



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Πληροφορική»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Μελέτη Επίδοσης Δικτύων WiMAX ως προς την παροχή QoS WiMAX Quality of Service performance analysis
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Σαλαμούρας Ανδρέας
Πατρώνυμο	Σπυρίδων
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΠΛ/09051
Επιβλέπων	Δημήτριος Δ. Βέργαδος, Επίκουρος Καθηγητής



Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

Δημήτριος Βέργαδος
Επίκουρος Καθηγητής

(υπογραφή)

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής

(υπογραφή)

Παναγιώτης Κοτζανικολάου
Λέκτορας

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2	ΓΕΝΙΚΑ.....	10
2.1	Πρότυπο IEEE 802.16-2001.....	10
2.2	Πρότυπο IEEE 802.16a.....	10
2.3	Πρότυπο IEEE 802.16-2004.....	11
2.4	Πρότυπο IEEE 802.16e-2005.....	11
2.5	Φυσικό Στρώμα.....	11
2.5.1	Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16-2001.....	11
2.5.2	Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16a.....	14
2.5.3	Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16e-2005.....	15
2.6	Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου.....	17
2.6.1	Δομή Στρώματος MAC 802.16-2001.....	18
2.6.2	Δομή Στρώματος MAC 802.16a.....	21
2.6.3	Δομή Στρώματος MAC 802.16e-2005.....	23
2.7	Αρχιτεκτονική Δικτύου.....	27
2.7.1	Τοπολογία Σημείου Προς Σημείο (P2P).....	28
2.7.2	Τοπολογία Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία (PMP).....	28
2.7.3	Τοπολογία Δικτύου Πλέγματος (Mesh).....	29
2.8	Βασικό Μοντέλο Αναφοράς NRM.....	30
2.9	Ζώνες Συχνοτήτων.....	32
2.9.1	Διαθέσιμα Φάσματα Συχνοτήτων.....	33
2.9.1.1	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της χρήσης Αδειοδοτημένου και μη.....	33
3	Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS).....	36
3.1	Τύποι Ποιότητας Υπηρεσίας.....	36
3.2	Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας.....	37
3.3	Κλάσεις Υπηρεσιών.....	38
3.4	Τύποι Υπηρεσιών.....	39
3.4.1	Unsolicited Grant Services (UGS).....	39
3.4.2	Real-time Polling Services (rtPS).....	39
3.4.3	Nonreal-time Polling Services (nrtPS).....	40
3.4.4	Best Effort (BE).....	40
3.4.5	Extended Real- Time Polling Service (ErtPS).....	40
3.5	Ροή Υπηρεσίας.....	41
3.5.1	Τροφοδοτούμενη Ροή Υπηρεσίας (Provisioned Service Flow).....	42
3.5.2	Επιτρεπόμενη Ροή Υπηρεσίας (Admitted Service Flow).....	43
3.5.3	Ενεργή Ροή Υπηρεσίας (Active Service Flow).....	43
3.6	Μοντέλα Έγκρισης.....	43
3.6.1	Μοντέλο Τροφοδοτούμενης Έγκρισης.....	44
3.6.2	Δυναμικό Μοντέλο Έγκρισης.....	44
3.7	Συναλλαγές WiMAX.....	45
3.7.1	Είδη Συναλλαγών.....	45

3.7.2	Καταστάσεις Συναλλαγών	45
3.8	Δυναμική Ροή Υπηρεσίας	46
3.8.1	Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας	46
3.8.2	Δυναμική Αλλαγή Ροής Υπηρεσίας	48
3.8.3	Δυναμική Διαγραφή Ροής Υπηρεσίας.....	49
4	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του WiMAX	50
4.1	Πλεονεκτήματα του WiMAX.....	50
4.2	Μειονεκτήματα του WiMAX.....	52
5	Σενάρια Χρήσης WiMAX.....	54
5.1	Δημόσια Δίκτυα.....	54
5.2	Αγροτικές Περιοχές.....	55
5.3	Backhaul Σε Κυψελωτά Δίκτυα	56
5.4	Backhaul Σε Ασύρματα Δίκτυα	57
5.5	Δίκτυα Τραπεζών.....	58
5.6	Εκπαιδευτικά Δίκτυα	58
5.7	Δημόσια Ασφάλεια.....	59
5.8	Offshore Δίκτυα.....	60
5.9	Πανεπιστημιακά Δίκτυα	61
5.10	Επικοινωνία σε προσωρινές κατασκευές	62
5.11	Θεματικά Πάρκα.....	62
6	Πειραματικό Μέρος	64
6.1	Προσομοιωτής NS 3.....	64
6.2	WiMAX module στον NS 3	65
6.3	Σκοπός Προσομοίωσης.....	66
6.4	Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης	67
7	Αποτελέσματα.....	74
7.1	Σενάριο 1	74
7.2	Σενάριο 2	78
8	Συμπεράσματα	84
8.1	Χρονοπρογραμματιστής SIMPLE	84
8.2	Χρονοπρογραμματιστής RTPS	84
8.3	Χρονοπρογραμματιστής MBQoS	85
9	Βιβλιογραφία.....	86
10	Παράρτημα	89

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1	Αρχιτεκτονική Υπο-πλαίσιου Κάτω Ζεύξης[5]	13
Σχήμα 2	Αρχιτεκτονική Υπο-πλαίσιου Άνω Ζεύξης [5]	13
Σχήμα 3	Αρχιτεκτονική Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου Υποστρώματος Σύγκλισης Μετάδοσης [5].....	14
Σχήμα 4	Δομή Υπο-πλαίσιου Κάτω Ζεύξης [6].....	16
Σχήμα 5	Δομή Υπο-πλαίσιου Άνω Ζεύξης [6]	17
Σχήμα 6	Πρότυπο Αναφοράς Πρωτοκόλλου 802.16 [9].....	19

Σχήμα 7 Επικεφαλίδα MPDU γενικής χρήσης [10].....	22
Σχήμα 8 Πραγματοποίηση «σκληρής» μεταπομπής [12].....	24
Σχήμα 9 Πραγματοποίηση μεταπομπή με τη μέθοδο γρήγορης μεταγωγής σταθμού βάσης [12].....	25
Σχήμα 10 Πραγματοποίηση μεταπομπής με μέθοδο διαφορισμού σταθμών βάσης [12].....	26
Σχήμα 11 Τοπολογία Σημείου προς Σημείο [14].....	28
Σχήμα 12 Τοπολογία Σημείου προς πολλαπλά Σημεία [14].....	29
Σχήμα 13 Τοπολογία δικτύου πλέγματος [15].....	30
Σχήμα 14 Βασικό Μοντέλο Αναφοράς WiMAX [16].....	31
Σχήμα 15 Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για τύπους υπηρεσιών [7].....	38
Σχήμα 16 Συνοπτικός Πίνακας Τύπων Υπηρεσιών με αντιστοιχία παραμέτρων/υπηρεσιών [20].....	41
Σχήμα 17 Λογική Σύνδεση Ροών Υπηρεσίας στο στρώμα MAC [20].....	42
Σχήμα 18 Μοντέλο τροφοδοτούμενης έγκρισης[17].....	44
Σχήμα 19 Δυναμικό μοντέλο έγκρισης[17].....	45
Σχήμα 20 Δημιουργία ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από τον κινητό σταθμό [21].....	47
Σχήμα 21 Δημιουργία ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από το σταθμό βάσης [21].....	48
Σχήμα 22 Διαγραφή ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από τον κινητό σταθμό [21].....	49
Σχήμα 23 Διαγραφή ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από το σταθμό βάσης [21].....	50
Σχήμα 24 Πλεονεκτήματα WiMAX[22].....	52
Σχήμα 25 Πίνακας Σεναρίων Χρήσης WiMAX [22].....	54
Σχήμα 26 Δίκτυο Πρόσβασης Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας [22].....	55
Σχήμα 27 Συνδεσιμότητα Αγροτικών Περιοχών [22].....	56
Σχήμα 28 Χρήση WiMAX ως backhaul σε Κυψελωτά Δίκτυα [22].....	57
Σχήμα 29 Χρήση WiMAX ως backhaul σε Ασύρματα Δίκτυα [22].....	57
Σχήμα 30 Χρήση WiMAX σε Τραπεζικά Δίκτυα [22].....	58
Σχήμα 31 Χρήση WiMAX σε Εκπαιδευτικά Δίκτυα [22].....	59
Σχήμα 32 Χρήση WiMAX σε Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας [22].....	60
Σχήμα 33 Χρήση WiMAX σε Offshore Δίκτυα [22].....	61
Σχήμα 34 Χρήση WiMAX σε Πανεπιστημιακά Δίκτυα [22].....	61
Σχήμα 35 Χρήση WiMAX σε Προσωρινές Κατασκευές [22].....	62
Σχήμα 36 Χρήση WiMAX σε Θεματικά Πάρκα [22].....	63
Σχήμα 37 Οργάνωση λογισμικού ns-3 [27].....	64
Σχήμα 38 Αρχιτεκτονική WiMAX στον ns3 [25].....	66
Σχήμα 39 Throughput Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε bit/s.....	75
Σχήμα 40 Delay Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε ns.....	76
Σχήμα 41 Jitter Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε ns.....	77
Σχήμα 42 Επί τοις Εκατό Packet Loss Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή.....	78
Σχήμα 43 Throughput Σεναρίου 2 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε bit/s.....	79
Σχήμα 44 Delay Σεναρίου 2 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε ns.....	80
Σχήμα 45 Jitter Σεναρίου 2 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε ns.....	81
Σχήμα 46 Επί τοις Εκατό Packet Loss Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή.....	82
Σχήμα 47 Κλάσεις και Απαιτήσεις Εφαρμογών WiMAX [43].....	85

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Τοπολογία Προσομοιώσεων.....	68
Εικόνα 2 Τοπολογία Σεναρίου 1.....	74
Εικόνα 3 Ρυθμοαπόδοση Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE Σεναρίου 1.....	75
Εικόνα 4 Καθυστέρηση Χρονοπρογραμματιστών Σεναρίου 1.....	76
Εικόνα 5 Διακύμανση καθυστέρησης Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE σεναρίου 1..	77
Εικόνα 6 Επί τοις εκατό απώλεια πακέτων για τους κόμβους ss2-ss6 με χρονοπρογραμματιστές RTPS και SIMPLE.....	78
Εικόνα 7 Τοπολογία προσομοίωσης 2.....	79
Εικόνα 8 Ρυθμοαπόδοση Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE/MBQOS Σεναρίου 2.....	80
Εικόνα 9 Διακύμανση καθυστέρησης Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE/MBQOS σεναρίου 2.....	81
Εικόνα 10 Διακύμανση καθυστέρησης Χρονοπρογραμματιστών σεναρίου 2.....	82
Εικόνα 11 Επί τοις εκατό απώλεια πακέτων σεναρίου 2.....	83

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Βέργαδο για την καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και τις επισημάνσεις που αφορούσαν την παρούσα εργασία και κυρίως για την υπομονή του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα και συνεργάτη του καθηγητή μου, Μανώλη Σκόνδρα, χάρη στη βοήθεια του οποίου κατάφερα να λύσω το σύνολο των ζητημάτων που παρουσιάστηκαν για την περάτωση της εργασίας. Εξίσου σημαντικό ρόλο είχε και ο πατέρας μου, Σπύρος Σαλαμούρας, ο οποίος εκτός από την ηθική υποστήριξη, γύρισε θέλοντας και μη στις μέρες που έγραφε κώδικα με τις ώρες, δίνοντας μου πολύτιμες συμβουλές. Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συμφοιτητές Παναγιώτη Κωνσταντινίδη και Μάριο Πετρόπουλο, με τους οποίους περάσαμε δύο υπέροχα χρόνια αντιμετωπίζοντας ομαδικά τις δυσκολίες του μεταπτυχιακού προγράμματος. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά την Όλγα, την οικογένειά μου και όλους τους δικούς μου ανθρώπους που μου παρείχαν ηθική συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού αλλά και της μεταπτυχιακής διατριβής.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στον παππού μου Ανδρέα Σαλαμούρα, ο οποίος λείπει πολλά χρόνια τώρα από δίπλα μου αλλά είναι συνεχώς στο μυαλό μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα WiMAX δίκτυα αποτελούν μία δικτυακή τεχνολογία η οποία παρέχει ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, εφάμιλλες υπηρεσίες με ασύρματα κυψελωτά δίκτυα όπως τα 3G, 4G και όλα αυτά με πολύ χαμηλό κόστος. Οι προδιαγραφές του προτύπου WiMAX αφορούν το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control-MAC) προσφέροντας στους κατασκευαστές και παρόχους της δικτύωσης διαλειτουργικότητα, καθώς και δυνατότητα διαφορετικών υλοποιήσεων στα υπόλοιπα επίπεδα. Το WiMAX πρότυπο κινείται στην ίδια λογική και σε ότι αφορά την ποιότητα υπηρεσίας. Υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις στις κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας που έχουν οριστεί αλλά οι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης, οι οποίοι ταξινομούν χρονικά και αποφασίζουν για την προτεραιότητα των πακέτων που έρχονται από ανώτερα επίπεδα αφήνονται στην ευχέρεια του κατασκευαστή.

Ο στόχος της εργασίας είναι να μελετήσει τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις του δικτύου με τη χρήση τριών χρονοδρομολογητών που έχουν υλοποιηθεί στην πλατφόρμα προσομοίωσης ns3, καθώς και να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά τους κάτω από συνθήκες μεγάλου δικτυακού φόρτου αλλά και να προταθεί ποιος είναι ο κατάλληλος ανά περίπτωση. Όπως παρουσιάζεται και στα συμπεράσματα, καθένας από τους τρεις αλγόριθμους υστερεί και υπερτερεί έναντι των υπολοίπων σε διαφορετικούς τομείς και δε μπορεί να θεωρηθεί κάποιος συνολικά αποτελεσματικότερος.

ABSTRACT

WiMAX standard is a network technology that provides wireless broadband internet access, services that can be compared with wireless cellular networks such as 3G and 4G, while using a very low cost. The WiMAX standard specifications are related to the Physical Layer and the Medium Access Control Layer, offering manufacturers and WiMAX network providers interoperability and enabling them to use different implementations at upper levels. WiMAX standard moves in the same direction in terms of Quality of Service (QoS). There are specific requirements on WiMAX QoS categories that are defined by the standard, but scheduling algorithms, which classify time specifications and decide packets' coming from upper levels priority, are left to manufacturer's discretion.

The objective of this thesis is to study the behavior and performance of the network using three schedulers that have been implemented in ns3 network simulator, to test their effectiveness under conditions of large network traffic and to recommend which one of them is appropriate in each case. As shown in the conclusions section, each of the three algorithms lags or outperforms the others in different areas so none of them can be considered the most effective in total.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την πάροδο του χρόνου η έννοια της τεχνολογικής εξέλιξης έχει αφομοιωθεί πλήρως από το σύνολο της κοινωνίας και το μεγαλύτερο μέρος των χρηστών, την αναμένει με ανυπομονησία. Η πληθώρα των τεχνολογικών εφαρμογών και το συνεχώς αυξανόμενο κοινό που τις χρησιμοποιεί καθημερινά έχουν δημιουργήσει ένα τεράστιο τεχνολογικό σύννεφο εντός του οποίου παρουσιάζονται συνεχώς ιδέες οι οποίες θα διασφαλίσουν τη μεγιστοποίησή του. Καθοριστικό ρόλο σε όλο αυτό διαδραματίζει η δικτυακή τεχνολογία, η οποία ουσιαστικά αποτελεί ένα άρμα για την εξάπλωση των τεχνολογικών εφαρμογών.

Με τη γιγαντιαία ανάπτυξη web και mobile εφαρμογών και την κοινή αποδοχή τους από τους χρήστες, οι ανάγκες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και ποιότητα υπηρεσιών έχουν αυξηθεί κατακόρυφα. Σημαντικός λόγος που στράφηκαν σε τέτοιου είδους εφαρμογές οι εταιρείες σαφέστατα ήταν η εξέλιξη των ευρυζωνικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτά παρέχουν υψηλές ταχύτητες σε μεγάλο όγκο χρηστών με χαμηλό κόστος.

Τα πρώτα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν και γνώρισαν μεγάλη αγοραστική επιτυχία από οικιακούς κι εταιρικούς χρήστες ήταν τα DSL, WiFi και 3G. Το 3G δεν παρέχει τις ταχύτητες και τη σταθερότητα που έχουν συνηθίσει οι οικιακοί χρήστες από τις άλλες δύο τεχνολογίες κι επίσης το κόστος του είναι δυσανάλογα μεγαλύτερο από την αποδοτικότητά του. Το DSL έχει σαν μειονέκτημα το κόστος εγκατάστασής του λόγω της ενσύρματης φύσης του. Το WiFi από την άλλη δεν έχει υψηλό κόστος εγκατάστασης, είναι αποδοτικό και γρήγορο, έχει όμως εξαιρετικά μικρή εμβέλεια κάλυψης, γεγονός που το περιορίζει σε οικιακές λύσεις. Η απάντηση στα προβλήματα αυτά έρχεται μέσω των 4G δικτύων και κυρίως του LTE και του WiMAX, τα οποία αποτελούν πρωτόκολλα που καλύπτουν τις καταναλωτικές ανάγκες για υψηλές ταχύτητες, χαμηλό κόστος και κάλυψη σε μεγάλη εμβέλεια.

Το WiMAX, το οποίο αποτελεί αντικείμενο μελέτης στην εργασία αυτή, υλοποιήθηκε μετά το WiFi και το 3G και λόγω της λειτουργίας του σε ευρύ φάσμα της ζώνης συχνοτήτων (2-66 GHz), αποτελεί λύση και για δίκτυα οπτικής επαφής (LOS) και για δίκτυα μη οπτικής επαφής (NLOS). Η περιοχή που μπορεί να καλυφθεί από ένα WiMAX δίκτυο είναι ακτίνας 50 km και η ταχύτητα μπορεί να αγγίξει τα 70Mbps. Μέσω της συσκευής σύνδεσης που χρησιμοποιεί ο εκάστοτε χρήστης μπορεί να εισέλθει σε όλα τα δίκτυα. Επιπλέον το κόστος εγκατάστασης του είναι αρκετά χαμηλό.

Σημαντικό ρόλο στο πρότυπο παίζει η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας, τομέας στον οποίο δίνεται μεγάλο βάρος. Μέσω του προτύπου υπάρχει διαχωρισμός των πακέτων μετάδοσης, τα οποία εξυπηρετούνται με διαφορετικά κριτήρια κατά περίπτωση. Παρόλο που το πρότυπο ορίζει συγκεκριμένες κατηγορίες και κριτήρια για την ομαδοποίηση των πακέτων, δεν περιλαμβάνει προδιαγραφές για τον χρονοπρογραμματισμό τους. Η υλοποίηση των Χρονοπρογραμματιστών αφήνεται στους παρόχους. Η εργασία αυτή μελετά την απόδοση ενός WiMAX δικτύου χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους χρονοπρογραμματιστές σε προσομοιώσεις με το σύγχρονο και καθημερινά εξελίξιμο προσομοιωτή ns-3.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η εξέλιξη και η λειτουργία του προτύπου WiMAX. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται ειδική μνεία στις μεθόδους τήρησης της ποιότητας υπηρεσίας του προτύπου. Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του προτύπου. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα σενάρια χρήσης των WiMAX δικτύων. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται περιγραφή του περιβάλλοντος προσομοίωσης καθώς και της δομής των σεναρίων προσομοίωσης. Στο κεφάλαιο 7 καταγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και στο κεφάλαιο 8 αναλύονται τα συμπεράσματα.

2 ΓΕΝΙΚΑ

Η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), το 1998 δημιούργησε μία ομάδα με σκοπό την ανάπτυξη του προτύπου 802.16. Το 2001 ήρθε η επικύρωση του προτύπου. Το 802.16 παρείχε προδιαγραφές για τα 2 χαμηλότερα επίπεδα, το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC(Media Access Control) . Με την πάροδο των χρόνων υπήρξε περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση του προτύπου και οι νέες εκδόσεις του που δημιουργήθηκαν και επικυρώθηκαν άλλαξαν ριζικά την πρώτη. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά ανά έκδοση ήταν:

- 802.16-2001- Πρώτο πρότυπο, σταθερή ευρυζωνική πρόσβαση, 10-66 GHz LOS
- 802.16a-2003- Χρήση OFDM-OFDMA, συχνότητες 2-11 GHz, NLOS
- 802.16b- Καθορισμός ασυρμάτων δικτύων πάνω από 10 GHz
- 802.16c- 2002- Προφίλ σε συχνότητες 10-66 GHz
- 802.16d,802.16-2004- Ενσωμάτωση όλων των προηγούμενων προτύπων
- 802.16e-2005- Κινητικότητα Χρηστών
- 802.16f-2005- Προσθήκη Management Information Base, υποστήριξη Mesh Δικτύων
- 802.16g-2007 Διαδικασίες και Υπηρεσίες Management Plane
- 802.16k-2007 Bridging στο 802.16
- 802.16j-2009 Υποστήριξη Multihop Relay
- 802.16i- Υλοποίηση Mobile Management
- 802.16h-2010- Βελτίωση μηχανισμών συνύπαρξης για λειτουργίες χωρίς άδεια χρήσης
- 802.16m- Λειτουργία 100Mbit/s για κινητούς χρήστες, 1 Gbit/s για σταθερούς
- 802.16n- Βελτίωση λειτουργίας σε μητροπολιτικά δίκτυα
- 802.16p- Υποστήριξη εφαρμογών Machine to Machine (M2M)

Στη συνέχεια καταγράφονται οι κυριότερες λειτουργίες του προτύπου μέσα από τις σημαντικότερες αλλαγές τους ανά έκδοση.

2.1 Πρότυπο IEEE 802.16-2001

Η πρώτη έκδοση του WiMAX έχει την ονομασία 802.16-2001 και δημοσιεύτηκε τον Απρίλιο του 2002. Οι συχνότητες λειτουργίας του προτύπου ήταν μεταξύ 10 και 66 GHz, ενώ υπήρχε πρόληψη για λειτουργία αποκλειστικά σε συνθήκες οπτικής επαφής (Line of Sight- LOS). Η οπτική επαφή συνεπάγει την έλλειψη φυσικών φραγμάτων στη ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη ώστε το σήμα να μεταδίδεται χωρίς εμπόδια. Για να χαρακτηριστεί μία ζεύξη ως ζεύξη «οπτικής επαφής» θα πρέπει να μην υπάρχουν εμπόδια στο μεγαλύτερο τμήμα της πρώτης ζώνης Fresnel. Η ζώνη Fresnel αποτελεί την ελλειπτική περιοχή που περιβάλλει τη νοητή ευθεία της οπτικής επαφής με το δέκτη, με κέντρο έλλειψης το μισό της απόστασης και ακτίνα $r = 0,164 \sqrt{\frac{d}{f}}$. Όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των κεραιών σε μέτρα, f η συχνότητα σε GHz και r η μέγιστη ακτίνα της ζώνης Fresnel σε μέτρα. Το ποσοστό της ζώνης που απαιτείται να είναι καθαρό εξαρτάται από την απόσταση πομπού και δέκτη, καθώς και από τη συχνότητα λειτουργίας.[1] [2]

2.2 Πρότυπο IEEE 802.16a

Λόγω του γεγονότος πως το αρχικό πρότυπο δεν ικανοποιούσε την ανάγκη μετάδοσης δεδομένων σε συνθήκες χωρίς οπτική επαφή (Non Line of Sight- NLOS), δημιουργήθηκε το πρότυπο 802.16a, το οποίο εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2003. Το πρότυπο αυτό περιέχει προσθήκες στη λειτουργία και του φυσικού στρώματος και του στρώματος ελέγχου πρόσβασης μέσω σε σχέση με τον προκάτοχό του.

Στις ζεύξεις NLOS το σήμα μεταδίδεται από τον πομπό προς το δέκτη αφού υποστεί ανακλάσεις, διαθλάσεις και διαχύσεις. Το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης κατ' επέκταση απαρτίζεται από συνιστώσες του ευθέως μονοπατιού και από διαθλώμενα και ανακλώμενα σήματα, τα οποία διαφέρουν από το ευθύ από πλευράς καθυστέρησης και εξασθένησης.

Το πρότυπο 802.16a λειτουργεί σε συχνότητες 2-11 GHz. Το χαμηλό αυτό φάσμα και η δυνατότητα λειτουργίας σε συνθήκες μη οπτικής επαφής έστω και σε μικρότερους από τον προκάτοχο ρυθμούς μετάδοσης, έθεσαν τις βάσεις για χρήση από αυξημένο αριθμό συνδρομητών. Το πρότυπο αυτό ουσιαστικά στράφηκε προς τους οικιακούς χρήστες, μιας και η χρήση του WiMAX μέχρι την έκδοσή του, ήταν αδύνατη λόγω της υψομετρικής διαφοράς και της ύπαρξης εμποδίων μεταξύ κτιρίων και σταθμών βάσης. Επίσης σημαντικό οικονομικό θύλητρο για τους εν δυνάμει χρήστες αποτέλεσε και η χρήση εσωτερικών κεραιών. Η κλασικότερη διάταξη του προτύπου είναι ένας σταθμός βάσης ο οποίος επικοινωνεί μέσω της τοπολογίας σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint – PMP) με οικιακούς και εταιρικούς Σταθμούς Συνδρομητή (Subscriber Stations-SSs). [3] [4]

2.3 Πρότυπο IEEE 802.16-2004

Το πρότυπο αυτό εκδόθηκε τον Ιούνιο του 2004 και στηρίχθηκε στις βασικές αρχές του 802.16a προσθέτοντας παράλληλα και κάποια νέα στοιχεία. Κυρίως, αφορά σταθερούς χρήστες και για το λόγο αυτό ονομάστηκε σταθερό WiMAX (fixed). Υποστηρίζει τη μετάδοση δεδομένων είτε με οπτική είτε χωρίς οπτική επαφή και λειτουργεί σε συχνότητες από 2 έως 66 GHz, το φάσμα όμως το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι από 2 έως 11GHz. Σε ότι αφορά το εύρος ζώνης καναλιού συμπεριλαμβάνει φάσματα από 1,25 MHz έως 20 MHz. Η ταχύτητα μετάδοσης μπορεί να ανέλθει στα 75 Mbps στην κάτω ζεύξη όταν πρόκειται για κανάλι μέγιστου επιτρεπτού εύρους ζώνης (20MHz). Σε συνθήκες μη οπτικής επαφής πάντως, η απόσταση κάλυψης είναι μικρότερη από τις LOS συνθήκες και φτάνει σε ένα εύρος μεταξύ 4,8-8 Km.

2.4 Πρότυπο IEEE 802.16e-2005

Το πρότυπο αυτό εκδόθηκε τον Οκτώβριο του 2005 και αποτελεί επέκταση του 802.16-2004. Στηρίχθηκε στον προκάτοχό του προσθέτοντας νέες τεχνικές και πρωτόκολλα μέσω των οποίων παρέχεται η δυνατότητα κινητικότητας στους χρήστες. Από το πρότυπο αυτό κι έπειτα, οι δέκτες των συνδρομητών ονομάζονται Κινητοί Σταθμοί (Mobile Stations). Οι συχνότητες λειτουργίας του προτύπου είναι από 2-11 GHz για σταθερούς και κινούμενους με χαμηλή ταχύτητα χρήστες, ενώ οι κινητοί χρήστες χρησιμοποιούν το φάσμα από 2 έως 6 GHz. Η μέγιστη υποστηριζόμενη ταχύτητα είναι 125 Km/h. Το πρότυπο συμπεριλαμβάνει και μεθόδους μεταπομπών (handoffs) στις προδιαγραφές του για τις περιπτώσεις κινητών χρηστών που μεταφέρονται σε διαφορετική κυψέλη εξυπηρέτησης. Μία ακόμη προσθήκη σχετίζεται με την εξοικονόμηση ενέργειας και συγκεκριμένα τις καταστάσεις αδράνειας και απενεργοποίησης που έχουν προστεθεί στο πρότυπο. Χρησιμοποιούνται κεραιές Πολλαπλής Εισόδου- Πολλαπλής Εξόδου (Multiple Input Multiple Output) MIMO και η ταχύτητα μετάδοσης μπορεί να φτάσει τα 63 Mbps ανά τομέα στην άνω ζεύξη και τα 28Mbps στην κάτω. Η μέση ακτίνα κυψέλης κυμαίνεται από 2 έως 4,8 Km ανάλογα με το σχεδιασμό.

2.5 Φυσικό Στρώμα

2.5.1 Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16-2001

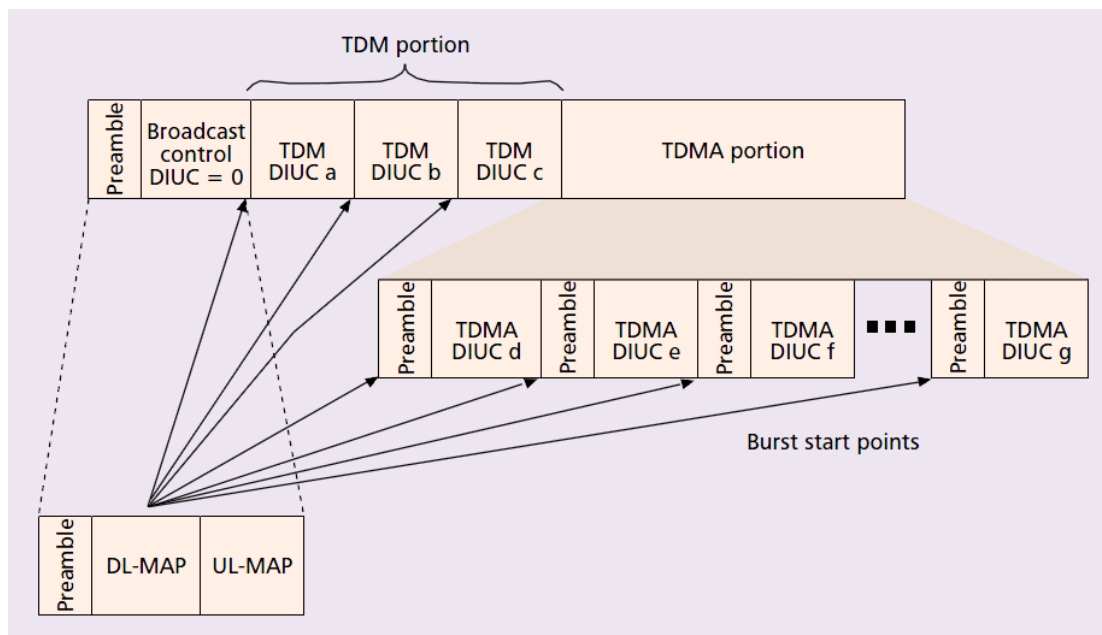
Λόγω της απαίτησης ύπαρξης οπτικής επαφή μεταξύ του Σταθμού Βάσης (Base Station- BS) και του Σταθμού Συνδρομητή (Subscriber Station-SSs) το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.16-2001 είναι βασισμένο σε ραδιοεπαφή μονής φέρουσας (single carrier) η οποία έχει την ονομασία WirelessMAN-SC. Το εύρος ζώνης του καναλιού εκτείνεται μεταξύ 20 και 25 MHz στην Αμερική και 28 MHz στην Ευρώπη. Στη δεύτερη περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης είναι της τάξης των 134,4 Mbps. Η ακτίνα κυφέλης κυμαίνεται μεταξύ 2-5 km, ενώ το πρότυπο εξυπηρετεί μόνο σταθερούς χρήστες. Στο δίκτυο χρησιμοποιείται σύνδεση σημείου προς πολλαπλά σημεία, δηλαδή από το Σταθμό Βάσης προς τους Κινητούς Σταθμούς. Για την κάτω ζεύξη (downlink) η τεχνική πολυπλεξίας που υποστηρίζεται είναι η Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing- TDM), βάσει της οποίας γίνεται αποστολή ενός σήματος TDM από τον BS και ανατίθενται σειριακά χρονοσχισμές (timeslots) στους SSs. Για την άνω ζεύξη (uplink) οι SSs επικοινωνούν με το BS μέσω της Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA), βάσει της οποίας όλοι οι SS χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα σε διαφορετικό timeslot ο καθένας. Για την αμφιδρόμηση χρησιμοποιούνται εξίσου η Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Συχνότητας (Frequency Division Duplexing – FDD) και η Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Duplexing – TDD). Στην FDD χρησιμοποιούνται διαφορετικά κανάλια για uplink και downlink, στα οποία μπορεί να γίνεται ταυτόχρονη εκπομπή. Στην TDD, το uplink και το downlink μοιράζονται το ίδιο κανάλι, επομένως η εκπομπή γίνεται σε διαφορετικό timeslot. Για τη διαμόρφωση υπάρχει η δυνατότητα χρήσης Εγκάρσιας Ψηφιακής Μεταλλαγής Φάσης (Quadrature Phase-Shift Keying – QPSK), Ψηφιακής Εγκάρσιας Διαμόρφωσης Πλάτους 16 σημείων (16-QAM – Quadrature Amplitude Modulation) και Ψηφιακής Εγκάρσιας Διαμόρφωσης Πλάτους 64 σημείων (64-QAM – Quadrature Amplitude Modulation). Η επιλογή της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης γίνεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο με στόχο την μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης ανά σηματοθορυβικό λόγο. Ο συνδυασμός τύπων ψηφιακής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται ορίζουν το προφίλ εκπομπής (burst profile). Για τη διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης χρησιμοποιείται η Εμπρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC) και συγκεκριμένα ο κώδικας Reed-Solomon GF(256), με μεταβλητό μέγεθος μπλοκ και ικανότητας διόρθωσης λαθών. [4][5]

Το φυσικό στρώμα στην πρώτη έκδοση του προτύπου αποτελείται από το υπόστρωμα που εξαρτάται από το φυσικό μέσο και το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence Sublayer – TC), το οποίο επικοινωνεί με το επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC).

Τα πλαίσια του Φ.Σ. έχουν διάρκεια 0,5, 1 ή 2 ms και χωρίζονται σε σχισμές 4-QAM συμβόλων. Υφίστανται δύο είδη υποπλαίσια, τα υποπλαίσια της άνω ζεύξης και τα υποπλαίσια της κάτω ζεύξης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD) τα δύο υποπλαίσια μεταφέρονται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικές συχνότητες, ενώ στην περίπτωση της αμφιδρόμησης με διαίρεση χρόνου (TDD) τα υποπλαίσια μεταδίδονται στην ίδια συχνότητα.

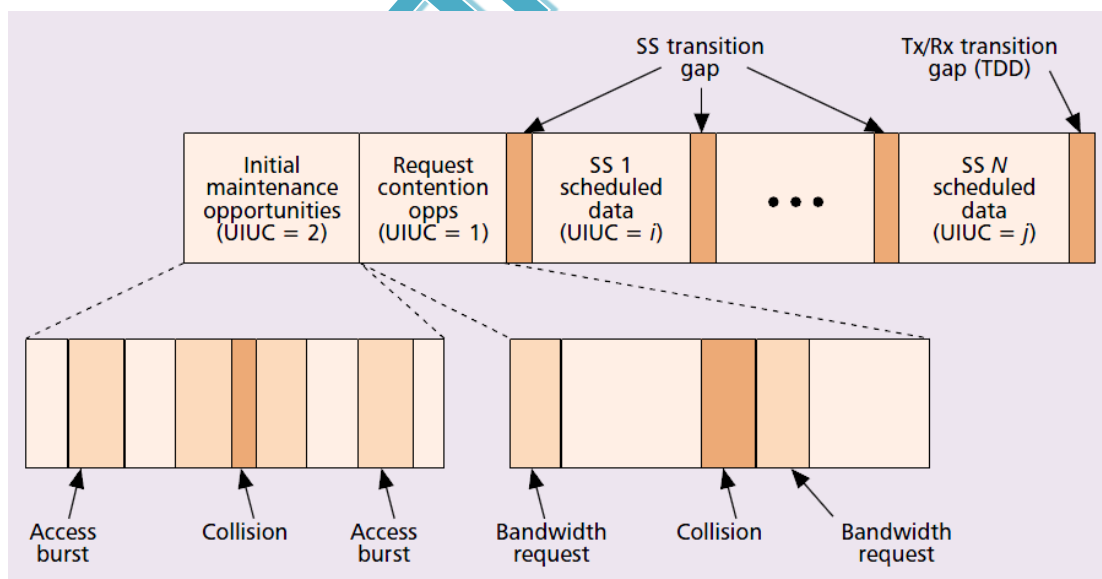
Το πρώτο μέρος ενός υποπλαισίου κάτω ζεύξης περιέχει ένα τμήμα ελέγχου το οποίο αποτελείται από μία επικεφαλίδα (preamble), ένα μήνυμα DL-MAP κι ένα UL-MAP του υποπλαισίου. Στην κάτω ζεύξη γίνεται χρήση του DL-MAP, το οποίο ενημερώνει για τυχόν αλλαγές στην κωδικοποίηση και την εμπρόσθια διόρθωση λαθών στο φυσικό στρώμα. Η μετάδοση των δεδομένων στους SSs γίνεται μέσω ενός προφίλ εκπομπής (burst profile) το οποίο καθορίζεται από τον κώδικα διαστήματος χρήσης (Interval Usage Code- DDIUC).

Στη συνέχεια υπάρχει το κομμάτι που έχει να κάνει με την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing- TDM). Όταν έχουμε αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD), το υποπλαίσιο περιλαμβάνει κι ένα τμήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access- TDMA), το οποίο προσθέτει επικεφαλίδες στην αρχή κάθε νέου προφίλ εκπομπής. Οι σταθμοί βάσης επεξεργάζονται το σύνολο των υποπλαισίων κάτω ζεύξης που λαμβάνουν, μιας και ο παραλήπτης σταθμός δεν καθορίζεται από το DL-MAP αλλά από τις επικεφαλίδες στο Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC).



Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική Υπο-πλαίσιου Κάτω Ζεύξης[5]

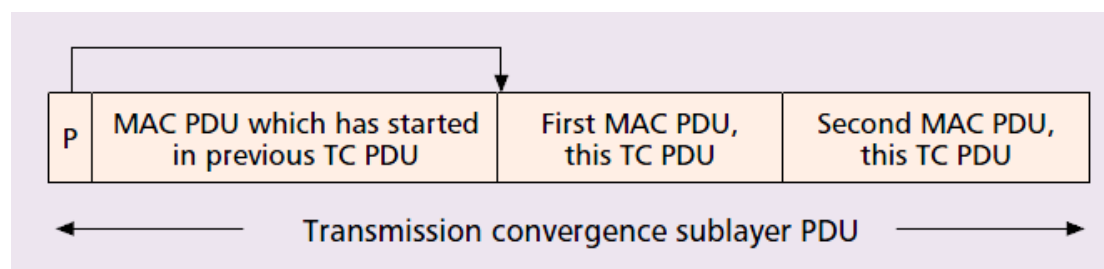
Παρομοίως, στα πλαίσια της άνω ζεύξης περιέχονται μηνύματα UL-MAP, τα οποία εκχωρούν εύρος ζώνης στον εκάστοτε Σταθμό Συνδρομητή. Οι σταθμοί συνδρομητή επίσης πραγματοποιούν την εκπομπή σύμφωνα με το προφίλ εκπομπής που έχει οριστεί από τον αντίστοιχο κώδικα διαστήματος χρήσης (UIUC) στο UL-MAP.



Σχήμα 2 Αρχιτεκτονική Υπο-πλαίσιου Άνω Ζεύξης [5]

Το Υπόστρωμα Σύγκλισης Μετάδοσης (Transmission Convergence Sublayer – TC) βρίσκεται μεταξύ φυσικού στρώματος και στρώματος MAC. Ο βασικός ρόλος του υποστρώματος είναι η αλλαγή των Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Units-PDU) που παραλαμβάνονται από το στρώμα MAC σε μπλοκ σταθερού μεγέθους Εμπρόσθιας Διόρθωσης Λαθών (Forward Error Correction-FEC) σε κάθε ριπή. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται μπλοκ Εμπρόσθιας Διόρθωσης λαθών τα οποία περιλαμβάνουν το σύνολο των Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου συνοδευόμενα από έναν δείκτη ο οποίος

προσδιορίζει την έναρξης της επόμενης MAC-PDU στην περίπτωση λαθών του προηγούμενου μπλοκ. [5]



Σχήμα 3 Αρχιτεκτονική Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου Υποστρώματος Σύγκλισης Μετάδοσης [5]

2.5.2 Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16a

Στο πρότυπο 802.16a υπάρχουν 4 υλοποιήσεις του φυσικού στρώματος οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το σκοπό του δικτύου.

Wireless MAN-SCa: Δε διαφέρει από το προηγούμενο πρότυπο ως προς το ότι βασίζεται σε ραδιοεπαφή μονής φέρουσας συχνότητας (Single Carrier) και χρησιμοποιεί Αμφιδρόμηση με Διάρθρωση Συχνότητας (FDD) και Αμφιδρόμηση με Διάρθρωση Χρόνου (TDD). Χρησιμοποιεί την τεχνική προσαρμοστικής διαμόρφωσης BPSK και σε κάποιες περιπτώσεις την 256-QAM. Υποστηρίζει επίσης διαφορική εκπομπή με χωροχρονική κωδικοποίηση (Space-Time Coding Transmit Delay) και προσαρμοστικές κεραίες (Adaptive Antennas).

Wireless MAN OFDM: Βασίζεται στην τεχνολογία ορθογωνικής πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing- OFDM), η οποία βοηθάει στη μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων. Περιέχει 256 φέροντα σήματα, από τα οποία τα 200 χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων και τα υπόλοιπα 56 αποτελούν διαστήματα προστασίας. Χρησιμοποιούνται αμφιδρομήσεις με διαίρεση συχνότητας και χρόνου στις αδειοδοτημένες ζώνες συχνότητων, ενώ στις μη αδειοδοτημένες χρησιμοποιείται μόνο αμφιδρόμηση με διαίρεση χρόνου. Στο εύρος των διαμορφώσεων υπάρχουν οι BPSK, QPSK, 16-QAM και η 64-QAM σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνότητων. Η πολλαπλή πρόσβαση πραγματοποιείται με την τεχνική της διαίρεσης χρόνου (TDMA).

