



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

**Μελέτη ανάλυσης λειτουργίας πακέτου υπηρεσιών IP σε δίκτυο
IEEE 802.16e, με έμφαση στην ποιότητα υπηρεσίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Θ. Στεφανής

Επιβλέπων : Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2010



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

**Μελέτη ανάλυσης λειτουργίας πακέτου υπηρεσιών IP σε δίκτυο
IEEE 802.16e, με έμφαση στην ποιότητα υπηρεσίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Θ. Στεφανής

Επιβλέπων : Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

2010.

.....
Ι. Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2010



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

.....

Νικόλαος Θ. Στεφανής

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

Copyright © Νικόλαος Θ. Στεφανής, 2010.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση ενός δικτύου βασισμένου στο πρότυπο IEEE 802.16™ (WiMAX) με χρήση του προγράμματος OPNET Modeler και η μελέτη του ως προς την ποιότητα υπηρεσίας που μπορεί να λάβει ο τελικός χρήστης, συναρτήσει της απόστασής του από το Σταθμό Βάσης και τον αριθμό των χρηστών στο δίκτυο. Το πρότυπο αυτό ανήκει στην κατηγορία της σταθερής ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης και έχει ως αντικείμενο τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα επικοινωνιών.

Στο πρώτο τμήμα της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται το πρότυπο IEEE 802.16™, τα χαρακτηριστικά του και η εξέλιξη του στο χρόνο. Επιπλέον, αναλύονται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου WiMAX, καθώς και διάφορες εφαρμογές και σενάρια χρήσης του. Τέλος, γίνεται εκτενής αναφορά στην Ποιότητα Υπηρεσίας, η οποία υποστηρίζεται εγγενώς από το πρότυπο, στα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους της.

Στο δεύτερο κομμάτι της εργασίας εκτελούνται προσομοιώσεις σε ένα δίκτυο συχνότητας 3,5 GHz και εύρους ζώνης καναλιού 7 MHz, που βρίσκεται σε μια ημιαστική περιοχή με λοφώδες έδαφος και υψηλή πυκνότητα δέντρων, οι απώλειες διάδοσης του οποίου υπολογίζονται από το εμπειρικό μοντέλο SUI περιβάλλοντος A. Το προσομοιούμενο δίκτυο αποτελείται από ένα Σταθμό Βάσης και σταθερούς χρήστες περιμετρικά του. Στους χρήστες παρέχονται υπηρεσίες δεδομένων, φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ και βίντεο κατ' απαίτηση. Αρχικά καταγράφονται οι απαιτήσεις των υπηρεσιών και στη συνέχεια υπολογίζεται θεωρητικά ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να υποστηριχθεί από το δίκτυο. Τέλος, εκτελούνται οι προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα αξιολογούνται βάσει ορισμένων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας.

Λέξεις Κλειδιά

IEEE 802.16™, WiMAX, Ποιότητα Υπηρεσίας, QoS, Προσομοίωση, OPNET, Πακέτο Υπηρεσιών IP, μοντέλο απωλειών διάδοσης Erceg, SUI models, OFDMA

Abstract

The scope of this thesis is to simulate a network based on the IEEE 802.16™ (WiMAX), using OPNET Modeler and the study of the Quality of Service (QoS) the end user may receive, depending on the distance from the Base Station and the number of the users in the network. The standard belongs to the Fixed Broadband Wireless Access (FBWA) network category and its subject is the Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN).

In the first part of the thesis, the IEEE 802.16™ standard is presented, its characteristics and evolution in time. Furthermore, the architecture of a WiMAX network as well as several applications and usage scenarios are analyzed. Finally, a comprehensive reference to the supported by the standard Quality of Service (QoS) is made, to its characteristics and its parameters.

In the second part of the thesis, several simulations take place in a network of 3.5GHz frequency and 7 MHz channel bandwidth, which is situated in a suburban area with hilly terrain and high tree density, the pathloss of which is calculated using the empirical SUI Model Terrain A. The network consists of a Base Station and some fixed users placed around it. The services provided to the users are the data service, Voice over IP (VoIP) and the Video on Demand (VoD). Initially, the requirements of the provided services are recorded and afterwards the theoretically maximum number of users that can be supported by the network are calculated. Finally the simulations are executed and the results are evaluated based on certain QoS parameters.

Key Words

IEEE 802.16™, WiMAX, Quality of Service, QoS, Simulation, OPNET, Triple Play service, Erceg Pathloss Model, SUI models, OFDMA

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
2	ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16	17
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	17
2.2	ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16-2001	18
2.2.1	ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	18
2.2.1.1	ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	19
2.2.2	ΣΤΡΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ- ΜΑC	22
2.2.2.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	23
2.2.2.2	ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΑC.....	23
2.2.2.2.1	ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΟ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ	24
2.2.2.2.2	ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΚΟΙΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	25
2.2.2.2.3	ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	26
2.3	ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16c.....	26
2.4	ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16a.....	27
2.4.1	ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	27
2.4.2	ΣΤΡΩΜΑ ΜΑC	28
2.5	ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16-2004	29
2.5.1	ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	29
2.5.2	ΣΤΡΩΜΑ ΜΑC	30
2.5.2.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΜΑC (ΜΡDU).....	31
2.5.2.2	ΑΙΤΗΣΗ ΚΑΙ ΕΚΧΩΡΗΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ.....	32
2.6	ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16e-2005	33
2.6.1	ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	34
2.6.2	ΣΤΡΩΜΑ ΜΑC	36
2.6.2.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΜΕΤΑΠΟΜΠΕΣ	36
2.6.2.1.1	«ΣΚΛΗΡΗ» ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ.....	37
2.6.2.1.2	ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ ΓΟΡΓΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ.....	38
2.6.2.1.3	ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ.....	38
2.6.2.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	39
2.7	ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.....	39
2.7.1	ΟΙ ΔΥΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ & ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΑΡΧΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	39

2.7.2	ΟΦΕΛΗ ΤΩΝ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΖΩΝΩΝ	
	ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	41
2.7.2.1	ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ.....	41
2.7.2.2	ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ.....	42
2.7.2.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ	
	ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΖΩΝΩΝ	44
2.7.2.4	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΕ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	46
2.8	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	47
2.8.1	ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΗΜΕΙΑ (ΡΜΡ).....	47
2.8.2	ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESH)	48
2.8.3	ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX.....	50
2.9	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ WiMAX	52
2.10	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ WiMAX.....	56
2.10.1	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ WiMAX.....	56
2.10.2	ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ WiMAX.....	56
2.10.2.1	ΔΗΜΟΣΙΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	58
2.10.2.1.1	ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΠΑΡΟΧΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	58
2.10.2.1.2	ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ.....	59
2.10.2.2	ΙΔΙΩΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	60
2.10.2.2.1	BACKHAUL ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	60
2.10.2.2.2	BACKHAUL ΠΑΡΟΧΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	61
2.10.2.2.3	ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΑΠΕΖΩΝ.....	62
2.10.2.2.4	ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	64
2.10.2.2.5	ΔΗΜΟΣΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑ	65
2.10.2.2.6	OFFSHORE ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	66
2.10.2.2.7	ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΩΝ	67
2.10.2.2.8	ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΕ ΠΡΟΣΩΡΙΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	68
2.10.2.2.9	ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	69
3	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS) ΣΤΟ WiMAX.....	72
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	72
3.2	ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	72
3.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	73
3.4	ΚΛΑΣΕΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	75
3.4.1	ΤΥΠΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	75

3.4.1.1	Unsolicited Grant Services (UGS)	76
3.4.1.2	Real-time Polling Services (rtPS).....	76
3.4.1.3	Nonreal-time Polling Services (nrtPS).....	77
3.4.1.4	Best Effort (BE)	77
3.4.1.5	Extended real-time Polling Service (ErtPS).....	78
3.5	ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	78
3.5.1	ΤΥΠΟΙ ΡΟΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	79
3.5.1.1	ΠΡΟΔΙΑΤΕΘΕΙΜΕΝΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (PROVISIONED SERVICE FLOW).....	79
3.5.1.2	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (ADMITTED SERVICE FLOW).....	80
3.5.1.3	ΕΝΕΡΓΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (ACTIVE SERVICE FLOW).....	81
3.6	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ.....	81
3.6.1	ΠΡΟΔΙΑΤΕΘΕΙΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ	81
3.6.2	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ.....	82
3.7	ΣΥΝΑΛΛΑΓΕΣ WiMAX.....	83
3.7.1	ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΛΛΑΓΩΝ.....	83
3.7.2	ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΑΛΛΑΓΩΝ	84
3.8	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	84
3.8.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	84
3.8.1.1	ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΗ.....	85
3.8.1.2	ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ	85
3.8.2	ΑΛΛΑΓΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	86
3.8.2.1	ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΗ.....	87
3.8.2.2	ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ	87
3.8.3	ΔΙΑΓΡΑΦΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	88
3.8.3.1	ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΗ.....	88
3.8.3.2	ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ	88
4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ OPNET MODELER.....	89
4.1	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	89
4.1.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	91
4.1.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ WiMAX.....	93
4.1.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	95
4.2	ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	96
4.2.1	ΠΑΚΕΤΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ IP.....	96
4.2.1.1	ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΒΙΝΤΕΟ	96

4.2.1.1.1	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ H.264/AVC.....	96
4.2.1.1.2	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ H.264/SVC	98
4.2.1.1.3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΡΧΕΙΩΝ ΙΧΝΩΝ	99
4.2.1.1.4	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ (Video on Demand)	100
4.2.1.2	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΦΩΝΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET – VoIP	101
4.2.1.3	ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	104
4.2.1.3.1	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΙΣΤΟΥ (HTTP).....	104
4.2.1.3.2	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΡΧΕΙΩΝ (FTP).....	105
4.2.1.3.3	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΤΑΧΥΔΡΟΜΕΙΟΥ (E-mail).....	106
4.2.1.3.4	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	106
4.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	106
4.3.1	ΟΡΙΣΜΟΙ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	107
4.3.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΧΡΗΣΤΩΝ.....	110
4.4	ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ	111
4.4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	111
4.4.1.1	ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΩΤΟ (ΦΩΝΗ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET – ΔΕΔΟΜΕΝΑ) 112	
4.4.1.2	ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ (ΦΩΝΗ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET – ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ).....	113
4.4.2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	114
4.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	117
4.5.1	ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΩΤΟ (ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΦΩΝΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET) 117	
4.5.1.1	ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΕΝΑ ΧΡΗΣΤΗ.....	117
4.5.1.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (344m).....	118
4.5.1.3	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΙΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ (170m) ΚΑΙ ΣΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΑΥΤΗΣ (85m)	120
4.5.2	ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ (ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΦΩΝΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET – ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ).....	123
4.5.2.1	ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΕΝΑ ΧΡΗΣΤΗ.....	123
4.5.2.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (344m).....	124
4.5.2.3	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΙΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ (170m) ΚΑΙ ΣΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΑΥΤΗΣ (85m)	127
5	ΑΛΦΑΒΗΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	130

6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΩΝ ΙΧΝΩΝ.....	134
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΜΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA).....	140
7.1	ΥΠΟΔΙΑΥΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	142
7.2	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟDFMA.....	144
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑ ΧΡΗΣΤΗ.....	146
8.1	ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΩΤΟ.....	146
8.2	ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	150
8.2.1	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΦΩΝΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET.....	150
8.2.2	ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ.....	152

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Δομή Υπό-πλαisiού Κάτω Ζεύξης (Πηγή: Eklund Carl και άλλοι, 2002)	20
Σχήμα 2.2 Δομή Υπό-πλαisiού Άνω Ζεύξης (Πηγή: Eklund Carl και άλλοι, 2002)	21
Σχήμα 2.3 Δομή Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου Υποστρώματος Σύγκλισης Μετάδοσης (Πηγή: Eklund Carl και άλλοι, 2002).....	21
Σχήμα 2.4 Πρότυπο Αναφοράς Πρωτοκόλλου IEEE 802.16 (Πηγή: Bo Li και άλλοι, 2007)	24
Σχήμα 2.5 Μορφή Επικεφαλίδας MPDU Γενικής Χρήσης (από IEEE 802.16-2004Std).....	32
Σχήμα 2.6 Δομή πλαisiών φυσικού στρώματος για υλοποίηση WiMAX-TDD (Πηγή: Andrews και άλλοι, 2007).....	36
Σχήμα 2.7 Τοπολογία Δικτύου Σημείο Προς Πολλαπλά Σημεία (Πηγή: Syed Ahson και άλλοι, 2007).....	48
Σχήμα 2.8 Τοπολογία Δικτύου Πλέγματος (Πηγή: Syed Ahson και άλλοι, 2007)	49
Σχήμα 2.9 Βασικό Μοντέλο Αναφοράς Δικτύου WiMAX (Πηγή: Etemad, 2008).....	51
Σχήμα 2.10 Πλεονεκτήματα του WiMAX (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	53
Σχήμα 2.11 Σενάρια Χρήσης του WiMAX (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	57
Σχήμα 2.12 Δίκτυο Πρόσβασης Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	58
Σχήμα 2.13 Συνδεσιμότητα Αγροτικών Περιοχών (Πηγή: Wimax Forum, 2005).....	60
Σχήμα 2.14 Το WiMAX ως backhaul σε Κυψελωτά Δίκτυα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	61
Σχήμα 2.15 Το WiMAX ως backhaul Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας (Πηγή: Wimax Forum, 2005).....	62
Σχήμα 2.16 Εφαρμογή σε Τραπεζικά Δίκτυα (Πηγή: Wimax Forum, 2005).....	63
Σχήμα 2.17 Εκπαιδευτικά Δίκτυα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	64
Σχήμα 2.18 Εφαρμογή του WiMAX σε υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	65
Σχήμα 2.19 Το WiMAX στην υποστήριξη Offshore επικοινωνιών (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	67
Σχήμα 2.20 Σύνδεση Πανεπιστημίων (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	68
Σχήμα 2.21 Εφαρμογή του WiMAX σε προσωρινές κατασκευές (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	69
Σχήμα 2.22 Εφαρμογή του WiMAX σε θεματικά πάρκα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)	70
Σχήμα 3.1 Προδιατεθειμένο Μοντέλο Έγκρισης (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004).....	82
Σχήμα 3.2 Δυναμικό Μοντέλο Έγκρισης (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004)	83
Σχήμα 3.3 Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας - Αρχικοποίηση από το Σταθμό Συνδρομητή (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004).....	85
Σχήμα 3.4 Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας - Αρχικοποίηση από το Σταθμό Βάσης (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004).....	86
Σχήμα 3.5 Διαγραφή Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας - Αρχικοποίηση από το Σταθμό Συνδρομητή (Πηγή: Bashir Hayat και άλλοι, 2006).....	88
Σχήμα 4.1 Δίκτυο προσομοίωσης WiMAX	89
Σχήμα 4.2 Τοπικό Δίκτυο Χρήστη (Σενάριο 1).....	112
Σχήμα 4.3 Τοπικό Δίκτυο Χρήστη (Σενάριο 2).....	114
Σχήμα 4.4 Μέση Ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 ενός χρήστη ανά απόσταση από το Σταθμό Βάσης (Σενάριο 1)	118

Σχήμα 7.1 Λαμβανόμενα από το δέκτη σήματα σε περιπτώσεις μονού φέροντος και OFDM (Πηγή: WiMAX Forum, 2004c).....	141
Σχήμα 7.2 Δομή πλαισίου OFDM με την εισαγωγή του κυκλικού προθέματος (Πηγή: WiMAX Forum, 2006a)	141

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 Εφαρμογές του WiMAX	56
Πίνακας 4-1: Βασικά χαρακτηριστικά προσομοιωμένου δικτύου WiMAX	91
Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων εμπειρικού μοντέλου διάδοσης SUI.....	92
Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά Μοντέλου Απωλειών Διάδοσης SUI (Περιβάλλον Α) για το Δίκτυο	93
Πίνακας 4-4: Παράμετροι Πλαισίου Φυσικού Στρώματος OFDMA.....	94
Πίνακας 4-5: Αντιστοίχιση Τύπων Υπηρεσιών σε Κλάσεις Υπηρεσιών του OPNET	95
Πίνακας 4-6: Παράμετροι Κλάσεων Υπηρεσίας.....	95
Πίνακας 4-7: Χαρακτηριστικά αρχείου ιχνών της ταινίας Finding Neverland	100
Πίνακας 4-8: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας βίντεο κατ' απαίτηση.....	101
Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά Φωνής με κωδικοποίηση G729a	103
Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας πλοήγησης ιστού	105
Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας μεταφοράς αρχείων	105
Πίνακας 4-12: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.....	106
Πίνακας 4-13: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας Βάσης Δεδομένων	106
Πίνακας 4-14: Μέσος Ρυθμός Μετάδοσης Υπηρεσιών (Επίπεδο 2).....	107
Πίνακας 4-15: Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης φυσικού στρώματος για κάθε διαμόρφωση για εύρος ζώνης καναλιού 7MHz	108
Πίνακας 4-16: Κατανομή Συμβόλων OFDMA στο Πλαίσιο Φυσικού Στρώματος (Πηγή: Eira και άλλοι)	109
Πίνακας 4-17: Μέγιστοι Ρυθμοί Μετάδοσης Επιπέδου 2 (64 QAM 3/4)	109
Πίνακας 4-18: Συνολικός απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης ανά υπηρεσία (επίπεδο 2)....	110
Πίνακας 4-19: Μέγιστος θεωρητικός αριθμός χρηστών ανά σενάριο χρήσης (64QAM-3/4)	111
Πίνακας 4-20 Κλάσεις υπηρεσιών Ποιότητας Υπηρεσίας και στόχοι επίδοσης σύμφωνα με την οδηγία ITU Y.1541.....	116
Πίνακας 4-21: Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υπηρεσίας για υπηρεσίες δεδομένων	116
Πίνακας 4-22: Ρυθμός απωλειών πακέτου για υπηρεσίες βίντεο.....	117
Πίνακας 4-23: Θεωρητική και προσομοιωμένη μέγιστη ακτίνα κάλυψης	117
Πίνακας 4-24: Μέγιστοι Ρυθμοί Μετάδοσης Επιπέδου 2 (64 QAM 3/4)	118
Πίνακας 4-25: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων (Σενάριο1- 344m - 31χρήστες).....	119
Πίνακας 4-26 Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 πολλαπλών χρηστών 344m (Σενάριο 1) ...	119
Πίνακας 4-27: Χαρακτηριστικά Υπηρεσιών Δεδομένων ανά αριθμό χρηστών 344m (Σενάριο 1).....	120

Πίνακας 4-29: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 31 χρηστών (Σενάριο1- 170m – 85m)	121
Πίνακας 4-30: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 30 χρηστών (Σενάριο1- 170m – 85m)	122
Πίνακας 4-31: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 25 χρηστών (Σενάριο1- 170m – 85m)	123
Πίνακας 4-32: Μέση Ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 ενός χρήστη ανά απόσταση από το Σταθμό Βάσης (Σενάριο 2)	124
Πίνακας 4-33: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων (Σενάριο2- 344m - 3χρήστες).....	125
Πίνακας 4-34: Μέσος Ρυθμός Απωλειών πακέτου ανά ροή (Υπηρεσία Βίντεο 3 χρήστες 344m)	125
Πίνακας 4-35 Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 344m πολλαπλών χρηστών (Σενάριο 2) ..	126
Πίνακας 4-36: Χαρακτηριστικά Υπηρεσιών Δεδομένων ανά αριθμό χρηστών 344m (Σενάριο 2).....	126
Πίνακας 4-37: Μέσος Ρυθμός Απωλειών Πακέτου ανά ροή (344m- 2χρήστες - 1 χρήστης)	126
Πίνακας 4-38: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 3 χρηστών (Σενάριο2- 170m – 85m)	127
Πίνακας 4-39: Μέσος Ρυθμός Απωλειών πακέτου ανά ροή (Υπηρεσία Βίντεο- 3 χρήστες 170m-85m).....	128
Πίνακας 4-40: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 2 χρηστών (Σενάριο 2 - 170m – 85m)	128
Πίνακας 4-41: Μέσος Ρυθμός Απωλειών πακέτου ανά ροή (Υπηρεσία Βίντεο- 2 χρήστες 170m-85m).....	129
Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για συστήματα OFDMA	145

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία εξάπλωση του διαδικτύου τα τελευταία ειδικά χρόνια, απαιτεί τη συνεχή αύξηση του παρεχόμενου εύρους ζώνης στον τελικό καταναλωτή και μάλιστα σε οποιοδήποτε σημείο και εάν αυτός βρίσκεται. Η σταθερή ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση (**Fixed Broadband Wireless Access – FBWA**) αποτελεί μια εναλλακτική λύση των υπαρχόντων τεχνολογιών DSL και των συστημάτων οπτικών ινών, καθώς μπορούν να υποστηρίξουν αξιόπιστα υπηρεσίες που απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Η στροφή των εταιρειών παροχής διαδικτύου (Internet Service Providers - ISPs) προς την τεχνολογία της ψηφιακής γραμμής συνδρομητή (Digital Subscriber Line - DSL), η οποία εμφανίστηκε ως λύση τελευταίου μιλίου (Last Mile Solution), εμφανίζει ορισμένα μειονεκτήματα τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Αρχικώς, χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες χάλκινες υποδομές τηλεφωνικών γραμμών με συνέπεια να υπάρχουν περιορισμοί στην απόδοση, ενώ ορισμένες αραιοκατοικημένες και απομακρυσμένες περιοχές δεν παρέχουν ελκυστικό αριθμό εν δυνάμει πελατών προς τις επιχειρήσεις ώστε αυτές να πραγματοποιήσουν την επένδυση στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Η χρήση συστημάτων οπτικών ινών αντί των χάλκινων καλωδίων, ώστε να επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης, έχουν υψηλό κόστος και χρόνο εγκατάστασης ως αποτέλεσμα της φυσικής δυσχέρειας κατά την εγκατάσταση, ενώ και σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή είναι τεχνικώς αδύνατη.

Οι τεχνολογίες σταθερής ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης αποτελούν μια ιδιαίτερα ικανοποιητική οικονομικά λύση στο πρόβλημα του τοπικού βρόχου, ιδιαίτερα σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές λόγω της απουσίας ενσύρματης πρόσβασης σε κάποιο τοπικό κέντρο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το μέσο κόστος ενός παρόχου για την κάλυψη μιας περιοχής 200 τετραγωνικών χιλιομέτρων με χρήση τεχνολογίας ADSL απαιτούνται 11 εκατομμύρια δολάρια, ενώ το αντίστοιχο μέγεθος για ασύρματη κάλυψη είναι 450 χιλιάδες δολάρια! Επιπλέον, μια παράμετρος άξια αναφοράς για τα συγκεκριμένα δίκτυα είναι ο μικρός χρόνος και η απλότητα εγκατάστασης τους συγκρινόμενα με οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία δικτύων πρόσβασης. Η εγκατάσταση ενός σταθμού βάσης είναι το ελάχιστο βήμα που απαιτείται για να ξεκινήσει η παροχή υπηρεσίας με συνέπεια τα συστήματα αυτά να καθίστανται επικερδή για τους παρόχους σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Τέλος, τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης παρέχουν τη δυνατότητα της επεκτασιμότητας μέσω της ανάπτυξης σε τομείς, γεγονός που είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό για τις επιχειρήσεις οι οποίες μπορούν να παρέχουν αρχικά την υπηρεσία σε μικρή κλίμακα και στη συνέχεια να την επεκτείνουν κατά το δοκούν.

Τα δίκτυα ασύρματης σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης είναι εν γένει κυψελοειδή, είναι χωρισμένα σε τομείς και αποτελούνται από δυο βασικά τμήματα. Το τμήμα που αναφέρεται στον τελικό συνδρομητή, περιλαμβάνει τον εξοπλισμό του συνδρομητή (Customer Premises Equipment – CPE). Το τμήμα που αναφέρεται στον πάροχο

αποτελεί το Σταθμό Βάσης (Base Station – BS), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία με τον εξοπλισμό των πελατών στη συγκεκριμένη περιοχή και την προώθηση της κίνησης τους στα κατάλληλα δίκτυα κορμού.

Τα συγκεκριμένα δίκτυα δίνουν τη δυνατότητα για πρόσβαση σε πολλούς συνδρομητές χρησιμοποιώντας περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, καθώς επιτυγχάνεται μεγάλη φασματική απόδοση με χρήση της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Ακόμη, πρέπει να είναι σχεδιασμένα κατάλληλα ώστε να μπορούν να εξασφαλίσουν αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία, με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. (Βασδάρης και άλλοι, 2006), (Κανάτας και άλλοι, 2008 σελ 587), (Βενιέρης, 2007, σελ 277-278)

2 ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μετά την κυβελωτή τηλεφωνία και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, τα συστήματα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης αποτέλεσαν την επόμενη επανάσταση στο χώρο των ασυρμάτων επικοινωνιών. Σε αυτά πλαίσια ξεκίνησαν προσπάθειες προτυποποίησης ασυρμάτων μητροπολιτικών δικτύων (Wireless Metropolitan Networks - WMANs) από οργανισμούς όπως το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) και το Ινστιτούτο Ευρωπαϊκών Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute – ETSI). Στη συγκεκριμένη διπλωματική θα ασχοληθούμε με το πρότυπο IEEE 802.16, για το οποίο χρησιμοποιείται ο όρος **WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)**. Το προαναφερθέν πρότυπο αποτελεί αντικείμενο μελέτης δυο μεγάλων οργανισμών, του IEEE και του WiMAX Forum.

Η **ομάδα εργασίας 802.16 του IEEE**, η οποία ιδρύθηκε το 1999, έχει αναπτύξει και εκδώσει διάφορες εκδόσεις προτύπων ραδιοεπαφής (air-interface) για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα με έμφαση στο φυσικό μέσο και στο υπόστρωμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control – MAC). Τα πρότυπα IEEE 802.16 ορίζουν τη δομή των λειτουργιών του φυσικού στρώματος και του στρώματος ζεύξεως δεδομένων που εμφανίζονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού συνδρομητή. Τα ανώτερα στρώματα δεν καθορίζονται από το συγκεκριμένο πρότυπο. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά του 802.16 για το φυσικό στρώμα και το στρώμα MAC, αφήνουν πολλές επιλογές και επιτρέπουν διάφορες υλοποιήσεις για τα χαρακτηριστικά του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού (Mobile Station – MS), τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε ασύμβατα προϊόντα εάν δεν ληφθεί ειδική μέριμνα.

Αυτός είναι ένας λόγος που οδήγησε στη δημιουργία του **WiMAX Forum**, το οποίο ιδρύθηκε το 2003 για να προωθήσει την ανάπτυξη του WiMAX ως μια καινούργια ευρυζωνική τεχνολογία πρόσβασης βασισμένη στα πρότυπα 802.16. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος έγιναν προσπάθειες εισαγωγής τεχνικών χαρακτηριστικών για να συμπληρωθεί η προτυποποίηση του 802.16, ορίζοντας ελάχιστες απαιτήσεις διαλειτουργικότητας, προφίλ συστημάτων, καθώς επίσης και συμμορφούμενα με το πρωτόκολλο χαρακτηριστικά ελέγχου των συσκευών και των σταθμών βάσης, που αποτελούν τη βάση για την πιστοποίηση των συσκευών σε ευρεία βιομηχανική κλίμακα.. Εκτός της ανάπτυξης χαρακτηριστικών ελέγχου, το WiMAX Forum έχει επιπλέον ιδρύσει εργαστήρια πιστοποίησης και διαχειρίζεται τον έλεγχο συμμόρφωσης και διαλειτουργικότητας των πιστοποιημένων WiMAX προϊόντων.. Η διαλειτουργικότητα επεκτείνεται πέραν της ραδιοεπαφής και στον ορισμό αρχιτεκτονικών από δικτύου άκρο σε άκρο και πρωτοκόλλων που βασίζονται στις προτυποποιήσεις του IEEE 802.16. Ιδρυτικά μέλη του WiMAX Forum

αποτελούν εταιρείες όπως Intel, Alvarion, ATT, Array Com, Nortel, Motorola, Samsung κ.α. ενώ σήμερα αριθμεί πάνω από 500 μέλη στη λίστα των οποίων ανήκουν μεγάλα ονόματα όπως Nokia, Vodafone, Cisco Systems και Verizon. (Βασδάρης και άλλοι, 2006), (Etemad, 2008)

2.2 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16-2001

Η πρώτη εκδοχή του προτύπου, ονομάζεται 802.16-2001 και εκδόθηκε για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 2002. Η συγκεκριμένη έκδοση προδιαγράφει ένα σύστημα που λειτουργεί σε συχνότητες 10 - 66 GHz μόνο σε συνθήκες οπτικής επαφής εξαιτίας των ισχυρών απωλειών που εμφανίζονται στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας.

Όταν αναφερόμαστε σε μετάδοση οπτικής επαφής (Line of Sight – LOS) εννοούμε μια ζεύξη που το σήμα ταξιδεύει διαμέσου ενός άμεσου και ανεμπόδιστου μονοπατιού από τον πομπό στο δέκτη. Μια ζεύξη οπτικής επαφής απαιτεί το μεγαλύτερο τμήμα της πρώτης ζώνης Fresnel να είναι καθαρό από εμπόδια, ειδικά η ισχύς του σήματος εμφανίζει ισχυρή εξασθένηση. Το ποσοστό της πρώτης ζώνης Fresnel που απαιτείται να είναι καθαρό, εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. (WiMAX Forum, 2004c)

2.2.1 ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Η έκδοση αυτή του προτύπου προδιαγράφει ραδιοεπαφή μονής φέρουσας (single carrier) με την ονομασία **WirelessMAN-SC**, εύρος ζώνης καναλιού 20 και 25 MHz στις ΗΠΑ και 28MHz στην Ευρώπη με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 134.4Mbps για κανάλι 28MHz. Οι χρήστες που μπορούν να υποστηριχθούν πρέπει να είναι σταθεροί, ενώ η ακτίνα μιας τυπικής κυψέλης εκτείνεται από 2 έως 5 km.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου που υποστηρίζεται είναι σημείου προς πολλαπλά σημεία, από το **Σταθμό Βάσης (Base Station – BS)** προς τους διαφόρους **Σταθμούς Συνδρομητή (Subscriber Stations – SSS)**. Για την εξυπηρέτηση της προαναφερθείσας αρχιτεκτονικής η τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται στην **κάτω ζεύξη (downlink)** είναι αυτή της Διαίρεσης Χρόνου (**Time Division Multiplexing – TDM**). Ο Σταθμός Βάσης αποστέλλει ένα TDM σήμα και ανατίθενται σειριακά χρονοσχισμές (timeslots) σε κάθε σταθμό συνδρομητή ξεχωριστά. Όσον αφορά στην **άνω ζεύξη (uplink)**, η Πολλαπλή Πρόσβαση των σταθμών συνδρομητή στο σταθμό βάσης γίνεται με τη μέθοδο της Διαίρεσης Χρόνου (**Time Division Multiple Access – TDMA**), όπου και χρησιμοποιείται μια κοινή συχνότητα και οι σταθμοί συνδρομητή εκπέμπουν σε διαφορετικές χρονοσχισμές ο καθένας. Η μέθοδος αμφιδρόμησης που είναι διαθέσιμη προς χρήση είναι τόσο η Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Χρόνου (**Time Division Duplexing – TDD**) όσο και η Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Συχνότητας (**Frequency Division Duplexing – FDD**). Στην πρώτη περίπτωση τόσο η άνω (uplink) όσο και η κάτω ζεύξη (downlink)

μοιράζονται ένα κοινό κανάλι, στο οποίο όμως δεν μπορούν να εκπέμψουν ταυτόχρονα. Στην FDD αντίστοιχα χρησιμοποιούνται διαφορετικά κανάλια για τις δυο ζεύξεις, όπου μπορούν να εκπέμψουν ταυτόχρονα. Σχετικά με τη διαμόρφωση και την κωδικοποίηση, η ραδιοεπαφή εμφανίζει προσαρμοστικότητα στις συνθήκες του διαύλου καθώς τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανανεώνονται από το σταθμό συνδρομητή σε κάθε εκπεμπόμενο πλαίσιο, ανάλογα με τις συνθήκες του διαύλου ώστε να μεγιστοποιείται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για ένα δεδομένο σηματοθορυβικό λόγο. Οι μέθοδοι διαμόρφωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη είναι η Εγκάρσια Ψηφιακή Μεταλλαγή Φάσης (Quadrature Phase-Shift Keying – QPSK), η Ψηφιακή Εγκάρσια Διαμόρφωση Πλάτους 16 σημείων (16-QAM – Quadrature Amplitude Modulation) και προαιρετικά η 64-QAM. Ο συνδυασμός των παραμέτρων της ψηφιακή διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται, καθορίζουν ένα προφίλ εκπομπής (burst profile). Τέλος η εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC) υλοποιείται με χρήση του Reed-Solomon GF(256), με μεταβλητό μέγεθος μπλοκ και ικανοτήτων διόρθωσης λαθών. (Eklund Carl και άλλοι, 2002), (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 597-598)

2.2.1.1 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

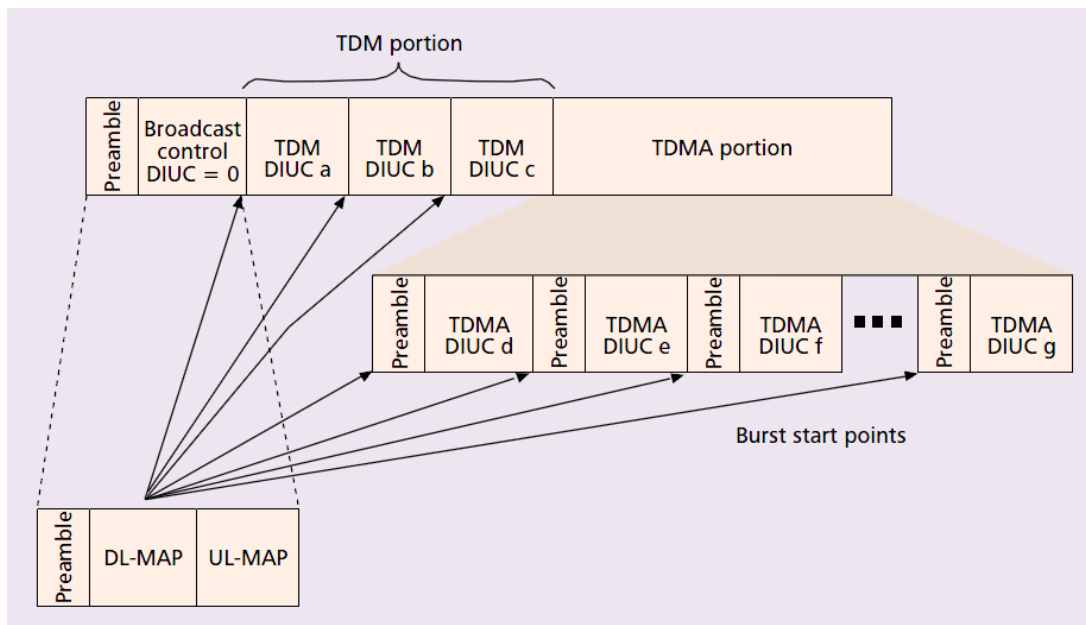
Το φυσικό στρώμα στο πρότυπο IEEE 802.16-2001 χωρίζεται σε δυο υποστρώματα, το **υπόστρώμα που εξαρτάται από το φυσικό μέσο** και το **υπόστρώμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence Sublayer – TC)** που διαχειρίζεται τις ανώτερες λειτουργίες και επικοινωνεί με το επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC).

Το πλαίσιο του φυσικού στρώματος που χρησιμοποιείται έχει διάρκεια 0.5, 1 ή 2 ms και χωρίζεται σε σχισμές για την κατανομή του εύρους ζώνης και τον προσδιορισμό των μεταβολών του φυσικού στρώματος. Κάθε σχισμή έχει οριστεί να μεταφέρει 4-QAM σύμβολα. Όπως είναι λογικό υπάρχουν δυο είδη «υπό-πλαίσια», ένα για την κάτω ζεύξη και ένα για την πάνω αντίστοιχα. Στην TDD εκδοχή του φυσικού στρώματος, τα δυο υπό-πλαίσια μεταδίδονται στην ίδια φέρουσα συχνότητα. Στην FDD εκδοχή τα δυο πλαίσια εκπέμπονται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικές συχνότητες.

Το **υπό-πλαίσιο κάτω ζεύξης (downlink sub-frame)** ξεκινά με ένα τμήμα ελέγχου του πλαισίου όπου περιλαμβάνεται ένα μήνυμα DL-MAP για το συγκεκριμένο υπό-πλαίσιο, καθώς επίσης και ένα μήνυμα UL-MAP για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα στο μέλλον. Το προαναφερθέν μήνυμα DL-MAP ορίζει πότε προκύπτουν μεταβολές του φυσικού στρώματος, δηλαδή αλλαγές στα σχήματα κωδικοποίησης και στην Εμπρόσθια Διόρθωση Λαθών (Forward Error Correction – FEC), μέσα στο υπό-πλαίσιο. Τα δεδομένα της κάτω ζεύξης μεταδίδονται σε κάθε σταθμό συνδρομητή μέσω ενός συνεννοημένου προφίλ εκπομπής.

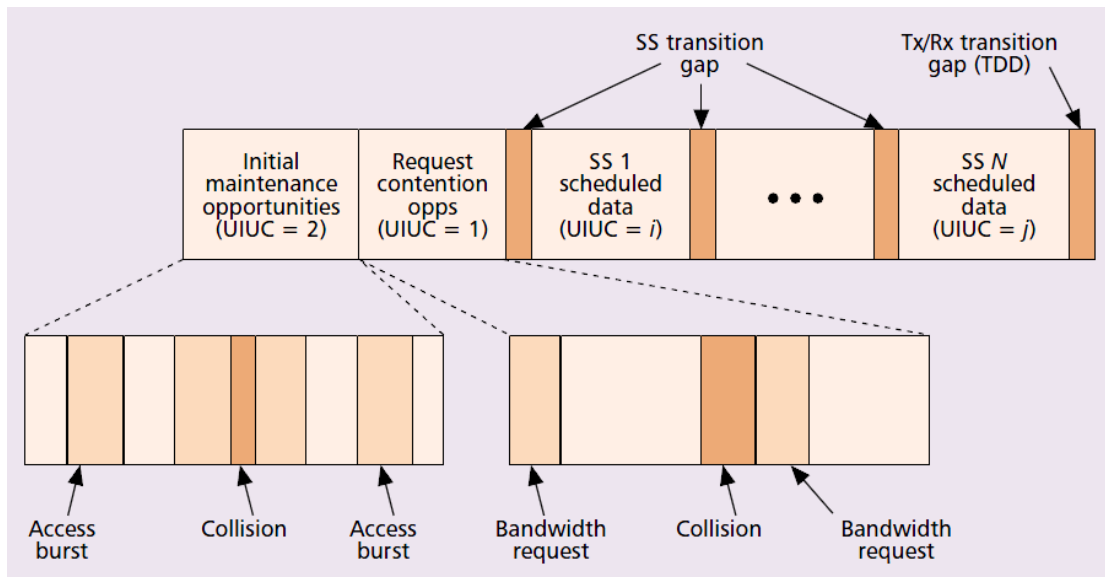
Αμέσως μετά το τμήμα ελέγχου, το υπό-πλαίσιο περιέχει και ένα τμήμα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM) και σε συστήματα

Αμφιδρόμησης Διάρθρωσης Συχνότητας (Frequency Division Duplexing – FDD) συνήθως ακολουθεί ένα τμήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαιρέσης Χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) που προσθέτει μια επιπλέον επικεφαλίδα (preamble) στην αρχή κάθε νέου Προφίλ Εκπομπής (burst profile). Εξαιτίας των διαφόρων απαιτήσεων για εύρος ζώνης για την πλειάδα των παρεχομένων υπηρεσιών, το πλήθος και τη διάρκεια των προφίλ εκπομπής καθώς επίσης και την παρουσία ή μη του τμήματος TDMA διαφέρει για κάθε υπό-πλαίσιο. Καθώς ο παραλήπτης (Σταθμός Συνδρομητή) καθορίζεται στις επικεφαλίδες του στρώματος Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC) και όχι από το μήνυμα DL-MAP, οι σταθμοί συνδρομητών επεξεργάζονται όλα τα υπό-πλαίσια κάτω ζεύξης που μπορούν να λάβουν. Για τους πλήρως αμφιδρόμους σταθμούς συνδρομητή (Full Duplex SS), ως ικανότητα λήψης θεωρείται το σύνολο των προφίλ εκπομπής που έχουν ίση ή μεγαλύτερη ευρωστία, δηλαδή μεγαλύτερη ικανότητα διόρθωσης λαθών, από αυτή που έχουν διαπραγματευθεί με το σταθμό βάσης.



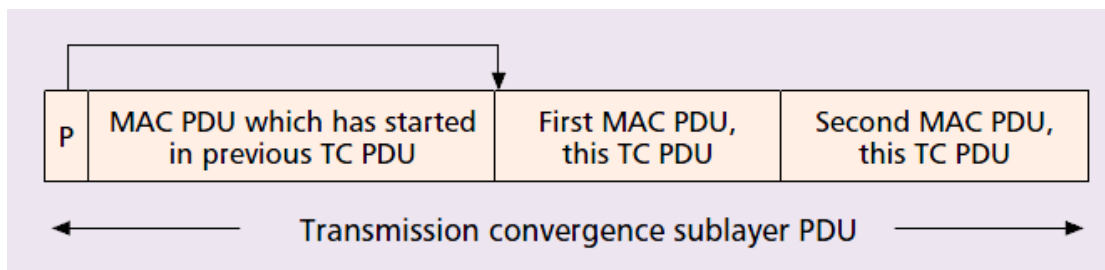
Σχήμα 2.1 Δομή Υπό-πλαισίου Κάτω Ζεύξης (Πηγή: Eklund Carl και άλλοι, 2002)

Στο υπό-πλαίσιο της άνω ζεύξης, το μήνυμα UL-MAP εκχωρεί εύρος ζώνης στο συγκεκριμένο σταθμό συνδρομητή. Οι σταθμοί συνδρομητή εκπέμπουν σύμφωνα με το εκχωρημένο εύρος ζώνης, χρησιμοποιώντας το προφίλ εκπομπής που έχει ορισθεί από τον κώδικα διαστήματος χρήσης (Interval Usage Code - UIUC) στο μήνυμα UL-MAP.



Σχήμα 2.2 Δομή Υπό-πλασιού Άνω Ζεύξης (Πηγή: Eklund Carl και άλλοι, 2002)

Μεταξύ του φυσικού στρώματος και του Στρώματος Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC) βρίσκεται το Υπόστρωμα Σύγκλισης Μετάδοσης (Transmission Convergence Sublayer – TC). Λειτουργία του συγκεκριμένου υποστρώματος είναι ο μετασχηματισμός των μεταβλητού μεγέθους Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Units - PDUs) του στρώματος ελέγχου πρόσβασης, σε σταθερού μεγέθους μπλοκ Εμπρόσθιας Διόρθωσης Λαθών (Forward Error Correction – FEC) για κάθε ριπή. Για το λόγο αυτό οι Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης ενσωματώνονται εξολοκλήρου στα μπλοκ Εμπρόσθιας Διόρθωσης Λαθών. Παράλληλα περιλαμβάνουν έναν δείκτη που υποδεικνύει που ξεκινά η επόμενη MAC-PDU εντός του FEC-μπλοκ, επιτρέποντας τον επανασυγχρονισμό με την επόμενη MAC-PDU στην περίπτωση που το προηγούμενο μπλοκ FEC είχε ανεπανόρθωτα λάθη. Ο ρόλος του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς, χωρίς αυτό, ο λαμβάνων Σταθμός Βάσης ή Συνδρομητή, μπορεί πιθανώς να χάσει το υπόλοιπο της μετάδοσης εάν ένα ανεπανόρθωτο λάθος προκύψει σε ένα μόνο bit. (Eklund Carl και άλλοι, 2002)



Σχήμα 2.3 Δομή Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου Υποστρώματος Σύγκλισης Μετάδοσης (Πηγή: Eklund Carl και άλλοι, 2002)

2.2.2 ΣΤΡΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ- MAC

Το στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC) του πρωτοκόλλου IEEE 802.16 σχεδιάστηκε για ασύρματες ευρυζωνικές εφαρμογές Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία. Καλύπτει την ανάγκη για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τόσο για την άνω (προς το Σταθμό Βάσης), όσο και για την κάτω ζεύξη (από το Σταθμό Βάσης) και μάλιστα κάνοντας μια πολύ αποδοτική χρήση του φάσματος. Οι αλγόριθμοι ανάθεσης πρόσβασης και εύρους ζώνης πρέπει να υποστηρίζουν εκατοντάδες τερματικών ανά κανάλι, με πιθανότητα πολλαπλοί τελικοί χρήστες να μοιράζονται ένα τερματικό. Οι υπηρεσίες που απαιτούνται από τους εν λόγω τελικούς χρήστες ποικίλλουν ως προς τη φύση τους και μπορεί να περιλαμβάνουν φωνή και δεδομένα με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM), συνδεδεσιμότητα IP και VoIP. Για την υποστήριξη αυτής της πληθώρας των υπηρεσιών, το στρώμα MAC του 802.16 πρέπει να μπορεί να φιλοξενεί τόσο συνεχή (continuous) όσο και κίνηση κατά ριπές (bursty traffic). Ακόμη, αυτές οι υπηρεσίες περιμένουν ανάθεση ποιότητας υπηρεσίας ανάλογα με τον τύπο της κυκλοφορίας. Έτσι λοιπόν, το στρώμα MAC διαθέτει ένα ευρύ φάσμα τύπων υπηρεσίας σε αναλογία με τις κατηγορίες υπηρεσίας του ATM, όπως και καινούργιες κατηγορίες όπως ο εγγυημένος ρυθμός πλαισίου (Guaranteed Frame Rate – GFR).

Το στρώμα MAC πρέπει επίσης να υποστηρίζει μια ποικιλία απαιτήσεων για backhaul, περιλαμβάνοντας τόσο τον Ασύρματο Τρόπο Μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode – ATM) όσο και πρωτόκολλα βασισμένα σε πακέτα. Τα υποστρώματα σύγκλισης χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση της κίνησης από διάφορα μέσα μεταφοράς σε ένα αρκετά ευέλικτο στρώμα MAC που μπορεί να μεταφέρει κάθε τύπο κυκλοφορίας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται πολλές φορές η μεταφορά της κίνησης να γίνεται αποδοτικότερα από τον συνηθισμένο μηχανισμό μεταφοράς.

Ο μηχανισμός αίτησης και εκχώρησης (request - grant mechanism) έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι κλιμακώσιμος, αποδοτικός και αυτό-διορθούμενος. Το σύστημα πρόσβασης του πρωτοκόλλου δεν χάνει την αποδοτικότητα του ακόμη και όταν έχει να χειριστεί πολλαπλές συνδέσεις και επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας ανά τερματικό, και ένα μεγάλο αριθμό στατιστικά πολυπλεγμένων χρηστών. Εκμεταλλεύόμενο τη μεγάλη ποικιλία μηχανισμών αίτησης, ισορροπεί μεταξύ της σταθερότητας της πρόσβασης χωρίς σύνδεση (connectionless) και της αποδοτικότητας της λειτουργίας προσανατολισμένης στη σύνδεση (connection oriented).

Ενώ η εκτεταμένη κατανομή εύρους ζώνης και οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας περιγράφονται στο πρότυπο, οι λεπτομέρειες του χρονοπρογραμματισμού και της διαχείρισης κρατήσεων έχουν αφηθεί ελεύθερες και έτσι οι κατασκευαστές έχουν τη δυνατότητα να διαφοροποιήσουν τον εξοπλισμό τους. Μαζί με το θεμελιώδες καθήκον της ανάθεσης εύρους ζώνης και μεταφοράς δεδομένων, το στρώμα MAC περιλαμβάνει ένα **υπόστρωμα ασφαλείας** που παρέχει αυθεντικοποίηση της πρόσβασης και εγκατάσταση σύνδεσης για την αποφυγή της κλοπής υπηρεσίας, και

επιπροσθέτως ανταλλαγή κλειδιών και κρυπτογράφηση δεδομένων (Marks και άλλοι, 2002), (Eklund και άλλοι, 2002).

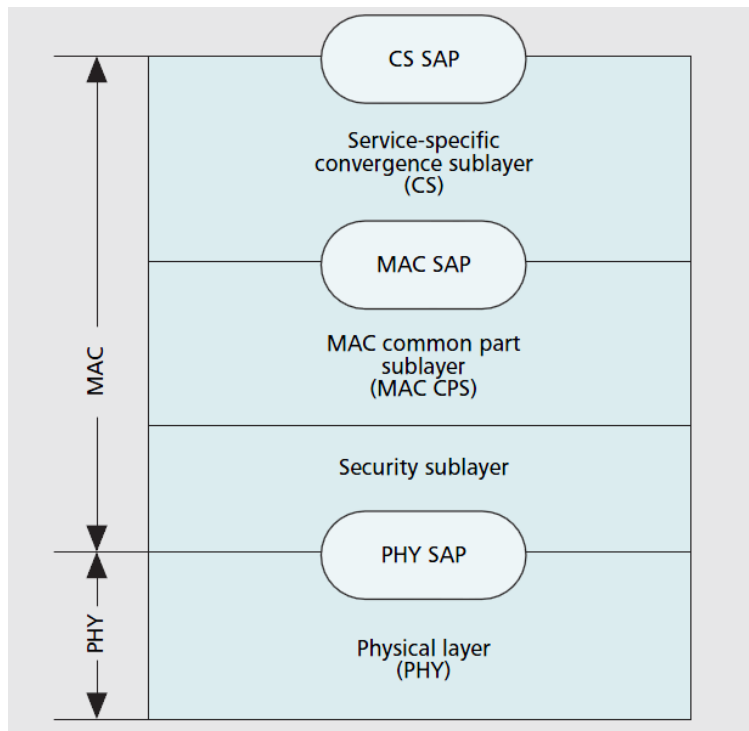
2.2.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Ο ρόλος του στρώματος MAC είναι η διασύνδεση του φυσικού στρώματος (PHY) με τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου. Τα ανώτερα στρώματα στέλνουν δεδομένα προς το στρώμα MAC οργανωμένα σε πακέτα που ονομάζονται **Μονάδες Δεδομένων Υπηρεσιών MAC (MAC Service Data Units- MAC SDUs)** και με βάση αυτές σχηματίζονται πακέτα που τα στέλνει στο φυσικό στρώμα και ονομάζονται **Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου MAC (MAC Protocol Data Units – MAC PDUs)**. Προκειμένου το στρώμα MAC να μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης και επιπλέον να είναι συμβατό με μελλοντικά πρωτόκολλα, η δομή και το μέγεθος των πακέτων PDU μπορεί να μεταβάλλονται. Για παράδειγμα πολλές PDUs του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους μπορούν να συνενώνονται σε μια μεγαλύτερη PDU, με κοινή επικεφαλίδα, ώστε να αποφεύγεται η διακίνηση μεγάλου όγκου πληροφοριών σηματοδοσίας στο φυσικό στρώμα. Επίσης, πολλές SDUs προερχόμενες από την ίδια υπηρεσία υψηλότερου στρώματος, μπορούν να συνενώνονται σε μια PDU, προκειμένου να αποφεύγονται οι πολλές επικεφαλίδες στο στρώμα MAC.

Ως Σύνδεση (Connection) ορίζεται μια ομοιοκατευθυντική αντιστοίχιση μεταξύ ομότιμων στρωμάτων MAC διαμέσου της ραδιοζεύξης. Η κάθε σύνδεση προσδιορίζεται μοναδικά από το αναγνωριστικό της σύνδεσης (Connection ID – CID). (Marks και άλλοι, 2002)

2.2.2.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ MAC

Το στρώμα MAC διακρίνεται σε επιμέρους υποστρώματα ώστε να είναι πιο λειτουργικό. Έτσι λοιπόν περιλαμβάνει ένα εξαρτώμενο από την υπηρεσία **Υπόστρωμα Σύγκλισης (Service-Specific Convergence Sublayer – CS)**, που διασυνδέεται με τα ανώτερα στρώματα και είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των εξωτερικών δεδομένων που φτάνουν στο στρώμα MAC από τα **Σημεία Πρόσβασης Υπηρεσίας (Service Access points – SAPs)** με το ανώτερο στρώμα. Κάτω από το υπόστρωμα σύγκλισης βρίσκεται το **Υπόστρωμα Κοινού Τμήματος (Common Part Sublayer – CPS)** που είναι υπεύθυνο για τις βασικές λειτουργίες του επιπέδου MAC. Τέλος κάτω από το Υπόστρωμα Κοινού Τμήματος υπάρχει το **Υπόστρωμα Ασφάλειας (Security Sublayer- SS)** (Eklund και άλλοι, 2002), (Κανάτας και άλλοι, 2008)



Σχήμα 2.4 Πρότυπο Αναφοράς Πρωτοκόλλου IEEE 802.16 (Πηγή: Bo Li και άλλοι, 2007)

2.2.2.2.1 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΟ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ

Το πρότυπο IEEE 802.16 ορίζει δυο διαφορετικά εξαρτώμενα από την υπηρεσία υποστρώματα σύγκλισης, για την αντιστοίχιση υπηρεσιών από και προς συνδέσεις του στρώματος MAC. Το υπόστρωμα σύγκλισης ATM ορίζεται για υπηρεσίες ATM και το υπόστρωμα σύγκλισης πακέτου που ορίζεται για διασύνδεση με πρωτόκολλα βασισμένα στη μετάδοση πακέτων όπως το IP (v4 και v6), το Ethernet και το VLAN. Τα πρότυπα IEEE 802.16 υποστηρίζουν και τα δυο είδη πρωτοκόλλων, αλλά το WiMAX Forum υποστηρίζει μόνο τα πρωτόκολλα που είναι βασισμένα σε πακέτα. Η βασική λειτουργία του υποστρώματος είναι η αντιστοίχιση των SDUs στις κατάλληλες συνδέσεις MAC, διατηρώντας ή ενεργοποιώντας την ποιότητα υπηρεσίας και ενεργοποιώντας την ανάθεση εύρους ζώνης. Η αντιστοίχιση παίρνει διάφορες μορφές ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας.

Προκειμένου να εξοικονομηθούν ραδιοπόροι, είναι δυνατόν να συμπιέζονται τα επαναλαμβανόμενα στοιχεία της επικεφαλίδας των SDUs, μέσω μιας ειδικής διαδικασίας που λέγεται Συμπύεση Στοιχείων Επικεφαλίδας (Header Suppresion). Για παράδειγμα εάν οι SDUs που φθάνουν στο στρώμα CS του MAC είναι πακέτα IP, τότε στην επικεφαλίδα κάθε πακέτου περιλαμβάνονται οι διευθύνσεις του αποστολέα και του παραλήπτη του μηνύματος και τα στοιχεία αυτά δεν αλλάζουν μεταξύ διαδοχικών πακέτων. Έτσι λοιπόν μπορούν να αφαιρούνται πριν την αποστολή των δεδομένων. Η υποστήριξη της συγκεκριμένης λειτουργίας στα συστήματα WiMAX

είναι προαιρετική αλλά τα περισσότερα δίκτυα την παρέχουν, αφού αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα.

2.2.2.2.2 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΚΟΙΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ

Γενικά το στρώμα MAC του IEEE 802.16 σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει μια αρχιτεκτονική Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία με ένα κεντρικό Σταθμό Βάσης να χειρίζεται συγχρόνως πολλαπλούς ανεξαρτήτους τομείς. Το MAC IEEE 802.16 είναι προσανατολισμένο σε σύνδεση. Όλες οι υπηρεσίες, ακόμη και οι εκείνες που εγγενώς λειτουργούν χωρίς σύνδεση, αντιστοιχίζονται σε μια σύνδεση. Το γεγονός αυτό παρέχει ένα μηχανισμό αίτησης εύρους ζώνης, αντιστοίχισης ποιότητας υπηρεσίας και παραμέτρων κυκλοφορίας, μεταφοράς και δρομολόγησης δεδομένων στο κατάλληλο υπόστρωμα σύγκλισης και άλλων ενεργειών που συνδέονται με τους συμβατικούς όρους της υπηρεσίας. Κάθε σύνδεση χαρακτηρίζεται από ένα αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection ID –CID) μήκους 16 bits και μπορεί να απαιτεί συνεχή εκχώρηση εύρους ζώνης μετά από αίτηση. Η σύνδεση περιγράφεται με τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, ώστε αν είναι δυνατή η αποτελεσματικότερη διαχείριση από το στρώμα MAC, σε ότι αφορά την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τον τερματισμό της.

Κάθε Σταθμός Συνδρομητή έχει μια σταθερή διεύθυνση MAC 48 bits, αλλά κυρίως λειτουργεί ως αναγνωριστικό εξοπλισμού, καθώς το ρόλο των διευθύνσεων επιτελούν τα αναγνωριστικά των συνδέσεων. Και κάθε Σταθμός Βάσης με τη σειρά του έχει ένα αναγνωριστικό 48 bits (Base Station ID), το οποίο όμως δεν αποτελεί διεύθυνση MAC. Κατά την είσοδο του στο δίκτυο, στο Σταθμό Συνδρομητή ανατίθενται τρεις σύνδεσης διαχείρισης σε κάθε κατεύθυνση. Αυτές οι τρεις συνδέσεις σχετίζονται με τα τρία διαφορετικά επίπεδα απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας που χρησιμοποιούνται από διαφορετικά επίπεδα διαχείρισης. Η πρώτη από αυτές είναι η βασική (basic) σύνδεση, που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μικρών MAC και μηνυμάτων έλεγχου ραδιοζεύξης (Radio Link Control – RLC). Η κύρια (primary) σύνδεση διαχείρισης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μεγαλύτερων, μηνυμάτων με αντοχή στην καθυστέρηση όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση και τη αυθεντικοποίηση της σύνδεσης. Η δευτερεύουσα (secondary) σύνδεση διαχείρισης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων των προτύπων διαχείρισης, όπως μηνύματα DHCP, TFTP και SNMP. Επιπλέον των συνδέσεων διαχείρισης, ανατίθενται στους Σταθμούς Συνδρομητή συνδέσεις μεταφοράς (Transfer Connections) για τις υπηρεσίες του υπογραφέντος συμβολαίου. Οι συνδέσεις μεταφοράς είναι και προς τις δυο κατευθύνσεις (unidirectional) για την υποστήριξη διαφορετικών ποιοτήτων υπηρεσίας και παραμέτρων κίνησης τόσο στην άνω όσο και στη κάτω ζεύξη.

Το στρώμα MAC κρατά επιπλέον συνδέσεις για άλλους σκοπούς. Μια σύνδεση κρατείται για ευρυεκπομπή στην κάτω ζεύξη (broadcast) καθώς και για ευρυεκπομπή

σηματοδοσίας βασισμένη στις ανάγκες εύρους ζώνης των Σταθμών Συνδρομητή. Επιπλέον συνδέσεις κρατούνται επίσης και για πολυεκπομπή (multicast).

Η Μονάδα Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Unit - PDU) είναι η μονάδα δεδομένων που ανταλλάσσεται μεταξύ των στρωμάτων MAC του Σταθμού Βάσης και του Σταθμού Συνδρομητή. Η MAC PDU περιλαμβάνει μια σταθερού μήκους κεφαλή (header), ένα χρήσιμο τμήμα (payload) μεταβλητού μήκους και ένα προαιρετικό τμήμα ελέγχου κυκλικού πλεονασμού (CRC). Ορίζονται δυο ειδών κεφαλές, η γενική κεφαλή και η κεφαλή αίτησης εύρους ζώνης.

Εκτός της PDU αίτησης εύρους ζώνης που δεν περιλαμβάνει χρήσιμο τμήμα, οι PDU περιλαμβάνουν είτε μηνύματα διαχείρισης στρώματος MAC είτε δεδομένα υποστρώματος σύγκλισης.

Υπάρχουν τρεις τύποι υποεπικεφαλίδας (subheader) MAC. Η **υποεπικεφαλίδα διαχείρισης εκχώρησης (grant management subheader)** χρησιμοποιείται από το Σταθμό Συνδρομητή για τη μετάδοση των αναγκών του για εύρος ζώνης στο Σταθμό Βάσης. Η **υποεπικεφαλίδα κατακερματισμού (fragmentation subheader)** περιλαμβάνει πληροφορίες που υποδεικνύουν την παρουσία και τον προσανατολισμό τυχόντος fragment μιας SDU. Η **υποεπικεφαλίδα συσκευασίας (packing subheader)** χρησιμοποιείται για να υποδείξει την συνένωση πολλαπλών SDU σε μια PDU. Οι υποεπικεφαλίδες διαχείρισης εκχώρησης και κατακερματισμού μπορούν να τοποθετηθούν στην PDU αμέσως μετά τη γενική επικεφαλίδα, εάν αυτό δηλώνει το πεδίο Τύπου (Type). Η υποεπικεφαλίδα συσκευασίας μπορεί να τοποθετηθεί πριν από κάθε MAC SDU, εάν κάτι τέτοιο δηλώνεται από το πεδίο Τύπου.

