυσικό επίπεδο, επιτρέπει τον διαχωρισμό σε υποκανάλια των διαθέσιμων υποφορέων και στην άνω ζεύξη και στην κάτω ζεύξη. Τα υποκανάλια εδώ, όπως και στην περίπτωση του fixed WiMAX, αποτελούν την ελάχιστη μονάδα πόρου, σε επίπεδο συχνοτήτων που μπορεί να κατανεμηθεί από το σταθμό βάσης προς τους χρήστες. Για αυτό το λόγο διαφορετικά υποκανάλια μπορούν να κατανεμηθούν σε διαφορετικούς χρήστες και άρα να έχουμε έτσι ένα αποτελεσματικό μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης, που ονομάζεται όπως έχουμε προαναφέρει OFDMA.

Τα υποκανάλια μπορεί να αποτελούνται από γειτονικούς υποφορείς ή από υποφορείς πού είναι ψευδοκανονικά κατανεμημένοι κατά μήκος όλου του συχνοτικού φάσματος. Τα υποκανάλια που σχηματίζονται χρησιμοποιώντας κατανεμημένους υποφορείς παρέχουν μεγαλύτερο συχνοτικό διαφορισμό (frequency diversity), που είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για κινητές εφαρμογές. Το WiMAX ορίζει αρκετά σενάρια υποκαναλισμού (subchannelization), βασισμένα σε κατανεμημένους υποφορείς και για την άνω ζεύξη, αλλά και για την κάτω ζεύξη. Ένα από αυτά τα σενάρια που ονομάζεται *μερική χρήση των υποφορέων* (partial usage of subcarriers-PUSC) είναι υποχρεωτικό στην υλοποίηση του για όλες τις mobile WiMAX υλοποιήσεις. Τα αρχικά προφίλ του WiMAX προβλέπουν 15 και 17 υποκανάλια για κάτω ζεύξη και άνω ζεύξη αντίστοιχα για λειτουργία PUSC σε κανάλι εύρους 5 MHz. Για κανάλι των 10 MHz προβλέπονται 30 και 35 υποκανάλια αντίστοιχα.

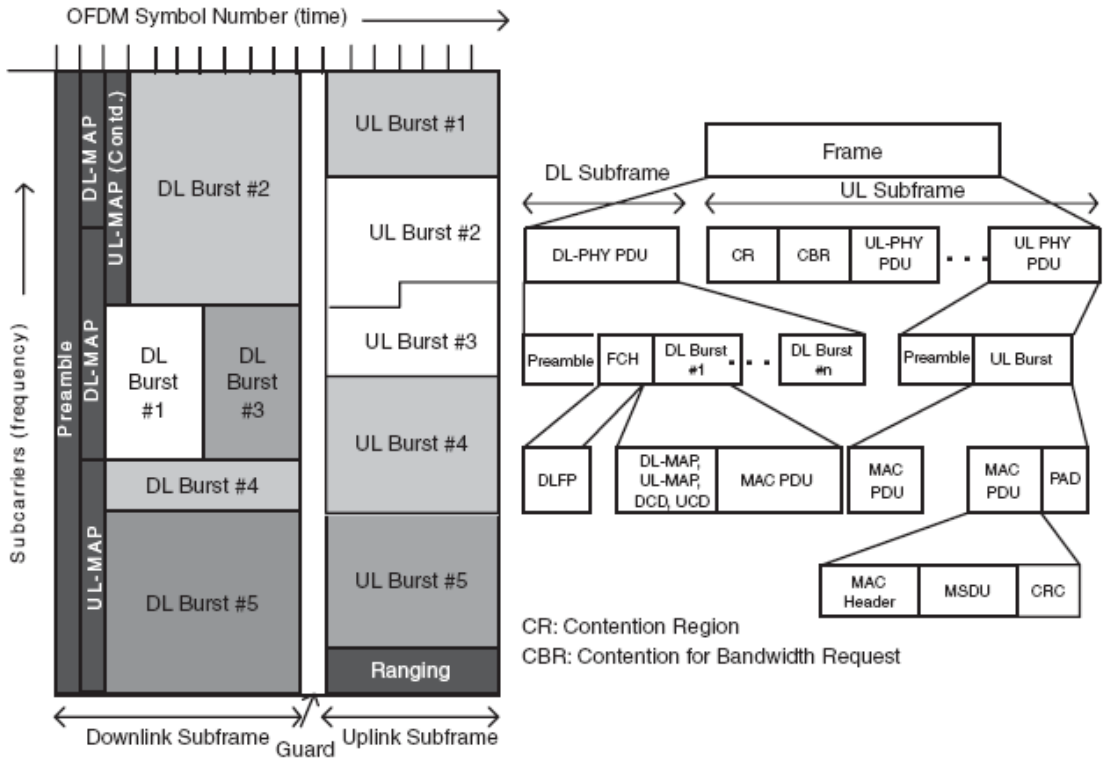
Το σενάριο υποκαναλισμού, που βασίζεται σε χρήση συνεχόμενων υποφορέων στο WiMAX, καλείται band adaptive and coding (AMP). Αν και η δυνατότητα συχνοτικού διαφορισμού σε αυτό το σενάριο δεν υπάρχει μπορεί να γίνει διαφορισμός πολλαπλών χρηστών (multi-user diversity), ανάλογα με τη απόκριση συχνότητας που έχουν οι χρήστες. Ο διαφορισμός πολλαπλών χρηστών παρέχει υψηλά κέρδη στην συνολική χωρητικότητα του συστήματος, εάν το σύστημα προσπαθεί να παράσχει κάθε χρήστη με ένα υποκανάλι που μεγιστοποιεί το SINR. Η απόδοση γειτονικών υποφορέων σε ένα χρήστη ταιριάζει περισσότερο σε στατικούς χρήστες ή σε χρήστες με μικρή κινητότητα.

2.4 Δομή θυρίδας και πλαισίου (Slot and Frame structure)

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX είναι επίσης υπεύθυνο για την κατανομή των θυρίδων και την πλαισίωση κατά την μετάδοση πάνω από το κανάλι επικοινωνίας, που δεν είναι άλλο παρά ο αέρας. Ο ελάχιστος πόρος που μπορεί να υπάρξει στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας σε μια δοσμένη ζεύξη επικοινωνίας ονομάζεται θυρίδα (slot). Κάθε θυρίδα αποτελείται από ένα υποκανάλι και αντιστοιχεί σε ένα, δυο ή τρία OFDM σύμβολα, αναλόγως με ποιό προφίλ υποκαναλισμού χρησιμοποιείται. Μια παράπλευρη σειρά θυρίδων που έχει αντιστοιχηθεί σε ένα χρήστη καλείται περιοχή δεδομένων (data region) χρήστη. Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού μπορούν να αφιερώσουν περιοχές δεδομένων σε διαφορετικές χρήστες, αναλόγως με την ζήτηση , τις απαιτήσεις στην ποιότητα υπηρεσίας και τις συνθήκες του καναλιού.

Το σχήμα 2-7 απεικονίζει ένα OFDMA και OFDM πλαίσιο όταν έχουμε TDD τεχνική. Το πλαίσιο διαιρείται σε δυο υποπλαίσια, ένα πλαίσιο για downlink ακολουθούμενο από ένα πλαίσιο για uplink, με ένα διάστημα φύλαξης ενδιάμεσά τους. Ο λόγος του downlink προς το uplink πλαίσιο ποικίλει από 3:1 μέχρι 1:1 αναλογίες, με αποτέλεσμα να μπορούν να

εξυπηρετηθούν διαφορετικές ανάγκες ροής κίνησης. Το WiMAX υποστηρίζει επίσης και FDD τεχνική. Σε αυτήν την περίπτωση τα πλαίσια έχουν την ίδια μορφή, με τη διαφορά ότι μεταδίδονται την ίδια χρονική στιγμή σε άλλες συχνότητες - πάνω από άλλους φορείς. Μερικά από τα υπάρχοντα συστήματα fixed WiMAX χρησιμοποιούν FDD. Ωστόσο οι περισσότερες υλοποιήσεις των κατασκευαστών χρησιμοποιούν TDD, λόγω κάποιων πλεονεκτημάτων που θεωρείται ότι έχει, σε εμπορικό τουλάχιστον επίπεδο. Η TDD τεχνική επιτρέπει πιο ευέλικτο διαμοιρασμό του εύρους ζώνης μεταξύ downlink και uplink, δεν απαιτεί ζεύγος εύρους ζώνης (2 διαφορετικούς φορείς-συχνότητες μετάδοσης), έχει ένα κανάλι αμφίδρομης επικοινωνίας σε μια και μόνο συχνότητα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκμετάλλευση χωρικών (spatial) τεχνικών βελτίωσης της ασύρματης επικοινωνίας και έχει απλό σχεδιασμό στην πλευρά του δέκτη. Στην περίπτωση της TDD θα πρέπει να εξασφαλιστεί συγχρονισμός μεταξύ των σταθμών βάσης για να μην υπάρχουν παρεμβολές. Αυτό συνήθως γίνεται με την χρήση ενός GPS δέκτη που λαμβάνει και πληροφορίες ώρας – χρονισμού.



Σχήμα 2-7: Η δομή ενός TDD πλαισίου για τη mobile WiMAX εκδοχή [Copyright © 2007 Pearson Education, Inc.]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2-7, το πλαίσιο downlink ξεκινά με ένα προοίμιο (preamble) που χρησιμοποιείται για διαδικασίες που υπάγονται στο φυσικό καθαρά επίπεδο, όπως είναι ο χρονικός και ο συχνοτικός συγχρονισμός (time and frequency synchronization) και η αρχική εκτίμηση του καναλιού (initial channel estimation). Το προοίμιο του downlink πλαισίου ακολουθείται από το frame control header (FCH), που παρέχει τις πληροφορίες για τη διαμόρφωση του frame,όπως το μήνυμα MAP, την τεχνική διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, και τους χρησιμοποιούμενους υποφορείς. Πολλαπλοί χρήστες επιμερίζονται περιοχές δεδομένων μέσα στο ίδιο πλαίσιο, με αυτές τις περιοχές να καθορίζονται μέσα στο uplink και downlink μήνυμα MAP (UL-MAP και DL-MAP). Αυτά τα μηνύματα εκπέμπονται ευρέως (broadcast) μετά το FCH του downlink πλαισίου. Τα MAP μηνύματα περιλαμβάνουν το προφίλ της ριπής (burst profile) για κάθε χρήστη, που καθορίζουν την διαμόρφωση και την κωδικοποίηση που χρησιμοποιούνται για αυτή τη ζεύξη. Δεδομένου ότι το MAP μήνυμα περιλαμβάνει κρίσιμες πληροφορίες για την εύρυθμη λειτουργία του επικοινωνιακού συστήματος και πρέπει να ληφθεί από όλους τους χρήστες ανεξαιρέτως συνήθως αποστέλλεται πάνω από μια αξιόπιστη ζεύξη, όπως η BPSK με ρυθμό κωδίκευσης (rate coding) ½ . Παρόλο που τα MAP μηνύματα είναι ένας αναμενόμενος και αξιόπιστος τρόπος για τον σταθμό βάσης να πληροφορεί τους συνδρομητικούς σταθμούς για την δομή που θα έχει κάθε πλαίσιο και για τα προφίλ ριπής μπορεί να δημιουργήσει πολύ μεγάλο επίβαρο (overhead), ειδικά στην περίπτωση πολλών χρηστών με μικρά πακέτα, όπως για παράδειγμα γίνεται με την VoIP κίνηση. Για να μετριασθεί το φαινόμενο της επιβάρυνσης της ζεύξης από μεγάλα επίβαρα το mobile WiMAX προβλέπει την προαιρετική χρήση πολλαπλών sub-MAP μηνυμάτων, όπου τα μηνύματα για κάθε συνδρομητή μεταδίδομαι σε υψηλότερους ρυθμούς, αναλόγως με το SNR που έχει ο κάθε ένας από αυτούς. Τα broadcast μηνύματα MAP μπορούν, προαιρετικά να συμπιεσθούν για περαιτέρω αποδοτικότητα.

Το WiMAX είναι αρκετά ευκίνητο σε θέματα που αφορούν τον αριθμό των χρηστών και των πακέτων που πολυπλέκονται ανά πλαίσιο. Ένα μόνο πλαίσιο downlink μπορεί να περιέχει πολλαπλές ριπές, διαφόρων μεγεθών, με δεδομένα διαφορετικού τύπου για αρκετούς χρήστες. Το μέγεθος επίσης αυτού κάθε αυτού του frame μπορεί να διαφέρει σε διάρκεια, από 2 ms μέχρι 20 ms και να αλλάζει κατά την λειτουργία του συστήματος. Κάθε ριπή μπορεί να περιέχει πολλαπλά αλυσιδωτά, σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους, πακέτα ή μέρη πακέτων που έχουν ληφθεί από τα υψηλότερα επίπεδα. Στην αρχή, ωστόσο, ο εξοπλισμός που θα είναι συμβατός με το WiMAX θα υποστηρίζει πλαίσια μόνο των 5 ms.

Το uplink πλαίσιο αποτελείται από πολλαπλές ριπές διαφορετικών χρηστών. Ένας μέρος του uplink υπο-πλαισίου χρησιμοποιείται για διαμαχοπαγή πρόσβαση (contention-based access). Το συγκεκριμένο κομμάτι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κανάλι ταξινόμησης (στις περισσότερες περιπτώσεις), να χρησιμοποιηθεί για ρυθμίσεις της εκπεμπόμενης ισχύος ή για αιτήσεις εύρους ζώνης στην άνω ζεύξη. Επιπρόσθετα, best-effort δεδομένα μπορούν να

σταλούν σε αυτό το διαμαχοπαγές κανάλι, όταν το η ποσότητα των δεδομένων είναι πολύ μικρή για να αφιερωθεί ένα ολόκληρο κανάλι για αυτά. Εκτός από τα ανωτέρω αναφερθέντα το uplink πλαίσιο έχει ένα δείκτη ποιότητας καναλιού (channel-quality indicator channel-CQICH) για τον σταθμό του συνδρομητή (subscriber station-SS), για να προσφέρεται ανάδραση στον σταθμό βάσης και συγκεκριμένα στον χρονοπρογραμματιστή (scheduler) αυτού. Επίσης υπάρχει ένα κανάλι γνωστοποίησης (acknowledgement-ACK) για τον SS για να προσφέρει ανάδραση για τα δεδομένα της κάτω ζεύξης.

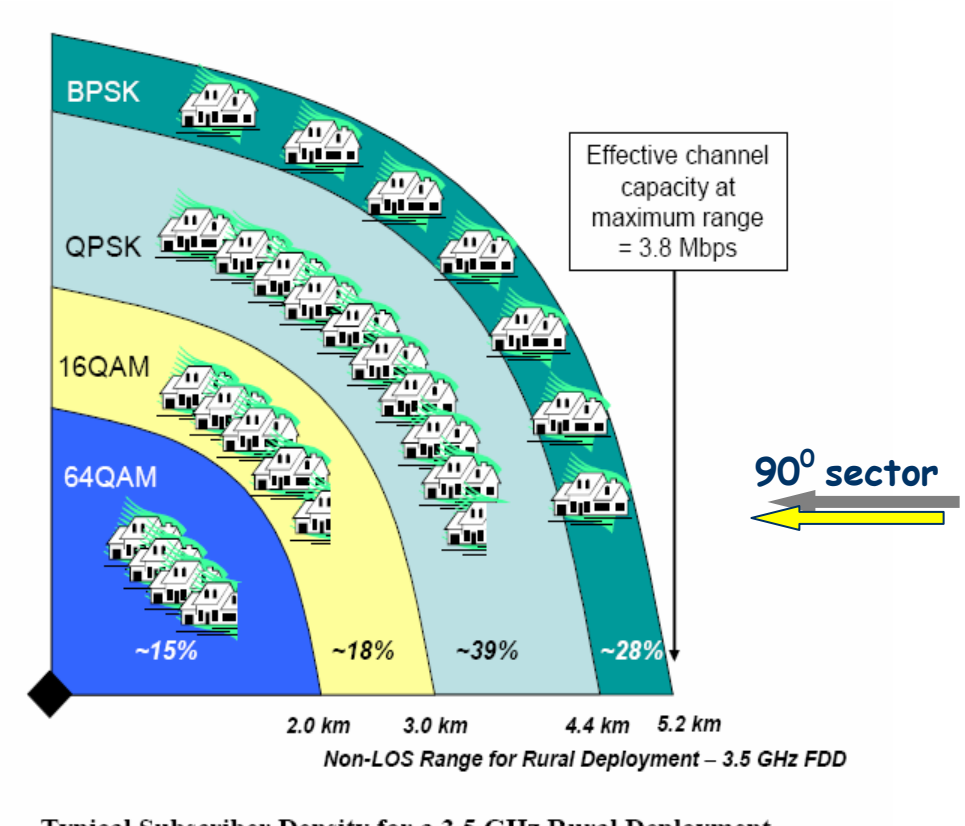
Για να μπορεί να χειρίζεται τις χρονικές αποκλίσεις το WiMAX υποστηρίζει, προαιρετικά, προοίμια σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανά 8, 16, ή 32 σύμβολα στην άνω ζεύξη. Στην κάτω ζεύξη ένα μικρό προοίμιο μπορεί να τοποθετηθεί στην αρχή κάθε ριπής. Έχει υπολογισθεί ότι έχοντας τέτοιου είδους προοίμια, κάθε 10 σύμβολα, επιτυγχάνεται επικοινωνία χρήστη-σταθμού βάσεως ακόμα και αν η ταχύτητα του χρήστη είναι πάνω από 150 KM/h.

2.5 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive modulation and coding)

Το WiMAX υποστηρίζει μια ποικιλία από διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Προβλέπεται μάλιστα αλλαγή των παραπάνω τεχνικών ανά ριπή, αναλόγως με τις συνθήκες του καναλιού. Χρησιμοποιώντας τον δείκτη ανάδρασης ο SS μπορεί να ενημερώσει τον σταθμό βάσης (base station-BS) για την ποιότητα της κάτω ζεύξης. Για την άνω ζεύξη ο BS μπορεί να εκτιμήσει την ποιότητα του καναλιού βασιζόμενος στην ποιότητα του ληφθέντος σήματος. Ο scheduler του BS υπολογίζει την ποιότητα καναλιού επικοινωνίας ανά χρήστη και προσδιορίζει τον κατάλληλο μηχανισμό διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που μεγιστοποιεί τη διεκπεραιωτικότητα (throughput) για το δεδομένο SNR που υπάρχει τη στιγμή της επικοινωνίας, με κάθε χρήστη, *ξεχωριστά*. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση αυξάνει το την συνολική χωρητικότητα του συστήματος σημαντικά, καθώς επιτρέπει την πραγματικού χρόνου εκτίμηση της χρυσής τομής μεταξύ throughput και στιβαρότητας (robustness) για κάθε ζεύξη-χρήστη.Το σχήμα 2-8 απεικονίζει τις διάφορες εκδοχές κωδικοποιήσεων που υποστηρίζονται από το WiMAX. Στην κάτω ζεύξη η QPSK, 16 QAM και 64 QAM είναι υποχρεωτικές για το fixed αλλά και το mobile WiMAX. Η 64 QAM είναι προαιρετική στην άνω ζεύξη.

	Downlink	Uplink
Modulation	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM; BPSK optional for OFDMA-PHY	BPSK, QPSK, 16 QAM; 64 QAM optional
Coding	Mandatory: convolutional codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Optional: convolutional turbo codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; repetition codes at rate 1/2, 1/3, 1/6, LDPC, RS-Codes for OFDM-PHY	Mandatory: convolutional codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Optional: convolutional turbo codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; repetition codes at rate 1/2, 1/3, 1/6, LDPC

Σχήμα 2-8: Διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις που χρησιμοποιούνται στο WiMAX



Σχήμα 2-9: Ποσοστιαία τυπική πυκνότητα χρηστών σε αγροτική περιοχή, χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση και συνολική χρήσιμη χωρητικότητα καναλιού στα 3.5 GHz [Copyright© Siemens Mobile Communications S.p.A. 2006]

2.6 Ρυθμοί δεδομένων σε φυσικό επίπεδο

Δεδομένης της μεγάλη ευελιξίας που υπάρχει στην επιλογή των τεχνικών της διαμόρφωσης, του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης, της κωδικοποίησης, στο φυσικό επίπεδο ο ρυθμός δεδομένων ποικίλει βάσει των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην λειτουργία του συστήματος. Εκτός από τις προαναφερθείσες πολύ σημαντικές παραμέτρους επίδραση έχουν και παράμετροι όπως ο αριθμός των υποκαναλιών που χρησιμοποιούνται, οι χρόνοι φύλαξης OFDM και ο ρυθμός υπερδειγματοληψίας .

Το σχήμα 2-10 περιλαμβάνει ρυθμούς δεδομένων στο φυσικό επίπεδο με διάφορες επιλογές στο εύρος ζώνης, στη διαμόρφωση και στην κωδικοποίηση. Οι ρυθμοί που παρουσιάζονται είναι το άθροισμα των ροών όλων των χρηστών, σε ένα τομέα, για TDD λειτουργία και 3:1 λόγο μεγέθους κάτω ζεύξης προς άνω ζεύξης. Στους υπολογισμούς έχει υποτεθεί μέγεθος πλαισίου 5ms, 12,5% overhead από το OFDM διάστημα προστασίας. Οι τιμές των ρυθμών δεδομένων που αποτυπώνονται είναι δίχως την χρήση χωρικής πολύπλεξης – χρήση πολλαπλών κεραιών σε πομπό και δέκτη. Με υιοθέτηση αυτής της τεχνικής μπορεί να επιτευχθούν μεγαλύτεροι ρυθμοί.

Channel bandwidth	3.5MHz		1.25MHz		5MHz		10MHz	
PHY mode	256 OFDM		128 OFDMA		512 OFDMA		1,024 OFDMA	
Oversampling	8/7		28/25		28/25		28/25	
Modulation and Code Rate	PHY-Layer Data Rate (kbps)							
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	Not applicable					
QPSK, 1/2	1,882	653	504	154	2,520	653	5,040	1,344
QPSK, 3/4	2,822	979	756	230	3,780	979	7,560	2,016
16 QAM, 1/2	3,763	1,306	1,008	307	5,040	1,306	10,080	2,688
16 QAM, 3/4	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032
64 QAM, 1/2	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032
64 QAM, 2/3	7,526	2,611	2,016	614	10,080	2,611	20,160	5,376
64 QAM, 3/4	8,467	2,938	2,268	691	11,340	2,938	22,680	6,048
64 QAM, 5/6	9,408	3,264	2,520	768	12,600	3,264	25,200	6,720

Σχήμα 2-10: Ρυθμοί δεδομένων συναρτήσει του εύρους καναλιού, της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης [Copyright © 2007 Pearson Education, Inc.]

2.7 Τεχνολογία Έξυπνων κεραιών (Smart Antenna Technologies)

Οι έξυπνες κεραίες αναφέρονται σε ένα σύστημα από συστοιχίες κεραιών με εξελιγμένους αλγορίθμούς επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση της χωρικής προέλευσης του σήματος και τον εντοπισμό της κεραίας αποστολής του σήματος.

2.7.1 Multiple-input and Multiple-output system (MIMO)

Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες στον πομπό και το δέκτη με απώτερο στόχο καλύτερων επιδόσεων επικοινωνίας. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία μπορούμε να επιτύχουμε αύξηση του throughput ή της απόστασης της ζεύξης, χωρίς την αύξηση του χρησιμοποιούμενου εύρους ή της εκπεμπόμενης ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση της φασματικής απόδοσης και της αξιοπιστίας του καναλιού μετάδοσης.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 υποστηρίζει την χρήση της τεχνικής διαφορισμού εκπομπής multiple-input and single output (MISO), που αναφέρεται και ως Space Time Code (STC). Με αυτή τη μέθοδο δυο ή περισσότερες κεραίες χρησιμοποιούνται στο δέκτη και μια κεραία στο πομπό. Με την χρήση MIMO κεραιοσυστήματος μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση ακόμα περισσότερο.

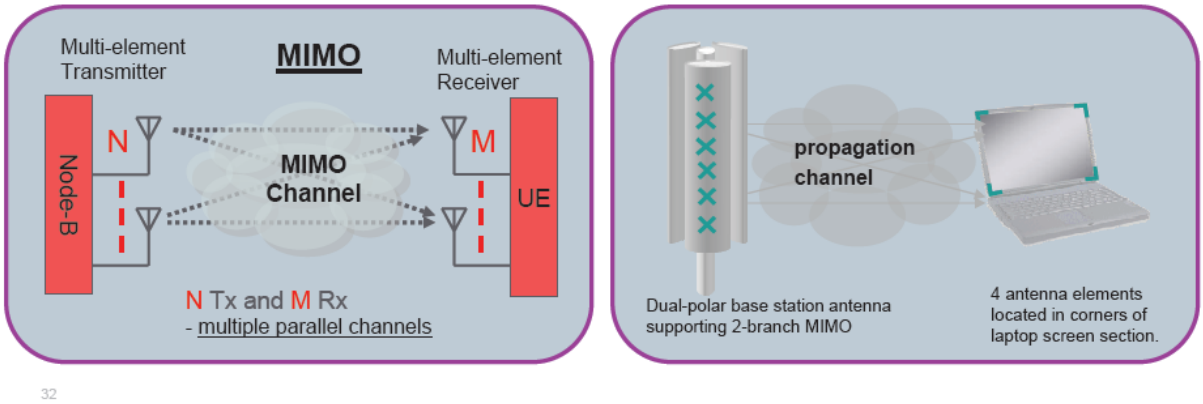
Με την χρήση διαφορισμού εκπομπής τύπου “Matrix A”, όπως περιγράφεται στο πρότυπο, διαφορετικές ακολουθίες bit μεταφέρονται από δυο διαφορετικές κεραίες κατά την διάρκεια ενός συμβόλου. Την επόμενη χρονική περίοδο συμβόλου μεταδίδονται από τις δυο κεραίες τα συζυγή σύμβολα των προηγούμενων. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός δεδομένων δεν αυξάνει, αλλά το σύστημα μας γίνεται πιο ανθεκτικό, λόγω του πλεονασμού κατά την μετάδοση των συμβόλων.