Wireless MAN OFDMA: Χρησιμοποιείται η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDMA) για την αντιμετώπιση της πολυδιαδρομικής διάδοσης και των συνθηκών μη οπτικής επαφής. Υπάρχουν 2048 φέροντα εκ των οποίων τα 1681 χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων και τα υπόλοιπα 367 για διαστήματα προστασίας, ενώ η πολλαπλή πρόσβαση πραγματοποιείται με τη διευθυνσιοδότηση του κάθε δείκτη με ένα υποσύνολο πολλαπλών φερόντων.

Wireless MAN HUMAN (Wireless High Speed Unlicensed Metropolitan Area Network): Η υλοποίηση αυτή είναι παρόμοια με τη Wireless MAN OFDM, με τη διαφορά ότι ορίζει δυναμική επιλογή συχνότητας σε μη αδειοδοτημένες ζώνες μεταξύ 5-6 GHz.

Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16-2004

Το πρότυπο 802.16-2004 διατήρησε τις υπάρχουσες υλοποιήσεις των προκατόχων του στο φυσικό στρώμα, καθιερώνοντας τη χρήση των τεχνολογιών ορθογωνικής πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (OFDM) και πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDMA). Εκτός αυτού έγιναν και κάποιες προσθήκες με σκοπό τη γενικότερη βελτίωση των λειτουργιών του φυσικού στρώματος.

- Χρήση μεθόδου δικτύου μονής συχνότητας (Single Frequency Network- SFN) για την εξυπηρέτηση πολυεκπομπής (broadcast) και ευρυεκπομπής (multicast).
- Ταχύτερη δρομολόγηση μέσω της Ευέλικτης Ένδειξης Καναλιού (Channel Quality Indication- CQI).
- Χρήση κεραιών Advanced Antenna Subsystem (AAS) , κεραιών κλειστού βρόγχου Πολλαπλής Εισόδου- Πολλαπλής Εξόδου (Multiple Input Multiple Output – MIMO).
- Υποστήριξη πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χώρου (Space Division Multiple Access- SDMA) , τεχνική κατά την οποία οι χρήστες μοιράζονται χωρικά κατά τη χρήση κεραιών MIMO και AAS.
- Πλαίσια μεταβλητού μεγέθους (2ms -5ms).
- Τεχνικές εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction- FEC) όπως ο κώδικας Convolution Turbo Code (CTC) και ο κώδικας ελέγχου ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας (Low Density Parity Check- LDPC).
- Χρήση Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής (Power Control) για τη βελτίωση της κατανάλωσης ισχύος στο δίκτυο. Ο Σταθμός Βάσης στέλνει πληροφορίες ελέγχου ισχύος εκπομπής στους Σταθμούς Συνδρομητών ώστε να μειώνεται η ισχύς για να μην ξεπερνά το προκαθορισμένο από το Σταθμό Βάσης επίπεδο. Με την τεχνική αυτή εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος, ελαχιστοποιείται και η πιθανότητα παρεμβολής με γειτονικούς σταθμούς βάσης.

2.5.3 Δομή Φυσικού Στρώματος 802.16e-2005

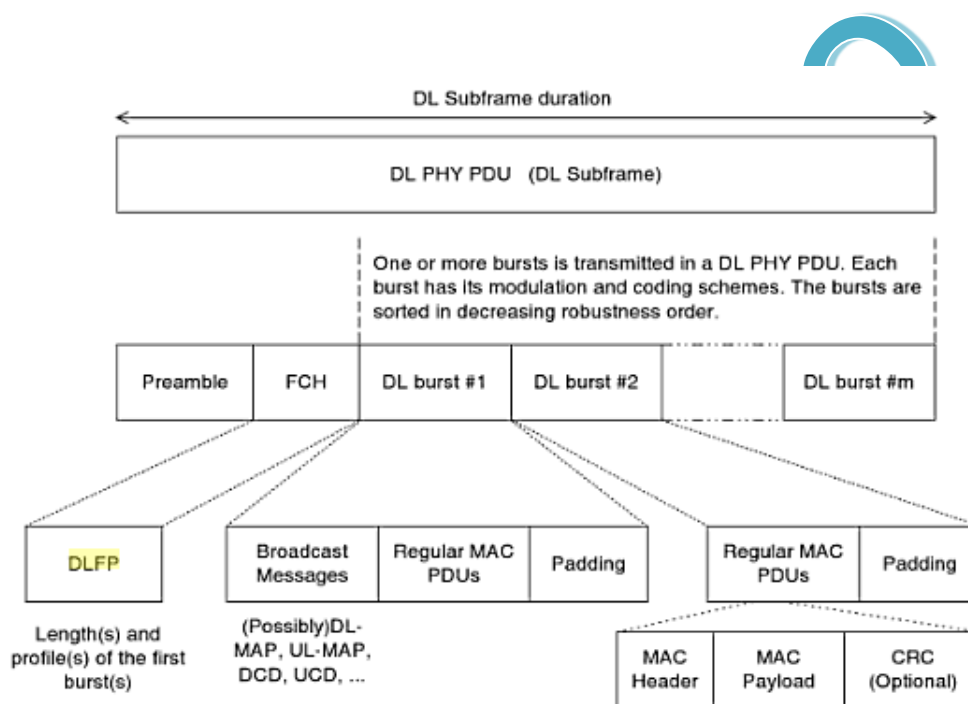
Το πρότυπο 802.16e-2005 λόγω της ένταξης της έννοιας της κινητικότητας και της υποστήριξής του, χωρίς να σταματά να χρησιμοποιεί τους τύπους ραδιοεπαφών που λειτουργούσαν στα προηγούμενα πρότυπα, στράφηκε κυρίως στην Wireless MAN OFDMA. Η εξέλιξη της υπήρξε η τεχνική της κλιμακούμενης πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Scalable OFDMA). Βάσει της ραδιοεπαφής αυτής, τα φέροντα σήματα που προκύπτουν από το Γρήγορο Μετασχηματισμό Φουριέ (Fast Fourier Transform- FFT) μπορεί να είναι 128, 512, 1024 ή 2048, ενώ κάποια από αυτά χρησιμοποιούνται για φασματικά διαστήματα προστασίας, πέρα απ' όσα διατίθενται για τόνους πλότους και δεδομένα. Η κλιμάκωση αυτή απορρέει από το γεγονός της ποικιλίας μεγέθους εύρους ζώνης των καναλιών.

Ο αριθμός των φερόντων που λαμβάνει κάθε Κινητός Σταθμός δεν διαφέρει. Τα φέροντα ομαδοποιούνται ανά 48 και σχηματίζουν ένα υποκανάλι OFDMA. Σε κάθε κινητό σταθμό μπορούν να ανατεθούν ένα ή παραπάνω υποκανάλια. Η αμφιδρόμηση όπως και στο προηγούμενο πρότυπο γίνεται με διαίρεση χρόνου (TDD) σε μη αδειοδοτημένες περιοχές συχνότητας, ενώ στις αδειοδοτημένες ζώνες χρησιμοποιείται και η αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD). Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Για την εμπρόσθια διόρθωση λαθών χρησιμοποιούνται ο κώδικας Convolution Turbo Code (CTC), ο κώδικας Reed Solomon και προαιρετικά τεχνικές turbo- coding.[4]

Τα πλαίσια OFDM χωρίζονται σε υποπλαίσια άνω και κάτω ζεύξης και στην TDD αμφιδρόμηση χωρίζονται μεταξύ τους με ένα χρονικό διάστημα προφύλαξης (Transmit/Receive και Receive/Transmit Transition Gap- TRG και RTG). Το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης μπορεί να διαρκεί μέχρι και τρεις φορές περισσότερο από αυτό της άνω ζεύξης αλλά μπορεί να έχουν και ίση χρονική διάρκεια.

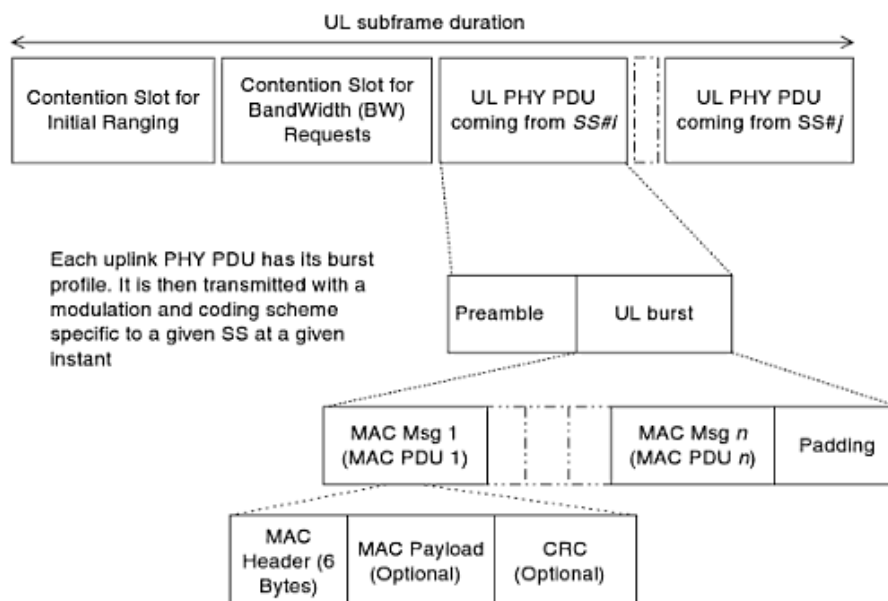
Το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης αποτελείται αρχικά από μία επικεφαλίδα (preamble), η οποία χρησιμοποιείται για συγχρονισμό, ενώ παράλληλα περιέχει μία αρχική εκτίμηση του ασύρματου διαύλου. Στη συνέχεια, υπάρχει η επικεφαλίδα ελέγχου πλαισίου (Frame Control Header- FCH) η οποία περιέχει πληροφορίες όπως το μήκος των μηνυμάτων DL MAP, ο τύπος της κωδικοποίησης, ο αριθμός υποκαναλιών OFDM και το πρόθεμα πλαισίου κάτω ζεύξης (Downlink Frame Prefix- DLFP). Το τελευταίο συμπεριλαμβάνει το προφίλ εκπομπής και το μήκος τουλάχιστον μίας εκ των ριπών που ακολουθούν. Τέλος, έχουμε τις ριπές κάτω ζεύξης (DL bursts). Το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης μπορεί να περιέχει ριπές διαφορετικής

πληροφορίας που προέρχεται από διαφορετικούς χρήστες και το μέγεθός τους μπορεί να είναι από 2 έως 20 ms, καθώς υπάρχει περίπτωση να είναι αποτέλεσμα ένωσης πολλών πακέτων ανώτερων επιπέδων. Οι ριπές κάτω ζεύξης αποτελούνται από μηνύματα UL MAP και DL MAP, από μηνύματα περιγραφής του καναλιού άνω και κάτω ζεύξης (Uplink Channel Descriptor και Downlink Channel Descriptor) και από ακαθόριστο αριθμό Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου του στρώματος ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC Protocol Data Units- MAC PDU) . Τα μηνύματα DL- MAP και UL- MAP αναθέτουν υποκανάλια και άλλες πληροφορίες ελέγχου στα υποπλαίσια άνω και κάτω ζεύξης και αποτελούνται από στοιχεία πληροφορίας (Information Elements- IE), ενώ απαρτίζονται από ένα σταθερό και ένα μεταβλητό σχήμα. Το μεταβλητό τμήμα εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών στην άνω και την κάτω ζεύξη που έχει προγραμματιστεί το πλαίσιο.



Σχήμα 4 Δομή Υπο-πλαίσιου Κάτω Ζεύξης [6]

Το υποπλαίσιο άνω ζεύξης περιέχει αρχικά ένα τμήμα δυναμικού συγχρονισμού άνω ζεύξης (UL Ranging Subchannel). Το υποκάνάλι αυτό ανατίθεται στους κινητούς σταθμούς για τη ρύθμιση συχνότητας, ισχύος και χρονισμού. Στη συνέχεια υπάρχει το κανάλι ένδειξης ποιότητας καναλιού άνω ζεύξης (UL Channel Quality Indicator Channel- CQICH), το οποίο περιέχει πληροφορίες που σχετίζονται με την κατάσταση του καναλιού, όπως η παρεμβολή και ο σηματοθορυβικός λόγος. Ακολουθεί το Κανάλι Επιβεβαίωσης Άνω Ζεύξης (Acknowledgement Channel- ACKCH) , το οποίο χρησιμοποιείται από τον κινητό σταθμό για επιβεβαίωση μηνυμάτων που χρησιμοποιούν τεχνικές HARQ (DL HARQ acknowledge) και το τμήμα αιτήσεων εκχώρησης εύρους ζώνης. Τέλος, αντίστοιχα με το υποκάνάλι της άνω ζεύξης, ακολουθούν οι Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου Φυσικού Επιπέδου (PHY PDU) οι οποίες αποτελούνται από επικεφαλίδες και έναν αριθμό ριπών άνω ζεύξης.



Σχήμα 5 Δομή Υπο-πλαίσου Άνω Ζεύξης [6]

2.6 Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου

Το στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control- MAC) του προτύπου 802.16-2001 υλοποιήθηκε για τοπολογία Σημείου προς Πολλαπλά Σημεία. Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και στην κάτω και στην άνω ζεύξη, ενώ η χρήση του φάσματος συχνοτήτων έχει πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Οι αλγόριθμοι ανάθεσης εύρους ζώνης και πρόσβασης υποστηρίζουν πολλά τερματικά ανά κανάλι και πολλοί τελικοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο τερματικό. Οι χρήστες αυτοί μπορεί να χρησιμοποιούν υπηρεσίες φωνής ή δεδομένων με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing- TDM) και σύνδεση IP και VOIP. Το στρώμα ελέγχου πρόσβασης δεδομένων για να μπορεί να ανταποκριθεί στις περιπτώσεις αυτές και να παρέχει αξιόπιστα τις συμφωνημένες υπηρεσίες θα πρέπει να φιλοξενεί είτε συνεχή κίνηση είτε κίνηση διακεκομμένων ριπών (bursty traffic). Εκτός αυτών, λόγω της ανάθεσης ποιότητας υπηρεσίας, το στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου διαθέτει μία μεγάλη γκάμα τύπων υπηρεσίας με νέες κατηγορίες όπως ο εγγυημένος ρυθμός πλαισίου (Guaranteed Frame Rate- GFR).

Το στρώμα MAC είναι συμβατό με αρκετές απαιτήσεις για backhaul, υποστηρίζοντας και τον Ασύρματο Τρόπο Μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode- ATM) και πρωτόκολλα βασισμένα σε πακέτα. Τα υποστρώματα σύγκλισης χρησιμοποιούνται για να μεταβιβάσουν την κίνηση από ποικιλία μέσων μεταφοράς στο στρώμα MAC, ώστε αυτό με τη σειρά του να ανταποκρίνεται σε κάθε τύπο κυκλοφορίας με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

Ο μηχανισμός αίτησης και εκχώρησης (request – grant mechanism) είναι υλοποιημένος στις νόρμες της κλιμάκωσης, της αποδοτικότητας και της δυνατότητας αυτό-διόρθωσης. Το σύστημα παραμένει αποδοτικό, ακόμα και στις πιο αντίξοες συνθήκες, από πλευράς χειρισμού μεγάλης ποσότητας συνδέσεων, επιπέδων υπηρεσίας και χρηστών ανά τερματικό. Λόγω του μεγάλου εύρους μηχανισμών αιτήσεων μπορεί να διαμοιράζει τις αιτήσεις είτε με πρόσβαση χωρίς σύνδεση (connectionless) είτε με πρόσβαση προσανατολισμένη σε σύνδεση (connection oriented).

Οι προδιαγραφές του χρονοπρογραμματισμού και της διαχείρισης κρατήσεων δεν περιλαμβάνονται στο πρότυπο, με αποτέλεσμα οι κατασκευαστές να έχουν τη δυνατότητα παραλλαγών στον εξοπλισμό τους, έχοντας σαν βάση την περιγραφή του προτύπου σε ότι αφορά την κατανομή εύρους ζώνης και τους μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας. Το στρώμα

MAC επίσης έχει και την εποπτεία της ασφάλειας, την οποία διαχειρίζεται το υπόστρωμα ασφαλείας του, παρέχοντας αυθεντικοποίηση πρόσβασης και εγκατάσταση σύνδεσης και ελέγχου κλειδιών κρυπτογράφησης [5] [8]

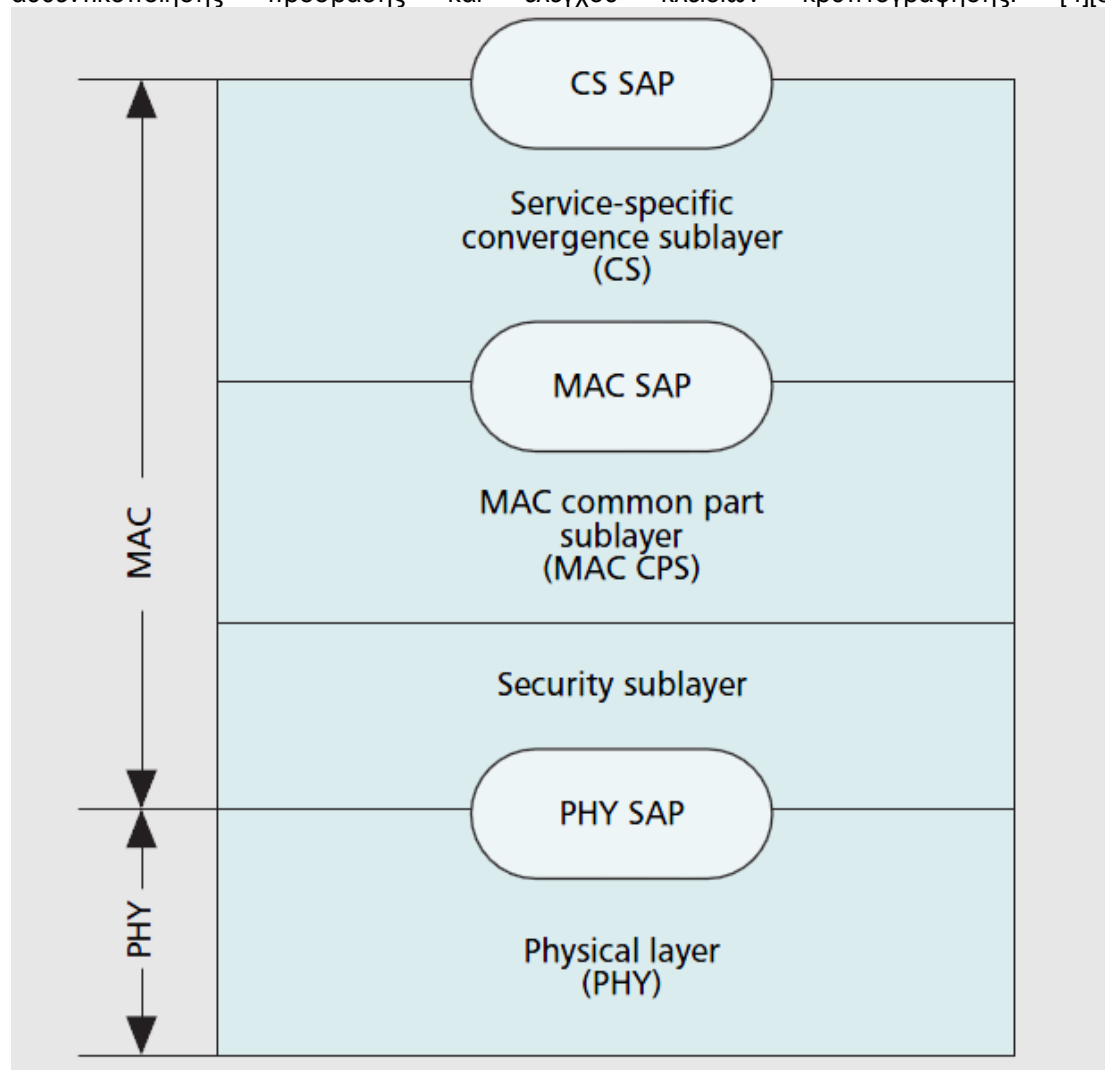
Το στρώμα ελέγχου δεδομένων όπως και σε άλλες τεχνολογίες δικτύων, αποτελεί τη διασύνδεση μεταξύ των ανώτερων επιπέδων του δικτύου και του φυσικού στρώματος. Τα ανώτερα στρώματα στέλνουν δεδομένα προς το στρώμα MAC διαμοιρασμένα σε πακέτα που ονομάζονται Μονάδες Δεδομένων Υπηρεσιών MAC (MAC Service Data Units- MAC SDUs). Βάσει αυτών, δημιουργούνται νέα πακέτα που αποστέλλονται από το στρώμα MAC στο φυσικό στρώμα τα οποία ονομάζονται Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου MAC (MAC Service Data Units- MAC SDUs). Η δομή και το μέγεθος των πακέτων PDU είναι μεταβαλλόμενα καθώς με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υπάρχει η δυνατότητα συμβατότητας με μελλοντικά πρωτόκολλα. Αυτό σημαίνει ότι πολλές PDUs ανεξαρτήτως μεγέθους μπορούν να υπεισέρχονται σε μία μεγαλύτερη PDU με κοινή επικεφαλίδα με σκοπό την αποφυγή διακίνησης μεγάλου όγκου πληροφοριών σηματοδοσίας στο φυσικό στρώμα. Εκτός αυτού, πολλές SDUs προερχόμενες από την ίδια υπηρεσία υψηλότερου στρώματος μπορούν να συγκεντρωθούν στην ίδια PDU για αποφυγή πλειάδας επικεφαλίδων στο στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου.

Σύνδεση (Connection) , αποκαλείται η αντιστοίχιση μεταξύ ομότιμων στρωμάτων MAC μέσω της ραδιοζεύξης. Κάθε σύνδεση κατέχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό που ονομάζεται Connection ID- CID. [8]

2.6.1 Δομή Στρώματος MAC 802.16-2001

Το στρώμα MAC του προτύπου χωρίζεται σε τρία υποστρώματα τα οποία αναλαμβάνουν διαφορετικές λειτουργίες. Το πρώτο είναι το Υπόστρωμα Σύγκλισης (Service - Specific Convergence Sublayer – CS) , το οποίο συνδέεται με τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου και είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των δεδομένων που φτάνουν στο επίπεδο πρόσβασης ελέγχου δεδομένων από τα σημεία πρόσβασης υπηρεσίας (Service Access points – SAPs). Κάτω από το υπόστρωμα σύγκλισης υπάρχει το Υπόστρωμα Κοινού Τμήματος (Common Part Sublayer- CPS), το οποίο είναι υπεύθυνο για τις βασικές λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης δεδομένων. Το τρίτο υπόστρωμα, πριν το φυσικό επίπεδο είναι το Υπόστρωμα Ασφάλειας (Security Sublayer- SS), το οποίο παρέχει υπηρεσίες

αυθεντικοποίησης πρόσβασης και ελέγχου κλειδιών κρυπτογράφησης. [4][5]



Σχήμα 6 Πρότυπο Αναφοράς Πρωτοκόλλου 802.16 [9]

2.6.1.1 Υπόστρωμα Σύγκλισης

Το πρότυπο 802.16-2001 ορίζει δύο ειδών υποστρώματα σύγκλισης. Το υπόστρωμα σύγκλισης ATM, το οποίο αφορά υπηρεσίες ATM και το υπόστρωμα σύγκλισης πακέτου, το οποίο σχετίζεται με υπηρεσίες διασύνδεσης με πρωτόκολλα που αφορούν μετάδοση πακέτων (IP, Ethernet, VLAN). Ο βασικός ρόλος του υποστρώματος είναι η αντιστοίχιση των λαμβανόμενων SDUs σε συνδέσεις MAC, καθορίζοντας την κατηγορία ποιότητας υπηρεσίας και αναθέτοντας εύρος ζώνης στις μονάδες αυτές. Η αντιστοίχιση ποικίλει ανάλογα με τον τύπο υπηρεσίας.

Τα στοιχεία που επαναλαμβάνονται στις επικεφαλίδες των λαμβανόμενων SDUs, συμπιέζονται μέσω της λειτουργίας Συμπύεση Επικεφαλίδων (Header Suppression) με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση πόρων. Σε περίπτωση για παράδειγμα που φτάνουν από τα ανώτερα επίπεδα στο στρώμα σύγκλισης μονάδες SDU πακέτων IP, συμπιέζονται οι επικεφαλίδες που περιέχουν τα στοιχεία του αποστολέα και του παραλήπτη, εξοικονομώντας με τον τρόπο αυτό ραδιοπόρους από το δίκτυο και αυξάνοντας την απόδοσή του.

2.6.1.2 Υπόστρωμα Κοινού Τμήματος

Το επίπεδο πρόσβασης ελέγχου δεδομένων του προτύπου WiMAX είναι προσανατολισμένο σε συνδεοστρεφείς υπηρεσίες (connection-oriented), επομένως το σύνολο των λειτουργιών και των υπηρεσιών του στρώματος αντιστοιχίζονται με μία σύνδεση. Για κάθε σύνδεση λοιπόν ενεργοποιείται ένας μηχανισμός αίτησης εύρους ζώνης, αντιστοίχισης ποιότητας υπηρεσίας και καταχώρησης παραμέτρων δρομολόγησης και μετάδοσης δεδομένων. Οι συνδέσεις λαμβάνουν ένα ξεχωριστό αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection ID- CID) μήκους 16 Bit και απαιτούν εκχώρηση εύρους ζώνης. Για την αποδοτικότερη διαχείριση των συνδέσεων στο στρώμα MAC, καθεμία περιγράφεται από συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες σχετίζονται με την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τον τερματισμό τους.

Οι Σταθμοί Συνδρομητών (SSs) έχουν μία σταθερή διεύθυνση MAC μεγέθους 48 bit. Οι διευθύνσεις αυτές αποτελούν αναγνωριστικά εξοπλισμού και όχι αναγνωριστικά των διευθύνσεων, μιας και το ρόλο αυτό τον έχουν αναλάβει τα CIDs. Αντίστοιχα, ούτε το αναγνωριστικό των σταθμών βάσης (Base Station ID) αποτελεί διεύθυνση MAC. Όταν ένας σταθμός συνδρομητή εισέρχεται σε ένα δίκτυο, του ανατίθενται τρεις συνδέσεις. Η πρώτη είναι η βασική (basic), η οποία είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά μικρών MAC και μηνυμάτων ελέγχου ραδιοζεύξης (Radio Link Control- RLC). Η δεύτερη είναι η κύρια (primary), η οποία χρησιμοποιείται για μεταφορά μεγαλύτερων μηνυμάτων στα οποία υπάρχει η αναγκαιότητα της αντοχής στη χρονοκαθυστέρηση, όπως τα μηνύματα αυθεντικοποίησης- εγκατάστασης σύνδεσης. Τρίτον, υπάρχει η δευτερεύουσα (secondary) σύνδεση διαχείρισης, η οποία χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων των προτύπων διαχείρισης (TFTP, DHCP, SNMP). Τέλος, ανατίθενται στο σταθμό συνδρομητή και συνδέσεις μεταφοράς (Transfer Connections) για τις υπηρεσίες του SLA, οι οποίες είναι αμφίδρομες ώστε να υποστηρίζουν και τις δύο ζεύξεις. Εκτός αυτών υπάρχουν και συνδέσεις για άλλες λειτουργίες. Συνδέσεις κρατούνται για την ευρυεκπομπή (broadcast) της κάτω ζεύξης, καθώς και για την ευρυεκπομπή σηματοδότησης σχετιζόμενης με τις εκχωρήσεις εύρους ζώνης και την πολυεκπομπή (multicast).

Η μονάδα δεδομένων που ανταλλάσσεται μεταξύ του επιπέδου MAC του σταθμού βάσης και του επιπέδου MAC των σταθμών συνδρομητή ονομάζεται Μονάδα Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Unit- PDU). Η μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου απαρτίζεται από μία επικεφαλίδα σταθερού μήκους (header), ένα μεταβλητού μήκους χρήσιμο τμήμα (payload) κι ένα τμήμα ελέγχου κυκλικού πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check- CRC) το οποίο είναι προαιρετικό. Υπάρχουν δύο τύποι επικεφαλίδων, οι επικεφαλίδες γενικού τύπου και οι επικεφαλίδες αίτησης εύρους ζώνης. Στο χρήσιμο τμήμα τους, οι μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου, περιλαμβάνουν είτε δεδομένα του υποστρώματος σύγκλισης, είτε μηνύματα διαχείρισης στρώματος MAC. Εξάιρεση αποτελούν οι PDU αιτήσεις εύρους ζώνης, οι οποίες δεν εμπεριέχουν χρήσιμο τμήμα.

Στο στρώμα MAC περιλαμβάνονται τρία είδη υποκεφαλίδας (sub header). Η πρώτη είναι υποκεφαλίδα διαχείρισης εκχώρησης (grant management sub header), την οποία χρησιμοποιεί ο Σταθμός Συνδρομητή για μετάδοση των αναγκών του για εύρος ζώνης στο Σταθμό Βάσης. Υπάρχει επίσης η υποκεφαλίδα κατακερματισμού (fragmentation sub header), η οποία περιέχει πληροφορίες που σχετίζονται με τη διάσπαση μία μονάδας SDU που έρχεται από ανώτερα στρώματα. Τέλος, υπάρχει και η υποκεφαλίδα συσκευασίας (packing sub header) η οποία περιέχει αντίστοιχα πληροφορίες περιπτώσεων όπου δύο ή παραπάνω μονάδες SDU έχουν σχηματίσει μία μονάδα PDU. Οι υποκεφαλίδες διαχείρισης εκχώρησης εύρους ζώνης και κατακερματισμού βρίσκονται στην PDU αμέσως μετά τη γενική επικεφαλίδα, ενώ η υποκεφαλίδα συσκευασίας τοποθετείται πριν από κάθε MAC SDU.

2.6.1.3 Υπόστρωμα Ασφαλείας

Το υπόστρωμα ασφαλείας είναι υπεύθυνο για την ομαλή διεξαγωγή των λειτουργιών που πραγματοποιούνται στο στρώμα MAC για την προστασία των δεδομένων, σε περιπτώσεις μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Συμπεριλαμβάνει δομές που προστατεύουν τις υποκλοπές πληροφοριών που μεταφέρονται εντός του δικτύου, όπως είναι η διαδικασία επαλήθευσης ταυτότητας, η διαδικασία διαχείρισης κλειδιών ασφαλείας και η διαδικασία κρυπτογράφησης δεδομένων. Οι λειτουργίες του υποστρώματος ασφαλείας παρουσιάζονται παρακάτω σε εδάφιο επεξήγησης των μεθόδων ασφαλείας του προτύπου.

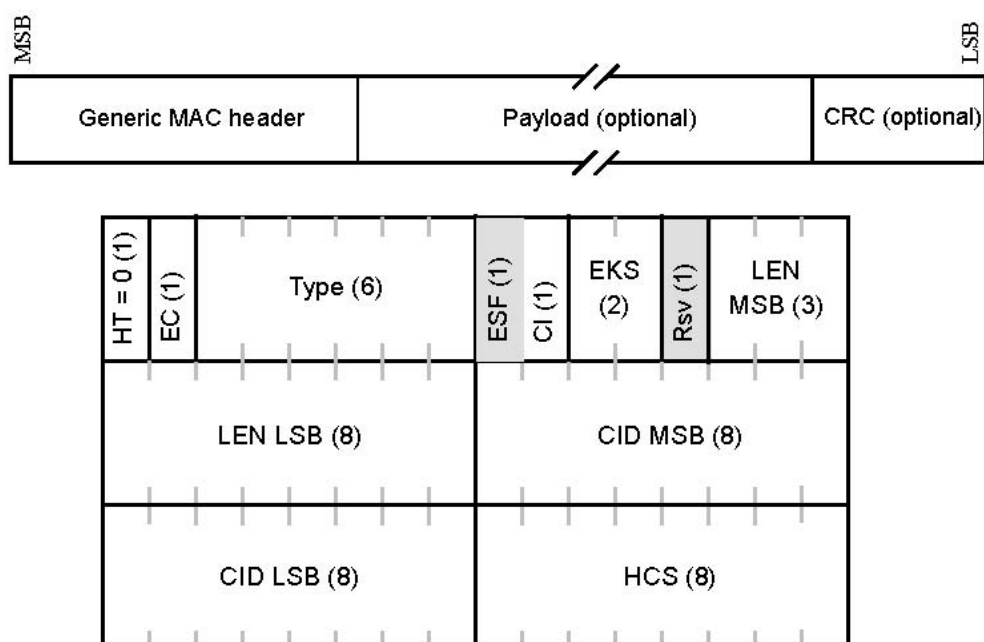
2.6.2 Δομή Στρώματος MAC 802.16a

Το πρότυπο 802.16a περιέχει όλες τις δομές του προκατόχου του στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου, αλλά λόγω των διαφοροποιήσεων και των προσθηκών του, συμπεριλαμβάνει και νέες υπηρεσίες και υλοποιήσεις. Πρώτη εξ' αυτών είναι η εισαγωγή των αυτόματων αιτήσεων επαναμετάδοσης (Automatic Repeat reQuests- ARQ). Γενικώς, ο δέκτης οφείλει να επιβεβαιώνει την ορθή λήψη πακέτων. Στις περιπτώσεις που ο πομπός δε λαμβάνει μήνυμα επιβεβαίωσης ορθής λήψης από το δέκτη μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θεωρείται ότι το απεσταλμένο πακέτο έχει χαθεί και επαναμεταδίδεται. Επίσης, στο στρώμα MAC πλέον χρησιμοποιούνται προσαρμοστικά συστήματα κεραιών (Adaptive Antenna Systems- AAS) εξελίσσοντας τη διάδοση του προτύπου. Τέλος, στο στρώμα MAC υποστηρίζεται και η αρχιτεκτονική δικτύου πλέγματος (mesh), πέρα από την τοπολογία σημείου προς πολλαπλά σημεία. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει την απευθείας επικοινωνία μεταξύ σταθμών συνδρομητή, χωρίς την παρεμβολή του σταθμού βάσης. [8]

2.6.2.1 Σχηματισμός και Διαχείριση Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου MAC

Σύμφωνα με το μέγεθος των μονάδων δεδομένων υπηρεσίας (SDUs) που φτάνουν στο υπόστρωμα Κοινού Τμήματος (Common Part Sublayer- CPS) από τα ανώτερα επίπεδα, σχηματίζονται MPDUs είτε με συνένωση πολλών SDUs είτε με τον κατακερματισμό μίας. Για τη βελτίωση της κατανάλωσης των πόρων του δικτύου, οι MPDUs που αποστέλλονται προς τον ίδιο δέκτη συνενώνονται και μεταδίδονται σε μία περιοχή δεδομένων χρήστη. Όταν επιβληθεί κατάτμηση μίας SDU σε μία ή περισσότερες MPDUs, χρησιμοποιούνται πλέον τεχνικές επαναμετάδοσης ARQ. Έτσι, στα μέρη της SDU που έχουν δημιουργηθεί μετά την κατάτμησή της γίνεται ανάθεση ενός χαρακτηριστικού αριθμού και θεωρείται επιτυχής η αποστολή τους στο δέκτη, όταν επιβεβαιώσει τη λήψη όλων των πακέτων. Σε προηγούμενα πρότυπα τα πακέτα MPDU που δημιουργούνταν, αποστέλλονταν με τη σειρά που είχαν εντός της SDU.

Η μονάδα MPDU αποτελείται από μία επικεφαλίδα, ένα χρήσιμο τμήμα και το τμήμα ελέγχου κυκλικού πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check- CRC). Το τμήμα CRC στην υλοποίηση της μονής φέρουσας είναι προαιρετικό, σε αντίθεση με όλες τις υπόλοιπες υλοποιήσεις. Η επικεφαλίδα συμπεριλαμβάνει το αναγνωριστικό της σύνδεσης (CID), το μέγεθος της MPDU, το κλειδί κρυπτογράφησης (αν το χρήσιμο τμήμα είναι κρυπτογραφημένο) και ένα τμήμα για την επαλήθευση των δεδομένων της (Header Check Sequence- HCS).



Σχήμα 7 Επικεφαλίδα MPDU γενικής χρήσης [10]

Όπως και στα παλιότερα πρότυπα υπάρχουν MPDUs γενικής χρήσης και MPDUs αίτησης εύρους ζώνης. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται από το σταθμό βάσης, ώστε να ζητήσουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης για την άνω ζεύξη προς το σταθμό βάσης. Στις MPDUs αίτησης εύρους ζώνης δεν περιέχεται χρήσιμο τμήμα και έλεγχος κυκλικού πλεονασμού.

Στις ήδη υπάρχουσες υποκεφαλίδες (διαχείρισης εκχώρησης, κατακερματισμού, συσκευασίας), προστίθενται και η υποκεφαλίδα πλέγματος (Mesh sub header) και η υποκεφαλίδα ανάθεσης γρήγορης ανάδρασης (FAST- FEEDBACK allocation sub header) η οποία χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή τεχνικών MIMO.

Αφού σχηματιστεί η MPDU, εκχωρούνται πόροι από τον αλγόριθμο προγραμματισμού (scheduling algorithm) και γίνεται η μετάδοση μέσω του φυσικού στρώματος. Ο αλγόριθμος προγραμματισμού επεξεργάζεται το αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας (Service Flow ID- SFID) και το αναγνωριστικό σύνδεσης (CID) και μέσω αυτών καταδεικνύει τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας της MPDU. Μετά από τη διεξαγωγή της διαδικασίας αυτής για πλειάδα MPDUs, ο αλγόριθμος κατανέμει καταλλήλως τους πόρους σε καθεμία από αυτές. Μολονότι ο αλγόριθμος προγραμματισμού είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση του δικτύου, δεν περιλαμβάνεται στις προδιαγραφές του προτύπου, αλλά αφήνεται στην ευχέρεια των κατασκευαστών. [4][11]

2.6.2.2 Αίτηση/ Εκχώρηση Εύρους Ζώνης

Το υπόστρωμα κοινού τμήματος του επιπέδου MAC είναι υπεύθυνο και για τις διαδικασίες αίτησης και εκχώρησης εύρους ζώνης της άνω και της κάτω ζεύξης. Στην άνω ζεύξη, ο σταθμός συνδρομητή αποστέλλει MPDUs αιτήσεων εύρους ζώνης ή γενικής χρήσης με υποκεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης προς το σταθμό βάσης. Ο σταθμός συνδρομητή μπορεί να αιτηθεί είτε αύξηση των πόρων που του εκχωρούνται ήδη (incremental bandwidth request) είτε να κάνει αίτηση για νέους πόρους οι οποίοι θα αντικαταστήσουν τους παλιούς (aggregate request). Τα αιτήματα για αύξηση των πόρων (incremental bandwidth requests) μπορούν να εντάσσονται σε MPDUs γενικής μορφής, σε αντίθεση με τα αιτήματα για νέους πόρους (aggregate requests), τα οποία μεταφέρονται σε ειδική MPDU. Στην κάτω ζεύξη, ο σταθμός βάσης αποκλειστικά διαχειρίζεται τη διαδικασία εκχώρησης εύρους ζώνης χωρίς τη συμμετοχή του σταθμού συνδρομητή. Αυτό συμβαίνει μετά από επεξεργασία των

λαμβάνομενων MPDUs για κάθε σύνδεση, οπότε και ενημερώνει το σταθμό βάσης με DL-MAP.

Στους σταθμούς συνδρομητών που κατέχουν πλειάδα συνδέσεων, εκχωρούνται πόροι για το σύνολό τους από το σταθμό βάσης. Αν οι πόροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεν αρκούν για όλες τις συνδέσεις, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού του σταθμού συνδρομητή, ο οποίος κάνει την κατάλληλη κατανομή των πόρων στις συνδέσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας τους.

Για την αίτηση εκχώρησης εύρους ζώνης από τους σταθμούς συνδρομητή προς το σταθμό βάσης, ο τελευταίος τους εκχωρεί εύρος ζώνης ειδικά για το λόγο αυτό μέσω της διαδοχικής διερεύνησης (polling). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται ανά σταθμό συνδρομητή, σε αντίθεση με τις αιτήσεις για εύρος ζώνης που γίνονται ανά σύνδεση. Οι πόροι για διαδοχική διερεύνηση μπορούν να δοθούν μέσω του unicast polling σε μία ομάδα σταθμών συνδρομητή, είτε μέσω multicast ή broadcast polling στο σύνολο των σταθμών. [4]

2.6.3 Δομή Στρώματος MAC 802.16e-2005

Στο επίπεδο MAC του προτύπου υιοθετούνται οι υλοποιήσεις των προηγούμενων προτύπων και υπεισέρχονται προσθήκες ώστε να υποστηρίζεται η κινητικότητα των χρηστών. Πιο σημαντικές προσθήκες είναι αυτή των μεταπομπών και των μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας. Υπάρχει επίσης επικαιροποίηση στις δομές ελέγχου και πιστοποίησης ταυτότητας, καθώς και στην παροχή υπηρεσιών. Στο πρότυπο εντάσσεται η υπηρεσία Extended Real-Time Polling Service (ErtPS), η οποία παρέχει μετάδοση φωνής μέσω διαδικτύου (VOIP).

