



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και αποτίμηση σχημάτων παροχής δικαιοσύνης
σε κινητά ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα τύπου WiMAX**

Μακρυδήμας Μιλτιάδης

Υπεύθυνη: Λούτα Μαλαματή, Επίκουρος Καθηγήτρια
Επιβλέπων: Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης, Π.Δ. 407/80

Κοζάνη, Ιούνιος 2013

Περίληψη

Τα WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) δίκτυα παρέχουν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, διαλειτουργικότητα μεταξύ των προμηθευτών της τεχνολογίας, ενώ παράλληλα χαμηλώνουν το φράγμα εισόδου στις κινητές τηλεπικοινωνίες, προσφέροντας υπηρεσίες συγκρίσιμες με αυτές της ανερχόμενης τεχνολογίας 4G. Ωστόσο, το πρότυπο IEEE 802.16e γνωστό και ως κινητό (mobile) WiMAX, δεν τυποποιεί μηχανισμούς παροχής δικαιοσύνης και είναι πολύ πιθανό η ανάθεση του εύρους ζώνης στους συνδεδεμένους συνδρομητές να μην είναι δίκαιη ή σύμφωνη με κάποιο συμβόλαιο (Service Level Agreement – SLA). Από τη στιγμή που δεν έχει οριστεί κάποιος συγκεκριμένος αλγόριθμος παροχής δικαιοσύνης, κάθε φορέας που θα χρησιμοποιήσει το πρότυπο για την παροχή υπηρεσιών ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο είναι ελεύθερος να επιλέξει αλγόριθμο. Γι' αυτό το λόγο έχουν γίνει πολλές μελέτες και έχουν προταθεί από πολλές ομάδες διαφορετικοί αλγόριθμοι παροχής δικαιοσύνης. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη και υλοποίηση αλγορίθμων παροχής δικαιοσύνης, με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης των σταθμών βάσεων σε Mobile WiMAX δίκτυα.

Ειδικότερα, στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική μελέτη των δικτύων WiMAX. Αρχίζοντας γενικά από τις ασύρματες επικοινωνίες και τις πρώτες ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν ή χρησιμοποιούνται, μέχρι και την ανάπτυξη των προτύπων WiMAX. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά και οι καινοτομίες της συγκεκριμένης τεχνολογίας, όπως: προσαρμοστική διαμόρφωση, πολυπλεξία OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), πολλαπλή πρόσβαση OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και SOFDMA (Scalable Orthogonal Division Multiple Access), τεχνικές TDD-FDD (Time Division Duplexing, Frequency Division Duplexing). Αναλύεται η ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) που μπορεί να προσφέρει το WiMAX με έμφαση στο στρώμα MAC (Service Flows). Παρουσιάζεται η τρέχουσα έρευνα σε θέματα αρχιτεκτονικών εξασφάλισης ποιότητας υπηρεσίας (Integrated Services - IntServ, Differentiated Services - DiffServ) στο διαδίκτυο και ο συνδυασμός τους με το WiMAX στη διασφάλιση εγγυημένης ποιότητας υπηρεσιών δικτύου (UGS, rtPS, ErtPS, nrtPS, BE) από άκρο σε άκρο. Τέλος, μελετώνται και αναλύονται μέσω παραδειγμάτων σχήματα παροχής δικαιοσύνης σε Mobile WiMAX δίκτυα, καθώς και μέσω προσομοίωσής τους συγκρίνονται οι επιδόσεις τους σε θέματα αποδοτικότητας και καθυστέρησης αιτήσεων.

Abstract

WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) networks provide wireless broadband internet access, interoperability among the suppliers of the technology, while decrease the entrance barrier in mobile communications, offering services comparable to those of the emerging 4G technology. However, the standard IEEE 802.16e, also known as Mobile WiMAX, doesn't standardize fairness mechanisms and is likely that the assignment of bandwidth to the connected subscribers will not be fair or in accordance with the Service Level Agreement (SLA). Since no particular fairness scheme has been proposed, allowing every provider that will use the standard to provide wireless broadband internet access to choose their own algorithm. For this reason several different fairness schemes can be found in the literature. This thesis aims to study and simulate fairness schemes, which have as goal to better handle the resource allocations of the base stations downlink subframe in Mobile WiMAX networks.

In particular, an extensive literature study is carried out on WiMAX networks. The study starts from wireless communications and the first wireless technologies that have been used or are being used, up until the development of the WiMAX standards. Furthermore, the characteristics and the innovations of the specific technology (WiMAX) are being analyzed such as: Adaptive Modulation, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), Scalable Orthogonal Division Multiple Access (SOFDMA) and the TDD-FDD (Time Division Duplexing, Frequency Division Duplexing) techniques. Moreover, the Quality of Service (QoS) which can be provided by WiMAX is analyzed with emphasis on the MAC layer (Service Flows). In addition, the current research on topics of architectures that guarantee QoS (Integrated Services - IntServ, Differentiated Services - DiffServ) on the Internet is presented and their incorporation into the WiMAX standard, result in ensuring quality of service in a WiMAX network (UGS, rtPS, ErtPS, nrtPS, BE). Finally, some fairness schemes of the Mobile WiMAX are being studied and analyzed, and by means of simulation their efficiency and delay is being compared and evaluated.

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη εκπονήθηκε από τον φοιτητή Μακρυδήμα Μιλτιάδη του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών της Κοζάνης. Αποτελεί το τελευταίο αλλά και σημαντικότερο σημείο του κύκλου της φοιτήσεώς μου στο ίδρυμα. Ήταν ευκαιρία κατά τη διάρκεια της εργασίας να αξιοποιήσω τις γνώσεις μου και να τις συνδυάσω με το δημιουργικό και ερευνητικό μου πνεύμα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη, για την ευκαιρία και την εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου για την ανάθεση της πτυχιακής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του σε οποιοδήποτε πρόβλημα ή απορία είχα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη που προσέφεραν και την κατανόηση που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Μακρυδήμας Μιλτιάδης
Κοζάνη, 2012

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στις Βασικές Έννοιες της ασύρματης τεχνολογίας WiMAX.....	1
1.1 Ασύρματες Τεχνολογίες – Μία Εισαγωγή.....	1
1.1.1 Γενικά.....	1
1.1.2 Σύντομη ιστορία της κινητής επικοινωνίας.....	3
1.1.3 Νόμοι - Χαρακτηριστικά Ασυρμάτων Τεχνολογιών.....	4
1.2 IEEE Working Group Standardization Bodies.....	7
1.3 Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης.....	10
1.3.1 Ασύρματα τοπικά δίκτυα.....	13
1.4 Πρότυπο IEEE 802.16™.....	14
1.4.1 Γενικά.....	14
1.4.2 Ζώνες Συχνοτήτων.....	20
1.4.3 WiMAX: Μία εμπορική συμμαχία.....	22
1.4.4 Πλεονεκτήματα του WiMAX.....	22
1.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης της τεχνολογίας WiMAX.....	26
1.5.1 Εφαρμογές του WiMAX.....	26
1.5.2 Σενάρια χρήσης.....	28
1.5.2.1 Ιδιωτικά Δίκτυα.....	28
1.5.2.1.1 Υποστήριξη κυψέλης.....	29
1.5.2.1.2 Οπισθόζευξη (Backhaul) Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας.....	30
1.5.2.1.3 Εκπαιδευτικά Δίκτυα.....	31
1.5.2.1.4 Δίκτυα Τραπεζών.....	32
1.5.2.1.5 Δημόσια Ασφάλεια.....	33
1.5.2.1.6 Επικοινωνίες Offshore (σε απόσταση από την παραλία).....	34
1.5.2.1.7 Συνδέσεις σε Πανεπιστημιούπολεις.....	35
1.5.2.1.8 Επικοινωνίες Προσωρινών Κατασκευών.....	37
1.5.2.1.9 Θεματικά Πάρκα.....	38
1.5.2.2 Δημόσια Δίκτυα.....	39

1.5.2.2.1	Δίκτυο Πρόσβασης Πάροχου Ασύρματης Υπηρεσίας.....	39
1.5.2.2.2	Συνδεσιμότητα σε αγροτικές περιοχές.....	41
1.5.3	Συμπεράσματα.....	41
1.6	Δομή ενός δικτύου WiMAX.....	43
1.7	Εισαγωγή στη μετάδοση χωρίς οπτική επαφή (non-line-of-sight, NLOS).....	47
1.7.1	Sub-Channelization.....	51
1.7.2	Κεραίες για Εφαρμογές Σταθερής Ασύρματης Υπηρεσίας.....	51
1.7.3	Ποικιλία Εκπομπής και Λήψης.....	52
1.7.4	Προσαρμόσιμη Διαμόρφωση (Adaptive Modulation).....	52
1.7.5	Τεχνικές Διόρθωσης Λαθών.....	53
1.7.6	Έλεγχος Ισχύος.....	53
	Κεφάλαιο 2^ο: Εισαγωγή στο OFDM.....	54
2.1	Η τεχνολογία μετάδοσης OFDM.....	54
2.2	Βασικές αρχές του σήματος OFDM.....	57
2.2.1	Ο χρόνος ελέγχου (guard time) και το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix).....	57
2.2.2	Επιλογή βασικών παραμέτρων για το σχεδιασμό συστήματος OFDM.....	59
2.2.3	Επεξεργασία σήματος OFDM.....	60
2.2.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του OFDM σήματος.....	61
2.3	Πολλαπλή Πρόσβαση στα δίκτυα WiMAX με την τεχνική OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).....	62
2.3.1	Βασικά στοιχεία του OFDMA.....	62
2.3.2	Δομή Συμβόλων OFDMA και υπο-καναλοποίηση.....	63
2.3.3	Επεκτάσιμο OFDMA.....	65
	Κεφάλαιο 3^ο: Πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσιών.....	65
3.1	Εισαγωγή.....	65
3.1.1	Μηχανισμοί Αστυνόμευσης (policing).....	68
3.1.2	Μηχανισμοί Χρονοπρογραμματισμού (scheduling).....	69
3.2	Ενοποιημένες Υπηρεσίες (Integrated Services).....	70

3.2.1	Εισαγωγή.....	70
3.2.2	Υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου.....	73
3.2.3	Υπηρεσία εγγυημένης ποιότητας.....	74
3.2.4	Διαχείριση κίνησης στο μοντέλο IntServ.....	75
3.2.5	Το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων – RSVP.....	76
3.2.6	Πλεονεκτήματα του μοντέλου IntServ – RSVP.....	79
3.3	Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services).....	81
3.3.1	Εισαγωγή.....	81
3.3.2	Πεδίο DS.....	83
3.3.3	Υπηρεσίες DiffServ.....	85
3.3.4	Μεσίτες Εύρους Ζώνης (BBs).....	86
3.3.5	Μηχανισμοί ελέγχου κίνησης.....	87
3.3.6	Λειτουργίες Μετα-Δρομολόγησης.....	90
3.3.7	Αξιολόγηση.....	92
3.4	Εισαγωγή IntServ και DiffServ στο Διαδίκτυο.....	93
	Κεφάλαιο 4^ο: Quality of Service στο WiMAX.....	95
4.1	Εισαγωγή.....	95
4.2	Εφαρμογές και κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας.....	97
4.3	802.16 MAC.....	101
4.3.1	Υποεπίπεδα MAC.....	102
4.3.1.1	MAC - Υποεπίπεδο Σύγκλισης (MAC - Convergence Sublayer, MAC-CS).....	102
4.3.1.2	MAC - Κοινό τμήμα του MAC (MAC-Common Part, MAC-CP).....	103
4.3.1.3	MAC-Υποεπίπεδο Ασφάλειας (MAC – Privacy Sublayer, MAC-PS).....	103
4.3.2	Service Flows - Ροές Υπηρεσίας.....	104
4.3.2.1	Provisioned service flow.....	105
4.3.2.2	Admitted service flow.....	105
4.3.2.3	Active service flow.....	106
4.3.2.4	Το Μοντέλο Αντικειμένων.....	106
4.3.3	Εξουσιοδότηση.....	107
4.3.3.1	Provisioned (Static) Authorization.....	108
4.3.3.2	Dynamic Authorization.....	109

4.3.4	Ποιότητα υπηρεσιών στο 802.16e (mobile WiMAX).....	109
4.4	Σύγκριση WiMAX και Wi-Fi ως προς παρεχόμενη QoS.....	110
4.4.1	WiMAX backhauling σε τοπολογία πλέγματος (mesh) Wi-Fi.....	111
4.4.2	Πλεονεκτήματα WiMAX.....	111

Κεφάλαιο 5^ο: Μελέτη σχημάτων παροχής δικαιοσύνης σε κινητά δίκτυα WiMAX.....116

5.1	Ορισμός του προβλήματος.....	117
5.1.1	Παράγοντες σχεδιασμού.....	118
5.2	Basic Raster Algorithm.....	118
5.2.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου Basic Raster.....	119
5.3	Raster Algorithm.....	120
5.3.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου Raster.....	121
5.4	Simple Packing Algorithm.....	122
5.4.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου Simple Packing.....	123
5.5	First Fit Decreasing Height Algorithm (FFDH).....	124
5.5.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου First Fit Decreasing Height-FIFO (FFDH-FIFO).....	125
5.5.2	Παράδειγμα Αλγορίθμου First Fit Decreasing Height-SORTED (FFDH-SORTED).....	126
5.6	One Column Striping with non-increasing Area first mapping Algorithm (OCSA).....	127
5.6.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου OCSA.....	130
5.7	Enhanced One Column Striping with non-increasing Area first mapping Algorithm (eOCSA).....	132
5.7.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου eOCSA.....	134
5.8	Adaptive Mapping Scheme (ADAMAS).....	136
5.8.1	Παράδειγμα Αλγορίθμου ADAMAS.....	138

Κεφάλαιο 6ο: Αποτίμηση σχημάτων παροχής δικαιοσύνης σε κινητά δίκτυα WiMAX με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.....140

6.1	Επιδόσεις σχημάτων παροχής δικαιοσύνης.....	140
6.2	Αξιολόγηση Simple Packing αλγόριθμου.....	141
6.3	Αξιολόγηση First Fit Decreasing Height – FIFO αλγόριθμου (FFDH-FIFO)...	145
6.4	Αξιολόγηση First Fit Decreasing Height – SORTED αλγόριθμου (FFDH-SORTED).....	149
6.5	Αξιολόγηση One Column Striping with non-increasing Area first mapping αλγόριθμου (OCSA).....	154
6.6	Αξιολόγηση Enhanced One Column Striping with non-increasing Area first mapping αλγόριθμου (eOCSA).....	158
6.7	Adaptive Mapping Scheme (ADAMAS).....	162
6.8	Συμπεράσματα.....	166
	Βιβλιογραφία.....	168
	Παραρτήματα.....	174
	Παράρτημα Α: Ευρετήριο Σχημάτων.....	174
	Παράρτημα Β: Ευρετήριο Πινάκων.....	181
	Παράρτημα Γ: Ακρωνύμια.....	182

Εισαγωγή

Έχουν περάσει περισσότερα από εκατό χρόνια από όταν ο Guglielmo Marconi απονεμήθηκε με το βραβείο Nobel (1909), ο οποίος ήταν ο πρώτος που πέτυχε ασύρματη επικοινωνία πάνω από νερό το 1897. Έχοντας τεράστιο αντίκτυπο στην κοινωνία, οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν υιοθετηθεί με μεγάλο ενθουσιασμό σε ολόκληρο τον κόσμο. Στη σύγχρονη εποχή, η βιομηχανία ραδιοεπικοινωνιών έχει επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό κυρίως λόγω της προόδου στις κατασκευές κυκλωμάτων RF (Radio Frequency), κάνοντας την εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας δικτύων ραδιοεπικοινωνίας πιο προσιτή και εύκολη στη χρήση.

Υπό αυτές τις συνθήκες δημιουργήθηκε η ανάγκη για κάτι διαφορετικό. Απαλλαγμένο από τα μειονεκτήματα των σημερινών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο και διατηρώντας ή αναβαθμίζοντας τα πλεονεκτήματά τους, το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) είναι η λύση που όπως όλα δείχνουν θα επικρατήσει στο πολύ κοντινό μέλλον, αντικαθιστώντας ακόμη και τις οικιακές ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) συνδέσεις. Το WiMAX προσφέρει αφενός μεν υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης σε σχέση με το Wi-Fi, αφετέρου δε σημαντικά υψηλότερη εμβέλεια, που υπολογίζεται ότι θα μπορεί να καλύψει σε κάθε της σημείο ακόμη και μια μεγαλούπολη.

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στις Βασικές Έννοιες της ασύρματης τεχνολογίας WiMAX

1.1 Ασύρματες Τεχνολογίες – Μία Εισαγωγή

1.1.1 Γενικά

Ο κόσμος και η τεχνολογία των ασύρματων τεχνολογιών και ειδικότερα των ασύρματων επικοινωνιών, είναι ο πιο ραγδαία αναπτυσσόμενος αυτή τη στιγμή στο χώρο των τεχνολογικών επιστημών.

Από τη δεκαετία του 1980, οπότε και η ιδέα της ασύρματης επικοινωνίας σταμάτησε να είναι μια απλή θεωρητική ουτοπία, η ασύρματη τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται τόσο πολύ, ώστε σήμερα να θεωρείται το “de facto” standard για την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών αναγκών.

Όταν ο R. Metcalfe συνέλαβε και υλοποίησε την ιδέα του Ethernet, πιθανόν να μην μπορούσε να συλλάβει και το ότι ο αιθέρας που υπήρχε μέσα στα απτά καλώδια των τοπικών δικτύων (Local Area Networks - LANs) για να μεταδοθεί η πληροφορία, θα

μπορούσε να μετατραπεί στο απλούστερο δυνατό αέριο μέσο, τον αέρα που υπάρχει γύρω μας, χωρίς είτε καλώδια είτε κάποιο άλλο υλικό μέσο.

Τώρα πλέον, οι ασύρματες τεχνολογίες στις τηλεπικοινωνίες έχουν προχωρήσει απίστευτα πολύ και χρησιμοποιούνται στις κινητές τηλεπικοινωνίες, στα αμυντικά συστήματα, στην τηλεκπαίδευση, την τηλεϊατρική, την ψηφιακή τηλεόραση και σε πολλές ακόμα υπηρεσίες.

Οι τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης τα τελευταία χρόνια έχουν γνωρίσει σημαντική εξέλιξη, καθώς από τα πλεονεκτήματά τους επωφελούνται τόσο οι πάροχοι υπηρεσιών μετάδοσης δεδομένων, όσο και οι ιδιώτες ή οι απλοί χρήστες. Η ευκολία εγκατάστασης ενός ασύρματου δικτύου, οδήγησε στην ανάπτυξη σήμερα εκατομμυρίων δικτύων Wi-Fi (Wireless Fidelity) σε ολόκληρο τον πλανήτη. Παρόλα αυτά, το Wi-Fi αντιμετωπίζει μειονεκτήματα που έρχεται να λύσει μια νέα τεχνολογία, η οποία ακούει στο όνομα WiMAX.

Κάνοντας μια ανασκόπηση του τρόπου με τον οποίο η συντριπτική πλειοψηφία των σημερινών χρηστών πλοηγείται στο διαδίκτυο, μάλλον η πιο συνηθισμένη εικόνα που σχηματίζει κανείς στο μυαλό του είναι αυτή των καλωδίων που απαιτούνται για τη σύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με κάποιο modem ή router. Η πρόσβαση στο Internet μέσω ενσύρματων δικτύων μπορεί να παρουσιάζει σαν πλεονέκτημα την υψηλή σταθερότητα της σύνδεσης, ωστόσο περιορίζει σημαντικά την ευελιξία του χρήστη, ο οποίος θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα σταθερό σημείο προκειμένου να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες του διαδικτύου.

Τα τελευταία χρόνια γνώρισε σημαντική απήχηση σε παγκόσμια κλίμακα μια εξελιγμένη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, το Wi-Fi, το οποίο απλοποιεί τις διαδικασίες σύνδεσης ενός χρήστη με το Internet. Το Wi-Fi όμως, αν και αρκετά απλό στη χρήση, δεν έφερε την πραγματική επανάσταση που όλοι περίμεναν και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο, στην περιορισμένη εμβέλεια της κάλυψής του. Στην πραγματικότητα, η εν λόγω τεχνολογία αξιοποιήθηκε κυρίως για σύνδεση ηλεκτρονικών υπολογιστών και δρομολογητών (routers) σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους και όχι για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet σε μια γεωγραφικά εκτεταμένη περιοχή. Με την εμβέλειά του να περιορίζεται στα 100 μέτρα, δεν θα μπορούσε φυσικά να περιμένει κανείς κάτι διαφορετικό.

Το μειονέκτημα της περιορισμένης εμβέλειας του Wi-Fi, άφησε σαν μοναδική λύση για τους χρήστες που επιθυμούν μόνιμη πρόσβαση στο διαδίκτυο εν κινήσει, τη χρήση των τεχνολογιών GPRS (General Packet Radio Service) και 3G (τρίτη γενιά), μέσω των GSM (Global System for Mobile communications) και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι εν λόγω τεχνολογίες προσφέρουν σταθερή σύνδεση σε κάθε σημείο όπου υπάρχει κάλυψη σήματος από το

δίκτυο, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι ο συνδρομητής μπορεί να πλοηγείται στα websites που τον ενδιαφέρουν, να «κατεβάζει» τα e-mail του και να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία του Internet ακόμη και στη διάρκεια ενός ταξιδιού από τη μία άκρη μιας χώρας στην άλλη, χωρίς καμία σχεδόν διακοπή της σύνδεσης.

Όμως τόσο το GPRS όσο και το 3G διαθέτουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, που κράτησε μειωμένη τη συνδρομητική βάση: τις υψηλές χρεώσεις. Παρόλο που ο χρήστης είναι σε συνεχή σύνδεση με το Internet, χωρίς να υφίσταται χρονοχρέωση, η κοστολόγηση της πρόσβασης γίνεται σύμφωνα με τον όγκο των διακινούμενων δεδομένων. Ενδεικτικά στη χώρα μας, 1 MB δεδομένων που στέλνει ή λαμβάνει ο συνδρομητής GPRS/3G φθάνει να κοστολογείται μέχρι και 5 ευρώ, κάτι που καθιστά απαγορευτική τη χρήση της υπηρεσίας ακόμη και για πλοήγηση σε websites λίγα λεπτά καθημερινά [1].

1.1.2 Σύντομη ιστορία της κινητής επικοινωνίας

Η ανάπτυξη της έννοιας της κυψέλης (cellular concept) από την Bell Laboratories τις δεκαετίες του 1960 και 1970 [13, 14], έφερε την επανάσταση στις προσωπικές επικοινωνίες. Ο αριθμός των χρηστών στις κυψέλες παγκοσμίως αυξήθηκε από 25000 το 1984 σε περίπου 25 εκατομμύρια το 1993. Από τότε ο αριθμός των συνδρομητών σε δίκτυα με κυψέλες έχει αυξηθεί σε περισσότερο από 50% ανά χρόνο [12]. Η πρώτη γενιά (1G) κινητής τηλεφωνίας ήταν μόνο ικανή για μετάδοση αναλογικών φωνητικών πληροφοριών. Τα πιο περίφημα συστήματα πρώτης γενιάς είναι το προηγμένο σύστημα κινητού τηλεφώνου (Advanced Mobile Phone System – AMPS), η Σκανδιναβική κινητή τηλεφωνία (Nordic mobile telephone – NMT) και το σύστημα επικοινωνίας πλήρους πρόσβασης (Total Access Communication System – TACS). Η ανάπτυξη των δεύτερης γενιάς δικτύων (2G) έγινε εξαιτίας της ανάγκης για βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης, της κάλυψης και της χωρητικότητας του συστήματος. Επιτεύγματα στην τεχνολογία επέτρεψαν στη δεύτερη γενιά τη χρήση ψηφιακής μετάδοσης. Η πιο περίφημη τεχνολογία δεύτερης γενιάς είναι το παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών (Global System for Mobile communications – GSM) [12], το οποίο χρησιμοποιεί τις τεχνικές time division multiple access (TDMA) και frequency division duplexing (FDD). Τα δεύτερης γενιάς πρότυπα, είχαν σχεδιαστεί αρχικά πριν από την ευρεία χρήση του διαδικτύου και συνεπώς χρησιμοποιούσαν modem με κύκλωμα μεταγωγής πακέτων, το οποίο περιορίζει την ταχύτητα του download και αυξάνει το κόστος, επειδή μία συνεδρία χρεώνεται συνήθως για την ώρα που η σύνδεση είναι ενεργή και όχι για την ποσότητα των δεδομένων που λήφθηκαν.

Εξαιτίας της αυξημένης ζήτησης για υπηρεσίες δεδομένων, υπηρεσίες με επίκεντρο τα δεδομένα αναπτύχθηκαν που μπορούσαν να υλοποιηθούν πάνω στις

υπάρχουσες τεχνολογίες δεύτερης γενιάς [12]. Στην περίπτωση των συστημάτων TDMA αυτές οι υπηρεσίες περιελάμβαναν, τη γενική ραδιοϋπηρεσία πακέτου (General Packet Radio Service – GPRS) και τον ενισχυμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για την εξέλιξη του GSM (Enhanced Data rate for GSM Evolution – EDGE). Αυτή η “βελτιωμένη” τεχνολογία δεύτερης γενιάς συχνά αναφέρεται ως 2.5G.

Καθώς το διαδίκτυο γινόταν ολοένα και πιο δημοφιλές, τόσο αυξανόταν και η ζήτηση για υψηλότερου ρυθμού υπηρεσίες internet. Έτσι, ξεκίνησε η ανάπτυξη των τρίτης γενιάς (3G) ασύρματων δικτύων. Το παγκόσμιο σύστημα κινητής τηλεπικοινωνίας (Universal Mobile Telecommunication System – UMTS) και η διαίρεση κώδικα πολλαπλής πρόσβασης 2000 (Code Division Multiple Access 2000– CDMA2000), είναι οι δύο κύριες τεχνολογίες της τρίτης γενιάς και παρέχουν στους χρήστες ταχύτητα κατερχόμενης ζεύξης (downlink – DL) μέχρι και 384 Kb/s ή 144 Kb/s αντίστοιχα. Η evolution-data optimized (1xEVDO) όπως και η high-speed downlink packet access (HSDPA), αποτελούν βελτιώσεις των CDMA2000 και UMTS. Αυτές οι τεχνολογίες επέτρεψαν στους χρήστες να επιτύχουν ταχύτητες μέχρι και 4.9 Mbps, χρησιμοποιώντας ένα 1.25 MHz κανάλι και 14 Mbps, χρησιμοποιώντας ένα 5 MHz κανάλι αντίστοιχα [15].

Η τέταρτη γενιά (4G) είναι η επόμενη γενιά των ασύρματων επικοινωνιών και αναμένεται να αντικαταστήσει την τρίτη γενιά δικτύων κάποια στιγμή στο μέλλον. Η τέταρτη γενιά προορίζεται για την παροχή υψηλής ταχύτητας, υψηλής χωρητικότητας και χαμηλό κόστος ανά bit, για υπηρεσίες βασισμένες στην IP. Ο στόχος της τέταρτης γενιάς είναι να αντικαταστήσει τα σημερινά κυψελωτά δίκτυα, με ένα παγκόσμιο πρότυπο κυψελωτού δικτύου βασισμένο στην IP για υπηρεσίες δεδομένων, video καθώς και φωνής [16].

1.1.3 Νόμοι - Χαρακτηριστικά Ασύρματων Τεχνολογιών

Σε αυτό το τμήμα γίνεται λόγος για τις ασύρματες τεχνολογίες, τα χαρακτηριστικά τους και τους νόμους που τις διέπουν.

Γενικά, οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες διέπονται από τέσσερις νόμους [2].

- Ο νόμος του Shannon

Ο νόμος του Shannon περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$C = W \times \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0W} \right),$$

όπου C είναι η χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος σε bits/second, P είναι η ισχύς του σήματος σε Watt, W είναι το εύρος ζώνης του σήματος σε Hertz και N_0 είναι η μονόπλευρη πυκνότητα φάσματος θορύβου. Ο παραπάνω νόμος, λέει ότι αν υπάρχει ένας πομπός και ένας δέκτης, η χωρητικότητα ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος εξαρτάται γραμμικά από το διαθέσιμο εύρος ζώνης και λογαριθμικά από το σηματοθορυβικό λόγο (signal-to-noise ratio, SNR).

- Ο νόμος του Moore

Ο παραπάνω νόμος υπογραμμίζει πως η επίδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες.

- Ο 3^{ος} νόμος δηλώνει πως η αξία ενός δικτύου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας της σύνδεσης.
- Ο 4^{ος} νόμος αναφέρει ότι η αξία ενός δικτύου είναι ανάλογη του τετραγώνου του αριθμού των συσκευών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε αυτό.

Με βάση τους παραπάνω νόμους λειτουργούν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και προσπαθούν να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες των συνδρομητών και της βιομηχανίας.

Ποιες είναι αυτές οι ανάγκες όμως;

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, είναι τα εξής:

- Ικανότητα να μεταφέρουν φωνή, ήχο και βίντεο, όπως επίσης και δεδομένα.
- Δυνατότητα λειτουργίας συσκευών με διαφορετική τιμή, κατανάλωση ισχύος και ρυθμό δεδομένων.
- Διάθεση φάσματος ικανοποιητικά και δυναμικά στις διάφορες συσκευές δικτύου.

Ιστορικά, όπως και στα ενσύρματα μέσα, η ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας προχωρούσε σε 2 μονοπάτια, τα δίκτυα φωνής και τα δίκτυα δεδομένων. Τα δίκτυα προσανατολισμένα στη μετάδοση φωνής αναπτύχθηκαν πρώτα και ο λόγος ήταν καθαρά εμπορικός, καθώς η αγορά για προϊόντα προσανατολισμένα σε φωνή και τέτοιες υπηρεσίες αναπτύχθηκαν πιο γρήγορα.

Παρ' όλ' αυτά, σήμερα υπάρχουν δύο σημαντικές μακροχρόνιες τάσεις της αγοράς. Πρώτον, η αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες δεδομένων μεγαλώνει αντιληπτά πιο γρήγορα από την αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες φωνής. Δεύτερον, και οι 2 προαναφερθείσες αγορές αναπτύσσονται και εξελίσσονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα προσανατολισμένα σε φωνή να έχουν αυξημένες δυνατότητες δεδομένων και τα μοντέρνα δίκτυα για δεδομένα να μπορούν άνετα να μεταφέρουν φωνή. Λογικό επακόλουθο είναι οι εταιρείες που αναλαμβάνουν την έρευνα και την ανάπτυξη των εν λόγω δικτύων να βρίσκονται σε συνεχώς αυξανόμενο ανταγωνισμό, τους καρπούς του οποίου απολαμβάνει ο τελικός χρήστης.

Όλα τα παραπάνω μας καταδεικνύουν το συμπέρασμα ότι η ιδανική ασύρματη τεχνολογία θα πρέπει να μεταφέρει φωνή, ήχο, (κινούμενη) εικόνα, καθώς και δεδομένα με την ίδια επιτυχία και ποιότητα. Το λεγόμενο, λοιπόν, triple play είναι το ζητούμενο στις μέρες μας και κάθε εταιρεία που αναπτύσσει ασύρματες τεχνολογίες προσέχει καταρχάς, τα προϊόντα της να ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη.

Κάτι τέτοιο, βέβαια, δεν είναι κάτι το εύκολο, για τους παρακάτω λόγους. Η φωνή, ο ήχος και το βίντεο έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τα δεδομένα. Για τα δεδομένα, λοιπόν, η πιο σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός μετάδοσης (throughput), ενώ η καθυστέρηση δεν είναι και τόσο σημαντική. Για τη φωνή και το βίντεο, απαιτείται κάποιος ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης, αλλά η καθυστέρηση του σήματος είναι επίσης σημαντική. Σε αυτόν τον τομέα γίνεται η μεγαλύτερη προσπάθεια και αξίζει να σημειωθεί πως όλα τα ασύρματα standards από την ομάδα του IEEE 802 κινούνται προς αυτήν την κατεύθυνση.

Η δυνατότητα του ασύρματου δικτύου να υποστηρίζει πολλές διαφορετικές καταναλώσεις ισχύος και ρυθμούς μετάδοσης, όπως και η δυναμική εκχώρηση φάσματος είναι οι απαιτήσεις που προβληματίζουν παγκόσμια τις εταιρείες, όπως και την IEEE. Επειδή είναι δύσκολο να βγούνε πολλές εταιρικές συσκευές εκτός παιχνιδιού και καθώς ένα πρότυπο (802.11™ ή 802.16™) είναι πιθανό να μη λύνει όλα τα προβλήματα του λόγου για τον οποίον δημιουργήθηκαν, το κάθε πρότυπο υποστηρίζει διαφορετικές συχνότητες, διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και όλες σχεδόν τις συσκευές που ικανοποιούν τις minimum απαιτήσεις του προτύπου. Έτσι γίνεται η διαπίστωση, στο πρότυπο, παραδείγματος χάριν, 802.11™, το 802.11b™ να υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων 1, 2, 5.5 και 11 Mb/s, το 802.11a™ 6 έως 54 Mb/s και συσκευές με ρυθμούς 6 Mb/s να κοστίζουν το ίδιο με συσκευές των 54 Mb/s.

Η ικανότητα του δικτύου να εκχωρεί δυναμικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι απαραίτητη, καθώς το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι περιορισμένο και μοιράζεται και σε άλλες ασύρματες συσκευές. Όσο αυξανόταν ο αριθμός των διαφορετικών τεχνολογιών, τόσο η ευελιξία εκχώρησης φάσματος γινόταν σημαντικότερος παράγοντας σε ένα ασύρματο δίκτυο. Τα τελευταία, βέβαια, πρότυπα έχουν χαρακτηριστικά για τον έλεγχο

κάθε συχνότητας και κατά το πόσο αυτή ανήκει στο δεδομένο φάσμα ή ελέγχεται από άλλη συσκευή.

Από τα παραπάνω, γίνεται ξεκάθαρο ότι οι υπάρχουσες τεχνολογίες, έχουν έλλειψη από πολλά χαρακτηριστικά του ιδανικού μοντέλου ασύρματης τεχνολογίας. Καθώς γίνεται η σύμβαση ότι μια τέτοια ιδανική τεχνολογία δεν υπάρχει, το αποτέλεσμα είναι 3 κύριες διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες.

- Τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής (Wireless Local Area Networks – WLAN).
- Τα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (Wireless Personal Area Networks – WPAN).
- Τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (Wireless Metropolitan Area Networks – WMAN), επίσης γνωστά και ως δίκτυα ευρείας ζώνης ασύρματης πρόσβασης (broadband wireless access networks).

Πριν αναφερθούν τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, θα γίνει μια αναφορά στην IEEE και πιο συγκεκριμένα μια σύντομη αναδρομή στα πρότυπα του Working Group 802 της IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

1.2 IEEE Working Group Standardization Bodies

Η ανάπτυξη των μεγάλων αγορών για τις ασύρματες υπηρεσίες δεν εξαρτάται μόνο στη διαθεσιμότητα του επαρκούς φάσματος στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, αλλά επίσης και στη διαθεσιμότητα των προτύπων (standards) που υπάρχουν. Ο κύριος λόγος γιατί οι μεγάλες αγορές δεν είναι εφικτές χωρίς τα πρότυπα, είναι επειδή οι μεγάλοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών θέλουν να έχουν την επιλογή της αγοράς εξοπλισμού από πολλαπλούς προμηθευτές και όχι από μία μόνο εταιρεία.

Με την απουσία των προτύπων, οι μεγάλοι πάροχοι υπηρεσιών απλά απέχουν από τη χρήση της υπάρχουσας τεχνολογίας. Η ύπαρξη των προτύπων επίσης, βοηθάει τις μικρές επιχειρήσεις της τεχνολογίας να εισέλθουν στις μεγάλες αγορές, μειώνοντας τα ρίσκα που συνδέονται με την προμήθεια προϊόντων όπως τα chipsets ημιαγωγών, λογισμικό, firmware κτλ.

Τα πρότυπα φαίνονται σαν εθελοντικές συμφωνίες μεταξύ εταιρειών ημιαγωγών και τεχνολογίας, κατασκευαστών εξοπλισμού και παρόχων υπηρεσιών. Μέχρι και αρκετά χρόνια πριν, δεν υπήρχε κανένα πρότυπο για ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων. Η ολική αγορά ήταν μικρή, κατακερματισμένη και κυριαρχούμενη από αρκετές ιδιοκτησιακές τεχνολογίες. Η δραματική αύξηση της αγοράς είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ύπαρξης

αρκετών προτύπων, όπως τα IEEE 802.11a™, 802.11b™ και 802.11g™. Τα πρότυπα επιτρέπουν εξοπλισμό από διαφορετικές εταιρείες να συνεργάζονται σε ένα δίκτυο. Τα πρότυπα δημιουργούν μαζικές αγορές για εξοπλισμό, ο οποίος δημιουργεί οικονομία κλιμάκωσης για τους κατασκευαστές. Η οικονομική συνέπεια των προτύπων είναι ακόμα πιο σημαντική από την απελευθέρωση της αγοράς. Η αγορά για προϊόντα τυποποιημένα κατά ένα πρότυπο χαρακτηρίζεται από σημαντικό ανταγωνισμό, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές. Για να υπερκεράσουν αυτήν την τάση, πολλές εταιρείες ψάχνουν για τρόπους ώστε να διαφοροποιηθούν μέσα στην αγορά, αλλά παράλληλα να προσφέρουν τα τυποποιημένα κατά το πρότυπο προϊόντα. Γενικά, τα πρότυπα δίχως άλλο, προωθούν τη δημιουργικότητα, την καινοτομία και την επιχειρηματικότητα.

Επειδή τα πρότυπα ευνοούν τις μαζικές αγορές, η πνευματική ιδιοκτησία που απαιτείται για τη δημιουργία ενός προτύπου αξιολογείται πολύ ψηλά. Άλλωστε, αρκετές από τις πιο υψηλές πατέντες πνευματικής ιδιοκτησίας στον κόσμο είναι αυτές που καλύπτουν ένα τέτοιο πρότυπο ή μέρος του. Έτσι, η πολιτική πνευματικής ιδιοκτησίας κατά τη δημιουργία ενός προτύπου είναι πολύ σημαντική.

Οι ανοιχτοί οργανισμοί, όπως οι οργανισμοί που αναπτύσσουν πρότυπα, σχηματίζονται για να αναπτύσσουν τα πρότυπα, έτσι ώστε να μην ευνοούν καμία εταιρεία, αλλά έχουν ως σκοπό να ωφελήσουν το κοινό καλό. Η IEEE είναι ένα ανοιχτό σώμα ανάπτυξης προτύπων. Πριν ένα IEEE πρότυπο υιοθετηθεί, ζητείται από εταιρείες που είναι γνωστό ότι διαθέτουν απαραίτητες πατέντες γι' αυτό, μια επιβεβαίωση ότι η εν λόγω εταιρεία είτε δε θα ενδυναμώσει κάποια από τις τωρινές είτε τις μελλοντικές πατέντες της (ή μέρος τους) εμποδίζοντας κάποια άλλη εταιρεία, είτε ότι θα διαθέσει άδειες με αποζημίωση ή σε λογικές τιμές σε διάφανη βάση. Δεν υπάρχει εγγύηση από την IEEE ότι ένα πρότυπο δεν παραβιάζει την πνευματική ιδιοκτησία τρίτων, ακόμη και αν οι τρίτοι αυτοί δε θέλουν να μοιραστούν τα πνευματικά δικαιώματα.

Ειδικότερα στην IEEE, τα πρότυπα για τις επικοινωνίες δεδομένων αναπτύσσονται από την κοινότητα IEEE 802, που αποκαλείται επίσης και Επιτροπή Προτύπων Τοπικών και Μητροπολιτικών Δικτύων (Local and Metropolitan Area Networks Standards Committee – LMSC) και χορηγείται από την IEEE Computer Society. Η IEEE 802, έχει την ευθύνη της ανάπτυξης και συντήρησης παγκοσμίων προτύπων και προτεινόμενων πρακτικών για επικοινωνίες υπολογιστών. Μερικά από τα επιτυχημένα πρότυπα της IEEE 802 είναι:

- IEEE 802.3™ ή Ethernet standard
- IEEE 802.5™ ή Token Ring standard
- IEEE 802.11™ ή Wi-Fi standard.

Όλα τα παραπάνω έχουν υιοθετηθεί από την ISO/IEC (International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission) Joint Technical Committee 1 (JTC1) ως διεθνή πρότυπα. Αν και η IEEE έχει την έδρα της στις Η.Π.Α., υπάρχει τεράστια παγκόσμια αναγνώριση και στήριξη, ειδικά στις διάφορες συνεδριάσεις που οργανώνει. Πολλά πρότυπα που εισάγονται από την IEEE αναγνωρίζονται ως παγκόσμια πρότυπα. Η κοινότητα IEEE 802 αποτελείται από πολλές ομάδες εργασίας, που οργανώνονται γύρω από σημαντικές εφαρμογές. Τα πρότυπα της IEEE 802 σχετίζονται με το φυσικό στρώμα και το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, όπως αυτά ορίζονται στο ISO open systems interconnections (OSI) μοντέλο αναφοράς. Τα πρότυπα της IEEE 802 χωρίζουν το στρώμα σύνδεσης δεδομένων σε 2 υποστρώματα, το logical link control (LLC) και το medium access control (MAC). Το LLC εισήχθη στο 802.2™ και είναι κοινό για όλα τα 802 MACs.

Στη δεκαετία του '90 δραστηριοποιήθηκε η ομάδα εργασίας του 802.11™ με εντυπωσιακά αποτελέσματα, καθώς ήταν το πρώτο πρότυπο με τόσο μεγάλη απήχηση στον κόσμο και φυσικά στην αγορά της ασύρματης τεχνολογίας. Η τεχνολογία, όμως, δε μένει στάσιμη και εφόσον το εμπορικό ενδιαφέρον ήταν μεγαλύτερο από ποτέ άλλοτε σχετικά με τις ασύρματες τεχνολογίες, το 1999 δύο ακόμα ομάδες εργασίες δημιουργήθηκαν. Η IEEE 802.15™, που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα και η IEEE 802.16™, που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα και στη λεγόμενη ασύρματη κάλυψη ευρείας ζώνης. Η συμμετοχή στις ομάδες αυτές είναι ανοιχτή σε όποιον θέλει να συμμετάσχει με οποιονδήποτε ωφέλιμο τρόπο. Δεν επιτρέπεται σε εταιρείες να συμμετέχουν. Μόνο μεμονωμένα πρόσωπα δύνανται να ψηφίσουν και να αποφασίσουν. Οι τελευταίοι προέρχονται συνήθως από τις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Αυστραλία. Τα πρότυπα που προκύπτουν από τη μελέτη της ομάδας εργασίας, πρώτα γίνονται πρότυπα της IEEE και έπειτα προτείνονται στην επιτροπή της ISO/IEC για αναγνώριση ως παγκόσμιου προτύπου. Η εμπορική επιτυχία των 802.11™ και 802.15™, όπως και οι εργασίες για το 802.16 έχουν αναδείξει την IEEE το πλέον αναγνωρίσιμο σώμα δημιουργίας ασύρματων προτύπων.

Το ότι ένα παγκόσμιο πρότυπο υπάρχει, δε σημαίνει απαραίτητα και ότι θα επιτύχει στην αγορά της τεχνολογίας. Η επιτυχία αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα της τεχνολογίας, αλλά επίσης και από εταιρικούς και πολιτικούς λόγους. Έτσι, πρέπει να υπάρχει μια συγκεκριμένη συμπόρευση μεταξύ των ενδιαφερομένων εταιρειών και των αντίστοιχων πολιτικών θεμάτων ώστε να υπάρξει ευτυχής έκβαση. Στη βιομηχανία, η συμπόρευση αυτή είναι ευκολότερο να επιτευχθεί. Για να γίνει λοιπόν πραγματικότητα η επιτυχία του προτύπου, οι εταιρείες δημιουργούν άλλες μορφές βιομηχανικών, αυτή τη φορά, οργανισμών για τα πρότυπα. Τέτοιοι οργανισμοί

συνδεδεμένοι με τα πρότυπα 802.11™ και 802.16™, που είναι οι Wi-Fi και WiMAX. Το εγχείρημα των οργανισμών αυτών, περιλαμβάνει δοκιμές για να διαπιστωθεί η διαλειτουργικότητα (interoperability) ανάμεσα στα προϊόντα από διαφορετικές εταιρείες και την προώθηση των προϊόντων, που είναι τυποποιημένα κατά το συγκεκριμένο πρότυπο στην αγορά. Πιο συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε το 802.16™ Working Group της IEEE. Η ομάδα εργασίας 802.16™ της IEEE, είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη προτύπων και την πρόταση πρακτικών πάνω στα δίκτυα ευρείας ζώνης ασύρματης πρόσβασης. Η ομάδα αυτή δημιουργήθηκε το Μάρτιο του 1999 και έχει αναπτύξει αρκετές εργασίες:

- a) Air Interface (συμπεριλαμβανομένου MAC και PHY (Physical layer)) για λειτουργία μεταξύ 10 και 66 GHz.
- b) IEEE 802.16™, μία τροποποίηση που προσδιορίζει επιπλέον φυσικά επίπεδα και κατάλληλες MAC μετατροπές για λειτουργία μεταξύ 2 και 11 GHz, συμπεριλαμβανομένου ζώνες με άδεια ή χωρίς.
- c) IEEE Std 802.16.2™ και 802.16.2a™, τα οποία παρέχουν μία προτεινόμενη πρακτική για συνύπαρξη.
- d) IEEE 802.16e™, αναπτύσσεται για να υποστηρίξει κινητούς συνδρομητές. Ακόμη, το IEEE 802.16™ έχει αναπτύξει τεκμηρίωση διαλειτουργικότητας, που κανονικά γίνεται έξω από τα IEEE 802 πρότυπα.

Πιο συγκροτημένα, τα projects της IEEE απεικονίζονται στον Πίνακα 1-1:

Number	Description
802.16	Fixed Broadband wireless systems between 10 and 66 GHz
802.16a	Amendment for operation between 2 and 11 GHz
802.16c	Enhancement including system profiles between 10 and 66 GHz
802.16.2	Coexistence between 10 and 66 GHz
802.16/Conf01 802.16/Conf02 802.16/Conf03	Test and conformance specifications
802.16d	System profiles
802.16e	Enhancement to support mobility

Πίνακας 1-1: Οικογένεια προτύπων 802.16 της IEEE

1.3 Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης

Τα τελευταία χρόνια, η περιοχή των επικοινωνιών ευρείας ζώνης υπέστη πολύ μεγάλη ανάπτυξη. Ο όρος “ευρείας ζώνης”, χρησιμοποιείται συνήθως για να καταδείξει τη δυνατότητα μεταφοράς σημαντικού εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη, πολύ υψηλότερη από

τα στενής ζώνης modem φωνής. Ακολουθώντας την ορολογία της ITU (International Telecommunication Union), ο όρος “ευρεία ζώνη” σημαίνει ρυθμοί μετάδοσης μεγαλύτεροι από 1.5 Mb/s. Η πρόσβαση στο internet ευρείας ζώνης έγινε μια βιομηχανία μαζικής αγοράς, φτάνοντας περισσότερα από 100 εκατομμύρια σπίτια και 3 εκατομμύρια επιχειρήσεις στις ΗΠΑ. Η πρόσβαση ευρείας ζώνης, φτάνει ένα ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό σε κάποιες άλλες εκβιομηχανοποιημένες χώρες, όπως η Κορέα και ο Καναδάς. Για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι γνωστό ότι οι κύριες τεχνολογίες για το internet ευρείας ζώνης είναι το DSL (Digital Subscriber Line), η καλωδιακή, η ασύρματη και οι επικοινωνίες οπτικών ινών. Από αυτές τις 4 τεχνολογίες, οι 2 – το DSL και η καλωδιακή τεχνολογία- είναι ώριμες τεχνολογίες και έχουν φτάσει τη μαζική αγορά. Οι οπτικές επικοινωνίες παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά το κόστος της εγκατάστασης είναι εξαιρετικά υψηλό, πόσο μάλλον σε αστικές περιοχές όπου βρίσκονται οι περισσότεροι πελάτες. Λόγω του κόστους, δεν είναι ξεκάθαρο αν οι οπτικές επικοινωνίες θα μπορέσουν ποτέ να γίνουν μια τεχνολογία μαζικής αγοράς. Παρ’ όλ’ αυτά, αναμένεται ότι τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης θα γίνουν μία τεχνολογία η οποία γενικά, είναι ανταγωνιστική στο DSL και την καλωδιακή, συνδέοντας τις οικίες των επιχειρήσεων και των χρηστών με τα κύρια δίκτυα.

Ξεκάθαρα πλέον, αν τα συστήματα πρόσβασης ευρείας ζώνης πρόκειται να ανταγωνιστούν το DSL και την καλωδιακή, η ανάπτυξη της αγοράς τους πρέπει να είναι το λιγότερο σημαντική. Πρώτα, σε βάθος χρόνου τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης, είναι ικανά να μεταφέρουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς από το DSL ή το καλώδιο. Η τεχνολογία του DSL, απαιτεί από τους πελάτες να είναι κοντά στα κεντρικά γραφεία της τηλεφωνικής εταιρείας και μπορεί να μεταφέρει μέχρι 6 Mb/s σε αποστάσεις περί των 5.49 km. Οι πελάτες που βρίσκονται πάνω από 5.49 km μακριά από το κεντρικό γραφείο της τηλεφωνικής εταιρείας δεν μπορούν να έχουν την υπηρεσία DSL. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και με την καλωδιακή τεχνολογία, όπου η αντίστοιχη υπηρεσία ευρείας ζώνης μεταφέρει 1.5 Mb/s, αλλά απαιτεί καλώδιο τηλεόρασης. Αν και οι περισσότερες εταιρείες και οι περισσότεροι κάτοικοι στη Βόρεια Αμερική έχουν πρόσβαση είτε στην τεχνολογία DSL είτε στην καλωδιακή, αρκετοί δεν έχουν. Αυτοί οι χρήστες αποτελούν μια σημαντική υποψήφια αγορά για την πρόσβαση ευρείας ζώνης. Επίσης, συγκρινόμενη με τα δίκτυα DSL και καλωδίου, η χρήση των ασύρματων τεχνικών έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων για τους χρήστες και τους παρόχους των υπηρεσιών. Για τους παρόχους υπηρεσιών, αυτά τα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνουν σχετικά χαμηλό κόστος εξοπλισμό. Για τους χρήστες, τα οφέλη περιλαμβάνουν την ευκολία μιας ασύρματης σύνδεσης.

Ποια είναι όμως η αρχιτεκτονική των δικτύων ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης; Σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης τυπικά περιλαμβάνουν

τουλάχιστον ένα σταθμό βάσης (Base Station, BS) και έναν αριθμό σταθμών υπηρεσίας (subscriber stations, SS). Επίσης, πιθανόν να υπάρχουν ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης, επαναλήπτες και πιθανόν άλλος εξοπλισμός. Οι σταθμοί βάσης παρέχουν συνδέσεις στα κύρια δίκτυα (core networks) από τη μία πλευρά και ραδιοσύνδεση με τους σταθμούς υπηρεσίας από την άλλη.

Τα σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης έχουν αρχιτεκτονικές πολλαπλών σημείων (multipoint architectures). Ο όρος multipoint περιλαμβάνει point-to-multipoint (PMP) και multipoint-to-multipoint (MP-MP). Τα συστήματα PMP περιλαμβάνουν σταθμούς βάσης, σταθμούς υπηρεσίας και σε μερικές περιπτώσεις, επαναλήπτες. Στο uplink, δηλαδή κατά την αποστολή σήματος από το τερματικό στο σταθμό βάσης, ο αποστολέας είναι ο σταθμός υπηρεσίας και ο παραλήπτης είναι ο σταθμός βάσης. Στο downlink, αντίστοιχα, ο αποστολέας είναι ο σταθμός βάσης και ο παραλήπτης ο σταθμός υπηρεσίας. Σημειώνεται ότι μια διαφορά σε σύγκριση με τα WLAN και τα WPAN, είναι ότι χρησιμοποιούνται κεραιές με ποικιλία διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν κεραιές σχετικά μεγάλης δέσμης, χωρισμένη σε έναν ή περισσότερους τομείς, παρέχοντας κάλυψη 360° με μία ή περισσότερες κεραιές. Η κεραία (μία από όλες) του σταθμού βάσης είναι ικανή να χειρίζεται πολλαπλούς ανεξάρτητους τομείς ταυτόχρονα. Σε ένα κανάλι δεδομένης συχνότητας και δοσμένου τομέα κεραίας, όλοι οι σταθμοί λαμβάνουν την ίδια εκπομπή. Για να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη μιας περιοχής, μπορεί να χρειαστούν περισσότεροι του ενός σταθμοί βάσης. Η σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης δεν είναι μέρος του σταθερού συστήματος ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης. Η σύνδεση επιτυγχάνεται από τη χρήση των ραδιοζεύξεων, καλωδίων οπτικών ινών ή αντίστοιχων μέσων. Οι ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης μπορεί μερικές φορές να χρησιμοποιούν κομμάτι από την ίδια ανάθεση συχνότητας, όπως τα σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης.

Η δρομολόγηση στον κατάλληλο σταθμό βάσης είναι μια συνάρτηση του κύριου δικτύου. Γενικά, οι σταθμοί υπηρεσίας χρησιμοποιούν πολύ κατευθυντικές κεραιές προς το σταθμό βάσης. Οι σταθμοί υπηρεσίας μοιράζονται τη χρήση του ραδιοκαναλιού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλες μεθόδους πρόσβασης, όπως διαμοιρασμός συχνότητας, διαμοιρασμός χρόνου ή διαμοιρασμός κώδικα. Μερικά συστήματα χρειάζονται και επαναλήπτες. Σε ένα PMP σύστημα, οι επαναλήπτες γενικά χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την κάλυψη σε τοποθεσίες όπου οι σταθμοί βάσης, δεν έχουν οπτική επαφή στις περιοχές τοπικής κάλυψης, ή, εναλλακτικά για να επεκτείνουν την κάλυψη ενός συγκεκριμένου σταθμού βάσης πέρα από τη συνηθισμένη ακτίνα εκπομπής του. Ο επαναλήπτης μεταφέρει την πληροφορία από ένα σταθμό βάσης σε έναν ή πολλούς σταθμούς υπηρεσίας. Μπορεί να λειτουργεί στις ίδιες συχνότητες downlink, όπως αυτές

που χρησιμοποιεί, κοιτώντας το σταθμό βάσης, ή μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες (π.χ. αποδιαμόρφωση και διαμόρφωση της κυκλοφορίας στα διαφορετικά κανάλια). MP- MP ή mesh συστήματα έχουν την ίδια λειτουργικότητα, όπως τα PMP συστήματα. Στα MP-MP συστήματα, η κυκλοφορία μπορεί να περάσει μέσω ενός ή πολλών επαναληπτών ώστε να φτάσει στο σταθμό υπηρεσίας. Οι περισσότεροι σταθμοί είναι επαναλήπτες που επίσης παρέχουν συνδέσεις για τοπικούς πελάτες. Οι κεραιές είναι συνήθως κατευθυντικές, τύπου στενής δέσμης για απομακρυσμένη χρήση.

Αυτά τα δίκτυα λειτουργούν με διαφάνεια, έτσι οι χρήστες δε γνωρίζουν ότι οι υπηρεσίες παρέχονται από ράδιο. Ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης, παρέχει σύνδεση σε πολλές κατοικίες χρηστών μέσα σε μια ραδιοκαλυπτόμενη περιοχή. Παρέχει μία ποσότητα εύρους ζώνης, η οποία μοιράζεται αυτόματα σε όλους τους χρήστες. Η ζήτηση από διαφορετικούς χρήστες είναι συχνά στατιστικά μικρής συσχέτισης, επιτρέποντας το δίκτυο να μεταφέρει σημαντικό εύρος ζώνης με βάση τη ζήτηση (bandwidth-on-demand) σε πολλούς χρήστες με ένα υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας φάσματος. Γίνεται επίσης σημαντική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Υπάρχει μεγάλο εύρος εφαρμογών και εξελίσσεται με μεγάλους ρυθμούς. Περιλαμβάνει φωνή, δεδομένα και υπηρεσίας ψυχαγωγίας κάθε είδους. Ακόμη, ο κάθε πελάτης μπορεί να απαιτεί μια διαφορετική ποικιλία από υπηρεσίες. Αυτή η ποικιλία πιθανόν να αλλάζει γρήγορα καθώς οι συνδέσεις εγκαθίστανται ή τερματίζονται. Η ροή της κυκλοφορίας μπορεί να είναι μονοκατευθυντική, ασύμμετρη ή συμμετρική, αλλάζοντας ξανά με τον καιρό. Με μερικές περιοχές, τα συστήματα που μεταφέρουν αυτές τις υπηρεσίες αναφέρονται ως Ασύρματα Συστήματα Πολυμέσων (Multimedia Wireless Systems, MWS), ώστε να αναδεικνύουν τη σύγκλιση μεταξύ των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και των υπηρεσιών ψυχαγωγίας.

Σε ανταπόκριση αυτών των αναγκών της αγοράς, η ομάδα εργασίας 802.16™ της IEEE ιδρύθηκε το 1999. Το ενδιαφέρον της βιομηχανίας ήταν σημαντικό και το πρώτο πρότυπο (IEEE Std 802.16-2001) εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2001 και δημοσιεύθηκε τον Απρίλη του 2002.

1.3.1 Ασύρματα τοπικά δίκτυα

Στην ενότητα 1.1, δόθηκε μία σύντομη επισκόπηση των κυψελωτών ασύρματων επικοινωνιών. Φάνηκε πως όταν αρχικά σχεδιάστηκε η κυψελωτή τεχνολογία, η ανάγκη για υπηρεσίες δεδομένων δεν ήταν προτεραιότητα επειδή το Internet ήταν ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Εξετάζοντας ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network – WLAN), οι στόχοι του σχεδιασμού του ήταν εντελώς διαφορετικοί από αυτούς των κινητών επικοινωνιών. Το 1987, η IEEE 802.11 Wireless LAN ομάδα εργασίας ιδρύθηκε για να ξεκινήσει την τυποποίηση διασποράς φάσματος των WLANs για χρήση σε ζώνες χωρίς

άδεια. Τα WLANs επικεντρώνονται σε υψηλής ρυθμαπόδοσης δεδομένα. Το IEEE 802.11 τυποποιήθηκε το 1997 και προσέφερε ρυθμό δεδομένων μέχρι και 2 Mbps [1]. Από όταν έγινε η αρχική έκδοση του προτύπου 802.11, πολλά συμπληρωματικά πρότυπα προστέθηκαν όπως τα 802.11a και 802.11b. Το πρότυπο 802.11a, έχει ονομαστεί Wi-Fi από το Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA) και παρέχει ταχύτητες έως και 54 Mbps στη ζώνη των 5 GHz [6].

Παρότι τα WLANs είναι ικανά να παρέχουν συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας σε ένα περιβάλλον γραφείου, όπου η απόσταση μεταξύ του χρήστη και του σημείου πρόσβασης (Access Point – AP) είναι της τάξης μερικών δεκάδων μέτρων, υπάρχει ακόμη η ανάγκη για χρήστες να συνδέονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Για αυτό το λόγο η IEEE 802.16 MAN (Metropolitan Area Network - MAN) (κοινώς γνωστό ως WiMAX) ομάδα εργασίας στόχευσε στην ανάπτυξη μιας τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης, που μπορεί να υποστηρίξει υψηλής ρυθμαπόδοσης ευρυζωνικές συνδέσεις σε μακρινές αποστάσεις για φορητούς και κινητούς χρήστες.

1.4 Πρότυπο IEEE 802.16™

1.4.1 Γενικά

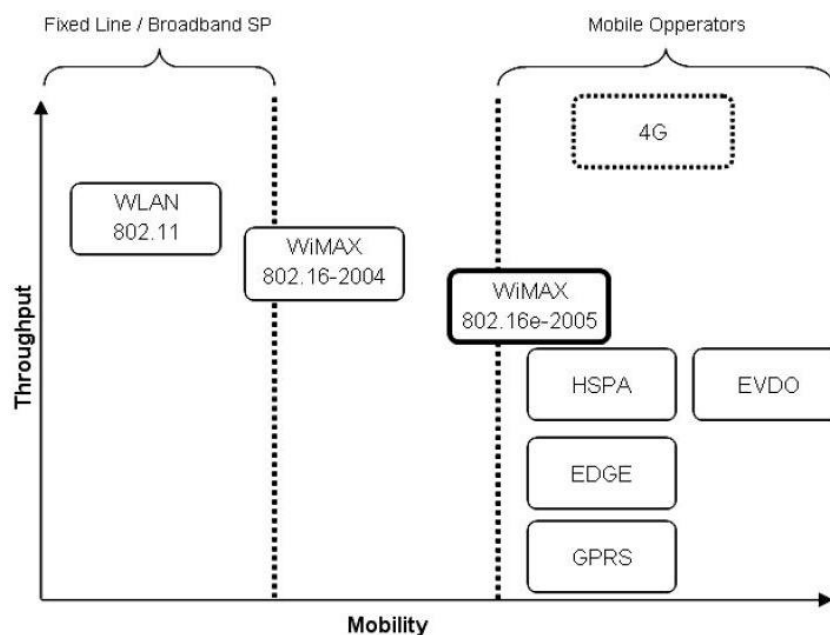
Το 2003 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο 802.16™ γνωστό και σαν WiMAX, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση (με σταθερούς ρυθμούς) ευρείας ζώνης. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα τοπικά δίκτυα, έτσι και το 802.16™ καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις [3].

Το πρότυπο WiMAX αναπτύχθηκε από το WiMAX forum [17]. Είναι βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.16 MAN και αποτελείται από τρία κύρια προφίλ φυσικού στρώματος, το WirelessMAN-SC, το WirelessMAN-OFDM και το WirelessMAN-OFDMA. Αυτά τα προφίλ γενικά συνδέονται με τα πρότυπα 802.16, 802.16-2004 και 802.16e-2005 αντίστοιχα. Ο Πίνακας 1-2 δίνει μερικές από τις προδιαγραφές για τα τρία προφίλ [8]. Το πρότυπο 802.16 χρησιμοποιείται κυρίως για οπισθόζευξη μικροκυμάτων (microwave backhaul) και απαιτεί οπτική επαφή (Line Of Sight – LOS), ενώ το 802.16-2004 και 802.16e-2005 (συχνά αναφέρεται ως mobile WiMAX) δεν απαιτούν οπτική επαφή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ευρυζωνική πρόσβαση. Η βασική διαφορά μεταξύ του προτύπου 802.16-2004 και του προτύπου 802.16e-2005 είναι η ικανότητα της κινητικότητας (mobility) και της μεταβίβασης (handover). Το πρότυπο 802.16-2004 δεν υποστηρίζει handovers και αναφέρεται γενικά ως σταθερή ευρυζωνική εφαρμογή που υποστηρίζει πολύ μικρή κινητικότητα. Από την άλλη, το 802.16e-2005 υποστηρίζει handover κάνοντάς το ένα πλήρως κινητό πρότυπο.

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Spectrum (GHz)	10-66	<11	<6
Line of sight required?	Ναι	Όχι	Όχι
Throughput (Mbps)	32-134	≤ 75	≤ 15
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Bandwidth (MHz)	20, 25, 28	Scalable [1.25,20]	Scalable [1.25,20]
Handover capability	Όχι	Όχι	Ναι
Mobility	fixed	nomadic	fully mobile

Πίνακας 1-2: Παράμετροι WiMAX

Λαμβάνοντας υπόψη την κυψελωτή και τη WLAN τεχνολογία, υπάρχει ένα κενό μεταξύ της κινητικότητας που προσφέρεται από την κυψελωτή τεχνολογία και την πιθανή ρυθμαπόδοση που προσφέρεται από το WLAN. Το Mobile WiMAX μπορεί να είναι δυνητικά η τεχνολογία που θα γεφυρώσει αυτό το χάσμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1. Αν και το Mobile WiMAX δε θεωρείται τέταρτης γενιάς τεχνολογία, η υψηλή φασματική απόδοση και όλα τα IP core είναι σε συμφωνία με τη μεθοδολογία σχεδιασμού που προβλέπεται να χρησιμοποιείται από μελλοντικά 4G συστήμα.



Σχήμα 1-1: Mobility εναντίον Throughput

Η μέθοδος πολυπλεξίας/πρόσβασης που χρησιμοποιείται στο Mobile WiMAX είναι η κλιμακωτή ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access – S-OFDMA) [18], η οποία είναι βασισμένη στην αρχή της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal

Frequency Division Multiplexing - OFDM). Η OFDM είναι μία μορφή μετάδοσης πολλαπλών φερουσών, που διαιρεί μία ενιαία ροή από bit σε μία σειρά από διαστρωμένες ροές bit, οι οποίες έπειτα διαμορφώνονται πάνω σε πολλούς φορείς. Η έννοια της μετάδοσης πολλαπλών φερουσών χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά πριν από 30 χρόνια [19], και έκτοτε παρουσιάζει αμείωτο ενδιαφέρον.

Στη σύγχρονη εποχή, έχει παρατηρηθεί μία παγκόσμια σύγκλιση για τη χρήση της OFDM ως μια αναδυόμενη τεχνολογία που παρέχει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Συγκεκριμένα, τρία WLAN συστήματα σε τρεις περιοχές του κόσμου: στις ΗΠΑ (IEEE 802.11a), στην Ευρώπη (ETSI BRAN HIPERLAN/2) και στην Ιαπωνία (Association of Radio Industries and Business Multimedia Mobile Access Communications - ARIB MMAC), έχουν υιοθετήσει αντίστοιχα το OFDM ως το προτεινόμενο σχέδιο διαμόρφωσης.

Το πρότυπο WiMAX σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάντα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ως και 72 Mbps στον αέρα, ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet υπολογίζεται στα 50 Mbps. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50 Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16™ σε σχέση με το IEEE 802.11™, είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής, φυσικά, με ρυθμούς μετάδοσης πολύ χαμηλότερους των 50 Mbps.

Το WiMAX σχεδιάστηκε κατά βάση ώστε να καλύπτει κυρίως Point-to-Multipoint (PMP) συνδέσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για point-to-point συνδέσεις. Η διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιείται ονομάζεται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Πρόκειται για μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά το φαινόμενο της πολυδιόδευσης (multipath), ειδικότερα στις συχνότητες πάνω των 2 GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί.

Παραλλαγές του προτύπου, που στοχεύουν στους κινητούς χρήστες (802.16e™) και στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) (802.16b™) είναι ήδη σε εξέλιξη. Διάφοροι προμηθευτές chip, συμπεριλαμβανομένης και της Intel, εργάζονται στο 802.16a™ ενσωματωμένο πυρίτιο, και σε χαμηλού κόστους μονάδες συνδρομητών και αναμένεται να είναι ευρέως διαθέσιμα σημεία πρόσβασης (Access Points - AP). Αρκετοί προμηθευτές που έχουν ασχοληθεί με εξοπλισμό για ευρείας ζώνης ασύρματη πρόσβαση, έχουν εκδηλώσει το ενδιαφέρον τους για το WiMAX και έτσι δραστηριοποιούνται στην κατασκευή προϊόντων συμβατών με το εν λόγω πρότυπο.

Λόγω των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει και ταυτόχρονα τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που μπορεί να παρέχει, το πρότυπο WiMAX βρίσκει πολλές εφαρμογές, λύνοντας σημαντικά προβλήματα που απασχολούσαν τους τεχνικούς δικτύων σήμερα. Τρεις είναι οι βασικότερες χρήσεις του:

- **Δίκτυο κορμού στα συστήματα κυψέλης κινητής τηλεφωνίας.** Η εισαγωγή του προτύπου αυτού αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, μιας και αποτελεί μια οικονομικότερη πρόταση, αν συγκριθεί με την οπτική ίνα για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Εξασφαλίζει ταυτόχρονα αξιοπιστία και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

- **Broadband on Demand.** Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, κάτι που με το πρότυπο IEEE 802.11™ σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό.

- **Παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο τα καλυφθούν με χρήση χαλκού ή οπτικής ίνας.** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συμπλήρωμα δικτύων οπτικών ινών σε τμήματα του εδάφους στα οποία το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων οπτικών ινών είναι απαγορευτικό.

Οι **ταχύτητες μετάδοσης** του προτύπου εξαρτώνται από την εκάστοτε ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Συνήθεις διαμορφώσεις είναι η 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) η οποία μπορεί να εξασφαλίσει και τη μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης, η 16 QAM και η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) η οποία μπορεί να εξασφαλίσει μεγάλη κάλυψη του συστήματος.

Το πρότυπο IEEE 802.16™ παρέχει υψηλού επιπέδου **ποιότητα υπηρεσίας**. Το επίπεδο MAC του προτύπου είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει στους χρήστες, όταν οι ίδιοι το επιθυμούν, εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης και ταυτόχρονα κίνηση best effort (καλύτερης δυνατής προσπάθειας) σε χρήστες που καλύπτονται από τον ίδιο σταθμό βάσης, κάτι που το πρότυπο IEEE 802.11™ δεν μπορούσε να εξασφαλίσει. Δηλαδή, αν υποθεθεί ότι δύο χρήστες καλύπτονται από τον ίδιο σταθμό βάσης, είναι δυνατό ο ένας χρήστης να έχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και ο δεύτερος χρήστης να δέχεται και να στέλνει απλή IP κίνηση best effort, κάτι που με το πρότυπο 802.11™ δεν ήταν δυνατό. Δηλαδή χρήστες που βρισκόταν στην κάλυψη ενός Access Point (σημείου πρόσβασης) είχαν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.

Την **ασφαλή μετάδοση** των δεδομένων στο WiMAX αναλαμβάνει ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης DES (Data Encryption Standard, Πρότυπο Κωδικοποίησης Δεδομένων) και συγκεκριμένα μια παραλλαγή του αλγορίθμου ο Triple DES. Το DES αναπτύχθηκε το 1970 από το Αμερικανικό Εθνικό Γραφείο Προτύπων. Η βασική ιδέα ήταν η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου κρυπτογράφησης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (και να βελτιωθεί) από διάφορες εταιρείες ή οργανισμούς. Το DES ανήκει στην οικογένεια των συμμετρικών αλγορίθμων και κάνει χρήση κλειδιών με μήκος 56 bit. Ο "κλασικός" αλγόριθμος DES είναι πλέον ξεπερασμένος, αφού με τη χρήση ενός σύγχρονου

υπολογιστή μπορεί να παραβιαστεί σχετικά εύκολα. Στο μεταξύ, εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές επάνω στο DES, γίνεται να αυξηθεί σημαντικά η ασφάλειά του. Με τη μέθοδο Triple - DES, για παράδειγμα, το μήνυμα κωδικοποιείται τρεις φορές, με τρία διαφορετικά κλειδιά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην αρχική του έκδοση το πρότυπο IEEE 802.16™ λειτουργούσε στη ζώνη συχνοτήτων 10-66 GHz. Στις παραπάνω συχνότητες, η επικοινωνία μεταξύ δύο σταθμών επιτυγχάνεται μόνο όταν οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε συνθήκες οπτικής επαφής. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο υποπρότυπο **IEEE 802.11c™**. Η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ σταθμών που δε βρίσκονται σε οπτική επαφή ήταν το κίνητρο για τη δημιουργία του υποπροτύπου **IEEE 802.16a™**. Τον Ιανουάριο του 2003 το πρότυπο επεκτάθηκε ώστε να λειτουργεί και στις συχνότητες από 2-11 GHz, όπου στις συχνότητες αυτές ήταν δυνατή η δημιουργία συνδέσεων χωρίς οπτική επαφή πομπού - δέκτη. Το υποπρότυπο το οποίο περιγράφει τη διαδικασία αυτή ονομάστηκε IEEE 802.16a™. Τα πρώτα προϊόντα WiMAX τα οποία σήμερα είναι διαθέσιμα στην αγορά, ακολουθούν στη μεγαλύτερή τους πλειοψηφία το υποπρότυπο αυτό.

Καθώς η πολυπλοκότητα των εφαρμογών που διαδίδονται πάνω από ένα ασύρματο δίκτυο ολοένα και αυξάνει, η ποιότητα υπηρεσίας πάνω από τέτοια δίκτυα γίνεται ένας πολύ καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η μετάδοση video σε πραγματικό χρόνο απαιτεί από το δίκτυο συνθήκες πολύ χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ποιότητα υπηρεσίας ορίστηκε το υποπρότυπο **IEEE 802.16d™**.

Η ένωση των υποπροτύπων IEEE 802.11™ a, c, d όρισε το πρότυπο **IEEE 802.16-2004™** το οποίο περιγράφει τη συνολική λειτουργικότητα των επιμέρους υποπροτύπων που προαναφέρθηκαν για συχνότητες λειτουργίας 2-66 GHz.

Το πρότυπο IEEE 802.16-2004™ ορίζει την επικοινωνία χρηστών οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε ένα κελί το οποίο καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης. Όταν κάποιος χρήστης κινηθεί σε περιοχή που βρίσκεται εκτός περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης η σύνδεση χάνεται. Το υποπρότυπο **IEEE 802.16e™** εισάγει και περιγράφει την έννοια της κινητικότητας των χρηστών (handover) από ένα σταθμό βάσης σε άλλο. Στο υποπρότυπο αυτό ορίζεται ότι ένας κινητός χρήστης μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμα και αν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα $120\frac{km}{h}$.

Το πρότυπο **IEEE 802.16e™-2009** προσδιορίζει το air interface των ενοποιημένων σταθερών ασύρματων ευρυζωνικών συστημάτων υποστηρίζοντας υπηρεσίες πολυμέσων. Το στρώμα MAC (Medium Access Control) υποστηρίζει μία κυρίως point-to-multipoint αρχιτεκτονική. Το MAC είναι δομημένο για να υποστηρίζει

πολλαπλές προδιαγραφές φυσικού στρώματος (PHY), η κάθε μία κατάλληλη σε ένα συγκεκριμένο λειτουργικό περιβάλλον. Προσδιορίζεται, επίσης, για λειτουργικές συχνότητες από 10-66 GHz, το WirelessMAN-SC PHY, βασισμένο σε διαμόρφωση ενιαίου φορέα (single-carrier). Για συχνότητες κάτω από 11 GHz, όπου η διάδοση χωρίς άμεση οπτική επαφή πρέπει να συμπεριληφθεί, δύο εναλλακτικές παρέχονται: η WirelessMAN-OFDM (που χρησιμοποιεί ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας) και WirelessMAN-OFDMA (που χρησιμοποιεί ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης). Αυτό το πρότυπο είναι μία αναθεώρηση του προτύπου IEEE Std 802.16-2004 και ενοποιεί υλικό από τα IEEE 802.16e-2005, IEEE 802.16-2004/Cor1-2005, IEEE 802.16f-2005, and IEEE 802.16g-2007, μαζί με επιπλέον αντικείμενα συντήρησης και βελτιώσεις στις προδιαγραφές της βάσης δεδομένων πληροφοριών διαχείρισης. Αυτή η αναθεώρηση αντικαθιστά και καθιστά παρωχημένα τα πρότυπα IEEE Std 802.16-2004, IEEE 802.16e-2005, IEEE 802.16-2004/Cor1-2005, IEEE 802.16f-2005 και IEEE 802.16g-2007 [18].

Ένα ακόμη πρότυπο το οποίο δημοσιεύτηκε στις 30 Ιουλίου 2010, είναι το **IEEE 802.16h™-2010** [18]. Αυτή η επέκταση στοχεύει στη λειτουργία των δικτύων 802.16 απαλλαγμένα από άδειες, δηλαδή, ορίζει μία συλλογή cognitive radio ικανοτήτων για WiMAX δίκτυα [18].