2.2.2.2.3 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Στη σχεδίαση συστημάτων WiMAX έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην προστασία των δεδομένων του χρήστη από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Τις διαδικασίες που είναι απαραίτητες για αυτό τον σκοπό τις συντονίζει το υπόστρωμα ασφαλείας του στρώματος MAC. Το υπόστρωμα αυτό περιέχει μηχανισμούς για την προστασία από υποκλοπές των πληροφοριών που μεταφέρονται μέσω του ραδιοδιαύλου. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν διαδικασίες επαλήθευσης ταυτότητας, διαχείρισης κλειδιών ασφαλείας και κρυπτογράφησης δεδομένων.

Για την προστασία των δεδομένων του χρήστη χρησιμοποιούνται πολλοί αποδοτικοί αλγόριθμοι κωδικοποίησης. Συγκεκριμένα υποστηρίζονται τόσο αλγόριθμοι AES (advanced Encryption Standard), όσο και αλγόριθμοι 3DES (Triple Data Encryption Standard). Τα κλειδιά που χρησιμοποιούνται είναι μεγέθους 128 ή 256 bits.

2.3 ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16c

Το υποπρότυπο IEEE 802.16c εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2002 και δημοσιεύθηκε τον Ιανουάριο του 2003 και περιλαμβάνει μια σειρά ενημερώσεων και αποσαφηνίσεων του προτύπου IEEE 802.16-2001. Η ενημερωμένη αυτή έκδοση

περιελάμβανε χαρακτηριστικά συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για διεξαγωγή τεστ συμμόρφωσης των συστημάτων με τις προδιαγραφές του προτύπου.

2.4 ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16a

Η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ σταθμών που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή (συνθήκες Non Line of Sight – NLOS) οδήγησε στο υποπρότυπο IEEE 802.16a, το οποίο παρουσιάστηκε τον Ιανουάριο του 2003 και εκδόθηκε τον Απρίλιο του ιδίου έτους. Το συγκεκριμένο υποπρότυπο, αποτελεί τον προάγγελο του IEEE 802.16-2004 που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα και περιλαμβάνει την ανάπτυξη νέων χαρακτηριστικών στο φυσικό στρώμα καθώς επίσης και τη βελτίωση του στρώματος MAC.

Σε μια ζεύξη με συνθήκες μη οπτικής επαφής, το σήμα φθάνει στο δέκτη διαμέσου ανακλάσεων, διαχύσεων και διαθλάσεων. Το λαμβανόμενο από το δέκτη σήμα αποτελείται από συνιστώσες από το ευθύ μονοπάτι, καθώς επίσης και από πολλαπλά ανακλώμενα και διαθλώμενα σήματα. Τα συγκεκριμένα σήματα διαφέρουν από το ευθύ σε διασπορά καθυστέρησης, εξασθένηση και ίσως πόλωση.

Οι συχνότητες λειτουργίας του προδιαγραφέντος από αυτό το πρότυπο συστήματος είναι από 2-11GHz, οι οποίες σε συνδυασμό με τις συνθήκες NLOS προσφέρουν τη δυνατότητα της απόκτησης περισσότερων πελατών φθηνότερα, με μικρότερους όμως ρυθμούς μετάδοσης. Το προαναφερθέν υπονοεί την στροφή της παροχής υπηρεσίας προς σπίτια ή μικρά γραφεία πλέον. Αυτό συμβαίνει διότι συνήθως οι κορυφές των κτιρίων είναι πολύ χαμηλά ώστε να είναι εφικτή οπτική επαφή με το σταθμό βάσης, πιθανόν λόγω εμποδίων από δέντρα ή άλλα κτίρια. Συνεπώς είναι εφικτή και η χρήση κεραιών εσωτερικού χώρου, έναντι των εξωτερικών που είναι σημαντικά ακριβότερες. Η πιο συνηθισμένη 802.16a διάταξη είναι ένας σταθμός βάσης τοποθετημένος σε ένα κτίριο, ο οποίος επικοινωνεί με οικιακούς ή εταιρικούς σταθμούς συνδρομητή (Subscriber Stations – SSS) μέσω σύνδεση σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint – PMP). (WiMAX Forum, 2004c), (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 592)

2.4.1 ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Το συγκεκριμένο πρότυπο εισάγει 4 διαφορετικές υλοποιήσεις του φυσικού στρώματος ανάλογα με τη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων και το σκοπό του δικτύου.

- **WirelessMAN-SCa:** Χρησιμοποιεί τεχνολογία μονής φέρουσας συχνότητας και υποστηρίζει αμφιδρόμηση τόσο μέσω TDD όσο και FDD. Το πρόβλημα που δημιουργείται από τα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης αντιμετωπίζονται με κατάλληλες τεχνικές εκτίμησης διαύλου και ισοστάθμισης. Όπως και στην προηγούμενη έκδοση του προτύπου, χρησιμοποιείται η τεχνική της προσαρμοστικής

διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με την προσθήκη του εύρωστου σχήματος διαμόρφωσης BPSK και προαιρετικά η διαμόρφωση με εξαιρετική φασματική απόδοση 256-QAM. Ακόμη, υποστηρίζεται διαφορική εκπομπή με χωροχρονική κωδικοποίηση (Space-Time Coding Transmit Delay) καθώς και προσαρμοστικές κεραιές (Adaptive Antennas).

- **WirelessMAN OFDM:** Χρησιμοποιεί την τεχνολογία της ορθογωνικής πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) με 256 φέροντα, η οποία ενδείκνυται για τη μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων σε διαύλους που αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Από τα 256 φέροντα του συστήματος OFDM τα 56 αντιστοιχούν σε διαστήματα προστασίας και τα υπόλοιπα 200 είτε για τη μετάδοση δεδομένων είτε για τόνους-πλότους. Η αμφιδρόμηση γίνεται με τεχνική TDD σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, ενώ σε αδειοδοτημένες υλοποιείται επιπλέον και η FDD. Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι BPSK, QPSK, 16-QAM και προαιρετικά η 64-QAM σε μη αδειοδοτημένες ζώνες. Η πολλαπλή πρόσβαση γίνεται με την τεχνολογία διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA).

- **WirelessMAN OFDMA:** Μια άλλη υλοποίηση για την αντιμετώπιση των συνθηκών NLOS και της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι η συγκεκριμένη, που χρησιμοποιεί την τεχνική OFDMA με 2048 φέροντα, εκ των οποίων τα 1681 για μετάδοση δεδομένων ή σύμβολα-πλότους και τα υπόλοιπα 367 για φασματικά διαστήματα προστασίας. Σε αυτό το σύστημα η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται διευθυνσιοδοτώντας με ένα υποσύνολο πολλαπλών φερόντων τον κάθε δέκτη.

- **WirelessMAN HUMAN (Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network):** Η συγκεκριμένη ραδιοεπαφή είναι παρόμοια με την WirelessMAN OFDM, απλώς ορίζει δυναμική επιλογή συχνότητα στις μη αδειοδοτημένες ζώνες μεταξύ των 5-6 GHz.

Στο συγκεκριμένο πρότυπο υποστηρίζονται δίαυλοι εύρους ζώνης πολλαπλασίων των 1.25, 1.5 και 1.75MHz μέχρι 20MHz. Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να φθάσουν έως και 75Mbps ενώ η ακτίνα μιας τυπικής κυψέλης εκτείνεται από 5 έως 50km. (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 598-599)

2.4.2 ΣΤΡΩΜΑ MAC

Μια αναβάθμιση που παρέχει το IEEE 802.16a στο επίπεδο MAC για να μπορέσει να χειριστεί το πιο απαιτητικό φυσικό περιβάλλον και τις διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών στις συχνότητες μεταξύ 2 και 11GHz, είναι οι αυτόματες αιτήσεις επαναμετάδοσης (**Automatic Repeat reQuests – ARQ**). Στις συγκεκριμένες συνδέσεις η λήψη κάθε πακέτου πρέπει να επιβεβαιώνεται από το δέκτη. Τα πακέτα για τα οποία ο πομπός δεν έχει λάβει από το δέκτη μήνυμα επιβεβαίωσης ορθής λήψης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θεωρούνται χαμένα και

επανεκπέμπονται. Επιπλέον εξαιτίας των απαιτήσεων διάδοσης, υποστηρίζεται η χρήση προσαρμοστικών συστημάτων κεραιών (**Adaptive Antenna Systems – AAS**). Μια σημαντική καινοτομία που επιφέρει το συγκεκριμένο πρότυπο είναι αυτή της υποστήριξης αρχιτεκτονικής δικτύου πλέγματος (Mesh), πέραν της βασικής αρχιτεκτονικής σημείου προς πολλαπλά σημεία. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, η οποία είναι προαιρετική στο συγκεκριμένο πρότυπο, επιτρέπει εκτός της επικοινωνίας Σταθμού Συνδρομητή προς Σταθμό Βάσης και την επικοινωνία μεταξύ Σταθμών Συνδρομητών. Η συγκεκριμένη τοπολογία αναλύεται στο εδάφιο της αρχιτεκτονικής δικτύου. (Marks, 2003), (Eklund και άλλοι, 2002)

2.5 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16-2004

Το πρότυπο IEEE 802.16-2004, που εκδόθηκε τον Ιούνιο του 2004, βασίστηκε κυρίως στο παλαιότερο πρότυπο IEEE 802.16a, αλλά αντικατέστησε όλες τις προηγούμενες εκδόσεις και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα για την παροχή υπηρεσιών WiMAX. Απευθύνεται μόνο σε σταθερούς χρήστες γι αυτό έχει λάβει και την ονομασία σταθερό WiMAX (fixed WiMAX). Υποστηρίζει περιβάλλοντα τόσο LOS όσο και NLOS, δηλαδή μπορεί να λειτουργήσει σε συχνότητες 2-66GHz. Κύρια εφαρμογή του όμως είναι οι συχνότητες 2-11GHz, όπου δεν απαιτείται οπτική επαφή για την επικοινωνία. Σε σύγκριση με προηγούμενα πρότυπα, υποστηρίζει αρκετές επιλογές στο εύρος ζώνης καναλιού που ξεκινούν από 1,25MHz και φτάνουν τα 20MHz. Ο ρυθμός διαμεταγωγής που μπορεί να υποστηρίξει, φτάνει ακόμη και τα 75Mbps στην κάτω ζεύξη για εύρος ζώνης καναλιού 20 MHz. Όπως είναι λογικό, για την καλύτερη κάλυψη σε περιβάλλοντα μη οπτικής επαφής, οι ακτίνες των κυψελών μειώνονται με τυπικές τιμές 4,8-8 Km.

2.5.1 ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Στο φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.16-2004, έχουν επέλθει λίγες σχετικά αλλαγές εν συγκρίσει με το IEEE 802.16a. Διατηρείται η υλοποίηση του φυσικού στρώματος WirelessMAN-SC από το πρότυπο IEEE 802.16-2001 ενώ προστίθενται και οι τέσσερις υλοποιήσεις που παρουσιάστηκαν στο IEEE 802.16a.

Με την έκδοση αυτή της οικογένειας IEEE 802.16 γίνεται μια ουσιαστική στροφή προς τη χρήση των τεχνολογιών OFDM και OFDMA, ώστε να απαιτούνται τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη δέκτες απλοί αλλά ισχυρής απόδοσης. Η νέα αυτή δυνατότητα του φυσικού στρώματος βελτιώθηκε με την προσθήκη ορισμένων νέων στοιχείων: (Fan Wang και άλλοι, 2008)

- Τεχνικές Υβριδικών Αυτόματων Αιτήσεων Επαναμετάδοσης (Hybrid Automatic Repeat reQuest - HARQ) στις οποίες βασίζεται η Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση. Οι υβριδικές τεχνικές είναι παραλλαγή της μεθόδου

ελέγχου λαθών ARQ, οι οποίες όμως εφαρμόζονται στο φυσικό επίπεδο και όχι στο επίπεδο MAC. Συνεπώς δεν έχουν προστασία CRC και άρα είναι πιο ευάλωτα σε λάθη. Παρόλα αυτά μπορούν να χειριστούν τις περισσότερες επανεκπομπές, όταν τα πακέτα είναι λανθασμένα, χωρίς να χρειαστεί η συμβολή των σχετικά αργών επανεκπομπών ARQ (Kwang-Cheng Chen, 2008 σελ 107).

- Ευέλικτη Ένδειξη Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Indication – CQI) η οποία προκαλεί γρήγορη δρομολόγηση.
- Νέα σχήματα εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction – FEC), συμπεριλαμβανομένων των συνελκτικών turbo κωδίκων (Convolution Turbo Code – CTC) και κωδίκων ελέγχου ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας (Low Density Parity Check - LDPC).
- Υποστήριξη λειτουργιών πολλαπλών κεραιών όπως προηγμένων υποσυστημάτων κεραιών (Advanced Antenna Subsystem - AAS), κεραιών κλειστού βρόχου Πολλαπλής Εισόδου Πολλαπλής Εξόδου (Multiple Input Multiple Output – MIMO) και πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (Space Division Multiple Access – SDMA), όπου οι χρήστες διαχωρίζονται χωρικά κατά τη χρήση πολλαπλών κεραιών.
- Αποδοτικά σχήματα πολυεκπομπής (broadcast) και ευρυεκπομπής (multicast) χρησιμοποιώντας μεθόδους δικτύου μονής συχνότητας (Single Frequency Network – SFN).
- Πλαίσια μεταβλητού μεγέθους (πχ 2 ms, 2,5 ms, 5 ms)
- Έλεγχος Ισχύος Εκπομπής (Power Control), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και υλοποιείται από το Σταθμό Βάσης που αποστέλλει πληροφορίες ελέγχου ισχύος εκπομπής σε κάθε σταθμό συνδρομητή με σκοπό τη μείωση του επιπέδου εκπεμπόμενης ισχύος αυτού, έτσι ώστε η ισχύς που λαμβάνεται από το Σταθμό Βάσης να βρίσκεται σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Σε ένα περιβάλλον με δυναμικές αλλαγές στο επίπεδο των διαλείψεων, το προκαθορισμένο επίπεδο απόδοσης σημαίνει ότι ο σταθμός συνδρομητή εκπέμπει τόση ισχύ όση απαιτείται για την ικανοποίηση του επιπέδου. Εάν το επίπεδο ισχύος είχε καθοριστεί δυναμικά, με βάση τις χειρότερες συνθήκες στο δίαυλο, θα γινόταν κατασπατάληση ισχύος κατά ένα μεγάλο χρονικό διάστημα που δεν επικρατούν αυτές οι συνθήκες. Έτσι λοιπόν με τον έλεγχο ισχύος μειώνεται η συνολική κατανάλωση ισχύος του σταθμού συνδρομητή, ενώ μειώνεται και η πιθανότητα παρεμβολής με γειτονικούς σταθμούς βάσης.

2.5.2 ΣΤΡΩΜΑ MAC

Στο στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC) υιοθετούνται όλες οι προτάσεις του υποπροτύπου IEEE802.16a, με βασικότερες την υποστήριξη των τεχνολογιών OFDM/OFDMA, των δικτύων πλέγματος (Mesh), και

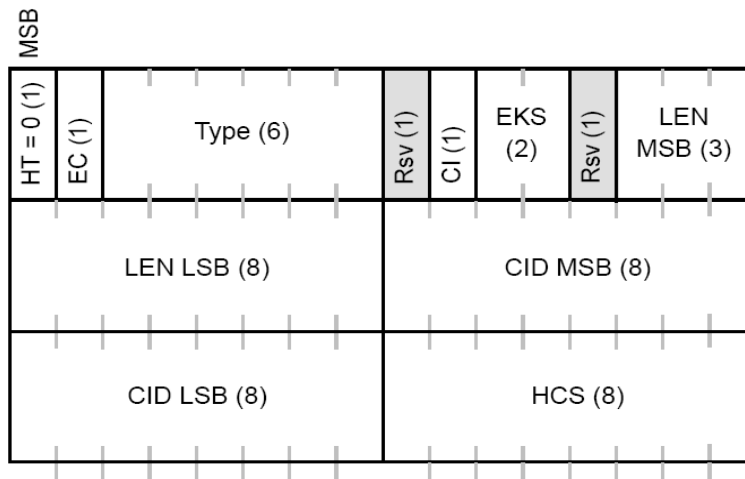
τις αυτόματες αιτήσεις επαναμετάδοσης (Automatic Repeat Requests – ARQ) που συμβάλει στη μείωση των λαθών.

2.5.2.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ MAC (MPDU)

Εφόσον το υπόστρωμα Κοινού Τμήματος (Common Part Sublayer – CPS) υποστηρίζει πλέον δυο διαφορετικού είδους δίκτυα (σημείου προς πολλαπλά σημεία, πλέγματος) κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση του σχηματισμού και της διαχείρισης των Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου MAC (MAC Protocol Data Units – MPDUs). Όπως έχει προαναφερθεί, ανάλογα με το μέγεθος των Μονάδων Δεδομένων Υπηρεσίας (Service Data Units – SDUs) που λαμβάνονται από τα ανώτερα στρώματα, μια MPDU μπορεί να σχηματιστεί είτε με τη συνένωση πολλών SDUs είτε από την κατάτμηση μιας SDU.

Για να αξιοποιηθούν οι πόροι του δικτύου με τον καλύτερο τρόπο, MPDUs που έχουν κοινό προορισμό συνενώνονται και μεταδίδονται σε μια περιοχή δεδομένων χρήστη. Στην περίπτωση της κατάτμησης μια μεγάλης SDU σε πολλές MPDUs, λαμβάνεται ειδική μέριμνα για το πόσο η σύνδεση υποστηρίζει τεχνικές αυτόματης επαναμετάδοσης (ARQ). Εάν δεν υποστηρίζει, τότε τα δημιουργούμενα τμήματα της μεγάλης SDU αποστέλλονται με τη σειρά που βρίσκονται σε αυτήν. Στην άλλη περίπτωση η SDU χωρίζεται σε μικρότερα πακέτα σταθερού μήκους, στα οποία ανατίθεται ένας χαρακτηριστικός αριθμός. Θεωρείται ότι η SDU έχει παραληφθεί επιτυχώς όταν επιβεβαιωθεί η ορθή λήψη όλων των πακέτων που την απαρτίζουν.

Η MPDU αποτελείται από τη επικεφαλίδα (header), το χρήσιμο τμήμα (payload) και από τμήμα ελέγχου κυκλικού πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check – CRC). Το τελευταίο είναι προαιρετικό για την υλοποίηση μονής φέρουσας SC (όπως και στα παρελθόντα πρότυπα), ενώ στις υπόλοιπες υλοποιήσεις (SCa, OFDM, OFDMA) είναι υποχρεωτικό. Διατηρείται από το πρότυπο IEEE 802.16-2001 ο ορισμός των δυο ειδών MPDU, η MPDU γενικής μορφής και η MPDU αίτησης εύρους ζώνης (bandwidth request MPDU). Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων και σηματοδότησης στρώματος MAC. Οι πληροφορίες που περιέχονται στην επικεφαλίδα αφορούν στο εάν το χρήσιμο τμήμα είναι κρυπτογραφημένο ή όχι, ποιο είναι το αντίστοιχο κλειδί, εάν περιέχεται τμήμα CRC, το μέγεθος της MPDU σε bytes, το αναγνωριστικό της σύνδεσης και τέλος ένα τμήμα για την επαλήθευση των δεδομένων της επικεφαλίδας (Header Check Sequence – HCS).



Σχήμα 2.5 Μορφή Επικεφαλίδας MPDU Γενικής Χρήσης (από IEEE 802.16-2004Std)

Ο τύπος MPDU αίτησης εύρους ζώνης χρησιμοποιείται από το σταθμό Συνδρομητή για να αιτηθεί μεγαλύτερου εύρος ζώνης για την άνω ζεύξη από το Σταθμό Βάσης. Το συγκεκριμένο είδος MPDU περιλαμβάνει μόνο επικεφαλίδα, χωρίς χρήσιμο τμήμα και πεδίο CRC.

Σχετικά με τους τύπους υποεπικεφαλίδας, στους τρεις τύπους του πρωτοκόλλου IEEE 802.16-2001 (διαχείρισης εκχώρησης, κατακερματισμού και συσκευασίας), προστίθενται άλλες δυο, η υποεπικεφαλίδα πλέγματος (Mesh subheader) και η υποεπικεφαλίδα ανάθεσης γρήγορης ανάδρασης (FAST-FEEDBACK allocation subheader) η οποία χρησιμοποιείται όταν εφαρμόζονται τεχνικές MIMO.

Μετά το σχηματισμό της MPDU, μεταδίδεται μέσω του φυσικού στρώματος, αφού πρώτα του έχουν εκχωρηθεί πόροι από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού των μεταδόσεων (scheduling algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός εξετάζει τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας που μεταφέρει η συγκεκριμένη MPDU, επεξεργαζόμενος τα αναγνωριστικά ροής υπηρεσίας (Service Flow ID- SFID) και σύνδεσης (Connection ID – CID). Έτσι λοιπόν αναλόγως των απαιτήσεων των MPDUs που ανήκουν σε διαφορετικές συνδέσεις, αποφασίζει για το βέλτιστο τρόπο κατανομής των πόρων του δικτύου στις διάφορες MPDUs. Όπως είναι αντιληπτό ο αλγόριθμος προγραμματισμού παίζει σημαντικό ρόλο στην επίδοση του δικτύου, αλλά η υλοποίησή του αφήνεται στους κατασκευαστές. (Κανάτας και άλλοι, 2008 σελ 625), (IEEE Std 802.16e™-2005).

2.5.2.2 ΑΙΤΗΣΗ ΚΑΙ ΕΚΧΩΡΗΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ

Στη δικαιοδοσία του υποστρώματος κοινού τμήματος του στρώματος MAC είναι και οι διαδικασίες αίτησης και εκχώρησης εύρους ζώνης τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Στην κάτω ζεύξη, η απόφαση για την εκχώρηση εύρους ζώνης γίνεται μόνο από το Σταθμό Βάσης χωρίς κάποια παρέμβαση από τη μεριά του Σταθμού Συνδρομητή. Ο Σταθμός Βάσης, επεξεργαζόμενος τις απαιτήσεις των λαμβανομένων

MPDUs για κάθε σύνδεση (Connection), αναθέτει τους αντίστοιχους πόρους και ενημερώνει το Σταθμό Συνδρομητή μέσω μηνυμάτων DL-MAP. Για την άνω ζεύξη, η διαδικασία ξεκινά από το Σταθμό Συνδρομητή ο οποίος αποστέλλει MPDUs αιτήσεων εύρους ζώνης ή MPDUs γενικής χρήσης με την ειδική υποεπικεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης. Οι δυνατότητες αίτησης του Σταθμού Συνδρομητή είναι είτε αύξηση επί των εκχωρούμενων πόρων (incremental bandwidth request) ή εκ νέου αίτηση για νέους πόρους που αντικαθιστούν τους παλιούς (aggregate request). Τα αιτήματα της πρώτης κατηγορίας, για προσθήκη νέων πόρων, διαβιβάζονται μέσω MPDUs γενικής μορφής, ενώ ένα νέο αίτημα υποχρεωτικά χρησιμοποιεί την ειδική MPDU.

Όταν ένας σταθμός συνδρομητή διατηρεί περισσότερες από μια συνδέσεις, τότε ο Σταθμός Βάσης του εκχωρεί ραδιοπόρους για το σύνολο των συνδέσεων. Αν οι εκχωρούμενοι πόροι δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών όλων των συνδέσεων, τότε ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που τρέχει στο Σταθμό Συνδρομητή είναι αυτός που κατανέμει καταλλήλως τους πόρους μεταξύ των συνδέσεων, βάσει των χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσίας και της τηλεπικοινωνιακής κίνησης κάθε σύνδεσης.

Για να είναι εφικτό οι σταθμοί συνδρομητή να στέλνουν τα μηνύματα αίτησης πόρων, ο Σταθμός Βάσης τους εκχωρεί εύρος ζώνης συγκεκριμένα γι' αυτό το σκοπό, μια διαδικασία που ονομάζεται διαδοχική διερεύνηση (Polling). Ας τονίσουμε ότι η ανάθεση πόρων, συνεπώς και η διαδοχική διερεύνηση γίνεται ανά Σταθμό Συνδρομητή, ενώ οι αιτήσεις για εύρος ζώνης γίνονται ανά σύνδεση (CID). Οι πόροι για polling μπορούν είτε να εκχωρούνται σε κάθε Σταθμό Συνδρομητή ανεξάρτητα όπου έχουμε unicast polling είτε να εκχωρούνται από κοινού σε μια ομάδα Σταθμών Συνδρομητή ή σε όλους όπου και έχουμε multicast ή broadcast polling αντίστοιχα. Βέβαια προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτωση της άνω ζεύξης, οι συγκεκριμένοι πόροι χρησιμοποιούνται από όσους Σταθμούς Συνδρομητή επιθυμούν να εκπέμψουν αίτημα για εύρος ζώνης. (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 625-627)

2.6 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16e-2005

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 εκδόθηκε τον Οκτώβριο του 2005, ως επέκταση του IEEE 802.16-2004, και το νεωτεριστικό στοιχείο του είναι η υποστήριξη κινητικότητα στους χρήστες, οι δέκτες των οποίων ονομάζονται Κινητοί Σταθμοί. Προβλέπει λειτουργία στις συχνότητες 2-11 GHz για ακίνητους και χρήστες κινούμενους με χαμηλή ταχύτητα και στις συχνότητες 2-6 GHz για κινητούς χρήστες με ταχύτητες έως 125Km ανά ώρα. Για την υποστήριξη της κινητικότητας, προδιαγράφονται διαδικασίες μεταπομπών (handoff) μεταξύ κυψελών και διαδικασίες εξοικονόμησης ενέργειας στο φορητό εξοπλισμό (καταστάσεις αδράνειας ή απενεργοποίησης). Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που υποστηρίζεται στην κάτω ζεύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση κεραιών MIMO και μπορεί να φτάσει τα 63Mbps

ανά τομέα στην άνω και 28 Mbps ανά τομέα στην κάτω ζεύξη. Οι τυπικές κυψέλες έχουν ακτίνα 2-4,8Km.

2.6.1 ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Οι αλλαγές στο φυσικό στρώμα είναι σημαντικές, με σκοπό την υποστήριξη της κινητικότητας. Υποστηρίζονται όλοι οι τύποι ραδιοεπαφής, αλλά οι μεγαλύτερες αλλαγές εστιάζονται στη ραδιοεπαφή WirelessMAN OFDMA η οποία είναι η μόνη που χρησιμοποιείται από κινητούς χρήστες. Πλέον χρησιμοποιείται η τεχνολογία της κλιμακούμενης πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Scalable OFDMA). Η ραδιοεπαφή WirelessMAN OFDMA υποστηρίζει πολλαπλό αριθμό φερόντων για τον Γρήγορο Μετασχηματισμό Φουριέ (Fast Fourier Transform- FFT), τα οποία μπορεί να είναι 128, 512, 1024 ή 2048. Τα διαφορετικά φέροντα εξυπηρετούν το γεγονός ότι είναι διαθέσιμα προς χρήση κανάλια με πολλαπλά μεγέθη εύρους ζώνης. Από τα φέροντα αυτά, ορισμένα χρησιμοποιούνται για δεδομένα, άλλα για τόνους-πilotους ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούνται για φασματικά διαστήματα προστασίας. Το πλήθος των φερόντων που διατίθενται σε κάθε Κινητό Σταθμό δεν είναι σταθερό, αλλά μπορεί να διαφέρει με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά τα φέροντα ομαδοποιούνται ανά 48 και σχηματίζουν ένα OFDMA υποκανάλι και σε κάθε χρήστη μπορούν να ανατίθενται ένα ή περισσότερα υποκανάλια, με αντίστοιχη μεταβολή του συνολικού ρυθμού μετάδοσης και της εκπεμπόμενης ισχύος. Η αμφιδρόμηση υλοποιείται με TDD σε μη αδειοδοτημένες ζώνες ενώ στις αδειοδοτημένες μπορεί να υλοποιηθεί και με FDD. Η διαμόρφωση μπορεί να μεταβάλλεται από QPSK σε 16-QAM ή 64-QAM, ενώ για την εμπρόσθια διόρθωση λαθών χρησιμοποιείται αλυσιδωτή συνελκτική κωδικοποίηση, Reed-Solomon κωδικοποίηση, ενώ προαιρετικά μπορούν να εφαρμοσθούν τεχνικές turbo κωδικοποίησης. (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 599). Ένα παράδειγμα της δομής ενός πλαισίου OFDM για μια υλοποίηση TDD φαίνεται στο σχήμα 2.6.

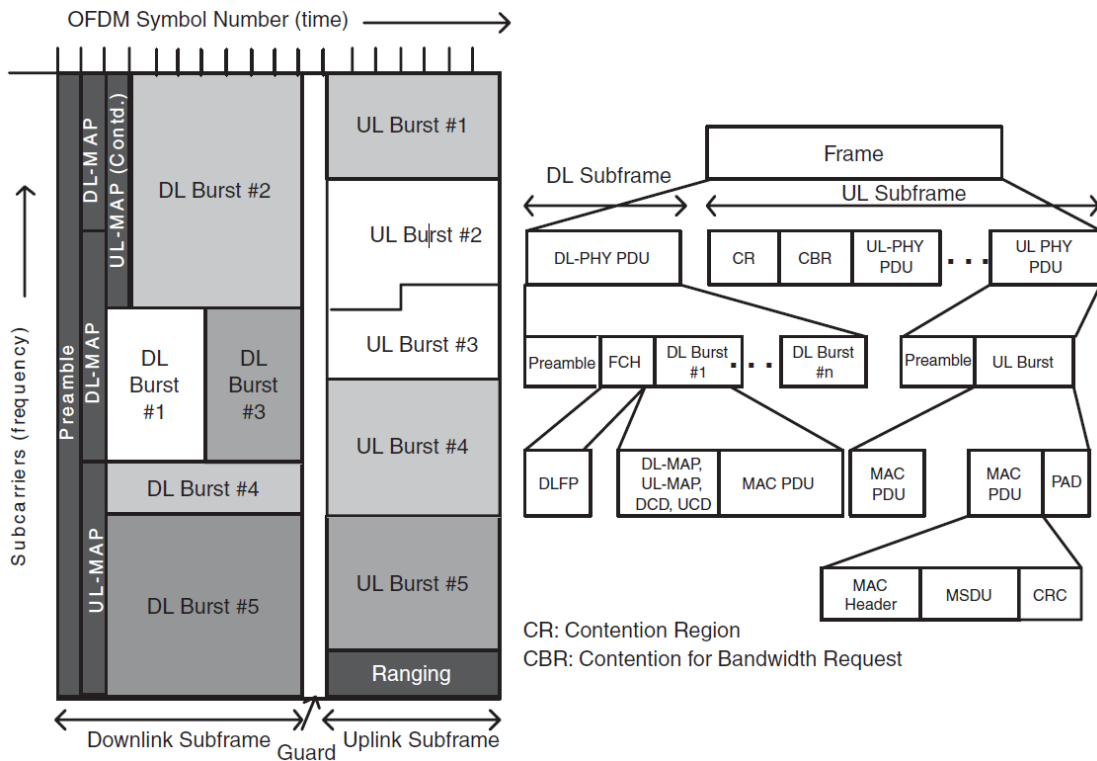
Κάθε πλαίσιο χωρίζεται σε υποπλαίσια για την κάτω και την άνω ζεύξη, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου με ένα χρονικό διάστημα προφύλαξης (Transmit/Receive και Receive/Transmit Transition Gap - TTG και RTG αντίστοιχα). Τα δυο υποπλαίσια μπορεί να έχουν την ίδια χρονική διάρκεια, ή το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης να διαρκεί έως και τρεις φορές περισσότερο του υποπλαισίου άνω ζεύξης.

Εντός του πλαισίου, η ακόλουθη πληροφορία ελέγχου χρησιμοποιείται για να διασφαλισθεί η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος: (Etemad K., 2008)

- Επικεφαλίδα (Preamble): Είναι το πρώτο τμήμα του υποπλαισίου της κάτω ζεύξης, χρησιμοποιείται για συγχρονισμό και περιέχει μια αρχική εκτίμηση του ασυρμάτου διαύλου
- Επικεφαλίδα Ελέγχου Πλαισίου (Frame Control Header – FCH): Ακολουθεί μετά την επικεφαλίδα και περιέχει πληροφορίες δομής του πλαισίου, όπως το μήκος

των μηνυμάτων MAP, το χρησιμοποιούμενο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και τον αριθμό των υποκαναλιών OFDM. Επειδή η FCH παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη ζεύξη, χρησιμοποιείται η ανθεκτική διαμόρφωση BPSK και η κωδικοποίηση $\frac{1}{2}$ ώστε να λαμβάνεται σωστά από όλους τους χρήστες κάτω ακόμη και από δυσμενείς συνθήκες.

- Μηνύματα MAP άνω και κάτω ζεύξης (DL-MAP και UL-MAP): Αναθέτουν υποκανάλια και άλλες πληροφορίες ελέγχου στα υποπλαίσια άνω και κάτω ζεύξης, κάθε μήνυμα MAP περιέχει διάφορα στοιχεία πληροφορίας (Information Elements – IE) και έχει ένα σταθερό και ένα μεταβλητό τμήμα. Το μέγεθος του μεταβλητού τμήματος εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών στην άνω και στην κάτω ζεύξη που είναι προγραμματισμένο στο πλαίσιο. Ο αριθμός των συμβόλων OFDM που απαιτούνται για τη μετάδοση των μηνυμάτων MAP εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών, το μέγεθος του πλαισίου, τα στοιχεία πληροφορίας που περιλαμβάνονται κλπ.
- Ριπές κάτω και άνω ζεύξης (DL- UL Bursts): Το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης μπορεί να περιλαμβάνει ριπές διαφορετικής πληροφορίας και από διαφορετικούς χρήστες. Επιπλέον, η ριπή μπορεί να προέρχεται από συνένωση πολλαπλών πακέτων ανώτερων επιπέδων ή τμημάτων αυτών, τα οποία έχουν ίδιο ή διαφορετικό μέγεθος. Η συνολική διάρκεια του πλαισίου μπορεί να μεταβάλλεται από 2 έως 20 msec. Το υποπλαίσιο άνω ζεύξης, εκτός των ριπών που αντιστοιχούν στους χρήστες, περιέχει και ένα τμήμα που αφορούν άλλες διαδικασίες που παρουσιάζονται ακολούθως.
- Υποκάνάλι δυναμικού συγχρονισμού άνω ζεύξης (UL Ranging subchannel): Το υποπλαίσιο άνω ζεύξης περιέχει το συγκεκριμένο τμήμα που ανατίθεται στους Κινητούς Σταθμούς για τη ρύθμιση χρονισμού, συχνότητας και ισχύος όπως και για αιτήσεις εύρους ζώνης.
- Κανάλι Ένδειξης Ποιότητας Καναλιού Άνω Ζεύξης (UL Channel Quality Indicator Channel – CQICH): Το συγκεκριμένο τμήμα μεταφέρει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του καναλιού, όπως για παράδειγμα ο λόγος σήματος προς θόρυβο και η παρεμβολή.
- Κανάλι Επιβεβαίωσης άνω ζεύξης (ACKnowledgement Channel – ACKCH): Το τμήμα αυτό χρησιμοποιείται από τον κινητό σταθμό για την επιβεβαίωση μηνυμάτων της κάτω ζεύξης που χρησιμοποιούν τεχνικές HARQ (DL HARQ acknowledge)



Σχήμα 2.6 Δομή πλαισίων φυσικού στρώματος για υλοποίηση WiMAX-TDD (Πηγή: Andrews και άλλοι, 2007)

2.6.2 ΣΤΡΩΜΑ MAC

Στο στρώμα MAC, έχουν επέλθει αρκετές αλλαγές ώστε να υποστηρίζεται πλήρως η κινητικότητα των χρηστών, με βασικότερες από αυτές την εξοικονόμηση ενέργειας και την υποστήριξη μεταπομπών. Ακόμη, υλοποιείται νέος έλεγχος πιστοποίησης ταυτότητας που συμβάλλει στην αύξηση της ασφάλειας. Ένας άλλος τομέας στο οποίο προστέθηκαν στοιχεία είναι αυτός της παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας, όπου υποστηρίζεται ένας καινούργιος τύπος υπηρεσίας, ο Extended Real-Time Polling Service (ErtPS), με κυρία εφαρμογή την μετάδοση φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ιντερνετ (VoIP) με καταπίεση διαστημάτων σιγής. Περισσότερα για την ποιότητα υπηρεσίας θα αναφερθούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

2.6.2.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ - ΜΕΤΑΠΟΜΠΕΣ

Όπως έχει προαναφερθεί, το στρώμα MAC έχει εμπλουτιστεί με δυνατότητες υποστήριξης κινητικότητας χρηστών μεταξύ διαφόρων κυψελών. Η μεταπομπή ορίζεται ως το σύνολο των διαδικασιών που επιτρέπουν σε ένα Κινητό Σταθμό να αποσυνδέεται από ένα σύστημα ραδιοπρόσβασης ενός Σταθμού Βάσης και να συνδέεται σε ένα άλλο Σταθμό Βάσης. Τρεις μέθοδοι μεταπομπής υποστηρίζονται από το πρότυπο IEEE 802.16e-2005, η «σκληρή» μεταπομπή (Hard Handoff – ΗΗΟ),

η μεταπομπή γοργής μεταγωγής Σταθμού Βάσης (Fast Base Station Switching – FBSS) και η μεταπομπή με διαφορισμό Σταθμών Βάσης (Macro Diversity Handover – MDHO). Από αυτές η πρώτη είναι υποχρεωτική, ενώ οι άλλες δυο προαιρετικές. (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 628-630), (WiMAX Forum, 2006a)

2.6.2.1.1 «ΣΚΛΗΡΗ» ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ

Η διαδικασία της μεταπομπής περιλαμβάνει διάφορα στάδια, ώστε αυτή να πραγματοποιηθεί επιτυχώς. Αρχικά, ο Κινητός Σταθμός ελέγχει περιοδικά τις ζεύξεις του με γειτονικούς Σταθμούς Βάσης και τους αξιολογεί ως πιθανούς προορισμούς μιας μεταπομπής. Η έναρξη της μεταπομπής αποφασίζεται είτε από τον ίδιο τον Κινητό Σταθμό, είτε με πρωτοβουλία του αρχικού Σταθμού Βάσης. Εάν η διαδικασία ξεκινήσει από τον Κινητό Σταθμό, αποστέλλει ένα μήνυμα MOB_MSHO-REQ με το οποίο ενημερώνει το Σταθμό Βάσης για την πρόθεση του και για τους πιθανούς Σταθμούς Βάσης προορισμού. Στη συνέχεια, ο Σταθμός Βάσης ενημερώνει τον κινητό σταθμό, μέσω μηνύματος MOB_BSHO-RSP, για τους επιτρεπτούς προορισμούς της μεταπομπής και στο τέλος ο Κινητός Σταθμός ενημερώνει το δίκτυο (μήνυμα MOB_MSHO-IND) για την επιλογή του Σταθμού Βάσης προορισμού. Εάν ο Σταθμός Βάσης είναι αυτός που ξεκινά τη διαδικασία, τότε αυτή είναι λίγο διαφορετική. Αποστέλλει ένα μήνυμα MOB_BSHO-REQ, με το οποίο δίνει εντολή στον Κινητό Σταθμό να πραγματοποιήσει μεταπομπή, ενημερώνοντάς τον παράλληλα για τους επιτρεπτούς Σταθμούς Βάσης προορισμού. Ο Κινητός Σταθμός επιβεβαιώνει τη λήψη της εντολής και ενημερώνει το δίκτυο για τον επιλεγέντα Σταθμό Βάσης μέσω του μηνύματος MOB_MSHO-IND. Να σημειωθεί, ότι μετά την έναρξη της διαδικασίας, ο Κινητός Σταθμός μπορεί ανά πάσα στιγμή να τη διακόψει.

Μετά την επιλογή του Σταθμού Βάσης προορισμού, ο Κινητός Σταθμός συγχρονίζεται με αυτόν, λαμβάνοντας τις πληροφορίες συγχρονισμού στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας από την επικεφαλίδα των πλαισίων εκπομπής κάτω ζεύξης του Σταθμού Βάσης (DL frame preamble). Επιπλέον λαμβάνει πληροφορίες για το κανάλι δυναμικού συγχρονισμού (ranging channel) του Σταθμού Βάσης. Ο Κινητός Σταθμός χρησιμοποιεί το κανάλι αυτό για να ανακτήσει τις απαιτούμενες πληροφορίες για το συγχρονισμό.

Μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης με τον Σταθμό Βάσης προορισμού, ο Κινητός Σταθμός αποστέλλει ένα μήνυμα στον αρχικό Σταθμό Βάσης, ενημερώνοντάς τον ότι πραγματοποίησε τη μεταπομπή. Αυτός εξακολουθεί να κρατά δεσμευμένους τους απαιτούμενους πόρους για τον ΚΣ για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (resource-retain timer) και στη συνέχεια, θεωρώντας ότι η μεταπομπή ολοκληρώθηκε με επιτυχία, τους αποδεσμεύει.

Σε περίπτωση που για οποιοδήποτε λόγο κατά τη διαδικασία της μεταπομπής διακοπεί η σύνδεση του Κινητού Σταθμού με τον εκάστοτε Σταθμό Βάσης που τον εξυπηρετεί, τότε έχουμε διακοπή κλήσης (call drop) και ο ΚΣ πρέπει να εισέλθει εκ νέου στο δίκτυο.

2.6.2.1.2 ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ ΓΟΡΓΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ

Όταν υποστηρίζεται η μεταπομπή γοργής μεταγωγής σταθμού βάσης, μια λίστα των Σταθμών Βάσης που σχετίζονται με τον Κινητό Σταθμό στη μεταπομπή FBSS, κάτι που ονομάζεται ενεργό σύνολο (active set). Μεταξύ των Σταθμών Βάσης στο ενεργό σύνολο, ορίζεται ένας Βασικός Σταθμός Βάσης (anchor BS). Ο Κινητός Σταθμός επικοινωνεί με το Βασικό Σταθμό Βάσης για τη μετάδοση μηνυμάτων άνω και κάτω ζεύξης, συμπεριλαμβανομένων της σηματοδοσίας και των δεδομένων. Για τη μετάβαση από ένα Βασικό Σταθμό Βάσης σε έναν άλλο, γίνεται χωρίς ρητή χρήση των μηνυμάτων σηματοδοσίας μεταπομπής. Μια μεταπομπή τέτοιου τύπου ξεκινά με μια απόφαση του Κινητού Σταθμού να αποστείλει ή να λάβει δεδομένα από ένα Βασικό Σταθμό Βάσης που μπορεί να αλλάξει στο ενεργό σύνολο. Ο Κινητός Σταθμός σαρώνει τους γειτονικούς Σταθμούς Βάσης και επιλέγει αυτούς που είναι κατάλληλοι να συμπεριληφθούν στο ενεργό σύνολο. Στη συνέχεια, καταγράφει τους επιλεγέντες Σταθμούς Βάσης και η διαδικασία αλλαγής του ενεργού συνόλου εκτελείται και από τα δυο μέρη. Ο Κινητός Σταθμός συνεχώς ελέγχει τη ένταση του λαμβανομένου σήματος από όλους τους Σταθμούς Βάσης στο ενεργό σύνολο και επιλέγει έναν από αυτούς ως Βασικό. Ο Βασικός Σταθμός Βάσης παρακολουθείται μέσω του καναλιού Ένδειξης Ποιότητας Καναλιού Άνω Ζεύξης (UL Channel Quality Indicator CHannel – CQICH) από τον Κινητό Σταθμό, ή ο τελευταίος αποστέλλει ένα μήνυμα αίτησης μεταπομπής. Μια βασική απαίτηση για τη λειτουργία της FBSS είναι τα δεδομένα να αποστέλλονται ταυτόχρονα σε όλα τα μέλη ενός ενεργού συνόλου Σταθμών Βάσης που μπορούν να εξυπηρετήσουν τον Κινητό Σταθμό.

2.6.2.1.3 ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ

Στην τεχνική μεταπομπής με διαφορισμό Σταθμών Βάσης (Macro Diversity Handover – MDHO), ο Κινητός Σταθμός μπορεί να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα το σύστημα ραδιοπρόσβασης από περισσότερους του ενός Σταθμούς Βάσης. Γι' αυτό το σκοπό διατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ένα ενεργό σύνολο Σταθμών Βάσης που μπορούν που σχετίζονται με το συγκεκριμένο Κινητό Σταθμό. Η βασική μορφή μεταπομπής μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση της μεταπομπής με διαφορισμό Σταθμών Βάσης, όπου το ενεργό σύνολο περιέχει μόνο τον προορισμό της μεταπομπής. Όταν χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη τεχνική, ο Κινητός Σταθμός επικοινωνεί με όλους τους Σταθμούς Βάσης στο ενεργό σύνολο, μέσω μηνυμάτων και κίνησης μονοεκπομπής (unicast) και στις δυο ζεύξεις. Η μεταπομπή με διαφορισμό Σταθμών Βάσης ξεκινά όταν ο Κινητός Σταθμός αποφασίζει να αποστείλει ή να λάβει μηνύματα από πολλαπλούς Σταθμούς Βάσης στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για τη μεταπομπή κάτω ζεύξης, δυο ή περισσότεροι Σταθμοί Βάσης αποστέλλουν συγχρονισμένα δεδομένα στον Κινητό Σταθμό, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτός ο συνδυασμός των δεδομένων από τον τελευταίο. Ο τρόπος συνδυασμού των δεδομένων από τον Κινητό Σταθμό δεν καθορίζεται από το πρότυπο. Στην άνω ζεύξη αντίστοιχα, όλοι οι Σταθμοί Βάσης του ενεργού συνόλου λαμβάνουν και

αποκωδικοποιούν τα εκπεμπόμενα σήματα του Κινητού Σταθμού, και στη συνέχεια τα προωθούν στο Βασικό Σταθμό Βάσης, ο οποίος και επιλέγει αυτά με τα λιγότερα σφάλματα.

2.6.2.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των κινητών σταθμών είναι η δυνατότητα να εξοικονομούν ενέργεια, ώστε να αυξάνει η αυτονομία τους. Έτσι λοιπόν, επιτρέπεται στον κινητό σταθμό να απενεργοποιεί κάποια από τα τμήματα του ώστε να μην καταναλώνουν ενέργεια. Για αυτό το σκοπό, το πρότυπο υποστηρίζει δυο τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, την κατάσταση νάρκης (Sleep mode) και την κατάσταση αδράνειας (idle mode).

Η κατάσταση νάρκης (sleep mode) είναι η κατάσταση όπου ο σταθμός βάσης απέχει από τη ραδιοεπαφή για προκαθορισμένες περιόδους. Αυτές οι περίοδοι χαρακτηρίζονται από τη μη διαθεσιμότητα του κινητού σταθμού, όπως αυτό παρατηρείται από το σταθμό βάσης μέσω της κίνησης άνω ή κάτω ζεύξης. Όταν τουλάχιστον μια σύνδεση του κινητού σταθμού είναι ενεργή, τότε αυτός θεωρείται διαθέσιμος (available), ενώ όταν όλες οι συνδέσεις του είναι ανενεργές, τότε ο κινητός σταθμός είναι μη διαθέσιμος (unavailable). Η συγκεκριμένη κατάσταση δημιουργήθηκε για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από τον κινητό σταθμό, αλλά και της χρήσης των ραδιοπύλων του σταθμού βάσης. Επιπλέον, παρέχεται η ευελιξία στον κινητό σταθμό να σαρώνει άλλους σταθμούς βάσης για τη συλλογή πληροφοριών κατά τη διάρκεια της κατάστασης νάρκης.

Η κατάσταση αδρανείας παρέχει ένα μηχανισμό, ώστε ο σταθμός βάσης να καθίσταται περιοδικά διαθέσιμος, για λήψη μηνυμάτων ευρυεκπομπής (broadcast) από σταθμούς βάσης που δεν έχουν καταχωρηθεί. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι επιθυμητό, ώστε οι κινητοί σταθμοί καθώς μετακινούνται να μην έχουν την ανάγκη μεταπομπών και άλλων λειτουργιών, εάν δεν έχουν ενεργές συνδέσεις. Από την άλλη μεριά, διευκολύνονται και οι Σταθμοί Βάσης και κατ' επέκταση όλο το δίκτυο, καθώς ελαχιστοποιούνται οι άσκοπες μεταπομπές, η κίνηση προς ανενεργούς κινητούς σταθμούς, ενώ παράλληλα παρέχεται μια απλή μέθοδος ειδοποίησης των κινητών σταθμών για την εκκρεμή κίνηση κάτω ζεύξης. (WiMAX Forum, 2006a)

2.7 ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

2.7.1 ΟΙ ΔΥΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ & ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΑΡΧΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας WiMAX περνάει από τη βασική απόφαση για την επιλογή φάσματος, το οποίο μπορεί να είναι **αδειοδοτημένο ή όχι**.

Η χρήση του **αδειοδοτημένου φάσματος** έχει το προφανές πλεονέκτημα της προστασίας έναντι των παρεμβολών από άλλους ασύρματους παρόχους. Το βασικό του μειονέκτημα όμως σχετίζεται με τη διαδικασία χορήγησης των αδειών. Αυτή η διαδικασία ποικίλλει ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς και μπορεί να είναι από πολύ απλή και γρήγορη έως σύνθετη και χρονοβόρα, ενώ στις χώρες που προϋποθέτουν κάποιο διαγωνισμό, η απόκτησή της μπορεί να είναι και εξαιρετικά ακριβή.

Η χρήση του **μη αδειοδοτημένου φάσματος** δίνει στον ασύρματο πάροχο το πλεονέκτημα της άμεσης, χωρίς άλλες διαδικασίες, χρήσης του, όμως ενέχεται ο κίνδυνος μελλοντικής παρεμβολής από φασματικά γειτονικούς παρόχους. Γενικά, η χρησιμοποίηση του αδειοδοτημένου φάσματος είναι επιθυμητή σε μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές όπου είναι πιθανή η δραστηριοποίηση πολλών παρόχων. Αντίθετα, το μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι συχνά μια καλή επιλογή στις αγροτικές περιοχές όπου είναι πιθανό να υπάρξουν λιγότεροι πάροχοι. Σε αυτές τις περιοχές η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών επιτυγχάνεται εύκολα μέσω του συντονισμού συχνότητας μεταξύ των παρόχων. Μια ορθή πρακτική κατά την χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος είναι να τοποθετηθούν τα hubs με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιείται λιγότερη από τη μισή διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων. Αυτό επιτρέπει την χρήση της αυτόματης επιλογής καναλιού για την επιλογή καναλιών που δεν υπόκεινται σε παρεμβολές από άλλους ασυρμάτους παρόχους. (WiMAX Forum, 2004b)

Οι ζώνες τριών συχνοτήτων αρχικού ενδιαφέροντος με τους σημερινούς κανονισμούς είναι:

- **Μη Αδειοδοτημένη Ζώνη 5-5.8 GHz:** Η λεγόμενη ως Unlicensed National Information Infrastructure Band (U-NII) περιλαμβάνει 3 μεγάλες ζώνες συχνοτήτων: 1) οι **χαμηλές και μεσαίες ζώνες U-NII (5.15-5.35 GHz)**, 2) η νέα **ζώνη U-NII World Radio Conference - WRC (5.47-5.725 GHz)** και 3) η **υψηλή U-NII / ISM band (5.725 - 5.825 GHz)**. Καθώς στην πλειονότητα των χωρών το μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι ελεύθερο για χρήση, οι προαναφερθείσες ζώνες συχνοτήτων είναι στρατηγικής σημασίας για να την επέκταση των παρόχων σε υποεξυπηρετούμενες αραιοκατοικημένες αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές. Σε αντίθεση με το Wi-Fi που στοχεύει πρώτιστα τις εφαρμογές δικτύων τοπικής περιοχής (Local Area Network - LAN), το WiMAX στοχεύει σε εφαρμογές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου σε μητροπολιτικό επίπεδο (Metropolitan Area Network – MAN) και έτσι ωφελείται από τα υψηλότερα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος εξόδου.

- Η χαμηλή και η μεσαία ζώνη 5.15-5.35GHz χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές εσωτερικού χώρου, χαμηλής ισχύος όπως το Wi-Fi και άρα είναι λιγότερο ενδιαφέρουσα για εφαρμογές WiMAX. Η καινούργια ζώνη WRC (5.47 – 5.7525 GHz) προσθέτει σημαντικό μη αδειοδοτημένο εύρος ζώνης προς χρήση. Βέβαια οι περισσότερες εφαρμογές WiMAX βρίσκονται στο άνω τμήμα της ζώνης (5.725 - 5.85GHz), καθώς υπάρχει λιγότερη παρεμβολή στο συγκεκριμένο τμήμα και

επιτρέπεται μεγαλύτερη ισχύς εξόδου η οποία φτάνει τα 4 W, συγκεκριόμενη με το 1W που επιτρέπεται στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες.

- **Αδειοδοτημένη Ζώνη 2.5GHz** (γνωστή ως Multipoint Distribution Service - MDS ζώνη και ως Broadband Radio Service - BRS στις ΗΠΑ): Η συγκεκριμένη ζώνη φάσματος περιλαμβάνει 31 κανάλια των 6MHz στο εύρος 2.5 έως 2.69 GHz και χρησιμοποιείται για την Instructional Television Fixed Service - ITFS στις ΗΠΑ. Καθώς το συγκεκριμένο φάσμα ελάχιστα χρησιμοποιείται για τον αρχικό του σκοπό της τηλεόρασης, έχει ανατεθεί για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, το Μεξικό, η Βραζιλία και σε μερικές της χώρες νοτιοανατολικής Ασίας. Επίσης επικρατούσα ζώνη στη Νοτιοανατολική Ασία (περιλαμβάνοντας την Αυστραλία, τη Νότια Κορέα και τη Νέα Ζηλανδία), είναι αυτή των 2.3GHz.

- **Αδειοδοτημένη Ζώνη 3.5GHz** : Η συγκεκριμένη ζώνη είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση (Broadband Wireless Access – BWA) στην Ευρώπη και διεθνώς, εκτός από τις ΗΠΑ. Το αρχικό αδειοδοτημένο φάσμα που διατίθεται για BWA εφαρμογές σε αυτήν την γενική περιοχή συχνοτήτων και βρίσκεται μεταξύ των 3.4 και 3.6GHz αν και υπάρχουν μερικές νέες κατανομές μεταξύ 3.3-3.4 και 3.6-3.8GHz. Έχοντας εύρος 300MHz η συγκεκριμένη ζώνη προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για σταθερές εφαρμογές, είτε τελευταίου μιλίου είτε backhaul. Στην Ελλάδα ο ΟΤΕ έχει εγκαταστήσει στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων (3.5 GHz) ένα δίκτυο WiMAX στο Άγιο Όρος, χρησιμοποιώντας έξι σταθμούς βάσης για την κάλυψη 50 χιλιομέτρων και περισσότερων από είκοσι μοναστηριών.

2.7.2 ΟΦΕΛΗ ΤΩΝ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Τα οφέλη των αδειοδοτημένων και μη αδειοδοτημένων λύσεων WiMAX σε σχέση με τις ενσύρματες λύσεις είναι αποδοτικότητα κόστους, η δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability) και η ευελιξία. (Intel, 2005)

2.7.2.1 ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ

Για να αναπτύξει ένας πάροχος δικτύου ή υπηρεσιών μια αδειοδοτημένη λύση, πρέπει να αγοράσει φάσμα κάτι που είναι συνήθως μια δυσκίνητη διαδικασία. Σε μερικές χώρες η συγκέντρωση των απαραίτητων δικαιολογητικών που απαιτούνται για τη λήψη της άδειας χρήσης του φάσματος μπορεί να πάρει μήνες, ενώ σε άλλες χώρες, η δημοπρασία φάσματος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των τιμών

και φυσικά στην καθυστέρηση υλοποίησης του έργου. Το παραπάνω σημαντικό εμπόδιο εισόδου, σε συνδυασμό με την αποκλειστική χρήση μιας ζώνης από μια εταιρεία, επιτρέπει την βελτίωση της ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών και την μείωση των παρεμβολών.

Οι αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι υψηλότερες δαπάνες και τα αποκλειστικά δικαιώματα στο φάσμα επιτρέπουν μια πιο προβλέψιμη και σταθερή λύση για τις μεγάλες μητροπολιτικές εφαρμογές και για κινητή χρήση. Οι χαμηλότερες συχνότητες που συνδέονται με τις αδειοδοτημένες ζώνες (2.5GHz και 3.5GHz) επιτρέπουν καλύτερη επικοινωνία Μη Οπτικής Επαφής (NLOS) και μεγαλύτερη διείσδυση. Εντούτοις, οι ζώνες αυτές αντιμετωπίζουν και κάποια ζητήματα παρεμβολής. Δεδομένου ότι οι πάροχοι επεκτείνουν περισσότερο τα δίκτυα τους, πρέπει να αντιμετωπίσουν τις αμοιβαίες παρεμβολές εντός του δικτύου τους. Ο κατάλληλος σχεδιασμός και υλοποίηση των δικτύων μπορούν να μειώσουν τα προβλήματα αυτά. Συνοψίζοντας, οι αδειοδοτημένες λύσεις προσφέρουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) εν σύγκριση με τις μη αδειοδοτημένες λύσεις.

2.7.2.2 ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ

Οι δαπάνες που απαιτούνται για την απόκτηση αδειοδοτημένων ζωνών οδηγούν πολλούς ασύρματους παρόχους υπηρεσιών Internet να εξετάσουν τις μη αδειοδοτημένες λύσεις για εξειδικευμένες αγορές, όπως οι αγροτικές και οι αναπτυσσόμενες περιοχές. Οι συγκεκριμένες λύσεις παρέχουν διάφορα βασικά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένων των χαμηλότερων αρχικών δαπανών, τη γρηγορότερη ανάπτυξη του δικτύου, και μια κοινή ζώνη συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο μέρος της υφηλίου. Αυτά τα οφέλη τροφοδοτούν το ενδιαφέρον και δίνουν δυναμική στην επιτάχυνση της υιοθέτησης ευρυζωνικών λύσεων.

Οι πάροχοι υπηρεσιών στις αναδυόμενες αγορές, όπως είναι οι αναπτυσσόμενες χώρες ή οι αναπτυσσόμενες χώρες με υπανάπτυκτες περιοχές, μπορούν να μειώσουν το χρόνο εισόδου τους στην αγορά και τις αρχικές δαπάνες, αναπτύσσοντας μια μη αδειοδοτημένη λύση χωρίς την αναγκαιότητα λήψης χρονοβόρων αδειών ή πραγματοποίησης δημοπρασιών. Ακόμη και οι αναπτυσσόμενες περιοχές μπορούν να ωφεληθούν από τις μη αδειοδοτημένες λύσεις. Μερικοί πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια τέτοια λύση ώστε να παρέχουν πρόσβαση τελευταίου μιλίου σε οικιακούς καταναλωτές και επιχειρήσεις, για backhaul ή ως συμπληρωματικό δίκτυο για τα υπάρχοντα αδειοδοτημένα ή ενσύρματα δίκτυα τους.

Μια μη αδειοδοτημένη λύση ρυθμίζεται από την άποψη της ισχύος εξόδου μετάδοσης, αν και δεν απαιτείται κάποια άδεια. Μια συσκευή ή μια υπηρεσία μπορεί να χρησιμοποιήσει τη ζώνη οποιαδήποτε στιγμή αρκεί να ελέγχεται επαρκώς η ισχύς εξόδου. Οι πάροχοι που ανησυχούν ιδιαίτερα για την ποιότητα υπηρεσίας,

διαπιστώνουν ότι μια αδειοδοτημένη λύση παρέχει σε αυτούς μεγαλύτερο έλεγχο της υπηρεσίας που προσφέρουν έναντι της μη αδειοδοτημένης.

Ένας πάροχος που θέλει να εξυπηρετήσει μια αναπτυσσόμενη ή μια υπανάπτυκτη αγορά με μια business class υπηρεσία μπορεί να χρησιμοποιήσει μια μη αδειοδοτημένη ζώνη, με το κατάλληλο σχεδιασμό του δικτύου, περιλαμβάνοντας έρευνες των επιθυμητών περιοχών και εξειδικευμένες κεραιών, για να προσφέρει συγκεκριμένα «συμβόλαια» (Συμφωνητικά Επιπέδου Υπηρεσίας, Service Level Agreements – SLAs) για τις εξειδικευμένες αγορές τους. Εντούτοις, μια τέτοια λύση δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι μπορεί να αντικαταστήσει μια αδειοδοτημένη λύση. Κάθε μία λύση καλύπτει μια διαφορετική ανάγκη της αγοράς, με την αδειοδοτημένη να έχει το πλεονέκτημα της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), ενώ τη μη αδειοδοτημένη το πλεονέκτημα του μικρότερου κόστους. Η διαθεσιμότητα των δύο εναλλακτικών επιλογών επιτρέπει στους προμηθευτές και στις αναδυόμενες αγορές να καλύψουν ποικίλες ανάγκες χρήσης.