2.6.3.1 Διαχείριση Κινητικότητας

Το στρώμα MAC, λόγω της υποστήριξης κινητικότητας που παρέχει το πρότυπο στους χρήστες, έχει υλοποιήσει δομές προς αυτή την κατεύθυνση. Η σημαντικότερη είναι η υποστήριξη των μεταπομπών. Ως μεταπομπή (Handoff) ορίζεται η μετακίνηση του κινητού σταθμού από ένα κυψελωτό σύστημα ραδιοπρόσβασης σε ένα άλλο, και κατ' επέκταση οι δομές που διέπουν τη μετακίνηση αυτή. Υπάρχουν τρεις τύποι μεταπομπής, η «σκληρή» μεταπομπή (Hard Handoff- HHO), η μεταπομπή γρήγορης μεταγωγής σταθμού βάσης (Fast Base Station Switching - FBSS), και η μεταπομπή με διαφορισμό σταθμού βάσης (Macro Diversity Handover - MDHO). [4][11]

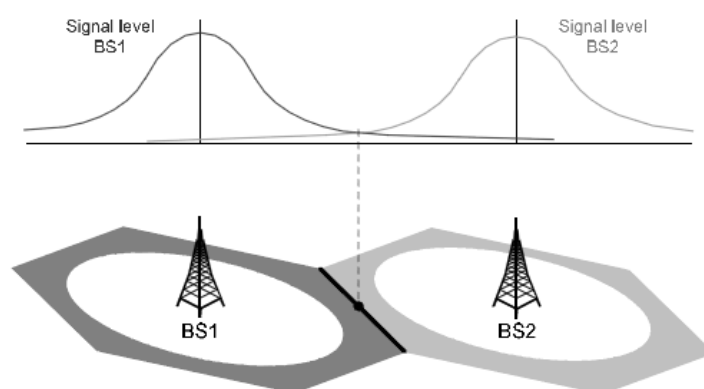
2.6.3.2 «Σκληρή» μεταπομπή (Hard Handoff- HHO)

Σύμφωνα με τη μέθοδο της «σκληρής» μεταπομπής, ο κινητός σταθμός ελέγχει σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους τις ζεύξεις του με γειτονικούς σταθμούς βάσης και ελέγχει τους πιθανότερους από αυτούς, στους οποίους μπορεί να μεταπηδήσει. Την έναρξη της μεταπομπής μπορεί να την ορίσει είτε ο ίδιος ο κινητός σταθμός είτε να επιληφθεί ο σταθμός βάσης. Στην πρώτη περίπτωση, ο κινητός σταθμός εκπέμπει ένα μήνυμα MOB_MSHO-REQ προς το σταθμό βάσης, με το οποίο τον ενημερώνει για την πρόθεσή του να μεταπηδήσει σε άλλο σταθμό βάσης και γνωστοποιεί μία λίστα με πιθανούς προορισμούς. Ακολούθως, ο σταθμός βάσης αποστέλλει ένα μήνυμα MOB_BSHO-RSP, μέσω του οποίου ενημερώνει τον κινητό σταθμό για τους επιτρεπτούς προορισμούς και τέλος ο κινητός σταθμός ενημερώνει το δίκτυο για την επιλογή του μέσω μηνύματος (MOB_MSHO-IND). Στην περίπτωση που ο σταθμός βάσης εκτελεί την έναρξη της μεταπομπής, αποστέλλει ένα μήνυμα MOB_BSHO-REQ στον κινητό σταθμό μέσω του οποίου του δίνει εντολή να πραγματοποιήσει μεταπομπή, ενώ παράλληλα του παραθέτει τους επιτρεπτούς προορισμούς. Ο κινητός σταθμός επιβεβαιώνει στη συνέχεια τη λήψη της εντολής μεταπομπής και ενημερώνει για την επιλογή

του μέσω μηνύματος MOB_MSHO-IND. Ο κινητός σταθμός μπορεί οποιαδήποτε στιγμή μετά την έναρξη της μεταπομπής να διακόψει τη διαδικασία.

Αφού γίνει η επιλογή του σταθμού βάσης προορισμού από τον κινητό σταθμό, πραγματοποιείται συγχρονισμός μεταξύ τους. Ο κινητός σταθμός δέχεται τις πληροφορίες συγχρονισμού μέσω της επικεφαλίδας των πλαισίων εκπομπής της κάτω ζεύξης του σταθμού βάσης. Επίσης, ενημερώνεται για το κανάλι δυναμικού συγχρονισμού (ranging channel), μέσω του οποίου πραγματοποιείται ενδεχόμενη ανάκτηση δεδομένων συγχρονισμού.

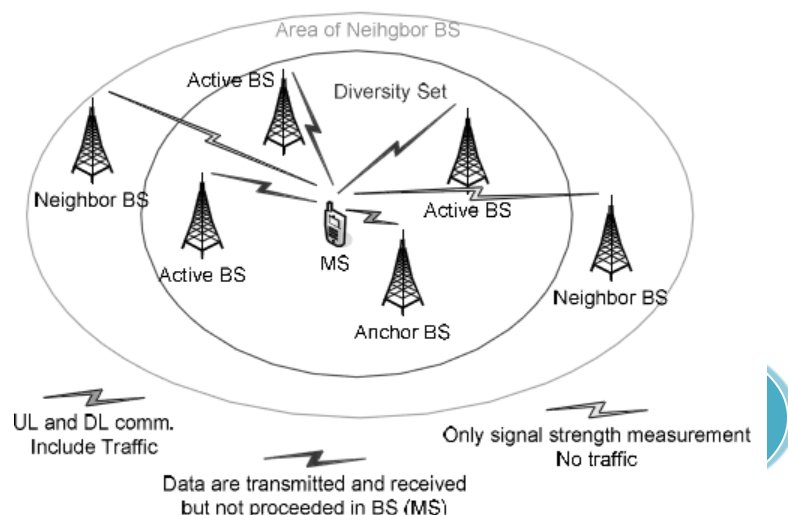
Εφόσον πραγματοποιηθεί η εγκαθίδρυση της σύνδεσης με το σταθμό βάσης προορισμού, ο κινητός σταθμός ενημερώνει μέσω μηνύματος τον αρχικό σταθμό βάσης για την επιτυχή μεταπομπή. Ο αρχικός σταθμός βάσης αφού κρατήσει για ένα χρονικό διάστημα τους απαιτούμενους πόρους για τον μεταπομπευθέντα κινητό σταθμό, τους αποδεσμεύει στο χρονικό σημείο που θεωρεί ότι πραγματοποιήθηκε ορθά η μεταπομπή. Σε ενδεχόμενη διακοπή σύνδεσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της μεταπομπής, πραγματοποιείται διακοπή κλήσης (call drop) και ο κινητός σταθμός πρέπει να εισέλθει εξ' αρχής στο δίκτυο.



Σχήμα 8 Πραγματοποίηση «σκληρής» μεταπομπής [12]

2.6.3.3 Μεταπομπή γρήγορης μεταγωγής σταθμού βάσης (Fast Base Station Switching – FBSS)

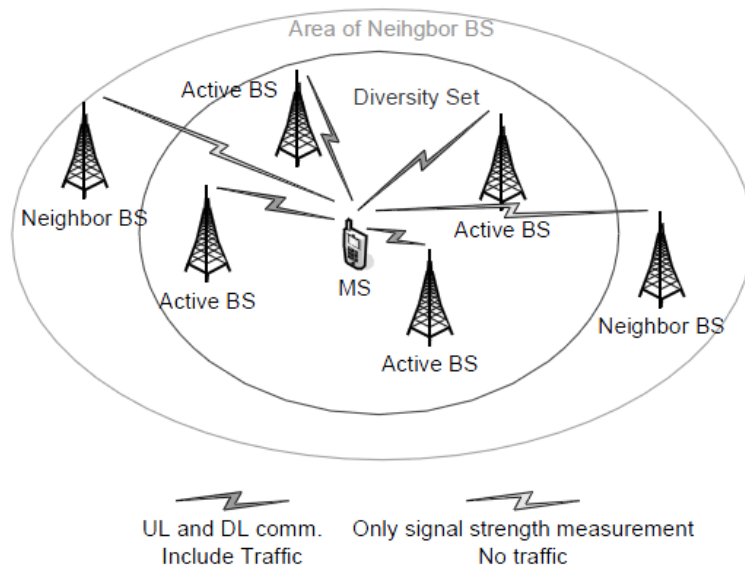
Σύμφωνα με τη μέθοδο γρήγορης μεταγωγής σταθμού βάσης, υπάρχει για κάθε κινητό σταθμό μία λίστα σταθμών βάσης από τους οποίους μπορεί να εξυπηρετηθεί. Η λίστα αυτή ονομάζεται ενεργό σύνολο (Active Set). Ένας από τους σταθμούς βάσης που περιέχονται στο ενεργό σύνολο αποτελεί το βασικό (Anchor BS). Ο βασικός σταθμός βάσης είναι αυτός που εξυπηρετεί τον κινητό σταθμό για όλες τις δικτυακές υπηρεσίες που μπορεί να του παρέχονται. Για τη μεταπομπή από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο, αρχικά ο κινητός σταθμός αποφασίζει ότι η αποστολή και η λήψη δεδομένων θα πραγματοποιείται από σταθμό βάσης εκτός ενεργού συνόλου. Πραγματοποιεί λοιπόν μία σάρωση στους γειτονικούς σταθμούς βάσης και επιλέγει τους κατάλληλους για να απαρτίσουν το active set. Έπειτα, καταγράφει τους σταθμούς αυτούς και πραγματοποιείται η διαδικασία αλλαγής των σταθμών του ενεργού συνόλου και από τα δύο μέρη. Αφού γίνει έλεγχος της έντασης του σήματος που εκπέμπουν οι σταθμοί βάσης από τον κινητό σταθμό, ο τελευταίος επιλέγει το βασικό σταθμό βάσης του ενεργού συνόλου. Για να ολοκληρωθεί η μεταπομπή, βασική προϋπόθεση είναι να αποστέλλονται ταυτοχρόνως τα δεδομένα σε όλο το ενεργό σύνολο.



Σχήμα 9 Πραγματοποίηση μεταπομπή με τη μέθοδο γρήγορης μεταγωγής σταθμού βάσης [12]

2.6.3.4 Μεταπομπή με διαφορισμό σταθμού βάσης (Macro Diversity Handover – MDHO)

Σύμφωνα με τη μέθοδο μεταπομπής με διαφορισμό σταθμών βάσης, ένας κινητός σταθμός μπορεί να χρησιμοποιεί για την εξυπηρέτησή του πάνω από ένα σταθμό βάσης. Λόγω αυτής της απαίτησης χρησιμοποιείται ένα ενεργό σύνολο σταθμών βάσης, όπως συμβαίνει και στην μεταπομπή γρήγορης μεταγωγής σταθμού βάσης. Μία μορφή της μεθόδου, είναι η περίπτωση κατά την οποία το ενεργό σύνολο συμπεριλαμβάνει μόνο τον προορισμό της μεταπομπής. Σε αυτή την περίπτωση, ο κινητός σταθμός επικοινωνεί με όλους τους σταθμούς βάσης του ενεργού συνόλου μέσω multicasting προς τις δύο ζεύξεις. Η έναρξη της μεταπομπής ορίζεται όταν ο κινητός σταθμός αποφασίσει να αποστείλει ή να λάβει δεδομένα από πολλαπλούς σταθμούς βάσης ταυτόχρονα. Για τη μεταπομπή κάτω ζεύξης, περισσότεροι του ενός σταθμοί βάσης αποστέλλουν στον Κ.Σ. συγχρονισμένα δεδομένα με τρόπο που να μπορεί να τους συνδυάσει. Για τη μεταπομπή άνω ζεύξης αντίστοιχα, όλοι οι σταθμοί βάσης του ενεργού συνόλου λαμβάνουν και αποκωδικοποιούν τα σήματα που εκπέμπει ο κινητός σταθμός και τα προωθούν στο βασικό σταθμό βάσης, ο οποίος επιλέγει αυτά με τα λιγότερα σφάλματα. Το πρότυπο δεν περιγράφει τη μέθοδο συνδυασμού των δεδομένων.



Σχήμα 10 Πραγματοποίηση μεταπομπής με μέθοδο διαφορισμού σταθμών βάσης [12]

2.6.3.5 Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας

Στο πρότυπο 802.16e-2005 δίνεται πολύ μεγάλη σημασία στην εξοικονόμηση ενέργειας των κινητών σταθμών ώστε να αυξάνεται η αυτονομία τους. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητός σταθμός σε χρονικές στιγμές που δε χρησιμοποιεί ή βρίσκονται σε αδράνεια κάποια τμήματά του, οφείλει να τα απενεργοποιεί ώστε να μην καταναλώνουν ενέργεια. Για το λόγο αυτό, στο πρότυπο χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι, η κατάσταση νάρκης (sleep mode) και η κατάσταση αδράνειας (idle mode).

Η κατάσταση νάρκης, είναι η κατάσταση κατά την οποία ο σταθμός βάσης απέχει από τη ραδιοεπαφή για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Αυτό συμβαίνει όταν ο σταθμός βάσης αντιλαμβάνεται τη μη διαθεσιμότητα του κινητού σταθμού μέσω της κίνησης της άνω και κάτω ζεύξης. Από τη στιγμή που έστω και μία σύνδεση του κινητού σταθμού είναι ενεργή, ο Κ.Σ. θεωρείται διαθέσιμος (available). Στις περιπτώσεις αντίθετα που το σύνολο των συνδέσεων του είναι ανενεργό, ο Κ.Σ. θεωρείται μη διαθέσιμος (unavailable). Η κατάσταση αυτή εκτός από την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από τον κινητό σταθμό, ωθεί και στην μείωση των ραδιοπύρων που καταναλώνει ο σταθμός βάσης. Επίσης, ο κινητός σταθμός μπορεί να σαρώνει άλλους σταθμούς βάσης για τη συλλογή πληροφοριών κατά την κατάσταση νάρκης του B.S. Βάσει του προτύπου καθορίζονται τρεις κλάσεις εξοικονόμησης ενέργειας βάσει των οποίων προβλέπεται η χρονική διάρκεια του sleep mode. Η πρώτη κλάση είναι η Power Save Class 1, κατά την οποία το μέγεθος του παραθύρου ύπνου αυξάνεται εκθετικά από ένα ελάχιστο προκαθορισμένο σύνολο χρονικών μονάδων σε ένα μέγιστο. Τύποι ροών υπηρεσίας στους οποίους χρησιμοποιείται είναι οι best effort και οι non real time. Η δεύτερη κλάση είναι η Power Save Class 2 κατά την οποία το παράθυρο ύπνου παραμένει σταθερό και χρησιμοποιείται σε UGS υπηρεσίες. Τέλος, υπάρχει η Power Save Class 3 βάσει της οποίας χρησιμοποιείται ένα one time παράθυρο ύπνου, κυρίως για multicast όπου είναι γνωστό πότε αναμένεται η επόμενη ροή.

Κατά την κατάσταση αδράνειας, ο σταθμός βάσης ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ορίζεται διαθέσιμος για λήψη μηνυμάτων ευρυεκπομπής (broadcast) από σταθμούς βάσης που δεν έχουν καταχωρηθεί. Αυτή η λειτουργία ωφελεί τους κινητούς σταθμούς, αφού μετακινούνται χωρίς να υπάρχει ανάγκη μεταπομπών και άλλων λειτουργιών όταν δεν έχουν ενεργές συνδέσεις. Φυσικά, με την ελαχιστοποίηση των άσκοπων μεταπομπών και τη

μείωση της κίνησης προς ανενεργούς σταθμούς επωφελούνται επίσης και οι σταθμοί βάσης, οι οποίοι έχουν ενεργό ρόλο στις περιπτώσεις αυτές. (WiMAX Forum, 2006a)

2.6.3.6 Ασφάλεια

Το WiMAX δίκτυο μέσω των κατάλληλων μεθόδων παρέχει τις ακόλουθες λειτουργίες στον τομέα της ασφάλειας:

- **Ιδιωτικότητα-** Τα στοιχεία των χρηστών είναι κρυπτογραφημένα ώστε να υπάρχει ιδιωτικότητα. Τα πρότυπα κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται είναι το AES (Advanced Encryption Standard) και το 3DES (Triple Data Encryption), ενώ τα κλειδιά είναι μεγέθους 128 ή 256 bit.
- **Αυθεντικοποίηση Χρηστών και Συσκευών-** Η αυθεντικοποίηση γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου EAP (Extensible Authentication Protocol) το οποίο υποστηρίζει πιστοποιητικά όπως username/password, ψηφιακά πιστοποιητικά και έξυπνες κάρτες. Οι τερματικές συσκευές συμπεριλαμβάνουν ψηφιακά πιστοποιητικά X.509 στα οποία περιέχεται το κλειδί τους και η διεύθυνση MAC.
- **Ευέλικτο Πρωτόκολλο Διαχείρισης Κλειδιών-** Μέσω του πρωτοκόλλου PKMv2 (Key Management Protocol version 2 είναι δυνατή η ασφαλής μεταφορά του υλικού διαμόρφωσης από το σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό. Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει την ανανέωση των κλειδιών ενώ έχει client-server χαρακτήρα με το σταθμό βάσης να παίζει το ρόλο του server και τον κινητό σταθμό αυτόν του client.
- **Προστασία Μηνυμάτων Ελέγχου-** Τα μηνύματα ελέγχου προστατεύονται με τη χρήση σχημάτων αφομοίωσης CMAC (Cypher based Message Authentication Code) και HMAC (Hash based Message Authentication Code), μέσω των οποίων πραγματοποιείται η μετάδοσή τους.
- **Υποστήριξη Γρήγορου Handover-** Μέσω της υποστήριξης three way handshake σχημάτων για την αυθεντικοποίηση/ επαναυθεντικοποίηση, το πρότυπο WiMAX κάνει εφικτή την επιταχυνόμενη είσοδο/ επανείσοδο ενός κινητού σταθμού σε νέα κυψέλη. Πιο συγκεκριμένα με τη χρήση της μεθόδου αυτής ο σταθμός βάσης μπορεί να επιτρέψει το γρήγορο handover στον κινητό σταθμό μετά την αυθεντικοποίησή του.

2.7 Αρχιτεκτονική Δικτύου

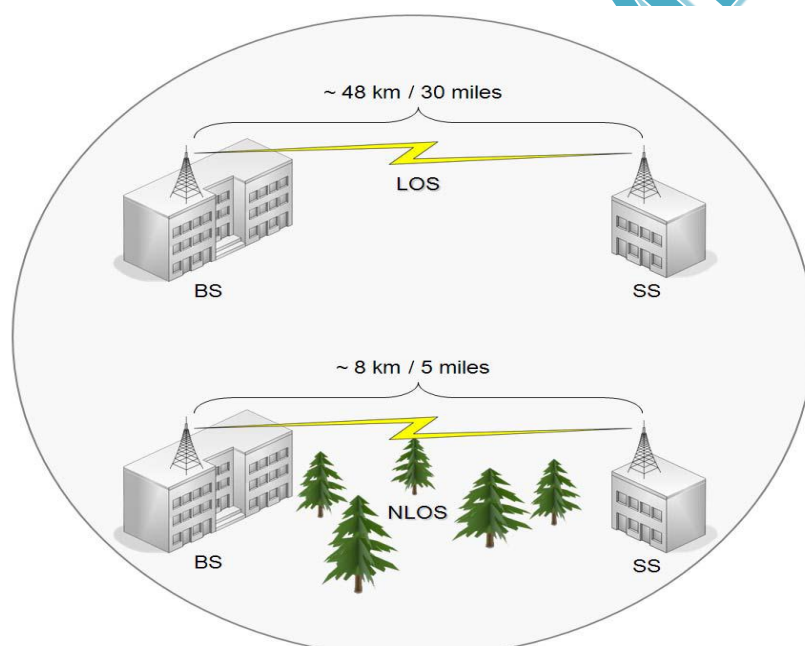
Το δίκτυο WiMAX συγκροτείται από τους Σταθμούς Βάσης (Base Stations- BSs), τους Σταθμούς Συνδρομητή (Subscribers Stations- SSS) και συνδέσεις μεταξύ τους βάσει της τοπολογίας σημείου προς πολλαπλά σημεία. Από την υλοποίηση του προτύπου IEEE 802.16e κι έπειτα, μετά την ένταξη των κινούμενων χρηστών στο δίκτυο, οι Σταθμοί Συνδρομητή ονομάζονται Κινητοί Σταθμοί (Mobile Stations – MS)s. Η ασύρματη σύνδεση που παρέχεται στους Κινητούς Σταθμούς από τους Σταθμούς Βάσης προέρχεται από το δίκτυο κορμού με το οποίο είναι συνδεδεμένος κάθε BS, το οποίο μπορεί να είναι οπτική ίνα ή άλλο ασύρματο ή ενσύρματο δίκτυο. Η διασύνδεση των σταθμών βάσεων με το δίκτυο κορμού δεν εμπεριέχεται στις προδιαγραφές του προτύπου WiMAX.

Οι χρήσεις του δικτύου WiMAX ποικίλουν, αφού υπάρχει η δυνατότητα παροχής Σταθερής Ασύρματης Πρόσβασης (Fixed Wireless Access) σε Οικιακούς Πελάτες ή όπως αποκαλούνται, χρήστες SOHO (Small Office- Home Office). Μία ακόμη χρήση του δικτύου είναι η αντικατάσταση ενός κομματιού δικτύου κορμού (καλωδίωσης) παρόχων κινητής τηλεφωνίας. Είναι επίσης εφικτή η χρήση του WiMAX για παράκαμψη του τοπικού βρόγχου, σε παροχή υπηρεσιών φωνής. Επιπλέον, λόγω της οικονομικής και σταθερής δικτυακής υπηρεσίας που παρέχει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν δίκτυο κορμού σε συστήματα Wireless LAN.

Οι τοπολογίες του δικτύου που υλοποιούνται βάσει του προτύπου είναι: Η αμφίδρομη σημείου προς σημείο (two way point to point- P2P), η αμφίδρομη σημείου προς πολλαπλά σημεία (two way point to multipoint- PMP) και η τοπολογία πλέγματος (Mesh). Η πρώτη συνηθίζεται σε κυβελωτά δίκτυα, ενώ η δεύτερη είναι βολική για δίκτυα Ad-hoc Wi-fi λόγω της πολυπλοκότητας της τοπολογίας τους. [4] [13]

2.7.1 Τοπολογία Σημείου Προς Σημείο (P2P)

Η τοπολογία σημείου προς σημείο (P2P) αποτελείται από μία μεγάλης εμβέλειας, υψηλής χωρητικότητας ασύρματη ζεύξη μεταξύ δύο σημείων. Ο Σταθμός Βάσης ελέγχει τις επικοινωνίες και τις παραμέτρους ασφάλειας για τον καθορισμό της σχέσης με τον Κινητό Σταθμό. Η τοπολογία σημείου προς σημείο χρησιμοποιείται για τις υψηλού εύρους ζώνης ασύρματες υπηρεσίες backhaul. [14]



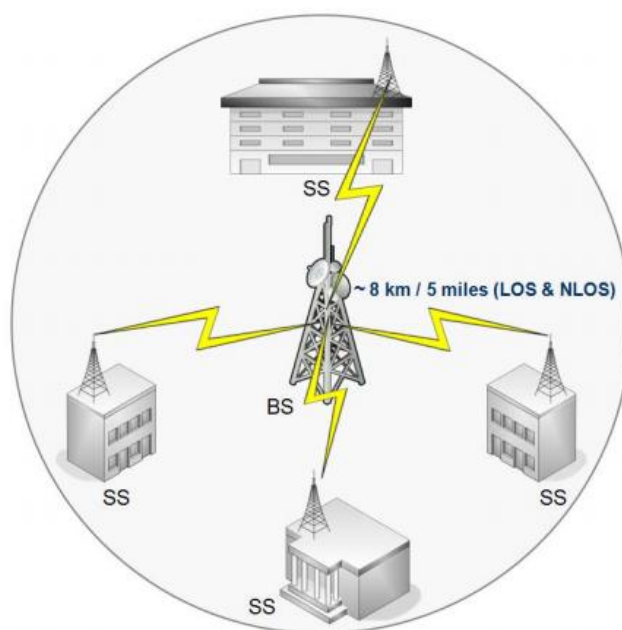
Σχήμα 11 Τοπολογία Σημείου προς Σημείο [14]

[14]

2.7.2 Τοπολογία Σημείου Προς Πολλαπλά Σημεία (PMP)

Το κυριότερο παράδειγμα τοπολογίας σημείου προς πολλαπλά σημεία σε ένα δίκτυο WiMAX είναι αυτό της κάτω ζεύξης και συγκεκριμένα της επικοινωνίας μεταξύ του Σταθμού Βάσης και των Κινητών Σταθμών. Ο Κεντρικός Σταθμός Βάσης ενός δικτύου έχει μία κεραία η οποία είναι χωρισμένη σε τομείς, τους οποίους μπορεί να χειριστεί ανεξάρτητα. Σε ένα συγκεκριμένο κανάλι συχνότητας και σε συγκεκριμένους τομείς της κεραίας οι Κινητοί Σταθμοί λαμβάνουν την ίδια εκπομπή και ο Σταθμός Βάσης είναι ο μοναδικός πομπός αυτής, αφού δε χρειάζεται τη συνεργασία κάποιου άλλου σταθμού για την εκπομπή (εκτός από την περίπτωση της αμφίδρομησης με διαίρεση χρόνου όπου χρειάζεται χρόνος σε περιόδους άνω και κάτω ζεύξης, και επομένως επιβάλλεται η αναμονή για το uplink των Κινητών Σταθμών).

Ο συνήθης τρόπος λειτουργίας της κάτω ζεύξης είναι μέσω της ευρευεκπομπής (broadcast), κατά την οποία ο σταθμός βάσης αποστέλλει προς όλους τους Κινητούς Σταθμούς. Τα πλαίσια της κάτω ζεύξης λαμβάνονται απ' όλους τους σταθμούς, εκτός από την περίπτωση που στο μήνυμα DL- MAP έχει οριστεί συγκεκριμένος παραλήπτης. Οι κινητοί σταθμοί ελέγχουν τα Connection IDs των μονάδων δεδομένων πρωτοκόλλου που λαμβάνουν και κρατούν αυτούς που τους αντιστοιχούν. Η άνω ζεύξη μοιράζεται μετά από αίτηση των Κινητών Σταθμών προς το Σταθμό Βάσης. Ο Κινητός σταθμός από εκεί και πέρα λαμβάνει δικαίωμα εκπομπής στην άνω ζεύξη είτε αυτόματα βάσει της κλάσης της υπηρεσίας που χρησιμοποιεί είτε βάσει του δικαιώματος που του παρέχει ο Σταθμός Βάσης μετά από σχετική αίτηση.



Σχήμα 12 Τοπολογία Σημείου προς πολλαπλά Σημεία [14]

[14]

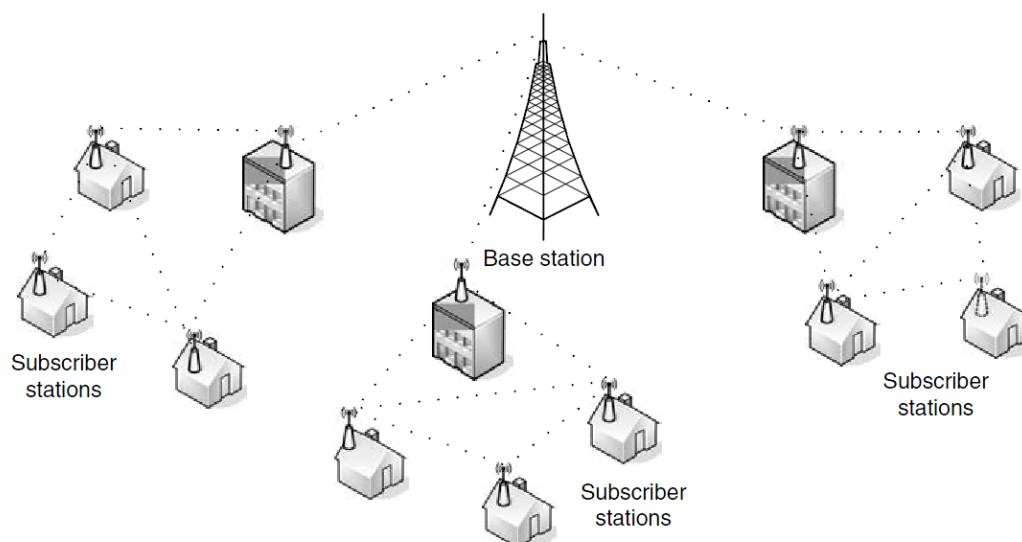
2.7.3 Τοπολογία Δικτύου Πλέγματος (Mesh)

Η τοπολογία Mesh, σε αντίθεση με την τοπολογία σημείου προς πολλαπλά σημεία, μπορεί να υλοποιηθεί και μεταξύ κινητών σταθμών χωρίς τη συμμετοχή κάποιου σταθμού βάσης. Ένα μήνυμα δηλαδή, μπορεί να φτάσει σε έναν κινητό σταθμό με ενδιάμεσο κόμβο κάποιον άλλο κινητό σταθμό.

Σε ένα δίκτυο πλέγματος, ο σταθμός που συνδέεται με το δίκτυο κορμού ονομάζεται Σταθμός Βάσης Mesh, οι υπόλοιποι σταθμοί ονομάζονται Κινητοί Σταθμοί Mesh, ενώ οι σταθμοί και των δύο κατηγοριών ονομάζονται κόμβοι. Οι κόμβοι που επικοινωνούν χωρίς την παρεμβολή κάποιου τρίτου ονομάζονται γειτονικοί (neighbors) και το σύνολό τους ονομάζεται γειτονιά (neighborhood). Στα δίκτυα mesh, άνω ζεύξη καλείται η κυκλοφορία των μηνυμάτων από τον κινητό σταθμό mesh προς το σταθμό βάσης mesh, ενώ η αντίστροφη διαδρομή αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων πραγματοποιείται είτε με την τεχνική του καταμεμημένου χρονοπρογραμματισμού στη βάση της ισότητας, είτε με την τεχνική του κεντρικού χρονοπρογραμματισμού ο οποίος ορίζεται από το σταθμό βάσης, είτε με ένα συνδυασμό των δύο τεχνικών.

Βάσει του κατανεμημένου χρονοπρογραμματισμού, οι κόμβοι εκπέμπουν συντονισμένα προς όλη τη γειτονιά μετά από συντονισμό της εκπομπής τους. Στην τεχνική αυτή δεν υπάρχει διαφορά στις εκπομπές της άνω και της κάτω ζεύξης, ούτε κάποια διάκριση μεταξύ τους. Ακόμη δηλαδή και ο σταθμός βάσης, αν ανήκει στην ίδια γειτονιά με μία ομάδα γειτονικών κινητών σταθμών mesh, συντονίζεται και εκπέμπει τον χρονοπρογραμματισμό του προς όλους τους γείτονες (αιτήσεις, εκχωρήσεις δικαιωμάτων, διαθέσιμοι πόροι). Μία άλλη εκδοχή είναι ο καθορισμός του χρονοπρογραμματισμού μεταξύ δύο κόμβων, μετά από αιτήσεις και εκχωρήσεις δικαιωμάτων οι οποίες δεν έχουν υποστεί συντονισμό. Οι κόμβοι στην περίπτωση αυτή είναι υπεύθυνοι για την ομαλή εκπομπή και την αποφυγή συγκρούσεων με τις υπόλοιπες εκπομπές της γειτονιάς.

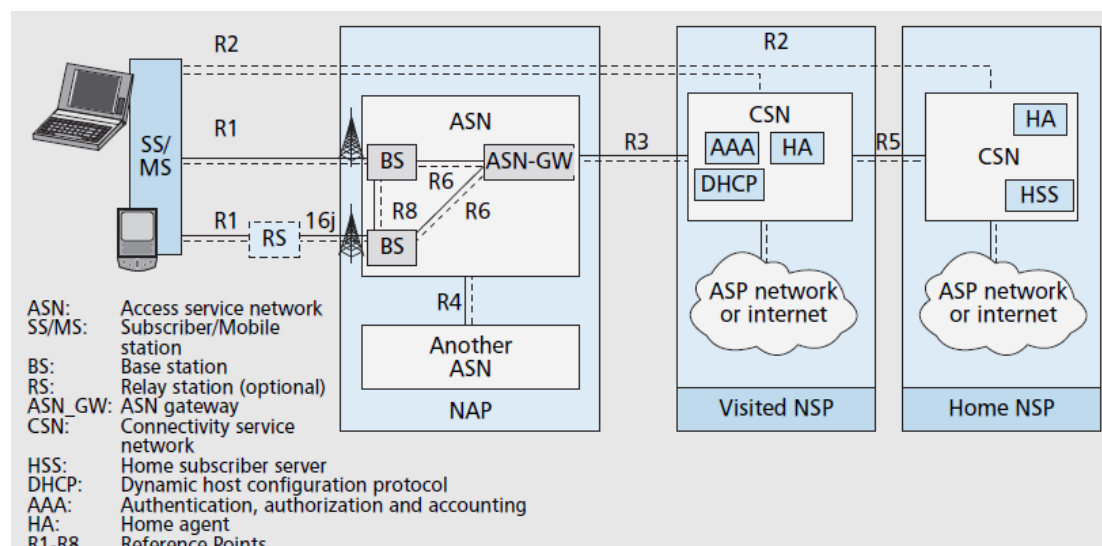
Στην περίπτωση του κεντρικού χρονοπρογραμματισμού, ο Σταθμός Βάσης mesh είναι εκείνος που αναθέτει πόρους εκπομπής στους υπόλοιπους κόμβους της κάθε γειτονιάς μετά από σχετικές αιτήσεις που δέχεται από μέρος τους. Τα μηνύματα εκχώρησης δικαιωμάτων εκπομπής που στέλνονται από το Σταθμό Βάσης δεν περιέχουν και τον πραγματικό χρονοπρογραμματισμό, καθώς αυτός υπολογίζεται από κάθε κόμβο μεμονωμένα μέσω προκαθορισμένου αλγορίθμου. Η κάθε ζεύξη εντός γειτονιάς έχει ένα χαρακτηριστικό αναγνωριστικό μεγέθους 8 bit, το οποίο αποτελεί μέρος του αναγνωριστικού της σύνδεσης (Connection ID- CID). Τέλος, τα μηνύματα που ανταλλάσσονται συμπεριλαμβάνουν παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας στην επικεφαλίδα τους.



Σχήμα 13 Τοπολογία δικτύου πλέγματος [15]

2.8 Βασικό Μοντέλο Αναφοράς NRM

Το μοντέλο που περιγράφει τις λειτουργικές ομάδες, τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση και τα σημεία αναφορά της αρχιτεκτονικής του δικτύου ονομάζεται Μοντέλο Αναφοράς Δικτύου (Network Reference Model- NRM). Οι σημαντικότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στη διαλειτουργικότητα του δικτύου είναι οι Πάροχοι Δικτύου Πρόσβασης (Network Access Providers- NAPs) και οι Πάροχοι Δικτύου Υπηρεσιών (Network Service Providers- NSPs). Η οντότητα που παρέχει στους συνδρομητές ενός δικτύου ραδιοπρόσβαση WiMAX είναι οι NAP, ενώ ο ρόλος των NSP είναι να παρέχουν υπηρεσίες IP και WiMAX συναρτήσει του συμβολαίου (Service Level Agreement- SLA) που έχει υπογραφεί με τον NAP. Βάσει του μοντέλου NRM, είναι δυνατή η αλληλεπίδραση ενός NSP με πολλούς NAP και το αντίστροφο, καθώς και η παροχή υπηρεσιών NAP και NSP από την ίδια οντότητα.



Σχήμα 14 Βασικό Μοντέλο Αναφοράς WiMAX [16]

Οι σημαντικότερες οντότητες στο Βασικό Μοντέλο Αναφοράς του προτύπου είναι οι ακόλουθες:

- Κινητός Σταθμός (Mobile Station- MS): Γενικός εξοπλισμός συνδρομητή (κινητών ή σταθερών τερματικών) που χρησιμοποιείται για την ασύρματη σύνδεση μεταξύ απλών ή πολλαπλών hosts στο WiMAX δίκτυο.
- Δίκτυο Πρόσβασης Υπηρεσίας (Access Service Network- ASN): Το κομμάτι του δικτύου το οποίο εκτελεί τις λειτουργίες που απαιτούνται για την παροχή ραδιοπρόσβασης WiMAX στον κινητό σταθμό. Στο Δίκτυο Πρόσβασης Υπηρεσίας εκτελούνται υπηρεσίες συνδεσιμότητας επιπέδου MAC με τον κινητό σταθμό και παρέχονται υπηρεσίες Αuthεντικοποίησης, Εξουσιοδότησης, Καταγραφής (Authentication Authorization Accounting- AAA) του χρήστη προς τον NSP, επιλογή NSP και διαχείριση ραδιοπύλων.
- Δίκτυο Υπηρεσιών Συνδεσιμότητας (Connectivity Service Network-CSN): Αποτελεί το μέρος του δικτύου που παρέχει IP υπηρεσίες σε WiMAX συνδρομητές. Το CSN περιέχει οντότητες και λειτουργίες όπως οι δρομολογητές, proxy servers AAA, home agent, πύλες (gateways) ή εξυπηρετητές (servers) δικτύου για υποστήριξη broadcast/multicast και βάσεις δεδομένων χρηστών. Το δίκτυο υπηρεσιών Συνδεσιμότητας λειτουργεί είτε σαν μέρος υπάρχοντος NSP, είτε σαν μέρος υπό NSP σχεδιασμού.

Το μοντέλο NRM υποστηρίζει δύο αρχιτεκτονικές κινητικότητας, τη βασική κινητικότητα CSN και τη βασική κινητικότητα ASN. Η πρώτη ισχύει στην περίπτωση των μεταπομπών ενός κινητού σταθμού σε διαφορετικό σταθμό βάσης, χωρίς να παίζει ρόλο το υποδίκτυο IP ή η αλλαγή πράκτορα Mobile IP. Η βασική κινητικότητα CSN αφορά την αλλαγή IP υποδικτύου ή ξένου πράκτορα.

Το Δίκτυο Πρόσβασης Υπηρεσίας υπάρχει είτε ως ενσωματωμένο δίκτυο, με τις λειτουργίες του να εκτελούνται από την ίδια λειτουργική οντότητα, είτε ως μία διάταξη με ξεχωριστούς κόμβους. Το καταναμημένο ASN αποτελείται από ένα ή περισσότερους σταθμούς βάσης και τουλάχιστον μία πύλη ASN gateway (ASN-GW).

Ο Σταθμός Βάσης αποτελεί την οντότητα του δικτύου που εκτελεί τις λειτουργίες συνδεσιμότητας της WiMAX ραδιοεπαφής του ASN με τους κινητούς σταθμούς μέσω της ασύρματης ζεύξης, η οποία λειτουργεί βάσει των προδιαγραφών του προτύπου. Οι λειτουργίες αυτές είναι:

- Διαχείριση κινητικότητας
- Καθιέρωση tunnels
- Διαχείριση Ραδιοπόρων
- Επιβολή Πολιτικής QoS
- Ταξινόμηση κίνησης
- DHCP(Dynamic Host Control Protocol)
- Διαχείριση συνόδων
- Διαχείριση ομάδας πολλαπλής διανομής

Η πύλη ASN gateway αποτελεί την οντότητα του δικτύου που διαχειρίζεται τις λειτουργίες εκείνες που σχετίζονται με υπηρεσίες ασφάλειας, ποιότητας υπηρεσίας και διαχείρισης κινητικότητας για όλες τις συνδέσεις που λαμβάνει από τους σταθμούς βάσης. Εκτός αυτών διαθέτει και λειτουργίες σχετικές με αλληλεπίδραση δικτύου IP με το CSN μέσω του σημείου αναφοράς R3 και με άλλα ASN μέσω του σημείου αναφοράς R4. Πιο συγκεκριμένα, είναι υπεύθυνη για:

- Διαχείριση σελιδοποίησης εντός του ASN
- Διαχείριση ραδιοπόρων
- Έλεγχο εισόδου- αποδοχής
- Αποθήκευση profile χρηστών και κλειδιών κρυπτογράφησης
- AAA
- Καθιέρωση mobility tunnel με σταθμούς βάσης
- QoS και επιβολή πολιτικής
- Διατήρηση λειτουργικότητας ξένων πρακτόρων για το Mobile IP
- Δρομολόγηση στο επιλεγμένο CSN

Γενικότερα υπάρχει η δυνατότητα συσχετισμού πολλών σταθμών βάσης με ένα ASN καθώς και του συσχετισμού ενός σταθμού βάσης με πολλές πύλες ASN για την εξισορρόπηση του φορτίου (load balancing). [16]

2.9 Ζώνες Συχνοτήτων

Για την υλοποίηση ενός WiMAX δικτύου, υπάρχουν δύο επιλογές αναφορικά με την απόφαση για τη ζώνη συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθεί. Το αδειοδοτημένο και το μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων.

Η επιλογή των αδειοδοτημένων ζωνών συχνοτήτων υπερέχει ως προς την προστασία που παρέχεται στο χρήστη από τις παρεμβολές άλλων ασύρματων παρόχων δικτύου WiMAX, αλλά αντιθέτως μειονεκτεί ως προς τη διαδικασία απόκτησης άδειας. Η διαδικασία αυτή διαφέρει από χώρα σε χώρα και υπάρχει η πιθανότητα γραφειοκρατικής και οικονομικής δυσκολίας σε έναν πάροχο, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που η άδεια χορήγησης συγκεκριμένου φάσματος δίνεται μέσω διαγωνισμού.

Αντιθέτως, η επιλογή μη αδειοδοτημένων ζωνών συχνοτήτων επιτρέπει στον πάροχο να χρησιμοποιήσει ένα φάσμα χωρίς τις διαδικασίες που απαιτούνται για χορήγηση άδειας από κάποιο φορέα, καθιστώντας αμεσότερη την υλοποίηση του δικτύου. Παρόλα αυτά υπάρχει ο κίνδυνος παρεμβολής από παρόχους που εκπέμπουν σε γειτονικές συχνότητες.