Το **IEEE 802.16m™-2011** πρότυπο είναι η βασική τεχνολογία για το WiMAX 2 [8]. Στόχος του προτύπου είναι η εκπλήρωση των ITU-R (International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector) IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced) απαιτήσεων για τα τέταρτης γενιάς συστήματα. Το πρότυπο IEEE 802.16m υποβλήθηκε στο ITU για IMT-Advanced τυποποίηση [9]. Επίσης, είναι ένας από τους σημαντικότερους υποψήφιους για το IMT-Advanced technologies της ITU. Μεταξύ πολλών βελτιώσεων, τα IEEE 802.16m συστήματα μπορούν να παρέχουν τέσσερις φορές μεγαλύτερη ταχύτητα δεδομένων από την πρώτη έκδοση WiMAX.

Η δεύτερη έκδοση WiMAX παρέχει συμβατότητα με την πρώτη. Οι χειριστές WiMAX μπορούν να μεταβούν από την πρώτη έκδοση στη δεύτερη αναβαθμίζοντας το λογισμικό. Η συνεργασία πρωτοβουλίας WiMAX 2 (WiMAX 2 Collaboration Initiative) σχηματίστηκε για να βοηθήσει αυτή τη μετάβαση [10].

Είχε προβλεφθεί ότι χρησιμοποιώντας 4x2 MIMO (πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου) σε σενάριο μικροκυψελών σε αστική περιοχή με μόνο ένα 20 MHz TDD (time-division duplexing) κανάλι διαθέσιμο σε όλο το σύστημα, το 802.16m σύστημα να μπορεί να υποστηρίξει και 120 Mbit/s downlink και 60 Mbit/s uplink ανά περιοχή ταυτόχρονα. Αναμενόταν ότι η δεύτερη έκδοση WiMAX θα είναι διαθέσιμη στο εμπόριο τη χρονική περίοδο 2011-2012 [11].

1.4.2 Ζώνες Συχνοτήτων

Το πρότυπο IEEE 802.16™ συγκεκριμενοποιεί το MAC και το PHY των σταθερών συστημάτων ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης. Παρόμοια με το IEEE 802.11™, το στρώμα MAC έχει φτιαχτεί ώστε να υποστηρίζει πολλαπλά φυσικά στρώματα και έτσι να δίνει στο πρότυπο μεγάλη ευελιξία. Το πρότυπο IEEE 802.16™ υποστηρίζει point-to-multipoint και multipoint-to-multipoint επικοινωνίες στη ζώνη 2-66 GHz. Η ύπαρξη των πολλαπλών φυσικών στρωμάτων, εκτός των τεχνολογικών και των επιχειρηματικών λόγων, αντικατοπτρίζει και το γεγονός ότι η ηλεκτρομαγνητική διάδοση ανάμεσα στα 2 και τα 66 GHz δεν είναι ομοιογενής. Κάθε φυσικό στρώμα είναι κατάλληλο για μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Το 802.16 είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε 3 διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων [2].

Η πρώτη ζώνη συχνοτήτων που παρουσιάζει ενδιαφέρον, είναι οι αδειοδοτημένες (licensed) συχνότητες ανάμεσα στα 10 και τα 66 GHz. Σε αυτό το εύρος των συχνοτήτων, το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό και η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από διάφορες επίγειες και ανθρωπίνες κατασκευές είναι σφοδρή. Γι' αυτό, η οπτική επαφή (line-of-sight, LOS) ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη επιβάλλεται. Η πολυδιαδρομική διάδοση (multipath) δεν αποτελεί πρόβλημα, επειδή μόνο το κύριο μονοπάτι από τον πομπό στο δέκτη θα έχει επαρκή ενέργεια. Ενώ, όμως, η πολυδιαδρομική διάδοση δεν είναι πρόβλημα, ο θερμικός θόρυβος και/ή οι παρεμβολές είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την επίδοση των ασύρματων συστημάτων σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται μόνο σε εξωτερικό περιβάλλον και η βροχή θα αυξήσει την εξασθένηση που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Έτσι, ένα αρκετά μεγάλο περιθώριο ζεύξης πρέπει να ληφθεί υπόψη για τις απώλειες λόγω βροχής. Ταυτόχρονα, η επιθυμία για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλής τάξης σχήματα διαμόρφωσης. Αντίστοιχα, τα τελευταία απαιτούν πολύ μεγάλο σηματοθορυβικό λόγο (signal-to-noise-ratio, SNR) για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά.

Μία ακόμα διαφορά ανάμεσα στα 802.16™ και 802.11™ ή και το 802.15™ είναι ότι το εύρος της παρεμβολής τυπικά ξεπερνάει το εύρος λειτουργίας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι σταγόνες της βροχής που προκαλούν τις πιο μεγάλες απώλειες δεν είναι ομοιόμορφα διατεταγμένες στη λειτουργική περιοχή. Αυτό δημιουργεί την προοπτική για περιπτώσεις όπου το επιθυμητό σήμα υφίσταται σφοδρή εξασθένηση, αλλά το παρεμβαλλόμενο σήμα όχι. Ενώ η εξασθένηση λόγω βροχής είναι ένα τεχνικό πρόβλημα, η λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 10-66 GHz οδηγεί σε 2 τεχνικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η πολυδιαδρομική παρεμβολή είναι αμελητέα. Δεύτερον, οι ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας σε αυτό το φυσικό

περιβάλλον είναι πολύ μεγάλες, της τάξης των 25-28 MHz. Αυτό επιτρέπει ρυθμούς δεδομένων μεγαλύτερους από 120 Mb/s.

Η δεύτερη ζώνη συχνοτήτων που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων ανάμεσα στα 2 και τα 11 GHz. Σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, η οπτική επαφή δεν είναι αναγκαία. Η πολυδιαδρομική λήψη μπορεί να είναι σημαντική και υπολογίσιμη, γι' αυτό και πρέπει να γίνονται οι απαραίτητες μετρήσεις. Επειδή μπορεί να υπάρχει ή όχι οπτική επαφή, η ισχύς του σήματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Οι επανεκπομπές πιθανόν να κρίνονται αναγκαίες εξαιτίας της συμπεριφοράς απωλειών του ασύρματου μέσου. Σαν λύση σε αυτά τα προβλήματα, το πρότυπο 802.16™ παρέχει αναβαθμισμένες τεχνικές ελέγχου της ισχύος και το φυσικό στρώμα για λειτουργία στα 2-11 GHz μπορεί να βασιστεί στο OFDM.

Η τρίτη ζώνη συχνοτήτων που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι οι μη αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων ανάμεσα στα 2 και τα 11 GHz. Ενώ τα φυσικά χαρακτηριστικά των μη αδειοδοτημένων αυτών ζωνών συχνοτήτων είναι ίδια όπως αυτά των αντίστοιχων αδειοδοτημένων, υπάρχουν 2 διαφορές. Πρώτον, επειδή οι ζώνες αυτές είναι μη αδειοδοτημένες, πιθανόν να υπάρχουν και άλλοι χρήστες, γεγονός το οποίο προκαλεί πρόβλημα παρεμβολής. Δεύτερον, οι κανονισμοί οριοθετούν την εκπεμπόμενη ισχύ. Τα προβλήματα αυτά απαιτούν δυναμική επιλογή συχνότητας και ελέγχου της ισχύος.

Παρακάτω γίνεται λόγος για το φυσικό στρώμα (PHY) και το στρώμα ελέγχου πρόσβασης του μέσου (MAC). Πριν από αυτό όμως, γίνεται αναφορά στο πως από πρότυπο 802.16™ της IEEE κατέληξε στην ονομασία WiMAX, που έχει επικρατήσει.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, στις εταιρείες δεν επιτρέπεται να συμμετέχουν ενεργά στις ομάδες εργασίας της IEEE. Μπορούν, όμως, να ιδρύουν οργανισμούς οι οποίοι θα δοκιμάζουν τα πρότυπα και θα εξετάζουν τη διαλειτουργικότητά τους. Καθώς, λοιπόν, οι ασύρματες επικοινωνίες είναι το πιο ενδιαφέρον τεχνολογικά κομμάτι των επικοινωνιών, δε φαντάζει περίεργο το γεγονός ότι μόλις παρουσιάστηκε και εγκρίθηκε το πρώτο μέρος του 802.16™, αμέσως ιδρύθηκε και ένας οργανισμός που θα το εξέταζε και θα προσπαθούσε να το εκμεταλλευτεί. Το όνομα αυτού, WiMAX ή καλύτερα WiMAX Forum, όπως ονομάζεται η ένωση των εταιρειών και γενικότερα των οργανισμών που εξετάζουν και παρακολουθούν στενά το WiMAX.

1.4.3 WiMAX: Μία εμπορική συμμαχία

Το WiMAX είναι απλώς ένα ακρώνυμο που σημαίνει **Worldwide Interoperability for Microwave Access**. Αυτό επρόκειτο για ένα βραχυπρόθεσμο όνομα, είχε όμως τόσο μεγάλη απήχηση που συντηρείται μέχρι σήμερα. Το WiMAX Forum είναι μια αφιλοκερδής

οργάνωση (ή καλύτερα οργανισμός) που ασχολείται με τα προϊόντα που σχεδιάζονται για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, βασισμένα στο 802.16™ της IEEE. Παρόμοια οργάνωση-συμμαχία υπήρξε και με το 802.11™ της IEEE, τη γνωστή Wi-Fi Alliance, που ασχολείται με τα προϊόντα βασισμένα στο 802.11™. Το WiMAX Forum ιδρύθηκε το 2001 από τη Nokia Corp., την Ensemble Communications και το Orthogonal Frequency Division Multiplexing Forum και προσπαθεί - όσο το δυνατόν - να πετύχει τη συμβατότητα του προτύπου σε παγκόσμια βάση, κάτι που το 802.11™ απέτυχε να κάνει. Το 2003 η Intel Corp. μπήκε στο παιχνίδι του WiMAX Forum και πολλές ευρωπαϊκές εταιρείες ακολουθούν το παράδειγμά της. Τελευταία η ελληνική Intracom εισήλθε και αυτή στο forum και έγινε συνétairos στην προσπάθεια για ανάδειξη και προώθηση του προτύπου.

Το WiMAX, λοιπόν, (θα γίνεται αναφορά έτσι σε αυτό πλέον, ως ένα καθολικό και ενιαίο πρότυπο και όχι ως πρότυπο 802.16™ της IEEE) είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στο πρότυπο 802.16™ της IEEE και υπόσχεται ασύρματη πρόσβαση ευρείας ζώνης με μεγάλη αξιοπιστία σαν το αντίπαλο δέος στις τεχνολογίες των DSL και καλωδίου. Το WiMAX παρέχει σταθερή, νομαδική, φορητή και κινητή ασύρματη επικοινωνία χωρίς μάλιστα την ανάγκη για οπτική επαφή με το σταθμό βάσης. Σε μία ακτίνα ενός τυπικού κελιού από 3 ως 10 χιλιόμετρα, τα συστήματα που πιστοποιούνται από το WiMAX Forum αναμένεται να μεταφέρουν χωρητικότητα ως και 40 Mbps ανά κανάλι, στις σταθερές και τις φορητές εφαρμογές [5].

1.4.4 Πλεονεκτήματα του WiMAX

Γιατί, όμως, το WiMAX έλαβε τόσο μεγάλο ενδιαφέρον από τις μεγαλύτερες εταιρείες του κόσμου μας; Προφανώς για την πληθώρα των εφαρμογών του, που όπως διαφημίζεται θα λύσουν πολλά προβλήματα (απόστασης κυρίως) και θα προσφέρουν υπηρεσίες άνευ προηγουμένου στους χρήστες.

Απαλλαγμένο από τα μειονεκτήματα των σημερινών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο και διατηρώντας ή αναβαθμίζοντας τα πλεονεκτήματά τους, το WiMAX είναι η λύση που όπως όλα δείχνουν θα επικρατήσει στο πολύ κοντινό μέλλον, αντικαθιστώντας ακόμη και τις οικιακές ADSL συνδέσεις. Το WiMAX προσφέρει αφενός μεν υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης σε σχέση με το Wi-Fi, αφετέρου δε σημαντικά υψηλότερη εμβέλεια, που υπολογίζεται ότι θα μπορεί να καλύψει σε κάθε της σημείο ακόμη και μια μεγαλούπολη [3].

Με τον τρόπο που τα κινητά τηλέφωνα σήμερα έχουν επικρατήσει για τις ανάγκες της επικοινωνίας μας έναντι του ενσύρματου τηλεφωνικού δικτύου, με τον ίδιο τρόπο εκτιμάται από τους ειδικούς ότι πολύ σύντομα το WiMAX θα καλύπτει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό συνδρομητών, σε σχέση με αυτούς που συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω

ενσύρματης γραμμής ADSL, ISDN (Integrated Services Digital Network) ή PSTN (Public Switched Telephone Network).

Το Internet πρέπει να αποτελεί ένα μέσο ενημέρωσης και επικοινωνίας προσβάσιμο ανά πάσα στιγμή από παντού, με την ίδια λογική που σήμερα ένα κινητό τηλέφωνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν από οποιοδήποτε σημείο, χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες. Κάπως έτσι εκτιμάται ότι μελλοντικά ο χρήστης ενός φορητού υπολογιστή ή PDA (Personal Digital Assistant), θα ενεργοποιεί τη συσκευή του σε οποιοδήποτε σημείο μιας πόλης ή και ολόκληρης της χώρας του και θα είναι αμέσως έτοιμος να πλοηγηθεί στο Internet με ταχύτητες αρκετών Mbps. Όσο κι αν αυτό φαίνεται σαν ένα "άπιαστο" όνειρο, το WiMAX υπόσχεται να το κάνει πραγματικότητα και οι πρώτες δοκιμές που έχουν γίνει σε χώρες του εξωτερικού, δείχνουν ότι θα το κατορθώσει.

Τι κάνει όμως το WiMAX τόσο ξεχωριστό ως τεχνολογία; Τα προτερήματά του είναι επιγραμματικά, τα εξής [4]:

Ευέλικτη αρχιτεκτονική: Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει πολλαπλές αρχιτεκτονικές συστημάτων, όπως Point-to-Point, Point-to-Multipoint και ευρεία κάλυψη. Το MAC του WiMAX υποστηρίζει Point-to-Point και ευρείας κάλυψης υπηρεσία με τον προγραμματισμό μιας χρονοθυρίδας (timeslot) για κάθε σταθμό υπηρεσίας. Αν υπάρχει μόνο ένας σταθμός υπηρεσίας στο δίκτυο, ο σταθμός βάσης του WiMAX θα επικοινωνεί με το σταθμό υπηρεσίας με μία βάση Point-to-Point. Ένας σταθμός βάσης σε ρυθμίσεις Point-to-Point μπορεί να χρησιμοποιεί κεραία στενότερης δέσμης ώστε να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις.

Υψηλή ασφάλεια: Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει το AES (Advanced Encryption Standard) και το 3DES (Triple DES, όπου DES είναι το Data Encryption Standard). Με την κρυπτογράφηση των συνδέσεων μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού υπηρεσίας, το WiMAX παρέχει στους χρήστες ιδιωτικότητα και ασφάλεια (ενάντια σε κακόβουλες επιθέσεις) και ασφάλεια στο ασύρματο ευρυζωνικό μέσο αλληλεπίδρασης (interface). Η ασφάλεια επίσης παρέχει στους υπεύθυνους υψηλή προστασία εναντίον της κλοπής υπηρεσιών. Το WiMAX, επίσης, έχει ενσωματωμένη υποστήριξη VLAN (Virtual Local Area Network), η οποία παρέχει υποστήριξη για δεδομένα που εκπέμπονται από διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο σταθμό βάσης.

WiMAX Quality of Service: Το WiMAX μπορεί να ρυθμιστεί δυναμικά για τη διαχείριση της κυκλοφορίας που μεταφέρεται. Τέσσερις τύποι υπηρεσίας υποστηρίζονται όπως φαίνονται στον Πίνακα 1-3 [4]:

Τύπος Υπηρεσίας	Περιγραφή
Unsolicited Grant Service (UGS)	Το UGS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποτελούνται από πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως T1/E1 και Voice over IP.
Real-Time Polling Service (rtPS)	Το rtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποτελούνται από πακέτα δεδομένων με μεταβλητό μήκος που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως MPEG video.
Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)	Το nrtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων που επιδέχονται καθυστέρηση και αποτελούνται από πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους για τα οποία απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός δεδομένων, όπως FTP.
Best Effort (BE)	Η BE υπηρεσία σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων για τις οποίες δεν απαιτείται κανένα ελάχιστο επίπεδο υπηρεσίας και μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μια βάση διαθέσιμου χώρου.

Πίνακας 1-3: WiMAX QoS

Γρήγορη εγκατάσταση-ανάπτυξη: Συγκρινόμενο με την εγκατάσταση των καλωδιωμένων λύσεων, το WiMAX απαιτεί μικρή ή καθόλου κατασκευή ή αναμόρφωση ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων. Για παράδειγμα, δεν απαιτείται εκσκαφή για την υποστήριξη των υπάρχοντων καλωδίων. Οι χειριστές που έχουν αποκτήσει άδειες να χρησιμοποιούν αδειοδοτούμενες ζώνες, ή σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν μία από τις μη αδειοδοτημένες ζώνες, δε χρειάζονται να λογοδοτούν κάθε φορά στην κυβέρνηση. Εφόσον η κεραία και ο αναγκαίος εξοπλισμός έχουν εγκατασταθεί, το WiMAX είναι έτοιμο να παρέχει την υπηρεσία. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η εγκατάσταση του συστήματος WiMAX μπορεί να ολοκληρωθεί σε λίγες ώρες, συγκρινόμενο με τους μήνες που χρειάζονται για άλλες λύσεις.

Υπηρεσία πολλαπλών επιπέδων: Ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται το QoS, γενικά βασίζεται στο Service Level Agreement (SLA) μεταξύ της υπηρεσίας παροχής και του τελικού χρήστη. Επίσης, ένας πάροχος υπηρεσίας μπορεί να προσφέρει διαφορετικά SLAs σε διαφορετικούς εγγεγραμμένους χρήστες ή ακόμα σε διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο σταθμό υπηρεσίας.

Διαλειτουργικότητα: Το WiMAX βασίζεται σε παγκόσμια πρότυπα και πρωτόκολλα, εκτός εταιρικών παρεμβάσεων, τα οποία διευκολύνουν τους τελικούς χρήστες να ταξιδεύουν και να χρησιμοποιούν τους σταθμούς υπηρεσίας τους σε διαφορετικές τοποθεσίες ή με διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών. Η διαλειτουργικότητα προστατεύει την πρόωρη επένδυση ενός χειριστή, καθώς μπορεί να επιλέξει εξοπλισμό από διαφορετικές εταιρείες και θα συνεχίσει να μειώνει το κόστος του εξοπλισμού σαν αποτέλεσμα της μαζικής αποδοχής.

Φορητότητα: Όπως και με τα τρέχοντα συστήματα κυψέλης, μόλις ο σταθμός υπηρεσίας του WiMAX αρχίζει τη λειτουργία του, καθορίζει τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης με το σταθμό βάσης, όσο ο σταθμός υπηρεσίας είναι εγγεγραμμένος στη βάση δεδομένων του συστήματος και τότε διαπραγματεύεται τα χαρακτηριστικά εκπομπής του, αντίστοιχα.

Κινητικότητα: Η τροποποίηση IEEE 802.16e™ έχει προσθέσει χαρακτηριστικά-κλειδιά για την υποστήριξη της κινητικότητας του προτύπου. Βελτιώσεις έχουν γίνει στα φυσικά στρώματα των OFDM και OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), ώστε να υποστηρίζουν συσκευές και υπηρεσίες σε ένα κινητό περιβάλλον. Αυτές οι βελτιώσεις, που περιλαμβάνουν Scalable OFDMA, MIMO (Multiple-input and Multiple-output) και υποστήριξη για idle/sleep mode και hand-off, θα επιτρέψουν πλήρη κινητικότητα σε ταχύτητες ως και 160 χιλιόμετρα την ώρα. Το υποστηριζόμενο από το WiMAX Forum πρότυπο έχει κληρονομήσει τη μοναδική NLOS (Non-Line-Of-Sight) επίδοση και την ανθεκτική σε πολλαπλή διαδρομή λειτουργία του OFDM, καθιστώντας το κατάλληλο για το κινητό περιβάλλον.

Επηρεάζει το κόστος: Το WiMAX είναι βασισμένο σε ένα ανοιχτό, παγκόσμιο πρότυπο. Η μαζική αποδοχή του και η χρήση chipset χαμηλού κόστους μαζικής παραγωγής, θα οδηγήσει σε δραματική μείωση του κόστους και το αποτέλεσμα του ανταγωνισμού στις τιμές, θα παρέχει σημαντικό οικονομικό κέρδος για τους παρόχους υπηρεσιών και τους τελικούς χρήστες.

Ευρύτερη κάλυψη: Το WiMAX δυναμικά υποστηρίζει πολλαπλά επίπεδα διαμόρφωσης, όπως BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK, 16-QAM και 64-QAM. Τα συστήματα WiMAX, όταν εξοπλίζονται με έναν ενισχυτή υψηλής ισχύος και λειτουργούν με μια χαμηλού επιπέδου διαμόρφωση (BPSK ή QPSK, για παράδειγμα), είναι ικανά να καλύψουν μια αρκετά μεγάλη γεωγραφική περιοχή όταν η διαδρομή ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το σταθμό υπηρεσίας δε διακόπτεται από κάποιο εμπόδιο.

Λειτουργία Μη-Οπτικής-Επαφής: Ο όρος NLOS συνήθως αναφέρεται σε μία ραδιοδιαδρομή με την πρώτη ζώνη Fresnel πλήρως μπλοκαρισμένη. Το WiMAX βασίζεται στην τεχνολογία OFDM, η οποία έχει τη δυνατότητα να μεταχειρίζεται NLOS περιβάλλοντα. Η δυνατότητα αυτή βοηθάει τα προϊόντα WiMAX να μεταφέρουν πολύ

μεγάλο εύρος ζώνης σε ένα NLOS περιβάλλον, κάτι το οποίο άλλα ασύρματα προϊόντα δεν μπορούν να κάνουν.

Υψηλή χωρητικότητα: Χρησιμοποιώντας υψηλότερη διαμόρφωση (64-QAM) και εύρος ζώνης καναλιού (τρέχουσα τιμή 7 MHz, με σχεδιασμένη ανάπτυξη προς το πλήρες εύρος ζώνης όπως διευκρινίζεται στα αντίστοιχα πρότυπα της IEEE και της ETSI), τα συστήματα WiMAX μπορούν να παρέχουν σημαντικό εύρος ζώνης στους τελικούς χρήστες.

1.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης της τεχνολογίας WiMAX

Σε αυτό το τμήμα αναφέρονται αναλυτικά οι στόχοι του WiMAX Forum για τις επερχόμενες εφαρμογές του 802.16™ [4]. Το παρακάτω Σχήμα 1-2, παρουσιάζει τους στόχους του WiMAX Forum.



Σχήμα 1-2: Στόχοι της τεχνολογίας WiMAX [4]

1.5.1 Εφαρμογές του WiMAX

Η τεχνολογία WiMAX έχει αναπτυχθεί ώστε να απευθύνεται σε μια ευρεία ακτίνα εφαρμογών, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 1-4.

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

Πίνακας 1-4: Εφαρμογές WiMAX [4]

Βασισμένο στα τεχνικά του χαρακτηριστικά, το WiMAX είναι κατάλληλο να υποστηρίξει μία μεγάλη ποσότητα σεναρίων χρήσης. Μερικά από αυτά τα σενάρια, συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 1-5, ο οποίος επιδεικνύει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του WiMAX, που είναι κρίσιμα για την επιτυχή λειτουργία των σεναρίων αυτών.

	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				

Πίνακας 1-5: Σενάρια χρήσης του WiMAX [4]

Πολλά από τα παραπάνω σενάρια χρησιμοποίησης, αναλύονται παρακάτω.

1.5.2 Σενάρια χρήσης

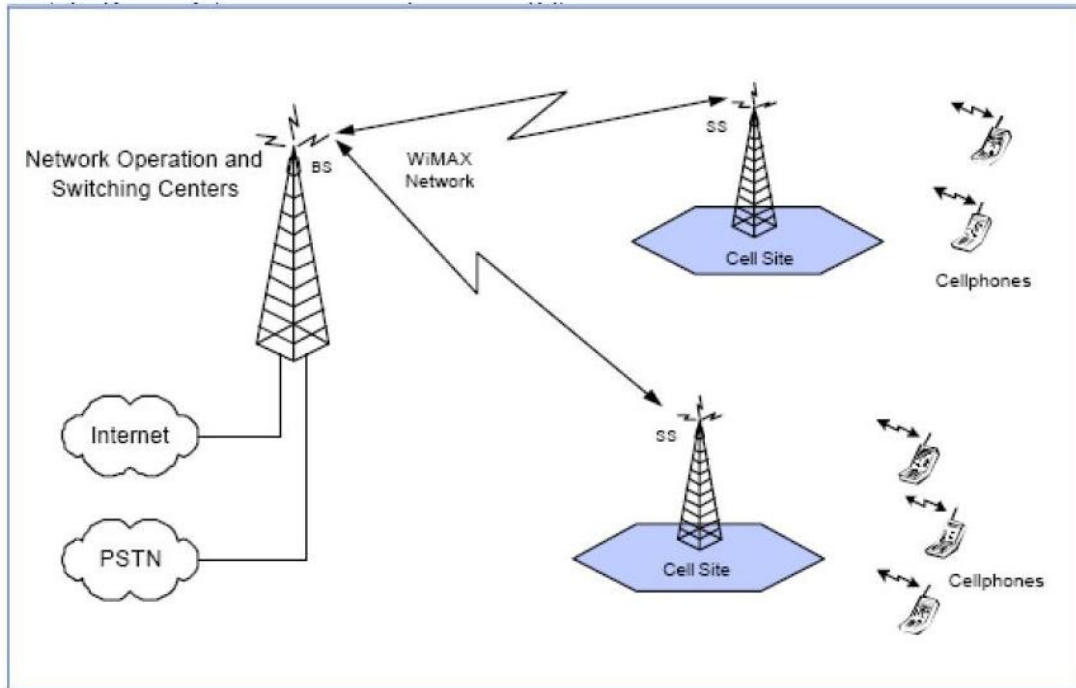
Η τεχνολογία WiMAX θα φέρει επανάσταση στον τρόπο που επικοινωνούμε. Θα παρέχει ολική ελευθερία στους ανθρώπους που κινούνται αρκετά, επιτρέποντάς τους να παραμένουν συνδεδεμένοι με υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο. Η τεχνολογία WiMAX θα επιτρέπει στους χρήστες να πηγαίνουν από το σπίτι στο αυτοκίνητό τους κι έπειτα στο γραφείο τους ή σπουδήποτε αλλού θέλουν, όλα αυτά χωρίς δέσμευση. Για να αναδειχθεί η ικανότητα του WiMAX να αντεπεξέλθει στις εφαρμογές που προηγήθηκαν, ακολουθούν αρκετά αντιπροσωπευτικά σενάρια χρήσης χωρισμένα σε 2 κατηγορίες, ιδιωτικά και δημόσια δίκτυα.

1.5.2.1 Ιδιωτικά Δίκτυα

Τα ιδιωτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από ένα συγκεκριμένο οργανισμό, ίδρυμα ή επιχείρηση και προσφέρουν επικοινωνιακές ζεύξεις για την ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά φωνής, δεδομένων και βίντεο. Η γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση είναι γενικά μια μεγάλη προτεραιότητα και οι ρυθμίσεις γίνονται συνήθως σε Point-to-Point και Point-to-Multipoint συνδέσεις.

1.5.2.1.1 Υποστήριξη κυψέλης

Η αγορά για υπηρεσίες κυψέλης γίνεται ολοένα και πιο ανταγωνιστική. Για να κρατηθούν στη δουλειά, οι υπεύθυνοι των κυψελωτών συσκευών και υπηρεσιών, ψάχνουν συνεχώς τρόπους ώστε να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη. Το κόστος των σταθμών εκπομπής και των επαναληπτών αποτελεί ένα σημαντικό μερίδιο των κοστών αυτών. Το WiMAX μπορεί να παρέχει ζεύξεις Point-to-Point μέχρι και μίλια (50 χιλιόμετρα), με ρυθμούς δεδομένων που υποστηρίζουν πολλαπλά E1/T1. Για τα κυψελωτά δίκτυα, λοιπόν, το WiMAX είναι μια σωστή επιλογή για την υποστήριξη του σταθμού βάσης στη λειτουργία του δικτύου και τα κέντρα δρομολόγησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3.

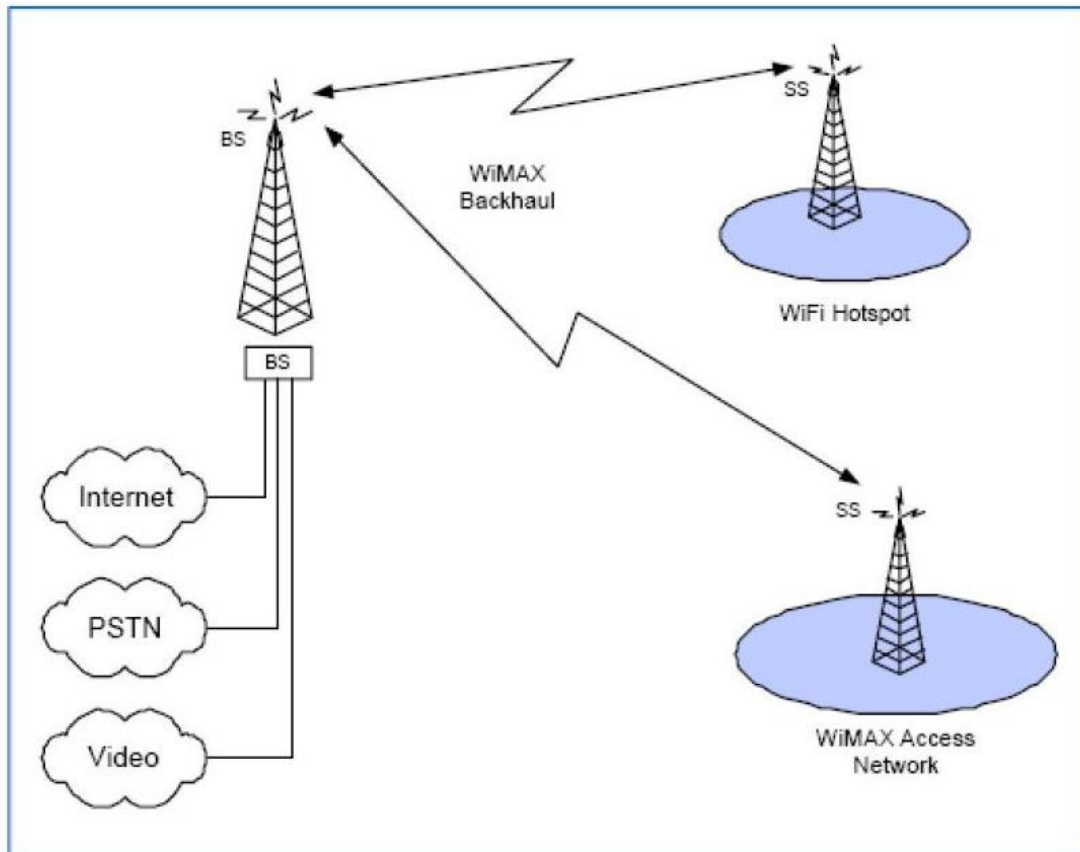


Σχήμα 1-3: Δίκτυο WiMAX για υποστήριξη κυψελωτού δικτύου

Σημείωση: Βασισμένη στη διαθεσιμότητα φάσματος του WiMAX στις διάφορες χώρες, η εφαρμογή της κυψελωτής εκπομπής μπορεί ή όχι να χειρίζεται δίκτυα που εκτείνονται σε ολόκληρη τη χώρα. Η κυψελωτή κυκλοφορία είναι ένα σύμπλεγμα από φωνή και δεδομένα, για τα οποία το ενσωματωμένο χαρακτηριστικό QoS του WiMAX είναι ίσως το πιο κατάλληλο. Η ενοικίαση συστημάτων κάλυψης και εκπομπής από τοπικές τηλεφωνικές εταιρείες μπορεί να είναι απαγορευτικές λόγω κόστους και η ανάπτυξη και υλοποίηση λύσης μέσω οπτικών ινών, η οποία είναι και χρονοβόρα και πολυέξοδη, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την υπηρεσία. Οι καλωδιωμένες λύσεις παροχής κυψελωτής κάλυψης, είναι σπάνια αντάξιες του κόστους τους σε αστικές ή προαστιακές περιοχές και οι περισσότερες εκδοχές του DSL και της καλωδιακής τεχνολογίας δεν μπορούν να προσφέρουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης, ειδικά για backhauling των 3G δικτύων.

1.5.2.1.2 Οπισθόζευξη (Backhaul) Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας

Οι πάροχοι ασύρματης υπηρεσίας χρησιμοποιούν εξοπλισμό WiMAX, ώστε να μεταβιβάζουν την κυκλοφορία από τους σταθμούς βάσης στα δίκτυα πρόσβασής τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-4.



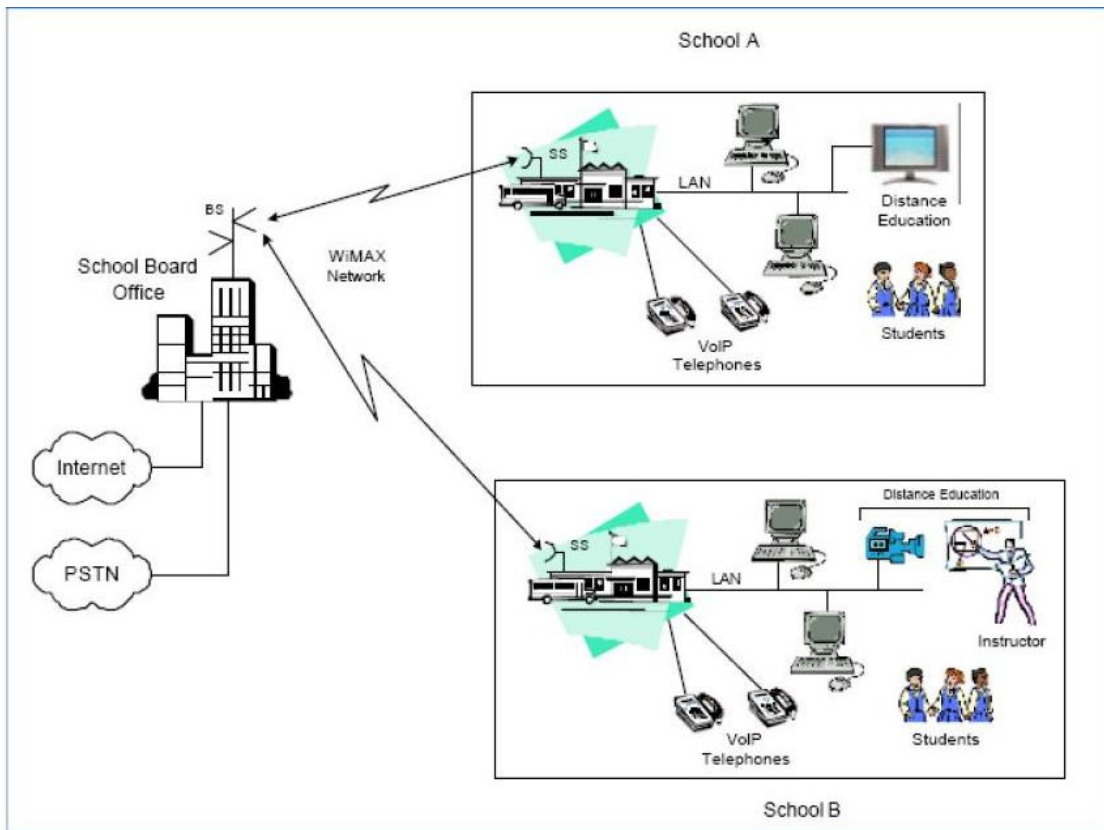
Σχήμα 1-4: WiMAX Backhaul

Τα δίκτυα πρόσβασης βασίζονται σε WiFi, WiMAX ή οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Αν το δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιεί εξοπλισμό Wi-Fi το ολικό δίκτυο παρόχων ασύρματης υπηρεσίας αναφέρεται ως Hot Zone. Από τότε που οι πάροχοι ασύρματης υπηρεσίας τυπικά προσφέρουν φωνή, δεδομένα και βίντεο, το ενσωματωμένο χαρακτηριστικό QoS του WiMAX θα βοηθήσει στην προτεραιότητα και βελτιστοποίηση της μεταβιβαζόμενης κυκλοφορίας. Ο εξοπλισμός WiMAX μπορεί να τοποθετηθεί γρήγορα, βοηθώντας στην ανάπτυξη και το στήσιμο ενός δικτύου παρόχων ασύρματης πρόσβασης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενοικίαση συστημάτων μετάδοσης από την τοπική τηλεφωνική εταιρεία θα αυξήσει το λειτουργικό κόστος και η εγκατάσταση δικτύου οπτικών ινών μπορεί να είναι πολυέξοδη και απαιτεί σημαντικό χρόνο, ενώ το DSL και η καλωδιακή τεχνολογία δεν είναι αντάξιες του κόστους τους.

1.5.2.1.3 Εκπαιδευτικά Δίκτυα

Τα υπουργεία παιδείας μπορούν να χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να συνδέουν τα σχολεία με τα υπουργεία ή τις νομαρχίες (αν βρισκόμαστε στην επαρχία) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-5. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου WiMAX που βοηθούν τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι το NLOS, το υψηλό εύρος

ζώνης (>15 Mbps), η δυνατότητα για Point-to-Point και Point-to-Multipoint και η δυνατότητα για ευρεία κάλυψη.



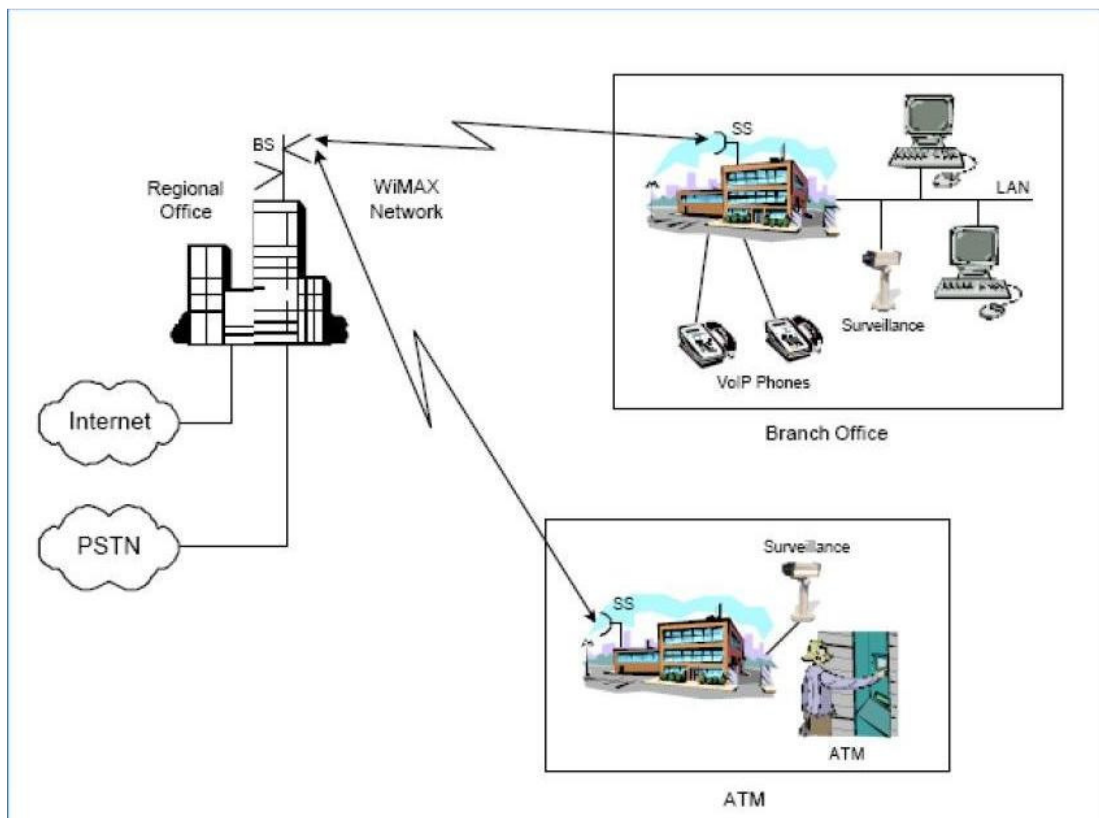
Σχήμα 1-5: Δίκτυο WiMAX για την εξυπηρέτηση του εκπαιδευτικού συστήματος

Τα εκπαιδευτικά δίκτυα που βασίζονται στο WiMAX και χρησιμοποιούν το QoS, μπορούν να μεταφέρουν στο μέγιστο το εύρος των απαιτήσεων της επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων της φωνής τηλεφωνίας, λειτουργικά δεδομένα (όπως οι φάκελοι των μαθητών), email, πρόσβαση σε Internet και intranet (δεδομένα) και εκπαίδευση από απόσταση (βίντεο) ανάμεσα σε κεντρικά του υπουργείου ή της νομαρχίας και όλων των σχολείων στην περιφέρεια κάλυψης, αλλά και μεταξύ των ίδιων των σχολείων. Στο παραπάνω σενάριο, η κάμερα στο σχολείο B μεταφέρει τη διδασκαλία του μαθήματος στο σχολείο A σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τα σχολεία να μεταδίδουν τη διδασκαλία ενός μαθήματος και σε άλλα σχολεία ταυτόχρονα, μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον δασκάλους. Η λύση του WiMAX παρέχει ευρεία κάλυψη και σε χαμηλό κόστος και είναι ιδανική, ειδικά για σχολεία της επαρχίας που έχουν λίγο ή καθόλου εξοπλισμό επικοινωνιών και είναι διασκορπισμένα σε μεγάλη ακτίνα. Όταν τα σχολεία θα έχουν και θα χρησιμοποιούν τα δικά τους δίκτυα, θα μπορούν οικειοθελώς να αντιδρούν σε οποιοσδήποτε αλλαγές στην τοποθεσία ή το πλήθος των εφαρμογών που διαθέτουν. Αυτό θα μειώσει σημαντικά το κόστος πιθανόν μισθωμένων γραμμών στο τηλεφωνικό δίκτυο. Έτσι, λοιπόν, φαίνεται ότι οι καλωδιωμένες λύσεις δεν μπορούν να προσφέρουν μια

γρήγορα εγκαταστάσιμη και χαμηλού κόστους λύση και οι περισσότερες εκδοχές DSL και καλωδίου, δεν έχουν τους απαιτούμενους για τέτοια δίκτυα ρυθμούς μετάδοσης.

1.5.2.1.4 Δίκτυα Τραπεζών

Οι μεγάλες τράπεζες μπορούν να συνδέουν υποκαταστήματα και τοποθεσίες ATM με το κεντρικό γραφείο της περιοχής, μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου WiMAX μεταφέροντας φωνή, δεδομένα και βίντεο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-6. Αυτές οι τράπεζες συνήθως εκτείνονται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή και απαιτείται υψηλή ασφάλεια και εύρος ζώνης, ώστε να διαχειρίζεται η κυκλοφορία:



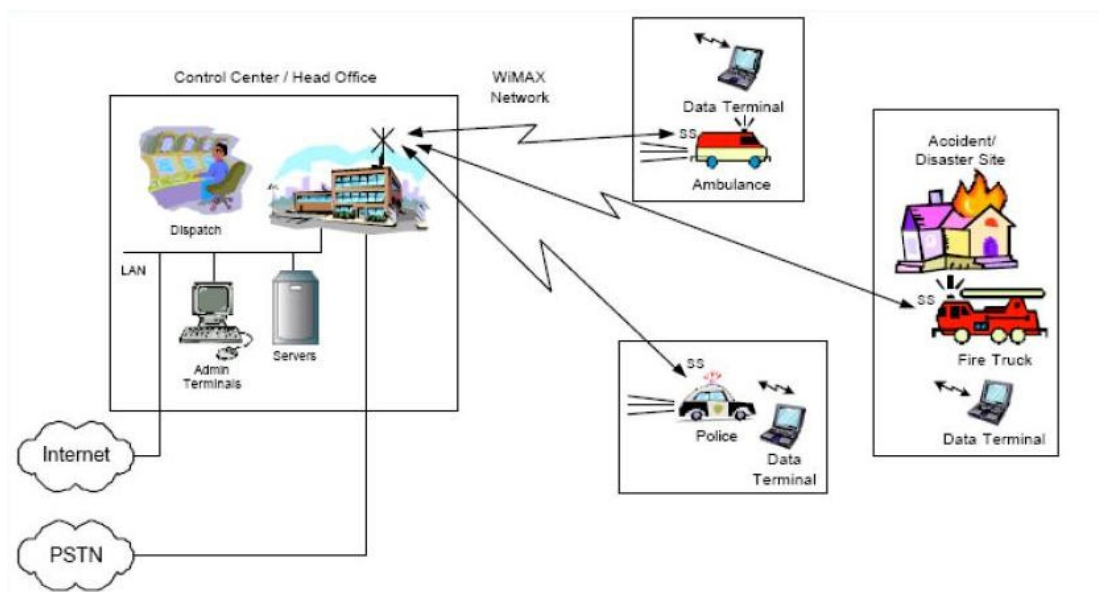
Σχήμα 1-6: Δίκτυο τράπεζας με χρήση WiMAX

Η κρυπτογράφηση δεδομένων μέσω του WiMAX προσφέρει εξαιρετική ασφάλεια σύνδεσης, παρ' όλα αυτά, οι τράπεζες πιθανόν να χρειαστούν και ασφάλεια από άκρη σε άκρη, όπως αυτή που παρέχεται από το SSL (Secure Sockets Layer), για να προστατευτούν ενάντια σε ανεπιθύμητη εισβολή στην ευαίσθητη τραπεζική κυκλοφορία. Η ευρεία κάλυψη και η υψηλή χωρητικότητα επιτρέπει στο κεντρικό γραφείο της τράπεζας να είναι συνδεδεμένο με ένα μεγάλο αριθμό υποκαταστημάτων και σημείων ATM, που είναι διασκορπισμένα στην ευρύτερη περιοχή. Τα δίκτυα WiMAX επίσης προσφέρουν έναν υψηλό βαθμό κλιμάκωσης, ώστε η κυκλοφορία χαμηλού ρυθμού δεδομένων μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των ATM, να συνυπάρχει με τα υψηλά επίπεδα της κυκλοφορίας

που χρειάζεται για να υποστηριχθούν οι επικοινωνίες μεταξύ κεντρικού γραφείου και υποκαταστημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, χρησιμοποιώντας το QoS του WiMAX, το οποίο χρησιμοποιείται για να δίνει προτεραιότητα στην κυκλοφορία φωνής (τηλεφωνία ανάμεσα στα καταστήματα), δεδομένων (οικονομικές συναλλαγές, email, Internet και intranet) και βίντεο (παρακολούθηση, Closed-Circuit Television - CCTV). Είναι επιθυμητό για τις τράπεζες να έχουν τα δικά τους δίκτυα, για πολλούς λόγους. Εκτός από την εξάλειψη του κόστους που χρεώνουν οι τηλεφωνικές εταιρείες, οι τράπεζες θα έχουν τη δυνατότητα να αναδιοργανώνουν το δίκτυό τους γρήγορα αν ένα ATM ή ένα υποκατάστημα έχει προσωρινά ή μόνιμα αλλάξει τοποθεσία. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη λογική του DSL και της καλωδιακής τεχνολογίας, που είναι περισσότερο «δυσκίνητες» τεχνολογίες.

1.5.2.1.5 Δημόσια Ασφάλεια

Οι κυβερνητικές υπηρεσίες δημόσιας ασφάλειας, όπως η αστυνομία και η πυροσβεστική μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δίκτυα WiMAX, ώστε να υποστηρίξουν δύσκολες ιατρικές ή άλλες επείγουσες καταστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-7.



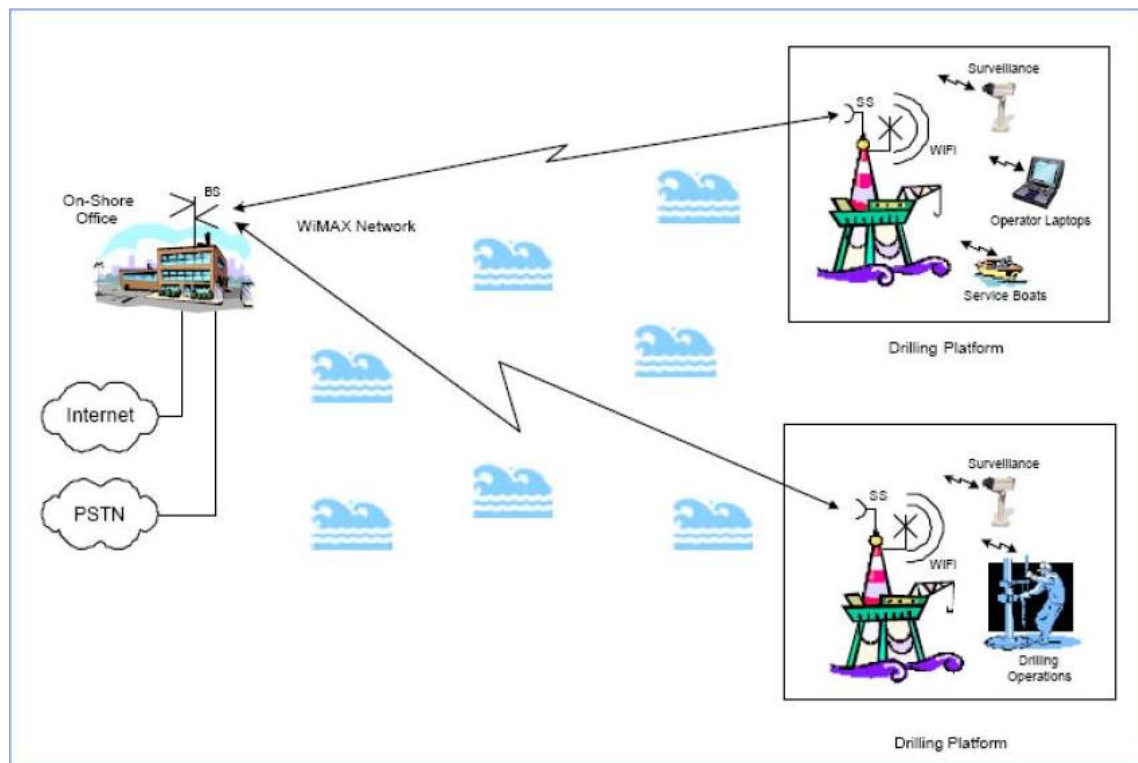
Σχήμα 1-7: Δίκτυο WiMAX για τη Δημόσια Ασφάλεια

Τα παραπάνω δίκτυα παρέχουν αμφίδρομη επικοινωνία φωνής ανάμεσα στο κέντρο ελέγχου και τις ομάδες διάσωσης που βρίσκονται στην τοποθεσία του επείγοντος συμβάντος. Επίσης, το δίκτυο μεταφέρει εικόνες βίντεο και δεδομένα από το σημείο του ατυχήματος στο κέντρο ελέγχου. Τα δεδομένα αυτά μπορούν με τη σειρά τους να μεταφερθούν σε ειδικές ομάδες ιατρικών ή άλλων ειδικών επιτελείων, τα οποία μπορούν να αναλύσουν την κατάσταση σε πραγματικό χρόνο, σαν να ήταν οι ίδιοι στον τόπο του ατυχήματος. Το QoS του WiMAX επιτρέπει στο δίκτυο να χειρίζεται όλες τις διαφορετικές καταστάσεις κυκλοφορίας των δεδομένων. Οι λύσεις WiMAX είναι εύκολα εγκαταστάσιμες,

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

1.5.2.1.6 Επικοινωνίες Offshore (σε απόσταση από την παραλία)

Οι παραγωγοί πετρελαίου και αερίου μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον εξοπλισμό WiMAX, ώστε να έχουν επικοινωνιακή ζεύξη από τις εγκαταστάσεις στην ξηρά στις πετρελαιοπηγές και πλατφόρμες στη θάλασσα, ώστε να πραγματοποιούνται απομακρυσμένες λειτουργίες, ασφάλεια και βασικές επικοινωνίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-8.

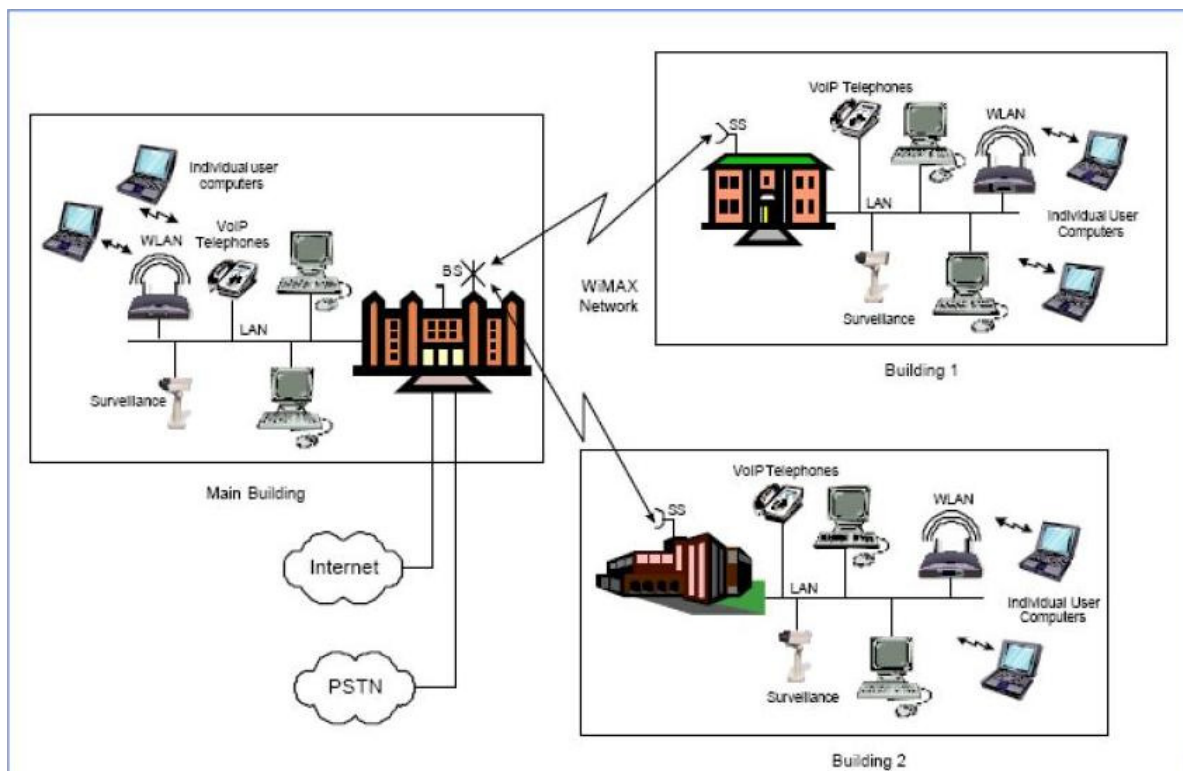


Σχήμα 1-8: Δίκτυο WiMAX για Offshore επικοινωνίες

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

1.5.2.1.7 Συνδέσεις σε Πανεπιστημιούπολεις

Κυβερνητικές υπηρεσίες, μεγάλες επιχειρήσεις, βιομηχανικές περιοχές, μεταφορικά μέσα, πανεπιστήμια και κολέγια μπορούν να χρησιμοποιούν δίκτυα WiMAX για να συνδέουν πολλαπλές τοποθεσίες και γραφεία μέσα στην περιοχή δράσης τους (π.χ. πανεπιστημιούπολη), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-9. Τα συστήματα επικοινωνίας στις πανεπιστημιούπολεις απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση, μεγάλη περιοχή κάλυψης και υψηλή ασφάλεια.

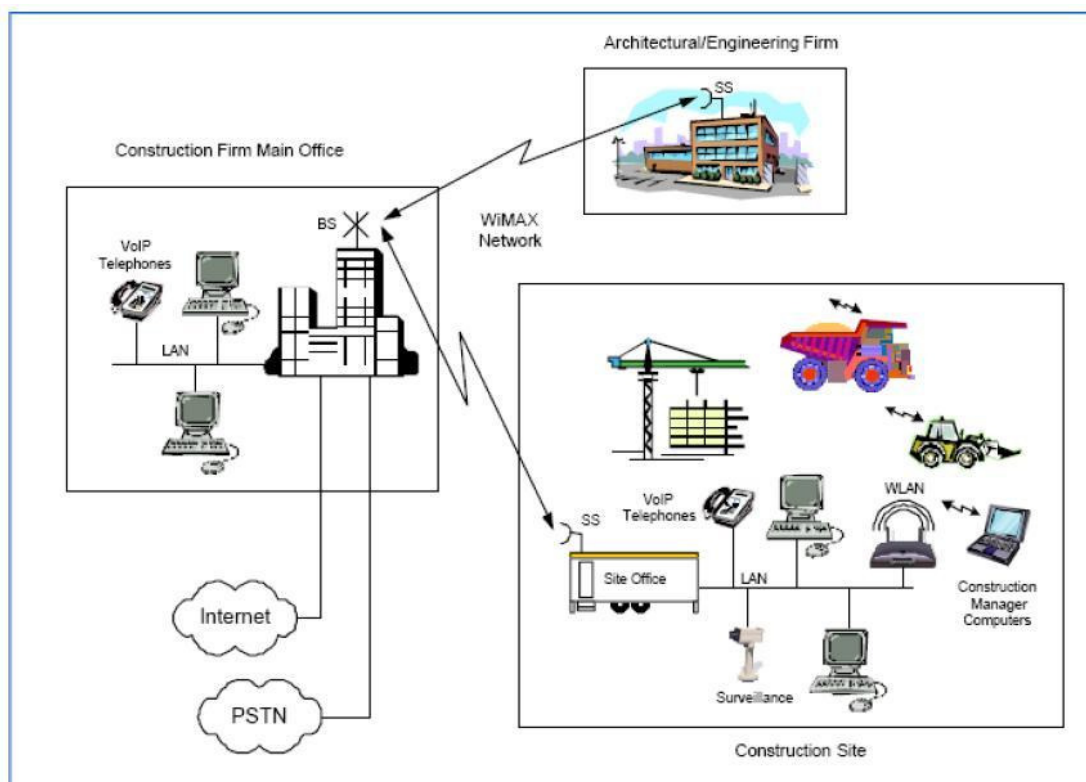


Σχήμα 1-9: Δίκτυο WiMAX σε Πανεπιστημιούπολη

Όπως σε κάθε άλλο σενάριο χρήσης, τα δίκτυα αυτά μεταφέρουν μια μίξη φωνής, δεδομένων και βίντεο, την οποία το QoS του WiMAX βοηθάει να ιεραρχεί και να βελτιστοποιεί. Χρειάζεται λιγότερος χρόνος και εξοπλισμός για να διασυνδεθεί μία πανεπιστημιούπολη με ένα δίκτυο WiMAX, καθώς δε χρειάζεται ούτε σκάψιμο, ούτε εξωτερικές κατασκευές. Μερικές πανεπιστημιούπολεις, είναι ήδη διασυνδεδεμένες με καλώδιο εδώ και πολλά χρόνια και σκάψιμο για το ξήλωμα των καλωδίων είναι αρκετά αντιπαραγωγικό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το WiMAX μπορεί να είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διασύνδεση των κτιρίων της πανεπιστημιούπολης. Ακόμα και αν υπάρχουν καλωδιωμένες εγκαταστάσεις, ο χρόνος που χρειάζεται για να εγκατασταθεί μια νέα εφαρμογή βασισμένη στο υπάρχον καλωδιωμένο δίκτυο, είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειάζεται το δίκτυο WiMAX για να στηθεί και να δουλέψει.

1.5.2.1.8 Επικοινωνίες Προσωρινών Κατασκευών

Οι εταιρείες κατασκευών μπορούν να χρησιμοποιήσουν δίκτυα WiMAX, ώστε να εγκαταστήσουν επικοινωνιακές ζεύξεις ανάμεσα στα κεντρικά γραφεία της εταιρείας και το μέρος της κατασκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-10:

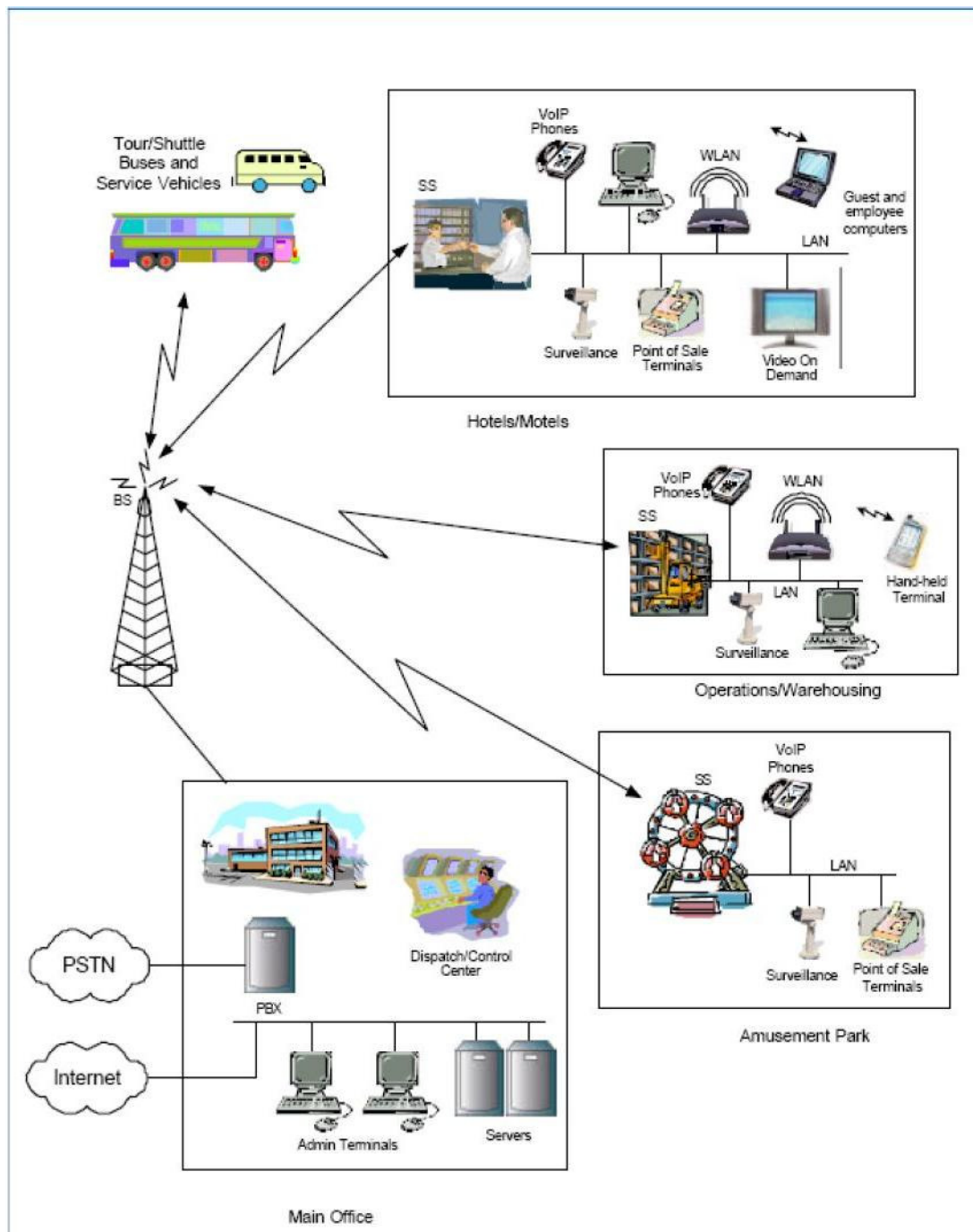


Σχήμα 1-10: Δίκτυο WiMAX για εταιρείες κατασκευών

Η γρήγορη εγκατάσταση και απεγκατάσταση του WiMAX είναι επίσης σημαντική σε αυτό το σενάριο, καθώς παρέχει γρήγορη επικοινωνία στην τοποθεσία κατασκευής με φωνή (τηλεφωνία) και δεδομένα (email, σχέδια μηχανικών και πρόσβαση στο Internet). Η παρακολούθηση μέσω βίντεο επιτελείται επίσης μέσω του δικτύου για την υποστήριξη της επιτήρησης της τοποθεσίας (ή μέρους της), που είναι δύσκολο να γίνει αλλιώς. Ένα τοπικό hot spot (σημείο πρόσβασης) μπορεί επίσης να εγκατασταθεί στην τοποθεσία της κατασκευής, επιτρέποντας στο προσωπικό να επικοινωνεί και να ανταλλάσσει δεδομένα και πληροφορίες για το χρονοδιάγραμμα. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, το ενσωματωμένο QoS του WiMAX ιεραρχεί τη δικτυακή κυκλοφορία και βελτιστοποιεί το κανάλι επικοινωνίας. Οι τοποθεσίες κατασκευής περιλαμβάνουν (και όχι μόνο) κτίρια γραφείων, ανάπτυξη κατοικιών, πετρελαϊκές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις αερίου. Καθώς η κατασκευαστική δραστηριότητα στις τοποθεσίες αυτές είναι προσωρινή, οι καλωδιωμένες λύσεις δεν είναι οι κατάλληλες. Ο εξοπλισμός του WiMAX, καθώς και φορητός, μπορεί να ξαναστηθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί και σε άλλες κατασκευαστικές τοποθεσίες.

1.5.2.1.9 Θεματικά Πάρκα

Οι υπεύθυνοι των θεματικών πάρκων μπορούν να χρησιμοποιήσουν WiMAX, ώστε να μεταφέρουν μια ευρεία ακτίνα υπηρεσιών επικοινωνίας για τα πάρκα ψυχαγωγίας τους, τις εκθέσεις, τα κέντρα φιλοξενίας και ελέγχου και τα οχήματα υπηρεσιών και λεωφορεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-11:



Σχήμα 1-11: Δίκτυο WiMAX για την εξυπηρέτηση Θεματικών Πάρκων

Το παραπάνω δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μια ευρεία ακτίνα από επικοινωνιακή κυκλοφορία, όπως αμφίδρομη επικοινωνία προς και από το κέντρο ελέγχου, παρακολούθηση μέσω βίντεο, συντήρηση δεδομένων, πρόσβαση και ανανέωση της βάσης δεδομένων, παρακολούθηση του πάρκου, βίντεο κατά βούληση και τηλεφωνία φωνής. Επίσης, βίντεο σε πραγματικό χρόνο μπορεί να μεταδοθεί στα τουριστικά λεωφορεία, παρέχοντας πληροφορίες για τις δραστηριότητες και τον καιρό στους πελάτες. Μερικές από τις απαιτήσεις-κλειδιά για ένα σύστημα σαν το παραπάνω, είναι η

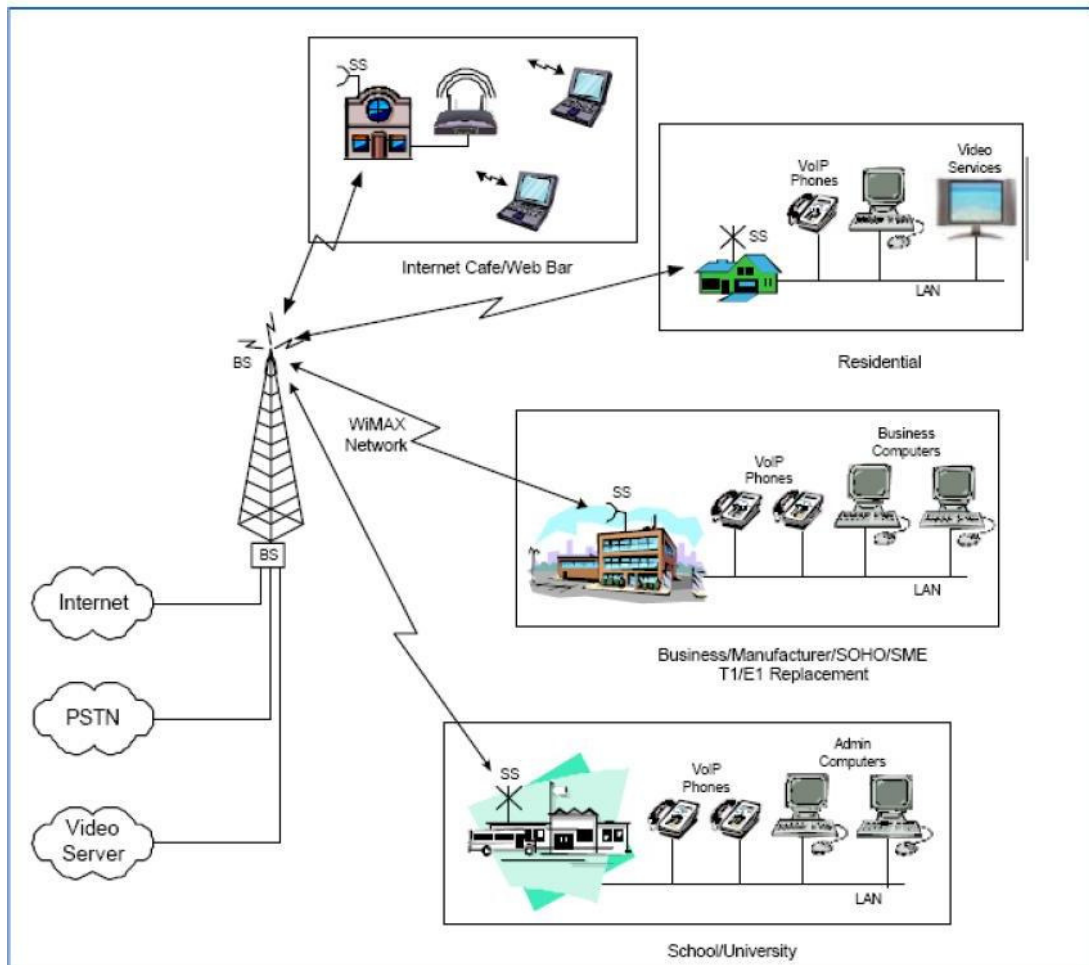
υποστήριξη για σταθερές και κινητές λειτουργίες, υψηλή ασφάλεια, κλιμακωτή αρχιτεκτονική και χαμηλή καθυστέρηση. Η ευρεία κάλυψη του WiMAX σημαίνει ότι ένα ολόκληρο πάρκο μπορεί να καλυφθεί από μόνο 11 σταθμούς βάσης, κλιμακωτά προς τα πάνω, καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για χωρητικότητα. Το QoS MAC του WiMAX βάζει σε προτεραιότητα και βελτιστοποιεί την κυκλοφορία, όπως την καθορίζει ο χειριστής του συστήματος.

1.5.2.2. Δημόσια Δίκτυα

Στα δημόσια δίκτυα πρόσβαση στις πληροφορίες έχουν διαφορετικοί χρήστες, είτε επιχειρηματίες είτε απλοί πελάτες. Τα δημόσια δίκτυα γενικά απαιτούν χαμηλού κόστους μέσα ώστε να καλύπτουν μια απρόβλεπτη περιοχή, καθώς η τοποθεσία των χρηστών δεν είναι ούτε προβλέψιμη, ούτε σταθερή. Οι κύριες εφαρμογές των δημοσίων δικτύων είναι επικοινωνίες φωνής και δεδομένων, αν και η επικοινωνία μέσω βίντεο γίνεται σιγά σιγά εξαιρετικά δημοφιλής. Η ασφάλεια είναι μια κρίσιμη απαίτηση, καθώς πολλοί χρήστες μοιράζονται το δίκτυο. Η ενσωματωμένη VLAN υποστήριξη και η κρυπτογράφηση των δεδομένων υλοποιούν την απαίτηση αυτή. Αρκετά σενάρια χρήσης δημοσίων δικτύων περιγράφονται παρακάτω.

1.5.2.2.1 Δίκτυο Πρόσβασης Πάροχου Ασύρματης Υπηρεσίας

Οι πάροχοι Ασύρματης Υπηρεσίας χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να παρέχουν συνδεσιμότητα στους πελάτες (φωνή, δεδομένα και βίντεο στους ιδιώτες και φωνή και Internet στους επιχειρηματίες), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-12:

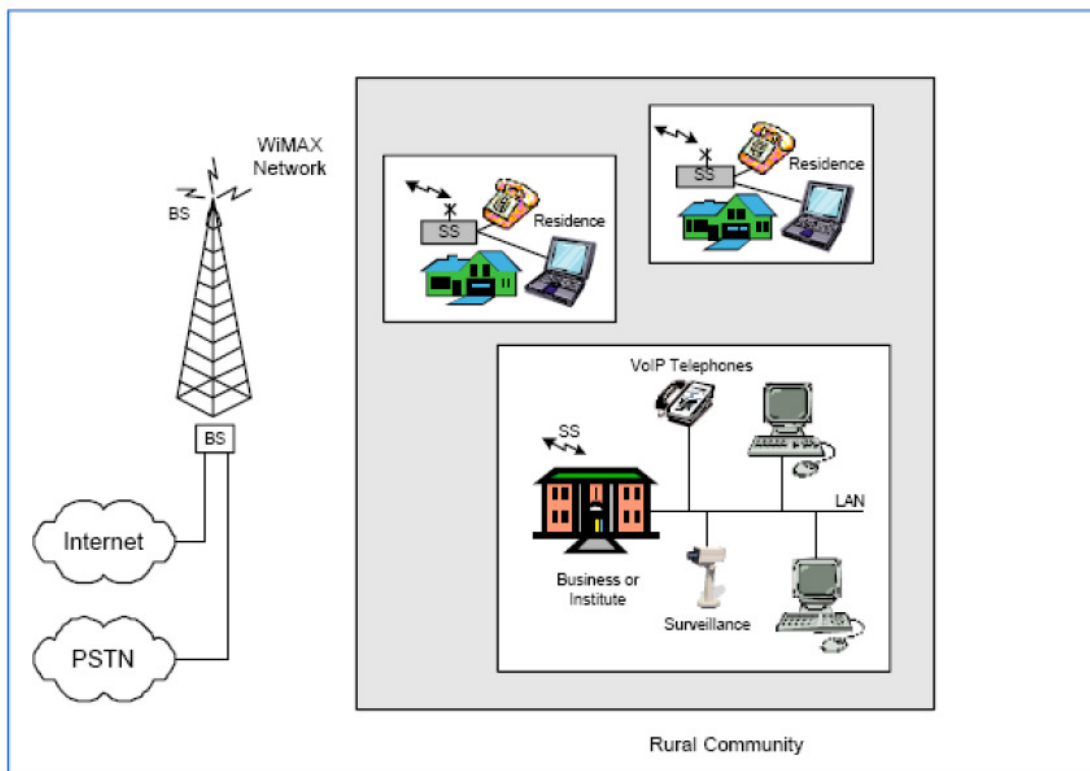


Σχήμα 1-12: Ασύρματες υπηρεσίες μέσω δικτύων WiMAX

Οι πάροχοι ασύρματων υπηρεσιών μπορεί να είναι εταιρείες που ξεκινούν την επιχείρησή τους με μικρό ή καθόλου εξοπλισμό. Καθώς το WiMAX εγκαθίσταται εύκολα, οι εταιρείες μπορούν να αναπτυχθούν εύκολα και να ανταγωνίζονται με τις ήδη υπάρχουσες εταιρείες. Ο ενσωματωμένος μηχανισμός QoS του WiMAX είναι κατάλληλος για την κυκλοφορία που χειρίζεται η επιχείρηση. Το QoS MAC προσφέρει επίσης πολυεπίπεδη υπηρεσία, ώστε να καλύπτει την ποικιλία των αναγκών σε υπηρεσίες των πελατών. Μία πλατφόρμα ενός συνηθισμένου δικτύου που προσφέρει φωνή, δεδομένα και βίντεο, είναι υψηλά ελκυστική στους τελικούς χρήστες, επειδή παρουσιάζει ευκολία και χαμηλό μηνιαίο λογαριασμό. Η υποστήριξη για πολλαπλούς τύπους υπηρεσίας επιτρέπει διαφορετικές ροές εσόδων και μειώνει το κόστος απόκτησής του από τους πελάτες, αυξάνοντας το μέσο έσοδο ανά χρήστη. Οι πάροχοι χρειάζονται μόνο ένα σύστημα πληρωμής και μία βάση δεδομένων πελατών. Οι κυψελωτές υπηρεσίες επίσης, ενδιαφέρονται για τις εφαρμογές του WiMAX. Οι εταιρείες έχουν ήδη σταθμούς βάσης, υπηρεσίες πληρωμής και μία βάση πελατών, αλλά η εγκατάσταση συστήματος WiMAX θα επεκτείνει την παρουσία τους στην αγορά.