Το 802.16 πρότυπο υποστηρίζει επίσης την τεχνική spatial multiplexing (SMX), που ορίζεται ως “Matrix B” στο πρότυπο. Με αυτή την τεχνική μεταδίδουμε διαφορετικές ροές bit από τις δυο κεραίες συγχρόνως, ανά περίοδο συμβόλου. Λόγω του ότι και ο δέκτης έχει παραπάνω από μια κεραία και τα εκπεμπόμενα σήματα έχουν την απαιτούμενη ποιότητα μπορεί να τα αναγνωρίσει και τα δυο. Η διαδικασία αποστολής από τον πομπό και η διαδικασία λήψεως και διαχωρισμού των δυο σημάτων στον δέκτη εισάγουν μεγάλη πολυπλοκότητα και κόστος στο σύστημα. Έχουμε ωστόσο την δυνατότητα για σοβαρή αύξηση στο throughput του συστήματος μας, με αυτή την τεχνική

Με το συνδυασμό των δυο παραπάνω τεχνικών οι χρήστες που έχουν καλό SNR θα λαμβάνουν τα δεδομένα τους σε λιγότερο χρόνο και άρα θα καταλαμβάνουν λιγότερο χρόνο στην χρήση του καναλιού και οι χρήστες που έχουν αδύναμο σήμα, με την χρήση της STC θα μπορούν λαμβάνουν με την συνήθη ταχύτητα τα δεδομένα τους. Άρα θα έχουμε την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών, με παράλληλη αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού.

Οι προδιαγραφές που ορίζονται στο 802.16 υποστηρίζουν και την χρήση τεσσάρων κεραιών. Τρεις διαρθρώσεις υποστηρίζονται σε αυτή την περίπτωση:

- *WiMAX four antenna mode 1:* Τα δεδομένα μεταδίδονται τέσσερις φορές ανά σύμβολο, με αντιστροφή ή μετάδοση του συζυγούς κάθε φορά. Έτσι δεν έχουμε αύξηση του ρυθμού, αλλά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε λάθη.
- *WiMAX four antenna mode 2:* Τα δεδομένα μεταδίδονται με διπλάσιο ρυθμό, με παράλληλη αύξηση της ανθεκτικότητας κατά την μετάδοση γιατί αποστέλλονται και τα συζυγή σύμβολα μια φορά.
- *WiMAX four antenna mode 2:* Στην περίπτωση αυτή, που χαρακτηρίζεται ως η περίπτωση τεσσάρων κεραιών σε Matrix C, τέσσερις διαφορετικές ροές bit μεταδίδονται από τις τέσσερις κεραίες ανά σύμβολο, με αποτέλεσμα να έχουμε ρυθμό τετραπλάσιο από τον βασικό

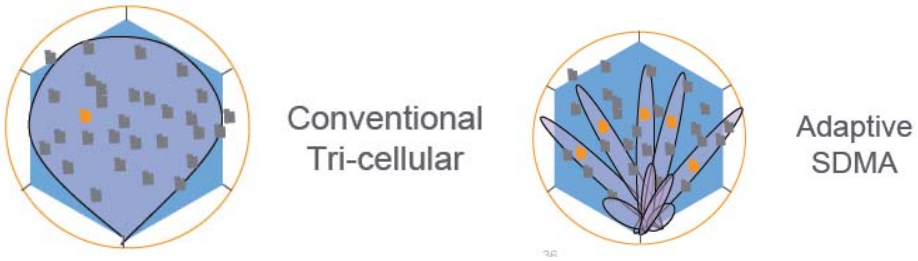


Σχήμα 2-11: MIMO κεραιοσυστήματα και χωρική πολύπλεξη [Copyright© Nortel 2006]

2.7.2 Προσαρμοστικό σύστημα κεραίας (Adaptive Antenna System)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε με σκοπό να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση της χωρικής/χρονικής φύσης του εκάστοτε καναλιού διάδοσης. Λόγω πολλαπλών ανακλάσεων, διαθλάσεων και του φαινομένου της σκέδασης στο κανάλι μεταξύ του

πομπού και του δέκτη σε ένα ασύρματο σύστημα το σήμα που φτάνει στο σταθμό βάσης προέρχεται από πολλαπλές διευθύνσεις., με διαφορετική ισχύ και φάση.
Η προσαρμογή του λοβού της κεραίας γίνεται με την χρήση συστοιχίας κεραιών. Η κάθε κεραία που συμμετέχει στη συστοιχία μπορεί να έχει διαφορετικό πλάτος ρεύματος εισόδου και φάση, με αποτέλεσμα να μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικοί λοβοί. Με την μορφοποίηση των λοβών των κεραιών (beamforming) μπορεί να επιτύχουμε καλύτερο λόγο φορέα προς παρεμβολή και θόρυβο (Carrier to Interference and Noise ratio-CINR).



Σχήμα 2-12: Διάγραμμα ακτινοβολίας με τυπικό λοβό κυψέλης (αριστερή πλευρά). Διάγραμμα ακτινοβολίας με πολλαπλούς ρυθμιζόμενους λοβούς (δεξιά πλευρά)

Η τεχνική αυτή ορίζεται στο IEEE 802.16-2004 και στο IEEE 802.16e-2005 πρότυπο. Δεν έχει υιοθετηθεί στο fixed WiMAX, αλλά είναι υποχρεωτικό να υποστηρίζεται από όλους τους κινητούς σταθμούς (mobile stations-MS) κατά την WiMAX mobile εκδοχή. Σε αυτή την εκδοχή του WiMAX είναι επίσης προαιρετικό για τους BS. Για να υπάρξει η δυνατότητα της χρήσης αυτής της τεχνικής από πολλαπλούς χρήστες ορίζεται μια ζώνη στο DL-MAP που περιέχει τους συνδυασμούς των πιλότων, που είναι αναγκαίοι κατά την μετάδοση των πλαισίων.

2.8 Περίληψη και Συμπεράσματα

- Το φυσικό επίπεδο του WiMAX μπορεί να προσαρμοστεί και να λειτουργήσει σε διάφορα εύρη καναλιού και σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιεί, με δυναμικό τρόπο, διαφορετικούς συνδυασμούς κωδικοποίησης και διαμόρφωσης για να ανταπεξέλθει στις εκάστοτε ανάγκες φυσικής κάλυψης και ταχύτητας διαμεταγωγής δεδομένων. Αυτά τα χαρακτηριστικά του το κάνουν εξαιρετικά ευέλικτο, ευπροσάρμοστο και αποδοτικό στο φυσικό επίπεδο διασύνδεσης.

- Το φυσικό επίπεδο του WiMAX έχει σχεδιασθεί για να υποστηρίζει τη χρήση πολλαπλών κεραιών. Οι πολλαπλές κεραίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για διαφορισμό, μορφοποίηση των λοβών και χωρική πολύπλεξη. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό έχει ως αποτέλεσμα υψηλή χωρητικότητα στο διαθέσιμο εύρος ζώνης και αξιοπιστία στην επικοινωνία.
- Αν και το πρότυπο παρέχει κάποια καθοδήγηση για το συνδυασμό και τη συνολική επιλογή, μεταξύ των ποικίλλων διατιθέμενων επιλογών, αφήνεται στη διακριτική ευκαιρία των κατασκευαστών και των τηλεπικοινωνιών παρόχων η επιλογή των πολλών τεχνικών παραμέτρων.

2.9 Βιβλιογραφία

[1] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed: Fundamentals of WiMAX-Understanding Broadband Wireless Networking, Copyright © 2007 Pearson Education, Inc.

[2] Loutfi Nuaymi: WiMAX-Technology for Broadband Wireless Access, Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd.

[3] www.wikipedia.com

[4] WayMAX-*draft*, Information and Communication Networks. Copyright © 2006 Siemens SMC

[5]www.moto-teleterm.com

3. Το επίπεδο πρόσβασης μέσου του WiMAX

MAC layer of WiMAX

3.1 Εισαγωγή

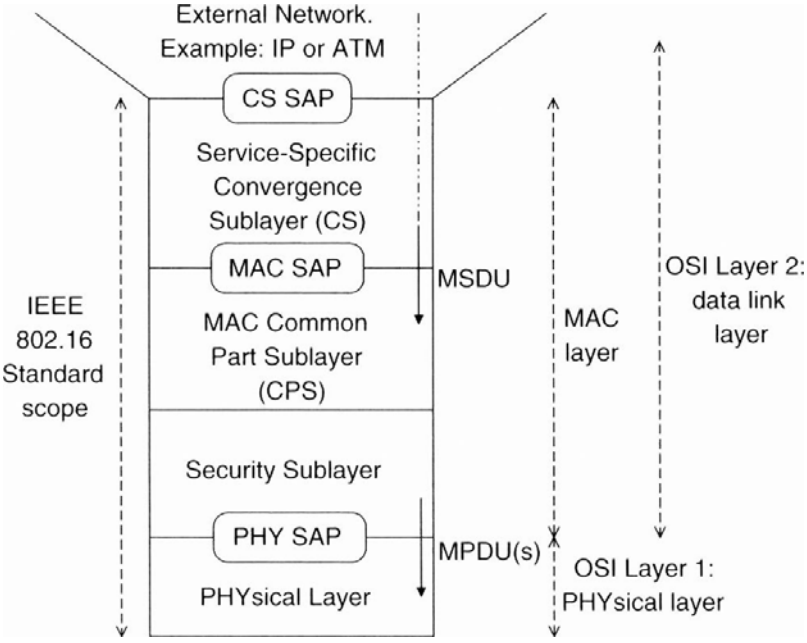
Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε το φυσικό επίπεδο του WiMAX. Το επίπεδο αυτό, που αναφέρεται ως πρώτο επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλων διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (open systems interconnect-OSI), έχει ως σκοπό την αξιόπιστη διασύνδεση του πομπού και του δέκτη χρησιμοποιώντας κάποιο φυσικό μέσο (χαλκό, οπτική ίνα, αέρα). Συνήθως στο φυσικό επίπεδο δεν ικανοποιούνται, ούτε ελέγχονται πλήρως οι απαιτήσεις για την ποιότητα υπηρεσίας χρήστη. Η εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας αφήνεται κυρίως σε παραπάνω επίπεδα και στην προκειμένη περίπτωση του WiMAX στο επίπεδο πρόσβασης μέσου. Το MAC επίπεδο, που εξυπηρετείται από το φυσικό επίπεδο, είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και την πολυπλεξία πολλαπλών συνδέσεων πάνω από το ίδιο φυσικό μέσο που ελέγχει το PHY. Οι σημαντικότερες λειτουργίες που επιτελούνται στο MAC επίπεδο είναι οι παρακάτω:

- Κατάτμηση (segmentation) ή σύνδεση (concatenation) των μονάδων δεδομένων υπηρεσίας (service data unit-SDU), που λαμβάνονται από ανώτερα επίπεδα, σε μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου (MAC protocol data unit-MAC_PDU)
- Επιλογή του κατάλληλου προφίλ ριπής (burst profile) και του επιπέδου ισχύος μετάδοσης των MAC PDU
- Επαναμετάδοση των MAC PDU που ελήφθησαν λανθασμένα από το δέκτη, όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία αυτόματης αίτησης επανάληψης (automated repeat request-ARQ)
- Παροχή ελέγχου ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και διαχείριση προτεραιοτήτων των MAC PDU που ανήκουν σε διαφορετικούς κομιστές δεδομένων και σηματοδοσίας (different data and signalling bearers)
- Χρονοπρογραμματισμός (scheduling) της αποστολής των MAC PDU πάνω από τους διαθέσιμους πόρους του φυσικού επιπέδου
- Παροχή διαχείρισης κινητότητας για την υποστήριξη ανωτέρων επιπέδων
- Παροχή ασφάλειας επικοινωνίας και δεδομένων και διαχείριση κλειδιών
- Έλεγχος λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης και αδράνειας συσκευής (power saving και idle-mode)

Το MAC επίπεδο του WiMAX χωρίζεται σε τρεις συνιστώσες: το υπο-στρώμα σύγκλισης ως προς την υπηρεσία (service-specific convergence sublayer-CS), το γενικό υπόστρωμα (common-part sublayer) και το υπόστρωμα ασφαλείας (security sublayer). Το CS, που είναι η διεπαφή μεταξύ του MAC επιπέδου και του επιπέδου 3 του δικτύου, λαμβάνει πακέτα

δεδομένων από το ανώτερο επίπεδο. Αυτά τα πακέτα είναι τα MAC SDU πακέτα (MAC service data unit-MAC_SDU). Το CS που τα λαμβάνει είναι υπεύθυνο για να εκπληρώνει όλες εκείνες τις διεργασίες που είναι εξαρτώμενες από τα ανώτερα επίπεδα, όπως συμπίεση επικεφαλίδας (header compression) και απεικόνιση διευθύνσεων (address mapping). Το CS είναι ουσιαστικά το υποεπίπεδο προσαρμογής των ανωτέρων πρωτοκόλλων στο MAC πρωτόκολλο του 802.16.

Το γενικό υπόστρωμα του MAC επιπέδου εκτελεί όλες εκείνες τις διεργασίες που είναι ανεξάρτητες από τον τύπο των ανωτέρων πρωτοκόλλων, όπως τεμαχιοποίηση (fragmentation), συναλύσωση (concatenation) των SDU μέσα σε ένα MAC PDU, μετάδοση των PDU, έλεγχο QoS, και ARQ. Το υποεπίπεδο ασφαλείας είναι υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση (encryption), εξουσιοδότηση (authorization) και σωστή ανταλλαγή των κλειδιών κωδικοποίησης μεταξύ των MS και του BS.



Σχήμα 3-1: Το επίπεδο πρόσβασης μέσου (MAC) του WiMAX

3.2 Υπόστρωμα Σύγκλισης (Convergence sublayer)

Το σχήμα 9.1 απεικονίζει τα διάφορα υποεπίπεδα σύγκλισης, τα οποία υποστηρίζονται από το WiMAX. Εκτός από την συμπίεση επικεφαλίδας, το CS είναι υπεύθυνο για την αντιστοίχηση των διευθύνσεων των ανωτέρων επιπέδων των SDUs, όπως οι IP διευθύνσεις, με την ταυτότητα των MAC και PHY συνδέσεων, οι οποίες χρησιμεύουν στη μετάδοσή του. Αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη, γιατί στα επίπεδα MAC και PHY δεν υπάρχει ορατότητα των διευθύνσεων υψηλών επιπέδων. Το WiMAX MAC επίπεδο είναι συνδεσιστρεφές (connection oriented) και αναγνωρίζει μια λογική σύνδεση μεταξύ του BS και του MS, μέσω

ενός μονοκατευθυντικού αναγνωριστή σύνδεσης (unidirectional connection identifier-CID). Για τις συνδέσεις UL και DL, οι CIDs είναι διαφορετικοί. Το CID μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσωρινή και δυναμική διεύθυνση του επιπέδου 2. Οι διευθύνσεις ανατίθενται από το BS, ώστε αυτός να αναγνωρίζει μια σύνδεση μονής κατεύθυνσης μεταξύ των ομότιμων MAC/PHY οντοτήτων των δυο συσκευών που θέλουν να επικοινωνήσουν. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων και τον έλεγχο κίνησης (control plane traffic). Με σκοπό την απεικόνιση των διευθύνσεων ανώτερου επιπέδου στο CID, το CS πρέπει να μπορεί να ανιχνεύσει την αντιστοίχηση μεταξύ της διεύθυνσης προορισμού και του αντίστοιχου CID. Είναι πολύ πιθανό, SDUs που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση προορισμού να μεταφερθούν σε διαφορετικές συνδέσεις, ανάλογα με τις QoS απαιτήσεις τους. Σε αυτή την περίπτωση το CS καθορίζει το κατάλληλο CID, η επιλογή του οποίου δεν βασίζεται μόνο στη διεύθυνση προορισμού αλλά και σε διάφορους άλλους παράγοντες, όπως η ροή υπηρεσίας (service flow ID-SFID) και η διεύθυνση πηγής. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 9-1, το πρωτόκολλο 802.16 καθορίζει το CS για ATM (ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς) υπηρεσίες και υπηρεσίες πακέτου. Ωστόσο, το WiMAX Forum έχει αποφασίσει να υλοποιήσει μόνο IP και Ethernet (802.3) CS. Είναι άξιο λόγου ότι έχουν δεσμευτεί και κάποιες τιμές-κωδικοί για μελλοντικά πρωτόκολλα, που μπορεί να δημιουργηθούν ή να χρησιμοποιηθούν σε ανώτερο επίπεδο.

3.3 Συνδέσεις και Ροές υπηρεσίας (Connections and Service Flows)

Το CS παρέχει οποιαδήποτε μετατροπή ή απεικόνιση (mapping) των δεδομένων που λαμβάνονται από ανώτερα επίπεδα, μέσω του CS σημείου πρόσβασης υπηρεσίας (CS Service Access Point-CS_SAP), όπως φαίνεται στο σχήμα 3-1. Το επόμενο SAP είναι αυτό του MAC common part sublayer (MAC CPS). Τα SDU θα πρέπει να αντιστοιχηθούν από το CS σε κάποια από τις ροές υπηρεσίας και κάποια συγκεκριμένη σύνδεση του MAC CPS, μέσω του Service flow identification (SFID) και του Connection Identifier (CID) αντίστοιχα.

Ο CID ταυτοποιεί μια σύνδεση μεταξύ ενός BS και MS (ή SS) μέσα από την οποία περνούν οι SDU μιας συγκεκριμένης τηλεπικοινωνιακής υπηρεσίας. Το CID είναι μεγέθους 16 bit, όπερ σημαίνει ότι υποστηρίζει μέχρι 65536 μονοκατευθυντικές συνδέσεις. Κάποια CID είναι δεσμευμένα για συγκεκριμένη χρήση, κυρίως για κάλυψη αναγκών του συστήματος, όπως το ranging, διαχείριση δικτύου, AAS και άλλα.

Η ροή υπηρεσίας είναι μια υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων που παρέχει μονοκατευθυντική διακομιδή πακέτων στην άνω ζεύξη ή στην κάτω ζεύξη. Το αναγνωριστικό κάθε τέτοιας ζεύξης (SFID) είναι μεγέθους 32 bit. Κάθε τέτοια ροή δεδομένων χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες QoS παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν, εν μέρει, πως ένα σταθμός χρήστη ζητά εύρος ζώνης για μετάδοση δεδομένων και την αντίστοιχη συμπεριφορά-απάντηση του σταθμού βάσης.

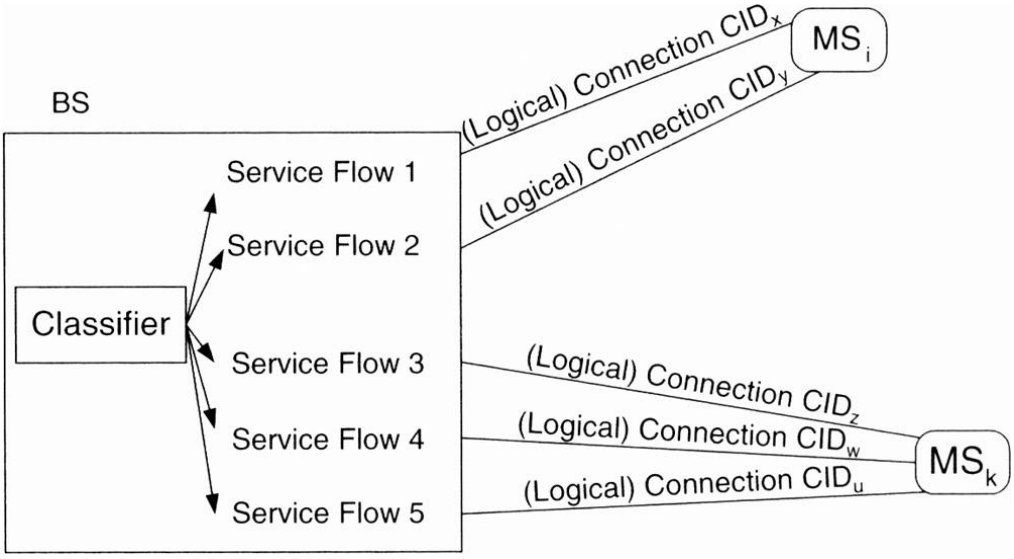
Μια ροή υπηρεσίας χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω γνωρίσματα:

- SFID – Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το SFID αποτελεί την ταυτότητα κάθε ροής υπηρεσίας.
- CID – Η αντιστοίχηση CID σε ένα service flow γίνεται μόνο στην περίπτωση που η συγκεκριμένη ροή είναι ενεργή ή όταν έχουν δεσμευτεί πόροι για αυτήν.
- ProvisionedQoSParamSet – Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει ομάδες χαρακτηριστικών QoS στα οποία γίνεται επίβλεψη, με σκοπό την τήρηση τους μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Το όνομα της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας (QoS class name) είναι μια από τις βασικές παραμέτρους. Υπάρχουν 5 QoS classes σύμφωνα με την έκδοση IEEE Standard 802.16e-2005.
- AdmittedQoSParamSet – Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει μια συγκεκριμένη ομάδα QoS παραμέτρων για την οποία ο BS κρατά, δεσμεύει πόρους. Ο βασικός πόρος ο οποίος δεσμεύεται είναι το εύρος ζώνης και σε ορισμένες περιπτώσεις μνήμη.
- ActiveQoSParamSet - Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει την υπηρεσία που πραγματικά προσφέρεται στη ροή δεδομένων. Μόνο μια ενεργή (active) υπηρεσία μπορεί να προωθήσει πακέτα. Το αν μια ροή δεδομένων είναι ενεργή καθορίζεται από την συγκεκριμένη παράμετρο. Αν η ActiveQoSParamSet παράμετρος δεν έχει τιμή (null), τότε η ροή δεδομένων δεν είναι ενεργή.
- Authorization module – Η συγκεκριμένης παράμετρος καθορίζεται από μια λογική συνάρτηση του BS που ορίζει την αποδοχή ή την απόρριψη κάθε αλλαγής στις QoS παραμέτρους μιας ροής δεδομένων. Καθορίζει τις πιθανές τιμές των AdmittedQoSParamSet και των ActiveQoSParamSet.

Οι τύποι των ροών υπηρεσίας είναι τρεις στον αριθμό:

- Provisioned service flows: Αυτό το είδος της ροής υπηρεσίας χρησιμοποιείται από το σύστημα διαχείρισης του δικτύου και δεν είναι ενεργό, ούτε καταλαμβάνει πόρους του δικτύου. Η AdmittedQoSParamSet και η ActiveQoSParamSet δεν έχουν τιμή σε αυτές τις ροές.

- Admitted service flow: Το πρότυπο υποστηρίζει μοντέλο ενεργοποίησης δυο φάσεων, που χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές τηλεφωνίας. Σε αυτό το μοντέλο οι πόροι για μια κλήση είναι καθορισμένοι, αλλά χρησιμοποιούνται μόνο στην περίπτωση που η end-to-end διαπραγμάτευση είναι επιτυχημένη. Τότε μόνο αρχίζουν οι πόροι και χρησιμοποιούνται.
- Active service flow: Αυτό το είδος της ροής υπηρεσίας έχει δεσμευμένους πόρους, για ιδιόχρηση, από τον BS. Η παράμετρος ActiveQoSParamSet έχει μη μηδενική τιμή.