Οι πάροχοι υπηρεσιών που θέλουν να προσθέσουν την κινητικότητα στο ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυό τους πρέπει να εξετάσουν πρώτα μια αδειοδοτημένη λύση WiMAX ώστε να απολαμβάνουν της βελτιωμένης ποιότητας υπηρεσίας, έπειτα μια Wi-Fi λύση πλέγματος (Mesh) για τις εφαρμογές που απαιτούν μια άμεση κάλυψη, και έπειτα μια μη αδειοδοτημένη λύση. Μια αδειοδοτημένη λύση WiMAX προσφέρει καλύτερο έλεγχο στις μεγάλες περιοχές, ενισχυμένη δυνατότητα κλιμάκωσης, ποιότητα υπηρεσίας (QoS), και ευελιξία για τους χρήστες, ενώ το πλέγμα Wi-Fi μπορεί να καλύψει τις μικρότερες περιοχές με χαμηλότερο κόστος και να χρησιμοποιήσει ένα πρωτόκολλο Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) για να χειριστεί τους πολλαπλούς χρήστες μέσα σε μια μικρή περιοχή.

Για αυτούς τους λόγους, οι μη αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX στρέφονται στις αγροτικές περιοχές, τις αναδυόμενες αγορές, και τις εφαρμογές σημείου προς σημείο και μπορούν να παρέχουν μια εξαιρετικά οικονομική λύση για backhaul. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις στον αριθμό και τη θέση των χρηστών και ο περιορισμένος έλεγχος του φάσματος που προσφέρεται από μια μη αδειοδοτημένη λύση μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερες παρεμβολές. Τα στατιστικά στοιχεία των δικτύων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προγραμματίσουν αυτή την αστάθεια. Εντούτοις, θέματα σχετικά με την κινητικότητα όπως η μετάδοση των σημάτων RF από και προς έναν κινούμενο στόχο αντιμετωπίζονται ευκολότερα χρησιμοποιώντας μια αδειοδοτημένη λύση. Επομένως, οι κινητές εφαρμογές είναι καταλληλότερες για μια αδειοδοτημένη λύση WiMAX.

Οι μεγάλες υπανάπτυκτες περιοχές ή οι υποεξυπηρετούμενες περιοχές, όπως μια απομονωμένη πανεπιστημιούπολη ή αγρόκτημα, καλύπτονται καλύτερα από τις μη αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX, όπου τα οικονομικά οφέλη είναι μεγαλύτερα και η περιοχή κάλυψης είναι ευρύτερη.

Έτσι λοιπόν, οι μη αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX είναι κατάλληλες για τις ακόλουθες εφαρμογές:

- Ζεύξεις Σημείου Προς Σημείο, λύσεις μεγάλων αποστάσεων σε αραιοκατοικημένες περιοχές.
- Λύσεις Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία στις αγροτικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων και μερικών αναπτυσσόμενων χωρών
- Περιοχές με μικρό εντός ζώνης θόρυβο RF (RF in-band noise) ή όπου η παρεμβολή στην μη αδειοδοτημένη ζώνη μπορεί να ελεγχθεί εντός ορισμένων περιοχών, όπως οι μεγάλες πανεπιστημιούπολεις, οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις, και τα ναυπηγεία.
- Λύσεις που το κόστος είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την απόφαση μεταξύ των ανταγωνιστικών ασύρματων τεχνολογιών.
- Λύσεις που η κατοχή του εξοπλισμού είναι προαιρετική για τον τελικό χρήστη.

Αντίστοιχα, οι αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX είναι κατάλληλες για τις ακόλουθες εφαρμογές:

- Εφαρμογές ευρείας κάλυψης, Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία
- Ευρυζωνικές κινητές υπηρεσίες
- Όταν η αδειοδότηση δίνει τη δυνατότητα του έλεγχου της χρήσης του φάσματος και της παρεμβολής.
- Όταν το κόστος δεν είναι το μείζον ζήτημα για την επιλογή της τεχνολογίας, επειδή η τεχνολογία έχει βελτιστοποιηθεί για αυτήν τη συγκεκριμένη εφαρμογή (άλλες τεχνολογίες όπως η 3G θα κοστίσουν περισσότερο και θα έχουν χειρότερη απόδοση)
- Όταν οι υπηρεσίες και ο εξοπλισμός των σταθμών βάσεων μπορούν να μισθωθούν μόνον από έναν πάροχο.

2.7.2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΖΩΝΩΝ

Τόσο οι αδειοδοτημένες όσο και οι μη αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX χρησιμοποιούν Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) στο φυσικό στρώμα (PHY). Η υποστήριξη OFDM παρέχει οφέλη όπως αυξημένο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) των Κινητών Σταθμών και βελτιωμένη ανθεκτικότητα στην παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών. Η έννοια της πολυπλεξία αναφέρεται στη διαδικασία δημιουργίας

αμφίδρομων καναλιών για μεταδόσεις δεδομένων τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Οι τεχνικές αμφιδρόμησης που υποστηρίζει το WiMAX είναι τόσο η **Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Duplexing - TDD)** όσο και **Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Duplexing – FDD)**. Οι αδειοδοτημένες λύσεις χρησιμοποιούν FDD, ενώ οι μη αδειοδοτημένες χρησιμοποιούν TDD.

Η **Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας (FDD)** απαιτεί δύο ζευγάρια καναλιών που είναι χωρισμένα για να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή, ένα για τη εκπομπή και ένα για την λήψη. Οι περισσότερες ζώνες FDD κατανέμονται για μετάδοση φωνής, επειδή η αμφίδρομη αρχιτεκτονική FDD επιτρέπει στη φωνή να έχει ελάχιστες καθυστερήσεις. Η FDD, εντούτοις, προσθέτει επιπλέον στοιχεία στο σύστημα και επομένως αυξάνει το κόστος υλοποίησης. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς, τα οποία λειτουργούν σε μια γνωστή συχνότητα και είναι σχεδιασμένα για εφαρμογές φωνής. Η πλειοψηφία των σχημάτων κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται στα 3G δίκτυα έχει περιορισμούς στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Δεδομένου ότι η κυκλοφορία στα δίκτυα αυξάνεται ή μειώνεται, η γεωγραφική περιοχή που καλύπτεται από τον πομπό μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί, φαινόμενο που αποκαλείται "κυψέλη που αναπνέει (cell breathing)". Ακόμη, όταν ένας χρήστης που μοιράζεται ένα κανάλι σταματάει να μεταδίδει, ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται ανάλογα προς τον αριθμό των χρηστών για να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή, κάτι που οδηγεί σε ένα χαμηλότερο επίπεδο ισχύος μετάδοσης. Οι μεταβολές στο επίπεδο ισχύος μετάδοσης και στην εμβέλεια μπορούν να είναι αποδεκτές για τις εφαρμογές φωνής, αλλά περιέχουν προκλήσεις για τα δίκτυα δεδομένων.

Η **Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Χρόνου (TDD)** γίνεται χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου τα ζευγάρια καναλιών δεν είναι διαθέσιμα λόγω κανονιστικών περιορισμών, ή όπου οι μη αδειοδοτημένες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η TDD παρέχει ένα ενιαίο κανάλι τόσο για την άνω όσο και την κάτω ζεύξη. Ένα σύστημα TDD μπορεί δυναμικά να διαθέσει εύρος ζώνης στην προς τα πάνω και την προς τα κάτω ζεύξη, ανάλογα με το μέγεθος της κυκλοφορίας. Αυτή η ασύμμετρη μεταφορά είναι ιδανική για την κυκλοφορία δεδομένων στο διαδίκτυο όπου τα μεγάλα ποσά δεδομένων μπορούν να μεταδίδονται κατά μήκος της κάτω ζεύξης. Ένα σύστημα TDD λειτουργεί αρχικά μεταδίδοντας από το Σταθμό Βάσης στον Κινητό Σταθμό. Μετά από έναν σύντομο χρόνο προστασίας (guard time) , τυπικά 1ms, ο Κινητός Σταθμός μεταδίδει στην ίδια συχνότητα στην κατεύθυνση της άνω ζεύξης.

Οι TDD και FDD λύσεις δεν είναι διαλειτουργικές δεδομένου ότι χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες και διαφορετική τεχνική αμφιδρόμησης. Συνοψίζοντας, οι δυο τεχνικές εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς. Η FDD λειτουργεί σε δύο χωριστά κανάλια, ένα για τη λήψη και ένα για την εκπομπή και το φάσμα που χορηγείται τεχνολογίες είναι αδειοδοτημένο σε ίσου μεγέθους ζώνες. Χρόνος προστασίας (guard time) μεταξύ των ριπών των δυο ζεύξεων δεν απαιτείται, επιτρέποντας μια full-duplex υλοποίηση. Τέλος η FDD δεν υποστηρίζει τη μορφολογία δικτύου πλέγματος

(Mesh). Σε μια λύση TDD, ένα κοινό κανάλι χρησιμοποιείται και για τη μετάδοση και για τη λήψη. Συνεπώς απαιτούνται χρόνοι προστασίας μεταξύ των ριπών της άνω και της κάτω ζεύξης, ενώ μπορεί να υποστηριχθεί τοπολογία πλέγματος.

Μια λύση FDD κοστίζει περισσότερο επειδή απαιτεί περισσότερο υλικό (hardware) για να υποστηρίξει τα χωριστά κανάλια των δυο ζεύξεων. Το κόστος δικαιολογείται από την αποδοτικότερη χρήση του εύρους ζώνης και την βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Οι αδειοδοτημένες λύσεις χρησιμοποιούν FDD εξαιτίας της εύρωστης φύσης του καθώς και του δεδομένου φάσματος που διαμορφώνεται από συχνότητα. Αυτό επιτρέπει στους παρόχους να κατηγοριοποιούν την ποιότητα υπηρεσίας, κάτι που δεν είναι πλήρως εφικτό στις μη αδειοδοτημένες λύσεις.

2.7.2.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΕ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

Ποια είναι η συνέχεια; Ο στόχος για την ευρύτερη ανάπτυξη του WiMAX είναι η χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων. Καθώς τα ραδιοκύματα διαδίδονται σε μεγαλύτερη απόσταση όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, δημιουργείται μια άμεση σχέση μεταξύ του απαιτούμενου αριθμού των Σταθμών Βάσης και της προς κάλυψη περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, όσο χαμηλότερη είναι η ζώνη συχνότητας, τόσο λιγότεροι Σταθμοί Βάσης απαιτούνται. Καθώς το κόστος ανάπτυξης είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στην ανάπτυξη συστημάτων Ευρυζωνικής Ασύρματης Πρόσβασης, η μετάβαση στις χαμηλότερες συχνότητες είναι κρίσιμη. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα χρήσης χαμηλότερης συχνότητας σε αναπτυσσόμενες χώρες για την αύξηση της ραδιοκάλυψης. Η διαθεσιμότητα των ζωνών χαμηλότερης συχνότητας για την ευρυζωνική πρόσβαση θα οδηγήσει σε ανάλογη αύξηση της ευρυζωνικής διείσδυσης.

Το WiMAX Forum εργάζεται με τα παγκόσμια πρότυπα και τους ρυθμιστικούς παράγοντες για να προωθήσει την κατανομή του αδειοδοτημένου και μη αδειοδοτημένου φάσματος στις χαμηλότερες ζώνες συχνότητας. Οι συχνότητες μικρότερες του 1GHz, που για παράδειγμα χρησιμοποιούνται για την αναλογική τηλεόραση σε συχνότητα μικρότερη των 800MHz, αναμένεται να γίνουν διαθέσιμες καθώς οι τηλεοπτικοί σταθμοί μεταβαίνουν από την αναλογική στην ψηφιακή μετάδοση. Στις ΗΠΑ, η Federal Communications Commission (FCC) έχει ήδη χορηγήσει αδειοδοτημένο φάσμα για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση στα UHF τηλεοπτικά κανάλια 52-59 (699-741MHz) και στα UHF κανάλια 60-69 (747-801MHz.) Πέραν των χαμηλών συχνοτήτων, και οι περιοχές 3.6-4.2 GHz αναπτύσσονται στην Ευρώπη όπως και η 3,65-3,7 στις ΗΠΑ.

2.8 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το δίκτυο WiMAX αποτελείται από **Σταθμούς Βάσης (Base Stations- BS)** και **Σταθμούς Συνδρομητή (Subscribers Stations – SS)**, καθώς και από συνδέσεις σημείου προς πολλαπλά σημεία. Οι Σταθμοί Συνδρομητή μετονομάστηκαν από το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 σε **κινητούς σταθμούς (Mobile Stations - MSs)**, ώστε να υποστηριχθούν τόσο οι σταθεροί χρήστες όσο και αυτοί σε κίνηση. Ο κάθε σταθμός βάσης είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο κορμού ώστε να παρέχει ασύρματη σύνδεση σε πολλαπλούς συνδρομητές. Το σκέλος της διασύνδεσης των σταθμών βάσης με το δίκτυο κορμού δεν περιλαμβάνεται στις προδιαγραφές του δικτύου WiMAX. Πιθανές υλοποιήσεις της διασύνδεσης αυτής είναι δίκτυο DSL, οπτικές ίνες ή ακόμη και ασύρματα μέσω ζεύξεων σημείου προς σημείο.

Ένα δίκτυο WiMAX μπορεί να παρέχει ευρυζωνικές διαδικτυακές υπηρεσίες σε οικιακούς πελάτες, οπότε έχουμε Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση (Fixed Wireless Access), σε χρήστες SOHO (Small Office – Home Office) ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράκαμψη του τοπικού βρόχου, παρέχοντας υπηρεσίες φωνής, είτε με μεταγωγή πακέτου είτε κυκλώματος. Ακόμη είναι εφικτή η εν μέρει αντικατάσταση της καλωδίωσης του δικτύου κορμού των παρόχων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, από δίκτυα WiMAX. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δίκτυο κορμού για συστήματα Wireless LAN, αφού τα σημεία πρόσβασης (Access Points- APs) των WLANs χρειάζονται αξιόπιστη και χαμηλού κόστους ευρυζωνική διασύνδεση, κάτι που εξασφαλίζει το δίκτυο WiMAX.

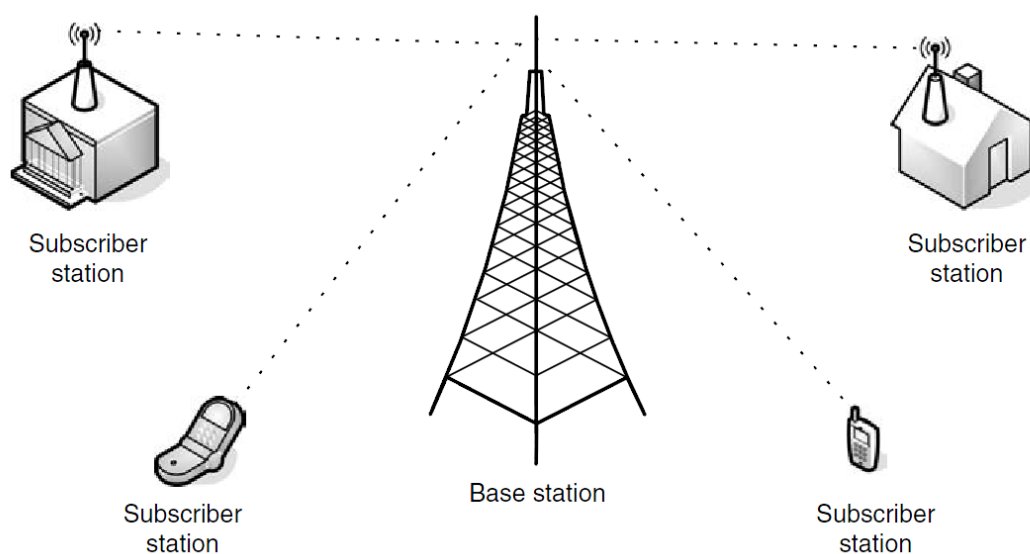
Υπάρχουν δυο τοπολογίες δικτύου που ορίζονται στο συγκεκριμένο πρότυπο, οι οποίες είναι (1) **αμφίδρομη σημείου προς πολλαπλά σημεία (two-way point-to-multipoint - PMP)** και (2) **τοπολογία δικτύου πλέγματος (mesh topology)**. Η τοπολογία PMP είναι μια πολύ συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή δικτύου που εμφανίζεται σε κυψελωτά δίκτυα, ενώ τα Ad-hoc Wi-fi δίκτυα αποτελούν ένα συνηθισμένο παράδειγμα mesh τοπολογίας. (Κανάτας και άλλοι, 2008 σελ 590-592) (Shehan Perera, 2008 σελ 50-51)

2.8.1 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΗΜΕΙΑ (PMP)

Η κάτω ζεύξη, από το σταθμό βάσης προς το χρήστη, λειτουργεί με τη συγκεκριμένη τοπολογία. Η ασύρματη ζεύξη του προτύπου λειτουργεί με ένα κεντρικό σταθμό βάσης και κεραία χωρισμένη σε τομείς, η οποία μπορεί να διαχειριστεί ταυτόχρονα πολλαπλούς ανεξαρτήτους τομείς. Σε ένα δεδομένο κανάλι συχνότητας και δεδομένους τομείς κεραίας, όλοι οι σταθμοί λαμβάνουν την ίδια εκπομπή ή έστω κομμάτι αυτής. Ο σταθμός βάσης είναι ο μόνος πομπός που λειτουργεί στη συγκεκριμένη κατεύθυνση, συνεπώς εκπέμπει χωρίς την ανάγκη της συνεργασίας με άλλους σταθμούς, εκτός της Αμφιδρόμησης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division

Duplexing –TDD) όπου ίσως χωρίζεται ο χρόνος σε περιόδους εκπομπής άνω και κάτω ζεύξης.

Η κάτω ζεύξη επιτυγχάνεται συνήθως με ευρυεκπομπή (broadcast), όπου ο σταθμός βάσης αποστέλλει προς όλους τους κινητούς σταθμούς. Μόνο όταν έχει ορισθεί το downlink map (DL-MAP) ώστε να υποδεικνύει ένα συγκεκριμένο κινητό σταθμό, το τμήμα του υποπλαισίου κάτω ζεύξης δεν θα ληφθεί από όλους τους σταθμούς, παρά μόνο από τον παραλήπτη. Ο κινητός σταθμός ελέγχει τα Connection IDs στις ληφθείσες PDUs και κρατά μόνον αυτές που αντιστοιχούν σε αυτόν. Οι κινητοί σταθμοί μοιράζονται την άνω ζεύξη προς το σταθμό βάσης μετά από αίτηση τους προς αυτόν. Ανάλογα με την κλάση της χρησιμοποιούμενης υπηρεσίας, ο κινητός σταθμός μπορεί να λάβει δικαιώματα συνεχούς εκπομπής, αλλιώς το δικαίωμα προς εκπομπή εκχωρείται από το σταθμό βάσης μετά από αίτηση του ίδιου του κινητού σταθμού. Εκτός των προαναφερθέντων μηνυμάτων, υπάρχει και η δυνατότητα πολυεκπομπής (multicast), κάτι που θα εκμεταλλευτούμε στη συγκεκριμένη διπλωματική για τη μετάδοση IPTV. Σε κάθε τομέα, οι χρήστες χρησιμοποιούν ένα πρωτόκολλο εκπομπής που ελέγχει τη διένεξη μεταξύ των χρηστών και ενεργοποιεί την υπηρεσία που σχετίζεται με τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση και εύρος ζώνης από κάθε εφαρμογή χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεσσάρων διαφορετικών τύπων μηχανισμού προγραμματισμού άνω ζεύξης.

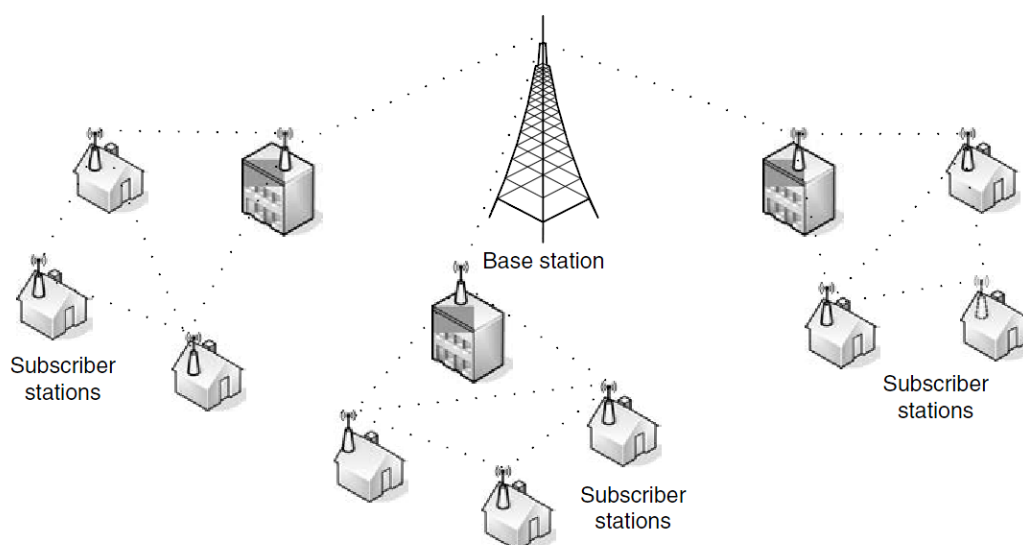


Σχήμα 2.7 Τοπολογία Δικτύου Σημείο Προς Πολλαπλά Σημεία (Πηγή: Syed Ahson και άλλοι, 2007)

2.8.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESH)

Η βασική διαφορά μεταξύ της τοπολογίας PMP και Mesh είναι ότι ενώ στην πρώτη η επικοινωνία εμφανίζεται μόνο μεταξύ σταθμών βάσης και κινητών σταθμών, στην τοπολογία mesh η κίνηση μπορεί να δρομολογηθεί και μεταξύ κινητών σταθμών.

Δηλαδή, ένα μήνυμα μπορεί να φθάσει στον παραλήπτη ακολουθώντας μια διαδρομή πολλαπλών ζεύξεων, καθώς ο αποστολέας συνδέεται με αυτόν είτε άμεσα είτε μέσω άλλων κόμβων.



Σχήμα 2.8 Τοπολογία Δικτύου Πλέγματος (Πηγή: Syed Ahson και άλλοι, 2007)

Εντός ενός δικτύου mesh, ένα σύστημα που έχει άμεση σύνδεση με υπηρεσίες backhaul εκτός του δικτύου πλέγματος, ορίζεται ως **Σταθμός Βάσης Mesh (Mesh BS)**. Όλα τα άλλα συστήματα ενός δικτύου πλέγματος καλούνται **Mesh Κινητοί Σταθμοί (Mesh MSs)**. Γενικά, τα συστήματα ενός δικτύου πλέγματος ονομάζονται **κόμβοι**. Δυο κόμβοι που μπορούν να επικοινωνούν απευθείας ονομάζονται **γειτονικοί (neighbours)**, ενώ το σύνολο των γειτονικών κόμβων καλείται **γειτονιά (neighbourhood)**. Μια **εκτεταμένη γειτονιά (Extended Neighbourhood)** περιλαμβάνει επιπλέον όλους τους γείτονες της γειτονιάς. Εντός του δικτύου πλέγματος, η **άνω** και η **κάτω ζεύξη** ορίζονται ως η κυκλοφορία στην κατεύθυνση του Mesh BS και η εξερχόμενη από το Mesh BS κυκλοφορία, αντίστοιχα.

Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο μετάδοσης, η επικοινωνία των κόμβων μπορεί να επιτευχθεί είτε με **κατανεμημένο χρονοπρογραμματισμό** στη βάση της ισότητας, είτε στη βάση της υπεροχής με **κεντρικό χρονοπρογραμματισμό** από ένα σταθμό βάσης είτε ακόμη και με συνδυασμό των δύο. Έτσι λοιπόν, κάθε κόμβος μπορεί να θεωρείται ισότιμος ή ανώτερος ανάλογα με το ρόλο που επιτελεί στο δίκτυο. Στην περίπτωση του **κατανεμημένου** χρονοπρογραμματισμού, οι κόμβοι συντονίζουν τις εκπομπές τους και εκπέμπουν προς όλους τους γειτονικούς κόμβους τις σχετικές πληροφορίες. Στην περίπτωση αυτή δεν γίνεται διάκριση μεταξύ της άνω και της κάτω ζεύξης. Με άλλα λόγια, όλοι οι κόμβοι ακόμη και ο Σταθμός Βάσης συντονίζουν τις μεταδόσεις τους στην εκτεταμένη γειτονιά και εκπέμπουν τον χρονοπρογραμματισμό τους (διαθέσιμοι πόροι, αιτήσεις, εκχωρήσεις δικαιωμάτων) προς όλους τους γείτονες. Προαιρετικά, ο χρονοπρογραμματισμός μπορεί να καθοριστεί από ασυντόνιστες αιτήσεις και εκχωρήσεις δικαιωμάτων μεταξύ δυο

κόμβων. Οι κόμβοι θα εξασφαλίσουν ότι οι τελικές εκπομπές δεν προκαλούν συγκρούσεις με τα δεδομένα και τις εκπομπές ελέγχου που έχει χρονοπρογραμματιστεί από άλλον κόμβο στην εκτεταμένη γειτονιά τους.

Στον **κεντρικό χρονοπρογραμματισμό** οι αποφάσεις για ανάθεση πόρων στις διάφορες ζεύξεις λαμβάνονται από τον σταθμό βάσης, αφού αυτός λάβει μηνύματα από όλους τους κόμβους που βρίσκονται σε μια καθορισμένη περιοχή (απόσταση ορισμένων βημάτων). Στη συνέχεια αποφασίζει για το μέγεθος των εκχωρημένων πόρων της κάθε ζεύξης στο δίκτυο, τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, και μεταδίδει τις εκχωρήσεις αυτές σε όλους τους Κινητούς Σταθμούς στην περιοχή. Τα μηνύματα εκχώρησης δικαιωμάτων δεν περιλαμβάνουν τον πραγματικό χρονοπρογραμματισμό, αλλά κάθε κόμβος τον υπολογίζει χρησιμοποιώντας έναν προκαθορισμένο αλγόριθμο με δεδομένες παραμέτρους. Όλες οι ανακοινώσεις γίνονται στο πλαίσιο της ζεύξης που έχει εγκατασταθεί μεταξύ δυο κόμβων, η οποία είναι η μοναδική για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ αυτών των δυο κόμβων. Η κάθε ζεύξη σε μια γειτονιά χαρακτηρίζεται από ένα αναγνωριστικό μεγέθους 8 bit, που είναι τμήμα του αναγνωριστικού της σύνδεσης (Connection ID – CID).

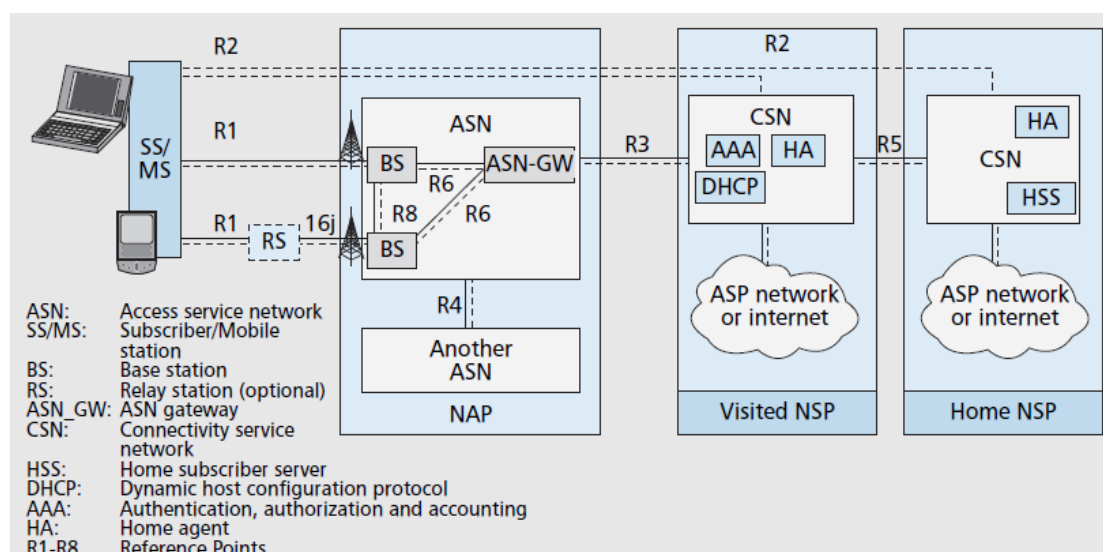
Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) παρέχεται σε επίπεδο μηνυμάτων, μέσα σε μια ζεύξη. Καμία υπηρεσία ή παράμετρος ποιότητας υπηρεσίας δεν σχετίζεται με μια ζεύξη, αλλά κάθε μήνυμα ξεχωριστά έχει παραμέτρους υπηρεσίας στην επικεφαλίδα του.

2.8.3 ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX

Η βασική αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX μπορεί να αναπαρασταθεί λογικά με ένα μοντέλο αναφοράς δικτύου (Network Reference Model – NRM) , το οποίο προσδιορίζει λειτουργικές ομάδες και σημεία αναφοράς βάσει των οποίων ορίζονται οι προδιαγραφές διαλειτουργικότητας δικτύου. Το μοντέλο αναφοράς δικτύου του WiMAX διαφοροποιεί τους **παρόχους δικτύου πρόσβασης (Network Access Providers – NAPs)** από του **παρόχους δικτύου υπηρεσιών (Network Service Providers - NSPs)**. Ο NAP είναι μια επιχειρηματική οντότητα που παρέχει υποδομή ραδιοπρόσβασης WiMAX, ενώ ο NSP παρέχει συνδεσιμότητα IP και WiMAX υπηρεσίες στους συνδρομητές ανάλογα με το εκάστοτε υπογραφέν συμβόλαιο (**Service Level Agreement - SLA**) με έναν ή περισσότερους NAP. Η αρχιτεκτονική του δικτύου επιτρέπει έναν NSP να σχετίζεται με πολλαπλούς NAP σε μια ή περισσότερες γεωγραφικές περιοχές, όπως και ένας NAP να σχετίζεται με πολλαπλούς NSP. Βέβαια είναι πολύ πιθανό, μια εταιρεία να είναι τόσο πάροχος πρόσβασης δικτύου όσο και υπηρεσίας.

Το μοντέλο αναφοράς δικτύου WiMAX αποτελείται από αρκετές λογικές οντότητες δικτύου: κινητούς σταθμούς (MSs), ένα δίκτυο πρόσβασης υπηρεσίας (Access Service Network- ASN), ένα δίκτυο υπηρεσιών συνδεσιμότητας (Connectivity Service Network - CSN) και την επικοινωνία τους μέσω των σημείων αναφοράς R1-

R8 όπως φαίνονται στο σχήμα. Κάθε λογική οντότητα από τις προαναφερθείσες περιγράφεται παρακάτω.



Σχήμα 2.9 Βασικό Μοντέλο Αναφοράς Δικτύου WiMAX (Πηγή: Etemad, 2008)

- **Κινητός Σταθμός (Mobile Station – MS):** Γενικός εξοπλισμός χρήστη που παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα μεταξύ απλών ή πολλαπλών hosts και το δίκτυο WiMAX. Ο όρος κινητός σταθμός αναφέρεται τόσο σε σταθερά όσο και σε κινητά τεμαχικά.
- **Δίκτυο Πρόσβασης Υπηρεσίας (Access Service Network- ASN):** Αποτελεί ένα σύνολο λειτουργιών δικτύου που απαιτούνται για την παροχή ραδιοπρόσβασης στον κινητό σταθμό. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν και λειτουργίες συνδεσιμότητας επιπέδου 2 με το κινητό σταθμό, σύμφωνα με τα πρότυπα IEEE 802.16 και τα προφίλ συστημάτων WiMAX. Επιπλέον, παρέχεται μεταφορά μηνυμάτων αυθεντικοποίησης, εξουσιοδότησης και πληρωμής (AAA) προς τον οικείο NSP, αναζήτηση και επιλογή προτιμώμενου NSP καθώς και διαχείριση ραδιοπύλων.
- **Δίκτυο Υπηρεσιών Συνδεσιμότητας (Connectivity Service Network - CSN):** Αποτελεί ένα σύνολο δικτυακών λειτουργιών που παρέχουν συνδεσιμότητα IP σε WiMAX συνδρομητές. Το CSN μπορεί επιπλέον να περιλαμβάνει στοιχεία δικτύου, όπως δρομολογητές, AAA proxy server, οικείο πράκτορα (home agent) , βάσεις δεδομένων χρηστών καθώς και διαλειτουργικές πύλες (gateways) ή servers δικτύου για υποστήριξη υπηρεσιών πολυεκπομπής (multicast) και ευρυεκπομπής (broadcast). Ένα δίκτυο υπηρεσιών συνδεσιμότητας μπορεί να αναπτυχθεί, τόσο ως κομμάτι ενός υπάρχοντος NSP όσο και ενός νεοσχεδιαζόμενου NSP.

Το δίκτυο υποστηρίζει δυο ειδών αρχιτεκτονικές κινητικότητας, τη βασική (anchored) κινητικότητα ASN και τη βασική κινητικότητα CSN. Η πρώτη συμβαίνει

σε κάθε μεταπομπή σταθμού βάσης, ανεξάρτητα από υποδίκτυα IP ή αλλαγές σε ξένους πράκτορες Mobile IP. Αυτή η διαπομπή είναι εντελώς διάφανη στο CSN, καθώς οι λειτουργίες του ASN διαχειρίζονται αλλαγές στις διαδρομές δεδομένων εντός ή μεταξύ ASNs για να διατηρηθούν οι διαδρομές επικοινωνίας (bearer paths) με τον κινητό σταθμό, τόσο στην άνω ζεύξη όσο και στην κάτω. Η βασική κινητικότητα CSN, αντίστοιχα, πυροδοτείται όταν αλλάξει το IP υποδίκτυο ή ο ξένος πράκτορας.

Το ASN μπορεί να υλοποιηθεί είτε ως ενσωματωμένο ASN, όπου όλες οι λειτουργίες επιτελούνται από την ίδια λειτουργική οντότητα, είτε ως μια κατανεμημένη διάταξη σε δυο ξεχωριστούς κόμβους, ένα **σταθμό βάσης (BS)** και μια **πύλη ASN (ASN gateway- ASN-GW)**. Ένα κατανεμημένο ASN, αποτελείται από έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης και από τουλάχιστον μια υλοποίηση της ASN-GW. Οι λειτουργίες των BS και των ASN-GW ακολουθούν:

- **Σταθμός Βάσης (BS):** Η λογική οντότητα δικτύου που πρωταρχικά αποτελείται από λειτουργίες σχετικές με τη ραδιοεπαφή ενός ASN με τους κινητούς σταθμούς (Mobile Stations- MSs), μέσω μιας ασύρματης ζεύξης που εφαρμόζει τις προδιαγραφές του φυσικού στρώματος και του στρώματος MAC που καθορίζονται από το πρότυπο IEEE802.16.
- **Πύλη ASN (ASN gateway):** Η λογική οντότητα που αντιπροσωπεύει ένα σύνολο συγκεντρωμένων λειτουργιών σχετικές με ποιότητα υπηρεσίας, ασφάλεια και διαχείριση κινητικότητας για όλες τις συνδέσεις δεδομένων που εξυπηρετούνται από το συνδυασμό της πύλης με το σταθμό βάσης. Επιπλέον, διαθέτει λειτουργίες σχετικές με αλληλεπίδραση IP με το CSN διαμέσου του σημείου αναφοράς R3, καθώς και με άλλα ASN μέσω του R4.

Τυπικά πολλαπλοί σταθμοί βάσης μπορεί να είναι λογικά συσχετισμένοι με ένα ASN. Ακόμη, ένας BS μπορεί να είναι συνδεδεμένος λογικά με περισσότερες της μιας ASN-GW, ώστε να είναι εφικτή η εξισορρόπηση φορτίου (load balancing). (Etemad, 2008)

2.9 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ WiMAX

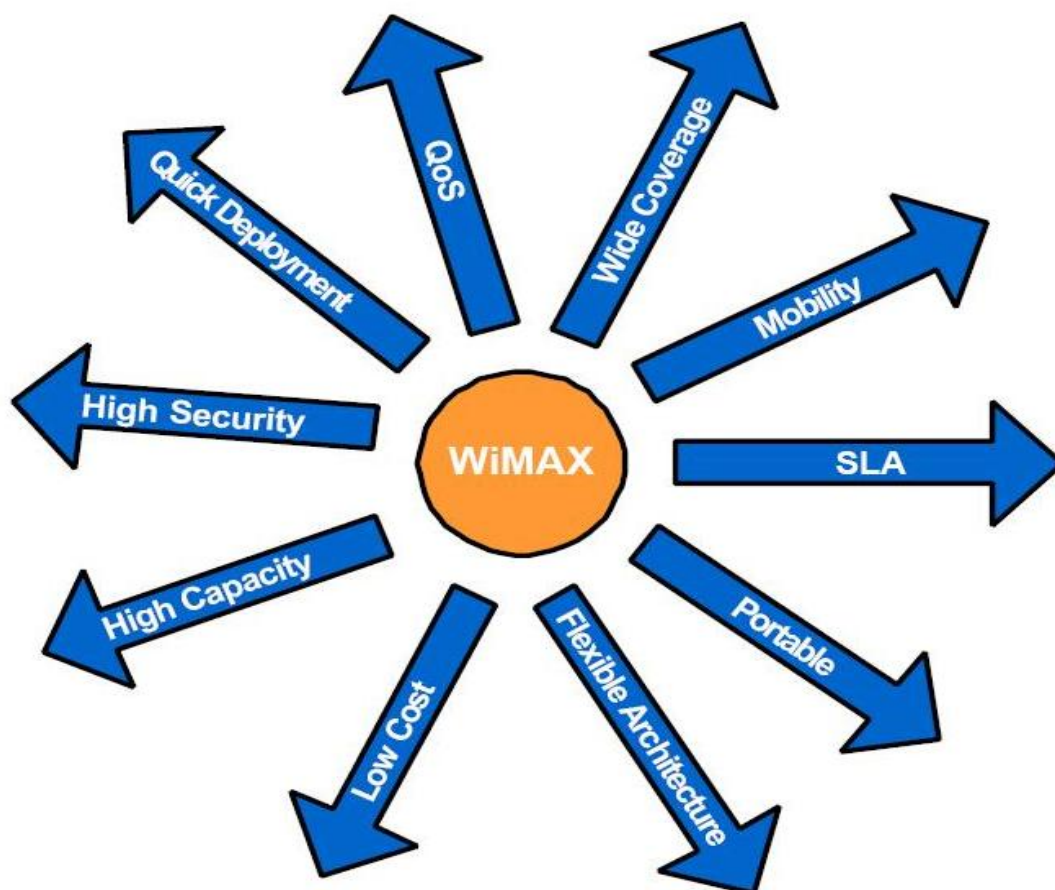
Ο μεγάλος αριθμός των εφαρμογών του WiMAX σε συνδυασμό με τη διαφημιζόμενη αποδοτικότητα τους στην επίλυση προβλημάτων κόστους και απόστασης, οδήγησε αρκετές επιχειρήσεις να στραφούν προς την τεχνολογία αυτή. Το WiMAX έχει κατασκευαστεί για να προσφέρει σημαντικά οφέλη στους παρόχους και τους χρήστες σε διαφορετικά περιβάλλοντα (επιχειρήσεις, καταναλωτές, δημόσια διοίκηση), καθώς και σε διαφορετικές περιοχές γεωγραφικά και δημογραφικά (αστική, περιαστική, αγροτική), τόσο βραχυχρόνια όσο και μακροχρόνια.

Διατηρώντας ή αναβαθμίζοντας τα πλεονεκτήματα των σημερινών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο και έχοντας απαλλαγεί από τα μειονεκτήματα

τους, το WiMAX είναι μια λύση που είναι πιθανό να επικρατήσει στο κοντινό μέλλον, αντικαθιστώντας ίσως και τις ADSL συνδέσεις. Το WiMAX προσφέρει υψηλές ταχύτητες πρόσβασης και πολύ μεγάλη εμβέλεια ώστε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε μητροπολιτικό επίπεδο.

Εκτιμάται ότι όπως σήμερα τα κινητά τηλέφωνα έχουν επικρατήσει στην τηλεφωνία έναντι του ενσυρμάτου τηλεφωνικού δικτύου, έτσι και το WiMAX θα καλύπτει περισσότερους συνδρομητές σε σχέση με αυτούς που συνδέονται στο Internet ενσύρματα.

Οι βασικοί στόχοι του WiMAX συνοψίζονται στο ακόλουθο σχήμα και στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε αυτούς που ουσιαστικά αποτελούν τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του WiMAX. (Wimax Forum, 2005)



Σχήμα 2.10 Πλεονεκτήματα του WiMAX (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

- **Ευέλικτη αρχιτεκτονική:** Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει πολλαπλές αρχιτεκτονικές συστημάτων, όπως Σημείου Προς Σημείο, Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία, και συνεχή και ευρεία κάλυψη. Το στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (**Medium Access Control – MAC**) του WiMAX υποστηρίζει υπηρεσία Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία με τον χρονοπρογραμματισμό (scheduling) μιας χρονοθυρίδας (timeslot) για κάθε Κινητό Σταθμό. Εάν υπάρχει μόνο ένας Κινητός Σταθμός στο δίκτυο, ο Σταθμός Βάσης WiMAX (**Base Station- BS**) επικοινωνεί με

τον πρώτο με ζεύξεις Σημείου Προς Σημείο. Σε μια τέτοια περίπτωση ο Σταθμός Βάσης χρησιμοποιεί κεραίες στενότερης δέσμης (πιο κατευθυντικές) ώστε να καλύπτονται μεγαλύτερες αποστάσεις.

- **Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality Of Service – QoS):** Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του WiMAX είναι η εγγενής υποστήριξη της ποιότητας υπηρεσίας. Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν το είδος και τις απαιτήσεις μιας υπηρεσίας. Επιπλέον στο WiMAX υπάρχει και η έννοια της **ροής υπηρεσίας (Service Flow)** που σημαίνει μια ροή πακέτων με κοινά χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας. Στο WiMAX υπάρχουν 5 τύποι ροών υπηρεσιών που πρέπει να υποστηρίζονται από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού του στρώματος Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC) του Σταθμού Βάσης για τη μετάδοση δεδομένων μιας σύνδεσης. Αυτοί είναι η **Unsolicited Grant Services (UGS)**, **Real-time Polling Services (rtPS)**, **Nonreal-Time Polling Services (nrtPS)**, **Best Effort (BE)** και **Extended real-time variable rate Services (ERT-VR)**. Περισσότερη αναφορά στο θέμα της ποιότητας υπηρεσίας γίνεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

- **Υψηλή Ασφάλεια:** Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει το **AES (Advanced Encryption Standard)** και το **3DES (Triple Data Encryption Standard - Triple DES)**. Με την κρυπτογράφηση των ζεύξεων μεταξύ του Σταθμού Βάσης και του Κινητού Σταθμού υπηρεσίας, το WiMAX παρέχει στους χρήστες ιδιωτικότητα και ασφάλεια ενάντια στους υποκλοπείς αλλά και ασφάλεια στην ασύρματη ευρυζωνική διεπαφή (interface). Επίσης, η τεχνολογία του WiMAX επιτρέπει στους παρόχους να έχουν ασφάλεια και υψηλή προστασία εναντίον της κλοπής υπηρεσιών. Το WiMAX επίσης διαθέτει εγγενή υποστήριξη VLAN, η οποία ουσιαστικά προστατεύει τα δεδομένα που εκπέμπονται από διαφορετικούς χρήστες προς τον ίδιο Σταθμό Βάσης.

- **Ταχεία Ανάπτυξη:** Συγκρινόμενο με την εγκατάσταση των ενσυρμάτων τεχνολογιών, το WiMAX απαιτεί μικρή ή καθόλου κατασκευή ή αναμόρφωση ήδη υπάρχουσών εγκαταστάσεων, καθώς δεν απαιτείται, για παράδειγμα, εκσκαφή για την υποστήριξη των καλωδιώσεων. Οι πάροχοι που έχουν αποκτήσει άδειες να χρησιμοποιούν αδειοδοτούμενες ζώνες, ή σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν μία από τις μη αδειοδοτημένες ζώνες δε χρειάζονται άλλες κρατικές αδειοδοτήσεις. Από τη στιγμή που η κεραία και ο απαιτούμενος εξοπλισμός λειτουργήσουν, το WiMAX είναι έτοιμο για παροχή υπηρεσιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εγκατάσταση του συστήματος WiMAX μπορεί να ολοκληρωθεί σε λίγες ώρες, ενώ άλλες τεχνολογίες απαιτούν διάρκεια μηνών.

- **Πολυεπίπεδη Υπηρεσία:** Ο τρόπος που μεταδίδεται μια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας, βασίζεται γενικά σε ένα «συμβόλαιο» που ονομάζεται Συμφωνητικό Επιπέδου Υπηρεσίας (**Service Level Agreement – SLA**), μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών και του τελικού χρήστη. Επιπλέον ένας πάροχος υπηρεσίας μπορεί να προσφέρει διαφορετικά SLAs σε διαφορετικούς συνδρομητές, ακόμα και σε διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο Κινητό Σταθμό.

- **Διαλειτουργικότητα:** Το WiMAX βασίζεται σε παγκόσμια πρότυπα, τα οποία έχουν αναπτυχθεί ανεξάρτητα από τους κατασκευαστές εξοπλισμού και έτσι διευκολύνεται η διαλειτουργικότητα των συσκευών. Είναι εύκολο λοιπόν για τους τελικούς χρήστες να μετακινούνται και να χρησιμοποιούν τους Κινητούς Σταθμούς τους σε διαφορετικές περιοχές ή ακόμη και με διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών (roaming). Η διαλειτουργικότητα προστατεύει την αρχική επένδυση ενός παρόχου καθώς μπορεί να επιλεγεί εξοπλισμός από διαφορετικές εταιρείες ενώ το κόστος αυτού θα συνεχίσει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της ευρείας αποδοχής.
- **Φορητότητα:** Όπως συμβαίνει και στις υπάρχουσες κυψελωτές υλοποιήσεις, μόλις ο Κινητός Σταθμός του WiMAX ενεργοποιηθεί, ταυτοποιείται, καθορίζει τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης του με το Σταθμό Βάσης, όσο ο Κινητός Σταθμός είναι εγγεγραμμένος στη βάση δεδομένων του συστήματος, και στη συνέχεια διαπραγματεύεται αντίστοιχα τα χαρακτηριστικά εκπομπής του.
- **Κινητικότητα:** Η τροποποίηση IEEE 802.16e του προτύπου, προσέθεσε χαρακτηριστικά για την υποστήριξη της κινητικότητας. Βελτιώσεις έχουν γίνει στα φυσικά στρώματα των OFDM και OFDMA, ώστε να υποστηρίζονται συσκευές και υπηρεσίες σε κινητό περιβάλλον. Αυτές οι βελτιώσεις, που περιλαμβάνουν Scalable OFDMA, MIMO και υποστήριξη για idle/sleep mode και διαπομπή, επιτρέπουν πλήρη κινητικότητα σε ταχύτητες ακόμη και 160 χιλιομέτρων την ώρα. Το πρωτόκολλο που υποστηρίζεται από το WiMAX Forum, έχει κληρονομήσει τη επίδοση της Μη Οπτικής Επαφής (**Non-Line-Of-Sight - NLOS**) και την ανθεκτικότητα στις πολλαπλές διαδρομές του OFDM, καθιστώντας έτσι κατάλληλο για το κινητό περιβάλλον.
- **Χαμηλό Κόστος:** Το WiMAX βασίζεται σε ένα ανοιχτό, παγκόσμιο πρωτόκολλο. Η ευρεία αποδοχή του και η χρήση κυκλωμάτων χαμηλού κόστους μαζικής παραγωγής θα οδηγήσει σε δραματική μείωση του κόστους και το αποτέλεσμα του ανταγωνισμού θα παρέχει σημαντικά οικονομικά οφέλη στους παρόχους υπηρεσιών και στους τελικούς χρήστες.
- **Ευρύτερη Κάλυψη:** Το WiMAX υποστηρίζει πολλαπλά σχήματα διαμόρφωσης, όπως BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM. Τα συστήματα WiMAX, που περιλαμβάνουν έναν ενισχυτή υψηλής ισχύος και λειτουργούν σε μια χαμηλού επιπέδου διαμόρφωση (BPSK, QPSK) είναι ικανά να καλύψουν μια αρκετά μεγάλη γεωγραφική περιοχή, όταν στη ζεύξη μεταξύ του Σταθμού Βάσης και του Κινητού Σταθμού δεν παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο.
- **Λειτουργία Μη Οπτικής Επαφής:** Ο όρος Μη Οπτική Επαφή (NLOS) συνήθως αναφέρεται σε μία ραδιοζεύξη η οποία περιλαμβάνει εμπόδια εντός της πρώτης της ζώνης Fresnel. Το WiMAX βασίζεται στην τεχνολογία OFDM, η οποία διαθέτει την ενσωματωμένη δυνατότητα να διαχειρίζεται περιβάλλοντα Μη Οπτικής Επαφής. Η δυνατότητα αυτή βοηθάει τα προϊόντα WiMAX να παρέχουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε ένα τέτοιο περιβάλλον, κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό από άλλες ασύρματες τεχνολογίες.

- **Υψηλή Χωρητικότητα:** Χρησιμοποιώντας υψηλότερη διαμόρφωση (64-QAM) και εύρος ζώνης καναλιού, τα συστήματα WiMAX μπορούν να παρέχουν σημαντικό εύρος ζώνης στους τελικούς χρήστες.

2.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ WiMAX

2.10.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ WiMAX

Το πρότυπο WiMAX έχει αναπτυχθεί ώστε να απευθύνεται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, οι οποίες συνοψίζονται ανά κατηγορία στον ακόλουθο πίνακα. (Wimax Forum, 2005)

Περιγραφή Κλάσης	Πραγματικού Χρόνου	Τύπος Εφαρμογής	Εύρος Ζώνης
Interactive Gaming	Ναι	Interactive Gaming	50-85 Kbps
VoIP, Video Conference	Ναι	VoIP	4 - 64 Kbps
		Video Phone	32 - 384 Kbps
Streaming Media	Ναι	Music/Speech	5 - 128 Kbps
		Video Clips	20 - 384 Kbps
		Movies Streaming	> 2 Mbps
Information Technology	Όχι	Instant Messaging	< 250 byte messages
		Web Browsing	> 500 Kbps
		Email (με συνημμένα)	> 500 Kbps
Media Content Download (Store and Forward)	Όχι	Δεδομένα, Movie Download	> 1 Mbps
		Peer-to-Peer	> 500 Kbps

Πίνακας 2-1 Εφαρμογές του WiMAX

2.10.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ WiMAX

Το WiMAX, εξαιτίας των τεχνικών χαρακτηριστικών του, μπορεί να υποστηρίξει ένα μεγάλο αριθμό σεναρίων χρήσης. Είναι σε θέση να παρέχει ολική ελευθερία στους

ανθρώπους που κινούνται αρκετά, επιτρέποντάς τους να παραμένουν συνεχώς συνδεδεμένοι με υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο. Η τεχνολογία WiMAX θα επιτρέπει στους ανθρώπους να πηγαίνουν από το σπίτι στο αυτοκίνητό τους κι έπειτα στο γραφείο τους ή οπουδήποτε αλλού θέλουν, και όλα αυτά απρόσκοπτα και με συνεχή παροχή υπηρεσίας. Στην αρχή της ενότητας παρουσιάζουμε ένα πίνακα με ορισμένα σενάρια χρήσης, που επιδεικνύει τα ποια από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά-πλεονεκτήματα του WiMAX είναι κρίσιμα για την επιτυχή λειτουργία των σεναρίων αυτών. (Wimax Forum, 2005)

Table 3 WIMAX Usage Scenarios												
	Flexible Architecture	High Security	WiMAX QoS	Quick Deployment	Multi-Level Service	Interoperability	Portability	Mobility	Cost-Effective	Wider Coverage	NLOS	High Capacity
Cellular Backhaul				x					x			x
WSP Backhaul				x					x			x
Banking Networks	x	x	x						x		x	
Education Networks	x		x						x	x		
Public Safety	x	x	x	x			x	x			x	
Offshore Communications	x		x				x	x		x	x	
Campus Connectivity	x	x	x									x
Temporary Construction			x	x			x				x	
Theme Parks	x		x				x	x			x	
WSP Access Network		x	x		x	x			x		x	x
Rural Connectivity			x			x			x	x		
Military Battlefield	x	x		x			x	x				

Σχήμα 2.11 Σενάρια Χρήσης του WiMAX (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Στη συνέχεια αναφερόμαστε στα πιο αντιπροσωπευτικά από τα σενάρια χρήσης του παραπάνω πίνακα με περισσότερη λεπτομέρεια. Τα σενάρια αυτά χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τα **δημόσια** και τα **ιδιωτικά**.

Στα **δημόσια** δίκτυα, οι πόροι μοιράζονται μεταξύ διαφορετικών χρηστών, τόσο εταιρειών όσο και απλών πελατών. Τα δημόσια δίκτυα γενικά απαιτούν χαμηλού κόστους μέσα ώστε να καλύπτουν μια απρόβλεπτη περιοχή, καθώς η θέση των χρηστών δεν είναι ούτε προβλέψιμη ούτε βέβαια και σταθερή. Οι κύριες εφαρμογές των δημοσίων δικτύων είναι επικοινωνίες φωνής και δεδομένων, αν και συχνά πλέον ζητείται και η επικοινωνία μέσω βίντεο. Η ασφάλεια είναι μια κρίσιμη απαίτηση, καθώς πολλοί διαφορετικοί χρήστες μοιράζονται το δίκτυο. Προς αυτή την

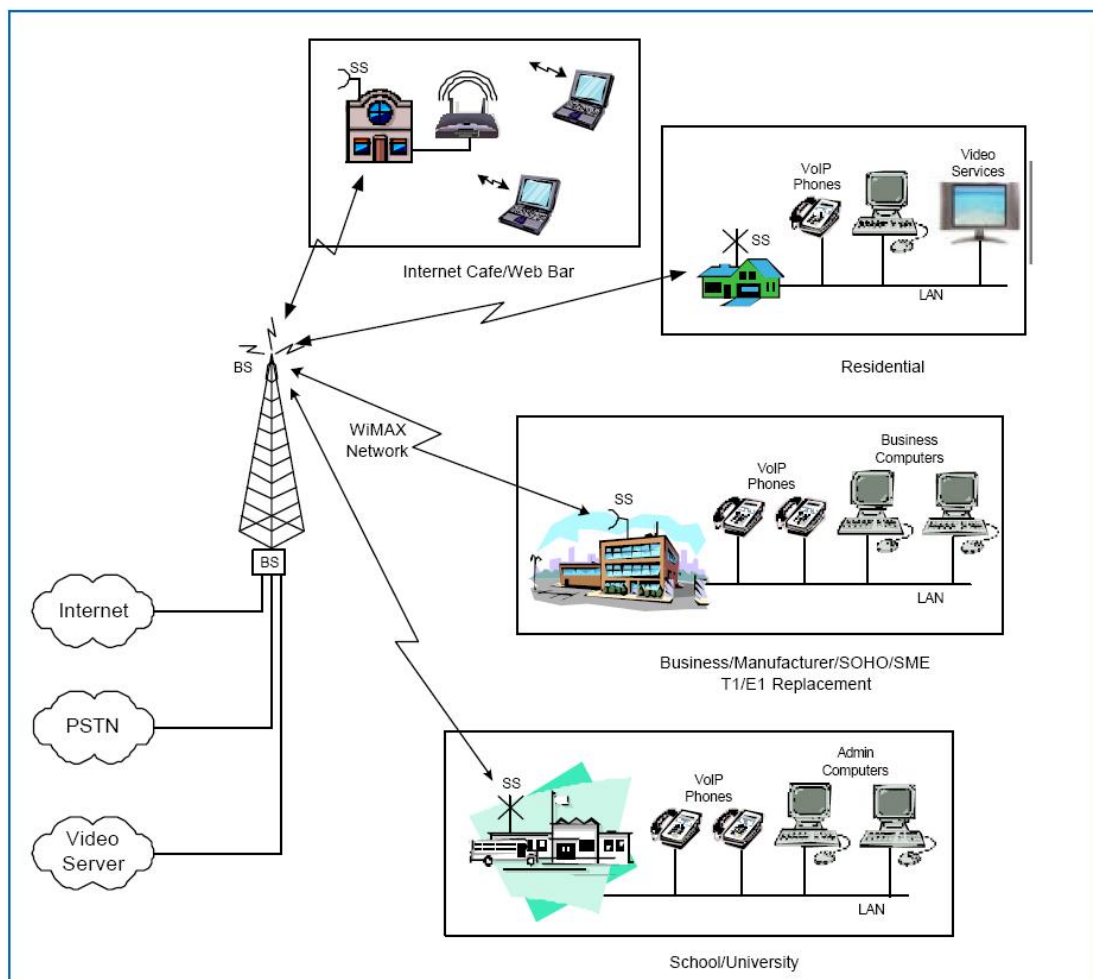
κατεύθυνση κινείται η ενσωματωμένη υποστήριξη VLAN καθώς και η κρυπτογράφηση των ανταλλασσόμενων δεδομένων.

Τα **ιδιωτικά** δίκτυα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από έναν συγκεκριμένο οργανισμό, ίδρυμα ή επιχείρηση και προσφέρουν επικοινωνιακές ζεύξεις για την ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά φωνής, δεδομένων και βίντεο. Η γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση είναι γενικά μια μεγάλη προτεραιότητα και οι συνήθως χρησιμοποιούνται ζεύξεις Σημείου Προς Σημείο και Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία.

2.10.2.1 ΔΗΜΟΣΙΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.10.2.1.1 ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΠΑΡΟΧΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Οι πάροχοι ασύρματης υπηρεσίας χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να παρέχουν συνδεσιμότητα σε οικιακούς πελάτες (φωνή, δεδομένα και βίντεο) και σε επιχειρήσεις (κυρίως φωνή και διαδίκτυο), όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



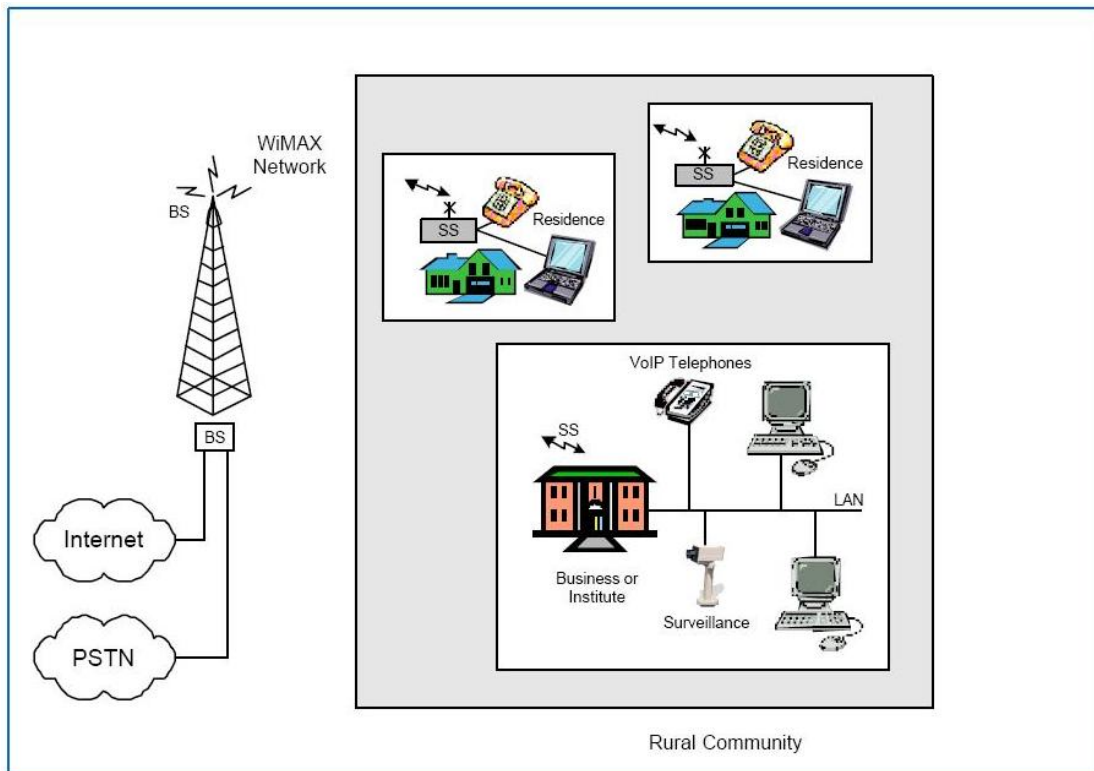
Σχήμα 2.12 Δίκτυο Πρόσβασης Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Οι πάροχοι ασυρμάτων υπηρεσιών μπορεί να είναι επιχειρήσεις που ξεκινούν από το μηδέν, με μικρό ή καθόλου εξοπλισμό. Λόγω της εύκολης εγκατάστασης τους WiMAX, οι συγκεκριμένες επιχειρήσεις μπορούν να εγκαταστήσουν γρήγορα το δίκτυό τους και να είναι σε θέση να ανταγωνιστούν τις υπάρχουσες εταιρείες του χώρου. Αντίθετα, όλες οι ενσύρματες λύσεις, συμπεριλαμβανομένων των οπτικών ινών και του DSL, απαιτούν σημαντικό αρχικό κόστος για την εγκατάσταση των υποδομών τους. Ειδικότερα, οι ενσύρματες λύσεις δεν είναι κατάλληλες για τις αγορές των αναπτυσσόμενων χωρών, όπου υπάρχει πολύ μικρή υποδομή, ή στις αραιοκατοικημένες περιοχές των αναπτυγμένων χωρών, όπως είναι οι αγροτικές περιοχές, οι μικρές πόλεις ή τα προάστια των μεγάλων πόλεων.