Συμπερασματικά, η χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος είναι πιο συνετή σε μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές, στις οποίες μπορεί να παρέχει δίκτυο WiMAX μία πλειάδα παρόχων. Η χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος είναι μία λύση που μπορεί να υλοποιηθεί σε αγροτικές περιοχές, με μειωμένο αριθμό χρηστών και παρόχων. Στις περιπτώσεις αυτές είναι ευκολότερο λόγω του μικρού τους αριθμού, οι πάροχοι να συντονίσουν τις συχνότητές τους ώστε να εξαλειφθούν ή να μειωθούν οι παρεμβολές στις γειτονικές συχνότητες. Ένας

τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η τοποθέτηση hubs έτσι ώστε να γίνεται χρήση λιγότερης από το μισό της διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων. [17]

2.9.1 Διαθέσιμα Φάσματα Συχνοτήτων

Τα φάσματα που διατίθενται είναι τα ακόλουθα:

- **Μη Αδειοδοτημένη Ζώνη 5-5.8 GHz-** Ονομάζεται Unlicensed National Information Infrastructure Band (U-NII) και περιλαμβάνει 3 ζώνες συχνοτήτων, τις χαμηλές και μεσαίες ζώνες U-NII (5.15-5.35 GHz), τη νέα ζώνη U-NII World Radio Conference-WRC (5.47-5.725 GHz) και την υψηλή U-NII/ISM band (5.725-5.825 GHz). Λόγω του ότι στις περισσότερες χώρες το μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι ελεύθερο για χρήση, οι συγκεκριμένες ζώνες είναι ζωτικής σημασίας στους παρόχους που θέλουν να επεκταθούν και να εξυπηρετήσουν αγροτικές, απομακρυσμένες ή αραιοκατοικημένες περιοχές. Η ιδιαιτερότητα του WiMAX σε σχέση με άλλα πρότυπα ασύρματης δικτύωσης, όπως το Wi-Fi, είναι πως ανταποκρίνεται σε μητροπολιτικό επίπεδο και τα υψηλά επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος αποτελούν πλεονέκτημα για τη χρήση αυτή. Οι χαμηλές και μεσαίες ζώνες χρησιμοποιούνται περισσότερο για εφαρμογές εσωτερικού χώρου, χαμηλής ισχύος, επομένως δεν είναι ιδιαίτερα βολικές για WiMAX υλοποιήσεις. Οι περισσότερες εφαρμογές WiMAX είναι υλοποιημένες στην υψηλή U-NII/ISM ζώνη (5.725-5.825 GHz), λόγω της ελάχιστης παρεμβολής που υπάρχει στο φάσμα αυτό καθώς και της δυνατότητας ισχύος εξόδου στα 4 W, εν αντιθέσει με τις χαμηλές και μεσαίες που επιτρέπουν 1 W.
- **Αδειοδοτημένη Ζώνη 2.5 GHz-** Ονομάζεται Multipoint Distribution Service (MDS) ζώνη και Broadband Radio Service- BRS στην Αμερική. Περιέχει 31 κανάλια των 6 MHz στο φάσμα από 2.5 έως 2.69 GHz και χρησιμοποιείται για την Instructional Television Fixed Service (ITFS) στην Αμερική.
- **Αδειοδοτημένη Ζώνη 3.5 GHz-** Το φάσμα αυτό είναι το συνηθέστερο για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση σε όλο τον κόσμο εκτός της Αμερικής. Το φάσμα αυτό έχει εύρος 300MHz, επομένως προσφέρεται για σταθερές εφαρμογές. Στην Ελλάδα, η αδειοδοτημένη ζώνη των 3.5 GHz έχει χρησιμοποιηθεί από τον ΟΤΕ στην πιλοτική υλοποίηση δικτύου WiMAX στο Άγιο Όρος, όπου και κάλυψε 50 χιλιόμετρα και πάνω από 20 μοναστήρια το 2008.

2.9.1.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της χρήσης Αδειοδοτημένου και μη Αδειοδοτημένου φάσματος συχνοτήτων

Γενικώς, η χρήση αδειοδοτημένων και μη ζωνών συχνοτήτων σε δίκτυα WiMAX, παρέχει τη δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability) και ευελιξίας.

Στις αδειοδοτημένες λύσεις, όπως έχει γραφτεί, είναι απαραίτητη η αγορά φάσματος συχνοτήτων από έναν πάροχο για να προχωρήσει σε υλοποίηση του δικτύου, μία διαδικασία που μπορεί να είναι πολύπλοκη. Σε κάποιες χώρες είναι χρονοβόρα η συγκέντρωση των δικαιολογητικών που απαιτούνται για την εξαγορά του φάσματος και οδηγεί σε σημαντική καθυστέρηση υλοποίησης του δικτύου. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα να παρουσιαστούν και οικονομικά εμπόδια σε περιπτώσεις που το φάσμα συχνοτήτων χορηγείται μέσω δημοπρασίας.

Παρόλα αυτά η χρήση αδειοδοτημένου φάσματος παρουσιάζει και σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι υψηλές δαπάνες και τα αποκλειστικά δικαιώματα βελτιώνουν την ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών, μειώνουν την πιθανότητα παρεμβολών και αποτελούν μία διέξοδο για σταθερή υλοποίηση σε μία μητροπολιτική περιοχή με μεγάλο αριθμό κινητών χρηστών. Οι χαμηλές συχνότητες που χρησιμοποιούνται (2.5 και 3.5 GHz) επιτρέπουν αποδοτικότερη επικοινωνία σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS) και μεγαλύτερη διείσδυση. Επίσης, η μετάδοση των σημάτων RF από και προς έναν κινούμενο χρήστη είναι πιο προσιτή μέσω χρήσης αδειοδοτημένων φασμάτων και έτσι στον τομέα της κινητικότητας καθίσταται προτιμότερη η λύση τους. Εν κατακλείδι, με τον κατάλληλο σχεδιασμό για την αποφυγή παρεμβολών, οι αδειοδοτημένες λύσεις προσφέρουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε σχέση με τις μη αδειοδοτημένες.

Το υψηλό κόστος των αδειοδοτημένων λύσεων, καθώς και τα υπόλοιπα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν, ωθούν τους παρόχους στο να χρησιμοποιήσουν και μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως είναι οι αγροτικές περιοχές. Η λύση των μη αδειοδοτημένων ζωνών πλεονεκτεί στον τομέα των δαπανών και της ταχείας υλοποίησης του δικτύου που επιτρέπει, επομένως προσελκύει το ενδιαφέρον.

Οι πάροχοι δικτυακών υπηρεσιών που έχουν σκοπό να εισέρθουν σε αγορές αναπτυσσόμενων χωρών, ή μεμονωμένων υποανάπτυκτων περιοχών που ανήκουν σε αναπτυσσόμενες χώρες, μπορούν να κερδίσουν χρόνο υλοποιώντας το δίκτυό τους χωρίς να μπουν σε διαδικασία λήψης άδειας. Επίσης, δίνεται και σε παρόχους αναπτυσσόμενων χωρών και περιοχών η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων για να παρέχουν last mile πρόσβαση σε οικιακούς καταναλωτές, είτε για backhaul είτε σαν συμπληρωματικό δίκτυο των ήδη υπαρχόντων δικτύων.

Φυσικά, οι πάροχοι που θα στραφούν σε μία μη αδειοδοτημένη λύση σε αναπτυσσόμενη περιοχή, λόγω της αστάθειας στην παροχή υπηρεσιών που παρατηρείται, θα πρέπει να προσφέρουν περιορισμένα και συγκεκριμένα συμβόλαια στους χρήστες (Συμφωνητικά Επιπέδου Υπηρεσίας- Service Level Agreement- SLAs). Η ισχύς εξόδου μετάδοσης μπορεί να ρυθμιστεί στις αδειοδοτημένες υλοποιήσεις, οπότε μία συσκευή έχει τη δυνατότητα αποδοτικής χρήσης του φάσματος με την προϋπόθεση του επαρκούς ελέγχου της. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών παρόχων, γεγονός που παρουσιάζεται στις μη αδειοδοτημένες ζώνες λόγω των διακυμάνσεων των χρηστών και των παρόχων, χρησιμοποιούνται στατιστικά στοιχεία δικτύων μειώνοντας σχετικά την αστάθεια αυτή.

Συγκεντρωτικά, οι αδειοδοτημένες υλοποιήσεις είναι κατάλληλες για τις ακόλουθες εφαρμογές

- Εφαρμογές Ευρείας κάλυψης, Σημείου προς Πολλαπλά Σημεία
- Ευρυζωνικές Κινητές Υπηρεσίες
- Όταν μέσω της αδειοδότησης, δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της χρήσης της ζώνης συχνοτήτων και της παρεμβολής
- Όταν το κόστος δεν είναι ο σημαντικότερος παράγοντας επιλογής υλοποίησης
- Όταν οι υπηρεσίες και ο εξοπλισμός των σταθμών βάσεων μπορούν να μισθωθούν από έναν μόνο πάροχο

Αντίστοιχα, οι μη αδειοδοτημένες υλοποιήσεις είναι κατάλληλες για τις ακόλουθες εφαρμογές

- Λύσεις Τοπολογίας Σημείου προς Σημείο, υλοποιήσεις μεγάλων αποστάσεων σε αραιοκατοικημένες περιοχές
- Λύσεις Τοπολογίας Σημείου προς Πολλαπλά Σημεία, σε αγροτικές περιοχές
- Περιοχές με μικρό θόρυβο RF (εντός του παρεχόμενου φάσματος συχνοτήτων) ή περιοχές με ελεγχόμενη παρεμβολή, όπως οι πανεπιστημιούπολεις, οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις και τα ναυπηγεία
- Λύσεις όπου οι δαπάνες είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την επιλογή υλοποίησης
- Λύσεις στις οποίες η κατοχή του εξοπλισμού είναι προαιρετική για τον τελικό χρήστη.

2.9.1.2 Τεχνικές Διαφορές Αδειοδοτημένου και μη Αδειοδοτημένου φάσματος συχνοτήτων

Η μέθοδος πολυπλεξίας που χρησιμοποιούν στο φυσικό στρώμα και οι υλοποιήσεις σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων καθώς και σε μη αδειοδοτημένες ζώνες, είναι η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Η υλοποίηση αυτή παρέχει πλεονεκτήματα, όπως ο αυξημένος σηματοθορυβικός λόγος (SNR) των κινητών σταθμών και η ανθεκτικότητα στην παρεμβολή. Οι τεχνικές αμφιδρόμησης του WiMAX είναι η Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Duplexing- TDD), η οποία χρησιμοποιείται σε υλοποιήσεις μη αδειοδοτημένων ζωνών συχνοτήτων και η Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Duplexing- FDD), η οποία χρησιμοποιείται σε υλοποιήσεις αδειοδοτημένων ζωνών συχνοτήτων.

Η **Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Duplexing- TDD)** δίνει λύσεις σε περιπτώσεις που τα ζευγάρια καναλιών δεν είναι διαθέσιμα λόγω περιορισμών και όταν χρησιμοποιούνται μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων. Επίσης, είναι συμβατή με υλοποιήσεις δικτύων πλέγματος σε αντίθεση με την FDD. Η TDD συμπεριλαμβάνει ένα κανάλι τόσο για την άνω, όσο και για την κάτω ζεύξη. Το εύρος ζώνης διατίθεται δυναμικά προς την κάθε ζεύξη, ανάλογα με την κυκλοφορία σε καθεμία. Η ασύμμετρη μετάδοση συνηθίζεται στο διαδίκτυο, όπου τα δεδομένα που μεταφέρονται στην κάτω ζεύξη είναι πολύ μεγαλύτερα από την άνω. Η μετάδοση στα συστήματα αμφιδρόμησης διαίρεσης χρόνου γίνεται από το σταθμό βάσης προς τον κινητό σταθμό, ακολουθεί ένα διάστημα προστασίας (guard time) και ο κινητός σταθμός μεταδίδει την ίδια συχνότητα στην άνω ζεύξη.

Η **Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Duplexing- FDD)** προϋποθέτει την ύπαρξη ζευγαριών καναλιών που είναι χωρισμένα (ένα για λήψη κι ένα για αποστολή) ώστε να μειωθεί η παρεμβολή. Η μετάδοση φωνής είναι μία υπηρεσία που χρησιμοποιεί αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας, καθώς επιτρέπει ελάχιστες καθυστερήσεις. Σαν τεχνική πάντως είναι πιο κοστοβόρα από την TDD, γιατί προσθέτει επιπλέον στοιχεία για να υποστηρίξουν τα χωριστά κανάλια των δύο ζεύξεων. Αυτό ωστόσο είναι θεμιτό εφόσον το εύρος ζώνης χρησιμοποιείται αποδοτικότερα και η ποιότητα υπηρεσίας είναι εξίσου βελτιωμένη. Λόγω του φάσματος που δημιουργείται είναι ευκολότερη η ένταξη της ποιότητας υπηρεσίας σε συγκεκριμένες κατηγορίες, οπότε η συγκεκριμένη αμφιδρόμηση είναι ιδανική για αδειοδοτημένες ζώνες. Χρησιμοποιείται για παράδειγμα στα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς, τα οποία λειτουργούν σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων και παρέχουν κυρίως υπηρεσίες φωνής.

3 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη λειτουργία και την υλοποίηση ενός δικτύου WiMAX είναι η ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service- QoS) που παρέχεται στους χρήστες. Η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας συμπεριλαμβάνει το σύνολο των παραμέτρων που καθορίζουν το είδος της κάθε υπηρεσίας.

Παλιότερα στα δίκτυα, όλες οι εφαρμογές και τα μετακινούμενα πακέτα είχαν την ίδια μεταχείριση χωρίς να διαφοροποιούνται. Αυτό είχε ως συνέπεια, εφαρμογές που είχαν μεγάλες απαιτήσεις σε εκχώρηση εύρους ζώνης, να υποβιβάζουν τις αποδόσεις των υπόλοιπων εφαρμογών. Με την εισαγωγή του μηχανισμού ποιότητας υπηρεσίας στα δίκτυα εξασφαλίζεται η παροχή ιδιαίτερης υπηρεσίας παράδοσης σε πακέτα σύμφωνα με το επίπεδο προτεραιότητας ποιότητας υπηρεσίας και τις αποδόσεις που καθορίζει αυτό. Επίσης, είναι εφικτός ο έλεγχος και η διόρθωση σφαλμάτων σε περιπτώσεις που κρίσιμες εφαρμογές του δικτύου επηρεάζονται από χαμηλότερης κρισιμότητας εφαρμογές. Η λειτουργία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτιωμένη εμπειρία του χρήστη, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και την οικονομικότερη χρήση των ραδιοπάρων.

Στο WiMAX, ο μηχανισμός παροχής ποιότητας υπηρεσίας λειτουργεί από την πρώτη έκδοση του προτύπου και αφορά όλες τις εφαρμογές που τίθενται σε ισχύ πάνω στο δίκτυο, είτε είναι πραγματικού χρόνου είτε είναι εφαρμογές δεδομένων. Σημάντικό ρόλο στην κατηγοριοποίηση των εφαρμογών παίζει η τεχνική της διαδοχικής διερεύνησης (rolling) και η προσαρμοστική κωδικοποίηση (Adaptive Modulation) του φυσικού στρώματος. Το WiMAX στις προδιαγραφές του περιγράφει τους τύπους Ροής Υπηρεσιών και όχι τους πραγματικούς μηχανισμούς των πακέτων για την κατηγοριοποίηση τους ανά υπηρεσία στο στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου. Η υλοποίηση των μηχανισμών είναι στην ευχέρεια του κατασκευαστή. [4][18]

3.1 Τύποι Ποιότητας Υπηρεσίας

- **Ποιότητα Υπηρεσίας προσανατολισμένη στο Δίκτυο (Network- Centric QoS)**- Ονομάζονται οι μηχανισμοί που δίνουν τη δυνατότητα του ελέγχου εκχώρησης εύρους ζώνης, καθυστέρησης, διακύμανσης στην καθυστέρηση και απώλειας πακέτων στο δίκτυο από τη διαχείρισή του, με σκοπό την παροχή μίας υπηρεσίας δικτύου.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας προσανατολισμένη στο Χρήστη (Quality of Experience- QOE)**- Ονομάζεται το επίπεδο της απόδοσης των υπηρεσιών οι οποίες καθορίζουν το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη.

Η κατηγοριοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας πραγματοποιείται τόσο ανά εφαρμογή, όσο και ανά πακέτο. Οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας λοιπόν χωρίζονται και βάσει των ακόλουθων λειτουργιών:

- **Έλεγχος Εισόδου (Admission Control)**- Ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για τον χρόνο και τον τρόπο που μία εφαρμογή ή ένας χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στους πόρους του δικτύου. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιεί συνόδους (sessions) ή χρονοδιαγράμματα ροής (flowtime scale). Χειρίζεται για παράδειγμα τις αποφάσεις για αποδοχή ροών στο δίκτυο.
- **Έλεγχος Κυκλοφορίας (Traffic Control) –** Ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την προσήμανση πακέτων, το χρονοπρογραμματισμό και τη μορφοποίηση των πακέτων που προέρχονται από μία εφαρμογή ή από ένα χρήστη. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιεί χρονοδιαγράμματα πακέτου, λαμβάνει δηλαδή αποφάσεις σχετικά με τα πακέτα και τις ροές που ακολουθούν σε μία μετάδοση δεδομένων. [18]

3.2 Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας

Οι παράμετροι που λογίζονται ως βασικά κριτήρια στον τομέα της παροχής υπηρεσιών του δικτύου είναι οι ακόλουθες:

- **Προτεραιότητα Κίνησης (Traffic Priority)**- Αποτελεί χαρακτηριστικό ροής υπηρεσίας και διευθετεί την προτεραιότητά της σε σχέση με τις υπόλοιπες υπηρεσίες. Όταν οι παράμετροι ροής υπηρεσίας δύο υπηρεσιών συμβαδίζουν, θα ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ώστε να υπάρξει μικρότερη καθυστέρηση στη ροή υπηρεσίας που έχει την υψηλότερη προτεραιότητα κίνησης. Όταν και αυτή η παράμετρος είναι ίδια σε δύο υπηρεσίες παρακάμπτεται.
- **Μέγιστος Διατηρούμενος Ρυθμός Μετάδοσης (Maximum Sustained Traffic Rate)**- Αποτελεί το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης μίας υπηρεσίας σε bits/sec, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα πρόσθετα δεδομένα που εισάγει το στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου. Ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται στο υπόστρωμα σύγκλισης. Ο αριθμός της παραμέτρου αυτής δεν είναι απαραίτητο ότι μπορεί να προσφέρεται από το δίκτυο και αποτελεί μόνο το άνω όριο του ρυθμού. Στις περιπτώσεις που ο ρυθμός μετάδοσης συγκεκριμένων πακέτων υπερβαίνει το όριο της υπηρεσίας στην οποία ανήκουν, είναι θέμα κατασκευαστή το αν θα επέλθει καθυστέρηση μετάδοσης ή απόρριψη των πακέτων. Ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται στο υπόστρωμα σύγκλισης.
- **Μέγιστο Μέγεθος Ριπής (Maximum Traffic Burst)**- Αποτελεί το μέγιστο μέγεθος ριπής μίας ροής υπηρεσίας και μετριέται σε bytes. Ουσιαστικά βάζει ένα άνω όριο στο μέγεθος της μέγιστης συνεχούς ριπής, που μπορεί να παρέχει το δίκτυο, βάσει της υπόθεσης ότι σε μία δεδομένη στιγμή μία υπηρεσία δε χρησιμοποιεί κάποιους από τους διαθέσιμους πόρους.
- **Ελάχιστος Δεσμευμένος Ρυθμός Μετάδοσης (Minimum Reserved Traffic Rate)**- Αποτελεί το κάτω όριο ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να ανατεθεί για τη μετάδοση των πακέτων μίας υπηρεσίας. Υπολογίζεται σε bits/sec.
- **Ελάχιστος Ανεκτός Ρυθμός Μετάδοσης (Minimum Tolerable Traffic Rate)**- Αν ο ελάχιστος ανεκτός ρυθμός μετάδοσης σε χρόνο T (sec) είναι R και S η επιπλέον ζήτηση που συσσωρεύεται στο σημείο πρόσβασης υπηρεσίας MAC του πομπού σε ένα τυχαίο χρονικό διάστημα του μήκους T , τότε το μέγεθος των δεδομένων (σε bits) που προωθούνται στο δέκτη του υποστρώματος σύγκλισης στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δεν πρέπει να είναι μικρότερο του ελάχιστου $\{S, R*T\}$.
- **Τύπος Ροής Υπηρεσίας Χρονοπρογραμματισμού (Service Flow Scheduling Type)** – Αποτελεί παράμετρο που σχετίζεται με το χρονοπρογραμματισμό που πρέπει να ισχύσει κατά τη μετάδοση δεδομένων κάθε υπηρεσίας.
- **Ανεκτή Μεταβλητότητα (Tolerated Jitter)**- Αποτελεί τη μέγιστη διακύμανση καθυστέρησης που μπορεί να επιτραπεί κατά τη ροή μίας υπηρεσίας.
- **Μέγιστη Διάρκεια Λανθάνουσας Κατάστασης (Maximum Latency)**- Αποτελεί το ανώτατο χρονικό όριο της διάρκειας που μεσολαβεί μεταξύ της λήψης ενός πακέτου είτε από το σταθμό βάσης είτε από τον κινητό σταθμό (είσοδος στο υπόστρωμα σύγκλισης) μέχρι να αποσταλεί στη ραδιοεπαφή (εκπομπή μονάδας SDU). Υπολογίζεται σε msec.
- **Πολιτική Αίτησης/ Εκπομπής (Request/ Transmission Policy)**- Αποτελεί παράμετρο ποιότητας υπηρεσίας που δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της ροής υπηρεσίας. Πιο συγκεκριμένα περιέχει πληροφορίες για τη μορφοποίηση των μονάδων PDU, για τη ροή υπηρεσίας της άνω ζεύξης και περιορισμούς στις αιτήσεις εκχώρησης εύρους ζώνης από πακέτα της υπηρεσίας.

- **Τύπος Χρονοπρογραμματισμού Εκχώρησης Άνω Ζεύξης (Uplink Grant Scheduling Type)-** Αποτελεί παράμετρο που υποδεικνύει τον τύπο του χρονοπρογραμματισμού που θα χρησιμοποιηθεί για την εκχώρηση άνω ζεύξης σε μία συγκεκριμένη ροή υπηρεσίας. Σε περίπτωση που δεν ορίζεται αυτή η παράμετρος, χρησιμοποιείται ο Best Effort αλγόριθμος.

Sample Traffic Parameters for Broadband Wireless Applications

Parameter	Interactive Gaming	Voice	Streaming Media	Data	Video
Data rate	50Kbps–85Kbps	4Kbps–64Kbps	5Kbps–384Kbps	0.01Mbps–100Mbps	> 1Mbps
Example applications	Interactive gaming	VoIP	Music, speech, video clips	Web browsing, e-mail, instant messaging (IM), telnet, file downloads	IPTV, movie download, peer-to-peer video sharing
Traffic flow	Real time	Real-time continuous	Continuous, bursty	Non-real time, bursty	Continuous
Packet loss	Zero	< 1%	< 1% for audio; < 2% for video	Zero	< 10 ⁻⁸
Delay variation	Not applicable	< 20 ms	< 2 sec	Not applicable	< 2 sec
Delay	< 50 ms–150 ms	< 100 ms	< 250 ms	Flexible	< 100 ms

Σχήμα 15 Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για τύπους υπηρεσιών [7]

3.3 Κλάσεις Υπηρεσιών

Οι κλάσεις των υπηρεσιών απαρτίζονται από μία πλειάδα παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας. Μία ροή υπηρεσίας αντί να ορίζει μεμονωμένα τις παραμέτρους της, χρησιμοποιεί μία κλάση μέσω της οποίας εξυπηρετούνται και τα ανώτερα στρώματα. Η ροή υπηρεσίας μπορεί να ορίζει και τις παραμέτρους της ξεχωριστά, μπορεί να χρησιμοποιεί μία κλάση υπηρεσιών η οποία περιέχει το σετ παραμέτρων της ή ακόμα μπορεί να χρησιμοποιεί μία κλάση υπηρεσιών με καθορισμένες συγκεκριμένες παραμέτρους. Αυτό που συνηθίζεται είναι η ομαδοποίηση πλειάδας ροών υπηρεσίας σε μία κλάση, η οποία προσδιορίζεται από ένα σύνολο απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Η γενική έννοια των κλάσεων δεν είναι αυστηρώς καθορισμένη από το πρότυπο και ο έλεγχος και η διαχείρισή τους αφήνεται στην ευχέρεια του παρόχου.

Η αρχικοποίηση της κλάσης υπηρεσίας πραγματοποιείται από το σταθμό βάσης και εν συνεχεία αποστέλλεται ένα εκ των μηνυμάτων DSA-REQ, DSCREQ, DSA-REP και DSC-REP στον κινητό σταθμό. Αν ο κινητός σταθμός κάνει χρήση κλάσης υπηρεσίας ή ενός συγκεκριμένου σετ παραμέτρων υπηρεσίας, τότε ο σταθμός βάσης πρέπει να απαντήσει με αναφορά στο σύνολο αυτό. [19]

3.4 Τύποι Υπηρεσιών

Το πρότυπο WiMAX ορίζει πέντε τύπους ροής υπηρεσιών οι οποίοι αξιοποιούνται από το σύνολο των συνδέσεων μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού σταθμού και θα πρέπει να υλοποιούνται αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού από τον κατασκευαστή οι οποίοι να τους υποστηρίζουν. Οι τύποι υπηρεσίας είναι:

- Unsolicited Grant Services (UGS)
- Real-time Polling Services (rtPS)
- Nonreal-time Polling Services (nrtPS)
- Best Effort (BE)
- Extended Real- Time Polling Service (ErtPS)

Η κάθε ροή έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά κλάσης υπηρεσίας, τα οποία περιγράφονται στην τιμή του πεδίου SFID (Service Flow ID) που περιέχεται στα πακέτα της ροής. Οι υπηρεσίες εκχώρησης εύρους ζώνης ορίζουν το εύρος ανάλογα με της παραμέτρους της ποιότητας υπηρεσίας που σχετίζονται με μία σύνδεση. Στην κάτω ζεύξη, τα δεδομένα που έχει ο σταθμός βάσης για εκχώρηση εύρους ζώνης στα πακέτα που διαχειρίζεται είναι αρκετά. Στην άνω ζεύξη αντίθετα, ο σταθμός βάσεις εκχωρεί εύρος ζώνης και δίνει προτεραιότητα στη μετάδοση βάσει προγραμματισμού των πληροφοριών που λαμβάνει από τους κινητούς σταθμούς. Στις περιπτώσεις αυτές, ο κινητός σταθμός κάνει αίτηση εκχώρησης εύρους ζώνης και ο σταθμός βάσης ανάλογα με τον ορισμένο τύπο ροής της υπηρεσίας, το κατανέμει κατάλληλα. [7] [9] [11] [17] [19]

3.4.1 Unsolicited Grant Services (UGS)

Ο τύπος υπηρεσίας αυτός, σχετίζεται με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Στις υπηρεσίες αυτές τα πακέτα που μεταδίδονται έχουν σταθερό μήκος, ενώ η μετάδοσή τους πραγματοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μεταδίδονται δηλαδή με σταθερό ρυθμό μετάδοσης (Constant Bit Rate- CBR). Βάσει των UGS, πρέπει να υπάρχει εγγύηση για τη ρυθμοαπόδοση (throughput), την καθυστέρηση και τη μεταβλητότητα στη ροή αυτού του τύπου υπηρεσιών. Στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι αιτήσεις ραδιοπόρων από τους κινητούς σταθμούς είναι προαιρετική και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την οικονομία δικτυακού φόρτου. Μία υπηρεσία που χρησιμοποιεί αυτόν τον τύπο είναι το VoIP χωρίς καταπίεση διαστημάτων σιγής.

Ο τύπος UGS προϋποθέτει την εκχώρηση σταθερού μεγέθους σε τακτά χρονικά διαστήματα πραγματικού χρόνου, ενώ παράλληλα αφαιρεί την πλεονάζουσα πληροφορία και την καθυστέρηση των αιτήσεων του κινητού σταθμού εξασφαλίζοντας ότι οι εκχωρήσεις που έχει ορίσει θα ικανοποιούν τις χρονικές ανάγκες της ροής υπηρεσίας.

Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει υποχρεωτικά να ορίζονται βάσει του τύπου είναι ο μέγιστος διατηρούμενος ρυθμός μετάδοσης, η ανεκτή μεταβλητότητα, η μέγιστη διάρκεια λανθάνουσας κατάστασης, ο τύπος χρονοπρογραμματισμού εκχώρησης της άνω ζεύξης και η πολιτική αίτησης/ εκπομπής.

3.4.2 Real-time Polling Services (rtPS)

Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας σχετίζεται επίσης με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου μετάδοσης πακέτων δεδομένων σε τακτά χρονικά διαστήματα, με τη διαφορά ότι πρόκειται για μεταβλητού μήκους πακέτα. Στο rtPS ο σταθμός συνδρομητή έχει τη δυνατότητα να

πραγματοποιεί αιτήσεις εκχώρησης εύρους ζώνης, μετά από περιοδικές ερωτήσεις που δέχεται σχετικά με αυτό από το σταθμό βάσης. Ένα παράδειγμα είναι το κωδικοποιημένο κατά MPEG 2 video. Ο rtPS στη μετάδοσή του περιέχει extra πληροφορία στην αίτηση σε σχέση των UGS, υποστηρίζει όμως μεταβλητά μεγέθη εκχωρήσεων αυξάνοντας την απόδοση της μετάδοσης.

Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει υποχρεωτικά να ορίζονται βάσει του τύπου είναι ο ελάχιστος δεσμευμένος ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος διατηρούμενος ρυθμός μετάδοσης, η μέγιστη διάρκεια λανθάνουσας κατάστασης, ο τύπος χρονοπρογραμματισμού εκχώρησης της άνω ζεύξης και η πολιτική αίτησης/ εκπομπής.

3.4.3 Nonreal-time Polling Services (nrtPS)

Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας σχετίζεται με υπηρεσίες που υπόκεινται σε καθυστέρηση, τα πακέτα μετάδοσής τους είναι μεταβλητού μήκους και χρειάζεται να υπάρχει ένας ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης. Ο nrtPS επιβάλλει την τεχνική της διαδοχικής διερεύνησης (polling) σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, κατά τα οποία διασφαλίζεται το γεγονός πως η ροή της άνω ζεύξης θα έχει τη δυνατότητα αίτησης εκχώρησης και σε συνθήκες δικτυακής συμφόρησης. Ο σταθμός βάσης επιτρέπει λοιπόν τις αιτήσεις εκχώρησης σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα στον κινητό σταθμό, ο οποίος με τη σειρά του αποστέλλει αιτήσεις συμφόρησης και αιτήσεις εκπομπής (congestion request) και μονοεκπομπής (unicast) δεδομένων. Ένα παράδειγμα του τύπου αυτού είναι οι υπηρεσίες FTP.

Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει υποχρεωτικά να ορίζονται βάσει του τύπου είναι ο ελάχιστος δεσμευμένος ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος διατηρούμενος ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα κίνησης, ο τύπος χρονοπρογραμματισμού εκχώρησης της άνω ζεύξης και η πολιτική αίτησης/ εκπομπής.

3.4.4 Best Effort (BE)

Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας σχετίζεται με υπηρεσίες για τις οποίες δεν έχει οριστεί κάποια ποιότητα υπηρεσίας και το δίκτυο διαχειρίζεται τη μετάδοση των πακέτων τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο τύπος αυτό μπορεί να μην θέτει εγγυήσεις για τις υπηρεσίες, δίνει όμως τη δυνατότητα χρήσης του μέγιστου δυνατού ρυθμού δεδομένων. Η δυνατότητα αίτησης εκχώρησης εύρους ζώνης από τους κινητούς σταθμούς στο σταθμό βάσης υφίσταται κανονικά. Ένα παράδειγμα υπηρεσίας τύπου Best Effort είναι η πλοήγηση στο διαδίκτυο.

Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει υποχρεωτικά να ορίζονται βάσει του τύπου είναι ο μέγιστος διατηρούμενος ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα κίνησης και η πολιτική αίτησης/ εκπομπής.

3.4.5 Extended Real- Time Polling Service (ErtPS)

Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας αποτελεί έναν μηχανισμό χρονοπρογραμματισμού που βασίζεται στην αποδοτικότητα των UGS και rtPS. Ο σταθμός βάσης επιτρέπει στον κινητό σταθμό αναθέσεις μονοεκπομπής (Unicast) με δική του ερώτηση όπως ισχύει στις UGS υπηρεσίες, αποτρέποντας έτσι τις λανθασμένες εκχωρήσεις. Εκτός αυτού υποστηρίζει και τις

μεταδόσεις πακέτων μεταβλητού μήκους, όπως συμβαίνει στις rtPS υπηρεσίες. Οι αναθέσεις άνω ζεύξης που παραχωρούνται στον κινητό σταθμό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για αποστολή δεδομένων είτε για αίτηση επιπλέον εύρους ζώνης, καθιστώντας τον τύπο αυτό ιδανικό για υπηρεσίες των οποίων οι απαιτήσεις για εύρος ζώνης διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου.

Η ErtPS υποστηρίζει ροές υπηρεσίας πραγματικού χρόνου οι οποίες απαρτίζονται από διαφορετικού μεγέθους πακέτα σε τακτά χρονικά διαστήματα και έχουν κάποια συγκεκριμένα όρια μέγιστης καθυστέρησης και ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης. Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου υπηρεσίας είναι η VOIP με καταπίεση διαστημάτων σιγής.

Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει υποχρεωτικά να ορίζονται βάσει του τύπου είναι ο ελάχιστος δεσμευμένος ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος διατηρούμενος ρυθμός μετάδοσης, η μέγιστη διάρκεια λανθάνουσας κατάστασης, και η πολιτική αίτησης εκπομπής.

QoS-Data Service Types		
QoS Class	Applications	QoS Specifications
UGS Un-Solicited Grant Service	VoIP	Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Jitter tolerance
rtPS Real-Time Packet Service	Streaming Audio, Video	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Traffic Priority
ErtPS Extended Real-Time Packet Service	Voice with Activity Detection (VoIP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Jitter Tolerance Traffic Priority
nrPS Non-Real-Time Packet Service	FTP	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Traffic Priority
BE Best-Effort Service	Data Transfer, Web Browsing	Maximum Sustained Rate Traffic Priority

Σχήμα 16 Συνοπτικός Πίνακας Τύπων Υπηρεσιών με αντιστοιχία παραμέτρων/υπηρεσιών [20]

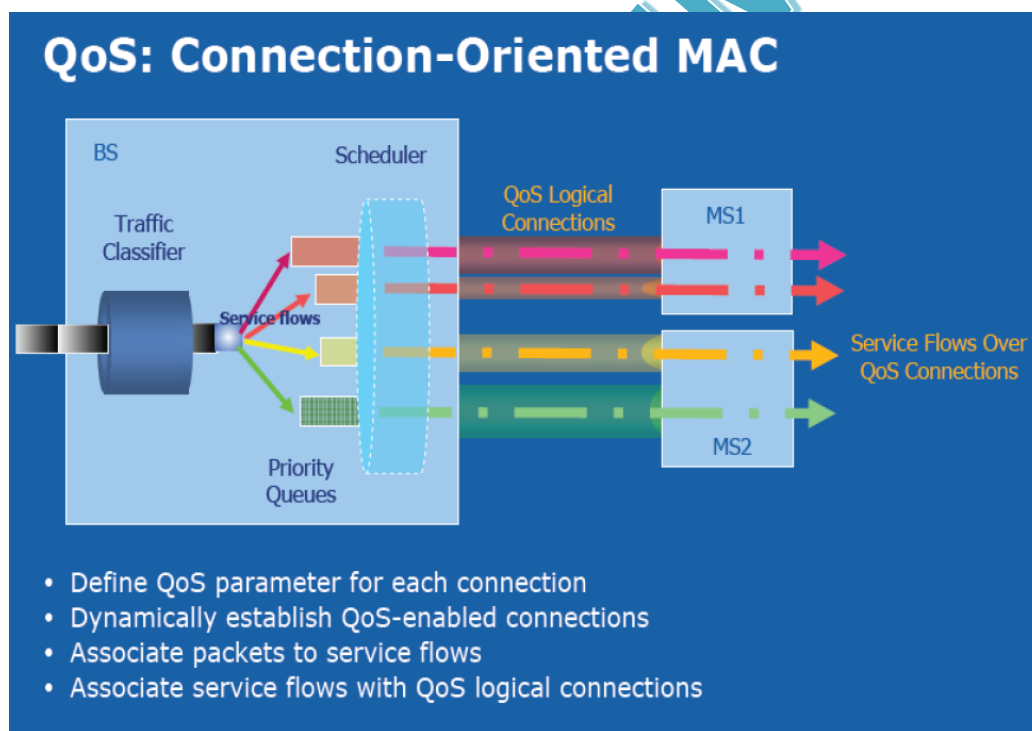
3.5 Ροή Υπηρεσίας

Η έννοια της ροής υπηρεσίας αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες στο στρώμα MAC για την επίτευξη της παροχής ποιότητας υπηρεσίας στη μετάδοση πακέτων. Η λειτουργία της ορίζεται ως υπηρεσία μεταφοράς για παράδοση πακέτων. Μία ροή μπορεί να περιλαμβάνει πλειάδα πακέτων και να χρησιμοποιηθεί και στην άνω αλλά και στην κάτω ζεύξη από το σταθμό βάσης και τον κινητό σταθμό αντίστοιχα. Όπως έχει προαναφερθεί, κάθε ροή υπηρεσίας μεταφέρει ένα μοναδικό αναγνωριστικό, το Service Flow ID (SFID) και συμπεριλαμβάνει ένα συγκεκριμένο σετ παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας. Υπάρχουν τρία είδη ροών, οι Τροφοδοτούμενες Ροές Υπηρεσίας (Provisioned Service Flow), οι Επιτρεπόμενες Ροές Υπηρεσίας (Admitted Service Flow) και οι Ενεργές Ροές Υπηρεσίας (Active Service Flow). Ανάλογα με το είδος της ροής, καθεμία περιέχει και επιπλέον παραμέτρους που χρειάζονται. Οι επιτρεπόμενες και οι ενεργές ροές υπηρεσίας, εκτός του αναγνωριστικού ροής, μεταφέρουν και ένα αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection ID- CID)

μεγέθους 16 bit. Σε κάθε σύνδεση αντιστοιχεί και μία ροή υπηρεσίας. Η παράμετρος ProvisionedQoSParameterSet παίρνει τιμές στην περίπτωση της τροφοδοτούμενης ροής, η παράμετρος AdmittedQoSParameterSet παίρνει τιμές στην περίπτωση της επιτρεπόμενης ροής και η παράμετρος ActiveQoSParameterSet παίρνει τιμές στην περίπτωση της ενεργής ροής υπηρεσίας αντίστοιχα.

Στα πακέτα δεδομένων αντιστοιχεί μία συνδεδεμένη ροή υπηρεσίας, άρα ένα πακέτο έχει ένα SFID εντός του οποίου υπάρχει η πιθανότητα να περιέχεται μία κλάση υπηρεσίας. Αν αυτό συμβαίνει, εντός της κλάσης υπηρεσίας συμπεριλαμβάνονται όλες οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας. Κάθε κλάση υπηρεσίας συνδέεται με μία ροή υπηρεσίας, ενώ σε μία ζεύξη μεταξύ κινητού σταθμού και σταθμού βάσης μπορούν να συνυπάρχουν πάνω από μία ροές υπηρεσιών, όπως μία best effort για πλοήγηση στο διαδίκτυο και μία rtPS για αναπαραγωγή realtime video. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η άνω και η κάτω ζεύξη διαφοροποιούνται ως προς τις ροές υπηρεσίας λόγω των διαφορετικών προορισμών.

Ο σταθμός βάσης συμπεριλαμβάνει και μία μονάδα εξουσιοδότησης με τη μορφή μίας λογικής συνάρτησης. Είναι υπεύθυνος για την αποδοχή ή την απόρριψη μία ροής υπηρεσίας που δέχεται από τον κινητό σταθμό μετά από εκπομπή μηνύματος DSC(Dynamic Service Change) από τον τελευταίο. [19]



Σχήμα 17 Λογική Σύνδεση Ροών Υπηρεσίας στο στρώμα MAC [20]

3.5.1 Τροφοδοτούμενη Ροή Υπηρεσίας (Provisioned Service Flow)

Το συγκεκριμένο είδος ροής υπηρεσίας προέρχεται από τη διαχείριση του δικτύου, η οποία αναθέτει αναγνωριστικά ροής υπηρεσίας σε όσες ροές ανήκουν στο είδος παρόλο που μπορεί να μην υπάρχει πληροφορία προς μετάδοση. Λόγω αυτής της πιθανότητας δε δεσμεύονται πόροι από το σταθμό βάσης και δεν αντιστοιχούνται πακέτα δεδομένων για το είδος αυτό. Ο κινητός σταθμός και ο συνδρομητής έχουν τη δυνατότητα αλλαγής του συγκεκριμένου είδους ροής από τροφοδοτούμενη σε ενεργή ή επιτρεπόμενη με την αποστολή μηνύματος DSC (Dynamic Service Change) εκατέρωθεν. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που αναλάβει την ενέργεια διαφοροποίησης ο σταθμός βάσης, αποστέλλει στον κινητό

σταθμό ένα μήνυμα DSC- REQ (Dynamic Service Activate Request), ενώ αν συμβεί το αντίθετο του αποστέλλει ένα μήνυμα DSC- RSP (Dynamic Service Activate Responce) για να του γνωστοποιήσει ότι ενημερώθηκε για την αλλαγή. [20]

3.5.2 Επιτρεπόμενη Ροή Υπηρεσίας (Admitted Service Flow)

Το είδος της συγκεκριμένης ροής υπηρεσίας έχει ουσιαστικά το ρόλο της ενεργοποίησης ή της απόρριψης αιτημάτων που σχετίζονται με ροές υπηρεσίας. Μετά από μία «εξωτερική» αίτηση που πραγματοποιείται, ο σταθμός βάσης ή ο κινητός σταθμός αναζητούν τους κατάλληλους πόρους που μπορούν να την υποστηρίξουν σύμφωνα με τις παραμέτρους υπηρεσίας που την διέπουν, και αν αυτοί βρεθούν η ροή αυτή υποστηρίζεται (ενεργοποιείται). Οι πόροι αυτοί δεν είναι απαραίτητο να είναι αποκλειστικοί αλλά υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τους κι από άλλες ροές.

Υπάρχουν δύο τρόποι δημιουργίας μίας τέτοιας ροής. Ο πρώτος είναι μέσω του μοντέλου τροφοδοτούμενης έγκρισης (provisioned authorization) και ο δεύτερος μέσω του δυναμικού μοντέλου έγκρισης (dynamic authorization). Και οι δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε από το σταθμό βάσης είτε από τον κινητό σταθμό.

Σύμφωνα με την τροφοδοτούμενη έγκριση, στο πρώτο στάδιο της ο σταθμός βάσης διαθέτει πόρους σε μία ροή υπηρεσίας σαν απάντηση σε μήνυμα DSCREQ από το σταθμό συνδρομητή. Αυτό επιτρέπει στη ροή υπηρεσίας να αναλάβει τους απαραίτητους πόρους που ορίζονται για να γίνει επιτρεπόμενη. Ο περιορισμός που υπάρχει είναι το γεγονός ότι οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας μίας επιτρεπόμενης ροής θα πρέπει να είναι υποσύνολο της τροφοδοτούμενης ροής.