1.5.2.2 Συνδεσιμότητα σε αγροτικές περιοχές

Οι πάροχοι υπηρεσιών χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να μεταφέρουν υπηρεσίες σε υποβαθμισμένες αγορές, σε αγροτικές περιοχές και στα προάστια των πόλεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-13:



Σχήμα 1-13: Δίκτυο WiMAX σε αγροτική περιοχή

Η μεταφορά της συνδεσιμότητας αυτής είναι κρίσιμη σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες και υποβαθμισμένες περιοχές των ανεπτυγμένων χωρών, όπου υπάρχει ελάχιστος ή καθόλου εξοπλισμός. Η συνδεσιμότητα αυτή παρέχει πολύ χρήσιμη τηλεφωνία φωνής και υπηρεσία Internet. Από τότε που η λύση WiMAX παρέχει εκτεταμένη κάλυψη, είναι πολύ πιο αποτελεσματική οικονομικά από την καλωδιωμένη τεχνολογία σε περιοχές με μικρότερη πυκνότητα πληθυσμού. Οι λύσεις WiMAX μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα, παρέχοντας επικοινωνιακές ζεύξεις σε αυτές τις υποβαθμισμένες περιοχές, παρέχοντας ένα πιο ασφαλές περιβάλλον, βοηθώντας στη βελτίωση των τοπικών οικονομιών.

1.5.3 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από τα παραπάνω, η τεχνολογία WiMAX και τα προϊόντα της στοχεύουν να καλύψουν μία ευρεία γκάμα εφαρμογών για τις αγορές πολλών χωρών του πλανήτη. Τα παραπάνω σενάρια είναι αντιπροσωπευτικά και είναι ένα καλό παράδειγμα

χρήσης του νέου αυτού προτύπου. Το WiMAX αν και βρίσκεται ακόμη σε νηπιακό στάδιο ανάπτυξης, εκτιμάται ότι τα επόμενα χρόνια θα προσελκύσει εκατομμύρια συνδρομητές.

Η μόνιμη και ασύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο επιτρέπει ακόμη και στον πιο απλό χρήστη να αξιοποιήσει ένα μεγάλο πλήθος νέων εφαρμογών, που μέχρι στιγμής δεν ήταν διαθέσιμες, είτε λόγω χαμηλού εύρους ζώνης, είτε λόγω των περιορισμών που θέτει η χρήση καλωδίων [1].

Η τηλεφωνία Voice over IP, που επιτρέπει την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων μέσω Internet, μέχρι τώρα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους που διέθεταν σύνδεση στο διαδίκτυο υψηλών ταχυτήτων. Με το WiMAX, το γρήγορο Internet είναι διαθέσιμο σε κάθε σημείο μιας μεγάλης πόλης και στα περισσότερα τμήματα της χώρας. Μπορείτε να φανταστείτε τον εαυτό σας να μετακινείται με ένα μέσο μαζικής μεταφοράς ή με το αυτοκίνητό του, συνομιλώντας τηλεφωνικά με άτομα που βρίσκονται στην άλλη άκρη του κόσμου, με πολύ χαμηλή ή και μηδενική χρέωση. Μάλιστα οι ταχύτητες που υπόσχεται το WiMAX είναι τόσο υψηλές, που εκτός από τη μετάδοση φωνής, το πιθανότερο είναι ότι θα καταστεί εφικτή και η βιντεοτηλεφωνία μέσω διαδικτύου. Εφαρμογές όπως το Skype, το ICQ ή το MSN Messenger που ήδη επιτρέπουν την πραγματοποίηση συνομιλίας με ήχο ή και εικόνα, θα μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν σε φορητούς υπολογιστές και PDA εν κινήσει, καθιστώντας απλή υπόθεση την αδιάλειπτη και οικονομική επικοινωνία. Όμως οι διευκολύνσεις που αναμένεται να φέρει το WiMAX στον καθημερινό τρόπο ζωής δε σταματούν εδώ.

Η παρακολούθηση video on demand και online τηλεοπτικών προγραμμάτων ή ραδιοφωνικών μεταδόσεων, θα επιτρέπει σε κάποιο φίλαθλο να παρακολουθεί τον αγώνα της αγαπημένης του ομάδας εν κινήσει, μέσω Internet, στον επαγγελματία να ενημερώνεται για τις τιμές των μετοχών κατά τη διαδρομή από το σπίτι προς το χώρο εργασίας του, αλλά και στον μουσικόφιλο χρήστη να γεμίζει τις ώρες ενός πολύωρου πληκτικού ταξιδιού αγοράζοντας τραγούδια mp3 και video clips από online καταστήματα. Η αποστολή ενός e-mail με μεγάλο όγκο συνημμένων αρχείων, ενώ βρίσκεται ο χρήστης καθοδόν, σήμερα είναι πρακτικά ανέφικτη, εκτός φυσικά αν χρησιμοποιεί το –όχι και τόσο οικονομικό– 3G. Το WiMAX με πολλαπλάσιες ταχύτητες θα κοστίζει σημαντικά λιγότερο, επιτρέποντας τη διεκπεραίωση κάθε online εργασίας μέσα σε ελάχιστα λεπτά.

Τα Wireless Metropolitan Networks, όπως αυτά που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε πόλεις της Ελλάδας και του εξωτερικού, αυτή τη στιγμή αντιμετωπίζουν ως σημαντικό πρόβλημα τη μειωμένη εμβέλεια της τεχνολογίας Wi-Fi, παρουσιάζοντας μεγάλα κενά στις περιοχές κάλυψής τους. Ως εκ τούτου, τα μέλη των συλλόγων που τα διαχειρίζονται αναγκάζονται να τοποθετούν κεραιές σε πολύ κοντινές αποστάσεις, ώστε να επιτευχθεί πληρέστερη κάλυψη. Το WiMAX θα επιτρέψει τη δημιουργία ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων που θα καλύπτουν αξιόπιστα μεγάλες περιοχές. Χρήστες που βρίσκονται στην

ίδια μεγαλούπολη, αλλά σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων μεταξύ τους, θα μπορούν να ανταλλάζουν αρχεία δημιουργώντας μεταξύ τους ένα προστατευμένο ιδιωτικό δίκτυο, στο οποίο δε θα έχουν πρόσβαση τρίτα άτομα, παρά μόνο αν γνωρίζουν το μυστικό κλειδί κρυπτογράφησης.

Σαν νέα τεχνολογία, το WiMAX διαθέτει σε παγκόσμια κλίμακα, αρκετά χαμηλή συνδρομητική βάση εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες πρόσβασης στο Internet, όπως οι συνδέσεις ADSL, Cable, ISDN ή μισθωμένων κυκλωμάτων. Αυτό είναι κάτι το δικαιολογημένο, αν αναλογιστεί κανείς ότι τα δίκτυα WiMAX δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί ιδιαίτερα.

Κατά το έτος του 2005 οι συνδρομητές WiMAX δεν ξεπερνούσαν τα 2 εκατομμύρια συνολικά σε Ευρώπη, Αμερική και Ασία, αλλά κατά το 2010 ξεπέρασαν τα 20 εκατομμύρια. Στις χρονιές που ακολουθούν και πιο συγκεκριμένα το 2015, η αύξηση μάλιστα αναμένεται να συνεχιστεί με ανάλογους ρυθμούς, φθάνοντας ή και ξεπερνώντας τα 100 εκατομμύρια. Στους υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξής του θα συμβάλλει φυσικά η ευκολία εγκατάστασης ενός δικτύου WiMAX, αλλά και η εύκολη εγγραφή και χρήση του από τους συνδρομητές.

Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι μετά τον τυφώνα που έπληξε τη Νέα Ορλεάνη των Ηνωμένων Πολιτειών και τις καταστροφές που επέφερε στο ενσύρματο δίκτυο τηλεπικοινωνιών, τα σωστικά συνεργεία προχώρησαν στην άμεση δημιουργία δικτύου WiMAX για την κάλυψη των αναγκών επικοινωνίας στην περιοχή.

1.6 Δομή ενός δικτύου WiMAX

Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται ένα δίκτυο WiMAX, ώστε να παρέχει υπηρεσίες διαδικτύου στους συνδρομητές του, είναι αρκετά απλός. Ο πάροχος υπηρεσιών Internet εγκαθιστά σταθμούς βάσης, δηλαδή τις λεγόμενες κεραιές, οι οποίες αναλαμβάνουν τη διανομή του σήματος σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Στη συνέχεια, ο συνδρομητής εγκαθιστά στο χώρο του τον απαραίτητο εξοπλισμό, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ένας απλός υπολογιστής με υποστήριξη WiMAX, είτε ένας WiMAX router (δρομολογητής) αν η σύνδεση πρόκειται να μοιραστεί σε περισσότερους από έναν υπολογιστές στον ίδιο χώρο. Μάλιστα από το 2008 υπάρχουν στην αγορά οι πρώτοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές με εγγενή υποστήριξη δικτύων WiMAX, με τον ίδιο τρόπο που συμβαίνει αυτό με την τεχνολογία Wi-Fi. Για παλαιότερους υπολογιστές φυσικά θα διατεθούν κάρτες επέκτασης σε μορφή PCI για desktop συστήματα, PCMCIA για laptops ή SDIO για Pocket PC, ενώ ήδη στο εξωτερικό έχει αρχίσει η διάθεση των WiMAX router που αναλαμβάνουν να μοιράσουν τη σύνδεση Internet σε 2 ή περισσότερους υπολογιστές ενός τοπικού δικτύου.

Σε γενικές γραμμές εκτιμάται ότι ο χρόνος που θα χρειάζεται ένας απλός χρήστης για να συνδεθεί για πρώτη φορά σε ένα δίκτυο WiMAX δεν θα ξεπερνά τα 3 λεπτά, δεδομένου ότι τα βήματα της σύνδεσης είναι πολύ απλά και συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Ο χρήστης ενεργοποιεί την ασύρματη σύνδεση WiMAX στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ή PDA του.
- 2) Το διαθέσιμο δίκτυο εντοπίζεται και αναφέρεται ως εντός εμβέλειας.
- 3) Ο χρήστης πληκτρολογεί ένα κλειδί εισόδου, το οποίο του έχει γνωστοποιηθεί από τον πάροχο υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Service Provider - ISP).
- 4) Η σύνδεση ολοκληρώνεται με επιτυχία και ο χρήστης είναι έτοιμος να πλοηγηθεί στο Internet.

Σημειώνεται δε, ότι η παραπάνω διαδικασία θα ακολουθηθεί μόνο την πρώτη φορά που θα συνδεθεί κανείς σε ένα δίκτυο WiMAX. Από τη στιγμή που οι απαραίτητες ρυθμίσεις (όνομα δικτύου, κλειδί πρόσβασης) αποθηκευτούν στη συσκευή του, τις επόμενες φορές η σύνδεση θα πραγματοποιείται σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Ουσιαστικά, ενεργοποιώντας κάποιος τον ηλεκτρονικό του υπολογιστή, μόλις ολοκληρωθεί η εκκίνηση του λειτουργικού συστήματος, θα έχει ήδη συνδεθεί στο προκαθορισμένο δίκτυο WiMAX και κατ' επέκταση στο Internet.

Σε ότι αφορά τις χρεώσεις, το WiMAX δε θα διαφοροποιείται σε σχέση με τη σημερινή τεχνολογία ADSL. Ως εκ τούτου, στα κοινά πακέτα πρόσβασης δε θα υφίσταται χρονοχρέωση ή ογκοχρέωση, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να παραμένει μόνιμα συνδεδεμένος στο Internet, «κατεβάζοντας» κάθε είδους αρχεία, χωρίς να ανησυχεί για υπερβολικές χρεώσεις. Φυσικά, δεν αποκλείεται να διατεθούν και προαιρετικά πρόσθετα προγράμματα ογκοχρέωσης ή χρονοχρέωσης για τους λεγόμενους "light users", όπως ήδη ισχύει σήμερα για το ADSL.

Σε γενικές γραμμές ο τρόπος λειτουργίας του WiMAX είναι ο εξής [6]:

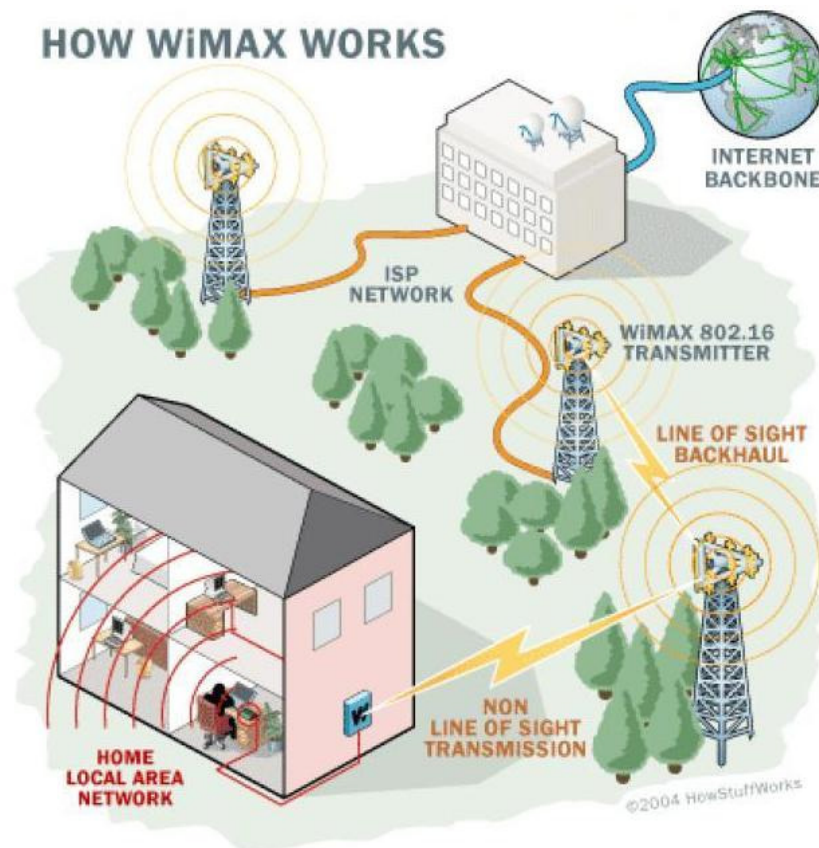
Με πρακτικούς όρους, το WiMAX λειτουργεί παρόμοια με το WiFi, αλλά σε υψηλότερους ρυθμούς, σε μεγαλύτερες αποστάσεις και για ένα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Το WiMAX θα μπορούσε ενδεχομένως να διαγράψει τις αστικές ή προαστιακές περιοχές που δεν έχουν πρόσβαση στο ευρυζωνικό Internet, γιατί οι τηλεφωνικές εταιρείες δεν έχουν τον αναγκαίο εξοπλισμό σε καλώδια.

Ένα σύστημα WiMAX αποτελείται από δύο μέρη:

Έναν WiMAX tower (πομπό), παρόμοιο σε σκεπτικό με έναν κυψελωτό tower. Ένας τέτοιος πομπός μπορεί να παρέχει κάλυψη σε μια ευρεία περιοχή του μεγέθους των 3.000 τετραγωνικών μιλίων (8.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα).

Ένα WiMAX δέκτη. Ο δέκτης και η κεραία μπορεί να είναι ένα μικρό κουτί ή μία κάρτα PCMCIA, ή μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα laptop όπως γίνεται και η πρόσβαση στο Wi-Fi.

Ένας σταθμός βάσης WiMAX μπορεί να συνδεθεί άμεσα με το Internet χρησιμοποιώντας μία καλωδιακή σύνδεση μεγάλου εύρους ζώνης (π.χ. μια γραμμή T3). Μπορεί επίσης να συνδεθεί με κάποιον άλλο σταθμό WiMAX χρησιμοποιώντας μια μικροκυματική ζεύξη οπτικής επαφής. Αυτή η σύνδεση με ένα δεύτερο πομπό (που συχνά αναφέρεται ως backhaul), μαζί με την ικανότητα ενός απλού tower να καλύπτει μέχρι και 3.000 τετραγωνικά μίλια, είναι τα στοιχεία που επιτρέπουν στο WiMAX να παρέχει κάλυψη σε απομακρυσμένες περιοχές.



Σχήμα 1-14: Τρόπος λειτουργίας του δικτύου WiMAX

Αυτό που φαίνεται από το Σχήμα 1-14 και το Σχήμα 1-15 είναι ότι το WiMAX μπορεί να παρέχει δύο τρόπους ασύρματης υπηρεσίας:

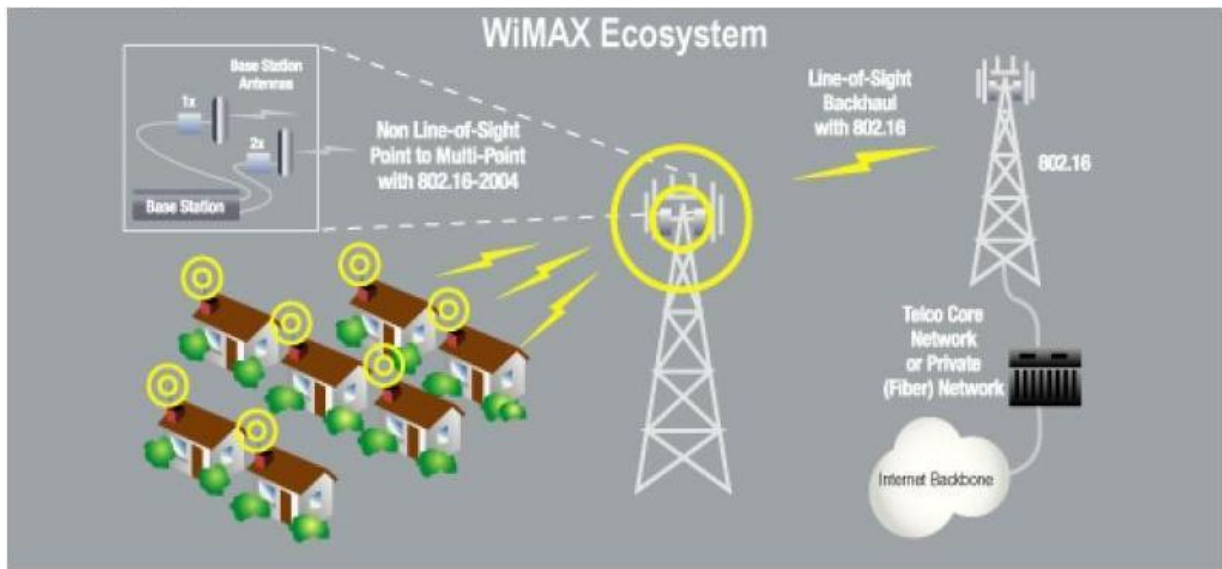
1. Μη οπτικής επαφής, τύπου υπηρεσίας Wi-Fi, όπου μια μικρή κεραία στον υπολογιστή συνδέεται με το tower. Σε αυτή τη μορφή, το WiMAX χρησιμοποιεί μια χαμηλότερη ακτίνα συχνοτήτων (2-11 GHz). Οι εκπομπές μικρότερου μήκους κύματος δε διακόπτονται τόσο εύκολα από φυσικά εμπόδια, είναι ικανά να διαθλαστούν ή να σκεδαστούν γύρω από αυτά.

2. Οπτικής επαφής, όπου μια σταθερή κεραία τύπου πιάτου κοιτάζει άμεσα το WiMAX tower από μια οροφή ή ένα ύψωμα. Η σύνδεση οπτικής επαφής είναι δυνατότερη και πιο σταθερή, έτσι είναι δυνατό να σταλούν περισσότερα δεδομένα με λιγότερα λάθη. Οι εκπομπές οπτικής επαφής χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες, φτάνοντας τα 66 GHz. Σε υψηλότερες συχνότητες, υπάρχει μικρότερη παρεμβολή και περισσότερο εύρος ζώνης.

Το WiMAX λειτουργεί στις ίδιες γενικές αρχές όπως το Wi-Fi, στέλνει δεδομένα από τον έναν υπολογιστή στον άλλον μέσω ραδιοσημάτων. Ένας υπολογιστής (desktop ή laptop) εξοπλισμένος με WiMAX λαμβάνει τα δεδομένα από τον πομπό WiMAX, χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση για να αποτρέπουν χρήστες χωρίς άδεια να κλέβουν την πρόσβαση.

Η γρηγορότερη σύνδεση Wi-Fi μπορεί να μεταδώσει μέχρι 54 Mbps στις βέλτιστες συνθήκες. Το WiMAX μπορεί να χειριστεί ως κα 70 Mbps. Αυτά τα Mbps μπορεί να χρησιμοποιούνται από επιχειρήσεις ή ιδιώτες και εξισώνουν τα Mbps που μεταφέρουν τα καλωδιωμένα modem.

Η μεγαλύτερη διαφορά δεν είναι η ταχύτητα, είναι η απόσταση. Ενώ η ακτίνα του Wi-Fi είναι 100 πόδια (30 μέτρα), η κάλυψη του WiMAX φτάνει τα 30 μίλια (50 χιλιόμετρα). Η αυξημένη ακτίνα οφείλεται στις χρησιμοποιούμενες συχνότητες και στην ισχύ του πομπού.



Σχήμα 1-15: LOS και NLOS σε δίκτυο WiMAX

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη λειτουργία του WiMAX είναι η εξής:

Ένας πάροχος Internet εγκαθιστά ένα σταθμό βάσης WiMAX 10 μίλια από το σπίτι του πελάτη. Αν ο πελάτης αγοράσει έναν υπολογιστή με εξοπλισμό WiMAX (ή αναβαθμίσει τον παλιό), θα γίνει το εξής:

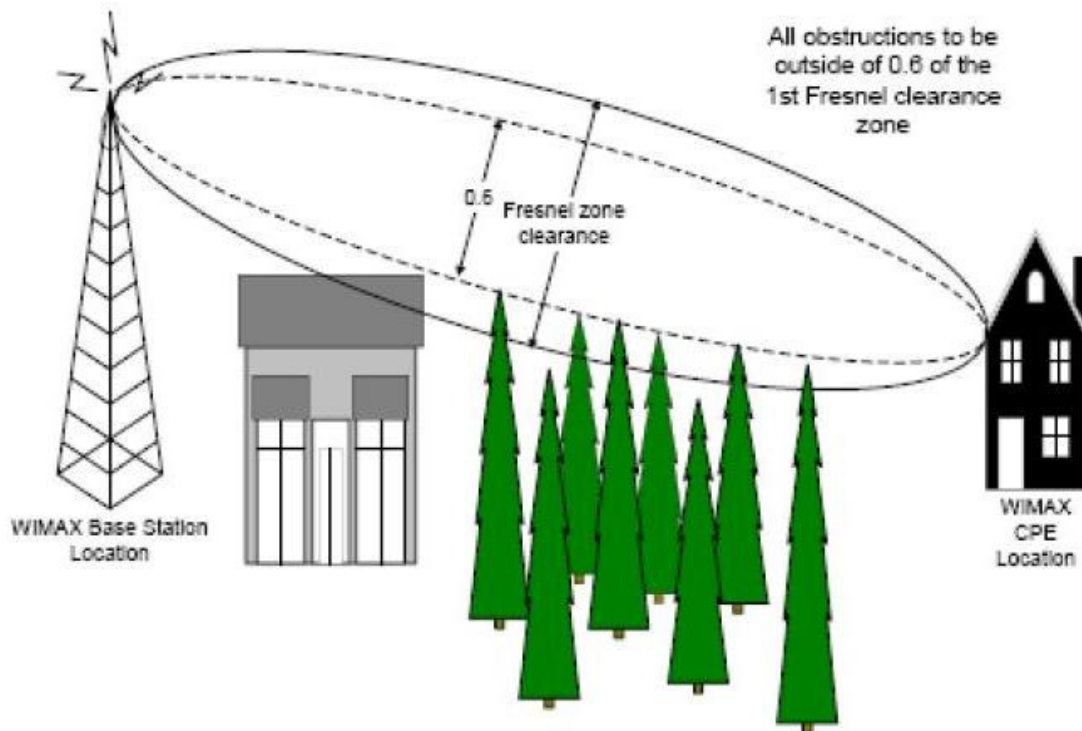
Ο πελάτης λαμβάνει έναν ειδικό κωδικό κρυπτογράφησης που δίνει πρόσβαση στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα από το Internet στον υπολογιστή με μηνιαία πληρωμή. Το κόστος όμως είναι πολύ χαμηλότερο από τα τρέχοντα δεδομένα, καθώς ο πάροχος δεν είχε τα έξοδα εγκατάστασης καλωδίων.

Αν υπάρχει δίκτυο στο σπίτι, τα πράγματα δεν αλλάζουν και πολύ. Ο σταθμός βάσης WiMAX στέλνει τα δεδομένα σε έναν WiMAX router, ο οποίος αναλαμβάνει να στείλει τα δεδομένα στους συνδεδεμένους στο δίκτυο υπολογιστές. Γίνεται επίσης, να συνδυαστεί το Wi-Fi με το WiMAX κάνοντας το router να στείλει τα δεδομένα στους υπολογιστές μέσω Wi-Fi. Αν οι υπολογιστές με εξοπλισμό WiMAX γίνουν κοινό φαινόμενο, τότε το VoIP θα είναι μία ακόμη πραγματικότητα. Αν όλα όσα υπόσχεται το WiMAX γίνουν πράξη, σχεδόν καθένας με laptop θα κάνει κλήσεις με VoIP.

1.7 Εισαγωγή στη μετάδοση χωρίς οπτική επαφή (non-line-of-sight, NLOS)

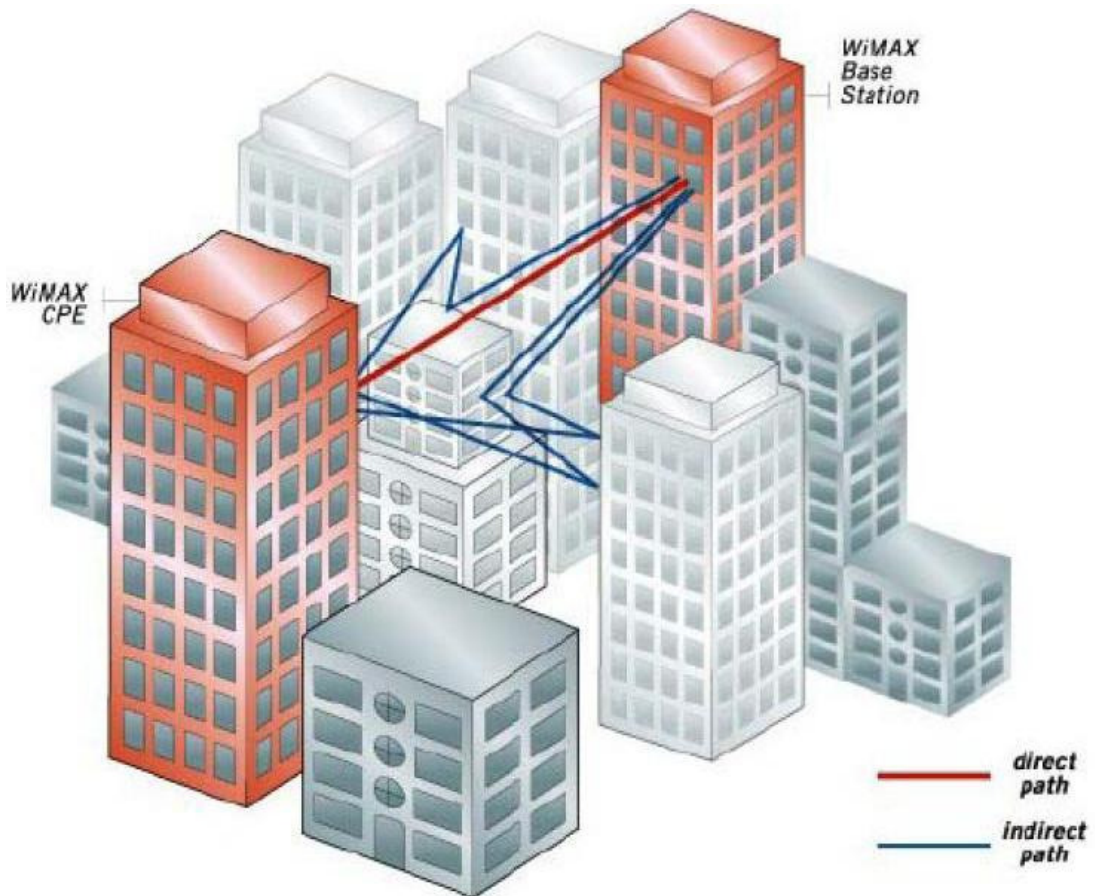
Ενώ οι περισσότερες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες αυτόν τον καιρό για σταθερή ευρυζωνική ασύρματη υπηρεσία μπορούν μόνο να παρέχουν LOS κάλυψη, η τεχνολογία WiMAX έχει αναπτυχθεί ώστε να παρέχει έξοχη κάλυψη NLOS. Η προχωρημένη τεχνολογία WiMAX, προσφέρει μεγάλες αποστάσεις κάλυψης ως και 50 χιλιόμετρα κάτω από συνθήκες LOS και τυπική ακτίνα κυψέλης 8 χιλιομέτρων κάτω από συνθήκες NLOS [7].

Ένας ραδιοδίαυλος σε ένα σύστημα ασύρματων τηλεπικοινωνιών συχνά περιγράφεται ως LOS (line of sight, οπτικής επαφής) είτε NLOS (non line of sight, μη οπτικής επαφής). Σε μία ζεύξη οπτικής επαφής, το σήμα ταξιδεύει σε ένα άμεσο και ανεμπόδιο μονοπάτι από τον πομπό στο δέκτη. Μία τέτοια ζεύξη απαιτεί το περισσότερο μέρος της πρώτης ζώνης Fresnel να είναι καθαρό από οποιοδήποτε εμπόδιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-16. Αν αυτό το κριτήριο δεν επαληθεύεται, τότε υπάρχει μια σημαντική μείωση στην ισχύ του σήματος. Το ποσοστό της ζώνης που πρέπει να είναι χωρίς εμπόδια, εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση ανάμεσα σε πομπό και δέκτη.



Σχήμα 1-16: Ζώνη Fresnel

Σε μία ζεύξη μη οπτικής επαφής, το σήμα φτάνει στο δέκτη μέσω ανακλάσεων, σκεδάσεων και περιθλάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-17. Το σήμα που φτάνει στο δέκτη, περιλαμβάνει στοιχεία από το απευθείας μονοπάτι και πολλαπλά στοιχεία από άλλα μονοπάτια λόγω ανάκλασης, περίθλασης και σκέδασης. Αυτά τα σήματα έχουν διαφορετική διασπορά καθυστέρησης (delay spreads), εξασθένιση και πόλωση σχετικά με αυτό του απευθείας μονοπατιού.



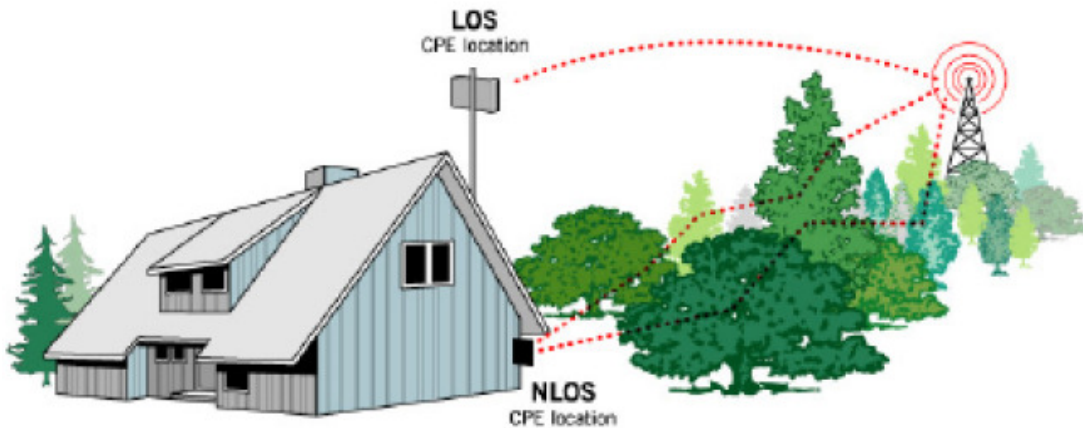
Σχήμα 1-17: Διάδοση NLOS

Τα φαινόμενα πολλαπλής διαδρομής μπορούν επίσης να προκαλέσουν την αλλαγή της πόλωσης του σήματος. Γι' αυτό, η χρήση πόλωσης ως μέσο επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, όπως συνήθως γίνεται στα LOS περιβάλλοντα, μπορεί να είναι προβληματική στις εφαρμογές NLOS. Το πώς ένα ραδιοσύστημα χρησιμοποιεί αυτά τα πολυδιαδρομικά σήματα ως πλεονέκτημα, είναι το κλειδί στην παροχή υπηρεσιών στα NLOS περιβάλλοντα. Ένα προϊόν το οποίο αυξάνει την ισχύ, ώστε να διεισδύει στα εμπόδια (μερικές φορές αποκαλείται near line of sight) δεν είναι τεχνολογία NLOS, γιατί η προσέγγιση αυτή ακόμα εξαρτάται σε ένα ισχυρό άμεσο μονοπάτι χωρίς να χρησιμοποιεί ενέργεια παρούσα στα έμμεσα σήματα. Οι συνθήκες κάλυψης LOS και NLOS εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά διάδοσης του περιβάλλοντός τους, την απώλεια διαδρομής και τους πόρους της ραδιοζεύξης.

Υπάρχουν πολλαπλά πλεονεκτήματα που κάνουν τις εγκαταστάσεις NLOS επιθυμητές. Για παράδειγμα, οι αυστηρές σχεδιαστικές απαιτήσεις και οι περιορισμοί ύψους κεραιών συχνά δεν επιτρέπουν στην κεραία να εγκατασταθεί για LOS. Για μεγάλης κλίμακας γειτονικές κυψελωτές εφαρμογές, όπου η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας είναι σημαντικότερη, χαμηλώνοντας την κεραία βοηθάει ώστε να μειωθεί η ομοδιαυλική παρεμβολή ανάμεσα στις γειτονικές κυψέλες. Αυτό συχνά αναγκάζει το σταθμό βάσης να

λειτουργεί σε συνθήκες NLOS. Τα συστήματα LOS δεν μπορούν να μειώσουν τα ύψη των κεραιών, γιατί αν γίνει αυτό θα χειροτερεύσει η θέα για το άμεσο μονοπάτι από το σταθμό εργασίας στο σταθμό βάσης.

Η τεχνολογία NLOS, επίσης, μειώνει τα έξοδα εγκατάστασης κάνοντας την επίπονη συνήθως διαδικασία της εγκατάστασης πραγματικότητα και διευκολύνοντας την τοποθέτηση αρκετών σταθμών εργασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-18. Η τεχνολογία αυτή επίσης βελτιώνει την ακρίβεια των εργαλείων σχεδιασμού NLOS.



Σχήμα 1-18: Τοποθεσία CPE (customer-premises equipment) με LOS και με NLOS

Η τεχνολογία NLOS και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά του WiMAX κάνουν δυνατή τη χρήση εσωτερικών σταθμών εργασίας. Αυτό έχει δύο κύριες προκλήσεις. Πρώτον, ξεπερνάει τις απώλειες από διεισδύσεις στα κτίρια και δεύτερον, καλύπτονται λογικές αποστάσεις με τη μικρότερη ισχύ εκπομπής και κέρδος κεραίας που συνδέονται με τους εσωτερικούς σταθμούς εργασίας. Το WiMAX δίνει αυτήν τη δυνατότητα και η κάλυψη NLOS, μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο λόγω των προαιρετικών δυνατοτήτων του προτύπου.

Η τεχνολογία WiMAX λύνει ή περιορίζει τα προβλήματα που δημιουργούνται από τις συνθήκες NLOS χρησιμοποιώντας:

- Τεχνολογία OFDM
- Sub-Channelization
- Κατευθυντικές Κεραίες
- Ποικιλία εκπομπής και λήψης
- Προσαρμόσιμη Διαμόρφωση
- Τεχνικές Διόρθωσης Λαθών
- Έλεγχο ισχύος

1.7.1 Sub-Channelization

Το sub-channelization στο uplink είναι μια επιλογή για το WiMAX. Χωρίς το sub-channelization, οι απαγορεύσεις των κανονισμών και η ανάγκη για χαμηλού κόστους αποτελεσματικούς σταθμούς εργασίας, τυπικά προκαλούν τους πόρους της ζεύξης να είναι ασύμμετροι και αυτό αναγκάζει την ακτίνα του συστήματος να είναι περιορισμένη ως προς το uplink. Το sub-channeling επιτρέπει στους πόρους της ζεύξης να είναι ισορροπημένοι, ώστε τα κέρδη του συστήματος να είναι παρόμοια για την ευθεία και την ανάστροφη ζεύξη. Το sub-channeling συγκεντρώνει την ισχύ εκπομπής σε λιγότερα φέροντα OFDM, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-19. Αυτό αυξάνει το κέρδος του συστήματος το οποίο μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για να επεκτείνει την ακτίνα του συστήματος, ξεπερνώντας τις απώλειες διείσδυσης στα κτίρια, είτε για να μειώσει την κατανάλωση ισχύος από το σταθμό εργασίας. Η χρήση sub-channeling επεκτείνεται ακόμα περισσότερο στην ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA), ώστε να επιτρέψει μια πιο ευέλικτη χρήση των πόρων που υποστηρίζουν νομαδική ή κινητή λειτουργία.



Transmitted downstream OFDM spectrum from the base station, each slot represents a RF carrier



Transmitted upstream OFDM spectrum from the CPE, all carriers are transmitted but at a quarter of the level of the base station, hence the range will be less



Transmitted upstream OFDM spectrum from the CPE using only a quarter of the carriers, but at the same level as the base station, hence the range will be the same with a quarter of the capacity

Σχήμα 1-19: Το αποτέλεσμα του sub-channelization

1.7.2 Κεραίες για Εφαρμογές Σταθερής Ασύρματης Υπηρεσίας

Οι κατευθυντικές κεραίες αυξάνουν το περιθώριο εξασθένισης με την προσθήκη περισσότερου κέρδους. Αυτό αυξάνει τη διαθεσιμότητα της ζεύξης. Η διάδοση καθυστέρησης μειώνεται ακόμα περισσότερο με τις κατευθυντικές κεραίες και στο σταθμό βάσης και στο σταθμό υπηρεσίας. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, καταπιέζει όποιο σήμα πολυδιαδρομής φτάνει με πλευρικούς ή οπίσθιους λοβούς. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων είναι αποδεδειγμένη και δοκιμασμένη σε επιτυχείς εγκαταστάσεις, όπου η υπηρεσία λειτουργεί υπό σημαντικές NLOS απώλειες.

Τα συστήματα προσαρμοζόμενων κεραιών είναι ένα προαιρετικό σημείο του προτύπου 802.16™. Έχουν ιδιότητες οδήγησης ακτίνας που μπορούν να οδηγήσουν την προσοχή τους σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ μεταδίδεται, ένα σήμα μπορεί να περιοριστεί στην επιθυμητή κατεύθυνση του δέκτη. Αντίθετα, κατά τη λήψη του σήματος, τα συστήματα προσαρμοζόμενων κεραιών μπορούν να εστιάσουν μόνο στην κατεύθυνση από όπου το επιθυμητό σήμα έρχεται προς το δέκτη. Επίσης, έχουν την ιδιότητα να καταπιέσουν την ομοδιαυλική παρεμβολή από άλλες τοποθεσίες. Τα συστήματα αυτά, θεωρούνται τα μελλοντικά στοιχεία τα οποία μπορούν τελικά να βελτιώσουν την επαναχρησιμοποίηση φάσματος και χωρητικότητα ενός δικτύου WiMAX.

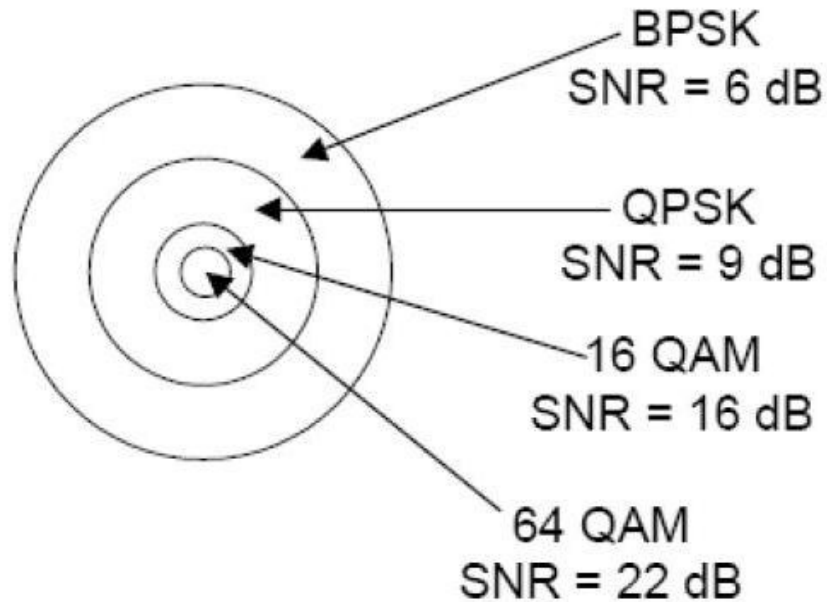
1.7.3 Ποικιλία Εκπομπής και Λήψης

Ποικίλα σχήματα χρησιμοποιούνται για να εκμεταλλευτούν το πλεονέκτημα της πολυδιαδρομής και των ανακλάσεων που υφίστανται τα σήματα κατά τις NLOS συνθήκες. Η ποικιλία είναι ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό στο WiMAX. Οι αλγόριθμοι ποικιλίας που προσφέρει το WiMAX στον πομπό και το δέκτη αυξάνουν τη διαθεσιμότητα του συστήματος. Η επιλογή ποικίλων σχημάτων εκπομπής του WiMAX χρησιμοποιεί κωδικοποίηση χώρου και χρόνου ώστε να παρέχει ανεξαρτησία πηγής εκπομπής. Αυτό μειώνει τις απαιτήσεις περιθωρίου εξασθένησης και πολεμά την παρεμβολή. Για ποικιλία λήψης, υπάρχουν ποικίλες συνδυαστικές τεχνικές ώστε να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα του συστήματος. Για παράδειγμα, ο μέγιστος λόγος συνδυασμών (Maximal-Ratio Combining - MRC) εκμεταλλεύεται δύο ξεχωριστές αλυσίδες λήψης ώστε να ξεπεραστεί η εξασθένηση και να μειωθεί η απώλεια του μονοπατιού. Η ποικιλία σχημάτων έχει αποδειχτεί ότι είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο ώστε να καταπολεμηθούν τα προβλήματα της NLOS διάδοσης.

1.7.4 Προσαρμόσιμη Διαμόρφωση (Adaptive Modulation)

Η προσαρμόσιμη διαμόρφωση, επιτρέπει στο σύστημα WiMAX να προσαρμόσει το σχήμα διαμόρφωσης του σήματος εξαρτημένο στις συνθήκες SNR της ραδιοζεύξης. Όταν η ραδιοζεύξη έχει υψηλή ποιότητα, χρησιμοποιείται το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης, δίνοντας στο σύστημα περισσότερη χωρητικότητα. Κατά τη διάρκεια μιας εξασθένησης του σήματος, το σύστημα WiMAX μπορεί να αλλάξει σε ένα χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης, ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα σύνδεσης και η σταθερότητα της ζεύξης. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στο σύστημα να ξεπεράσει την επιλεκτική εξασθένηση στο χρόνο. Το χαρακτηριστικό κλειδί της προσαρμόσιμης διαμόρφωσης, είναι ότι αυξάνει την ακτίνα στην οποία ένα υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθώς το σύστημα μπορεί να γυρίσει στις πραγματικές συνθήκες

εξασθένησης, ενώ υπάρχει ένα σταθερό σχήμα που στοχεύει στις χειρότερες συνθήκες. Οι σχετικές ακτίνες των σχημάτων διαμόρφωσης BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM φαίνονται στο Σχήμα 1-20.



Σχήμα 1-20: Σχετικές ακτίνες σχημάτων για προσαρμόσιμη διαμόρφωση

1.7.5 Τεχνικές Διόρθωσης Λαθών

Οι τεχνικές διόρθωσης λαθών έχουν ενσωματωθεί στο WiMAX, ώστε να μειώνονται οι απαιτήσεις του SNR. Ισχυροί αλγόριθμοι Reed Solomon, FEC (Forward Error Correction), συνελικτική κωδικοποίηση και interleaving χρησιμοποιούνται ώστε να ανιχνεύουν και να διορθώνουν τα λάθη και να βελτιώνουν το ρυθμό μετάδοσης. Αυτές οι ισχυρές τεχνικές διόρθωσης λαθών βοηθούν στο να διορθώνονται λανθασμένα πλαίσια, που μπορεί να έχουν χαθεί λόγω επιλεκτικής εξασθένησης στη συχνότητα ή ριπές λαθών. Η αυτόματη απαίτηση επανάληψης (Automatic Repeat Request - ARQ) χρησιμοποιείται για να διορθώνει λάθη που δε διορθώνονται από το FEC, έχοντας τη λανθασμένη πληροφορία επεξεργασμένη. Αυτό βελτιώνει σημαντικά την επίδοση του bit error rate (BER) για ένα παρόμοιο επίπεδο κατωφλίου.

1.7.6 Έλεγχος Ισχύος

Οι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος χρησιμοποιούνται για να βελτιώνεται η ολική επίδοση του συστήματος. Υλοποιούνται από το σταθμό βάσης στέλνοντας πληροφορία ελέγχου ισχύος σε καθέναν από τους σταθμούς εργασίας, για να κανονικοποιείται το επίπεδο ισχύος εκπομπής, ώστε το επίπεδο που λαμβάνεται στο σταθμό βάσης να είναι σε ένα προαποφασισμένο επίπεδο. Σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον

εξασθένησης, αυτό το προαποφασισμένο επίπεδο επίδοσης σημαίνει ότι ο σταθμός εργασίας, εκπέμπει αρκετή ισχύ ώστε να ικανοποιεί τις συνθήκες. Το αντίθετο θα ήταν, ότι το επίπεδο εκπομπής του σταθμού εργασίας βασίζεται στις συνθήκες χειρότερου σεναρίου. Ο έλεγχος ισχύος, μειώνει την ολική κατανάλωση ισχύος από το σταθμό εργασίας και την πιθανή παρεμβολή με άλλους σταθμούς βάσης της περιοχής. Για LOS η ισχύς εκπομπής του σταθμού εργασίας είναι σχεδόν ανάλογη με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για NLOS είναι επίσης υψηλά εξαρτημένη στην καθαρότητα από εμπόδια.

Κεφάλαιο 2^ο: Εισαγωγή στο OFDM

2.1 Η τεχνολογία μετάδοσης OFDM

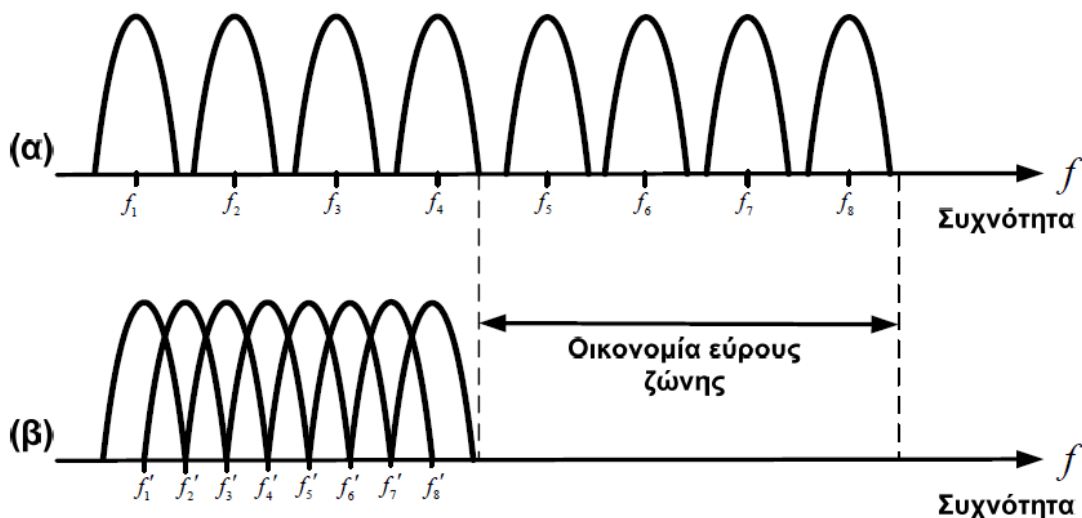
Η τεχνική του διαχωρισμού του εύρους ζώνης ενός καναλιού σε πολλές ζώνες (Multicarrier), είναι γνωστή και διαδεδομένη με τη μορφή του Frequency Division Multiplexing. Τις τελευταίες δεκαετίες διατυπώθηκαν οι αρχές της τεχνολογίας μετάδοσης πολλαπλών φερουσών, γνωστής σαν Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Ωστόσο, τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής μόλις πρόσφατα αξιολογήθηκαν και μπόρεσαν να αξιοποιηθούν.

Το OFDM πρότυπο αναπτύχθηκε από κοινού από το European Telecommunication Standards Institute Broadband Radio Access Networks (ETSI BRAN) και από το Multimedia Mobile Access Communications (MMAC). Σήμερα, αποτελεί το παγκόσμιο πρότυπο για τη μπάντα των 5 GHz.

Η μετάδοση OFDM μπορεί να εξεταστεί τόσο σαν τεχνική διαμόρφωσης, όσο και σαν τεχνική πολύπλεξης. Πρόκειται για μια ειδική περίπτωση μετάδοσης multicarrier, όπου η συνολική ροή δεδομένων μεταδίδεται μέσω ενός αριθμού υποκαναλιών, όπου το κάθε ένα έχει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Ένας από τους βασικότερους λόγους χρήσης της διαμόρφωσης OFDM είναι ο αποδοτικός τρόπος που διαχειρίζεται τη διάδοση μέσω πολλών μονοπατιών. Επιπλέον, αυξάνει την ανθεκτικότητα απέναντι σε φαινόμενα εξασθένησης επιλεκτικής συχνότητας, καθώς και σε φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών υποκαναλιών μετάδοσης [20]. Σε ένα σύστημα με μία φέρουσα μετάδοσης, μια απλή εξασθένηση ή μια παρεμβολή, μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία ολόκληρου του δικτύου μετάδοσης. Αντίθετα, σε ένα σύστημα πολλαπλών φερουσών, θα επηρεαστεί μόνο ένα μικρό ποσοστό των φερουσών μετάδοσης. Σε ένα κλασικό παράλληλο σύστημα, το εύρος της συχνότητας του σήματος διαιρείται σε N μη επικαλυπτόμενα «κομμάτια» και το κάθε κομμάτι αντιστοιχεί σε ένα υποκανάλι. Από κάθε φέρουσα μεταδίδεται ένα ξεχωριστό σύμβολο και έπειτα οι N φέρουσες πολυπλέκονται στο πεδίο της συχνότητας. Η επιλογή μη επικαλυπτόμενων πεδίων φάσματος, οφείλεται στο γεγονός ότι γίνεται

προσπάθεια αποφυγής φαινομένων παρεμβολής μεταξύ των υπο-καναλιών μετάδοσης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή οδηγεί σε μη αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, προτάθηκαν συστήματα που συνδυάζουν την παράλληλη ροή δεδομένων και την τεχνική πολύπλεξης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing) με επικαλυπτόμενα κανάλια μετάδοσης. Στην περίπτωση αυτή, αν b είναι ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης του σήματος, τότε το φάσμα της συχνότητας διαιρείται σε b υποκανάλια, όπου το κάθε ένα έχει πολύ μικρότερο ρυθμό μετάδοσης. Τα δεδομένα δηλαδή που μεταδίδονταν με υψηλό ρυθμό από ένα κανάλι, θα μεταδίδονται τώρα παράλληλα από ξεχωριστά υποκανάλια με χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Επιπλέον, τα δεδομένα πολυπλέκονται με κατάλληλες τεχνικές, ώστε να επιτευχθεί αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Στο παρακάτω σχήμα, Σχήμα 2-1, απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ της τεχνικής μη επικαλυπτόμενων φερουσών και της τεχνικής επικαλυπτόμενων φερουσών. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί, χρησιμοποιώντας την τεχνική επικαλυπτόμενων φερουσών, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση μέχρι και 50% του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Για την πλήρη εκμετάλλευση της τεχνικής επικαλυπτόμενων φερουσών, θα πρέπει να μειωθεί η ανεπιθύμητη παρεμβολή μεταξύ των φερουσών μετάδοσης, κάτι που απαιτεί την «ορθογωνιότητα» μεταξύ τους. Η λέξη «ορθογωνιότητα», υποδηλώνει ότι υπάρχει μια ακριβής μαθηματική σχέση μεταξύ των συχνοτήτων των διαφορετικών φερουσών στο σύστημα. Με την τεχνική του FDM οι φέρουσες τοποθετούνται στη σειρά με τέτοιο τρόπο ώστε ο δέκτης, με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων και αποδιαμορφωτών, να μπορεί να διαχωρίσει τα υποκανάλια μεταξύ τους. Σε τέτοιους δέκτες ωστόσο, χρησιμοποιούνται μπάντες ελέγχου (guard bands) μεταξύ των διαφορετικών φερουσών στο πεδίο της συχνότητας, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος.

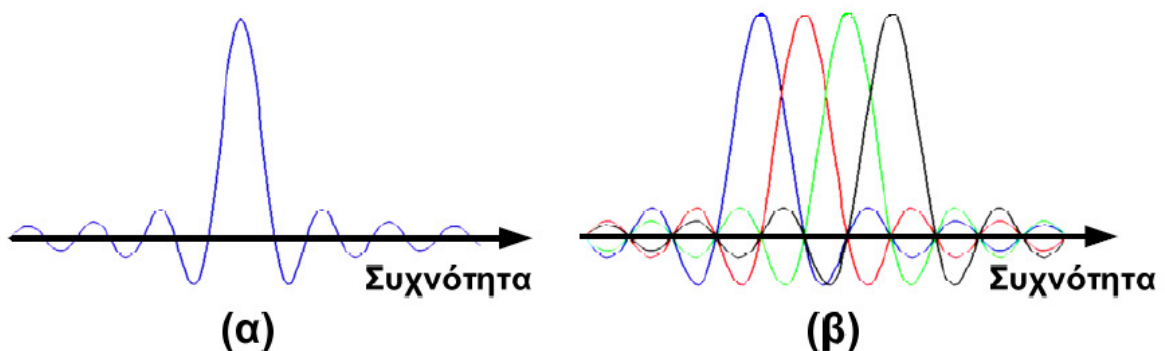


Σχήμα 2-1: Τεχνική (α) μη επικαλυπτόμενων φερουσών, (β)
επικαλυπτόμενων φερουσών

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνεται από την τεχνική διαμόρφωσης OFDM, όπου η τοποθέτηση των φερουσών γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επικαλύπτονται οι μπάντες ελέγχου, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν φαινόμενα ανεπιθύμητης παρεμβολής μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο οι φέρουσες να είναι μαθηματικά ορθογώνιες μεταξύ τους.

Για τους λόγους αυτούς, η τεχνική διαμόρφωσης OFDM, έγινε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας από τη δεκαετία του 1970 κι έπειτα. Έτσι, σε πολλά συστήματα παράλληλης μετάδοσης, εφαρμόστηκε ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) σαν ένα μέρος των τεχνικών διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης. Στο παρακάτω σχήμα, Σχήμα 2-2a, δίνεται μια φασματική απεικόνιση ενός ξεχωριστού υποκαναλιού. Στο Σχήμα 2-2b, φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο πολυπλέκονται τα υποκανάλια δημιουργώντας το σήμα OFDM. Κάθε υποκανάλι έχει τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης και καταλαμβάνει το ίδιο εύρος συχνοτήτων. Άξιο παρατήρησης στο σχήμα αυτό, είναι το γεγονός ότι η κεντρική συχνότητα του κάθε υποκαναλιού δεν επηρεάζεται (παρεμβάλλεται) από άλλα υποκανάλια. Επομένως, αν χρησιμοποιείται DFT στο δέκτη και γίνει υπολογισμός των τιμών συσχέτισης με την κεντρική συχνότητα της κάθε φέρουσας, θα ανακτηθούν τα δεδομένα χωρίς παρεμβολές.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ειδικού σκοπού, που εκτελούν τον Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform - FFT), ο οποίος είναι μια αποδοτική υλοποίηση του DFT. Ακόμη, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των VLSI (Very Large Scale Integration), είχε σαν αποτέλεσμα να διατίθενται στο εμπόριο FFT chips μεγάλου μεγέθους και υψηλής ταχύτητας, χωρίς ιδιαίτερο οικονομικό κόστος. Με τον τρόπο αυτό, τόσο ο πομπός, όσο και ο δέκτης υλοποιούνται με χρήση FFT τεχνικών, με αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των πράξεων από N^2 (με χρήση DFT), σε $N \log N$ [21].



Σχήμα 2-2: Φάσμα (a) υποκανάλι OFDM, (b) σήμα OFDM

2.2 Βασικές αρχές του σήματος OFDM

Όπως αναφέρθηκε, η βασική αρχή των συστημάτων OFDM είναι ο διαχωρισμός ενός υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, σε ταυτόχρονη μετάδοση των δεδομένων μέσω υποκαναλιών με χαμηλότερη ροή. Για κάθε μία από τις παράλληλες φέρουσες μετάδοσης αυξάνεται η διάρκεια του συμβόλου, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της σχετικής ποσότητας διασποράς στο χρόνο, που προκαλείται από το delay spread των πολλών μονοπατιών. Επιπλέον, με τη χρήση ενός χρόνου ελέγχου (guard time) σε κάθε σύμβολο OFDM, εξαλείφεται το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference - ISI). Μέσα στο χρόνο αυτό το σύμβολο OFDM επεκτείνεται κυκλικά για την αποφυγή παρεμβολής μεταξύ των υποκαναλιών.

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος OFDM, αντικείμενο μελέτης γίνεται ένας αριθμός παραμέτρων, όπως είναι ο αριθμός των φερουσών μετάδοσης, η απόσταση μεταξύ τους, η διάρκεια του συμβόλου, ο χρόνος ελέγχου, ή ακόμα και ο τύπος του κώδικα διόρθωσης λαθών. Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων επηρεάζεται από τις απαιτήσεις του συστήματος, όπως είναι ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης bit, το διαθέσιμο εύρος φάσματος, το ανεκτό delay spread και οι τιμές Doppler. Για παράδειγμα, για να υπάρξει μεγαλύτερη ανεκτικότητα σε delay spread, απαιτείται μεγάλος αριθμός φερουσών μετάδοσης σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Το αντίθετο ωστόσο ισχύει, εάν είναι επιθυμητή υψηλή ανεκτικότητα σε Doppler, spread και θόρυβο.

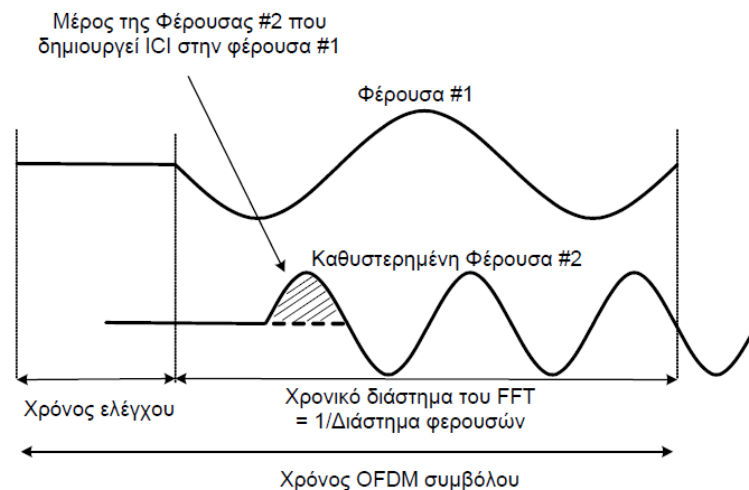
2.2.1 Ο χρόνος ελέγχου (guard time) και το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix)

Ένας από τους σημαντικότερους λόγους χρήσης του OFDM, είναι ο αποδοτικός τρόπος αντιμετώπισης της διασποράς καθυστέρησης (delay spread). Αν τα δεδομένα εισόδου μεταδοθούν από N_s υποκανάλια (φέρουσες), τότε η διάρκεια του συμβόλου γίνεται N_s φορές μικρότερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση του delay spread του υποκαναλιού κατά τον ίδιο παράγοντα, αφού είναι ανάλογο με τη διάρκεια του συμβόλου. Ωστόσο, για την πλήρη ακύρωση του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI), χρησιμοποιείται ένα χρονικό διάστημα για κάθε σύμβολο OFDM, το οποίο είναι γνωστό σαν χρόνος ελέγχου (guard time) ή χρόνος προστασίας. Ο χρόνος αυτός επιλέγεται να είναι μεγαλύτερος του αναμενόμενου delay spread, έτσι ώστε κάποια συνιστώσα ενός συμβόλου που μεταδίδεται από κάποια φέρουσα να μην μπορεί να παρεμβληθεί με το επόμενο σύμβολο. Κατά το χρόνο ελέγχου δεν είναι αναγκαίο να μεταδίδεται σήμα. Στην περίπτωση όμως αυτή, θα εμφανίζονταν φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ των φερουσών (Inter-Carrier Interference - ICI). Η παρεμβολή αυτή είναι γνωστή

και ως crosstalk, ενώ η παρουσία της σημαίνει ότι οι φέρουσες δεν είναι πλέον ορθογώνιες μεταξύ τους. Το φαινόμενο αυτό είναι ορατό στο Σχήμα 2-3.

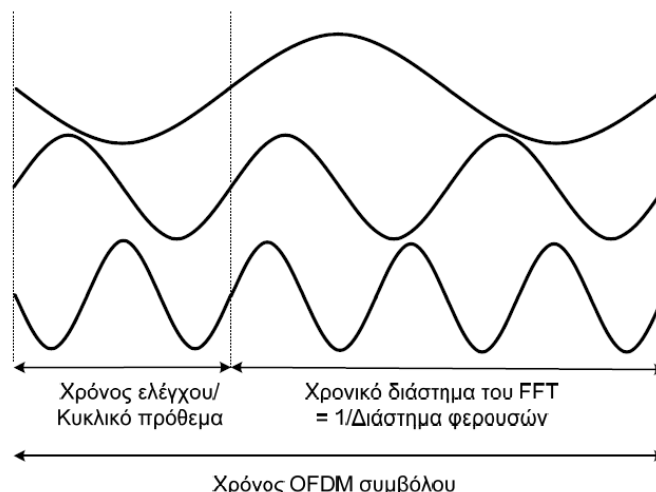
Στο παράδειγμα αυτό υπάρχουν δύο φέρουσες, εκ των οποίων η δεύτερη έχει καθυστέρηση. Όταν ο δέκτης OFDM προσπαθήσει να αποδιαμορφώσει την πρώτη φέρουσα, θα συμπεριλάβει κάποια παρεμβολή από τη δεύτερη φέρουσα. Αυτό συμβαίνει διότι μέσα στο διάστημα του FFT, η διαφορά των κύκλων των δύο φερουσών δεν είναι ακέραιος αριθμός. Την ίδια στιγμή, η πρώτη φέρουσα θα παρεμβάλλεται στην αποδιαμόρφωση της δεύτερης με τον ίδιο τρόπο.

Για την αποφυγή της παρεμβολής ICI, το σύμβολο OFDM επεκτείνεται κυκλικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4. Η τεχνική αυτή εξασφαλίζει ότι τα αντίγραφα του συμβόλου OFDM που έχουν καθυστερήσει, θα έχουν πάντοτε έναν ακέραιο αριθμό κύκλων στο διάστημα του FFT, όσο η καθυστέρηση αυτή είναι μικρότερη του χρόνου ελέγχου (guard time).



Σχήμα 2-3: Crosstalk για φέρουσα με μηδενικό σήμα κατά το χρόνο ελέγχου

Σαν αποτέλεσμα, σήματα που μεταδίδονται από πολλές φέρουσες (μονοπάτια) με καθυστερήσεις μικρότερες του guard time δεν μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα παρεμβολής ICI.



Σχήμα 2-4: Σύμβολο OFDM με κυκλικό πρόθεμα

2.2.2 Επιλογή βασικών παραμέτρων για το σχεδιασμό συστήματος OFDM

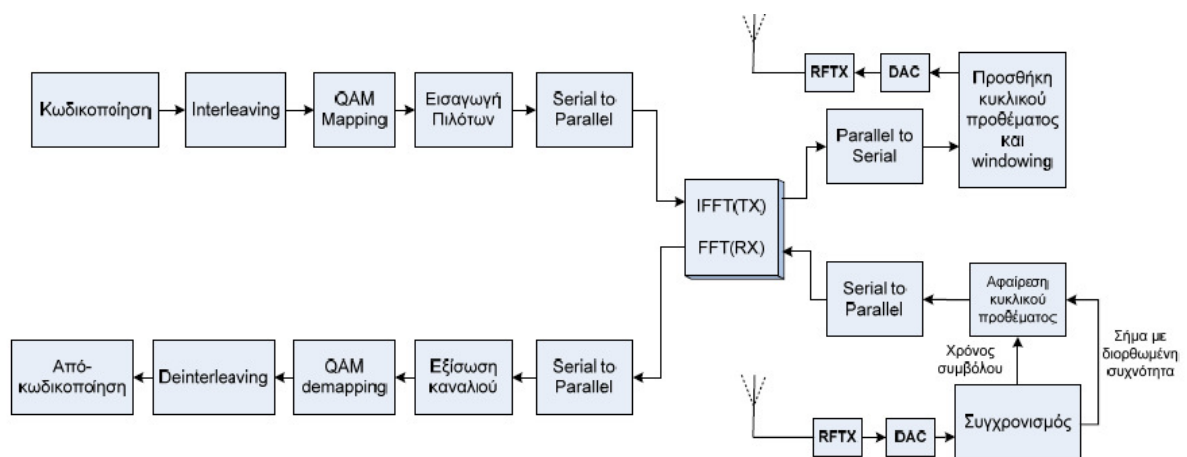
Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος OFDM, η επιλογή των βασικών παραμέτρων απαιτεί την ικανοποίηση διαφορετικών και συχνά αντικρουόμενων απαιτήσεων. Συνήθως υπάρχουν τρεις βασικές επιλογές: το εύρος ζώνης, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και το delay spread του καναλιού. Το delay spread καθορίζει τη διάρκεια χρόνου του κυκλικού προθέματος. Ένας απλός κανόνας είναι, ο χρόνος αυτός θα πρέπει να είναι δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος από το delay spread. Η τιμή αυτή εξαρτάται από τον τύπο κωδικοποίησης και από τη διαμόρφωση QAM. Μεγαλύτερη τάξη διαμόρφωσης (π.χ. 64-QAM), σημαίνει περισσότερη ευαισθησία σε παρεμβολές ICI και ISI από τη διαμόρφωση QPSK, ενώ ισχυρότερη κωδικοποίηση μειώνει την ευαισθησία σε τέτοιου είδους παρεμβολές.

Αν έχει καθοριστεί ο χρόνος ελέγχου, μπορεί να οριστεί και η διάρκεια του συμβόλου. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) που προκαλούνται από το χρόνο ελέγχου, είναι επιθυμητό να έχουμε διάρκεια συμβόλου πολύ μεγαλύτερη από το χρόνο ελέγχου. Ωστόσο, η τιμή αυτή δεν μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα μεγάλη, καθώς μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου σημαίνει περισσότερες φέρουσες και μικρότερη απόσταση (στο πεδίο της συχνότητας) μεταξύ τους, μεγαλύτερη πολυπλοκότητα υλοποίησης, μεγαλύτερη ευαισθησία σε θόρυβο και μετατοπίσεις φάσης [23], καθώς και αυξημένο λόγο PAP (λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ) [24], [25]. Ένας πρακτικός τρόπος είναι, να επιλέγεται η διάρκεια συμβόλου τουλάχιστον πέντε φορές μεγαλύτερη από το χρόνο ελέγχου, κάτι που επιφέρει απώλεια SNR της τάξης του 1dB λόγω του χρόνου ελέγχου.

Αφού καθοριστεί και η διάρκεια του συμβόλου, ακολουθεί ο αριθμός των φερουσών, ο οποίος προκύπτει απευθείας από τη διαίρεση του απαιτούμενου εύρους ζώνης με την απόσταση μεταξύ των φερουσών. Η απόσταση αυτή είναι το αντίστροφο της αφαίρεσης μεταξύ διάρκειας συμβόλου και χρόνου ελέγχου. Με άλλο τρόπο, ο αριθμός των φορέων μπορεί να καθοριστεί διαιρώντας το συνολικό ρυθμό μετάδοσης, με το ρυθμό μετάδοσης ανά φορέα. Ο ρυθμός μετάδοσης ανά φορέα, εξαρτάται με τη σειρά του από τον τύπο διαμόρφωσης, το ρυθμό συμβόλων και το ρυθμό κωδικοποίησης.

2.2.3 Επεξεργασία σήματος OFDM

Στο Σχήμα 2-5 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα ενός OFDM modem, όπου το πάνω επίπεδο αποτελεί τον πομπό, ενώ το κάτω το δέκτη. Στο κέντρο φαίνεται ο Αντίστροφος Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT), ο οποίος διαμορφώνει ένα μπλοκ τιμών QAM εισόδου σε έναν αριθμό φορέων. Στο δέκτη, οι φορείς αποδιαμορφώνονται με τον FFT, ο οποίος εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του FFT/IFFT, είναι ότι ο FFT είναι σχεδόν πανομοιότυπος με τον IFFT. Στην πραγματικότητα, ο IFFT μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση ενός FFT, ενώνοντας την είσοδο και την έξοδο του FFT και διαιρώντας το αποτέλεσμα με το μέγεθος του FFT. Έτσι είναι δυνατή η χρήση του ίδιου υλικού σε πομπό και δέκτη. Όμως, αυτή η μείωση της πολυπλοκότητας είναι δυνατή μόνο σε περιπτώσεις που ένα modem δε χρειάζεται να εκπέμπει και να δέχεται ταυτόχρονα.



Σχήμα 2-5: Μπλοκ διάγραμμα ενός OFDM πομποδέκτη

Στο δέκτη, μετά τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό, η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος ξεκινά με μια φάση εκπαίδευσης (training) που βοηθά στο

συγχρονισμό και καθορισμό των μετατοπίσεων στη συχνότητα. Ο FFT, όπως έχει αναφερθεί, αποδιαμορφώνει όλες τις φέρουσες και η έξοδός του περιέχει N_s τιμές QAM, που αντιστοιχούνται σε δυαδικές τιμές και αποκωδικοποιούνται για την παραγωγή των δυαδικών δεδομένων στην έξοδο. Για τη σωστή αντιστοίχιση των τιμών QAM σε δυαδικές τιμές, πρέπει πρώτα να εκτιμηθούν οι φάσεις και τα πλάτη αναφοράς σε όλες τις φέρουσες.

2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του OFDM σήματος

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά επιγραμματικά στις ιδιότητες του σήματος OFDM, στα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, αλλά και στα μειονεκτήματά του σε σχέση με τα συστήματα μετάδοσης μονής φέρουσας.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα βασικά πλεονεκτήματα του σήματος OFDM είναι:

- Κάνει αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης (με το να επιτρέπει την επικάλυψη των φασμάτων των υποκαναλιών).
- Είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητο στο φαινόμενο της επιλεκτικής εξασθένησης του καναλιού (frequency selective fading), σε σχέση με τα συστήματα μονής φέρουσας (single carrier).
- Εξαλείφει αποδοτικά τα φαινόμενα ISI και ICI με τη χρήση του χρόνου ελέγχου και την εισαγωγή κυκλικού προθέματος.
- Με τη χρήση επαρκών μεθόδων κωδικοποίησης και παρεμβολής (interleaving) καναλιού, μπορεί να ανακτήσει σύμβολα που έχουν αλλοιωθεί εξαιτίας της μη ομοιογενούς συμπεριφοράς του καναλιού.
- Είναι υπολογιστικά αποδοτικό ως προς τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση, κάνοντας χρήση του FFT/IFFT, ενώ είναι δυνατή η χρήση του ίδιου hardware σε πομπό και δέκτη για την υλοποίηση του FFT/IFFT.
- Αποτελεί έναν αποδοτικό τρόπο για την αντιμετώπιση του multi-path delay spread.
- Σε σχετικά αργά μεταβαλλόμενα κανάλια, είναι δυνατή η σημαντική αύξηση της χωρητικότητας, μέσω της προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σε κάθε φέρουσα βάσει του SNR της συγκεκριμένης φέρουσας.
- Είναι ανθεκτικό σε φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών ζωνών συχνότητας (narrowband interference), αφού επηρεάζεται μόνο ένα μικρό ποσοστό των φερουσών.
- Καθιστά πιθανή την υλοποίηση δικτύων single-frequency, κάτι που είναι αρκετά ελκυστικό για εφαρμογές μετάδοσης.

Αντίθετα, σαν βασικά μειονεκτήματα μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα:

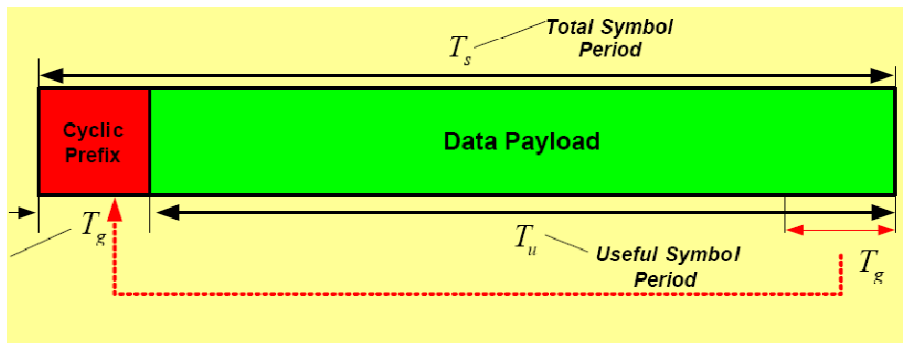
- Είναι πιο επιρρεπής από τα συστήματα μονής φέρουσας σε αποκλίσεις συχνότητας και μετατοπίσεις φάσης.
- Το μεταδιδόμενο σήμα OFDM έχει πλάτος που προσομοιάζεται με θόρυβο. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος ότι τα χρονικά δείγματα του σήματος, είναι σε μεγάλο βαθμό ασυσχέτιστα μεταξύ τους και επομένως το σήμα OFDM έχει σχετικά μεγάλο λόγο $\frac{P_{peak}}{P_{avg}}$ (στιγμιαία προς μέση ισχύς). Το φαινόμενο αυτό, τείνει να μειώσει την απόδοση του RF (Radio Frequency) ενισχυτή αφού απαιτούνται πομποί με μεγάλο λόγο PAP, ενώ παράλληλα αυξάνει την πολυπλοκότητα των μετατροπών ADC (Analog-to-Digital Converter) και DAC (Digital-to-Analog Converter).