Ο ενσωματωμένος μηχανισμός ποιότητας υπηρεσίας του WiMAX είναι κατάλληλος για την σύνθεση της κυκλοφορίας που διαχειρίζεται η επιχείρηση. Μέσω της ποιότητας υπηρεσίας είναι εφικτή η παροχή πολυεπίπεδης υπηρεσίας ώστε να καλύπτεται η ποικιλία των αναγκών των πελατών για υπηρεσίες. Μια κοινή πλατφόρμα δικτύου που παρέχει φωνή, δεδομένα και Internet είναι ιδιαιτέρως ελκυστική στους τελικούς πελάτες καθώς αυτοί σχετίζονται με μια μόνο επιχείρηση και συνεπώς λαμβάνουν μόνον ένα λογαριασμό. Από την μεριά των επιχειρήσεων, η υποστήριξη πολλαπλών τύπων υπηρεσίας επιτρέπει διαφορετικές ροές εσόδων, μειώνοντας το κόστος απόκτησης υπηρεσίας από τους πελάτες και αυξάνοντας τα μέσα έσοδα ανά χρήστη. Ακόμη, απαιτείται μόνο ένα σύστημα χρέωσης και πληρωμών και μια βάση δεδομένων πελατών. Οι πάροχοι κυψελωτών υπηρεσιών μπορεί να ενδιαφέρονται για την εγκατάσταση του WiMAX στα δίκτυα τους. Και αυτό γιατί ήδη διαθέτουν σταθμούς βάσης, υποδομή τιμολόγησης και μια βάση πελατών, και συνεπώς η εφαρμογή του WiMAX θα επεκτείνει την παρουσία τους στην αγορά στην περιοχή των υπηρεσιών τους.

2.10.2.1.2 ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Οι πάροχοι υπηρεσιών χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να μεταφέρουν υπηρεσίες σε υποεξυπηρετούμενες αγορές στις αγροτικές περιοχές και στα προάστια των πόλεων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



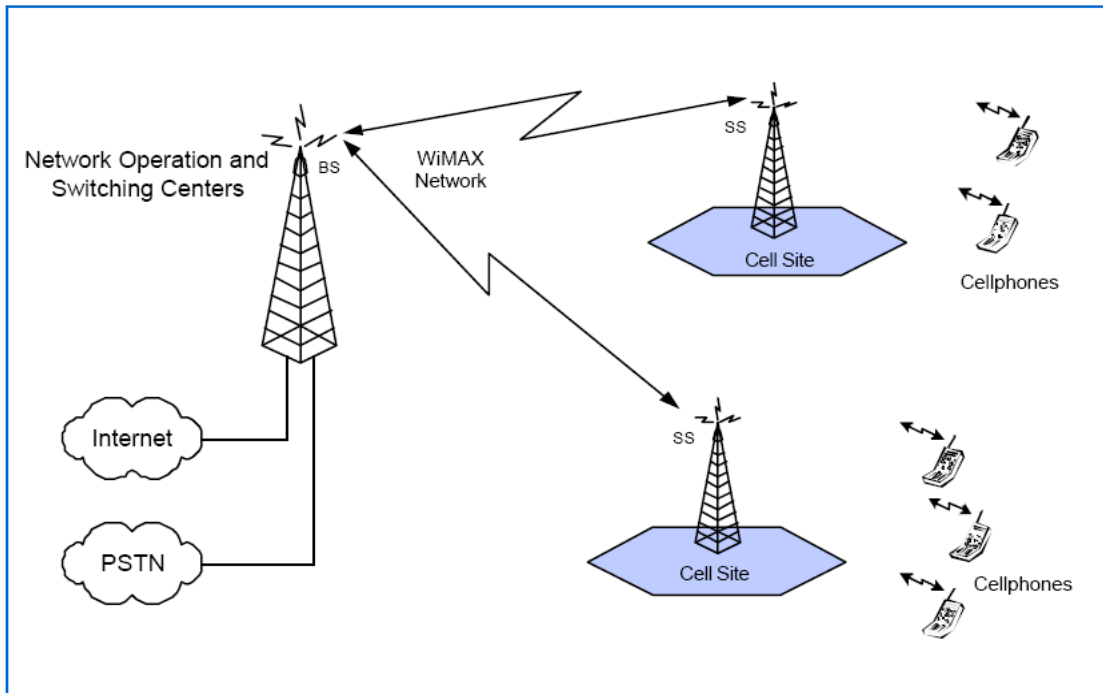
Σχήμα 2.13 Συνδεσιμότητα Αγροτικών Περιοχών (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Η μεταφορά της συνδεσιμότητας αυτής είναι κρίσιμη σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες και υποβαθμισμένες περιοχές των αναπτυγμένων χωρών, όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη υποδομή και η ανάπτυξή της απαιτεί κόστος και χρόνο. Σ' αυτές τις περιοχές λοιπόν λόγω της εκτεταμένης κάλυψης του WiMAX είναι εφικτή η παροχή φωνής και συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο, ούσα μάλιστα μια οικονομικά αποτελεσματική λύση συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες ενσύρματες.

2.10.2.2 ΙΔΙΩΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.10.2.2.1 BACKHAUL ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η αγορά των κυψελωτών υπηρεσιών γίνεται ολοένα και πιο ανταγωνιστική. Έτσι λοιπόν για να διατηρηθούν στην αγορά, οι πάροχοι κυψελωτών υπηρεσιών αναζητούν τρόπους μείωσης του λειτουργικού τους κόστους. Πολύ σημαντικό τμήμα του λειτουργικού κόστους των επιχειρήσεων αυτών -και μάλιστα σε μόνιμη βάση- είναι το κόστος του backhaul (δηλαδή των σταθμών εκπομπής και των επαναληπτών). Η τεχνολογία του WiMAX μπορεί να παρέχει ζεύξεις Σημείου Προς Σημείο έως και 50 χιλιομέτρων, με αρκετά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Για τους παρόχους κυψελωτών δικτύων η χρήση του WiMAX είναι λοιπόν μια σωστή επιλογή για την υποστήριξη της κίνησης των Σταθμών Βάσης στη λειτουργία του δικτύου και στα Κέντρα Μεταγωγής, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

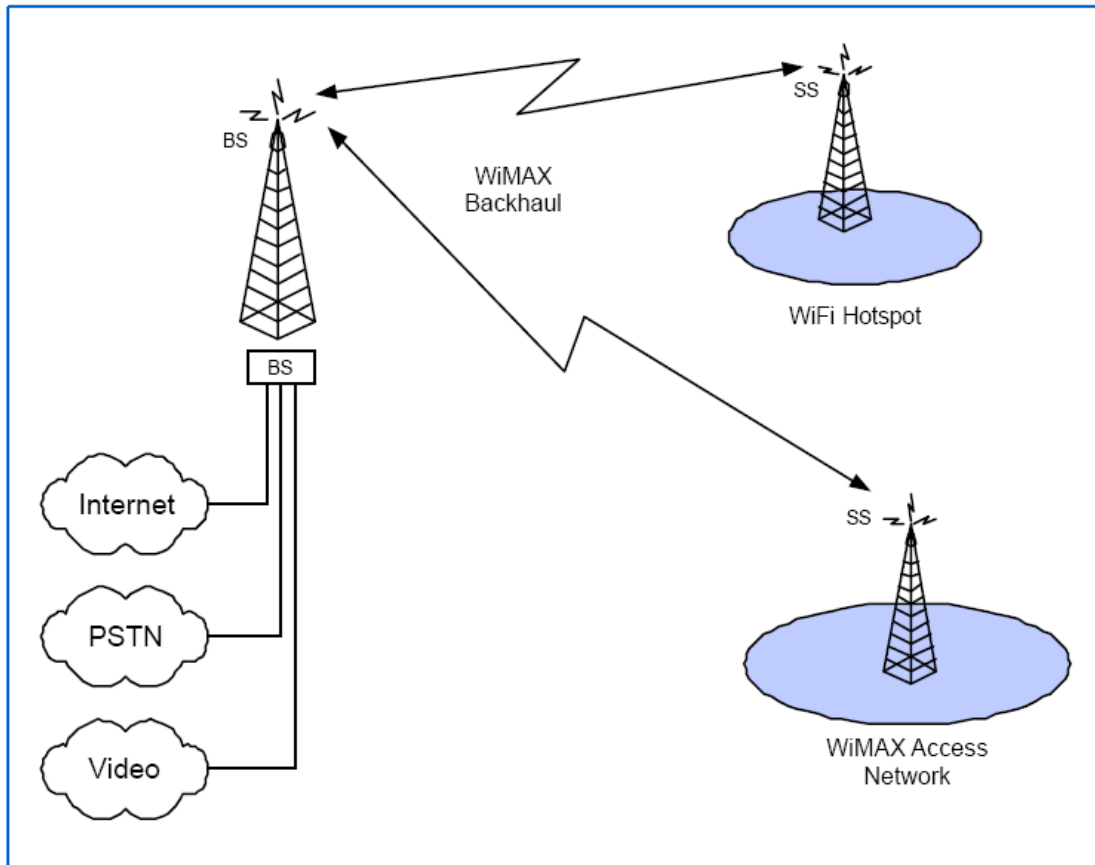


Σχήμα 2.14 Το WiMAX ως backhaul σε Κυψελωτά Δίκτυα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Η πληροφορία στο κυψελωτό δίκτυο είναι ένας συνδυασμός φωνής και δεδομένων για τα οποία η ενσωματωμένη ποιότητα υπηρεσίας του WiMAX είναι το πλέον κατάλληλο χαρακτηριστικό. Η ενοικίαση συστημάτων backhaul από τηλεφωνικές εταιρείες μπορεί να έχουν απαγορευτικό κόστος και η ανάπτυξη οπτικών ινών, η οποία μπορεί να είναι χρονοβόρα και ακριβή, είναι λύσεις που μπορεί να επιφέρουν αρνητική επίδραση στην παροχή της υπηρεσίας. Οι ενσύρματες λύσεις παροχής κυψελωτής κάλυψης είναι σπάνια αποδοτικές σε θέμα κόστους σε αστικές ή περιαστιακές περιοχές από τη μία, και από την άλλη οι περισσότερες εκδοχές του DSL και της καλωδιακής τεχνολογίας δεν μπορούν να προσφέρουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης, ειδικά για backhauling των επερχόμενων δικτύων τρίτης γενιάς (3G networks).

2.10.2.2.2 BACKHAUL ΠΑΡΟΧΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Οι Πάροχοι Ασύρματης Υπηρεσίας χρησιμοποιούν εξοπλισμό WiMAX ώστε να μεταβιβάσουν την κυκλοφορία από τους Σταθμούς Βάσης στα Δίκτυα Πρόσβασης τους (backhauling), όπως υποδεικνύεται από το ακόλουθο σχήμα.

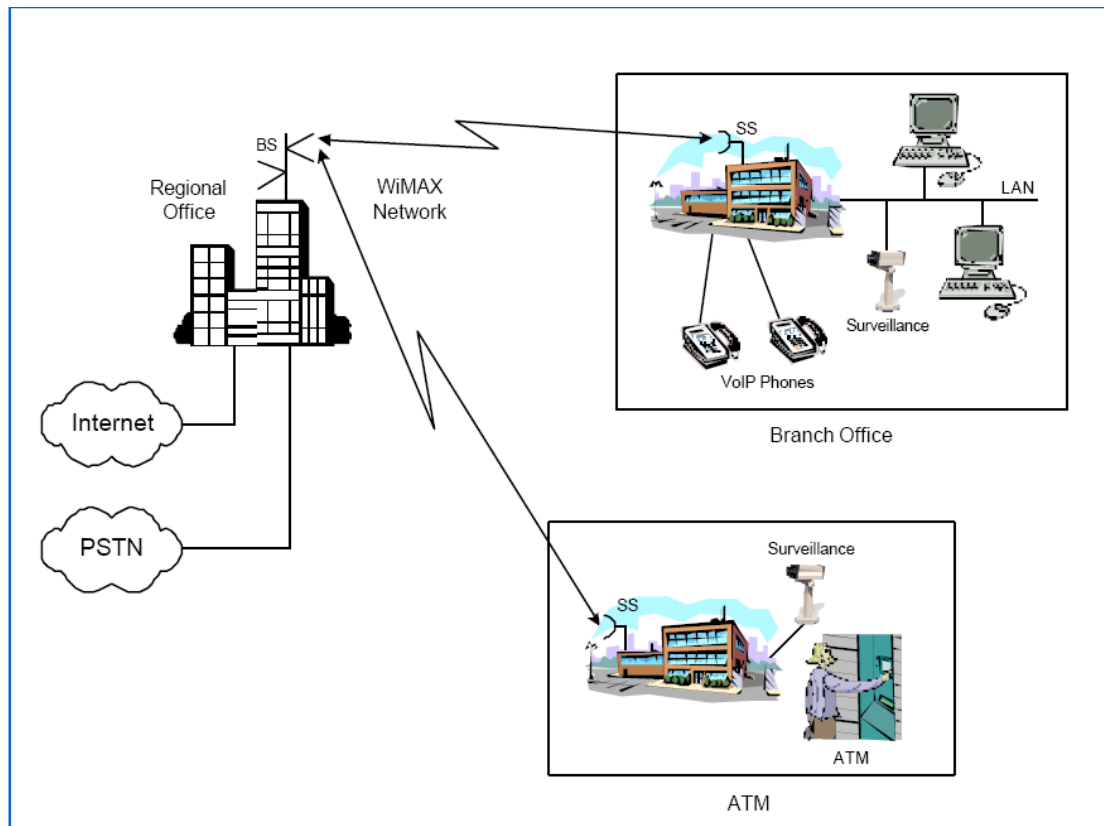


Σχήμα 2.15 Το WiMAX ως backhaul Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Τα Δίκτυα Πρόσβασης βασίζονται σε WiFi, WiMAX ή οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Αν το Δίκτυο Πρόσβασης χρησιμοποιεί εξοπλισμό WiFi, το Ολικό Δίκτυο Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας (Overall Wireless Service Provider Network) αναφέρεται ως **Hot Zone**. Καθώς οι Πάροχοι Ασύρματης Υπηρεσίας προσφέρουν φωνή, δεδομένα και βίντεο, ο ενσωματωμένος μηχανισμός ποιότητας υπηρεσίας του WiMAX θα βοηθήσει στον ορισμό προτεραιότητας και στη βελτιστοποίηση της μεταδιδόμενης κυκλοφορίας. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο εδάφιο, οι εναλλακτικές τεχνολογίες για την υποστήριξη της συγκεκριμένης υπηρεσίας είτε δεν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις της (υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης) είτε δεν είναι αντάξιες του κόστους τους.

2.10.2.2.3 ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΑΠΕΖΩΝ

Οι μεγάλες τράπεζες μπορούν να συνδέουν τα υποκατάστημα και τα μηχανήματα ATM με το κεντρικό γραφείο της περιοχής μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου WiMAX μεταφέροντας φωνή, δεδομένα και βίντεο, όπως φαίνεται παρακάτω. Αυτές οι τράπεζες συνήθως εκτείνονται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή και χρειάζονται υψηλή ασφάλεια και εύρος ζώνης, ώστε να διαχειριστούν την κυκλοφορία.

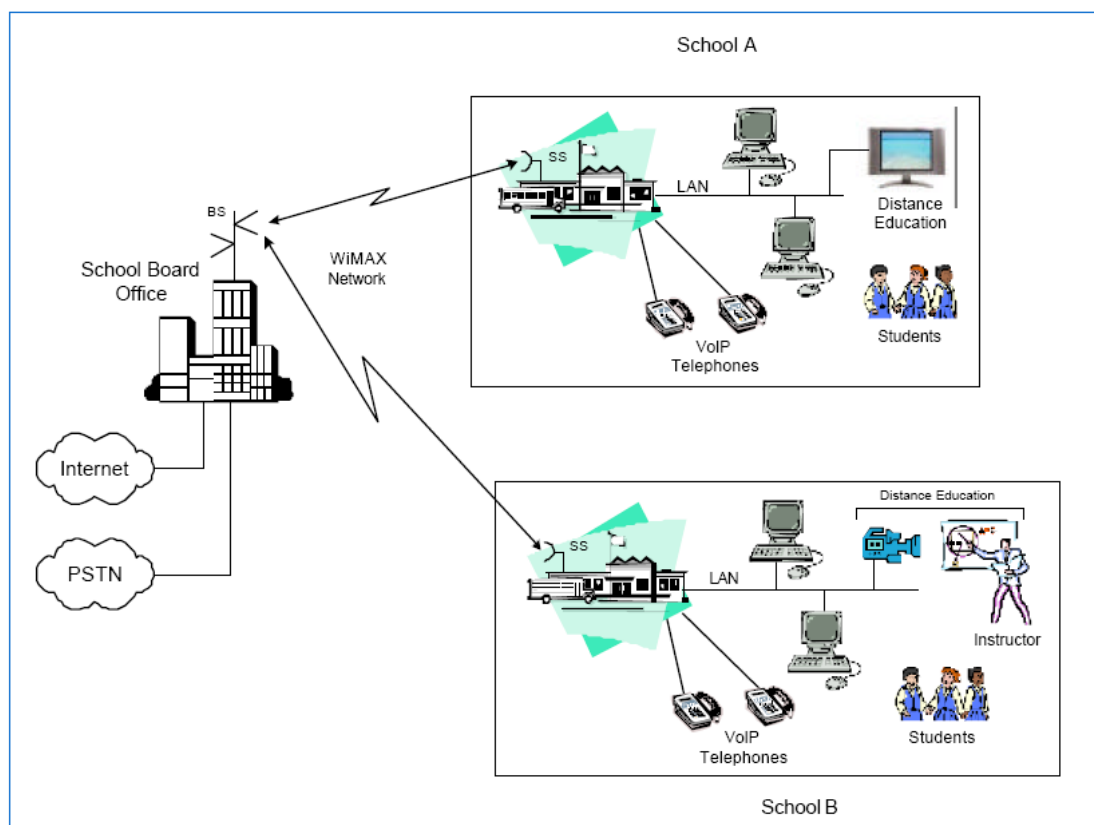


Σχήμα 2.16 Εφαρμογή σε Τραπεζικά Δίκτυα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Παρά το γεγονός ότι η κρυπτογράφηση δεδομένων μέσω του WiMAX προσφέρει εξαιρετική ασφάλεια σύνδεσης, οι τράπεζες πιθανόν να χρειαστούν και ασφάλεια από άκρη σε άκρη, όπως αυτή που παρέχεται από το SSL, για να προστατευτούν ενάντια σε ανεπιθύμητη εισβολή στα ευαίσθητα τραπεζικά δεδομένα. Η ευρεία κάλυψη και η υψηλή χωρητικότητα επιτρέπει το κεντρικό γραφείο της τράπεζας να είναι συνδεδεμένο με ένα μεγάλο αριθμό υποκαταστημάτων και μηχανημάτων ATM, που είναι διασκορπισμένα στην ευρύτερη περιοχή. Τα δίκτυα WiMAX επίσης προσφέρουν έναν υψηλό βαθμό κλιμάκωσης, ώστε η κυκλοφορία χαμηλού ρυθμού δεδομένων μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των ATM να συνυπάρχει με τα υψηλά επίπεδα της κυκλοφορίας που απαιτείται για την υποστήριξη των επικοινωνιών μεταξύ κεντρικού γραφείου και υποκαταστημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό ποιότητας υπηρεσίας του WiMAX, ο οποίος χρησιμοποιείται για να δίνει προτεραιότητα στην κυκλοφορία φωνής (τηλεφωνία μεταξύ υποκαταστημάτων), δεδομένων (οικονομικές συναλλαγές, email, Internet και intranet) και βίντεο (παρακολούθηση, CCTV). Είναι λοιπόν επιθυμητό για τις τράπεζες να έχουν τα δικά τους δίκτυα, για πολλούς λόγους. Εκτός από την εξάλειψη του επαναλαμβανόμενου κόστους των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών εάν αυτές ανατεθούν σε τρίτες εταιρείες, οι τράπεζες έχουν τη δυνατότητα να αναδιοργανώνουν το δίκτυό τους γρήγορα εάν ένα ATM ή ένα υποκατάστημα έχει προσωρινά ή μόνιμα αλλάξει τοποθεσία. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη λογική του DSL και της καλωδιακής τεχνολογίας, που λόγω της φύσης τους είναι περισσότερο «δυσκίνητες».

2.10.2.2.4 ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα υπουργεία παιδείας μπορούν να χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να συνδέουν τα σχολεία με τα υπουργεία ή τις νομαρχίες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



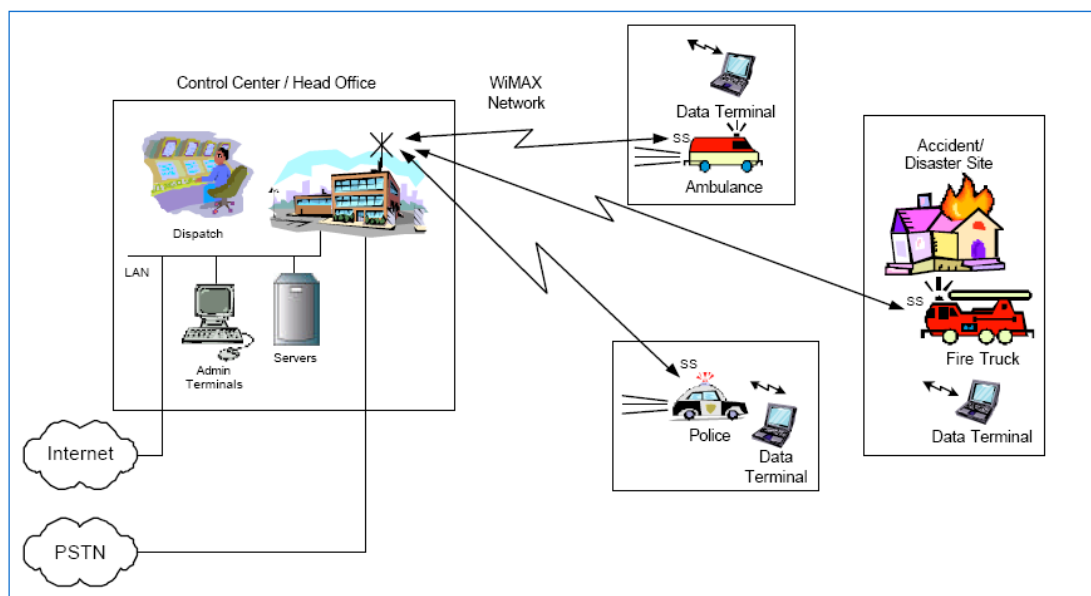
Σχήμα 2.17 Εκπαιδευτικά Δίκτυα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Μερικά από τα σημαντικά χαρακτηριστικά για ένα τέτοιο σύστημα είναι η υποστήριξη ζεύξεων Μη Οπτικής Επαφής (NLOS), το υψηλό εύρος ζώνης (μεγαλύτερο των 15 Mbps), και δυνατότητα για συνδέσεις Σημείου προς Σημείο και Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία όπως και η δυνατότητα κάλυψης ευρείας περιοχής. Τα εκπαιδευτικά δίκτυα που βασίζονται στο WiMAX και χρησιμοποιούν το μηχανισμό ποιότητας υπηρεσίας, μπορούν να μεταφέρουν στο μέγιστο το εύρος των απαιτήσεων της επικοινωνίας, συμπεριλαμβανόμενης της τηλεφωνίας, των λειτουργικών δεδομένων (όπως οι φάκελοι των μαθητών), των email, της πρόσβασης σε Internet και intranet (δεδομένα) και της τηλεεκπαίδευσης ανάμεσα στα κεντρικά του υπουργείου ή της νομαρχίας και όλων των σχολείων στην περιφέρεια κάλυψης, αλλά και μεταξύ των ίδιων των σχολείων. Στο παραπάνω σενάριο της τηλεεκπαίδευσης, η κάμερα στο σχολείο B μεταφέρει τη διδασκαλία του μαθήματος στο σχολείο A σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στα σχολεία να μεταδίδουν τη διδασκαλία ενός μαθήματος σε ένα μεγάλο αριθμό μαθητών, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για επιπλέον δασκάλους.

Η λύση του WiMAX παρέχει ευρεία κάλυψη και σε χαμηλό κόστος και είναι ιδανική ειδικά για σχολεία της επαρχίας που έχουν ελάχιστη ή καθόλου τηλεπικοινωνιακή υποδομή και είναι διασκορπισμένα σε μεγάλη ακτίνα. Όταν τα σχολεία θα έχουν και θα χρησιμοποιούν τα δικά τους δίκτυα, θα μπορούν οικειοθελώς να αντιδρούν σε οποιοσδήποτε αλλαγές στην τοποθεσία ή στη διάταξη των μονάδων τους. Αυτό θα μειώσει σημαντικά το πιθανό ετήσιο λειτουργικό κόστος μισθωμένων γραμμών στο τηλεφωνικό δίκτυο. Όπως έχει προαναφερθεί, οι ενσύρματες τεχνολογίες δεν μπορούν να προσφέρουν γρήγορη εγκατάσταση και μια χαμηλού κόστους λύση καθώς επίσης και οι περισσότερες εκδοχές της ψηφιακής γραμμής συνδρομητή (DSL) δεν μπορούν να υποστηρίξουν τους ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα εκπαιδευτικά δίκτυα.

2.10.2.2.5 ΔΗΜΟΣΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Οι κυβερνητικές υπηρεσίες δημόσιας ασφαλείας, όπως η αστυνομία, η πυροσβεστική, το λιμενικό και οι μονάδες διάσωσης και τα ασθενοφόρα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δίκτυα WiMAX ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν επείγουσες καταστάσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται με τον καλύτερο τρόπο η δυνατότητα κινητικότητας των χρηστών που παρέχει η τεχνολογία καθώς ο τρόπος επικοινωνίας τους φαίνεται παρακάτω, ο οποίος περιλαμβάνει ένα κεντρικό γραφείο – κέντρο ελέγχου που συντονίζει και επικοινωνεί με τις εξωτερικές κινητές μονάδες.



Σχήμα 2.18 Εφαρμογή του WiMAX σε υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

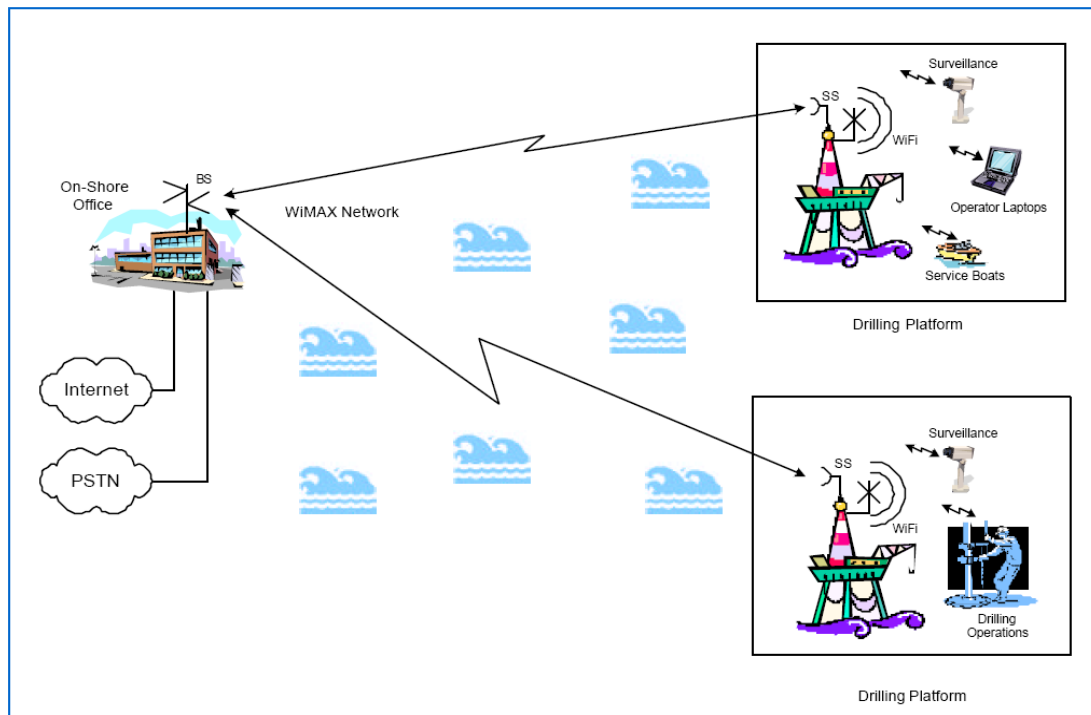
Εκτός της δυνατότητας για παροχής αμφίδρομης επικοινωνίας φωνής μεταξύ του κέντρου ελέγχου και των εξωτερικών μονάδων, είναι εφικτή και η άμεση αποστολή εικόνων και βίντεο διαμέσου του δικτύου από το σημείο του ατυχήματος στο κέντρο ελέγχου. Τα συγκεκριμένα δεδομένα μπορούν με τη σειρά τους να μεταφερθούν

στους εκάστοτε ειδικούς, οι οποίοι μπορούν να αναλύσουν την κατάσταση σαν να βρίσκονταν στο χώρο του συμβάντος. Ως γνωστόν, η ικανότητα χειρισμού των διαφορετικών τύπων κίνησης προέρχεται από την ενσωματωμένη ποιότητα υπηρεσίας του WiMAX.

Οι λύσεις WiMAX είναι εύκολα εγκαταστάσιμες, έτσι η αρχική ομάδα διάσωσης μπορεί να στήσει ένα προσωρινό ασύρματο δίκτυο στο σημείο του ατυχήματος, γεγονός ή φυσικής καταστροφής μέσα σε λίγα μόνο λεπτά. Μπορούν επίσης να μεταφέρουν κυκλοφορία από το δίκτυο αυτό στο κέντρο ελέγχου, μέσω ενός ήδη υπάρχοντος δικτύου WiMAX. Οι ενσύρματες λύσεις δεν είναι λειτουργικές στην περίπτωση αυτή, λόγω του απρόβλεπτου των ατυχημάτων και των καταστροφών. Επιπλέον υπάρχει η ανάγκη της κινητικότητας, όπως για παράδειγμα, ένας αστυνομικός μπορεί να θέλει να έχει πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων από ένα κινούμενο όχημα ή ένας πυροσβέστης να χρειάζεται τη βέλτιστη διαδρομή για να φτάσει στο σημείο της πυρκαγιάς ή να χρειάζεται την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Μια βίντεο κάμερα στο ασθενοφόρο μπορεί να προσφέρει πληροφορία για την κατάσταση ενός ασθενούς πριν το ασθενοφόρο φτάσει στο νοσοκομείο. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, το WiMAX παρέχει υποστήριξη για κινητικότητα και υψηλό εύρος ζώνης, κάτι που τα συστήματα στενού εύρους ζώνης δεν μπορούν να επιτύχουν.

2.10.2.2.6 OFFSHORE ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Οι παραγωγοί πετρελαίου και αερίου μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον εξοπλισμό WiMAX, ώστε να έχουν επικοινωνία από τις εγκαταστάσεις στην ξηρά στις πετρελαιοπηγές και πλατφόρμες στη θάλασσα, ώστε να υποστηριχθούν απομακρυσμένες λειτουργίες, ασφάλεια και βασικές επικοινωνίες, όπως φαίνεται παρακάτω.

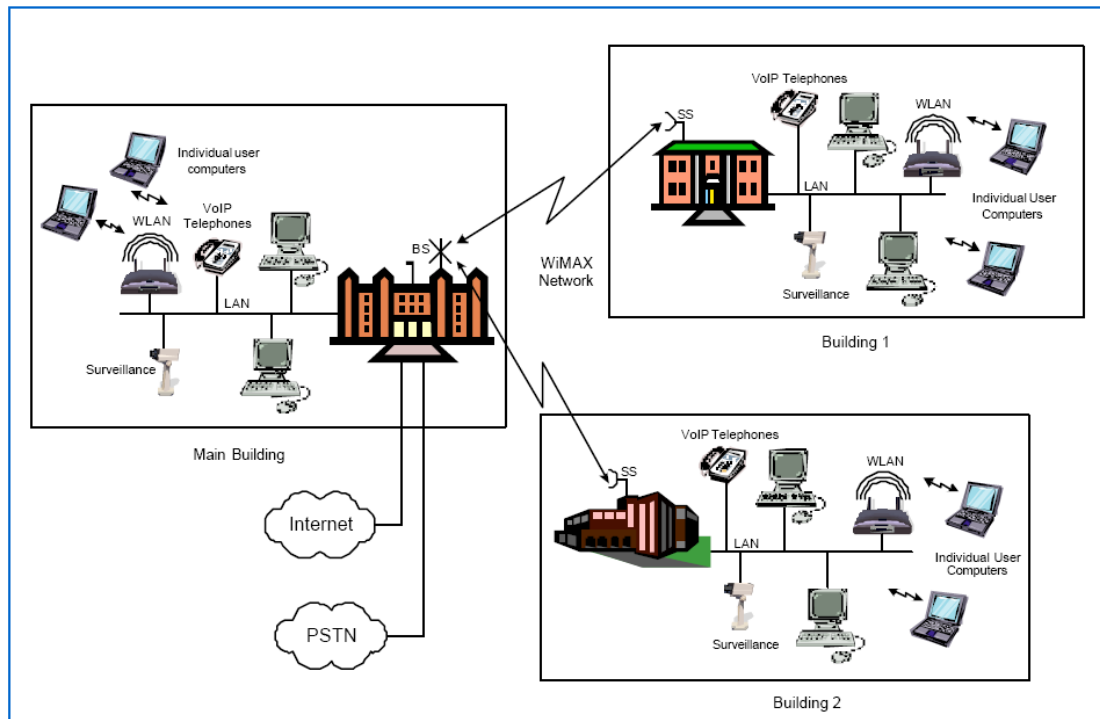


Σχήμα 2.19 Το WiMAX στην υποστήριξη Offshore επικοινωνιών (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Οι απομακρυσμένες λειτουργίες περικλείουν απομακρυσμένη λύση συνθέτων προβλημάτων εξοπλισμού, παρακολούθηση της τοποθεσίας και πρόσβαση σε βάση δεδομένων. Για παράδειγμα, βίντεο από δυσλειτουργικά κομμάτια μπορούν να μεταδοθούν στους σταθμούς ξηράς για να αναλυθούν από ομάδες ειδικών. Η ασφάλεια περιλαμβάνει συστήματα συναγερμών και παρακολούθηση του χώρου. Οι βασικές επικοινωνίες περικλείουν τηλεφωνία, email, πρόσβαση στο Internet και τηλεσυνδιάσκεψη (video conferencing). Τα δίκτυα WiMAX εγκαθίστανται γρήγορα και εύκολα. Το δίκτυο μπορεί να στηθεί ή να ξαναστηθεί σε λίγες ώρες, ακόμα και όταν οι πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου μεταφέρονται. Οι καλωδιωμένες λύσεις δεν είναι κατάλληλες, καθώς οι εγκαταστάσεις δεν είναι πάντα στην ξηρά και είναι συχνά μεταφερόμενες. Όταν χρειάζεται μια εγκατάσταση να εγκαταλειφθεί προσωρινά, οι επικοινωνίες για την παρακολούθηση της περιοχής διατηρούνται με τερματικά WiMAX βασισμένα σε μπαταρίες.

2.10.2.2.7 ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΩΝ

Κυβερνητικές υπηρεσίες, μεγάλες επιχειρήσεις, βιομηχανικές περιοχές, μεταφορικά μέσα, πανεπιστήμια και κολέγια μπορούν να χρησιμοποιούν δίκτυα WiMAX για να συνδέουν πολλαπλές τοποθεσίες και γραφεία μέσα στις εγκαταστάσεις τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα συστήματα επικοινωνίας στην πανεπιστημιούπολεις απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση (latency), μεγάλη περιοχή κάλυψης και υψηλή ασφάλεια.

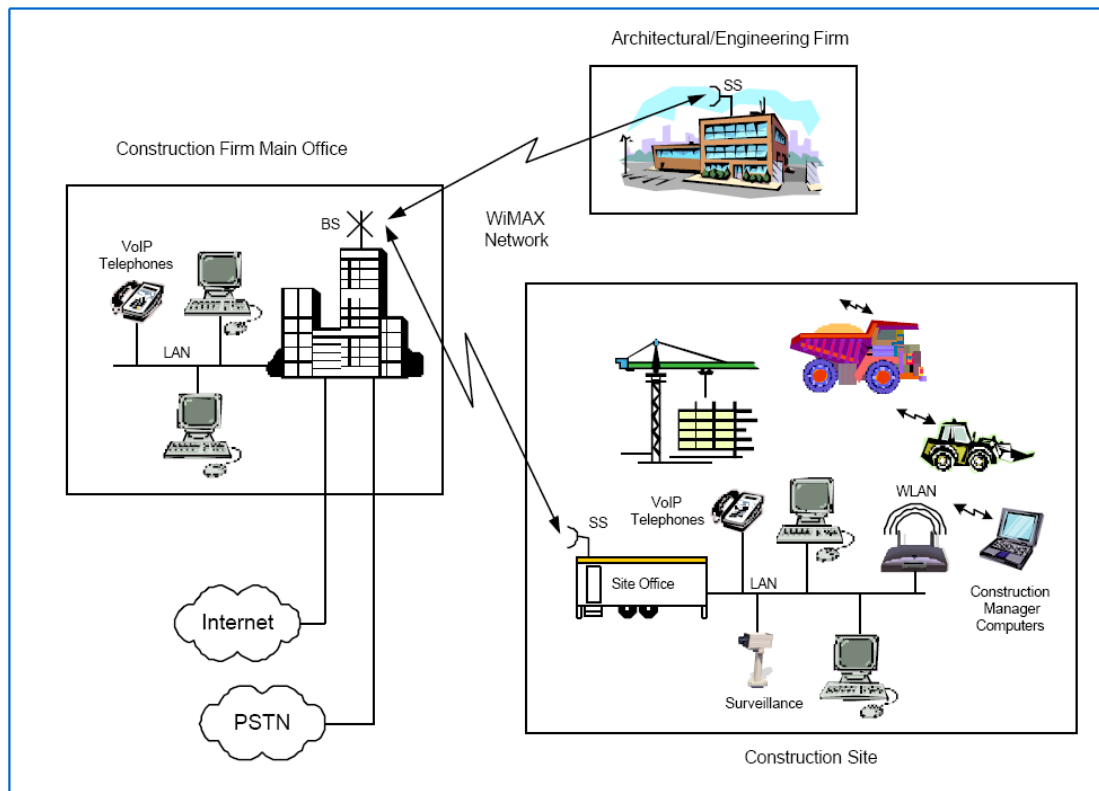


Σχήμα 2.20 Σύνδεση Πανεπιστημίων (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Όπως και στα άλλα σενάρια χρήσης, τα δίκτυα αυτά μεταφέρουν ένα συνδυασμό φωνής, δεδομένων και βίντεο, ο οποίος ιεραρχείται και βελτιστοποιείται από το μηχανισμό ποιότητας υπηρεσίας του WiMAX. Απαιτείται λιγότερος χρόνος και εξοπλισμός για τη διασύνδεση μιας πανεπιστημιούπολης με ένα δίκτυο WiMAX, καθώς το σκάψιμο και οι γενικότερες εξωτερικές κατασκευές αποφεύγονται. Μερικές πανεπιστημιούπολεις λόγω της παλαιότητας τους μπορεί να μην επιτρέπουν το σκάψιμο για την εγκατάσταση ή τη μεταβολή της υπάρχουσας καλωδίωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το WiMAX μπορεί να είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διασύνδεση των κτιρίων της πανεπιστημιούπολης. Ακόμα και αν επιτρέπονται οι ενσύρματες εγκαταστάσεις, ο χρόνος που χρειάζεται μια εφαρμογή βασισμένη στο υπάρχον καλωδιωμένο δίκτυο είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειάζεται το δίκτυο WiMAX για να στηθεί και να δουλέψει, χωρίς το γεγονός αυτό να αντισταθμίζεται από άλλα πλεονεκτήματα.

2.10.2.2.8 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΕ ΠΡΟΣΩΡΙΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι κατασκευαστικές εταιρείες μπορούν να χρησιμοποιήσουν δίκτυα WiMAX, ώστε να εγκαταστήσουν επικοινωνία ανάμεσα στα κεντρικά γραφεία της εταιρείας, στο σημείο που γίνεται το έργο και στα γραφεία άλλων συμμετεχόντων στο έργο αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω:



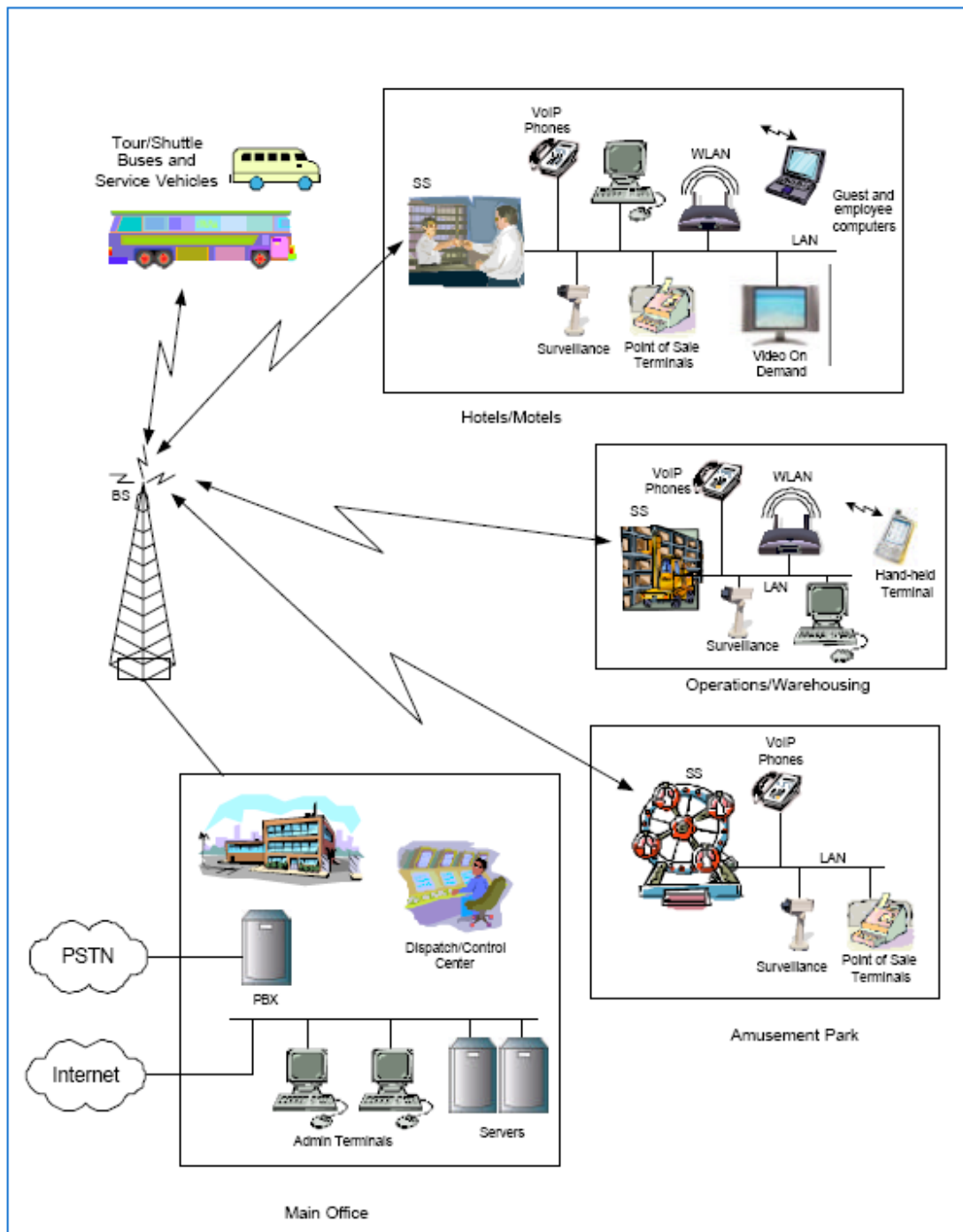
Σχήμα 2.21 Εφαρμογή του WiMAX σε προσωρινές κατασκευές (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Η γρήγορη απεγκατάσταση του WiMAX είναι ένας σημαντικός παράγοντας σε αυτό το σενάριο χρήσης, καθώς παρέχει γρήγορη επικοινωνία στην τοποθεσία κατασκευής με φωνή (τηλεφωνία) και δεδομένα (email, μηχανολογικά σχέδια και πρόσβαση στο Internet). Η παρακολούθηση μέσω βίντεο επιτελείται επίσης μέσω του δικτύου για την επιτήρηση της τοποθεσίας ή τμημάτων αυτής που αλλιώς θα ήταν δύσκολα προσβάσιμα. Ένα τοπικό σημείο πρόσβασης (hot spot) μπορεί επίσης να εγκατασταθεί στην τοποθεσία της κατασκευής, επιτρέποντας στο προσωπικό να επικοινωνεί και να ανταλλάσσει δεδομένα και πληροφορίες. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, η ενσωματωμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) του WiMAX ιεραρχεί τη δικτυακή κυκλοφορία και βελτιστοποιεί το κανάλι επικοινωνίας. Παραδείγματα τοποθεσιών κατασκευής είναι κτίρια γραφείων, ανάπτυξη κατοικιών, πετρελαϊκές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις αερίου. Καθώς η κατασκευαστική δραστηριότητα στις τοποθεσίες αυτές είναι προσωρινή, οι ενσύρματες λύσεις δεν είναι οι κατάλληλες. Επιπλέον ο ίδιος εξοπλισμός του WiMAX, καθότι φορητός, μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί στο μέλλον και σε άλλες κατασκευαστικές τοποθεσίες

2.10.2.2.9 ΘΕΜΑΤΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Οι υπεύθυνοι των θεματικών πάρκων μπορούν να χρησιμοποιήσουν WiMAX ώστε να μεταφέρουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών επικοινωνίας για τα πάρκα ψυχαγωγίας, τις

εκθέσεις, τα κέντρα φιλοξενίας και ελέγχου και για τα οχήματα υπηρεσιών και λεωφορεία, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.22 Εφαρμογή του WiMAX σε θεματικά πάρκα (Πηγή: Wimax Forum, 2005)

Το παραπάνω δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μια πληθώρα τηλεπικοινωνιακής κίνησης, όπως αμφίδρομη επικοινωνία από και προς το κέντρο ελέγχου, παρακολούθηση του πάρκου μέσω βίντεο, διατήρηση δεδομένων, πρόσβαση και ανανέωση της βάσης δεδομένων και τηλεφωνία. Οι σημαντικοί παράγοντες του συγκεκριμένου δικτύου είναι η απαίτηση για σταθερούς και κινητούς χρήστες, για υψηλή ασφάλεια, χαμηλή καθυστέρηση και κλιμακώσιμη αρχιτεκτονική. Η ευρεία

κάλυψη που παρέχει το WiMAX σημαίνει ότι ένα μεγάλο θεματικό πάρκο μπορεί να καλυφθεί με 11 Σταθμούς Βάσης, κλιμακούμενους προς τα πάνω όσο οι απαιτήσεις χωρητικότητας αυξάνουν. Βασιζόμενο στις απαιτήσεις του λειτουργού, το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) που είναι υπεύθυνο για το μηχανισμό ποιότητας υπηρεσίας θα ορίσει προτεραιότητες για την κίνηση και θα βελτιστοποιήσει το κανάλι επικοινωνίας. Πολύ σημαντικό γεγονός αποτελεί η ευκολία και η ταχύτητα που επιτυγχάνεται η εκ νέου ανάπτυξη του δικτύου σε περίπτωση αλλαγών στο θεματικό πάρκο, και επιπλέον η συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπει ευρυεκπομπή βίντεο πραγματικού χρόνου στα τουριστικά λεωφορεία, παρέχοντας τουριστικές πληροφορίες, πρόγνωση καιρού και προωθητικές ενέργειες στους επιβάτες.

3 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS) ΣΤΟ WiMAX

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια θεμελιώδης έννοια για την λειτουργία του στρώματος MAC του WiMAX είναι η έννοια της **Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS)**. Με τον όρο Ποιότητα Υπηρεσίας αναφερόμαστε σε ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν τις απαιτήσεις και το είδος της κάθε υπηρεσίας.

Τα πρώτα δίκτυα πακέτων συνήθως μεριμνούσαν για ένα μόνο τύπο υπηρεσίας και έτσι μεταχειρίζονταν όλα τα πακέτα με τον ίδιο τρόπο. Δεν υπήρχε καμία διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας ή εγγύηση αξιοπιστίας και άλλων χαρακτηριστικών απόδοσης για κανένα σύνολο πακέτων. Ως αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού, μια εφαρμογή με μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης μπορεί να προκαλούσε σημαντικό υποβιβασμό της απόδοσης των άλλων εφαρμογών. Σε ένα δίκτυο πολλαπλών εφαρμογών ο μηχανισμός Ποιότητας Υπηρεσίας πρέπει να εξασφαλίσει ότι μπορεί να παρέχει προνομιακή υπηρεσία παράδοσης σε πακέτα ανάλογα με τις απαιτήσεις απόδοσης και το επίπεδο προτεραιότητας Ποιότητας Υπηρεσίας. Υλοποιώντας ένα λειτουργικό μηχανισμό ποιότητας υπηρεσίας, οι μηχανικοί δικτύων μπορούν να ελέγχουν του πόρους του δικτύου ώστε να ικανοποιούν ένα συγκεκριμένο μοντέλο απαιτήσεων και επιπλέον να διασφαλίζουν ότι οι κρίσιμες υπηρεσίες δεν επηρεάζονται από άλλες χαμηλής προτεραιότητας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι βελτιωμένη εμπειρία χρήστη και μειωμένο κόστος συστήματος εξαιτίας της πιο αποδοτικής και στοχευμένης χρήσης των διαθέσιμων πόρων.

Από την πρώτη έκδοση του προτύπου IEEE 802.16, η παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας είναι εγγενής και προορίζεται τόσο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όσο και για δεδομένα, τα οποία μπορούν να εκμεταλλευτούν την αρχιτεκτονική διαδοχικής διερεύνησης (polling) όπως και την Προσαρμοστική Κωδικοποίηση (Adaptive Modulation) στο φυσικό στρώμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ το τυποποιημένο πλαίσιο της Ποιότητας Υπηρεσίας στο WiMAX παρέχει τις λεπτομέρειες σχετικά με τους τύπους των Ροών Υπηρεσιών, δεν ορίζει ρητά τους πραγματικούς μηχανισμούς των πακέτων για διαφοροποίηση της Ποιότητας Υπηρεσίας στο στρώμα MAC. Όπως και σε άλλα πρότυπα αυτού του τύπου αυτοί οι μηχανισμοί εξαρτώνται από την υλοποίηση του κατασκευαστή, εφόσον όμως προσαρμόζονται στο δεδομένο πλαίσιο Ποιότητας Υπηρεσίας του WiMAX. (Sekercioglu Ahmet και άλλοι, 2009 σελ 2518), Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 619)

3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δυο ορισμοί της ποιότητα Υπηρεσίας (**Quality of Service - QoS**): (Sekercioglu Ahmet και άλλοι, 2009 σελ 2518)

- **«Χρηστο-κεντρική» Ποιότητα Υπηρεσίας (User-Centric QoS):** Είναι η συλλογική επίδραση των επιδόσεων των υπηρεσιών που καθορίζουν τον βαθμό ικανοποίησης του χρήστη των υπηρεσιών.
- **«Δικτυο-κεντρική» Ποιότητα Υπηρεσίας (Network-Centric QoS):** Είναι οι μηχανισμοί που δίνουν στους διαχειριστές του δικτύου την ικανότητα να ελέγχουν το μίγμα εύρους ζώνης, καθυστέρησης, διακύμανσης στην καθυστέρηση και απώλεια πακέτων στο δίκτυο ώστε να παρέχουν μια υπηρεσία δικτύου.

Η διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να υλοποιηθεί είτε σε **βάση εφαρμογής** είτε σε **βάση πακέτου**. Έτσι λοιπόν οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες δυο κατηγορίες:

- **Έλεγχος Αποδοχής (Admission Control):** καθορίζει πως και πότε η κυκλοφορία που παράγεται από μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή χρήστη μπορεί να έχει πρόσβαση στους πόρους του δικτύου. Συνήθως λειτουργεί σε μια σύνοδο (session) ή ένα χρονοδιάγραμμα ροής (flowtimescale), για παράδειγμα αποφασίζει για την αποδοχή συνόδων χρηστών ή ροών.
- **Έλεγχος Κυκλοφορίας (Traffic Control):** καθορίζει πως η προσήμανση πακέτων, ο χρονοπρογραμματισμός και η μορφοποίηση (έλεγχος ρυθμού ροής) εφαρμόζεται σε πακέτα που προέρχονται από μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή χρήστη. Συνήθως λειτουργεί σε χρονοδιαγράμματα πακέτου, δηλαδή χειρίζεται αποφάσεις σχετικές με το ποιο πακέτο από ποια ροή θα πρέπει να μεταδοθεί στη συνέχεια.

3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Για να είναι εφικτή μια αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας υπηρεσίας πρέπει να συμφωνηθούν ορισμένες παράμετροι που θα αποτελούν το κριτήριο αξιολόγησης των ροών πακέτων. Οι σημαντικότερες παράμετροι ακολουθούν: (Κανάτας και άλλοι, 2008 σελ 620), (IEEE Std 802.16TM-2004, σελ 698-702), (IEEE Std 802.16eTM-2005, σελ. 735-738)

- **Προτεραιότητα Κίνησης (Traffic Priority):** Είναι ένα χαρακτηριστικό μιας ροής υπηρεσίας και ορίζει την προτεραιότητά της έναντι άλλων υπηρεσιών. Όταν δυο ροές υπηρεσίας έχουν τις ίδιες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας εκτός της προτεραιότητας κίνησης, τότε η ροή υπηρεσίας με την υψηλότερη προτεραιότητα θα λάβει μικρότερη καθυστέρηση και υψηλότερη προτεραιότητα στους ενταμιευτές. Σε περιπτώσεις που οι ροές δεν είναι ίδιες η συγκεκριμένη παράμετρος δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.
- **Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης (Maximum Sustained Traffic Rate):** Εκφράζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της υπηρεσίας σε bits/sec, χωρίς να περιλαμβάνει τα πρόσθετα bits που εισάγει το στρώμα MAC. Το συγκεκριμένο πεδίο είναι απλώς ένα όριο, χωρίς να εξασφαλίζεται ότι ο συγκεκριμένος ρυθμός είναι διαθέσιμος. Στο πρότυπο IEEE 802.16e προστίθεται το

γεγονός ότι σε περίπτωση που ορισμένα πακέτα φαίνονται να υπερβαίνουν το μέγιστο διατηρούμενο ρυθμό μετάδοσης μπορούν να καθυστερήσουν ή να απορριφθούν, ανάλογα με την επιλογή του κατασκευαστή. Επιπλέον, ορίζεται ότι ο συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης μετράται στην είσοδο του υποστρώματος σύγκλισης, ενώ παλαιότερα η εν λόγω μέτρηση γινόταν στην είσοδο του συστήματος.

- **Μέγιστο Μέγεθος Ριπής (Maximum Traffic Burst):** Είναι το μέγιστο μέγεθος ριπής σε bytes για τη δεδομένη ροή υπηρεσίας. Ουσιαστικά εκφράζει το μέγεθος της μέγιστης συνεχούς ριπής που θα παρέχει το δίκτυο σε μια υπηρεσία, υποθέτοντας ότι η υπηρεσία δεν χρησιμοποιεί αυτή τη στιγμή κάποιους από τους διαθέσιμους πόρους.
- **Ελάχιστος Δεσμευμένος Ρυθμός Μετάδοσης (Minimum Reserved Traffic Rate):** Είναι ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης σε bits/sec που έχει ανατεθεί για τη μετάδοση της εν λόγω υπηρεσίας. Ουσιαστικά ορίζει το ελάχιστο ποσό ωφέλιμου φορτίου που συνδέεται με τη ροή υπηρεσιών όταν υπολογίζεται κατά μέσο όρο με την πάροδο του χρόνου.
- **Ελάχιστος Ανεκτός Ρυθμός Μετάδοσης (Minimum Tolerable Traffic Rate):** έστω R ο ελάχιστος ανεκτός ρυθμός μετάδοσης με βάση χρόνου T (sec). Έστω S η επιπλέον ζήτηση που συσσωρεύεται στο Σημείο Πρόσβασης Υπηρεσίας MAC του πομπού σε ένα τυχαίο χρονικό διάστημα του μήκους T . Τότε το ποσό των δεδομένων σε bits που προωθούνται στο δέκτη στο υπόστρωμα σύγκλισης στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δεν πρέπει να είναι μικρότερο του ελαχίστου $\{S, R*T\}$.
- **Είδος Χρονοπρογραμματισμού Ροής Υπηρεσίας (Service Flow Scheduling Type):** Η τιμή της παραμέτρου αναφέρεται στην υπηρεσία χρονοπρογραμματισμού που πρέπει να ενεργοποιηθεί για τον αντίστοιχο τύπο ροής υπηρεσίας. Εκτενέστερη αναφορά στους τύπους υπηρεσίας γίνεται στο αντίστοιχο εδάφιο.
- **Ανεκτή Μεταβλητότητα (Tolerated Jitter):** Είναι η μέγιστη διακύμανση της καθυστέρησης σε msec που μπορεί να γίνει ανεκτή από μια σύνδεση.
- **Μέγιστη Διάρκεια Λανθάνουσας Κατάστασης (Maximum Latency):** Είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα σε msec που μπορεί να μεσολαβεί μεταξύ της λήψης ενός πακέτου (από το Σταθμό Βάση ή το Σταθμό Συνδρομητή) στη διεπαφή δικτύου και της αποστολής τους στη ραδιοεπαφή (RF interface). Η έλευση του προτύπου IEEE 802.16e τροποποίησε τη συγκεκριμένη παράμετρο, ως το μέγιστο χρονικό διάστημα μεταξύ της εισόδου ενός πακέτου στο υπόστρωμα σύγκλισης και της προώθησης της SDU στη ραδιοεπαφή (air interface).
- **Πολιτική Αίτησης/ Εκπομπής (Request/ Transmission Policy):** Η τιμή αυτής της παραμέτρου παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της συσχετισμένης ροής υπηρεσίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν επιλογές για τη μορφοποίηση των PDUs και, για τις ροές υπηρεσίας άνω ζεύξης, περιορισμοί στον τύπο των διαφόρων επιλογών αιτήσεων εύρους ζώνης.

- **Τύπος Χρονοπρογραμματισμού Εκχώρησης Άνω Ζεύξης (Uplink Grant Scheduling Type):** η τιμή αυτής της παραμέτρου ορίζει τον τύπο χρονοπρογραμματισμού εκχώρησης άνω ζεύξης που θα ενεργοποιηθεί για τη συσχετισμένη ροή υπηρεσίας άνω ζεύξης. Εάν η παράμετρος παραλείπεται, υπονοείται η Best Effort.

3.4 ΚΛΑΣΕΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Η κλάση υπηρεσιών αποτελείται από ένα σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας. Χρησιμοποιείται έτσι ώστε αντί να ορίζεται κάθε παράμετρος Ποιότητας Υπηρεσίας της ροής υπηρεσίας, τα υψηλότερα στρώματα και οι εξωτερικές εφαρμογές να χρησιμοποιούν το όνομα της κλάσης υπηρεσίας.

Η ροή υπηρεσίας μπορεί να έχει κάθε παράμετρο Ποιότητας Υπηρεσίας ρητά ορισμένη, ή μπορεί να χρησιμοποιεί έμμεσα μια κλάση υπηρεσιών που ορίζει το σύνολο των παραμέτρων ή ακόμη και να χρησιμοποιεί έμμεσα μια Κλάση υπηρεσιών με ένα τροποποιημένο σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας. Από τη στιγμή που εγκαθίσταται η ροή υπηρεσίας, δεν υπάρχει ανάγκη για Κλάση Υπηρεσίας, καθώς κάθε παράμετρος της ροής υπηρεσίας έχει οριστεί πλέον ρητά.