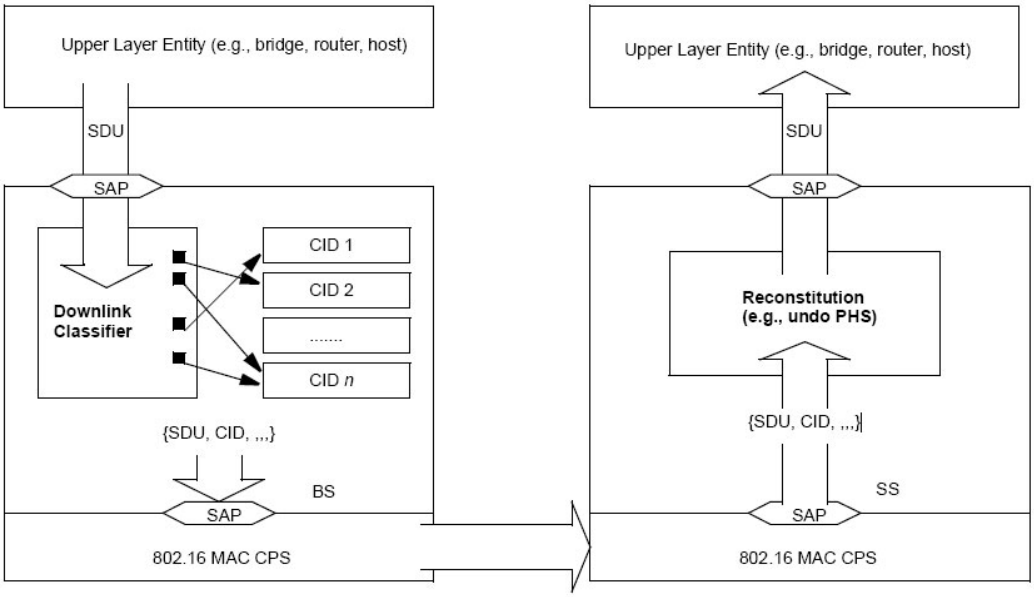


Σχήμα 3-2: Απεικόνιση ροών υπηρεσίας και των συνδέσεων
[Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd]

3.4 Κατάταξη και Απεικόνιση των MAC SDU (Classification and Mapping of MAC SDU)

Σύμφωνα με το πρότυπο η κατάταξη είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα MAC SDU ανατίθεται (is mapped) σε μια συγκεκριμένη σύνδεση για μετάδοση από το MAC επίπεδο μιας συσκευής στο MAC επίπεδο μιας άλλης συσκευής. Αυτή η ανάθεση των SDU σχετίζεται και με ποια είναι η service flow που ανήκει το SDU. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στα SDU να παραδίδονται ικανοποιώντας τους διάφορους περιορισμούς QoS που έχουν απαιτηθεί από τα παραπάνω επίπεδα διασύνδεσης. Η κατάταξη των MAC SDU πρέπει να γίνει και για την άνω ζεύξη και για την κάτω ζεύξη. Στην περίπτωση της άνω ζεύξης η διαδικασία κατάταξης γίνεται στον σταθμό του χρήστη, ενώ στην περίπτωση της κάτω ζεύξης η κατάταξη γίνεται στον BS. Τα κριτήρια για να γίνει η κατάταξη αυτή έχουν να κάνουν με την σωστή αντιστοίχηση διαφόρων παραμέτρων των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα

την IP διεύθυνση παραλήπτη των πακέτων και την προτεραιότητα των πακέτων. Εάν ένα πακέτο ταιριάζει στα κριτήρια αποστολής, τότε αυτό αποστέλλεται στο SAP και μέσω αυτού παραδίδεται στο MAC CPS που το δρομολογεί μέσω της σύνδεσης που υποδηλώνει ο CID. Ο μηχανισμός κατάταξης φαίνεται στο σχήμα 3-3.



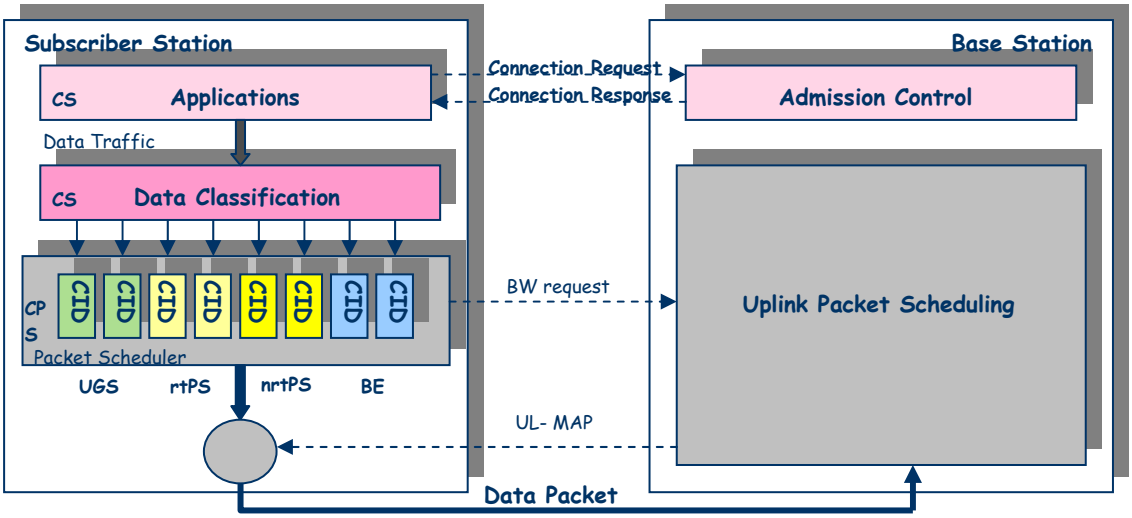
Σχήμα 3-3: Classification and CID mapping. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια και για την άνω και για την κάτω ζεύξη [Copyright IEEE 2004, IEEE]

Το MAC επίπεδο του IEEE 802.16 είναι συνδεσιστρεφές. Οι συνδέσεις είναι νοητές, για σκοπούς απεικόνισης, συγχρόνως, πολλαπλών και διαφορετικών υπηρεσιών με ποικίλες QoS παραμέτρους. Μετά την καταχώρηση ενός σταθμού χρήστη στο δίκτυο οι συνδέσεις συσχετίζονται με συγκεκριμένες ροές δεδομένων. Καινούριες συνδέσεις μπορούν να δημιουργηθούν μεταξύ ενός BS και ενός SS, εάν αυτό το επιτρέψει ο BS και μετά την αρχική καταχώρηση. Μια σύνδεση καθορίζει και μια υποχρεωτικά ροή δεδομένων. Η ροή δεδομένων με την σειρά της, όπως αναφέρθηκε, καθορίζει συγκεκριμένες QoS παραμέτρους για τα SDU που ανταλλάσσονται πάνω από μια σύνδεση.

Οι σημαντικότερες QoS παράμετροι των ροών δεδομένων περιγράφονται παρακάτω:

- Scheduling service type: Οι κλάσεις της ποιότητας υπηρεσίας για τον αντίστοιχο χρονοπρογραμματισμό των SDU είναι πέντε. Ανάλογα στο ποια κλάση ανήκει το κάθε SDU θα χρονοπρογραμματισθεί και διαφορετικά. Οι κλάσεις και ο σκοπός που εξυπηρετεί η κάθε μια αναφέρονται παρακάτω.

- Traffic priority: Σε περίπτωση που δυο ή περισσότερες service flow έχουν όλες τις υπόλοιπες QoS παραμέτρους τους ίδιες, τότε ανάλογα με την προτεραιότητα που δίνεται από αυτή την παράμετρο καθορίζεται το ποια ροή θα υποστεί την μεγαλύτερη καθυστέρηση.
- Maximum sustained traffic rate (bits/sec): Η συγκεκριμένη παράμετρος ορίζει το μέγιστο μέγεθος ριπής δεδομένων που μπορεί να εξυπηρετηθεί.
- Minimum reserved traffic rate (bits/sec): Αυτή η παράμερος καθορίζει το ελάχιστο ρυθμό που δεσμεύεται για αυτή τη ροή υπηρεσίας.
- Vendor-specific QoS parameters: Αυτή η παράμετρος επιτρέπει στους κατασκευαστές να ορίσουν δικές τους επιπρόσθετες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας.
- Tolerated jitter: Αυτή η παράμετρος καθορίζει τη μέγιστη αποδεκτή αυξομείωση (jitter)της καθυστέρησης στα δεδομένα μια συγκεκριμένης ροής υπηρεσίας
- Maximum latency: Η τιμή αυτής της παραμέτρου ορίζει την μέγιστη καθυστέρηση μεταξύ της υποδοχής ενός πακέτου από ένα σταθμό στη διεπαφή του δικτύου μέχρι την προώθηση του πακέτου στην ασυρματική του διεπαφή.
- Fixed length versus variable-length SDU indicator: Καθορίζει εάν τα SDU στην συγκεκριμένη ροή υπηρεσίας έχουν σταθερό μήκος. Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που επιτρέπεται η πακετοποίηση.
- SDU size: Αυτή η τιμή ορίζει το μέγεθος των SDU, στην περίπτωση που το μήκος αυτών είναι σταθερό.
- Request/Transmission policy: Αυτή η παράμετρος επιτρέπει τον καθορισμό της μεθόδου ζήτησης εύρους ζώνης από τον σταθμό χρήστη στον σταθμό βάσης, καθώς και της μεθόδου μορφοποίησης των PDU.



Σχήμα 3-4: WiMax 802.16 Quality of Service Architecture
[Copyright© Siemens Mobile Communications S.p.A. 2006]

3.5 Υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού (Scheduling Services)

Οι υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού βάσει του IEEE Standard 802.16-2004 είναι τέσσερις. Μετέπειτα στην έκδοση IEEE Standard 802.16e-2005 προστέθηκε ακόμα μια υπηρεσία η οποία ονομάζεται εκτεταμένη υπηρεσία πραγματικόχρονης σταθμοσκόπησης (extended real time polling service-ertPS).

3.5.1 Υπηρεσία ανεπίκλητης χορηγίας (unsolicited grant service-UGS)

Η UGS είναι σχεδιασμένη για να παρέχει υπηρεσίες άνω ζεύξης πραγματικού χρόνου που μεταφέρουν πακέτα δεδομένων σταθερού μεγέθους, σε περιοδική βάση, όπως είναι η T1/E1 και η VoIP υπηρεσίες με ανίχνευση σιγής (silent suppression). Η υπηρεσία παρέχει χορηγίες (grants) σταθερού μεγέθους σε περιοδική βάση και σε πραγματικό χρόνο, όπερ σημαίνει ότι μειώνεται στο ελάχιστο το επίβαρο (overhead) και η καθυστέρηση της αίτησης του σταθμού του χρήστη για εύρος ζώνης. Ο BS μπορεί να επιτρέπει την αποστολή ριπών δεδομένων από το χρήστη σε περιοδικά διαστήματα, βασιζόμενος στην παράμετρο maximum sustained traffic rate που έχει καταχωρηθεί στην συγκεκριμένη ροή δεδομένων. Το μέγεθος των χορηγιών πρέπει να είναι αρκετό να υποστηρίξει τα δεδομένα πραγματικού χρόνου που είναι σχετισμένα με την συγκεκριμένη ροή δεδομένων, αλλά μπορεί να είναι και μεγαλύτερο , πράγμα το οποίο αφήνεται στη διακριτική ευκαίρεια του χρονοπρογραμματιστή. Στη συγκεκριμένη υπηρεσία χρονοπρογραμματισμού

οποιαδήποτε αίτηση διεκδίκησης εύρους ζώνης είναι απαγορευμένη. Οι υποχρεωτικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για το χρονοπρογραμματισμό περιγράφονται συνοπτικά σε σχήμα που ακολουθεί.

3.5.2 Υπηρεσία πραγματικόχρονης σταθμοσκόπησης (real time polling service-rtPS)

Η rtPS σχεδιάσθηκε να υποστηρίζει ροές δεδομένων άνω ζεύξης πραγματικού χρόνου που μεταφέρουν πακέτα δεδομένων μεταβλητού μήκους σε περιοδική βάση, όπως moving experts group video (MPEG video). Η υπηρεσία αυτή προσφέρει περιοδικές, πραγματικού χρόνου μονοεκπομπές αίτησης χορήγησης εύρους ζώνης και επιτρέπει στο σταθμό του χρήστη να καθορίζει το μέγεθος της απαιτούμενης χορηγίας. Αυτή η υπηρεσία απαιτεί μεγαλύτερο επίβαρο αιτήσεων, αλλά υποστηρίζει μεταβλητού μεγέθους χορηγίες για βέλτιστη αποδοτικότητα μεταφοράς των δεδομένων. Ο BS πρέπει να παρέχει περιοδικές ευκαιρίες αίτησης για εύρος ζώνης στους σταθμούς των χρηστών. Για την συγκεκριμένη σύνδεση που χρησιμοποιεί η rtPS θα πρέπει να είναι απενεργοποιημένες οι αιτήσεις διεκδίκησης του εύρους ζώνης.

3.5.3 Υπηρεσία εκτεταμένης πραγματικόχρονης σταθμοσκόπησης (extended real time polling service-extended rtPS)

Η συγκεκριμένη υπηρεσία είναι ένας μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού που εκμεταλλεύεται χαρακτηριστικά των δυο παραπάνω κλάσεων (UGS, rtPS). Ο BS μπορεί να παρέχει χορηγίες μονοεκπομπής με αυτόκλητο χαρακτήρα (unicast grants in an unsolicited manner), όπως στην UGS, και ως εκ τούτου να μειώνει την καθυστέρηση, λόγω μη ύπαρξης αίτησης για εύρος ζώνης. Ωστόσο αν και στην UGS η καταχώρηση εύρους ζώνης είναι σταθερή, στην ertPS υπηρεσία κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Η κατανομή bandwidth εδώ είναι δυναμική. Ο BS μπορεί να παρέχει περιοδικές ευκαιρίες μετάδοσης που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, είτε για δεδομένα, είτε για αιτήσεις bandwidth. Το μέγεθος της κατανομής εύρους ζώνης είναι προκαθορισμένο στην τρέχουσα τιμή της παραμέτρου maximum sustained traffic rate. Ο MS μπορεί ωστόσο να ζητήσει να γίνει αλλαγή στην κατανομή του εύρους. Όταν το μέγεθος της αίτησης εύρους ζώνης τεθεί μηδέν από τον MS, τότε ο MS παρέχει μόνο κάποιο εύρος ζώνης για να μπορούν να γίνουν αιτήσεις bandwidth ή ακόμα και τίποτα. Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες ευκαιρίες αίτησης εύρους με μονοεκπομπή, τότε ο MS μπορεί να χρησιμοποιεί αιτήσεις διεκδίκησης εύρους ζώνης ή να αποστείλει μια κωδική λέξη ενεργοποίησης της υπηρεσίας.

3.5.4 Μη πραγματικόχρονη υπηρεσία σταθμοσκόπησης (non real time polling service- nrtPS)

Η nrtPS υπηρεσία χρονοπρογραμματισμού προσφέρει ευκαιρίες σταθμοσκόπησης με μονοεκπομπή (διεργασία κατά την οποία σταθμοί δεδομένων προσκαλούνται κυκλικά ένας ένας να εκπέμψουν). Για να λειτουργεί αυτή η υπηρεσία σωστά θα πρέπει οι σταθμός χρήστη που χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη υπηρεσία να επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει αιτήσεις διεκδίκησης εύρους. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθούν και αιτήσεις μονοεκπομπής.

3.5.5 Άριστη προσπάθεια (best effort)

Ο σκοπός της άριστης προσπάθειας χρονοπρογραμματισμού είναι να παρέχει αποδοτική υπηρεσία σε κίνηση άριστης προσπάθειας στην άνω ζεύξη. Σε αυτή την περίπτωση η παράμετρος Request/Transmission policy θα πρέπει να έχει τέτοια τιμή έτσι ώστε να επιτρέπονται οι αιτήσεις διεκδίκησης εύρους ζώνης.

Scheduling service	Maximum sustained traffic rate	Minimum reserved traffic rate	Request/transmission policy	Tolerated jitter	Maximum latency	Traffic priority
UGS	•	(Can be present	•	•	•	
rtPS	•	•	•		•	
nrtPS	•	•	•			•
BE	•		•			•

Σχήμα 3-5: Υποχρεωτικές QoS παράμετροι για τις υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού

Scheduling service	Piggyback grant request	Bandwidth stealing	Unicast polling	Contention-based polling
UGS	Allowed	Allowed	PM (Poll-Me) bit can be used	Not allowed
ertPS	Extended piggyback	Allowed	Allowed	Allowed
rtPS	Not allowed	Not allowed	Allowed	Not allowed
nrtPS	Not allowed	Not allowed	Allowed	Allowed
BE	Not allowed	Not allowed	Allowed	Allowed

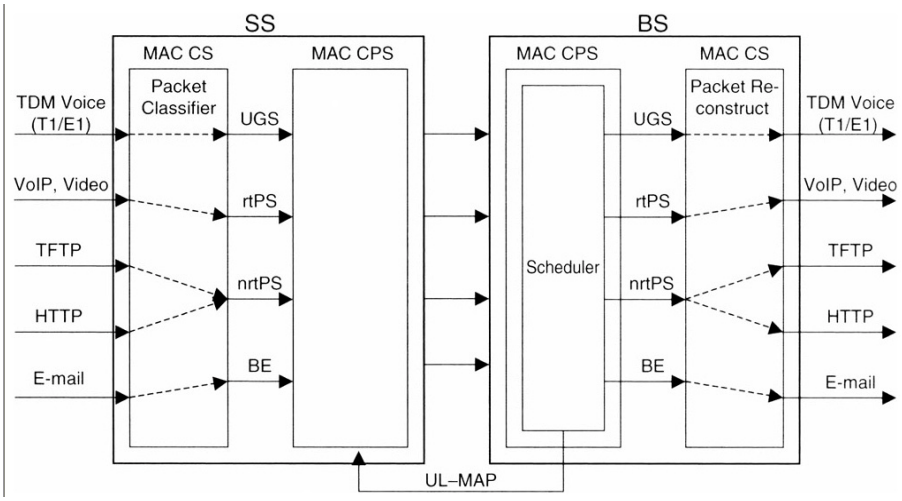
Σχήμα 3-6: Επιλογές χορηγίας (grant) και σταθμοσκόπησης (poll) εύρους ζώνης για κάθε κλάση χρονοπρογραμματισμού

Κάθε σύνδεση στην άνω ζεύξη είναι επιφορτισμένη με τη μεταφορά μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας χρονοπρογραμματισμού από την στιγμή της δημιουργία της (μην ξεχνάμε ότι αναφερόμαστε σε νοητές συνδέσεις). Όταν τα πακέτα ταξινομηθούν από το υποεπίπεδο σύγκλισης CS η σύνδεση μέσα από την οποία μεταφέρονται επιλέγεται βάσει του τύπου των εγγυήσεων QoS που πρέπει να ικανοποιούνται από την εφαρμογή.

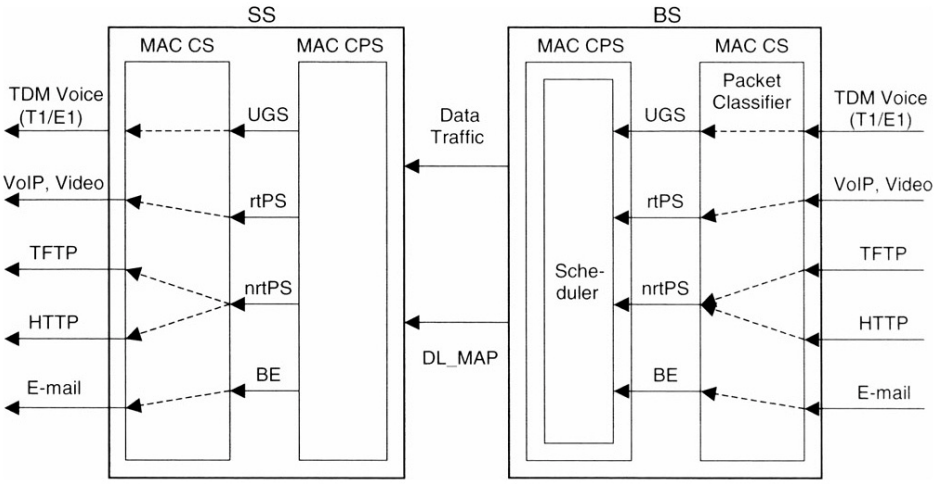
Αν και το πρότυπο αναφέρει εκτενώς τις διαφορετικές κλάσεις QoS, που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς επίσης και τις μεθόδους καταμερισμού του εύρους ζώνης δεν περιγράφει συγκεκριμένο μηχανισμό χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης προκράτησης. Αυτές οι λειτουργίες αφήνονται στον χρονοπρογραμματιστή (scheduler), ο οποίος είναι ένα κομμάτι που κάθε κατασκευαστής συστήματος βασιζόμενο στο 802.16 μπορεί να αναπτύξει κατά βούληση. Στα παρακάτω σχήματα δίνεται δείγμα των αντιστοιχήσεων που μπορεί να υπάρξει μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών και των υπηρεσιών χρονοπρογραμματισμού που μπορούν να υποστηρίξουν επαρκώς αυτές τις εφαρμογές.

QoS Category	Applications	QoS Specifications
UGS Unsolicited Grant Service	VoIP	• Maximum Sustained Rate • Maximum Latency Tolerance • Jitter Tolerance
rtPS Real-Time Polling Service	Streaming Audio or Video	• Minimum Reserved Rate • Maximum Sustained Rate • Maximum Latency Tolerance • Traffic Priority
ErtPS Extended Real-Time Polling Service	Voice with Activity Detection (VoIP)	• Minimum Reserved Rate • Maximum Sustained Rate • Maximum Latency Tolerance • Jitter Tolerance • Traffic Priority
nrtPS Non-Real-Time Polling Service	File Transfer Protocol (FTP)	• Minimum Reserved Rate • Maximum Sustained Rate • Traffic Priority
BE Best-Effort Service	Data Transfer, Web Browsing, etc.	• Maximum Sustained Rate • Traffic Priority

Σχήμα 3-7: Ενδεικτικός πίνακας αντιστοίχησης εφαρμογών σε QoS κλάσεις που μπορούν να ικανοποιήσουν επαρκώς τις προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσίας των



Σχήμα 3-8: Λειτουργία scheduler για την άνω ζεύξη



Σχήμα 3-9: Λειτουργία scheduler για την κάτω ζεύξη

3.6 Ο χρονοπρογραμματιστής και ο κυρίαρχος ρόλος του στην αποδοτικότητα του δικτύου

Το WiMAX προβλέπει τον έλεγχο του δικτύου στο επίπεδο πρόσβασης μέσου από το σταθμό βάσης. Αυτό σημαίνει ότι ο χρονοπρογραμματισμός της μετάδοσης γίνεται από τον BS, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Ο scheduler στο BS είναι επιφορτισμένος να καθορίζει τις περιόδους μετάδοσης κάθε σύνδεσης καθώς επίσης και το τρόπο μετάδοσης των δεδομένων. Η επιλογή της κωδικοποίησης και την διαμόρφωσης που θα εφαρμόσουν οι διάφοροι MS και SS είναι επίσης αρμοδιότητα του scheduler στον BS, ανάλογα με την ποιότητα της εκάστοτε ζεύξης, του φόρτου του δικτύου και της ζήτησης που υπάρχει ανά χρονική περίοδο. Για αυτό το λόγο ο scheduler πρέπει να παρακολουθεί παραμέτρους όπως είναι το CINR και να καθορίζει τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για κάθε σταθμό χωριστά, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν και τις ροές υπηρεσίας που έχουν ανατεθεί σε κάθε επιμέρους σύνδεση. Βασιζόμενος στις αιτήσεις των σταθμών για χρήση της άνω ζεύξης και λαμβάνοντας υπόψιν τις διάφορες QoS παραμέτρους και τις προτεραιότητες που πρέπει να τηρηθούν (βλέπε σχήμα 3-7) αποφασίζει για το καταμερισμό της άνω ζεύξης. Οι αποφάσεις του scheduler αποτυπώνονται, ως πληροφορία, στο UL-MAP μήνυμα που αποστέλλει προς όλους τους σταθμούς. Ο scheduler αποφασίζει επίσης και για την χρήση της κάτω ζεύξης, γνωστοποιώντας τις αποφάσεις του στους σταθμούς SS και MS μέσω του DL-MAP μηνύματος.

Υπάρχει επίσης και χρονοπρογραμματιστής στους σταθμούς SS και MS. Αυτός είναι επιφορτισμένος μόνο με την ταξινόμηση των εισερχόμενων σε αυτόν πακέτα προς μετάδοση στον σταθμό βάσης. Τα πακέτα τα ταξινομεί στις διάφορες ροές υπηρεσίας και τα αποστέλλει μέσω της σύνδεσης ή των συνδέσεων που έχει με κάποιο σταθμό βάσης.

Το πρότυπο δεν καθορίζει συγκεκριμένο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού που πρέπει να χρησιμοποιείται. Οι κατασκευαστές μπορεί να χρησιμοποιήσουν κάποιον από τους ήδη

γνωστούς, όπως είναι ο Round Robin, Weighted Round Robin, Weighted Fair Queuing ή κάποιον καινούριο. Νέοι αλγόριθμοί δοκιμάζονται ερευνητικά, με απώτερο σκοπό της μεγαλύτερη αποδοτικότητα και αξιοποίηση των πόρων καθώς επίσης και την εξυπηρέτηση των διαφόρων απαιτήσεων QoS.

3.7 MAC διευθύνσεις και MAC πλαίσια

MAC address

Το πρότυπο ορίζει ότι κάθε σταθμός χρήστη έχει μια καθολική MAC διεύθυνση των 48 bit. Αυτός ο τύπος διεύθυνσης είναι γνωστός ως "IEEE 802 MAC address". Ορίζει μοναδικά τον σταθμό χρήστη μεταξύ όλων των πιθανών κατασκευαστών και τύπων συσκευών. Χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια του αρχικού ranging για να εγκαθιδρύσει τις κατάλληλες συνδέσεις για ένα σταθμό χρήστη. Είναι επίσης ένα στοιχείο για την πιστοποίηση του SS από τον BS και το αντίστροφο.