Για τη μείωση του λόγου PAP έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τεχνικές όπως οι clipping, peak windowing και peak cancellation. Στη δεύτερη, ανήκουν οι τεχνικές κωδικοποίησης (coding) και στην τρίτη οι τεχνικές παρεμβολής (symbol scrambling) .[

2.3 Πολλαπλή Πρόσβαση στα δίκτυα WiMAX με την τεχνική OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

2.3.1 Βασικά στοιχεία του OFDMA

Όπως έχει προαναφερθεί, η OFDM είναι μια τεχνική πολυπλεξίας που υποδιαιρεί το φάσμα σε πολλαπλά κανάλια συχνότητας μικρού εύρους. Το ρεύμα δεδομένων εισόδου διαιρείται σε πολλά παράλληλα υπο-ρεύματα με μειωμένο ρυθμό δεδομένων αλλά και αυξανόμενη διάρκεια συμβόλων και κάθε υπο-ρεύμα διαμορφώνεται και μεταδίδεται σε ένα ξεχωριστό ορθογώνιο φέρον. Η αυξανόμενη διάρκεια συμβόλων βελτιώνει την απόδοση του OFDM όταν υπάρχει καθυστέρηση λόγω πολλαπλών δρόμων. Επιπλέον, η εισαγωγή του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix, CP) μπορεί πλήρως να αποβάλλει τη διασυμβολική παρεμβολή (ISI) όσο η διάρκεια του CP είναι πιο μεγάλη από την καθυστέρηση των καναλιών. Το CP είναι χαρακτηριστικά μια επανάληψη ενός δείγματος από τα τελευταία δεδομένα του ωφέλιμου φορτίου, που επισυνάπτεται στην αρχή των στοιχείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6: Εισαγωγή κυκλικού προθέματος στο πλαίσιο OFDM [11]

Το CP αποτρέπει την παρεμβολή γειτονικών πακέτων και κάνει το κανάλι να εμφανίζεται κυκλικό, επιτρέποντας να γίνεται αντιστάθμιση στη ζώνη συχνοτήτων με χαμηλή πολυπλοκότητα. Ένα ορατό μειονέκτημα του CP είναι ότι εισάγει πλεονάζουσα πληροφορία, η οποία μειώνει σε κάποιο βαθμό την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης. Δεδομένου ότι το OFDM έχει ένα πολύ αιχμηρό φάσμα, ένα μεγάλο μέρος του διατιθέμενου εύρους ζώνης των καναλιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων, η οποία βοηθά στην αντιστάθμιση από τις απώλειες στην αποδοτικότητα λόγω του κυκλικού προθέματος.

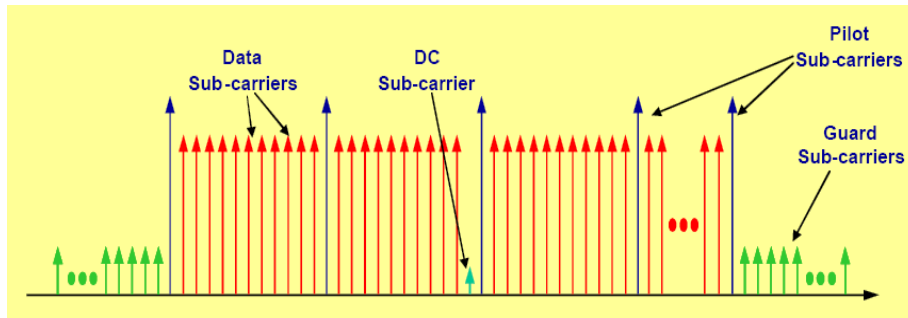
Το OFDM εκμεταλλεύεται την ποικιλία των συχνοτήτων λόγω της πολυδιόδευσης, κωδικοποιώντας και πολυπλέκοντας την πληροφορία στα φέροντα πριν τη μετάδοση. Η OFDM διαμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον αποδοτικό Αντίστροφο Γρήγορο Μετασχηματισμό κατά Φουριέ (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT), ο οποίος χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό υπο-φερόντων (μέχρι 2048) με χαμηλή πολυπλοκότητα. Σε ένα OFDM σύστημα, η πληροφορία είναι διαθέσιμη στη χρονική περιοχή με τη βοήθεια των συμβόλων OFDM και στην περιοχή της συχνότητας με τη βοήθεια των υπο-φερόντων. Οι πόροι χρόνου και συχνότητας μπορούν να είναι οργανωμένοι σε υπο-κανάλια για την κατανομή τους στους μεμονωμένους χρήστες. Η OFDMA είναι ένα σχήμα πολλαπλής-πρόσβασης/πολυπλεξίας που παρέχει λειτουργίες πολυπλεξίας των ρευμάτων δεδομένων από πολλαπλούς χρήστες στο προς τα κάτω κανάλι και προς τα πάνω πολλαπλή πρόσβαση σε μορφή υπο-καναλιών.

2.3.2 Δομή Συμβόλων OFDMA και υπο-καναλοποίηση

Η δομή των συμβόλων OFDMA αποτελείται από τρεις τύπους υπο-φερόντων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-7.

- Υπο-φέροντα δεδομένων για τη μετάδοση των δεδομένων

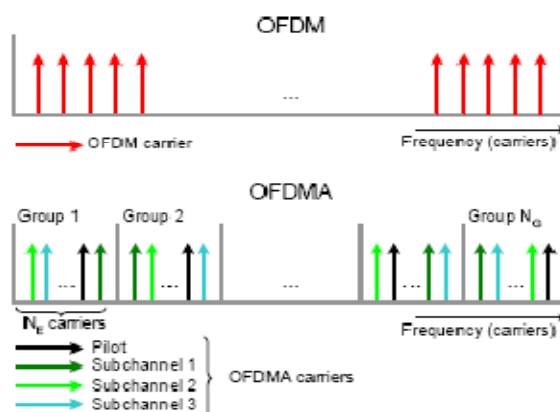
- Υπο-φέροντα πιλότους για λόγους εκτίμησης και συγχρονισμού
- Μηδενικά υπο-φέροντα για καθόλου μετάδοση. Χρησιμοποιούνται για ζώνες ελέγχου και DC συνιστώσες.



Σχήμα 2-7: Η δομή υπο-φερόντων του OFDMA [26]

Τα ενεργά υπο-φέροντα (δεδομένα και πιλότοι) ομαδοποιούνται σε υπο-ομάδες υπο-φερόντων που ονομάζονται υπο-κανάλια. Το Φυσικό Επίπεδο (PHY) του WiMAX, υποστηρίζει υπο-καναλοποίηση και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η ελάχιστη μονάδα για την υπο-καναλοποίηση είναι μία θυρίδα, η οποία ισούται με 48 υπο-φέροντα δεδομένων.

Στην OFDM, όλα τα φέροντα μεταδίδονται παράλληλα με το ίδιο πλάτος. Η OFDMA διαιρεί το διάστημα των φερόντων σε N_G ομάδες, κάθε μία εκ των οποίων έχει N_E φέροντα και στα N_E υπο-κανάλια, υπάρχει ένα φέρον από κάθε ομάδα. Στην OFDMA με 2048 φέροντα, για παράδειγμα, αυτό μεταφράζεται σε $N_E = 32$ και $N_G = 48$ στην προς τα κάτω σύνδεση, και $N_E = 32$ και $N_G = 53$ στην άνω ζεύξη (Uplink), με τα υπόλοιπα φέροντα να χρησιμοποιούνται για τις ζώνες ελέγχου και για τους πιλότους. Η κωδικοποίηση, η διαμόρφωση και το πλάτος ορίζονται ξεχωριστά για κάθε υπο-κάνάλι ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες και τη χρήση των πόρων του δικτύου. Στο Σχήμα 2-8 απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των φερόντων για την OFDM και την OFDMA.



Σχήμα 2-8: Σύγκριση OFDM και OFDMA

2.3.3 Επεκτάσιμο OFDMA

Το IEEE 802.16e-2005 πρότυπο ασύρματης OFDMA πρόσβασης, που χρησιμοποιείται στα συστήματα WiMAX, είναι βασισμένο στην έννοια του επεκτάσιμου OFDMA (Scalable-OFDMA). Το S-OFDMA υποστηρίζει μία μεγάλη περιοχή φάσματος ώστε να καλύπτει ευέλικτα την ανάγκη για διαφορετικές απαιτήσεις κατανομής και χρήσης του φάσματος. Η επεκτασιμότητα υποστηρίζεται μεταβάλλοντας το μέγεθος του FFT και καθορίζοντας την απόσταση των υπο-φερόντων στα 10,94 kHz. Καθώς το εύρος ζώνης των υπο-φερόντων μονάδων των πόρων και η διάρκεια συμβόλων είναι σταθερή, το αντίκτυπο στα υψηλότερα στρώματα είναι ελάχιστο κατά την επέκταση του εύρους ζώνης.

Οι παράμετροι S-OFDMA παρατίθενται στον Πίνακα 2-1. Τα εύρη ζώνης δύο συστημάτων από τα αρχικά σχεδιαζόμενα προφίλ που αναπτύσσονται από το WiMAX φόρουμ είναι 5 και 10 MHz (που τονίζονται στον πίνακα).

Parameters	Values			
System Channel Bandwidth (MHz)	1.25	5	10	20
Sampling Frequency (F_p in MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
FFT Size (N_{FFT})	128	512	1024	2048
Number of Sub-Channels	2	8	16	32
Sub-Carrier Frequency Spacing	10.94 kHz			
Useful Symbol Time ($T_b = 1/f$)	91.4 microseconds			

Parameters	Values
Guard Time ($T_g = T_b/8$)	11.4 microseconds
OFDMA Symbol Duration ($T_s = T_b + T_g$)	102.9 microseconds
Number of OFDMA Symbols (5 ms Frame)	48

Πίνακας 2-1: Παράμετροι επέκτασης του OFDMA [26]

Κεφάλαιο 3^ο: Πρωτόκολλα ποιότητας υπηρεσιών

3.1 Εισαγωγή

Λόγω της ραγδαίας εξάπλωσης του Διαδικτύου, τροφοδοτείται όλο και περισσότερο η ανάπτυξη καινούργιων εφαρμογών που επιθυμούν να το χρησιμοποιήσουν σαν μέσο μεταφοράς των δεδομένων τους. Άνθρωποι χρησιμοποιούν καθημερινά διαδικτυακές υπηρεσίες τόσο στο εργασιακό, όσο και στο οικιακό τους περιβάλλον. Η ανάγκη για διαρκή ανάπτυξη καινούριων online εφαρμογών είναι επιτακτική. Όμως, η οικογένεια δικτυακών πρωτοκόλλων με την οποία είναι χτισμένο το

διαδίκτυο (TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Protocol), δεν παρέχει τις δυνατότητες και τις εγγυήσεις που χρειάζονται οι νέες εφαρμογές για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, η υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best effort) που παρέχει ο αρχικός σχεδιασμός του διαδικτύου, επιτρέπει στις συνολικές απ' άκρο σε άκρο (end-to-end) καθυστερήσεις να αυξάνονται απεριόριστα εξαιτίας του φαινομένου της συμφόρησης. Ωστόσο, εφαρμογές μεταφοράς ήχου και εικόνας πραγματικού χρόνου (real-time) απαιτούν χρήση **ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS)**. Για να είναι λοιπόν σε θέση ένας πάροχος υπηρεσιών να προσφέρει υπηρεσίες τις οποίες οι πελάτες του μπορούν να εμπιστευθούν, χρειάζεται ένα δίκτυο με δυνατότητες ποιότητας υπηρεσίας (QoS enabled).

Γενικά, η ποιότητα υπηρεσίας αναφέρεται σε διάφορες πτυχές της τηλεφωνίας και των δικτύων των υπολογιστών που επιτρέπουν τη μεταφορά της κυκλοφορίας με ειδικές απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, έχει αναπτυχθεί τεχνολογία που επιτρέπει στα δίκτυα υπολογιστών να γίνουν όσο χρήσιμα είναι τα δίκτυα τηλεφώνων για ηχητικές συνομιλίες, όσο και για υποστήριξη νέων εφαρμογών με ακόμη αυστηρότερες απαιτήσεις υπηρεσίας.

Οι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα που προσφέρει το δίκτυο στη μεταφορά των εφαρμογών είναι:

- Η καθυστέρηση (**delay**)
- Το εύρος ζώνης (**bandwidth**)
- Η διακύμανση καθυστέρησης (**jitter**)
- Οι απώλειες πακέτων (**loss**)

Οι παραπάνω παράγοντες της ποιότητας υπηρεσίας ορίζονται ως εξής:

• **Καθυστέρηση (delay):** Πρόκειται για το χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο για να φτάσει μέσω του δικτύου από τον αποστολέα στον παραλήπτη του.

• **Εύρος ζώνης (Bandwidth):** Είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα σε κάποια ζεύξη του δικτύου, συνήθως σε bits/sec. Για τη μεταφορά μιας υπηρεσίας σημαντικό ρόλο μπορεί να παίζουν: η μέγιστη τιμή εύρους ζώνης που μπορεί να διατεθεί από το δίκτυο, η μέση τιμή καθώς και η ελάχιστη.

• **Η διακύμανση καθυστέρησης (jitter) :** Είναι η διακύμανση της μέσης χρονικής απόστασης μεταξύ διαδοχικών πακέτων σε μια συγκεκριμένη ροή.

• **Απώλειες πακέτων (loss):** Αναφέρεται στο ποσοστό απώλειας πακέτων (loss), που σημειώνεται είτε εξαιτίας της υπερχειλίσης των θέσεων μνήμης στις ουρές αναμονής μετάδοσης των δρομολογητών, είτε λόγω αλλοίωσης από θόρυβο των φυσικών μέσων μετάδοσης, είτε από αναδιάταξη (reordering) λόγω μεταφοράς πακέτων της ίδιας ροής μέσω διαφορετικών μονοπατιών. [27]

Από τις παραμέτρους κίνησης συχνότερη αναφορά γίνεται στο εύρος ζώνης και την καθυστέρηση.

Προβλέπεται ότι για τις εφαρμογές που θα αναπτυχθούν στο κοντινό μέλλον, το απαιτούμενο εύρος ζώνης θα είναι της τάξης μερικών megabits ανά δευτερόλεπτο (10Mbps) και καθυστέρηση που θα κυμαίνεται μεταξύ 30 και 500ms. Μερικές εφαρμογές απαιτούν επίσης αυστηρά όρια για τη διακύμανση καθυστέρησης, αλλά τα προβλήματα αυτά συνήθως μπορούν να αντιμετωπιστούν με ενταμιευτές εγκατεστημένους στους παραλήπτες των πακέτων.

Στις μέρες μας, στο Διαδίκτυο, κάθε στοιχείο δικτύου που παρεμβάλλεται στη διαδρομή ενός πακέτου IP, δεν κάνει τίποτα περισσότερο από μια βέλτιστη προσπάθεια να προωθήσει το πακέτο προς τον προορισμό του. Αν σε ένα δρομολογητή η ουρά είναι υπερφορτωμένη, ορισμένα πακέτα απορρίπτονται χωρίς διάκριση μεταξύ χαμηλής προτεραιότητας κίνησης και υψηλής προτεραιότητας κίνησης. Αυτή η υπηρεσία είναι γνωστή ως υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best effort). Κάθε νέα σύνδεση γίνεται πάντοτε δεκτή και ποτέ ένα δίκτυο βέλτιστης προσπάθειας δεν αρνείται την εξυπηρέτησή της.

Με αυτόν τον τρόπο επιβαρύνεται η επίδοση των ήδη εγκατεστημένων συνδέσεων, δίνοντας την εντύπωση στο χρήστη ότι ένα δίκτυο βέλτιστης προσπάθειας δεν είναι ποτέ πλήρως κατειλημμένο, αντίθετα με αυτό που συμβαίνει στα συνήθη κυκλώματα μεταγωγής. [29]

Για τη σωστή λειτουργία, πολλές προηγμένες εφαρμογές απαιτούν εγγύηση του ελαχίστου εύρους ζώνης και της μέγιστης καθυστέρησης πακέτου (latency) τα οποία, τα δίκτυα βέλτιστης προσπάθειας είναι ανίκανα να παρέχουν. Για παράδειγμα, απομακρυσμένα εργαλεία αλληλεπίδρασης συνήθως έχουν απαιτήσεις που πηγάζουν από ιδιότητες των ανθρώπινων αισθήσεων, δίνοντας έτσι αυστηρές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και καθυστέρησης πακέτου. Η αποτυχία να υλοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, οδηγεί την εφαρμογή στο να μη δουλεύει σωστά. Επιπλέον, ορισμένες σημαντικές προηγμένες εφαρμογές, όπως απομακρυσμένα ιατρεία ή απομακρυσμένα όργανα ελέγχου, έχουν απαιτήσεις οι οποίες αν δεν ικανοποιηθούν έχουν σοβαρές επιπτώσεις στον πραγματικό κόσμο.

Στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί, παρατίθενται διάφοροι τύποι εφαρμογών καθώς και οι απαιτήσεις τους από το δίκτυο, προκειμένου να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ		
		Μέση Καθυστέρηση	Διακύμανση Καθυστέρησης	Ποσοστό Απώλειας
Αλληλεπίδρασης	VoIP, video conferencing, interactive gaming	*****	*****	***
Απόκρισης	web browsing, server access, e-commerce	***	***	*****
Συνεχούς Ροής	VoD, internet radio, news broadcast, teletraining	***	***	***
Παρασκηνίου	e-mail, μεταφορά αρχείων	*	*	*****
Ελέγχου Δικτύου	συναγερμοί παρακολούθησης, δρομολόγηση, σηματοδοσία	*****	*	*****

Πίνακας 3-1: Κατηγορίες εφαρμογών και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας [27]

Εύκολα γίνεται αντιληπτό, ότι για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας, το δίκτυο οφείλει να προσφέρει διαφορετικούς πόρους στις διάφορες εφαρμογές, διαφοροποιώντας έτσι τη μεταχείρισή τους.

Γενικά, υπάρχουν δύο ευρείες προσεγγίσεις οι οποίες μπορεί να ακολουθηθούν. Οι **Μηχανισμοί Αστυνόμευσης (policing)** και οι **Μηχανισμοί Χρονοπρογραμματισμού (scheduling)**.

3.1.1 Μηχανισμοί Αστυνόμευσης (policing)

Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στο σκεπτικό της “αστυνόμευσης” της κυκλοφορίας. Εάν η κυκλοφορία μιας εφαρμογής πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια (π.χ. η ταχύτητα μετάδοσης πακέτων να μην υπερβαίνει ένα μέγιστο όριο), μπορεί να υλοποιηθεί ένας μηχανισμός αστυνόμευσης ο οποίος θα διασφαλίζει ότι τα κριτήρια αυτά τηρούνται πραγματικά. Εάν η ελεγχόμενη εφαρμογή αρχίσει να συμπεριφέρεται προβληματικά, ο μηχανισμός αστυνόμευσης αναλαμβάνει κάποια ενέργεια (π.χ. απόρριψη ή καθυστέρηση των πακέτων που παραβιάζουν τα κριτήρια), έτσι

ώστε να διασφαλίζει ότι η κυκλοφορία που εισέρχεται στο δίκτυο συμμορφώνεται με τα κριτήρια.

Πιο αναλυτικά, ορίζονται τρία σημαντικά κριτήρια αστυνόμευσης (ρύθμιση της ταχύτητας με την οποία μπορεί να στέλνει πακέτα στο δίκτυο μια εφαρμογή). Κάθε κριτήριο διαφέρει από τα άλλα ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία γίνεται η αστυνόμευση. Τα κριτήρια είναι: της μέσης ταχύτητας, της μέγιστης ταχύτητας και του μεγέθους ακολουθίας πακέτων. Για το χαρακτηρισμό των ορίων αστυνόμευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναλογία ο μηχανισμός του “τρύπιου δοχείου” (leaky bucket) [30]. Τόσο ο μηχανισμός κατηγοριοποίησης και σήμανσης των πακέτων όσο και ο μηχανισμός αστυνόμευσης είναι τοποθετημένοι στην ίδια θέση, στα “όρια” του δικτύου, είτε στο τελικό σύστημα είτε σε έναν περιμετρικό δρομολογητή.

3.1.2 Μηχανισμοί Χρονοπρογραμματισμού (scheduling)

Μια εναλλακτική προσέγγιση η οποία μπορεί να παρέχει επαρκή απομόνωση μεταξύ διαφορετικών μορφών κυκλοφορίας, είναι ο μηχανισμός **χρονοπρογραμματισμού πακέτων** σε επίπεδο σύνδεσης, ο οποίος δεσμεύει ρητά ένα σταθερό ποσό από το εύρος ζώνης της σύνδεσης για την κυκλοφορία κάθε εφαρμογής.

Σε ένα δίκτυο τα πακέτα που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες κυκλοφορίας «πολυπλέκονται» (multiplexed) και αναμένουν στην ουρά για μετάδοση, στους ενταμιευτές εξόδου μιας σύνδεσης. Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται πακέτα από την ουρά αναμονής για μετάδοση μέσω της σύνδεσης αναφέρεται ως **μέθοδος χρονοπρογραμματισμού της σύνδεσης (scheduling)**. Η μέθοδος χρονοπρογραμματισμού παίζει σημαντικό ρόλο στις καθυστερήσεις που υφίστανται τα πακέτα και συνεπώς στην παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας.[30]

Για παράδειγμα, πακέτα που ανήκουν σε μια εφαρμογή VoIP με ευαισθησία στην καθυστέρηση, θα πρέπει να μεταδίδονται με προτεραιότητα έναντι των πακέτων μιας εφαρμογής e-mail. Για να επιτευχθεί παρόμοια διαφοροποίηση στη συμπεριφορά ενός μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού χρησιμοποιούνται περισσότεροι του ενός καταχωρητές, ο καθένας από τους οποίους λαμβάνει διαφορετική μεταχείριση από τη διαδικασία επιλογής του επόμενου πακέτου προς μετάδοση. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι οι:

- απόλυτης προτεραιότητας (strict Priority Queueing, PQ)
- δίκαιος με βάρη (Weighted Fair Queueing, WFQ)
- κυκλικής σειράς με βάρη (Weighted Round Robin, WRR)
- WRR με έλλειμμα (Deficit Weighted Round Robin)
- υβριδικό όπως ο βασιζόμενος σε κλάσεις (Class Based Queueing, CBQ) κ.ά.

Με κάθε τέτοιο μηχανισμό σε κάθε διαφορετικό καταχωρητή αποδίδεται τελικά ένα μέρος του εύρους ζώνης του φυσικού μέσου μετάδοσης. Δεδομένων των ρυθμίσεων του κάθε μηχανισμού, το μερίδιο αυτό εξαρτάται από το φόρτο των καταχωρητών.

Έτσι, οι μηχανισμοί διακρίνονται περαιτέρω σε :

- σταθερού έργου (work-conserving)
- μη σταθερού έργου (not work-conserving)

Στους μηχανισμούς σταθερού έργου (work-conserving), το μέγεθος του εύρους ζώνης που παραχωρείται σε κάθε καταχωρητή είναι σταθερό, ανεξάρτητα με το αν ο συνολικός φόρτος είναι χαμηλός και αφήνει μέρος του εύρους ζώνης αναξιοποίητο. Αντίθετα, στους μηχανισμούς μη σταθερού έργου (not work-conserving) όταν υπάρχει επιπλέον εύρος ζώνης, αυτό μοιράζεται μεταξύ των καταχωρητών που έχουν πακέτα προς μετάδοση αυξάνοντας έτσι το μερίδιο που τους αντιστοιχεί. [27]

Ένας χρήστης δικτύου το οποίο υποστηρίζει ποιότητα υπηρεσίας, αντιλαμβάνεται ένα μοντέλο υπηρεσίας παρόμοιο με αυτό ενός τηλεφωνικού δικτύου, σε αντίθεση με αυτό που ισχύει στο κλασσικό Διαδίκτυο. Έτσι, σε πρώτη φάση λαμβάνει χώρα μια διαδικασία παρόμοια με αυτή της εγκατάστασης κλήσης, όπου ο χρήστης προσπαθεί να αρχικοποιήσει μια σύνδεση και να δεσμεύσει τους απαραίτητους πόρους. Υποθέτοντας ότι η κλήση έχει γίνει δεκτή, ο χρήστης έχει στη διάθεσή του έναν καθαρό τηλεπικοινωνιακό δίαυλο. Στην αντίθετη περίπτωση, ο χρήστης λαμβάνει ένα σήμα κατειλημμένου, που τον ειδοποιεί ότι η αίτησή του για σύνδεση με τη συγκεκριμένη ποιότητα δεν έγινε δεκτή.

3.2 Ενοποιημένες Υπηρεσίες (Integrated Services)

3.2.1 Εισαγωγή

Η ποιότητα υπηρεσιών (QoS), όπως ορίστηκε νωρίτερα, απαιτεί προφανώς ένα διαχωρισμό μεταξύ υπηρεσιών, ώστε κάθε μία να υπόκειται σε διαφορετική μεταχείριση. Έτσι, ο οργανισμός **Internet Engineering Task Force (IETF)** όρισε δύο αρχιτεκτονικές ποιότητας υπηρεσίας: την **Αρχιτεκτονική Ενοποιημένων Υπηρεσιών** (Integrated Services Architecture – **IntServ**), η οποία ακολουθήθηκε αρχικά και το **μοντέλο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών** (Differentiated Services Framework – **DiffServ**) που υιοθετήθηκε αργότερα. Η κάθε μία έχει το ρόλο της και ένα σύστημα το οποίο συνδυάζει και τις δύο, προσφέροντας τα συμπληρωματικά πλεονεκτήματά τους, θα αποτελούσε μια πολύ καλή λύση για την επίτευξη ποιότητας υπηρεσίας.

Η ομάδα εργασίας Ενοποιημένων Υπηρεσιών (Integrated Services – IntServ), ιδρύθηκε με σκοπό την επαύξηση της βασικής αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου σε μια νέα IntServ αρχιτεκτονική όπως αρχικά προτάθηκε στο RFC1633, έτσι ώστε να καθίσταται

δυνατή η εξυπηρέτηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας πέραν της best-effort.

Ως αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο υπηρεσιών που περιγράφει τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τη νέα αρχιτεκτονική και αποσκοπεί στην εξυπηρέτηση όλων των τύπων εφαρμογών. Προδιαγράφηκαν οι επιπρόσθετοι μηχανισμοί Ελέγχου Κίνησης (Traffic Control – TC) στους δρομολογητές του δικτύου που είναι απαραίτητοι για την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής, καθώς και οι σχετικές διεπαφές με τους υπάρχοντες μηχανισμούς. Ακόμα, αναπτύχθηκε το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων (Resource Reservation Protocol – RSVP), το οποίο επιτρέπει στις εφαρμογές να επιλέγουν το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας για την κίνηση που δημιουργούν και πρόκειται να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο. Για το λεπτομερή σχεδιασμό του πρωτοκόλλου RSVP ιδρύθηκε η RSVP ομάδα εργασίας.

Σύμφωνα με το μοντέλο Ενοποιημένων Υπηρεσιών οι εφαρμογές κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real-time).
- στις εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου ή ελαστικές (non-real-time/ elastic).

Στις real-time εφαρμογές ταυτόχρονα με τη λήψη των πακέτων στον προορισμό πραγματοποιείται ασύγχρονα και ανεξάρτητα η επεξεργασία τους για τη σύνθεση του δειγματοληπτημένου σήματος. Τα πακέτα που φτάνουν με καθυστέρηση για την ανασύνθεση του σήματος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οπότε θεωρούνται άκυρα και απορρίπτονται. Αντίθετα, στις non-real-time εφαρμογές η επεξεργασία των πακέτων είναι σύγχρονη με τη λήψη τους, μπλοκάρει μέχρι την άφιξη του επόμενου στη σειρά πακέτου η οποία εξασφαλίζεται μέσω μηχανισμών ανίχνευσης λάθους (error detection) και αναμεταδόσεων από την πηγή.

Οι real-time εφαρμογές διακρίνονται περαιτέρω σε δύο υποκατηγορίες :

- στις ανεκτικές (tolerant).
- στις μη ανεκτικές (intolerant) real-time εφαρμογές.

Οι tolerant εφαρμογές είναι εκείνες οι real-time εφαρμογές, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αφομοιώσουν διακυμάνσεις σε delay και jitter και να λειτουργήσουν ικανοποιητικά, σε αντίθεση με τις intolerant εφαρμογές των οποίων η ποιότητα μειώνεται σε παρόμοιες συνθήκες. [27]

Η αρχιτεκτονική IntServ βασίζεται στην προσέγγιση ανά ροή και τη δυναμική δέσμευση πόρων. Μέσω της αρχιτεκτονικής IntServ παρέχεται εξατομικευμένη εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας σε μεμονωμένες συνόδους εφαρμογών. Η λογική πίσω από την IntServ αρχιτεκτονική είναι ότι σε κάθε ροή (flow) δίνονται απόλυτες εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας για την πιθανότητα απωλειών καθώς και για την καθυστέρηση, εφόσον η κίνηση για κάθε ροή υπακούει σε προκαθορισμένες παραμέτρους. Μία ροή καθορίζεται

(στο IPv4) από τις IP διευθύνσεις πηγής και προορισμού, αριθμούς των sockets και το πρωτόκολλο μεταφοράς. Στο IPv6 υπάρχει ειδικό πεδίο γι' αυτό το σκοπό. Οι ροές αναφέρονται σε μία κατεύθυνση μόνο (σε αντίθεση με μια TCP σύνδεση, που είναι διπλής κατεύθυνσης). Κάθε ροή, λοιπόν, μπορεί να συσχετιστεί με μια τιμή ToS (Type Of Service), η οποία αναφέρεται στην ποιότητα υπηρεσίας που απαιτεί. Το πεδίο ToS βρίσκεται στην κεφαλίδα ενός πακέτου του IPv4. [28]

Πιο συγκεκριμένα, προτού κάποια εφαρμογή αρχίσει να στέλνει δεδομένα, στέλνει μία αίτηση στο δίκτυο αναφέροντας το προφίλ της κίνησής της, καθώς και τις απαιτήσεις που έχει σε χωρητικότητα και καθυστέρηση. Αν το δίκτυο αποφασίσει ότι διαθέτει τους απαραίτητους πόρους για την εξυπηρέτηση της εφαρμογής, απαντά ότι αποδέχεται την αίτηση, οπότε και η εφαρμογή μπορεί να αρχίσει να στέλνει δεδομένα. Τα δύο βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής IntServ είναι:

- Δέσμευση πόρων: Ένας δρομολογητής απαιτείται να ξέρει το ποσοστό των πόρων του (ενταμιευτές, εύρος ζώνης) που είναι ήδη εγκατεστημένοι από τις ήδη εγκατεστημένες ροές.
- Εγκατάσταση κλήσης: Μια ροή με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, θα πρέπει πρώτα να δεσμεύσει επαρκείς πόρους σε κάθε δρομολογητή στο μονοπάτι από την πηγή στον προορισμό για να διασφαλίσει από άκρη σε άκρη ποιότητα υπηρεσίας. Η διαδικασία εγκατάστασης κλήσης (γνωστή και ως αποδοχή κλήσης) απαιτεί τη συμμετοχή κάθε δρομολογητή που βρίσκεται στο μονοπάτι. Κάθε δρομολογητής θα πρέπει να ορίσει τους πόρους που απαιτούνται τοπικά από τη συγκεκριμένη ροή, το ποσοστό των πόρων που είναι δεσμευμένοι από τις υπάρχουσες ροές και εάν έχει επαρκείς πόρους για να ικανοποιήσει την ανά κόμβο ποιότητα υπηρεσίας της συγκεκριμένης ροής σε αυτόν τον δρομολογητή, χωρίς να αθετήσει τις τοπικές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας στις ήδη εγκατεστημένες ροές. [29]

Η διαδικασία προετοιμασίας για αποδοχή κλήσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Χαρακτηρισμός της κυκλοφορίας και προσδιορισμός της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσίας. Αρχικά, για να μπορεί ένας δρομολογητής να εξακριβώσει εάν οι πόροι του είναι επαρκείς για να καλύψουν τις απαιτήσεις QoS μιας συνεδρίασης ή όχι, η συνεδρίαση αυτή πρέπει πρώτα να δηλώσει τις απαιτήσεις της σε ποιότητα υπηρεσίας, καθώς και να χαρακτηρίσει την κυκλοφορία που πρόκειται να στείλει στο δίκτυο και για την οποία απαιτεί εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Στην αρχιτεκτονική IntServ, το RSPEC (Request SPECification, προδιαγραφή αιτήματος) ορίζει το συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας που ζητείται από μία σύνδεση. Ακόμη, το TSPEC (Traffic SPECification, κυκλοφορία) χαρακτηρίζει την κυκλοφορία που πρόκειται να παράγει ο αποστολέας στο

δίκτυο ή να λαμβάνει ο παραλήπτης από το δίκτυο. Η συγκεκριμένη μορφή των RSPEC και TSPEC ποικίλλει ανάλογα με τη ζητούμενη υπηρεσία.

2. Σηματοδοσία για την αποδοχή κλήσης. Τα TSPEC και RSPEC μιας συνόδου πρέπει να μεταφέρονται στους δρομολογητές στους οποίους θα δεσμευτούν πόροι για τη συνεδρίαση. Στο Διαδίκτυο, το πρωτόκολλο RSVP, είναι προς το παρόν το προτιμώμενο πρωτόκολλο σηματοδοσίας. Το έγγραφο RFC 2210 περιγράφει τη χρήση του πρωτοκόλλου δέσμευσης πόρων RSVP στην αρχιτεκτονική IntServ.

3. Αποδοχή κλήσης ανά στοιχείο. Αφού ένας δρομολογητής λάβει τα TSPEC και RSPEC για μία συνεδρία η οποία ζητά εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, μπορεί να εξακριβώσει εάν μπορεί να κάνει αποδεκτή τη λύση ή όχι. Αυτή η απόφαση αποδοχής ή όχι της κλήσης εξαρτάται από τον χαρακτηρισμό της κυκλοφορίας, την υπηρεσία και τη διαθεσιμότητα πόρων από τις ήδη εγκατεστημένες συνόδους. [30]

Στο IntServ μοντέλο η δέσμευση των πόρων μπορεί να γίνει με ένα πρωτόκολλο ειδικά σχεδιασμένο γι' αυτό το σκοπό, όπως το RSVP (**R**esource **ReSerV**ation **P**rotocol). Μέσα σε αυτό το μοντέλο ορίζονται πολλαπλές κατηγορίες τηλεπικοινωνιακής κίνησης (traffic classes), οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από το δίκτυο, όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας. Έτσι, πέραν της υπάρχουσας υπηρεσίας βέλτιστης προσπάθειας (Best Effort Service) ορίζονται δύο νέες κατηγορίες κίνησης:

- 1) την υπηρεσία Ελεγχόμενου Φορτίου (Controlled Load service) για tolerant real-time εφαρμογές.
- 2) την υπηρεσία Εγγυημένης Ποιότητας (Guaranteed QoS service) για intolerant real-time εφαρμογές. [27]

3.2.2 Υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου

Η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου παρέχει σχεδόν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας τόσο κάτω από συνθήκες υπερφόρτωσης δικτύου, όσο και κάτω από συνθήκες ελαφριάς κίνησης στο δίκτυο. Η βασική διαφορά σε σχέση με την υπάρχουσα υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας του Διαδικτύου, είναι ότι η αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέσα στο δίκτυο δεν επιδεινώνει την ποιότητα υπηρεσίας των ροών που υπόκεινται στην υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου. Αντίθετα, μια ροή που ελέγχεται από την υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας θα υπόκειντο σε συνεχή και σταδιακή χειροτέρευση της προσφερόμενης υπηρεσίας με την αύξηση του φόρτου του δικτύου.

Η κατηγορία ελεγχόμενου φορτίου είναι κατάλληλη για υπηρεσίες πολυμέσων, οι οποίες μπορούν να ανεχθούν μικρές απώλειες πακέτων και καθυστερήσεις, αρκεί αυτό να γίνεται μέσα σε ένα λογικό πλαίσιο. Για παράδειγμα, η υπηρεσία κινούμενης εικόνας κατά απαίτηση (Video On Demand - VoD) θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τη συγκεκριμένη

κλάση, αρκεί το τερματικό του δέκτη να έχει το κατάλληλο μέγεθος ενταμιευτή, ώστε να μπορεί να κρατήσει ψηφιακά δεδομένα, το χρονικό μήκος των οποίων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη καθυστέρηση που μπορεί να εισάγει το δίκτυο. Μια τέτοιου είδους υπηρεσία πολυμέσων πραγματικού χρόνου ονομάζεται προσαρμοζόμενη υπηρεσία πραγματικού χρόνου (adaptive real-time application). Αντίθετα, για την υπηρεσία μετάδοσης φωνής μεταξύ δύο συνομιλητών, όπου η μέγιστη διαφορά φάσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 125ms, η κατηγορία ελεγχόμενου φορτίου είναι ακατάλληλη.

Μια περιγραφή των χαρακτηριστικών της κίνησης που παράγει μια εφαρμογή πολυμέσων, που θέλει να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου, πρέπει πάντοτε να στέλνεται στο δίκτυο. Αν μια αίτηση για μια νέα ροή ελεγχόμενου φορτίου γίνει αποδεκτή από το δίκτυο, τότε οι δρομολογητές του δικτύου δεσμεύοντας τους κατάλληλους πόρους, διασφαλίζουν ότι τα πακέτα της συγκεκριμένης ροής θα απολαμβάνουν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας ανεξάρτητα από το φόρτο του δικτύου. Σε συνθήκες χαμηλού φόρτου τα πακέτα της ροής αυτής απολαμβάνουν ουσιαστικά την ίδια ποιότητα υπηρεσίας με ροές που ανήκουν στην υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας. [29]

3.2.3 Υπηρεσία εγγυημένης ποιότητας

Τα πακέτα μιας ροής που υπόκεινται στην υπηρεσία εγγυημένης ποιότητας φθάνουν στον προορισμό τους μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, ενώ παράλληλα δεν πρόκειται να απορριφθούν λόγω υπερχείλισης των ενταμιευτών στους δρομολογητές του δικτύου. Τα παραπάνω βέβαια, ισχύουν εφόσον η πηγή της συγκεκριμένης ροής στέλνει πακέτα στο δίκτυο σύμφωνα με τις παραμέτρους κίνησης που έχουν συμφωνηθεί με το δίκτυο. Η διαδικασία ενεργοποίησης της υπηρεσίας ξεκινά από τον αποστολέα (sender) ο οποίος καθορίζει τα χαρακτηριστικά κίνησης της ροής που θα χρησιμοποιήσει την υπηρεσία και στη συνέχεια ο παραλήπτης (receiver) καθορίζει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Όσο ο αποστολέας στέλνει στο δίκτυο κίνηση που υπακούει στα δοθέντα χαρακτηριστικά, τα πακέτα φθάνουν στον αποστολέα χωρίς απώλειες εξαιτίας πιθανής συμφόρησης και με καθυστέρηση μικρότερη ή το πολύ ίση με το δοθέν άνω όριο καθυστέρησης. Για να είναι δυνατή η πραγματοποίηση της υπηρεσίας εγγυημένης ποιότητας, κάθε κόμβος του από άκρο σε άκρο μονοπατιού θα πρέπει να υλοποιεί τους απαραίτητους μηχανισμούς που την υποστηρίζουν.

Ωστόσο, η κλάση εγγυημένης υπηρεσίας δεν ελέγχει την ελάχιστη ή τη μέση καθυστέρηση μιας ροής, ούτε ελαχιστοποιεί τη διακύμανση της μέσης χρονικής απόστασης μεταξύ διαδοχικών πακέτων της συγκεκριμένης ροής (jitter). [29] Η κλάση εγγυημένης υπηρεσίας προορίζεται για υπηρεσίες πολυμέσων με αυστηρότατες

απαιτήσεις όσον αφορά το χρόνο παράδοσης των ψηφιακών δεδομένων. Τέτοιες εφαρμογές είναι ορισμένες εφαρμογές μεταφοράς ήχου ή κινούμενης εικόνας όπου το μέγεθος των ενταμιευτών στους αποκωδικοποιητές είναι σταθερό και μικρό και έτσι κάθε καθυστερημένο πακέτο απορρίπτεται.

3.2.4 Διαχείριση κίνησης στο μοντέλο IntServ

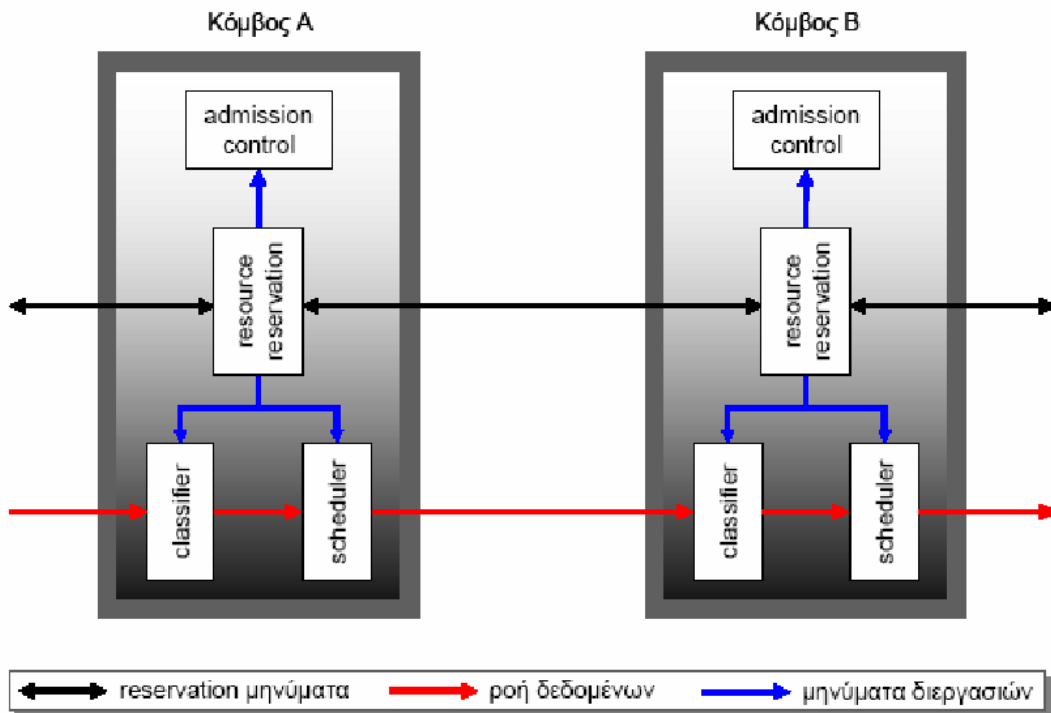
Η αρχιτεκτονική IntServ ορίζει τρεις μηχανισμούς που αποτελούν τις λειτουργίες του ελέγχου κίνησης στους δρομολογητές του δικτύου (βλέπε Σχήμα 3-1), τον χρονοδρομολογητή πακέτων (packet scheduler), τον ταξινομητή πακέτων (packet classifier) και τον έλεγχο εισόδου κίνησης (admission control). Οι μηχανισμοί ελέγχου κίνησης μαζί με το μηχανισμό δέσμευσης πόρων, όπως τελικά υλοποιείται από το πρωτόκολλο RSVP, αποτελούν τα τέσσερα δομικά στοιχεία που είναι απαραίτητα στους κόμβους για την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής IntServ.

Ο μηχανισμός χρονοδρομολόγησης πακέτων διατηρεί μια ξεχωριστή ουρά πακέτων για κάθε ενεργή ροή. Η λειτουργία του χωρίζεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, κάθε ροή ελέγχεται κατά πόσο είναι σύμφωνη με το αρχικό προφίλ κίνησης που είχε ζητήσει από το δίκτυο. Πακέτα που δεν είναι σύμφωνα με το αρχικό προφίλ κίνησης απορρίπτονται. Στη συνέχεια, η μονάδα χρονοδρομολόγησης αδειάζει τη μία μετά την άλλη τις ουρές πακέτων εξυπηρετώντας πρώτη εκείνη με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Ο ταξινομητής πακέτων ταξινομεί κάθε εισερχόμενο πακέτο σε μια συγκεκριμένη κλάση. Στις διαμορφωμένες αυτές κλάσεις επενεργεί στη συνέχεια ο scheduler παρέχοντας διαφοροποιημένη ανά κλάση ποιότητα υπηρεσίας. Η εύρεση της κλάσης στην οποία μπορεί να ανήκει ένα συγκεκριμένο πακέτο γίνεται βάσει της διεύθυνσης προορισμού, της διεύθυνσης πηγής, του αριθμού της θύρας πηγής (source port number), του αριθμού της θύρας προορισμού (destination port number) καθώς και του ενδείκτη πρωτοκόλλου μεταφοράς (Protocol ID). Αν ένα πακέτο δεν ανήκει σε καμία ενεργή ροή τότε αυτό χειρίζεται ως πακέτο κλάσης βέλτιστης προσπάθειας. Φυσικά, τα πακέτα της κλάσης βέλτιστης προσπάθειας, αντιμετωπίζουν τη χειρότερη συμπεριφορά σε σχέση με τα πακέτα των υπόλοιπων κλάσεων. Οι κανόνες ταξινόμησης μπορεί να διαφέρουν από κόμβο σε κόμβο με την ίδια λογική που ο μηχανισμός scheduler μπορεί είναι διαφορετικός.

Ο έλεγχος εισόδου κίνησης αποφασίζει εάν μία νέα ροή, μπορεί να εξυπηρετηθεί αν η ποιότητα υπηρεσίας που αιτείται δε μειώνει την ποιότητα υπηρεσίας των ήδη ενεργών ροών. Συνήθως, αυτός ο έλεγχος γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, ελέγχεται αν ο χρήστης που ζητάει να γίνει η συγκεκριμένη δέσμευση έχει και την ανάλογη άδεια (Policy Control). Στη δεύτερη φάση, συγκρίνονται οι παράμετροι της κίνησης της

νέας ροής με τους διαθέσιμους πόρους του δρομολογητή. Μόνο αν ο χρήστης έχει το δικαίωμα να κάνει τη συγκεκριμένη δέσμευση και υπάρχουν και οι ανάλογοι πόροι στο σύστημα η αίτηση γίνεται αποδεκτή. Σε αυτή την περίπτωση ενημερώνεται και η τοπική βάση δεδομένων που φυλάει τις ενεργές ροές με τις παραμέτρους κίνησής τους. Ο αλγόριθμος ελέγχου εισόδου κίνησης πρέπει να είναι συμβατός με το υπό χρήση μοντέλο υπηρεσιών.



Σχήμα 3-1: Λειτουργικό μοντέλο κόμβου IntServ [27]

3.2.5 Το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων – RSVP

Το μοντέλο IntServ του Διαδικτύου διαχωρίζει το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για μεταφορά αιτήσεων δέσμευσης πόρων δικτύου από το μηχανισμό ελέγχου και την περιγραφή της κίνησης του χρήστη (QoS control). Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται κυρίως το πρωτόκολλο μεταφοράς αιτήσεων δέσμευσης πόρων δικτύου.

Το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων – Resource Reservation Protocol, RSVP (RFC 2205, Zhang 1993) διαφέρει σε αρκετά σημεία από άλλα πρωτόκολλα σηματοδότησης που έχουν αναπτυχθεί για δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Χαρακτηριστικότερη διαφορά, είναι η υποστήριξη πολλαπλών ετερογενών δεσμεύσεων μέσα σε μια σύνοδο πολλαπλών μερών προς πολλαπλά μέρη. Αυτό σημαίνει ότι διαφορετικοί δέκτες της ίδιας συνόδου μπορούν να ζητήσουν διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται είτε διότι οι δέκτες δεν έχουν όλοι την ίδια δικτυακή υποδομή (για παράδειγμα ένας δέκτης μπορεί να λαμβάνει μέρος σε μια υπηρεσία τηλεδιάσκεψης μέσω ενός απλού modem στα 56 kbps ενώ ένας άλλος να είναι συνδεδεμένος σε ένα LAN των 10Mbps), είτε λόγω

διαφοροποίησης του κόστους βάσει της ποιότητας υπηρεσίας. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου RSVP, είναι η υποστήριξη δυναμικής μεταβολής της ποιότητας υπηρεσίας μιας δεδομένης ροής πακέτων. Ανά πάσα στιγμή, ο κάθε δέκτης μπορεί να μεταβάλει τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας μιας ροής, χωρίς να είναι απαραίτητο να γίνει πρώτα προσωρινή κατάργησή της και εκ νέου επανεγκατάστασή της. Ένα άλλο μοναδικό χαρακτηριστικό που συναντάται στο RSVP, είναι ότι η δέσμευση των πόρων του δικτύου γίνεται από το δέκτη της πληροφορίας και όχι από τον πομπό. Μάλιστα, ο δέκτης της πληροφορίας μπορεί να ζητήσει από το δίκτυο να δεσμευτούν λιγότεροι πόροι από ότι ορίζεται στο προφίλ κίνησης του πομπού. Αυτό είναι απαραίτητο για την υποστήριξη ετερογενών δεσμεύσεων μέσα στην ίδια σύνοδο. Ακόμη, το γεγονός ότι η δέσμευση πόρων γίνεται από το δέκτη της πληροφορίας διευκολύνει την ύπαρξη συνόδων με πολύ μεγάλο αριθμό μελών.

Το πρωτόκολλο RSVP τοποθετείται ακριβώς πάνω από το πρωτόκολλο IP στη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, καταλαμβάνοντας τη θέση πρωτοκόλλου μεταφοράς (βλέπε Σχήμα 3-2). Ωστόσο, το RSVP παρέχει υπηρεσίες επιπέδου συνόδου εφόσον δε μεταφέρει δεδομένα εφαρμογής.

Application		
Sockets I/F		
TCP	UDP	RSVP
IP		
Data Link Layer		

Σχήμα 3-2: Στοίβα πρωτοκόλλων τερματικού Διαδικτύου [29]

Το RSVP είναι ένα μονόδρομο (simplex) πρωτόκολλο σηματοδότησης (signaling), που μεταφέρει αιτήσεις δέσμευσης πόρων για ροές μίας κατεύθυνσης και επιστρέφει μια ένδειξη για την επιτυχή ή αποτυχημένη περάτωση της διαδικασίας στην πλευρά που πραγματοποιεί την αίτηση. Το ίδιο το RSVP δεν είναι πρωτόκολλο δρομολόγησης, αλλά χρησιμοποιεί τους πίνακες δρομολόγησης όπως έχουν διαμορφωθεί από άλλους μηχανισμούς. Η δέσμευση πόρων σε ένα κόμβο για κάθε ροή κίνησης που τον διατρέχει, συνεπάγεται την αποθήκευση και διαχείριση πληροφορίας κατάστασης της ροής στον κόμβο, χαρακτηριστικό που αποτελεί θεμελιώδη και ουσιαστική αλλαγή στη βασική αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Ακόμη, λόγω του ότι το RSVP είναι πρωτόκολλο χαλαρής κατάστασης (soft-state), ανά τακτά χρονικά διαστήματα αυτή η πληροφορία κατάστασης, πρέπει να ανανεώνεται με την αποστολή και λήψη νέων μηνυμάτων για να συνεχίζει να θεωρείται έγκυρη.

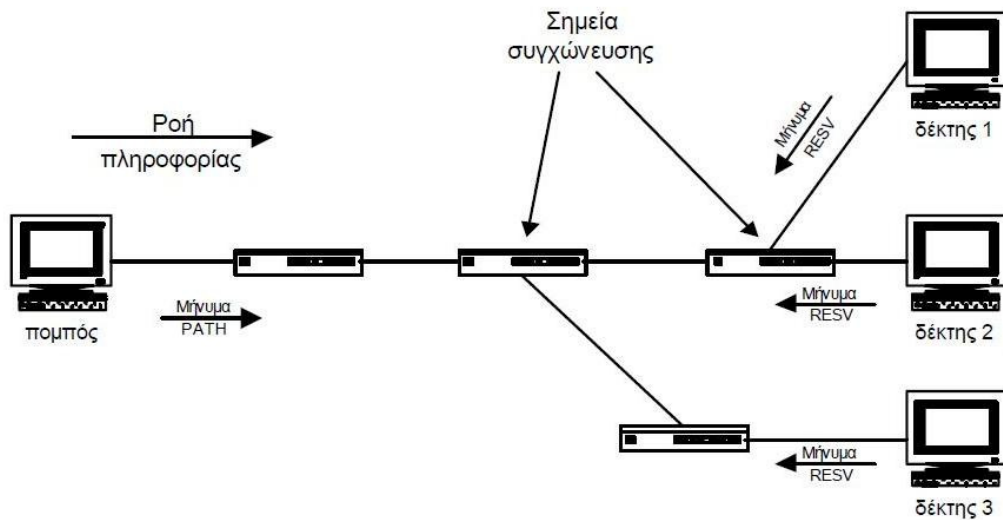
Η διαδικασία δέσμευσης πόρων με το πρωτόκολλο RSVP πραγματοποιείται ως εξής. Η δέσμευση πόρων δικτύου γίνεται από το δέκτη της πληροφορίας και όχι από τον πομπό. Ωστόσο, για να μπορέσει ο δέκτης να δεσμεύσει πόρους του δικτύου θα πρέπει να ξέρει τα χαρακτηριστικά της κίνησης (μέσο και μέγιστο εύρος ζώνης, μέγιστη χρονική καθυστέρηση κλπ.) που πρόκειται να αρχίσει να λαμβάνει. Γι' αυτό το λόγο, προτού ο δέκτης κάνει οποιαδήποτε ενέργεια για δέσμευση πόρων, ο πομπός στέλνει ένα ειδικό μήνυμα, που ονομάζεται PATH message, με σκοπό να ενημερώσει το δέκτη αλλά και τους ενδιαμέσους δρομολογητές, για τα χαρακτηριστικά της κίνησης που πρόκειται να αρχίσει να εκπέμπει. Το μήνυμα PATH, μέχρι να φτάσει στο δέκτη (ή στους δέκτες, αν η διεύθυνση προορισμού είναι διεύθυνση πολλαπλών δεκτών, multicast IP address) περνάει μέσα από έναν ή περισσότερους δρομολογητές. Κάθε ενδιαμέσος δρομολογητής που λαμβάνει ένα μήνυμα PATH ελέγχει αρχικά αν είναι έγκυρο ή όχι το περιεχόμενό του. Αν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του διαπιστωθεί κάποιο λάθος, τότε ο ενδιαμέσος δρομολογητής στέλνει ένα ειδικό μήνυμα λάθους στον πομπό έτσι ώστε να ληφθούν οι κατάλληλες ενέργειες. Αν το περιεχόμενο του μηνύματος PATH είναι έγκυρο, τότε αυτό φυλάσσεται σε μια τοπική βάση δεδομένων, τίθεται ο χρονιστής επανεκκίνησης για τη συγκεκριμένη ροή και τέλος αποστέλλεται στον επόμενο δρομολογητή. Σε αυτή τη φάση, σε κάθε ενδιαμέσο κόμβο αποθηκεύεται η κατάσταση μονοπατιού (path state) για τη συγκεκριμένη ροή με βάση τα PATH μηνύματα αλλά δε γίνεται καμία απόπειρα δέσμευσης πόρων.

Ο λόγος που οι ενδιαμέσοι δρομολογητές αποθηκεύουν τα περιεχόμενα των μηνυμάτων PATH είναι ο εξής: για κάθε μήνυμα PATH ένας δρομολογητής δέχεται μία ή περισσότερες αιτήσεις για δέσμευση εσωτερικών πόρων, που ονομάζονται RESV message. Τα RESV μηνύματα, περιλαμβάνουν πληροφορία σχετικά με τις απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας και ακολουθούν το αντίστροφο μονοπάτι που υποδεικνύεται από το path state σε κάθε ενδιαμέσο κόμβο. Αν κάποια στιγμή ο πομπός αποφασίσει να σταματήσει να στέλνει δεδομένα, τότε όλοι οι ενδιαμέσοι δρομολογητές θα πρέπει να καταργήσουν αυτομάτως και όλες τις δεσμεύσεις πόρων που έχουν γίνει για τη συγκεκριμένη ροή πακέτων. Επιπλέον, ο χρονιστής τίθεται για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του δικτύου με τον εξής τρόπο: αν για χρονικό διάστημα ίσο με την περίοδο του χρονιστή, ο ενδιαμέσος δρομολογητής δε λάβει μήνυμα ανανέωσης από τον πομπό της πληροφορίας, τότε το δίκτυο θεωρεί ότι ο πομπός της πληροφορίας σταμάτησε να εκπέμπει κίνηση στο δίκτυο και άρα όλες οι συσχετιζόμενες δεσμεύσεις πρέπει να καταργηθούν. Μηνύματα ανανέωσης, είναι υποχρεωμένοι να στέλνουν τόσο οι πομποί όσο και οι δέκτες σε τακτά χρονικά διαστήματα, μικρότερα των αντίστοιχων χρονιστών που τίθενται στους ενδιαμέσους δρομολογητές.

Όταν το μήνυμα PATH περάσει μέσα από όλους τους ενδιαμέσους δρομολογητές και φτάσει τελικά στο δέκτη (ή δέκτες) της πληροφορίας, τότε αυτός στέλνει στο δίκτυο το κατάλληλο μήνυμα RSVP, δηλαδή το RESV message, για τη δέσμευση των αντίστοιχων πόρων. Σε αυτή τη φάση, με βάση τα RESV μηνύματα σε κάθε κόμβο επιχειρείται δέσμευση πόρων και αντίστοιχα αποθηκεύεται η κατάσταση δέσμευσης (reservation state) για τη συγκεκριμένη ροή. Στη συνέχεια, αν επιτύχει η δέσμευση πόρων το μήνυμα RESV προωθείται στον επόμενο κόμβο προς τον αποστολέα ή σε αντίθετη περίπτωση ένα μήνυμα λάθους (RESV_ERR).

Με την επιτυχή διεκπεραίωση της διαδικασίας, ο αποστολέας ξεκινά τη μετάδοση πακέτων που συνιστούν τη ροή δεδομένων, που εξυπηρετείται από τους δεσμευμένους πλέον από άκρο σε άκρο πόρους του δικτύου.

Το γεγονός πως το πρωτόκολλο RSVP είναι προσανατολισμένο προς τον παραλήπτη (receiver-oriented) παρέχει πολλά πλεονεκτήματα σε ένα περιβάλλον εφαρμογών πολλαπλής αποστολής (multicast). Για παράδειγμα, κάθε φύλλο του δένδρου πολλαπλής αποστολής, απαιτεί να έχει το δικό του επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας και είναι δυνατό να συγχωνεύονται οι αντίστοιχες δεσμεύσεις πόρων στους ενδιαμέσους κόμβους. Το πρωτόκολλο RSVP έχει σχεδιαστεί ανεξάρτητα από τις προδιαγραφές των υπηρεσιών του μοντέλου IntServ. Στο Σχήμα 3-3, φαίνεται η διαδρομή των μηνυμάτων για το πρωτόκολλο RSVP.



Σχήμα 3-3: Ροή μηνυμάτων πρωτοκόλλου σηματοδότησης Διαδικτύου RSVP [29]

3.2.6 Πλεονεκτήματα του μοντέλου IntServ – RSVP

Η αρχιτεκτονική που προέρχεται από τις Ενοποιημένες Υπηρεσίες παρέχει αρκετά οφέλη. Η συμπεριφορά του μοντέλου προδιαγράφηκε με αρκετή λεπτομέρεια ώστε να επιτρέπει στους πελάτες RSVP (RSVP clients) να προδιαγράψουν κάθε κατηγορία υπηρεσίας λεπτομερώς. Επειδή το RSVP εφαρμόζεται σε κάθε δρομολογητή από την

πηγή έως τον προορισμό, κάθε ροή μπορεί να παρακολουθηθεί ώστε να αποτραπεί η κατανάλωση περισσότερων πόρων από αυτούς που αρχικά είχαν ζητηθεί, δεσμευθεί και προφανώς πληρωθεί.

Ένα άλλο όφελος του RSVP, είναι ότι χρησιμοποιεί τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης ώστε να ορίσει το μονοπάτι της ροής μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Περιοδικά αναμεταδίδονται τα μηνύματα PATH και RESV και το πρωτόκολλο μπορεί και αντιδρά στην αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου. Αυτά ακριβώς τα ανανεωμένα PATH και RESV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αλλάξουν το μονοπάτι της δεσμευμένης ροής. Η απώλεια αυτών των μηνυμάτων μπορεί να βοηθήσει επίσης στη διαπίστωση ότι είτε ο αποστολέας είτε ο παραλήπτης δεν είναι πλέον ενεργός. Όταν ο δρομολογητής ανακαλύψει αυτήν την απώλεια, αποδεσμεύει τους πόρους που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη σύνοδο.

Ένας από τους πρωταρχικούς σκοπούς του IntServ, ήταν να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας σε ροές από μια πηγή σε έναν προορισμό (unicast) και από μια πηγή σε πολλαπλούς προορισμούς (multicast). Το πρωτόκολλο RSVP σχεδιάστηκε ώστε να επιτρέπει στα μηνύματα PATH, να αναγνωρίζουν όλα τα τερματικά σημεία μιας ροής πολλαπλών προορισμών και να στέλνουν το μήνυμα PATH σε κάθε αποδέκτη. Επίσης, επιτρέπει στα μηνύματα RESV από κάθε αποδέκτη να μπορούν να συνδυάζονται σε μία μόνο αίτηση στα σημεία του δικτύου όπου ροή πολλαπλών προορισμών θα έστελνε την ίδια ροή σε δύο διαφορετικά κανάλια.

3.2.7 Μειονεκτήματα του μοντέλου IntServ – RSVP

Η αρχιτεκτονική IntServ ωστόσο παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα (scalability) που απορρέουν από τη χρήση του RSVP. Η απαίτηση από όλους τους δρομολογητές να παίρνουν μέρος στη δέσμευση πόρων, είναι μια διαδικασία η οποία απαιτεί από τον κάθε δρομολογητή να αποθηκεύει και να συντηρεί μεγάλο όγκο πληροφορίας και να έχει μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Οι πόροι σε ισχύ επεξεργασίας και χώρο μνήμης ενός δρομολογητή που αναλίσκονται για τις ανάγκες του RSVP σε επίπεδο ελέγχου (control plane) και σε επίπεδο δεδομένων (data plane), αυξάνουν αναλογικά με τον αριθμό των ροών που απαιτούν ποιότητα υπηρεσίας, εκείνων δηλαδή που χρησιμοποιούν υπηρεσία άλλης της best effort. Αυτό το μοντέλο δεν είναι πρακτικά χρησιμοποιήσιμο για ροές που διαρκούν λίγο, γιατί το τίμημα για τη δέσμευση των πόρων είναι μεγαλύτερο ακόμα και από την επεξεργασία όλων των πακέτων της ροής. Έχει αποδειχθεί, πως οι περισσότερες IP συνδέσεις από άκρο σε άκρο διαρκούν πολύ λίγο και πως μερικές δεκάδες χιλιάδες τέτοιες συνδέσεις είναι ενεργές ανά πάσα στιγμή σε ένα μέσο δρομολογητή ενός δικτύου κορμού. Τα RSVP μηνύματα για την εγκατάσταση κάθε τέτοιας σύνδεσης, επιβαρύνουν σημαντικά το δίκτυο σε εύρος ζώνης αναλογικά με το

εύρος ζώνης που τελικά χρησιμοποιείται από αυτές τις συνδέσεις. Έτσι, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται έστω και ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας από ροές μικρής διάρκειας, το μοντέλο IntServ θα απαιτούσε πολύ κόπο σε σχέση με το αποτέλεσμα.

Το μοντέλο IntServ απαιτεί ένα μεγάλο όγκο πληροφορίας για την κατάσταση της ροής. Η κατάσταση περιλαμβάνει πληροφορία για τον προσδιορισμό της ταυτότητας της ροής και των πόρων που καταναλώνει. Επίσης, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αστυνόμευσης της κίνησης και προγραμματισμού της, σύμφωνα με τις υποχρεώσεις που προκύπτουν από την προκαθορισμένη δέσμευση πόρων. Ο πυρήνας του δικτύου θα μπορούσε να περιέχει εκατομμύρια τέτοιες συνδέσεις. Χειροτερεύοντας ακόμα το σενάριο, αν η τοπολογία του δικτύου άλλαζε, οι δεσμεύσεις πόρων για όλες αυτές τις συνδέσεις θα έπρεπε να διαπραγματευτούν ξανά ταυτοχρόνως. Όλα αυτά καθιστούν σχεδόν αδύνατη την εφαρμογή του RSVP σε μεγάλη κλίμακα. [29]

3.3 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services)

3.3.1 Εισαγωγή

Αναγνωρίζοντας τα προβλήματα εφαρμογής της αρχιτεκτονικής IntServ σε μεγάλη κλίμακα, ο οργανισμός IETF δημιούργησε την ομάδα εργασίας Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (Differentiated Services, DiffServ). Σκοπός της είναι η δημιουργία μιας εναλλακτικής πρότασης επέκτασης της βασικής αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου, για παροχή ποιότητας υπηρεσίας που να είναι εφαρμόσιμη σε μεγάλη κλίμακα (scalable). Η συγκεκριμένη ομάδα εργασίας, που θεσπίστηκε το Φεβρουάριο του 1998, παρουσίασε το Δεκέμβριο του ίδιου έτους το RFC 2475 για την Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών.

Η βασική αρχή της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι ότι τοποθετεί τη διαχείριση ροών κίνησης στα άκρα του δικτύου, όπου γίνεται η ανάθεση και συνάθροιση (aggregation) των ροών κίνησης σε πεπερασμένες και προκαθορισμένες κλάσεις, ενώ η διαχείριση των κλάσεων αυτών γίνεται από τους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου. Έτσι, η ογκώδης πληροφορία και η πολύπλοκη επεξεργασία (π.χ. αστυνόμευση, μορφοποίηση) των ξεχωριστών ροών, δηλαδή των μεμονωμένων συνόδων που αποτελούσαν τις ροές στο IntServ, περιορίζεται στους ακραίους κόμβους. Ενώ, οι εσωτερικοί κόμβοι, ανεξάρτητα από το πλήθος των ενεργών ροών, καλούνται να διαχειριστούν ανά πάσα στιγμή τον ίδιο αριθμό κλάσεων. Έτσι, η αρχιτεκτονική καθίσταται εφαρμόσιμη σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής DiffServ έναντι του μοντέλου IntServ/RSVP, καθώς μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί. [27]

Ως αποτέλεσμα των πιο πάνω, είναι και η απαλλαγή των εσωτερικών κόμβων από τη διαδικασία δέσμευσης πόρων ανά ροή και κατά συνέπεια από την από άκρο σε άκρο

σηματοδοσία κατά την ενεργοποίηση μιας ροής. Η πληροφορία για την ποιότητα υπηρεσίας που είναι να λάβει μια ροή φαίνεται στην επικεφαλίδα των πακέτων με την αναγραφή της κλάσης, στην οποία έχει ενταχθεί. Συγκεκριμένα, η πληροφορία αυτή κωδικοποιείται στο DS (Differentiated Services) πεδίο της επικεφαλίδας των IP πακέτων. Το πεδίο DS, ορίστηκε από την ομάδα εργασίας της IEEE για τις Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες, αντικαθιστώντας το πεδίο Type of Service - TOS (στο IPv4) ή το πεδίο Traffic Class (στο IPv6).

Η αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών επιτυγχάνει να λύσει το πρόβλημα της επεκτασιμότητας με τον προσδιορισμό ενός μικρού αριθμού απλών, διαφοροποιημένων χειρισμών προώθησης πακέτων (differentiated packet forwarding treatments), γνωστών με το όνομα Συμπεριφορά Προώθησης Ανά-Κόμβο (Per-Hop Behavior, PHB). Μεμονωμένα δικτυακά στοιχεία υλοποιούν τις PHBs με μία πληθώρα μηχανισμών και κανόνων αναμονής και εξυπηρέτησης (queueing disciplines). Η ουσία των Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών είναι ο συνδυασμός των PHBs με προσεκτικά ρυθμισμένους μηχανισμούς πολιτικών κίνησης στα άκρα του δικτύου για την παροχή διάφορων υπηρεσιών. Επιβάλλοντας λειτουργίες ελέγχου πολιτικών στα άκρα και παρέχοντας απλή μεταχείριση συσσωρευμένων δεδομένων στον πυρήνα του δικτύου, μπορούν να διασφαλιστούν νέες υπηρεσίες IP χωρίς υπερβολική αποθήκευση πληροφορίας κατάστασης ή ακριβών αποφάσεων προώθησης στους δρομολογητές του δικτύου πυρήνα.

Περιοδικά, η λειτουργία του μοντέλου DiffServ έχει ως εξής: οι πελάτες ζητούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσίας, μαρκάροντας το πεδίο DS του κάθε πακέτου με μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή αυτή προσδιορίζει την ανά κόμβο συμπεριφορά του δικτύου (PHB) ως προς το πακέτο. Οι τιμές του DS πεδίου είναι μέσα στα πλαίσια της συμφωνίας (Service Level Agreement, SLA) ανάμεσα στον πάροχο (provider) και τον πελάτη και ορίζουν τις παραμέτρους του επιπέδου υπηρεσίας, όπως είναι ο ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα μετάδοσης και απόρριψης, η εξυπηρέτηση στην ουρά κ.α. [31]

Όσον αφορά τις οντότητες, που πρέπει να υπάρχουν σε ένα δίκτυο να μπορεί αυτό να υποστηρίξει DiffServ, ταξινομητές πακέτων (classifiers), μηχανισμούς αστυνόμευσης (policers), σημαδευτές πακέτων (markers) και ένα καινούργιο είδος στοιχείου δικτύου τον Μεσίτη Εύρους Ζώνης (Bandwidth Broker, BB).

Πακέτα διαφορετικών υπηρεσιών έχουν διαφορετικές προτεραιότητες και φυσικά αντιμετωπίζονται και με διαφορετικό τρόπο. Κατά συνέπεια, οι δρομολογητές κάνουν διάκριση των πακέτων βάσει της υπηρεσίας (δηλαδή της κλάσης) στην οποία ανήκουν και όχι βάσει της ροής. Επειδή δε, ο αριθμός των διακριτών υπηρεσιών που μπορεί να υπάρχουν σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου είναι γενικά μικρός και ανεξάρτητος του αριθμού των χρηστών που εξυπηρετεί το δίκτυο (σε αντίθεση με τις ενεργές ροές), η

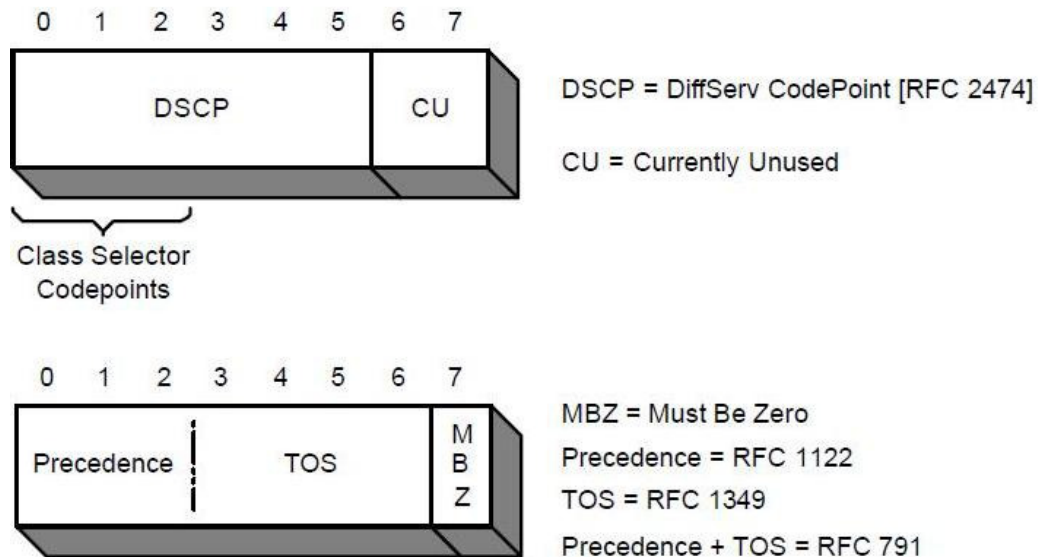
αρχιτεκτονική των διαφοροποιημένων υπηρεσιών είναι επεκτάσιμη. Η κλάση ενός πακέτου (δηλαδή σε ποια διαφοροποιημένη υπηρεσία ανήκει) καθορίζεται από την τιμή του πεδίου DiffServ Code Point (DSCP) που βρίσκεται στην επικεφαλίδα του. Κατά συνέπεια, όταν ένας χρήστης κάνει χρήση μιας χρονικά ευαίσθητης υπηρεσίας, όπως είναι η μεταφορά φωνής, δεν έχει παρά να σημαδέψει τα πακέτα του με τέτοιο τρόπο ώστε αυτά να τύχουν και της ανάλογης αντιμετώπισης από το δίκτυο. Εναλλακτικά, η ταξινόμηση των πακέτων ενός χρήστη μπορεί να γίνεται στον πρώτο δρομολογητή με τον οποίο συνδέεται άμεσα ο συγκεκριμένος χρήστης. Σε αυτή την περίπτωση, χρειάζεται να προδιαγραφούν τα κριτήρια για την ταξινόμηση των πακέτων, για παράδειγμα, όλα τα πακέτα με ένα συγκεκριμένο αριθμό θύρας (Port Number) που χρησιμοποιείται από μια εφαρμογή μεταφοράς φωνής, να ταξινομούνται στην κλάση μέγιστης προτεραιότητας. Αυτή η λύση είναι προτιμότερη γιατί δε χρειάζεται να γίνει καμία αλλαγή στη στοίβα πρωτοκόλλου των τερματικών. Ωστόσο, η αρχιτεκτονική των διακριτών υπηρεσιών δεν περιορίζεται αποκλειστικά στον τελικό χρήστη για την ταξινόμηση των πακέτων που στέλνει στο δίκτυο. Είναι φανερό ότι σε μια τέτοια περίπτωση κάθε χρήστης θα σημάδευε όλα τα πακέτα του ως πακέτα μέγιστης προτεραιότητας και κατά συνέπεια το τελικό αποτέλεσμα θα ήταν το ίδιο με την παρούσα κατάσταση. Για αυτό το λόγο, η αρχιτεκτονική των διακριτών υπηρεσιών προσθέτει επιπλέον λειτουργίες στους δρομολογητές που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου, όπου το φορτίο είναι σχετικά μικρό, οι οποίες αποσκοπούν στον έλεγχο της κίνησης που εισάγει ένας χρήστης στο δίκτυο. Αν ένας συνδρομητής εισάγει περισσότερη κίνηση για μια συγκεκριμένη κλάση από αυτή που του αναλογεί, τότε η επιπλέον κίνηση είτε απορρίπτεται είτε υποβιβάζεται σε μια άλλη κλάση χαμηλότερης προτεραιότητας. Συνοψίζοντας, οι βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής των διακριτών ή διαφοροποιημένων υπηρεσιών είναι:

- Περιορισμός της πολυπλοκότητας στον πυρήνα του δικτύου έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο επεκτάσιμο.
- Τοποθέτηση εργασιών (έλεγχος κίνησης, χρέωση κλπ) που είναι απαραίτητες για τη σωστή λειτουργία του δικτύου στα άκρα του, όπου το τηλεπικοινωνιακό φορτίο είναι μικρό.