Η επέκταση της κλάσης υπηρεσίας αρχικοποιείται από το Σταθμό Βάσεως και ένα από τα μηνύματα DSA-REQ, DSA-REQ, DSCREQ, DSA-REP και DSC-REP αποστέλλονται στο Σταθμό Συνδρομητή ή τον Κινητό Σταθμό. Εάν ο ΣΣ ή ο ΚΣ χρησιμοποιεί Κλάση Υπηρεσίας καθώς επίσης και ένα τροποποιημένο σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας τότε ο ΣΒ πρέπει να αποστείλει απάντηση με αναφορά στο τροποποιημένο σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας. (Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.4.1 ΤΥΠΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Στο πρότυπο 802.16-2004 ορίζονται τέσσερις τύποι ροής υπηρεσιών, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε σύνδεση μεταξύ Σταθμού Βάσης και Σταθμού Συνδρομητή και πρέπει να υποστηρίζονται από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού του στρώματος MAC του Σταθμού Βάσης. Το πρότυπο IEEE 802.16e (Mobile WiMAX) ορίζει και έναν επιπλέον τύπο ποιότητας που ονομάζεται **Extended real-time Polling Service (ErtPS)**. Κάθε ροή υπηρεσίας διαθέτει τα χαρακτηριστικά της Κλάσης Υπηρεσίας στην οποία ανήκει, κάτι που υποδηλώνεται από την τιμή του πεδίου SFID (Service Flow ID) των πακέτων της ροής Υπηρεσίας.

Οι υπηρεσίες εκχώρησης εύρους ζώνης ορίζουν την ανάθεση του εύρους ζώνης βασιζόμενες στις παραμέτρους Ποιότητας Υπηρεσίας, που σχετίζονται με μια σύνδεση. Στις εκπομπές κάτω ζεύξης ο Σταθμός Βάσης έχει ικανοποιητική πληροφορία, ώστε να εκτελέσει τον χρονοπρογραμματισμό, αλλά στις εκπομπές άνω

ζεύξης ο Σταθμός Βάσης εκτελεί το χρονοπρογραμματισμό διαφόρων εκπομπών υπηρεσιών, βασιζόμενος στις πληροφορίες που συλλέγει από τους Σταθμούς Συνδρομητή. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο Σταθμός Συνδρομητή θα κάνει αίτηση για εύρος ζώνης άνω ζεύξης από το Σταθμό Βάσης, και εκείνος με τη σειρά του θα αναθέσει το εύρος ζώνης όπως χρειάζεται. Έτσι λοιπόν ορίζονται οι πέντε τύποι Ροής Υπηρεσιών για να γίνεται ορθά η κατανομή του εύρους ζώνης.

(Bo Li και άλλοι, 2007), (Bashir Hayat και άλλοι, 2006), (IEEE Std 802.16-2004, σελ140), (IEEE Std 802.16e™-2005, σελ182-184), (Jeffrey Andrews και άλλοι, 2007) σελ 317-318)

3.4.1.1 Unsolicited Grant Services (UGS)

Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας υποστηρίζει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπου σε τακτά χρονικά διαστήματα μεταδίδονται πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους. Ο συγκεκριμένος τύπος αναφέρεται σε υπηρεσίες σταθερού ρυθμού μετάδοσης (Constant Bit Rate – CBR), που απαιτούν αυστηρό χρονοπρογραμματισμό και εγγύηση για τη ρυθμαπόδοση (throughput), την καθυστέρηση και τη μεταβλητότητα. Στις υπηρεσίες αυτές δεν είναι υποχρεωτική η αποστολή μηνυμάτων αίτησης ραδιοπόρων από τους κινητούς σταθμούς και έτσι αποφεύγεται η επιβάρυνση του δικτύου με πλεονάζουσα τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Χρησιμοποιείται σε υπηρεσίες όπως η VoIP χωρίς καταπίεση των διαστημάτων σιγής.

Ο τύπος υπηρεσίας προσφέρει εκχωρήσεις σταθερού μεγέθους σε μια περιοδική βάση σε πραγματικό χρόνο, που εξαλείφουν την πλεονάζουσα πληροφορία και την καθυστέρηση των αιτήσεων του Σταθμού Συνδρομητή και εξασφαλίζουν ότι οι εκχωρήσεις μπορούν να ικανοποιήσουν της ανάγκες πραγματικού χρόνου της ροής.

Οι υποχρεωτικές παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας για αυτό τον τύπο υπηρεσίας είναι ο Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης, η Ανεκτή Μεταβλητότητα, η Μέγιστη Διάρκεια Λανθάνουσας Κατάστασης, ο Τύπος Χρονοπρογραμματισμού Εκχώρησης Άνω Ζεύξης και η Πολιτική Αίτησης / Εκπομπής.

3.4.1.2 Real-time Polling Services (rtPS)

Είναι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπου μεταδίδονται πακέτα δεδομένων μεταβλητού μήκους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Σε αυτόν τον τύπο υπηρεσίας, ο Σταθμός Βάσης προσφέρει στο Σταθμό Συνδρομητή δυνατότητα περιοδικών αιτήσεων εύρους ζώνης, ρωτώντας σε σταθερά διαστήματα το Σταθμό Συνδρομητή πόσο εύρος ζώνης χρειάζεται κάθε φορά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συγκεκριμένης υπηρεσίας είναι το βίντεο κωδικοποιημένο κατά MPEG-2. Αυτός ο τύπος υπηρεσίας περιέχει περισσότερη πλεονάζουσα πληροφορία στην αίτηση από

την UGS αλλά υποστηρίζει μεταβλητά μεγέθη εκχωρήσεων ώστε να επιτυγχάνεται αποδοτικότητα στη μετάδοση δεδομένων.

Η υπηρεσία προσφέρει δυνατότητες περιοδικών αιτήσεων, σε πραγματικό χρόνο, που ικανοποιούν της ανάγκες της ροής σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν στο Σταθμό Συνδρομητή να προσδιορίσει το μέγεθος της επιθυμητής εκχώρησης.

Οι υποχρεωτικές παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας για αυτό τον τύπο υπηρεσίας είναι ο Ελάχιστος Δεσμευμένος Ρυθμός Μετάδοσης, ο Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης, η Μέγιστη Διάρκεια Λανθάνουσας Κατάστασης, ο Τύπος Χρονοπρογραμματισμού Εκχώρησης Άνω Ζεύξης και η Πολιτική Αίτησης / Εκπομπής.

3.4.1.3 Nonreal-time Polling Services (nrtPS)

Ο συγκεκριμένος τύπος έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει υπηρεσίες που υπόκεινται σε καθυστέρηση και τα δεδομένα αποτελούνται από πακέτα μεταβλητού μήκους, όπου απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης, όπως σε υπηρεσίες FTP. Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας παρέχει τη διαδικασία διαδοχικής διερεύνησης (polling) προς ένα προορισμό σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που εξασφαλίζει ότι η ροή άνω ζεύξης λαμβάνει δυνατότητες αιτήσεων ακόμη και σε περίπτωση συμφόρησης του δικτύου. Ο Σταθμός Βάσης παρέχει σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ευκαιρίες αιτήσεων και ο Σταθμός Συνδρομητή χρησιμοποιεί δυνατότητες αίτησης συμφόρησης (congestion request) , όπως επίσης και δυνατότητες αίτησης μονοεκπομπής (unicast) και εκπομπής δεδομένων.

Οι υποχρεωτικές παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας για αυτό τον τύπο υπηρεσίας είναι ο Ελάχιστος Δεσμευμένος Ρυθμός Μετάδοσης, ο Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης, η Προτεραιότητα Κίνησης, ο Τύπος Χρονοπρογραμματισμού Εκχώρησης Άνω Ζεύξης και η Πολιτική Αίτησης / Εκπομπής.

3.4.1.4 Best Effort (BE)

Είναι υπηρεσίες χωρίς απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και η τηλεπικοινωνιακή κίνησή τους διαχειρίζεται από το δίκτυο με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Δεν παρέχει κάποια εγγύηση, αλλά ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Όπως και στο nrtPS παρέχεται η δυνατότητα για contention request, αλλά δεν παρέχεται κράτηση εύρους ζώνης ή οι συνηθισμένες διερευνήσεις μονοεκπομπής (unicast polls). Παράδειγμα υπηρεσίας BE είναι η πλοήγηση στο διαδίκτυο.

Οι υποχρεωτικές παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης, η Προτεραιότητα Κίνησης και η Πολιτική Αίτησης / Εκπομπής. Οι παράμετροι αυτές είναι υποχρεωτικές μόνο στο πρότυπο IEEE 802.16-2004, ενώ στην έκδοση IEEE 802.16-2005 είναι προαιρετικές.

3.4.1.5 Extended real-time Polling Service (ErtPS)

Η συγκεκριμένη κατηγορία είναι ένας μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού που βασίζεται στην αποδοτικότητα των UGS και rtPS. Ο Σταθμός Βάσης θα παρέχει αναθέσεις μονοεκπομπής (unicast allocations) με αυτόκλητο (unsolicited) τρόπο όπως στην UGS, μειώνοντας έτσι την λανθάνουσα κατάσταση μιας αίτησης εύρους ζώνης. Παρόλα αυτά, ενώ οι εκχωρήσεις στην UGS είναι σταθερού μεγέθους, στην rtPS είναι δυναμικές. Οι περιοδικές αναθέσεις άνω ζεύξης που παρέχονται για ένα συγκεκριμένο Κινητό Σταθμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για εκπομπή δεδομένων, όσο και για αίτηση επιπλέον εύρους ζώνης. Δηλαδή ο τύπος ertPS μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες των οποίων οι απαιτήσεις για εύρος ζώνης αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.

Η ErtPS έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ροές υπηρεσίας πραγματικού χρόνου που παράγουν μεταβλητού μεγέθους πακέτα σε περιοδική βάση, αλλά απαιτούν να ικανοποιούνται ορισμένα όρια για τη μέγιστη καθυστέρηση και τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων υπηρεσιών είναι η VoIP με καταπίεση διαστημάτων σιγής.

Οι σημαντικές παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας για το συγκεκριμένο τύπο είναι ο Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης, ο Ελάχιστος Δεσμευμένος Ρυθμός Μετάδοσης, η Μέγιστη Διάρκεια Λανθάνουσας Κατάστασης και η Πολιτική Αίτησης / Εκπομπής.

3.5 ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Η ροή υπηρεσίας είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του στρώματος MAC του WiMAX που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας. Η χρήση της είναι ως υπηρεσία μεταφοράς για την παράδοση πακέτων. Μια ροή υπηρεσίας μπορεί να χρησιμοποιείται από πολλά πακέτα. Η ροή υπηρεσίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις 2 κατευθύνσεις τόσο από το Σταθμό Βάσης προς το Σταθμό Συνδρομητή, όσο και αντίστροφα και διαθέτει ένα αναγνωριστικό 32bits που λέγεται Service Flow ID - SFID. Κάθε ροή υπηρεσίας έχει ένα ορισμένο σύνολο παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας. Οι ροές υπηρεσιών μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις τύπους, τις **Προδιατεθειμένες (Provisioned) Ροές Υπηρεσίας**, τις **Επιτρεπόμενες (Admitted) και τις Ενεργές (Active) Ροές Υπηρεσίας**. Η ροή υπηρεσίας

περιλαμβάνει και προαιρετικές παραμέτρους που εξαρτώνται από τον τύπο της ροής υπηρεσίας. Στην περίπτωση των Επιτρεπόμενων και των Ενεργών Ροών Υπηρεσίας εκτός του SFID υπάρχει και το **Αναγνωριστικό Σύνδεσης (Connection ID –CID)** μήκους 16 bits. Κάθε σύνδεση έχει ακριβώς μια αντιστοιχισθείσα ροή υπηρεσίας. Η παράμετρος ProvisionedQoSParameterSet δεν είναι κενή στην περίπτωση που η ροή υπηρεσίας είναι Προδιατεθειμένη και η παροχή γίνεται από το σύστημα διαχείρισης του δικτύου. Η παράμετρος AdmittedQoSParameterSet δεν είναι κενή εφόσον πρόκειται για επιτρεπόμενη ροή υπηρεσίας και ο Σταθμός Βάσης κρατά πόρους για αυτό το είδος των ροών υπηρεσίας. Η ActiveQoSParameterSet παράμετρος δεν είναι κενή εάν η ροή υπηρεσίας είναι Ενεργή και τα πακέτα δεδομένων μπορούν να μεταδίδονται χρησιμοποιώντας Ενεργή Ροή Υπηρεσίας.

Κάθε πακέτο δεδομένων έχει μια συνδεδεμένη ροή υπηρεσίας, που σημαίνει ότι ένα πακέτο έχει μόνο ένα SFID ως παράμετρο, ενώ μπορεί να περιλαμβάνει και το όνομα της Κλάσης Υπηρεσίας. Εάν αυτό περιλαμβάνεται, τότε το σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας της Ροής Υπηρεσίας, ορίζεται στην Κλάση Υπηρεσίας. Όπως κάθε σύνδεση έχει ακριβώς μια συνδεδεμένη Ροή Υπηρεσίας έτσι και κάθε κλάση Υπηρεσίας είναι συνδεδεμένη με ακριβώς μια ροή υπηρεσίας. Μια ζεύξη επικοινωνίας μεταξύ του Σταθμού βάσης και του Σταθμού Συνδρομητή μπορεί να περιλαμβάνει αρκετές ροές υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα μια BE για πρόσβαση στο διαδίκτυο και μια rPS για μεταφορά βίντεο πραγματικού χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την μετάδοση της εφαρμογής μεταξύ των δυο προαναφερθέντων κόμβων, οι κινήσεις άνω και κάτω ζεύξης θεωρούνται διαφορετικές ροές υπηρεσίας καθώς έχουν διαφορετικούς προορισμούς και προελεύσεις.

Ο Σταθμός Βάσης περιέχει μια μονάδα (module) εξουσιοδότησης που είναι μια λογική συνάρτηση. Όταν ο Σταθμός Συνδρομητή στέλνει ένα μήνυμα DSC μιας Προδιατεθειμένης, Επιτρεπόμενης ή Ενεργής Ροής Υπηρεσίας στο Σταθμό Βάσης, τότε αυτός είναι υπεύθυνος για να το δεχθεί ή να το απορρίψει. Οι αλλαγές είναι περιορισμένες στις Ενεργές και στις Επιτρεπόμενες Ροές Υπηρεσίας. (Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.5.1 ΤΥΠΟΙ ΡΟΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Στο συγκεκριμένο εδάφιο αναλύονται οι τρεις διαφορετικοί τύποι Ροής Υπηρεσίας.

3.5.1.1 ΠΡΟΔΙΑΤΕΘΕΙΜΕΝΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (PROVISIONED SERVICE FLOW)

Ο συγκεκριμένος τύπος Ροής Υπηρεσίας παρέχεται από το σύστημα διαχείρισης δικτύου, με ανάθεση ενός SFID σε αυτόν, αλλά μπορεί αν μην υπάρχει πληροφορία προς μετάδοση. Ο Σταθμός Βάσης, λοιπόν, δεν δεσμεύει πόρους γι' αυτόν τον τύπο Ροής Υπηρεσίας, ούτε πακέτα δεδομένων μπορούν να αντιστοιχισθούν με αυτόν. Ο Σταθμός Συνδρομητή μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα μήνυμα DSC (Dynamic Service Change) για να αλλάξει τον τύπο ροής υπηρεσιών από Προδιατεθειμένο σε Ενεργό ή

Επιτρεπόμενο. Παρόμοια ο Σταθμός Βάσης μπορεί αποστέλλοντας το συγκεκριμένο μήνυμα στο Σταθμό Συνδρομητή να αλλάξει τον τύπο Ροής Υπηρεσίας. Γι' αυτό το λόγο ο Σταθμός Βάσης αντιστοιχίζει το SFID σε CID και το αποστέλλει στο Σταθμό Συνδρομητή με χρήση του μηνύματος DSC-REQ (Dynamic Service Activate-Request) εάν το μήνυμα DSC αρχικοποιήθηκε από τον ίδιο τον Σταθμό Βάσης ή αποστέλλει στον Σταθμό Συνδρομητή DSC-RSP (Dynamic Service Activate-Response) εάν το μήνυμα DSC αρχικοποιήθηκε από το Σταθμό Συνδρομητή. (Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.5.1.2 ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (ADMITTED SERVICE FLOW)

Μια επιτρεπόμενη Ροή Υπηρεσίας υπόκειται τη διαδικασία της ενεργοποίησης. Σε απάντηση σε μια εξωτερική αίτηση για μια συγκεκριμένη ροή υπηρεσίας, ο Σταθμός Βάσης ή ο Σταθμός Συνδρομητή αντίστοιχα θα ψάξει για διαθέσιμους πόρους, βασισμένους στις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, για να δουν εάν μπορούν να υποστηρίξουν την αίτηση. Εάν είναι διαθέσιμοι ικανοποιητικοί πόροι, η ροή υπηρεσίας θα θεωρηθεί επιτρεπόμενη. Οι πόροι που έχουν ανατεθεί στη συγκεκριμένη ροή υπηρεσίας, μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν από άλλες υπηρεσίες.

Ο συγκεκριμένος τύπος ροής υπηρεσίας μπορεί να «κατασκευαστεί» χρησιμοποιώντας δυο τύπους μοντέλων έγκρισης (authorization), το **προδιατεθειμένο (provisioned)** και το **δυναμικό μοντέλο έγκρισης**, τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν τόσο από το Σταθμό Βάσης όσο και από το Σταθμό Συνδρομητή.

Το **προδιατεθειμένο μοντέλο έγκρισης** υποστηρίζει ενεργοποίηση δυο φάσεων, Ο σταθμό Βάσης αρχικά δίνει πόρους σε μια ροή υπηρεσίας σε απάντηση σε ένα μήνυμα DSC-REQ από το Σταθμό Συνδρομητή. Με τη συγκεκριμένη κίνηση εξασφαλίζονται οι απαιτούμενοι από τη Ροή Υπηρεσίας πόροι, από τη στιγμή που εγκαθίσταται η Επιτρεπόμενη Ροή Υπηρεσίας. Το σύνολο των παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας μιας Επιτρεπόμενης Ροής Υπηρεσίας πρέπει πάντα να είναι υποσύνολο της Προδιατεθειμένης Ροής Υπηρεσίας.

Στο δυναμικό μοντέλο έγκρισης, η ροή υπηρεσίας μπορεί να δημιουργηθεί δυναμικά χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα DSA (Dynamic Service Activate), το οποίο θα συζητηθεί στη συνέχεια.

3.5.1.3 **ΕΝΕΡΓΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (ACTIVE SERVICE FLOW)**

Μια ροή υπηρεσίας είναι ενεργή όταν όλοι οι έλεγχοι έχουν πραγματοποιηθεί και οι πόροι έχουν ανατεθεί. Τα πακέτα ρέουν διαμέσου της σύνδεσης που έχει ανατεθεί στη ροή υπηρεσίας. Η χρήση των ροών υπηρεσίας είναι ο κύριος μηχανισμός για την παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας. Τα πακέτα που διέρχονται από το στρώμα MAC, σχετίζονται με ροές υπηρεσίας οι οποίες χαρακτηρίζονται από την CID όταν απαιτείται η Ποιότητα Υπηρεσίας.

Οι Ενεργές Ροές Υπηρεσίας δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τόσο το **προδιατεθειμένο (provisioned)** όσο και το **δυναμικό μοντέλο έγκρισης**. Όπως και προηγουμένως, η διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει από το Σταθμό Βάσης ή από το Σταθμό Συνδρομητή. Ο Σταθμός Βάσης κρατά πόρους για τις Ενεργές Ροές Υπηρεσίας. Το σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας της Ενεργής Ροής Υπηρεσίας πρέπει να είναι υποσύνολο των Επιτρεπόμενων Ροών Υπηρεσίας.

Στο μοντέλο έγκρισης δυο φάσεων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο Σταθμός Βάσης κρατά πόρους για τις Επιτρεπόμενες Ροές Υπηρεσίας, στη συνέχεια ο Σταθμός Συνδρομητή αποστέλλει το σύνολο Ενεργών παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας στο Σταθμό Βάσης με ένα μήνυμα DSC (Dynamic Service Change).

Στο **δυναμικό** μοντέλο έγκρισης, ο Σταθμός Συνδρομητή μπορεί να δημιουργεί δυναμικά Ενεργές Ροές Υπηρεσίας χρησιμοποιώντας το μήνυμα DSA (Dynamic Service Activate) που περιέχει το Ενεργό σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας.

Από τη στιγμή που μια Ενεργή Ροή Υπηρεσίας έχει εγκριθεί και ενεργοποιηθεί, ο Σταθμός Βάσης μπορεί να αποστέλλει δεδομένα μέσω μιας σύνδεσης εάν πρόκειται για κάτω ζεύξη Ενεργής Ροής Υπηρεσίας ή ο Σταθμός Συνδρομητή μπορεί να αποστέλλει δεδομένα μέσω σύνδεσης εάν είναι Ροή Υπηρεσίας άνω ζεύξης.

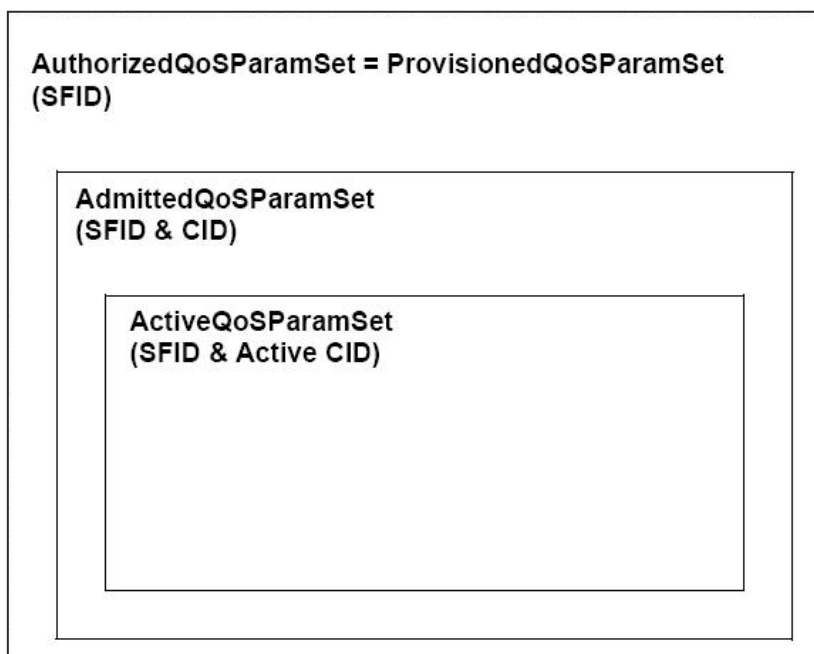
3.6 **ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ**

Ο Σταθμός Βάσης χρησιμοποιεί τη μονάδα έγκρισης που επιτρέπει ή αρνείται κάποια νέα ροή υπηρεσίας ή μεταβάλλει το σύνολο των παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας ή αλλάζει τοβ τύπο Ροής Υπηρεσίας. Η μονάδα έγκρισης υποστηρίζει δυο τύπους μοντέλων έγκρισης, που είναι το Προδιατεθειμένο (στατικό) μοντέλο έγκρισης και το Δυναμικό μοντέλο έγκρισης. (Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.6.1 **ΠΡΟΔΙΑΤΕΘΕΙΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ**

Στο συγκεκριμένο μοντέλο έγκρισης, ο Σταθμός Βάσης κρατά όλα τα προδιατεθειμένα σύνολα παραμέτρων Ποιότητα Υπηρεσίας των Ροής Υπηρεσιών. Όταν ο Σταθμός Συνδρομητή χρησιμοποιεί το μήνυμα DSC (Dynamic Service

Change) για να αποδεχθεί μια Ροή Υπηρεσίας ή να ενεργοποιήσει μια Ροή Υπηρεσίας, το μοντέλο έγκρισης διαβεβαιώνει ότι αυτό είναι ένα υποσύνολο της Προδιατεθειμένης Ροής Υπηρεσίας στην πρώτη περίπτωση και στη συνέχεια υποσύνολο της Επιτρεπόμενης Ροής Υπηρεσίας. Παρόμοια ο Σταθμός Συνδρομητή δεν επιτρέπεται να δημιουργήσει Προδιατεθειμένη Ροή Υπηρεσίας. Η προδιάθεση της Ροής Υπηρεσίας γίνεται από το σύστημα διαχείρισης του δικτύου. Ο Σταθμός Βάσης ρυθμίζει και καταχωρεί τη Ροή Υπηρεσίας και αναθέτει ένα SFID σε αυτή. Επιπλέον αποστέλλει τη Ροή Υπηρεσίας στο Σταθμός Συνδρομητή με χρήση του DSAREQ (Dynamic Service Activate-Request) και ο Σταθμός Συνδρομητή αφότου την αποδεχθεί απαντά στέλνοντας μήνυμα DSA-RSP (Dynamic Service Activate-Response) και τέλος για να ολοκληρωθεί η διαδικασία ο Σταθμός Βάσης επιβεβαιώνει αποστέλλοντας DSA-ACK (Dynamic Service Activate-Acknowledgement). Οι «φάκελοι» του μοντέλου προδιατεθειμένου μοντέλου έγκρισης φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:

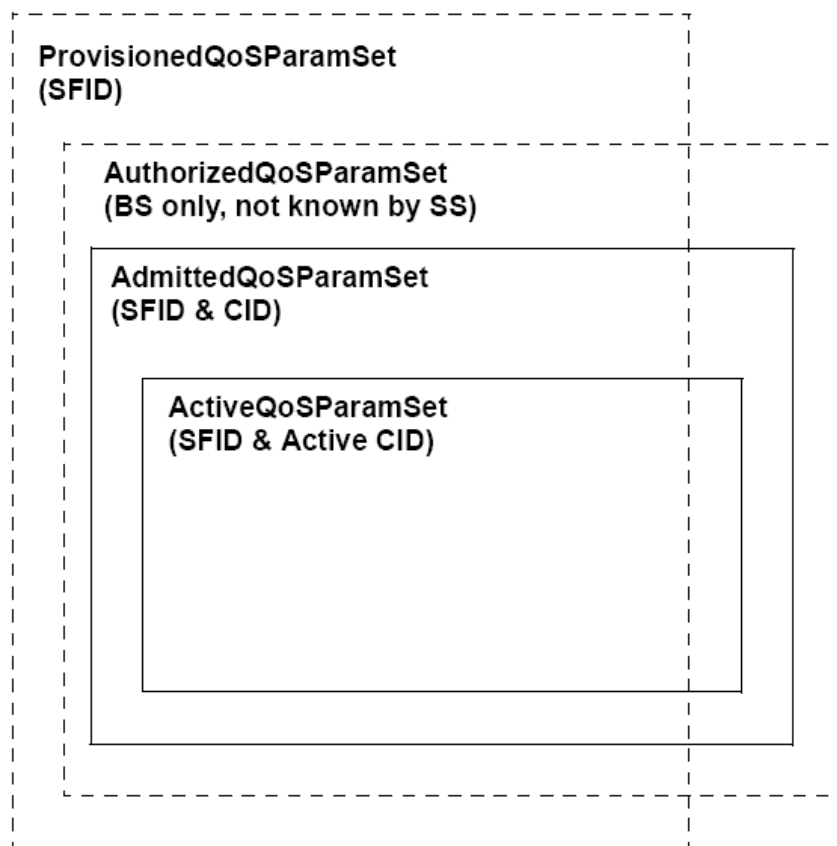


Σχήμα 3.1 Προδιατεθειμένο Μοντέλο Έγκρισης (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004)

3.6.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Στο δυναμικό μοντέλο έγκρισης, η μονάδα έγκρισης επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή πολιτικής (policy server). Αυτός ενημερώνει τη μονάδα έγκρισης για τις κινήσεις που πρέπει να γίνουν για την εισερχόμενη αίτηση έγκρισης ή ενεργοποίησης που στέλνει ο Σταθμός Συνδρομητή. Ο εξυπηρετητής πολιτικής στέλνει το σύνολο των παραμέτρων στη μονάδα έγκρισης για κάθε επερχόμενη αίτηση, γι αυτό το λόγο και το σύνολο των παραμέτρων που στέλνει ο Σταθμός Συνδρομητή πρέπει πάντα να είναι υποσύνολο του συνόλου παραμέτρων που στέλνει ο εξυπηρετητής πολιτικής. Εάν ο εξυπηρετητής πολιτικής δεν έχει στείλει πληροφορία σχετικά με κάποια

εισερχόμενη αίτηση, τότε εξαρτάται από τη μονάδα έγκρισης εάν θα την αποδεχθεί ή όχι. Το αντίστοιχο δυναμικό μοντέλο παρουσιάζεται εποπτικά ακολούθως.



Σχήμα 3.2 Δυναμικό Μοντέλο Έγκρισης (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004)

3.7 ΣΥΝΑΛΛΑΓΕΣ WiMAX

Όποτε ο Σταθμός Βάσης ή Συνδρομητή θέλει να δημιουργήσει, να αλλάξει ή να διαγράψει μια Ροή Υπηρεσίας, χρησιμοποιεί συναλλαγές. Κάθε συναλλαγή έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό. Για να διαφοροποιούνται οι συναλλαγές που αρχικοποιούνται από το Σταθμό Βάσης από αυτές του Σταθμού Υπηρεσίας, ο Σταθμός Υπηρεσίας χρησιμοποιεί δεκαεξαδικούς αριθμούς από το 0000 έως το 7FFFF και ο Σταθμός Βάσης από το 8000 έως το FFFF για το αναγνωριστικό της transaction. (Bashir Hayat και άλλοι 2006)

3.7.1 ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΛΛΑΓΩΝ

Υπάρχουν συνολικά έξι συναλλαγές, εκ των οποίων τρεις αρχίζουν τοπικά και οι υπόλοιπες τρεις απομακρυσμένα. Επιπλέον υπάρχουν και οι συναλλαγές που μπορούν να αρχικοποιηθούν είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα.

Η transaction που χρησιμοποιείται για το μήνυμα DSA (Dynamic Service Activate) περιλαμβάνει ένα μοναδικό αναγνωριστικό συναλλαγής. Αυτός ο τύπος αποτελείται

από την ακολουθία αίτησης, απάντησης και επιβεβαίωσης. Τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά έχουν και οι συναλλαγές για αλλαγή και διαγραφή των Ροών Υπηρεσίας και χρησιμοποιούν τα μηνύματα DSC (Dynamic Service Change) και DSD (Dynamic Service Delete) αντίστοιχα.

3.7.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΑΛΛΑΓΩΝ

Υπάρχουν τυπικά τρεις καταστάσεις μιας transaction, η κατάσταση **αναμονής (pending)**, **κράτησης (holding)** και **διαγραφής (deleting)**. Στην κατάσταση αναμονής, η transaction αναμένει απάντηση. Στην κατάσταση κράτησης, η transaction έχει λάβει την απάντηση και διατηρεί το μήνυμα ώστε σε περίπτωση χαμένου μηνύματος να μπορεί να αποσταλεί εκ νέου. Στην κατάσταση διαγραφής, διαγράφεται η Ροή Υπηρεσίας που είναι υπό επεξεργασία.

Το διάγραμμα κατάστασης transition Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας περιλαμβάνει τις εισαγωγές, αλλαγές και διαγραφές από το ανώτερο στρώμα.

3.8 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Η δυναμική Ροή Υπηρεσίας έχει είτε μια **κενή (null) κατάσταση** είτε μια **κανονική (normal)**. Στην **κενή** κατάσταση δεν τερματίζει καμία Ροή Υπηρεσίας, που ταιριάζει με το αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας SFID ή το αναγνωριστικό της συναλλαγής από το μήνυμα συναλλαγής. Για να μεταφέρουμε την υπηρεσία από την κενή κατάσταση στην κανονική, χρησιμοποιείται ένα μήνυμα DSA (Dynamic Service Activate). Όταν μια ροή υπηρεσιών τερματίζεται, της έχει ανατεθεί ένα SFID. Στην κανονική κατάσταση, το SFID μπορεί να αλλάξει αρκετές φορές με τα μηνύματα DSC (Dynamic Service Change). Τέλος, όταν χρησιμοποιείται το μήνυμα DSD (Dynamic Service Delete), η Ροή Υπηρεσίας επιστρέφει στην κενή κατάσταση. (Bashir Hayat και άλλοι 2006)

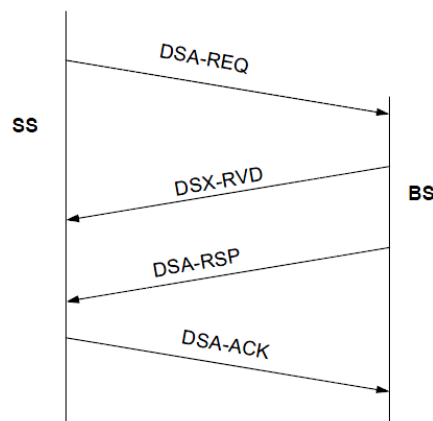
3.8.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Μπορεί να αρχικοποιηθεί είτε από το Σταθμό Βάσης είτε από το Σταθμό Συνδρομητή. Στέλνουν με ένα μήνυμα DSA (Dynamic Service Activate) το σύνολο των παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας για νέα ροή υπηρεσίας, μια για τη ροή υπηρεσίας άνω ζεύξης και/η μια για αυτήν της κάτω ζεύξης. Είναι εφικτή η δημιουργία περισσότερων της μιας ροές υπηρεσιών τη φορά. (Bashir Hayat και άλλοι 2006)

3.8.1.1 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΗ

Ο Σταθμός Συνδρομητή αρχικά ελέγχει τους πόρους για τη νέα ροή Υπηρεσίας και εάν είναι διαθέσιμοι στη συνέχεια στέλνει ένα μήνυμα DSA-REQ (Dynamic Service Activate-Request) στο Σταθμό Βάσης με αναφορά στη ροή υπηρεσίας και στο σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας. Τότε ο Σταθμός Συνδρομητή ενεργοποιεί το χρονόμετρο T7 και T14. Ο Σταθμός Βάσης ελέγχει την ακεραιότητα του μηνύματος και στέλνει το μήνυμα DSARVD στο Σταθμό Συνδρομητή και στη συνέχεια αυτός σταματά το χρονόμετρο T14. Ο Σταθμός Βάσης ελέγχει εάν ο Σταθμός Συνδρομητή εξουσιοδοτείται για τις συγκεκριμένες υπηρεσίες, στη συνέχεια ελέγχει για την διαθεσιμότητα των πόρων και δημιουργεί ένα SFID. Ο σταθμός Βάσης εάν πρόκειται για αίτηση αποδοχής άνω ζεύξης αντιστοιχίζει τη ροή υπηρεσίας σε ένα CID, και εάν πρόκειται για αίτηση ενεργοποίησης άνω ζεύξης τότε ενεργοποιεί τη λήψη δεδομένων διαμέσου της νέας Ροής Υπηρεσίας. Ακόμη ο Σταθμός Βάσης στέλνει ένα μήνυμα DSA-RSP (Dynamic Service Activate-Response) στο σταθμό Συνδρομητή, ο οποίος και σταματά το χρονόμετρο T7. Εάν πρόκειται για αίτηση ενεργοποίησης, ο Σταθμός Συνδρομητή ενεργοποιεί την εκπομπή/λήψη δεδομένων διαμέσου ροών υπηρεσίας άνω/κάτω ζεύξης. Στη συνέχεια ο Σταθμός Συνδρομητή στέλνει ένα μήνυμα DSA-ACK (Dynamic Service Activate-Acknowledgement) στο Σταθμό Βάσης. Ο Σταθμός Βάσης εάν πρόκειται για αίτηση ενεργοποίησης, ενεργοποιεί την εκπομπή δεδομένων διαμέσου της ροής δεδομένων κάτω ζεύξης.

Η όλη διαδικασία φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

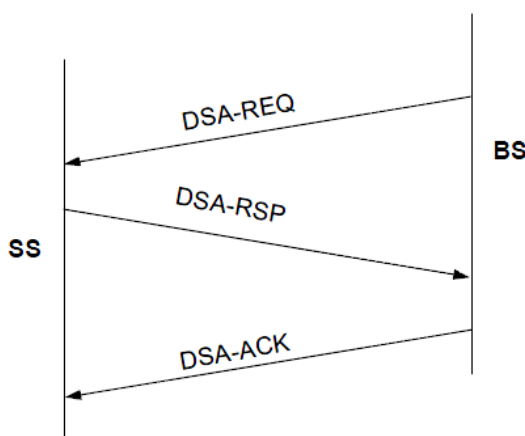


Σχήμα 3.3 Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας - Αρχικοποίηση από το Σταθμό Συνδρομητή (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004)

3.8.1.2 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ

Ο Σταθμός Βάσης μπορεί να δημιουργήσει μια Ροή Υπηρεσίας άνω και μια κάτω ζεύξης ή μια από αυτές χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα DSA-REQ (Dynamic Service Activate-Request). Αποστέλλει τα σύνολα παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας και το

SFID σε ένα μήνυμα. Αρχικά, ο Σταθμός βάσης ελέγχει εάν ο Σταθμός Συνδρομητή χρειάζεται νέες ροές υπηρεσιών και εάν όχι ελέγχει εάν ο σταθμός Συνδρομητή είναι εξουσιοδοτημένος (authorized) για ροές υπηρεσίας. Στη συνέχεια, ελέγχει τη διαθεσιμότητα των πόρων για υπηρεσίες, δημιουργεί το SFID και εάν πρόκειται για αίτηση αποδοχής αντιστοιχίζει τη ροή υπηρεσίας με ένα CID. Ακόμη ο Σταθμός Βάσης στέλνει ένα μήνυμα DSA-REQ και ενεργοποιεί το χρονόμετρο T7. Ο Σταθμός συνδρομητή με τη σειρά του ελέγχει εάν μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες και εάν πρόκειται για αίτηση ενεργοποίησης, ενεργοποιεί τη λήψη δεδομένων διαμέσου των νέων Ροών Υπηρεσίας. Στέλνει στο Σταθμό Βάσης ένα μήνυμα DSA-RSP και αυτός σταματά το χρονόμετρο T7 και ενεργοποιεί την αποστολή δεδομένων από τη νέα ροή υπηρεσίας εάν πρόκειται για αίτηση ενεργοποίησης κάτω ζεύξης ή ενεργοποιεί τη λήψη δεδομένων εάν αίτηση είναι για ενεργοποίηση άνω ζεύξης. Τέλος ο Σταθμός Βάσης στέλνει μήνυμα DSA-ACK στο Σταθμό Συνδρομητή και εάν πρόκειται για αίτηση ενεργοποίησης άνω ζεύξης ξεκινά η αποστολή δεδομένων διαμέσου της νέας Ροής Υπηρεσίας. Σχηματικά η διαδικασία ακολουθεί:



Σχήμα 3.4 Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας - Αρχικοποίηση από το Σταθμό Βάσης (Πηγή: IEEE Std 802.16™-2004)

3.8.2 ΑΛΛΑΓΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται για την αλλαγή μιας Προδιατεθειμένης Ροής Υπηρεσίας σε μια Επιτρεπόμενη, ή από μια Επιτρεπόμενη σε μια Ενεργή. Επιπλέον χρησιμοποιείται για την αλλαγή του συνόλου παραμέτρων Υπηρεσίας μιας Επιτρεπόμενης ή Ενεργής Ροής Υπηρεσίας. Εάν το μήνυμα DSC (Dynamic Service Change) δεν περιλαμβάνει σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας, τότε το Επιτρεπόμενο και το Ενεργό σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας για μια ροή ορίζονται να είναι κενά και η Ροή Υπηρεσίας «αποεπιτρέπεται». Εάν το μήνυμα DSC περιλαμβάνει μόνο Επιτρεπόμενο σύνολο παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας, τότε το συγκεκριμένο σύνολο μεταβάλλεται και απενεργοποιείται. Εάν το μήνυμα DSC περιλαμβάνει Επιτρεπόμενο και Ενεργό σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας τότε πρώτα το Επιτρεπόμενο σύνολο μεταβάλλεται και στη συνέχεια ελέγχεται εάν το

Ενεργό σύνολο είναι υποσύνολο του Επιτρεπομένου και στην περίπτωση αυτή το Ενεργό σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας αντικαθίσταται από το Ενεργό σύνολο του μηνύματος DSC.

Το μήνυμα DSC μπορεί να αρχικοποιηθεί τόσο από το Σταθμό Βάσης όσο και από το Σταθμό Συνδρομητή. Στην περίπτωση που και οι δυο έχουν ενεργοποιήσει μήνυμα DSC τότε κάποιο από τα δυο μέρη θα απορρίψει το μήνυμα DSC που έχει αρχικοποιηθεί από το Σταθμό Συνδρομητή. (Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.8.2.1 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΗ

Εάν ο Σταθμός Συνδρομητή χρειάζεται να αλλάξει τη Ροή Υπηρεσίας, στέλνει με ένα μήνυμα DSC-REQ στο Σταθμό Βάσης το μεταβληθέν σύνολο παραμέτρων Ποιότητας Υπηρεσίας και ενεργοποιεί τα χρονόμετρα T7 και T14. Ο Σταθμός Βάσης ελέγχει την ακεραιότητα του μηνύματος και στέλνει ένα μήνυμα DSC-RVD στο Σταθμό Συνδρομητή, ο οποίος με τη σειρά του σταματά το χρονόμετρο T14. Στη συνέχεια ο Σταθμός Βάσης ελέγχει την διαθεσιμότητα των πόρων και μεταβάλλει τη Ροή Υπηρεσίας. Εάν απαιτείται αυξάνει το εύρος ζώνης του καναλιού και στέλνει στο Σταθμό Συνδρομητή ένα μήνυμα DSC-RSP. Ο Σταθμός Συνδρομητή σταματά το χρονόμετρο T7, μεταβάλλει τη Ροή Υπηρεσίας, αλλάζει το εύρος ζώνης του ωφέλιμου φορτίου και στέλνει ένα μήνυμα DSC-ACK στο Σταθμό Βάσης. Εκείνος μειώνει το εύρος ζώνης του καναλιού, εάν είναι απαραίτητο.

Το διάγραμμα δυναμικής αλλαγής υπηρεσίας είναι ίδιο με αυτό της δημιουργίας, με αντικατάσταση των μηνυμάτων DSA με DSC.

3.8.2.2 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ

Εάν ο Σταθμός Βάσης θέλει να μεταβάλλει τη Ροή Υπηρεσίας, αρχικά πρέπει να ελέγξει εάν μπορεί να υποστηρίξει τη μεταβολή. Στη συνέχεια ο Σταθμός Βάσης αποστέλλει ένα μήνυμα DSC-REQ στο Σταθμό Συνδρομητή και ενεργοποιεί το χρονόμετρο Ta&. Ο Σταθμός Συνδρομητή αφού λαμβάνει το μήνυμα ελέγχει τη διαθεσιμότητα των πόρων, στη συνέχεια μεταβάλλει τη Ροή Υπηρεσίας και εάν είναι απαραίτητο μειώνει το εύρος ζώνης ωφέλιμο φορτίου (payload). Ο Σταθμός Συνδρομητή στέλνει το μήνυμα DSC-RSP στο Σταθμό Βάσης και αυτός αλλάζει το εύρος ζώνης του καναλιού και στέλνει το μήνυμα DSC-ACK στο Σταθμό Συνδρομητή, ο οποίος αυξάνει το εύρος ζώνης ωφέλιμου φορτίου εάν κάτι τέτοιο απαιτείται.

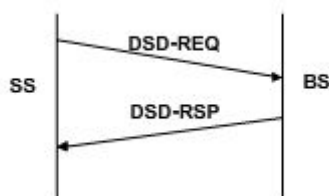
Όπως και προηγουμένως το διάγραμμα ανταλλαγής μηνυμάτων είναι παρόμοιο με την περίπτωση δημιουργίας δυναμικής ροής υπηρεσίας, με αντικατάσταση των μηνυμάτων DSA με τα DSC.

3.8.3 ΔΙΑΓΡΑΦΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Για να διαγραφεί μια Ροή Υπηρεσίας, χρησιμοποιείται το μήνυμα DSD, ενώ μια μόνο μια Ροή Υπηρεσίας μπορεί να διαγραφεί χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα. Οι πόροι που κρατούνται για τη Ροή Υπηρεσίας, απελευθερώνονται μετά τη διαγραφή. Ο Σταθμός Συνδρομητή πρέπει να ξανακαταχωρήσει τον εαυτό του εάν η διαγραφείσα Ροή Υπηρεσίας σχετίζεται με τη διαχείριση δικτύου και ακόμη εάν μια Προδιατεθειμένη Ροή Υπηρεσίας διαγράφεται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το Σταθμό Συνδρομητή μόνο εάν αυτός ξανακαταχωρηθεί. (Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.8.3.1 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΗ

Εάν ο Σταθμός Υπηρεσίας δεν χρειάζεται μια Ροή Υπηρεσίας, τη διαγράφει και στέλνει ένα μήνυμα DSD-REQ στο Σταθμό Βάσης. Ο Σταθμός Βάσης αρχικά επιβεβαιώνει ότι ο Σταθμός Συνδρομητή είναι ο ιδιοκτήτης της Ροής Υπηρεσίας και στη συνέχεια τη διαγράφει και στέλνει ένα μήνυμα DSD-RSP. Η διαδικασία φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.5 Διαγραφή Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας - Αρχικοποίηση από το Σταθμό Συνδρομητή (Πηγή: Bashir Hayat και άλλοι, 2006)

3.8.3.2 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ

Εάν ο Σταθμός Βάσης δεν χρειάζεται μια Ροή Υπηρεσίας, τη διαγράφει και ελέγχει ποιος Σταθμός Συνδρομητή είναι συσχετισμένος με τη Ροή Υπηρεσίας και στη συνέχεια στέλνει σε αυτόν ένα μήνυμα DSD-REQ. Ο Σταθμός Συνδρομητή διαγράφει τη Ροή Υπηρεσίας και στέλνει ένα μήνυμα DSD-RSP στο Σταθμό Βάσης.

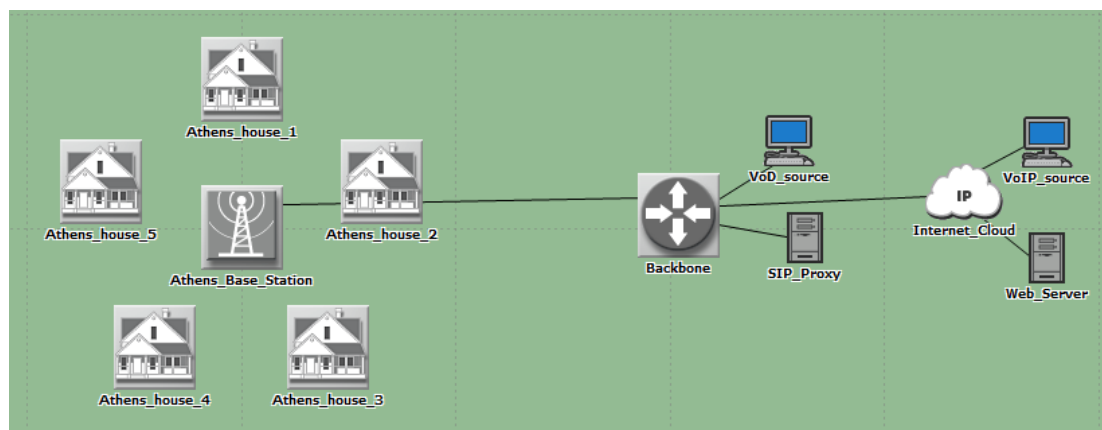
4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ OPNET MODELER

4.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Στη συγκεκριμένη διπλωματική γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης ενός δικτύου WiMAX. Το δίκτυο, στο κομμάτι της πρόσβασης, αποτελείται από ένα Σταθμό Βάσης και πολλούς σταθερούς χρήστες, οι οποίοι είναι οικίες και μικρές επιχειρήσεις. Ο Σταθμός Βάσης έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Σταθμού Βάσης που προτείνει η διπλωματική των Τερζάκη και Τσαπάρα (Τερζάκης και άλλοι, 2007) στο κτίριο του ΟΤΕ στην Πατησίων (NYMA).

Περιμετρικά του Σταθμού Βάσης και στην ίδια απόσταση από αυτόν, βρίσκονται οι σταθεροί χρήστες, οι οποίοι αποτελούνται από ένα υποδίκτυο LAN που περιλαμβάνει ένα τηλέφωνο VoIP, έναν προσωπικό υπολογιστή για τις υπηρεσίες των δεδομένων και μια συσκευή-αποκωδικοποιητή (set-top-box) η οποία είναι υπεύθυνη για τη λήψη της υπηρεσίας του βίντεο κατ' απαίτηση (Video on Demand – VoD).

Επιπλέον, ο Σταθμός Βάσης είναι συνδεδεμένος μέσω μιας σύνδεσης σημείου προς σημείο με το δίκτυο κορμού του παρόχου, στο οποίο συνδέεται η πηγή του VoD ο πληρεξούσιος εξυπηρετητής (SIP Proxy Server) που χρησιμοποιείται για την σηματοδότηση της υπηρεσίας φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ (Voice over Internet Protocol – VoIP). Το δίκτυο κορμού, με τη σειρά του συνδέεται με το υπόλοιπο Ίντερνετ (μη ελεγχόμενο από τον πάροχο) όπου βρίσκεται συνδεδεμένος ο εξυπηρετητής ιστού (web server) και ο διακομιστής που χρησιμοποιείται ως αποδέκτης των κλήσεων των χρηστών μέσω της υπηρεσίας φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ (Voice over Internet Protocol – VoIP). Αναλυτικά στοιχεία για τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες βρίσκονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 4.1 Δίκτυο προσομοίωσης WiMAX

Η συχνότητα λειτουργίας του δικτύου είναι στην κατηγορία των 3.5GHz, δηλαδή στις αδειοδοτημένες συχνότητες από την ΕΕΤΤ στην Ελλάδα. Το εύρος ζώνης του καναλιού που διατίθεται είναι 7MHz, με βασική συχνότητα τα 3450,25 MHz. Καθώς το πρότυπο IEEE 802.16 υποστηρίζει πολλαπλές υλοποιήσεις του φυσικού

στρώματος του WiMAX, το προφίλ φυσικού στρώματος που επελέγη είναι το OFDMA 1024 σημείων με εύρος καναλιού 7MHz, όπως προτείνεται και από τα προφίλ συστήματος του WiMAX Forum (Wimax Forum, 2006b). Όπως έχει προαναφερθεί, τα δίκτυα WiMAX υποστηρίζουν την προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding – AMC) κάτι που επιτρέπει τη διαφοροποίηση των ρυθμών μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο και την απόσταση από το Σταθμό Βάσης. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική, καθώς η μελέτη εστιάζεται στην ποιότητα υπηρεσίας που μπορεί να λάβει ο τελικός χρήστης, συναρτήσει της απόστασής του από το Σταθμό Βάσης και τον αριθμό των χρηστών στο δίκτυο. Γι' αυτό και επελέγη το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης 64-QAM 3/4, το οποίο παρέχει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης από τα υποστηριζόμενα από το πρότυπο σχήματα και άρα μπορεί να υποστηρίξει τους περισσότερους χρήστες.

Για την ισχύ εκπομπής του Σταθμού Βάσης και του Σταθμού Συνδρομητή χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που ορίζονται στη διπλωματική (Τερζάκης και άλλοι, 2007). Αναφέρεται ότι σύμφωνα με απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και ταχυδρομείων, η ισοδύναμη ακτινοβολούμενη ισχύς (Equivalent Isotropically Radiated Power – EIRP) μιας κεραίας η οποία λειτουργεί στη συχνότητα 3,5 GHz δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30dBm (1 W). Η έννοια της ισοδύναμη ακτινοβολούμενης ισχύος περιλαμβάνει το άθροισμα της ισχύος εκπομπής και του κέρδους της κεραίας μείον τις διάφορες απώλειες. Έτσι λοιπόν η ισχύς εκπομπής του Σταθμού Βάσης είναι 21dBm (125,89 mW) (Τερζάκης και άλλοι, 2007) και το κέρδος της ομοιοκατευθυντικής κεραίας 9 dBi, καθώς στο OPNET δεν μοντελοποιείται κάποια απώλεια της κεραίας εκπομπής. Αντίστοιχα για το σταθμό συνδρομητή το κέρδος της κεραίας είναι 10dBi και η ισχύς εκπομπής 20dBm (100 mW). Η ευαισθησία του δέκτη δίνεται από το πρότυπο IEEE 802.16-2005 για τα χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος και είναι -69dBm. Το ύψος του Σταθμού Βάσης, σε απόλυτη τιμή, είναι 75m (Τερζάκης και άλλοι, 2007) και περιλαμβάνει το ύψος του κτιρίου και του ιστού της κεραίας. Τέλος το ύψος του Σταθμού Συνδρομητή είναι 10m.

Από τα υλοποιημένα στο OPNET μοντέλα απωλειών διάδοσης, χρησιμοποιείται η επέκταση του εμπειρικού μοντέλου διάδοσης Erceg (Erceg και άλλοι, 1999) που ονομάζεται SUI Model (IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001). Το αρχικό μοντέλο αφορούσε συχνότητες λειτουργίας 1,9GHz σε ημιαστικές περιοχές και γι αυτό το λόγο επεκτάθηκε και σε υψηλότερες συχνότητες και μάλιστα συνιστάται προς χρήση στη συχνότητα 3,5GHz από το WiMAX Forum (WiMAX Forum, 2006a). Έχουν υλοποιηθεί τρία διαφορετικά ημιαστικά περιβάλλοντα τα οποία έχουν ονομαστεί περιβάλλον (terrain) A, B και C με μειούμενες απώλειες. Καθώς η μελέτη μας αφορά ημιαστική περιοχή στην Ελλάδα, χρησιμοποιείται η κατηγορία που παρέχει τις μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης, δηλαδή η κατηγορία περιβάλλοντος A που περιλαμβάνει λοφώδες έδαφος και μεγάλη πυκνότητα δένδρων.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ραδιοεπαφής του δικτύου.

Συχνότητα Λειτουργίας	3,5 GHz (3,4025-3,4725 GHz)
Εύρος Ζώνης Καναλιού	7MHz
Διαμόρφωση	OFDMA 1024 σημείων, διαμόρφωση 64QAM 3/4
Τεχνική Αμφιδρόμησης	TDD
Ισχύς Εκπομπής Σταθμού Βάσης	21dBm (125,89 mW)
Κέρδος Κεραίας Σταθμού Βάσης (Ομοιοκατευθυντική)	9 dBi
Ύψος Σταθμού Βάσης	75 m
Ισχύς Λήψης Σταθμού Συνδρομητή	20dBm (100 mW)
Κέρδος Κεραίας Σταθμού Συνδρομητή (Ομοιοκατευθυντική)	10dBi
Ύψος Σταθμού Συνδρομητή	10 m
Ευαισθησία Δέκτη Σταθμού Συνδρομητή	-69dBm
Μοντέλο Απωλειών Διάδοσης	Erceg Τύπου A

Πίνακας 4-1: Βασικά χαρακτηριστικά προσομοιωμένου δικτύου WiMAX

4.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του εμπειρικού μοντέλου απωλειών διάδοσης είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέγιστης θεωρητικής ακτίνας κάλυψης του δικτύου. Η διαδικασία υπολογισμού της μέγιστης απόστασης κάλυψης του μοντέλου απωλειών διάδοσης SUI model Terrain A (IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001) παρουσιάζεται αναλυτικά στο (Αραújo και άλλοι, 2009).

Οι απώλειες διάδοσης του μοντέλου δίνονται από τη σχέση:

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + Xf + Xh + s, d > d_0 \quad (1)$$

όπου d η απόσταση μεταξύ του Σταθμού Βάσης και του Σταθμού Συνδρομητή Στο συγκεκριμένο εμπειρικό μοντέλο απωλειών διάδοσης χρησιμοποιείται μια απόσταση αναφοράς ($d_0=100m$).

Βάση του υπολογισμού των απωλειών διάδοσης του συγκεκριμένου μοντέλου είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου στην απόσταση αναφοράς d_0 που εκφέρονται με τον όρο

A. Ο δεύτερος όρος της σχέσης (1) εκφράζει την αύξηση των απωλειών λόγω της απόστασης d πομπού και δέκτη, οι οποίες εξαρτώνται από το ύψος του Σταθμού Βάσης και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (terrain) του δικτύου μέσω της παραμέτρου γ (σχέση 5). Ο παράγοντας Xf προσθέτει της απώλειες που εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος (σχέση 3). Τέλος, ο όρος Xh προσθέτει την παράμετρο του ύψους του Σταθμού Συνδρομητή στις απώλειες διάδοσης (σχέση 4), ενώ ο παράγοντας s δίνεται από a χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος λειτουργίας και στην περίπτωση μας είναι 8,2.

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων του μοντέλου υπολογίζονται από:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2)$$

$$Xf = 6 \log \left(\frac{f}{2} \right) \quad (3)$$

$$Xh = \begin{cases} -10.8 \log \left(\frac{h_r}{2} \right), & \text{για περιβάλλοντα A και B} \\ -20 \log \left(\frac{h_r}{2} \right), & \text{για περιβάλλοντα C} \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma = a - b * h_b + \frac{c}{h_b} \quad (5)$$

h_b είναι το ύψος του σταθμού Βάσης σε μέτρα, h_r το ύψος του Σταθμού Συνδρομητή σε μέτρα και f η συχνότητα λειτουργίας σε GHz. Οι τιμές των παραμέτρων a , b , c και s εξαρτώνται από το περιβάλλον και είναι οι ακόλουθες:

Παράμετροι	Περιβάλλον A	Περιβάλλον B	Περιβάλλον C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20
s	8,2	8,2	8,2

Πίνακας 4-2: Τιμές παραμέτρων εμπειρικού μοντέλου διάδοσης SUI

Τελικά, η μέγιστη ακτίνα κάλυψης του δικτύου, ως συνάρτηση των παραμέτρων του πομπού και του δέκτη είναι:

$$d_{max} = d_0 \cdot 10^{\frac{(P_T - L_T + G_T + G_R - L_R) - S_R - (A + Xf + Xh + s)}{10\gamma}} \quad (6)$$

Όπου

P_T : Εκπεμπόμενη Ισχύς (dBm)

L_T : Απώλειες Εκπομπής (dB)

G_T : Κέρδος κεραίας εκπομπής (dBi)

G_R : Κέρδος κεραίας λήψης (dBi)

L_R : Απώλειες Ισχύος (dB)

S_R : Ευαισθησία Δέκτη (dB)

Όλες οι παραπάνω παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της μέγιστης απόστασης κάλυψης του δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Ισχύς Εκπομπής (P_T) (dBm)	21
Κέρδος Κεραίας Εκπομπής (G_t) (dbi)	9
Ύψος Σταθμού Βάσης (h_b)(m)	75
Κέρδος Κεραίας Λήψης (G_r) (dbi)	10
Ύψος Σταθμού Συνδρομητή (h_r) (m)	10
Συχνότητα Λειτουργίας (f) (GHz)	3,45025
Ευαισθησία Δέκτη (S_r) (dBm)	-69
A	83,19878348
Xf	1,420923413
Xh	-7,548876047
γ	4,2055

Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά Μοντέλου Απωλειών Διάδοσης SUI (Περιβάλλον A) για το Δίκτυο

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα εύκολα υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση μεταξύ του Σταθμού Βάσης και Σταθμού Συνδρομητή για το συγκεκριμένο δίκτυο ότι είναι 366,64 μέτρα.

4.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ WiMAX

Όπως έχει προαναφερθεί, η υλοποίηση του φυσικού στρώματος που χρησιμοποιείται είναι αυτή της OFDMA 1024 σημείων, η οποία υποστηρίζεται από το πρότυπο IEEE 802.16-2005. Η βασική ιδέα της διαμόρφωσης αυτής είναι ο διαχωρισμός μια ροής υψηλού ρυθμού σε περισσότερες ροές χαμηλότερου ρυθμού, οι οποίες με τη σειρά τους κατανέμονται σε διάφορα φέροντα κάτι που οδηγεί στην ταυτόχρονη μετάδοση μεγάλου αριθμού δεδομένων και στη μεγαλύτερη ανοχή σε λάθη. Περισσότερα στοιχεία για την τεχνική διαμόρφωσης OFDMA παρουσιάζονται στο αντίστοιχο παράρτημα.