Κάθε σταθμός βάσης έχει ένα "Base station ID-BSID", με μέγεθος 48 bit. Αυτή η διεύθυνση-ταυτότητα είναι διαφορετική από την MAC διεύθυνση του BS. Περιλαμβάνει ένα δείκτη των 24 bit που καθορίζει τον πάροχο. Το BSID χρησιμοποιείται, ως εκ τούτου, για αναγνώριση ενός συγκεκριμένου παρόχου. Χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, στο Downlink Channel Descriptor (DCD) μήνυμα διαχείρισης.

MAC header

Το MAC PDU είναι γνωστό και ως πλαίσιο MAC (MAC frame). Κάθε τέτοιο πλαίσιο ξεκινά με μια κεφαλίδα (header) σταθερού μεγέθους. Αυτή η κεφαλίδα μπορεί να ακολουθείται από τον ωφέλιμο φόρτο (payload) του MAC PDU (MPDU). Ένα MPDU μπορεί περιλαμβάνει κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (cyclic redundancy check). Εάν υπάρχει το MPDU, τότε μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- Μηδέν μέχρι πολλαπλές υποκεφαλίδες
- Μηδέν μέχρι πολλαπλές MAC SDU
- Κομμάτι ή κομμάτια από MAC SDU

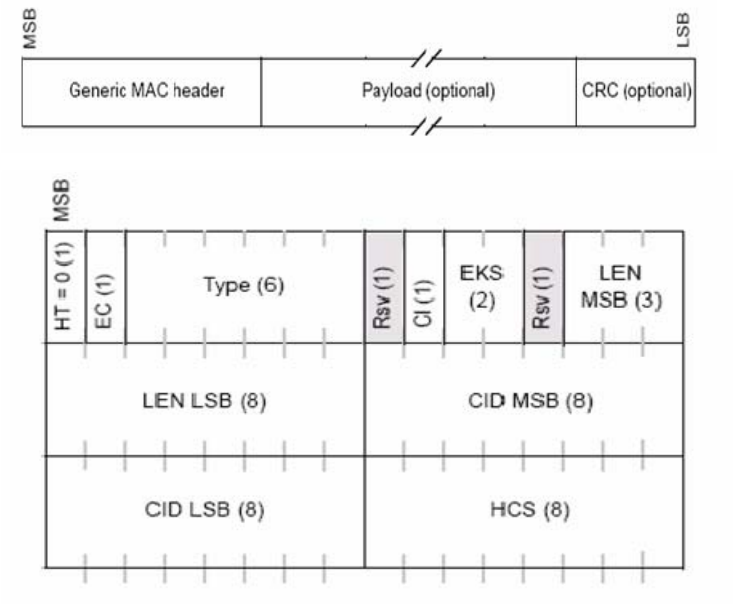
Το ωφέλιμο φορτίο μπορεί να ποικίλει σε μέγεθος. Αυτός είναι και ο λόγος που το μήκος του MAC πλαισίου είναι μεταβλητό. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση επιτρέπει να διοχετεύεται κίνηση διαφόρων τύπων, υψηλότερων επιπέδων, χωρίς να χρειάζεται το MAC επίπεδο να έχει επίγνωση της μορφοποίησης της πληροφορίας που διοχετεύει.

Η μορφοποίηση της κεφαλίδας MAC καθορίζεται στο πρότυπο και μπορεί να είναι δυο ειδών:

- Generic MAC Header-GMH (γενικού τύπου MAC κεφαλίδα). Αυτή είναι η κεφαλίδα του MAC πλαισίου που περιέχει είτε κάποια μηνύματα διαχείρισης MAC

επιπέδου, είτε δεδομένα από το CS επίπεδο. Τα δεδομένα που προέρχονται από το CS επίπεδο μπορεί να είναι είτε μηνύματα διαχείρισης υψηλότερων επιπέδων, είτε δεδομένα προερχόμενα από κάποια εφαρμογή χρήστη. Η συγκεκριμένη κεφαλίδα είναι η μοναδική που χρησιμοποιείται στην κάτω ζεύξη. Παρουσιάζεται παρακάτω, μαζί με τα επιμέρους πεδία που διαθέτει.

- MAC header without payload. Αυτή η κεφαλίδα είναι δίχως ωφέλιμο φορτίο. Έχει μάλιστα δυο υποτύπους, TYPE I και TYPE II. Τα πλαίσια με αυτό το είδος κεφαλίδας δεν ακολουθούνται από CRC. Αν και το μέγεθος της είναι ίδιο με αυτό της GMH τα πεδία διαφέρουν. Εξυπηρετεί ποικίλους σκοπούς όπως αίτηση εύρους ζώνης, αναφορές κατάστασης του PHY, αναφορές ισχύος εκπομπής κλπ.



Σχήμα 3-10: Στο άνω μέρος του σχήματος διακρίνεται το μορφότυπο του MAC πλαισίου. Στο κάτω μέρος διακρίνεται το μορφότυπο του GMH

Name	Length (bits)	Description
HT	1	Header Type. Zero for generic MAC header
EC	1	Encryption Control: 0 = payload is not encrypted; 1 = payload is encrypted. For a MAC header without payload, this bit indicates whether it is Type I or II
Type	6	This field indicates the subheaders and special payload types present in the message payload (see below)
ESF	1	Extended Subheader Field. If ESF = I, the extended subheader is present and follows the generic MAC header immediately (applicable in both the downlink and uplink)
CI	1	CRC Indicator: 1 = CRC is included; 0 = no CRC is included
EKS	1	Encryption Key Sequence. The index of the Traffic Encryption Key (TEK) and initialization vector used to encrypt the payload. Evidently, this field is only meaningful if the EC field is set to one
LEN	11	Length. The length in bytes of the MAC PDU including the MAC header and the CRC, if present
CID	16	Connection IDentifier
HCS	8	Header Check Sequence. An 8-bit field used to detect errors in the header

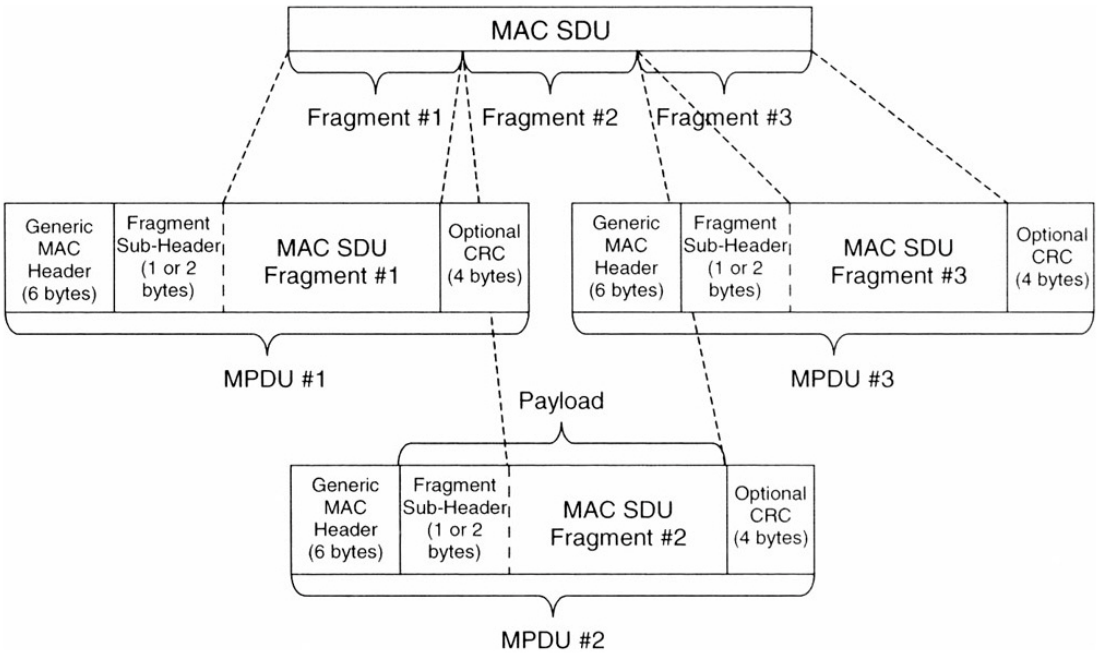
3.8 Τεμαχισμός, Πακετοποίηση, Συναλύσωση (Fragmentation, Packing, Concatenation)

Στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας υπάρχει η τάση να υλοποιείται μηχανισμός που επιτρέπει τον τεμαχισμό ενός MAC SDU σε πολλαπλά MAC PDU (fragmentation) ή αντίστροφα να υλοποιείται μηχανισμός που επιτρέπει την πακετοποίηση πολλαπλών MSDU σε ένα PDU (concatenation). Το κύριο πλεονέκτημα του τεμαχισμού είναι η μικρότερη πιθανότητα απώλειας ενός ολόκληρου MSDU, με αντάλλαγμα το μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας των κεφαλίδων. Η συγκεκριμένη λειτουργία έχει πολύ ευεργετικά αποτελέσματα κυρίως όταν έχουμε μεγάλο λόγο δυφιακών σφαλμάτων (bit error rate-BER) ή μεγάλα SDUs προς μετάδοση. Αντίστροφα η πακετοποίηση σου προσφέρει την δυνατότητα αποστολής πολλών SDU, με μικρό συνολικά επίβαρο κεφαλίδων, αλλά με παράλληλη αύξηση της πιθανότητας απώλειας όλων των πακέτων που αποστέλλονται. Αυτή η λειτουργία έχει ευεργετικά αποτελέσματα κυρίως όταν το κανάλι είναι καλό και παρουσιάζεται μικρό BER. Η συναλύσωση είναι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται εκπομπή πολλών PDU σε μια ριπή.

3.8.1 Τεμαχισμός (Fragmentation)

Τεμαχισμός είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα MAC SDU χωρίζεται σε δυο ή περισσότερα MAC PDUs. Όταν έχουμε μεγάλο λόγο δυφιακών σφαλμάτων η συγκεκριμένη λειτουργία έχει πολύ ευεργετικά αποτελέσματα. Επιτρέπει την αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, λαμβάνοντας υπόψιν τις QoS παραμέτρους της

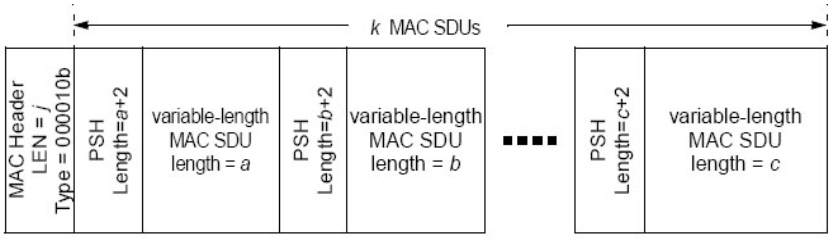
σύνδεσης μιας ροής υπηρεσίας. Η ύπαρξη τεμαχισμού υποδηλώνεται από την τιμή του δεύτερου bit στο πεδίο τύπου (bit field) του GMH. Έχει αρκετά μεγάλη χρησιμότητα όταν αποστέλλονται IP πακέτα, που θεωρούνται σχετικά μεγάλα. Η λειτουργία του τεμαχισμού και της ανακατασκευής είναι υποχρεωτικές βάσει του προτύπου.



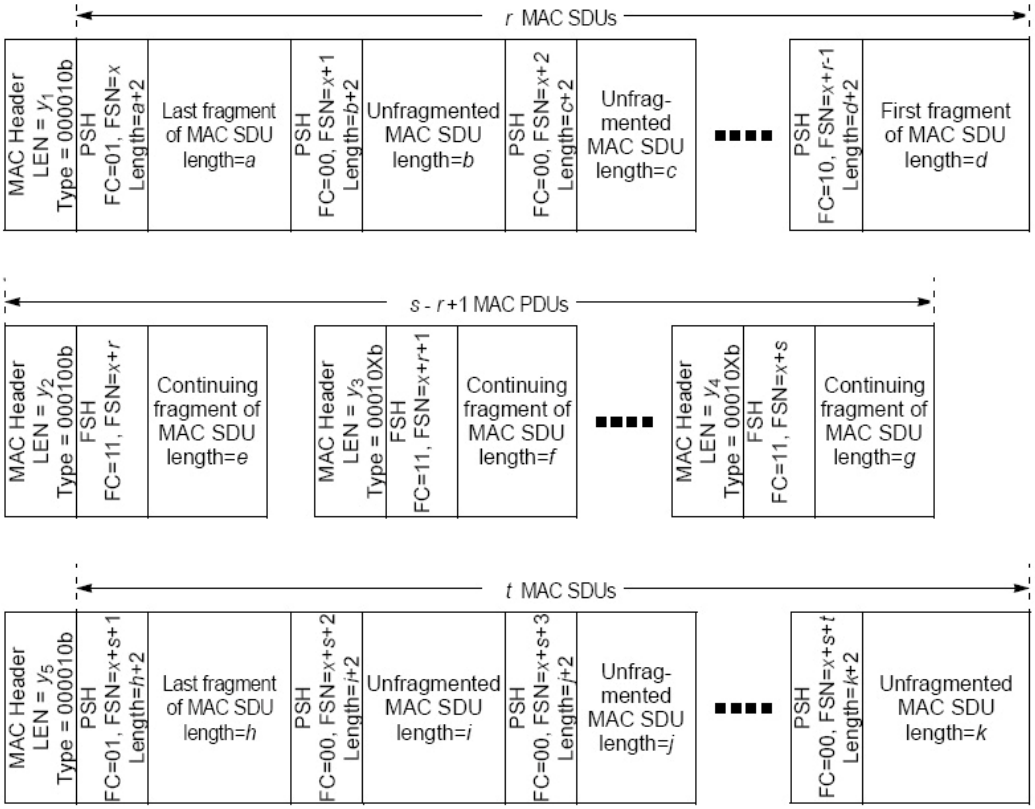
Σχήμα 3-11: Αναπαράσταση του τεμαχισμού ενός MAC SDU σε τρία MAC PDUs (πλαίσια) [Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd]

3.8.2 Πακετοποίηση (Packing)

Όταν η πακετοποίηση είναι ενεργοποιημένη για μια σύνδεση το επίπεδο MAC μπορεί να πακετάρει πολλαπλά MAC SDUs σε ένα μόνο MAC PDU. Όταν το κανάλι έχει χαμηλό BER η συγκεκριμένη λειτουργία επιτρέπει καλύτερη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Η πλευρά που μεταδίδει έχει την επιλογή να πακετοποιεί κατά βούληση. Η ύπαρξη πακετοποίησης γίνεται γνωστή στο δέκτη από την τιμή του πρώτου bit του πεδίου τύπου του GMH. Για μετάδοση σχετικά μικρών πακέτων η λειτουργία αυτή είναι πολύ ευεργετική. Το ωφέλιμο φορτίο του πλαισίου σε αυτή την περίπτωση θα περιέχει πολλές υποκεφαλίδες, που η κάθε μια θα ακολουθείται από το δικό της MAC SDU. Το άθροισμα των υποκεφαλίδων, σε bit, είναι μικρότερο από το άθροισμα, σε bit, των κεφαλίδων που θα χρειάζονταν σε μετάδοση κάθε SDU χωριστά. Σε περίπτωση απώλειας του PDU χάνονται όλα τα SDU που περιέχει και αυτό αποτελεί το αρνητικό σημείο, το οποίο όμως δεν προβληματίζει στην περίπτωση που έχουμε χαμηλό BER.Η πακετοποίηση είναι υποχρεωτική βάσει προτύπου.



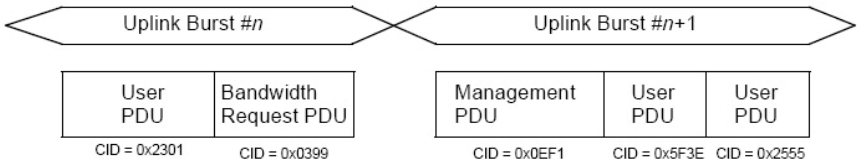
Σχήμα 3-12: Πακετοποίηση πολλαπλών MAC SDUs μεταβλητού μήκους σε ένα MAC PDU



Σχήμα 3-13: Πακετοποίηση σε συνδυασμό με τεμαχισμό
[Copyright IEEE 2004, IEEE]

3.8.3 Συναλύσωση (Concatenation)

Η συναλύσωση είναι η διαδικασία της πολλαπλής αποστολής MAC PDUs σε μια ριπή. Επιτρέπεται στην άνω ζεύξη και την κάτω ζεύξη. Δεδομένου ότι κάθε PDU προσδιορίζεται από ένα συγκεκριμένο CID η MAC οντότητα που λαμβάνει τα MAC PDU μπορεί να προωθήσει το κάθε PDU στο σωστό MAC SAP. Αυτός είναι και ο λόγος που με μια ριπή μπορούν να αποσταλούν σωστά πολλαπλά PDU.



Σχήμα 3-14: Συναλύσωση MAC PDUs που έχουν διαφορετικά CID

3.9 Μηχανισμοί αίτησης και κατανομή εύρους ζώνης

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει όλες οι αποφάσεις που σχετίζονται με την κατανομή του εύρους ζώνης, στην κάτω ζεύξη, στους διάφορους MS γίνεται από το χρονοπρογραμματιστή του σταθμού βάσης, ανά CID, χωρίς την ανάμειξη του MS. Καθώς φτάνουν MAC PDUs για διάφορα CID το χρονοπρογραμματιστής προγραμματίζει την αποστολή τους στους MS, βασιζόμενος στις QoS παραμέτρους που πρέπει να τηρηθούν. Τις αποφάσεις του για το πότε και τι θα γίνει μετάδοση στον εκάστοτε MS τη γνωστοποιεί μέσω του DL-MAP μηνύματος.

Στην άνω ζεύξη θα πρέπει να γίνει αίτηση για παραχώρηση bandwidth, από τους MS προς τον BS, χρησιμοποιώντας αυτόνομο MAC PDU αίτησης εύρους ζώνης (stand-alone bandwidth request MAC PDU) ή χρησιμοποιώντας την δυνατότητα αίτησης επωμισμού (piggybacking) σε ένα generic MAC PDU, με χρήση υποκεφαλίδας (subheader).

Οι αιτήσεις για εύρος ζώνης στην άνω ζεύξη μπορεί να είναι σταδιακές-βηματικές (incremental) ή συγκεντρωτικές (aggregate).Στην περίπτωση βηματικής αίτησης ο BS προσθέτει την ποσότητα του bandwidth που ζητήθηκε στην τρέχουσα ποσότητα εύρους που γνωρίζει ότι χρειάζεται κάποιο συγκεκριμένο CID. Στη περίπτωση συγκεντρωτικής αίτησης ο BS αντικαθιστά την ποσότητα του bandwidth που γνώριζε μέχρι εκείνη τη στιγμή ότι χρειάζεται κάποιο CID με την καινούρια τιμή που έλαβε. Οι αιτήσεις επωμισμού μπορεί να είναι μόνο βηματικές. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί generic MAC PDU για αίτηση το *πεδίο τύπου (type field)* είναι αυτό που καθορίζει για το αν έχουμε αυξητική ή συγκεντρωτική αίτηση bandwidth.

Όταν ένας MS χρησιμοποιεί πολλαπλά CIDs το BS καθορίζει το συνολικό εύρος ζώνης που θα εκχωρηθεί στον συγκεκριμένο MS, χωρίς να αποφασίζει για το ποια CID του συγκεκριμένου MS θα το χρησιμοποιήσουν. Ο χρονοπρογραμματιστής του MS είναι αυτός που θα λάβει την απόφαση πως θα γίνει ο διαμοιρασμός του bandwidth μεταξύ των πολλαπλών CIDs Που έχει, βάσει της κίνησης και των QoS απαιτήσεων που έχει το κάθε CID.

Στο WiMAX η σταθμοσκόπηση αναφέρεται στην διαδικασία που αφιερωμένο, σε ένα σταθμό, ή μοιραζόμενο bandwidth μεταξύ πολλών σταθμών, στην άνω ζεύξη, παρέχεται

στους MS για να κάνουν αίτηση μετάδοσης δεδομένων. Όταν ένα MS σταθμοσκοπείται ατομικά η διαδικασία αναφέρεται ως μονοεκπομπή (unicast) και οι αφιερωμένοι πόροι στην άνω ζεύξη χρησιμοποιούνται για την μετάδοση ενός bandwidth-request PDU. Ο BS καθορίζει στους MS τις ευκαιρίες που έχουν για μονοεκπομπή μέσω του UL-MAP. Από την στιγμή που οι πόροι κατανέμονται ανά MS ο UL-MAP χρησιμοποιεί μόνο το πρωτεύον CID (primary CID) του κάθε MS για την κατανομή του bandwidth. Το πρωτεύον CID ανατίθεται κατα την διάρκεια αρχικοποίησης των παραμέτρων σύνδεσης στο δίκτυο και χρησιμοποιείται για όλα τα μηνύματα σηματοδοσίας του επιπέδου MAC. Τα δευτερεύοντα CID (secondary CIDs) που μπορεί να ζητήσει ένας σταθμός χρησιμοποιούνται για μεταφορά δεδομένων. Οι σταθμοί που έχουν ενεργή την υπηρεσία ανεπίκλητης χορηγίας (UGS) δεν σταθμοσκοπούνται καθώς μπορούν να αποστέλλουν μέσω της υπηρεσίας αυτής τις αιτήσεις τους για bandwidth που θέλουν να χρησιμοποιήσουν σε κάποια άλλη υπηρεσία. Εάν ο MS δεν έχει περαιτέρω απαιτήσεις σε εύρος ζώνης στέλνει ένα κενό MAC PDU κατά την μονοεκπομπή, με το type field να έχει τέτοια τιμή έτσι ώστε να αναγνωρίζει ο BS ότι δεν υπάρχει ανάγκη για παραχώρηση εύρους ζώνης. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ο MS δεν επιτρέπεται να παραμείνει σιωπηλός κατά την διάρκεια μονοεκπομπής.

Εάν το διαθέσιμο bandwidth δεν είναι αρκετό για να γίνει σταθμοσκόπηση του κάθε MS χωριστά, τότε χρησιμοποιείται πολυεκπομπή (multicast) ή ευρυεκπομπή (broadcast), για να γίνει σταθμοσκόπηση πολλών σταθμών μαζί. Με σκοπό να μειωθεί η πιθανότητα σύγκρουσης (collision), μόνο σταθμοί που έχουν ανάγκη για μετάδοση δεδομένων απαντούν κατά την διαδικασία πολυεκπομπής ή ευρυεκπομπής. Το WiMAX χρησιμοποιεί ένα συντομευμένο τύπο του αλγορίθμου δυαδικής εκθετικής υποχώρησης (binary exponential backoff algorithm) κατά την σταθμοσκόπηση με πολυεκπομπή ή ευρυεκπομπή. Όταν ένας σταθμός χρειάζεται να σταθμοσκοπήσει, αρχικά, μπαίνει σε μια διαδικασία επιλογής ενός αριθμού μεταξύ του μηδενός και του παραθύρου υποχώρησης (*backoff window), χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ομοιόμορφης κατανομής για την ψευδοτυχαία αυτή επιλογή.* Αυτός ο τυχαίος αριθμός καθορίζει τον αριθμό των ευκαιριών μετάδοσης (transmission opportunities) που ο MS θα αναμένει πριν στείλει τη δική του αίτηση. Το *backoff window* είναι ο μέγιστος αριθμός των ευκαιριών-θυρίδων που ο MS μπορεί να αναμένει πριν στείλει μια αίτηση σε αναμονή προς τον BS. Εάν δεν λάβει μερίδιο bandwidth μέσα σε ένα χρονικό διάστημα που καθορίζεται από τον *T16 timer,* τότε υποθέτει ότι η αίτηση του έχει χαθεί, λόγω σύγκρουσης της αίτησης του με κάποια αίτηση άλλου σταθμού. Σε αυτή την περίπτωση ο MS διπλασιάζει το backoff window, μέχρι να φτάσει να πάρει τιμή ίση με το *backoff window*. Όταν φτάσει το όριο του *backoff window* η διαδικασία ξεκινά από την αρχή. Εάν δεν εκχωρηθεί bandwidth μετά από ένα μέγιστο όριο προσπαθειών, τότε το MAC PDU

απορρίπτεται. Το μέγιστο όριο προσπαθειών για αίτηση bandwidth είναι ρυθμιζόμενο και μπορεί να προσαρμόζεται είτε από το κατασκευαστή, είτε από τον πάροχο.