3.3.2 Πεδίο DS

Η αρχιτεκτονική DiffServ αντί να καθορίσει τα χαρακτηριστικά των ίδιων των υπηρεσιών, καθορίζει τα χαρακτηριστικά πεπερασμένων κλάσεων που υλοποιεί το δίκτυο και οι οποίες αποτελούν τα δομικά στοιχεία με βάση τα οποία στη συνέχεια κάθε πάροχος υπηρεσιών Διαδικτύου μπορεί να δομήσει τις υπηρεσίες που θα παρέχει στην περιοχή του, εξυπηρετώντας καλύτερα τις ιδιαίτερες ανάγκες του. [27] Κάθε πακέτο που εισέρχεται

στο δίκτυο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών μαρκάρεται με ένα Κωδικό Σημείο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DiffServ Code Point, DSCP) σε ένα καινούργιο πεδίο της επικεφαλίδας IP, το πεδίο DS, για να δηλώσει ποια PHB πρέπει να λάβει το πακέτο. Τα πακέτα με το ίδιο DSCP ανήκουν σε μία συσσωρευμένη συμπεριφορά (behavior aggregate) και λαμβάνουν την ίδια μεταχείριση PHB, ανεξάρτητα από τη μικρο-ροή στην οποία ανήκουν.[29] Στη συνέχεια, αναλύουμε το DS πεδίο.



Σχήμα 3-4: Πεδίο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DS field)

Στο παραπάνω Σχήμα 3-4 φαίνεται το format του DS πεδίου, όπως έχει οριστεί από την ομάδα εργασίας των DiffServ. Τα πρώτα 6 bits του πεδίου αποτελούν το Differentiated Services Code Point (DSCP) και χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν την Per-Hop Behavior που θα έχει το πακέτο και κατά συνέπεια την υπηρεσία που θα του παρέχεται. Συνολικά, μπορούν να διακριθούν 64 (2⁶) διαφορετικές υπηρεσίες (προτεραιότητες) στο DSCP μέσα στο DS πεδίο. Οι 64 υπηρεσίες έχουν χωριστεί σε τρεις διαφορετικές ομάδες :

1. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από 32 απ' άκρο σε άκρο συμπεριφορές (υπηρεσίες).
2. Οι επόμενες 16 υπηρεσίες είναι δεσμευμένες για τοπική ή πειραματική χρήση.
3. Οι επόμενες 16 υπηρεσίες είναι δεσμευμένες αρχικά για τοπική ή πειραματική χρήση, αλλά πρέπει να χρησιμοποιούνται σαν overflow ομάδες υπηρεσιών σε περίπτωση που και οι 32 υπηρεσίες της πρώτης ομάδας έχουν όλες χρησιμοποιηθεί.

Τα τελευταία 2 bits του DS field είναι δεσμευμένα για μελλοντική χρήση και αγνοούνται κατά τη διαδικασία της επιλογής PHB. Όμως, υπάρχει ένα πλήθος από δρομολογητές που δεν ανήκουν σε πεδία που υποστηρίζουν DiffServ και συνεχίζουν να ρυθμίζουν τη λειτουργία τους με βάση την τιμή του Traffic Class πεδίου στην επικεφαλίδα

των IP πακέτων. Η μετατροπή ενός πεδίου που δεν υποστηρίζει DiffServ σε πεδίο που υποστηρίζει DiffServ είναι μη πρακτική και αρκετά δύσκολη. Έτσι, για την παροχή ολοκληρωμένων από άκρο σε άκρο υπηρεσιών πρέπει να υπάρχει κάποια συμβατότητα ανάμεσα στο DSCP πεδίο και στο Traffic Class πεδίο. Για το σκοπό αυτό τα 3 bits προτεραιότητας του Traffic Class πεδίου λαμβάνονται υπόψη και διερμηνεύονται στο DSCP πεδίο, από τον δρομολογητή που υποστηρίζει DiffServ. Από το DSCP πεδίο μπορούν, λοιπόν, να υποστηριχθούν, 8 (23) επίπεδα προτεραιότητας (class selector code points). [31]

3.3.3 Υπηρεσίες DiffServ

Πέραν της κλάσης βέλτιστης προσπάθειας (**Best Effort**) το δίκτυο υποστηρίζει δύο επιπλέον διακριτές υπηρεσίες: την Εξαιρετική (**Premium**) και την Εγγυημένη (**Assured**).

Η Premium κλάση υλοποιεί μια υπηρεσία που έχει συγκεκριμένο μέγιστο εύρος ζώνης (Peak Bandwidth) και ασήμαντη αναμονή στις ουρές των δρομολογητών. Δε δανείζεται εύρος ζώνης από άλλες υπηρεσίες και μπορεί να υλοποιηθεί αρκετά εύκολα. Αυτή η κλάση είναι κατάλληλη για εμπορικές εφαρμογές που δεν έχουν μεγάλη εκρηκτικότητα αλλά είναι αρκετά ευαίσθητες στις χρονικές καθυστερήσεις (για παράδειγμα VoIP, video conference). Από την άλλη μεριά, η Assured υπηρεσία, έχει χρονικές καθυστερήσεις παρόμοιες με αυτές που έχει η υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας όταν το δίκτυο δε διαθέτει υψηλό φορτίο. Ροές πακέτων που χρησιμοποιούν την Assured υπηρεσία μπορούν να δανείζονται εύρος ζώνης από άλλες κλάσεις χαμηλότερης προτεραιότητας (ή και από κλάσεις υψηλότερης προτεραιότητας όταν αυτές έχουν μικρή κίνηση) όταν αυτό είναι απαραίτητο. Για αυτό το λόγο, η συγκεκριμένη υπηρεσία είναι κατάλληλη για εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου με υψηλή εκρηκτικότητα (για παράδειγμα World Wide Web). [29] Στον Πίνακα 3-2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών σε εύρος ζώνης καθώς και η χρονική ευαισθησία τους.

Application	Bandwidth	Sensitivity to		
		Delay	Jitter	Loss
VoIP	Low	High	High	Med
Video Conferencing	High	High	High	Med
Streaming video on demand	High	Med	Med	Med
Streaming audio	Low	Med	Med	Med
Client/Server transactions	Med	Med	Low	High
E-mail	Low	Low	Low	High
File transfer	Med	Low	Low	High

Πίνακας 3-2: Απαιτήσεις διαφόρων υπηρεσιών [28]

Η υιοθέτηση των δύο παραπάνω υπηρεσιών στο ίδιο δίκτυο έχει μερικά επιπλέον οφέλη. Καταρχήν, η Premium κλάση κάνει σπατάλη στη δέσμευση των πόρων του δικτύου (αφού η δέσμευση των πόρων του δικτύου γίνεται με μόνο μια παράμετρο που είναι το μέγιστο εύρος ζώνης). Ωστόσο, λόγω της ύπαρξης επιπλέον κλάσεων στο ίδιο δίκτυο, το εύρος ζώνης που δε χρησιμοποιείται από την Premium κλάση μπορεί να δανειστεί στην κλάση εγγυημένης υπηρεσίας. Όλοι οι δρομολογητές που υιοθετούν και τις δύο υπηρεσίες πρέπει να εφαρμόζουν βέβαια και την ανάλογη πολιτική διαχείρισης στις ουρές τους. Αν για παράδειγμα, η συγκεκριμένη πολιτική είναι ο αλγόριθμος Τυχαίας Έγκαιρης Ανίχνευσης (Random Early Detection – RED), τότε προκύπτει πώς ένα έμμεσο αποτέλεσμα της πολύπλεξης κίνησης διαφόρων υπηρεσιών είναι η μείωση της εκρηκτικότητας της κίνησης βέλτιστης προσπάθειας.

3.3.4 Μεσίτες Εύρους Ζώνης (BBs)

Γενικά, οι οντότητες οι οποίες πρέπει να υπάρχουν σε ένα δίκτυο για να μπορεί να υποστηρίξει Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες είναι: δρομολογητές με ικανότητα Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών, σημαδευτές πακέτων (markers), ταξινομητές πακέτων (classifiers), μηχανισμοί αστυνόμευσης (policers) και ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης (Bandwidth Broker, BB). Οι Μεσίτες Εύρους Ζώνης ορίζονται στο RFC 2638. Είναι στην ουσία πράκτορες που διεξάγουν τη διαχείριση πόρων σε ένα δίκτυο-domain. Κάθε BB κατέχει μία βάση δεδομένων που περιέχει κανόνες και πληροφορίες για τις πολιτικές κατανομής πόρων. [31]

Αντιπροσωπεύουν όλα τα δίκτυα από τα οποία θα χρειαστεί να διοχετευτεί μια ροή, δίνοντας μια αφαιρετική εικόνα για αυτά. Κάθε BB είναι υπεύθυνος για τη διασφάλιση των πόρων στο δίκτυο και για την προστασία των γειτονικών γραμμών Παρόχων Υπηρεσιών Internet (Internet Service Providers, ISPs). Όταν ο αποστολέας επικοινωνεί με τον τοπικό Μεσίτη Εύρους Ζώνης για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης, εξακριβώνεται η γνησιότητά του και η αίτησή του προωθείται σε ένα μηχανισμό ελέγχου αποδοχής. Ο μηχανισμός αυτός παίρνει τις αποφάσεις του εφαρμόζοντας προκαθορισμένες πολιτικές (policy based). Στη συνέχεια, ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης προωθεί την αίτηση του χρήστη στο γειτονικό Μεσίτη Εύρους Ζώνης μέχρι να φτάσει η αίτηση στον Πάροχο Υπηρεσιών Internet. Ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης προορισμού επεξεργάζεται την αίτηση και την προωθεί στον παραλήπτη, ο οποίος αποκρίνεται ανάλογα. Αν η αίτηση γίνει δεκτή από το Μεσίτη Εύρους Ζώνης κάθε δικτύου, ο BB θα πρέπει να ρυθμίσει τους δρομολογητές της περιοχής της οποίας είναι υπεύθυνος, ώστε να υποστηρίξει το ζητούμενο προφίλ υπηρεσίας (service profile). [29]

Η βασική διαδικασία κατανομής εύρους συχνοτήτων είναι η ακόλουθη: Ο host που επιθυμεί να κατανείμει ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων σ' ένα συγκεκριμένο DSCP αποστέλλει μία αίτηση κατανομής πόρων (Resource Allocation Request, RAR) στον BB του domain του, μαζί με όλες τις πληροφορίες για τη συγκεκριμένη μετάδοση. Ο BB κατόπιν καθορίζει το δρομολογητή που συνδέει το δεύτερο domain με τον παραλήπτη και την intra-domain διαδρομή προς αυτόν και ελέγχει αν η ροή υπακούει την SLA. Κατόπιν τούτου, ο BB αποστέλλει μία τροποποιημένη RAR στον BB του άλλου domain ή μία απάντηση κατανομής πόρων (Resource Allocation Answer, RAA), με τη σημαία (flag) απόρριψης ανητημένη στον πρώτο host. Όταν ο δεύτερος BB λάβει την RAR, διεξάγει τις ίδιες ενέργειες. Αν η εισδοχή είναι επιτυχής, αποστέλλεται στον host του παραλήπτη μία τροποποιημένη RAR, ειδάλλως μία RAA αποστέλλεται στον πρώτο host μέσω του πρώτου BB. Τελικά, οι δύο BB διαμορφώνουν κάποιους ενδιάμεσους δρομολογητές (απαραιτήτως τους δρομολογητές εισόδου και εξόδου) μέσω RAA, οι οποίες περιλαμβάνουν παραμέτρους PHB και λειτουργίες marking. Βεβαίως, αυτή είναι η βασική ιδέα της διαδικασίας κατανομής εύρους συχνοτήτων και άλλοι μηχανισμοί μπορεί να παρέχουν λιγότερο πολύπλοκες λύσεις (Aggregate Tunnels). [31]

Η περιγραφή των μηχανισμών του Μεσίτη Εύρους Ζώνης έχει ολοκληρωθεί, όμως δεν έχουν τυποποιηθεί και αποτελούν πεδίο συνεχιζόμενης έρευνας. Οι Μεσίτες Εύρους Ζώνης αντιπροσωπεύουν όλα τα δίκτυα από τα οποία θα χρειαστεί να διοχετευτεί η συγκεκριμένη ροή. Η οντότητα του Μεσίτη Εύρους Ζώνης δίνει μια αφαιρετική εικόνα για τα δίκτυα που αντιπροσωπεύει και επιτρέπει στους διαχειριστές τους να διαλέξουν το δικό τους τρόπο που θα τα διαχειριστούν. Τέλος, ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης δείχνει να είναι η ιδανική οντότητα για να επιτελεί πιστοποίηση ταυτότητας, έλεγχο δικαιώματος πρόσβασης και χρέωση (Authentication, Authorization, Accounting, AAA). [29]

3.3.5 Μηχανισμοί ελέγχου κίνησης

Στον πρώτο δρομολογητή εμπιστοσύνης, το δρομολογητή πρόσβασης, που συναντά η κίνηση από την πηγή προς τον προορισμό υλοποιούνται οι μηχανισμοί ελέγχου κίνησης, όπως **ταξινόμηση (classification)**, **κατηγοριοποίηση-σήμανση (marking)**, **μέτρηση (metering)** και **αστυνόμευση (policing)**. Μετά από αυτόν το δρομολογητή κάθε ροή Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών αναμιγνύεται με άλλες ροές με παρόμοια χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η δημιουργία των κλάσεων ροών. Όλες οι διαδικασίες προώθησης και αστυνόμευσης στους εσωτερικούς δρομολογητές του δικτύου πραγματοποιούνται πλέον στο επίπεδο των κλάσεων.

Επιπρόσθετο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι απλοποιεί τις επιχειρησιακές σχέσεις μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών Internet (ISPs), ώστε

να μπορούν αν συνεργαστούν με αποδοτικό τρόπο και να δημιουργήσουν υπηρεσίες από άκρη σε άκρη που διασχίζουν διαφορετικά δίκτυα. Στο μοντέλο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών κάθε δίκτυο συνάπτει συμφωνίες με τα γειτονικά του δίκτυα για να προσφέρει διαφοροποιημένες υπηρεσίες σε διαφορετικές ομάδες ροών. Οι συμφωνίες χαρακτηρίζονται από ορισμένες ιδιότητες (profiles). Εφαρμόζοντας με αυστηρότητα τις συμφωνίες κίνησης των ομαδοποιημένων ροών και εξασφαλίζοντας ότι καινούριες συνδέσεις που θα επηρέαζαν αρνητικά την απόδοση του δικτύου δε θα γίνονται δεκτές, το μοντέλο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών εξασφαλίζει μια καλά ορισμένη υπηρεσία από άκρη σε άκρη για μια αλυσίδα διασυνδεδεμένων δικτύων. [29] Η αρχιτεκτονική DiffServ απαιτεί στην υλοποίησή της από τους δρομολογητές του δικτύου την υποστήριξη ορισμένων μηχανισμών. Οι κυριότερες λειτουργίες των απαιτούμενων μηχανισμών είναι [31] :

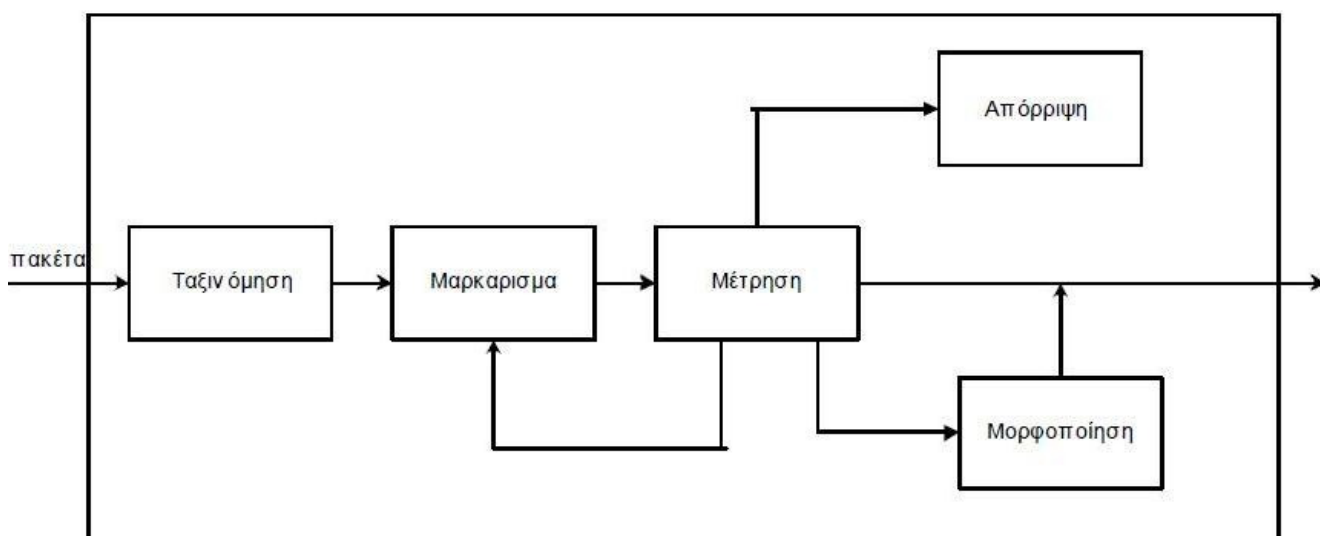
• **Ταξινόμηση πακέτων (packet classification).** Γίνεται ταξινόμηση των πακέτων που εισέρχονται στο δίκτυο σε ροές ή συνενώσεις ροών ώστε να ακολουθήσει η κατάλληλη εξυπηρέτησή τους. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται στο δρομολογητή πρόσβασης, που συναντά η κίνηση από την πηγή προς τον προορισμό. Συγκεκριμένα, ο ταξινομητής (classifier) ελέγχει την IP επικεφαλίδα των εισερχόμενων πακέτων, τα αντιστοιχεί σε SLAs σύμφωνα με τους κανόνες ταξινόμησης και τα προωθεί για επεξεργασία στις λειτουργίες ρύθμισης, όπως ορίζεται από τους κανόνες ρύθμισης στο κάθε SLA. Θεωρητικά οι ροές χαρακτηρίζονται από μια πεντάδα που αποτελείται από:

- Την IP διεύθυνση του αποστολέα
- Τον αριθμό port του αποστολέα
- Την IP διεύθυνση του παραλήπτη
- Τον αριθμό port του παραλήπτη
- Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται.

Στην περίπτωση κατά την οποία το υπό εξέταση πακέτο δεν αντιστοιχεί σε κάποιο SLA, τότε ακολουθεί τους default κανόνες ρύθμισης όπως έχουν καθοριστεί από τον πάροχο. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου επιθυμούμε να κάνουμε ταξινόμηση σε συνενώσεις ροών τότε αρκεί να χρησιμοποιήσουμε ένα συνδυασμό των παραπάνω πεδίων της πεντάδας που χαρακτηρίζει μια ροή, ή ακόμη και ένα μόνο πεδίο. Η περίπτωση αυτή είναι πιο εύκολη να γίνει και μπορεί τελικά να πραγματοποιείται ταχύτατα σε σύγκριση με τον έλεγχο όλης της πεντάδας. Στην πραγματικότητα, ισχύει πως η ταξινόμηση των πακέτων είναι επιθυμητό να γίνει σε έναν περιορισμένο αριθμό κατηγοριών (κλάσεων) και συνεπώς αρκεί να χρησιμοποιείται ένα σταθερό πεδίο στην επικεφαλίδα των πακέτων. Η μέθοδος αυτή είναι σαφώς απλούστερη και πιο αποδοτική και στην περίπτωση της DiffServ αρχιτεκτονικής ονομάζεται behavior aggregate classification.

- **Μαρκάρισμα πακέτων (packet marking).** Έπεται της λειτουργίας της ταξινόμησης. Παρέχει συγκεκριμένη τιμή στο πεδίο DSCP, καθορίζοντας έτσι το PHB που θα χρησιμοποιηθεί από τους εσωτερικούς κόμβους του Δικτύου για την εξυπηρέτηση του πακέτου και κατά συνέπεια την ποιότητα που θα λάβει από το δίκτυο.
- **Μέτρηση (metering).** Ο μηχανισμός μέτρησης ελέγχει αν κάθε ροή συμπεριφέρεται σύμφωνα με το προκαθορισμένο προφίλ της, το οποίο έχει συμφωνηθεί από τον πελάτη και το διαχειριστή του δικτύου. Το προφίλ κίνησης της ροής του χρήστη περιγράφεται στα SLAs. Με βάση τα περιγραφόμενα χαρακτηριστικά, τα εισερχόμενα πακέτα κρίνονται είτε ως συμμορφούμενα (in-profile) είτε ως μη συμμορφούμενα (out-of-profile). Κριτήρια αποτελούν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων (arrival rate) και το μέγεθος έκρηξης (burst size). Διαφορετικές ενέργειες ρύθμισης καθορίζονται για τα in profile και out-of-profile πακέτα. Η λειτουργία που ελέγχει τη ροή των πακέτων έναντι του traffic profile της ονομάζεται μετρητής (meter). Η κίνηση που υπερβαίνει το προκαθορισμένο προφίλ είτε μαρκάρεται και πάλι, ώστε να υποδεικνύεται ως κίνηση κλάσης χαμηλότερης προτεραιότητας, είτε γίνεται απόρριψη ή μορφοποίηση στα πακέτα της.
- **Αστυνόμευση κίνησης (policy routing).** Η αστυνόμευση σχετίζεται με τον έλεγχο της κίνησης και με τα μέτρα τα οποία λαμβάνει το δίκτυο, όταν μια ροή προσπαθεί να διοχετεύσει στο δίκτυο περισσότερα πακέτα από αυτά που έχουν προσυμφωνηθεί. Για τη συμμόρφωση της ροής με το traffic profile της χρησιμοποιούνται ο shaper (μορφοποιεί την κίνηση) και ο dropper (απορρίπτει την κίνηση). Ο shaper καθυστερεί τα πακέτα έτσι ώστε, με την τεχνητή αυτή καθυστέρηση, η ροή που προκύπτει να συμμορφώνεται με το traffic profile της. Ο shaper χρησιμοποιεί καταχωρητές περιορισμένης χωρητικότητας για την αποθήκευση των πακέτων που έρχονται πιο γρήγορα. Κατά την υπερχείλιση αυτών των καταχωρητών τα πακέτα διαγράφονται. Ο dropper απλά διαγράφει τα out-of-profile πακέτα. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και ως αστυνόμευση (policing). Γνωστοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι οι: token και leaky bucket [31].

Στο Σχήμα 3-5 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σειρά εφαρμογής των βασικών μηχανισμών που χρησιμοποιεί η DiffServ αρχιτεκτονική. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιθανό να αλλάξει η συγκεκριμένη σειρά. Για παράδειγμα η μορφοποίηση μπορεί να προηγείται της μέτρησης.



Σχήμα 3-5: Οι βασικοί μηχανισμοί της DiffServ αρχιτεκτονικής [31]

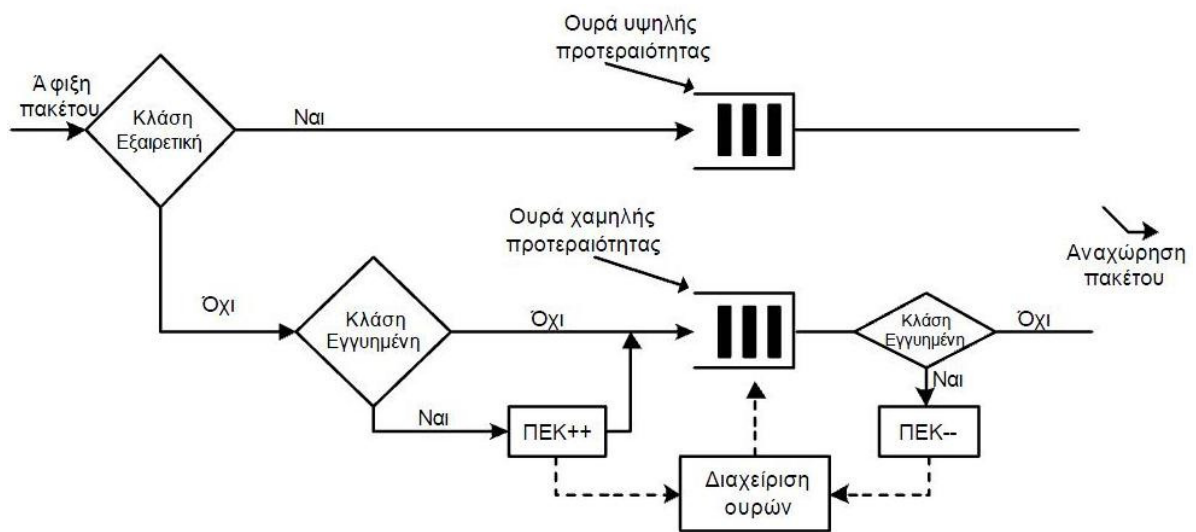
3.3.6 Λειτουργίες Μετα-Δρομολόγησης

Αφού έγινε περιγραφή των μηχανισμών ελέγχου κίνησης που υλοποιούνται στο δρομολογητή πρόσβασης, στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στις λειτουργίες μετα-δρομολόγησης που πραγματοποιούν οι δρομολογητές απόληξης καθώς και εσωτερικοί δρομολογητές του δικτύου.

Κάθε θύρα εξόδου ενός δρομολογητή πρέπει να έχει δύο ουρές απλής προτεραιότητας (First-In-First-Out, FIFO) και ένα κατάλληλο μηχανισμό διαχείρισης για αυτές. Κάθε νέο πακέτο ελέγχεται για το αν ανήκει στην Εξαιρετική (Premium) κλάση ή όχι. Αν το πακέτο ανήκει στην Εξαιρετική κλάση τότε τοποθετείται στην ουρά υψηλής προτεραιότητας. Αντίστοιχα, αν το πακέτο ανήκει στην Εγγυημένη (Assured) κλάση ή στην κλάση βέλτιστης προσπάθειας (Best Effort), τότε αυτό τοποθετείται στην ουρά χαμηλής προτεραιότητας. Αν το μέγεθος της ουράς χαμηλής προτεραιότητας περάσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι, τότε τα πακέτα της κλάσης βέλτιστης προσπάθειας αρχίζουν να απορρίπτονται. Αν το μέγεθος της ουράς χαμηλής προτεραιότητας εξακολουθεί να μεγαλώνει και ο αριθμός των πακέτων που ανήκουν στην Εγγυημένη κλάση ξεπεράσει ένα δεύτερο κατώφλι τότε απορρίπτονται και πακέτα της Εγγυημένης κλάσης.

Η ουρά υψηλής προτεραιότητας δεν πρόκειται να υπερχειλίσει ποτέ, αφού ο αριθμός των πακέτων της Εξαιρετικής κλάσης ελέγχεται με αυστηρά κριτήρια στην είσοδο του δρομολογητή. Για τον ίδιο λόγο, τα πακέτα αυτής της κλάσης δεν πρόκειται ποτέ να καταλάβουν όλο το εύρος του διαύλου αλλά μόνο ένα κλάσμα αυτού. Ωστόσο, το πλεονέκτημα του παραπάνω μηχανισμού είναι ότι αφενός μπορεί να δοθεί ποιότητα υπηρεσίας (για παράδειγμα Εξαιρετική κλάση) και αφετέρου το εύρος του διαύλου που έχει δεσμευθεί για κλάσεις υψηλής προτεραιότητας αλλά δε χρησιμοποιείται, μπορεί να

δοθεί στις κλάσεις χαμηλότερης προτεραιότητας. Έτσι, επιτυγχάνεται παράλληλα και υψηλή χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου. [29] Στο Σχήμα 3-6 γίνεται απεικόνιση αυτών των λειτουργιών.



Σχήμα 3-6: Λειτουργίες μετά τη δρομολόγηση [29]

Εξαιρετικής σημασίας για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας είναι ο μηχανισμός του χρονοπρογραμματισμού (scheduling). Υλοποιείται τόσο στους ακραίους δρομολογητές, αλλά και σε κάθε εσωτερικό δρομολογητή του δικτύου που παρεμβάλλεται στη διαδρομή μιας ροής από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Σχετίζεται με τη διαχείριση των ουρών του δρομολογητή, καθορίζοντας το επόμενο προς μετάδοση πακέτο. Η χρονοδρομολόγηση επιδρά καθοριστικά στις θεμελιώδεις μετρικές της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα:

- Το **Εύρος Ζώνης (Bandwidth)** που ανατίθεται σε κάθε κλάση, εξαρτάται από τη συχνότητα προτίμησης των πακέτων προς μετάδοση από μία συγκεκριμένη ουρά αναμονής. Λόγω της αυξημένης εξυπηρέτησης ουρών με μεγαλύτερη προτεραιότητα, οι αντίστοιχες κλάσεις απολαμβάνουν αυξημένο ρυθμό μετάδοσης (throughput).
- Η **Καθυστέρηση (Delay)** κάθε κλάσης, σχετίζεται άμεσα με το χρόνο παραμονής των πακέτων της στην αντίστοιχη ουρά αναμονής.
- Η **Διακύμανση Καθυστέρησης (jitter)**, επηρεάζεται από τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης, ο οποίος μπορεί να εξασφαλίζει ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ εξυπηρετήσεων δύο διαδοχικών πακέτων μιας κλάσης είναι φραγμένο. Ο ρόλος της χρονοδρομολόγησης είναι πολύ σπουδαίος στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας, καθώς επιδρά καθοριστικά στους παράγοντες που αναφέρθηκαν. Συνεπώς, είναι κρίσιμη η σωστή επιλογή του μηχανισμού χρονοδρομολόγησης σε κάθε δρομολογητή. Γνωστές μέθοδοι χρονοδρομολόγησης είναι οι: WFQ (Weighted Fair Queueing)/CBWFQ (Class-Based Weighted Fair Queueing), MDRR (Modified Deficit Round Robin), Priority.

Ορισμένα από τα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού χρονοδρομολόγησης σε ένα δίκτυο είναι:

- η φύση των εγγυήσεων που δίνει ο μηχανισμός
- η αποδοτικότητα των επιβαλλόμενων εγγυήσεων
- η χρονική πολυπλοκότητα, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την επιλογή του επόμενου προς μετάδοση πακέτου
- η ευελιξία διαχείρισης της κίνησης υπό προσυμφωνημένα όρια αλλά και κατά τη διάρκεια συμφόρησης
- η ευκολία καθορισμού παραμέτρων για την ευέλικτη παροχή εγγυήσεων. [31]

3.3.7 Αξιολόγηση

Η αρχιτεκτονική DiffServ σχεδιάστηκε με επίκεντρο το δίκτυο και όχι τις υπηρεσίες όπως η αρχιτεκτονική IntServ. Επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο η απεμπλοκή της λειτουργίας του δικτύου από την πρόβλεψη και παροχή νέων πολύπλοκων και απαιτητικών υπηρεσιών. Έτσι, καθίσταται εφικτή η εφαρμογή της αρχιτεκτονικής σε οσοδήποτε μεγάλη κλίμακα και αξιοποιούνται παράλληλα και οι δυνατότητες των δικτύων υψηλών ταχυτήτων. Επιπλέον, καθώς δεν προαπαιτείται διαδικασία σηματοδότησης από άκρο σε άκρο για κάθε ενεργοποίηση μιας υπηρεσίας όπως στην περίπτωση της αρχιτεκτονικής IntServ μέσω του RSVP, οι χρήστες απαλλάσσονται από τις αντίστοιχες καθυστερήσεις. Το μεγαλύτερο όφελος αποκομίζουν χρήστες και εφαρμογές που λειτουργούν με πολλαπλές κλήσεις μικρής διάρκειας. Ακόμα, η δυνατότητα υπέρβασης του καθορισμένου traffic profile σε συνδυασμό με την ευέλικτη χρήση των διαθέσιμων πόρων από ροές διαφορετικών PHBs ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες, όπως διαμορφώνονται από τις εκάστοτε ενεργές ροές, συντελούν στην πιο εντατική χρήση των πόρων του δικτύου και κατά συνέπεια στην καλύτερη αξιοποίησή τους, στην εξυπηρέτηση περισσότερων πελατών και σε υψηλότερα οικονομικά οφέλη. Η αρχιτεκτονική DiffServ από μόνη της, σε αντίθεση με την αρχιτεκτονική IntServ, δεν παρέχει μηχανισμούς που να εξασφαλίζουν συγκεκριμένα ποσοτικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Αντίθετα, προτυποποιεί τα PHBs ως κλάσεις σχετικής διαφοροποίησης της ποιότητας υπηρεσίας, η τελική τιμή της οποίας ρυθμίζεται από τις ανώτερες λειτουργίες διαχείρισης των πόρων του δικτύου και ελέγχου εισόδου της κίνησης. Κατ' επέκταση, οι πάροχοι που εφαρμόζουν την αρχιτεκτονική DiffServ έχουν την ελευθερία να καθορίσουν, αλλά και την ευθύνη να υλοποιήσουν, την καλή λειτουργία του δικτύου τους.

Το κυριότερο κριτήριο για να εκτιμηθεί αν η προσέγγιση DiffServ μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες και των πιο απαιτητικών εφαρμογών, είναι η φύση των παραμέτρων του συμβολαίου κίνησης που μπορεί να υποστηρίξει. Τα τέσσερα είδη

DiffServ υπηρεσιών τα οποία φαίνεται ότι καλύπτουν σε μεγάλο μέρος τις απαιτήσεις των εφαρμογών είναι τα εξής.

- Premium. Εξομοιώνει τη χρήση μισθωμένης γραμμής με εξασφαλισμένο εύρος ζώνης, ελάχιστη καθυστέρηση, απώλειες και διακύμανση καθυστέρησης. Η υπηρεσία αυτή είναι ιδανική για εφαρμογές με σκληρές απαιτήσεις στις παραμέτρους κίνησής τους (multimedia, remote sensing).
- Assured. Η υπηρεσία αυτή εξομοιώνει ένα ελαφρά φορτωμένο δίκτυο και ικανοποιεί μεγάλο φάσμα εφαρμογών (ftp, email, telnet).
- Class of Service (CoS). Είναι η υπηρεσία που ξεχωρίζει τις ροές και τις διαφοροποιεί μεταξύ τους ως προς την ποιότητα εξυπηρέτησης που θα λάβουν, χωρίς να τις εξασφαλίζει με απόλυτο τρόπο.
- Βέλτιστης Προσπάθειας (Best-effort).

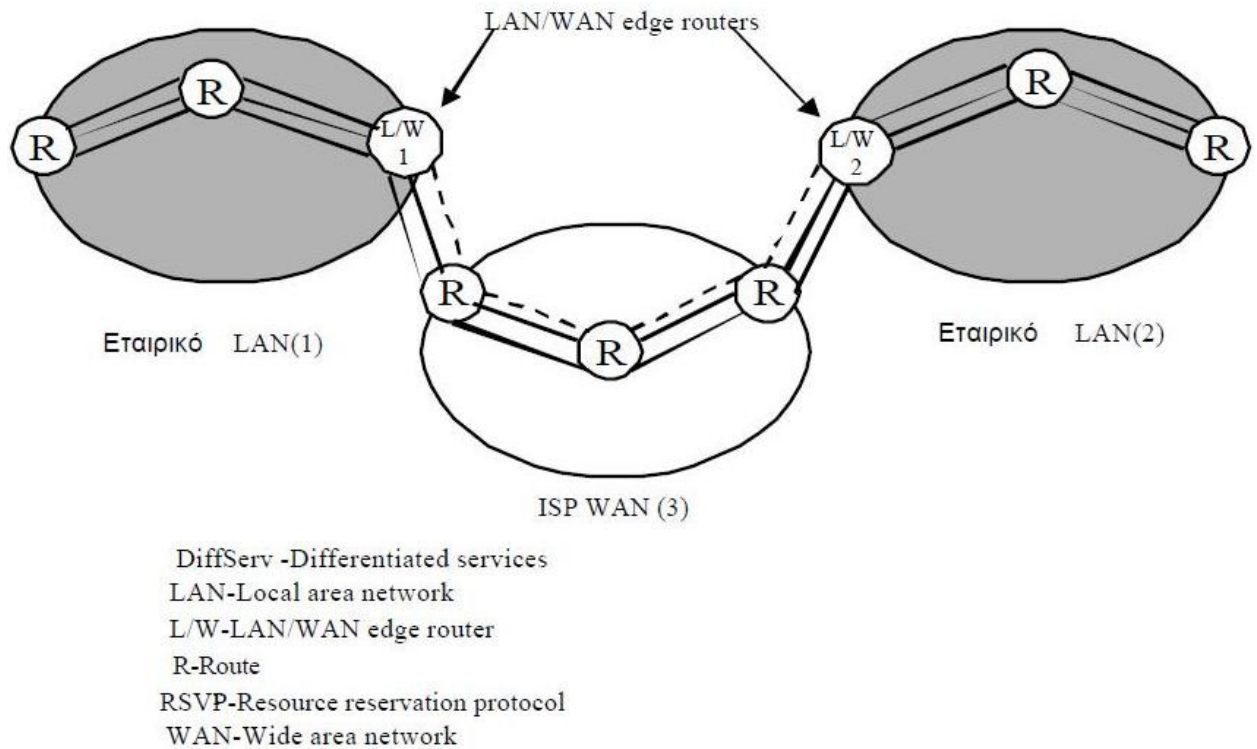
Η υπηρεσία Premium για να υλοποιηθεί χρειάζεται μια Per-Hop-Behavior (PHB), ισοδύναμη με μια ουρά αυστηρής προτεραιότητας και έναν μηχανισμό αποδοχής κλήσεων, ο οποίος φροντίζει ώστε η χωρητικότητα της υπηρεσίας να μη φτάνει ποτέ στα όριά της (oversell), σε κανέναν δρομολογητή σε όλη την ακολουθούμενη διαδρομή. Οι μηχανισμοί αστυνόμευσης απορρίπτουν όλα τα πακέτα (ξεχωριστών ροών και ομάδων) που δεν συμμορφώνονται με τα συμφωνημένα προφίλ.

Με την υπηρεσία Assured οι χρήστες συμφωνούν σε ένα συμβόλαιο κίνησης και περιμένουν από το δίκτυο να εξυπηρετήσει όλη την κίνησή τους, που υπακούει στο συμβόλαιο, σαν να ήταν ελαφρά φορτωμένο, ακόμη και στην περίπτωση συμφόρησης. Πακέτα που ικανοποιούν το συμβόλαιο εξυπηρετούνται από μια PHB, η οποία υποδεικνύει ότι θα πρέπει να απορριφθούν τελευταία, αν αυτό είναι αναπόφευκτο. Τα υπόλοιπα μαρκάρονται ώστε να έχουν την best-effort PHB. Υπηρεσίες σαν αυτήν είναι σχετικά πιο εύκολο να αναπτυχθούν από την Premium και φαίνεται ότι μπορούν να ικανοποιήσουν ευρεία γκάμα εφαρμογών, που δεν απαιτούν αυστηρά όρια στην απώλεια πακέτων. Απαιτούν, όμως, κάποιες χαλαρές εγγυήσεις στη μετάδοση των δεδομένων, που αφορούν κυρίως μέσες τιμές μεγεθών για ορισμένα χρονικά διαστήματα.

Υποστηρίζοντας QoS δίνεται η δυνατότητα στο δίκτυο απλά και μόνο να βλέπει διαφορετικές κλάσεις χρηστών και να τους εξυπηρετεί ανάλογα. Αν όμως, η κίνηση του δικτύου αυξηθεί πριν μπορέσει κάποιος να το αναβαθμίσει (κάτι το οποίο είναι σύνθηρες φαινόμενο), τότε η προσέγγιση αυτή δε θα μπορέσει να ικανοποιήσει τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες πολλών εφαρμογών. [29]

3.4 Εισαγωγή IntServ και DiffServ στο Διαδίκτυο

Το πιο πιθανό είναι ότι οι Ενοποιημένες Υπηρεσίες (IntServ) δε θα αναπτυχθούν σε δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs), λόγω του ότι δεν αποτελούν ένα κλιμακούμενο μοντέλο. Στην πραγματικότητα, οι περισσότεροι πάροχοι υπηρεσιών αναμένουν ότι οι Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (DiffServ) θα ικανοποιήσουν όλες τις ανάγκες τους για Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS). Σε αντίθεση οι Ενοποιημένες Υπηρεσίες προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν κυρίως σε μικρά εταιρικά δίκτυα. Το ερώτημα που τίθεται είναι το εξής: Αν το δίκτυο ευρείας περιοχής είναι βασισμένο σε Διαφοροποιημένες υπηρεσίες και το τοπικό δίκτυο είναι μια μίξη από Διαφοροποιημένες και Ενοποιημένες υπηρεσίες, πώς μπορεί να προσφερθεί ποιότητα υπηρεσίας από άκρη σε άκρη όταν ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη, παρεμβάλλονται πόροι που ανήκουν σε LAN και WAN. Αν το τερματικό χρησιμοποιεί Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες για τον καθορισμό της Ποιότητας Υπηρεσίας της ροής, τότε το πρόβλημα είναι σχετικά εύκολο. Αν όμως το τερματικό χρησιμοποιεί Ενοποιημένες Υπηρεσίες και οι πάροχοι υπηρεσιών Internet (ISPs) χρησιμοποιούν Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν Ενοποιημένες Υπηρεσίες για τη δέσμευση πόρων στο LAN και ύστερα να μετατραπούν τα μηνύματα RSVP PATH και RESV στο σύνορο L/W1 (βλέπε Σχήμα 3-7). Το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα, οι δρομολογητές του WAN να αγνοήσουν την όποια πληροφορία RSVP στα πακέτα. Όταν όμως, τα πακέτα φτάνουν στο άλλο σύνορο L/W2 επαναφέρονται στην αρχική τους μορφή και οι Ενοποιημένες υπηρεσίες συνεχίζουν την εξέλιξή τους στο επόμενο τοπικό δίκτυο. Όταν ένα πακέτο φτάνει στο σύνορο L/W1, τότε ο δρομολογητής τού βάζει την κατάλληλη τιμή στο πεδίο που καθορίζει τη Συμπεριφορά Προώθησης Ανά-Κόμβο, η οποία είναι ικανή να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της ροής. Στο άλλο σύνορο γίνεται η αντίστροφη διαδικασία έτσι ώστε το πακέτο να επεξεργαστεί σύμφωνα με αυτά που ορίζει το RSVP. [29]



Σχήμα 3-7: LAN-WAN [29]

Κεφάλαιο 4^ο: Quality of Service στο WiMAX

4.1 Εισαγωγή

Για την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε δίκτυα IP, φαίνεται ότι η προσέγγιση των διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services, DiffServ) αποτελεί αποδοτική λύση. Ωστόσο, η έρευνα στις διαφοροποιημένες υπηρεσίες επικεντρώθηκε κυρίως στα ενσύρματα δίκτυα. Λόγω όμως της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης για ALL-IP ασύρματα δίκτυα, υπήρξε η ανάγκη παροχής QoS από άκρο σε άκρο. Αυτό σήμαινε, ότι έπρεπε να υπάρξει ένα πρότυπο που θα διασφάλιζε εγγυημένη παροχή ποιότητας υπηρεσίας από τον ένα χρήστη στον άλλο, ανεξάρτητα από το αν παρεμβάλλεται μεταξύ τους ενσύρματο ή ασύρματο δίκτυο. Στην περίπτωση του ασύρματου δικτύου, ήταν σημαντικό να αξιοποιηθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τόσο το φυσικό επίπεδο (πρώτο επίπεδο στο μοντέλο αναφοράς OSI) όσο και το επίπεδο σύνδεσης (δεύτερο επίπεδο στο μοντέλο OSI), προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα στη δυνατότητα παροχής ποιότητας υπηρεσιών.

Σημαντικές παράμετροι στον προσδιορισμό και την εκτίμηση της ποιότητας υπηρεσίας ήταν οι εξής:

- Bandwidth (εύρος ζώνης)

- Latency (καθυστέρηση) - ο χρόνος μεταφοράς του πακέτου από άκρο σε άκρο.
- Jitter (διακύμανση καθυστέρησης)

Έτσι, η IEEE μέσω του πρωτοκόλλου 802.16 (WiMAX) μπόρεσε να δώσει την πλέον αποδοτική λύση μέχρι τώρα. Στο ασύρματο αυτό σύστημα τηλεπικοινωνιών, ο Σταθμός Βάσης (Base Station) είναι υπεύθυνος για την εξασφάλιση QoS στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο σύνδεσης. Στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές όπως: προσαρμοστική διαμόρφωση (adaptive modulation), OFDM πολυπλεξία – Subchannelization και δυνατότητα μετάδοσης TDD-FDD. Χάρη στις τεχνικές αυτές, το σήμα γίνεται πολύ πιο ανθεκτικό στη διέλευσή του από διαύλους με επιλεκτική εξασθένηση συχνότητας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Στο επίπεδο 2, υπήρξε μέριμνα ώστε εκτός από τη βελτίωση του επιπέδου ασφάλειας της επικοινωνίας, να εξασφαλισθεί η δυνατότητα εξυπηρέτησης των διαφόρων επικοινωνιακών συνόδων (sessions) κατά προτεραιότητα. Στην κατεύθυνση αυτή συνέβαλαν τα πρωτόκολλα 802.1 Q/p και η υποστήριξη από πλευράς WiMAX σε επίπεδο MAC, των διαφορετικών ως προς την εγγύηση ποιότητας ροών υπηρεσίας (Service Flows).

Η αρχιτεκτονική των δικτύων WiMAX είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να υποστηρίζει διάφορους μηχανισμούς QoS. Παρέχει ευέλικτη υποστήριξη ταυτόχρονης χρήσης διαφορετικών IP υπηρεσιών. Η αρχιτεκτονική υποστηρίζει:

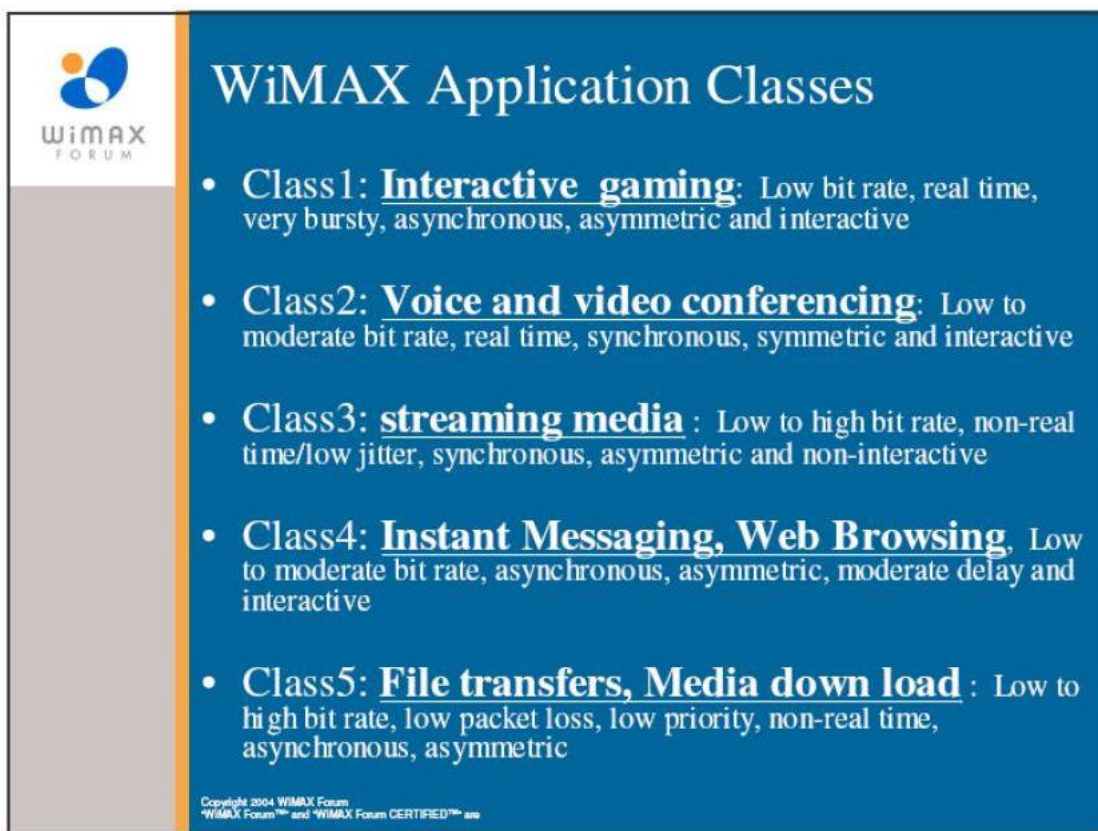
- a) διαφοροποιημένα επίπεδα QoS ανά τερματικό/χρήστη και/ή ροή υπηρεσίας (service flow)
- b) Έλεγχο Αποδοχής (Admission Control)
- c) διαχείριση εύρους ζώνης
- d) εφαρμογή πολιτικών όπως αυτές μπορεί να ορίζονται από τους παρόχους στα SLAs (Service Level Agreements). Στις πολιτικές μπορεί να συμπεριλαμβάνεται ιδιαίτερη μεταχείριση ανά χρήστη ή ομάδα χρηστών, ανάλογα με την τοποθεσία στην οποία βρίσκονται, τη συγκεκριμένη ώρα της μέρας κλπ. Επιπλέον, έχει γίνει εκτεταμένη χρήση προτυποποιημένων μηχανισμών της IETF, για τη διαχείριση των διαφόρων πολιτικών ανάμεσα στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. [32]

Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται ανάλυση της QoS που διασφαλίζει το WiMAX σε επίπεδο MAC. Χάρη στην αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου επιπέδου οι ροές υπηρεσίας (Service Flows), μπορούν να απεικονιστούν στα σημεία κώδικα DiffServ (DSCP). Το γεγονός αυτό, επιτρέπει την παροχή εγγυήσεων ως προς την ποιότητα υπηρεσίας σε IP επίπεδο από άκρο σε άκρο.

4.2 Εφαρμογές και κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας

Η καινοτομία του WiMAX έγκειται στο γεγονός ότι παρ' όλο πρόκειται για σύστημα ασύρματης δικτύωσης, εντούτοις μπορεί να εγγυηθεί στους τελικούς του χρήστες συγκεκριμένα επίπεδα ως προς την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Η ομάδα εργασίας εφαρμογών (Applications Working Group - AWG) του WiMAX Forum, έχει ορίσει πέντε γενικές κατηγορίες εφαρμογών. Τα επικυρωμένα από το WiMAX Forum συστήματα WiMAX, είναι σε θέση να υποστηρίζουν ταυτόχρονα εφαρμογές που ανήκουν και στις πέντε αυτές κατηγορίες. Οι κατηγορίες όπως έχουν ορισθεί από το WiMAX Forum απεικονίζονται στο Σχήμα 4-1.



The slide titled "WiMAX Application Classes" features the WiMAX Forum logo in the top left corner. The main content is a list of five application classes, each with a brief description of its characteristics. The text is white on a blue background.

- **Class1: Interactive gaming**: Low bit rate, real time, very bursty, asynchronous, asymmetric and interactive
- **Class2: Voice and video conferencing**: Low to moderate bit rate, real time, synchronous, symmetric and interactive
- **Class3: streaming media** : Low to high bit rate, non-real time/low jitter, synchronous, asymmetric and non-interactive
- **Class4: Instant Messaging, Web Browsing**, Low to moderate bit rate, asynchronous, asymmetric, moderate delay and interactive
- **Class5: File transfers, Media down load** : Low to high bit rate, low packet loss, low priority, non-real time, asynchronous, asymmetric

Copyright 2004 WiMAX Forum
*WiMAX Forum™ and *WiMAX Forum CERTIFIED™ are

Σχήμα 4-1: Κλάσεις εφαρμογών του WiMAX [33]

Στον επόμενο Πίνακα 4-1, αναφέρονται συγκεκριμένες εφαρμογές ανά κλάση εφαρμογών καθώς και ιδιαίτερες απαιτήσεις τους ως προς το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση και το jitter.

Class	Application	BANDWIDTH		LATENCY		JITTER	
		Guideline		Guideline		Guideline	
1	Interactive Gaming	Low Bandwidth	50 kbit/s	Low Latency	80ms	N/A	
2	Voice Telephone (VOIP) Video Conference	Low Bandwidth	32-64 kbit/s	Low Latency	160ms	Low Jittering	<50ms
3	Streaming Media	Moderate to High Bandwidth	<2 Mbit/s	N/A		Low Jittering	<100 ms
4	Instant Messaging Web Browsing	Moderate Bandwidth	2 Mbit/s	N/A		N/A	
5	Media Content Download	High Bandwidth	10 Mbit/s	N/A		N/A	

Πίνακας 4-1: Κλάσεις εφαρμογών του WiMAX όπως έχουν ορισθεί από το WiMAX Forum, με το απαιτούμενο εύρος ζώνης, καθυστέρηση και jitter [34]

Οι δύο επόμενοι πίνακες, ο Πίνακας 4-2 και Πίνακας 4-3, απεικονίζουν την αντιστοιχία των 5 κλάσεων εφαρμογών που έχουν ορισθεί από το WiMAX Forum στις 5 κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) που έχουν ορισθεί από τα πρότυπα IEEE 802.16.

802.16 QoS Classes

Class	Description	Minimum rate	Maximum rate	Latency	Jitter	Priority
Unsolicited Grant Service	VOIP, E1; fixed-size packets on periodic basis		x	x	x	
Real-Time Polling Service	Streaming audio/video	X	x	x		X
Enhanced Real-Time Polling Service	VOIP with activity detection	X	x	x	x	X
Non-Real-Time Polling Service	FTP	X	x			X
Best-Effort	Data transfer, Web browsing, etc.		x			X

x = QoS specified. Source: Light Reading, 2006

Πίνακας 4-2: Αντιστοιχία κλάσεων εφαρμογών και κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας [35]

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

Πίνακας 4-3: Κλάσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS) που υποστηρίζονται στο 802.16e (Mobile WiMAX) [36]

Στο πρότυπο IEEE 802.16-2004 ορίζονται 4 επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε σύνδεση μεταξύ σταθμού βάσης (Base Station, BS) και σταθμού συνδρομητή (Subscriber Station, SS). Στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005 ορίζεται και ένα 5ο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, το Enhanced real-time Polling Service (ErtPS).

Κάθε service flow (ροή δεδομένων ανάμεσα σε BS και SS) έχει τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας της service class στην οποία ανήκει. Η service class στην οποία ανήκει, υποδηλώνεται με συγκεκριμένη τιμή στο πεδίο SFID (Service Flow ID) των πακέτων μιας service flow. Στο 802.16 παρέχονται οι ακόλουθες 5 κλάσεις υπηρεσιών [37]:

1. Unsolicited Grant Service (UGS). Παρέχει υπηρεσίες με σταθερό ρυθμό μετάδοσης των bits (Constant Bit Rate, CBR), οι οποίες απαιτούν σταθερό χρονοπρογραμματισμό (scheduling) και εγγύηση ρυθμαπόδοσης (throughput), καθυστέρηση απόκρισης (latency) και μεταβλητότητα καθυστέρησης (jitter). Χρησιμοποιείται για real-time services. Παράδειγμα εφαρμογής που ανήκει σε αυτή την κλάση υπηρεσιών είναι το VoIP χωρίς καταστολή σιωπής.

2. Real-time Polling Service (rtPS). Προσφέρει ένα μεταβλητό bit rate, αλλά με εγγυημένο ελάχιστο ρυθμό και μια εγγυημένη καθυστέρηση (latency). Παρέχει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time services) όπως βιντεο-διάσκεψη (video conferencing). Το μήκος πακέτου των δεδομένων μπορεί να είναι μεταβλητό. Ο σταθμός βάσης εκτελεί περιόδευση, «ρωτώντας» το συνδρομητή σε σταθερά διαστήματα πόσο εύρος ζώνης χρειάζεται αυτή τη φορά. Ένα άλλο παράδειγμα, είναι οι υπηρεσίες επιχειρηματικής πρόσβασης. Είναι αρκετά συνηθισμένο οι πάροχοι υπηρεσιών ασύρματου διαδικτύου (Wireless Internet Service Providers - WISPs), να εγγυώνται ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων επιπέδου γραμμής E1/T1 σύμφωνα με τα Service Level Agreements (SLAs). Ωστόσο, επιτρέπουν στους πελάτες να χρησιμοποιούν μεγαλύτερη χωρητικότητα εφόσον αυτή είναι διαθέσιμη στο δίκτυο. Αυτό θεωρείται μια επιτυχημένη στρατηγική των WISPs έναντι των ανταγωνιστικών παρόχων ενσύρματων δικτύων.

3. Enhanced real-time Polling Service (ErtPS). Ορίζεται στο 802.16e και θα χρησιμοποιηθεί για τις υπηρεσίες VoIP με μεταβλητά μεγέθη πακέτων, σε αντιδιαστολή με την υπηρεσία VoIP με σταθερού μεγέθους πακέτα. Αυτού του είδους υπηρεσία VoIP θα χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου θα υπάρχει καταστολή σιωπής (ή διαφορετικά ανίχνευση δραστηριότητας). Για παράδειγμα σε εφαρμογές όπως το Skype. Συμπερασματικά, οι χρήστες κάτω από τον ίδιο σταθμό βάσης έχουν τη δυνατότητα να απολαμβάνουν διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας ανάλογα με τις ανάγκες τους.

4. Non-real-time Polling Service (nrtPS). Παρέχει μόνο εγγύηση για τη ρυθμαπόδοση (throughput) και γι' αυτό χρησιμοποιείται για υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, με μεταβλητό μήκος δεδομένων όπως για παράδειγμα το e-mail. Ο σταθμός βάσης «ρωτάει» το συνδρομητή ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όχι όμως αυστηρά προδιαγεγραμμένα, για το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Αν ένας συνδρομητής δεν αποκριθεί στην περιόδευση κ φορές στη σειρά, ο σταθμός βάσης τον προσθέτει σε μια ομάδα πολυδιανομής και σταματά να τον ρωτά «προσωπικά». Αντίθετα, όταν η περιόδευση φτάσει στην ομάδα πολυδιανομής μπορεί να αποκριθεί οποιοσδήποτε από τους σταθμούς, ανταγωνιζόμενος για εξυπηρέτηση. Με αυτόν τον τρόπο οι σταθμοί που έχουν λίγη κίνηση δεν σπαταλούν πολύτιμες περιόδους. [38]

5. Best-Effort (BE). Όλοι οι συνδρομητές που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη κλάση υπηρεσίας ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Υποστηρίζει υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου για παράδειγμα, web surfing.

Ως μια συγκεντρωτική αναφορά των κλάσεων υπηρεσιών στο IEEE802.16d, παρατίθεται ο ακόλουθος Πίνακας 4-4.

Τύπος Υπηρεσίας	Περιγραφή
Unsolicited Grant Service (UGS)	Το UGS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποτελούνται από πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως T1/E1 και Voice over IP.
Real-Time Polling Service (rtPS)	Το rtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποτελούνται από πακέτα δεδομένων με μεταβλητό μήκος που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως MPEG video.
Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)	Το nrtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων που επιδέχονται καθυστέρηση και αποτελούνται από πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους για τα οποία απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός δεδομένων, όπως FTP.
Best Effort (BE)	Η BE υπηρεσία σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων για τις οποίες δεν απαιτείται κανένα ελάχιστο επίπεδο υπηρεσίας και μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μια βάση διαθέσιμου χώρου.

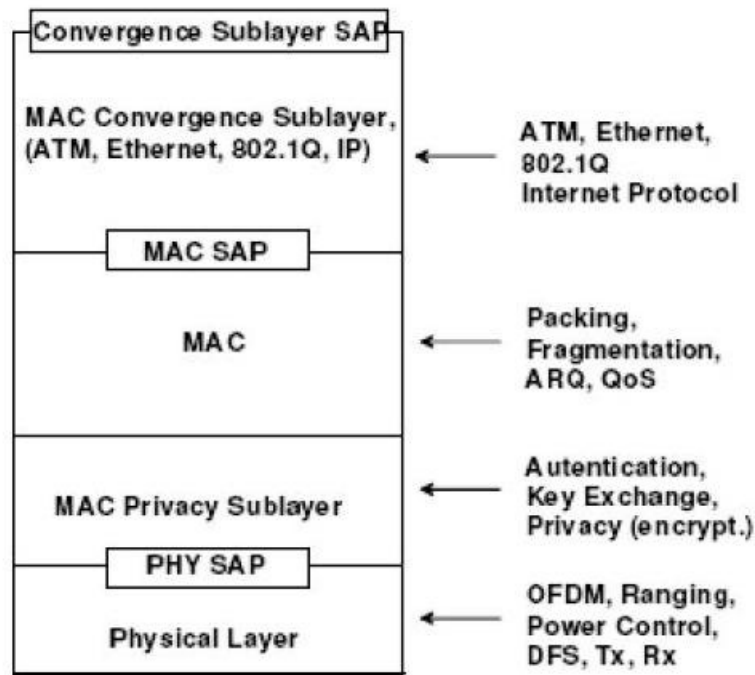
Πίνακας 4-4: Συγκεντρωτική παρουσίαση κλάσεων υπηρεσιών στο IEEE802.16d [39]

4.3 802.16 MAC

Η διασφάλιση συγκεκριμένης QoS ανά service flow υλοποιείται στο επίπεδο MAC των WiMAX δικτύων. Έτσι, στη συνέχεια αναλύεται το επίπεδο αυτό. Το στρώμα ζεύξης δεδομένων (layer 2 στο OSI) αποτελείται στο WiMAX από 3 υποεπίπεδα [40], τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια:

- MAC - Υποεπίπεδο Σύγκλισης (MAC - Convergence Sublayer, MAC-CS)
- MAC - Κοινό τμήμα (MAC - Common Part, MAC-CP)
- MAC - Υποεπίπεδο Ασφάλειας (MAC – Privacy Sublayer, MAC-PS)

Στο Σχήμα 4-2 που ακολουθεί, φαίνεται η διαστρωμάτωση του επιπέδου MAC, καθώς και συγκεκριμένες λειτουργίες που επιτελούνται ανά υποεπίπεδο.



Σχήμα 4-2: Διαστρωμάτωση επιπέδου MAC [41]

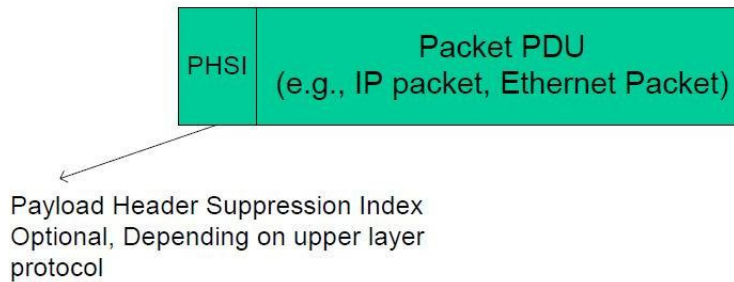
4.3.1 Υποεπίπεδα MAC

4.3.1.1 MAC - Υποεπίπεδο Σύγκλισης (MAC - Convergence Sublayer, MAC-CS)

Το Υποεπίπεδο Σύγκλισης, χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση μιας ενιαίας διεπαφής με το ανώτερο στρώμα δικτύου, ανεξάρτητα από την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που χρησιμοποιείται από το κατώτερο υποεπίπεδο MAC. Με το συγκεκριμένο υποεπίπεδο του MAC, γίνεται εφικτή η διασύνδεση του κοινού υποεπιπέδου MAC (MAC-CP) με το επίπεδο δικτύου. Έτσι, πακέτα των πρωτοκόλλων ATM (Asynchronous Transfer Mode), IPv4, IPv6, Ethernet καθώς και πακέτα για VLAN μπορούν να υποστηρίζονται στη μετάδοσή τους. Αυτό σημαίνει, ότι το WiMAX μπορεί να παρέχει όλες τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν τα παραπάνω πρωτόκολλα από άκρο σε άκρο. Η λειτουργία του MAC-CS είναι να κατηγοριοποιεί τα SDUs (Service Data Units) στην κατάλληλη σύνδεση MAC. Απεικονίζει τα υψηλότερου επιπέδου PDUs () σε μορφή κατάλληλη για τις συνδέσεις MAC. Τα SDUs είναι μονάδες δεδομένων υπηρεσίας, οι οποίες ανταλλάσσονται μεταξύ δύο ομότιμων επιπέδων. Επιπρόσθετα, το MAC-CS μπορεί να κατακερματίζει, αλλά και να ανασυνθέτει τα πακέτα προκειμένου να αυξήσει την απόδοση του ραδιοδιαύλου. [42]

Έτσι, οι μονάδες δεδομένων υπηρεσίας (SDUs) του επιπέδου MAC είναι οι μονάδες δεδομένων του πρωτοκόλλου (PDUs), για τα οποία διεπαφή αποτελεί το υποεπίπεδο σύγκλισης (MAC-CS), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3.

MAC SDU = CS PDU



Σχήμα 4-3: Αντιστοίχιση MAC SDU σε CS PDU [42]

4.3.1.2 MAC - Κοινό τμήμα του MAC (MAC-Common Part, MAC-CP)

Για το τμήμα αυτό του επιπέδου MAC αναφέρονται οι τρεις λειτουργίες του: Πολιτική εξασφάλισης QoS, Ranging, ARQ.

- **Πολιτική εξασφάλισης QoS**

Το κοινό τμήμα του MAC (MAC - Common Part, MAC-CP) είναι υπεύθυνο για την παροχή QoS. Η πολιτική εξασφάλισης QoS έχει 3 συνιστώσες:

1. Τη δυναμική εγκατάσταση υπηρεσίας (Dynamic Service Establishment)
2. Το μοντέλο ενεργοποίησης σε 2 φάσεις.
3. Τον χρονοπρογραμματισμό των ροών υπηρεσίας (Service Flow QoS Scheduling)

- **Ranging**

Μία άλλη λειτουργία του MAC-CP είναι το ranging (ρύθμιση). Πρόκειται για τη διαδικασία απόκτησης συγχρονισμού με τον SS, καθώς και ρύθμισης διαφόρων παραμέτρων του φυσικού στρώματος, όπως του επιπέδου ισχύος του BS (Tx level), της συχνότητας λειτουργίας κλπ. Έτσι, ο BS μπορεί να επικοινωνεί σωστά με τον SS. Παράλληλα, ο BS εκτελεί μετρήσεις ανάδρασης για τη γνώση της κατάστασης της ζεύξης με τον SS.

Υπάρχουν 2 τύποι ranging:

1. Initial ranging (αρχική ρύθμιση): Πραγματοποιείται για νέο SS όταν πρόκειται να συνδεθεί με τον BS.
2. Periodic ranging (περιοδική ρύθμιση): Καλείται και ρύθμιση συντήρησης. Συμβάλει στη διατήρηση ενός καλού επιπέδου της ραδιοζεύξης.

- **ARQ**

Επίσης, στο υποεπίπεδο MAC-CP υλοποιείται το ARQ (Automatic Repeat reQuest). Πρόκειται για μηχανισμό ελέγχου της ροής σε μια σύνοδο.

4.3.1.3 MAC-Υποεπίπεδο Ασφάλειας (MAC – Privacy Sublayer, MAC-PS)

Υλοποιεί 2 πρωτόκολλα:

1. Data Encryption Protocol
2. Privacy Key Management (PKM) που βασίζεται στο μοντέλο client/server

Κρυπτογραφούνται μόνο τα ωφέλιμα φορτία των πλαισίων, όχι οι κεφαλίδες. Η ιδιότητα αυτή σημαίνει ότι υπάρχει περίπτωση κάποιος τρίτος να μπορέσει να δει τα άκρα μιας σύνδεσης, δηλαδή τον αποστολέα και τον παραλήπτη, αλλά δε μπορεί να γνωρίζει το περιεχόμενο της επικοινωνίας.

4.3.2 Service Flows - Ροές Υπηρεσίας

Ο όρος Ροή Υπηρεσίας (Service Flow) όπως χρησιμοποιείται στα WiMAX συστήματα, είναι η μονόδρομη (UL ή DL) ροή πακέτων που εξυπηρετούν τη μεταφορά συγκεκριμένης εφαρμογής σε επίπεδο MAC και έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS. Το σύνολο παραμέτρων που περιγράφουν την προστιθέμενη στη ροή ποιότητα υπηρεσίας, είναι το εύρος ζώνης (bandwidth), η καθυστέρηση μεταφοράς (latency) και η διακύμανση καθυστέρησης (jitter). Μια ζεύξη επικοινωνίας ανάμεσα στον SS και στον BS μπορεί να εμπεριέχει αρκετές ροές υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα, μια ροή υπηρεσίας πραγματικού χρόνου για video και μια ροή υπηρεσίας βέλτιστης προσπάθειας για Web browsing. Διευκρινίζεται ότι για τη μεταφορά μιας εφαρμογής ανάμεσα στους SS και BS, οι κινήσεις UL και DL συνιστούν διαφορετικές ροές υπηρεσίας, αφού έχουν διαφορετικές προελεύσεις και προορισμούς. Όλες οι ροές υπηρεσιών έχουν ένα μοναδικό αναγνωριστικό SFID (Service Flow ID) των 32 bit.

Οι 3 τύποι ροών υπηρεσίας είναι οι εξής:

- Οι Provisioned (προδιατιθέμενες) ροές υπηρεσίας
- Admitted (επιτρεπόμενες) ροές υπηρεσίας
- Active (ενεργές) ροές υπηρεσίας

Επίσης, τα σύνολα παραμέτρων QoS που αναφέρονται στους τύπους ροών είναι τα:

- **ProvisionedQoSParamSet:** σύνολο παραμέτρων QoS που χρησιμοποιείται από το σύστημα διαχείρισης δικτύου.
- **AdmittedQoSParamSet:** σύνολο παραμέτρων QoS που αναφέρεται στους πόρους που δεσμεύονται σε μια admitted ροή.
- **ActiveQoSParamSet:** σύνολο παραμέτρων QoS που αναφέρεται στους πόρους που χρησιμοποιεί μια active ροή.

Πριν την ανάλυση των 3 τύπων ροής υπηρεσίας, αναφέρεται ότι στην περίπτωση των admitted και των active ροών υπηρεσίας, εκτός από το SFID διατίθεται και το αναγνωριστικό της σύνδεσης CID (Connection ID) των 16 bit. [37], [43]

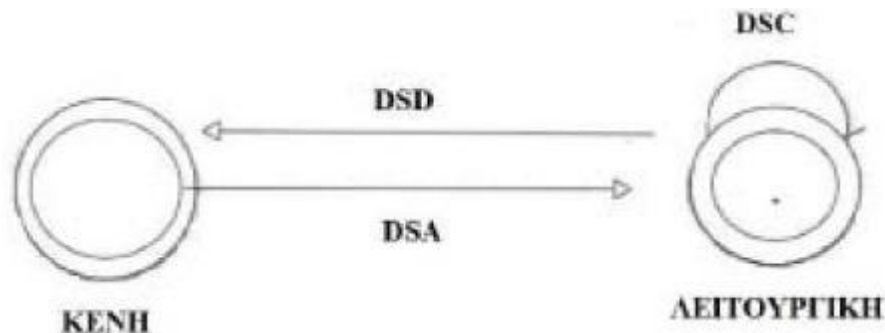
4.3.2.1 Provisioned service flow

Οι ροές υπηρεσίας που χαρακτηρίζονται ως provisioned, χρησιμοποιούνται από το σύστημα διαχείρισης δικτύου. Ο BS ενώ εκχωρεί σε αυτές ένα SFID δε δεσμεύει πόρους για αυτές. Οι συγκεκριμένες ροές δε σχετίζονται με πακέτα δεδομένων. Πρόκειται για ροές υπηρεσίας στις οποίες μεταφέρονται διαχειριστικά μηνύματα για τις ίδιες. Οι ροές μπορούν να δημιουργηθούν, να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς μηνυμάτων διαχείρισης MAC, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια, ενώ η μεταφορά τους αποτελεί μια provisioned ροή υπηρεσίας.

Τα είδη μηνυμάτων είναι τα εξής:

- **Dynamic Service Change (DSC).** Τροποποιεί υπάρχουσα ροή υπηρεσίας.
- **Dynamic Service Delete (DSD).** Διαγράφει υπάρχουσες ροές υπηρεσιών.
- **Dynamic Service Activate (DSA).** Ενεργοποιεί μια ροή υπηρεσίας.

Ο SS μπορεί να χρησιμοποιήσει DSC μήνυμα για να μετατρέψει την provisioned ροή υπηρεσίας σε admitted ή active ροή υπηρεσίας. Παρόμοια ο BS μπορεί να στείλει DSC μήνυμα στον SS για να μετατρέψει την provisioned ροή υπηρεσίας σε admitted ή active. Για το σκοπό αυτό (μετατροπή της ροής), ο BS απεικονίζει το SFID στο CID και το στέλνει στον SS με ένα DSC-REQ μήνυμα, εάν το DSC μήνυμα στάλθηκε από τον ίδιο τον BS. Εάν το DSC μήνυμα ξεκίνησε από τον SS, τότε ο BS στέλνει ένα DSC-RSP στον SS. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4, η κενή κατάσταση υπονοεί πως δεν υπάρχει καμιά ροή υπηρεσίας της οποίας το SFID να ταιριάζει στο μήνυμα. Μόλις υπάρξει η ροή υπηρεσίας, γίνεται λειτουργική (της έχει ανατεθεί ένα SFID).



Σχήμα 4-4: Δυναμική ροή υπηρεσίας [43]

Κλείνοντας την περιγραφή των Provisioned ροών υπηρεσίας, αναφέρεται ότι τα AdmittedQoSParamSet και ActiveQoSParamSet που διαθέτουν οι ροές αυτές είναι κενά (null).

4.3.2.2 Admitted service flow

Οι Admitted ροές υπηρεσίας, είναι ροές για τις οποίες δεσμεύονται πόροι από τον BS ή τον SS ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS που τίθενται στο

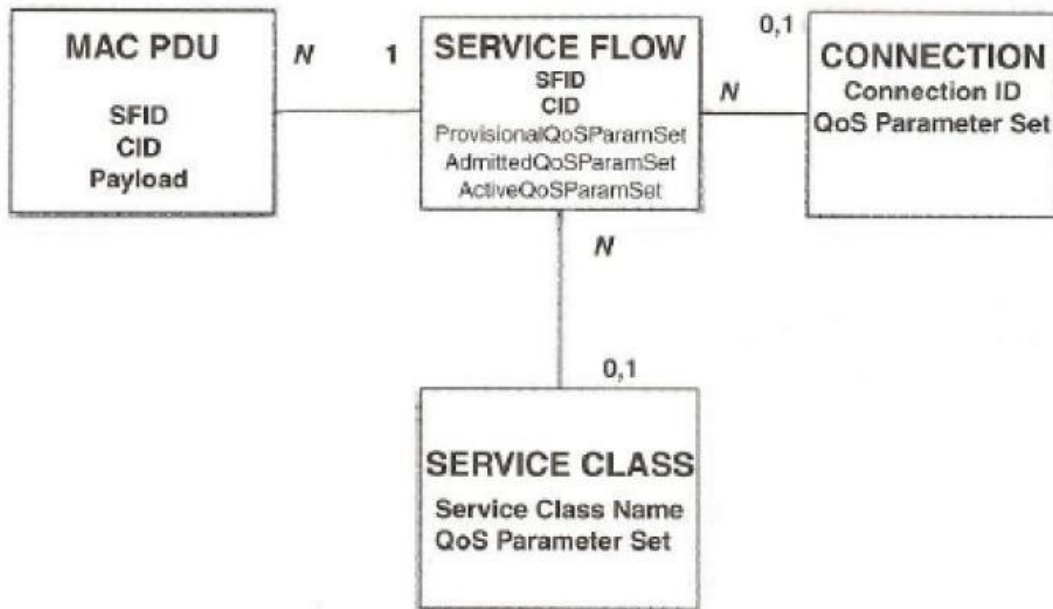
AdmittedQoSParamSet. Μέχρι οι απαιτήσεις του ActiveQoSParamSet να ταυτιστούν με του AdmittedQoSParamSet, οι πόροι ενώ είναι δεσμευμένοι δε χρησιμοποιούνται (δηλαδή οι παράμετροι QoS του AdmittedQoSParamSet είναι μη ενεργές). Το ActiveQoSParamSet των ροών αυτών είναι κενό (null).

4.3.2.3 Active service flow

Οι Active ροές υπηρεσίας, είναι ροές που έχουν ήδη δεσμευμένους τους πόρους που χρειάζονται και τους χρησιμοποιούν μεταφέροντας πακέτα δεδομένων. Οι συγκεκριμένοι πόροι αποτυπώνονται στο ActiveQoSParamSet, το οποίο δεν είναι πλέον κενό (null).