Σύμφωνα με τη δυναμική έγκριση, η υλοποίηση της ροής υπηρεσίας γίνεται δυναμικά με την αποστολή ενός μηνύματος DSA (Dynamic Service Activate) από τον κινητό σταθμό. [19]

3.5.3 Ενεργή Ροή Υπηρεσίας (Active Service Flow)

Το συγκεκριμένο είδος ορίζεται από τη στιγμή που μία ροή έχει περάσει από όλα τα στάδια ελέγχου και τις έχουν ανατεθεί οι απαιτούμενοι πόροι. Τα πακέτα πλέον μεταδίδονται στο στρώμα MAC και συσχετίζονται με τις ροές υπηρεσίας μέσω του αναγνωριστικού της σύνδεσής τους (CID).

Οι ροές υπηρεσίας καθίστανται ενεργές είτε μέσω του δυναμικού είτε μέσω του μοντέλου τροφοδοτούμενης έγκρισης. Οι διαδικασίες που περιλαμβάνουν τα δύο μοντέλα δε διαφέρουν σε σχέση με τις επιτρεπόμενες ροές. Είτε δηλαδή ο σταθμός βάσης κρατά πόρους για τις ενεργές ροές και ο κινητός σταθμός του αποστέλλει μήνυμα DSC με τις ενεργές παραμέτρους ροής, είτε ο κινητός σταθμός δυναμικά χρησιμοποιεί απευθείας μήνυμα DSA. Ο περιορισμός που υπάρχει και στις ενεργές ροές είναι το γεγονός πως οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας μίας ενεργής ροής θα πρέπει να είναι υποσύνολο της επιτρεπόμενης ροής. [19]

3.6 Μοντέλα Έγκρισης

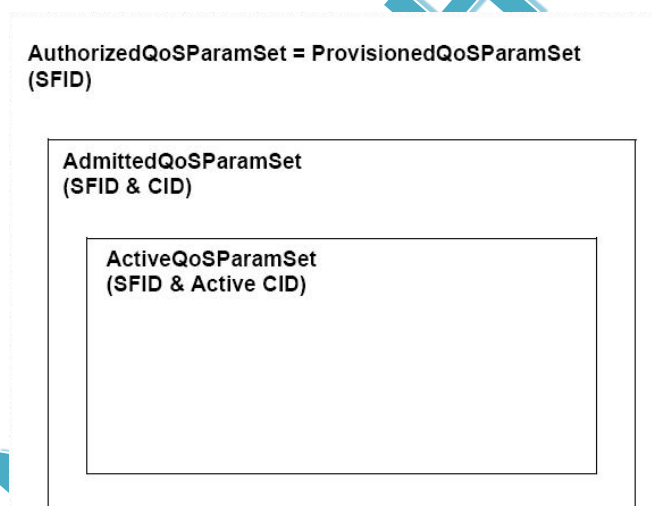
Ο σταθμός βάσης κάνει χρήση ενός μοντέλου έγκρισης, βάσει του οποίου υπάρχουν οι δυνατότητες να επιτρέψει ή να απορρίψει μία νέα ροή υπηρεσίας ή επίσης να αλλάξει τις παραμέτρους που συμπεριλαμβάνονται στη ροή υπηρεσίας ή ακόμα και το είδος της. Όπως

αναφέρθηκε υπάρχει το δυναμικό μοντέλο έγκρισης και το μοντέλο τροφοδοτούμενης έγκρισης. [19]

3.6.1 Μοντέλο Τροφοδοτούμενης Έγκρισης

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, ο σταθμός βάσης αποθηκεύει όλες τις τροφοδοτούμενες ομάδες παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας των ροών υπηρεσίας. Όταν ο κινητός σταθμός χρησιμοποιεί το μήνυμα DSC για να εισαγάγει μία ροή ή να την ενεργοποιήσει, η μονάδα έγκρισης διασφαλίζει ότι οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας των ροών ανήκουν στο υποσύνολο των τροφοδοτούμενων ροών υπηρεσίας αν πρόκειται για επιτρεπόμενη και στο υποσύνολο των επιτρεπόμενων ροών αν μιλάμε για ενεργή. Ο κινητός σταθμός δεν έχει την αντίστοιχη δυνατότητα δημιουργίας τροφοδοτούμενης ροής υπηρεσίας.

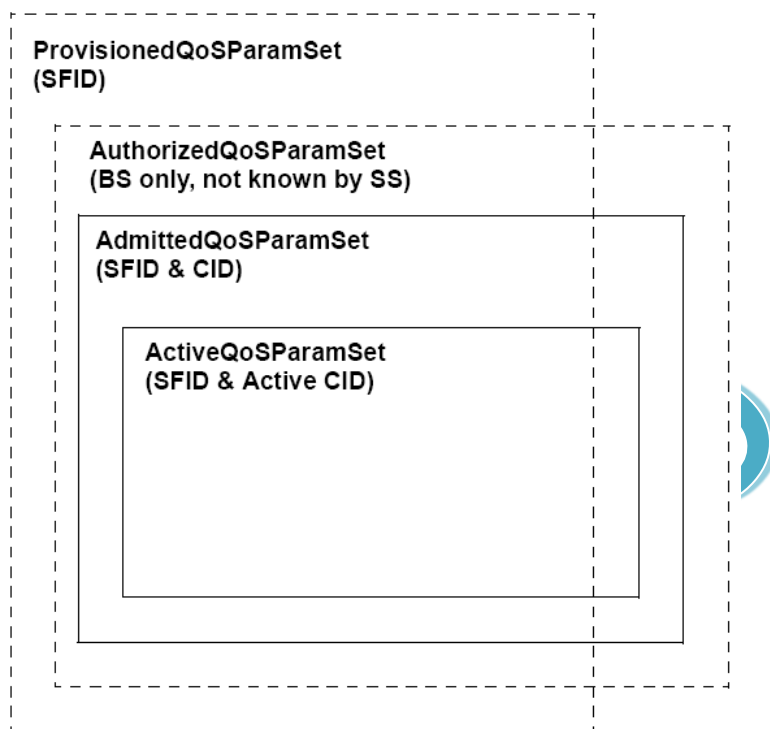
Η τροφοδότηση της ροής υπηρεσίας εκτελείται από τη διαχείριση του δικτύου. [19] Ο σταθμός βάσης μεταχειρίζεται και καταγράφει τη ροή των υπηρεσιών, ενώ παράλληλα τους αναθέτει SFID. Εν συνεχεία, αποστέλλει τη ροή στον κινητό σταθμό μέσω μηνυμάτων DSA-REQ και ο τελευταίος με τη σειρά του στέλνει μηνύματα DSA-RSP μετά την αποδοχή της. Τέλος, ο σταθμός βάσης αποστέλλει μηνύματα DSA-ACK και έτσι λαμβάνει τέλος η διαδικασία.



Εικόνα 18 Μοντέλο τροφοδοτούμενης έγκρισης[17]

3.6.2 Δυναμικό Μοντέλο Έγκρισης

Σύμφωνα με το δυναμικό μοντέλο έγκρισης, υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του εξυπηρετητή πολιτικής (policy server) και της μονάδας έγκρισης. Κατά την επικοινωνία ο εξυπηρετητής ενημερώνει τη μονάδα για τις ενέργειες οι οποίες πρέπει να εκτελεστούν σχετικά με την αίτηση που έχει αποσταλεί από τον κινητό σταθμό. Παραδίδει στη μονάδα όλες τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που αφορούν την αίτηση, συνεπώς οι παράμετροι που έχει αποστείλει ο κινητός σταθμός θα πρέπει να είναι υποσύνολο αυτών. Αν ο εξυπηρετητής δεν αποστείλει πληροφορίες που αφορούν εισερχόμενη αίτηση, η αποδοχή ή η απόρριψη εξαρτάται από τη μονάδα έγκρισης. [19]



Σχήμα 19 Δυναμικό μοντέλο έγκρισης[17]

3.7 Συναλλαγές WiMAX

Στις περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαίο ο σταθμός βάσης ή ο κινητός σταθμός να δημιουργήσουν, να αλλάξουν ή να διαγράψουν μία ροή υπηρεσίας, το κάνουν μέσω συναλλαγών. Η κάθε συναλλαγή διαθέτει ένα μοναδικό αναγνωριστικό και για να διαφοροποιούνται αυτές που αρχικοποιούνται από τον κινητό σταθμό σε σχέση με αυτές που αρχικοποιούνται από το σταθμό βάσης, ο πρώτος χρησιμοποιεί δεκαεξαδικούς αριθμούς από 0000 έως 7FFFFFFF και ο δεύτερος από 8000 έως FFFF [19]

3.7.1 Είδη Συναλλαγών

Το πρότυπο περιλαμβάνει έξι συναλλαγές, τρεις τοπικά και τρεις απομακρυσμένα. Επίσης υπάρχουν συναλλαγές που μπορούν να υποβληθούν σε αρχικοποίηση είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα. Η συναλλαγή που χρησιμοποιείται για τα μηνύματα DSA, DSC και DSD (Dynamic Service Activate, Dynamic Service Change και Dynamic Service Delete αντίστοιχα) φέρουν το αναγνωριστικό ID της συναλλαγής και περιέχουν αιτήσεις, απαντήσεις και ακολουθίες αναγνώρισης.

3.7.2 Καταστάσεις Συναλλαγών

Μία συναλλαγή μπορεί να βρίσκεται σε τρεις καταστάσεις :

1. **Αναμονής (pending)** – κατάσταση στην οποία η συναλλαγή περιμένει απάντηση
2. **Κράτησης (holding)**- κατάσταση στην οποία η συναλλαγή μετά την απάντηση που λαμβάνει, κρατά το μήνυμα για να το ξαναστείλει σε περίπτωση απώλειας του αρχικού
3. **Διαγραφής (deleting)**- κατάσταση στην οποία η συναλλαγή διαγράφει την επεξεργαζόμενη ροή υπηρεσίας

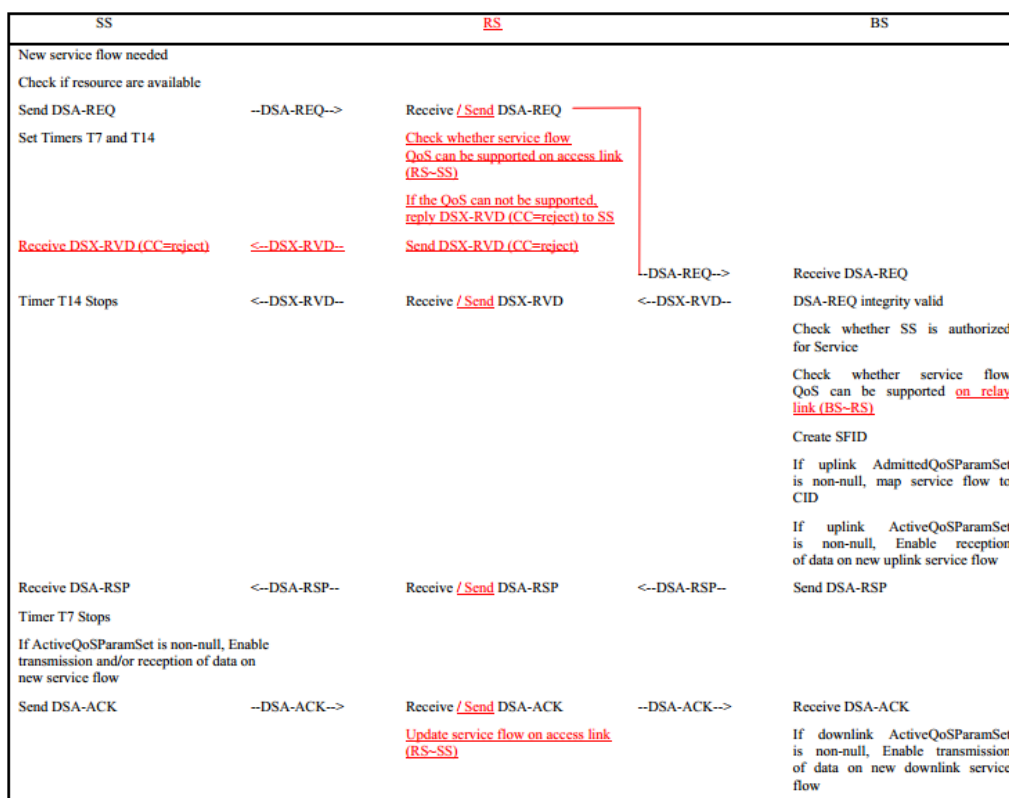
3.8 Δυναμική Ροή Υπηρεσίας

Η δυναμική ροή υπηρεσίας μπορεί να παρουσιαστεί σε κενή κατάσταση ή σε κανονική κατάσταση. Στην περίπτωση της κενής κατάστασης, δεν εξέρχεται καμία ροή υπηρεσίας με ταιριαστό αναγνωριστικό SFID ή αναγνωριστικό συναλλαγής με το μήνυμα συναλλαγής. Για να μεταλλαχτεί αυτή η κατάσταση σε κανονική χρησιμοποιείται ένα μήνυμα DSA. Μία ροή υπηρεσιών εξέρχεται μόνο στην περίπτωση που της αποδοθεί αναγνωριστικό SFID. Όταν μία ροή υπηρεσίας βρίσκεται σε κανονική κατάσταση, το αναγνωριστικό της μπορεί να αλλάξει μέσω μηνυμάτων DSC ενώ όταν γίνεται χρήση του μηνύματος DSD, η ροή υπηρεσίας από κανονική κατάσταση επιστρέφει στην κενή.

3.8.1 Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας

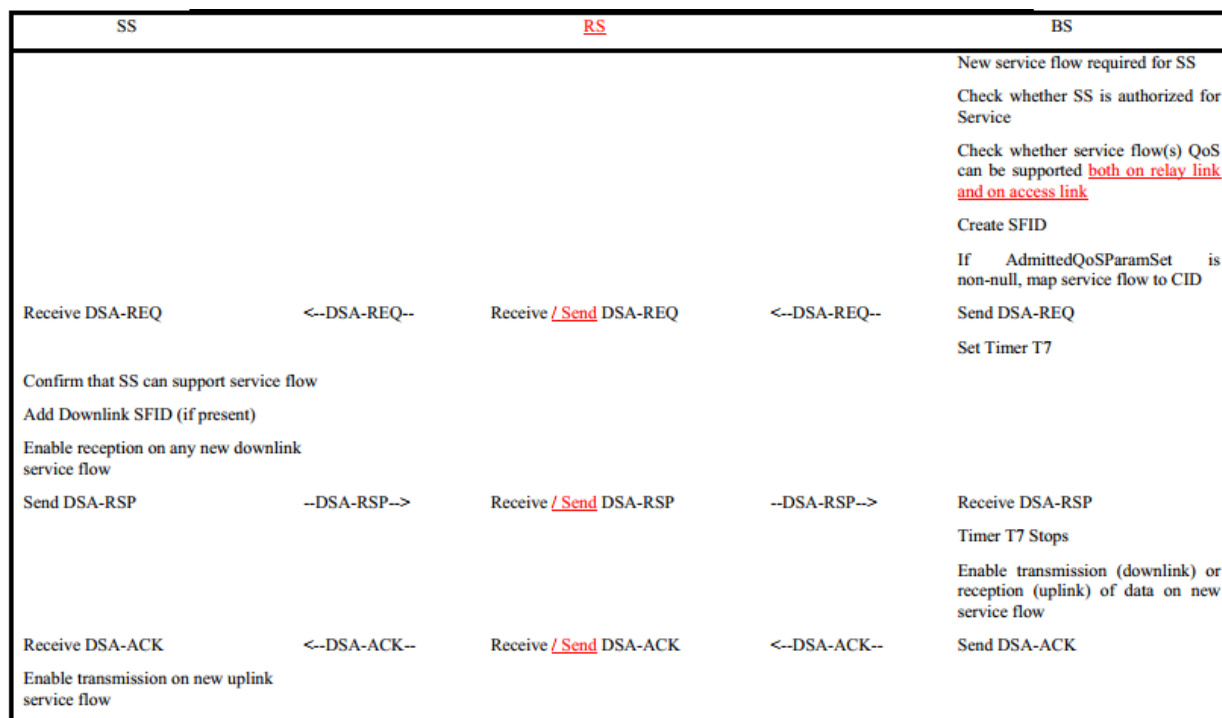
Η δυναμική ροή υπηρεσίας μπορεί να εκτελεστεί από το σταθμό βάσης αλλά και από τον κινητό σταθμό μέσω του DSA, το οποίο συμπεριλαμβάνει το σετ παραμέτρων της ποιότητας υπηρεσίας από το οποίο θα λαμβάνει χαρακτηριστικά ή νέα ροή. Τα χαρακτηριστικά αυτά ομαδοποιούνται ξεχωριστά για τις δύο ζεύξεις, σε ένα σετ παραμέτρων για την άνω κι ένα σετ παραμέτρων για την κάτω.

Στην περίπτωση που η έναρξη της ροής υπηρεσίας πραγματοποιείται από τον κινητό σταθμό, το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον έλεγχο που κάνει ο σταθμός για τη διαθεσιμότητα πόρων. Αν οι πόροι υπάρχουν, αποστέλλει στο σταθμό βάσης ένα μήνυμα αίτησης DSA- REQ εντός του οποίου καθορίζει σε ποια ροή υπηρεσίας και σε ποιο σετ παραμέτρων ποιότητας αναφέρεται, ενεργοποιώντας παράλληλα τα χρονόμετρα T7 και T14. Ο σταθμός βάσης ελέγχει την ακεραιότητα του μηνύματος και απαντά με ένα μήνυμα RSX-RVD, το οποίο μόλις φτάνει στον κινητό σταθμό, σταματά το T14. Έπειτα, ο σταθμός βάσης ελέγχει αν ο κινητός σταθμός είναι εξουσιοδοτημένος για υπηρεσία και αν η ποιότητα της ροής υπηρεσίας μπορεί να υποστηριχθεί και δημιουργεί το αναγνωριστικό SFID. Αν η παράμετρος `AdmittedQoSParamSet` της άνω ζεύξης δεν είναι null συνδέει το SFID με ένα CID και αν η παράμετρος `ActiveQoSParamSet` της άνω ζεύξης δεν είναι null ενεργοποιεί την υποδοχή δεδομένων στη νέα ροή υπηρεσίας της άνω ζεύξης. Στη συνέχεια στέλνει πίσω στον κινητό σταθμό μήνυμα DSA-RSP και σταματά και το T7. Ο κινητός σταθμός, αν στο μήνυμα που έλαβε διαβάσει πως η παράμετρος `ActiveQoSParamSet` δεν είναι null, ενεργοποιεί τη μετάδοση ή τη λήψη δεδομένων στην νέα ροή υπηρεσίας και αποστέλλει μήνυμα DSA- ACK στο σταθμό βάσης. Τέλος, ο σταθμός βάσης διαβάζει την παράμετρο `ActiveQoSParamSet` του μηνύματος και αν δεν είναι κενή ενεργοποιεί κι αυτός τη μετάδοση και τη λήψη στη νέα ροή υπηρεσίας της κάτω ζεύξης.[21]



Σχήμα 20 Δημιουργία ροής υπηρεσίας με ενεργοποίηση από τον κινητό σταθμό [21]

Στην περίπτωση που η έναρξη της ροής υπηρεσίας πραγματοποιείται από σταθμό βάσης, αναλαμβάνει ο ίδιος το πρώτο βήμα της διαδικασίας, που είναι η δημιουργία μίας ροής υπηρεσίας άνω και μίας ροής υπηρεσίας κάτω ζεύξης με τη χρήση μηνύματος DSA-REQ. Αυτό φυσικά συμβαίνει μετά τους απαραίτητους ελέγχους, οι οποίοι αφορούν το αν χρειάζεται νέα ροή υπηρεσίας ο κινητός σταθμός, αν είναι εξουσιοδοτημένος για διαχείριση υπηρεσιών και αν μπορεί να υποστηριχθεί η ποιότητα της ροής υπηρεσίας. Αν αυτοί οι έλεγχοι του το επιτρέψουν, ο σταθμός βάσης δημιουργεί ένα νέο αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας και αν πρόκειται για αίτηση αποδοχής (η παράμετρος AdmittedQoSParamSet δεν είναι null) αποστέλλει το DSA-REQ μήνυμα, ενεργοποιώντας παράλληλα το χρονόμετρο T7. Όταν γίνει η λήψη του μηνύματος, ο κινητός σταθμός επιβεβαιώνει ότι είναι σε θέση να υποστηρίξει ροές υπηρεσίας, προσθέτει αναγνωριστικό SFID στην κάτω ζεύξη και ενεργοποιεί τη λήψη κάθε νέας ροής υπηρεσίας κάτω ζεύξης. Στη συνέχεια στέλνει στο σταθμό βάσης μήνυμα DSA-RSP και μόλις αυτό παραλειφθεί, σταματά το χρονόμετρο T7. Έπειτα ο σταθμός βάσης ενεργοποιεί την εκπομπή και τη λήψη δεδομένων της νέα ροής υπηρεσίας (άνω κάτω ζεύξη) και στέλνει πίσω μήνυμα επιβεβαίωσης DSA-ACK. Τέλος, με τη λήψη του μηνύματος, ο κινητός σταθμός ενεργοποιεί την εκπομπή μέσω της νέας ροής υπηρεσίας. [21]



Σχήμα 21 Δημιουργία ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από το σταθμό βάσης [21]

3.8.2 Δυναμική Αλλαγή Ροής Υπηρεσίας

Η αλλαγή της δυναμικής ροής υπηρεσίας χρησιμοποιείται όταν πρόκειται για μετάβαση από προδιατεθειμένη ροή υπηρεσίας σε επιτρεπόμενη ή μετάβαση από επιτρεπόμενη ροή υπηρεσίας σε ενεργή. Εκτός αυτού, η αλλαγή δυναμικής ροής υπηρεσίας αποτελεί τον τρόπο να τροποποιηθεί το σετ παραμέτρων υπηρεσίας σε μία ροή. Στην περίπτωση που το μήνυμα DSC που αποστέλλεται δεν περιέχει σετ παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας, το υπάρχον σετ μετατρέπεται σε κενό και η ροή υπηρεσίας απενεργοποιείται. Αν το μήνυμα DSC περιλαμβάνει μόνο το επιτρεπόμενο σετ παραμέτρων, το επιτρεπόμενο σετ παραμέτρων της ροής υπηρεσίας αλλάζει και απενεργοποιείται. Τέλος στην περίπτωση που το μήνυμα DSC περιέχει και επιτρεπόμενο και ενεργό σετ παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας τότε μεταβάλλεται αρχικά το επιτρεπόμενο σύνολο. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος αν το ενεργό σετ παραμέτρων είναι υποσύνολο του επιτρεπόμενου, και να η συνθήκη αυτή είναι αληθής μεταβάλλεται και το ενεργό σετ παραμέτρων του μηνύματος.

Η αλλαγή ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί, όπως και η δημιουργία, είτε με αρχικοποίηση από τον κινητό σταθμό, είτε με αρχικοποίηση από το σταθμό βάσης. Όταν αυτό συμβαίνει ταυτοχρόνως, ένας από τους δύο σταθμούς απορρίπτει το εισερχόμενο DSC μήνυμα.

Στην περίπτωση που κάνει την αρχικοποίηση της αλλαγής ροής υπηρεσίας ο κινητός σταθμός, αποστέλλει ένα μήνυμα DSC-REQ στο σταθμό βάσης, το οποίο περιλαμβάνει το μεταβαλλόμενο σετ παραμέτρων και παράλληλα ενεργοποιεί τα χρονόμετρα T7 και T14. Μόλις φτάσει το μήνυμα στον προορισμό του σταματά το χρονόμετρο T14. Ο σταθμός βάσης από την πλευρά του ελέγχει αν ο κινητός σταθμός είναι εξουσιοδοτημένος για υπηρεσία και αν η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να υποστηριχτεί. Σε περίπτωση που οι έλεγχοι αυτοί είναι θετικοί μεταβάλλει τη ροή υπηρεσίας. Αν υπάρχει σχετική απαίτηση, προχωρά σε αύξηση του εύρους ζώνης και αποστέλλει στον κινητό σταθμό μήνυμα DSC-RSP, με τη λήψη του οποίου σταματά το χρονόμετρο T7. Ο κινητός σταθμός στη συνέχεια αλλάζει τη ροή υπηρεσίας, το εύρος ζώνης του ωφέλιμου φορτίου και απαντά με μήνυμα DSC-ACK στο σταθμό βάσης, ο οποίος αν κριθεί απαραίτητο, ελαχιστοποιεί το εύρος ζώνης. Σχηματικά, το διάγραμμα εργασιών της δυναμικής αλλαγής ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από τον κινητό σταθμό είναι ίδιο με αυτό της δημιουργίας.

Αντίστοιχα στην περίπτωση που η δυναμική αλλαγή ροής υπηρεσίας ξεκινά από το σταθμό βάσης, το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος που κάνει για να αποφανθεί αν μπορεί να υποστηρίξει την αλλαγή που θα προκύψει στο σετ παραμέτρων ροής υπηρεσίας. Έπειτα αποστέλλει ένα μήνυμα DSC-REQ στον κινητό σταθμό και ενεργοποιεί το χρονόμετρο T7. Ο κινητός σταθμός επιβεβαιώνει τη λήψη του μηνύματος, ελέγχει τη διαθεσιμότητα των πόρων, μεταβάλλει τη ροή υπηρεσίας και αν κριθεί απαραίτητο μειώνει το εύρος ζώνης του ωφέλιμου φορτίου ανάλογα με τα περιεχόμενα του μηνύματος. Στη συνέχεια απαντά στο σταθμό βάσης με ένα μήνυμα DSC-RSP με τη λήψη του οποίου σταματά το T7 και ο σταθμός βάσης μεταβάλλει το εύρος ζώνης του καναλιού και επιβεβαιώνει μέσω του μηνύματος DSC-ACK που αποστέλλει στον κινητό σταθμό, ο οποίος με τη σειρά του αυξάνει το εύρος ζώνης του ωφέλιμου φορτίου αν απαιτείται κάτι τέτοιο. Σχηματικά, το διάγραμμα εργασιών της δυναμικής αλλαγής ροής με αρχικοποίηση από το σταθμό βάσης είναι ίδιο με αυτό της δημιουργίας.

3.8.3 Δυναμική Διαγραφή Ροής Υπηρεσίας

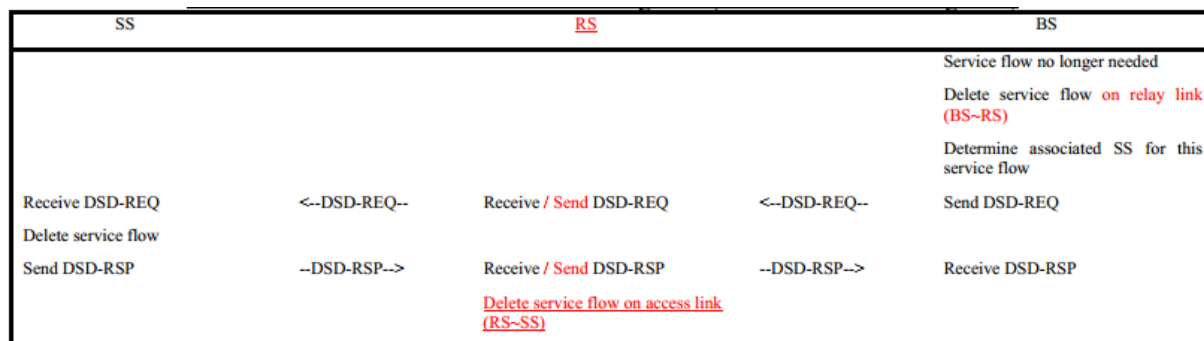
Η διαδικασία της δυναμικής διαγραφής ροής υπηρεσίας πραγματοποιείται μέσω της αποστολής μηνύματος DSD από τον κινητό σταθμό ή το σταθμό συνδρομητή (ανάλογα ποιος κάνει εκκίνηση της διαδικασίας). Μετά το πέρας της διαγραφής ελευθερώνονται οι πόροι που έχουν αποθηκευτεί για τη ροή υπηρεσίας ενώ ο κινητός σταθμός οφείλει να επανακαταχωρήσει τον εαυτό του στην περίπτωση που η διαγραφόμενη ροή περιλαμβάνει πληροφορίες διαχείρισης δικτύου. Τέλος στην περίπτωση διαγραφής μίας τροφοδοτούμενης ροής υπηρεσίας, αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον κινητό σταθμό μόνο αν επανακαταχωρηθεί.

Στην περίπτωση που η διαγραφή αρχικοποιείται από τον κινητό σταθμό, η πρώτη κίνηση που οφείλει να κάνει είναι η αποστολή μηνύματος DSD-REQ στο σταθμό βάσης. Ο τελευταίος επιβεβαιώνει ότι ο κάτοχος της ροής υπηρεσίας είναι όντως ο σταθμός- αποστολέας και εν συνεχεία εκτελεί τη διαγραφή και αποστέλλει ενημερωτικό μήνυμα DSD-RSP.

SS		RS		BS
				Service flow no longer needed
				Delete service flow both on relay link and on access link
				Determine associated SS for this service flow
Receive DSD-REQ	<--DSD-REQ--	Receive / Send DSD-REQ	<--DSD-REQ--	Send DSD-REQ
Delete service flow				
Send DSD-RSP	--DSD-RSP-->	Receive / Send DSD-RSP	--DSD-RSP-->	Receive DSD-RSP

Σχήμα 22 Διαγραφή ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από τον κινητό σταθμό [21]

Στην περίπτωση που η αρχικοποίηση της διαγραφής πραγματοποιείται από το σταθμό βάσης, η διαδικασία ξεκινά με απευθείας διαγραφή της ροής. Στη συνέχεια ο σταθμός βάσης ελέγχει με ποιον κινητό σταθμό σχετίζεται η ροή και του αποστέλλει μήνυμα DSD-REQ. Ο κινητός σταθμός με τη σειρά του διαγράφει τη ροή υπηρεσίας και απαντά με ένα DSD-RSP στο σταθμό βάσης.



Σχήμα 23 Διαγραφή ροής υπηρεσίας με αρχικοποίηση από το σταθμό βάσης [21]

4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του WiMAX

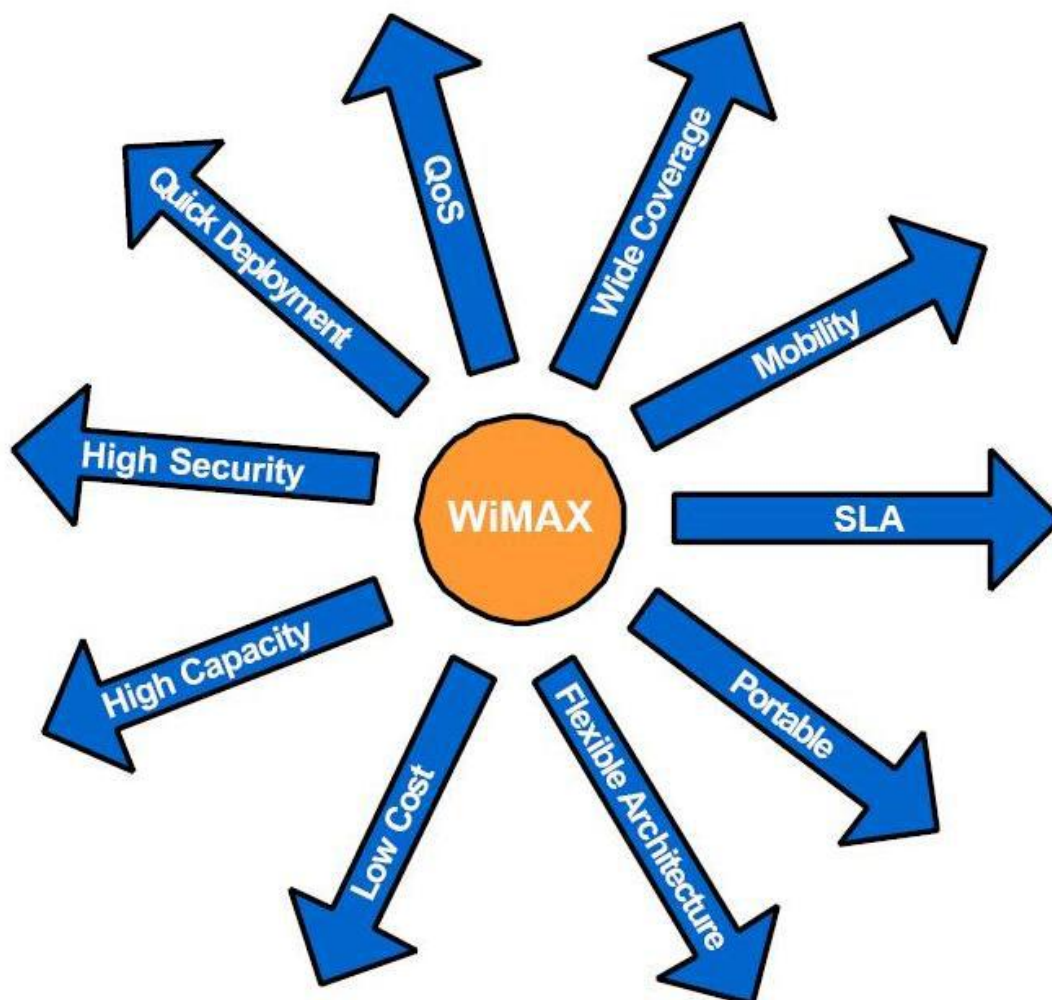
4.1 Πλεονεκτήματα του WiMAX

Το πρότυπο WiMAX παρουσιάζει πλειάδα πλεονεκτημάτων τα οποία καθιστούν θελκτική τη χρήση του. Το γεγονός πως πρόκειται για μία δικτυακή τεχνολογία η οποία παρέχει υψηλή ταχύτητα πρόσβασης σε τόσο μεγάλη εμβέλεια είναι το σημαντικότερο. Εκτός αυτού, η ταχύτατη εγκατάσταση και υλοποίηση του σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος που έχει σε σχέση με άλλα ασύρματα πρότυπα, διευκολύνει τους επίδοξους παρόχους στην ανάπτυξη WiMAX δικτύου. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματά του προτύπου είναι τα ακόλουθα:

- **Ευέλικτη Αρχιτεκτονική-** Το WiMAX πρότυπο υποστηρίζει μεγάλη γκάμα αρχιτεκτονικών και τοπολογιών όπως η τοπολογία σημείου προς σημείο, σημείου προς πολλαπλά σημεία, δίκτυα πλέγματος με συνεχή και ευρεία κάλυψη.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας-** Μέσω του χαρακτηριστικού γνωρίσματος αυτού, το πρότυπο μέσω ομάδων παραμέτρων διαχωρίζει τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας, δίνοντας τις αντίστοιχες ταχύτητες και προτεραιότητες στο δίκτυο. Υποστηρίζει επίσης και τις ροές υπηρεσίας, που αποτελούν ένα σύνολο πακέτων με κοινά χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας.
- **Ασφάλεια-** Το πρότυπο παρέχει μεθόδους AAA και κρυπτογράφησης όπως το AES και το πρότυπο 3DES. Οι ζεύξεις μεταξύ κινητών σταθμών και σταθμών βάσης είναι κρυπτογραφημένες, γεγονός που διασφαλίζει την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια κατά τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των χρηστών.
- **Γρήγορη Ανάπτυξη-** Σε σύγκριση με την εγκατάσταση ασυρμάτων δικτύων, το WiMAX υπερτερεί σαφέστατα σε ταχύτητα και οικονομική επιβάρυνση εγκατάστασης, αφού δεν υπάρχουν απαιτήσεις για εκσκαφή και τοποθέτηση καλωδίων ή οπτικής ίνας. Προαπαιτούμενα για την παροχή υπηρεσιών είναι η κεραία και ο εξοπλισμός, επομένως ο χρόνος εγκατάστασης, αν εξαιρεθεί η απόκτηση άδειας που μπορεί να διαρκέσει παραπάνω λόγω γραφειοκρατικών διαδικασιών, είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με άλλες τεχνολογίες.
- **Πολυεπίπεδη Υπηρεσία-** Η παροχή των υπηρεσιών πραγματοποιείται σε συνάρτηση με ένα συμβόλαιο που υπογράφεται μεταξύ παρόχου- χρήστη (Service Level Agreement). Ο πάροχος μπορεί να προσφέρει διαφορετικά συμβόλαια σε διαφορετικούς χρήστες, ακόμα κι αν εξυπηρετούνται από τον ίδιο κινητό σταθμό.
- **Διαλειτουργικότητα-** Το πρότυπο είναι υλοποιημένο πάνω σε παγκόσμια πρότυπα, η ανάπτυξη των οποίων έχει γίνει ανεξαρτήτως κατασκευαστών, γεγονός που το

καθιστά διαλειτουργικό. Οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης σε διαφορετικές περιοχές κάλυψης και να εξυπηρετούνται από διαφορετικούς παρόχους (roaming). Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί πλεονέκτημα και για τους παρόχους, οι οποίοι κερδίζουν συνδρομητές λόγω της αποδοχής του χρήστη ο οποίος γνωρίζοντας ότι μπορεί να εξυπηρετηθεί από άλλο πάροχο με τον ίδιο εξοπλισμό δε διστάζει να χρησιμοποιεί την τεχνολογία.

- **Φορητότητα-** Το πρότυπο υποστηρίζει τους κινητούς χρήστες στο πλαίσιο και τον υπολοίπων κυψελωτών δικτύων. Έτσι με την ενεργοποίηση του κινητού σταθμού, επέρχεται ταυτοποίηση, καθορισμός των χαρακτηριστικών σύνδεσης και αποθήκευση τους σε βάση δεδομένων.
- **Κινητικότητα-** Από το πρότυπο 802.16e κι έπειτα υπάρχει υποστήριξη κινητικότητας χρηστών. Μέσω του scalable OFDMA φυσικού στρώματος, των MIMO κεραιών, των μεταπομπών και της εξοικονόμησης ενέργειας με idle και sleep mode, υποστηρίζεται η πλήρης κινητικότητα χρηστών με ταχύτητα μέχρι και 160 km/h ακόμα και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής.
- **Χαμηλό Κόστος-** Το πρότυπο βασίζεται σε ανοιχτό, παγκόσμιο πρωτόκολλο το οποίο επιτρέπει την εγκατάσταση, υλοποίηση και χρήση του δικτύου με κεντρικό άξονα το χαμηλό κόστος.
- **Ευρεία Κάλυψη-** Το πρότυπο υποστηρίζει διαμορφώσεις BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM με αποτέλεσμα να είναι αποτελεσματικό και αποδοτικό στον τομέα της κάλυψης με ποικιλία επιλογών.
- **Λειτουργία σε συνθήκες μη οπτικής επαφής-** Η μη ύπαρξη οπτικής επαφής αποτελεί εμπόδιο σε πολλά ασύρματα πρότυπα. Το WiMAX υπερβαίνει το εμπόδιο αυτό μέσω της τεχνολογίας OFDM, μέσω του οποίου είναι δυνατή η παροχή μεγάλου εύρους ζώνης σε τέτοια περιβάλλοντα.
- **Υψηλή Χωρητικότητα-** Με τη χρήση της υψηλότερης διαμόρφωσης και εύρους ζώνης καναλιού, το WiMAX δίκτυο παρέχει σημαντικό εύρος ζώνης στους συνδρομητές. [22]



Σχήμα 24 Πλεονεκτήματα WiMAX[22]

4.2 Μειονεκτήματα του WiMAX

Λόγω των προδιαγραφών του προτύπου, έχει δημιουργηθεί η παρανόηση πως το WiMAX μπορεί να προσφέρει ταχύτητες 70 Mbps σε ακτίνα 113 km. Στην πραγματικότητα, αυτό το εύρος ζώνης μπορεί να αποδοθεί μόνο σε ιδανικές συνθήκες, με οπτική επαφή, από ένα σταθμό βάσης σε ένα σταθερό συνδρομητή.

Η ταχύτητα που θα μπορούσε να παρέχει το WiMAX σε συνθήκες line of sight, είναι αυτή των 10 Mbps, σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων. Σε non line of sight συνθήκες η ταχύτητα των 10 Mbps μπορεί να αποδοθεί σε ακτίνα των 2 km. Όταν έχουμε κινητούς χρήστες, η ταχύτητα αυτή μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Το WiMAX επίσης έχει περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Αποτελεί μεγάλο μειονέκτημα για τη χρήση του WiMAX το γεγονός ότι δεν κατέχει μεγάλο φάσμα συχνοτήτων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Για την κάλυψη των περιοχών αυτών απαιτείται υψηλό εύρος ζώνης, γεγονός που οδηγεί σε υψηλές δαπάνες. [23]

Επίσης στην πράξη δεν υποστηρίζεται πλήρως η κινητικότητα τερματικών. Η δομή του WiMAX δεν έχει εξαπλωθεί σε ολόκληρο τον κόσμο και αυτός είναι ο λόγος που μεγάλες

εταιρείες διστάζουν να προβούν σε εγκαταστάσεις σταθμών βάσης και μέχρι στιγμής δεν έχει επιτευχθεί πλήρης κινητικότητα [23]

Το εύρος ζώνης μοιράζεται μεταξύ των χρηστών εντός ενός συγκεκριμένου τομέα ραδιοκυμάτων και όταν υπάρχει μεγάλο πλήθος χρηστών στον τομέα αυτό, οι χρήστες μοιράζονται χαμηλότερη ταχύτητα. Μειονέκτημα αποτελεί και το κόστος εγκατάστασης του WiMAX (εξοπλισμού παρόχου). [24] Συνοπτικά:

- Όταν υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ χρήστη και σταθμού βάσης κρίνεται απαραίτητη η οπτική επαφή, γεγονός που μπορεί να αυξήσει και το κόστος αν ο τρόπος αντιμετώπισής του είναι η τοποθέτηση ενδιάμεσων συσκευών.
- Είναι πιθανή η διακοπή της σύνδεσης λόγω κακών καιρικών συνθηκών όπως είναι η βροχή.
- Είναι δυνατή η πρόκληση παρεμβολών από άλλες ασύρματες συσκευές.
- Το WiMAX αποτελεί μία τεχνολογία που καταναλώνει αρκετή ισχύ και απαιτεί μεγάλο εύρος ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η εγκατάστασή του αποτελεί μία διαδικασία σημαντικού κόστους. Το ίδιο ισχύει και για τα λειτουργικά του έξοδα.
- Χρησιμοποιούνται πολλαπλασιαζόμενες συχνότητες.