3.10 Μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας

Το mobile WiMAX, προκειμένου να υποστηρίξει φορητές συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, διαθέτει χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας τα οποία επιτρέπουν στους φορητούς συνδρομητικούς σταθμούς να λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χωρίς να χρειάζονται επαναφόρτιση. Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με την απενεργοποίηση μερών του MS με ελεγχόμενο τρόπο, όταν αυτό δεν μεταδίδει ή δε λαμβάνει δεδομένα. Το mobile WiMAX καθορίζει τις μεθόδους σηματοδοσίας που επιτρέπουν στο MS, όταν είναι ανενεργός, να εισέρχεται σε κατάσταση *sleep mode (κατάσταση ύπνου)* ή σε κατάσταση *idle mode (κατάσταση ηρεμίας)*. Στην κατάσταση *sleep mode* ο MS απενεργοποιεί αποτελεσματικά τον εαυτό του και καθίσταται μη διαθέσιμος για προκαθορισμένες περιόδους. Οι περίοδοι της ύπνωσης καθορίζονται σε συνεργασία με τον BS στον οποίο είναι συνδεδεμένος ο MS. Το WiMax καθορίζει τρεις κλάσεις εξοικονόμησης ενέργειας, βάσει του τρόπου με τον οποίο εκτελείται η διαδικασία ύπνωσης.

Στην κατάσταση *Power Save Class 1 mode*, το παράθυρο ύπνωσης αυξάνεται, εκθετικά, από μια ελάχιστη τιμή σε μια μέγιστη. Αυτό τυπικά γίνεται όταν το MS χρησιμοποιεί την υπηρεσία άριστης προσπάθειας (best-effort) ή τη μη πραγματικόχρονη υπηρεσία σταθμοσκόπησης (nrtPS).

Η κατάσταση Power Save Class 2 διαθέτει ένα σταθερού μήκους παράθυρο ύπνωσης και χρησιμοποιείται για υπηρεσία ανεπίκλητης χορηγίας (UGS) υπηρεσία.

Η κατάσταση Power Save Class 3 επιτρέπει την ύπαρξη ενός μόνο παραθύρου ύπνωσης (one-time sleep window) και χρησιμοποιείται κυρίως για κίνηση πολυεκπομπής ή κίνηση διαχείρισης, όταν ο MS γνωρίζει πότε αναμένεται η επόμενη μετάδοση.

Εκτός της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας του MS, η κατάσταση sleep mode διατηρεί τα αποθέματα του BS σε ραδιοπόρους. Για την διευκόλυνση της μεταπομπής, κατά τη διάρκεια της κατάστασης *sleep mode*, το MS μπορεί να σαρώσει άλλους σταθμούς βάσης προκειμένου να συλλέξει πληροφορία σχετική με την μεταπομπή.

Η κατάσταση *idle mode* προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και η λειτουργία της είναι προαιρετική από το WiMAX. Η *ıdle mode* επιτρέπει στο MS να απενεργοποιείται πλήρως και να μην εγγράφεται σε κανένα BS, ενώ παράλληλα να λαμβάνει κίνηση πολυεκπομπής κάτω ζεύξης. Όταν η κίνηση κάτω ζεύξης φτάνει τον σταθμό που βρίσκεται σε idle-mode, το MS σελιδοποιείται (paged) από ένα σύνολο σταθμών βάσης, οι οποίοι συγκροτούν μια ομάδα σελιδοποίησης. Το MS, πριν μπει σε idle mode, ανατίθεται από το BS σε μια ομάδα σελιδοποίησης και «ξυπνάει» περιοδικά για να ενημερώσει την

ομάδα σελιδοποίησης (paging group). Η *idle mode* εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια από την *sleep mode*, αφού το MS δεν χρειάζεται να καταχωρηθεί ή να εκτελεί μεταπομπές. Τέλος, η *idle mode* ωφελεί σημαντικά το δίκτυο και το BS, γιατί εξαλείφει την κίνηση μεταπομπής, λόγω των ανενεργών MSs.

3.11 Υποστήριξη κινητικότητας (Mobility Suppor)

Επιπρόσθετα της τυπικής ευρυζωνικής πρόσβασης (fixed WiMAX), το mobile WiMAX προβλέπει τέσσερα σενάρια χρήσης, με δυνατότητα κίνησης των σταθμών του χρήστη.

1. *Nomadic*: Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ένα σταθερό συνδρομητικό σταθμό και να επανασυνδεθεί από διαφορετικό σημείο επαφής.
2. *Portable*: Η νομαδική πρόσβαση παρέχεται σε φορητή συσκευή, όπως η PC card, με δυνατότητα best-effort handover.
3. *Simple mobility*: Ο συνδρομητής μπορεί να κινηθεί με ταχύτητα έως και 60 km/h, με σύντομες διακοπές στην επικοινωνία του (μικρότερες του 1 sec) κατά τη διάρκεια της μεταπομπής.
4. *Full mobility*: Υποστηρίζει κινητικότητα έως 120 km/h και απρόσκοπτο handoff (καθυστέρηση μικρότερη των 50 ms και <1% απώλεια πακέτου).

Είναι πολύ πιθανό ότι τα WiMAX δίκτυα αρχικά θα χρησιμοποιηθούν για fixed και nomadic εφαρμογές και στη συνέχεια θα εξελιχθούν για να υποστηρίζουν φορητότητα.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 καθορίζει ένα πλαίσιο για την υποστήριξη της διαχείρισης της κινητότητας (mobility management). Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο καθορίζει μηχανισμούς σηματοδοσίας για την ανίχνευση των συνδρομητικών σταθμών, όταν αυτοί διαφεύγουν από την ακτίνα κάλυψης του σταθμού βάσης και κατευθύνονται σε έναν άλλον σταθμό ενώ είναι ενεργοποιημένοι, ή κατά την κίνησή τους από μια ομάδα σελιδοποίησης σε μια άλλη ενώ βρίσκονται σε κατάσταση *idle*.

Το πρότυπο ακόμα διαθέτει πρωτόκολλα τα οποία διευκολύνουν το απρόσκοπτο handover, σε συνδέσεις (connections), από έναν σταθμό βάσης σε έναν άλλο. Το WiMAX Forum έχει χρησιμοποιήσει το πλαίσιο που καθορίζεται από το IEEE 802.16e-2005 για την περαιτέρω ανάπτυξη του mobility management, μέσα στα πλαίσια της end-to-end αρχιτεκτονικής δικτύου. Η αρχιτεκτονική υποστηρίζει ακόμα φορητότητα IP επιπέδου (IP-layer mobility) χρησιμοποιώντας κινητή IP (mobile IP).

Τρεις handoff μέθοδοι υποστηρίζονται στην IEEE 802.16e-2005, εκ των οποίων η μία είναι υποχρεωτική, κατά την υλοποίηση των κατασκευαστών και οι άλλες δύο προαιρετικές.

Η υποχρεωτική μέθοδος handoff καλείται hard handover (HHO) και είναι ο μοναδικός τύπος που απαιτείται να υλοποιηθεί αρχικά από το mobile WiMAX. Η HHO προϋποθέτει μια απότομη μεταφορά σύνδεσης από το ένα BS σε ένα άλλο.

Οι αποφάσεις για το handoff λαμβάνονται από τα BS, MS ή κάποια άλλη οντότητα, και βασίζονται στα αποτελέσματα μετρήσεων που αναγγέλλονται από το MS. Ο τελευταίος εκτελεί περιοδικά μια σάρωση του ραδιοφάσματος (radio frequency –RF), και μετράει την ποιότητα του σήματος των γειτονικών σταθμών βάσης. Η σάρωση εκτελείται στα διαστήματα σάρωσης (*scanning intervals*)που προσδιορίζονται από το BS. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαστημάτων, το MS μπορεί προαιρετικά να εκτελέσει *initial ranging*, καθώς και να συσχετιστεί με έναν ή περισσότερους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Όταν η απόφαση για το handover ληφθεί, ο MS ξεκινά τον συγχρονισμό του με την μετάδοση της κάτω ζεύξης (downlink transmission) του BS στόχου. Στη συνέχεια εκτελεί το ranging, σε περίπτωση που αυτό δεν έχει εκτελεστεί κατά τη διάρκεια της σάρωσης, και τερματίζει τη σύνδεση με το προηγούμενο BS.

Οποιαδήποτε MPDUs (που βρίσκονται) στο BS συγκρατούνται, μέχρις ότου να λήξει ένα χρονόμετρο. Οι δύο προαιρετικές μέθοδοι handoff που υποστηρίζονται από το IEEE 802.16e-2005, είναι η *fast base station switching (FBSS)* και *macro diversity handover (MDHO)*. Σε αυτές τις δύο μεθόδους, ο MS διατηρεί μια έγκυρη σύνδεση, σε περισσότερα από ένα BS, ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, στην FBSS περίπτωση, το MS διατηρεί μια λίστα από τους εμπλεκόμενους BS, η οποία καλείται *active set*. Το MS παρακολουθεί διαρκώς τη λίστα *active set*, εκτελεί το *ranging*, και διατηρεί μια έγκυρη σύνδεση ID με κάθε εμπλεκόμενο BS. Το MS, ωστόσο, επικοινωνεί με ένα μόνο MS, το οποίο καλείται *anchor BS*. Όταν είναι αναγκαία η αλλαγή του *anchor BS*, τότε η σύνδεση μεταβαίνει από τον ένα σταθμό βάσης σε άλλον χωρίς να πρέπει να εκτελεστεί η διαδικασία του handoff. Ο MS απλώς αναφέρει το επιλεγμένο anchor BS στο CQICH. Η macro diversity handover είναι παρόμοια με την FBSS, με εξαίρεση το γεγονός ότι το MS επικοινωνεί κατά το downlink και το uplink με όλους τους σταθμούς βάσης της λίστας active set – η οποία σε αυτή την περίπτωση καλείται diversity set – ταυτόχρονα. Κατά το downlink, τα πολλαπλά αντίγραφα που λαμβάνει το MS συγκρίνονται με βάση τις ευρέως γνωστές τεχνικές διαφορισμού (diversity-combining). Κατά το uplink, όπου το MS αποστέλλει τα δεδομένα σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης, εκτελείται η επιλογή diversity προκειμένου να επιλεχθεί η καλύτερη uplink ζεύξη. Τόσο η FBSS όσο και η MDHO μέθοδος προσφέρουν υψηλότερη απόδοση σε σχέση με την HHO μέθοδο, ωστόσο προϋποθέτουν/απαιτούν ότι οι σταθμοί βάσης πρέπει να συγχρονίζονται μεταξύ τους, να χρησιμοποιούν τους ίδιους φορείς συχνότητας, και να μοιράζονται τις πληροφορίες που υπάρχουν, σε επίπεδο δικτύου, σχετικά με τις οντότητες.

Στα δίκτυα WiMAX δεν υποστηρίζονται πλήρως οι FBHH και MDHO μέθοδοι και στις προδιαγραφές δικτύου του *WiMAX Forum Release 1* δεν προβλέπεται υποστήριξη για αυτά.

3.12 Λειτουργίες ασφαλείας (Security Functions)

Σε αντίθεση με το Wi-Fi, τα WiMAX συστήματα έχουν σχεδιαστεί εξαρχής έχοντας ως κριτήριο την παροχή άριστης ασφάλειας. Το πρότυπο περιλαμβάνει μεθόδους τελευταίας τεχνολογίας οι οποίες εξασφαλίζουν στο χρήστη την ασφάλεια προσωπικών δεδομένων, ενώ αποτρέπουν την μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Ακόμη, το πρότυπο διαθέτει επιπρόσθετη βελτιστοποίηση σε πρωτόκολλα που αφορούν την κινητικότητα. Η ασφάλεια ανατίθεται στο υπόστρωμα ασφαλείας του MAC επιπέδου που είναι υπεύθυνο για τη μυστικότητα (privacy).

Τα σημεία κλειδιά σχετικά με την ασφάλεια που προσφέρει το WiMAX είναι τα εξής:

1. Support for privacy (υποστήριξη μυστικότητας):

Τα δεδομένα του χρήστη κωδικοποιούνται με τη χρήση κρυπτογραφικών σχεδίων αποδεδειγμένης ασφάλειας, τα οποία παρέχουν μυστικότητα. Υποστηρίζονται τόσο το *AES* πρότυπο *(Advanced Encryption Standard)* όσο και το *3DES* πρότυπο (Triple Data Encryption Standard). Οι περισσότερες υλοποιήσεις συστημάτων χρησιμοποιούν το *AES*, διότι είναι το νέο πρότυπο κωδικοποίησης , το οποίο εγκρίθηκε λόγω συμβατότητας με το πρότυπο *Federal Information Processing Standard (FIPS)*, αλλά και γιατί είναι ευκολότερα υλοποιήσιμο. Το κλειδί των 128 ή 256 bit το οποίο χρησιμοποιείται για την επανάκτηση του κώδικα, παράγεται κατά τη διάρκεια της φάσης πιστοποίησης/επαλήθευσης, και ανανεώνεται περιοδικά για επιπρόσθετη προστασία.

2. Device/user authentication (επαλήθευση συσκευής/χρήστη):

Το WiMAX παρέχει έναν ευέλικτο τρόπο για την επαλήθευση συνδρομητικών σταθμών και χρηστών προκειμένου να αποτρέπει την μη εξουσιοδοτημένη χρήση. Το πλαίσιο επαλήθευσης βασίζεται στο *Internet Engineering Task Force (IETF) EAP*, το οποίο υποστηρίζει ποικιλία πιστοποιητικών, όπως username/password, ψηφιακά πιστοποιητικά, και έξυπνες κάρτες. Οι WiMAX τερματικές συσκευές συνοδεύονται από built-in *X.509* ψηφιακά πιστοποιητικά τα οποία περιλαμβάνουν τα δημόσια κλειδιά τους (public key) και την MAC διεύθυνση. Οι χρήστες WiMAX έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τις βεβαιώσεις (certificates) για επαλήθευση συσκευής, ενώ για την επαλήθευση χρήστη μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πιστοποιητικά username/password ή το πιστοποιητικό έξυπνης κάρτας πάνω από αυτό.

3. Flexible key management protocol:

Το πρωτόκολλο *Privacy and Key Management Protocol Version 2 (PKMv2)* χρησιμοποιείται για την ασφαλή μεταφορά των κλειδιών, από το σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό, ενώ παράλληλα επανεξουσιοδοτεί και ανανεώνει περιοδικά τα κλειδιά. Το *PKM* είναι ένα πρωτόκολλο πελάτη-εξυπηρετητή client-server: Ο MS συμπεριφέρεται ως πελάτης και ο BS ως εξυπηρετητής. Το *PKM* χρησιμοποιεί X.509 ψηφιακά πιστοποιητικά (certificates) και *RSA (Rivest-Shamer-Adleman)* αλγορίθμους κωδικοποίησης για το δημόσιο κλειδί (public-key), ώστε να μπορεί να εκτελεί ασφαλώς ανταλλαγές κλειδιού μεταξύ των BS και MS.

4. Protection of control messages (Προστασία μηνυμάτων ελέγχου):

Η ακεραιότητα των μηνυμάτων ελέγχου που μεταφέρονται μέσω του αέρα, προστατεύεται χρησιμοποιώντας message digest σχέδια, όπως τα *AES-based CMAC* ή τα *MD5-based HMAC.11*.

5. Protection of fast handover (Υποστήριξη για γρήγορο handover):

Για το σκοπό αυτό, το WiMAX επιτρέπει στο MS τη χρήση προ-πιστοποίησης (εκ των προτέρων επαλήθευση) με το BS, προκειμένου να διευκολύνει την πιο γρήγορη επανείσοδο του MS στον έλεγχο ενός συγκεκριμένου BS. Για τη βελτιστοποίηση των μηχανισμών της προ-πιστοποίησης, το WiMAX υποστηρίζει ένα σχέδιο χειραψίας τριών κατευθύνσεων (three-way handshake), ενώ παράλληλα αποτρέπει/αποκλείει οποιαδήποτε ανθρώπινη παρέμβαση/επίθεση (man-in-the-middle).

3.13 Υπηρεσίες πολυεκπομπής και ευρυεκπομπής (Multicast και Broadcast Services)

Το mobile WiMAX MAC επίπεδο υποστηρίζει multicast και broadcast υπηρεσίες (MBS). Ειδικότερα, υποστηρίζει MBS related λειτουργίες, ενώ τα χαρακτηριστικά που υποστηρίζει το πρότυπο έχουν ως εξής:

- Μηχανισμοί σηματοδοσίας για το MS για αίτηση και εγκατάσταση των MSB.
- Πρόσβαση του συνδρομητικού σταθμού στο MSB μέσω ενός ή πολλαπλών BS, ανάλογα με τις δυνατότητες και την επιθυμία του.
- MBS QoS και κρυπτογράφηση, με χρήση ενός γενικού ορισμένου κλειδιού κρυπτογράφησης κίνησης (globally defined traffic encryption key).

- Μια ξεχωριστή ζώνη μέσα στο πλαίσιο του MAC επιπέδου, η οποία διαθέτει τη δική της πληροφορία MAP για τον έλεγχο της κίνησης MBS.
- Μέθοδοι για παράδοση της MBS κίνησης σε σταθμούς συνδρομητών που βρίσκονται σε idle-mode.
- Υποστήριξη macro diversity, για τη βελτίωση της απόδοσης της MBS κίνησης, κατά την διαδικασία παράδοσης.

3.14 Περίληψη και Συμπεράσματα

- Το επίπεδο πρόσβασης μέσου του WiMAX σχεδιάσθηκε από την αρχή με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει μια ευέλικτη και ισχυρή αρχιτεκτονική, ικανή να ανταπεξέλθει στις ανάγκες ποικίλων υπηρεσιών και εφαρμογών χρήστη, με διαφορετικές ανάγκες ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Το WiMAX ορίζει πέντε διαφορετικές ροές πληροφορίας, που το σύστημα χειρίζεται και χρονοπρογραμματίζει διαφορετικά, ανάλογα με τις διαφορετικές ανάγκες ποιότητας υπηρεσίας που υπάρχουν.
- Το mobile WiMAX έχει διάφορα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την αποδοτική λειτουργία κινητών συνδρομητικών συσκευών στο δίκτυο του. Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ότι οι σταθμοί μπορούν να μπαίνουν σε κατάσταση ύπνωσης ή ηρεμίας για να εξοικονομούν ενέργεια, όταν δεν είναι αναγκαία η μετάδοση δεδομένων. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι προβλέπεται και προδιαγράφεται μηχανισμός μεταπομπής των συνδρομητικών συσκευών από σταθμό βάσης σε άλλο σταθμό βάσης, με απώτερο στόχο την απρόσκοπτη επικοινωνία των χρηστών με το δίκτυο.

Τέλος, ο σχεδιασμός του MAC επιπέδου περιλαμβάνει υπόστρωμα ασφαλείας που αναλαμβάνει όλες εκείνες τις ενέργειες που απαιτούνται, όπως πιστοποίηση συσκευής και χρήστη καθώς και κρυπτογράφηση δεδομένων για την προστασία των χρηστών, αλλά και της λειτουργίας του δικτύου από κακόβουλους χρήστες.

3.15 Βιβλιογραφία

[1] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, Fundamentals of WiMAX-Understanding Broadband Wireless Networking, Copyright © 2007 Pearson Education, Inc.

[2] Loutfi Nuaymi, WiMAX-Technology for Broadband Wireless Access, Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd.

[3] Shyam Parekh, 802.16/WiMAX, EECS 228a, Spring 2006

[4] WayMAX-*draft*, Information and Communication Networks. Copyright © 2006 Siemens SMC

[5] 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

[6] WiMAX Forum, Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, August 2006

[7]www.moto-teleterm.gr

4. Αξιολόγηση του MAC επιπέδου του 802.16 με τη χρήση του εξομοιωτή Opnet modeller

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 3 έγινε αναφορά στους μηχανισμούς τεμαχισμού, συναλύσωσης και πακετοποίησης. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί που περιγράφονται και υλοποιούνται στο πρωτόκολλο 802.16 μπορούν να προσφέρουν βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας και η σωστή τους υλοποίηση από τους κατασκευαστές επικοινωνιακών συστημάτων είναι καθοριστικής σημασίας στην συνολική απόδοση, όπως φαίνεται στην πειραματική αξιολόγηση που ακολουθεί. Ο μηχανισμός σταθμοσκόπησης, που έχει επίσης περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι αντικείμενο πειραματικής μελέτης. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση μιας ευρετικής μεθόδου-στρατηγικής (heuristic strategy) για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων (call admission control-CAC).

4.2 Εξομοιωτής Opnet modeler και χαρακτηριστικά του δομοστοιχείου (module) που χρησιμοποιήθηκε στις εξομοιώσεις

Ο εξομοιωτής δικτύων (network simulator) που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική μελέτη των QoS παραμέτρων είναι ο OPNET Modeler® (“Modeler”). Ο εξομοιωτής OPNET Modeler® είναι μια εκ των δυο κορυφαίων λύσεων, μαζί με τον εξομοιωτή NS-2, για την μοντελοποίηση και την εξομοίωση δικτύων. Χρησιμοποιείται ευρέως από την ακαδημαϊκή κοινότητα, αλλά και από κατασκευαστές και παρόχους τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και υπηρεσιών αντίστοιχα. Χρησιμοποιεί μια ισχυρή μηχανή πεπερασμένων στοιχείων (finite state machine-FSM) για να εξομοιώσει με πληρότητα και ακρίβεια την λειτουργία πρωτοκόλλων, πηγών, εφαρμογών, αλγορίθμων και ουρών. Ο κώδικας που «κρύβεται» πίσω από το γραφικό περιβάλλον του εξομοιωτή είναι γραμμένος στις γλώσσες προγραμματισμού C και C++.

Ο OPNET Modeler® (“Modeler”) εξομοιώνει τα διάφορα πρωτόκολλα χρησιμοποιώντας πολλαπλά module. Το κάθε module αποτελεί ένα πρωτόκολλο. Το διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας το WiMAX module δεν ήταν ακόμη διαθέσιμο, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη των διαφόρων παραμέτρων το δομοστοιχείο του πρωτοκόλλου DOCSIS. Η επιλογή αυτή έγινε για το λόγο ότι το DOCSIS περιλαμβάνει τους ίδιους μηχανισμούς τεμαχισμού, συναλύσωσης και πακετοποίησης, καθώς και τον ίδιο μηχανισμό σταθμοσκόπησης. Επίσης έχει τις ίδιες ροές πληροφορίας, με ίδια φιλοσοφία λειτουργίας. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το επίπεδο πρόσβασης μέσου του WiMAX έχει

υιοθετήσει τα χαρακτηριστικά του DOCSIS, όσον αφορά λειτουργίες που σχετίζονται με μηχανισμούς QoS στο επίπεδο MAC.

Στις επόμενες υποπαραγράφους παρουσιάζονται μερικώς κάποιες παράμετροι που μπορούν να ορισθούν στο δομοστοιχείο του εξομοιωτή. Λόγω εξαιρετικής πολυπλοκότητας στον τρόπο εξομοίωσης καθώς επίσης και στο εξαιρετικά μεγάλο πλήθος παραμέτρων δεν είναι δυνατή η αναλυτική παρουσίαση τους. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για τη μοντελοποίηση ενός σταθμού βάσεως (CMTS) ο OPNET Modeler® περιλαμβάνει 50000 γραμμές κώδικα.

4.2.1 Χαρακτηριστικά που ενσωματώνει το δομοστοιχείο DOCSIS

Το δομοστοιχείο DOCSIS του Opnet ενσωματώνει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Feature	Description
Service Types	• Unsolicited Grant (UGS) • Real-Time Polling (rtps) • Non-Real-Time Polling (nrtps) • Best Effort (BE)
QoS	The model supports the following DOCSIS 1.1 QoS features: • Fragmentation • Concatenation •Contention • Piggyback • Payload Header Suppression (PHS)
RF Specification	The following Radio Frequency (RF) specifications are configurable for upstream and downstream channels: • Modulation • Channel width •Data rate • Central frequency
Multiple channel support	The model supports multiple channels in the upstream and downstream direction.
Device creator support	You can use the Device Creator feature to create new DOCSIS node models.