4.3.2.4 Το Μοντέλο Αντικειμένων

Τα κύρια αντικείμενα της αρχιτεκτονικής MAC παριστάνονται με ονομασμένα τετράγωνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-5. Κάθε αντικείμενο έχει έναν αριθμό ιδιοτήτων. Η σχέση μεταξύ των αριθμών αντικειμένων, αναγράφεται κάθε φορά στο τέλος της γραμμής συσχέτισης μεταξύ τους. Για παράδειγμα, μια ροή υπηρεσίας μπορεί να σχετίζεται με 0 μέχρι N PDUs, αλλά μια PDU σχετίζεται με ακριβώς μία ροή υπηρεσίας. Η ροή υπηρεσίας είναι η κεντρική έννοια του πρωτοκόλλου MAC.

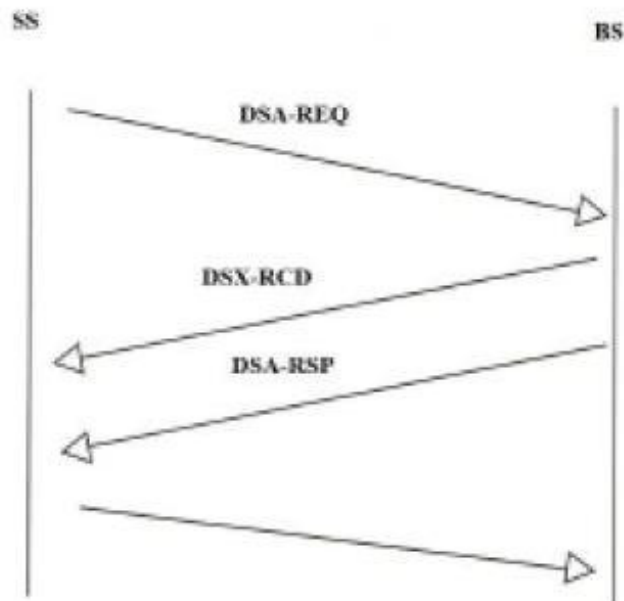


Σχήμα 4-5: Θεωρία λειτουργίας του μοντέλου αντικειμένου [43]

Ροές υπηρεσιών μπορούν να ξεκινήσουν και ο BS και ο SS:

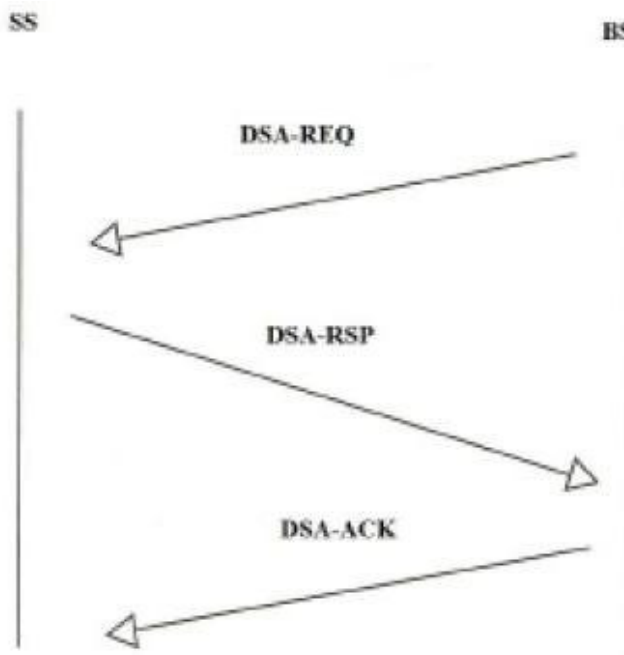
Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας από τον SS. Ένα DSA-REQ από έναν SS (βλ. Σχήμα 4-6) περιέχει μια αναφορά ροής υπηρεσίας και το επιθυμητό σύνολο

παραμέτρων QoS. Ο BS αποκρίνεται με ένα DSA-RSP υποδηλώνοντας αποδοχή ή άρνηση.



Σχήμα 4-6: Ροή μηνύματος DSA που εκκινεί ο SS [43]

Δημιουργία Δυναμικής Ροής Υπηρεσίας από τον BS. Ένα DSA-REQ από τον BS (βλ. Σχήμα 4-7) περιέχει ένα SFID, το συσχετιζόμενο CID τους και ένα σύνολο active ή admitted παραμέτρων QoS. Ο SS αποκρίνεται με DSA-RSP υποδηλώνοντας αποδοχή ή άρνηση.



Σχήμα 4-7: Ροή μηνύματος DSA που εκκινεί ο BS [43]

4.3.3 Εξουσιοδότηση

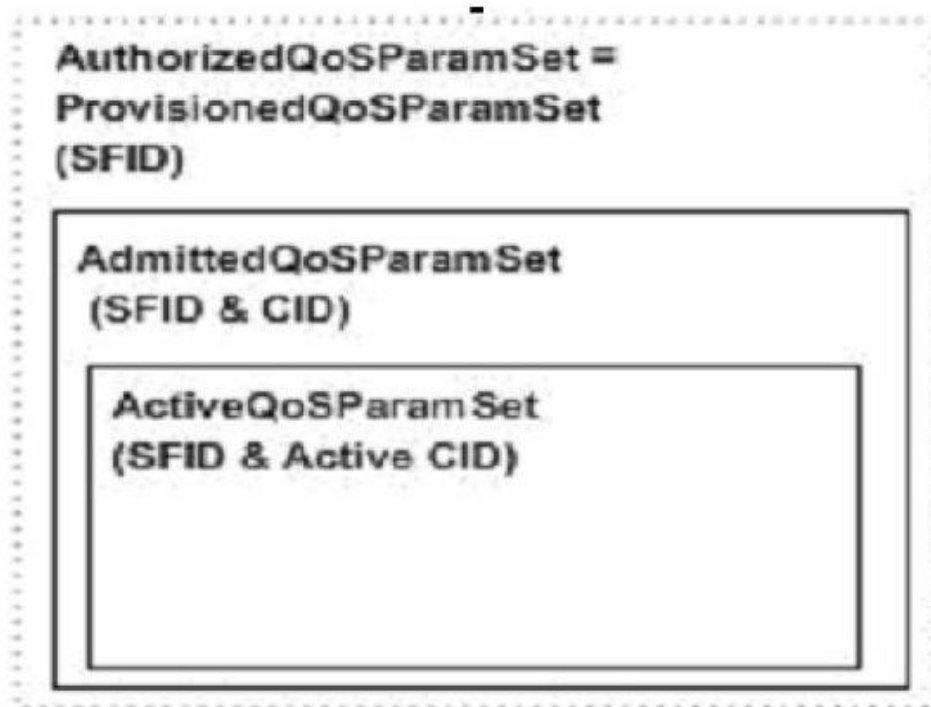
Στους BSs υπάρχει η μονάδα εξουσιοδότησης (Authorization Module), που είναι υπεύθυνη για την έγκριση ή μη κάθε αλλαγής στις παραμέτρους QoS της ροής υπηρεσίας. Πριν την αρχικοποίηση της σύνδεσης, ο BS ανακτά το σύνολο των παραμέτρων QoS (ProvisionedQoSParamSet) για έναν SS, το οποίο παραδίδεται στο Authorization Module. [37],[43]

Το Authorization Module χρησιμοποιεί 2 μοντέλα εξουσιοδότησης QoS, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

4.3.3.1 Provisioned (Static) Authorization

Στο μοντέλο provisioned (static) authorization, ο BS έχει στη διάθεσή του όλα τα σύνολα παραμέτρων ProvisionedQoSParamSet των ροών υπηρεσίας. Αιτήσεις αποδοχής και ενεργοποίησης για τις provisioned ροές υπηρεσιών, επιτρέπονται για όσο διάστημα το σύνολο παραμέτρων Admitted QoS, είναι υποσύνολο του συνόλου παραμέτρων Provisioned QoS, και το σύνολο παραμέτρων Active QoS είναι υποσύνολο του συνόλου παραμέτρων Admitted QoS. Αιτήσεις αλλαγής του συνόλου παραμέτρων Provisioned QoS απορρίπτονται.

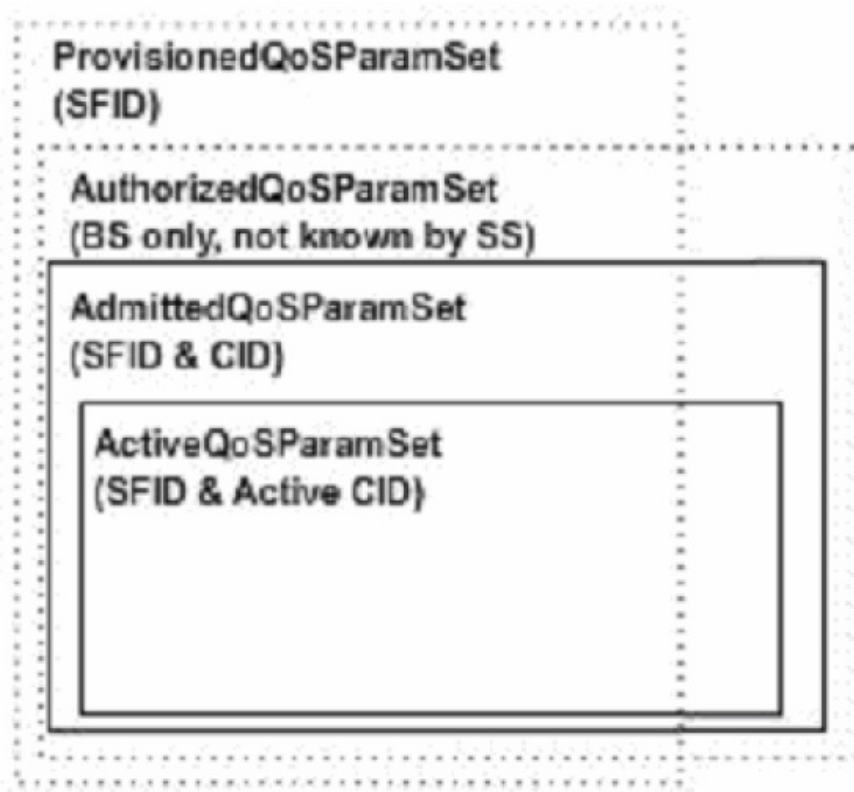
Η στατική εξουσιοδότηση ορίζει ένα στατικό σύστημα, όπου όλες οι πιθανές υπηρεσίες ορίζονται στην αρχική ρύθμιση του κάθε SS. Ο SS δεν επιτρέπεται να δημιουργήσει provisioned ροή υπηρεσία. Ο BS στέλνει στον SS μήνυμα DSA-REQ και ο SS απαντά με ένα μήνυμα DSA-RSP αφού αποδεχτεί την αίτηση και τότε ο BS στέλνει ένα DSA-ACK. Το Σχήμα 4-8 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου.



Σχήμα 4-8: Provisioned Authorization [37]

4.3.3.2 Dynamic Authorization

Στο μοντέλο δυναμικής εξουσιοδότησης, η μονάδα εξουσιοδότησης (authorization module) επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή πολιτικής (policy server), ο οποίος την πληροφορεί σχετικά με τις λαμβανόμενες αιτήσεις αποδοχής (admission) και ενεργοποίησης (activation) που έστειλε ο SS. Ο policy server στέλνει το σύνολο παραμέτρων στο authorization module για τις εισερχόμενες αιτήσεις και γι' αυτό το λόγο, το σύνολο παραμέτρων που στάλθηκε από τον SS θα πρέπει πάντοτε να είναι υποσύνολο του συνόλου παραμέτρων που στέλνονται από τον policy server. Αν ο policy server δεν έχει στείλει πληροφορίες σχετικά με κάποια αίτηση, τότε η αποδοχή ή απόρριψη της αίτησης επαφίεται στο authorization module. Το Σχήμα 4-9 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου.



Σχήμα 4-9: Δυναμικό μοντέλο εξουσιοδότησης [37]

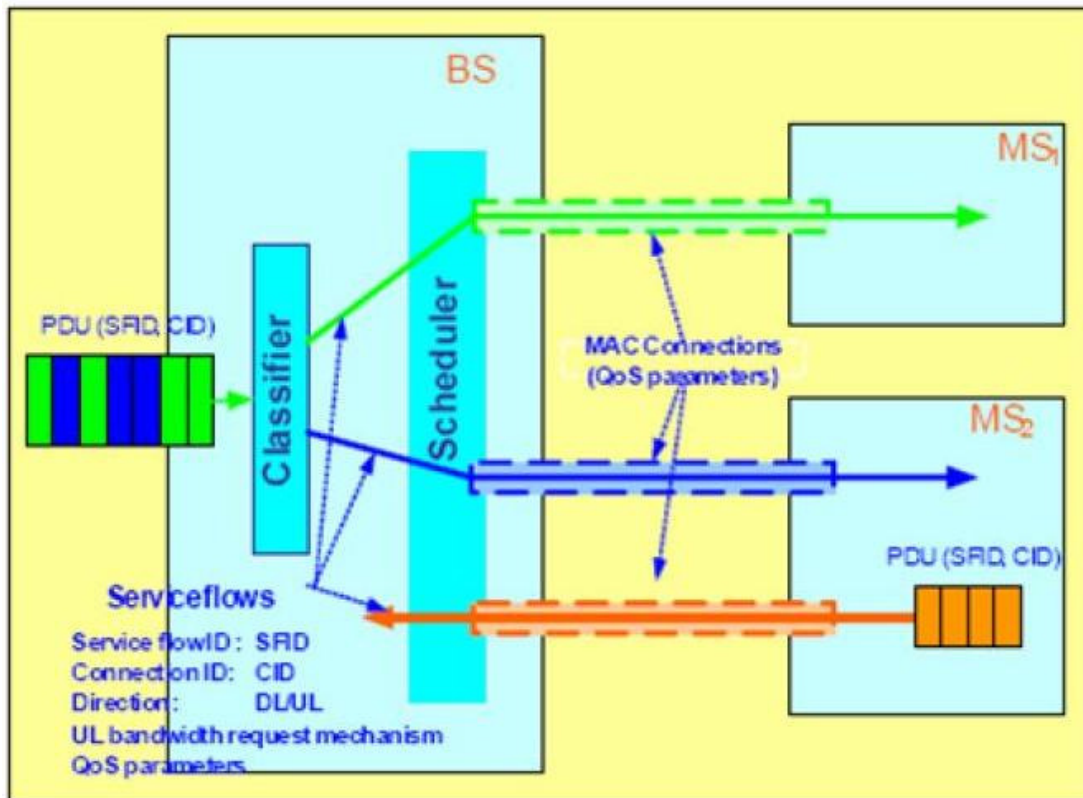
4.3.4 Ποιότητα υπηρεσιών στο 802.16e (mobile WiMAX)

Εκτός από όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετικά με την παρεχόμενη QoS, στη mobile έκδοση του WiMAX η υπηρεσία προγραμματισμού στο επίπεδο MAC, είναι σχεδιασμένη για να προσφέρει αποτελεσματικά ευρυζωνικές υπηρεσίες πάνω σε χρονικά μεταβαλλόμενο ασύρματο δίαυλο. Ο προγραμματιστής MAC, κατανέμει αποτελεσματικά τους διαθέσιμους πόρους, ώστε να ανταποκρίνεται στην εκρηκτική κίνηση των δεδομένων

και στις χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες του διαύλου. Βρίσκεται σε κάθε σταθμό βάσης για να δρα άμεσα στις απαιτήσεις της κίνησης κάθε διαύλου. Τα πακέτα δεδομένων ανατίθενται σε υπηρεσίες ροής με σαφώς καθορισμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσιών στο στρώμα MAC, έτσι ώστε ο προγραμματιστής να καθορίζει σωστά τη σειρά μετάδοσης των πακέτων στη διεπαφή αέρα (air interface).

Το CQICH (Channel Quality Indicator sub-Channel), παρέχει γρήγορα πληροφορίες για την κατάσταση του διαύλου, έτσι ώστε ο προγραμματιστής να επιλέγει κάθε φορά την κατάλληλη διαμόρφωση-κωδικοποίηση. Η προσαρμοστική διαμόρφωση-κωδικοποίηση σε συνδυασμό με την υβριδική αίτηση αυτόματης επανάληψης (Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ), παρέχουν τη δυνατότητα για ανθεκτική μετάδοση πάνω στο μεταβαλλόμενο δίαυλο. [36]

Στο Σχήμα 4-10, φαίνεται η λειτουργία του BS σε επίπεδο MAC σχετικά με τις ροές υπηρεσίας (service flows) στο mobile WiMAX.



Σχήμα 4-10: Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας στο Mobile WiMAX [32]

4.4 Σύγκριση WiMAX και Wi-Fi ως προς παρεχόμενη QoS

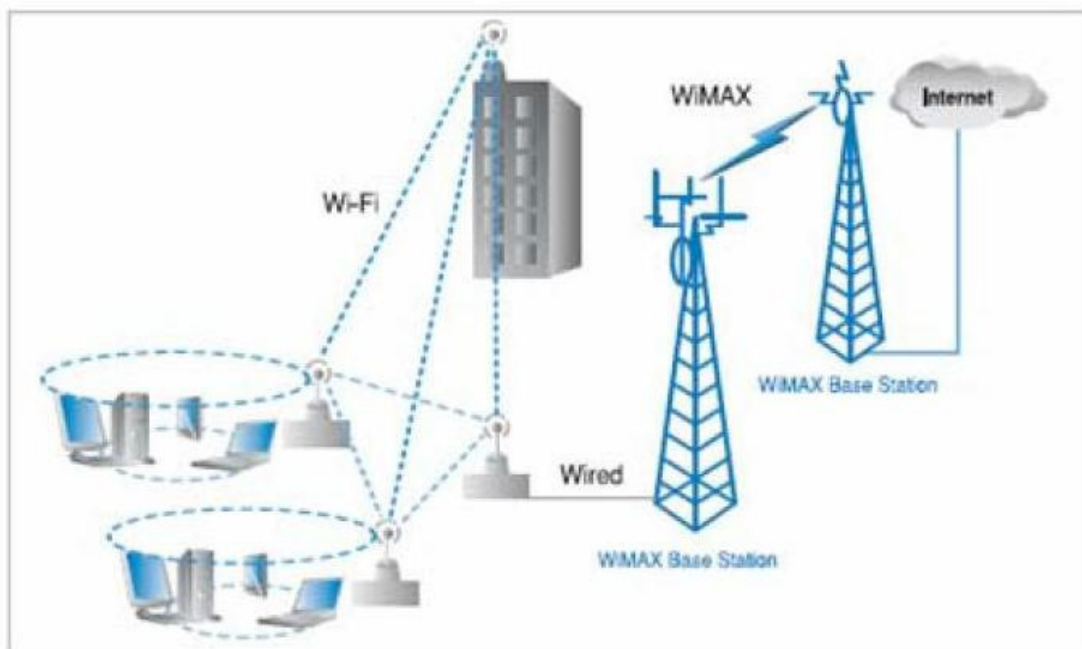
Σχετικά με την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας, η υπεροχή του 802.16 είναι σαφής. Στο WiMAX υπάρχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας πολυμέσων, τη στιγμή που κάτι τέτοιο απουσιάζει από τις περισσότερες εξειδικεύσεις του 802.11 και παρουσιάζεται

μόνο στο 802.11e με τη μορφή των κλάσεων υπηρεσιών. Η καινοτομία αυτή μεταφράζεται σε έμπιστες συμβάσεις-συμφωνίες (Service Level Agreements, SLAs) που μπορεί ένας πάροχος να προσφέρει στον τελικό χρήστη, ως προς την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, παρά το γεγονός ότι μεσολαβεί ασύρματο μέσο διάδοσης. Επιπλέον, ο πάροχος μπορεί να προσφέρει διαφορετικά SLAs σε διαφορετικούς εγγεγραμμένους χρήστες ή ακόμα σε διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο σταθμό υπηρεσίας. [39]

4.4.1 WiMAX backhauling σε τοπολογία πλέγματος (mesh) Wi-Fi

Σαφώς, ο καλύτερος τρόπος πρόσβασης είναι ο πάροχος να χρησιμοποιεί απευθείας WiMAX, διότι μπορεί να παρέχει ειδική μεταχείριση ανά εφαρμογή και ανά χρήστη, ακόμη και ανάμεσα σε χρήστες που εξυπηρετούνται από την ίδια κεραία. Το Wi-Fi μπορεί να θεωρηθεί ότι παρέχει QoS μόνο στην έκδοση 802.11e και μάλιστα μόνο σε αυτή με WSM.

Η χρήση του WiMAX μόνο ως backhaul υποτιμά πολύ τις δυνατότητές του και το ρόλο για τον οποίο σχεδιάστηκε, στερώντας τους χρήστες αλλά και τους παρόχους από μια δυναμική διεύθυνση στον κόσμο της παροχής QoS [44]. Ωστόσο, για την παροχή σε αυτού του είδους τα δίκτυα QoS από άκρο σε άκρο, θα πρέπει το WLAN να υλοποιείται με συστήματα 802.11e που υποστηρίζουν εγγενώς QoS. Στο Σχήμα 4-11 απεικονίζεται ένα τέτοιο δίκτυο.



Σχήμα 4-11: WiMAX διασύνδεση για Wi-Fi τοπολογία πλέγματος (mesh topology) [44]


4.4.2 Πλεονεκτήματα WiMAX

Τα IEEE 802.16 δίκτυα χρησιμοποιούν το στρώμα LLC (Logical Link Control που τυποποιείται και ως IEEE 802.2) όπως και άλλα LAN και WAN. Μια σημαντική πτυχή του IEEE 802.16, είναι ότι καθορίζει το στρώμα MAC που υποστηρίζει τις προδιαγραφές του πολλαπλού φυσικού στρώματος (PHY). Αυτό είναι κρίσιμο ώστε να επιτρέψει στους κατασκευαστές εξοπλισμού να διαφοροποιήσουν τις προσφορές τους. Αυτό είναι επίσης μια σημαντική πτυχή του γιατί το WiMAX μπορεί να περιγραφεί ως "πλαίσιο για την εξέλιξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας", παρά μια στατική εφαρμογή ασύρματων τεχνολογιών. Οι αναβαθμίσεις στις τρέχουσες και στις νέες τεχνολογίες και ενδεχομένως στις νέες βασικές τεχνολογίες που ενσωματώνονται στο φυσικό στρώμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. [36]

Μια συγκλίνουσα τάση είναι η χρήση των multi-mode και multi-radio SoC (System on a Chip) και σχεδίων συστημάτων που είναι εναρμονισμένα μέσω της χρήσης του κοινού MAC, της διαχείρισης συστημάτων, της περιαγωγής (roaming), του IMS (IP Multimedia System) και άλλων επιπέδων του συστήματος. Το WiMAX μπορεί να περιγραφεί ως μία τολμηρή προσπάθεια σφυρηλάτησης πολλών τεχνολογιών, για να εξυπηρετήσει πολλές ανάγκες σε πολλά φάσματα. Το στρώμα MAC είναι σημαντικά διαφορετικό από αυτό του 802.11 Wi-Fi (αλλά και του Ethernet). Στο Wi-Fi, το MAC χρησιμοποιεί «ανταγωνιστική» πρόσβαση, όλοι οι συνδρομητικοί σταθμοί που επιθυμούν να περάσουν δεδομένα μέσω ενός σημείου πρόσβασης (Access Point - AP), ανταγωνίζονται για την προσοχή του σε τυχαία βάση. Αυτό μπορεί να αναγκάσει τους απόμακρους από το AP κόμβους να διακόπτονται επανειλημμένα από τους λιγότερο ευαίσθητους, πιο κοντινούς κόμβους, μειώνοντας πολύ τη ρυθμαπόδοσή τους. Αντιθέτως στο 802.16 MAC, ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ανταγωνιστεί μόνο μία φορά (για την αρχική του είσοδο μέσα στο δίκτυο). Μετά από αυτό, διατίθεται μια χρονοθυρίδα από το σταθμό βάσης. Η χρονοθυρίδα μπορεί να διευρυνθεί ή να περιοριστεί, αλλά παραμένει ορισμένη στο συνδρομητή, με την έννοια ότι άλλοι συνδρομητές δεν μπορούν να την χρησιμοποιήσουν αλλά περιμένουν τη σειρά τους εκ περιτροπής. Αυτός ο αλγόριθμος προγραμματισμού είναι ανθεκτικός στην υπερφόρτωση και το μεγάλο αριθμό εγγραφών (αντίθετα από το 802.11). Είναι επίσης πολύ περισσότερο αποδοτικός σε εύρος ζώνης. Ο αλγόριθμος επιτρέπει, ακόμη, στο σταθμό βάσης να ελέγχει την ποιότητα της υπηρεσίας, με την εξισορρόπηση των αναθέσεων με βάση τις ανάγκες των συνδρομητικών σταθμών.

Μια πρόσφατη προσθήκη στο πρότυπο WiMAX θα προσθέσει πλήρη ικανότητα δικτύωσης πλέγματος (mesh networking), καθιστώντας τους κόμβους WiMAX ικανούς να λειτουργούν ταυτόχρονα σε διαμόρφωση συνδρομητικού σταθμού και σταθμού βάσης. Αυτό θα θολώσει την αρχική διάκριση και θα επιτρέψει την ευρεία υιοθέτηση του πλέγματος δικτύου που βασίζεται στο WiMAX. Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.16, ορίζει εύρος από 10 έως 66GHz. Αργότερα προστέθηκε πρόβλεψη υποστήριξης για συχνότητες

από 2 έως 11GHz, του οποίου τα περισσότερα τμήματα είναι χωρίς άδεια διεθνώς και μόνο πολύ λίγα από αυτά απαιτούν ακόμα κρατικές άδειες. Το ενδιαφέρον των περισσότερων επιχειρήσεων θα είναι πιθανώς στο κομμάτι αυτό, καθώς δεν απαιτεί αδειοδοτημένες συχνότητες. Οι προδιαγραφές του WiMAX βελτιώνονται σε πολλούς από τους περιορισμούς του Wi-Fi, με την παροχή αυξημένου εύρους ζώνης και ισχυρότερης κρυπτογράφησης. Στον Πίνακα 4-5, αποτυπώνονται σημεία διαφοροποίησης των τεχνολογιών WiMAX και Wi-Fi σύμφωνα με το WiMAX FORUM.



Fixed WiMAX vs. WiFi

Attribute	WiFi (IEEE 802.11)	Fixed WiMAX (IEEE 802.16-2004)
Quality of Service	Priority-based, no service level guarantee	Deterministic, guaranteed service levels by traffic type and customer
Link Budget/Range	Limited by unlicensed Tx limitations and UL channel BW	Higher Tx powers permitted in licensed bands, UL sub-channelization and support for advanced antenna technologies
Latency	High with large number of users due to CSMA/CA scheduling approach	Grant/Request for scheduling, latency independent of number of users, can support latency-sensitive traffic such as VoIP, interactive gaming, etc.
Interference Immunity	No UL Tx power control or DFS, multiple operators in license-exempt bands	Aided by UL power control, DFS and advanced antenna technologies
Best Application	A good solution for wireless LANs	WiMAX is the best solution for wireless MANs, can also backhaul WiFi Access Points

WiFi is not a threat to WiMAX. WiFi & Fixed WiMAX address different markets, they are complementary

Copyright 2004 WiMAX Forum
*WiMAX Forum™ and *WiMAX Forum CERTIFIED™ are

Πίνακας 4-5: Σύγκριση σταθερού WiMAX και Wi-Fi [33]

Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας WiMAX έναντι του Wi-Fi σημειώνονται στους παρακάτω πίνακες, Πίνακας 4-6 έως 4-11 [45] :

	Channel Bandwidth	Maximum Data Rate	Maximum bps/Hz
802.11	20 MHz	54 Mbps	2.7 bps/Hz
802.16	1.75 – 20 MHz	100 Mbps	5.0 bps/Hz

Πίνακας 4-6: Σχετική απόδοση

802.11	802.16
<ul style="list-style-type: none"> • Βέλτιστη απόδοση σε LOS • Δεν υποστηρίζει τοπολογία πλέγματος με επικυρωμένα πρότυπα 	<ul style="list-style-type: none"> • Βέλτιστη απόδοση σε NLOS • Το πρότυπο υποστηρίζει τοπολογία δικτύου πλέγματος (mesh network)

Πίνακας 4-7: Κάλυψη

802.11	802.16
<ul style="list-style-type: none"> • MAC βασισμένο στον ανταγωνισμό (CSMA/CA) => όχι εγγυημένη QoS • Δεν εγγυάται το επίπεδο latency για μεταφορά φωνής ή video • Δεν παρέχει διαφοροποιημένα επίπεδα υπηρεσιών ανάλογα με το χρήστη 	<ul style="list-style-type: none"> • Απόκτηση πρόσβασης MAC κατόπιν αίτησης • Σχεδιάστηκε για την παροχή βέλτιστης μεταφορά φωνής και video • Υποστηρίζει διαφορετικά επίπεδα υπηρεσίας π.χ. T1 για επιχειρησιακούς πελάτες, Best Effort για οικιακούς.

Πίνακας 4-8: Ποιότητα Υπηρεσιών

802.11	802.16
<ul style="list-style-type: none"> • Εμβέλεια περίπου 100 m • Η ανοχή του σε φαινόμενα εξάπλωσης καθυστέρησης λόγω πολυδιόδευσης σε εσωτερικούς χώρους είναι 0.8 msec 	<ul style="list-style-type: none"> • Η θεωρητική εμβέλεια περίπου 50 Km • Η ανοχή του σε φαινόμενα εξάπλωσης καθυστέρησης λόγω πολυδιόδευσης (ανακλάσεις σήματος) σε εσωτερικούς χώρους είναι 10.0 msec

Πίνακας 4-9: Εμβέλεια

802.11	802.16
<ul style="list-style-type: none"> Κανάλια εύρους 20MHz 	<ul style="list-style-type: none"> Το εύρος των καναλιών επιλέγεται και κυμαίνεται από 1.75 MHz έως 20 MHz

Πίνακας 4-10: Κλιμάκωση

802.11	802.16
<ul style="list-style-type: none"> Το υπάρχον πρότυπο WPA + WEP 	<ul style="list-style-type: none"> Το υπάρχον πρότυπο PKM - EAP

Πίνακας 4-11: Ασφάλεια

Κεφάλαιο 5^ο: Μελέτη σχημάτων παροχής δικαιοσύνης σε κινητά δίκτυα WiMAX

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μελέτη κάποιων σχημάτων παροχής δικαιοσύνης που χρησιμοποιούνται στο υποπλάσιο της κατερχόμενης ζεύξης σε δίκτυα Mobile WiMAX. Οι Πίνακες 5-1 και 5-2 παρουσιάζουν κάποιες τυχαίες αιτήσεις που γίνονται στο σταθμό βάσης του WiMAX δικτύου. Οι πίνακες αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στα παραδείγματα των σχημάτων.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Allocations	43	25	39	80	11	57	19	9	54	23
Possible Mapping Pairs	2x22 3x15 4x11 5x9	5x5 2x13	3x13 5x8 6x7	4x20 5x16 6x14 8x10	1x11 2x6 3x4 8x2	2x29 3x19 4x15 5x12	1x19 2x10 4x5	1x9 2x5 3x3	2x27 3x18 5x11 6x9	1x23 2x12 3x8 4x6

Πίνακας 5-1: Δέκα τυχαίες αιτήσεις

	A4	A6	A9	A1	A3	A2	A10	A7	A5	A8
Allocations	80	57	54	43	39	25	23	19	11	9
Possible Mapping Pairs	4x20 5x16 6x14 8x10	2x29 3x19 4x15 5x12	2x27 3x18 5x11 6x9	2x22 3x15 4x11 5x9	3x13 5x8 6x7	5x5 2x13	1x23 2x12 3x8 4x6	1x19 2x10 4x5	1x11 2x6 3x4 8x2	1x9 2x5 3x3

Πίνακας 5-2: Οι δέκα αιτήσεις του Πίνακα 1 σε φθίνουσα σειρά μεγέθους

5.1 Ορισμός του προβλήματος

Στο IEEE 802.16e Mobile WiMAX, οι δύο διαστάσεων απεικόνιση της εκρηκτικότητας της κατερχόμενης ζεύξης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

1. Δίνεται ένα καθορισμένο ορθογώνιο bin (δοχείο) B με πλάτος W και ύψος H . Το bin B έχει μία περιοχή A ίση με $W \times H$.
2. Δίνεται επίσης, ένα σετ από n αντικείμενα $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. Το i_{th} (i -οστό) αντικείμενο b_i έχει μία περιοχή A_i .
3. Πρέπει να προσδιοριστεί ένα ορθογώνιο σχήμα για το i_{th} αντικείμενο με πλάτος W_i και ύψος H_i τέτοιο ώστε $A_i \leq W_i \times H_i$.
4. Για κάθε i ισχύει ότι το πλάτος είναι $W_i < W$. Παρόμοια, για το ύψος ισχύει $H_i < H$ για κάθε i .
5. Τα W_i , H_i , W , και H είναι όλα ακέραιοι.
6. Επειδή η περιοχή απεικόνισης είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή κατανομή A_i , ο επιπλέον πόρος σπαταλιέται και έτσι, το $W_i \times H_i - A_i$, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.
7. Εξαιτίας του ορθογώνιου παράγοντα, όλα τα n αντικείμενα μπορεί να μη χωράνε στο μεγάλο bin B , έτσι σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του επιπλέον πλάτους που απαιτείται για να χωρέσουν όλα τα n αντικείμενα.

Η μονάδα κατανομής στο IEEE 802.16e Mobile WiMAX είναι το "slot" (θυρίδα). Ο ορισμός του slot εξαρτάται από το subchannelization και την κατεύθυνση της ζεύξης (DL ή UL) [46,47].

Στα παραδείγματα σχημάτων παροχής δικαιοσύνης που θα παρουσιαστούν πιο κάτω, θεωρείται ο Partially Used Sub-Channelization (PUSC) τρόπος, που είναι ο πιο συνήθης χρησιμοποιούμενος τρόπος [47] σε ένα κινητό ασύρματο περιβάλλον. Η ανάλυση είναι επίσης εφαρμόσιμη και σε άλλους τρόπους, πέρα από τον PUSC. Ο PUSC, που αποτελεί τη διανομή μετάθεσης υποφερόντων, είναι κατάλληλος για κινητούς χρήστες όταν η κατάσταση του καναλιού δεν είναι σταθερή σε χρόνο και απόσταση. Η κατάσταση του καναλιού διαμοιράζεται ισομερώς σε όλο το κανάλι.

Θεωρείται PUSC κατερχόμενης ζεύξης με κανάλι 10 MHz. Με τις καθορισμένες παραμέτρους του WiMAX forum [47], ένα κανάλι των 10 MHz απαιτεί 1024 υποφέροντα. Στην κατερχόμενη ζεύξη, αυτά τα 1024 υποφέροντα ομαδοποιούνται σε 30 υποκανάλια, με κάθε υποκανάλι να αποτελείται από 28 καθορισμένα υποφέροντα. Ένα πλαίσιο 5 ms και λόγος 2:1 DL:UL, έχει ως αποτέλεσμα 13 στήλες slot [48]. Έτσι, γι' αυτό το σετ παραμέτρων, το υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης αποτελείται από 14 στήλες slot και 30 σειρές, σύνολο 420 slots. Από αυτά χρησιμοποιούνται 12 στήλες slot για QoS ευαίσθητη κυκλοφορία. Η ορθογώνια απεικόνιση μπορεί να απαιτεί μία ακόμη στήλη slot. Ο υπόλοιπος χώρος είναι για τις απεικονίσεις.

5.1.1 Παράγοντες σχεδιασμού

Το πρόβλημα απεικόνισης των ριπών είναι NP-complete (Nondeterministic Polynomial time) [49]. Υπάρχουν τέσσερις βασικές εκτιμήσεις, στο σχεδιασμό ενός αλγορίθμου που θα χειρίζεται το πρόβλημα απεικόνισης δύο διαστάσεων της εκρηκτικότητας της κατερχόμενης ζεύξης. Πρώτον, ο αλγόριθμος θα πρέπει να μεγιστοποιεί τη ρυθμαπόδοση μειώνοντας τον αχρησιμοποίητο χώρο ή τα αχρησιμοποίητα slots και ελαχιστοποιώντας τον περισσευούμενο χώρο, που απαιτείται για το σχηματισμό ορθογωνίων παραλληλογράμμων. Δεύτερον, ο αλγόριθμος πρέπει να μπορεί να χειριστεί ένα μεγάλο αριθμό χρηστών και ριπών αποτελεσματικά. Τρίτον, θα πρέπει να είναι ενήμερος για μεταβλητά στοιχεία του DL-MAP και UP-MAP [48]. Τέλος, θα πρέπει να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας το κινητού σταθμού.

5.2 Basic Raster Algorithm

Ο αλγόριθμος Basic Raster αναπαριστά μία αφελής προσπάθεια επίλυσης του B2DAP (Basic Two-Dimensional Allocation Problem) προβλήματος. Ο Basic Raster όπως και ο Raster αλγόριθμος που θα αναφερθεί παρακάτω, δεν αποτελούν ρεαλιστικοί μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος μιας και δεν απεικονίζουν τις ριπές σε ορθογώνια παραλληλόγραμμα και αναφέρονται μόνο για βιβλιογραφικούς σκοπούς.

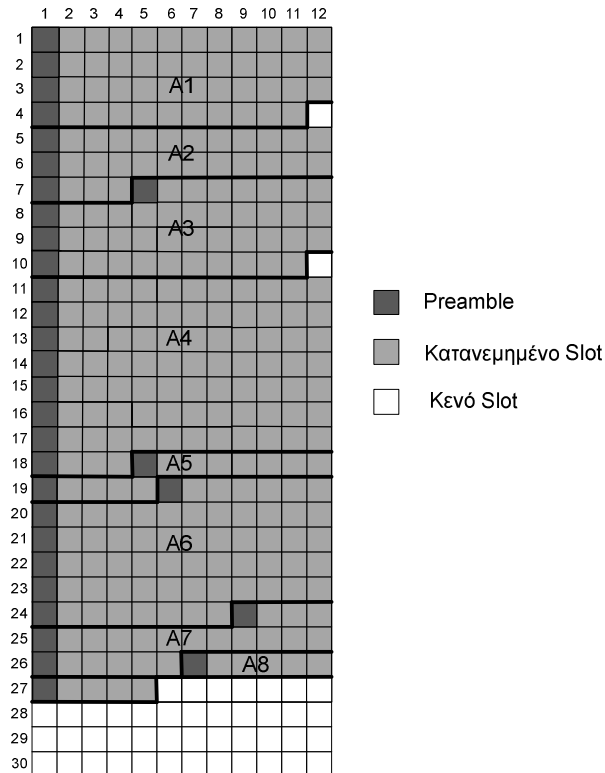
Ο αλγόριθμος λαμβάνει ένα πίνακα και ένα σύνολο αιτήσεων. Ο πίνακας σαρώνεται σειρά προς σειρά, από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω και η επεξεργασία των αιτήσεων γίνεται σύμφωνα με τη σειρά που λήφθηκαν. Η κατανομή γίνεται αναθέτοντας slots για μία αίτηση με τη σειρά που σαρώνεται ο πίνακας. Κάθε ανάθεση έχει ένα κόστος. Αυτό το κόστος είναι το preamble. Το πρώτο OFDM σύμβολο του υποπλαίσιου της κατερχόμενης ζεύξης περιέχει ένα preamble, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για συγχρονισμό στο χρόνο και τη συχνότητα. Αν μία ανάθεση

απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό slot από τα slot που δεν έχουν σαρωθεί στην τρέχουσα σειρά, η ανάθεση θα συνεχιστεί στην επόμενη σειρά, ξεκινώντας με ένα νέο preamble. Αν ο αριθμός των απαιτούμενων σειρών ανά κατανομή στην τρέχουσα τοποθεσία είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των εναπομεινάντων σειρών, τότε η αίτηση επιστρέφεται στο χρονοπρογραμματιστή (scheduler). Ακολουθεί παράδειγμα του αλγορίθμου Basic Raster στο Σχήμα 5-1. [51]

5.2.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου Basic Raster

Στο παράδειγμα του αλγορίθμου Basic Raster το υποπλαίσιο κατερχόμενης ζεύξης είναι 12×30 , δηλαδή 360 slot σύνολο. Οι αιτήσεις απεικονίζονται με τη σειρά που λαμβάνονται, δηλαδή όπως είναι διατεταγμένες στον Πίνακα 5-1. Όλες οι κατανομές ξεκινάνε με ένα preamble και για κάθε σειρά που καταλαμβάνουν προστίθεται ένα ακόμη. Αρχικά, γίνεται απεικόνιση της κατανομής A1 (43) και προκύπτει ένα κενό slot, χώρος στον οποίο δεν μπορεί να απεικονιστεί η επόμενη κατανομή επειδή πρέπει να ξεκινήσει με ένα preamble. Έτσι, η κατανομή A2 ξεκινά από την επόμενη σειρά. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την κατανομή A8, η οποία αφήνει 43 slot ανεκμετάλλευτο χώρο. Η επόμενη κατανομή A9 είναι 54 slot και άρα δεν χωράει οπότε επιστρέφεται στο χρονοπρογραμματιστή και ο αλγόριθμος τερματίζει.

Στο παράδειγμα, ο συνολικός αχρησιμοποίητος χώρος είναι 45 slot και το σύνολο των preamble είναι 32 slot, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-1. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου (ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε) είναι 78.61% με τα preamble να μετρώνται ως σπατάλη.



Σχήμα 5-1: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Basic Raster

5.3 Raster Algorithm

Ο Basic Raster algorithm είναι απλός, αλλά όχι πάντα αποδοτικός διότι προσθέτει κόστη τα οποία θα μπορούσαν να αποφευχθούν. Το πρόβλημα της αποδοτικότητας απορρέει από τις ακόλουθες παρατηρήσεις: (1) Κάθε καινούργια σειρά εκχώρησης προσθέτει ένα κόστος (ένα preamble). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σενάρια στα οποία μία διαφορετική επιλογή αιτήσεων που θα εκχωρηθούν κατά τη διάρκεια του σταδίου επανάληψης του αλγορίθμου να αποτρέψει τον κατακερματισμό μίας εκχώρησης μεταξύ δύο σειρών, με αποτέλεσμα να μην προστεθεί ένα κόστος. (2) Είναι προτιμότερο να κατακερματιστεί μία μεγαλύτερη εκχώρηση από ότι μία μικρότερη, διότι καταλήγουμε με καλύτερη αξιοποίηση του χώρου. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι το σχετικό κόστος ενός preamble είναι μεγαλύτερο για μικρές αιτήσεις από ότι για μεγαλύτερες. Η δεύτερη παρατήρηση που έγινε (2) λαμβάνει υπ' όψιν το overhead που δημιουργείται και λόγω των preamble και λόγω των αχρησιμοποίητων slot.

Ένας τρόπος βελτίωσης του αλγορίθμου Basic Raster είναι να χρησιμοποιηθεί μία άπληστη προσέγγιση στην επιλογή των αιτήσεων που θα εξυπηρετηθούν, ενώ παράλληλα αποφεύγεται η διάσπαση εκχωρήσεων μεταξύ σειρών όσο το δυνατόν

περισσότερο. Ο αλγόριθμος Raster τροποποιεί τον Basic Raster αλγόριθμο ως εξής: Βήμα 1^ο: Ταξινομεί τις αιτήσεις σε φθίνουσα σειρά μεγέθους. Βήμα 2^ο: Σε κάθε επανάληψη, επιλέγει τη μεγαλύτερη αίτηση που μπορεί να εκχωρηθεί χωρίς κατακερματισμό. Βήμα 3^ο: Αν καμία αίτηση δεν ικανοποιεί το Βήμα 2, επιλέγει τη μεγαλύτερη αίτηση που μπορεί να εισαχθεί.

Η τροποποίηση που αναφέρθηκε πιο πάνω προσπαθεί να απαντήσει τα δύο προβλήματα που προσδιορίστηκαν στον αλγόριθμο Basic Raster. Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται η απεικόνιση των κατανομών του Πίνακα 5-1. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το αποτέλεσμα της ταξινόμησης και της επιλογής της καλύτερης αίτησης κάθε στιγμή μπορεί να εμποδίσει περιττά preamble ή αχρησιμοποίητα slot στη μέση μίας κατανομής. Σημειώνεται, ότι η άπληστη προσέγγιση προτιμά συγκεκριμένες αιτήσεις που απαντούν ένα τοπικό άπληστο κριτήριο, και μπορούν πιθανώς να οδηγήσουν σε παρατεταμένη στέρηση (starvation) κάποιων αιτήσεων.

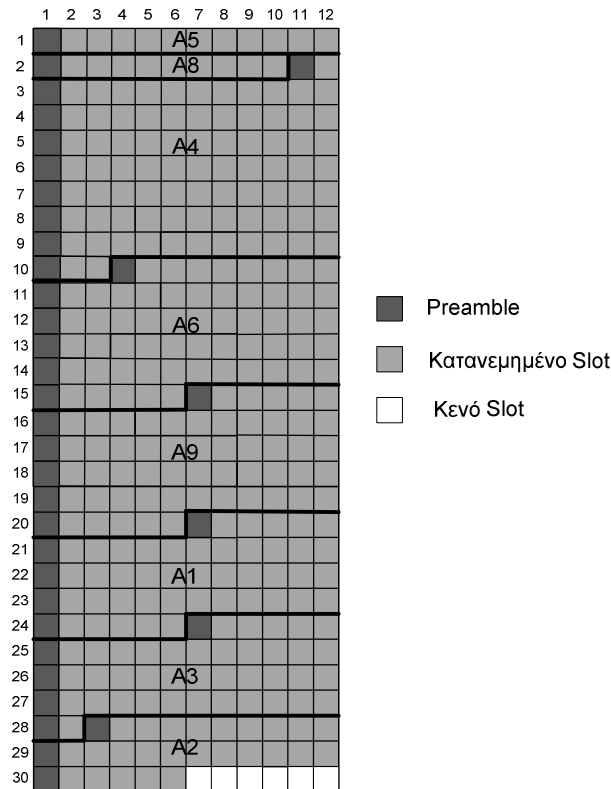
Για ένα δεδομένο πίνακα $T(p,q)$, φαίνεται ότι η τιμή του p (ύψος) μπορεί να επηρεάσει την επίδοση των βασισμένων σε Raster αλγορίθμων, αφού καθορίζει πόσα preamble θα απαιτηθούν και το σχετικό τους κόστος σε slot. Αυξάνοντας το p , επηρεάζει την επίδοση σε δύο κατευθύνσεις: πρώτον, περισσότερες αιτήσεις μπορούν να εισαχθούν χωρίς κατακερματισμό και επομένως, η επίδοση αυξάνεται και για τον Basic Raster και για τον Raster αλγόριθμο, και δεύτερον, ο αριθμός των slot αυξάνεται, και ως εκ τούτου, περισσότερες αιτήσεις μπορούν να εξυπηρετηθούν. Είναι επίσης εύκολα κατανοητό ότι η τιμή του q (πλάτος) επηρεάζει μόνο τον αριθμό των αιτήσεων που μπορούν να εξυπηρετηθούν. [51]

5.3.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου Raster

Σε αντίθεση με το παράδειγμα του Basic Raster, ο Raster αλγόριθμος αρχικά παίρνει τις αιτήσεις του Πίνακα 5-1 και τις ταξινομεί σε φθίνουσα σειρά όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-2. Σύμφωνα με το βήμα 2 του αλγορίθμου που αναφέρθηκε πιο πάνω, σε κάθε επανάληψη επιλέγεται η μεγαλύτερη αίτηση που μπορεί να εκχωρηθεί χωρίς κατακερματισμό. Έτσι, η πρώτη αίτηση που θα απεικονιστεί στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης (360 slot) είναι η A5 (11 slot). Η επόμενη αίτηση που μπορεί να χωρέσει σε μία σειρά χωρίς να κατακερματιστεί είναι η A8 (9 slot). Μετά όμως από αυτές τις δύο αιτήσεις δεν υπάρχει κάποια που να μπορεί να καταχωρηθεί χωρίς να κατακερματιστεί, επομένως ακολουθείται το 3^ο βήμα του αλγορίθμου. Δηλαδή, οι αιτήσεις τοποθετούνται σε φθίνουσα σειρά μεγέθους μέχρις ότου να μη χωράει κάποια άλλη και ο

αλγόριθμος να τερματιστεί. Στο παράδειγμα, η τελευταία αίτηση που καταχωρείται είναι η A2 (25 slot) αφήνοντας 6 slot κενού χώρου.

Τελικά, ο συνολικός αχρησιμοποίητος χώρος είναι 6 slot και το σύνολο των preamble είναι 36 slot, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-2. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου (ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε) είναι 88.33% με τα preamble να μετρώνται ως σπατάλη.



Σχήμα 5-2: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Raster

5.4 Simple Packing Algorithm

Ο Simple Packing αλγόριθμος λαμβάνει πρώτα μία λίστα με μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU) του στρώματος MAC από το χρονοπρογραμματιστή ποιότητας υπηρεσίας (QoS scheduler) του σταθμού βάσης και ξεκινά να τα πακετάρει με τη μέθοδο First-In-First-Out (FIFO). Το πακετάρισμα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να γεμίζει το υποπλαίσιο (subframe) της κατερχόμενης ζεύξης (downlink) του WiMAX κατανέμοντας ολόκληρες στήλες από πάνω έως κάτω (στη διάσταση των υποκαναλιών (subchannel) μέχρις ότου επιτευχθεί ο αριθμός των slot που απαιτούνται για τα δεδομένα. Αν ο αριθμός των slot που απαιτούνται δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της διάστασης του υποκαναλιού το υπόλοιπο συμπληρώνεται με padding (συμπλήρωμα ώστε η ριπή να έχει ορθογώνιο

σχήμα). Το Σχήμα 5-3 απεικονίζει ένα παράδειγμα της διάταξης των ριπών που προκύπτει από τον Simple Packing αλγόριθμο.

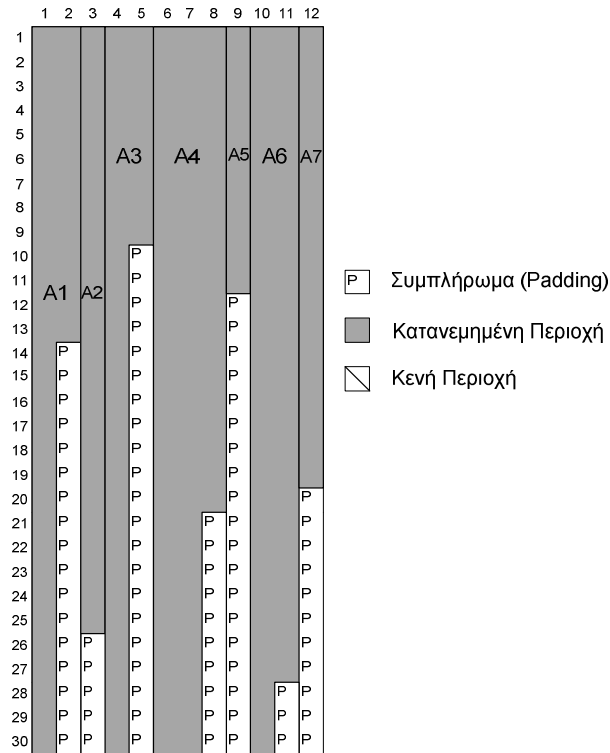
Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται μία προσέγγιση η οποία πάντα κατανέμει ολόκληρες στήλες είναι για να απλοποιηθεί το πρόβλημα κατανομής των ριπών στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ εύκολο για τον αλγόριθμο να αντιμετωπίσει τον κενό χώρο που προκύπτει εφόσον το μόνο που πρέπει να κάνει είναι να παρακολουθεί τον εναπομείναντα αριθμό συμβόλων για να αποφασίσει αν η επόμενη ριπή μπορεί να απεικονιστεί. Προφανώς, αυτός ο αλγόριθμος δεν είναι πολύ αποτελεσματικός επειδή ανάλογα με τον αριθμό των slot που πρέπει να καταχωρηθούν έχει σαν αποτέλεσμα πολλά slot να χαραμίζονται με padding. [52]

5.4.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου Simple Packing

Ο Simple Packing αλγόριθμος είναι αρκετά ευθυτενής, δέχεται τις αιτήσεις και τις καταχωρεί με τη σειρά που τις λαμβάνει. Αρχίζοντας από αριστερά και πάνω, κατανέμει τις αιτήσεις σε στήλες. Αν για κάποια αίτηση που καταχωρήθηκε μείνει κενός χώρος στη στήλη, τότε το υπόλοιπο της στήλης γεμίζεται με padding.

Έτσι, ο αλγόριθμος λαμβάνει τις αιτήσεις του Πίνακα 5-1 και τις καταχωρεί με τη μέθοδο FIFO. Οπότε, η πρώτη αίτηση που απεικονίζεται είναι η A1 (43 slot) η οποία καταλαμβάνει μία ολόκληρη στήλη και 13 slot από τη δεύτερη, αφήνοντας 17 slot κενού χώρου σε αυτή τη στήλη που συμπληρώνεται με padding. Η επόμενη αίτηση είναι η A2 (25 slot), της οποίας η απεικόνιση έχει ως αποτέλεσμα 5 slot κενού χώρου τα οποία συμπληρώνονται με padding. Συνεχίζοντας ο αλγόριθμος ακολουθεί την ίδια διαδικασία μέχρι το υποπλαίσιο να μη χωράει άλλη αίτηση.

Σαν αποτέλεσμα, ο συνολικός αχρησιμοποίητος χώρος είναι 86 slot που προκύπτουν από το padding όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-3. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου (ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε) είναι 76.12%.



Σχήμα 5-3: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Simple Packing

5.5 First Fit Decreasing Height Algorithm (FFDH)

Ο αλγόριθμος First Fit Decreasing Height μπορεί να προσαρμοστεί για την περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης της πολλαπλής πρόσβασης ορθογώνιας διαίρεσης φερουσών συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) του WiMAX με τον ακόλουθο τρόπο. Με δεδομένο αριθμό ριπών γνωστού αριθμού υποκαναλιών και συμβόλων, οι ριπές τοποθετούνται ξεκινώντας από την πάνω αριστερή γωνία. Ένα ράφι (shelf) ορίζεται κάθε φορά που μία ριπή τοποθετείται στο πάνω μέρος της διάστασης των υποκαναλιών. Οι επακόλουθες ριπές τοποθετούνται η μία μετά την άλλη στην κατεύθυνση της διάστασης των υποκαναλιών μέχρις ότου η επόμενη να μη χωράει. Τότε, ένα καινούργιο ράφι δημιουργείται. Όταν δεν υπάρχει άλλη χωρητικότητα στο τρέχων ράφι για να τοποθετηθεί η επόμενη ριπή και ένα καινούργιο ράφι δεν μπορεί να δημιουργηθεί, ο αλγόριθμος τερματίζεται. Δύο διαφορετικές περιπτώσεις μπορούν να ληφθούν υπ 'όψιν γι' αυτόν τον αλγόριθμο, είτε να πακετάρονται οι ριπές με τη σειρά άφιξής τους (FFDH-FIFO), είτε να ταξινομούνται με σειρά μη αυξανόμενων συμβόλων πριν το πακετάρισμα (FFDH-SORTED).

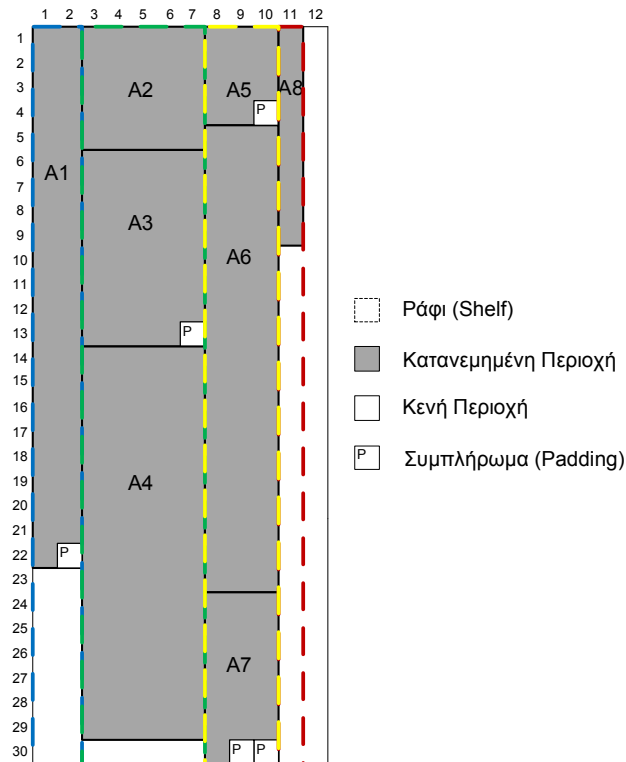
Και στις δύο περιπτώσεις όμως, πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου FFDH, οι διαστάσεις των ριπών πρέπει να καθορίζονται. Ένα παράδειγμα μίας ευρετικής μεθόδου,

η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση ενός ορθογώνιου σχήματος για συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων που πρέπει να πακεταριστεί, είναι η ακόλουθη. Δεδομένου του αριθμού των slot που θα χρησιμοποιηθούν, εντοπίζονται τα πιθανά ορθογώνια σχήματα, λαμβάνοντας υπόψη ένα μέγιστο όριο συμπληρωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται ο μέγιστος δυνατός χώρος στη διάσταση του υποκαναλιού και η χρήση όσο το δυνατό λιγότερων συμπληρωμάτων. Τα Σχήματα 5-4 και 5-5 απεικονίζουν παραδείγματα του αλγορίθμου FFDH και για τις δύο εκφάνσεις του αντίστοιχα (FFDH-FIFO, FFDH-SORTED). [52]

5.5.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου First Fit Decreasing Height-FIFO (FFDH-FIFO)

Ο αλγόριθμος FFDH χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FIFO τοποθετεί τις αιτήσεις στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης με τη σειρά που τις λαμβάνει. Αρχικά, έχοντας τις αιτήσεις του Πίνακα 5-1 η πρώτη αίτηση που καταχωρείται είναι η A1 (43), και επιλέγεται να καταχωρηθεί με τη μορφή 2×22 η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο χώρο στη διάσταση του υποκαναλιού με χρήση ενός μόνο συμπληρώματος. Το ράφι που ορίζει η αίτηση A1 έχει πλάτος δύο συμβόλων και 16 slot κενό χώρο, στον οποίο η αίτηση A2 (25) δε χωράει. Οπότε, η αίτηση A2 τοποθετείται δεξιά της αίτησης A1 με τη μορφή 5×5, ορίζοντας ένα νέο ράφι. Ο κενός χώρος που μένει σε αυτό το ράφι είναι 125 slot όπου και τοποθετούνται οι αιτήσεις A3 (5×8), έχοντας ένα συμπλήρωμα, και A4 (5×16). Μετά την καταχώρηση της A4 ο κενός χώρος που απομένει στο ράφι είναι 5 slot. Έτσι, η A5 (3×4) αίτηση ορίζει ένα καινούργιο ράφι στο οποίο θα καταχωρηθούν οι αιτήσεις A6 (3×19) και A7 (3×7). Τέλος, ένα τελευταίο ράφι σχηματίζεται για την αίτηση A8 (1×9), καθώς οι υπόλοιπες αιτήσεις δε χωράνε ούτε σε αυτό το ράφι ούτε στο χώρο που μένει εκτός του ραφιού.

Το αποτέλεσμα του παραδείγματος του αλγορίθμου είναι ότι, ο συνολικός αχρησιμοποίητος χώρος είναι 5 slot που προκύπτουν από το padding και 72 κενά slot όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-4. Το ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε είναι 78.61%.

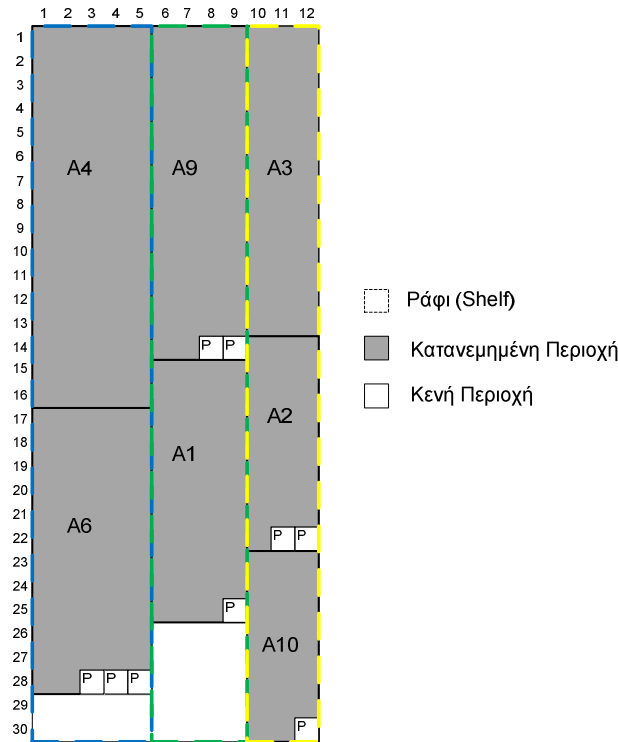


Σχήμα 5-4: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFDH-FIFO

5.5.2 Παράδειγμα Αλγορίθμου First Fit Decreasing Height-SORTED (FFDH-SORTED)

Σε αυτό το παράδειγμα ο αλγόριθμος FFDH κατατάσσει τις αιτήσεις που λαμβάνει σε φθίνουσα σειρά. Η μοναδική διαφορά με το προηγούμενο παράδειγμα είναι η σειρά με την οποία διατάσσονται οι αιτήσεις προς καταχώρηση. Έτσι, οι αιτήσεις τοποθετούνται με τη σειρά που φαίνεται στον Πίνακα 5-2. Το πρώτο ράφι δημιουργείται με την τοποθέτηση της αίτησης A4 (4×16). Ο μόνος τρόπος για να μπορέσει η αίτηση A6 να χωρέσει στο ράφι είναι με το ζεύγος πλάτος-ύψος 5×12, που έχει 3 slot συμπλήρωμα. Ένα καινούργιο ράφι ορίζεται με την αίτηση A9 (4×14) στο οποίο καταχωρείται και η αίτηση A1 (4×11). Το τελευταίο ράφι δημιουργείται με την αίτηση A3 (3×13) και συμπεριλαμβάνει και τις αιτήσεις A2 (3×9) με δύο slot συμπλήρωμα, και A10 (3×8) με ένα slot συμπλήρωμα.

Από το παράδειγμα προκύπτει ότι ο κενός χώρος σε slot είναι 30 και τα συμπληρώματα είναι 9, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-5. Άρα, το ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε είναι 89.17%.



Σχήμα 5-5: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFDH-SORTED

5.6 One Column Striping with non-increasing Area first mapping Algorithm (OCSA)

Στον αλγόριθμο OCSA αρχικά, ο χρονοπρογραμματιστής υπολογίζει την κατανομή του κάθε χρήστη βασιζόμενος μόνο στη ζήτησή του, την εγγύηση της ποιότητας υπηρεσίας (ρυθμαπόδοση και καθυστέρηση) και διαθέσιμη χωρητικότητα. Ο περιορισμός της τοποθέτησης των δεδομένων σε ορθογώνια δε λαμβάνεται υπόψη σε αυτό το πρώτο βήμα αλλά είναι το κύριο μέλημα του δεύτερου μέρους.

Για να μεγιστοποιηθεί η ρυθμαπόδοση, η κατανομή των πόρων ταξινομείται σε φθίνουσα σειρά (το μεγαλύτερο είναι πρώτο). Για να επιτραπεί χώρος για μεταβλητά μέρη του DL-MAP και UL-MAP, οι κατανομές των πόρων απεικονίζονται από δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Δεδομένης μίας περιοχής που μπορεί να καλύψει μία ριπή, υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί υψών και πλατών που θα μπορούσαν να περιληφθούν σε αυτήν την περιοχή· επιλέχθηκε για αυτόν τον αλγόριθμο το ζεύγος πλάτους-ύψους με το μικρότερο πλάτος. Αυτό επιτρέπει στον κινητό σταθμό δέκτη να κλείσει το ηλεκτρονικό του κύκλωμα για το μεγαλύτερο μέρος του εναπομείναντος υποπλασίου της κατερχόμενης ζεύξης, με αποτέλεσμα, την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου OCSA θα μπορούσε να χωριστεί σε τρία βήματα. Πρώτα, έχοντας ένα δεδομένο αριθμό πόρων προς κατανομή $\{A_i\}$, γίνεται ταξινόμηση αυτών κατά φθίνουσα σειρά. Το δεύτερο βήμα αποτελείται από την απεικόνιση αυτών των κατανομών στο υποπλάισιο της κατερχόμενης ζεύξης (οριζόντια απεικόνιση). Ο αλγόριθμος επιλέγει το μεγαλύτερο στοιχείο προς απεικόνιση το οποίο μπορεί να χωρέσει στον αχρησιμοποίητο χώρο. Δεδομένης της περιοχής A_i , ο αλγόριθμος καθορίζει το πιθανό j -οστό ζευγάρι πλάτους-ύψους (W_{ij}, H_{ij}) για τη ριπή, τέτοιο ώστε $W_{ij} \times H_{ij} = A_i$. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι κάθε W_{ij} πρέπει να είναι μικρότερο από W (πλάτος του υπόλοιπου υποπλαισίου κατερχόμενης ζεύξης) και κάθε H_{ij} να είναι μικρότερο από H (ύψος του υποπλαισίου κατερχόμενης ζεύξης). Για παράδειγμα, αν η κατανομή πόρου είναι 40, τα πιθανά ζευγάρια απεικόνισης είναι 2×20 , 4×10 , 5×8 , 8×5 και 10×4 . Να σημειωθεί ότι τα 1×40 , 20×2 ή 40×1 δεν είναι εφικτά αφού το ύψος τους ή το πλάτος τους υπερβαίνει το μέγεθος του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης. Σε αυτό το παράδειγμα, το ύψος του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης είναι 30 και το πλάτος 12. Σε περίπτωση που υπάρχουν πολλά πιθανά ζευγάρια, επιλέγεται το ζευγάρι με το μικρότερο πλάτος. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας στον κινητό σταθμό.

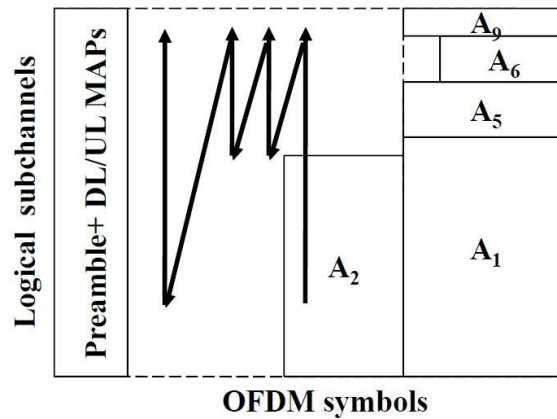
Ωστόσο, αν για παράδειγμα θεωρηθεί αντί για 40, κατανομή πόρων 37, δεν υπάρχουν εφικτά ζευγάρια απεικόνισης. Σε αυτό το βήμα, ο αλγόριθμος επιλέγει το ζευγάρι που έχει ως αποτέλεσμα το ορθογώνιο κατανομής με τα λιγότερα αχρησιμοποίητα slot λόγω υπερ-κατανομής (idle slot). Σε αυτό το παράδειγμα, γίνεται δοκιμή όλων των πιθανών πλατών (από 2 έως 12), δηλαδή, 2×19 , 3×13 , 4×10 , 5×8 , 6×7 , 7×6 , 8×5 , 9×5 , 10×4 , 11×4 και 12×4 . Αυτές οι απεικονίσεις θα έχουν αντίστοιχα 1, 2, 3, 3, 5, 5, 3, 8, 3, 7 και 11 αχρησιμοποίητα slot. Οι περιορισμοί του μέγιστου επιτρεπτού πλάτους και ύψους ισχύουν ακόμη.

Το μέγεθος του διαθέσιμου χώρου υπαγορεύει τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η απεικόνιση. Για παράδειγμα, η κατανομή πόρων για 35 μπορεί να απεικονιστεί ως 5×7 ή 7×5 . Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καμία από αυτές τις δύο απεικονίσεις αν είναι διαθέσιμος αχρησιμοποίητος χώρος 90 στη μορφή 3×30 . Σε όλες τις περιπτώσεις, ο αλγόριθμος επιλέγει την απεικόνιση που έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη υπερ-κατανομή (τα λιγότερα idle slot). Σε αυτό το παράδειγμα, το ζευγάρι 2×18 θα επιλεγόταν με ένα αχρησιμοποίητο slot.

Αφότου μία κατανομή έχει απεικονιστεί στο υποπλάισιο της κατερχόμενης ζεύξης, κάποιος χώρος μπορεί να παραμένει κενός πάνω από τις ριπές που έχουν απεικονιστεί. Στο τρίτο βήμα (κάθετη απεικόνιση), γίνεται προσπάθεια ανάθεσης αυτού του χώρου προτού αρχίσει η απεικόνιση του επόμενου υποπλαισίου κατερχόμενης ζεύξης.

Ακολούθως, θεωρείται η κάθετη λωρίδα πάνω από τις ριπές που έχουν απεικονιστεί. Σκοπός του αλγορίθμου είναι να γεμίσει αυτήν τη λωρίδα πριν προχωρήσει στις εναπομείνουσες άδειες στήλες στο πλαίσιο. Ο αλγόριθμος ψάχνει για τη μεγαλύτερη κατανομή που μπορεί να χωρέσει στην άδεια περιοχή σε αυτή τη λωρίδα. Ωστόσο, μικρότερο ύψος και μεγαλύτερο πλάτος προτιμούνται για την εκμετάλλευση του χώρου μέσα στο παρόν πλάτος. Η απεικόνιση γίνεται, αν βρεθεί κατανομή που να ταιριάζει. Αυτή η διαδικασία γεμίσματος της κάθετης λωρίδας επαναλαμβάνεται μέχρι να μη χωράει καμία άλλη κατανομή κάθετα στον αχρησιμοποίητο χώρο με αυτό το πλάτος υποπλαισίου κατερχόμενης ζεύξης.

Σε αυτό το σημείο, ο αλγόριθμος πηγαίνει πίσω στο δεύτερο βήμα και επιλέγει την επόμενη μεγαλύτερη κατανομή για οριζόντια απεικόνιση στο υποπλάισιο της κατερχόμενης ζεύξης. Η διαδικασία κίνησης κάθετα και μετά οριζόντια προς τα αριστερά φαίνεται στο Σχήμα 5-6.



Σχήμα 5-6: Παράδειγμα απεικόνισης ριπών στην κατερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο OCSA

Είναι καλό να παρατηρηθεί ότι η πολυπλοκότητα στη χειρότερη περίπτωση του OCSA είναι της τάξης του $O((rn)^2)$, όπου n είναι ο αριθμός των κατανομών πόρων μέσα σε ένα πλαίσιο και r είναι η κατανομή πόρων (για λόγους απαρίθμησης ζευγαριών απεικόνισης).

$$Complexity = O(sorting) + O(allocations) = O(n \log n) + O((rn)^2)$$

Μία πιθανή επέκταση του αλγορίθμου OCSA είναι ότι πριν τον τερματισμό του, ο αλγόριθμος θα μπορούσε να επιχειρήσει να απεικονίσει όλες τις κατανομές που απομένουν στον αχρησιμοποίητο χώρο με αντίστροφη σειρά. Αυτό θα προσθέσει έναν ακόμη γύρο αναζήτησης και ως εκ τούτου θα αυξήσει την πολυπλοκότητα. Οι κατανομές μπορούν να ικανοποιηθούν μόνο εν μέρει. Ότι περισσεύει κατανέμεται σε μελλοντικά πλαίσια. Αν επιτραπούν οι μερικές κατανομές, ο αλγόριθμος μπορεί να βελτιστοποιηθεί

ώστε να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την επόμενη μεγαλύτερη κατανομή πόρου, αλλά και την κατανομή που θα έχει ως αποτέλεσμα το λιγότερο αχρησιμοποίητο χώρο. Και πάλι, ότι περισσεύει κρατείται για μελλοντικά πλαίσια.

Ο OCSA όχι μόνο βελτιστοποιεί την αξιοποίηση του πλαισίου αλλά επίσης μεγιστοποιεί την κατανομή πόρων· ωστόσο, σε περίπτωση που υπάρχει αυστηρή ανάγκη για ποιότητα υπηρεσίας σε κάποιον κινητό σταθμό ή για να αποφευχθεί παρατεταμένη στέρηση (starvation) μικρότερων κατανομών πόρων, υπεισέρχεται άλλη μία πιθανή επέκταση του OCSA που είναι η εφαρμογή του μηχανισμού προτεραιότητας. Για παράδειγμα, η κατανομή πόρου με αυστηρή προτεραιότητα θα παρακάμψει το κριτήριο της επόμενης μεγαλύτερης κατανομής πόρου. Με άλλα λόγια, η μεγαλύτερη κατανομή πόρου μετακινείται στην αρχή της ουράς απεικόνισης και η κατανομή πόρου με την προτεραιότητα θα απεικονιστεί ανεξάρτητα από τον περιορισμό του μεγαλύτερου μεγέθους. Αυτός είναι ένας συμβιβασμός που χρησιμοποιείται, επειδή η αυστηρή προτεραιότητα μπορεί να οδηγήσει σε αχρησιμοποίητο χώρο. [53]

5.6.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου OCSA

Σε αυτό το τμήμα, παρέχεται ένα παράδειγμα που βοηθά στην κατανόηση του αλγορίθμου. Για ακόμη μια φορά, το υποπλαίσιο κατερχόμενης ζεύξης θεωρείται ότι είναι 12×30 , δηλαδή 360 slot σύνολο. Ο Πίνακας 5-1 δείχνει ένα τυχαίο παράδειγμα δέκα κινητών σταθμών. Αυτοί οι κινητοί σταθμοί έχουν κατανεμηθεί ως A1 έως A10 από τον χρονοπρογραμματιστή. Το άθροισμα όλων των κατανομών είναι ίσο με 360.

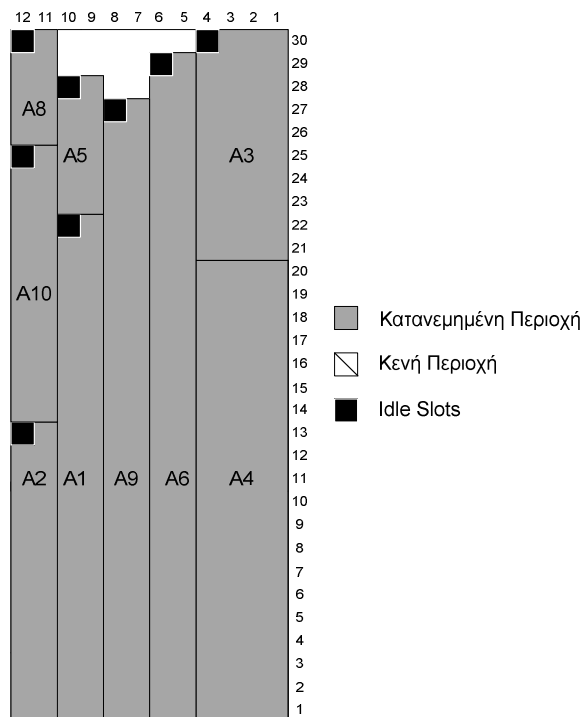
Πρώτα, ο αλγόριθμος ταξινομεί όλες τις κατανομές πόρων σε φθίνουσα σειρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο Πίνακας 5-1 να φαίνεται όπως ο Πίνακας 5-2. Η απεικόνιση της περιοχής του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω. Η κατανομή A4 επιλέγεται πρώτη, όλοι οι πιθανοί παράγοντες του 80 παρατίθενται, και το ζευγάρι 4×20 επιλέγεται και απεικονίζεται στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Αυτό το ζευγάρι έχει το μικρότερο πλάτος. Αυτή η απεικόνιση έχει ως αποτέλεσμα να αφήσει αχρησιμοποίητο χώρο 4×10 στη λωρίδα πάνω από τη ριπή A4. Ο αλγόριθμος κινείται κάθετα και ψάχνει για όλα τα πιθανά ζευγάρια που μπορούν να χωρέσουν σε αυτόν το χώρο. Η κατανομή A3 επιλέγεται και η απεικόνιση 4×10 παρέχει το καλύτερο ταίριασμα για το πλάτος. Αν και υπάρχει υπερ-κατανομή του ενός slot σε αυτήν την απεικόνιση, καμία από τις υπόλοιπες κατανομές δε χωράει σε αυτό το χώρο, χωρίς να αφήσει μεγαλύτερο κενό.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος συνεχίζει οριζόντια στην επόμενη μεγαλύτερη κατανομή, η οποία είναι η A6 (57). Αυτή τη φορά το ζευγάρι 2×29 επιλέγεται. Αυτή η

απεικόνιση καταλήγει στο να υπάρξει κενός χώρος 2×1 στη λωρίδα από πάνω της και σε υπερ-κατανομή, δηλαδή μένει ένα αχρησιμοποίητο slot στη ριπή. Αν και υπάρχει αχρησιμοποίητος χώρος στη λωρίδα πάνω από την A6, καμία από τις κατανομές που απομένουν δε χωράει σε αυτό το χώρο.