5 Σενάρια Χρήσης WiMAX

Το WiMAX πρότυπο χάρη στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις κλάσεις υπηρεσίας του έχει τη δυνατότητα υποστήριξης δικτύων πολλαπλών σεναρίων χρήσης. Αρκετά από αυτά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

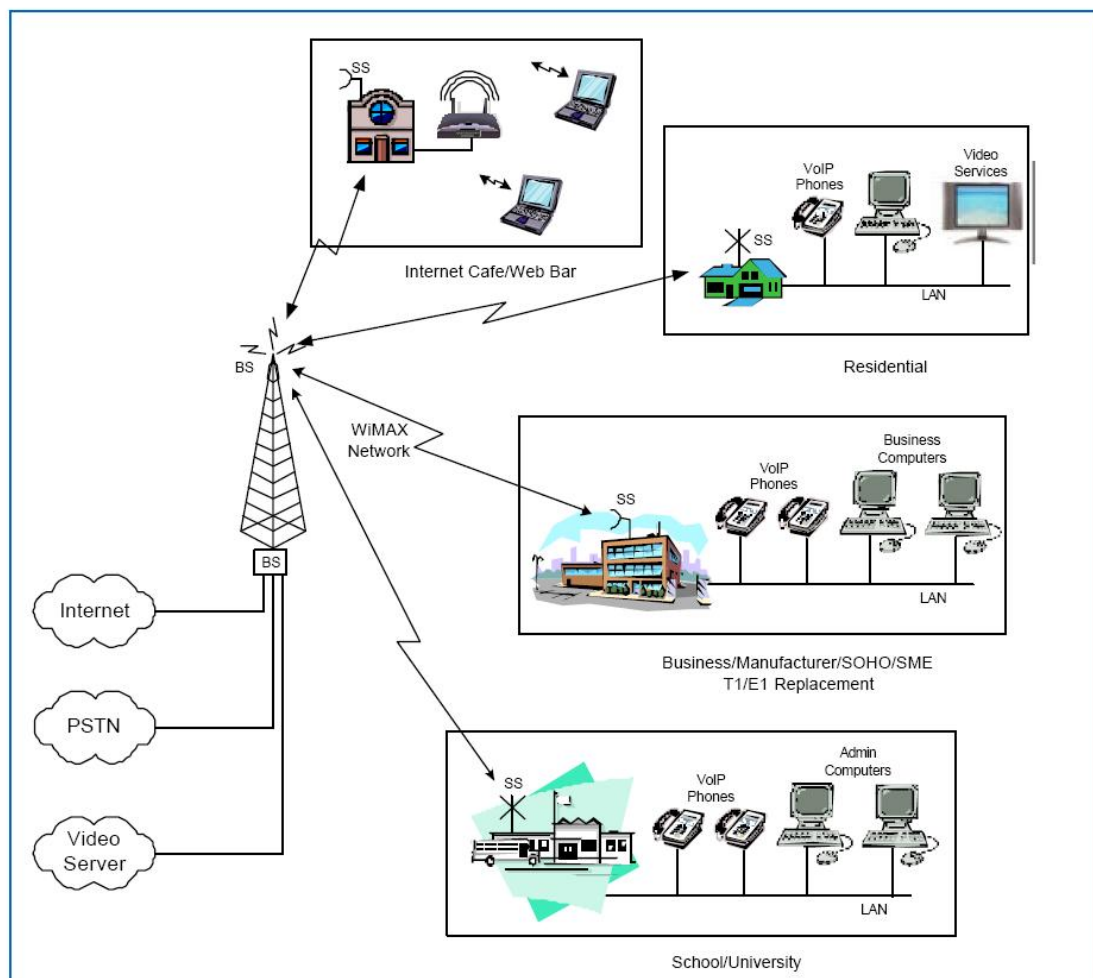
	Flexible Architecture	High Security	WiMAX QoS	Quick Deployment	Multi-Level Service	Interoperability	Portability	Mobility	Cost-Effective	Wider Coverage	NLOS	High Capacity
Cellular Backhaul				x					x			x
WSP Backhaul				x					x			x
Banking Networks	x	x	x						x		x	
Education Networks	x		x						x	x		
Public 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 25 Πίνακας Σεναρίων Χρήσης WiMAX [22]

5.1 Δημόσια Δίκτυα

Οι πάροχοι ασυρμάτων υπηρεσιών έχουν τη δυνατότητα χρήσης του WiMAX για να παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες σε οικιακούς συνδρομητές και σε επιχειρήσεις. Μία startup επιχείρηση παροχής δικτύου με έλλειψη πόρων για εξοπλισμό μπορεί να επιλέξει το WiMAX χάρη στην εύκολη και γρήγορη εγκατάστασή του, καθώς αυτό θα τους βοηθήσει στην ταχεία κάλυψη του χάσματος που τη χωρίζει από τους ανταγωνιστές που βρίσκονται ήδη στην αγορά. Αντιθέτως, οι ενσύρματες λύσεις ή οι οπτικές ίνες είναι οικονομικά δυσβάσταχτες για μία τέτοιου είδους επιχείρηση κατά την εγκατάστασή τους. Εκτός αυτού οι ενσύρματες λύσεις δεν είναι ιδανικές για τις αγορές στις υποανάπτυκτες περιοχές και στις αναπτυσσόμενες χώρες καθώς δεν υπάρχει η κατάλληλη υποδομή.

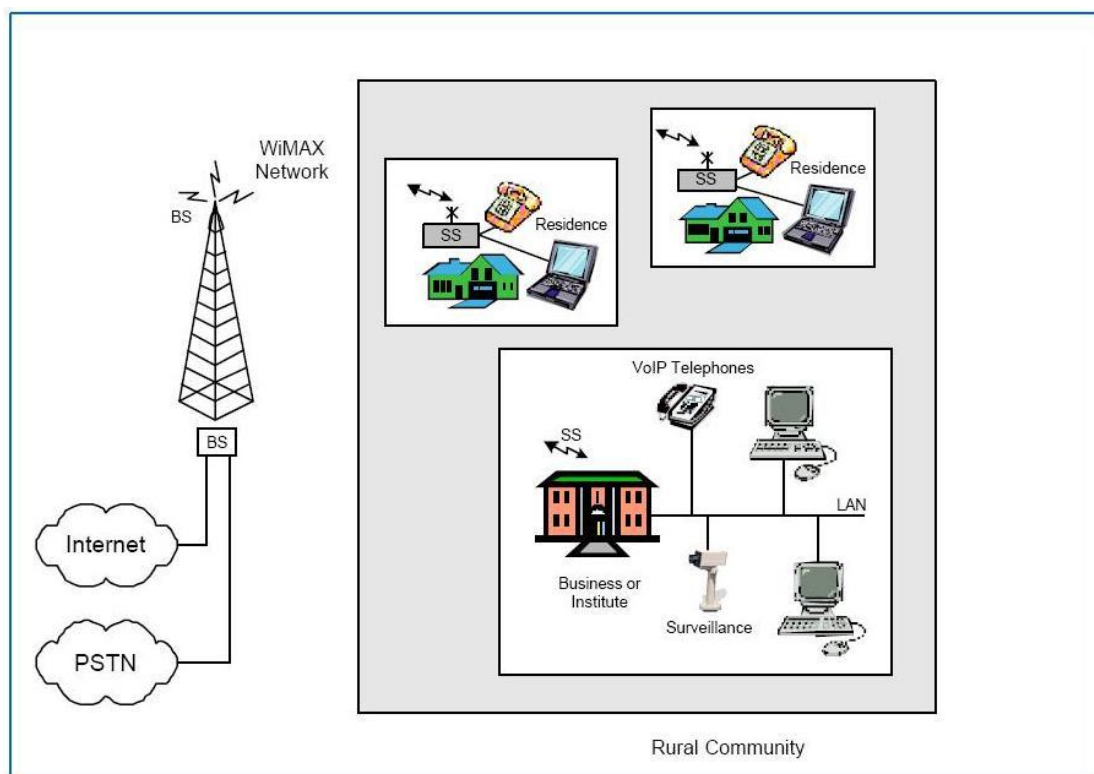
Το μοντέλο ελέγχου ποιότητας υπηρεσίας που συμπεριλαμβάνεται στο πρότυπο είναι κατάλληλο για τη διαχείριση της δικτυακής κυκλοφορίας την οποία θα εποπτεύει ο πάροχος. Χάρη στην ποιότητα υπηρεσίας είναι εφικτή η παροχή υπηρεσιών σε διαφορετικά επίπεδα ανάλογα με τα υπογεγραμμένα συμβόλαια και τις ανάγκες κάθε χρήστη. Αυτό αποτελεί ένα πλεονέκτημα σε παρόχους οι οποίοι γίνονται ελκυστικοί στον πελάτη που με έναν λογαριασμό μπορεί να πληρώνει τον αριθμό υπηρεσιών που εκείνος επιλέγει. Τέλος, η εγκατάσταση του WiMAX είναι προσοδοφόρα και για τους υπάρχοντες παρόχους κυψελωτών υπηρεσιών οι οποίοι έχουν ήδη υποδομή (σταθμούς βάσης), τιμολόγηση και δίκτυο πελατών και μπορούν να αυξήσουν τις υπηρεσίες τους προς τους συνδρομητές.



Σχήμα 26 Δίκτυο Πρόσβασης Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας [22]

5.2 Αγροτικές Περιοχές

Οι πάροχοι ασυρμάτων υπηρεσιών έχουν τη δυνατότητα χρήσης του WiMAX για να παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες σε αγροτικές περιοχές ή σε προάστια αστικών περιοχών. Οι συνδέσεις αυτές είναι πολύ σημαντικές σε αναπτυσσόμενες χώρες ή σε υποβαθμισμένες περιοχές όπου η έλλειψη ανάπτυξης και υποδομών αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για τη δικτύωσή τους. Στις περιοχές αυτές, το WiMAX λόγω του ότι δεν είναι κοστοβόρο, και μπορεί να εγκατασταθεί γρήγορα αποτελεί σημαντική λύση. Μέσω του WiMAX είναι εφικτή η παροχή υπηρεσιών φωνής και πλοήγησης στο διαδίκτυο με παρόμοιες ταχύτητες και ασφάλεια με τις ενσύρματες λύσεις.

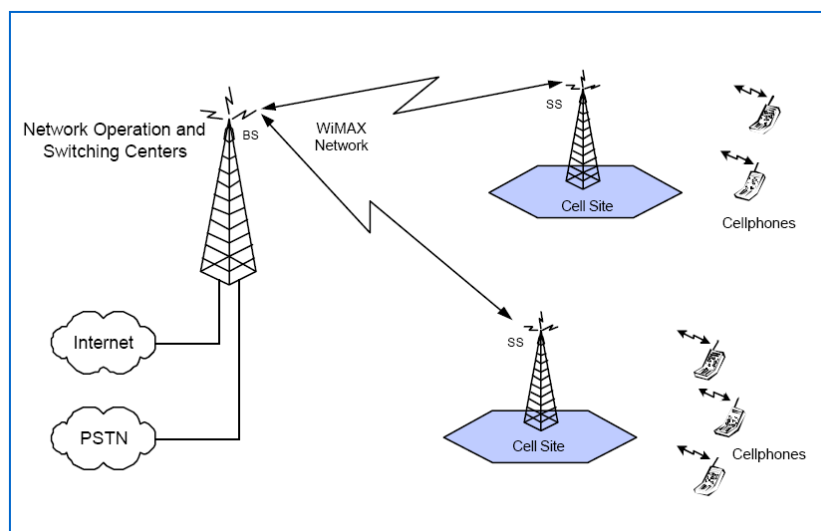


Σχήμα 27 Συνδεσιμότητα Αγροτικών Περιφερειών [22]

5.3 Backhaul Σε Κυψελωτά Δίκτυα

Λόγω της αύξησης του ανταγωνισμού στον τομέα των κυψελωτών υπηρεσιών, οι πάροχοι ερευνούν λύσεις που απαιτούν λιγότερες δαπάνες από μέρους τους αλλά και τρόπους που θα τους διατηρήσουν στην αγορά μειώνοντας το λειτουργικό κόστος των δικτύων τους. Ένα κομμάτι στο οποίο δαπανώνται σημαντικά χρήματα είναι αυτό των σταθμών εκπομπής, των επαναληπτών και των ενισχυτών σήματος (backhaul). Το WiMAX προσφέρει τη δυνατότητα ασύρματων ζεύξεων σημείου προς σημείο με κάλυψη αποστάσεων έως και 50 km. Για έναν πάροχο ασύρματων υπηρεσιών αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο για την υποστήριξη της κίνησης των σταθμών βάσης.

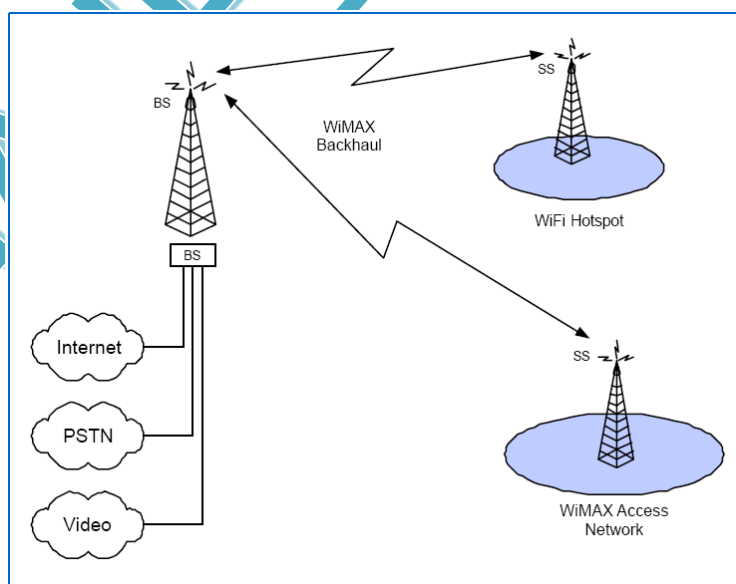
Το WiMAX προσφέρει μηχανισμούς ελέγχου ποιότητας υπηρεσίας που μπορούν να υποστηρίξουν φωνή και δεδομένα, τα οποία ουσιαστικά απαρτίζουν τα πακέτα μετάδοσης των κυψελωτών δικτύων. Ένας τηλεφωνικός πάροχος λοιπόν, αντί να προβεί σε ενοικίαση ενός δικτύου κορμού από το κράτος ή κάποιον άλλο πάροχο η οποία θα του κοστίζει ακριβά και θα είναι χρονοβόρα, μπορεί να προτιμήσει το backhaul μέσω WiMAX.



Σχήμα 28 Χρήση WiMAX ως backhaul σε Κυψελωτά Δίκτυα [22]

5.4 Backhaul Σε Ασύρματα Δίκτυα

Οι πάροχοι ασύρματης υπηρεσίας έχουν τη δυνατότητα χρήσης WiMAX εξοπλισμού για τη μεταβίβαση πληροφοριών από τους σταθμούς βάσης στα δίκτυα πρόσβασής τους. Τα δίκτυα πρόσβασης βασίζονται σε WiMAX, WiFi ή κάποια άλλη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Στην περίπτωση που το δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιεί εξοπλισμό WiFi, το συνολικό δίκτυο του παρόχου αποκαλείται Hot Zone. Όπως και στην περίπτωση των κυψελωτών δικτύων, οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας που είναι ενσωματωμένοι στο WiMAX πρότυπο είναι ικανοί να υποστηρίξουν την ασφαλή μετάδοση πληροφοριών φωνής, δεδομένων και video του παρόχου, βελτιστοποιώντας τις υπηρεσίες backhaul.

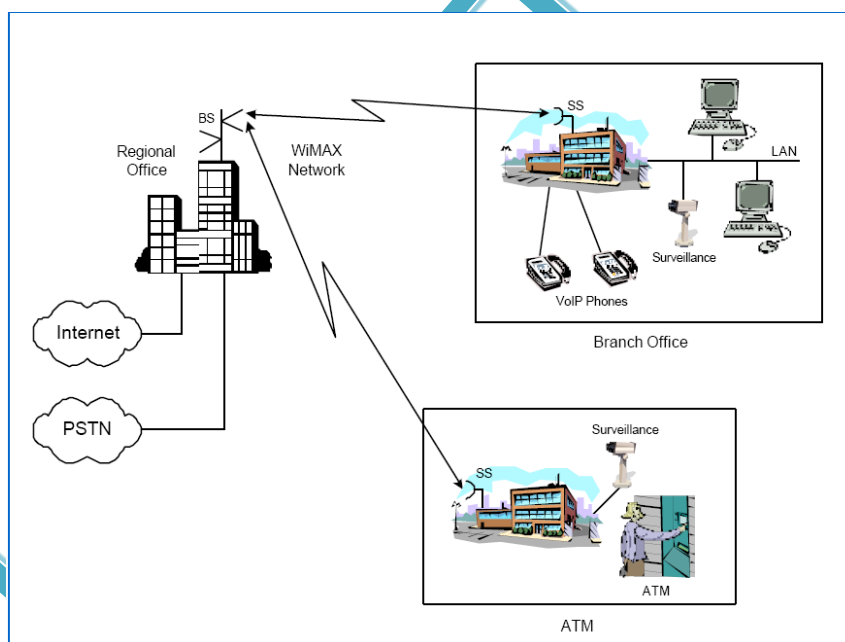


Σχήμα 29 Χρήση WiMAX ως backhaul σε Ασύρματα Δίκτυα [22]

5.5 Δίκτυα Τραπεζών

Οι τράπεζες έχουν τη δυνατότητα χρήσης ενός WiMAX δικτύου σαν ένα μέσο σύνδεσης των υποκαταστημάτων και των μηχανημάτων ανάληψης χρημάτων με το κεντρικό κατάστημα τους. Λόγω του χαρακτήρα των τραπεζών απαιτείται υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, ασφάλειας και μεγάλο εύρος ζώνης ώστε να γίνει σωστή διαχείριση του μεγάλου όγκου πληροφοριών που διαχειρίζονται καθημερινά οι τράπεζες.

Το πρότυπο του WiMAX έχει καθορίσει αυστηρές προδιαγραφές και παρέχει αποτελεσματικούς αλγορίθμους κρυπτογράφησης στον τομέα της ασφάλειας σε ότι αφορά τα δύο χαμηλότερα στρώματα του δικτύου. Από εκεί και πέρα σε συνδυασμό με τους κανόνες που καθορίζουν άλλα πρωτόκολλα όπως το SSL (Secure Sockets Layer), μπορεί να προκύψει end to end ασφάλεια σε ένα τραπεζικό δίκτυο. Η ευρεία κάλυψη και η υψηλή χωρητικότητα δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης ενός γραφείου με πλειάδα υποκαταστημάτων ενώ ο κλιμακούμενος χαρακτήρας του προτύπου επιτρέπει κάθε μορφής μετάδοση, είτε είναι χαμηλόρυθμη (κεντρικά γραφεία με ATM) είτε είναι υψηλόρυθμη (κεντρικά γραφεία με υποκαταστήματα). Σημαντικό ρόλο για την κλιμάκωση παίζει ο μηχανισμός ποιότητας υπηρεσίας μέσω του οποίου εκχωρείται εύρος ζώνης ανά ροή υπηρεσίας. Τέλος σε περίπτωση που μία τράπεζα χρησιμοποιεί δικό της WiMAX δίκτυο, είναι πολύ πιο εύκολο να το αναμορφώσει σε περίπτωση μετακόμισης υποκαταστήματος ή βλάβης κάποιου μηχανήματος ανάληψης, κάτι που δεν ισχύει σε περίπτωση DSL ή καλωδιακής τεχνολογίας.

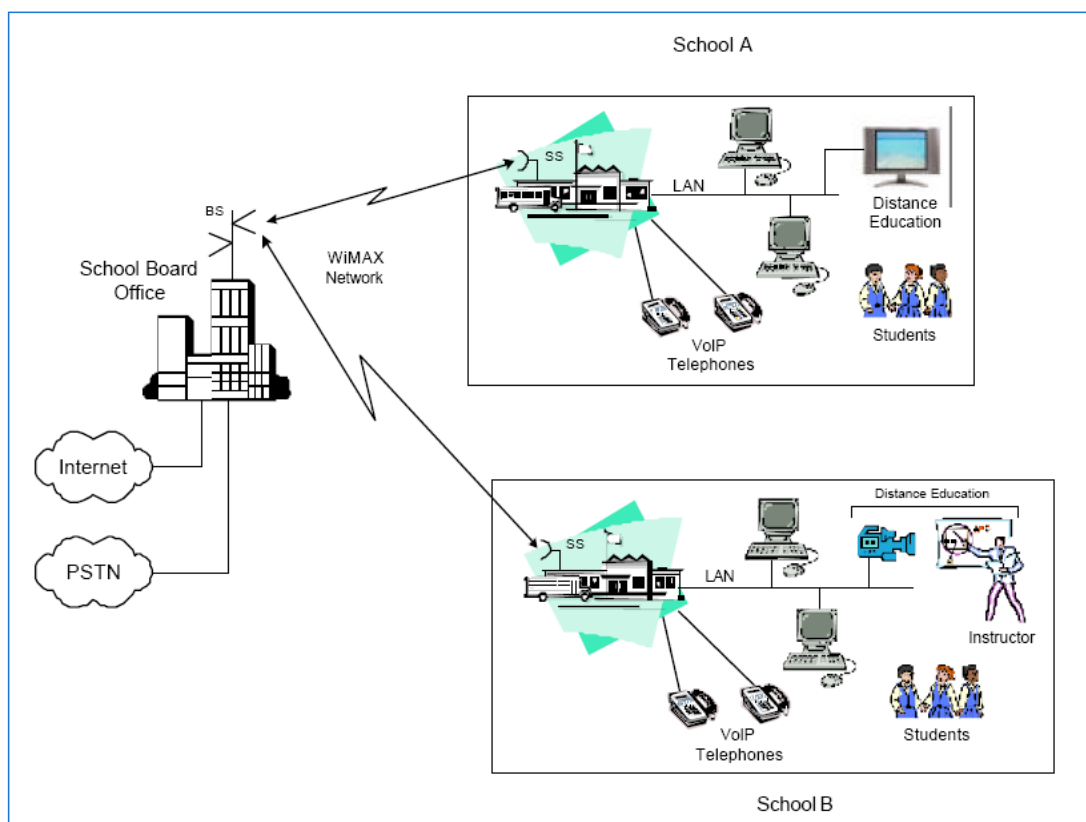


Σχήμα 30 Χρήση WiMAX σε Τραπεζικά Δίκτυα [22]

5.6 Εκπαιδευτικά Δίκτυα

Μία ακόμα δυνατότητα του WiMAX δικτύου είναι η υποστήριξη ενός δικτύου που συνδέει σχολεία ή άλλα εκπαιδευτικά ιδρύματα. Εκμεταλλευόμενοι την υποστήριξη του προτύπου σε συνθήκες μη οπτικής επαφής, το υψηλό εύρος ζώνης του καθώς και τη δυνατότητα σύνδεσης σε τοπολογίες σημείου προς σημείο αλλά και τοπολογίες σημείου προς πολλαπλά σημεία, οι αρμόδιοι φορείς μπορούν να εγκαταστήσουν εκπαιδευτικά δίκτυα. Τα WiMAX εκπαιδευτικά

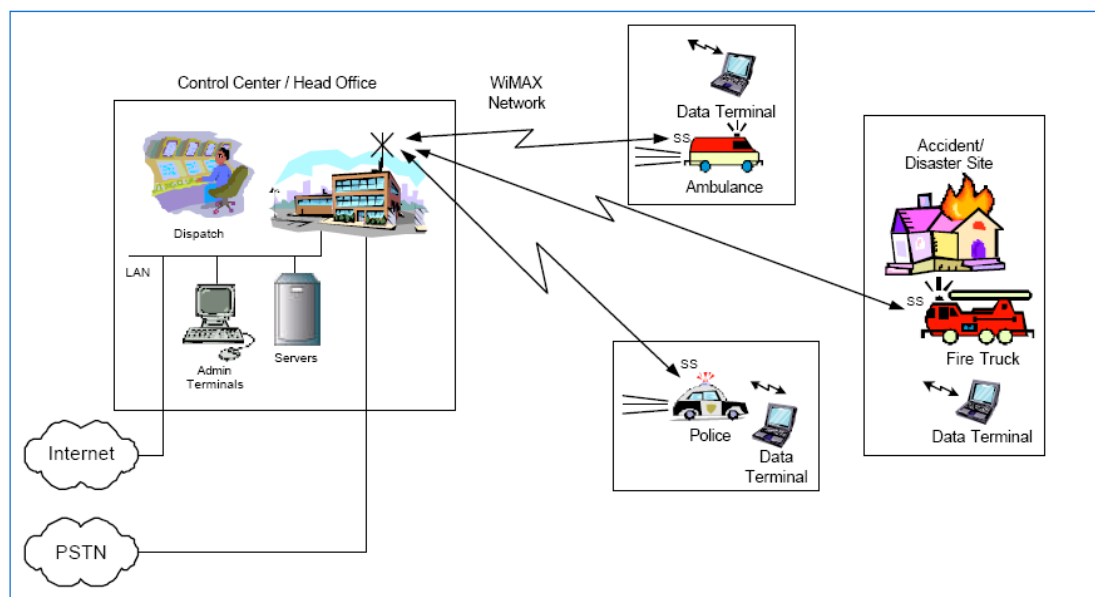
δίκτυα παρέχουν υπηρεσίες τηλεφωνίας, μεταφοράς δεδομένων, πλοήγησης στο διαδίκτυο και τηλε-εκπαίδευσης. Ειδικά στην περίπτωση των εκπαιδευτικών ιδρυμάτων αγροτικών ή αναπτυσσόμενων περιοχών, χωρίς δικτυακή υποδομή, τα WiMAX δίκτυα αποτελούν μία λύση καθώς συνδέουν τα απομακρυσμένα αυτά σχολεία είτε μεταξύ τους είτε με το αρμόδιο υπουργείο ή δημόσιο φορέα.



Σχήμα 31 Χρήση WiMAX σε Εκπαιδευτικά Δίκτυα [22]

5.7 Δημόσια Ασφάλεια

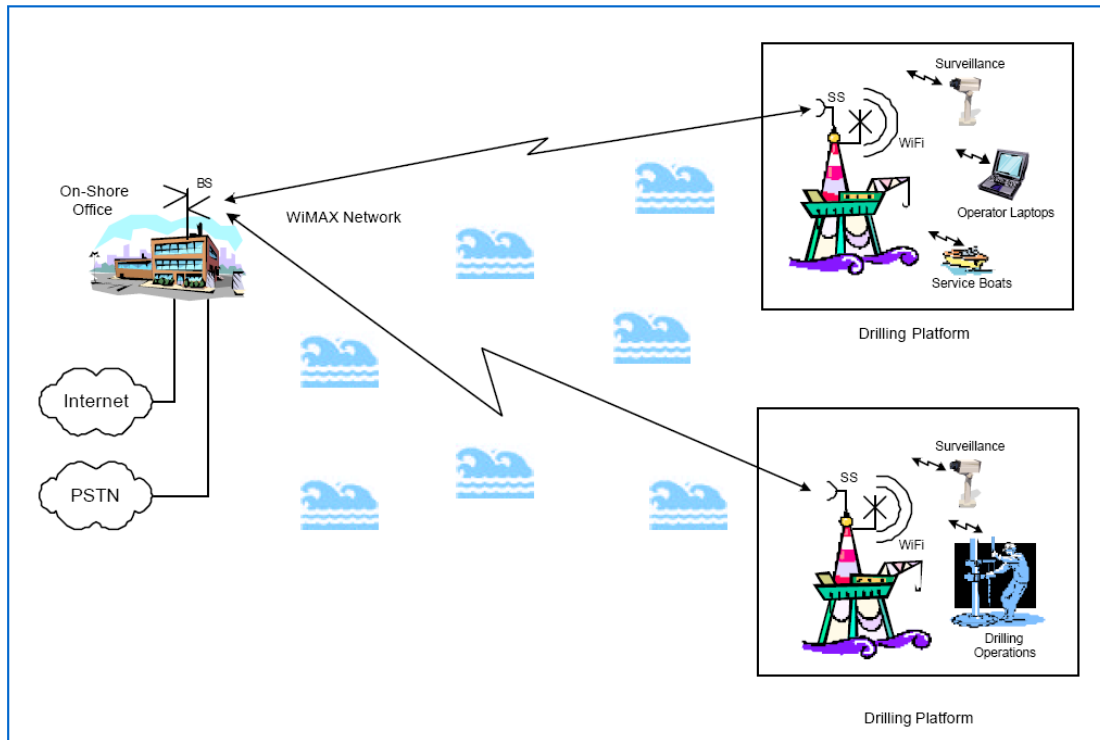
Οι υπηρεσίες δημόσιας ασφάλειας, όπως αστυνομία, πυροσβεστική και οι μονάδες διάσωσης, έχουν τη δυνατότητα χρήσης δικτύου WiMAX για διασύνδεση και την επικοινωνία σε επείγουσες περιστάσεις. Το WiMAX υποστηρίζει την κινητικότητα των κινητών μονάδων και παρέχει αμφίδρομη επικοινωνία από αυτές προς το κέντρο ελέγχου και αντίστροφα. Μπορούν να μεταφερθούν δεδομένα φωνής, εικόνας και video από τους τόπους ατυχημάτων προς το κέντρο ελέγχου ενώ η ευκολία στην εγκατάσταση επιτρέπει για παράδειγμα σε ένα σωστικό συνεργείο να στήσει ένα προσωρινό ασύρματο δίκτυο σε σημείο που υπάρχει μία φυσική καταστροφή.



Σχήμα 32 Χρήση WiMAX σε Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας [22]

5.8 Offshore Δίκτυα

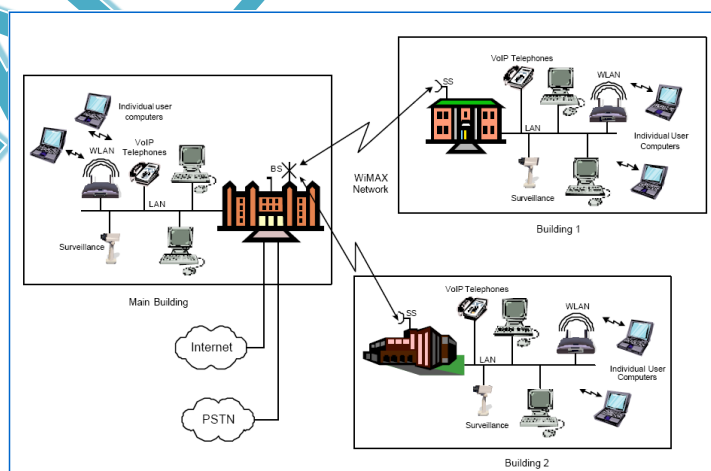
Οι παραγωγοί πετρελαίου και αερίου έχουν τη δυνατότητα χρήσης WiMAX εξοπλισμού για την επικοινωνία των γραφείων τους με τις χερσαίες και θαλάσσιες εγκαταστάσεις. Οι απομακρυσμένες λειτουργίες του WiMAX συμπεριλαμβάνουν την απομακρυσμένη επίλυση προβλημάτων εξοπλισμού, την παρακολούθηση τοποθεσίας καθώς και πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων. Σε περίπτωση βλάβης σε απομακρυσμένο κομμάτι μιας θαλάσσιας πλατφόρμας για παράδειγμα, θα μπορούσαν να αποσταλούν video ή εικόνες στους τεχνικούς για εκτίμηση και διόρθωση της κατάστασης. Επίσης είναι σημαντικό όπως και για τα δίκτυα δημόσιας ασφάλειας το γεγονός πως ένα δίκτυο WiMAX μπορεί να στηθεί ή να ξαναστηθεί μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που μπορεί να δώσει λύσεις σε μία πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου που μεταφέρεται.



Σχήμα 33 Χρήση WiMAX σε Offshore Δίκτυα [22]

5.9 Πανεπιστημιακά Δίκτυα

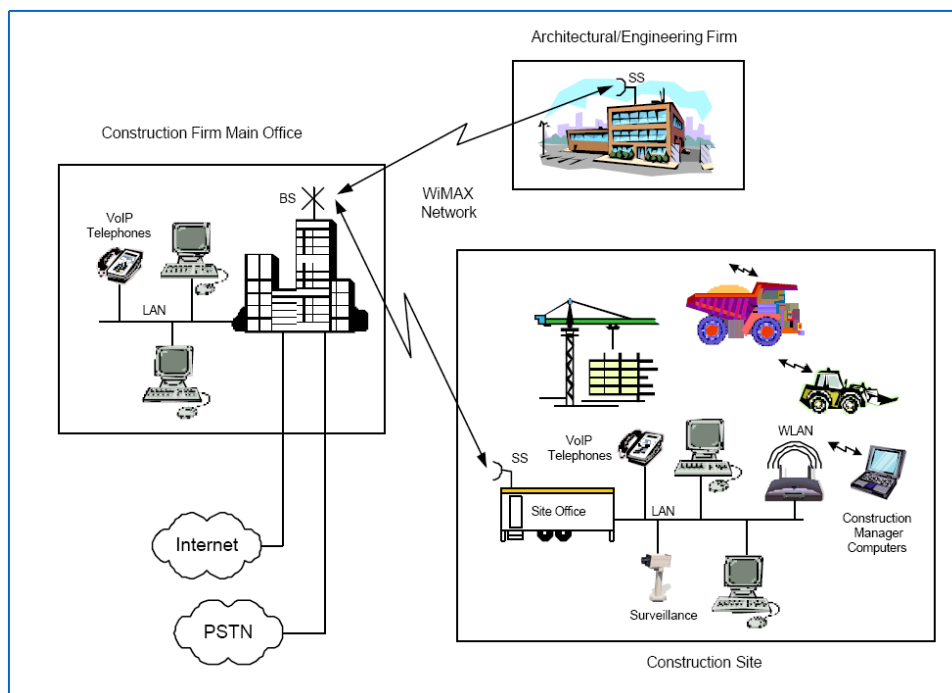
Το WiMAX δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πανεπιστήμια, μεγάλες επιχειρήσεις, κυβερνητικές υπηρεσίες, μεταφορικά μέσα ή κολέγια για τη σύνδεση πολλαπλών τοποθεσιών εντός των εγκαταστάσεων τους. Τα πανεπιστημιακά δίκτυα απαιτούν υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή ασφάλεια, ενώ η περιοχή κάλυψης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.



Σχήμα 34 Χρήση WiMAX σε Πανεπιστημιακά Δίκτυα [22]

5.10 Επικοινωνία σε προσωρινές κατασκευές

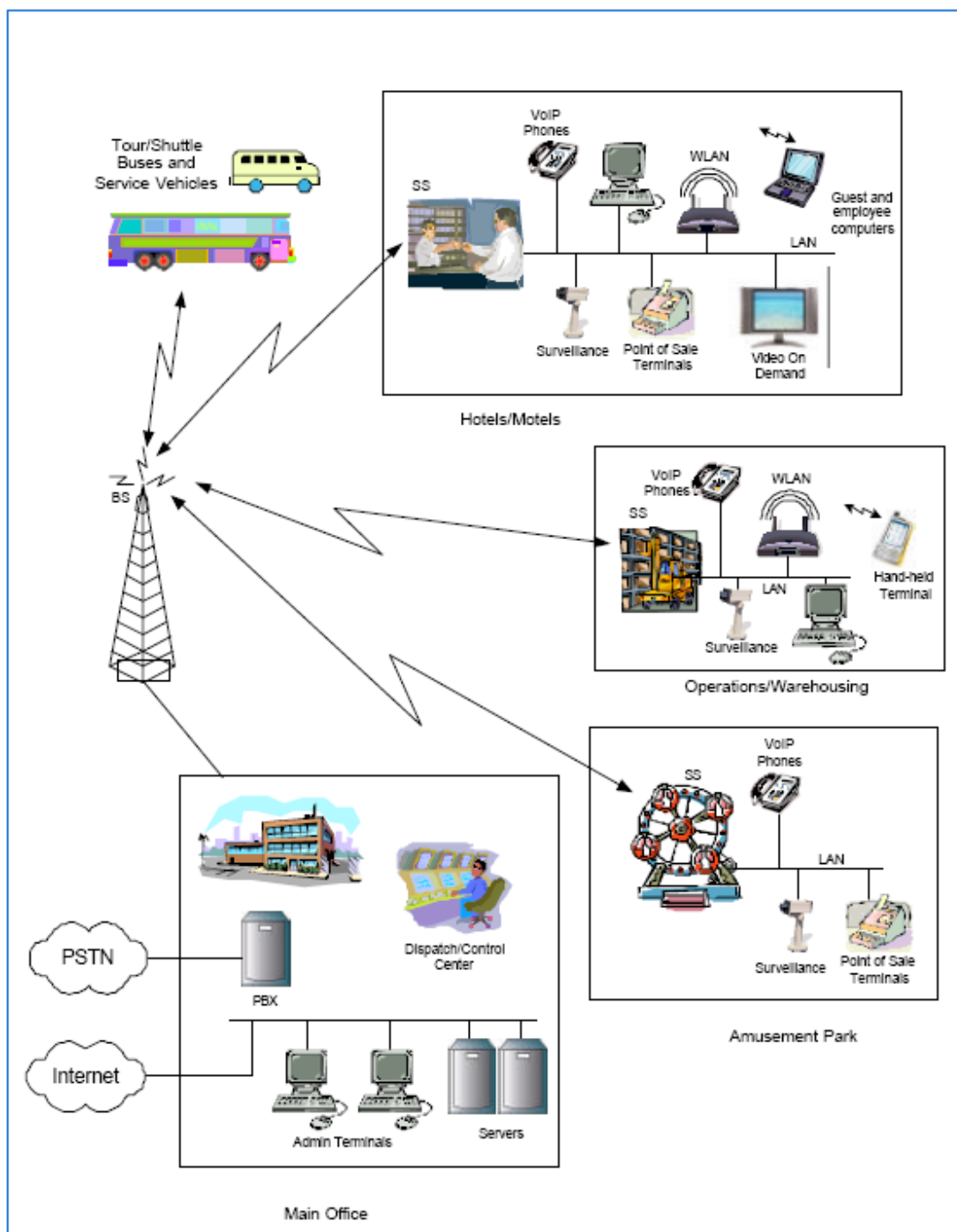
Οι κατασκευαστικές εταιρείες μπορούν να στραφούν στη χρήση WiMAX δικτύου για την επικοινωνία ανάμεσα στα κεντρικά γραφεία με τα κατά τόπους εργοτάξια που δημιουργούν. Κατά την κατασκευή μεγάλων έργων, ο χρονικός παράγοντας του οποίου είναι συγκεκριμένος, επιβάλλεται η αρχική εγκατάσταση ενός δικτύου και η μετέπειτα απεγκατάσταση του λόγω της περάτωσης του έργου. Αυτό είναι εύκολο όταν πρόκειται για WiMAX όπως έχει γραφτεί και σε προηγούμενα σενάρια χρήσης, ενώ ο φορητός εξοπλισμός μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερα έργα.



Σχήμα 35 Χρήση WiMAX σε Προσωρινές Κατασκευές [22]

5.11 Θεματικά Πάρκα

Το WiMAX δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θεματικά πάρκα για την υποστήριξη μεγάλου φάσματος υπηρεσιών επικοινωνίας για πάρκα ψυχαγωγίας, εκθέσεις, κέντρα φιλοξενίας και οχήματα υπηρεσιών.



Σχήμα 36 Χρήση WiMAX σε Θεματικά Πάρκα [22]

6 Πειραματικό Μέρος

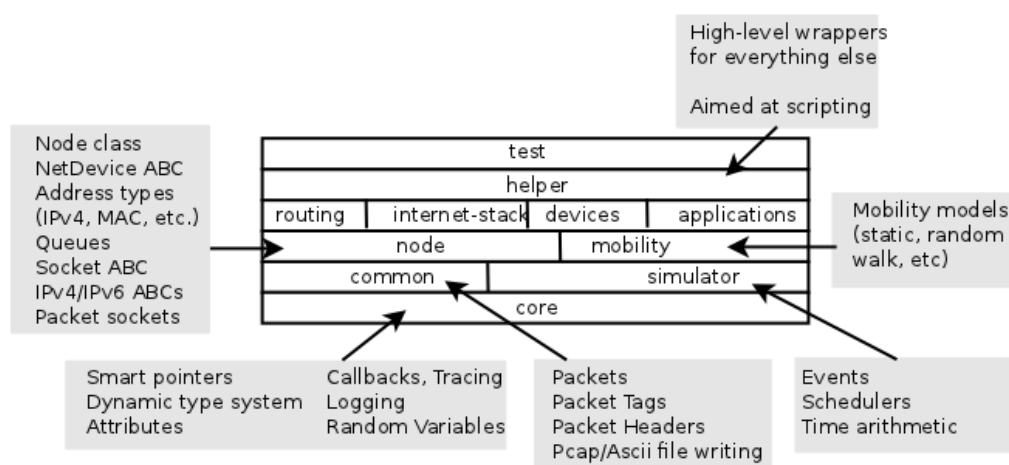
6.1 Προσομοιωτής NS 3

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής δικτύων ns 3 (network simulator 3) ο οποίος αποτελεί την τρίτη έκδοση των προσομοιωτών ns. Οι ns προσομοιωτές αποτελούν περιβάλλοντα προσομοίωσης δικτύων ανοιχτού κώδικα και δημιουργήθηκαν από την ερευνητική κοινότητα για τη μελέτη δικτύων μέσω ρεαλιστικών εξομοιώσεων.

Ο ns 3 όπως και οι προκάτοχοί του είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων (discrete event simulator) και υποστηρίζει τις ανάγκες εξομοίωσης των δικτύων δίνοντας ελευθερία και πληθώρα επιλογών για την ανάπτυξη και επέκτασή του. Η διανομή του γίνεται υπό την άδεια ελεύθερου λογισμικού GNU GPLv2 και είναι διαθέσιμο για έρευνα, ανάπτυξη καθώς και για αξιολόγηση, επικύρωση και βελτίωση του από τους χρήστες.