Το εύρος ζώνης που διατίθενται προς χρήση είναι 7MHz και έχει προτυποποιηθεί σε μεγάλο βαθμό από τα προφίλ συστήματος του προτύπου IEEE 802.16 (OFDMA_ProfP3) (IEEE Std 802.16TM-2004) (IEEE Std 802.16eTM-2005). Σε αυτό το εύρος καναλιού η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8MHz και άρα η απόσταση μεταξύ φερόντων είναι 7,8125 KHz. Από αυτή την τιμή υπολογίζεται η χρήσιμη διάρκεια του συμβόλου OFDMA (T_b) (Παράρτημα B, Σχήμα 7.2), που αντιστοιχεί στο χρόνο που είναι διαθέσιμος για την μετάδοση δεδομένων. Καθώς το σύστημα λειτουργεί με αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing – TDD), ορίζονται χρονικά διαστήματα φύλαξης (T_g) μεταξύ των συμβόλων για την

προστασία από την παρεμβολή μεταξύ τους, ως ποσοστό του χρήσιμου χρόνου (1/4, 1/8, 1/16, 1/32). Η επιλογή μας είναι ο χρόνος φύλαξης να αποτελεί το 1/8 του χρόνου, όπως προτείνεται και από τα προφίλ συστήματος του Wimax Forum (WiMAX Forum, 2006b). Το ίδιο έγγραφο συνιστά την χρήση της τιμής των 5msec στη συνολική διάρκεια πλαισίου, όπως και οι τιμές των παραμέτρων «Χρονικό Κενό Μετάδοσης Αποστολής-Λήψης (transmit/ Receive Transition Gap - TTG)» και «Χρονικό Κενό Μετάδοσης Λήψης-Αποστολής (Receive/transmit Transition Gap – RTG)» να υπολογίζονται ως $376 \cdot 4 / F_s$ και $120 \cdot 4 / F_s$ αντίστοιχα. Επιπλέον, λόγω της φύσης των υπηρεσιών που μεταδίδουν κυρίως στην κάτω ζεύξη (προς του χρήστες), διατίθεται στην άνω ζεύξη το ελάχιστο επιτρεπτό ποσοστό συμβόλων, δηλαδή το 25% των συμβόλων, ενώ το υπόλοιπο 75% ανατίθεται στην κάτω ζεύξη. Τέλος, η τεχνική υποδιαυλοποίησης που χρησιμοποιείται στην κάτω ζεύξη είναι η πλήρης χρήση των φερόντων ώστε να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός μετάδοσης, ενώ στην άνω ζεύξη η μερική χρήση των φερόντων που υλοποιείται υποχρεωτικά σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.16. Περισσότερα στοιχεία για την τεχνική διαμόρφωσης βρίσκονται στο Παράρτημα Β. Ο πίνακας που ακολουθεί συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά του πλαισίου φυσικού στρώματος OFDMA.

Διαμόρφωση	OFDMA 1024 σημείων, διαμόρφωση 64 QAM3/4
Εύρος Ζώνης Καναλιού (BW)	7 MHz
Συχνότητα Δειγματοληψίας ($F_s=8/7 \cdot BW$)	8 MHz
Συχνотική Απόσταση Φερόντων ($\Delta_f=F_s/1024$)	7,8125 KHz
Χρήσιμη Διάρκεια Συμβόλου ($T_b=1/\Delta_f$)	128 μ sec
Κυκλικό Πρόθεμα	1/8
Διάρκεια Χρόνου Φύλαξης ($T_g=T_b/8$)	16 μ sec
Συνολική Διάρκεια Συμβόλου ($T_s=T_b+T_g$)	144 μ sec
Διάρκεια Πλαισίου	5 msec
Χρονικό Κενό Μετάδοσης Αποστολής-Λήψης (Transmit/ Receive Transition Gap – TTG = $376 \cdot 4 / F_s$)	188 μ sec
Χρονικό Κενό Μετάδοσης Λήψης-Αποστολής (Receive/transmit Transition Gap – RTG = $120 \cdot 4 / F_s$)	60 μ sec
Μέγεθος Υπο-πλασίου Άνω Ζεύξης	25% των συμβόλων
Υποδιαυλοποίηση Κάτω Ζεύξης	Πλήρης Χρήση φερόντων (DL FUSC)
Υποδιαυλοποίηση Άνω Ζεύξης	Μερική Χρήση φερόντων (UL PUSC)

Πίνακας 4-4: Παράμετροι Πλαισίου Φυσικού Στρώματος OFDMA

4.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το πρόγραμμα προσομοίωσης OPNET χρησιμοποιεί κατηγορίες υπηρεσιών με ονόματα (Gold/Silver/Bronze), όπου ο χρήστης αναθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας τα οποία θα διαθέτουν οι ροές υπηρεσίας (Service Flows) που θα προωθούνται ανάλογα με τον Τύπο Ποιότητας Υπηρεσίας MAC που ανήκουν.

Στη συνέχεια παρατίθενται δυο πίνακες, ο πρώτος από τους παρουσιάζει τις υπηρεσίες που υλοποιούνται, τον τύπο ποιότητας υπηρεσίας του WiMAX MAC που ανήκουν όπως επίσης και κλάση υπηρεσίας του OPNET που αντιστοιχίζεται. Ο δεύτερος πίνακας παρουσιάζει τις υποχρεωτικές παραμέτρους Ποιότητας Υπηρεσίας που ορίζει το πρότυπο IEEE 802.16 για κάθε διαφορετικό τύπο υπηρεσίας, οι οποίες είναι σημαντικές για τον τρόπο χρονοπρογραμματισμού κάθε ροής υπηρεσίας τέτοιου τύπου.

Υπηρεσία	Τύπος Υπηρεσίας	Κλάση Υπηρεσίας OPNET
Φωνή Μέσω Πρωτοκόλλου Ίντερνετ	UGS	Gold
Δεδομένα	BE	Bronze
Βίντεο Κατ' Απαίτηση	rtPS	Silver

Πίνακας 4-5: Αντιστοίχιση Τύπων Υπηρεσιών σε Κλάσεις Υπηρεσιών του OPNET

Κλάση Υπηρεσίας OPNET	Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης (Kbps)	Ελάχιστος Δεσμευμένος Ρυθμός Μετάδοσης (Kbps)	Μέγιστη Διάρκεια Λανθάνουσας Κατάστασης (msec)
Gold	44,8	-	100
Silver	8000	1500	-
Bronze	1024	-	-

Πίνακας 4-6: Παράμετροι Κλάσεων Υπηρεσίας

4.2 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

Για τη διαμόρφωση της προσομοίωσης, υλοποιούνται ποικίλες υπηρεσίες βασισμένες σε διάφορα μοντέλα κίνησης, που αποτελούν πολύ ακριβή αποτύπωση της πραγματικότητας. Οι χρησιμοποιούμενες υπηρεσίες είναι αυτή των δεδομένων, της φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ (VoIP) και του βίντεο κατ' απαίτηση (Video on Demand – VoD), οι οποίες αναλύονται σε επόμενες παραγράφους.

4.2.1 ΠΑΚΕΤΟ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ IP

4.2.1.1 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΒΙΝΤΕΟ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα υλοποιηθεί η υπηρεσία του βίντεο κατ' απαίτηση (Video on Demand – VoD) χρησιμοποιώντας αρχεία ιχνών βίντεο (Video Trace Files). Τα συγκεκριμένα αρχεία δεν περιέχουν την πραγματική πληροφορία του βίντεο αλλά στατιστικές πληροφορίες, όπως ο αριθμός και ο τύπος του πλαισίου (frame), ο αριθμός των bits που απαιτούνται για την κωδικοποίηση κάθε πλαισίου βίντεο καθώς επίσης και κάποια στοιχεία ποιότητας όπως ο δείκτης μεγίστου σήματος προς θόρυβο (**Peak Signal to Noise Ratio - PSNR**) της μέσης ποιότητας των τριών χρωματικών συνιστωσών (Y,U,V) των πλαισίων. Τα συγκεκριμένα αρχεία συγκρινόμενα με τα αρχεία βίντεο από τα οποία προέρχονται, έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν προστατεύονται από δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας (copyright) ούτε απαιτείται κάποιος ειδικός εξοπλισμός για τη χρήση τους.

Στην ιστοσελίδα <http://trace.eas.asu.edu/> του πανεπιστημίου της Αριζόνα, υπάρχουν διαθέσιμα προς χρήση αρκετά αρχεία ιχνών με διάφορες κωδικοποιήσεις. Από την πληθώρα των διαθέσιμων αρχείων, θα χρησιμοποιηθούν οι κωδικοποιήσεις H.264/AVC (Advanced Video Coding) και H.264/SVC (Scalable Video Coding), οι οποίες προσφέρουν την ίδια ποιότητα βίντεο μειώνοντας το μέσο ρυθμό bit (average bit rate) έως και το μισό συγκρινόμενες με τον κωδικοποιητή MPEG-2 και έως 30% συγκρινόμενες με τον κωδικοποιητή MPEG-4 Part 2 (Ostermann και άλλοι, 2004). Βέβαια ως αντιστάθμισμα, οι συγκεκριμένοι κωδικοποιητές παράγουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα κίνησης σε σχέση με το παρελθόν (Ostermann και άλλοι, 2004 και Geert Van der Auwera και άλλοι, 2008a).

4.2.1.1.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ H.264/AVC

Το πρότυπο H.264/MPEG-4 Advanced Video Coding (AVC), που είναι γνωστό και ως H.264/MPEG-4 Part 10, αναπτύχθηκε από την ομάδα Joint Video Team (JVT) και εκδόθηκε για πρώτη φορά το Μάιο του 2003. Έκτοτε, έχουν εκδοθεί αρκετές βελτιώσεις και επεκτάσεις, με σημαντικότερες τις επεκτάσεις εύρους πιστότητας (Fidelity Range Extensions – FRExt) που παρέχουν υψηλότερες ποιότητες βίντεο. Η συγκεκριμένη ομάδα κωδικοποιητών είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη, καθώς

χρησιμοποιείται στην ευρυεκπομπή ψηφιακού βίντεο (Digital Video Broadcasting – DVB) και στο δίσκο Blu-ray (Geert Van der Auwera και άλλοι, 2008a).

Η κωδικοποίηση H.264/AVC διατηρεί τη μορφή των πλαισίων των παλαιότερων κωδικοποιητών της οικογένειας MPEG-4, με τους τρεις τύπους πλαισίων (I, P και B) οι οποίοι οργανώνονται σε σύνολα εικόνων (Group of Pictures – GoP)¹. Στα πλαίσια τύπου I εφαρμόζεται ενδοπλαισιακή κωδικοποίηση (intra-frame coding), όπου κάθε πλαίσιο χωρίζεται σε μπλοκ 8x8 δειγμάτων, από δείγματα Y,U και V συνιστωσών. Το κάθε μπλοκ με χρήση διακριτού μετασχηματισμού συνημιτόνου (Discrete Cosine Transform – DCT) μετατρέπεται στο συχνοτικό του ισοδύναμο, το οποίο αντιπροσωπεύει τα στοιχεία χωρικής συχνότητας του αρχικού μπλοκ. Τέλος το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού κβαντίζεται από ένα 8x8 πίνακα κβάντισης που περιέχει το μέγεθος του βήματος κβαντοποίησης² για κάθε στοιχείο χωριστά. Στα πλαίσια τύπου P εφαρμόζεται διαπλαισιακή κωδικοποίηση (intra-frame coding) με αναφορά το προηγούμενο I ή P πλαίσιο, τα οποία λειτουργούν ως προς τα μπροστά αναφορά (forward reference). Στην περίπτωση αυτή τα πλαίσια P χωρίζονται σε μακρομπλόκ (4 μπλοκ των 8x8 δειγμάτων) και με εκτίμησης κίνησης αναγνωρίζεται το μακρομπλοκ αναφοράς που ταιριάζει καλύτερα στο δοθέν. Στη συνέχεια η διαφορά μεταξύ των δυο μακρομπλόκ είναι αυτή στην οποία εφαρμόζεται ο DCT. Στα πλαίσια τύπου B εφαρμόζεται διαπλαισιακή κωδικοποίηση και προς τις δυο κατευθύνσεις, με διαφορετικό τρόπο από τον συνηθισμένο, δηλαδή με αναφορά στο προηγούμενο και στο επόμενο I ή P πλαίσιο (Seeling και άλλοι, 2004). Στο πρότυπο H.264/AVC η κωδικοποίηση των πλαισίων τύπου B γίνεται με το σχηματισμό δυο λιστών πλαισίων αναφοράς με πλαίσια που προηγούνται ή έπονται του πλαισίου B. Από κάθε μια από τις δυο λίστες επιλέγεται ένα πλαίσιο και μάλιστα τα δυο επιλεγμένα πλαίσια μπορούν να συνδυαστούν με διαφορετικό βάρος για τη δημιουργία του ζητουμένου πλαισίου B (Geert Van der Auwera και άλλοι, 2008b).

Το συγκεκριμένο πρότυπο προδιαγράφει ορισμένα προφίλ, δηλαδή ένα σύνολο εργαλείων κωδικοποίησης για τη δημιουργία ενός ρυθμού bit που κάθε αποκωδικοποιητής που συμμορφώνεται με αυτό το προφίλ πρέπει να υποστηρίζει. Το βασικό προφίλ (baseline profile) προορίζεται για εφαρμογές μικρής καθυστέρησης, πλατφόρμες χαμηλής επεξεργαστικής ισχύος και για περιβάλλοντα όπου εμφανίζεται μεγάλη απώλεια πακέτων. Το κύριο προφίλ (main profile) περιλαμβάνει το σύνολο των εργαλείων για την επίτευξη υψηλής αποδοτικότητας κωδικοποίησης για εφαρμογές υψηλού ρυθμού bit. Το εκτεταμένο προφίλ (extended profile) προορίζεται για εφαρμογές ροής ελαστικές στο λάθος. Η επέκταση FRExt προσθέτει τέσσερα υψηλά προφίλ (High Profiles): το υψηλό (High Profile – HP), το High 10 (Hi10P), το High 4:2:2 (Hi422P) και το High 4:4:4 (Hi444P). Το υψηλό προφίλ περιλαμβάνει βελτιωμένα εργαλεία που μπορεί να οδηγήσουν έως και σε 10% κέρδος κωδικοποίησης σχετικά με το κύριο προφίλ και έως 59% εν συγκρίσει με το MPEG-

¹ Σύνολο Εικόνων (Group Of Pictures - GoP): Είναι η ακολουθία των πλαισίων από ένα πλαίσιο I μέχρι το ακριβώς προηγούμενο πλαίσιο του επομένου πλαισίου I.

² Βήμα κβαντοποίησης: Είναι το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού ενός πίνακα βάσης με μια παράμετρο κβαντοποίησης, η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κωδικοποίησης βίντεο.

2 για βίντεο υψηλής ανάλυσης, με μια οριακή αύξησης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας ως προς το κύριο προφίλ (Geert Van der Auwera και άλλοι, 2008a).

4.2.1.1.2 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ H.264/SVC

Τον Ιούλιο του 2007 προστέθηκε στο πρότυπο H.264/AVC η επέκταση της κλιμακώσιμης κωδικοποίησης βίντεο (Scalable Video Encoding – SVC). Η συγκεκριμένη επέκταση επιτρέπει τη μετάδοση και την αποκωδικοποίηση επιμέρους ροών bit ώστε να παρέχονται υπηρεσίες βίντεο με χαμηλότερες χρονικές ή χωρικές αναλύσεις, η ακόμη και μειωμένη πιστότητα (fidelity) διατηρώντας μια ποιότητα αποκατάστασης (reconstruction) που είναι υψηλή σχετικά με το ρυθμό των μερικών ροών. Ως εκ τούτου, η επέκταση SVC παρέχει λειτουργίες προσαρμογής ρυθμού bit, μορφοποίησης (format) και ισχύος. Γενικά μια ροή βίντεο ονομάζεται κλιμακώσιμη (scalable), όταν τμήματα της ροής μπορούν να αφαιρεθούν έτσι ώστε η εναπομείνουσα υποροή να αποτελεί μια έγκυρη ροή για ένα αποκωδικοποιητή-στόχο και η υποροή έχει ποιότητα αποκατάστασης μικρότερη της αρχικής ροής βίντεο, αλλά υψηλή εξετάζοντας τη χαμηλότερη ποιότητα των δεδομένων που έχουν απομείνει (Schwarz και άλλοι 2007). Η βασική αρχή της κλιμακωσιμότητας (scalability) είναι ότι το βίντεο κωδικοποιείται σε ένα βασικό επίπεδο (base layer) και σε ένα ή περισσότερα επίπεδα ενίσχυσης (enhancement layers). Το βασικό επίπεδο μπορεί να αποκωδικοποιηθεί ανεξάρτητα, καθώς τα πλαίσια του έχουν ως αναφορά πλαίσια του επιπέδου αυτού, ενώ τα επίπεδα ενίσχυσης απαιτούν και την ύπαρξη του βασικού επιπέδου για την αποκωδικοποίηση, καθώς τα πλαίσιά του έχουν ως αναφορά πλαίσια του βασικού επιπέδου. Οι πιο συνήθεις κλιμακώσεις (scalabilities) είναι η χρονική (temporal), όπου κάθε επίπεδο αυξάνει το ρυθμό πλαισίων (frame rate), η χωρική (spatial) όπου τα επίπεδα ενίσχυσης αυξάνουν το μέγεθος των πλαισίων και η κλιμάκωση ποιότητας (quality ή SNR scalability) όπου η ροή παρέχει την ίδια χωροχρονική ανάλυση αλλά κάθε επίπεδο αυξάνει την πιστότητα (fidelity) η οποία συνήθως αναφέρεται ανεπίσημα ως λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio – SNR) Ένας εκ των νεωτερισμών που εισάγει η επέκταση H.264/SVC, είναι η ιεράρχηση των πλαισίων τύπου B, κάτι που επιτρέπει την χρήση των ιδίων ως αναφορά για πρόβλεψη άλλων πλαισίων τύπου B. Έτσι λοιπόν τα πλαίσια τύπου B χρησιμοποιούν ως αναφορά για διαπλασιακή κωδικοποίηση πλαίσια όλων των τύπων (I,P,B) (Seeling και άλλοι 2004).

Η επέκταση SVC του προτύπου H.264/AVC ορίζει τρία νέα προφίλ για το SVC: Scalable Baseline, Scalable High και Scalable High Intra. Το προφίλ Scalable Baseline στοχεύει κυρίως σε εφαρμογές συνομιλίας και παρακολούθησης χώρων που απαιτούν χαμηλή πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης. Το προφίλ Scalable High σχεδιάστηκε για εφαρμογές ευρυεκπομπής (broadcast), συνεχούς ροής (streaming) και εφαρμογές αποθήκευσης. Τα δυο προαναφερθέντα προφίλ υποστηρίζουν χωρίς περιορισμούς την χωρική κλιμακωσιμότητα και την κλιμακωσιμότητα ποιότητας, ενώ η χωρική κλιμάκωση υποστηρίζεται αλλά με ορισμένους περιορισμούς σχετικά με

την ανάλυση στο Scalable Baseline προφίλ. Ακόμη, η ροή bit βασικού επιπέδου των βίντεο που είναι κωδικοποιημένα με αυτά τα προφίλ συμμορφώνονται με το Βασικό (Baseline) και υψηλό (High) προφίλ της κωδικοποίησης H.264/AVC (Schwarz και άλλοι, 2007).

4.2.1.1.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΡΧΕΙΩΝ ΙΧΝΩΝ

Γενικά ένα βίντεο, ανεξαρτήτως κωδικοποιητή, μπορεί να κωδικοποιηθεί με δυο διαφορετικούς τρόπους: α) με σταθερές παραμέτρους κβαντοποίησης³ (Quantization Scales) με αντιστάθμισμα το μεταβλητό ρυθμό bit του βίντεο (bit rate), ή β) με έλεγχο ρυθμού (rate control), ο οποίος προσαρμόζει τις παραμέτρους κωδικοποίησης ώστε να διατηρείται ο ρυθμός bit του βίντεο σταθερός, με αποτέλεσμα όμως τη μεταβλητότητα της ποιότητας του βίντεο (Lakshman και άλλοι, 1998). Για μια δεδομένη ποιότητα βίντεο, ο σχεδόν σταθερός ρυθμός bit μιας κωδικοποίησης ελεγχόμενου ρυθμού είναι γενικά σημαντικά υψηλότερος από το μέσο ρυθμό bit της αντίστοιχης κωδικοποίησης μεταβλητού ρυθμού (Geert Van der Auwera και άλλοι 2008a). Συνεπώς εστιάζουμε την προσοχή μας σε αρχεία ιχνών που προέρχονται από βίντεο μεταβλητού ρυθμού, δηλαδή κωδικοποιημένου με σταθερές παραμέτρους κβαντοποίησης, καθώς τα συγκεκριμένα βίντεο συμβάλλουν στην καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου.

Στην προαναφερθείσα ιστοσελίδα, τα διαθέσιμα αρχεία ιχνών είναι ανάλυσης τόσο CIF (352x288) όσο και υψηλής ανάλυσης (1920x1080 και 1280x720) (High Definition – HD). Απουσιάζουν αρχεία ιχνών στη λεγόμενη κανονική ανάλυση (Standard Definition – SD), δηλαδή 720x576 pixel για τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία και 720x480 για τον υπόλοιπο κόσμο. Η πλειονότητα των διαθέσιμων τηλεοπτικών προγραμμάτων εκπέμπεται στην κανονική ανάλυση, ενώ συνεχώς αυξανόμενος είναι ο αριθμός των τηλεοπτικών προγραμμάτων υψηλής ανάλυσης τόσο στις ΗΠΑ όσο και παγκοσμίως. Συνεπώς η μελέτη μας θα στραφεί σε αρχεία ιχνών που προέρχονται από ροές bit υψηλής ανάλυσης, καθώς με την βελτίωση των δικτυακών υποδομών και την αντικατάσταση των τηλεοπτικών δεκτών είναι αρκετά πιθανό στο άμεσο μέλλον να παρέχονται πολλές τηλεοπτικές υπηρεσίες με εκπομπές αμιγώς υψηλής ανάλυσης. Επιπλέον, τα αρχεία ιχνών του Πανεπιστημίου της Αριζόνα είναι κωδικοποιημένα χρησιμοποιώντας διαφορετικά είδη συνόλου εικόνων (GoP). Το σύνολο εικόνων που επιτυγχάνει καλύτερη απόδοση κωδικοποίησης για την κωδικοποίηση H.264/AVC είναι αυτό με μέγεθος 16 πλαισίων και τρία πλαίσια B μεταξύ των I/P πλαισίων (μορφής IBBBPBBBBPBBBBPBBB), το οποίο υποδηλώνεται ως G16-B3. Για την κωδικοποίηση H.264/SVC το είδος συνόλου εικόνων με την καλύτερη απόδοση

³ Παράμετρος κβαντοποίησης (Quantization Scale): Είναι παράμετροι που σχετίζονται με την κβαντοποίηση των δεδομένων του βίντεο και μάλιστα όσο μικρότερη είναι η τιμή τους τόσο υψηλότερο είναι το μέγεθος και η ποιότητα του βίντεο. Συχνά δίνονται στη μορφή (x,y,z) αναφερόμενες στις παραμέτρους κβαντοποίησης για τα πλαίσια τύπου I,P και B.

κωδικοποίησης και άρα αυτό που χρησιμοποιείται είναι το G16-B15, με 15 πλαίσια B και κανένα P πλαίσιο μεταξύ δυο πλαισίων I (μορφής IBBBBBBBBBBBBBBB) (Geert Van der Auwera και άλλοι, 2008a). Τέλος, η ποιότητα⁴ του βίντεο επιλέγεται πάντα να είναι υψηλή, γι' αυτό και επιλέγονται παράμετροι κβαντοποίησης τέτοιες ώστε η μέση ποιότητα Q να είναι μεγαλύτερη των 40dB.

4.2.1.1.4 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ (Video on Demand)

Για την υπηρεσία Video on Demand, χρησιμοποιείται ένα αρχείο ιχνών από την οικογενειακή ταινία Finding Neverland. Το συγκεκριμένο αρχείο προέρχεται από ένα απόσπασμα μιας ώρας, υψηλής ανάλυσης (1920x1088), με κωδικοποίηση SVC μονού επιπέδου και μέσου ρυθμού bit 4,424 Mbps. Από το αρχείο αυτό χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση μόνο τα πρώτα 10 λεπτά, τα οποία αποδίδουν μέσο ρυθμό bit 4,448Mbps.

Τα χαρακτηριστικά του αρχείου ιχνών που χρησιμοποιείται παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	Finding Neverland
Είδος	Οικογενειακή Ταινία / Δράμα
Κωδικοποίηση	H.264 SVC Single Layer
Προφίλ Κωδικοποίησης	High (Level 5)
Ανάλυση (pixel * pixel)	1920x1088
Ρυθμός Πλαισίου (πλαίσια/sec)	24
Ρυθμός bit (Kbits/sec)	4424,4
Ρυθμός bit 10 πρώτων λεπτών (Kbits/sec)	4448,2
Διάρκεια (Λεπτά)	59
Τύπος Συνόλου Εικόνων (GoP)	G16-B15
Παράμετροι Κβαντοποίησης	(22, -, 24)
Μέση Ποιότητα Πλαισίου (Q) (dB)	45,1

Πίνακας 4-7: Χαρακτηριστικά αρχείου ιχνών της ταινίας Finding Neverland

Το αρχείο ιχνών με τη μορφή που βρίσκεται στην ιστοσελίδα, δεν είναι άμεσα επεξεργάσιμο από το OPNET, καθώς αυτό αναγνωρίζει ως είσοδο αρχεία .csv με πληροφορία το χρόνο μεταξύ της αποστολής δυο διαδοχικών πακέτων αλλά και το μέγεθος των πακέτων. Πληροφορίες για την επεξεργασία του αρχείων ιχνών, ώστε να έλθει στη ζητούμενη μορφή, βρίσκονται στο παράρτημα Α.

⁴ Ποιότητα Βίντεο (Quality – Q): Εκφράζεται ως ο Λόγος Μεγίστου Σήματος προς Θόρυβο (σε dB) της μέσης ποιότητας των τριών χρωματικών συνιστωσών (Y,U,V) των πλαισίων.

Η υπηρεσία του βίντεο κατά απαίτηση υλοποιήθηκε ως υπηρεσία βιντεοδιάσκεψης (Video Conferencing), η οποία είναι μια από τις βασικές υπηρεσίες-εφαρμογές του OPNET. Η συγκεκριμένη υπηρεσία υποστηρίζει επικοινωνία και προς τις δυο κατευθύνσεις, καθώς και τα δυο μέρη αποστέλλουν και λαμβάνουν βίντεο. Στην υλοποίηση του βίντεο κατά απαίτηση εκπέμπεται βίντεο μόνο προς τους χρήστες, οι οποίοι βέβαια έχουν επιλέξει εκ των προτέρων το βίντεο, κάτι που όμως δεν μελετάται στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής. Έτσι λοιπόν για την κίνηση από τους χρήστες προς την πηγή χρησιμοποιούμε μεγάλη χρονική τιμή μεταξύ δυο συνεχόμενων πακέτων και τα πακέτα αυτά έχουν μικρό μέγεθος. Για τον τύπο της υπηρεσίας, χρησιμοποιήθηκε μια πρόταση της Cisco (Cisco Systems, 2006) για το δίκτυο διανομής/συνάθροισης, σύμφωνα με την οποία η τιμή Κωδικού Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (Differentiated Services Code Point- DSCP)⁵ είναι AF42. Στο επίπεδο του WiMAX MAC, η υπηρεσία IPTV αντιστοιχίζεται στη ροή υπηρεσίας real-time Polling Service (rtPS), καθώς ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία του streaming video, που σύμφωνα με τον Bo Li (Bo Li και άλλοι, 2007) αποτελεί τη βασική εφαρμογή της ροής υπηρεσίας.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών αφίξεων πακέτων	Προς τον χρήστη (seconds) scripted («αρχείο με χρονική πληροφορία»)
	Από τον χρήστη (seconds) Σταθερό (10000)
Μέγεθος Πλαισίου (bytes)	Προς το χρήστη (bytes) scripted («αρχείο με μέγεθος πακέτων»)
	Από το χρήστη (bytes) Σταθερό (10)
Πρωτόκολλο Μεταφοράς	UDP

Πίνακας 4-8: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας βίντεο κατ' απαίτηση

4.2.1.2 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΦΩΝΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET – VoIP

Η υπηρεσία της φωνής διαμέσου του πρωτοκόλλου Ίντερνετ (Voice over Internet Protocol) είναι πολύ διαδεδομένη ειδικά διαμέσου υπολογιστών, αλλά τελευταία

⁵ Κωδικός Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (Differentiated Services Code Point- DSCP): Είναι ένα πεδίο 6 bits της επικεφαλίδας του πακέτου IP που χρησιμοποιείται για κατηγοριοποίηση των πακέτων και εκχώρηση προτεραιοτήτων σε αυτά, έτσι ώστε να εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη συμπεριφορά προώθησης ανά κόμβο ανάλογα με τη τιμή του συγκεκριμένου πεδίου.

παρατηρείται και μια αύξηση των ανεξάρτητων συσκευών, οι οποίες μπορούν να εκμεταλλευτούν τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Δηλαδή, είναι η τηλεφωνία μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ μπορεί έως ένα βαθμό να υποκαταστήσει την παραδοσιακή σταθερή ή ακόμη και κινητή τηλεφωνία. Στην προσομοίωση με το πρόγραμμα OPNET, για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του δικτύου, δεν υλοποιείται επικοινωνία από χρήστη σε χρήστη όπως γίνεται στην πραγματικότητα. Αντιθέτως ο ένας «συνομιλητής» είναι χρήστης, που χρησιμοποιεί ένα τηλέφωνο για VoIP, ενώ ο άλλος είναι ένας διακομιστής, κοινός για όλους τους χρήστες.

Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται είναι ο G.729a της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU-T), η πρώτη έκδοση του οποίου προτυποποιήθηκε το 1996. Ο κωδικοποιητής έχει σταθερό ρυθμό bit 8Kbps, ο οποίος προκύπτει από πλαίσια σταθερού μεγέθους 10 bytes διάρκειας 10msec, δηλαδή σε ένα δευτερόλεπτο εκπέμπονται 100 πλαίσια. Ο συγκεκριμένος κωδικοποιητής επελέγη, διότι ενώ διαθέτει ένα πολύ μικρό ρυθμό bit (8Kbps), επιτυγχάνει πολύ χαμηλή καθυστέρηση (10ms) και υψηλό δείκτη MOS⁶ (4,2) συγκρινόμενος με κωδικοποιητές με μεγαλύτερο ρυθμό bit όπως οι G.726 και G.728 (16-40Kbps και 16Kbps αντίστοιχα). Ακόμη, ο κωδικοποιητής G.723.1 που επιτυγχάνει μεγαλύτερη συμπίεση (5,3 και 6,3Kbps), λαμβάνει πολύ χειρότερες τιμές για την καθυστέρηση (30msec) και το δείκτη MOS (3,5-3,98). Συνεπώς ο κωδικοποιητής G.729 επιτυγχάνει πολύ καλή ποιότητα επικοινωνίας με πολύ καλή χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης, ενώ μπορεί να λειτουργήσει ομαλά και σε περιπτώσεις τυχαίων λαθών (Ohtrman, 2005). Για την υπηρεσία VoIP, η Cisco (Cisco Systems, 2006) προτείνει την τιμή DSCP Ταχείας Προώθησης (Expedited Forwarding - EF).

Για τη σηματοδοσία χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Αρχικοποίησης Συνεδρίας (Session Initiation Protocol – SIP), το οποίο είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση, τη μεταβολή και τον τερματισμό μιας συνεδρίας μεταξύ δυο ή περισσότερων χρηστών χρησιμοποιώντας συνήθως το Πρωτόκολλο Μεταφοράς Πραγματικού Χρόνου (Real time Transport Protocol – RTP). Οι διευθύνσεις του πρωτοκόλλου SIP είναι παρόμοιες με τις διευθύνσεις email και έχουν την ιδιότητα της φορητότητας με συνέπεια να επιτρέπουν στον κάτοχό τους να συνδέεται στο λογαριασμό του και να πραγματοποιεί και να λαμβάνει κλήσεις από οποιαδήποτε συμβατή συσκευή. (Ohtrman, 2005). Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου βασίζεται στη λογική πελάτη εξυπηρετητή και τα βασικές οντότητες είναι οι πράκτορες χρήστη (User Agents – UAs) και οι εξυπηρετητές (servers). Οι πράκτορες χρήστη είναι τόσο ο υπολογιστής ή το τηλέφωνο SIP που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της κλήσης, όσο και οι συσκευές στο άλλο άκρο για την απάντηση της κλήσης. Σε ένα πράκτορα

⁶ Δείκτης MOS (Mean Opinion Score): Αποτελεί μια αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας των τηλεφωνικών συνδέσεων. Οι τεχνικές μέτρησης ορίζονται στη σύσταση ITU-T P.800 και βασίζονται σε απόψεις πολλών εθελοντών που ακούν ένα ηχητικό απόσπασμα συνομιλίας και αξιολογούν την ποιότητα μετάδοσης θεωρώντας αρκετές παραμέτρους (απώλειες, θόρυβος, ηχώ, καθυστέρηση κ.α.). Τα αποσπάσματα βαθμολογούνται σε μια κλίμακα από το 1 έως το 5, με το 5 να είναι το άριστο και το 1 το κακό. Η τιμή 4 θεωρείται ως «ποιότητα υπεραστικών κλήσεων».

χρήστη υπάρχουν και οι δυο συνιστώσες, δηλαδή όταν ο πράκτορας κάνει μια αίτηση (όπως η αρχικοποίηση μιας συνεδρίας) λειτουργεί ως Πράκτορας Χρήστη Πελάτη (User Agent Client – UAC), ενώ όταν απαντά στην αίτηση ονομάζεται Πράκτορας Χρήστη Εξυπηρετητή (User Agent Server – UAS). Όσον αφορά στους εξυπηρετητές, αυτοί είναι τριών ειδών: α) ο εξυπηρετητής πληρεξούσιος (Proxy Server), β) Ο εξυπηρετητής «ληξίαρχος» (Registrar Server) και γ) ο εξυπηρετητής προώθησης (Redirect Server). Στην υλοποίηση στο πρόγραμμα OPNET χρησιμοποιούμε τον πληρεξούσιο εξυπηρετητή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την καταχώρηση και προώθηση των αιτήσεων εκ μέρους του πελάτη προς τον εξυπηρετητή που απευθύνεται η αίτηση. Επιπλέον, παρέχει λειτουργίες ελέγχου πρόσβασης δικτύου, ασφάλειας, ελέγχου ταυτότητας χρηστών και εξουσιοδότησης (Chaffin, 2007).

Περισσότερες πληροφορίες για την υπηρεσία στον ακόλουθο πίνακα :

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Μήκος Σιγής (sec)	Εκθετική (0,65)
Μέγεθος Ριπής Φωνής (sec)	Εκθετική (0,352)
Σχήμα Κωδικοποίησης	G.729 A
Πλαίσια ανά πακέτο	1
Πρωτόκολλο Μεταφοράς	UDP
Σηματοδοσία	SIP
Καθυστέρηση Συμπίεσης (sec)	0,002
Καθυστέρηση Αποσυμπίεσης (sec)	0,002

Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά Φωνής με κωδικοποίηση G729a

Η υπηρεσία VoIP χωρίς καταπίεση σιγής, αντιστοιχίζεται στο τύπο υπηρεσίας WiMAX Unsolicited Grant Services (UGS) (Bo Li και άλλοι, 2007).

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης από το δίκτυο, πρέπει να υπολογιστεί και η πλεονάζουσα πληροφορία που εισάγουν οι επικεφαλίδες δικτύου RTP/UDP/IP/WiMAX-MAC. Αρχικά γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης της κωδικοποιημένης φωνής είναι 8Kbps (10bytes/frame *100frames/sec*8bits/byte). Οι επικεφαλίδες που απαρτίζουν μια MAC PDU έχουν μέγεθος 12(RTP)+8(UDP)+20(IP)+6(WiMAX) = 46bytes = 368bits. Κάθε δευτερόλεπτο αποστέλλονται 100 πλαίσια φωνής, ήτοι 36800bps. Συνεπώς, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης της υπηρεσίας VoIP είναι 36800+8000 = 44800bps = 44,8Kbps.

4.2.1.3 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Πέραν των προαναφερθέντων, θα αναπτυχθούν και υπηρεσίες που χρησιμοποιούν συχνά οι χρήστες για μεταφορά δεδομένων. Οι πιο σημαντικές εξ' αυτών είναι η πλοήγηση στο διαδίκτυο (Web Browsing), δηλαδή κίνηση πρωτοκόλλου http, η αποστολή και λήψη Ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) και η ανταλλαγή αρχείων με χρήση του Πρωτοκόλλου Μεταφοράς Αρχείων (File Transfer Protocol – FTP). Όλες οι προαναφερθείσες υπηρεσίες χρησιμοποιούν ως πρωτόκολλο μεταφοράς το Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς (Transport Control Protocol – TCP) και ανήκουν στον τύπο υπηρεσίας Best Effort του WiMAX.

4.2.1.3.1 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΙΣΤΟΥ (HTTP)

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη υπηρεσία για μεταφορά δεδομένων είναι αυτή της πλοήγησης στο διαδίκτυο (Web Browsing), η οποία χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου (HyperText Transfer Protocol – HTTP).

Η μοντελοποίηση της κίνησης του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου γίνεται σε διάφορα επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο είναι αυτό της συνεδρίας (Session level). Το συγκεκριμένο επίπεδο ορίζεται ως η ενεργή συνεδρία ενός χρήστη με ένα φυλλομετρητή (browser) από την άνοιγμα του έως τη λήξη της πλοήγησης. Το συγκεκριμένο επίπεδο αποτελείται από σελίδες οι οποίες θεωρούνται μη επικαλυπτόμενες. Το επόμενο επίπεδο είναι το επίπεδο της σελίδας (Page Level). Η επίσκεψη σε μια ιστοσελίδα, θεωρώντας τη σελίδα ως ένα σύνολο αντικειμένων (αρχεία HTML, εικόνες, βίντεο κλπ), αποτελούν τη σελίδα όπως ορίζεται στο συγκεκριμένο επίπεδο. Τέλος, το χαμηλότερο επίπεδο είναι το επίπεδο του πακέτου (Packet Level) και αναφέρεται στην μεταφορά πακέτων πρωτοκόλλου Ίντερνετ (Reyes-Lecuona και άλλοι, 1999). Η υπηρεσία http περιλαμβάνεται στο OPNET ως μια από τις προκαθορισμένες εφαρμογές του, με συγκεκριμένες παραμέτρους. Οι παράμετροι της υπηρεσίας αυτής αφορούν τα επίπεδα συνεδρίας και σελίδας και συνεπώς με αυτά θα ασχοληθούμε.

Από τις διαθέσιμες παραμέτρους της υπηρεσίας http του OPNET, θα αναφερθούμε στις παραμέτρους που προέρχονται από διάφορα μοντέλα και έχουν ενδιαφέρον. Αρχικά, η παράμετρος Αριθμός Σελίδων ανά Εξυπηρετητή (Pages Per Server) ανήκει στο επίπεδο της συνεδρίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση κάνουμε την υπόθεση ότι κάθε χρήστης έχει μια συνεδρία στη σύνδεση του με το εξυπηρετητή και συνεπώς η συγκεκριμένη παράμετρος μετατρέπεται σε αριθμό σελίδων ανά συνεδρία.

Οι βασικές παράμετροι της υπηρεσίας που εισήχθησαν στο πρόγραμμα OPNET παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Προδιαγραφή Http	Http 1.1
Χρόνος μεταξύ διαδοχικών αιτήσεων (seconds)	Εκθετική (7sec)
Αριθμός αντικειμένων (Αντικείμενα ανά σελίδα)	1/5
Μέγεθος αντικειμένου (bytes)	1000bytes / Ομοιόμορφη (50000 , 100000)
Σελίδες ανά εξυπηρετητή	Εκθετική (10)
Πρωτόκολλο Μεταφοράς	TCP
Τύπος υπηρεσίας	Best Effort (Καλύτερης Προσπάθειας)

Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας πλοήγησης ιστού

4.2.1.3.2 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΡΧΕΙΩΝ (FTP)

Στη συγκεκριμένη κατηγορία κίνησης έχουν γίνει προσπάθειες μοντελοποίησής της αλλά όλες στις αρχές τις δεκαετίας του '90 (Cáceres, 1991), (Danzig, 1991), (Paxson, 1994) λόγω της αυξανόμενης διάδοσης του HTTP. Καμία από αυτές τις προσπάθειες δεν έδωσε πλήρως αναλυτικά δοσμένες παραμέτρους για την μοντελοποίηση της κίνησης, αλλά απλώς παρατίθενται αναλυτικά μερικές παράμετροι, και μερικές άλλες γραφικά.

Κατά τη διάρκεια μιας συνόδου ftp μεταξύ ενός εξυπηρετητή και ενός πελάτη, αποστέλλονται αιτήσεις για κατέβασμα ενός αρχείου (get) από τον εξυπηρετητή ή για ανέβασμα ενός αρχείου (put) στον Εξυπηρετητή. Οι ζητούμενες παράμετροι για τον προσδιορισμό της υπηρεσίας ftp στο OPNET είναι ο χρόνος μεταξύ δυο συνεχόμενων αιτήσεων για την αποστολή ή λήψη ενός αρχείου αλλά και το μέγεθος του αρχείου αυτού. Οι σημαντικότερες παράμετροι της υπηρεσίας παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Συνδυασμός αιτήσεων (Get/Total)	90%
Κατανομή χρόνου μεταξύ διαδοχικών αιτήσεων (seconds)	Εκθετική (100)
Μέγεθος αρχείου προς μεταφορά (bytes)	300000
Πρωτόκολλο Μεταφοράς	TCP
Τύπος Υπηρεσίας	Best Effort (Καλύτερης Προσπάθειας)

Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας μεταφοράς αρχείων

4.2.1.3.3 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΤΑΧΥΔΡΟΜΕΙΟΥ (E-mail)

Οι παράμετροι της υπηρεσίας ηλεκτρονικού ταχυδρομείου που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Κατανομή χρόνου μεταξύ διαδοχικών αποστολών (seconds)	Εκθετική (1000)
Μέγεθος συνόλου αποστολής	1
Κατανομή χρόνου μεταξύ διαδοχικών λήψεων (seconds)	Εκθετική (100)
Μέγεθος συνόλου λήψης	1
Κατανομή μεγέθους αρχείου προς μεταφορά (bytes)	200000
Πρωτόκολλο Μεταφοράς	TCP
Τύπος Υπηρεσίας	Best Effort (Καλύτερης Προσπάθειας)

Πίνακας 4-12: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας ηλεκτρονικού ταχυδρομείου

4.2.1.3.4 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η υπηρεσία βάσης δεδομένων υλοποιήθηκε ως ακολούθως:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Μείγμα Συναλλαγών (Αιτήσεις/Σύνολο Συναλλαγών)	100%
Κατανομή χρόνου μεταξύ διαδοχικών αιτήσεων (seconds)	Εκθετική (12)
Κατανομή μεγέθους αρχείου Αίτησης (bytes)	32678
Πρωτόκολλο Μεταφοράς	TCP
Τύπος Υπηρεσίας	Best Effort (Καλύτερης Προσπάθειας)

Πίνακας 4-13: Χαρακτηριστικά υπηρεσίας Βάσης Δεδομένων

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει μια προσπάθεια εκτίμησης του μέγιστου αριθμού των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει ένας Σταθμός Βάσης WiMAX για κάθε σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης αλλά και για κάθε υπηρεσία. Η θεωρητική αυτή μελέτη βασίζεται σε μια μεθοδολογία προτεινόμενη από τους Τερζάκη και Τσαπάρα στη διπλωματική τους (Τερζάκης και άλλοι, 2007), η οποία τροποποιήθηκε ελάχιστα καθώς οι απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης των υπηρεσιών μετρώνται στο επίπεδο 2.

Αρχικά, καταγράφουμε το μέσο ρυθμό μετάδοσης (bitrate) που απαιτεί κάθε μια υπηρεσία στο επίπεδο 2, και στις δυο ζεύξεις, στον ακόλουθο πίνακα.

ΥΠΗΡΕΣΙΑ	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (Mbps)
Φωνή μέσω Πρωτοκόλλου Ίντερνετ (ανά ζεύξη)	0,0448
Δεδομένα (Κάτω Ζεύξη)	0,474
Δεδομένα (Ανω Ζεύξη)	0,026
Βίντεο Κατ' Απαίτηση (Κάτω Ζεύξη)	4,448

Πίνακας 4-14: Μέσος Ρυθμός Μετάδοσης Υπηρεσιών (Επίπεδο 2)

Η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί υπολογίζει, όπως έχει προαναφερθεί, το μέγιστο θεωρητικό αριθμό υποστηριζόμενων χρηστών. Οι τιμές αυτές κατά πάσα πιθανότητα διαφέρουν από τις πραγματικές- που εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες- αλλά και από αυτές που θα προκύψουν ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης με το πρόγραμμα OPNET.

4.3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Για την πλήρη κατανόηση της μεθοδολογίας είναι αναγκαία η παράθεση ορισμένων εννοιών (Τερζάκης και άλλοι, 2007):

- Ζώνη Διαμόρφωσης:** Το πρότυπο WiMAX υποστηρίζει την τεχνική της προσαρμοζόμενης διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (adaptive modulation and coding), όπου προβλέπεται διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανάλογα με την ισχύ της λήψης. Έτσι λοιπόν, καθώς μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς με την αύξηση της απόστασης, μεταβάλλεται το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης προς ένα πιο εύρωστο σχήμα με μεγαλύτερη ανοχή στα σφάλματα. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί. Αντίστροφα, καθώς αυξάνεται η στάθμη λήψης του σήματος, είναι εφικτή η μετάβαση σε σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης μεγαλύτερης τάξης όπου τα δεδομένα μεταδίδονται σε υψηλότερους ρυθμούς. Από τα παραπάνω, εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι η περιοχή ραδιοκάλυψης χωρίζεται σε ζώνες, αναλόγως του χρησιμοποιούμενου σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.
- Μέγιστο πλήθος συνδρομητών στο Σταθμό Βάσης:** Το μέγιστο πλήθος συνδρομητών που μπορούν να υποστηριχθούν από ένα Σταθμό Βάσης εξαρτάται από το πλήθος των διαθέσιμων προς χρήση διευθύνσεων MAC. Ο αριθμός αυτός αποτελεί κατασκευαστική επιλογή, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται ο αριθμός 128. Συνεπώς, στη μελέτη μας ο μέγιστος αριθμός συνδρομητών εξυπηρετούμενων από ένα σταθμό βάσης ανέρχεται στους 128.
- Ποσοστό πληθυσμιακής κάλυψης μιας ζώνης διαμόρφωσης (Q_i):** Πρόκειται για το εκατοστιαίο ποσοστό του συνολικού πληθυσμού της περιοχής ραδιοκάλυψης που βρίσκεται στη ζώνη διαμόρφωσης i .

- **Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης επιπέδου 2 σε μια συγκεκριμένη ζώνη διαμόρφωσης (R_i):** Η συγκεκριμένη τιμή του ρυθμού μετάδοσης είναι μέγιστη, καθώς για τον υπολογισμό της θεωρούμε ότι δεν υπάρχει άλλη ζώνη διαμόρφωσης, με συνέπεια η ζώνη *i* να μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους του πόρους του δικτύου. Ο υπολογισμός των τιμών αυτών για κάθε ζώνη διαμόρφωσης γίνεται με ένα μαθηματικοποιημένο τρόπο που βασίζεται στις σχέσεις ορισμών μερικών βασικών μεγεθών που αναλύονται στη συνέχεια. (Araújo Marco και άλλοι, 2009).

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα διαμόρφωσης γιατί μεταβάλλεται ο αριθμός των bit που χρησιμοποιείται για κάθε σύμβολο. Έτσι λοιπόν, η διαμόρφωση BPSK περιλαμβάνει 1 bit/σύμβολο, η QPSK 2 bits/σύμβολο, η 16-QAM 4 bits/σύμβολο και η 64-QAM 6bits/σύμβολο. Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός του ρυθμού δειγματοληψίας $F_s = \frac{8}{7} * BW$, όπου BW το εύρος ζώνης σε MHz, που στη δική μας περίπτωση είναι BW=7 MHz.

Στη συνέχεια, διαιρούμε το ρυθμό δειγματοληψίας συχνότητας με την τάξη του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier του OFDMA, δηλαδή 1024 στην περίπτωση μας, οπότε προκύπτει $\Delta F = \frac{F_s}{1024} = 7812.15$. Η χρήσιμη διάρκεια του συμβόλου είναι $T_b = \frac{1}{\Delta F} = 128 \mu sec$ και η συνολική διάρκεια (θεωρώντας και τους χρόνους φύλαξης) $T_s = T_b + \frac{T_b}{8} = 144 \mu sec$

Έχοντας υπολογίσει τα προηγούμενα ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης προκύπτει από τη σχέση:

$$v = \frac{\frac{3}{4} * FFT * (\frac{bit}{\text{συμβολο}})}{T_s} * (\text{ρυθμός κώδικα})$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία (Araújo Marco και άλλοι, 2009) για κάθε ζώνη διαμόρφωσης ξεχωριστά, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (Mbps)
64-QAM 3/4	24
64-QAM 2/3	21,333
64-QAM 1/2	16
16-QAM 3/4	16
16-QAM 1/2	10,6667
QPSK 3/4	8
QPSK 1/2	5,3333
BPSK 1/2	2,667

Πίνακας 4-15: Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης φυσικού στρώματος για κάθε διαμόρφωση για εύρος ζώνης καναλιού 7MHz

Το ενδιαφέρον της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, εστιάζεται στο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης 64-QAM 3/4, το οποίο παρέχει το μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης και συνεπώς μπορεί να υποστηρίξει τους περισσότερους χρήστες.

Όπως έχει προαναφερθεί, στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιούνται πλαίσια διάρκειας 5msec, ενώ η διάρκεια ενός συμβόλου OFDMA είναι 144μsec. Αυτό οδηγεί στην ύπαρξη 34 συμβόλων OFDMA σε ένα πλαίσιο. Η κατανομή των συμβόλων φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Αριθμός Συμβόλων OFDMA/Πλαίσιο	34
Συνολικός Αριθμός Συμβόλων Δεδομένων	26
Αριθμός Συμβόλων Δεδομένων (Κάτω Ζεύξη) (75% Συμβόλων)	19
Αριθμός Συμβόλων Δεδομένων (Άνω Ζεύξη) (25% Συμβόλων)	7

Πίνακας 4-16: Κατανομή Συμβόλων OFDMA στο Πλαίσιο Φυσικού Στρώματος (Πηγή: Eira και άλλοι)

Η παραπάνω κατανομή συμβόλων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στο επίπεδο 2, θα είναι τα 26/34 του ρυθμού μετάδοσης φυσικού στρώματος, καθώς μόνο 26 σύμβολα χρησιμοποιούνται για δεδομένα. Ο συνολικός μέγιστος ρυθμός μετάδοσης επιπέδου 2, αλλά και οι επιμέρους τιμές του σε κάτω και άνω ζεύξη για το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης 64-QAM 3/4 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (Mbps)
Συνολικός Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης Επιπέδου 2 (R_i)	18,36
Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης Επιπέδου 2 (Κάτω Ζεύξη)	13,41
Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης Επιπέδου 2 (Άνω Ζεύξη)	4,95

Πίνακας 4-17: Μέγιστοι Ρυθμοί Μετάδοσης Επιπέδου 2 (64 QAM 3/4)

Συνεπώς ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης επιπέδου 2 για το σχήμα 64QAM-3/4 είναι $R_i=18,36$ Mbps.

- **Συνολικός απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης για κάθε υπηρεσία (W_j):** Οι τιμές προκύπτουν από τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης κάθε υπηρεσίας. Οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται είναι όπως έχει προαναφερθεί, η υπηρεσία φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ (VoIP), ένας συνδυασμός υπηρεσιών δεδομένων και τέλος η υπηρεσία κατ' απαίτηση. Οι τιμές του συνολικού απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης επιπέδου 2 για κάθε υπηρεσία αθροιστικά και στις 2 ζεύξεις, φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΥΠΗΡΕΣΙΑ	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (Mbps)
Φωνή μέσω Πρωτοκόλλου Ίντερνετ	0,0896
Δεδομένα	0,5
Βίντεο Κατ' Απαίτηση	4,448

Πίνακας 4-18: Συνολικός απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης ανά υπηρεσία (επίπεδο 2)

- **Λόγος ανταγωνισμού (Contention Ratio – CR_j):** Ο λόγος $1/CR_j$ δείχνει το μέγιστο αριθμό χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα κανάλι της υπηρεσίας j . Οι υπηρεσίες που μελετούνται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούν λόγο ανταγωνισμού 1:1, έτσι ώστε ο κάθε χρήστης να απολαμβάνει κάθε στιγμή το σύνολο του ρυθμού μετάδοσης.
- **Ποσοστό ατόμων του συνολικού πληθυσμού μιας περιοχής που ζητά την κάθε υπηρεσία (P_j):** Όπως συμβαίνει και με την προηγούμενη παράμετρο, έτσι και αυτή δεν λαμβάνεται ουσιαστικά υπ' όψιν καθώς στη μελέτη μας κάθε χρήστης ζητά όλες τις υπηρεσίες. Δηλαδή η τιμή P_j είναι για όλες τις υπηρεσίες 100%.

4.3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΧΡΗΣΤΩΝ

Όλα τα μεγέθη που ορίστηκα στην προηγούμενη παράγραφο αποτελούν τα δεδομένα για τον υπολογισμό της κατανομής του μέγιστου πλήθους χρηστών ανά ζώνη διαμόρφωσης. Ο υπολογισμός γίνεται με δυο διαφορετικούς τρόπους ανεξάρτητους μεταξύ τους.

Τα μεγέθη προς υπολογισμό είναι:

- **Μέγιστο πλήθος υποψηφίων συνδρομητών της υπηρεσίας j στην περιοχή κάλυψης του σταθμού βάσης (N_j):** $N_j = N * P_j = N$ Ταυτίζεται με το μέγιστο πλήθος συνδρομητών στο Σταθμό Βάσης, καθώς το ποσοστό ζήτησης P_j είναι 100%.
- **Μέγιστο δυνατικά πλήθος εξυπηρετούμενων χρηστών σε κάθε ζώνη διαμόρφωσης (F_{ij}):** Το μέγεθος αυτό εκφράζει τον αριθμό χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει ο Σταθμός Βάσης, θεωρώντας ότι παρέχεται μόνο η υπηρεσία j και μόνο η ζώνη διαμόρφωσης i . Δηλαδή, το μέγεθος F_{ij} εκφράσει το μέγιστο αριθμό χρηστών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν την j -οστή υπηρεσία. Η τιμή του προκύπτει ως το ακέραιο μέρος του λόγου του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης της συγκεκριμένης ζώνης διαμόρφωσης προς τον συνολικό απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης της μελετούμενης υπηρεσίας, πολλαπλασιασμένη με το λόγο ανταγωνισμού της υπηρεσίας. Τελικά η τιμή του F_{ij} προκύπτει ως ο ελάχιστος αριθμός του προηγούμενου αποτελέσματος και του μέγιστου πλήθους συνδρομητών N .

$$F_{ij} = \min \left\{ \left\lfloor \frac{R_i}{W_j} \right\rfloor \cdot CR_j, N \right\}$$

Το παραπάνω μέγεθος είναι αυτό που θα καθορίσει το μέγιστο αριθμό των χρηστών που μπορεί θεωρητικά να υποστηρίξει η διαμόρφωση 64 QAM-3/4 βάσει των μέσων τιμών των απαιτούμενων ρυθμών μετάδοσης των υπηρεσιών. Στην προσομοίωση που θα ακολουθήσει υλοποιούνται δυο διαφορετικά σενάρια, το πρώτο που υλοποιούνται οι υπηρεσίες διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ (VoIP) και δεδομένων και το δεύτερο στο οποίο υλοποιούνται και οι τρεις υπηρεσίες. Περισσότερα στοιχεία για τα σενάρια στην παράγραφο που ακολουθεί.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο θεωρητικός μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο, βασισμένος στις απαιτήσεις των υπηρεσιών και στις δυο ζεύξεις.

ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΧΡΗΣΤΩΝ (F _{ij})
Σενάριο 1 (Δεδομένα –VoIP)	31
Σενάριο 2 (Δεδομένα – VoIP- VoD)	3

Πίνακας 4-19: Μέγιστος θεωρητικός αριθμός χρηστών ανά σενάριο χρήσης (64QAM-3/4)

4.4 ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ

Στην προσομοίωση θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα OPNET MODELER (έκδοση 15.0.A) και συγκεκριμένα την Wireless Suite, η οποία περιέχει την επιπρόσθετη σουίτα του WiMAX. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που μας παρέχει η εφαρμογή, θα αξιολογηθούν με σκοπό την εκτίμηση των δυνατοτήτων και των ορίων της τεχνολογίας του WiMAX για την παροχή ενοποιημένων υπηρεσιών (δεδομένα, φωνή και βίντεο).

4.4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

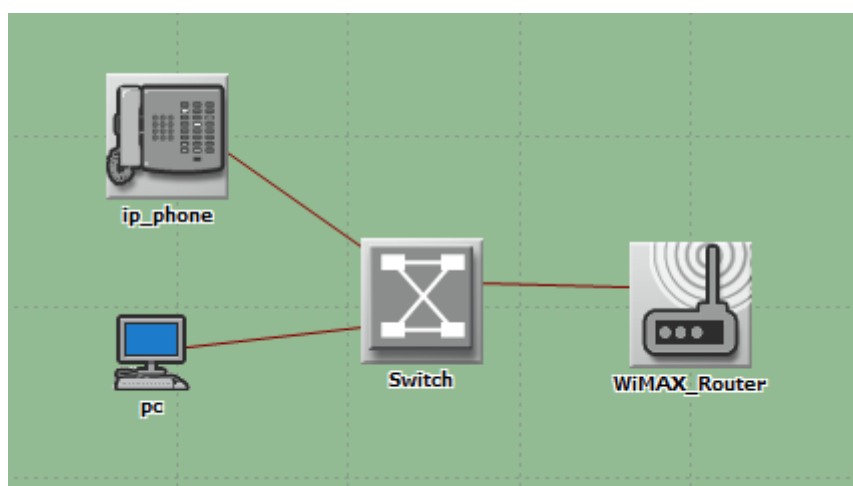
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η προσομοίωση ενός δικτύου WiMAX και η μελέτη του ως προς την ποιότητα υπηρεσίας που μπορεί να λάβει ο τελικός χρήστης, συναρτήσει της απόστασής του από το Σταθμό Βάσης και τον αριθμό των χρηστών στο δίκτυο.

Υλοποιούνται δυο διαφορετικά σενάρια χρήσης υπηρεσιών, ενδεικτικών του προφίλ ενοποιημένων υπηρεσιών. Το πρώτο σενάριο, υποστηρίζει τις διάφορες υπηρεσίες δεδομένων και της φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ (VoIP), ενώ το δεύτερο πέραν των υπηρεσιών του πρώτου υποστηρίζει την υπηρεσία του βίντεο κατ'

απαίτηση (VoD). Σε κάθε περίπτωση η διάρκεια της προσομοίωσης με το πρόγραμμα OPNET είναι 720sec.

4.4.1.1 ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΩΤΟ (ΦΩΝΗ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΙΝΤΕΡΝΕΤ – ΔΕΛΙΟΜΕΝΑ)

Στο πρώτο σενάριο της προσομοίωσης, οι σταθεροί χρήστες ζητούν μόνο τις υπηρεσίες δεδομένων και της φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ (Voice over IP - VoIP). Οι χρήστες τοποθετούνται κυκλικά γύρω από τον Σταθμό Βάσης, διαθέτοντας στο τοπικό τους δίκτυο, πίσω από το δρομολογητή WiMAX, ένα τηλέφωνο για φωνή διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ και έναν προσωπικό υπολογιστή (PC) για την υπηρεσία των δεδομένων. Θεωρούμε ότι όλοι οι χρήστες λαμβάνουν σε ένα σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, το 64-QAM 3/4, δηλαδή αυτό που μπορεί να υποστηρίξει το μεγαλύτερο αριθμό χρηστών.