Όποτε ο αλγόριθμος φτάνει στο όριο του ύψους, προχωράει προς τα αριστερά για να γεμίσει το εναπομένον υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Ο αχρησιμοποίητος χώρος στο υποπλαίσιο είναι 180 (6×30) οπότε, η επόμενη μεγαλύτερη κατανομή που είναι η A9, απεικονίζεται με το ζευγάρι 2×27 και αφήνει κενό χώρο 6 slot από πάνω της στον οποίο δεν χωράει κάποια κατανομή. Έτσι, ο αλγόριθμος προχωράει για ακόμη μια φορά προς τα αριστερά και γίνεται απεικόνιση της κατανομής A1 με το ζευγάρι 2×22. Αυτή τη φορά στη λωρίδα κενού που μένει, χωράει η κατανομή A5 (2×6) με υπερ-κατανομή του ενός slot όπως και η A1. Παρόλα αυτά όμως, και πάλι μένει αχρησιμοποίητος χώρος πάνω από την κατανομή A5. Τέλος, ο αλγόριθμος κινείται για μία τελευταία φορά προς τα αριστερά στον κενό χώρο των 60 (2×30) slot και πραγματοποιείται κάθετα η απεικόνιση των κατανομών A2 (2×13), A10 (2×12) και A8 (2×5), με υπερ-κατανομή ένα slot για την κάθε μία.

Σε αυτό το παράδειγμα, ο συνολικός αχρησιμοποίητος χώρος είναι 12 slot και η συνολική υπερ-κατανομή είναι 8 slot, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-7. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου (ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε) είναι 94.45% με την υπερ-κατανομή να μετράται ως σπατάλη.



Σχήμα 5-7: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο OCSA

5.7 Enhanced One Column Striping with non-increasing Area first mapping Algorithm (eOCSA)

Σε αυτό το τμήμα, γίνεται περιγραφή του δύο διαστάσεων αλγορίθμου ορθογώνιας απεικόνισης ριπών, eOCSA. Γενικά, ο eOCSA είναι παρόμοιος με τον OCSA στο ότι αρχικά για να μεγιστοποιήσει τη ρυθμαπόδοση, η κατανομή πόρων ταξινομείται σε φθίνουσα σειρά μεγέθους. Έπειτα, οι κατανομές απεικονίζονται από κάτω προς τα πάνω και δεξιά προς τα αριστερά για να επιτραπεί χώρος για τα μεταβλητά μέρη του DL-MAP (καθορίζει τη μεταχείριση των μεσοδιαστημάτων κατερχόμενης ζεύξης μεταξύ ριπών). Τρίτον, ο αλγόριθμος ευνοεί μικρότερο πλάτος για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την απεικόνιση στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Ωστόσο, ο eOCSA δε λαμβάνει υπόψη όλα τα πιθανά ζευγάρια για την απεικόνιση μιας αίτησης, αλλά αντί αυτού διαλέγει μόνο ένα ζευγάρι το οποίο θα έχει το μικρότερο πλάτος (για την κάθετη απεικόνιση) ή το μικρότερο ύψος (για την οριζόντια απεικόνιση).

Ο αλγόριθμος αποτελείται από τέσσερα στάδια ως εξής: Πρώτον, δεδομένου ενός συνόλου αιτήσεων $\{A_i\}$, γίνεται ταξινόμησή του σε φθίνουσα σειρά και επιλέγεται η μεγαλύτερη αίτηση για απεικόνιση. Το δεύτερο βήμα, κάθετη απεικόνιση, αποτελείται από την απεικόνιση αυτής της αίτησης στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Δεδομένης μιας περιοχής A_i , ο αλγόριθμος απεικονίζει το ζευγάρι πλάτους-ύψους (W_i, H_i) για τη ριπή ως εξής:

$$W_i =$$

$$H_i =$$

Εδώ, τα σύμβολα W_i υποδηλώνουν στρογγυλοποίηση προς τα πάνω, και το H_i είναι το ανώτατο διαθέσιμο ύψος του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης. Με 10 MHz Mobile WiMAX, το H_i είναι 30 υποκανάλια. Να σημειωθεί ότι αυτό εξασφαλίζει ότι η περιοχή που απαιτείται για την αίτηση είναι μικρότερη από το διαθέσιμο χώρο ($W_i * H_i \geq A_i$) και πως το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο έχει το ελάχιστο δυνατό πλάτος (ελαχιστοποιώντας τον ενεργό χρόνο και την ενέργεια του κινητού σταθμού).

Αφότου μία αίτηση έχει τοποθετηθεί στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης, υπάρχει περίπτωση να έχει μείνει κάποιος ανεκμετάλλετος χώρος πάνω από τη ριπή αυτή που μόλις κατανεμήθηκε. Στο τρίτο βήμα, πραγματοποιείται οριζόντια απεικόνιση, όπου ο αλγόριθμος eOCSA προσπαθεί να αναθέσει αυτό το χώρο στο επόμενο μεγαλύτερο στοιχείο, για παράδειγμα, τη j -οστή αίτηση, που μπορεί να τοποθετηθεί σε αυτό το χώρο. Σε αυτό το βήμα το πλάτος είναι καθορισμένο, και χρησιμοποιείται για να

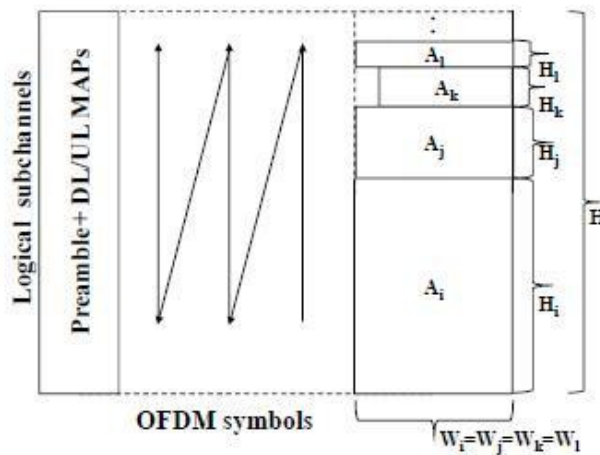
προσδιοριστεί το απαιτούμενο ύψος για το επόμενο μεγαλύτερο στοιχείο που μπορεί να τοποθετηθεί σε αυτή τη διαθέσιμη περιοχή:

Εύρεση μεγαλύτερης αίτησης A_j , τέτοια ώστε $A_j < W_i \times H_0$,

$$W_j = \lfloor A_j / H_j \rfloor$$

$$H_j = \lfloor A_j / W_j \rfloor$$

Εδώ, το $H_0 = H - H_i$ είναι το μεγαλύτερο διαθέσιμο ύψος για τον κενό χώρο πάνω από την αίτηση A_i . Αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχει άλλος χώρος κάθετα, ή δεν υπάρχουν άλλες αιτήσεις που να μπορούν να τοποθετηθούν στο διαθέσιμο χώρο. Αν δεν υπάρχουν αιτήσεις που να μπορούν να τοποθετηθούν, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο δεύτερο βήμα και επιλέγει την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση να απεικονίσει στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης. Στο Σχήμα 5-8 φαίνεται η διαδικασία με την οποία ο αλγόριθμος πρώτα κινείται κάθετα και στη συνέχεια οριζόντια, από δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω.



Σχήμα 5-8: Παράδειγμα απεικόνισης ριπών στην κατερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο eOCSA

Παρατηρείται ότι η πολυπλοκότητα στη χειρότερη περίπτωση του eOCSA είναι της τάξης του $O(n^2)$, όπου n είναι ο αριθμός των κατανομών πόρων μέσα σε ένα πλαίσιο.

$$Complexity = O(sorting) + O(allocation) = O(n \log n) + O(n^2)$$

Επιπλέον, για να επιτευχθεί υψηλότερη αξιοποίηση του πλαισίου, είτε ένα κάθετο ή οριζόντιο βήμα απεικόνισης μπορεί να προστεθεί στον eOCSA με ένα παραπάνω επίπεδο πολυπλοκότητας.

Είναι καλό να σημειωθεί ότι χωρίς να ληφθούν υπόψη επιπλέον στήλες· ο αλγόριθμος eOCSA μπορεί επίσης να μεταφέρει τις επιπλέον στήλες που χρειάζονται για το τρέχων πλαίσιο στο επόμενο πλαίσιο, προτού ξεκινήσει την απεικόνιση του επόμενου πλαισίου. Ωστόσο, αυτό μπορεί να προκαλέσει επιπλέον καθυστέρηση. Εξάλλου, χωρίς τις επιπλέον στήλες θα πρέπει να εφαρμοστεί ένας μηχανισμός προτεραιότητας. Για παράδειγμα, η κατανομή του πόρου με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα να μεταφέρεται στην αρχή της ουράς απεικόνισης ανεξάρτητα από το μέγεθος. Κάτι το οποίο όμως, μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερο αχρησιμοποίητο χώρο. [54]

5.7.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου eOCSA

Η κεντρική ιδέα είναι η αυστηρή απεικόνιση όλων των αιτήσεων σε ένα Mobile WiMAX πλαίσιο για την κάλυψη των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

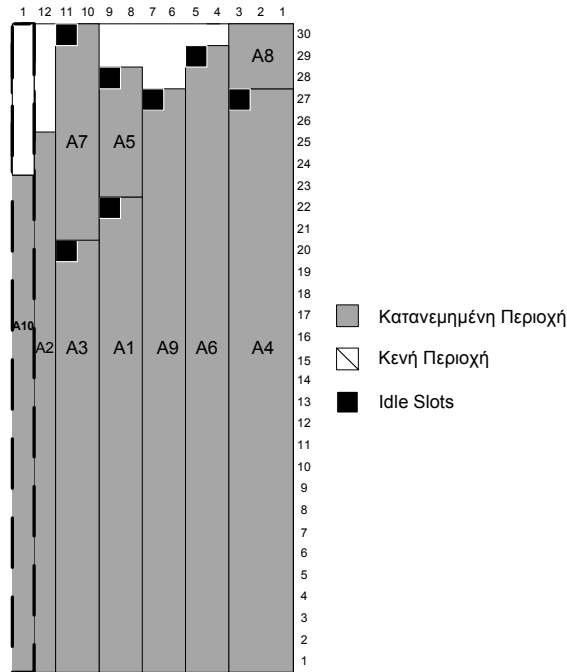
Σε αυτό το παράδειγμα, ο χρονοπρογραμματιστής κάνει μία απόφαση κατανομής για δέκα κινητούς σταθμούς (Mobile Station - MS) σε ένα υποπλαίσιο κατερχόμενης ζεύξης του Mobile WiMAX. Ο Πίνακας 5-1 δείχνει και πάλι ένα απλό παράδειγμα για δέκα κινητούς σταθμούς που έχουν επιλεγεί τυχαία. Αυτοί οι κινητοί σταθμοί έχουν χορηγηθεί ονομασίες από A1 έως A10 από τον χρονοπρογραμματιστή όπως φαίνεται στην πρώτη σειρά του πίνακα. Ουσιαστικά, το άθροισμα όλων των κατανομών πόρων είναι 360 ή 12×30 .

Αρχικά, ο αλγόριθμος κατατάσσει όλες τις κατανομές πόρων σε φθίνουσα σειρά (Βήμα 1^ο). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο Πίνακας 5-1 να μετατραπεί στον Πίνακα 5-2. Η απεικόνιση του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω. Η μεγαλύτερη αίτηση $A_4 = 80$ επιλέγεται πρώτα. Εφαρμόζοντας το βήμα 2 το αποτέλεσμα για το πλάτος είναι $\lceil 80/30 \rceil = 3$ στήλες και ύψος $\lfloor 80/3 \rfloor = 27$. Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο 3×27 έχει ως αποτέλεσμα υπέρ κατανομή του ενός slot.

Η απεικόνιση της A_4 αφήνει περιθώριο 9 slot από πάνω της, τα οποία καλύπτονται πλήρως με την αίτηση A_8 . Έτσι, αφού δεν υπάρχει πλέον αχρησιμοποίητος χώρος πάνω από την A_4 , ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2 κινούμενος οριζόντια προς τα αριστερά. Η αίτηση $A_6 = 57$ slot, η επόμενη μεγαλύτερη ριπή τοποθετείται στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης με πλάτος $\lfloor 57/30 \rfloor = 2$ στήλες και ύψος $\lfloor 57/2 \rfloor = 29$. Η ορθογώνια απεικόνιση 2×29 έχει ως αποτέλεσμα σε υπέρ κατανομή του ενός slot

και δύο κενά slot στη λωρίδα που μένει πάνω από την A6. Επειδή καμία αίτηση δεν έχει μέγεθος δύο slot, ο αλγόριθμος επιστρέφει και πάλι στο βήμα 2. Η επόμενη μεγαλύτερη κατανομή πόρου είναι η $A9 = 54$ slot, η οποία απεικονίζεται σε ορθογώνιο πλάτους $\lceil 54/30 \rceil = 2$ και ύψους $\lceil 54/2 \rceil = 27$, με ένα slot υπέρ κατανομή. Στον κενό χώρο που μένει πάνω από την A9, που είναι 6 slot, δεν υπάρχει κάποια αίτηση που να μπορεί να τοποθετηθεί. Έτσι, ο αλγόριθμος συνεχίζοντας στο βήμα 2, απεικονίζει την αίτηση $A1 = 43$ slot, σε ορθογώνιο 2×22 με υπέρ κατανομή ένα slot και κενό χώρο από πάνω 2×8 . Ο αλγόριθμος προχωράει στο βήμα 3 για να καλύψει την κενή λωρίδα 2×8 τοποθετώντας την αίτηση $A5 = 11$ slot, με ύψος $\lceil 11/2 \rceil = 6$. Η απεικόνιση της A6 έχει ως αποτέλεσμα ένα slot υπέρ κατανομή και τέσσερα αχρησιμοποίητα slot στη λωρίδα από πάνω. Μην έχοντας αίτηση που να χωράει σε αυτή τη λωρίδα ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2 και απεικονίζει την αίτηση $A3 = 39$ slot, με πλάτος $\lceil 39/30 \rceil = 2$ και ύψος $\lceil 39/2 \rceil = 20$, έχοντας υπέρ κατανομή ένα slot και αφήνοντας είκοσι slot κενής λωρίδας. Στο 3^ο βήμα και πάλι του αλγορίθμου, τοποθετείται η αίτηση $A7 = 19$ slot σε ορθογώνιο 2×10 , με αποτέλεσμα ένα slot υπέρ κατανομή, όμως δε μένει καθόλου κενός χώρος. Στην τελευταία στήλη του πλαισίου, απεικονίζεται σε ορθογώνιο διαστάσεων 1×25 η αίτηση $A2 = 25$ slot. Σε αυτήν την περίπτωση, αν και υπάρχουν 5 κενά slot, η $A10 = 23$ slot, η μόνη αίτηση που δεν έχει τοποθετηθεί στο πλαίσιο, δε χωράει σε αυτό το χώρο, και δυστυχώς ο αλγόριθμος φθάνει στο μέγιστο πλάτος του πλαισίου. Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος χρειάζεται να χρησιμοποιήσει μία επιπλέον στήλη και στη συνέχεια να απεικονίσει την A10 ως 1×23 . Τέλος, ο αλγόριθμος τερματίζει.

Σε αυτό το παράδειγμα, το σύνολο των slot που χάθηκαν λόγω υπέρ κατανομής είναι 7 και το σύνολο των αχρησιμοποίητων slot είναι 24, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-9. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου είναι 92.06%, με τα slot λόγω υπέρ κατανομής και τα αχρησιμοποίητα slot να μετρώνε ως σπατάλη.



Σχήμα 5-9: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο eOCSA

5.8 Adaptive Mapping Scheme (ADAMAS)

Ο αλγόριθμος ADAMAS εισάγει την έννοια του ορίζοντα, σχηματίζοντας τη βάση για τις επικείμενες αιτήσεις. Αρχικά, ορίζοντες δημιουργούνται με το να εξυπηρετούνται μεγάλες αιτήσεις, αφήνοντας ελάχιστο εναπομείναντα αδρανή χώρο. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται, ορίζοντας κατάλληλες διαστάσεις για τις δισδιάστατες ορθογώνιες αιτήσεις, από δεξιά προς τα αριστερά και κάτω προς τα πάνω. Συνεχίζοντας στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου, οι υπόλοιπες αιτήσεις απεικονίζονται με βάση τους ορίζοντες που καθορίστηκαν στο πρώτο βήμα. Χρησιμοποιώντας την έννοια του ορίζοντα, η προσφορά είναι διττή: πρώτον, η πολυπλοκότητα της όλης διαδικασίας μειώνεται, λόγω του ότι οι αιτήσεις που απομένουν ακολουθούν προκαθορισμένα πλαίσια, λαμβάνοντας συγκεκριμένο πλάτος με βάση τον επιλεγμένο ορίζοντα και δεύτερον, οι διαστάσεις του χώρου που θα καταλάβει η κάθε αίτηση, επιλέγονται με βάση τον αχρησιμοποίητο χώρο, που δημιουργείται όταν η αίτηση κατανέμεται.

Το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου ονομάζεται Ορισμός του Ορίζοντα (Horizon Definition), στα πλαίσια του οποίου γίνεται ταξινόμηση των αιτήσεων σε φθίνουσα σειρά και δημιουργούνται ορίζοντες με το να εξυπηρετούνται οι μεγαλύτερες αιτήσεις. Η διαδικασία της ταξινόμησης, στοχεύει στο να παρέχει την ευκαιρία στις μεγάλες αιτήσεις να εξυπηρετηθούν νωρίτερα από τις μικρότερες, μειώνοντας έτσι, των αριθμό αιτήσεων που αποτυγχάνουν να κατανεμηθούν. Για κάθε αίτηση, ο διαθέσιμος χώρος στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης εξετάζεται και ο αλγόριθμος επιχειρεί να κατανείμει

την αίτηση σε ορθογώνιο σχήμα, σε συμφωνία με τους πρότυπους περιορισμούς. Οι πρώτες αιτήσεις που κατανέμονται δημιουργούν οριζόντες, έχοντας συγκεκριμένες διαστάσεις και θέσεις στο υποπλαίσιο.

Ένα κρίσιμο σημείο στην πρώτη φάση του ADAMAS, είναι η επιλογή των κατάλληλων διαστάσεων της ορθογώνιας περιοχής για κάθε αίτηση. Ο αλγόριθμος επιλέγει τις κατάλληλες διαστάσεις του ορθογωνίου, προτού αρχίσει τη διαδικασία εξυπηρέτησης των αιτήσεων με βάση τα slot που χαραμίζονται (idle slots) με κάθε αίτηση. Προκειμένου να μετρηθεί ο χώρος που χαραμίζεται για κάθε κατανομή, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την εξίσωση
$$\left\lfloor \frac{W}{A_{width}} \right\rfloor$$
, με

A_{width} το πλάτος. Η εξίσωση επιδιώκει να βρει το κατάλληλο ορθογώνιο πλάτος, A_{width} , έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει τα υπόλοιπα μη χρησιμοποιούμενα slot. Το $\left\lfloor \frac{W}{A_{width}} \right\rfloor$ υποδηλώνει τον αριθμό των slot της αίτησης και το W και H , το πλάτος και το ύψος αντίστοιχα του υποπλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης. Έχοντας εντοπίσει το κατάλληλο πλάτος, ο αλγόριθμος υπολογίζει το ορθογώνιο ύψος $A_{height} = \left\lfloor \frac{H}{\left\lfloor \frac{W}{A_{width}} \right\rfloor} \right\rfloor$, και καθορίζει τη θέση της αίτησης στο υποπλαίσιο βρίσκοντας τις συντεταγμένες της πάνω αριστερά γωνίας του ορθογωνίου, $A_x = W - A_{width}$, $A_y = H - A_{height}$. Οι διαστάσεις του οριζοντα που σχηματίζεται είναι $HZ_{height} = H - A_{height}$, για το ύψος, και $HZ_{width} = A_{width}$, για το πλάτος. Η ακριβής τοποθεσία του κάθε οριζοντα εντοπίζεται, υπολογίζοντας τις συντεταγμένες του πάνω αριστερά σημείου ως εξής, $HZ_x = W - A_{width}$ και $HZ_y = H - A_{height}$. Η πρώτη φάση του αλγορίθμου τελειώνει όταν, είτε οι αιτήσεις που περιμένουν δε χωράνε στο υπόλοιπο υποπλαίσιο ή όλες οι αιτήσεις έχουν κατανεμηθεί. [50]

Στη δεύτερη φάση του αλγορίθμου, που ονομάζεται Επιλογή Οριζοντα (Horizon Selection), ο αλγόριθμος επιχειρεί να κατανείμει τις υπόλοιπες αιτήσεις που δεν έχουν εξυπηρετηθεί, στους ήδη σχηματισμένους οριζόντες. Συγκεκριμένα, ο ADAMAS καθορίζει το σύνολο των υπολειπόμενων αιτήσεων και ακολούθως επιχειρεί να τις εξυπηρετήσει, εξετάζοντας τη μεγαλύτερη αίτηση κάθε φορά. Προκειμένου να ολοκληρώσει αυτή τη διαδικασία αποτελεσματικά, ο πιο κατάλληλος οριζοντας με βάση τα περισσευούμενα slot που χαραμίζονται (idle slots), προσδιορίζεται και επιλέγεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$\left\lfloor \frac{W - A_{width}}{A_{width}} \right\rfloor$$
, όπου A_{width} είναι ο οριζοντας που θα επιλεχθεί. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει το πλάτος $A_{width} = \left\lfloor \frac{W - A_{width}}{\left\lfloor \frac{W - A_{width}}{A_{width}} \right\rfloor} \right\rfloor$, και το ύψος $A_{height} = \left\lfloor \frac{H - A_{height}}{\left\lfloor \frac{W - A_{width}}{A_{width}} \right\rfloor} \right\rfloor$ της αίτησης. Έπειτα, οι διαστάσεις του επιλεγμένου οριζοντα (A_{width} και A_{height}) ενημερώνονται με βάση τις διαστάσεις της αίτησης που θα κατανεμηθεί, $A_{width} = A_{width} + A_{width}$ και $A_{height} = A_{height} + A_{height}$, για το ύψος και το πλάτος παραμένει το ίδιο. Στην

περίπτωση όπου οι αιτήσεις που απομένουν δε χωράνε σε κανένα οριζόντα, ο αλγόριθμος περνάει στη φάση της ενοποίησης οριζόντων. Οι διαθέσιμοι οριζόντες ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά με βάση την περιοχή τους. Ο ενοποιημένος οριζόντας (unified horizon) πραγματοποιείται προσθέτοντας έναν έναν τους οριζόντες, έως ότου είτε οι διαθέσιμοι οριζόντες να εξαντληθούν (με αποτέλεσμα η τρέχουσα αίτηση να μην μπορεί να εξυπηρετηθεί), ή ο ενοποιημένος οριζόντας είναι αρκετά μεγάλος ώστε να χωρέσει την τρέχουσα αίτηση. Για τη δεύτερη περίπτωση, όπου η αίτηση απεικονίζεται στον ενοποιημένο οριζόντα, καθορίζονται το ύψος $A_{height} = \lceil \text{————} \rceil$ και το πλάτος $A_{width} =$

της αίτησης. Την ίδια στιγμή, ο ενοποιημένος οριζόντας αλλάζει σε ένα νέο οριζόντα, με διαστάσεις για το ύψος και το πλάτος UHZ_{width} παραμένει το ίδιο. Αντιθέτως, σε περίπτωση που η τρέχουσα αίτηση αποτύχει να βρει διαθέσιμο χώρο, ο αλγόριθμος χωρίζει τον ενοποιημένο οριζόντα στους αρχικούς οριζόντες που τον αποτελούσαν και η αίτηση επιστρέφει στον χρονοπρογραμματιστή. Μετά από αυτό το βήμα, ο ενοποιημένος οριζόντας διαγράφεται. Ο ADAMAS συνεχίζει με την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση, μέχρι να μην υπάρχουν άλλες αιτήσεις προς εξυπηρέτηση. [50]

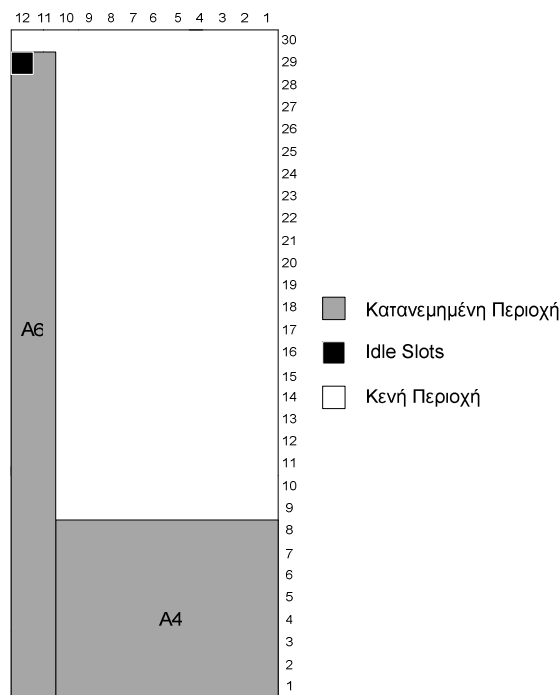
5.8.1 Παράδειγμα Αλγορίθμου ADAMAS

Σε αυτό το τμήμα παρατίθεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου ADAMAS για την καλύτερη κατανόησή του. Όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα, υπάρχουν δέκα κινητοί σταθμοί συνδεδεμένοι στο σταθμό βάσης. Στον Πίνακα 5-1 φαίνονται δέκα τυχαίες αιτήσεις προς κατανομή στο υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης, με διαστάσεις 30×12 (360 slot), όπου το ύψος είναι 30 και το πλάτος 12. Ο χρονοπρογραμματιστής ενημερώνει τον mapper για τις αιτήσεις του κάθε κινητού σταθμού.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, ο ADAMAS ταξινομεί όλες τις αιτήσεις σε φθίνουσα σειρά, όπως φαίνονται στον Πίνακα 5-2, και επιλέγει τη μεγαλύτερη, δηλαδή την A4 (80 slot). Ακολούθως, ο αλγόριθμος ορίζει το κατάλληλο πλάτος για να κατανείμει την αίτηση. Το ελάχιστο πιθανό πλάτος είναι τρία, επειδή είναι η ελάχιστη τιμή πολλαπλασιαζόμενη με το τριάντα που να μπορεί να περικλείσει την αίτηση ($3 \times 30 \geq 80$).

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο, το αποτέλεσμα για πλάτος 3 είναι ένα idle slot ($\lceil \text{—} \rceil$). Παρόμοια, για πλάτος = 4, το αποτέλεσμα είναι μηδέν idle slot όπως και για πλάτος = 5, 8 και 10. Ο ADAMAS σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου δύο ή περισσότερα πλάτη αφήνουν τον ελάχιστο αριθμό idle slot (στο παράδειγμα τα πλάτη 4, 5, 8, 10, που δεν αφήνουν idle slot), επιλέγει το μεγαλύτερο πλάτος έτσι ώστε να σχηματίσει μεγαλύτερο οριζόντα (σε

αυτή την περίπτωση το πλάτος = 10). Στη συνέχεια, το ύψος της αίτησης υπολογίζεται, $A_{height} = \lceil \frac{12}{10} \rceil = \lceil 1.2 \rceil = 2$ και η αίτηση του κινητού σταθμού κατανέμεται στο υποπλαίσιο. Η επόμενη αίτηση του ελέγχεται είναι η A6 (57 slot). Τώρα, ο αλγόριθμος εξετάζει τον κενό χώρο που μένει αριστερά της αίτησης A4. Το κατάλληλο πλάτος για είναι 3 με μηδέν idle slot, όμως μένουν μόνο δύο στήλες, έτσι αναγκαστικά το πλάτος της A6 θα είναι 2. Οπότε, το ύψος της αίτησης θα είναι $A_{height} = \lceil \frac{57}{2} \rceil = \lceil 28.5 \rceil = 29$, με ένα idle slot. Με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης, το υποπλαίσιο περιλαμβάνει δύο αιτήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-10. Ταυτόχρονα, δύο οριζόντες έχουν δημιουργηθεί, που θα οδηγήσουν τη διαδικασία απεικόνισης για τις υπόλοιπες αιτήσεις.

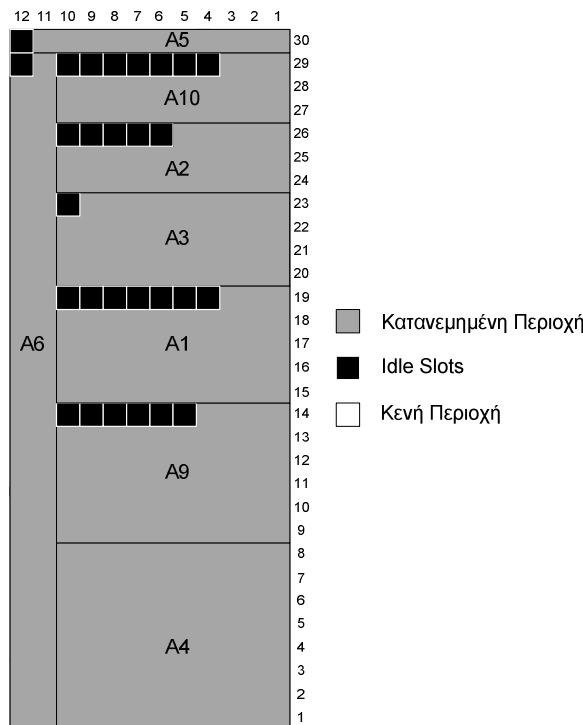


Σχήμα 5-10: Το υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης

Η δεύτερη φάση αρχίζει βρίσκοντας τον κατάλληλο οριζόντα για να εξυπηρετήσει τις αιτήσεις που απομένουν. Η επόμενη μεγαλύτερη αίτηση είναι η A9 (54 slot), η οποία μπορεί να καλυφθεί από τον οριζόντα που έχει δημιουργηθεί από την αίτηση A4. Το πλάτος της αίτησης A9 θα είναι αυτό του οριζόντα, δηλαδή, $A_{width} = 10$ και το ύψος θα είναι $A_{height} = \lceil \frac{54}{10} \rceil = \lceil 5.4 \rceil = 6$. Η κατανομή της αίτησης A9 αφήνει 6 idle slot. Παρόμοια, οι αιτήσεις A1, A3, A2 και A10 τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη στον ίδιο οριζόντα. Σε αυτό το σημείο, οι δύο οριζόντες δεν είναι ικανοί να χωρέσουν την αίτηση

A7 (19 slot). Έτσι, λαμβάνει χώρα η ενοποίηση οριζόντων. Οι οριζόντες ενώνονται και σχηματίζουν έναν ενοποιημένο ορίζοντα, με πλάτος το άθροισμα των πλατών των οριζόντων που τον αποτελούν, $UHZ_{width} = HZ_{width,1} + HZ_{width,2} = 10 + 2 = 12$. Τελικά, ακόμη και στον ενοποιημένο ορίζοντα η αίτηση A7 δεν μπορεί να τοποθετηθεί, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να κατανείμει την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση, την A5 (11 slots). Η τελική μορφή του υποπλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 5-11.

Στο παράδειγμα, ο συνολικός χώρος που χαραμίστηκε λόγω των idle slot είναι 28 slot. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου (ποσοστό του χώρου που χρησιμοποιήθηκε) είναι 92.223%.



Σχήμα 5-11: Two-dimensional downlink burst mapping χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ADAMAS

Κεφάλαιο 6^ο: Αποτίμηση σχημάτων παροχής δικαιοσύνης σε κινητά δίκτυα WiMAX με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB

6.1 Επιδόσεις σχημάτων παροχής δικαιοσύνης

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις των σχημάτων παροχής δικαιοσύνης που παρουσιάστηκαν στο 5^ο κεφάλαιο, στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Όλες οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για 20, 100, 200 και 1000 αιτήσεις. Οι αιτήσεις είναι τυχαίες και έχουν μέγεθος από 1 slot έως 360 slot. Ρεαλιστικά, το μέγεθος

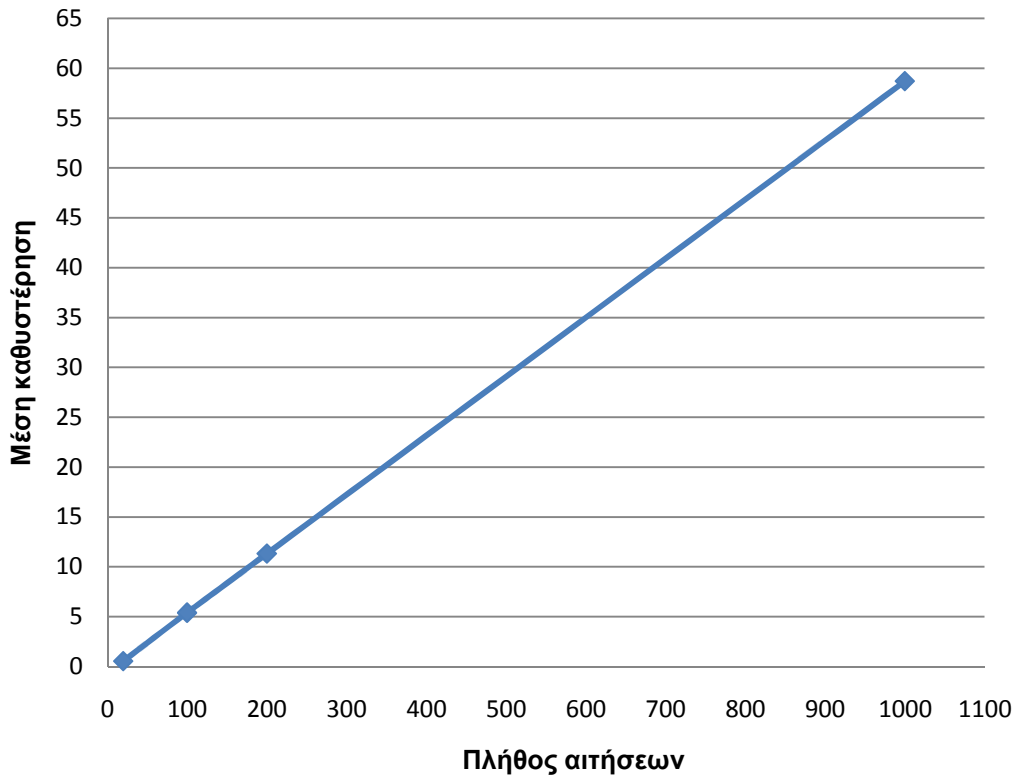
της κάθε αίτησης μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο από 360 slot αλλά δεν υπάρχουν πρακτικά μοντέλα ριπών βασισμένα σε πραγματικά δίκτυα WiMAX.

Οι μετρήσεις των επιδόσεων γίνονται με βάση τη θεωρία ουρών. Έτσι, ορίζεται ο όρος καθυστέρηση ως ο αριθμός των υποπλαισίων μία αίτηση πρέπει να περιμένει στην ουρά πριν εξυπηρετηθεί. Επίσης, ορίζεται η μέση καθυστέρηση ως η μέση τιμή του αριθμού των υποπλαισίων που μία αίτηση παραμένει στην ουρά πριν εξυπηρετηθεί. Τέλος, όπως ο όρος υπαινίσσεται, η αποδοτικότητα είναι το ποσοστό των υποπλαισίων το οποίο χρησιμοποιήθηκε.

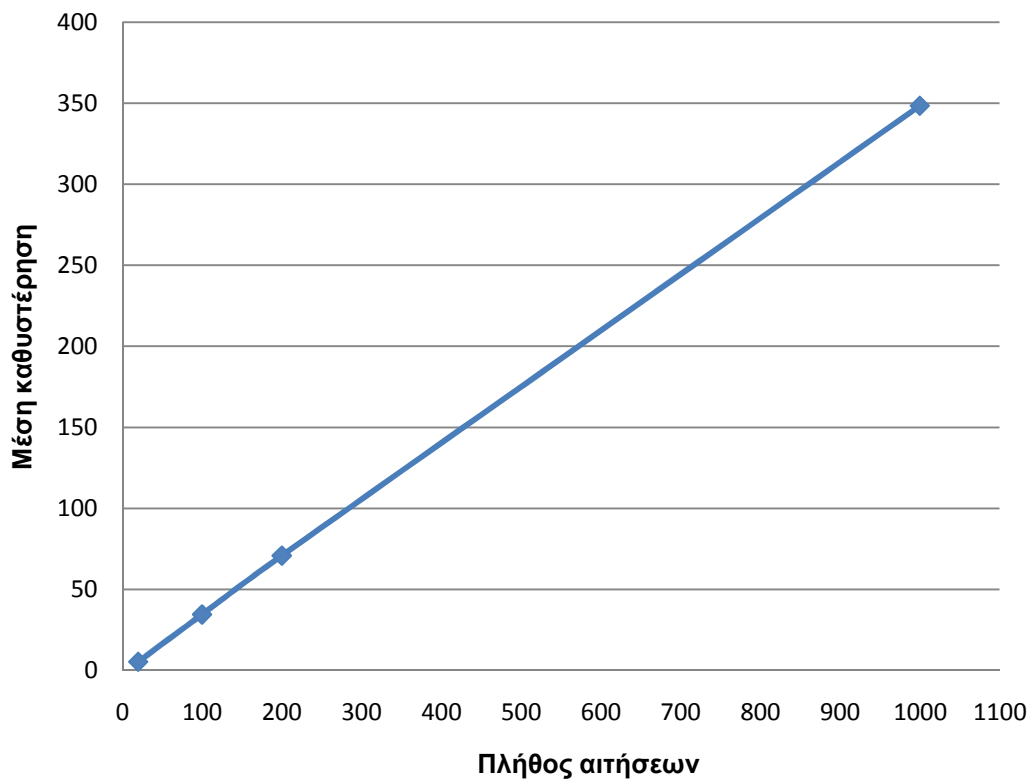
Η μέση καθυστέρηση και η αποδοτικότητα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αλγορίθμων. Στα σχεδιαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η σχέση μεταξύ της μέσης καθυστέρησης και του πλήθους των αιτήσεων, καθώς και η σχέση μεταξύ της αποδοτικότητας και του πλήθους των αιτήσεων.

6.2 Αξιολόγηση Simple Packing αλγόριθμου

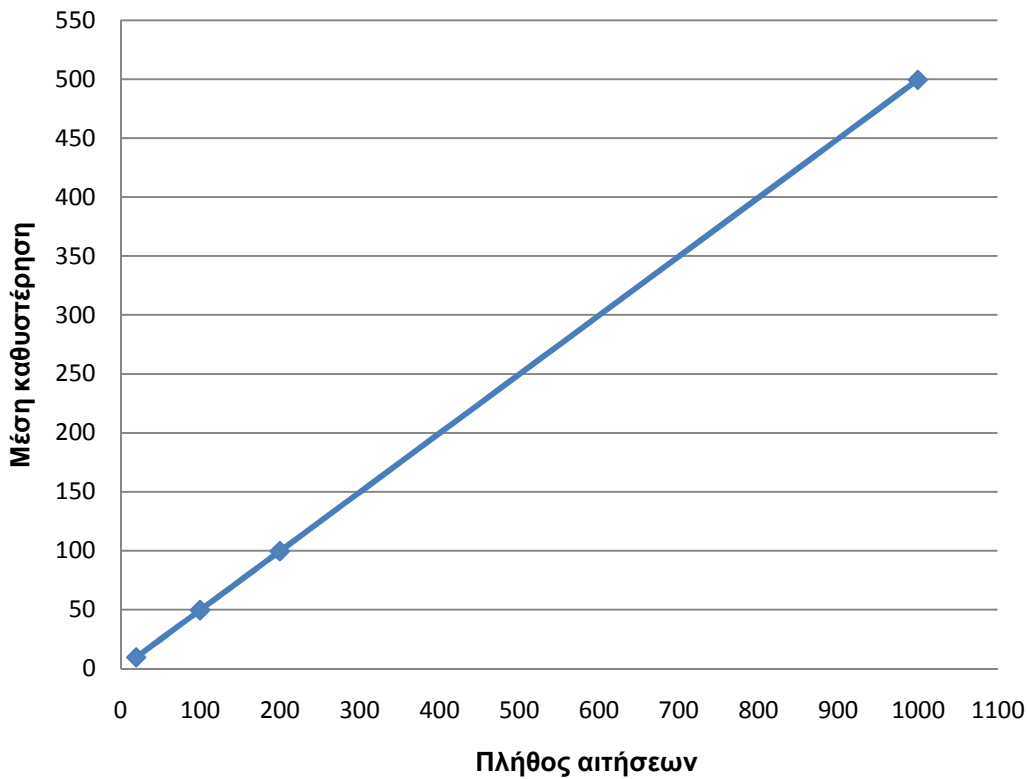
Στα Σχήματα 6-1, 6-2 και 6-3 απεικονίζονται τα σχεδιαγράμματα της σχέσης μεταξύ της μέσης καθυστέρησης και του πλήθους των αιτήσεων, με τις αιτήσεις να έχουν τυχαίο μέγεθος από 1-50 slot, 1-360 slot και 200-360 slot αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα παρατηρείται σαφώς, πως όσο αυξάνουν οι αιτήσεις τόσο αυξάνει και η μέση καθυστέρηση καθώς και ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των αιτήσεων τόσο μικρότερη είναι και η μέση καθυστέρηση. Ο simple packing αλγόριθμος λειτουργεί με ουρά προτεραιότητας FIFO οπότε είναι λογικό να αυξάνεται κατά πολύ η μέση καθυστέρηση όταν οι αιτήσεις έχουν μέγεθος από 200 έως 360 slot. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διαστάσεις του υποπλαισίου είναι $30 \times 12 = 360$ slot, που σημαίνει όταν έρχονται αιτήσεις με μέγεθος από 200 έως 360 slot, είναι αρκετά πιθανό μία αίτηση να καταλαμβάνει ένα ολόκληρο υποπλαίσιο το οποίο ανεβάζει κατά πολύ τη μέση καθυστέρηση.



Σχήμα 6-1: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον *Simple Packing* αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)

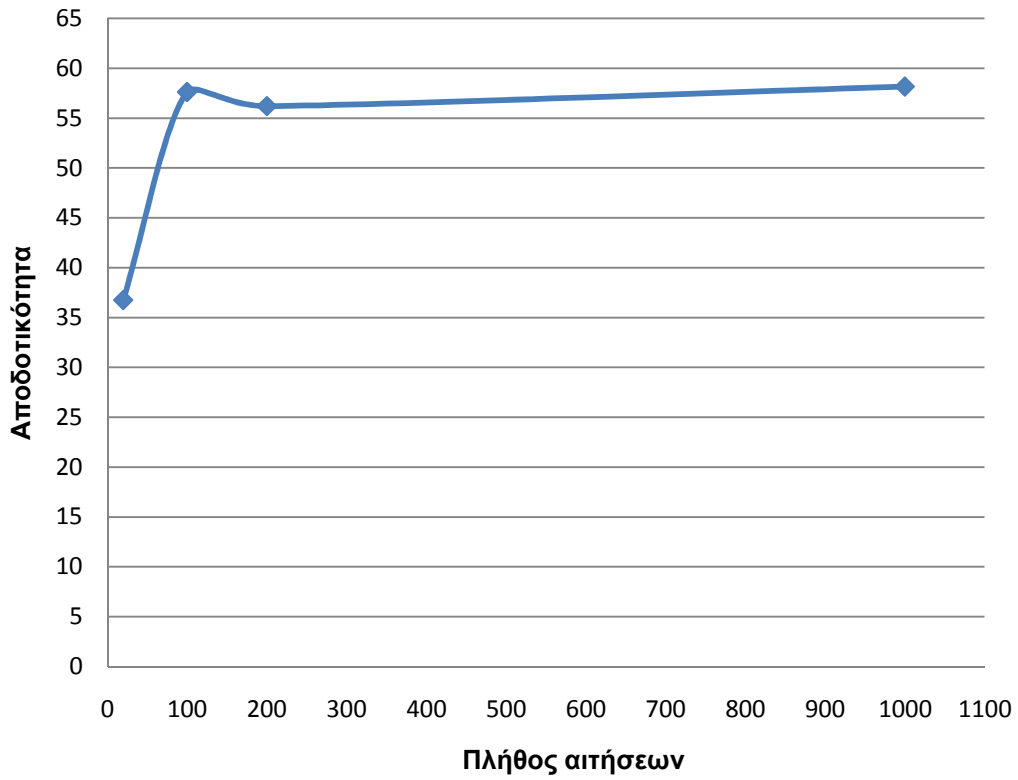


Σχήμα 6-2: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον Simple Packing αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

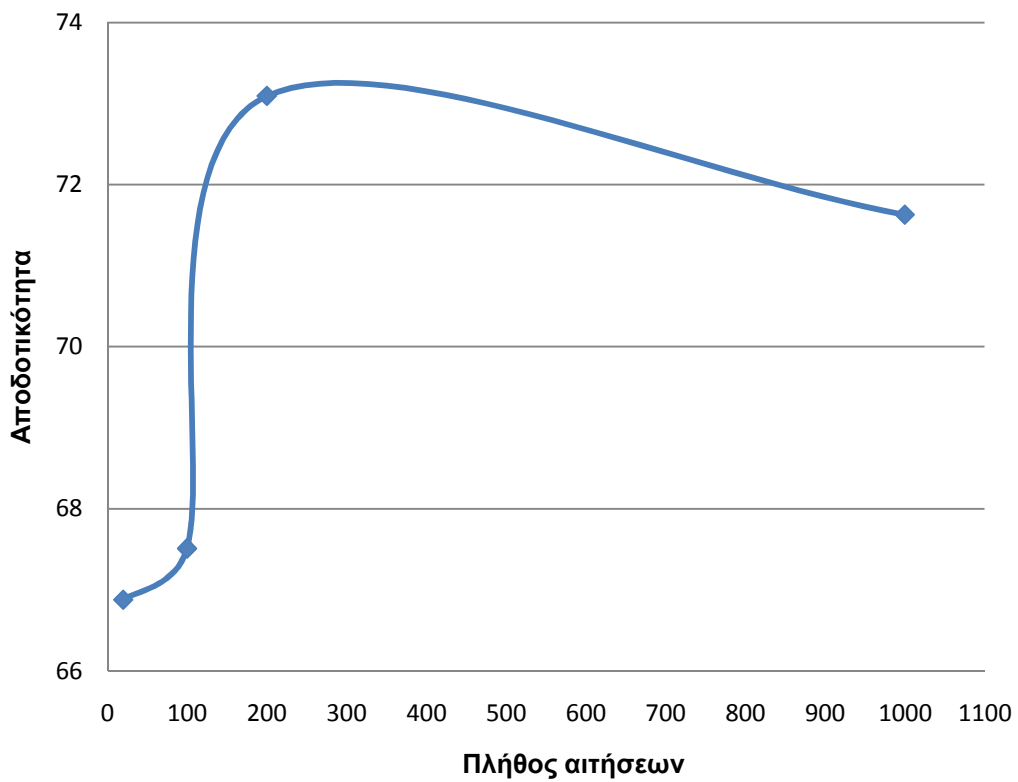


Σχήμα 6-3: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον Simple Packing αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

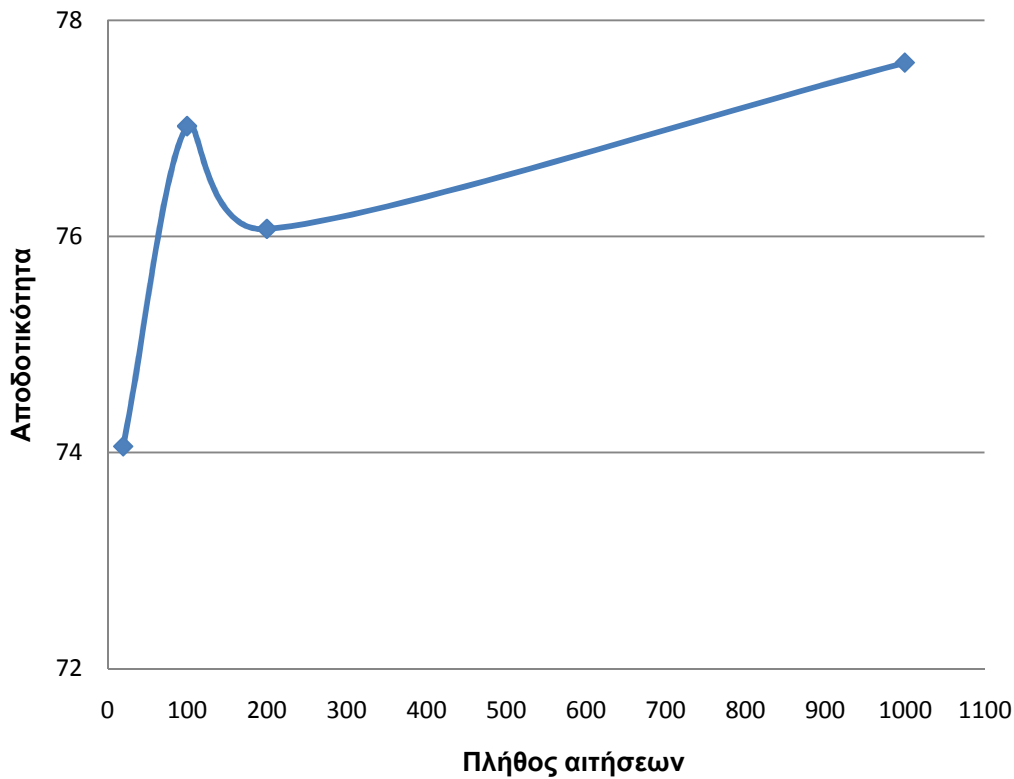
Στα Σχήματα 6-4, 6-5 και 6-6 παρουσιάζεται η σχέση αποδοτικότητας-πλήθος αιτήσεων ανάλογα με το μέγεθος των αιτήσεων. Λόγω της απλοϊκότητας του αλγορίθμου στον τρόπο λειτουργίας του, τα σχετικά μικρά ποσοστά αποδοτικότητας ήταν αναμενόμενα. Ο λόγος για τον οποίο οι αιτήσεις μεγαλύτερου μεγέθους (Σχήμα 6-6), έχουν αποδοτικότητα μεγαλύτερη από την αποδοτικότητα όταν οι αιτήσεις είναι μικρότερου μεγέθους (Σχήμα 6-4), έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί την προτεραιότητα ουράς FIFO καθώς και τα padding για τη δημιουργία ορθογωνίων. Όταν οι αιτήσεις έχουν μέγεθος από 200 έως 360, έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να καλύψουν ένα υποπλαίσιο με μικρές περιοχές να παραμένουν ακάλυπτες, ενώ όταν οι αιτήσεις είναι μικρού μεγέθους λόγω και του padding σπαταλούνται μεγαλύτερες περιοχές.



Σχήμα 6-4: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον Simple Packing αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)



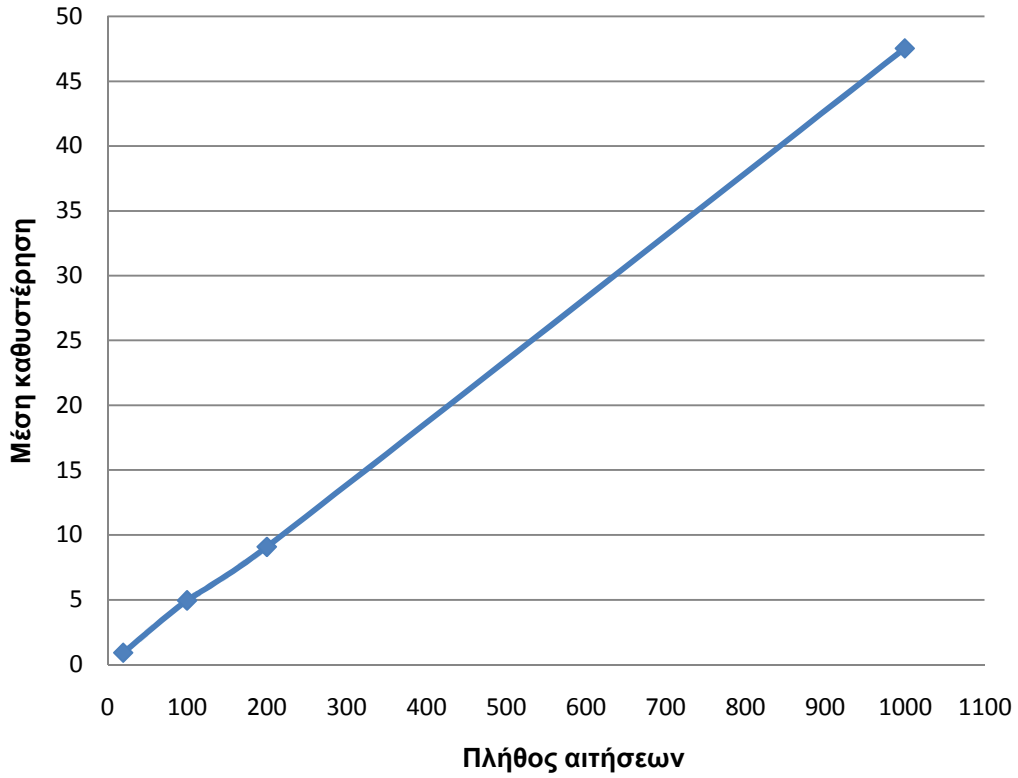
Σχήμα 6-5: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον Simple Packing αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)



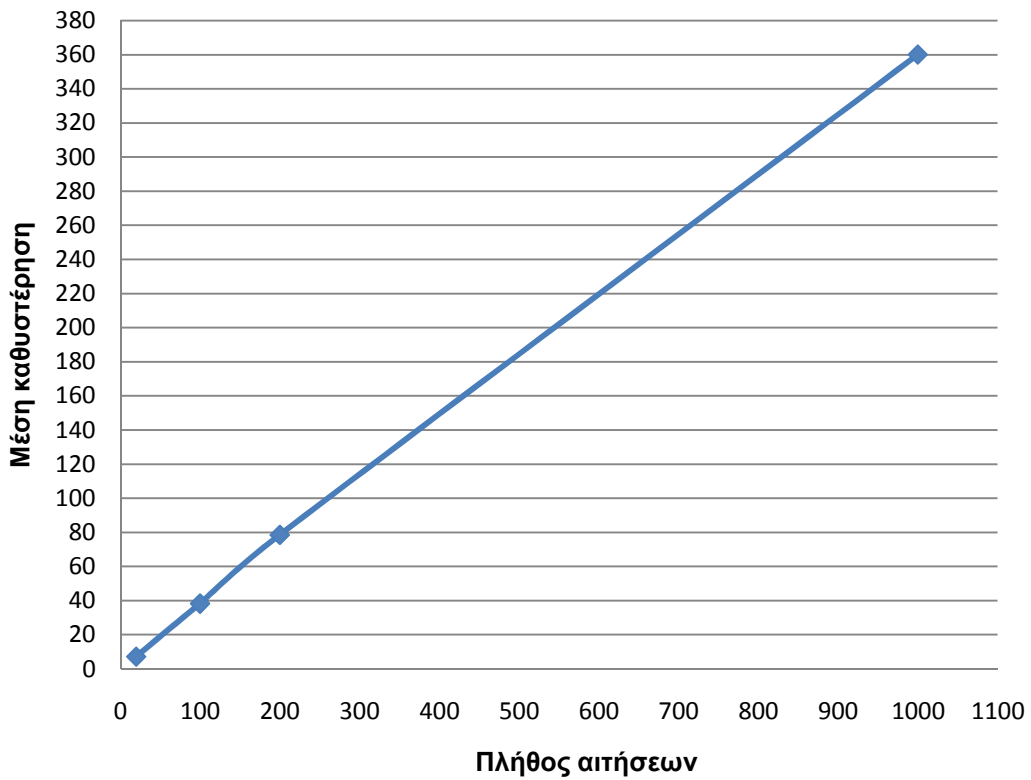
Σχήμα 6-6: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον Simple Packing αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

6.3 Αξιολόγηση First Fit Decreasing Height – FIFO αλγόριθμου (FFDH-FIFO)

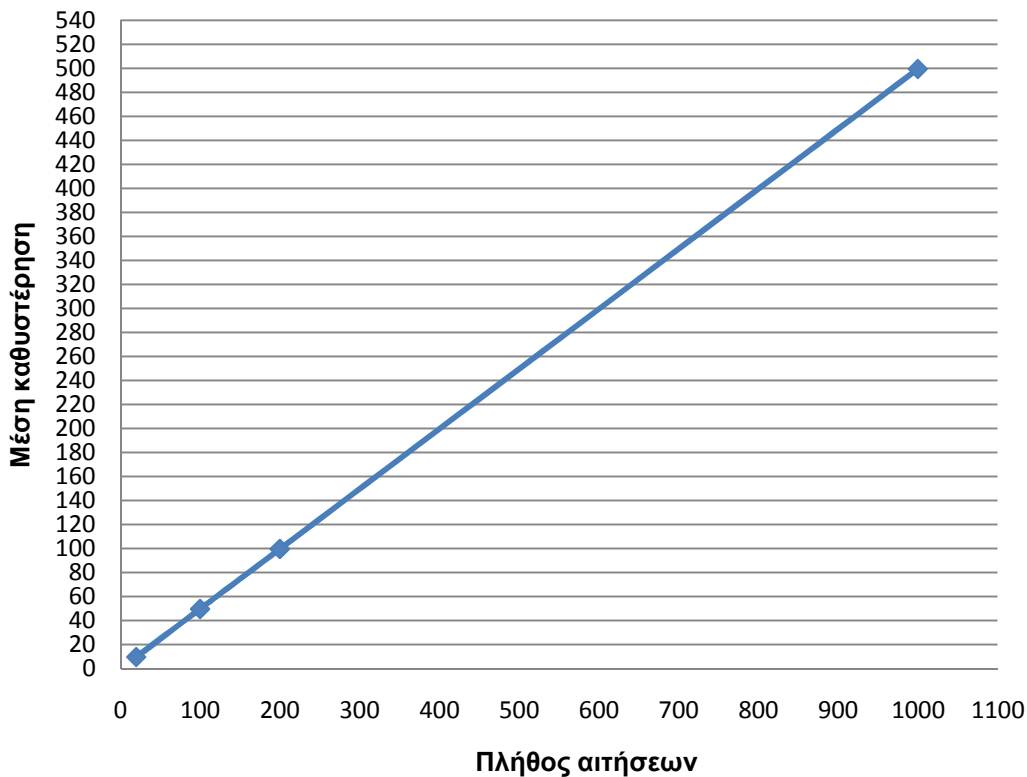
Στα Σχήματα 6-7, 6-8 και 6-9 απεικονίζεται η μέση καθυστέρηση σε σχέση με το πλήθος των αιτήσεων. Όπως είναι αναμενόμενο για όλες τις περιπτώσεις, περισσότερες αιτήσεις συνεπάγεται και μεγαλύτερη καθυστέρηση και άρα μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση. Ο FFDH-FIFO ενώ χρησιμοποιεί και αυτός FIFO σαν τον simple packing, έχει σχετικά μικρότερες τιμές μέσης καθυστέρησης λόγω των “ραφιών”, τα οποία επιτρέπουν την κατανομή αιτήσεων κάτω από άλλες αιτήσεις και άρα γρηγορότερη εξυπηρέτησή τους.



Σχήμα 6-7: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-FIFO αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)

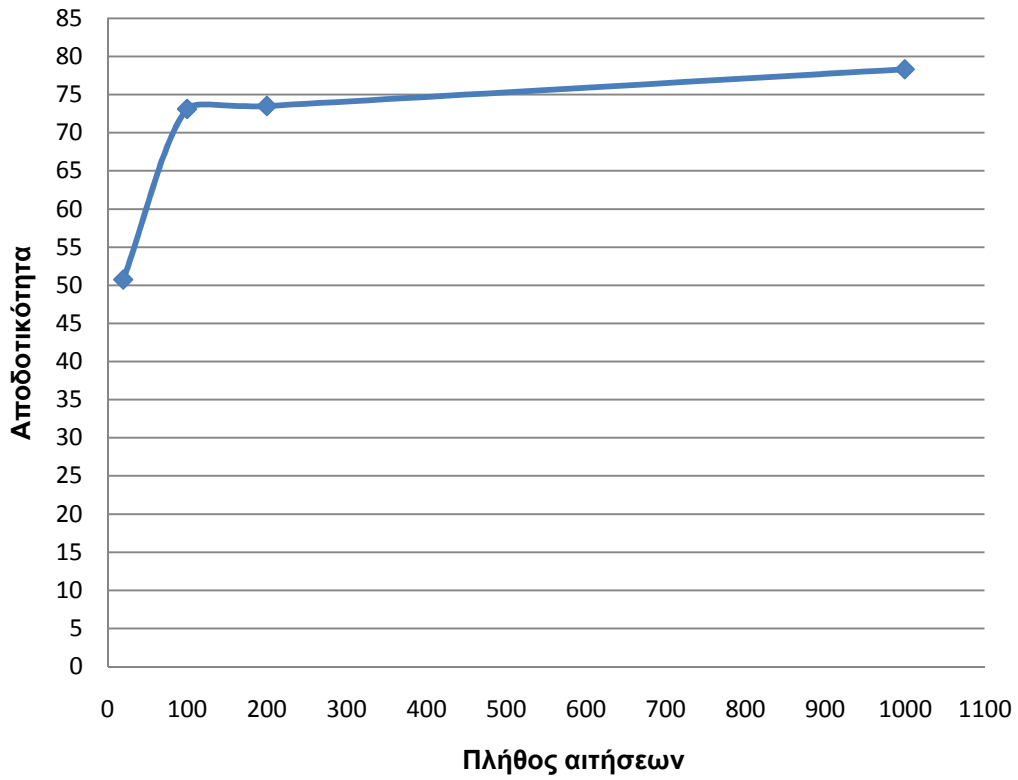


Σχήμα 6-8: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-FIFO αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

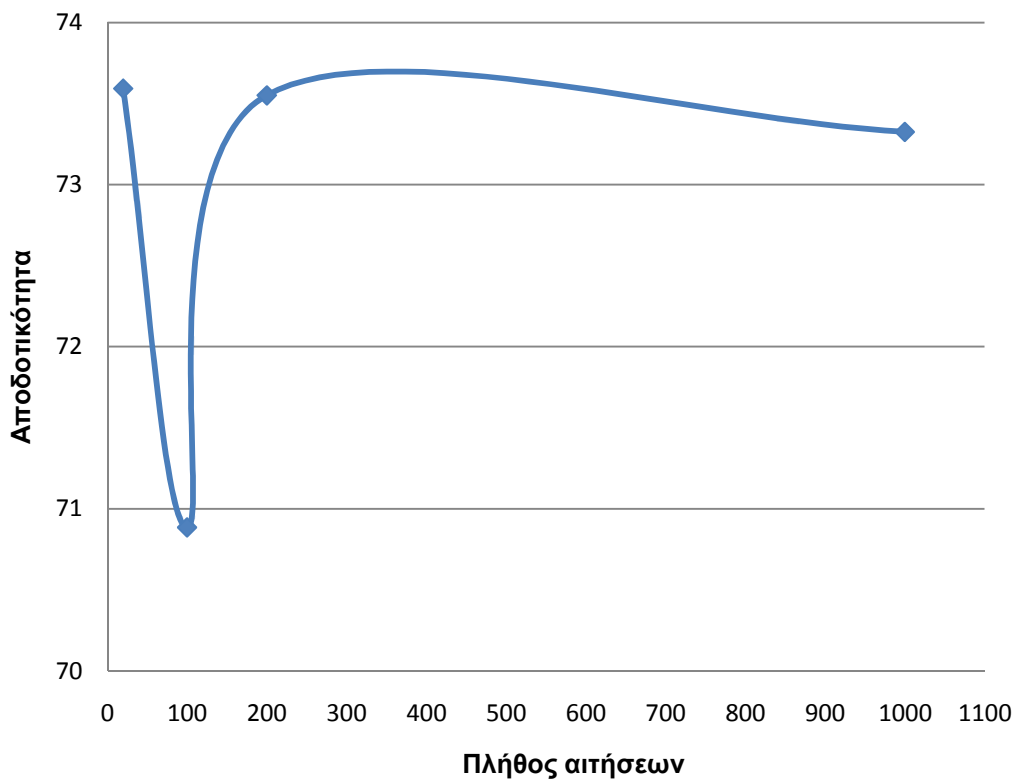


Σχήμα 6-9: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-FIFO αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

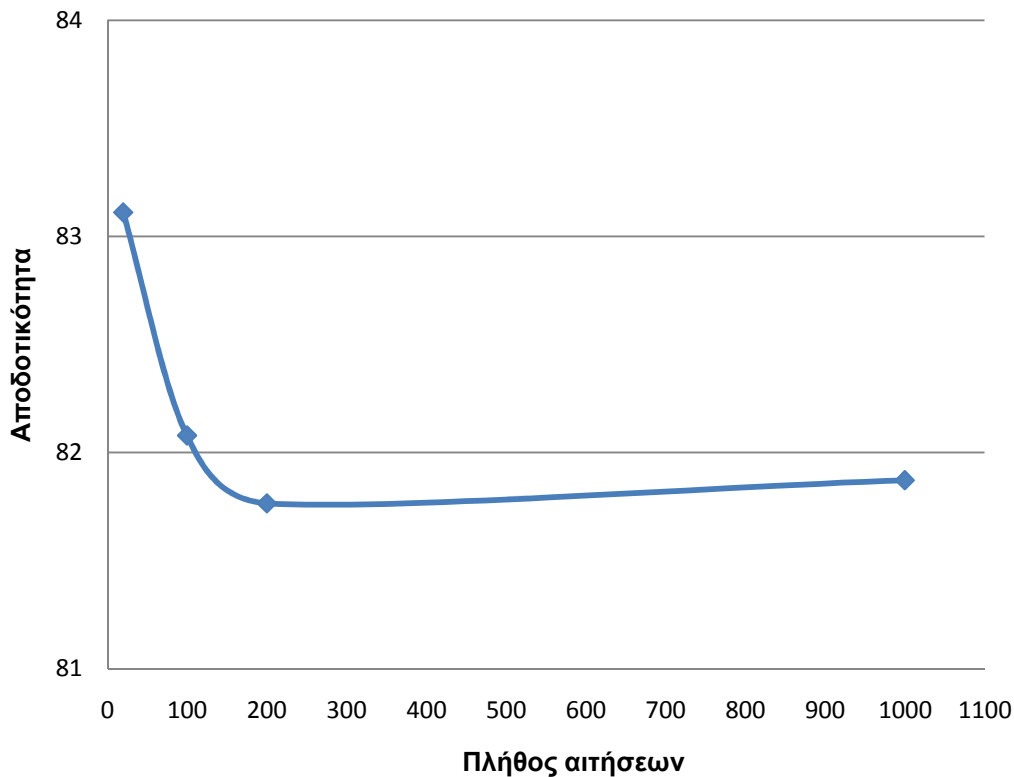
Στα Σχήματα 6-10, 6-11 και 6-12 φαίνεται η σχέση μεταξύ της αποδοτικότητας και του πλήθους των αιτήσεων για τον FFDH-FIFO. Αρχικά, παρατηρείται ότι ισχύει και σε αυτόν τον αλγόριθμο ότι ίσχυε και για τον simple packing, σε ότι αφορά τη διαφορά της αποδοτικότητας μεταξύ των διαγραμμάτων με τις μεγαλύτερες σε μέγεθος αιτήσεις και των διαγραμμάτων με τις μικρότερες σε μέγεθος αιτήσεις. Για ακόμη μια φορά αυτό συμβαίνει λόγω της επιλογής του αλγορίθμου να χρησιμοποιεί προτεραιότητα FIFO. Όμως, στον FFDH-FIFO αλγόριθμο φαίνεται η διαφορά στην εξοικονόμηση χώρου μέσω της χρήσης των ραφιών, από τη στιγμή που η αποδοτικότητα έχει αυξηθεί σε ένα βαθμό σε σχέση με τον simple packing.



Σχήμα 6-10: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-FIFO αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)



Σχήμα 6-11: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-FIFO αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

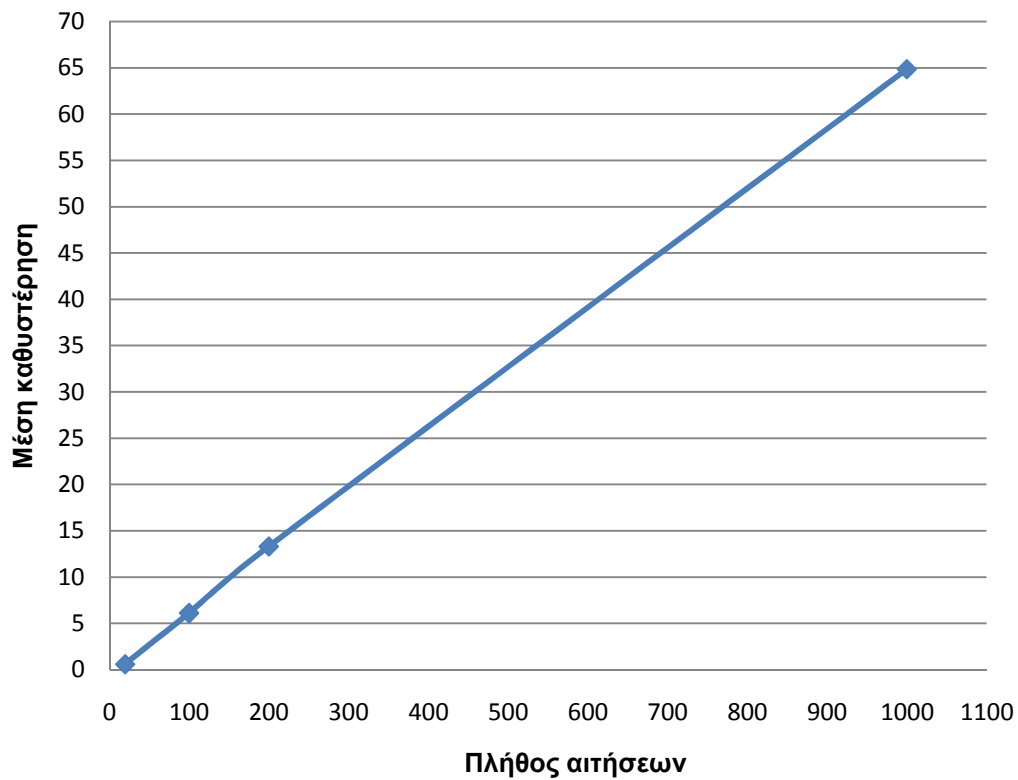


Σχήμα 6-12: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-FIFO αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

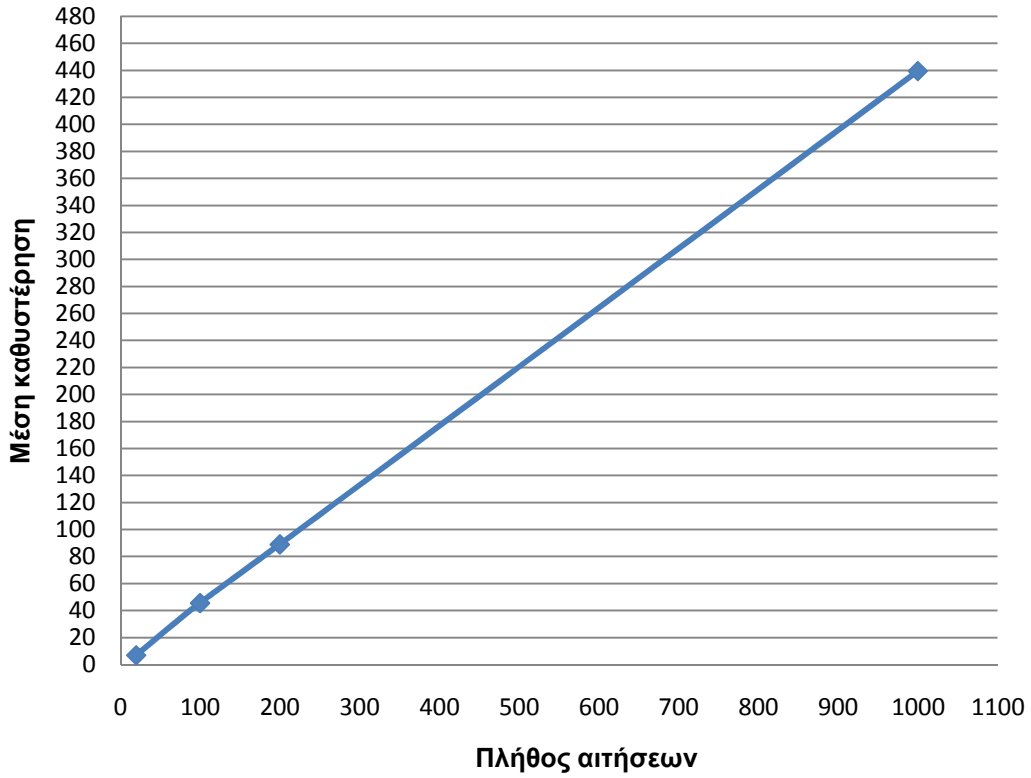
6.4 Αξιολόγηση First Fit Decreasing Height – SORTED αλγόριθμου (FFDH-SORTED)

Στα Σχήματα 6-13, 6-14 και 6-15 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της μέσης καθυστέρησης και του πλήθους των αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο. Ο FFDH-SORTED, αν και πρόκειται κατά βάση για τον ίδιο αλγόριθμο με τον FFDH-FIFO με τη μόνη διαφορά τους να είναι η φθίνουσα κατάταξη των αιτήσεων πριν την εξυπηρέτησή τους, παρουσιάζει μία μικρή αύξηση στη μέση καθυστέρηση κυρίως στις αιτήσεις με μικρότερο μέγεθος σε slot. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν οι αιτήσεις μπορούν να είναι από 1 έως 50 slots και κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά, τότε υπάρχει πιθανότητα να έρθουν αρκετές αιτήσεις που είναι κοντά στο άνω όριο για αυτήν την περίπτωση (δηλαδή κοντά στα 50 slots) και άρα θα αναγκάσουν τον αλγόριθμο να προχωρήσει προς τα δεξιά του

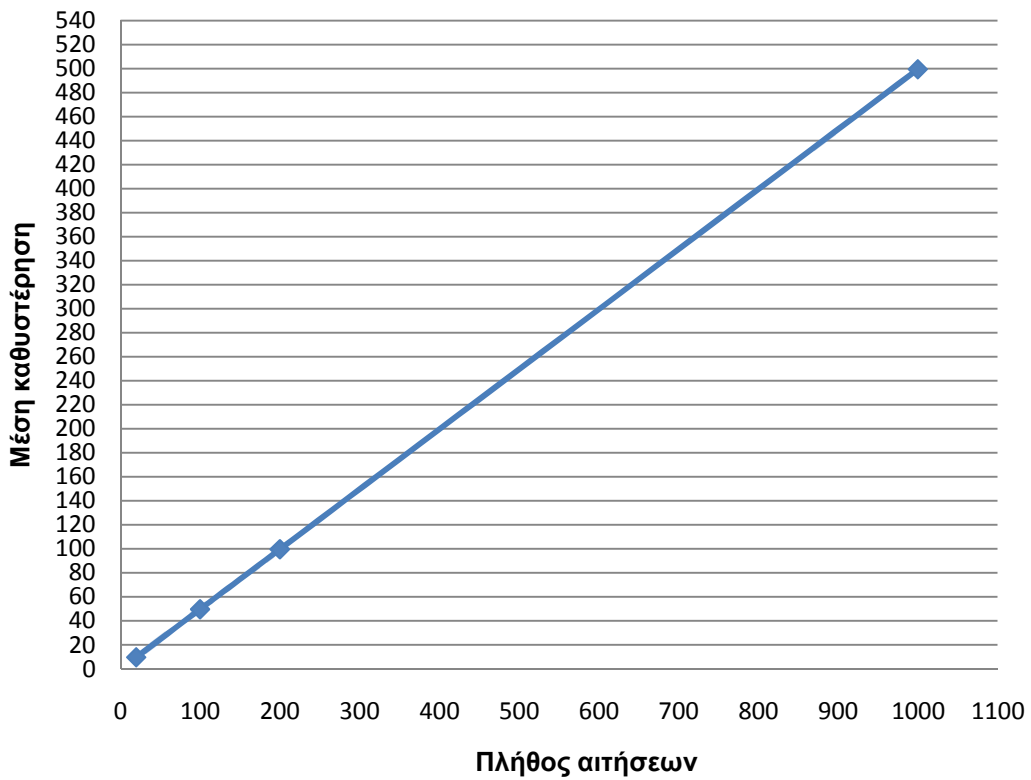
υποπλαισίου (στον άξονα του χρόνου) τοποθετώντας τις αιτήσεις σε καινούργια ράφια. Έτσι, το αποτέλεσμα είναι οι αιτήσεις να καθυστερούν.