Μέσω της λεπτομερούς τεκμηρίωσης του πυρήνα προσομοίωσής του είναι δυνατή η προσομοίωση ρεαλιστικών μοντέλων, τα οποία δεν απέχουν από τις πραγματικές συνθήκες. Ο πυρήνας του ns 3 υποστηρίζει την έρευνα IP-based δικτύων και μη, καθώς και σε επίκαιρες ασύρματες δικτυακές τεχνολογίες όπως το Wi-fi, το WiMAX και το LTE σε χαμηλότερα επίπεδα, ενώ παρέχει πληθώρα πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Επίσης διαθέτει υλοποιημένους χρονοπρογραμματιστές πραγματικού χρόνου και πραγματικές συσκευές δικτύου, γεγονότα που κάνουν πιο ρεαλιστικές τις συνθήκες προσομοίωσης.

Ο ns3 έχει υλοποιηθεί σε C++, ενώ περιλαμβάνει και συγκεκριμένες δομές που είναι γραμμένες σε Python. Αυτές οι δύο γλώσσες προγραμματισμού αποτελούν και τις γλώσσες που μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς στα scripts που δημιουργεί για την παραγωγή μίας προσομοίωσης. Για οποιαδήποτε αλλαγή ή προσθήκη της υπάρχουσας δομής των πρωτοκόλλων που έχουν υλοποιηθεί, ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στον πηγαίο κώδικα. Ο πηγαίος κώδικας του ns 3 βρίσκεται στο φάκελο src και είναι δομημένος όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 37 Οργάνωση λογισμικού ns-3 [25]

Στην ανάπτυξη του ns-3 χρησιμοποιείται το Mercurial ως σύστημα διαχείρισης του πηγαίου κώδικα, το οποίο είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα το οποίο έχει τη δυνατότητα να χειρίζεται γρήγορα και αποτελεσματικά τα projects. Το εργαλείο που αναλαμβάνει το compilation του κώδικα και ενδεχομένως και την εγκατάσταση του ns3 είναι το Waf, το οποίο είναι ένα framework γραμμένο σε python.

Η ανάπτυξη προσομοιώσεων με τον ns3 γίνεται σε linux based περιβάλλοντα κάτι που συνέβη και με την εργασία αυτή. Το λειτουργικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Ubuntu 12.04 και η 3.18 έκδοση του ns3 .Στη διανομή ns-allinone-3.18 υπάρχουν επίσης:

- Το **NetAnim 3.103**, το οποίο είναι ένα παραθυρικό περιβάλλον που χρησιμοποιεί xml αρχεία που παράγονται από το script προσομοίωσης για την αναπαράσταση της τοπολογίας και της ανταλλαγής πακέτων εντός του δικτύου. Υπάρχει βιβλιοθήκη netanim μέσω της οποίας ενεργοποιείται η παραγωγή των xml αρχείων.
- Το **Pybindgen-0.16.0.831**, το οποίο είναι μία βιβλιοθήκη η οποία επιτρέπει την παραγωγή python bindings για κώδικα γραμμένο σε C++.

Οι βασικές δομές του ns 3 είναι :

- **Node-** Ο κόμβος αποτελεί την οντότητα του δικτύου πάνω στην οποία αλληλεπιδρούν όλες οι υπόλοιπες δομές του δικτύου.
- **Channel-** Το κανάλι αποτελεί την οντότητα που συνδέει 2 κόμβους στο φυσικό επίπεδο.
- **Net Device-** Η συσκευή δικτύου αποτελεί τη συσκευή διασύνδεσης των κόμβων με το κανάλι. Αποτελείται από τη συσκευή/κάρτα σύνδεσης και τους απαραίτητους drivers που επιτρέπουν στο λειτουργικό σύστημα να τη χρησιμοποιήσει. Κάθε κόμβος μπορεί να συνδέεται με παραπάνω από ένα net device. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η διασύνδεσή του με περισσότερα κανάλια.
- **Application-** Πρόκειται για την εφαρμογή η οποία δημιουργεί την κίνηση των πακέτων στο δίκτυο κάνοντας μετάδοση ή λαμβάνοντας πακέτα. Κάθε κόμβος στην προσομοίωση συνδέεται με μία ή περισσότερες εφαρμογές.
- **Topology Helpers-** Οι βοηθοί τοπολογίας περιλαμβάνουν πληροφορίες για την τοπολογία προσομοίωσης διαμορφώνοντας κατάλληλα τη συμπεριφορά του δικτύου. Τα στοιχεία που επεξεργάζονται οι topology helpers μπορεί να είναι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, η ανάθεση διευθύνσεων, η δρομολόγηση, η διαμόρφωση, η δημιουργία κίνησης και αρκετά ακόμα στοιχεία που αποτελούν συστατικά της εκάστοτε τεχνολογίας δικτύου.

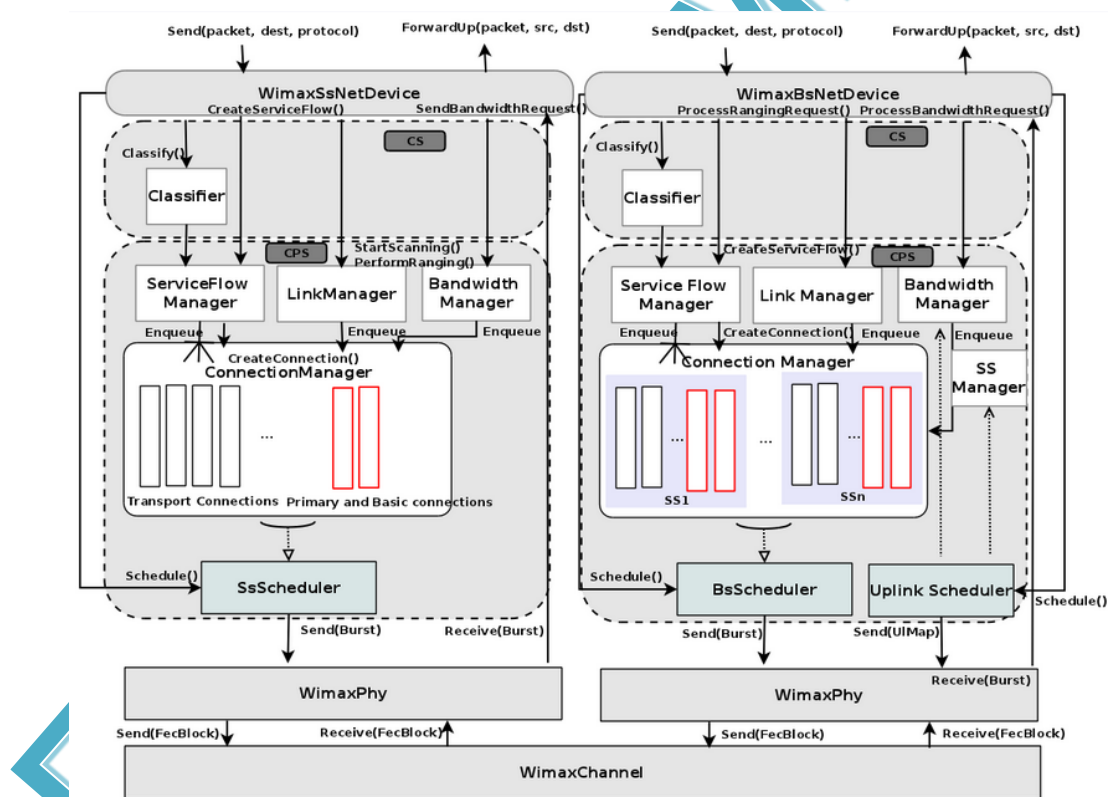
6.2 WiMAX module στον NS 3

Στη διανομή ns-allinone-3.18 και συγκεκριμένα στο φάκελο src υπάρχει το σύνολο του πηγαίου κώδικα που σχετίζεται με WiMAX δίκτυα. Ο φάκελος περιέχει documentation του WiMAX module, τον πηγαίο κώδικα του topology helper, τα bindings, αρχεία ελέγχου καθώς και τρία παραδείγματα προσομοιώσεων. Το module περιλαμβάνει

- Μοντέλο Φυσικού επιπέδου
- Ταξινόμηση πακέτων
- Δρομολογητές
 1. **Simple** – First Come First Served Χρονοπρογραμματιστής
 2. **Rtps-** Χρονοπρογραμματιστής προσανατολισμένος σε rtPS ροές υπηρεσίας.
 3. **MBQOS-** Χρονοπρογραμματιστής για την ανερχόμενη κίνηση.
- Υποστήριξη multicast και unicast
- Δυνατότητα tracing των πακέτων
- Διαμορφώσεις
 1. BPSK
 2. QPSK

3. QAM16
 4. QAM64
- Δυνατότητα χρήσης μοντέλων κίνησης (mobility module).
 - Υποστήριξη Point to Multipont τοπολογίας και WirelessMAN-OFDM
 - Initial Ranging
 - Αρχικοποίηση Ροής Υπηρεσίας με
 1. Best Effort ροές
 2. Non Real Time Polling Services ροές
 3. Real Time Poling Services ροές
 4. Unsolicited Grant Services ροές
 - Αρχικοποίηση Μεταφοράς
 - Χρήση Base Station (BS) στα πρότυπα του WiMAX
 - Χρήση Subscriber Station (SS) στα πρότυπα του WiMAX

Μία βασική υλοποίηση που δεν έχει πραγματοποιηθεί όσο γράφεται η πτυχιακή αυτή ,είναι αυτή των ErtPS ροών υπηρεσίας. [25]



Σχήμα 38 Αρχιτεκτονική WiMAX στον ns3 [25]

6.3 Σκοπός Προσομοίωσης

Το πρότυπο του WiMAX έχει σχεδιαστεί ώστε να χρησιμοποιείται σε μία ευρεία ζώνη συχνοτήτων είτε υπάρχουν συνθήκες οπτικής επαφής είτε όχι, παρέχοντας ασφαλείς και ευρυζωνικές υπηρεσίες στους χρήστες του με μικρό κόστος και βελτιστοποιημένη φασματική απόδοση.

Παρόλα αυτά, όπως έχει γραφτεί και παραπάνω οι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης ενός WiMAX δικτύου δεν ορίζονται από τις προδιαγραφές του προτύπου αλλά αφήνονται στην ευχέρεια υλοποίησης του εκάστοτε παρόχου. Όπως είναι αντιληπτό, η σημασία της δρομολόγησης είναι καθοριστική για την τήρηση των συμφωνηθέντων συμβολαίων (SLAs) τα

οποία σχετίζονται με την παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Ειδικότερα από τη στιγμή που σε ένα WiMAX δίκτυο υπάρχουν εγγυημένοι τύποι ροών υπηρεσίας όπως είναι οι rtPS, οι nrtPS και οι UGS υπηρεσίες.

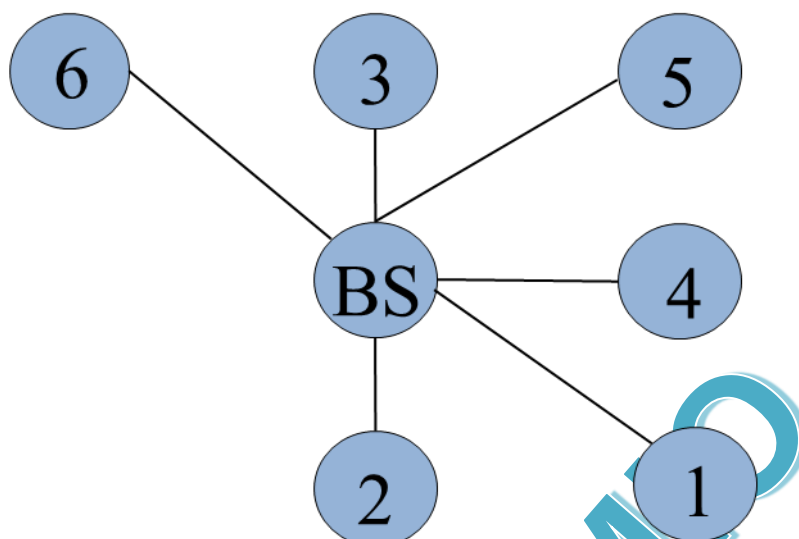
Στον ns 3 έχουν υλοποιηθεί τρεις δρομολογητές:

- **SIMPLE-** Αποτελεί ένα χρονοπρογραμματιστή First Come First Serve (FCFS) λογικής. Για τις ροές πραγματικού χρόνου (rtPS και UGS) ο σταθμός βάσης χορηγεί δικαιώματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανάλογα με το υπολογιζόμενο interval (διάστημα μεταξύ ριπών). Για τις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (nrtPS, BE) υπάρχει εγγύηση μόνο του ελάχιστου εγγυημένου εύρους ζώνης, μετά την εξυπηρέτηση των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Μέχρι στιγμής υποστηρίζονται μόνο πακέτα σταθερού μήκους καθώς υπάρχει υλοποίηση για μεταβλητού μήκους.
- **RTPS-** Αποτελεί ένα χρονοπρογραμματιστή ο οποίος έχει παρόμοιες αρχές και λειτουργία με τον Simple Scheduler, αλλά διαφέρει μεταξύ τους στην αντιμετώπιση των rtPS ροών. Όλες οι rtPS συνδέσεις είναι σε θέση να μεταδώσουν όλα τα πακέτα τους σύμφωνα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ο έλεγχος εύρους ζώνης έχει εφαρμοστεί έτσι ώστε να κάνει αναδιανομή του πραγματικού διαθέσιμου εύρους ζώνης σε όσες ροές έχουν τουλάχιστον ένα πακέτο προς μετάδοση. Το υπόλοιπο εύρος ζώνης διατίθεται στις υπόλοιπες συνδέσεις.
- **MBQOS-** Αποτελεί ένα χρονοπρογραμματιστή προσανατολισμένο στην άνω ζεύξη. Χρησιμοποιεί τρεις ουρές προτεραιότητας, τη χαμηλής, την ενδιάμεσης και την υψηλής προτεραιότητας ουρά. Ο χρονοπρογραμματιστής αυτός εξυπηρετεί από τα υψηλά στα χαμηλά στρώματα με αυστηρή σειρά προτεραιότητας. Στη χαμηλή ουρά κρατείται εύρος ζώνης για BE ροές και στην ενδιάμεση για nrtPS και rtPS ροές. Οι nrtPS και οι rtPS ροές μπορούν να μεταφερθούν και στην ουρά υψηλής προτεραιότητας όπου θα έχουν εξασφαλισμένο εύρος ζώνης. Εκτός από τις αιτήσεις των ροών που έχουν μεταφερθεί από την ενδιάμεση ουρά, η ουρά υψηλής προτεραιότητας αποθηκεύει περιοδικά πόρους και για unicast. Ο σταθμός βάσης δίνει προθεσμία για αιτήσεις εύρους ζώνης από τις nrtPS και τις rtPS ροές της ενδιάμεσης ουράς ώστε να τηρηθεί η μέγιστη απαίτηση delay.

Σκοπός της εργασίας είναι η λήψη συμπερασμάτων για την απόδοση των δρομολογητών που έχουν υλοποιηθεί στον ns 3 κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες σε ένα δίκτυο WiMAX. Για την επίτευξη ρεαλιστικότερης σύγκρισης των δρομολογητών δημιουργήθηκαν συγκεκριμένα σενάρια προσομοίωσης, με κοινή τοπολογία και χαρακτηριστικά δικτύου, στα οποία δοκιμάστηκε κάθε χρονοπρογραμματιστής ξεχωριστά.[25] [27]

6.4 Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης

Το WiMAX δίκτυο που δημιουργήθηκε αποτελείται από οκτώ κόμβους. Ο ένας κόμβος αποτελεί το σταθμό βάσης (base station – bs), ο οποίος είναι παράλληλα και server. Οι υπόλοιποι σταθμοί είναι clients. Οι κόμβοι 1-3 έχουν την ίδια μεταξύ τους απόσταση από το σταθμό βάσης, κάτι που ισχύει αντίστοιχα και για τους σταθμούς 4-6. Η τοπολογία των προσομοιώσεων είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 1 Τοπολογία Προσομοιώσεων

Αρχικά γίνεται δήλωση του namespace που θα χρησιμοποιηθεί:

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/config-store-module.h"
#include "ns3/wimax-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/global-route-manager.h"
#include "ns3/ipcs-classifier-record.h"
#include "ns3/service-flow.h"
#include <iostream>
#include "ns3/netanim-module.h"

using namespace ns3;
```

Στη συνέχεια δηλώνεται το επίπεδο καταγραφής των μηνυμάτων, ενεργοποιείται ο χρονοπρογραμματιστής (στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο RTPS) μέσω των αντικειμένων που έχουν δημιουργηθεί στην κλάση WimaxHelper και δηλώνεται η μεταβλητή duration η οποία θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω και κρατάει τη χρονική διάρκεια των 30 δευτερολέπτων.

```

int main (int argc, char *argv[])
{
    int duration = 30;
    WimaxHelper::SchedulerType scheduler = WimaxHelper::SCHED_TYPE_RTPTS;

    LogComponentEnable ("UdpClient", LOG_LEVEL_INFO);

    LogComponentEnable ("UdpServer", LOG_LEVEL_INFO);

```

Έπειτα δημιουργούνται οι κόμβοι του δικτύου (1 bs και 6 ss) μέσω της μεθόδου Create που έχει υλοποιηθεί στην κλάση NodeContainer του ns 3 και αποθηκεύονται σαν αντικείμενα της κλάσης ssNodes και bsNodes αντίστοιχα.

```

NodeContainer ssNodes;

NodeContainer bsNodes;

ssNodes.Create (6);

bsNodes.Create (1);

```

Το επόμενο βήμα αποτελεί τη δημιουργία του WiMAX helper . Με τη μέθοδο install της κλάσης NetDeviceContainer κατασκευάζονται οι συσκευές WiMAX δικτύου και λαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του subscriber και του base station αντίστοιχα, ενώ λαμβάνουν τις ρυθμίσεις λειτουργίας του Simple OFDM φυσικού επιπέδου.

```

WimaxHelper wimax;

NetDeviceContainer ssDevs, bsDevs;

ssDevs = wimax.Install (ssNodes,

WimaxHelper::DEVICE_TYPE_SUBSCRIBER_STATION,

                        WimaxHelper::SIMPLE_PHY_TYPE_OFDM,

                        scheduler);

bsDevs = wimax.Install (bsNodes,

WimaxHelper::DEVICE_TYPE_BASE_STATION,

WimaxHelper::SIMPLE_PHY_TYPE_OFDM, scheduler);

```

Έπειτα δημιουργούνται τα Net Devices για τους σταθμούς συνδρομητή (ss από 1 έως 7) μέσω της κλάσης SubscriberStationNetDevice, στα οποία ορίζεται η τεχνική διαμόρφωσης QAM64_34 για το φυσικό επίπεδο. Η επιλογή αυτή έγινε μετά από προσομοιώσεις με όλους τους τύπους διαμόρφωσης καθώς η QAM64 είχε τα πιο αποδοτικά αποτελέσματα.

```
Ptr<SubscriberStationNetDevice> ss[6];
```

```

for (int i = 0; i < 6; i++)
{
    ss[i] = ssDevs.Get (i)->GetObject<SubscriberStationNetDevice>
();
    ss[i]->SetModulationType (WimaxPhy::MODULATION_TYPE_QAM64_34);
}

```

Αντιστοίχως δημιουργούνται και τα Net Devices για τον σταθμό βάσης

```

Ptr<BaseStationNetDevice> bs;

bs = bsDevs.Get (0)->GetObject<BaseStationNetDevice> ();

```

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο ορισμός των IP διευθύνσεων στους κόμβους. Αρχικά δημιουργείται το αντικείμενο stack της κλάσης InternetStackHelper και με τη μέθοδο Install ορίζονται τα νέα αντικείμενα bsNodes και ssNodes που αντιστοιχούν στο σταθμό βάσης και τους σταθμούς συνδρομητή. Ακολουθεί ο ορισμός της διεύθυνσης βάσης, της διεύθυνσης δηλαδή που θα οριστεί στον πρώτο σταθμό και με τη μέθοδο Assign κάθε κόμβος λαμβάνει διεύθυνση. Λόγω του ότι προηγείται ο ορισμός στην κλάση ssdevs, οι σταθμοί συνδρομητή διευθυνσιοδοτούνται με τον πρώτο να παίρνει την 10.1.1.0 και τον έκτο να παίρνει την 10.1.1.6 ενώ ο σταθμός βάσης λαμβάνει τη διεύθυνση 10.1.1.7 λόγω του ότι assign έρχεται δεύτερο.

```

InternetStackHelper stack;

stack.Install (bsNodes);
stack.Install (ssNodes);

Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");

Ipv4InterfaceContainer SSinterfaces = address.Assign (ssDevs);
Ipv4InterfaceContainer BSinterface = address.Assign (bsDevs);

```

Ακολουθεί η τοποθέτηση των κόμβων στο έδαφος με τη βοήθεια της κλάσης ListPositionAllocator η οποία δημιουργεί τα σημεία στα οποία θα πάρουν θέση οι κόμβοι. Αφού ολοκληρωθεί η δήλωση των σημείων καταχωρείται η κατάσταση κινητικότητας και με τη μέθοδο install οι κόμβοι συνδέονται με τις θέσεις που έχουν δημιουργηθεί. Στις προσομοιώσεις που τρέχουν στην εργασία οι κόμβοι παραμένουν σταθεροί στις θέσεις που έχουν δηλωθεί.

```

Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
CreateObject<ListPositionAllocator> ();

positionAlloc->Add (Vector(55, 55, 0));
positionAlloc->Add (Vector(55, 45, 0));

```

```

positionAlloc->Add (Vector(55, 65, 0));
positionAlloc->Add (Vector(65, 55, 0));
positionAlloc->Add (Vector(65, 65, 0));
positionAlloc->Add (Vector(45, 65, 0));
positionAlloc->Add (Vector(65, 45, 0));

MobilityHelper bs_mobility;

bs_mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
bs_mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);

bs_mobility.Install(bsNodes);

bs_mobility.Install(ssNodes);

```

Έπειτα ακολουθεί η σύνδεση των σταθμών συνδρομητή με τους ρόλους server και client που έχει ο καθένας. Αρχικά δημιουργούνται αντικείμενα των κλάσεων UdpServerHelper και UdpClientHelper καθώς και server-client αντικείμενα της κλάσης ApplicationContainer ώστε να οριστούν στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά των κόμβων και των εφαρμογών που θα τρέχουν. Στον κώδικα που ακολουθεί περιλαμβάνεται η δημιουργία μόνο του πρώτου client και της εφαρμογής του, στο παράρτημα υπάρχει και η δημιουργία των υπολοίπων.

```

UdpServerHelper udpServer;

ApplicationContainer serverApps;

UdpClientHelper udpClient;

ApplicationContainer clientApps;

```

Ο server θα λάβει την port 49000 μέσω του UdpServerHelper και οι εφαρμογές του θα συνδεθούν με τον κόμβο bs 0. Η εφαρμογές θα ξεκινήσουν το έκτο δευτερόλεπτο της προσομοίωσης και θα σταματήσουν το 30ό όπως έχει οριστεί παραπάνω στη μεταβλητή duration.

```

udpServer = UdpServerHelper (49000);

serverApps = udpServer.Install (bsNodes.Get (0));

serverApps.Start (Seconds (6));

serverApps.Stop (Seconds (duration));

```

Ο client θα κάνει επίσης χρήση του Port 4900, θα έχει την ίδια ενεργή περίοδο μετάδοσης/λήψης πακέτων εφαρμογών με το server και από εκεί και πέρα γίνεται ο ορισμός του μεγέθους των πακέτων του και του interval, του διαστήματος μεταξύ αποστολής ή λήψης πακέτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε πακέτα των 256 bytes ανά 2,5 ms επομένως δημιουργείται. Όπως και προηγουμένως, ακολουθεί ο κώδικας απόδοσης χαρακτηριστικών μόνο στον πρώτο client, ενώ στο παράρτημα υπάρχει το σύνολό τους.

```

udpClient = UdpClientHelper (BSinterface.GetAddress (0), 49000);

udpClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (12000));

udpClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.0025)));

```

```
udpClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (256));

clientApps = udpClient.Install (ssNodes.Get (1));

clientApps.Start (Seconds (6.0));

clientApps.Stop (Seconds (duration));
```

Μετά την ολοκλήρωση του προηγούμενου βήματος υπάρχει η εντολή τερματισμού του simulator η οποία θα γίνει στο δευτερόλεπτο 30.1 της προσομοίωσης.

```
Simulator::Stop (Seconds (duration + 0.1));
```

Έπειτα ακολουθεί η κατασκευή των ροών υπηρεσιών σύμφωνα με τις WiMAX κλάσεις. Σε πρώτη φάση δημιουργείται ένα αντικείμενο της κλάσης `IpcsClassifierRecord` το οποίο συνδέεται με συγκεκριμένο κόμβο και λαμβάνει χαρακτηριστικά σύνδεσης όπως είναι το εύρος των port οι οποίες θα μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα της ροής (source και destination), το πρωτόκολλο και η προτεραιότητα της ροής. Στη συνέχεια δημιουργείται η ροή και διευκρινίζεται ποιος είναι ο τύπος της (BE/NRTPS/RTPS/UGS) και αν πρόκειται για ροή άνω ή κάτω ζεύξης. Η ροή υπηρεσίας που ακολουθεί είναι ροή UGS κάτω ζεύξης, κύριας προτεραιότητας λόγω του ότι είναι εγγυημένη και συνδέεται με τον κόμβο s0. Με τον ίδιο τρόπο καταχωρήθηκαν και οι υπόλοιπες ροές που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα της προσομοίωσης ο οποίος υπάρχει στο παράρτημα.

```
IpcsClassifierRecord DlClassifierRtps (Ipv4Address ("0.0.0.0"),
                                       Ipv4Mask ("0.0.0.0"),
                                       SSinterfaces.GetAddress (0),
                                       Ipv4Mask ("255.255.255.255"),
                                       0,
                                       65000,
                                       49000,
                                       49000,
                                       17,
                                       1);

ServiceFlow      DlServiceFlowRtps      =      wimax.CreateServiceFlow
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_DOWN,

ServiceFlow::SF_TYPE_RTPS,

DlClassifierRtps);
```

Το επόμενο βήμα είναι η ανάληψη της ροής υπηρεσίας από τον εκάστοτε κόμβο. Στη γραμμή που ακολουθεί, ο κόμβος `ss1` συνδέεται με τη ροή `U1ServiceFlowBe1`, η οποία είναι μία ροή Best Effort άνω ζεύξης. Αυτό σημαίνει πως βάσει του σεναρίου, ο κόμβος αυτός θα παράγει πακέτα που θα έχουν τα χαρακτηριστικά BE ροής τα οποία θα έχουν συγκεκριμένο μέγεθος και interval.

```
ss[1]->AddServiceFlow (U1ServiceFlowBe1);
```


Τέλος έχουμε τις εντολές έναρξης και τερματισμού του προσομοιωτή, καθώς και την παραγωγή αρχείου xml με το όνομα labwi.xml, ανοίγοντας το οποίο στον NetAnim λαμβάνουμε την οπτική αναπαράσταση της λειτουργίας του δικτύου.

```
AnimationInterface anim("labwi.xml");  
  
Simulator::Run ();  
  
Simulator::Destroy ();  
  
return 0;  
  