Σχήμα 4.2 Τοπικό Δίκτυο Χρήστη (Σενάριο 1)

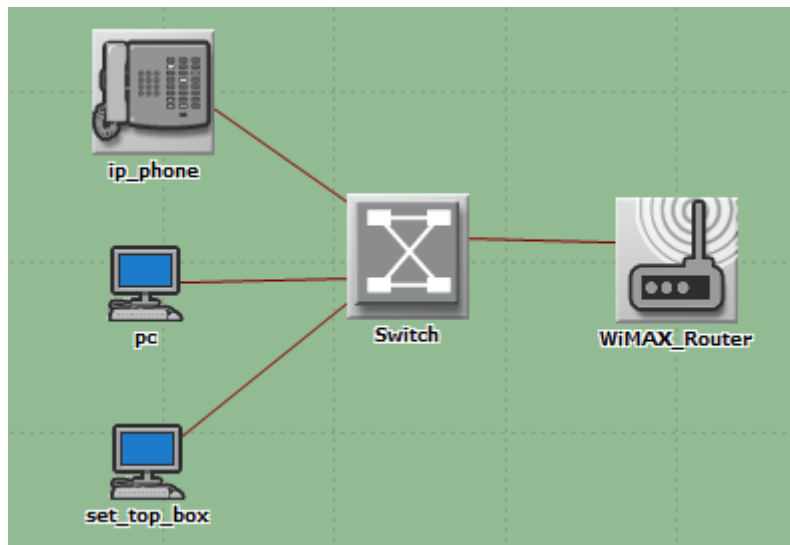
- **Έλεγχος μέγιστης απόστασης κάλυψης με ένα χρήστη:** Το πρώτο βήμα της μελέτης αποτελεί η εύρεση της μέγιστης ακτίνας κάλυψης του δικτύου. Εφόσον οι κεραιές τόσο στο Σταθμό Βάσης όσο και στο Σταθμό Συνδρομητή είναι ομοιοκατευθυντικές, η αναζήτηση της μέγιστης απόστασης μπορεί να επιτευχθεί με ένα μόνο χρήστη. Με άλλα λόγια, λόγω της ομοιοκατευθυντικότητας η υποστήριξη ενός χρήστη σε μια δεδομένη απόσταση εξασφαλίζει και την κάλυψη πολλαπλών χρηστών στην ίδια απόσταση. Έτσι λοιπόν για την ανεύρεση της μέγιστης δυνατής απόστασης κάλυψης, το δίκτυο προσομοιώνεται με ένα Σταθμό Συνδρομητή με δοκιμές σε διάφορες αποστάσεις. Στη συνέχεια πέραν της μέγιστης απόστασης κάλυψης, μετράται και η μέση ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 (throughput) σε διαφορετικές αποστάσεις από το Σταθμό Βάσης.

- **Έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας πολλαπλών χρηστών στη μέγιστη απόσταση:** Εφόσον έχει υπολογιστεί η μέγιστη ακτίνα κάλυψης του δικτύου, σε αυτή την απόσταση μπορούν να υποστηριχθούν πολλαπλοί χρήστες λόγω του ομοιοκατευθυντικού χαρακτήρα των κεραιών του Σταθμού Βάσης και Σταθμού Συνδρομητή. Στην περίπτωση αυτή, εκτελούνται προσομοιώσεις με μειούμενο αριθμό χρηστών, ξεκινώντας από το μέγιστο θεωρητικά υπολογισμένο αριθμό τους. Για την αξιολόγηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας, εξετάζονται οι τιμές των χρόνων απόκρισης για τις υπηρεσίες δεδομένων και της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο και της διακύμανσης της καθυστέρησης για την υπηρεσία φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ (VoIP), όπως ορίζονται στην ενότητα «Μέθοδος Αξιολόγησης». Σκοπός των εκτελούμενων δοκιμών είναι η εύρεση του μέγιστου αριθμού χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν από το δίκτυο με δεδομένη ποιότητα υπηρεσίας.

- **Έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας πολλαπλών χρηστών στη μισή και στο ένα τέταρτο της μέγιστης απόστασης:** Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται ξεχωριστά για απόσταση μισή της μέγιστης αλλά και για απόσταση που αποτελεί το ένα τέταρτο της υπολογισθείσας ακτίνας κάλυψης.

4.4.1.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ (ΦΩΝΗ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΙΝΤΕΡΝΕΤ – ΔΕΛΟΜΕΝΑ- ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ’ ΑΠΑΙΤΗΣΗ)

Στο δεύτερο σενάριο, προστίθενται στους χρήστες και συσκευή-αποκωδικοποιητής (set-top-box) για την λήψη της υπηρεσίας βίντεο κατ’ απαίτηση. Όπως και προηγουμένως, οι χρήστες τοποθετούνται κυκλικά γύρω από το Σταθμό Βάσης, ενώ το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται είναι το 64-QAM 3/4.



Σχήμα 4.3 Τοπικό Δίκτυο Χρήστη (Σενάριο 2)

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή του πρώτου σεναρίου.

- **Έλεγχος μέγιστης απόστασης κάλυψης με ένα χρήστη:** Αρχικά υπολογίζεται μέγιστη ακτίνας κάλυψης του δικτύου, θεωρώντας ένα χρήστη. Παράλληλα με τις προσομοιώσεις στις διάφορες αποστάσεις, καταγράφεται και η μέση ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 του δικτύου WiMAX.
- **Έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας πολλαπλών χρηστών στη μέγιστη απόσταση:** Στη συνέχεια ο μέγιστος αριθμός χρηστών που έχει υπολογισθεί θεωρητικά τοποθετείται κυκλικά περιμετρικά του Σταθμού Βάσης. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, επιπρόσθετα των κοινών με το πρώτο σενάριο στατιστικών που καταγράφονται, αξιολογείται και ο ρυθμός απωλειών πακέτου όπως και η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και η διακύμανση αυτής για την υπηρεσία του βίντεο κατ' απαίτηση. Με δοκιμές με όλο και λιγότερους χρήστες, υπολογίζεται πόσοι χρήστες μπορούν να υποστηριχθούν κατά μέγιστο με τη δεδομένη ποιότητα υπηρεσίας.
- **Έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας πολλαπλών χρηστών στη μισή και στο ένα τέταρτο της μέγιστης απόστασης:** Εκτελείται εκ νέου η διαδικασία για της εν λόγω αποστάσεις.

4.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση με το πρόγραμμα OPNET, χρησιμοποιείται η οδηγία Y.1540 της ITU-T που καθορίζει τις παραμέτρους αξιολόγησης της Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) και η οδηγία Y.1541 της ITU-T που ορίζει διαφορετικές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας βάσει τιμών διαφόρων δικτυακών παραμέτρων μετρούμενων στο επίπεδο 3 του OSI. Αυτές οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΚΛΑΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	IPTD ⁷	IPDV ⁸	IPLR ⁹	IPER ¹⁰	IPRR ¹¹	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
0	100 msec	50 msec	10 ⁻³	10 ⁻⁴	-	Πραγματικού χρόνου, ευαίσθητες στη διακύμανση της καθυστέρησης με υψηλή διαδραστικότητα (VoIP)
1	400 msec	50 msec	10 ⁻³	10 ⁻⁴	-	Πραγματικού χρόνου, ευαίσθητες στη διακύμανση της καθυστέρησης, διαδραστικές υπηρεσίες
2	100 msec	-	10 ⁻³	10 ⁻⁴	-	Συναλλαγές δεδομένων, ιδιαίτερα διαδραστικές (σηματοδοσία)
3	400 msec	-	10 ⁻³	10 ⁻⁴	-	Συναλλαγές δεδομένων, διαδραστικές υπηρεσίες
4	1 sec	-	10 ⁻³	10 ⁻⁴	-	Υπηρεσίες με μικρή ανοχή στις απώλειες (μόνο δεδομένα, ροή βίντεο)
5	-	-	-	-	-	Παραδοσιακές υπηρεσίες δικτύου IP
6	100 msec	50 msec	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	Υπηρεσίες υψηλού ρυθμού, με μεγάλη ευαισθησία σε απώλειες και σφάλματα
7	400	50	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	Υπηρεσίες υψηλού ρυθμού, με μεγάλη

⁷ Καθυστέρηση Μετάδοσης Πακέτου IP (IP Transfer Delay – IPTD): Το χρονικό διάστημα μεταξύ αντίστοιχων εμφανίσεων αναφοράς ενός πακέτου IP. Στην οδηγία Y.1541 η Καθυστέρηση Μετάδοσης ορίζεται ως η μέση τιμή για ένα σύνολο μετρήσεων.

⁸ Διακύμανση της καθυστέρησης Μετάδοσης (IP Packet Delay Transfer Delay Variation): Ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της καθυστέρησης ενός πακέτου και της καθυστέρησης αναφοράς, δηλαδή της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο του πρώτου πακέτου που λαμβάνεται από τον προορισμό.

⁹ Ρυθμός Απωλειών Πακέτου IP (IP Packet Loss Rate - IPLR): Ορίζεται ως ο λόγος των απολεσθέντων πακέτων προς το σύνολο των μεταδιδόμενων πακέτων.

¹⁰ Ρυθμός Λαθών Πακέτου IP (IP Packet Error Rate – IPER): Αποτελεί τον λόγο των λανθασμένων πακέτων προς το σύνολο των πακέτων που ελήφθησαν (σωστά και λανθασμένα)

¹¹ Λόγος Αναδιαταχθέντων (IP Reordered Ratio – IPRR): Αποτελεί των λόγο των πακέτων που ελήφθησαν με διαφορετική σειρά από τη σειρά εκπομπής τους προς το σύνολο των λαμβανομένων πακέτων.

	msec	msec				ευαισθησία σε απώλειες και σφάλματα
--	------	------	--	--	--	-------------------------------------

Πίνακας 4-20 Κλάσεις υπηρεσιών Ποιότητας Υπηρεσίας και στόχοι επίδοσης σύμφωνα με την οδηγία ITU Y.1541

Στην προσομοίωση που εκτελούμε με το πρόγραμμα OPNET, λαμβάνουμε τις τιμές των παραμέτρων δικτύου (καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, διακύμανση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο και ποσοστό απωλειών πακέτου) σε επίπεδο 3 (δικτύου – IP) για τις υπηρεσίες φωνής και βίντεο. Για τις υπηρεσίες δεδομένων, τα αποτελέσματα που συλλέγονται ανήκουν στο επίπεδο εφαρμογής (application layer).

Σύμφωνα με την οδηγία Y.1541 της ITU, η υπηρεσία της **φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ (VoIP)**, ανήκει στην κλάση Ποιότητας Υπηρεσίας 0. Σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη υπηρεσία παίζει η καθυστέρηση, η διακύμανση ης καθυστέρησης από άκρο σε άκρο και οι ρυθμός απωλειών πακέτου. Έτσι σύμφωνα με την οδηγία Y.1541 της ITU, η υπηρεσία VoIP απαιτεί καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο σε άκρο μικρότερη των 100msec, διακύμανση της καθυστέρησης μικρότερη των 50 msec και ρυθμό απωλειών μικρότερων του 10^{-6} . Έτσι λοιπόν, για τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το OPNET, θέλουμε οι μέσες τιμές της καθυστέρησης και της διακύμανσης της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο να βρίσκονται εντός των ορίων.

Για τις υπηρεσίες των **δεδομένων**, όπως έχει προαναφερθεί, οι λαμβανόμενες μετρήσεις γίνονται στο επίπεδο της εφαρμογής. Έχουν γίνει προσπάθειες από την ITU (G.1010, ITU-T, 2001) για τον καθορισμό κατάλληλων παραμέτρων Ποιότητας Εμπειρίας (Quality of Experience – QoE), δηλαδή στην αντίληψη του χρήστη για την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας, για τις υπηρεσίες δεδομένων. Οι παράμετροι αυτές αφορούν την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Τα όρια που χρησιμοποιούνται για τους χρόνους απόκρισης, προτάθηκαν από τον Chen και λοιπούς (Chen A. και άλλοι, 2006) και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (sec)
Υπηρεσία Πλοήγησης Ιστού	2-5
Υπηρεσία Ηλεκτρονικού Ταχυδρομείου	2-5
Υπηρεσία Μεταφοράς Αρχείων	2-5
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων	2-5

Πίνακας 4-21: Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υπηρεσίας για υπηρεσίες δεδομένων

Στις υπηρεσίες δεδομένων λοιπόν, θέλουμε το πολύ των 99% των δειγμάτων των τιμών του χρόνου απόκρισης εφαρμογής που μας δίνει το πρόγραμμα OPNET, να είναι στο εύρος των 2-5sec.

Σχετικά με τις υπηρεσίες **βίντεο**, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει ο ρυθμός απωλειών πακέτων και γι' αυτό η ITU (ITU-T, 2005) έχει καθιερώσει ορισμένες ποιοτικές

κατηγορίες του μεταδιδόμενου βίντεο εξαρτώμενες από την τιμή του ρυθμού απωλειών πακέτου. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Παπαγιάννη, 2009).

ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΑΚΕΤΟΥ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΒΙΝΤΕΟ
$<10^{-5}$	εξαιρετική
$<2 \times 10^{-4}$	ικανοποιητική
$<10^{-2}$	ικανή
$>10^{-2}$	μη διαθέσιμη

Πίνακας 4-22: Ρυθμός απωλειών πακέτου για υπηρεσίες βίντεο

Σύμφωνα με (Παπαγιάννη, 2009) η υπηρεσία του βίντεο κατ' απαίτηση (Video On Demand – VoD) ανήκει στην κλάση 7 της οδηγίας Y.1541 της ITU (Πίνακας 4-20). Έτσι λοιπόν, η υπηρεσία απαιτεί μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (επίπεδο IP) μικρότερη των 400msec και μέση διακύμανση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο μικρότερη των 50msec.

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.5.1 ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΩΤΟ (ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΦΩΝΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΙΝΤΕΡΝΕΤ)

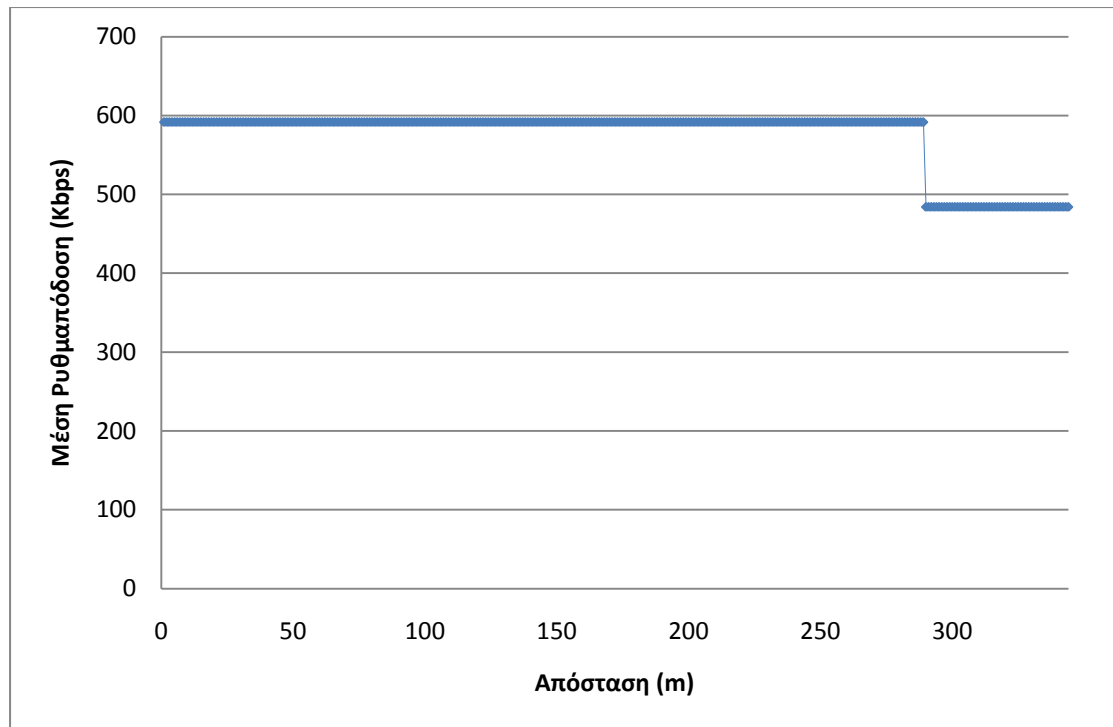
4.5.1.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΕΝΑ ΧΡΗΣΤΗ

Μετά από δοκιμές, η μέγιστη οριζόντια απόσταση κάλυψης ενός χρήστη βρέθηκε ότι είναι 344 μέτρα. Η πραγματική απόσταση μεταξύ Σταθμού Βάσης και Σταθμού Συνδρομητή είναι λίγο μεγαλύτερη καθώς βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη. Τελικά λοιπόν, η μέγιστη απόσταση Σταθμού Βάσης Σταθμού Συνδρομητή που προκύπτει από την προσομοίωση είναι 350,09 μέτρα, η οποία είναι παρόμοια με την θεωρητικά υπολογισμένη τιμή των 366,64 μέτρων.

Μέγιστη Θεωρητική Απόσταση (m)	366,64
Μέγιστη Προσομοιωμένη Ακτίνα (m)	344
Μέγιστη Προσομοιωμένη Απόσταση Πομπού – Δέκτη (m)	350,09

Πίνακας 4-23: Θεωρητική και προσομοιωμένη μέγιστη ακτίνα κάλυψης

Η μέση ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 για τις υπηρεσίες δεδομένων και φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, παραμένει σταθερή μέχρι τα 290m στην τιμή των 591,467Kbps. Από την απόσταση αυτή μέχρι και τη μέγιστη ακτίνα κάλυψης η ρυθμαπόδοση πέφτει στην τιμή των 484,005Kbps.



Σχήμα 4.4 Μέση Ρυθμολόγηση επιπέδου 2 ενός χρήστη ανά απόσταση από το Σταθμό Βάσης (Σενάριο 1)

4.5.1.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (344m)

Στο συγκεκριμένο εδάφιο μελετάται η παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας σε πολλούς χρήστες που βρίσκονται στη μέγιστη ακτίνα κάλυψης. Θεωρητικά έχει υπολογισθεί ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να υποστηριχθεί από το δίκτυο σε 31 χρήστες.

Για διευκόλυνση του αναγνώστη, επαναλαμβάνονται οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης σε άνω και κάτω ζεύξη στο επίπεδο 2, οι οποίοι υπολογίστηκαν προηγουμένως.

	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (Mbps)
Συνολικός Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης Επιπέδου 2	18,36
Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης Επιπέδου 2 (Κάτω Ζεύξη)	13,41
Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης Επιπέδου 2 (Άνω Ζεύξη)	4,95

Πίνακας 4-24: Μέγιστοι Ρυθμοί Μετάδοσης Επιπέδου 2 (64 QAM 3/4)

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για 31 χρήστες σε απόσταση 344m ακολουθούν.

Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	9,6755
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	18,73753
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	55,01678
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	39,01338
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	43,33234
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	33,02883
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	26,33058

Πίνακας 4-25: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων (Σενάριο1- 344m - 31χρήστες)

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, οι χρόνοι απόκρισης των υπηρεσιών δεδομένων απέχουν σε μεγάλο βαθμό από τους αποδεκτούς. Αντίθετα, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και η διακύμανση της καθυστέρησης *ανά ροή* για την υπηρεσία της φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ είναι εντός των ζητούμενων ορίων, όπως φαίνεται στα σχήματα του Παραρτήματος Γ. Ακόμη, δεν υπάρχει κάποια απώλεια δεδομένων για την υπηρεσία VoIP, δηλαδή ο ρυθμός απωλειών πακέτου είναι μηδενικός.

Στη συνέχεια οι χρήστες μειώνονται μέχρι τον αριθμό εκείνο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας.

Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	344 μέτρα
30 χρήστες	8,622
25 χρήστες	7,557
20 χρήστες	6,593
8 χρήστες	3,827

Πίνακας 4-26 Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 πολλαπλών χρηστών 344m (Σενάριο 1)

	Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)
30 χρήστες	15,91286	65,6538	2,954373	35,09341	23,45839	16,9871
25 χρήστες	22,30213	68,1197	3,025268	66,36885	26,86325	26,05148
20 χρήστες	11,48706	54,0451	2,213194	39,26827	12,24641	19,70656
8 χρήστες	1,841459	4,05147	2,069759	3,93587	3,216096	4,383621

Πίνακας 4-27: Χαρακτηριστικά Υπηρεσιών Δεδομένων ανά αριθμό χρηστών 344m (Σενάριο 1)

Στις περιπτώσεις των 30, 25 και 20 χρηστών οι χρόνοι απόκρισης των υπηρεσιών δεδομένων απέχουν σημαντικά από τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας, ενώ αντίθετα η καθυστέρηση και η διακύμανση καθυστέρησης από άκρο σε άκρο *ανά ροή* για την υπηρεσία VoIP βρίσκεται εντός των ορίων.

Το παραπάνω γεγονός οδηγεί στην περαιτέρω μείωση του αριθμού των χρηστών στους 8. Σε αυτή την περίπτωση τόσο τα στατιστικά για τους χρόνους απόκρισης των ασύμμετρων υπηρεσιών δεδομένων ικανοποιούν πλήρως τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας, όσο και οι τιμές της καθυστέρησης και διακύμανσης της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο της υπηρεσίας VoIP για κάθε ροή ξεχωριστά.

Συνεπώς, ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορούν να ικανοποιηθούν στη μέγιστη απόσταση των 344 μέτρων με τις δεδομένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας για τις υπηρεσίες δεδομένων και φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ είναι 8.

4.5.1.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΙΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ (170m) ΚΑΙ ΣΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΑΥΤΗΣ (85m)

Σε αυτό το κομμάτι της μελέτης μελετούμε την ποιότητα υπηρεσίας πολλαπλών χρηστών ευρισκομένων σε απόσταση 170m και 85m περιμετρικά του Σταθμού Βάσης. Όπως και προηγουμένως ξεκινούμε από το θεωρητικά υπολογισμένο μέγιστο αριθμό χρηστών. Παρατίθενται η μέση ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 και οι χρόνοι απόκρισης των υπηρεσιών δεδομένων (99% των δειγμάτων). Στο παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα στατιστικά της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο και της διακύμανσης αυτής *ανά ροή*.

Απόσταση	170 μέτρα	85 μέτρα
Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	13,034	13,034
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	1,69382	1,69382
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	11,29738	11,29738
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	7,180688	7,180688
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	7,370851	7,370851
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	8,439125	8,439125
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	9,070612	9,070612

**Πίνακας 4-28: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 31 χρηστών
(Σενάριο1- 170m – 85m)**

Εύκολα φαίνεται από τους πίνακες ότι η κίνηση σε αυτές της αποστάσεις είναι ακριβώς η ίδια για τους χρήστες, αλλά οι χρόνοι απόκρισης δεν είναι ικανοποιητικοί δεδομένων των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Αντιθέτως η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και η διακύμανση της καθυστέρησης για κάθε χρήστη της υπηρεσία φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ βρίσκονται εντός των ορίων που έχουν τεθεί και για τις 31 ροές. Επιπλέον, δεν παρατηρείται καμία απώλεια πακέτου για την συγκεκριμένη υπηρεσία, καθώς ανήκει στην κλάση υπηρεσίας UGS και συνεπώς διαθέτει προτεραιότητα έναντι της υπηρεσίας δεδομένων.

Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται για 30 χρήστες. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στην επόμενη σελίδα. Παρόμοια, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά μόνο για την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και τη διακύμανση αυτής *ανά ροή*, της υπηρεσίας φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ.

Απόσταση	170 μέτρα	85 μέτρα
Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	13,062	13,062
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	1,583109	1,583109
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	9,719927	9,719927
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	7,365893	7,365893
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	6,53947	6,53947
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	7,914329	7,914329
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	9,326623	9,326623

**Πίνακας 4-29: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 30 χρηστών
(Σενάριο1- 170m – 85m)**

Στη συνέχεια, οι χρήστες περιορίζονται στους 25. Τα στατιστικά των προσομοιώσεων των 25 χρηστών στις αποστάσεις των 85 και 170 μέτρων παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Απόσταση	170 μέτρα	85 μέτρα
Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	12,096	12,096
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	0,70941	0,70941
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	4,604716	4,604716
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	3,795876	3,795876
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	3,290762	3,290762
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	2,643819	2,643819
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	4,721639	4,721639

Πίνακας 4-30: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 25 χρηστών
(Σενάριο1- 170m – 85m)

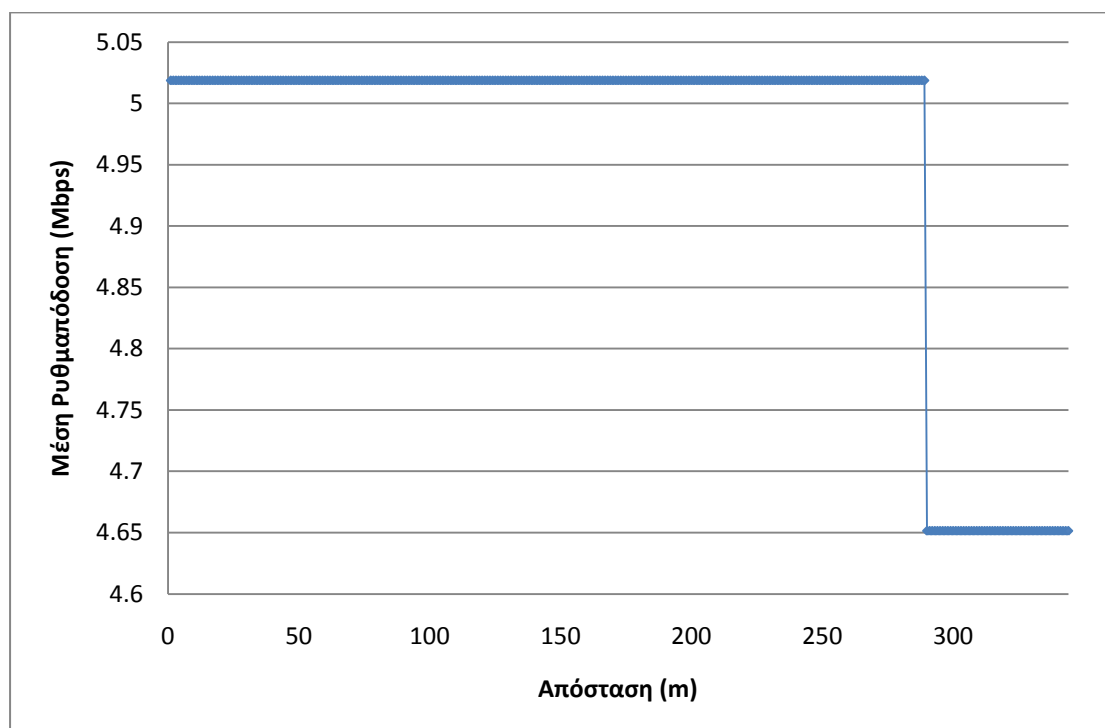
Οι χρόνοι απόκρισης για της υπηρεσίες δεδομένων στην περίπτωση των 25 χρηστών στις αποστάσεις 170 και 85 μέτρων καλύπτουν πλήρως τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας. Παρομοίως, η καθυστέρηση από άκρη σε άκρη και η διακύμανση της καθυστέρησης *ανά ροή* της υπηρεσίας VoIP βρίσκονται εντός των ορίων και οι απώλειες είναι μηδενικές. Συνεπώς, οι 25 χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν ικανοποιητικά από το προσομοιωμένο δίκτυο WiMAX, στην περίπτωση των υπηρεσιών δεδομένων και φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ.

4.5.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ (ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΦΩΝΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET – ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ’ ΑΠΑΙΤΗΣΗ)

4.5.2.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΕΝΑ ΧΡΗΣΤΗ

Η ίδια διαδικασία όπως και στο πρώτο σενάριο επαναλαμβάνεται σε αυτή την περίπτωση. Ένας χρήστης τοποθετείται σε διαφορετικές αποστάσεις με σκοπό την εξακρίβωση της μέγιστης ακτίνας κάλυψης. Παράλληλα καταγράφεται και η μέση

ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 (throughput) ανά απόσταση. Όπως είναι λογικό, η μέγιστη ακτίνα κάλυψης είναι ίδια με προηγούμενως (344m), καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό του δικτύου.



Πίνακας 4-31: Μέση Ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 ενός χρήστη ανά απόσταση από το Σταθμό Βάσης (Σενάριο 2)

Για τις υπηρεσίες της φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ, του βίντεο κατ' απαίτηση και της υπηρεσίας των δεδομένων η μέση ρυθμαπόδοση επιπέδου 2 ενός χρήστη κυμαίνεται στα 5,01874 Mbps για αποστάσεις έως και 290 μέτρα από το Σταθμό Βάσης και από την απόσταση αυτή έως την μέγιστη ακτίνα (344 μέτρα) η μέση ρυθμαπόδοση είναι 4,65141 Mbps.

4.5.2.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (344m)

Οι μέγιστοι χρήστες που μπορεί να ικανοποιήσει το δίκτυο για το δεύτερο σενάριο, που πέραν της φωνής διαμέσου πρωτοκόλλου Ίντερνετ και των δεδομένων παρέχεται και βίντεο κατ' απαίτηση, έχουν υπολογιστεί θεωρητικά ότι είναι 3. Έτσι λοιπόν, οι τρεις χρήστες τοποθετούνται στη μέγιστη απόσταση των 344 μέτρων. Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των 3 χρηστών.

Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	9,984
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	20,29814
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	26,92439
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	4,281806
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	60,8348
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	1,252641
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	17,58612

Πίνακας 4-32: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων (Σενάριο2- 344m - 3χρήστες)

Μέσος Ρυθμός Απωλειών Πακέτου	344 μέτρα
Χρήστης 1	0,100463
Χρήστης 2	0,121257
Χρήστης 3	0,385112

Πίνακας 4-33: Μέσος Ρυθμός Απωλειών πακέτου ανά ροή (Υπηρεσία Βίντεο 3 χρήστες 344m)

Όπως εύκολα παρατηρεί κανείς από τους πίνακες, οι χρόνοι απόκρισης των δεδομένων απέχουν σημαντικά από τα όρια των 2-5 δευτερολέπτων που απαιτούνται, ενώ ο μέσος ρυθμός απωλειών ανήκει στην κατηγορία «μη διαθέσιμη» της ποιότητας βίντεο. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο Παράρτημα Γ, δείχνουν ότι η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και η διακύμανση της καθυστέρησης κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα τόσο για την υπηρεσία φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ όσο και για την υπηρεσία βίντεο κατ' απαίτηση.

Στη συνέχεια, οι χρήστες μειώνονται και επαναλαμβάνονται οι προσομοιώσεις. Οι επόμενοι τρεις πίνακες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για 2 χρήστες και για 1 χρήστη στην απόσταση των 344 μέτρων.

Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	344 μέτρα
2 χρήστες	8,427
1 χρήστης	4,651

Πίνακας 4-34 Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 344m πολλαπλών χρηστών (Σενάριο 2)

	Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)
2 χρήστες	11,71548	25,90729	3,674257	16,58511	1,197997	14,29392
1 χρήστης	1,952923	15,05685	1,208133	20,57257	7,890285	9,522

Πίνακας 4-35: Χαρακτηριστικά Υπηρεσιών Δεδομένων ανά αριθμό χρηστών 344m (Σενάριο 2)

Μέσος Ρυθμός Απωλειών Πακέτου	2 χρήστες	1 χρήστης
Χρήστης 1	0,02503	0,014763
Χρήστης 2	0,140886	-

Πίνακας 4-36: Μέσος Ρυθμός Απωλειών Πακέτου ανά ροή (344m- 2χρήστες - 1 χρήστης)

Οι χρόνοι απόκρισης των δεδομένων απέχουν σημαντικά από το όριο των 2 έως 5 δευτερολέπτων που απαιτείται, ενώ ο μέσος ρυθμός απωλειών πακέτου είναι μη αποδεκτός καθώς ανήκει στην κατηγορία «μη διαθέσιμη» ποιότητας υπηρεσίας. Αντίθετα η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και η διακύμανση της καθυστέρησης για την υπηρεσία της φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ και του βίντεο κατ' απαίτηση είναι εντός των ορίων που έχουν τεθεί.

Συνεπώς στην μέγιστη απόσταση των 344 μέτρων δεν μπορεί να υποστηριχθεί κανένας χρήστης με τη δεδομένη ποιότητα υπηρεσίας, για ταυτόχρονη χρήση των υπηρεσιών δεδομένων, φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ και Βίντεο κατ' απαίτηση.

4.5.2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΜΙΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ (170m) ΚΑΙ ΣΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΑΥΤΗΣ (85m)

Σε αυτό το κομμάτι μελετούμε την υποστήριξη πολλαπλών χρηστών κειμένων σε αποστάσεις που αντιστοιχούν στο μισό της μέγιστης (170 μέτρα) και στο ένα τέταρτο αυτής (85μέτρα). Ως συνήθως η μελέτη ξεκινά με το μέγιστο αριθμό χρηστών που έχει υπολογιστεί θεωρητικά και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 3 χρήστες.

Απόσταση	170 μέτρα	85 μέτρα
Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	11,723	11,723
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	3,888274	3,888274
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	5,196353	5,196353
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	5,391129	5,391129
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	17,50577	17,50577
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	1,397408	1,397408
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	5,428001	5,428001

Πίνακας 4-37: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 3 χρηστών (Σενάριο2-170m – 85m)

Όπως και στο πρώτο σενάριο, δεν υπάρχει καμία διαφοροποίηση στην κάλυψη των χρηστών στις συγκεκριμένες αποστάσεις. Ο ρυθμός μετάδοσης και τα χαρακτηριστικά της ποιότητας υπηρεσίας είναι ακριβώς τα ίδια ανεξάρτητα της απόστασης.

Όσον αφορά στους χρόνους απόκρισης της υπηρεσίας δεδομένων, αυτοί είναι πολύ κοντά στο άνω όριο των 5 δευτερολέπτων εκτός της λήψης ηλεκτρονικού ταχυδρομείου που είναι σημαντικά μεγαλύτερος του ορίου.

Μέσος Ρυθμός Απωλειών Πακέτου	170 μέτρα	85 μέτρα
Χρήστης 1	0,091223	0,091223
Χρήστης 2	0,104212	0,104212
Χρήστης 3	0,103576	0,103576

Πίνακας 4-38: Μέσος Ρυθμός Απωλειών πακέτου ανά ροή (Υπηρεσία Βίντεο- 3 χρήστες 170m-85m)

Ο μέσος ρυθμός απωλειών πακέτου είναι και αυτός με τη σειρά του μη ικανοποιητικός και ανήκει στην κατηγορία ποιότητας βίντεο «μη διαθέσιμη» για όλες τις ροές προς κάθε χρήστη.

Ως συνήθως, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και η διακύμανση της καθυστέρησης για την υπηρεσία της φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ και του βίντεο κατ'ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ποιότητα υπηρεσίας. Επιπλέον, ο ρυθμός απωλειών πακέτου για την υπηρεσία VoIP είναι μηδενικός για όλες τις ροές.

Η μη υποστήριξη τριών χρηστών, οδηγεί στη μείωση του αριθμού τους σε 2 και στην επανάληψη της προσομοίωσης.

Απόσταση	170 μέτρα	85 μέτρα
Μέση Ρυθμαπόδοση Επιπέδου 2 (Mbps)	9,406	9,406
Υπηρεσία Βάσης Δεδομένων Χρόνος απόκρισης αιτήματος (sec)	1,053079	1,053079
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	5,019968	5,019968
Υπηρεσία μεταφοράς αρχείων Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	2,208435	2,208435
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης λήψης (sec)	4,812667	4,812667
Υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – Χρόνος απόκρισης αποστολής (sec)	1,286832	1,286832
Υπηρεσία πλοήγησης ιστού – Χρόνος απόκρισης λήψης σελίδας (sec)	3,944725	3,944725

Πίνακας 4-39: Μέση Ρυθμαπόδοση και Στατιστικά Υπηρεσιών Δεδομένων 2 χρηστών (Σενάριο 2 - 170m – 85m)

Οι χρόνοι απόκρισης όλων των υπηρεσιών δεδομένων ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας, καθώς όλες οι τιμές είναι μικρότερες των 5 δευτερολέπτων εκτός του χρόνου απόκρισης της λήψης της υπηρεσίας μεταφοράς αρχείων που είναι οριακά υψηλότερη.

Μέσος Ρυθμός Απωλειών Πακέτου	170 μέτρα	85 μέτρα
Χρήστης 1	0,010354	0,010354
Χρήστης 2	0,009381	0,009381

Πίνακας 4-40: Μέσος Ρυθμός Απωλειών πακέτου ανά ροή (Υπηρεσία Βίντεο- 2 χρήστες 170m-85m)

Ο μέσος ρυθμός απωλειών πακέτου για κάθε χρήστη ξεχωριστά, ανήκει οριακά στην κατηγορία ποιότητα βίντεο «ικανή» που ορίζει την τιμή του ρυθμού να είναι μικρότερη από 10^{-2} . Ακόμη, η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσίας, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Γ.

Συνεπώς, ο μέγιστος αριθμός χρηστών που το δίκτυο μπορεί να παρέχει ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσίας για τις υπηρεσίες φωνής μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ, δεδομένων και βίντεο κατ' απαίτηση είναι 2.

5 ΑΛΦΑΒΗΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andrews Jeffrey, Arunabha Ghosh και Rias Muhamed (2007), *Fundamentals of WiMAX*, Understanding Broadband Wireless Networking, NJ: Pearson Education
- Araújo Marco, Navarro António, Rocha Armando (2009), *Cellular planning of 802.16e WiMAX networks*, [Internet] < www.av.it.pt/conftele2009/Papers/17.pdf>
- Bashir Hayat, Raheel Mansoor και Abdul Nasir (2006), *802.16 2001 MAC Layer QoS*, Ubiquity, 7 (17) < <http://www.acm.org/ubiquity/>>
- Bo Li, Yang Qin, Chor Ping Low και Choon Lim Gwee (2007), *A Survey on Mobile WiMAX*, IEEE Communications Magazine, 45 (12) σελ. 70-75
- Cáceres Ramón, Danzig Peter B. , Jamin Sugih και Mitzel Danny J. (1991), *Characteristics of Wide-Area TCP/IP Conversations*,
- Chen, A., Yang G. και Wu Z. (2006), *Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem*. J Zhejiang Univ Sci ,A 7(4) σελ. 607–614
- Choi Hyoung-Kee και Limb John O. (1999), *A Behavioral Model of Web Traffic*
- Danzig Peter B., Jamin Sugih (1991), *tcplib: A Library of TCP Internetwork Traffic Characteristics*,
- Eira João Pedro, Rodrigues António, *Analysis of WiMAX data rate performance*, [Internet] < http://www.anacom.pt/streaming/Analysis_WiMAX.pdf?categoryId=260643&contentId=542756&field=ATTACHED_FILE>
- Eklund Carl, Marks Roger, Kenneth L. και Wang Stanley (2002), *IEEE Standard 802.16:A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access*, IEEE Communications Magazine , 40 (6) σελ. 98-107
- Erceg Vinko, Greenstein Larry, Tjandra Sony, Parkoff Seth, Gupta Ajay, Kulic Boris, Julius Arthur και Bianchi Renee (1999), *An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments*, IEEE JSAC, 17(7), σελ. 1205-1222
- Etemad K., (2008), *Overview of mobile WiMAX technology and evolution*, IEEE Communications Magazine, 46 (10) σελ. 31-40
- Fan Wang, Ghosh Amitava, Sankaran Chandy, Fleming Philip J., Hsieh Frank και Benes Stanley J.(2008), *Mobile WiMAX Systems: Performance and Evolution*, IEEE Communications Magazine, 46 (10) σελ 41-49
- Geert Van der Auwera, Prasanth T. David, and Martin Reisslein (2008a), *Traffic Characteristics of H.264/AVC Variable Bit Rate Video*, IEEE Communications Magazine, 46(11) σελ 164-174
- Geert Van der Auwera, Prasanth T. David, and Martin Reisslein (2008b), *Traffic and Quality Characterization of Single-Layer Video Streams Encoded with H.264/AVC*

Advanced Video Coding Standard and Scalable Video Coding Extension, IEEE Transactions on Broadcasting , 54(3), σελ 698-718

IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group (2001), *Channel Models for Fixed Wireless Applications (IEEE 802.16.3c-01/29r4)*, [Internet] <<http://www.ieee802.org/16/>>

IEEE Computer Society και IEEE Microwave Theory and Techniques Society (2004), *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access (IEEE Std 802.16™-2004)*

IEEE Computer Society και IEEE Microwave Theory and Techniques Society (2005), *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 (IEEE Std 802.16e™-2005)*

Intel (2005), *Deploying License-Exempt WiMAX Solutions*, [Internet] <<http://empoweringsoho.files.wordpress.com/2007/07/deployingwimaxlicenseexemptband.pdf>>

ITU-T (2001), G.1010, *Quality of service and performance*

ITU-T (2005), J.241, *Quality of Service ranking and measurement methods for digital video services delivered over broadband IP Networks*, Appendix A.

Kwang-Cheng Chen, J. Roberto B. de Marca (2008), *Mobile WiMAX*, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd

Lakshman T., Ortega A., and Reibman A. (1998), *VBR video: Tradeoffs and potentials*, Proceedings of the IEEE, 86 (5) σελ 952–973,

Marks Roger (2003), *The IEEE 802.16 WirelessMAN Standard for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks*, [Internet], <<http://www.wirelessman.org>>

Marks Roger B., Eklund Carl, Stanwood Ken, Wang Stanley (2002), *The 802.16 WirelessMAN™ MAC: It's Done, but What Is It?*, [Internet], <http://www.wirelessman.org/docs/01/80216-01_58r1.pdf>

Ohrman Frank (2005), *Wimax Handbook Building 802.16 Wireless Networks*, McGraw Hill Communications

Ostermann J., Bormans J., List P., Marpe D., Narroschke M., , Stockhammer T and Wedi T. (2004), *Video Coding with H.264/AVC: Tools, Performance and Complexity*, IEEE Circuits and Systems Magazine, 4(1) σελ 7–28,

Paxson Vern (1994), *Empirically-Derived Analytic Models of Wide-Area TCP Connections: Extended Report*, IEEE/ACM Transactions on Networking, 3(3), σελ. 226-244,

Reyes-Lecuona A., González-Parada E., Casilari E., Casasola J. C. και Díaz-Estrella A. (1999), *A page-oriented WWW traffic model for wireless system simulations*,

Proceedings of the 16th International Teletraffic Congress (ITC'16), June, 1999, σελ. 1271-1280

Schwarz Heiko, Marpe Detlev, και Wiegand Thomas (2007), *Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 17(3) σελ 1103-1120

Seeling Patrick, Reisslein Martin και Kulapala Beshan (2004), *Network Performance Evaluation Using Frame Size and Quality Traces of Single-Layer and Two-Layer Video: A Tutorial*, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 6(2) σελ 58-78

Sekercioglu Ahmet, Ivanovich Milosh και Yegin Alper (2009), *A survey of MAC based QoS implementations for WiMAX networks*, Computer Networks [Internet], 53 (14), σελ 2517-2536 <www.elsevier.com/locate/comnet ή http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VRG-4W9XG9V-1&_user=10&_coverDate=09%2F18%2F2009&_alid=1080050407&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=6234&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=18&_acct=C00050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=3bc1462de73f40c257110ae14982b506 >

Shehan Perera, *VoIP and Best Effort Service enhancement on Fixed Wimax*, Διδακτορική Διατριβή, University of Canterbury, 2008

Staehe D., Leibnitz K. και Tran-Gia P. (2000), *Source Traffic Modeling of Wireless Applications*

Syed Ahson, Ilyas Mohammad (2007), *WiMAX Applications*, Boca Raton, FL: CRC Press

Tran-Gia P, Staehe D. και Leibnitz K. (2001), *Source Traffic Modeling of Wireless Applications*, AEU - International Journal of Electronics and Communications, 55(1), Pages 27-36

WiMAX Forum (2004a), *Business Case Models for Fixed Broadband Wireless Access based on WiMAX Technology and the 802.16 Standard*, [Internet] <http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_the_business_case-rev3.pdf>

WiMAX Forum (2004b), *Regulatory Positions and Goals of the WiMAX Forum* [Internet], <http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_forum_regulatory_whitepaper_v08092004.pdf>

WiMAX Forum (2004c), *WiMAX's technology for LOS and NLOS environments* [Internet], <<http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf> >

Wimax Forum (2005), *Can WiMAX Address Your Applications?*, [Internet], <http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/can_wimax_address_your_applications_final.pdf>

WiMAX Forum (2006a), *Mobile WiMAX-Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*, [Internet] <http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/mobile_wimax_part1_overview_and_performance.pdf >

WiMAX Forum (2006b), *WiMAX Forum™ Mobile System Profile Release 1.0 Approved Specification (Revision 1.2.2: 2006-11-17)*, [Internet] <<http://www.scribd.com/doc/6673881/WiMAX-Forum-Mobile-System-Profile-v1-2-2>>

WiMAX Forum (2009), *WiMAX Forum™ Mobile System Profile Specification Release 1.5 Common Part WMF-T23-001-R015v01* [Internet] <http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/07/WMF-T23-001-R015v01_MSP-Common-Part.pdf>

Yarali Abdulrahman, Rahman Saifur, Mbula Bwanga (2008), *WiMAX: The Innovative Broadband Wireless Access Technology*, Journal of Communications, 3 (2), σελ 53-63

Βασδάρης Θωμάς, Τσελίκης Παναγιώτης, *Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα WiMAX*, Διπλωματική εργασία ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2006

Βενιέρης Ιάκωβος (2007), *Δίκτυα Ευρείας Ζώνης*, 2^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

Κανάτας Α., Κωνσταντίνου Φ., Γ. Πάντος (2008), *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*, Αθήνα: Α.Παπασωτηρίου και ΣΙΑ Ο.Ε.

Παπαγιάννη Χρυσούλα, *Αποδοτικοί αλγόριθμοι σχεδίασης δικτύων επικοινωνιών με έμφαση στην ποιότητα υπηρεσίας*, Διδακτορική Διατριβή ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Μάιος 2009

Στεφάνου Κωνσταντίνος, *Σχεδίαση και Προσομοίωση Συστήματος WiMAX*, Διπλωματική εργασία ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Ιούλιος 2006

Τερζάκης Ιωάννης, Τσαπάρας Δημήτριος, *Σχεδίαση ασύρματων δικτύων WiMAX για πρόσβαση και διασύνδεση. Μελέτη ποιότητας (QoS) & ανάλυση υποστηριζόμενων υπηρεσιών δικτύου - Case Study: Πιλοτικά Συστήματα WiMAX Ο.Τ.Ε.*, Διπλωματική εργασία ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Απρίλιος 2007

6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΩΝ ΙΧΝΩΝ

Τα αρχεία ιχνών της ιστοσελίδας <http://trace.eas.asu.edu> είναι διαθέσιμα σε μορφή αρχείου κειμένου με πληροφορίες όπως ο αύξων αριθμός του πλαισίου, ο χρόνος προβολής (display time), ο τύπος του πλαισίου, το μέγεθός του κ.ά. Από το σύνολο των πληροφοριών, αυτές που μας ενδιαφέρουν είναι ο αθροιστικός χρόνος προβολής του πλαισίου και το μέγεθος πλαισίου, καθώς αυτές τις πληροφορίες ζητά ως είσοδο το πρόγραμμα OPNET για την προσομοίωση των υπηρεσιών Τηλεόρασης μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ και του βίντεο κατά απαίτηση.

Όπως έχει προαναφερθεί, ένα πλαίσιο MPEG τύπου B απαιτεί για την αποκωδικοποίησή του την ύπαρξη ενός πλαισίου I και ενός P, εκ των οποίων το ένα προηγείται και το άλλο έπεται του πλαισίου B. Η τυπική ακολουθία πλαισίων, δηλαδή αυτή που χρησιμοποιείται για την προβολή στην οθόνη, είναι η λεγόμενη ακολουθία προβολής¹² (display sequence). Ο κωδικοποιητής όμως αποστέλλει τα πλαίσια με τη λεγόμενη ακολουθία κωδικοποιητή¹³ (codec sequence). Στη περίπτωση μας όπου μελετάμε τη λειτουργία των δικτύων προτιμάται η χρήση της ακολουθίας προβολής, καθώς τα σύνολα των εικόνων μεταδίδονται σειριακά (Παπαγιάννη, 2009). Έτσι λοιπόν η πληροφορία του αρχείου ιχνών σχετικά με τον χρόνο προβολής κάθε πλαισίου είναι και αυτή που χρησιμοποιούμε ως χρονική αναφορά.

Το μέγεθος των πλαισίων του βίντεο, όπως έχει προαναφερθεί, έχει μεταβλητό μέγεθος με συνέπεια να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ορισμένα πλαίσια να έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το Μέγιστο Μέγεθος Τμήματος¹⁴ (Maximum Segment Size – MSS) του δικτύου. Για να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός πλαισίων (frame rate) του βίντεο (24 ή 30 πλαίσια/δευτερόλεπτο) πρέπει το πλαίσιο να καταταμηθεί σε πολλαπλά τμήματα, τα οποία θα αποσταλούν μέσα στην περίοδο του πλαισίου (frame period). Για τη μετάδοση των πλαισίων διαμέσου δικτύων IP, πρέπει αυτά να μετατραπούν σε πακέτα IP χρησιμοποιώντας επικεφαλίδες RTP/UDP/IP/WiMAX-MAC. Τα προηγούμενα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται τόσο στην υπηρεσία IPTV όσο και στην VoD. Για την προσομοίωση πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για το επιπλέον φορτίο που ορίζει η επικεφαλίδα RTP (12 bytes) καθώς το πρόγραμμα OPNET δεν υλοποιεί το συγκεκριμένο πρωτόκολλο για τις υπηρεσίες αυτές, ενώ διαχειρίζεται μόνο του τις επικεφαλίδες MAC (επίπεδο 2), IP (επίπεδο 3) και UDP (επίπεδο 4). Στο πρωτόκολλο WiMAX δεν είναι καθορισμένη πλήρως η τιμή του Μεγίστου Τμήματος Μεταφοράς (Maximum Transfer Unit – MTU)¹⁵, αλλά η συνιστώμενη τιμή της MTU για τα πακέτα IPv4 είναι 1500 bytes (Katz, 2009 σελ 25). Η τιμή αυτή ταυτίζεται και

¹² Ακολουθία Προβολής (display sequence): Είναι η τυπική ακολουθία πλαισίων της οικογένειας MPEG, η οποία για το σύνολο εικόνων G12-B3 είναι IBBBBPBBBBBB

¹³ Ακολουθία Κωδικοποιητή (codec sequence): Είναι η ακολουθία των πλαισίων όπως αυτά εξέρχονται του κωδικοποιητή, δηλαδή για το σύνολο εικόνων G12-B3 είναι IPBBBBPBBBBBB

¹⁴ Μέγιστο Μέγεθος Τμήματος (Maximum Segment Size – MSS): Είναι το μέγιστο ποσό δεδομένων σε byte, που μια τηλεπικοινωνιακή συσκευή μπορεί να χειριστεί σε ένα κομμάτι, χωρίς θραύσματα.

¹⁵ Μεγίστου Τμήματος Μεταφοράς (Maximum Transfer Unit – MTU): Η MTU ενός επιπέδου (layer) ενός πρωτοκόλλου είναι το μέγεθος σε Bytes της μεγαλύτερης Μονάδας Δεδομένων Πρωτοκόλλου (protocol data unit – PDU) που ένα επίπεδο προωθεί.

με την αντίστοιχη για το πρωτόκολλο Ethernet με συνέπεια να μην απαιτείται επιπλέον κατακερματισμός σε συσκευές που συνδέονται ενσύρματα σε ένα Σταθμό Συνδρομητή WiMAX. Το μέγεθος της επικεφαλίδας IPv4 είναι 20 bytes και της επικεφαλίδας UDP 8 bytes, συνεπώς το πρόγραμμα θα δημιουργεί πακέτα μεγέθους το πολύ 1472 bytes έτσι ώστε τοποθετώντας το OPNET τις επικεφαλίδες να επιτυγχάνεται ο ζητούμενος αριθμός των 1500 bytes. Έτσι λοιπόν, υπολογίζοντας και την επικεφαλίδα RTP που προσθέτουμε επιπλέον, ένα πακέτο μπορεί να χωρέσει κατά μέγιστο 1460 bytes δεδομένων. Εάν το δοθέν από το αρχείο ιχνών πλαίσιο είναι μεγαλύτερο των 1460 bytes, τότε αυτό κατακερματίζεται σε ένα ή περισσότερα τμήματα των 1472 bytes (1500bytes όταν κυκλοφορήσει στο δίκτυο) και σε ένα τμήμα μικρότερο των 1472 bytes.

Όσον αφορά στο χρόνο αποστολής κάθε πλαισίου, αυτός είναι ο χρόνος προβολής όπως δίνεται από το αρχείο ιχνών εκτός εάν το πακέτο κατακερματίζεται. Στην τελευταία περίπτωση τα θραύσματα του πλαισίου ισοκατανέμονται χρονικά μέσα στην περίοδο του πλαισίου (Seeling και άλλοι, 2007). Όμως η σχετική παράμετρος του OPNET ζητά τον ενδιάμεσο χρόνο μεταξύ της αποστολής δυο πακέτων, με συνέπεια ο χρόνος αυτός να είναι η περίοδος του πλαισίου (33,3/41,67 msec για 30/24 πλαίσια/sec) εκτός της περίπτωσης του κατακερματισμού όπου η τιμή του ενδιάμεσου χρόνου υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε ανωτέρω.

Όσα περιγράφηκαν παραπάνω, υλοποιήθηκαν σε ένα script γραμμένο στη γλώσσα BASH (Bourne-Again SHell), που είναι ένας πυρήνας για το λειτουργικό σύστημα Linux. Το εν λόγω script, με ένα σύντομο σχολιασμό στα βασικά του σημεία, ακολουθεί:

```
#!/bin/bash
#
#Script για την επεξεργασία ενός αρχείου ιχνών, το οποίο δημιουργεί
#δυο αρχεία csv που είναι επεξεργάσιμα από το OPNET. Το πρώτο
#αρχείο έχει το μέγεθος κάθε πακέτου και το δεύτερο τον ενδιάμεσο
#χρόνο μεταξύ της αποστολής δυο συνεχόμενων πακέτων.

# Συνάρτηση Χρήσης
usage()
{
echo "usage: $0 options
This script processes a video trace file and produces valid csv
script files for use in OPNET simulator
OPTIONS:
    -h          Show this message
```

```

    -f      File to process
    -y      Delete existing temporary of output files "

}
DELETE=0
mss=1460
header=12
payload=${mss+header}
frame_count=0 #Αριθμός των πλαισίων
fragment_num=1 #Αριθμός των «θραυσμάτων» κάθε πλαισίου

# Έλεγχος παραμέτρων προγράμματος
while getopts "hyf:" OPTION
do
    case $OPTION in
        h)      usage
                exit 1
                ;;
        y)      DELETE=1
                ;;
        f)
                FILE=$OPTARG
                ;;
        ?)
                usage
                exit 1
                ;;
    esac
done

if [ -z $FILE ]
then
    usage
    exit 1
fi

```



```

# Έλεγχος ύπαρξης αρχείων εξόδου
if [ -f $FILE.time_sorted ] || [ -f $FILE.split_fs ] || [ -f
$FILE.split_ft ];
then
    if [ $DELETE -eq "1" ];
    then
        rm -f $FILE.time_sorted $FILE.split_fs $FILE.split_ft
    else
        echo "Temporary or output files exists. Exiting..."
        exit 1
    fi
fi

# Ταξινόμηση πλαισίων ως προς το χρόνο προβολής (display time)
echo "Sorting File $FILE"
cat $FILE | grep ^[0-9] | sort -g > $FILE.time_sorted

# Υπολογισμός περιόδου πλαισίου
exec 6<&0
exec < $FILE.time_sorted
read line1
read line2
exec 0<&6 6<&-

temp1=`echo $line1 | awk '{print $2}'`
temp2=`echo $line2 | awk '{print $2}'`
frame_period=$(echo "scale=6; $temp2-$temp1"|bc)

check=$(echo "scale=6; $frame_period > 1"|bc)
if [ "$check" = 1 ] ; then

# Ο χρόνος δίνεται σε msec
        frame_rate=$(echo "scale=1;
1000.0/$frame_period"| bc)
        echo "Frame Rate = $frame_rate frames/sec and Frame
Period = $frame_period msec"; echo

```

```

        frame_period=$(echo "scale=6;
$frame_period/1000.0"| bc)

        # Ο χρόνος δίνεται σε sec
        else    frame_rate=$(echo "scale=1;
1.0/$frame_period"| bc)
        echo "Frame Rate = $frame_rate frames/sec and Frame
Period = "$(echo "scale=6; 1000.0*$frame_period"|bc)" msec"; echo
        fi

# Επεξεργασία του ταξινομημένου αρχείου γραμμή προς γραμμή
echo "Splitting Frames..."
echo
while read line
do
echo -n "$frame_count#"

# Ανάγνωση του χρόνου, του μεγέθους και του αύξοντα αριθμού του
πλαισίου
time=`echo $line | awk '{print $2}'`
frame=`echo $line | awk '{print $4}'`
num=`echo $line | awk '{print $1}'`

# Βρόχος για το διαχωρισμό πλαισίων μεγαλύτερων των 1460
    while [ $frame -gt $mss ];
    do
        # Μετρητής «φραγμάτων»
        fragment_num=${$fragment_num+1}
        # Μέγεθος υπόλοιπου πλαισίου
        frame=${$frame-$mss}
    done

if [ $fragment_num -gt 1 ]; then # Το πλαίσιο έχει κατακερματιστεί

    # Χρόνος μεταξύ δυο «θραυσμάτων»
    fragment_time=$(echo "scale=6; $frame_period/$fragment_num" |
bc)

```

```

let "full_fragments=$fragment_num - 1"
# Θραύσματα που είναι ολόκληρα
for b in `seq 1 $full_fragments`;
do
    echo $payload >> $FILE.split_fs.csv
    echo $fragment_time >> $FILE.split_ft.csv

done

# Τελικό θραύσμα < 1472 bytes
frame=${frame + header}
echo $frame >> $FILE.split_fs.csv
echo $fragment_time >> $FILE.split_ft.csv

else # Το πλαίσιο δεν κατακερματίζεται
    frame=${frame + header}
    echo $frame >> $FILE.split_fs.csv
    echo $frame_period >> $FILE.split_ft.csv

fi

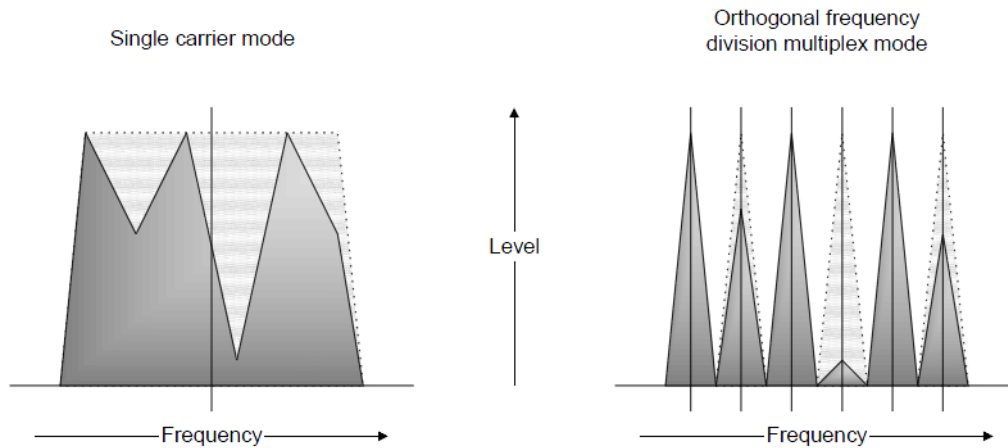
frame_count=`expr $frame_count + 1`
fragment_num=1
done < $FILE.time_sorted
echo
echo "Cleanup"
rm -f $FILE.time_sorted
echo "Total Frames Processed: $frame_count"
echo "Scripted Frame Size file: $FILE.split_fs.csv"
echo "Scripted Frame Time file: $FILE.split_ft.csv"
echo "Done"

```

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΜΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA)

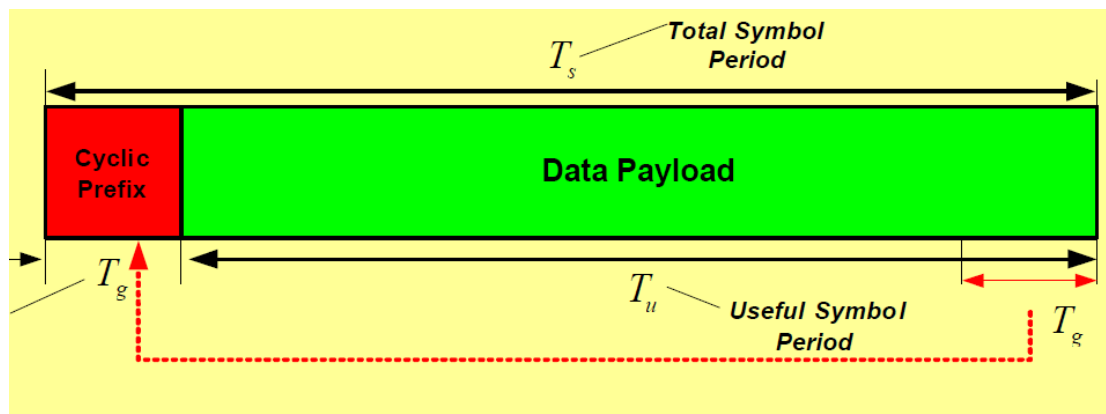
Η τεχνολογία της πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας είναι ένας τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων μετάδοσης που εισάγει η μη οπτική επαφή (Non Line Of Sight- NLOS). Ανήκει στην οικογένεια των σχημάτων μετάδοσης που ονομάζεται διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων, η οποία βασίζεται στην ιδέα του διαχωρισμού μιας ροής δεδομένων υψηλού ρυθμού σε πολλαπλές παράλληλες ροές χαμηλότερου ρυθμού όπου κάθε μια από αυτές κωδικοποιείται από διαφορετικά φέροντα. Τα πολλαπλά φέροντα εξαλείφουν ή ελαχιστοποιούν τη διασυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference – ISI)¹⁶, καθιστώντας τη διάρκεια συμβόλου αρκετά μεγάλη ώστε οι καθυστερήσεις που εισάγει το κανάλι να αποτελούν ένα ασήμαντο κομμάτι της. Μεγάλη διάρκεια συμβόλου, δηλαδή διεύρυνση στο πεδίο του χρόνου, οδηγεί σε σύμπτυξη του φάσματος στο πεδίο της συχνότητας, δηλαδή, στην εκπομπή ενός σήματος στενής ζώνης, τόσο στενής ώστε η συμπεριφορά του καναλιού δεν προλαβαίνει να αλλάξει. Με αυτή τη νέα θεώρηση εκπομπής σημάτων στενής ζώνης, το διαθέσιμο φάσμα μπορεί να χωριστεί σε πολλά υπο-κανάλια στα οποία αντιστοιχεί διαφορετική φέρουσα συχνότητα και τα οποία μεταφέρουν ταυτόχρονα ξεχωριστά σήματα πληροφορίας. Στην ουσία δηλαδή, είναι μια τεχνική πολυπλεξίας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως διαμόρφωση καθώς όλα τα διαθέσιμα φέροντα μπορεί να αποδίδονται σε έναν και μόνο χρήστη. Στο WiMAX η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται τόσο ως διαμόρφωση (Πολυπλεξία με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) αλλά και ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA). Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες μοιράζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και σε διαφορετικά φέροντα της OFDM. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει σημαντικά την ευελιξία στη διαχείριση των ραδιοπόρων του συστήματος, αλλά ως αντιστάθμισμα προσθέτει επιπλέον τηλεπικοινωνιακό φόρτο καθώς τόσο ο Σταθμός Βάσης περιέχει πληροφορίες για τους διαύλους της κάτω ζεύξης, όσο και ο Κινητός Σταθμός πρέπει να γνωρίζει ποια φέροντα του έχουν αποδοθεί. Καθώς τα δεδομένα αυτά πρέπει να ανανεώνονται συχνά υπό πραγματικές συνθήκες, είναι εύλογο ότι δημιουργείται μια σημαντική ποσότητα πληροφορίας προς μετάδοση.