Σχήμα 4-1: Βασικά χαρακτηριστικά που ενσωματώνει το δομοστοιχείο DOCSIS του Opnet

4.2.2 Μοντέλα κόμβων του δομοστοιχείου DOCSIS του Opnet

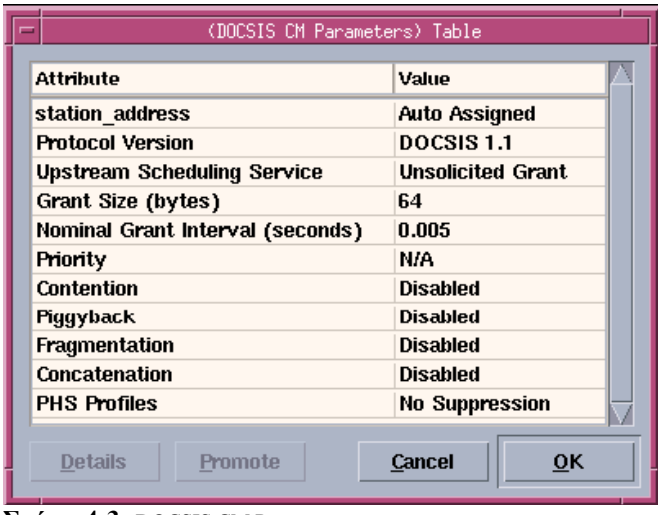
Οι κόμβοι πρόσβασης που χρησιμοποιούνται για να λαμβάνουν και να στέλνουν κίνηση, η οποία δημιουργείται από οποιαδήποτε εφαρμογή δικτύου (φωνή, video, τηλεδιάσκεψη, HTTP) παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

node	**To model**
docsis_ethernet_cable_modem	a cable modem connected to an ethernet port
docsis_cm_wkstn	a combined Ethernet workstation and cable modem
docsis_cm_server	a combined Ethernet server and cable modem

Σχήμα 4-2: Σχηματική αναπαράσταση των κόμβων που χρησιμοποιούνται στο δομοστοιχείο DOCSIS για την λήψη και αποστολή κίνησης

Οι κόμβοι αυτοί έχουν τις παρακάτω παραμέτρους, οι οποίες ρυθμίζονται από το πλαίσιο επιλογών:

- station_address
- Protocol Version
- Upstream Scheduling Service
- Service type
- Grant Size
- Nominal Grant Interval
- Priority
- Contention
- Piggyback
- Fragmentation
- Concatenation
- PHS Profile



Σχήμα 4-3: DOCSIS CM Parameters

4.2.3 DOCSIS Configuration Object

Σε αυτή την οντότητα-αντικείμενο μπορεί να ορισθούν καθολικές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία όλου του δικτύου. Μπορούμε να παραμετροποιήσουμε τον UL_MAP, την διαμόρφωση, το επίβαρο φυσικού επιπέδου και άλλα που αναφέρονται μερικώς παρακάτω, όπως ορίζονται μέσα στο δομοστοιχείο:

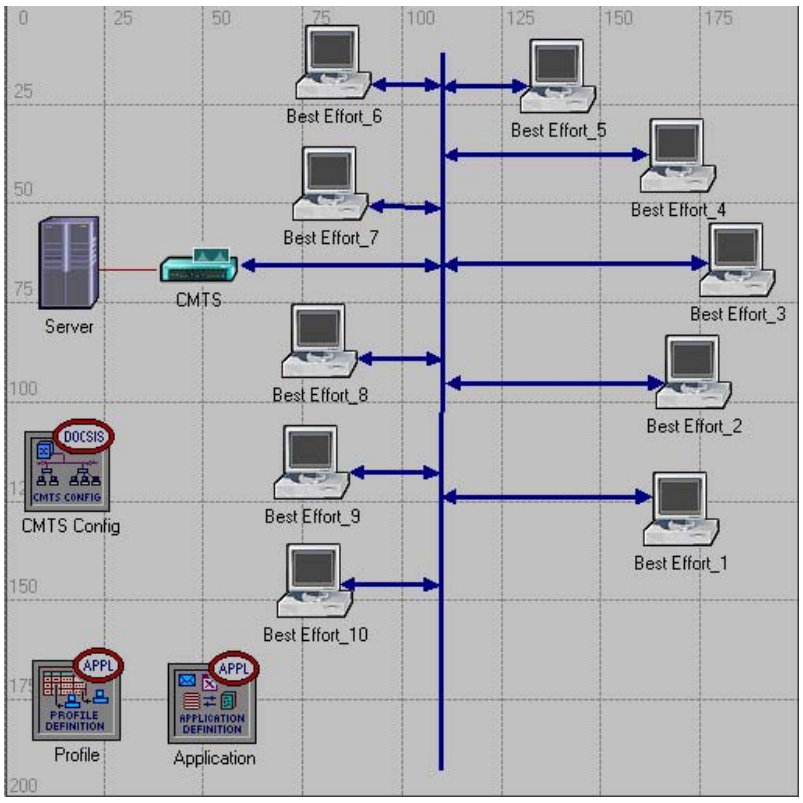
- Modulation (η διαμόρφωση έχει αλληλεξάρτηση με τις 2 παρακάτω παραμέτρους)
- Data Rate
- Channel Width
- Center Frequency
- Interleave Latency
- MAP Profiles
    1. Time covered by MAP
    2. Request/Data IE
    3. Short Grant IE
    4. Long Grant IE
    5. Initial Maintenance IE
    6. Station Maintenance IE
- Modulation Profiles
    1. Request Frames Overhead
    2. Request/Data Frames Overhead
    3. Short Data Frames Overhead
    4. Long Data Frames Overhead

- PHS Profiles
- Upstream Physical Parameters

4.3 Η επίδραση του παραθύρου υποχώρησης στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης

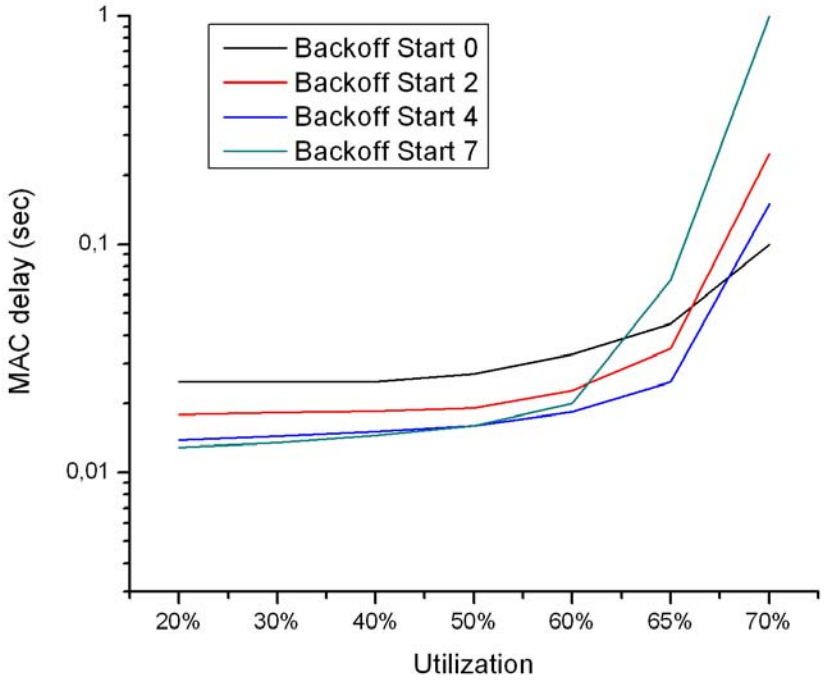
Η επίδραση του παραθύρου υποχώρησης στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης, μελετήθηκε με την χρήση ενός μοντέλου που περιελάμβανε ένα κεντρικό εξυπηρετητή (server), ένα σύστημα τερματισμού καλωδιακού διαποδιαμορφωτή (cable modem termination system-CMTS) και 10 συνδρομητικών σταθμών. Το CMTS αντιστοιχεί με το BS στο WiMAX, με τη διαφορά ότι συνδέεται καλωδιακά και όχι ασύρματα με τους σταθμούς συνδρομητών. Η γραφική απεικόνιση του μοντέλου φαίνεται παρακάτω.

Στο συγκεκριμένο σενάριο ο διαφιξιακός χρόνος των πακέτων (packet interarrival time) και το μέγεθος αυτών επιλέχθηκε να έχουν εκθετική κατανομή. Η επιλογή αυτή έγινε για να έχουμε καλή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών άφιξης της κίνησης. Η κάτω ζεύξη είχε χωρητικότητα 50 Mbps.



Σχήμα 4-4: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της επίδρασης του παραθύρου υποχώρησης στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης

Το μέγεθος του παραθύρου υποχώρησης ήταν σταθερό σε όλες τις εξομοιώσεις που έγιναν. Ο τύπος της κίνησης που δημιουργούσαν οι σταθμοί ήταν επίσης του ίδιου τύπου. Αυτό που άλλαζε και αποτέλεσε ουσιαστικά την ανεξάρτητη μεταβλητή μας στο πείραμα μας ήταν το φορτίο. Επισημαίνουμε ότι το φορτίο ήταν ισοκατανεμημένο στατιστικά. Όλοι οι σταθμοί δηλαδή παρήγαγαν, κατά μέσο όρο την ίδια κίνηση. Αυτή η σειρά εξομοιώσεων επαναλήφθηκε τέσσερις φορές. Κάθε φορά γινόταν επιλογή διαφορετικής τιμής έναρξης στο παράθυρο υποχώρησης και έτσι λάβαμε 4 διαφορετικές οικογένειες σημείων στο διάγραμμα που ακολουθεί (η καθυστέρηση είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχήμα 4-5: Γραφική παράσταση της καθυστέρησης συναρτήσει του φορτίου για 4 διαφορετικές τιμές της τιμής έναρξης στον αλγόριθμο υποχώρησης

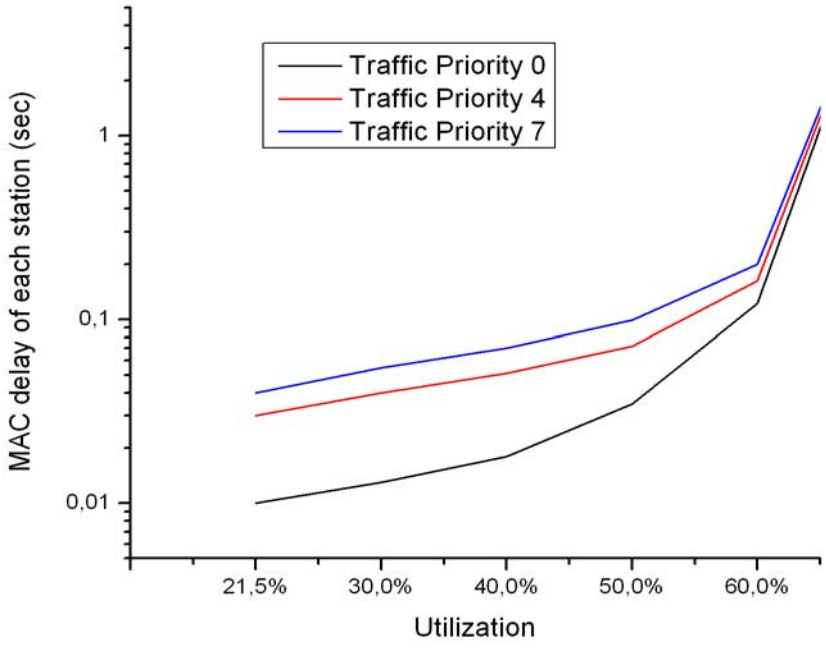
Από τη γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για χαμηλές τιμές φορτίου η καθυστέρηση στο επίπεδο MAC είναι πιο μικρή όταν η τιμή backoff start είναι μεγάλη. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε το εξής: Η λειτουργία αίτησης επωμισμού ήταν ενεργοποιημένη σε αυτό το πείραμα. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσε να γίνει αίτηση για αποστολή πακέτων μέσω της αίτηση επωμισμού, χωρίς να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία ανταγωνισμού (contention). Έτσι λοιπόν σε χαμηλά φορτία που δεν υπήρχε δυνατότητα για πολλές αιτήσεις επωμισμού αναγκαστικά οι σταθμοί κατέφευγαν στην διαδικασία άριστης προσπάθειας με την χρήση του exponential backoff algorithm. Έτσι λοιπόν όταν είχαμε μεγαλύτερο backoff start time αποφεύγονταν οι πολλές συγκρούσεις, με αποτέλεσμα να μην γίνονται συγκρούσεις και άρα να μην αυξάνεται ο χρόνος μέχρι την αποστολή των δεδομένων. Αντίθετα με μικρό backoff start time οι αιτήσεις που έπρεπε να

γίνουν σε χαμηλά φορτία ήταν περισσότερες και οι σταθμοί δεν ήταν υπομονετικοί, με αποτέλεσμα να γίνονται πολλές συγκρούσεις και οι καθυστερήσεις να αυξάνουν. Βλέπουμε ότι σε μεγαλύτερες τιμές φορτίου η καθυστέρηση για μικρό backoff start time είναι μικρότερη για το λόγο ότι υπάρχουν πολλά πακέτα δεδομένων που αποστέλλονται και άρα πολλές ευκαιρίες για αιτήσεις επωμισμού. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί αποστέλλουν λίγες αιτήσεις με την χρήση της άριστης προσπάθειας και άρα υπάρχουν πολύ λιγότερες συγκρούσεις κατά την διεκδίκηση που συντελείται μεταξύ των σταθμών. Συγχρόνως οι σταθμοί δεν περιμένουν πολύ μέχρι να δοκιμάσουν την επόμενη αίτησή τους όταν έχουν μικρό backoff start time.

Γενικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο μεγαλύτερα φορτία έχουμε και για σταθερό backoff start time η τιμή της καθυστέρησης αυξάνει.

4.4 Η επίδραση των προτεραιοτήτων στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είχαμε δει ότι σε περίπτωση που δυο ή περισσότερες service flow έχουν όλες τις υπόλοιπες QoS παραμέτρους τους ίδιες, τότε ανάλογα με την προτεραιότητα της εκάστοτε service flow, καθορίζεται το ποια ροή θα υποστεί την μεγαλύτερη καθυστέρηση. Το επόμενο πείραμα δείχνει τα αποτελέσματα μιας τέτοιας επιβολής προτεραιότητας στις διάφορες ροές υπηρεσίας. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό και του προηγούμενου πειράματος. Όλοι οι σταθμοί ανεξαιρέτως είχαν τις ίδιες παραμέτρους, με μόνη διαφοροποίηση την προτεραιότητα των ροών υπηρεσίας που είχε η κάθε μια. Κάθε σταθμός δηλαδή είχε και διαφορετική τιμή προτεραιότητας στην ροή πληροφορίας του. Η ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν ο συνολικός φόρτος. Επισημαίνουμε ότι το φορτίο ήταν ισοκατανεμημένο στατιστικά. Όλοι οι σταθμοί δηλαδή παρήγαγαν, κατά μέσο όρο την ίδια κίνηση. Στο διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης για τρεις διαφορετικούς σταθμούς που είχαν διαφορετικές προτεραιότητες. Ο σταθμός «0» είχε την υψηλότερη προτεραιότητα και ο σταθμός «7» είχε την χαμηλότερη προτεραιότητα. Η κλίμακα του χρόνου καθυστέρησης είναι λογαριθμική στο σχήμα που ακολουθεί.



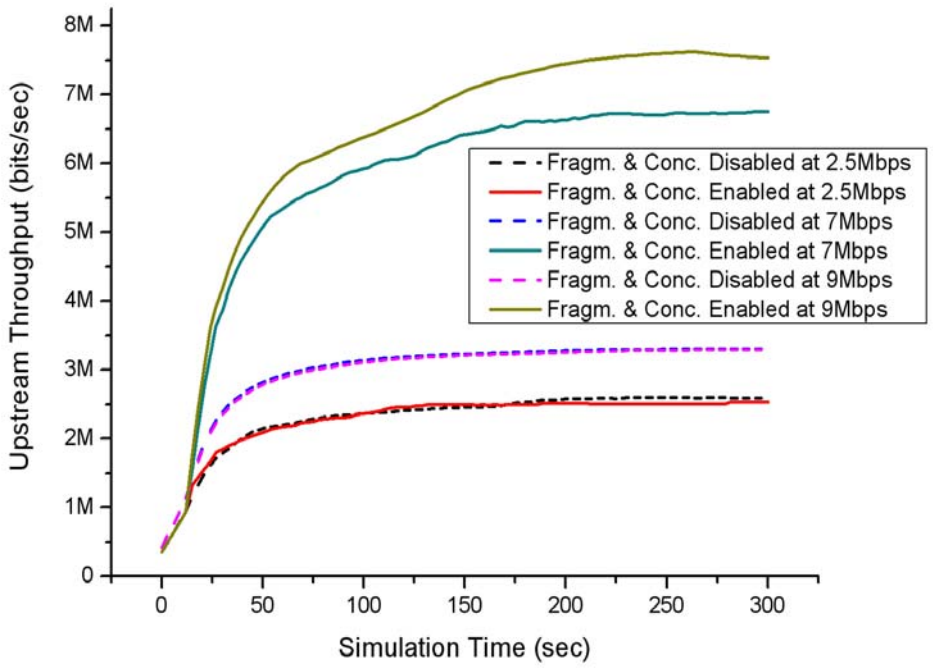
Σχήμα 4-6: Γραφική παράσταση της καθυστέρησης συναρτήσει του φορτίου για τρεις σταθμούς με διαφορετική προτεραιότητα ο καθένας

Παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές φορτίου η προτεραιότητα στις διαφορετικές ροές πληροφορίας έχει καθοριστικό ρόλο στην καθυστέρηση που υπόκεινται τα δεδομένα του εκάστοτε σταθμού κατά την μεταφορά τους. Όσο αυξάνει το φορτίο παρατηρούμε ότι αυξάνει η καθυστέρηση, αλλά και πάλι στις ροές με μικρότερη προτεραιότητα, για ένα δεδομένο φορτίο, η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη. **Οι προτεραιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για την παροχή διαφορετικών συμφωνιών στάθμης (παρεχομένης) υπηρεσίας (Service level agreement-SLA)**

4.5 Η επίδραση του τεμαχισμού και της συναλύσωσης στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης

Η επίδραση του τεμαχισμού (fragmentation) και της συναλύσωσης (concatenation) στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης, μελετήθηκε με την χρήση ενός μοντέλου που περιελάμβανε ένα κεντρικό εξυπηρετητή (server), ένα σύστημα τερματισμού καλωδιακού διαποδιαμορφωτή (cable modem termination system-CMTS) και πέντε συνολικά συνδρομητικούς σταθμούς. Οι ροές υπηρεσίας που είχαν οι τέσσερις από τους πέντε σταθμούς ήταν τύπου *best effort*. Υπήρχε και ένας σταθμός ο οποίος είχε ροή υπηρεσίας

UGS.Ο σταθμός με τη ροή *UGS* παρήγαγε κίνηση που αντιστοιχούσε με το 15% της συνολικής διεκπεραιωτικότητας της άνω ζεύξης. Με τη χρήση συνδυασμού διαφορετικών ροών υπηρεσίας η εξομοίωσή μας προσέγγιζε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο. Στο συγκεκριμένο σενάριο ο διαφιξιακός χρόνος των πακέτων (packet interarrival time) και το μέγεθος αυτών επιλέχθηκε να έχουν εκθετική κατανομή για τους σταθμούς με *best effort* ροή υπηρεσίας. Η επιλογή αυτή έγινε για να έχουμε καλή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών άφιξης της κίνησης. Ο σταθμός με την *UGS* ροή υπηρεσίας διαχειριζόταν και απέστελλε κίνηση που προερχόταν από τη δημιουργία τηλεφωνικών κλήσεων ρυθμού 64 Kbps εκάστη. Αυτές οι κλήσεις δημιουργούνταν σε απόσταση 3 δευτερολέπτων η κάθε μια. Αυτός είναι ο λόγος που στη γραφική παράσταση που ακολουθεί παρατηρούμε σταδιακή αύξηση του throughput κατά την πάροδο του χρόνου εξομοίωσης, μέχρι να φτάσουμε σε κατάσταση κορεσμού της άνω ζεύξης.

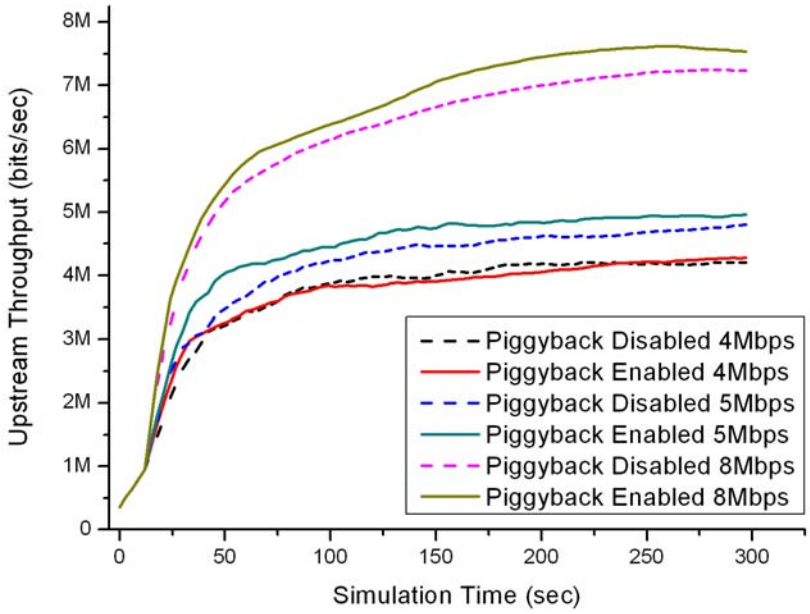


Σχήμα 4-7: Η επίδραση του τεμαχισμού και της συναλύσωσης στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης

Από τα αποτελέσματα του πειράματος βλέπουμε ότι μετά τα 3,3 Mbps η διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης δεν μπορεί να αυξηθεί παρά μόνο αν είναι ενεργοποιημένη η λειτουργία της συναλύσωσης και του τεμαχισμού. Εάν αναλογιστούμε ότι η άνω ζεύξη είναι χωρητικότητας 10 Mbps, τότε μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι αυτές οι δυο λειτουργίες είναι σημαντικότατες στην αποδοτική λειτουργία του WiMAX. Αυτός είναι ο λόγος που η υλοποίηση τους είναι υποχρεωτική βάσει του προτύπου 802.16. Αντίστοιχη απόδοση μπορεί να παρατηρηθεί και σε γράφημα παρατήρησης της καθυστέρησης.

4.6 Η επίδραση της αίτησης επωμισμού στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης

Η επίδραση της αίτησης επωμισμού στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης, μελετήθηκε με την χρήση ενός μοντέλου που περιελάμβανε ένα κεντρικό εξυπηρετητή, ένα CMTS και πέντε συνολικά συνδρομητικούς σταθμούς. Οι ροές υπηρεσίας που είχαν οι τέσσερις από τους πέντε σταθμούς ήταν τύπου *best effort*. Υπήρχε και ένας σταθμός ο οποίος είχε ροή υπηρεσίας *UGS*.Ο σταθμός με τη ροή *UGS* παρήγαγε κίνηση που αντιστοιχούσε με το 15% της συνολικής διεκπεραιωτικότητας της άνω ζεύξης. Με τη χρήση συνδυασμού διαφορετικών ροών υπηρεσίας η εξομοίωσή μας προσέγγιζε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο. Στο συγκεκριμένο σενάριο ο διαφιξιακός χρόνος των πακέτων και το μέγεθος αυτών επιλέχθηκε να έχουν εκθετική κατανομή για τους σταθμούς με *best effort* ροή υπηρεσίας. Η επιλογή αυτή έγινε για να έχουμε καλή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών άφιξης της κίνησης. Ο σταθμός με την *UGS* ροή υπηρεσίας διαχειριζόταν και απέστελλε κίνηση που προερχόταν από τη δημιουργία τηλεφωνικών κλήσεων ρυθμού 64 Kbps εκάστη. Αυτές οι κλήσεις δημιουργούνταν σε απόσταση 3 δευτερολέπτων η κάθε μια. Αυτός είναι ο λόγος που στη γραφική παράσταση που ακολουθεί παρατηρούμε σταδιακή αύξηση του throughput κατά την πάροδο του χρόνου εξομοίωσης, μέχρι να φτάσουμε σε κατάσταση κορεσμού της άνω ζεύξης.



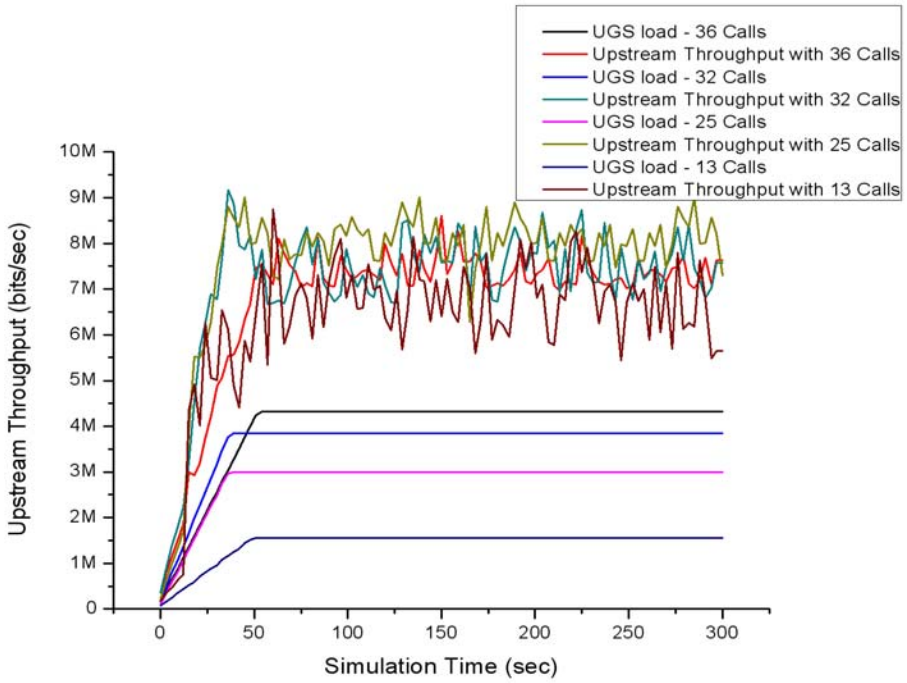
Σχήμα 4-8: Η επίδραση της αίτησης επωμισμού στη διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξης

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι για χαμηλά φορτία η αίτηση επωμισμού δεν προσφέρει διαφοροποίηση στην διεκπεραιωτικότητα της άνω ζεύξεως. Για μεγαλύτερα φορτία όμως συμβαίνουν πολλές συγκρούσεις κατά το διάστημα ανταγωνισμού για απόδοση bandwidth. Έτσι λοιπόν αν μπορεί να γίνουν αιτήσεις για bandwidth και με το μηχανισμό αίτησης επωμισμού η διεκπεραιωτικότητα αυξάνεται και οι καθυστερήσεις, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 4.3, μειώνονται.