}
```

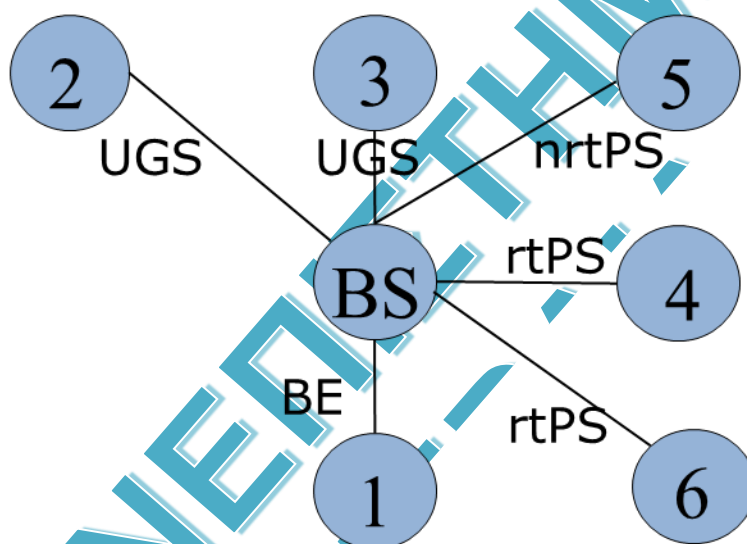
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

7 Αποτελέσματα

7.1 Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο της εργασίας κάθε κόμβος μεταξύ των ss1-ss4, οι οποίοι έχουν την ίδια απόσταση από το σταθμό βάσης, μεταδίδει διαφορετικό service flow , καλύπτοντας το εύρος των υλοποιημένων ροών στον ns3. Οι κόμβοι ss5, ss6 οι οποίοι βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τους υπολοίπους μεταδίδουν RTPS και UGS ροές αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα:

- **Κόμβος 1:** Best Effort (Ανω Ζεύξη)
- **Κόμβος 2:** Unsolicited Grant Services (Ανω Ζεύξη)
- **Κόμβος 3:** Unsolicited Grant Services (Ανω Ζεύξη)
- **Κόμβος 4:** Real Time Polling Services (Ανω Ζεύξη)
- **Κόμβος 5:** non Real Time Polling Services (Ανω Ζεύξη)
- **Κόμβος 6:** Real Time Polling Services (Ανω Ζεύξη)



Εικόνα 2 Τοπολογία Σεναρίου 1

Το μέγεθος των πακέτων ήταν 256 bytes και το interval 2,5 ms με παραγόμενη κίνηση 102,4Kbyte/sec ανά κόμβο.

Με τη χρήση του χρονοπρογραμματιστή RTPS μεταδόθηκαν 57600 πακέτα και έγινε λήψη των 57544 . Το συνολικό packet loss έφτασε το 0,09% . Το throughput ήταν της τάξης του 4,68 Mbit/sec . Το delay ήταν 21,59 msec και το jitter 3,88 msec .

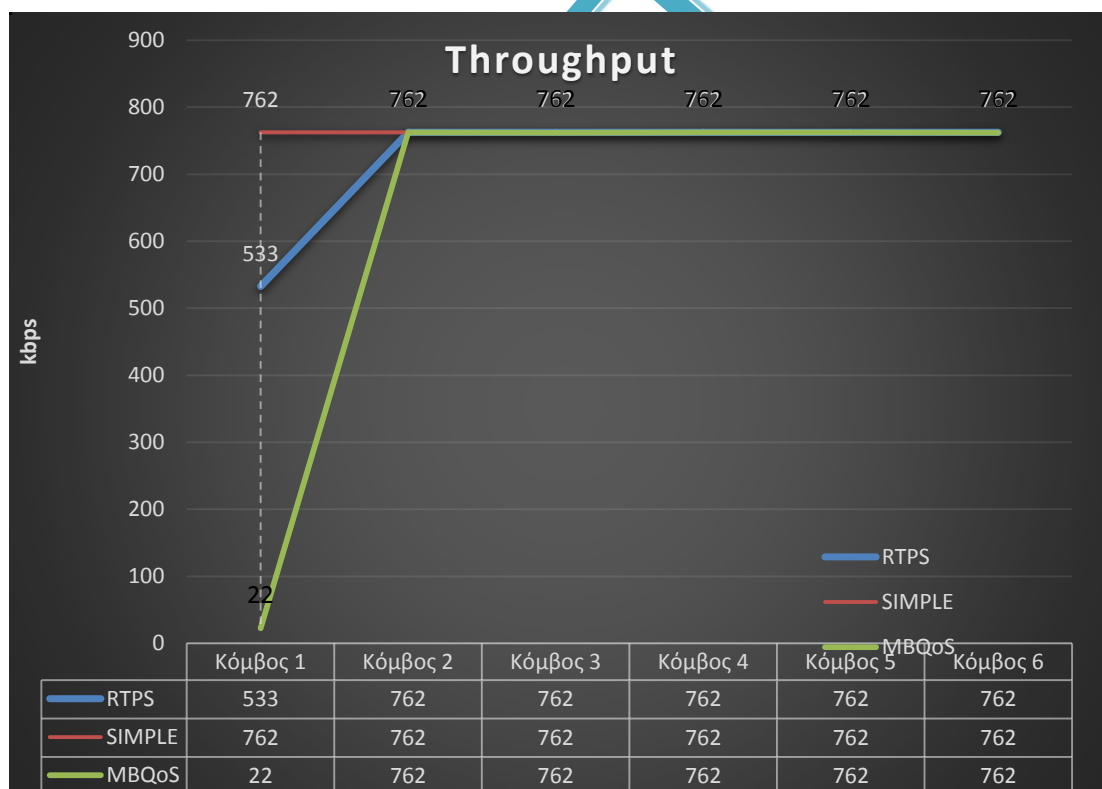
Με τη χρήση του χρονοπρογραμματιστή SIMPLE μεταδόθηκαν 57600 πακέτα και έγινε λήψη των 57591 . Το συνολικό packet loss έφτασε το 0,001 % . Το throughput ήταν της τάξης του 4,68 Mbit/sec . Το delay ήταν 6,18 msec και το jitter 3,9 msec .

Με τη χρήση του χρονοπρογραμματιστή MBQOS μεταδόθηκαν 57600 πακέτα και έγινε λήψη των 48261 . Το συνολικό packet loss έφτασε το 16,21 % . Το throughput ήταν της τάξης του 3,92 Mbit/sec . Το delay ήταν 18,98 msec και το jitter 6,53 msec .

Όπως αποτυπώνεται και διαγραμματικά, οι 3 χρονοπρογραμματιστές έχουν πανομοιότυπο επίπεδο ρυθμοαπόδοσης στους κόμβους 2-6. Στον πρώτο κόμβο, ο οποίος παράγει ροή be , οι χρονοπρογραμματιστές RTPS και MBQoS έχουν απόδοση 533 kbps και 22 kbps αντίστοιχα, σε αντίθεση με τον SIMPLE που έχει throughput στα ίδια επίπεδα με αυτά των υπολοίπων κόμβων.

Κόμβος	RTPS scheduler	SIMPLE scheduler	MBQoS scheduler
1	545304	780637,3333	22707,66667
2	780637,3333	780637,3333	780637,3333
3	780718,6667	780637,3333	780312
4	780718,6667	780718,6667	780718,6667
5	780637,3333	780718,6667	780637,3333
6	780718,6667	780718,6667	780068

Σχήμα 39 Throughput Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε bit/s

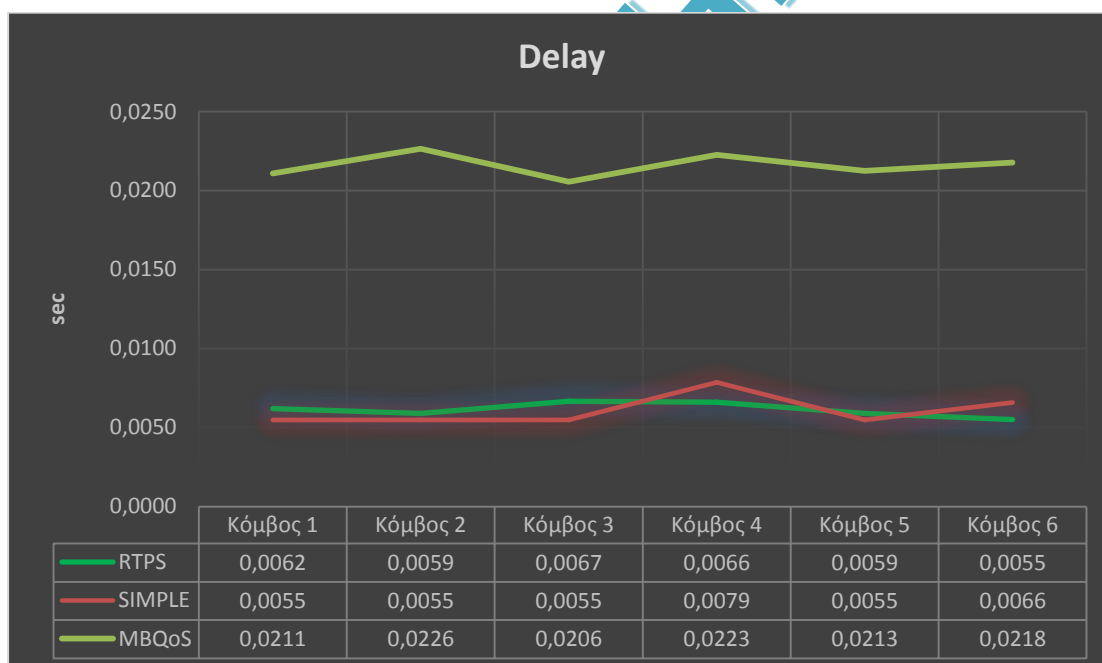


Εικόνα 3 Ρυθμοαπόδοση Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE Σεναρίου 1

Στον παράγοντα της καθυστέρησης, ο χρονοπρογραμματιστής SIMPLE παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις στους κόμβους 1,2,3,5 σε σχέση με τους υπόλοιπους. Η διαφορά του με τον RTPS δεν είναι μεγάλη, σε αντίθεση με τον MBQoS scheduler, η καθυστέρηση του οποίου κινείται μεταξύ 20 και 22 ms, εντός δηλαδή των ορίων που προβλέπονται από το πρότυπο.

Κόμβος	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	0,0062	0,0055	0,0211
2	0,0059	0,0055	0,0226
3	0,0067	0,0055	0,0206
4	0,0066	0,0079	0,0223
5	0,0059	0,0055	0,0213
6	0,0055	0,0066	0,0218

Σχήμα 40 Delay Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε sec

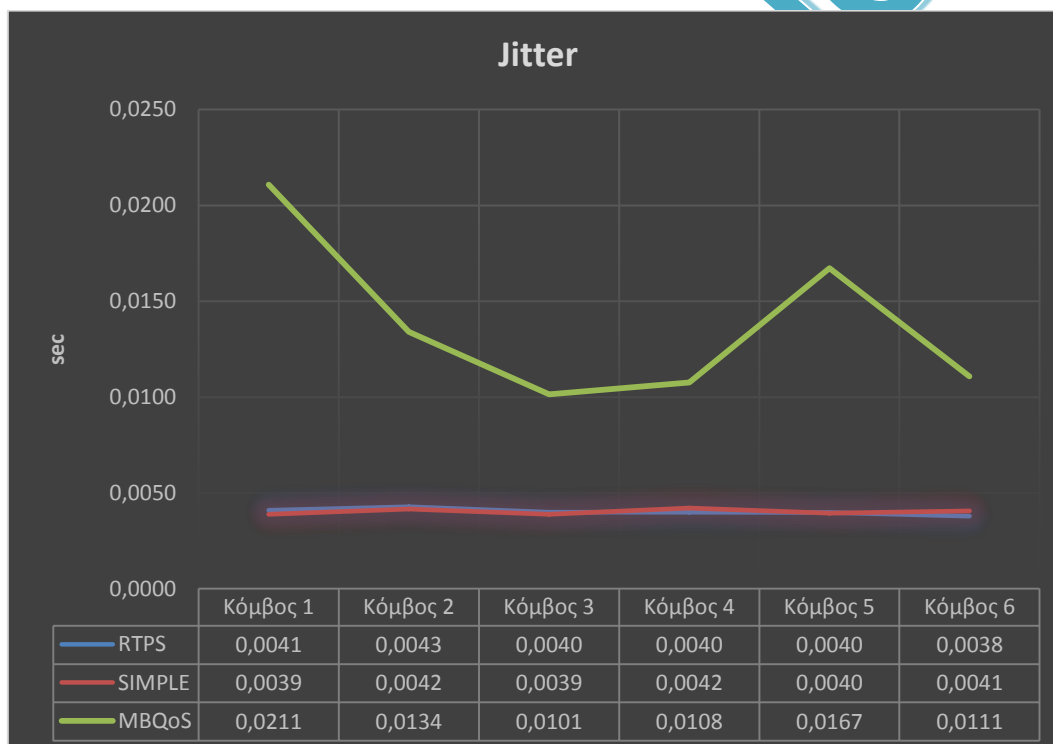


Εικόνα 4 Καθυστέρηση Χρονοπρογραμματιστών Σεναρίου 1

Ο SIMPLE χρονοπρογραμματιστής παρουσιάζει τη μικρότερη διακύμανση στην καθυστέρηση στους κόμβους 1-3 με μικρή διαφορά από τον RTPS. Ο RTPS με τη σειρά του υπερέρχει στους κόμβους 4 και 6. Το jitter των δύο αυτών scheduler κυμαίνεται στα 4 ms, σε αντίθεση με τον MBQoS, η διακύμανση της καθυστέρησης του οποίου κυμαίνεται από 10 έως 21 ms.

Κόμβοι	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	0,0041	0,0039	0,0211
2	0,0043	0,0042	0,0134
3	0,0040	0,0039	0,0101
4	0,0040	0,0042	0,0108
5	0,0040	0,0040	0,0167
6	0,0038	0,0041	0,0111

Σχήμα 41 Jitter Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε sec



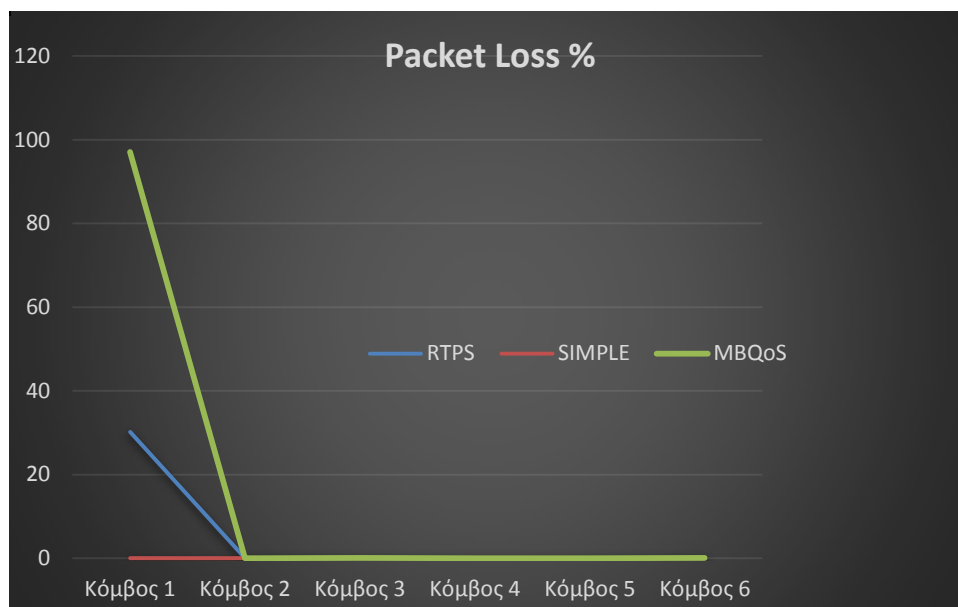
Εικόνα 5 Διακύμανση καθυστέρησης Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE σεναρίου 1

Σε ότι αφορά την απώλεια πακέτων, παρατηρήθηκαν μεγάλες απώλειες πακέτων από τον RTPS και τον MBQoS χρονοπρογραμματιστή στον κόμβο 1 ο οποίος μετέδιδε BE ροές. Ο RTPS scheduler είχε 30% απώλεια, ενώ ο MBQoS 97%. Οι τιμές αυτές δε μπορούν να θεωρηθούν εκτός ορίων μιας και οι best effort ροές δεν έχουν εγγυημένες παραμέτρους. Στους υπόλοιπους κόμβους η απώλεια είναι αμελητέα και εντός ορίων και για τους τρεις χρονοπρογραμματιστές.

Κόμβοι	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	30,16086	0,020833	97,09174
2	0,020833	0,020833	0,020833
3	0,010417	0,020833	0,0625
4	0,010417	0,010417	0,010417

5	0,020833	0,010417	0,020833
6	0,010417	0,010417	0,09375

Σχήμα 42 Επί τοις Εκατό Packet Loss Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή

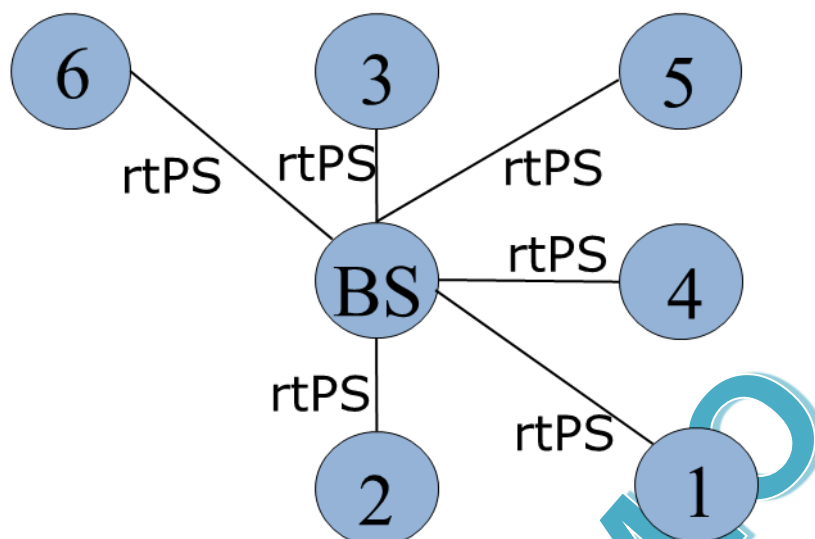


Εικόνα 6 Επί τοις εκατό απώλεια πακέτων για τους κόμβους ss2,ss6 με χρονοπρογραμματιστές RTPS και SIMPLE

7.2 Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο της οι κόμβοι μεταδίδουν εναλλάξ rtPS ροές υπηρεσίας άνω και κάτω ζεύξης ώστε να εξεταστεί η απόδοση των χρονοπρογραμματιστών σε real time ροές. Πιο συγκεκριμένα:

- **Κόμβος 1:** Real Time Polling Services (Άνω Ζεύξη)
- **Κόμβος 2:** Real Time Polling Services (Άνω Ζεύξη)
- **Κόμβος 3:** Real Time Polling Services (Άνω Ζεύξη)
- **Κόμβος 4:** Real Time Polling Services (Άνω Ζεύξη)
- **Κόμβος 5:** Real Time Polling Services (Άνω Ζεύξη)
- **Κόμβος 6:** Real Time Polling Services (Άνω Ζεύξη)



Εικόνα 7 Τοπολογία προσομοίωσης 2

Το μέγεθος των πακέτων ήταν 256 bytes και το interval 2,5 ms με παραγόμενη κίνηση 102,4Kbyte/sec ανά κόμβο.

Με τη χρήση του χρονοπρογραμματιστή RTPS μεταδόθηκαν 57600 πακέτα και έγινε λήψη των 57594. Το συνολικό packet loss έφτασε το 0,01% . Το throughput ήταν της τάξης του 4,68 Mbit/sec . Το delay ήταν 10,2 msec και το jitter 4 msec .

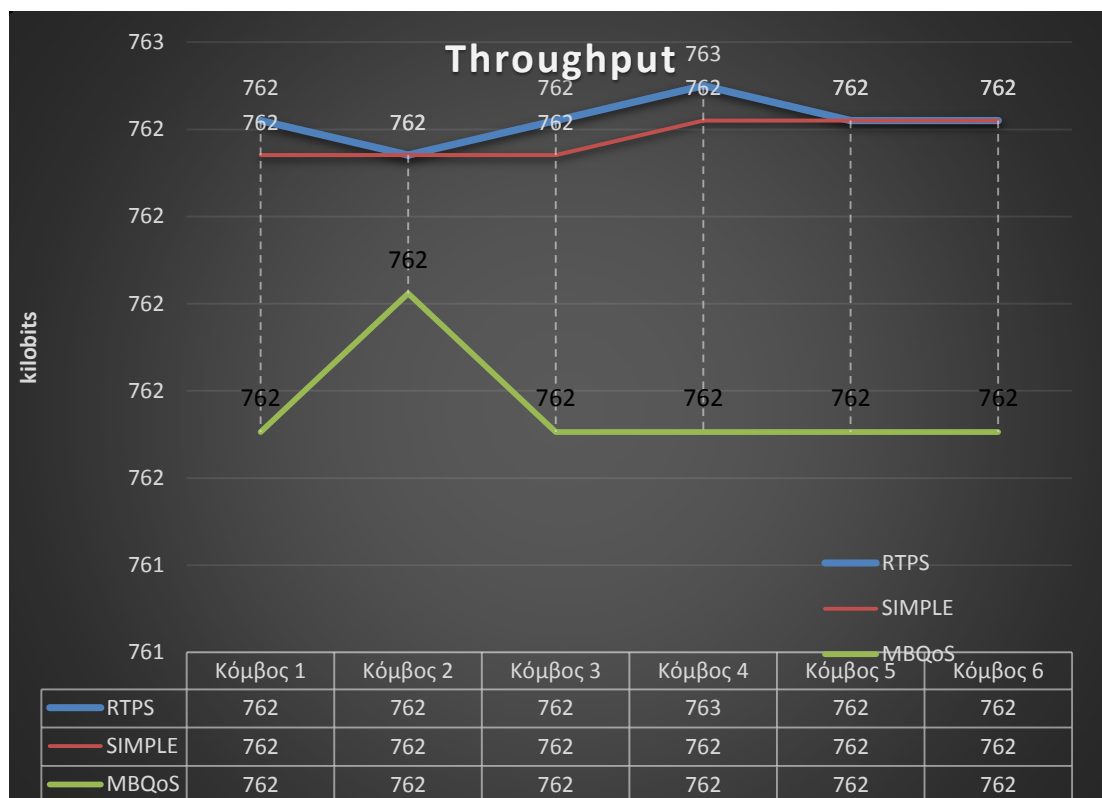
Με τη χρήση του χρονοπρογραμματιστή SIMPLE μεταδόθηκαν 57600 πακέτα και έγινε λήψη των 57591 . Το συνολικό packet loss έφτασε το 0,01 % . Το throughput ήταν της τάξης του 4,68 Mbit/sec . Το delay ήταν 6,06 msec και το jitter 4 msec .

Με τη χρήση του χρονοπρογραμματιστή MBQoS μεταδόθηκαν 57600 πακέτα και έγινε λήψη των 57544. Το συνολικό packet loss έφτασε το 0,09 % . Το throughput ήταν της τάξης του 4,68 Mbit/sec . Το delay ήταν 21,59 msec και το jitter 10 msec .

Όπως αποτυπώνεται και διαγραμματικά, οι 3 χρονοπρογραμματιστές έχουν πανομοιότυπο επίπεδο ρυθμοαπόδοσης. Με ελάχιστη διαφορά υπερτερεί ο RTPS στους κόμβους 1,3,4, ενώ ο MBQoS υστερεί σε όλους τους κόμβους αλλά η διαφορά του είναι της τάξης των 600-700 bps.

Κόμβοι	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	780718,6667	780637,3333	779986,6667
2	780637,3333	780637,3333	780312
3	780718,6667	780637,3333	779986,6667
4	780800	780718,6667	779986,6667
5	780718,6667	780718,6667	779986,6667
6	780718,6667	780718,6667	779986,6667

Σχήμα 43 Throughput Σεναρίου 2 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε bit/s



Εικόνα 8 Ρυθμοαπόδοση Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE/MBQoS Σεναρίου 2

Στην καθυστέρηση έχουμε ξεκάθαρες διαφορές στους τρεις χρονοπρογραμματιστές. Στους κόμβους 1,4 υπερéχει ο RTPS scheduler με 5,8 ms έναντι 7,9 και 6,6 ms αντίστοιχα του SIMPLE. Ο Simple έχει ελάχιστα μικρότερη καθυστέρηση στους υπόλοιπους κόμβους με 5,5 ms έναντι 5,8 ms του RTPS. Ο MBQoS παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καθυστέρηση σε όλους τους κόμβους με τιμές που κυμαίνονται από 21,1 ms έως 22,6 ms. Όλες οι τιμές πάντως είναι μικρότερες των 50 ms που αποτελεί το κάτω όριο για καθυστέρηση σε εφαρμογές rtPS.

Κόμβοι	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	0,0058	0,0055	0,0211
2	0,0058	0,0055	0,0226
3	0,0058	0,0055	0,0206
4	0,0058	0,0079	0,0223
5	0,0058	0,0055	0,0213
6	0,0058	0,0066	0,0218

Σχήμα 44 Delay Σεναρίου 2 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε sec

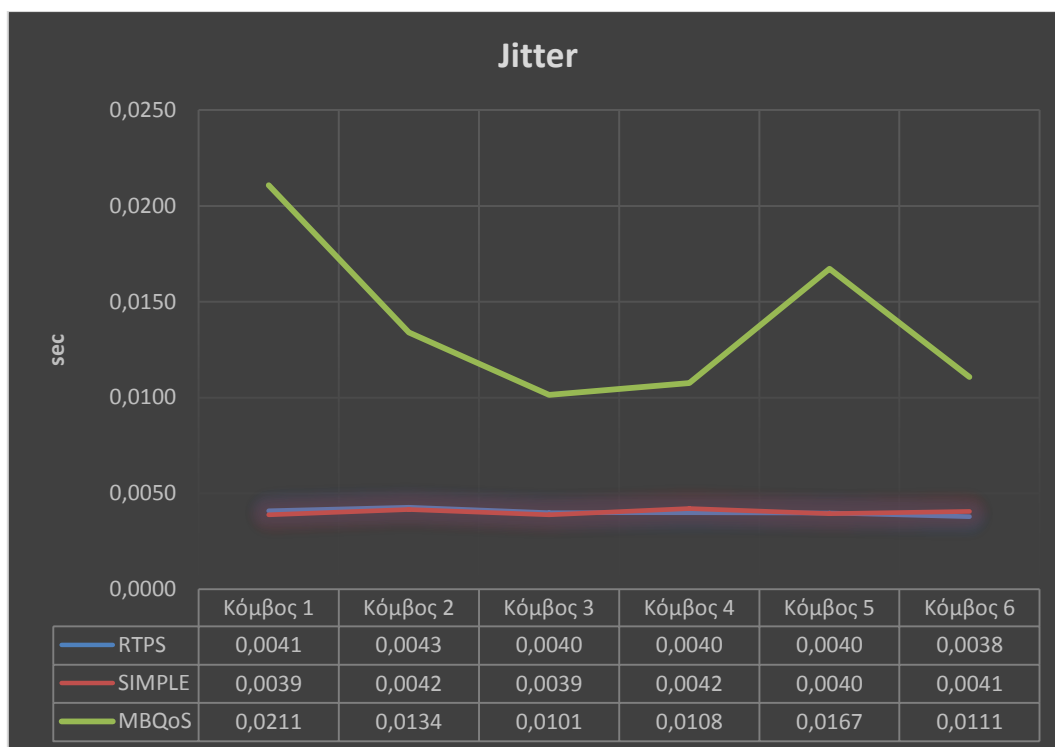


Εικόνα 9 Διακύμανση καθυστέρησης Χρονοπρογραμματιστών RTPS/SIMPLE/MBQoS σεναρίου

Το jitter διαφέρει ελάχιστα για τον RTPS και τον SIMPLE χρονοπρογραμματιστή οι οποίοι έχουν μέση διακύμανση καθυστέρηση 4 ms, ενώ ο MBQoS, στον κόμβο 1 έχει jitter από 11 έως 21 ms.

Κόμβοι	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	0,0039	0,0039	0,0211
2	0,0043	0,0042	0,0134
3	0,0039	0,0039	0,0101
4	0,0039	0,0042	0,0108
5	0,0039	0,0040	0,0167
6	0,0039	0,0041	0,0111

Σχήμα 45 Jitter Σεναρίου 2 ανά Χρονοπρογραμματιστή σε sec

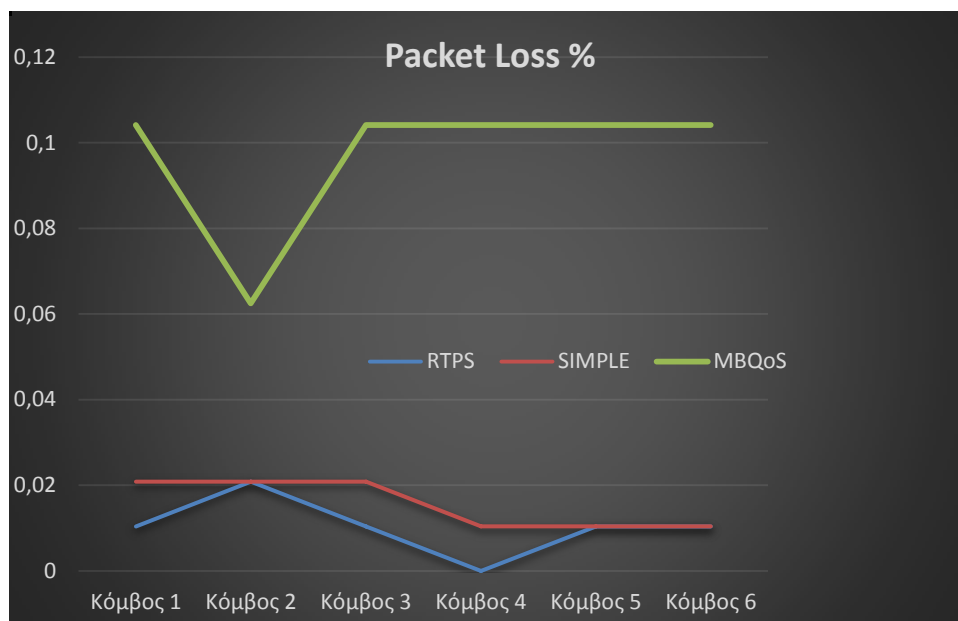


Εικόνα 10 Διακύμανση καθυστέρησης Χρονοπρογραμματιστών σεναρίου 2

Στο ποσοστό απώλειας πακέτων, και οι τρεις χρονοπρογραμματιστές κινούνται σε χαμηλά όρια και παρουσιάζουν μικρές διαφορές. Ο πιο αποδοτικός στους κόμβους 1,3,4 είναι ο RTPS χρονοπρογραμματιστής, στους κόμβους 2,5,6 έχει την ίδια απώλεια πακέτων με τον SIMPLE, ενώ η μεγαλύτερη απώλεια πακέτων σημειώνεται από τον χρονοπρογραμματιστή MBQoS. Το ποσοστό του 0,1% της απώλειας πακέτων που παρουσιάζει ο MBQoS παρόλα αυτά είναι μία τιμή αρκετά μικρή και πληροί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί από το πρότυπο για rtPS ροές υπηρεσίας.

Κόμβος	RTPS Scheduler	SIMPLE Scheduler	MBQoS Scheduler
1	0,010417	0,020833	0,104167
2	0,020833	0,020833	0,0625
3	0,010417	0,020833	0,104167
4	0	0,010417	0,104167
5	0,010417	0,010417	0,104167
6	0,010417	0,010417	0,104167

Σχήμα 46 Επί τοις Εκατό Packet Loss Σεναρίου 1 ανά Χρονοπρογραμματιστή



Εικόνα 11 Επί τοις εκατό απώλεια πακέτων σεναρίου 2

8 Συμπεράσματα

Στην εργασία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις βάσει 2 σεναρίων. Η επιλογή του interval και του μεγέθους των πακέτων έγινε έτσι ώστε η κίνηση που θα δημιουργηθεί να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπάρχει απώλεια πακέτων και να μελετηθεί η συμπεριφορά του δικτύου. Στο πρώτο σενάριο είχαμε μετάδοση ροών υπηρεσίας όλων των τύπων (εγγυημένων και μη) και εξετάστηκε η συμπεριφορά των χρονοπρογραμματιστών συνολικά και ανά κόμβο ώστε να παρουσιαστεί η διαφορά στην προτεραιότητα και τη μετάδοση των διαφορετικών ομάδων πακέτων. Στο δεύτερο σενάριο υπήρξε μετάδοση ίδιου όγκου πακέτων, με τη διαφορά ότι ανήκαν σε ροές RtPS. Η επιλογή αυτή έγινε για να μελετηθεί η απόδοση του δικτύου ανά χρονοπρογραμματιστή σε εγγυημένες ροές.

8.1 Χρονοπρογραμματιστής SIMPLE

Στο πρώτο σενάριο ο SIMPLE χρονοπρογραμματιστής παρείχε την υψηλότερη ρυθμοαπόδοση εκ των τριών χρονοπρογραμματιστών συνολικά, και ειδικότερα στους κόμβους 1 και 4. Τα επίπεδα του throughput είναι παραπάνω από αποδεκτά βάσει του πίνακα που αποτυπώνεται στα σχήματα 15 και 47. Σε ότι αφορά την καθυστέρηση, στους κόμβους 4,6 ήταν εντός ορίων και ελάχιστα χειρότερος από τον RTPS, ενώ στους κόμβους 1,2,3,5 είχε τη μικρότερη καθυστέρηση. Αντίστοιχα ήταν και τα αποτελέσματά του σε ότι αφορά τη διακύμανση της καθυστέρησης. Στον τομέα της απώλειας πακέτων ο SIMPLE scheduler ήταν εντός ορίων και είχε τα λιγότερα απολεσθέντα πακέτα συνολικά η πραγματική διαφορά του με τους άλλους χρονοπρογραμματιστές υπήρξε στον κόμβο που παρήγαγε best effort ροή.

Στο δεύτερο σενάριο ο SIMPLE χρονοπρογραμματιστής παρείχε μαζί με τον RTPS τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση. Τα επίπεδα του throughput πάντως ήταν παραπάνω από αποδεκτά βάσει του πίνακα που αποτυπώνεται στα σχήματα 15 και 47. Στην καθυστέρηση, ήταν οριακά χειρότερος από τον RTPS χρονοπρογραμματιστή, αφού ο δεύτερος υπερείχε στους κόμβους που μετέδιδαν rtPS ροές. Στη διακύμανση της καθυστέρησης, ο χρονοπρογραμματιστής SIMPLE είχε επίσης παρόμοια απόδοση με τον RTPS scheduler. Στον τομέα του packet loss ο SIMPLE scheduler παρουσίασε αμελητέα απώλεια, της τάξης του 0,01%.

Συμπερασματικά μετά τις δύο προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η χρήση του χρονοπρογραμματιστή SIMPLE είναι μία λύση ώστε να υπάρχει μία δίκαιη κατανομή πόρων ακόμα και σε συνθήκες μεγάλου φόρτου στο δίκτυο. Και στα δύο σενάρια τα αποτελέσματά του ήταν εντός των τιμών που προδιαγράφει το πρότυπο WiMAX. Στην περίπτωση που σε ένα δίκτυο μεταδίδονται πακέτα που ανήκουν σε όλες τις κατηγορίες των ροών υπηρεσιών του WiMAX, κάτι που αγγίζει τη ρεαλιστική χρήση του δικτύου, ο SIMPLE χρονοπρογραμματιστής εκχωρεί εύρος ζώνης ακόμα και στις best effort υπηρεσίες με τρόπο τέτοιο που να προσφέρει τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που προδιαγράφονται και για τις εγγυημένες ροές.

8.2 Χρονοπρογραμματιστής RTPS

Στο πρώτο σενάριο ο χρονοπρογραμματιστής RTPS παρουσιάζει χαμηλότερο throughput από τον SIMPLE λόγω της χαμηλής απόδοσης του κόμβου 1. Αυτό μειώνει και τη συνολική του απόδοση στην απώλεια. Η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης είναι οι παράγοντες στους οποίους ο RTPS scheduler υπερέχει έναντι των υπολοίπων, κυρίως στους κόμβους 4 και 6.

Στο δεύτερο σενάριο ο RTPS επίσης έχει το χαμηλότερο jitter και το χαμηλότερο delay, με μικρή διαφορά από τον simple χρονοπρογραμματιστή. Στον τομέα της απώλειας πακέτων και

της ρυθμοαπόδοσης ο RTPS scheduler είχε τα καλύτερα αποτελέσματα (έστω και οριακά σε σχέση με τον SIMPLE).

Βάσει της απόδοσης του RTPS scheduler στις δύο προσομοιώσεις βγαίνει το συμπέρασμα ότι παρέχει πλήρως τις προδιαγραφές του προτύπου για μετάδοση RTPS πακέτων, ειδικότερα από την πλευρά της καθυστέρησης και της διακύμανσής της. Λόγω του προσανατολισμού του στις RTPS ροές όμως, στο πρώτο σενάριο, παρόλο που το εύρος ζώνης όπως φάνηκε και από την απόδοση του SIMPLE scheduler ήταν αρκετό για να εξυπηρετηθούν σε υψηλό επίπεδο όλοι οι κόμβοι, «θυσίασε» τον πρώτο κόμβο που μετέδιδε best effort ροές μειώνοντας ρυθμοαπόδοση και αυξάνοντας την απώλεια των πακέτων του, ώστε να μειώσει την καθυστέρηση και τη διακύμανσή της στους κόμβους που μετέδιδαν rtPS ροές.

8.3 Χρονοπρογραμματιστής MBQoS

Ο χρονοπρογραμματιστής MBQoS στο πρώτο σενάριο είχε υψηλά επίπεδα ρυθμοαπόδοσης (στα ίδια ή και καλύτερα επίπεδα με τους άλλους δύο) σε όλους τους κόμβους εκτός από τον κόμβο 1 ο οποίος μετέδιδε πακέτα ροής best effort. Στον κόμβο αυτό η ρυθμοαπόδοση έπεσε από τα 762 kbps στα 22 kbps με αποτέλεσμα το packet loss να φτάσει το 97%. Στην καθυστέρηση επίσης υπολείπεται των άλλων χρονοπρογραμματιστών σε όλους τους κόμβους, με επακόλουθο να ισχύει το ίδιο και για το jitter. Οι τιμές πάντως των δύο αυτών παραμέτρων βρίσκονται εντός των ορίων των προδιαγραφών του προτύπου (20-22ms delay και 10-21 ms jitter).

Στη δεύτερη προσομοίωση, ο χρονοπρογραμματιστής MBQoS είχε ικανοποιητική ρυθμοαπόδοση, η οποία κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με τους άλλους δύο χρονοπρογραμματιστές. Η απώλεια των πακέτων ήταν κάτω από 0,1%, ποσοστό που εντάσσεται στις προδιαγραφές του προτύπου για RTPS ροές. Ο τομέας που υστέρησε ο MBQoS έναντι των υπολοίπων ήταν αυτός της καθυστέρησης και της διακύμανσής της. Συγκεκριμένα η μέση καθυστέρηση ήταν 21,59 msec και η διακύμανσή της 10 msec, αποτελέσματα που είναι εκτός των ορίων που προδιαγράφει το πρότυπο.

Συνοπτικά παρατηρείται ότι ο MBQoS εκχωρεί ελάχιστο εύρος ζώνης στα πακέτα που τοποθετεί στη χαμηλής προτεραιότητας ουράς του με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη απώλεια πακέτων και πολύ χαμηλός ρυθμός μετάδοσης σε Best Effort ροές υπηρεσίας. Οι ροές που τοποθετούνται στην ουρά υψηλής προτεραιότητας (RTPS, UGS στην πρώτη προσομοίωση) μεταδίδονται με ταχύτητα. Ο χρονοπρογραμματιστής αυτός είχε τις χαμηλότερες επιδόσεις από τους τρεις που έχουν υλοποιηθεί στον ns3, ενώ σε περίπτωση μεγάλου δικτυακού φόρτου, οι best effort υπηρεσίες μεταδίδονται με πολύ αργούς ρυθμούς, όταν το καταφέρνουν.

Classes	Applications	Bandwidth Guideline		Latency Guideline		Jitter Guideline		QoS Classes
1	Multiplayer Interactive Gaming	Low	50 kbps	Low	< 25 ms	N/A		rtPS and UGS
2	VoIP and Video Conference	Low	32-64 kbps	Low	< 160 ms	Low	< 50 ms	UGS and rtPS
3	Streaming Media	Low to high	5 kbps to 2 Mbps	N/A		Low	< 100 ms	rtPS
4	Web Browsing and Instant Messaging	Moderate	10 kbps to 2 Mbps	N/A		N/A		nrtPS and BE
5	Media Content Downloads	High	> 2 Mbps	N/A		N/A		nrtPS and BE

Σχήμα 47 Κλάσεις και Απαιτήσεις Εφαρμογών WiMAX [43]

9 Βιβλιογραφία

- [1] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group (2001), *Channel Models for Fixed Wireless Applications (IEEE 802.16.3c-01/29r4)*, <http://www.ieee802.org/16/>
- [2] <http://kioan.users.uth.gr/wireless/fresnelZone.html>
- [3] IEEE 802.16a <http://ieee802.org/16/pubs/80216a-2003.html>
- [4] Κανάτας Α. & Κωνσταντίνου Φ. & Πάντος Γ. (2008): Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.(ISBN 978-960-7182-06-7)
- [5] Eklund Carl, Marks Roger, Kenneth L., Wang Stanley (2002), IEEE Standard 802.16:A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access, IEEE Communications Magazine
- [6] Loutfi Nuaymi “WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access”, January 2007, ISBN: 978-0-470-02808-7
- [7] Andrews Jeffrey, Arunabha Ghosh ,Rias Muhamed (2007), “Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking”, NJ: Pearson Education, ISBN 10: 0-13-222552-2
- [8] Marks Roger B., Eklund Carl, Stanwood Ken, Wang Stanley (2002), The 802.16 WirelessMAN™ MAC: It’s Done, but What Is It?, http://www.wirelessman.org/docs/01/80216-01_58r1.pdf
- [9] Bo Li, Yang Qin, Chor Ping Low, Choon Lim Gwee (2007), A Survey on Mobile WiMAX, IEEE Communications Magazine, σελίδες 70-75, ISBN: 0163-6804
- [10] Hongyuan Chen, Recovering Data from Pdu Stream with HCS Error in WIMAX, ICCASM-12, July 2012, ISBN 978-94-91216-00-8
- [11] IEEE 802.16e, <http://ieee802.org/16/pubs/80216e.html>
- [12] Zdenek Becvar, Jan Zelenka ,”Handovers in the Mobile WiMAX”, Research in Telecommunication Technology (RTT 2006), Brno, Czech Republic, p. 147-150, 2006.
- [13] Bandaralokuge Earl Shehan Perera, VoIP and Best Effort Service Enhancement on Fixed WiMAX: A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering in the University of Canterbury.
- [14] Karen Scarfone, Cyrus Tibbs, Matthew Sexton, Guide to Securing WiMAX Wireless Communications, NIST Special Publication 800-127, ISBN 147816848X, 9781478168485, CreateSpace, 2012
- [15] Syed Anson, Ilyas Mohammad (2007), WiMAX Applications, Boca Raton, FL: CRC Press
- [16] Etemad K., (2008), Overview of mobile WiMAX technology and evolution, IEEE Communications Magazine
- [17] IEEE 802.16b, <http://www.ieee802.org/16/tg4/>
- [18] Sekercioglu Ahmet, Ivanovich Milosh, Yegin Alper (2009), A survey of MAC based QoS implementations for WiMAX networks, <http://titania.ctie.monash.edu/papers/wimax-mac-qos-survey.pdf>
- [19] Bashir Hayat, Raheel Mansoor , Abdul Nasir (2006), 802.16 2001 MAC Layer QoS, Ubiquity, <http://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1133945>

- [20] Sassan Ahmadi ,”Introduction to mobile WiMAX Radio Access Technology: PHY and MAC Architecture Wireless Standards and Technology”, Intel Corporation, December 7, 2006, http://vivonets.ece.ucsb.edu/ahmadiUCSB_slides_Dec7.pdf
- [21] Kenji Saito, Takashi Inoue, “Service flow management for RS”, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2006-11-7, http://www.ieee802.org/16/relay/contrib/C80216j-06_282.pdf
- [22] Wimax Forum, “Can WiMAX Address Your Applications?”, October 24 2005, http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/can_wimax_address_your_applications_final.pdf
- [23] Shafqat Hameed , Asim Javaid Butt , Ahmed Raza, “Performance Analysis of WiMax”, Journal of American Science, ISSN:1545-1003, 7(9), Pages 975-984, 2011
- [24] Filip Zivkovic, Jeff Priest, Hamidreza Haghshenas, Quantitative Analysis of Streaming Multimedia over WiMAX and LTE Networks Using OPNET v. 16.0, ENSC 427 – Communication Networks Spring 2013, <http://www.sfu.ca/~jpa30/ENSC%20427%20-%20Group%209%20Final%20Report.pdf>
- [25] ns-3 documentation, <http://www.nsnam.org/docs/release/3.18/doxygen/index.html>
- [26] ns3- tutorial, <http://www.nsnam.org/docs/release/3.18/tutorial/singlehtml/index.html>
- [27] ns-3 manual, <http://www.nsnam.org/docs/release/3.18/manual/singlehtml/index.html>
- [28] ns-3 model library, <http://www.nsnam.org/docs/release/3.18/models/singlehtml/index.html>
- [29] IEEE 802.16c, <http://ieee802.org/16/pubs/80216c-2002.html>
- [30] IEEE 802.16d, <http://ieee802.org/16/pubs/P80216d.html>
- [31] IEEE 802.16f, <http://ieee802.org/16/pubs/80216f.html>
- [32] IEEE 802.16g, <http://ieee802.org/16/pubs/80216g.html>
- [33] IEEE 802.16k, <http://ieee802.org/16/pubs/80216k.html>
- [34] IEEE 802.16j, <http://ieee802.org/16/pubs/80216j.html>
- [35] IEEE 802.16i, <http://ieee802.org/16/pubs/80216i.html>
- [36] IEEE 802.16h, <http://ieee802.org/16/pubs/80216h.html>
- [37] IEEE 802.16m, <http://ieee802.org/16/pubs/80216m.html>
- [38] IEEE 802.16n, <http://ieee802.org/16/pubs/80216n.html>
- [39] IEEE 802.16p, <http://ieee802.org/16/pubs/80216p.html>
- [40] IEEE 802.16.2-2004, <http://ieee802.org/16/pubs/802162-2004.html>
- [41] IEEE 802.16-2009, <http://ieee802.org/16/pubs/80216-2009.html>
- [42] Μ.Ε. Θεολόγου, “Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών” 2^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 978-960-418-278-7
- [43] Chakchai So-In, Student Member, IEEE, Raj Jain, Fellow, IEEE, and Abdel-Karim Tamimi, Student Member, IEEE, “Scheduling in IEEE 802.16e Mobile WiMAX

Networks: Key Issues and a Survey” , IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 27, NO. 2, FEBRUARY 2009

[44] Alexander Sayenko, Olli Alanen, Juha Karhula, Timo Hamalainen, Ensuring the QoS Requirements in 802.16 Scheduling, 9th ACM international symposium on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems Pages 108-117 , ISBN:1-59593-477-4

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

[47] Shehan Perera, VoIP and Best Effort Service enhancement on Fixed Wimax, PHD thesis , University of Canterbury, 2008

[48] Ohterman Frank (2005), Wimax Handbook Building 802.16 Wireless Networks, Mc-Graw Hill Communications

10 Παράρτημα

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/config-store-module.h"
#include "ns3/wimax-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/global-route-manager.h"
#include "ns3/ipcs-classifier-record.h"
#include "ns3/service-flow.h"
#include <iostream>
#include "ns3/netanim-module.h"

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("WimaxSimpleExample");

using namespace ns3;

int main (int argc, char *argv[])
{
// scheduler 0=SIMPLE, 1=MBQOS, 2=RTPS
int duration = 30;
// schedType = 0;
//bool verbose = false; //2 make logs

WimaxHelper::SchedulerType scheduler =
WimaxHelper::SCHED_TYPE_RTPS;

LogComponentEnable ("UdpClient", LOG_LEVEL_INFO);
LogComponentEnable ("UdpServer", LOG_LEVEL_INFO);

NodeContainer ssNodes;

NodeContainer bsNodes;
```

```
ssNodes.Create (6);
bsNodes.Create (1);

WimaxHelper wimax;

NetDeviceContainer ssDevs, bsDevs;

ssDevs = wimax.Install (ssNodes,
WimaxHelper::DEVICE_TYPE_SUBSCRIBER_STATION,
                    WimaxHelper::SIMPLE_PHY_TYPE_OFDM,
                    scheduler);

bsDevs = wimax.Install (bsNodes,
WimaxHelper::DEVICE_TYPE_BASE_STATION,
                    WimaxHelper::SIMPLE_PHY_TYPE_OFDM, scheduler);

Ptr<SubscriberStationNetDevice> ss[7];

for (int i = 0; i < 6; i++)
{
    ss[i] = ssDevs.Get (i)->GetObject<SubscriberStationNetDevice>
();
    ss[i]->SetModulationType (WimaxPhy::MODULATION_TYPE_QAM64_34);
}

Ptr<BaseStationNetDevice> bs;

bs = bsDevs.Get (0)->GetObject<BaseStationNetDevice> ();

InternetStackHelper stack;
stack.Install (bsNodes);
stack.Install (ssNodes);
```

```
Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");

Ipv4InterfaceContainer SSinterfaces = address.Assign (ssDevs);
Ipv4InterfaceContainer BSinterface = address.Assign (bsDevs);

Ptr<ListPositionAllocator>          positionAlloc          =
CreateObject<ListPositionAllocator> ();

positionAlloc->Add (Vector(55, 55, 0));
positionAlloc->Add (Vector(55, 45, 0));
positionAlloc->Add (Vector(55, 65, 0));
positionAlloc->Add (Vector(65, 55, 0));
positionAlloc->Add (Vector(65, 65, 0));
positionAlloc->Add (Vector(45, 65, 0));
positionAlloc->Add (Vector(65, 45, 0));

MobilityHelper bs_mobility;
bs_mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
bs_mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
bs_mobility.Install(bsNodes);
bs_mobility.Install(ssNodes);

UdpServerHelper udpServer;
ApplicationContainer serverApps;

UdpClientHelper udpClient;
ApplicationContainer clientApps;

UdpClientHelper udpClient1;
ApplicationContainer clientApps1;

UdpClientHelper udpClient2;
ApplicationContainer clientApps2;
```

```
UdpClientHelper udpClient3;
ApplicationContainer clientApps3;

UdpClientHelper udpClient4;
ApplicationContainer clientApps4;

udpServer = UdpServerHelper (49000);

serverApps = udpServer.Install (bsNodes.Get (0));
serverApps.Start (Seconds (6));
serverApps.Stop (Seconds (duration));

udpClient = UdpClientHelper (BSinterfaces.GetAddress (0), 49000);
udpClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (12000));
udpClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.0025)));
udpClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (200));

clientApps = udpClient.Install (ssNodes.Get (1));
clientApps.Start (Seconds (6.0));
clientApps.Stop (Seconds (duration));

udpClient1 = UdpClientHelper (BSinterfaces.GetAddress (0), 49000);
udpClient1.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (12000));
udpClient1.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.0025)));
udpClient1.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (200));

clientApps1 = udpClient1.Install (ssNodes.Get (2));
clientApps1.Start (Seconds (6.0));
clientApps1.Stop (Seconds (duration));

udpClient2 = UdpClientHelper (BSinterfaces.GetAddress (0), 49000);
```

```
udpClient2.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (12000));
udpClient2.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.0025)));
udpClient2.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (200));

clientApps2 = udpClient2.Install (ssNodes.Get (3));
clientApps2.Start (Seconds (6.0));
clientApps2.Stop (Seconds (duration));

udpClient3 = UdpClientHelper (BSinterfaces.GetAddress (0), 49000);
udpClient3.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (12000));
udpClient3.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.0025)));
udpClient3.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (200));

clientApps3 = udpClient3.Install (ssNodes.Get (4));
clientApps3.Start (Seconds (6.0));
clientApps3.Stop (Seconds (duration));

udpClient4 = UdpClientHelper (BSinterfaces.GetAddress (0), 49000);
udpClient4.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (12000));
udpClient4.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.0025)));
udpClient4.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (200));

clientApps4 = udpClient4.Install (ssNodes.Get (5));
clientApps4.Start (Seconds (6.0));
clientApps4.Stop (Seconds (duration));

    Simulator::Stop (Seconds (duration + 0.1));

//-----
-----

IpcsClassifierRecord DlClassifierRtps2 (Ipv4Address ("0.0.0.0"),
```

```
        Ipv4Mask ("0.0.0.0"),
        SSinterfaces.GetAddress (2),
        Ipv4Mask ("255.255.255.255"),
        0,
        65000,
        49000,
        49000,
        17,
        1);

    ServiceFlow      DlServiceFlowRtps2    =    wimax.CreateServiceFlow
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_DOWN,

ServiceFlow::SF_TYPE RTPS,

DlClassifierRtps2);

    IpcsClassifierRecord UlClassifierRtps1 (SSinterfaces.GetAddress (1),
        Ipv4Mask ("255.255.255.255"),
        Ipv4Address ("0.0.0.0"),
        Ipv4Mask ("0.0.0.0"),
        0,
        65000,
        49000,
        49000,
        17,
        1);

    ServiceFlow      UlServiceFlowRtps1    =    wimax.CreateServiceFlow
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_UP,

ServiceFlow::SF_TYPE RTPS,

UlClassifierRtps1);

    IpcsClassifierRecord DlClassifierUgs3 (Ipv4Address ("0.0.0.0"),
        Ipv4Mask ("0.0.0.0"),
        SSinterfaces.GetAddress (3),
        Ipv4Mask ("255.255.255.255"),
```

```
0,  
65000,  
49000,  
49000,  
17,  
1);  
  
ServiceFlow      DlServiceFlowUgs3      =      wimax.CreateServiceFlow  
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_DOWN,  
  
ServiceFlow::SF_TYPE_UGS,  
  
DlClassifierUgs3);  
  
IpcsClassifierRecord UlClassifierUgs4 (Ssinterfaces.GetAddress (4),  
Ipv4Mask ("255.255.255.255"),  
Ipv4Address ("0.0.0.0"),  
Ipv4Mask ("0.0.0.0"),  
0,  
65000,  
49000,  
49000,  
17,  
1);  
  
ServiceFlow      UlServiceFlowUgs4      =      wimax.CreateServiceFlow  
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_UP,  
  
ServiceFlow::SF_TYPE_UGS,  
  
UlClassifierUgs4);  
  
IpcsClassifierRecord DlClassifierBe (Ipv4Address ("0.0.0.0"),  
Ipv4Mask ("0.0.0.0"),  
Ssinterfaces.GetAddress (0),  
Ipv4Mask ("255.255.255.255"),  
0,  
65000,  
49000,
```

```
49000,  
17,  
2);  
  
ServiceFlow DlServiceFlowBe = wimax.CreateServiceFlow  
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_DOWN,  
  
ServiceFlow::SF_TYPE_BE,  
  
DlClassifierBe);  
  
IpcsClassifierRecord DlClassifierBe5 (Ipv4Address ("0.0.0.0"),  
Ipv4Mask ("0.0.0.0"),  
SSinterfaces.GetAddress (5),  
Ipv4Mask ("255.255.255.255"),  
0,  
65000,  
49000,  
49000,  
17,  
2);  
  
ServiceFlow DlServiceFlowBe5 = wimax.CreateServiceFlow  
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_DOWN,  
  
ServiceFlow::SF_TYPE_BE,  
  
DlClassifierBe5);  
  
IpcsClassifierRecord UlClassifierBe6 (SSinterfaces.GetAddress (6),  
Ipv4Mask ("255.255.255.255"),  
Ipv4Address ("0.0.0.0"),  
Ipv4Mask ("0.0.0.0"),  
0,  
65000,  
49000,  
49000,
```



```
17,  
2);  
  
ServiceFlow UServiceFlowBe6 = wimax.CreateServiceFlow  
(ServiceFlow::SF_DIRECTION_UP,  
  
ServiceFlow::SF_TYPE_BE,  
  
UClassifierBe6);  
  
//-----  
-----  
  
ss[0]->AddServiceFlow (UServiceFlowRtps);  
ss[1]->AddServiceFlow (UServiceFlowRtps1);  
ss[2]->AddServiceFlow (UServiceFlowRtps2);  
ss[3]->AddServiceFlow (UServiceFlowRtps3);  
ss[4]->AddServiceFlow (UServiceFlowRtps4);  
ss[5]->AddServiceFlow (UServiceFlowRtps5);  
  
AnimationInterface anim("labwi.xml");  
Simulator::Run ();  
Simulator::Destroy ();  
  
return 0;  
}
```