¹⁶ Διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference – ISI): Είναι το φαινόμενο της παραμόρφωσης του σήματος που ένα σύμβολο παρεμβάλλει με επόμενα σύμβολα. Δηλαδή, τα προηγούμενα σύμβολα λειτουργούν ως θόρυβος με συνέπεια να κάνουν την επικοινωνία λιγότερο αξιόπιστη.



Σχήμα 7.1 Λαμβανόμενα από το δέκτη σήματα σε περιπτώσεις μονού φέροντος και OFDM (Πηγή: WiMAX Forum, 2004c)

Η τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) αποτελεί ουσιαστικά ένα συνδυασμό των τεχνικών Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (TDMA) και Διαίρεσης Συχνότητας (FDMA), καθώς σε κάθε χρήστη ανατίθενται διαφορετικά φέροντα αλλά και διαφορετικές χρονοσχισμές. Ο τρόπος που παράγονται τα OFDM σήματα εξασφαλίζουν ότι τα εκχωρούμενα φέροντα είναι μεταξύ τους ορθογώνια, με συνέπεια να μην υπάρχει η ανάγκη μη επικάλυψης των φερόντων ώστε να αποφευχθεί η διασυμβολική παρεμβολή. Προς την κατεύθυνση της εξάλειψης της διασυμβολικής παρεμβολής, κινείται και η εισαγωγή ενός κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix – CP) πριν το ωφέλιμο φορτίο του πλαισίου OFDM. Το κυκλικό πρόθεμα συνήθως είναι μια επανάληψη των τελευταίων δειγμάτων των δεδομένων του πλαισίου, το οποίο τοποθετείται στην αρχή του όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Όμως ένα μειονέκτημα του κυκλικού προθέματος είναι ότι εισάγει πλεονάζουσα πληροφορία (overhead), που μειώνει την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης.



Σχήμα 7.2 Δομή πλαισίου OFDM με την εισαγωγή του κυκλικού προθέματος (Πηγή: WiMAX Forum, 2006a)

Το OFDM αξιοποιεί το διαφορισμό συχνότητας του καναλιού κωδικοποιώντας και αναδιατάσσοντας (interleave) τα δεδομένα στα φέροντα πριν την εκπομπή τους. Για την παραγωγή των πλαισίων OFDM χρησιμοποιείται ο αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Φουριέ (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT), ο οποίος μπορεί να χειρισθεί μεγάλο αριθμό φερόντων (256, 512, 1024 ή 2048) με μικρή πολυπλοκότητα. Όπως έχει προαναφερθεί, σε ένα σύστημα OFDM, οι πόροι διατίθενται μέσω των συμβόλων OFDM στο επίπεδο του χρόνου, ενώ στο επίπεδο της συχνότητας μοιράζονται μεταξύ των φερόντων. Οι προαναφερθέντες πόροι στο επίπεδο του χρόνου και της συχνότητας, μπορούν να οργανωθούν σε υποκανάλια που ανατίθενται σε διάφορους χρήστες.

7.1 ΥΠΟΔΙΑΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Στα συστήματα WiMAX που υλοποιούν την τεχνολογία OFDM, το κάθε φέρον αντιστοιχεί σε ένα στοιχειώδη δίαυλο επικοινωνίας. Το σύνολο των διαθέσιμων φερόντων μπορούν να εκχωρηθούν εξολοκλήρου σε μια ζεύξη ή να διαμοιράζονται μεταξύ πολλών ζεύξεων, περίπτωση που ονομάζεται υποδιαυλοποίηση. Στην περίπτωση της υποδιαυλοποίησης, που είναι και η πιο συνήθης, το εύρος ζώνης και η ταχύτητα μετάδοσης της ζεύξης εξαρτάται από τον αριθμό των εκχωρημένων στη ζεύξη φερόντων. Επιπλέον, καθώς η υποδιαυλοποίηση συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ισχύ σε λιγότερα φέροντα, επιτρέπει την αύξηση του κέρδους του συστήματος φτάνοντάς το στα όριά του, με συνέπεια να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας του εξοπλισμού του χρήστη (Customer Premise Equipment – CPE). Η υποδιαυλοποίηση επεκτείνεται και στην πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDMA), καθώς επιτρέπει την πιο ευέλικτη χρήση των πόρων του δικτύου που μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες κινητών χρηστών.

Ένα σύμβολο OFDMA αποτελείται από τρεις τύπους φερόντων, τα φέροντα δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων, τα φέροντα πιλότοι που χρησιμοποιούνται για λόγους συγχρονισμού και τα κενά φέροντα που δεν μεταφέρουν κάτι αλλά χρησιμοποιούνται ως ζώνες προστασίας. Στην έκδοση IEEE 802.16-2005 ένα υπό-κανάλι είναι ένα σύνολο από ενεργά φέροντα (δεδομένων και πιλότοι), η διάταξη και ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον τρόπο αντιμετάθεσης των φερόντων (subcarrier permutation mode). Τα φέροντα μπορεί να είναι είτε συνεχόμενα όπου το υπο-κανάλι αντιστοιχεί σε μια ενιαία ζώνη συχνοτήτων είτε κατανεμημένα με ψευδοτυχαίο τρόπο σε όλο το εύρος ζώνης του συστήματος. Στην τελευταία περίπτωση επιτυγχάνεται καλύτερη διαχείριση των ραδιοπόρων του συστήματος αλλά και προστασία του σήματος από παρεμβολές στενού εύρους ζώνης.

Στο πρότυπο IEEE 802.16-2004 υποστηρίζονται 200 ενεργά από τα 256 φέροντα και η υποδιαυλοποίηση επιτυγχάνεται στην άνω ζεύξη υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Σε κάθε Σταθμό Συνδρομητή εκχωρούνται 1,2,4,8 ή 16 από τα διαθέσιμα 16 υποκανάλια, με συνέπεια να επιτυγχάνεται η χρησιμοποίηση μόνο ενός τμήματος του εκχωρηθέντος στον Σταθμό Συνδρομητή φάσματος.

Στο πρότυπο IEEE 802.16-2005 η υποδιαυλοποίηση υποστηρίζεται τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, και όπως έχει προαναφερθεί τα υποκανάλια είναι αυτά που αποτελούν την ελάχιστη μονάδα συχνότητας που ανατίθεται από τον Σταθμό Βάσης. Έτσι λοιπόν, ανατίθενται σε κάθε χρήστη διαφορετικά υπό-κανάλια και επιτυγχάνεται πολλαπλή πρόσβαση καθώς διαμοιράζονται τα φέροντα του συστήματος σε περισσότερους χρήστες.

Τα υπο-κανάλια μπορούν να σχηματιστούν είτε από συνεχόμενα είτε από ψευδοτυχαία κατανεμημένα, σε όλο το φάσμα, φέροντα. Τα σχήματα υποδιαυλοποίησης με ψευδοτυχαία κατανομή των φερόντων είναι τα εξής:

- **Πλήρης χρήση των φερόντων στην κάτω ζεύξη (DL Full Usage of Sub-Carriers – DL FUSC):** Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται όλα τα φέροντα για τη δημιουργία υπο-καναλιών, ανεξαρτήτως της θέσης τους στο συνολικό εύρος ζώνης.
- **Μερική χρήση των φερόντων στην κάτω ζεύξη (DL Partial Usage of Sub-Carriers – DL PUSC):** τα φέροντα, αρχικά, χωρίζονται σε συστάδες (clusters) τα οποία σχηματίζουν 6 ομάδες (groups). Εν συνεχεία γίνεται αντιμετάθεση ανεξάρτητα σε κάθε ομάδα, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα υπο-κανάλι.
- **Μερική χρήση των φερόντων στην άνω ζεύξη (UL Partial Usage of Sub-Carriers – ULPUSC):** Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα φέροντα χωρίζονται σε τμήματα (tiles) και τα οποία δημιουργούν 6 ομάδες (groups). Στη συνέχεια 6 τμήματα μιας ομάδας σχηματίζουν ένα υπό-κανάλι. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι μερικής χρήσης των φερόντων είναι υποχρεωτικές στις υλοποιήσεις του IEEE 802.16e.
- **Συνεχόμενη χρήση των φερόντων στην κάτω ζεύξη (DL Tile Usage of SubCarriers – TUSC):** Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι παρόμοια με τη μέθοδο της μερικής χρήσης φερόντων στην άνω ζεύξη, με σκοπό την εξάλειψη της ανάγκης ανάδραση της κατάστασης του διαύλου, καθώς εκμεταλλεύεται την αμοιβαιότητα και τη συμμετρία του διαύλου.

Σε όλες τις υλοποιήσεις, IEEE 802.16e οι προαναφερθείσες μέθοδοι μερικής χρήσης των φερόντων είναι υποχρεωτικές ενώ οι αντίστοιχες πλήρους χρήσης προαιρετικές. Για κανάλι WiMAX εύρους ζώνης 5MHz με μερική χρήση των φερόντων, ορίζονται 15 και 17 υπο-κανάλια για τη κάτω και την άνω ζεύξη αντίστοιχα. Στην περίπτωση του καναλιού εύρους ζώνης 10 MHz, ο αντίστοιχος αριθμός των υπο-καναλιών είναι 30 και 35 (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 600-602) (WiMAX Forum, 2004c) (WiMAX Forum, 2006a).

7.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ODFMA

Η ευθύνη της κατανομής των πόρων του δικτύου στους χρήστες βρίσκεται στο φυσικό στρώμα του WiMAX. Η βασική μονάδα χρόνου και το στοιχειώδες εύρος συχνότητας, δηλαδή οι θεμελιώδεις μονάδες δικτυακών πόρων, ονομάζονται **σχισμές (slots)**. Μια σχισμή αποτελεί ένα OFDMA υπο-κανάλι σε ένα, δύο ή τρία διαδοχικά OFDM σύμβολα. Μια σειρά από συνεχόμενες σχισμές, που έχουν εκχωρηθεί σε ένα χρήστη ονομάζεται **πεδίο δεδομένων του χρήστη (user's data region)**. Η κατανομή των πεδίων δεδομένων στους διάφορους χρήστες γίνεται από τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού. Έτσι λοιπόν, μέσω της διαχείρισης των πόρων, ανατίθενται τα πεδία δεδομένων στους χρήστες ανάλογα με τις συνθήκες του διαύλου και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών σε ποιότητα υπηρεσίας και ρυθμό μετάδοσης.

Ο αλγόριθμος προγραμματισμού δεν έχει καθοριστεί πλήρως από το πρότυπο, αλλά η υλοποίησή του είναι ελεύθερη στους κατασκευαστές. Συνεπώς, υπάρχουν διαθέσιμες πολλές προσεγγίσεις σχεδιασμού του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, με σκοπό την ικανοποίηση των αιτημάτων των χρηστών με την καλύτερη δυνατή επίδοση του δικτύου.

Ορισμένοι βασικοί τύποι αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού ακολουθούν (Κανάτας και άλλοι, 2008, σελ 602-604):

- **Αλγόριθμος Μέγιστου Συνολικού Ρυθμού (Maximum Sum Rate – MSR):** Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, με μόνο περιορισμό τη συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ. Το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι είναι αρκετά πιθανό όλοι οι ραδιοπόροι να καταναλώνονται από χρήστες που βρίσκονται κοντά στο Σταθμό Βάσης και να μην αποδίδονται ραδιοπόροι σε χρήστες που βρίσκονται μακρύτερα ή σε δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης.
- **Αλγόριθμος Μέγιστης Αμεροληψίας (Maximum Fairness – MF):** Στόχος του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι η δίκαια κατανομή των ραδιοπόρων μεταξύ των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύει στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνει ο χρήστης που διαθέτει το χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Ουσιαστικά ενδιαφερόμαστε για τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης τιμής, έχουμε δηλαδή ένα max-min πρόβλημα. Το μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι η απόδοση ολόκληρου του συστήματος εξαρτάται από το χρήστη με τη χαμηλότερη τιμή του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise plus Interference Ratio – SNIR). Επειδή η βέλτιστη λύση είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί, συνήθως χρησιμοποιούμε υποβέλτιστες (sub-optimal) προσεγγιστικές λύσεις.
- **Αλγόριθμος Περιορισμού των Κατ' Αναλογία Ρυθμών (Proportional Rate Constraints – PRC):** Αποτελεί γενίκευση του προηγούμενου αλγορίθμου και στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, με την προϋπόθεση ότι ο τελικός ρυθμός μετάδοσης του χρήστη είναι ανάλογος μιας προκαθορισμένης σταθερής τιμής. Έτσι λοιπόν, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος υπολογίζει τις απαιτήσεις

των χρηστών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των υπηρεσιών τους. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να καθοριστούν κάποιοι συντελεστές σπουδαιότητας, αναλόγως των απαιτήσεων υπηρεσιών τους. Όπως και προηγουμένως, ο αλγόριθμος υλοποιείται με μειωμένη πολυπλοκότητα μέσω προσεγγιστικών λύσεων.

- **Αλγόριθμος Αναλογικής Αμεροληψίας (Proportional Fairness – PF):** Συγκρινόμενους με τους προαναφερθέντες αλγορίθμους, που αποσκοπούν στην άμεση επίτευξη της κατανομής των ραδιοπόρων, ο αλγόριθμος Αναλογικής Αμεροληψίας στοχεύει στην κατανομή των ραδιοπόρων με τρόπο τέτοιο που να διασφαλίζεται η βελτιστοποίηση της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου.

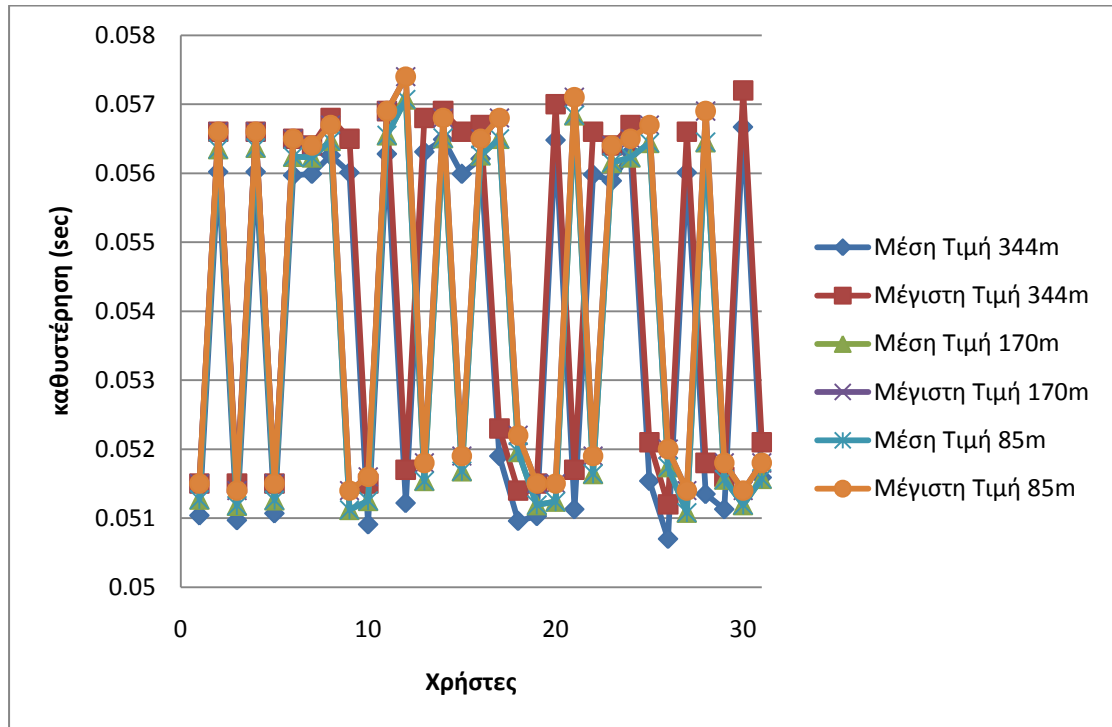
Αλγόριθμος	Συνολική Χωρητικότητα	Αμερόληπτη Κατανομή Πόρων	Ευελιξία	Πολυπλοκότητα
Μέγιστου Συνολικού Ρυθμού (MSR)	++	-	--	+
Μέγιστης Αμεροληψίας (MF)	-	++	--	-
Περιορισμού των Κατ' Αναλογία Ρυθμών (PRC)	+	+	++	-
Αναλογικής Αμεροληψίας (PF)	+	+	+	+

Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για συστήματα OFDMA

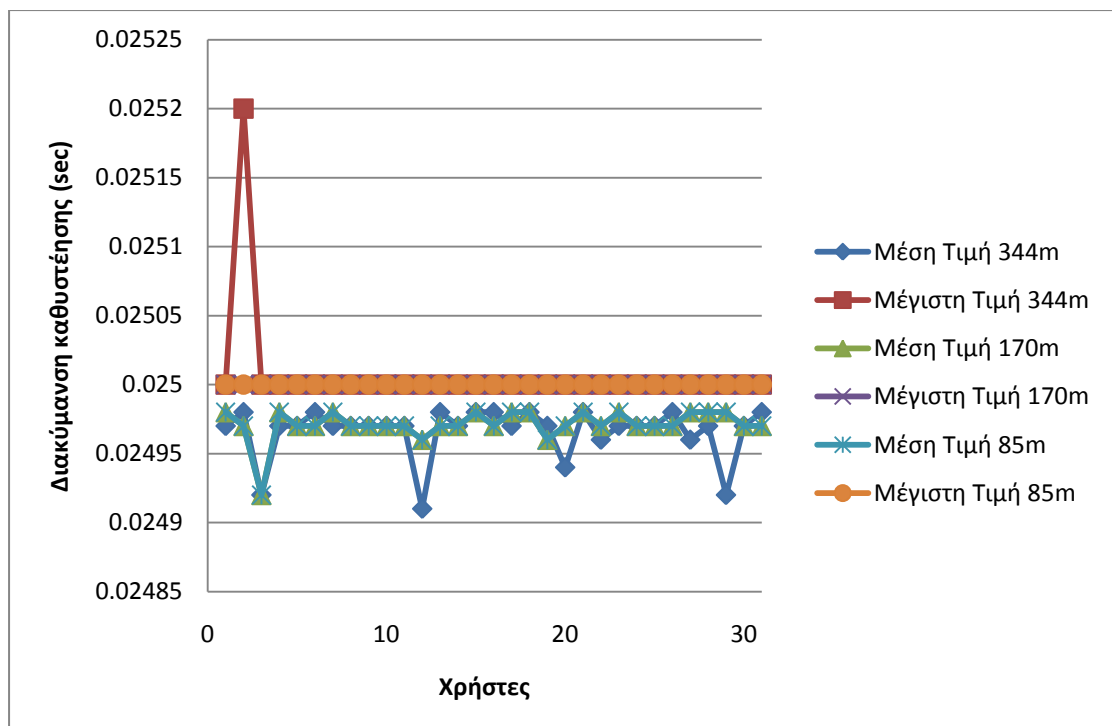
Ο παραπάνω πίνακας συνοψίζει με εποπτικό τρόπο τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προαναφερθέντων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού. Από αυτόν φαίνεται ότι ο αλγόριθμος Μέγιστου Συνολικού Ρυθμού (MSR) επιτυγχάνει τη μέγιστη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, υστερώντας όμως σημαντικά στα υπόλοιπα στοιχεία. Αντίθετα ο αλγόριθμος Περιορισμού των Κατ' Αναλογία Ρυθμών μοιάζει να είναι ο συνολικά αποδοτικότερος, με μόνο μειονέκτημα την πολυπλοκότητα υλοποίησής του.

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑ ΧΡΗΣΤΗ

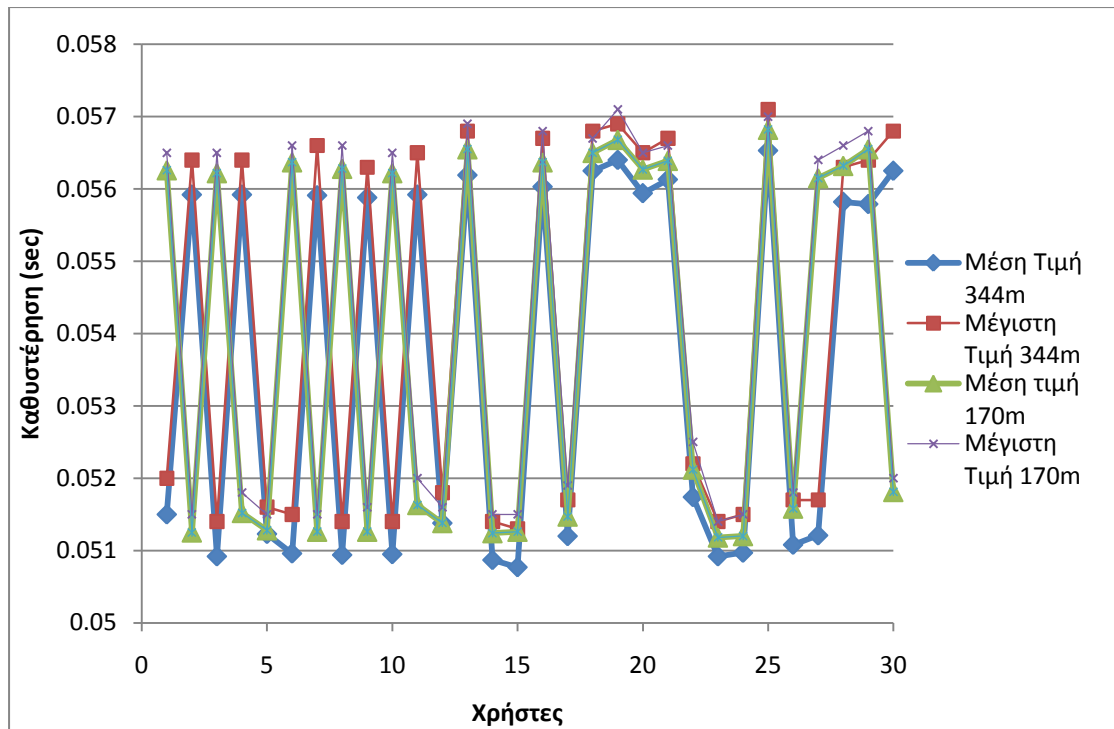
8.1 ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΩΤΟ



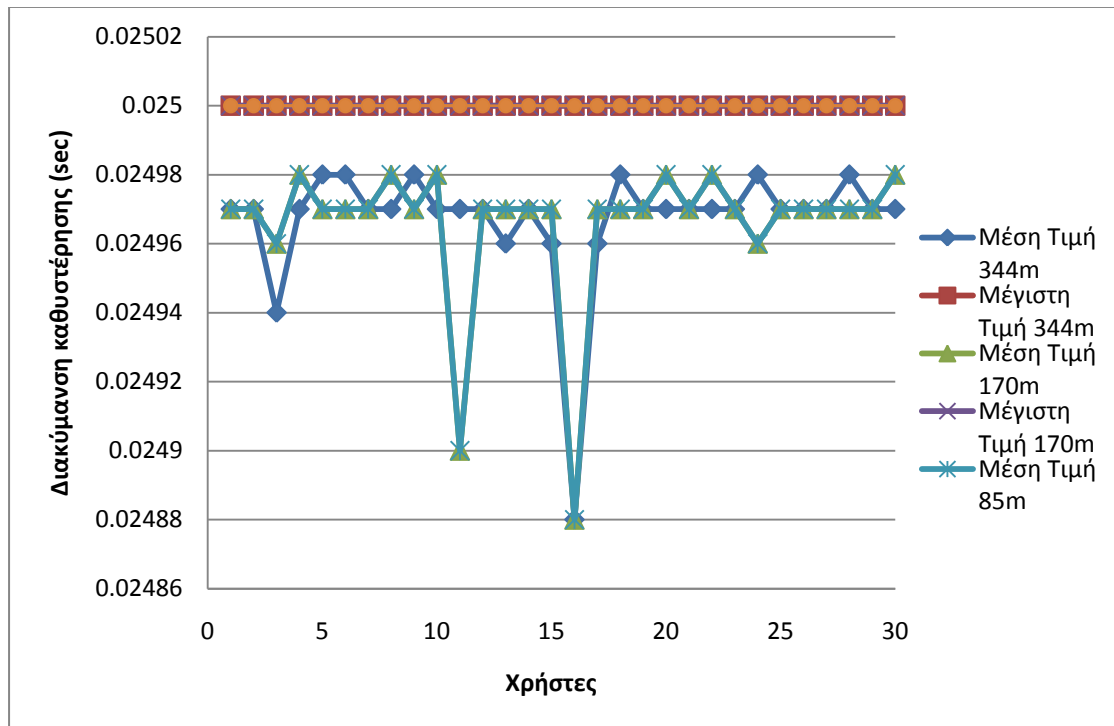
Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (31χρήστες)



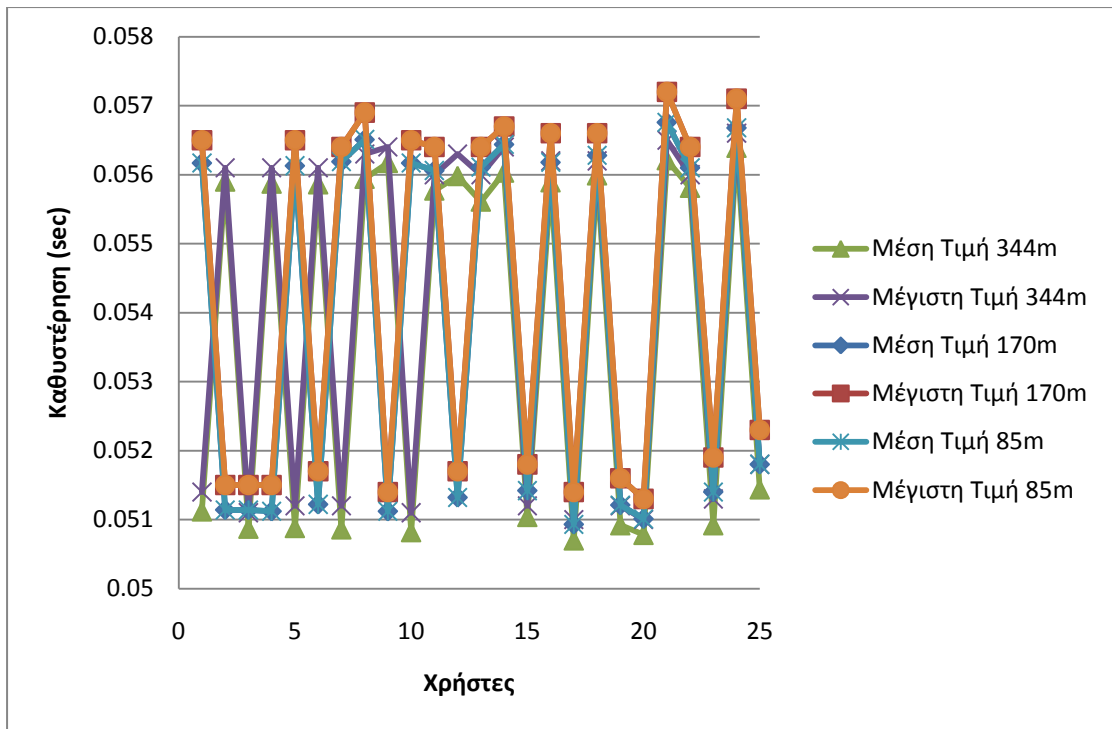
Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (31 χρήστες)



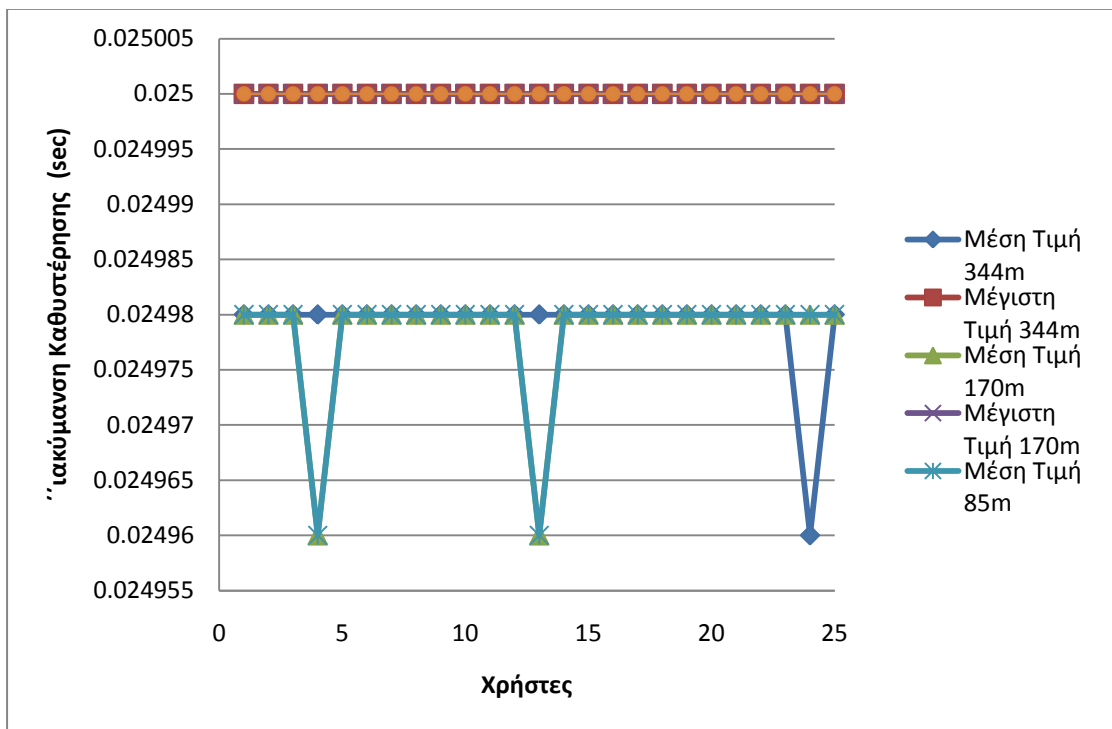
Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (30χρήστες)



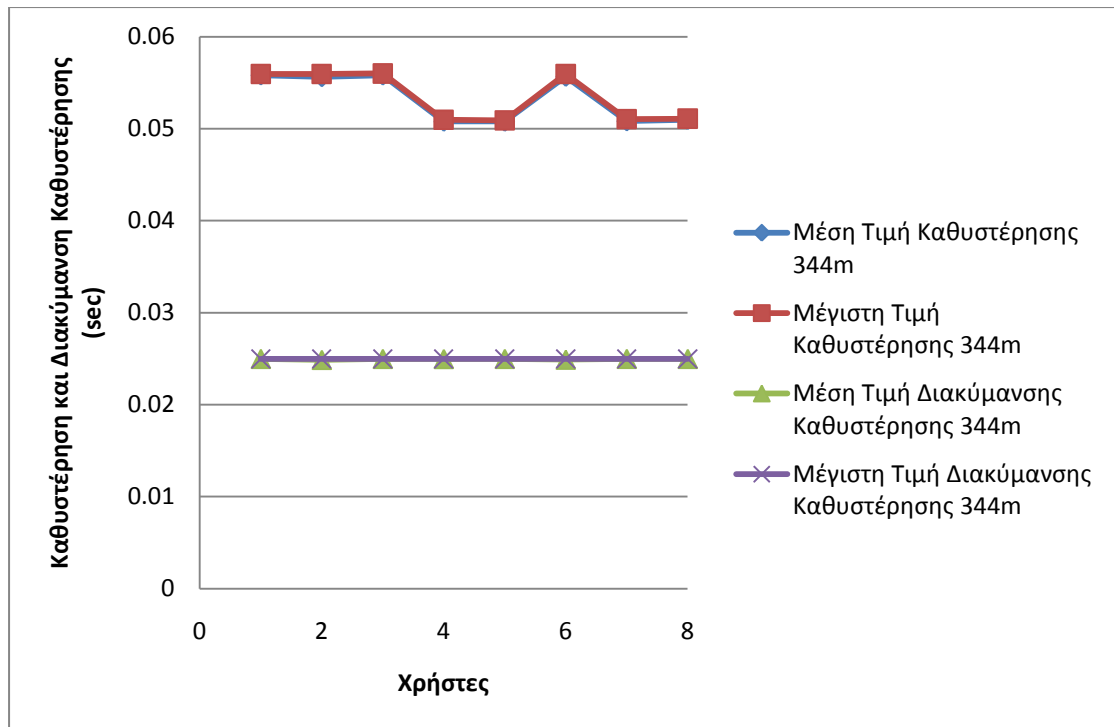
Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (30χρήστες)



Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (25χρήστες)



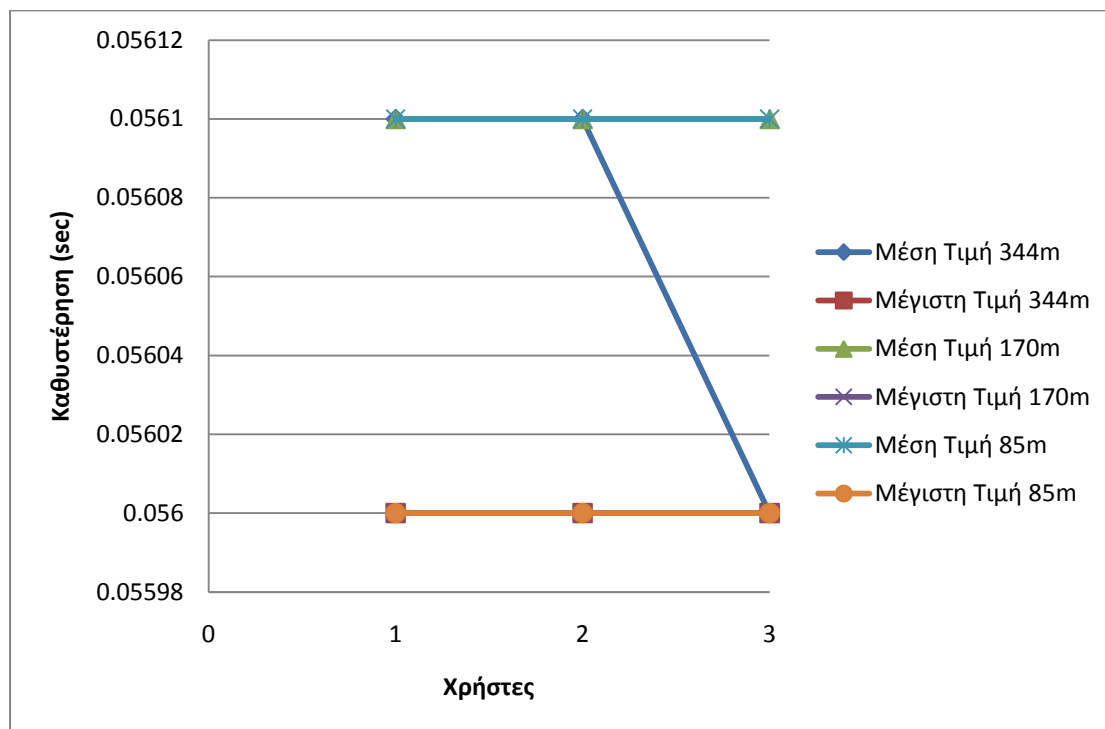
Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (25χρήστες)



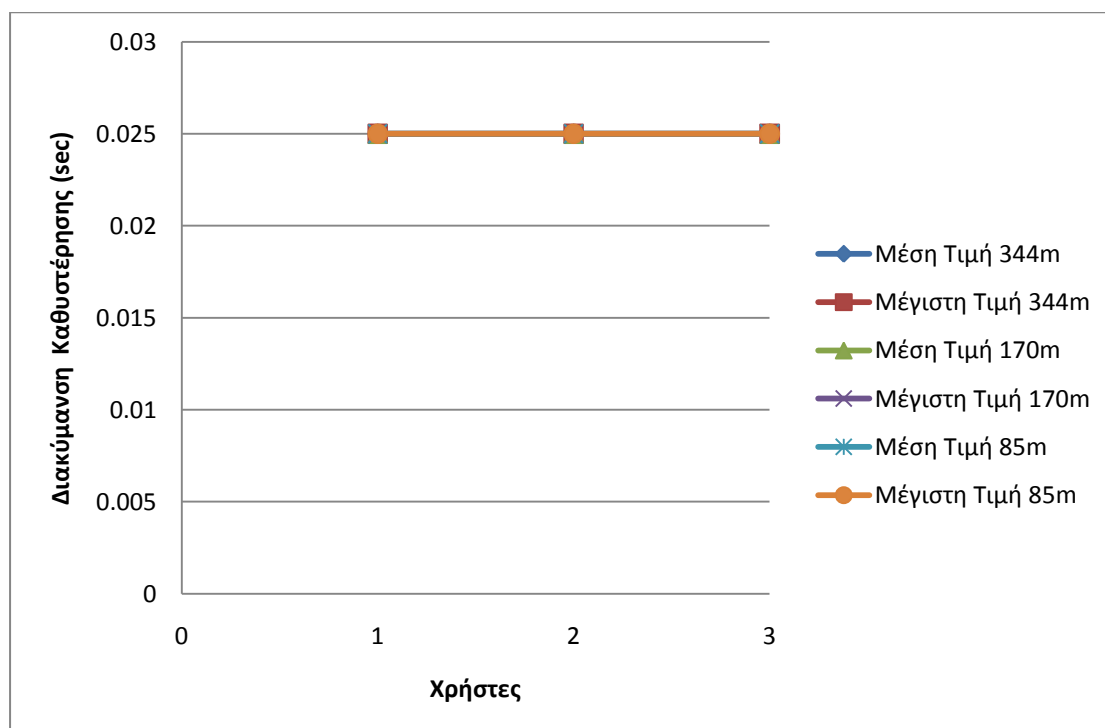
Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης και Διακύμανσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (8χρήστες)

8.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

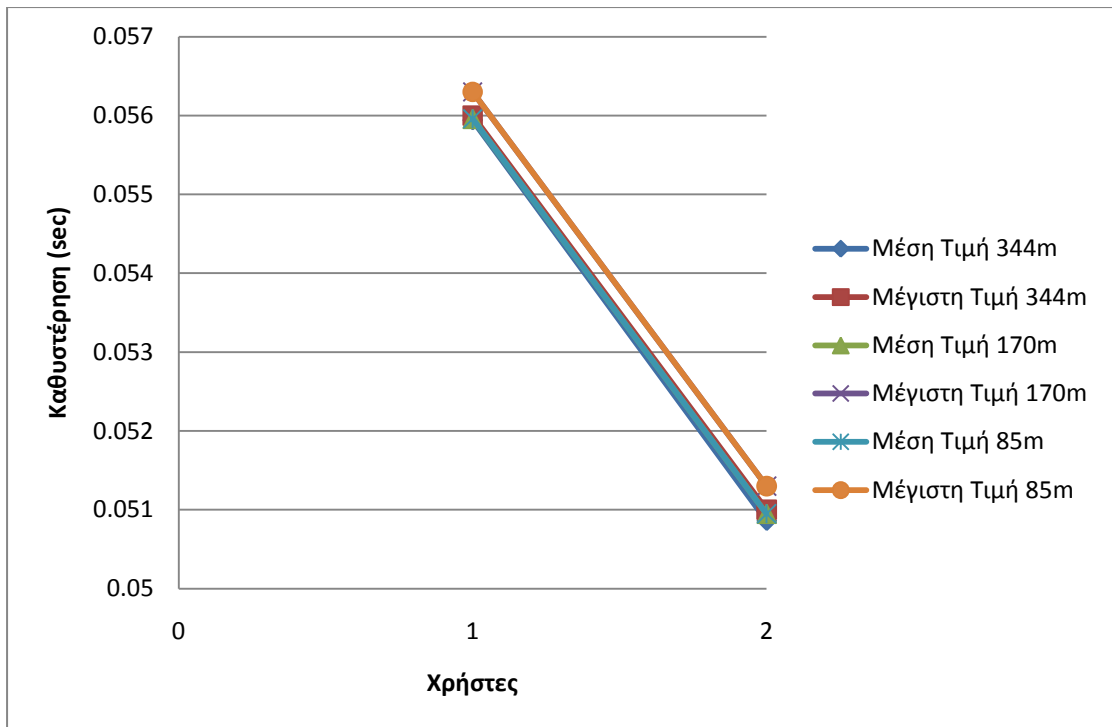
8.2.1 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΦΩΝΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ INTERNET



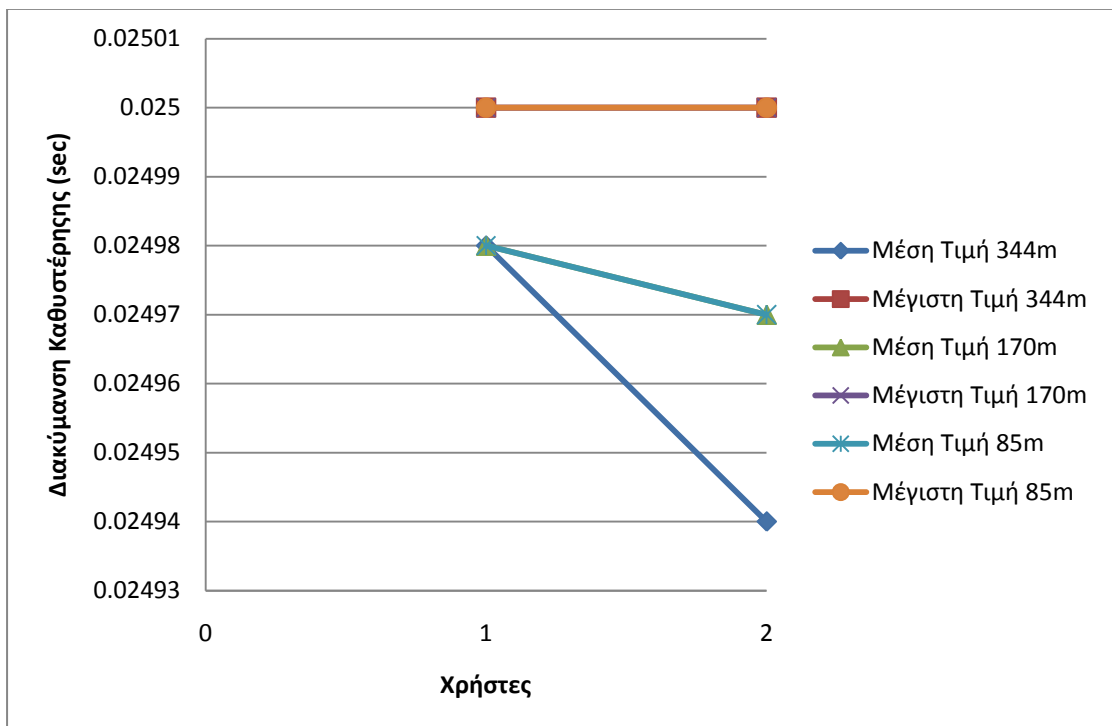
Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (3 χρήστες)



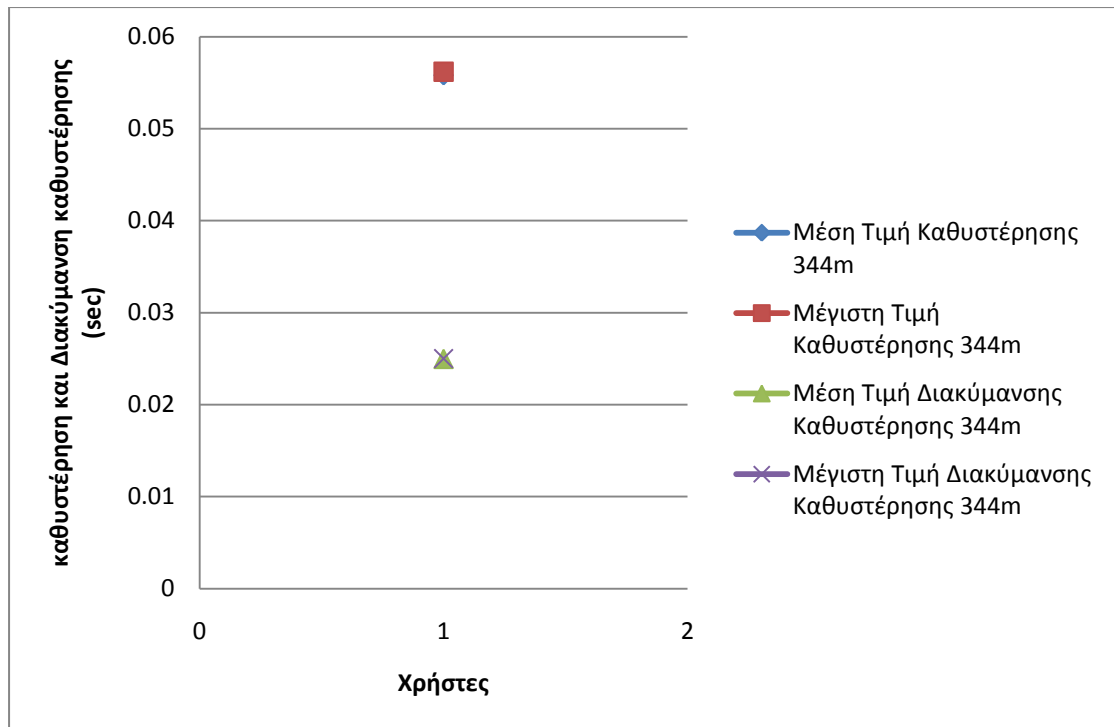
Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανση Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (3 χρήστες)



Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (2 χρήστες)

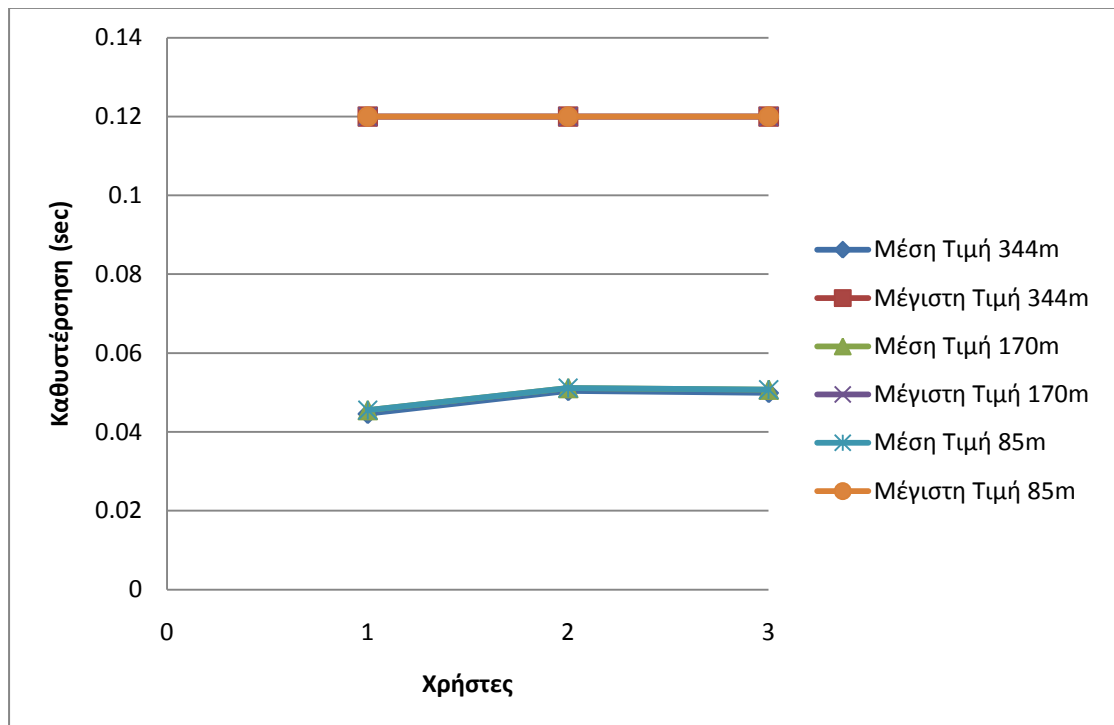


Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανση Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (2 χρήστες)

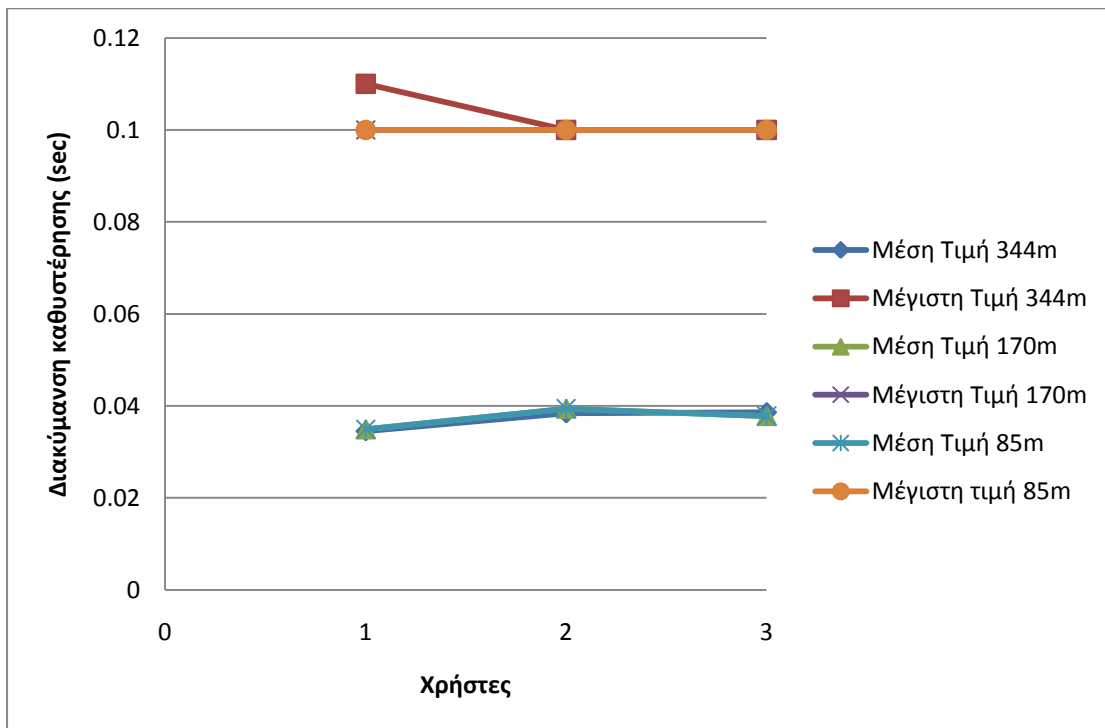


Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης και Διακύμανση Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Φωνής (1 χρήστης)

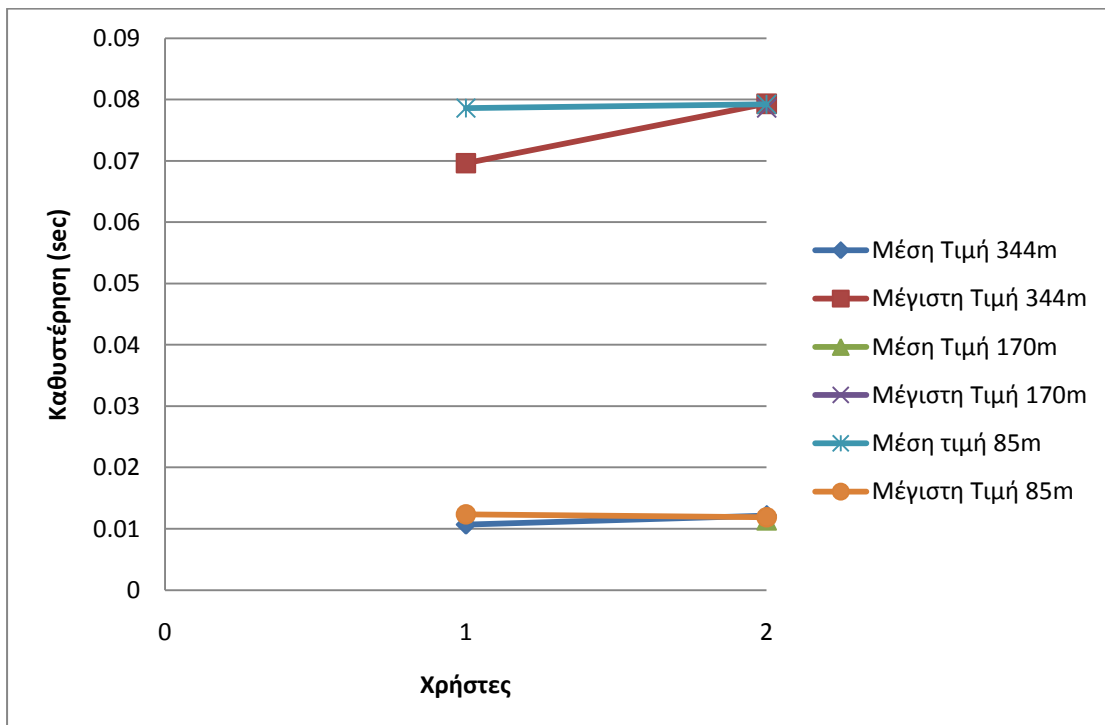
8.2.2 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ



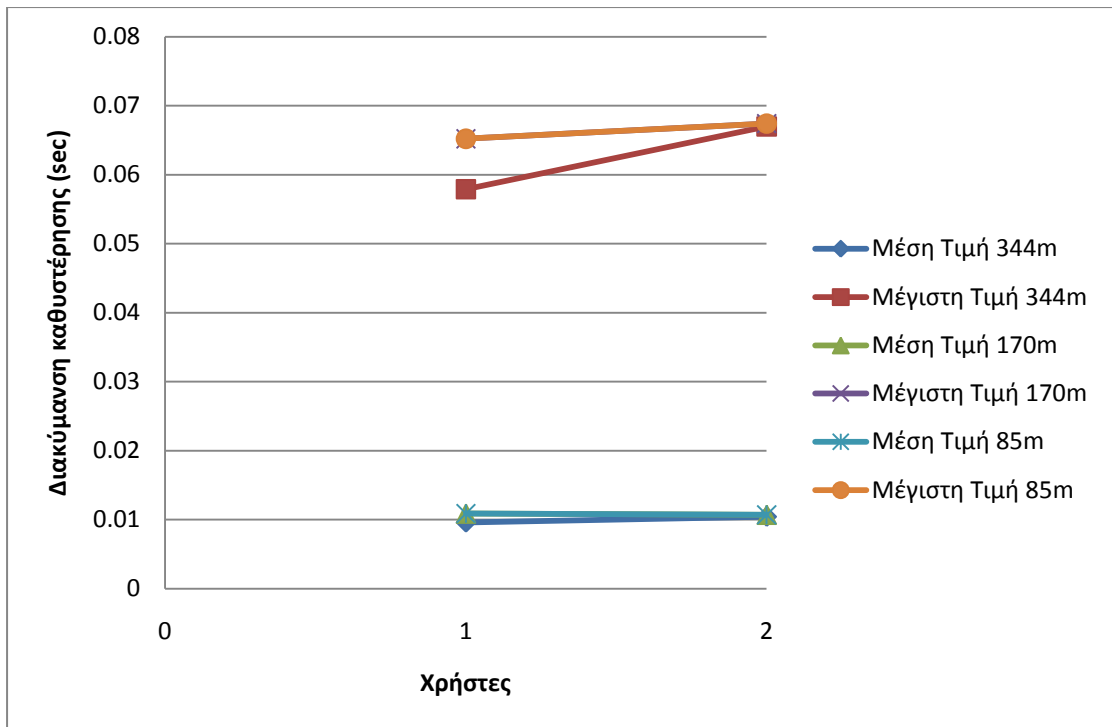
Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Βίντεο (3 χρήστες)



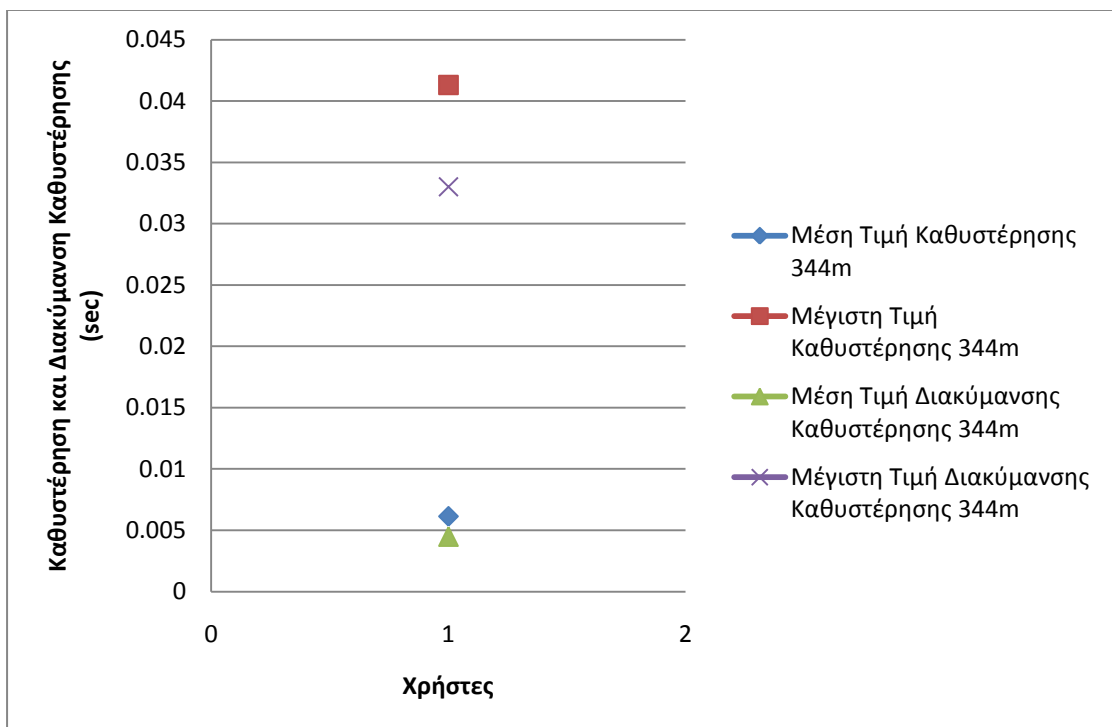
Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανσης Καθυστερήσης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Βίντεο (3χρήστες)



Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστερήσης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Βίντεο (2 χρήστες)



Μέση και Μέγιστη Τιμή Διακύμανσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Βίντεο (2χρήστες)



Μέση και Μέγιστη Τιμή Καθυστέρησης και Διακύμανσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο - Υπηρεσία Βίντεο (1 χρήστης)