4.7 Ευρετικό μοντέλο ελέγχου αποδοχής κλήσεων (A heuristic model for call admission control)

Σε αυτό το μοντέλο μελετήθηκε ένας μηχανισμός ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Οι σταθμοί ήταν συνολικά πέντε. Ο ένας παρήγαγε κίνηση, λόγω γένεσης τηλεφωνικών κλήσεων, που σε κάθε επανάληψη καταλάμβανε και διαφορετικό ποσοστό της συνολικής διεκπεραιωτικότητας της άνω ζεύξης. Στην πρώτη εξομοίωση του σεναρίου αυτού η κίνηση λόγω των 13 τηλεφωνικών κλήσεων του σταθμού που του είχε ανατεθεί η γένεση κλήσεων αντιστοιχούσε στο 15% της συνολικής διεκπεραιωτικότητας. Στην επόμενη εξομοίωση οι κλήσεις ήταν 25 και αντιστοιχούσαν στο 30% της συνολικής διεκπεραιωτικότητας. Στην τρίτη εξομοίωση οι κλήσεις ήταν 32 και αντιστοιχούσαν στο 40% της συνολικής διεκπεραιωτικότητας. Τέλος, στην τέταρτη εξομοίωση οι κλήσεις ήταν 36 και αντιστοιχούσαν στο 50% της συνολικής διεκπεραιωτικότητας. Μετά από τον προαναφερθέντα αριθμό κλήσεων καμία νέα κλήση που δεν γινόταν δεκτή από το δίκτυο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι ο σταθμός που παρήγαγε τις κλήσεις χρησιμοποιούσε ροή υπηρεσίας *UGS*. Η παροχή ευκαιριών μετάδοσης στη *UGS* γίνεται σε σταθερά διαστήματα. Εάν η UGS ζητήσει από το σταθμό βάσης πολλές ευκαιρίες μετάδοσης, τότε επέρχεται κορεσμός. Μετά το σημείο κορεσμού οι ζητούμενες ευκαιρίες μετάδοσης που έχουν γίνει από χρήστες του δικτύου δεν μπορούν να ικανοποιηθούν στο επόμενο MAP και άρα δημιουργούνται καθυστερήσεις απαγορευτικές για την ποιότητα υπηρεσίας που πρέπει να παρέχει η UGS ροή. Έτσι λοιπόν απαιτείται, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου, να επιβάλλεται έλεγχος αποδοχής κλήσεων. Οι κλήσεις χρησιμοποιούσαν G.711 Voice codec.

Η συνολική διεκπεραιωτικότητα όλων των ροών υπηρεσίας κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα, με ενεργοποιημένους τους μηχανισμούς τεμαχισμού, πακετοποίησης, συναλύσωσης και αίτησης επωμισμού. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική διεκπεραιωτικότητα του δικτύου είναι ανεξάρτητη από το αν η κίνηση μας μεταφέρεται μέσω της UGS ή όχι, με την βοήθεια, όμως, των παραπάνω μηχανισμών.



Σχήμα 4-9: **Έλεγχος αποδοχής κλήσεων (CAC)**

4.8 Περίληψη και Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων που παρουσιάσθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο οι μηχανισμοί του τεμαχισμού και της πακετοποίησης των SDU καθώς και της συναλύσωσης πολλαπλών PDU βελτιώνουν την διεκπεραιωτικότητα του δικτύου και μειώνουν την καθυστέρηση στην μεταφορά των δεδομένων. Επίσης είδαμε την επίδραση του παραθύρου υποχώρησης στη καθυστέρηση, συναρτήσει της χρησιμοποίησης της ζεύξης.

Ξεχωριστή αναφορά έγινε στη δυνατότητα χρησιμοποίησης προτεραιοτήτων, μεταξύ ίδιου τύπου ροών πληροφορίας, από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για την παροχή διαφορετικών συμφωνιών στάθμης (παρεχόμενης) υπηρεσίας (Service level agreement-SLA). Ακόμη μελετήθηκε η συμβολή του μηχανισμού αιτήσεως επωμισμού στην αύξηση της διεκπεραιωτικότητας της άνω ζεύξης. Τέλος, δημιουργήθηκε ένα ευρετικό μοντέλο ελέγχου αποδοχής κλήσεων, που εξασφάλιζε την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας για την εξυπηρέτηση τηλεφωνικών κλήσεων από το δίκτυο WiMAX.

4.9 Βιβλιογραφία

[1] IEEE Std. IEEE 802.11-1999 - Local and metropolitan area networks Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1999.

[2] IEEE Std. 802.16-2004 (Revision of IEEE Std. 802.16-2001): IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Mar. 17, 2004.

[3] IEEE Std. 802.16/D5-2004, Part 16: 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 Bands, Nov. 2004.

[4] Steven J. Vaughan-Nichols, "Achieving Broadband Wireless Access with WiMax" *IEEE Computer Society Magazine*, vol. 37 Issue 6, pp 10-13, June 2004.

[5] C. Hoymann, "Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16", *In Computer Networks, Selected Papers from the European Wireless 2004 Conference*, Vol. 49, No. 3, p.p. 341-363, The Hague, Netherlands Oct. 2005.

[6] D.H. Cho, J.H. Song, M.S. Kim, and K.J. Han "Performance Analysis of the IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network," *Proceedings of the First Intrenational Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications (DFMA '05)*, pp. 130-137, 2005.

[7] S. Ramachandran, C.W. Bostian and S.F. Midkiff, "Performance Evaluation of IEEE 802.16 Broadband Wireless Access", *Proceedings of OPNETWORK 2002*, Aug 2002.

[8] H. Lee, T. Kwon, and D.H. Cho, " An Efficient Uplink Scheduling Algorithm for VoIP Services in IEEE 802.16d/e System", *IEEE comm. Letters*, Vol. 9, No. 8, Aug. 2005.

[9] H. Wang, W. Li and D.P. Agrawal, "Dynamic Admission Control and QoS for 802.16 Wireless MAN", *Wireless Telecommunication Symposium 2005*, pp. 60-66, April 2005.

[10] M. Hawa and D.W. Petr, "Quality of Service in Cable and Broadband Wireless Access Systems", *Tenth Int. Workshop on Quality of Service*, pp. 247-255, May 2002.

[11] G. Chandrasekaram, M. Hawa and D. Pettr, "Preliminary Performance Evaluation of QoS in DOCSIS 1.1", *Technical Report, in University of Kansas*, Jan. 2003

[12] Cable Television Laboratories, Data-Over-Cable Service Interface Specifications – Radio Frequency Interface Specification v1.1, July 1999.

[13] OPNET Modeler® Documentation

[14] www.opnet.com

5. Σύγκριση των Ασύρματων Ευρυζωνικών Τεχνολογιών

5.1 Εισαγωγή

Εκτός από το 802.16 τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί και άλλα πρότυπα, που σκοπό έχουν την παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης χρηστών. Ένα από τα πιο γνωστά είναι το **Evolution-Data Optimized** ή **Evolution-Data only** (**EVDO**). Το EVDO έχει προτυποποιηθεί από το *3rd Generation Partnership Project 2* (*3GPP2*), ως κομμάτι της οικογένειας προτύπων *CDMA 2000*. Έχει μάλιστα υιοθετηθεί από πολλούς παρόχους κινητής τηλεφωνίας.

Μια άλλη οικογένεια πρωτοκόλλων αρκετά διαδεδομένη είναι η **High-Speed Packet Access** (**HSPA**), προτυποποιημένη από το *3rd Generation Partnership Project* (*3GPP*). Η οικογένεια αυτή πρωτοκόλλων επεκτείνει και βελτιώνει την επίδοση του εν λειτουργία UMTS πρωτοκόλλου. Προσφέρει την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων στη φασματική περιοχή που λειτουργούν τα UMTS δίκτυα, με βελτιωμένη χρήση του διατιθέμενου εύρους ζώνης. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι υιοθετημένη από παρόχους κινητής τηλεφωνίας ως η λύση για ευρυζωνική πρόσβαση, για το λόγο ότι μπορεί πολύ εύκολα να προσαρμοστεί στα 3G δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, σε αντίθεση με το 802.16 που θέλει νέα υποδομή.

Φυσικά δεν θα πρέπει να ξεχνάμε και την οικογένεια πρωτοκόλλων 802.11 που έχει γνωρίσει πολύ μεγάλη επιτυχία την τελευταία πενταετία και συνεχίζει να συμπληρώνεται με νέα πρότυπα. Αν και η οικογένεια πρωτοκόλλων 802.11 αρχικά σχεδιάσθηκε για την κάλυψη αναγκών ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Network-WLAN) στη συνέχεια υιοθετήθηκε και ως λύση για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Network-WMAN). Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας στην ανάπτυξη WMAN στην κατεστραμμένη από τον τυφώνα Νέα Ορλεάνη (New Orleans).

5.2 Κοινά χαρακτηριστικά των WiMAX, EVDO και HSPA

Ορισμένα χαρακτηριστικά στη σχεδίαση έχουν υιοθετηθεί και από τα τρία πρότυπα, με σκοπό την αύξηση του throughput στη μεταφορά δεδομένων. Επιγραμματικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Adaptive modulation and Coding (AMC)
- Hybrid ARQ (HARQ)
- Fast Scheduling
- Bandwidth Efficient Handoff

Στη παράγραφο 2.5 εξετάσαμε την προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση του WiMAX. Για το EVDO και το HSDPA/HSPA μπορούμε να αναφέρουμε ότι έχουν υιοθετήσει και αυτά την συγκεκριμένη τεχνική για αύξηση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Στο EVDO και το HSPA υπάρχει ένας πεπερασμένος αριθμός μορφότυπων μεταφοράς, που το καθένα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μέγεθος πακέτου, ρυθμό κώδικά και διαμόρφωση. Τα πακέτα πρέπει να τεμαχιστούν για να ταιριάζουν στο σωστό μορφότυπο μεταφοράς. Λόγω του περιορισμένου αριθμού μορφότυπων το επίβαρο χρονοπρογραμματισμού μπορεί να μειωθεί. Ωστόσο ο τεμαχισμός και η προσαρμογή σε συγκεκριμένο μέγεθος πακέτου προκαλεί overhead. Στο σχήμα 5.1 φαίνονται συνοπτικά οι δυνατότητες AMC των διαφόρων πρωτοκόλλων.

Technology	DL Modulation	DL Code Rate	UL Modulation	UL Code Rate
1xEVDO-Rev 0	16QAM, 8PSK, QPSK	Turbo: 1/3, 1/5	Fixed (BPSK)	Fixed
1xEVDO-Rev A			BPSK, QPSK, 8PSK	Turbo: 1/2, 1/4
1xEVDO-Rev B	64QAM[6], 16QAM, 8PSK, QPSK			

Technology	DL Modulation	DL Code Rate	UL Modulation	UL Code Rate
HSDPA	16QAM, QPSK	Turbo, CC: 1/4, 2/4, 3/4, 4/4	Fixed (BPSK)	Fixed
HSPA (HSDPA+HSUPA)			BPSK, QPSK	Turbo, CC: 2/3, 3/4, 4/4
Mobile WiMAX	64QAM, 16QAM, QPSK	Turbo, CC, Repetition: 1/12, 1/8, 1/4, 1/2, 2/3, 3/4, 5/6	16QAM, QPSK, *64QAM Optional*	Turbo, CC, Repetition: 1/12, 1/8, 1/4, 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 *Optional*

Σχήμα 5-1: Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση σε WiMAX, EVDO, HSDPA, HSPA [Copyright 2006 WiMAX Forum]

Όλα τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα υποστηρίζουν και την χρήση της λειτουργίας hybrid automatic request response (H-ARQ), ως μέσο για την βελτίωση της στιβαρότητας της μεταφοράς δεδομένων πάνω από το ασύρματο κανάλι.

Η δυνατότητα για γρήγορο χρονοπρογραμματισμό (fast scheduling) στη κάτω ζεύξη είναι μια δυνατότητα που έχουν όλες οι προαναφερθείσες ευρυζωνικές τεχνολογίες. Το WiMAX όμως υποστηρίζει, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3 χρονοπρογραμματισμό και για την κάτω ζεύξη. Επίσης η δυνατότητα του να κάνει τον προγραμματισμό ανά πλαίσιο και να μεταδίδει μηνύματα MAP στην αρχή κάθε πλαισίου του προσδίδουν την ικανότητα αλλαγής του

προγραμματισμού τάχιστα. Αυτό το πρόσθετο χαρακτηριστικό μπορεί να βοηθήσει στην εξυπηρέτηση ριπαίας κίνησης (bursty traffic) και σε συνθήκες γρήγορων αλλαγών του καναλιού.

5.3 Πλεονεκτήματα του WiMAX έναντι των EVDO και HSPA

Τα 3G συστήματα σχεδιάσθηκαν και εξελίχθηκαν για την εξυπηρέτηση, πρωτίστως, υπηρεσιών φωνής. Τα πρωτόκολλα HSPA και EVDO ανήκουν στην 'ομπρέλα' της οικογένειας 3G, αλλά έχουν ως στόχο την μετάδοση δεδομένων. Το WiMAX από την άλλη πλευρά σχεδιάσθηκε ευθύς εξαρχής για να ικανοποιεί ανάγκες ευρυζωνικής πρόσβασης και να εξυπηρετεί υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και εικόνας. Τα 3G συστήματα βασισμένα στην CDMA πρόσβαση υστερούν σε ορισμένα σημεία, σε σχέση με το WiMAX, που χρησιμοποιεί την OFDMA τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Το WiMAX, εκτός από την OFDMA τεχνική, έχει να επιδείξει ένα ακόμα πολύ δυνατό σημείο. Η υιοθέτηση all-IP δικτύου κορμού καθώς και ενός απλού συστήματος διαχείρισης μειώνει την πολυπλοκότητα στη συνολική αρχιτεκτονική του WiMAX και του προσδίδει χαρακτηριστικά ευρείας αποδοχής σε επίπεδο υλοποίησης, λειτουργίας και υπηρεσιών.

5.3.1 Μεγαλύτερη ανοχή στην πολυόδευση και στην αυτοπαρεμβολή

Όπως ήδη αναφέραμε στο κεφάλαιο 2 τα συστήματα που βασίζονται στην OFDMA πρόσβαση καναλιού παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στα φαινόμενα πολυόδευσης που τυχόν υπάρχουν στο ασύρματο κανάλι.

Στα CDMA συστήματα δέκτες τύπου RAKE χρησιμοποιούνται για να καταπολεμήσουν τις διαλείψεις. Ωστόσο άλλα φαινόμενα, όπως το φαινόμενο Doppler, η έλλειψη συγχρονισμού και η μετατόπιση συχνότητας, μπορεί να προκαλέσουν ενδοκυψελική παρεμβολή μεταξύ των χρηστών που ανήκουν στο ίδιο κελί, ακόμα και αυτοπαρεμβολή (self-interference), στην απουσία άλλων χρηστών. Η χρήση εξισορροπητή μπορεί να αμβλύνει τις παρεμβολές, αλλά δεν μπορεί να την εξουδετερώσει πλήρως. Ο εξισορροπητής παρουσιάζει αυξανόμενη πολυπλοκότητα όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος καναλιού, γεγονός το οποίο αποτελεί επιπρόσθετο πρόβλημα. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι σε ασυρματικά ευρυζωνικά συστήματα, που η πολυόδευση επικρατεί, η OFDMA τεχνική του WiMAX αποτελεί λύση με μικρότερη πολυπλοκότητα και μεγαλύτερη σθεναρότητα, σε σχέση με τη CDMA τεχνική πρόσβασης των 3G δικτύων.

5.3.2 Κλιμακοθετησιμότητα του εύρους καναλιού (Scalable Channel Bandwidth)

Η κλιμακοθετησιμότητα είναι ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της OFDMA τεχνικής. Με την τεχνική των υποφερουσών, που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, μπορεί να υποστηριχθεί μεγάλος αριθμός καναλιών διαφορετικού εύρους. Με αυτή την ευελιξία που έχει η OFDMA τεχνική το WiMAX μπορεί να επιτύχει υψηλή συνολική διεκπεραιωτικότητα, που επιτρέπει την αποδοτική πολύπλεξη κίνησης δεδομένων, με μικρή καθυστέρηση.

Τα συστήματα που βασίζονται πάνω στην CDMA τεχνική, όπως είναι το EVDO και το HSPA, είναι βελτιστοποιημένα για ένα συγκεκριμένο εύρος καναλιού (1.25 MHz το EVDO και 5 MHz το HSPA). Αυτά τα συστήματα είναι πολύ ευαίσθητα σε αλλαγές του εύρους καναλιού, λόγω του ότι το σήμα καταλαμβάνει όλο το εύρος. Δεν έχουν την ιδιότητα της αρθρωτής δομοστοιχείωσης της OFDMA τεχνικής. Ο κώδικας και η δομή του πλαισίου πρέπει να επαναβελτιστοποιηθούν σε τυχόν αλλαγή τους εύρους καναλιού. Υπό αυτή την οπτική δεν παρουσιάσουν «φυσική» κλιμακοθετησιμότητα τα συστήματα EVDO και HSPA.

5.3.3 Πολλαπλή ορθογωνική πρόσβαση άνω ζεύξης (Orthogonal Uplink Multiple Access)

Στο κεφάλαιο 2 περιγράψαμε του λόγους για τους οποίους η ύπαρξη ορθογωνικών υποκαναλιών στο WiMAX εξασφαλίζει πολλαπλή πρόσβαση στην άνω ζεύξη, χωρίς παρεμβολές (θεωρητικά). Η χρήση διαφορετικού κομματιού του διαθέσιμου εύρους από το κάθε χρήστη εξασφαλίζει χαμηλή παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (multiple access interference-MAI) μεταξύ των χρηστών. Με αυτό τον τρόπο η OFDMA μπορεί να υποστηρίξει διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης και να επιτύχει υψηλή φασματική απόδοση (spectral efficiency).

Με τη χρήση της CDMA τεχνικής ο κάθε χρήστης μεταδίδει στο εύρος όλου του καναλιού. Αν και είναι δυνατό να κατασκευαστούν ορθογωνικοί κώδικες, λόγω των θεμάτων συγχρονισμού που ανακύπτουν, χρησιμοποιείται η *asynchronous CDMA* τεχνική στα περισσότερα συστήματα. Με την *asynchronous CDMA* οι χρήστες παρεμβάλλονται μεταξύ τους κατά την διάρκεια της πολλαπλής πρόσβασης στην άνω ζεύξη και η MAI μειώνει την φασματική απόδοση. Η διεκπεραιωτικότητα στην άνω ζεύξη θεωρείται μάλιστα ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των συστημάτων που χρησιμοποιούν CDMA. Η OFDMA, αντιθέτως, σε συνδυασμό με την διαχείριση της χρήσης των υποκαναλιών από το χρονοπρογραμματιστή παρέχει την δυνατότητα καλύτερης χρήσης της άνω ζεύξης και καλύτερου ελέγχου αυτής. Για αυτό το λόγο η επίδοση της άνω ζεύξης είναι πιο προβλέψιμη και η ποιότητα υπηρεσίας πιο υψηλή στο WiMAX, σε σύγκριση με τα EVDO και HSPA.

5.3.4 Υψηλή ποιότητα υπηρεσίας

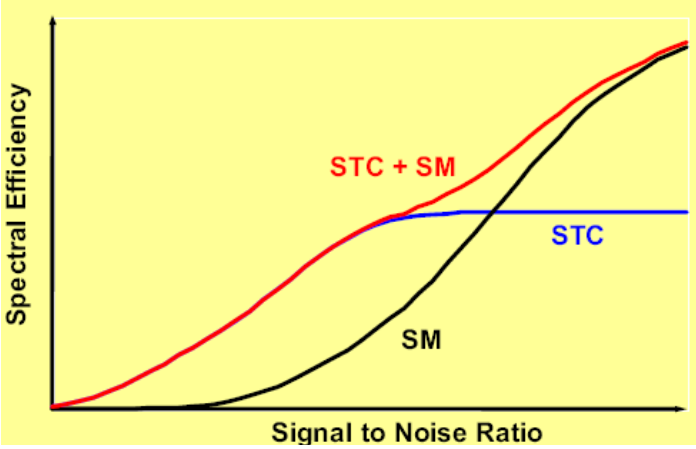
Όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 3, το WiMAX από την αρχική του σχεδίαση προέβλεπε την ύπαρξη μηχανισμών για την εξυπηρέτηση υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις σε ποιότητα. Η ύπαρξη ροών υπηρεσίας, ο κεντρικός χρονοπρογραμματισμός της διαχείρισης της κίνησης, οι υψηλοί ρυθμοί διεκπεραιωτικότητας, η ευέλικτη και ταχύτατη κατανομή των πόρων στους χρήστες του συστήματος καθώς και η δυνατότητα ελέγχου της χωρητικότητας, κατά βούληση, σε άνω και κάτω ζεύξη είναι μερικά από τα στοιχεία που δίνουν στο WiMAX την δυνατότητα να υποστηρίζει υπηρεσίες και εφαρμογές ποικίλων απαιτήσεων.
Οι μηχανισμοί για επίτευξη ποιότητας υπηρεσίας στα συστήματα 3G είναι υπαρκτοί, αλλά είναι πιο περιορισμένοι, σε σχέση με το WiMAX. Τα 3G συστήματα χρησιμοποιούν τεχνικές προτεραιοτήτων για να υποστηρίζουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Με τη διαφορά όμως ότι αυξημένη κίνηση σε κλάσεις υψηλότερης προτεραιότητας οδηγεί σε πλήρη αποκλεισμό την προώθηση της κίνησης κλάσεων με χαμηλότερη προτεραιότητα.

5.3.5 Έξυπνα συστήματα κεραιών

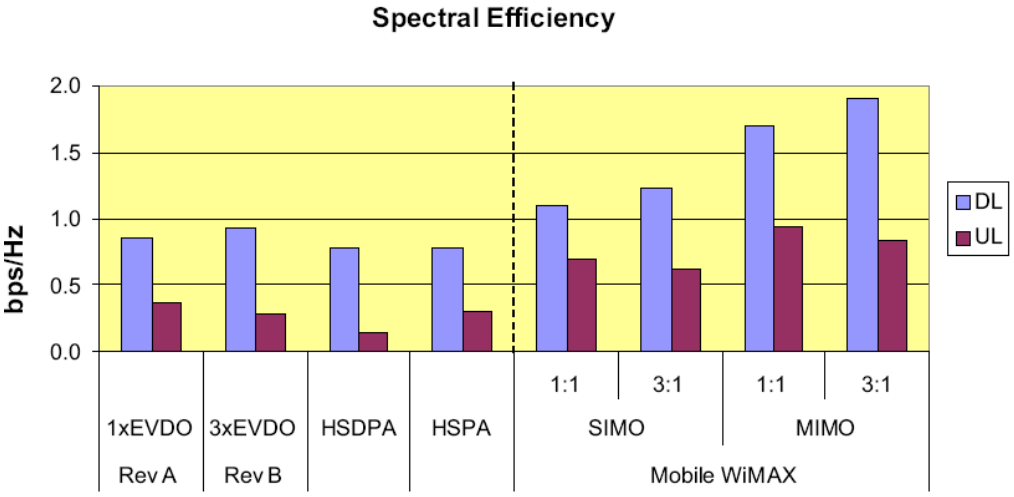
Σε συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνική CDMA, τα σήματα καταλαμβάνουν ολόκληρο το εύρος ζώνης. Η επεξεργαστική πολυπλοκότητα της τεχνολογίας έξυπνων κεραιών διαβαθμίζεται ανάλογα με το εύρος ζώνης του καναλιού. Άρα, το να υποστηρίζει η CDMA τεχνική πρόσβασης τεχνολογίες εξελιγμένων κεραιών στα ευρυζωνικά ασύρματα κανάλια παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία από αυτή που παρουσιάζεται Mobile WiMAX. Το πρότυπο EVDO αλλά και το HSPA υποστηρίζουν απλό διαφορισμό εκπομπής (simple transmit diversity **)** και το πρότυπο HSPA έχει μια επιλογή για να υποστηρίζει beamforming. Γενικά, ωστόσο, η χρήση τεχνολογιών εξελιγμένων κεραιών στα υπάρχοντα EVDO και HSPA συστήματα είναι περιορισμένη.
Το πρότυπο Mobile WiMAX βασίζεται στην τεχνολογία OFDM/OFDMA που είναι φιλική με τις έξυπνες κεραίες. Η τεχνολογία OFDM/OFDMA μετατρέπει ένα ευρυζωνικό κανάλι επιλεγόμενης συχνότητας σε πολλαπλούς σταθερούς στενοζωνικούς υπο-φορείς και επιτρέπει σε λειτουργίες έξυπνων κεραιών να εκτελούνται στους υπο-φορείς. Οι πολύπλοκοι εξισορροπητές δεν είναι απαραίτητοι για να αντισταθμίσουν τις διαλείψεις σε συγκεκριμένες συχνότητες. Συνεπώς με τα συστήματα OFDM/OFDMA είναι πολύ ευκολότερο να υποστηρίξουμε τις τεχνολογίες έξυπνων κεραιών. Το πρότυπο Mobile WiMAX υποστηρίζει πλήρως τις τεχνολογίες έξυπνων κεραιών για την βελτίωση της απόδοσης

συμπεριλαμβανομένου και του beamforming, του STC και του SM. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να βελτιώσουν και την κάλυψη και την χωρητικότητα του συστήματος.

Το WiMAX υποστηρίζει επίσης την δυναμική εναλλαγή μεταξύ των τεχνολογιών έξυπνων κεραιών για να μεγιστοποιήσει το όφελος που βασίζεται στις συνθήκες του συστήματος. Το Mobile WiMAX υποστηρίζει την AMS τεχνική, μεταξύ των πολλαπλών MIMO τρόπων λειτουργίας, για να μεγιστοποιεί την φασματική αποδοτικότητα, χωρίς την μείωση της περιοχής κάλυψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-2.



Σχήμα 5-2: Φασματική απόδοση των adaptive MIMO switch συστημάτων (AMS)
[Copyright 2006 WiMAX Forum]



Σχήμα 5-3: Ενδεικτική σύγκριση της φασματικής απόδοσης του WiMAX, EVDO, HSPA, HSPDA
[Copyright 2006 WiMAX Forum]

5.4 Ομοιότητες και διαφορές μεταξύ WiMAX και Wi-FI

Το πρωτόκολλο 802.11 από το 1997, που ανακοινώθηκε για πρώτη φορά, μέχρι και σήμερα έχει γνωρίσει πολλές συμπληρώσεις. Η πιο σημαντική, συγκεντρωτική τροποποίηση, που έχει γίνει μέχρι σήμερα ονομάζεται « ***IEEE 802.11-2007: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications »*.** Η συγκεκριμένη συγκεντρωτική τροποποίηση περιλαμβάνει τις επιμέρους οχτώ τροποποιήσεις 802.11**a**, **b**, **d**, **e**, **g**, **h**, **i**, **j**. Στους πίνακες που ακολουθούν γίνεται αναφορά σε μερικές συμπληρώσεις-εκδόσεις του 802.11 και αντιπαράθεση με αντίστοιχα χαρακτηριστικά του 802.16. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην τροποποίηση 802.11e και 802.11i. Μετά από την επιτυχία που γνώρισε το 802.11, η IEEE, με αυτές τις δυο τροποποιήσεις, θέλησε να καλύψει τα αδύναμα σημεία του πρωτοκόλλου. Με το 802.11e θέλησε να εισάγει διαβαθμίσεις στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας και με το 802.11i (WPA2 κατά την Wi-Fi alliance) υιοθέτησε το πρότυπο Advance Encryption Standard (AES) για αύξηση της παρεχόμενης ασφάλειας στην επικοινωνία. Δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε μια ειδική αναφορά και στην τροποποίηση 802.11n που είναι ακόμα σε φάση προσχεδίου (draft) και αναμένεται να φτάσει στην τελική του μορφή (standard) το 2009.Το 802.11n υιοθετεί τρεις πολύ βασικές τεχνικές στην επικοινωνία των συσκευών. Η πιο βασική τεχνική από αυτές, που όπως έχουμε αναφέρει προδιαγράφεται και στο 802.16, είναι η χρήση MIMO κεραιοσυστημάτων. Η αναμφίβολη θετική συμβολή στην ταχύτητα μετάδοσης μπορεί να οδηγήσει σε θεωρητικές ταχύτητες άνω των 200 Mbps ή σε ταχύτητες άνω των 70 Mbps στο MAC επίπεδο, με τη χρήση εύρους φάσματος 40 MHz. Στο 802.11n γίνεται επίσης υιοθέτηση της OFDM τεχνικής και της τεχνικής packet aggregation, που ουσιαστικά είναι αντίστοιχη με την τεχνική packing του WiMAX.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι τα tasking group που συνθέτουν τις τροποποιήσεις για το 802.11 υιοθετούν όλες τις νέες τεχνικές, στο φυσικό επίπεδο, αλλά και στο MAC επίπεδο με σκοπό να αριστοποιήσουν την επικοινωνία. Αντίστοιχα το 802.16 θα εμπλουτιστεί μέχρι το 2009 με νέα τροποποίηση (802.16m) που θα προβλέπει ταχύτητες μέχρι 100 Mbps για κινητούς χρήστες και 1 Gbps για σταθερούς χρήστες. Επομένως τίθεται το ερώτημα ποια είναι η διαφορά μεταξύ 802.11 και 802.16.

Η απάντηση μπορεί εύκολα να δοθεί όταν ανατρέξουμε στο στόχο που είχε η IEEE όταν ανέπτυσσε τα συγκεκριμένα πρότυπα. Το μεν 802.11 σχεδιάσθηκε έτσι ώστε να καλύπτει ανάγκες τοπικών ασύρματων δικτύων (WLAN), ενώ το 802.16 αναπτύχθηκε για να ικανοποιεί ανάγκες ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων (WMAN). Μια θεμελιώδης διαφορά στη φιλοσοφία των WLAN και των WMAN είναι η δυνατότητα για κινητότητα των

χρηστών. Στην σχεδίαση ενός δικτύου που έχει σκοπό να εξυπηρετήσει μια ευρεία περιοχή και κάθε πιθανή υπηρεσία, όπως το 802.16, δίνεται μεγάλη βαρύτητα στη κινητότητα των χρηστών- με χρήση μεταπομπής, την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων, την περιοχή κάλυψης (βλέπε σχήμα 5-6) και φυσικά την εξυπηρέτηση όλων των υπηρεσιών που ο χρήστης επιθυμεί. Επίσης στο πρωτόκολλο 802.16 δίνεται ιδιαίτερη σημασία σε μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας, που το σημαντικότερο από όλα, μπορεί να παρουσιάζει ένα πλήθος από διαβαθμίσεις. Επίσης το 802.16, επειδή από την αρχή σχεδιάσθηκε για WMAN, έχει τους αντίστοιχους μηχανισμούς δικτύωσης και διαχείρισης ενός μεγάλου πλήθους σταθμών βάσης και συνδρομητικών σταθμών. Άρα λοιπόν οι διαφορές ανάμεσα σε 802.11 και 802.16, ανάμεσα σε Wi-Fi και WiMAX αφορούν περισσότερο την λειτουργία του δικτύου, της διασύνδεσης, της διαχείρισης και των διαφορετικών επιπέδων υπηρεσίας που κάθε τηλεπικοινωνιακός πάροχος θέλει να προσφέρει στους πελάτες του. Ο τελικός χρήστης είτε χρησιμοποιεί το Wi-FI, είτε το WiMAX , είτε 3G θα μπορεί να επικοινωνεί με φωνή, δεδομένα και εικόνα.

	WiMax (802.16a)	**Wi-Fi (802.11b)**	**Wi-Fi (802.11a/g)**
Primary Application	Broadband Wireless Access	Wireless LAN	Wireless LAN
Frequency Band	Licensed/Unlicensed 2 G to 11 GHz και 10–66 GHz	2.4 GHz ISM	2.4 GHz ISM (g) 5 GHz U-NII (a)
Channel Bandwidth	Adjustable 1.25 M to 20 MHz	25 MHz	20 MHz
Half/Full Duplex	Full	Half	Half
Radio Technology	OFDM (256-channels)	Direct Sequence Spread Spectrum	OFDM (64-channels)
Bandwidth Efficiency	≤5 bps/Hz	≤0.44 bps/Hz	≤2.7 bps/Hz
Modulation	BPSK, QPSK, 16-, 64-QAM	QPSK	BPSK, QPSK, 16-, 64-QAM
FEC	Convolutional Code Reed-Solomon	None	Convolutional Code
Encryption	Mandatory- 3DES Optional- AES	Optional- RC4 (AES in 802.11i)	Optional- RC4 (AES in 802.11i)
Access Protocol - Best Effot - Data Priority - Consistent Delay	Request/Grant Yes Yes Yes	CSMA/CA Yes 802.11e WME 802.11e WSM	CSMA/CA Yes 802.11e WME 802.11e WSM
Mobility	Mobile WiMax (802.16e)	In development	In development

Σχήμα 5-4: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών χαρακτηριστικών WiMax (802.16a), Wi-Fi (802.11b), Wi-Fi (802.11a/g)

Εμπορική Τεχνολογία	Fixed WiMAX	Mobile WiMAX	HSPA	1x EV-DO Rev A	Wi-Fi
Πρότυπο	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP Release 6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης (Peak down link data rate)	9.4Mbps για 3.5MHz φάσμα με 3:1 DL-to-UL λόγο, TDD; 6.1Mbps με 1:1	46Mbps[a] με 3:1 DL- to-UL λόγο, TDD; 32Mbps με 1:1	14.4Mbps χρησιμοποιώντας 15 κώδικες; 7.2Mbps με 10 κώδικες	3.1Mbps; Rev. B θα υποστηρίζει 4.9Mbps	54 Mbps[b] μεριζόμενο για 802.11a/g; πάνω από 200Mbps[c] μέγιστη διεκπεραιωτικότητα για layer 2 (throughput) με 802.11n
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης (Peak uplink data rate)	3.3Mbps με 3.5MHz χρησιμοποιώντας 3:1 DL-to-UL λόγο; 6.5Mbps με 1:1	7Mbps με 10MHz χρησιμοποιώντας 3:1 DL-to-UL λόγο; 4Mbps με λόγο 1:1	1.4Mbps αρχικά; 5.8Mbps αργότερα	1.8Mbps	
Εύρος Ζώνης (Bandwidth)	3.5MHz και 7MHz στην 3.5GHz μπάντα; 10MHz στην 5.8GHz μπάντα	3.5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz, και 8.75MHz αρχικά	5MHz	1.25MHz	20MHz για 802.11a/g; 20/40MHz για 802.11n
Διαμόρφωση (Modulation)	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Πολύπλεξη (Multiplexing)	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/ CDMA	CSMA
Μέθοδος αμφιδρόμησης (Duplexing)	TDD, FDD	TDD αρχικά	FDD	FDD	TDD
Συχνότητα (Frequency)	3.5GHz και 5.8GHz αρχικά	2.3GHz, 2.5GHz, και 3.5GHz αρχικά	800/900/1,800/ 1,900/ 2,100MHz	800/900/ 1,800/ 1,900MHz	2.4GHz, 5GHz
Τυπική Κάλυψη (Typical Coverage)	5–8 Km	< 2 Km	1,5–5 Km	1,5–5 Km	< 30 m σε εσωτερικό χώρο < 300 m σε εξωτερικό χώρο

a. Υποθέτει 2 * 2 MIMO κεραιοσύστημα και κανάλι εύρους10MHz.

b. Εξαιτίας αναποτελεσματικού CSMA MAC επιπέδου, αυτό τυπικά μεταφράζεται μόνο σε ~20Mbps με 25Mbps διεκπεραιωτικότητα (throughput) στο δεύτερο επίπεδο.

c.με την χρήση φάσματος 40 MHz, της τεχνικής channel bonding και MIMO κεραιοσυστήματος

Σχήμα 5-5: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών χαρακτηριστικών Fixed WiMAX, Mobile WiMAX, HSPA, 1x EV-DO Rev A, Wi-Fi

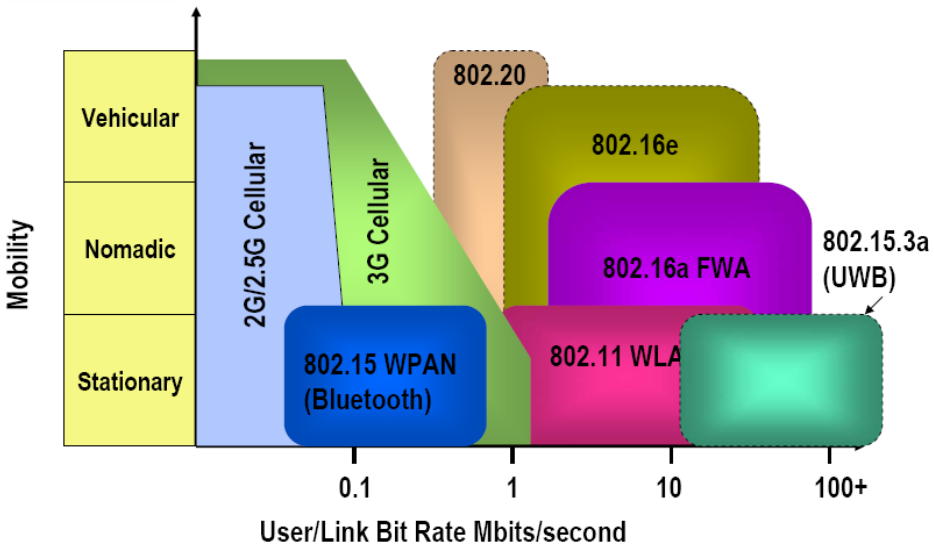
name	origin date	frequency band	bandwidth	bitrate	signal range	bandwidth efficeincy	modulation
Bluetooth	2004	2,4 GHz	1 MHz	2,1 Mbit/s	10 m	2,1 bps/Hz	GMSK
UWB	2007	4,8-10 GHz	500 MHz	480 Mbit/s	10 m	0,96 bps/Hz	OFDM
Zigbee	2004	2,4 GHz	2 MHz	250 kbit/s	10 m	0,125 bps/Hz	O-QPSK
					outdoor/indoor		
IEEE 802.11a	1999	5 GHz	20 MHz	54 Mbit/s	100/30 m	2,7 bps/Hz	OFDM, BPSK,QPSK, 16QAM, 64QAM
IEEE 802.11b	1999	2,4 GHz	20 MHz	11 Mbit/s	110/35 m	0,55 bps/Hz	BPSK,QPSK, CCK
IEEE 802.11g	2003	2,4 GHz	20 MHz	54 Mbit/s	110/35 m	2,7 bps/Hz	OFDM, BPSK,QPSK, 16QAM, 64QAM
IEEE 802.11n	2006	2,4/5 GHz	40 MHz	150 Mbit/s	160/70 m	3,7 bps/Hz	MIMO
IEEE 802.16	2001	10-66 Ghz	28 MHz	134 Mbit/s	5 km	4,5 bps/Hz	QPSK, 16QAM, 64QAM
IEEE 802.16a	2003	2-11GHz	20 MHz	75 Mbit/s	10 km	3,7 bps/Hz	BPSK,QPSK, 16QAM, 64QAM
IEEE 802.16d	2004	2-11GHz	25MHz	75 Mbit/s	8 km	3 bps/Hz	BPSK,QPSK, 16QAM, 64QAM
IEEE 802.16e	2005	2-6 GHz	20 MHz	30 Mbit/s	5 km	1,1 bps/Hz	BPSK,QPSK, 16QAM, 64QAM
				downlink/uplink			
GSM	1992	900/1800 MHz	200 KHz	9,6 kbit/s	35 km	0,05 bps/Hz	GMSK
GPRS	1997	900/1800 MHz	200 KHz	80 kbit/s	35 km	0,4 bps/Hz	GMSK
EDGE	2004	900/1800 MHz	200 KHz	200/100 kbit/s	30 km	1,2 bps/Hz	8-PSK
UMTS	2000	1885-2200 MHz	5MHz	2048 kbit/s	2 km	0,4 bps/Hz	QPSK
HSDPA	2004	873/1900 MHz	5MHz	14,4 Mbit/s	6 km	2,8 bps/Hz	QPSK, 16-QAM
HSUPA	2005	873/1900 MHz	5MHz	1,4 Mbit/s	5 km	0,4 bps/Hz	QPSK, 16-QAM
IEEE 802.20	2002	< 3,5GHz	1,25 Mhz	1024/300 kbit/s	12 km	1,0 bps/Hz	OFDM

Σχήμα 5-6: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των ασύρματων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για PAN, WLAN, WMAN, WAN [Department of Telecommunications, Brno University of Technology]

5.5 Περίληψη και Συμπεράσματα

Το WiMAX έχει σκοπό να καλύψει τις ανάγκες διαφορετικού τύπου χρηστών, στα πλαίσια Ασύρματων Μητροπολιτικών Δικτύων. Τα εγγενή χαρακτηριστικά που έχει στο MAC επίπεδο δίνουν την δυνατότητα μεγαλύτερης ευελιξίας σε θέματα παροχής διαβαθμισμένων υπηρεσιών με την ικανοποίηση διαφορετικών SLAs. Από άποψη επιδόσεων μάλιστα είναι το μόνο ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο που μπορεί να παρέχει υπηρεσίες αντίστοιχες των ενσύρματων δικτύων xDSL και DOCSIS, με οικονομικό τρόπο και σε μεγάλη κλίμακα. Οι απαιτήσεις και οι ανάγκες που υπάρχουν σήμερα για την παράλληλη κάλυψη αναγκών τηλεφωνίας, δεδομένων και εικόνας είναι ο στόχος του WiMAX. Η ανοιχτή αρχιτεκτονική

του επιτρέπει επίσης την μελλοντική υιοθέτηση και συνεργασία με μελλοντικές τεχνολογίες που θα προκύψουν. Η ευρεία αποδοχή του και υποστήριξη από την τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία υλοποίησης συστημάτων καθώς και οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους που θα το υιοθετήσουν φαίνεται πως μπορεί να προσφέρει την ευρεία αποδοχή του και την οικονομία κλίμακας που απαιτείται για την επιτυχία μιας τέτοιας τεχνολογίας. Ο σαφής προσανατολισμός του για την ικανοποίηση των αναγκών WMAN δικτύων και η έλλειψη άλλων ανταγωνιστικών τεχνολογιών, σε αυτό το επίπεδο δικτύωσης, του δίνουν ακόμα περισσότερες πιθανότητας επιτυχίας. Θα πρέπει να γίνει σαφές ότι έχοντας στόχο την σύγκλιση (convergence) των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης είναι λογικό να υπάρχει υποστήριξη των διαφόρων αναγκών από όλα τα σύγχρονα ασυρματικά δίκτυα, αυτό όμως δεν σημαίνει ότι τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα (3G, 802.11 κλπ.) μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες για ασύρματη μητροπολιτική δικτύωση. Η διασύνδεση του WiMAX με δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Network-WAN), όπως τα 3G δίκτυα, και δικτύων WLAN, όπως είναι το 802.11. θα δώσουν τη διασυνδετικότητα (interconnectivity) που όλοι περιμένουμε για καθολικές υπηρεσίες διασύνδεσης, παντού και πάντα (βλέπε σχήμα 5-6).



Σχήμα 5-7: Δυνατότητα κάλυψης αναγκών κινούμενων χρηστών, συναρτήσει της ταχύτητας διασύνδεσης, διαφόρων ήδη υλοποιημένων προτύπων **[** Copyright WiMAX Forum]

5.6 Βιβλιογραφία

[1] WiMAX Forum, Mobile WiMAX: A Performance and Comparative Summary, Prepared by Doug Gray, September 2006

[2] Wi-Fi Alliance, Wi-Fi CERTIFIED™ for WMM™ - Support for Multimedia Applications with Quality of Service in Wi-Fi® Networks, September 1, 2004

[3] Cisco White Paper, 802.11n Wireless Technology Overview, 2007

[4] Ing. Milan Šimek, Ing. Ivan Míča, Ing. Jan Kacálek, Ing. Radim Burget, Department of Telecommunications, Brno University of Technology,
Czech Republic, Bandwidth Efficiency of Wireless Networks of
WPAN, WLAN, WMAN and WWAN, 2007

[5] Wi-Fi Alliance, Wi-Fi CERTIFIED™ 802.11n draft 2.0:Longer-Range, Faster-Throughput, Multimedia-Grade Wi-Fi® Networks, 2007

[6] WiMAX Forum, Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, August 2006

[7] WiMAX Forum, Mobile WiMAX – Part II: A Comparative Analysis
May, 2006

[8] WiMAX Forum, WIMAX AN EFFICIENT TOOL TO BRIDGE THE DIGITAL DIVIDE, November, 2005

[9] www.wikipedia.com

[10] www.wi-fi.org

[11] www.intel.com

[12]www.wimaxforum.org

5.7 Συντομογραφίες

3-DES	triple data encryption standard
AAS	adaptive antenna system
AES	advanced encryption standard
ATM	asynchronous transfer mode
BE	best effort
BER	bit error rate
BPSK	binary phase shift keying
BR	bandwidth request
BS	base station
BSN	block sequence number
BTC	block turbo code
BW	bandwidth
BWA	broadband wireless access
C/I	carrier-to-interference ratio
C/N	carrier-to-noise ratio
CA	certification authority
CC	confirmation code
CCI	co-channel interference
CDMA	code division multiple access
CID	connection identifier
CINR	carrier-to-interference-and-noise ratio
CRC	cyclic redundancy check
dBi	decibels of gain relative to the zero dB gain of a free-space isotropic radiator
dBm	decibels relative to one milliwatt
DCD	downlink channel descriptor
DES	data encryption standard
DFS	dynamic frequency selection
DHCP	dynamic host configuration protocol
DSA	dynamic service addition
DSC	dynamic service change
DSCH	distributed scheduling
DSCP	differentiated services codepoint
DSD	dynamic service deletion
FEC	forward error correction
FFT	fast fourier transform
HEC	header error check
IFFT	inverse fast fourier transform
IP	internet protocol
ITU	international telecommunications union
IWF	interworking function
KEK	key encryption key
LAN	local area network
LOS	line-of-sight
LSB	least significant bit
MAC	medium access control layer
MAN	metropolitan area network
Mb/s	megabits per second
MBd	megabaud
MBd/s	megabaud per second
MPEG	moving pictures experts group
NLOS	non-line-of-sight
nrtPS	non-real-time polling service
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing

OFDMA	orthogonal frequency division multiple access
PHS	payload header suppression
PHY	physical layer
PKM	privacy key management
PM	poll-me bit
PUSC	partial usage of subchannels
QAM	quadrature amplitude modulation
QoS	quality of service
QPSK	quadrature phase-shift keying
REQ	request
rtPS	real-time polling service
Rx	receiver
SC	single carrier
SDU	service data unit
SF	service flow
SFID	service flow identifier
SN	sequence number
SNR	signal-to-noise ratio
SS	subscriber station
SSID	subscriber station identification (MAC address)
TDD	time division duplex or duplexing
TDM	time division multiplexing
TDMA	time division multiple access
TEK	traffic encryption key
UCD	uplink channel descriptor
UDP	user datagram protocol
UGS	unsolicited grant service
VLAN	virtual local area network
VP	virtual path
VPI	virtual path identifier
WirelessHUMAN	Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks
WirelessMAN	Wireless Metropolitan Area Networks

Περίληψη της Διπλωματικής Εργασίας

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :

ΤΙΤΛΟΣ: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (WMAN)

Φοιτητής: Αργυρόπουλος Χρήστος Επιβλέπων: Καθηγητής Σ.Κωτσόπουλος

Η ανάγκη για ασύρματη ευρυζωνική διασύνδεση, που έχει προκύψει τα τελευταία χρόνια, για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών και απαιτήσεων οδήγησε στην δημιουργία νέων πρωτοκόλλων και αντίστοιχων συστημάτων επικοινωνίας. Ένα από αυτά είναι το 802.16, το οποίο αποδεικνύεται σε παγκόσμια κλίμακα, ως το επικρατέστερο και του οποίου η εμπορική υλοποίηση έχει λάβει το όνομα WiMAX. Το πρωτόκολλο αυτό αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία περιλαμβάνει τα εξής μέρη :

a. Γενική παρουσίαση των συστημάτων Ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης
b. Συνοπτική παρουσίαση του Φυσικού Επιπέδου του WiMAX
c. Συνοπτική παρουσίαση του επιπέδου πρόσβασης μέσου του WiMAX
d. Αξιολόγηση του MAC επιπέδου του 802.16 με τη χρήση του εξομοιωτή Opnet Modeler
e. Σύγκριση των Ασύρματων Ευρυζωνικών Τεχνολογιών

Το WiMAX είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να καλύπτει τις ανάγκες σταθερής και κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης, επιδιώκοντας έτσι να καταστεί βασικός μοχλός σύγκλισης των κινητών και σταθερών ευρυζωνικών υπηρεσιών. Βασικοί στόχοι του WiMAX είναι να προσφέρει υψηλή διεκπεραιωτικότητα, ευρεία κάλυψη περιοχής και διαβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται μέσα από μια σύνθετη δομή λειτουργιών και τεχνολογιών, που περιγράφονται στην αρχή αυτού το έργου. Στη συνέχεια, με τη χρήση του εξομοιωτή Opnet Modeler, γίνεται η μελέτη της επίδρασης διαφόρων μηχανισμών του επιπέδου πρόσβασης μέσου στην ποιότητα υπηρεσίας. Τέλος γίνεται αναφορά στις υπόλοιπες ασύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες και σύγκριση τους, όπου αυτό είναι δυνατό, με το WiMAX.