Σχήμα 6-13: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)

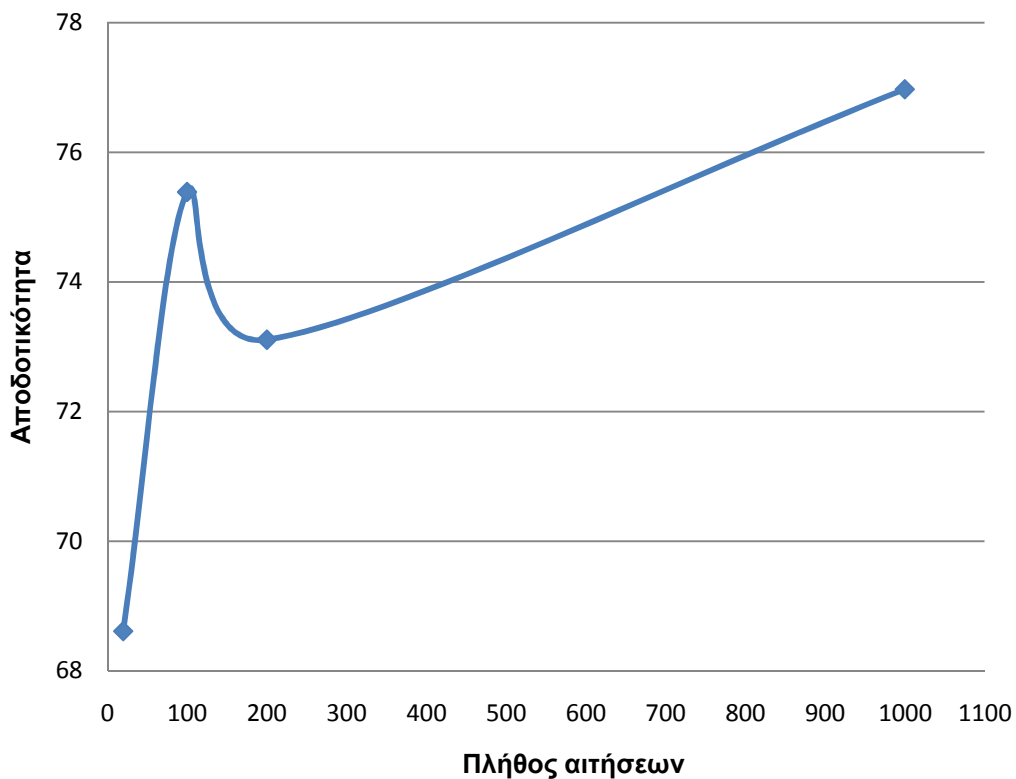


Σχήμα 6-14: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

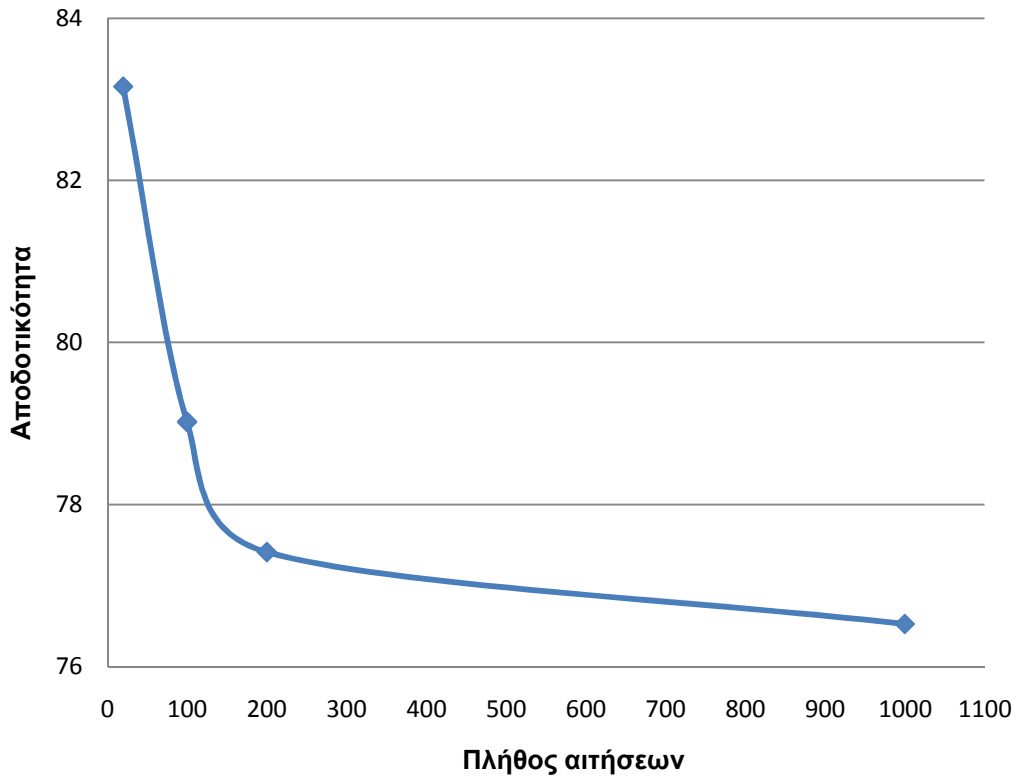


Σχήμα 6-15: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

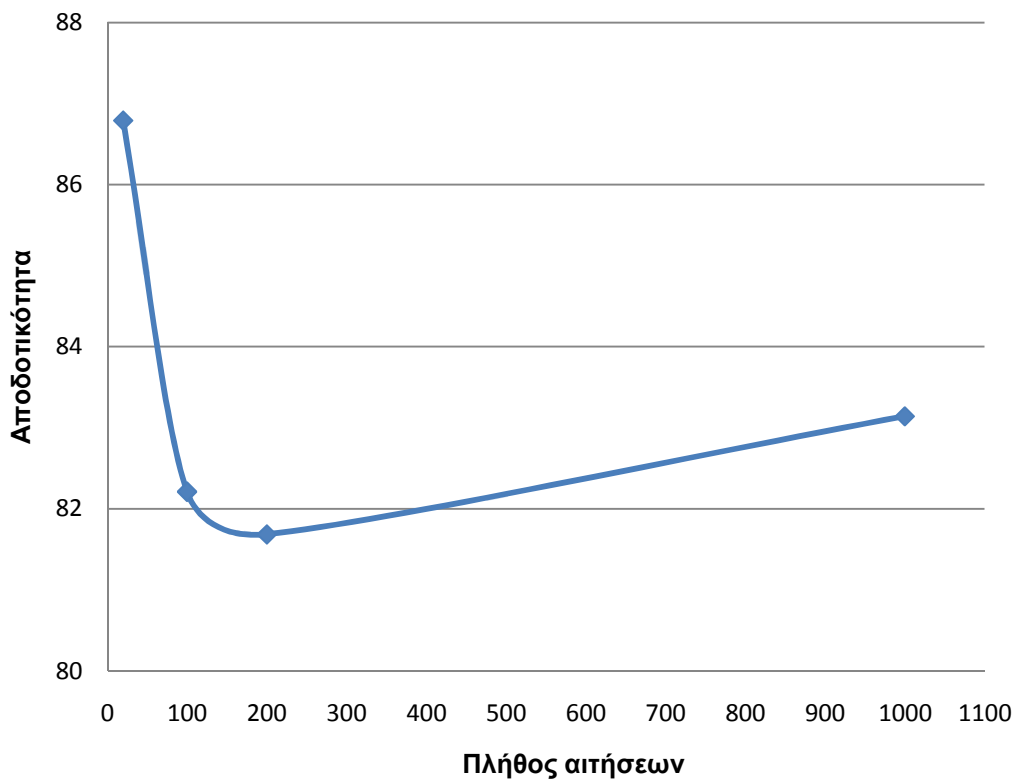
Στα Σχήματα 6-16, 6-17 και 6-18 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ της αποδοτικότητας και του πλήθους των αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο. Εμφανώς, η εκδοχή του αλγορίθμου με τη φθίνουσα ταξινόμηση προσφέρει υψηλότερη αποδοτικότητα σε σχέση με τη FIFO. Η ταξινόμηση των αιτήσεων σε φθίνουσα σειρά εξασφαλίζει καλύτερο ποσοστό κάλυψης των υποπλαισίων, επειδή πάντα η προηγούμενη αίτηση θα είναι μεγαλύτερη από την επόμενη και άρα τα ράφια γίνονται πιο αποδοτικά σε σχέση με τη FIFO εκδοχή του αλγορίθμου.



Σχήμα 6-16: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)



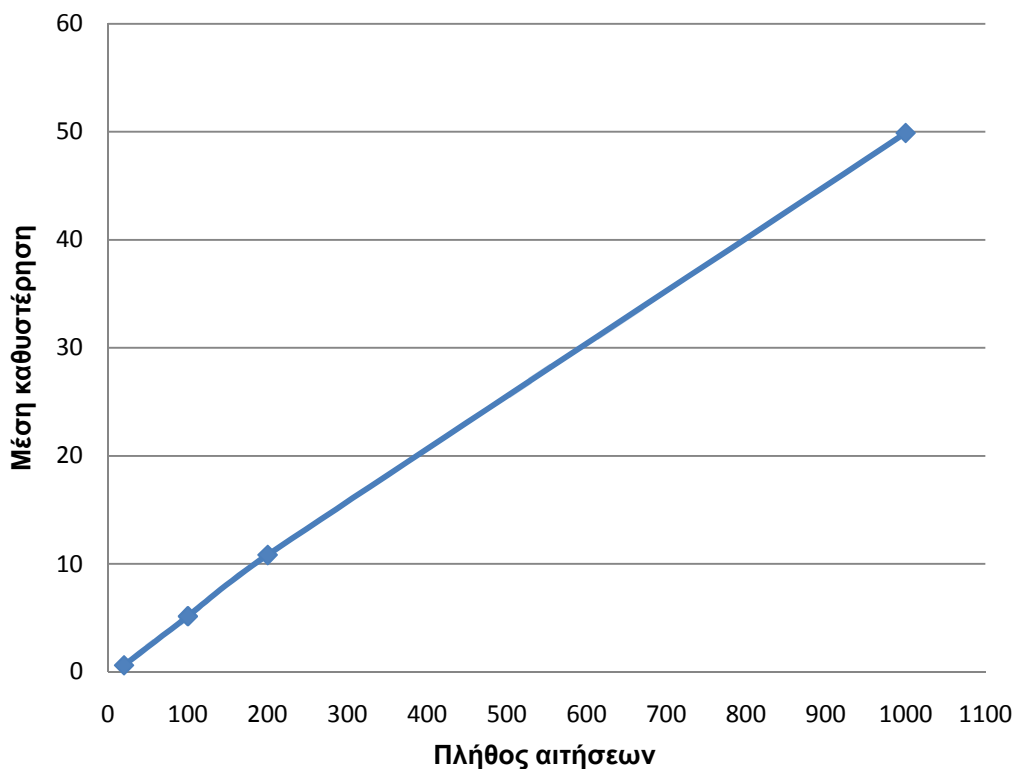
Σχήμα 6-17: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)



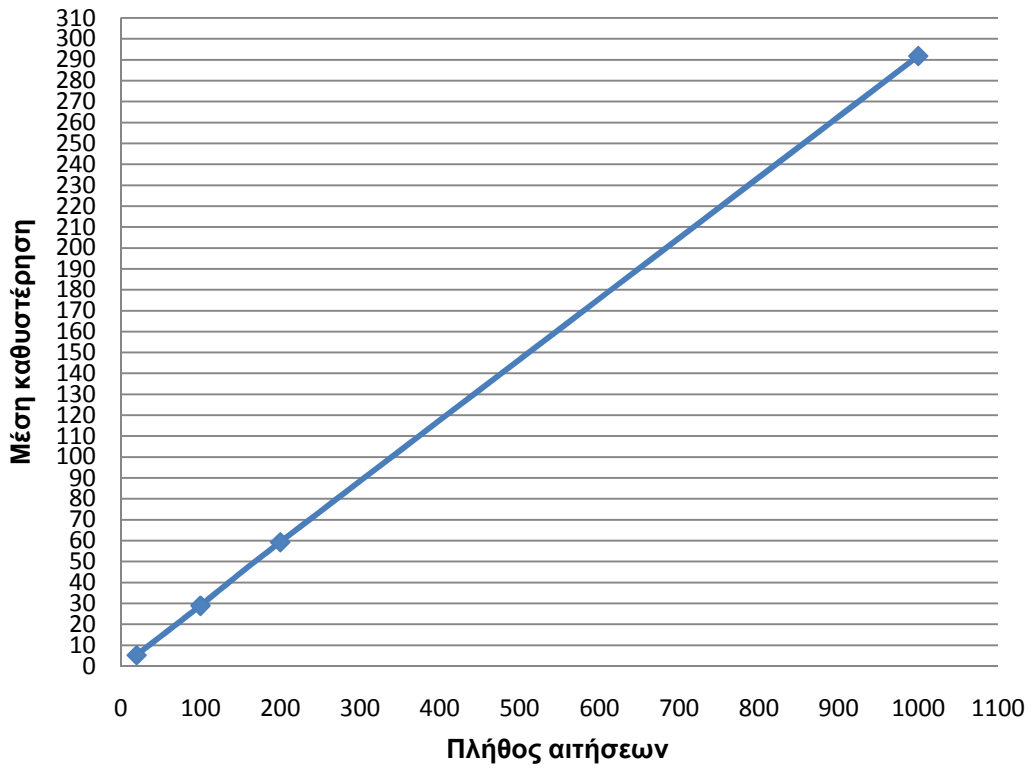
Σχήμα 6-18: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

6.5 Αξιολόγηση One Column Striping with non-increasing Area first mapping αλγόριθμου (OCSA)

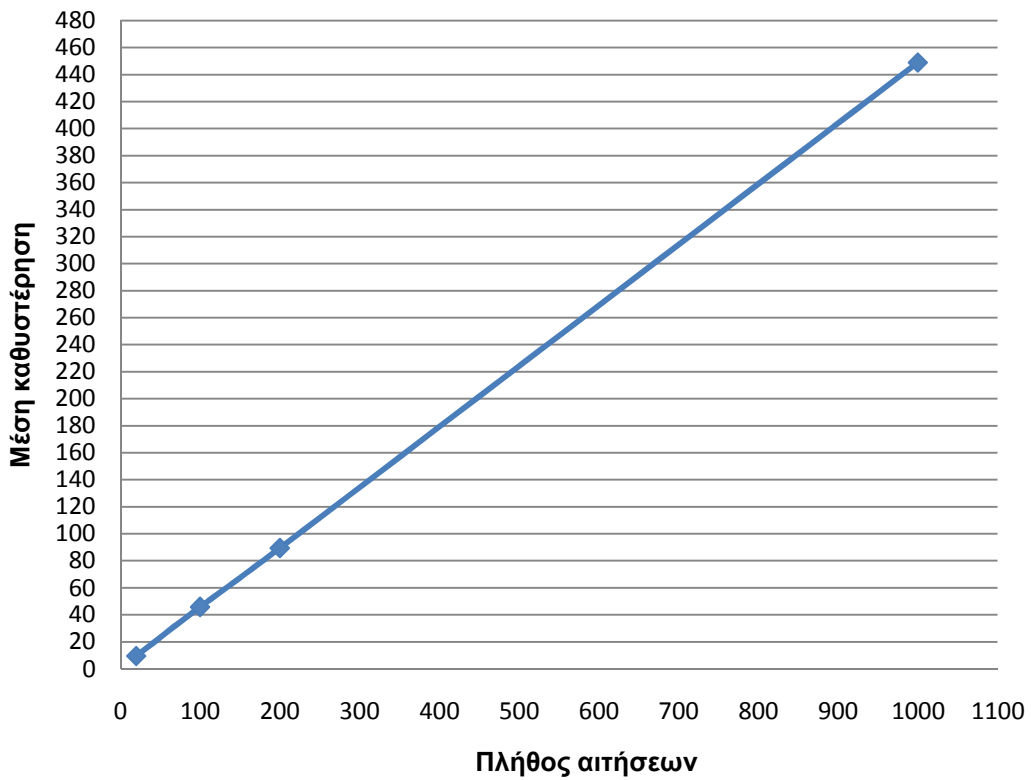
Στα Σχήματα 6-19, 6-20 και 6-21 απεικονίζονται τα διαγράμματα μέσης καθυστέρησης – πλήθους αιτήσεων για τον αλγόριθμο OCSA. Ο OCSA, έχοντας τη δυνατότητα υπολογισμού του χώρου που υπάρχει πάνω από μία αίτηση και τοποθετώντας τη μεγαλύτερη αίτηση που μπορεί να χωρέσει σε αυτόν το χώρο και όχι απαραίτητα την επόμενη στην ουρά, υπερέχει των προηγούμενων αλγορίθμων. Έτσι, ήταν αναμενόμενο να έχει μικρότερη μέση καθυστέρηση από τη στιγμή που περισσότερες αιτήσεις κατανέμονται νωρίτερα, σε χώρο που σε κάποιον από τους προηγούμενους αλγόριθμους θα έμενε ανεκμετάλλευτος.



Σχήμα 6-19: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)

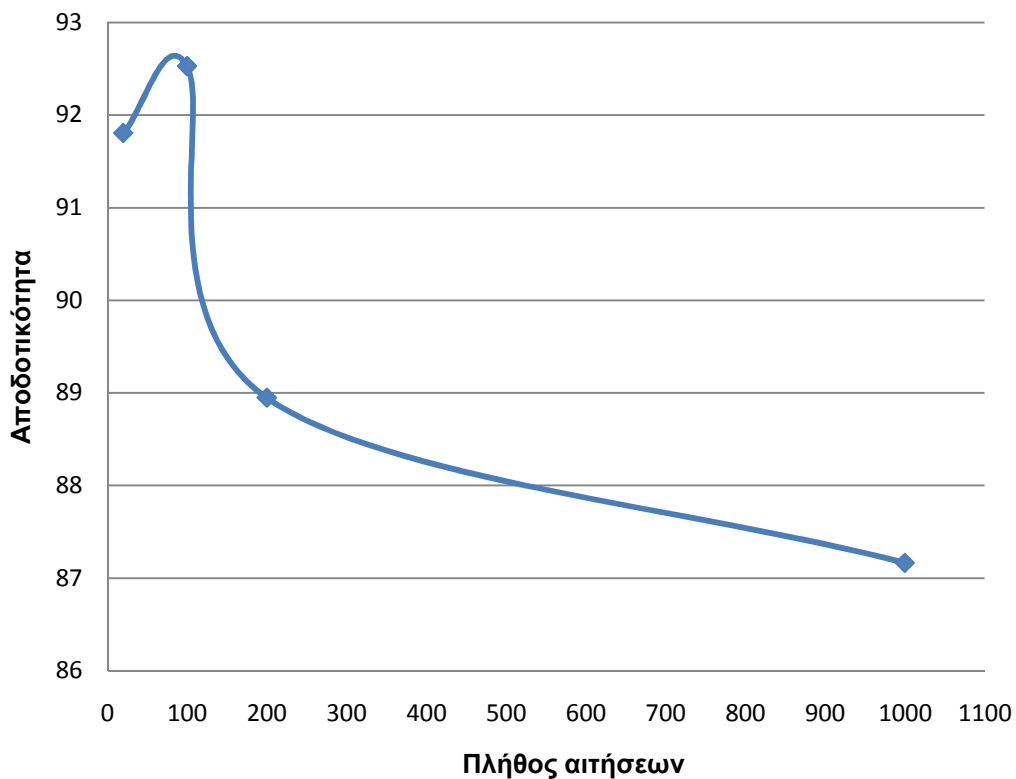


Σχήμα 6-20: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

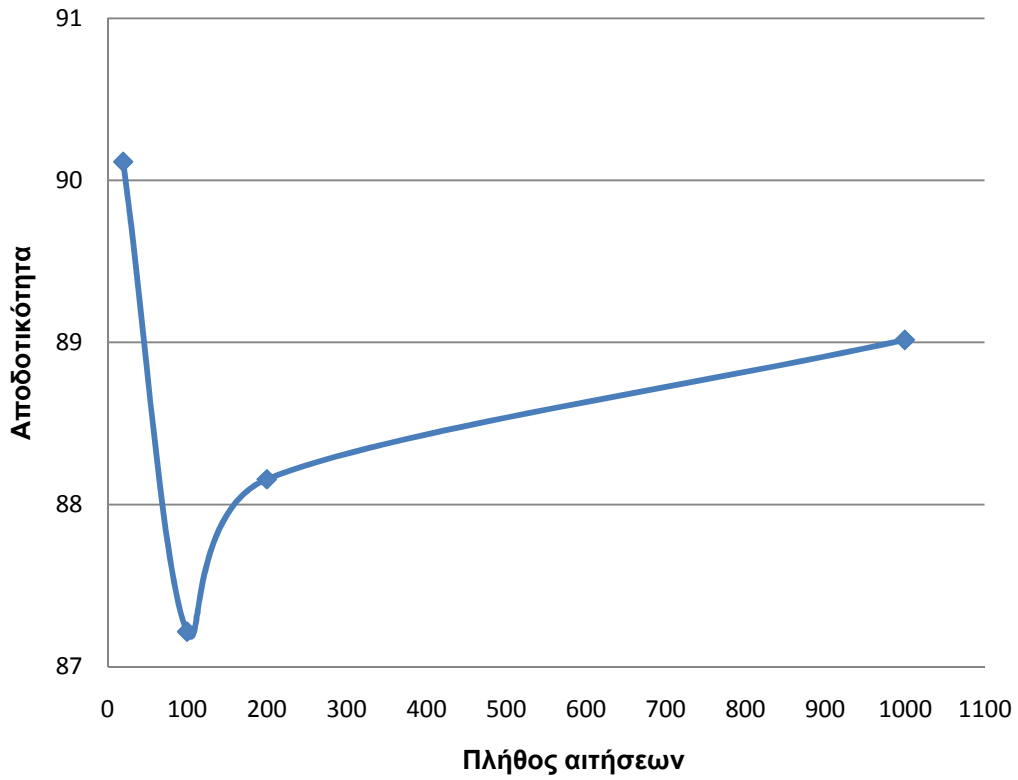


Σχήμα 6-21: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

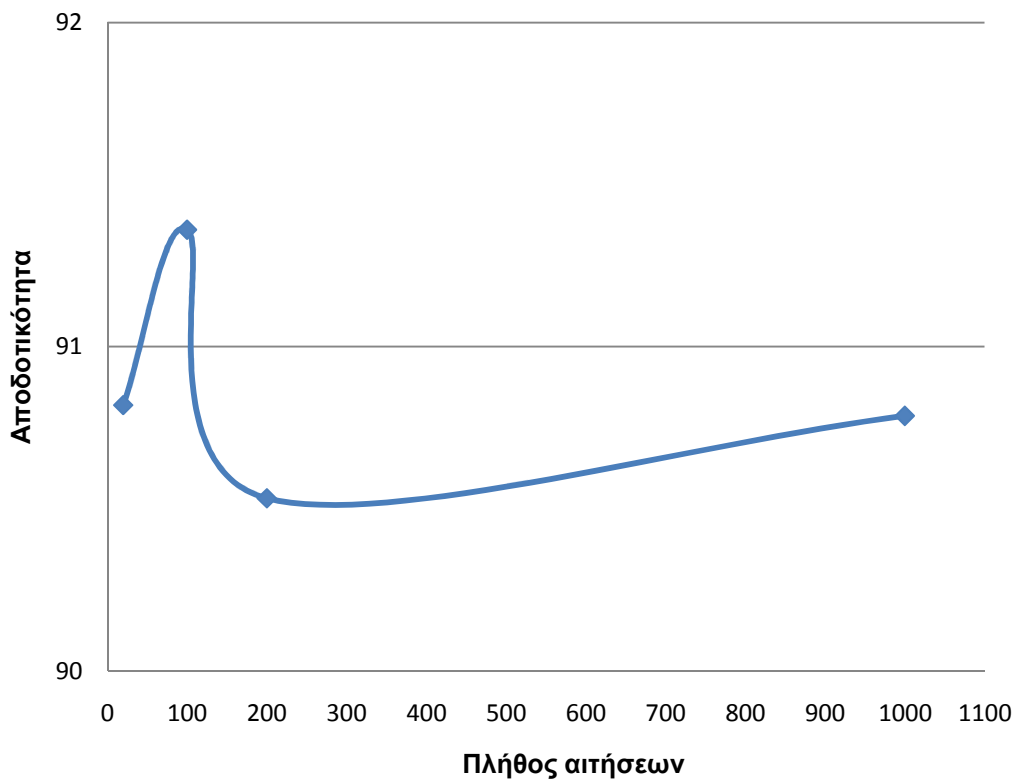
Στα Σχήματα 6-22, 6-23 και 6-24 που ακολουθούν, αναπαριστάται η σχέση μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων στον αλγόριθμο OCSA. Η αύξηση στην αποδοτικότητα σε σχέση με τους προηγούμενους αλγόριθμους είναι εμφανής και οφείλεται και πάλι στο γεγονός ότι ο OCSA μπορεί να καταναίμει περισσότερες αιτήσεις σε κάθε υποπλαίσιο.



Σχήμα 6-22: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)



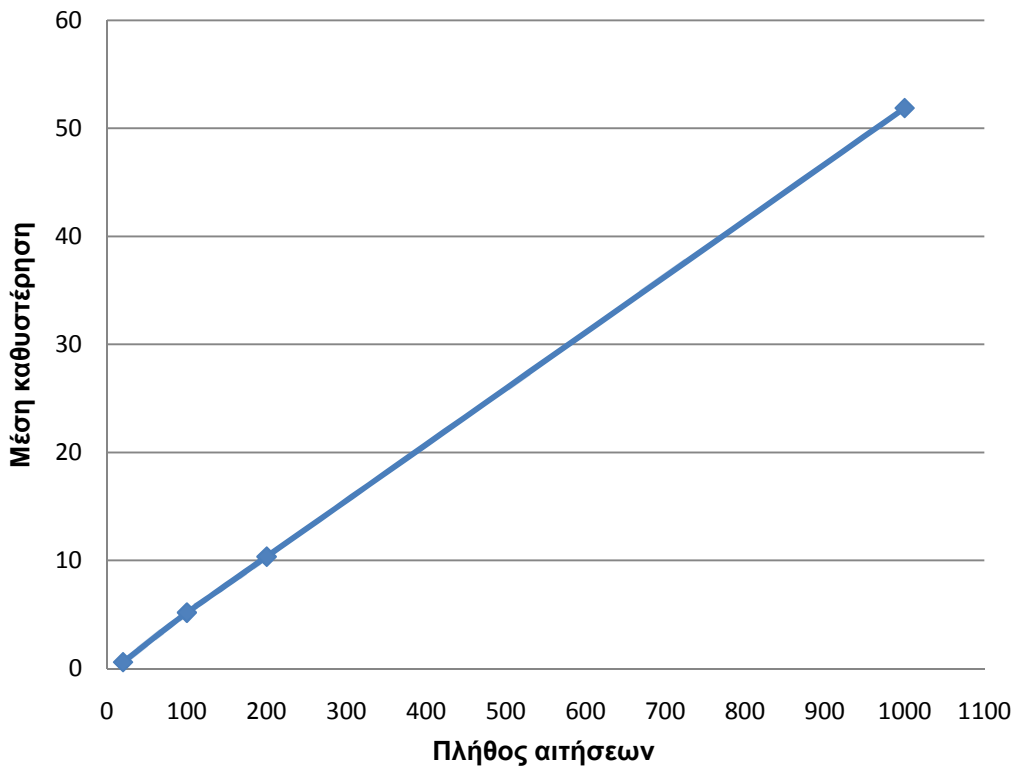
Σχήμα 6-23: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)



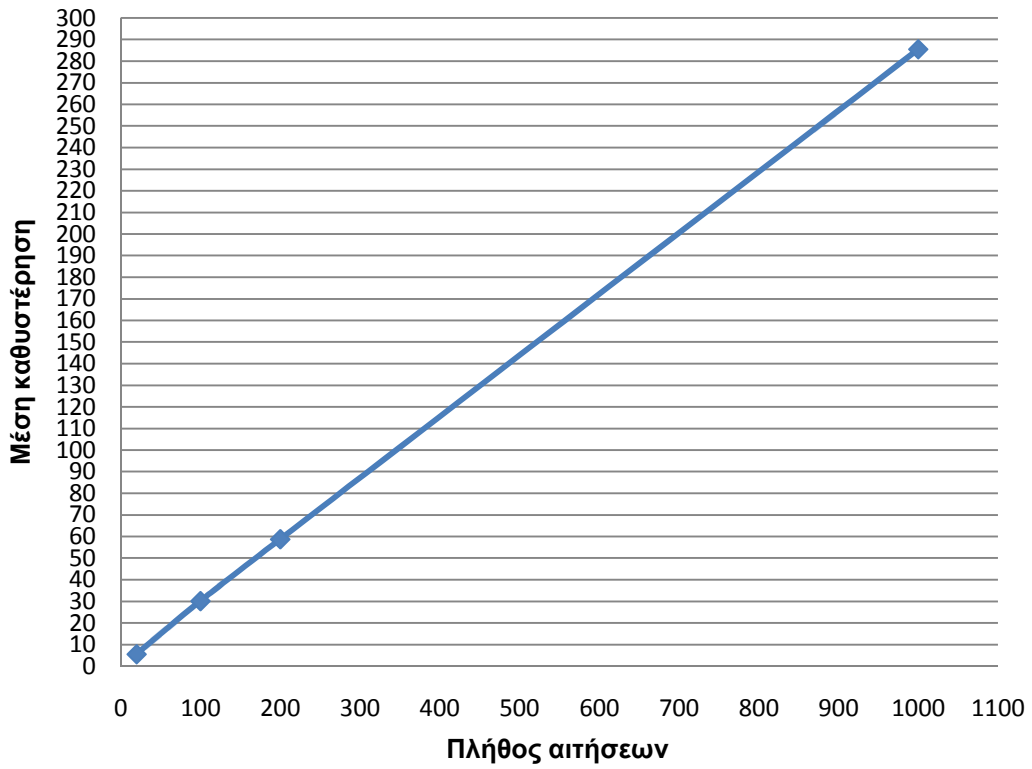
Σχήμα 6-24: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

6.6 Αξιολόγηση Enhanced One Column Striping with non-increasing Area first mapping αλγόριθμου (eOCSA)

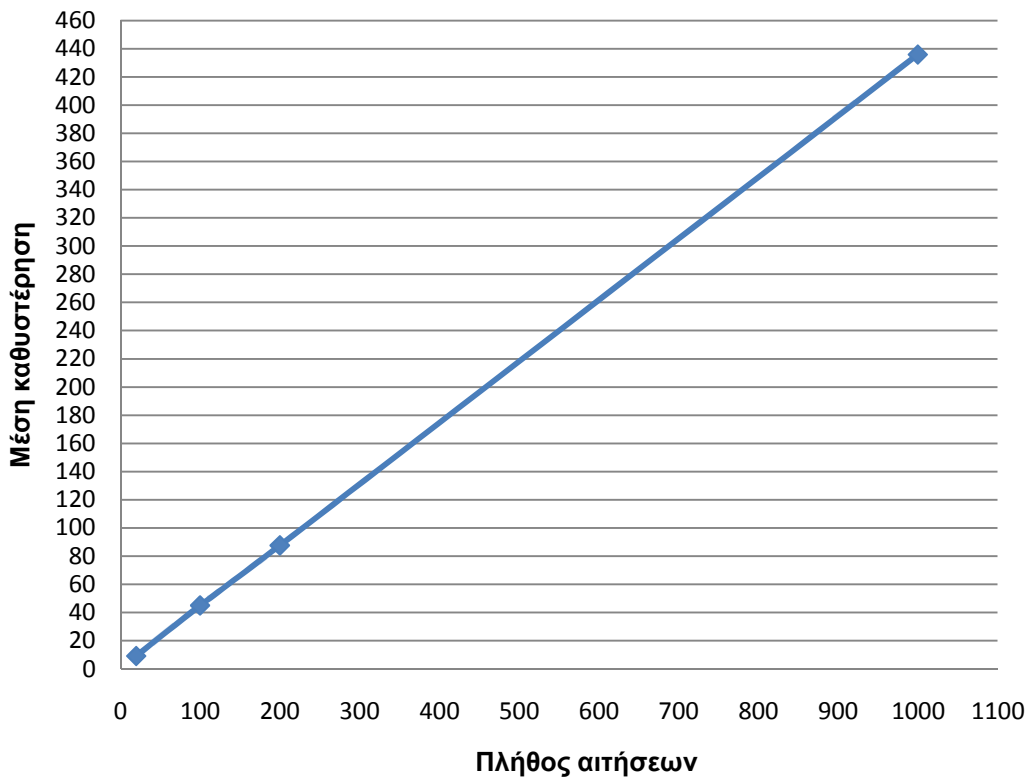
Στα Σχήματα 6-25, 6-26 και 6-27 απεικονίζονται τα διαγράμματα μέσης καθυστέρησης – πλήθους αιτήσεων για τον αλγόριθμο eOCSA. Η διαφορά αυτού του αλγορίθμου με τον OCSA είναι ότι εάν ένα υποπλαίσιο έχει γεμίσει και υπάρχουν και άλλες αιτήσεις προς εξυπηρέτηση, χρησιμοποιεί και επιπλέον χώρο από επόμενα υποπλάσια πριν αρχίσει η δικιά τους απεικόνιση. Έτσι, κάποιες αιτήσεις κατανέμονται λίγο νωρίτερα με αποτέλεσμα μικρές διαφορές στη μέση καθυστέρηση.



Σχήμα 6-25: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)

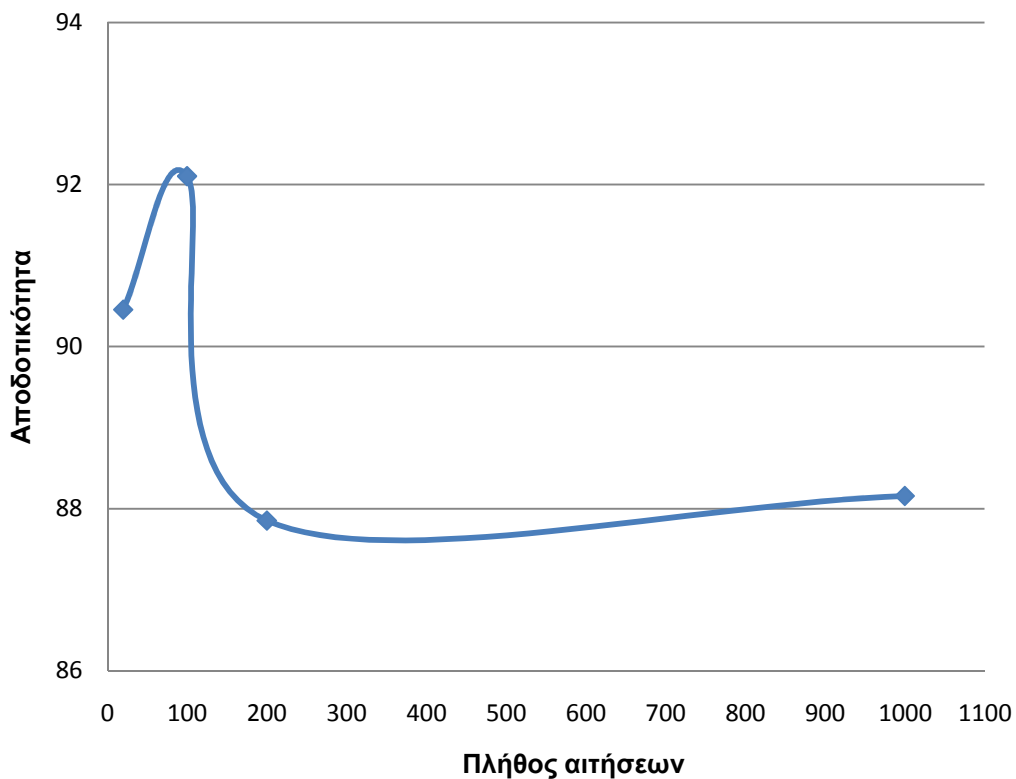


Σχήμα 6-26: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

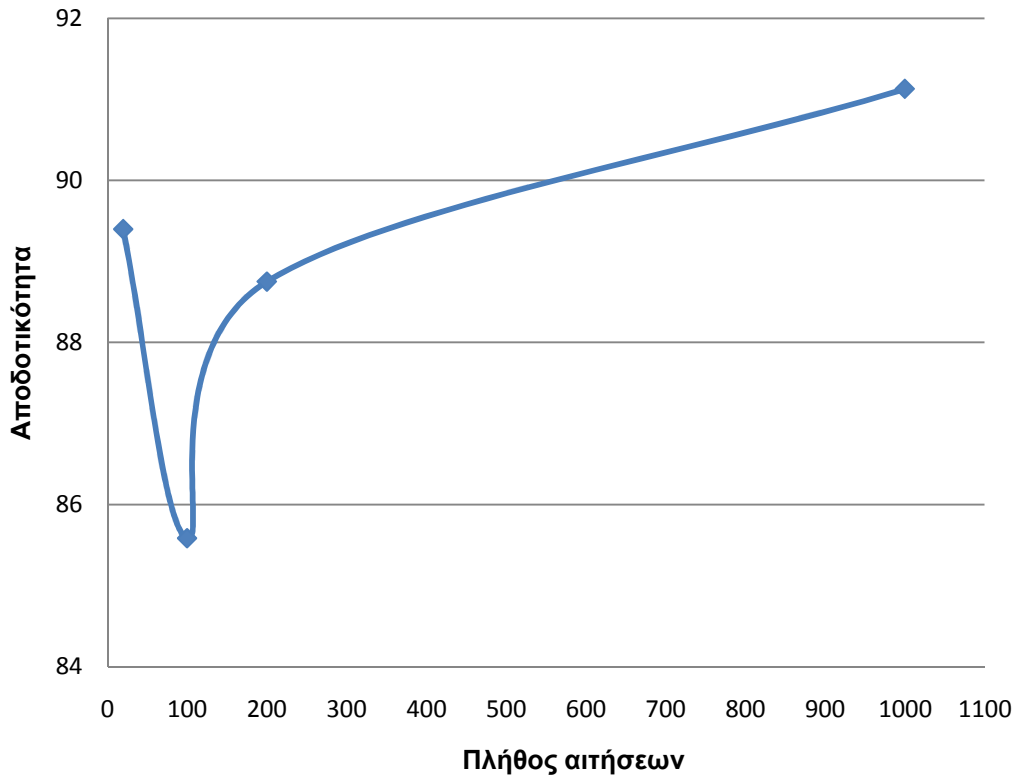


Σχήμα 6-27: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

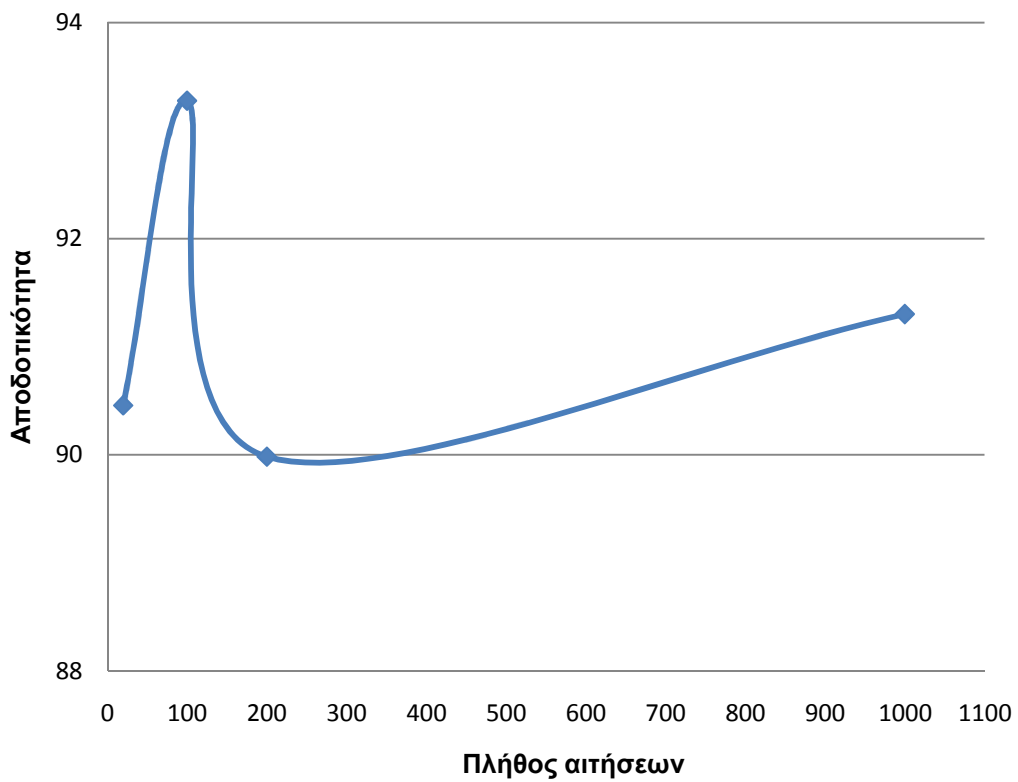
Τα Σχήματα 6-28, 6-29 και 6-30 παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ της αποδοτικότητας και του πλήθους των αιτήσεων στον αλγόριθμο eOCSA. Παρατηρώντας τα διαγράμματα φαίνεται πως η αποδοτικότητα είναι αρκετά παρόμοια με αυτή του OCSA. Κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, μιας και οι δύο αλγόριθμοι δεν έχουν σημαντικές διαφορές.



Σχήμα 6-28: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)



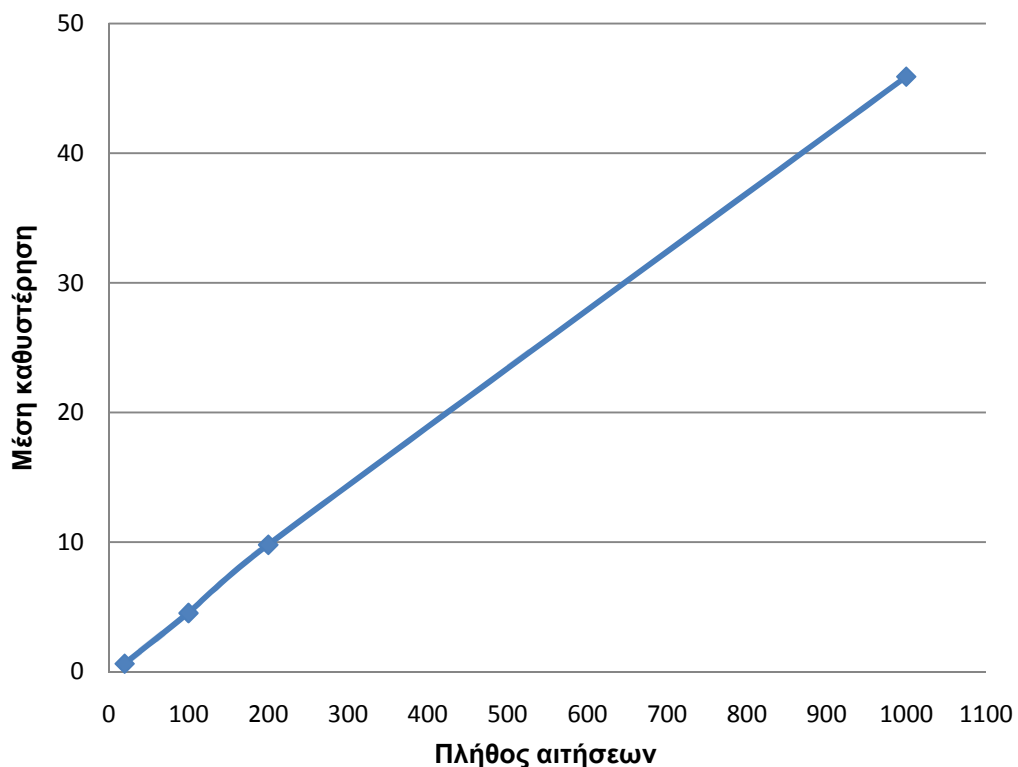
Σχήμα 6-29: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)



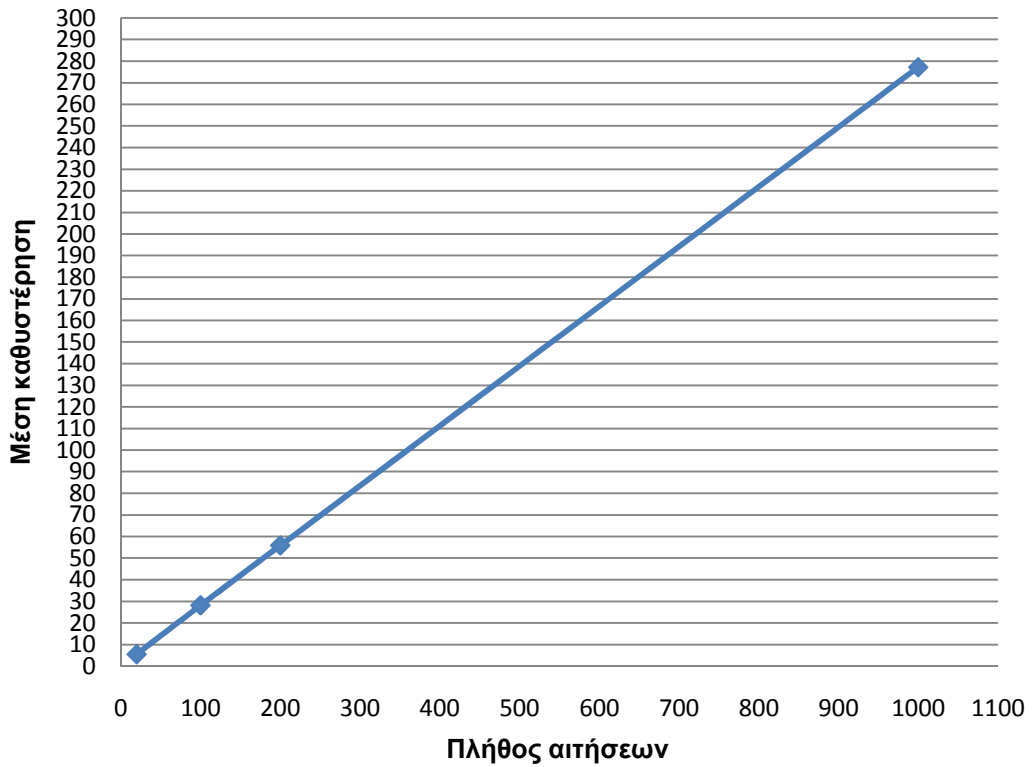
Σχήμα 6-30: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

6.7 Adaptive Mapping Scheme (ADAMAS)

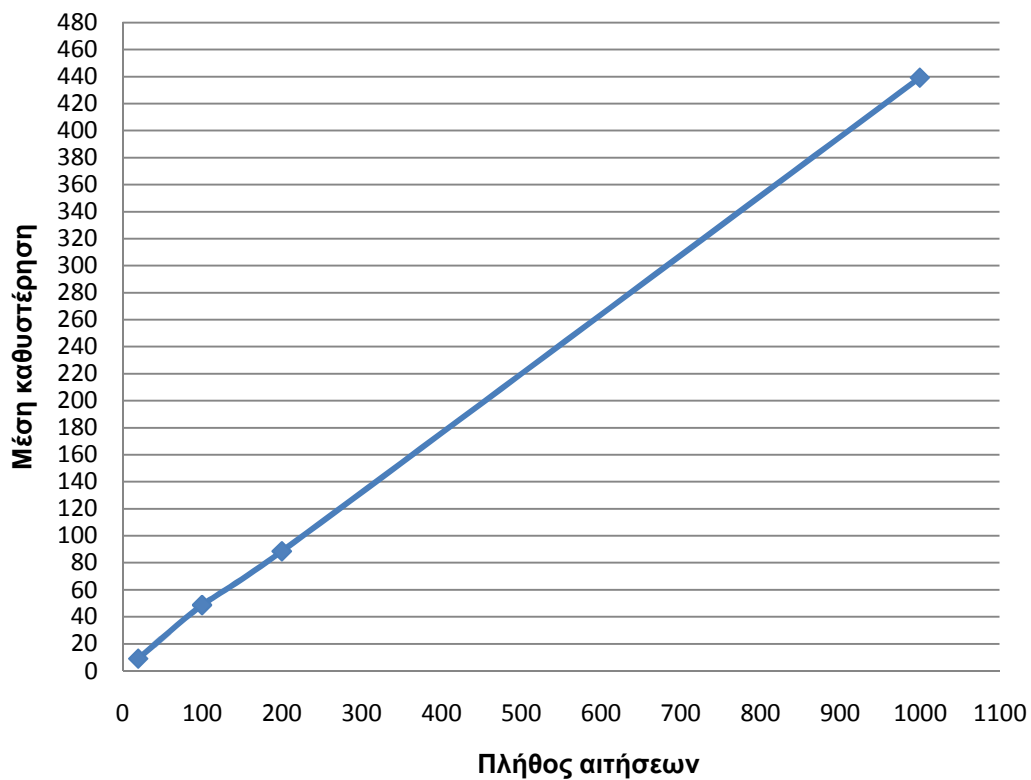
Στα Σχήματα 6-31, 6-32 και 6-33 παρουσιάζεται η απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της μέσης καθυστέρησης και του πλήθους των αιτήσεων για τον αλγόριθμο ADAMAS. Παρατηρείται πως, ο ADAMAS έχει σχετικά μικρότερη μέση καθυστέρηση από τον OCSA ή eOCSA κάτι το οποίο οφείλεται στην ενσωμάτωση των οριζόντων στον ADAMAS. Χρησιμοποιώντας τους ορίζοντες αυτός ο αλγόριθμος, πέρα από τις λειτουργίες του OCSA, μπόρεσε να κατανείμει αιτήσεις στο πάνω μέρος του υποπλαισίου (στον άξονα των υποκαναλιών) ανεξάρτητα από το πόσες διαφορετικές στήλες αιτήσεων βρίσκονται πιο κάτω από αυτό το χώρο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ακόμη μικρότερη μέση καθυστέρηση, μιας και για ακόμη μια φορά οι πόροι των υποπλαισίων διαχειρίζονται καλύτερα.



Σχήμα 6-31: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)

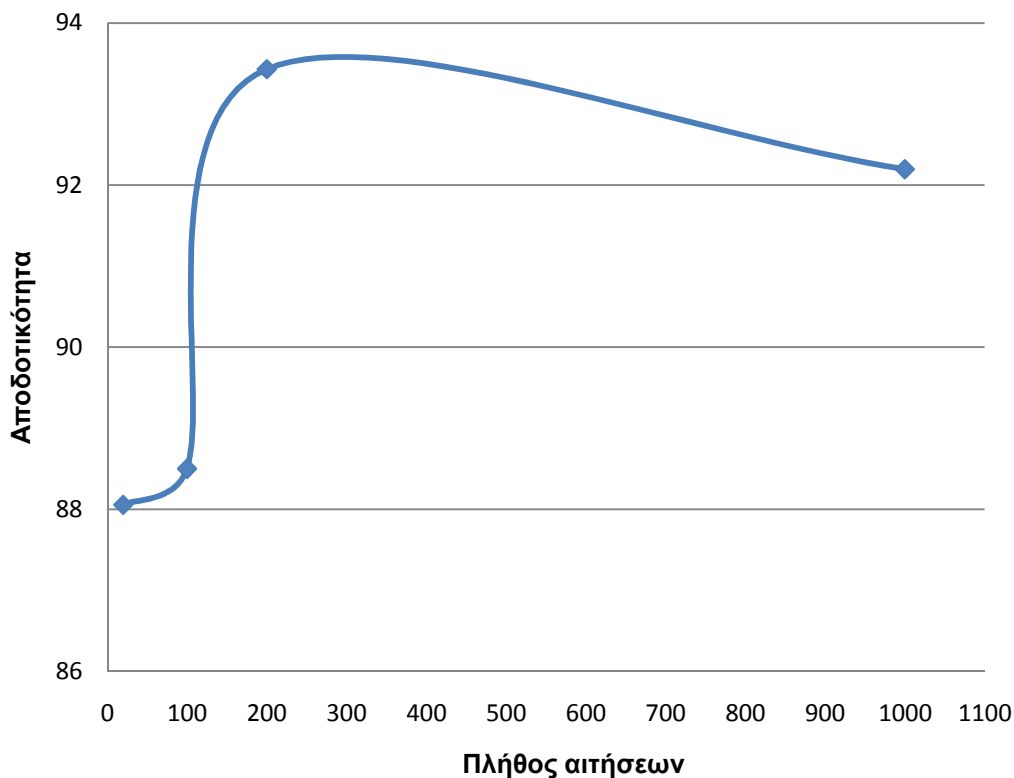


Σχήμα 6-32: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)

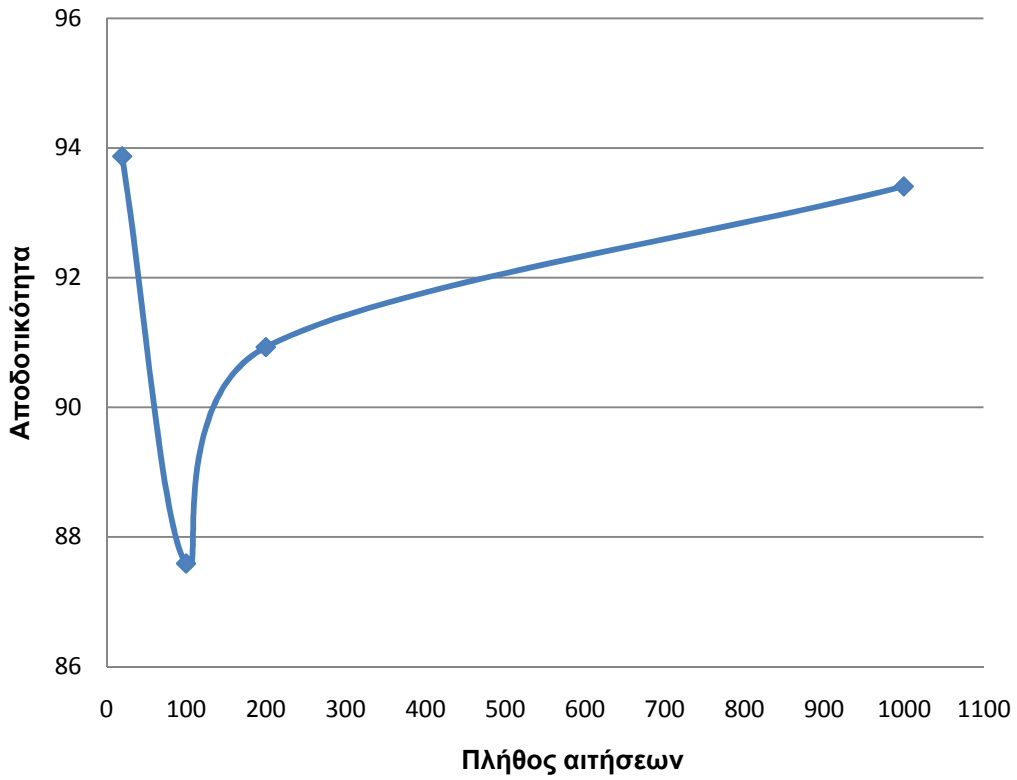


Σχήμα 6-33: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

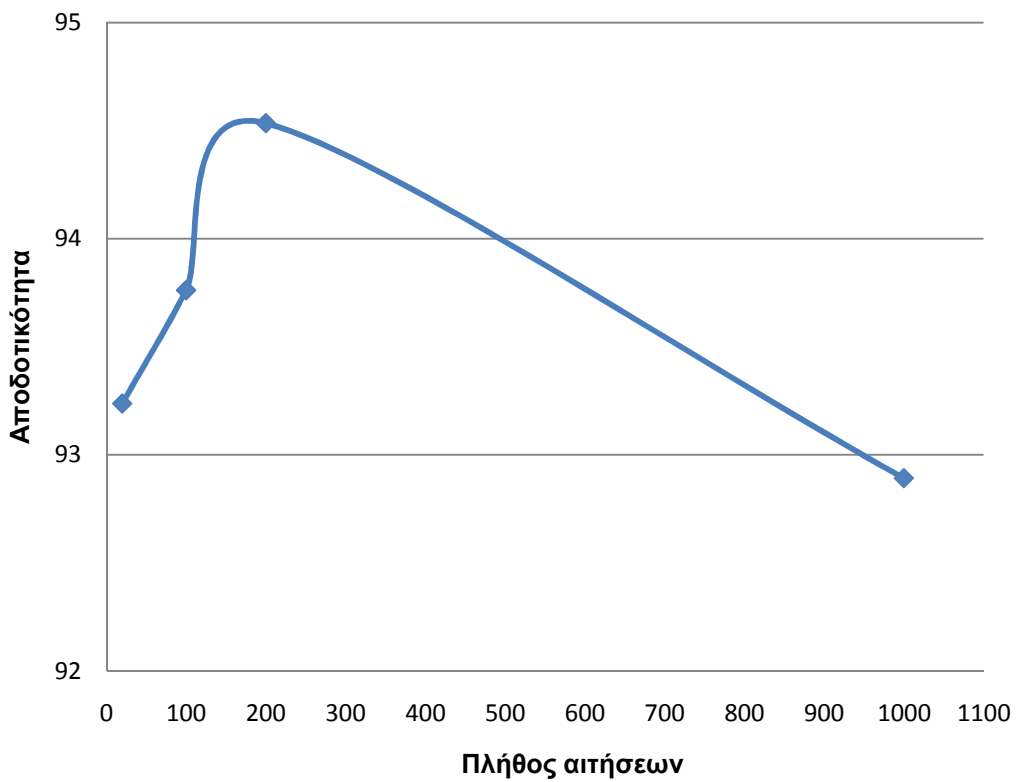
Στα Σχήματα 6-34, 6-35 και 6-36 φαίνεται η σχέση αποδοτικότητας – πλήθους αιτήσεων για τον αλγόριθμο ADAMAS. Αν και ο ADAMAS έχει κάποια στοιχεία του OCSA ή του eOCSA στη διαχείριση των αιτήσεων, η προσθήκη της έννοιας των οριζόντων προσέφερε στον ADAMAS τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται καλύτερα το χώρο που μένει μετά την κάθετη κατανομή. Έτσι, ο ADAMAS παρουσιάζει καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τους προηγούμενους αλγορίθμους.



Σχήμα 6-34: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)



Σχήμα 6-35: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)



Σχήμα 6-36: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot)

6.8 Συμπεράσματα

Μέσα από τη βιβλιογραφική μελέτη καθώς και από τις προσομοιώσεις στη MATLAB ο αλγόριθμος ADAMAS φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή για τη διαχείριση των αιτήσεων των κινητών σταθμών σε ένα mobile WiMAX δίκτυο. Αλγόριθμοι όπως ο simple packing και οι FFDH-FIFO και SORTED, προσέφεραν κάποια λύση στο Basic Two-Dimensional Allocation πρόβλημα όμως υπήρχε χώρος για βελτίωση. Οι αλγόριθμοι OCSA και eOCSA κατάφεραν να καλύψουν ορισμένα κενά στον τρόπο διαχείρισης των αιτήσεων, όμως τελικά ο ADAMAS με την εφαρμογή του ορίζοντα κατάφερε να επιτύχει το μεγαλύτερο ποσοστό αποδοτικότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.techteam.gr/wiki/WiMAX>, 'Techteam.gr Wiki', 2006
- [2] Todor Cooklev, 'Wireless Communication Standards: a study of IEEE 802.11™, 802.15™, and 802.16™', Artech House, 2002
- [3] <http://ru6.cti.gr/broadband/el/wimax.php>, 'Προώθηση της Ευρυζωνικότητας στην Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας', 2006
- [4] Prepared by Westech Communications Inc. on behalf of the WiMAX Forum, "Can WiMAX Address Your Applications?", October 24, 2005, WiMAX Forum
- [5] Wikipedia, 'WiMAX Technology', 2005
- [6] Edward Grabianowski and Marshall Brain, 'How WiMAX Works', <http://computer.howstuffworks.com/wimax5.htm>
- [7] SR Telecom White Paper 033-100596-001, Issue 1, 'WiMAX Technology, LOS and NLOS Environments', Αύγουστος 2004
- [8] <http://www.networkworld.com/news/2010/012810-wimax-2.html?hpg1=bn>, " 'WiMAX 2' coming in 2011?", Networkworld.com
- [9] "802.16m submitted to ITU for IMT-Advanced standardization" IEEE Project 802.16m as an IMT-Advanced Technology
- [10] "WiMAX 2 Collaboration Initiative (WCI) Frequently Asked Questions", WiMAX Forum, April 12, 2010
- [11] "Global WiMAX network deployments surpass 500", News release (WiMAX Forum), October 6, 2009 <http://www.wimaxforum.org/node/1724>
- [12] T. Rappaport, Wireless Communications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002
- [13] D. Noble, "The history of land-mobile radio communications," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 50, no. 5, pp. 1405–1414, May 1962
- [14] V. MacDonald, "The cellular concept," The Bell Systems Technical Journal, vol. 58, no. 1, pp 15–43, July 1979
- [15] Mobile WiMAX - part 2: A comparative analysis, <http://www.wimaxforum.org/technology/downloads>

- [16] K. Santhi, V. Srivastava, G. Senthil, and A. Butare, "Goals of true broad band's wireless next wave (4G-5G)," in IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 4, Oct. 2003, pp. 2317–2321
- [17] Wimax forum, <http://www.wimaxforum.org/>
- [18] Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Systems, IEEE Amendment and Corrigendum to IEEE Std. 802.16-2004 802.16e-2005, 2005
- [19] J. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come," IEEE Communications Magazine, pp. 5–14, May 1990
- [20] R. van Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications". Artech House, 2000
- [21] Zou, W. Y. and Y. Wu. "COFDM: an overview", IEEE Trans. Broadcasting, vol. 41, No. 1, pp. 1 – 8, March 1995
- [22] Ιωάννη Γ. Δαγρέ, "Σχεδιασμός αλγορίθμων προσαρμοστικής διαμόρφωσης και αντιμετώπισης θορύβου φάσης σε ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα πολλαπλών φερουσών ", Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα 2011
- [23] Pollet, T., M. van Bladel and M. Moeneclaey, "BER Sensitivity of OFDM Systems to Carrier Frequency Offset and Wiener Phase Noise", IEEE Trans. On Communications, vol. 43, No. 2/3/4, pp. 191 – 193, Feb. – Apr. 1995
- [24] Pauli, M. and H. P. Kuchenbecker, "Minimization of the Intermodulation Distortion of a Nonlinearly Amplified OFDM Signal", Wireless Personal Communications, vol. 4, No. 1, pp. 93 – 101, Jan. 1997
- [25] Rapp, C., "Effects of HPA – Nonlinearity on a 4–DPSK/OFDM Signal for a Digital Sound Broadcasting System", Proc. Of the Second European Conference on Satellite Communications, Liege, Belgium, pp. 179 – 184, Oct. 22 – 24, 1991
- [26] WiMAX Forum, «Mobile WiMAX – Part 1, A Technical Overview and Performance Evaluation»
- [27] Ιωάννης Α. Τερζάκης, Δημήτριος Κ. Τσαπάρας, "Σχεδίαση ασύρματων δικτύων WiMAX για πρόσβαση και διασύνδεση. Μελέτη ποιότητας (QoS) & ανάλυση υποστηριζόμενων υπηρεσιών δικτύου - Case Study: Πιλοτικά Συστήματα WiMAX Ο.Τ.Ε. ", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2007
- [28] Μαρκάκη Ουρανία, Χαρίλας Δημήτρης, "ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ QoS ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 4ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2006

- [29] Βενιέρης Στ. Ιάκωβος, Νικολούζου Ευγενία, “Τεχνολογίες Διαδικτύου”, 2η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
- [30] James F. Kurose, Keith W. Ross, “Δικτύωση Υπολογιστών”, εκδόσεις Γκιούρδας
- [31] Παπαχαραλάμπους Αναστάσιος, “Μελέτη υποστήριξης υπηρεσιών Quality of Service σε IPv6 δίκτυα”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα 2005
- [32] “Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation”, WiMAX FORUM, August 2006
- [33] Ashish Sharma, “WiMAX and its Applications”, CDOT New Delhi, Dec 8, 2005, WiMAX Forum
- [34] <http://utem-wan.wikispaces.com/Futures+of+WiMAX>
- [35] Mohammed Dawood, ECOM 5301, Senior I, “Theoretical Research about: WiMAX & QoS”, May 2007
- [36] Βασδάρης Θωμάς, Τσελίκης Παναγιώτης, “Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα WiMAX”, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Σεπτ. 2006
- [37] Bashir Hayat, Raheel Mansoor Abdul Nasir, “802.16 2001 MAC Layer QoS”
- [38] Tanenbaum S. Andrew, “Δίκτυα Υπολογιστών”, 4η αμερικανική έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [39] Στεφάνου Κωνσταντίνος, “Σχεδίαση και Προσομοίωση Συστήματος WiMAX”, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2006
- [40] Ιάκωβος Στ. Βενιέρης, “Δίκτυα Ευρείας Ζώνης”, 2η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα
- [41] Aarne Hummelholm, “Wimax MAC – Upperlayer Services”, S-72.4210 Postgraduate Seminar on Wideband RadioCommunications, Communications Laboratory 28.3.2006
- [42] Karim M. El Defrawy, “WiMAX for Broadband Wireless Access”, 9-16-05, ICS, UCI-2005
- [43] Νέστορας Αλέξανδρος, “WiMAX και διασυνεργασία με το UMTS”, Πτυχιακή εργασία ΤΕΙ Λάρισας, Λάρισα 2006
- [44] “Understanding WiFi and WiMAX as Metro-Access Solutions”, Intel, white paper
- [45] “WiMAX”, Shashi Jakku
- [46] IEEE P802.16Rev2/D2, “DRAFT Standard for Local and metropolitan area networks,” Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, Dec. 2007, 2094 pp.

- [47] WiMAX Forum, "WiMAX System Evaluation Methodology V2.1," Jul. 2008, 230 pp. URL=<http://www.wimaxforum.org/technology/documents>
- [48] C. So-In, R. Jain, and A. Al-Tamimi, "Capacity Evaluation for IEEE 802.16e Mobile WiMAX," To appear in Journal of Comp. Systems, Networks, and Comm. (Special Issue in WiMAX, LTE, and WiFi Internetworking), April. 2010
- [49] M-R. Garey and D-S. Johnson, "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness," W.H. Freeman, 340 pp., Jan. 1979
- [50] Panagiotis Sarigiannidis, Member, IEEE, Malamati Louta, Member, IEEE, Georgios Papadimitriou, Senior Member, IEEE, Petros Nicopolitidis, Member, IEEE, Mohammad Obaidat, Fellow Member, IEEE, and Andreas Pomportsis, "ADAMAS: An Efficient Adaptive Mapping Scheme for Downlink Sub-Frame in Mobile WiMAX Access Networks"
- [51] Yehuda Ben-Shimol, Itzik Kitroser, and Yefim Dinitz, "Two-Dimensional Mapping for Wireless OFDMA Systems", IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, VOL. 52, NO. 3, SEPTEMBER 2006
- [52] Xavier P´erez-Costa, Paolo Favaro, Anatolij Zubow*, Daniel Camps and Julio Ar´auz, "On the Challenges for the Maximization of Radio Resources Usage in WiMAX Networks", NEC Laboratories Europe, Network Research Division, Heidelberg, Germany and *Humboldt University, Berlin, Germany, 2008
- [53] Chakchai So-In, Student Member, IEEE, Raj Jain, Fellow, IEEE, Abdel-Karim Al Tamimi, Member, IEEE, "OCSA: An Algorithm for Burst Mapping in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks^{1, 2}", Department of Computer Science & Engineering, Washington University in St. Louis One Brookings Drive, Box 1045, St. Louis, MO 63130 USA, Proceedings of 15th Asia Pacific Conference on Communications (APCC 2009), 8-10 October 2009, Shanghai, China
- [54] Chakchai So-In Department of Computer Science & Engineering, Washington University in St. Louis, MO 63130 USA, cs5@cse.wustl.edu, Raj Jain and Abdel-Karim Al Tamimi Department of Computer Science & Engineering, Washington University in St. Louis, MO 63130 USA, jain and aa7@cse.wustl.edu, "eOCSA: An Algorithm for Burst Mapping with Strict QoS Requirements in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks", Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2010), Singapore, February 26 - 28, 2010

Παραρτήματα

Παράρτημα Α: Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1: <i>Mobility</i> εναντίον <i>Throughput</i>	15
Σχήμα 1-2: Στόχοι της τεχνολογίας <i>WiMAX</i>	26
Σχήμα 1-3: Δίκτυο <i>WiMAX</i> για υποστήριξη κυψελωτού δικτύου.....	29
Σχήμα 1-4: <i>WiMAX Backhaul</i>	30
Σχήμα 1-5: Δίκτυο <i>WiMAX</i> για την εξυπηρέτηση του εκπαιδευτικού συστήματος..	31
Σχήμα 1-6: Δίκτυο τράπεζας με χρήση <i>WiMAX</i>	32
Σχήμα 1-7: Δίκτυο <i>WiMAX</i> για τη Δημόσια Ασφάλεια.....	34
Σχήμα 1-8: Δίκτυο <i>WiMAX</i> για <i>Offshore</i> επικοινωνίες.....	35
Σχήμα 1-9: Δίκτυο <i>WiMAX</i> σε Πανεπιστημιούπολη.....	36
Σχήμα 1-10: <i>WiMAX</i> για εταιρείες κατασκευών.....	37
Σχήμα 1-11: Δίκτυο <i>WiMAX</i> για την εξυπηρέτηση Θεματικών Πάρκων.....	38
Σχήμα 1-12: Ασύρματες υπηρεσίες μέσω δικτύων <i>WiMAX</i>	40
Σχήμα 1-13: Δίκτυο <i>WiMAX</i> σε αγροτική περιοχή.....	41
Σχήμα 1-14: Τρόπος λειτουργίας του δικτύου <i>WiMAX</i>	45
Σχήμα 1-15: <i>LOS</i> και <i>NLOS</i> σε δίκτυο <i>WiMAX</i>	46
Σχήμα 1-16: Ζώνη <i>Fresnel</i>	48
Σχήμα 1-17: Διάδοση <i>NLOS</i>	49
Σχήμα 1-18: Τοποθεσία <i>CPE</i> (<i>customer-premises equipment</i>) με <i>LOS</i> και με <i>NLOS</i>	50
Σχήμα 1-19: Το αποτέλεσμα του <i>sub-channelization</i>	51
Σχήμα 1-20: Σχετικές ακτίνες σχημάτων για προσαρμόσιμη διαμόρφωση.....	53

Σχήμα 2-1: Τεχνική (α) μη επικαλυπτόμενων φερουσών, (β) επικαλυπτόμενων φερουσών.....	56
Σχήμα 2-2: Φάσμα (α) υποκανάλι OFDM, (b) σήμα OFDM.....	56
Σχήμα 2-3: Εμφάνιση crosstalk για φέρουσα με μηδενικό σήμα κατά το χρόνο ελέγχου.....	58
Σχήμα 2-4: Σύμβολο OFDM με κυκλικό πρόθεμα.....	59
Σχήμα 2-5: Μπλοκ διάγραμμα ενός OFDM πομποδέκτη.....	60
Σχήμα 2-6: Εισαγωγή κυκλικού προθέματος στο πλαίσιο OFDM.....	63
Σχήμα 2-7: Η δομή υπο-φερόντων του OFDMA.....	64
Σχήμα 2-8: Σύγκριση OFDM και OFDMA.....	64
Σχήμα 3-1: Λειτουργικό μοντέλο κόμβου IntServ.....	76
Σχήμα 3-2: Στοιίβα πρωτοκόλλων τερματικού Διαδικτύου.....	77
Σχήμα 3-3: Ροή μηνυμάτων πρωτοκόλλου σηματοδότησης Διαδικτύου RSVP.....	79
Σχήμα 3-4: : Πεδίο Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DS field).....	84
Σχήμα 3-5: Οι βασικοί μηχανισμοί της DiffServ αρχιτεκτονικής.....	90
Σχήμα 3-6: Λειτουργίες μετά τη δρομολόγηση.....	91
Σχήμα 3-7: LAN-WAN.....	95
Σχήμα 4-1: Κλάσεις εφαρμογών του WiMAX.....	97
Σχήμα 4-2: Διαστρωμάτωση επιπέδου MAC.....	102
Σχήμα 4-3: Αντιστοίχιση MAC SDU σε CS PDU.....	103
Σχήμα 4-4: Δυναμική ροή υπηρεσίας.....	105
Σχήμα 4-5: Θεωρία λειτουργίας του μοντέλου αντικειμένου.....	106
Σχήμα 4-6: Ροή μηνύματος DSA που εκκινεί ο SS.....	107
Σχήμα 4-7: Ροή μηνύματος DSA που εκκινεί ο BS.....	107
Σχήμα 4-8: Provisioned Authorization.....	108
Σχήμα 4-9: Δυναμικό μοντέλο εξουσιοδότησης.....	109
Σχήμα 4-10: Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας στο Mobile WiMAX.....	110

Σχήμα 4-11: WiMAX διασύνδεση για Wi-Fi τοπολογία πλέγματος (<i>mesh topology</i>).....	111
Σχήμα 5-1: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>Basic Raster</i>	120
Σχήμα 5-2: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>Raster</i>	122
Σχήμα 5-3: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>Simple Packing</i>	124
Σχήμα 5-4: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>FFDH-FIFO</i>	126
Σχήμα 5-5: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>FFDH-SORTED</i>	127
Σχήμα 5-6: Παράδειγμα απεικόνισης ριπών στην κατερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>OCSA</i>	129
Σχήμα 5-7: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>OCSA</i>	131
Σχήμα 5-8: Παράδειγμα απεικόνισης ριπών στην κατερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>eOCSA</i>	133
Σχήμα 5-9: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>eOCSA</i>	136
Σχήμα 5-10: Το υποπλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης.....	139
Σχήμα 5-11: <i>Two-dimensional downlink burst mapping</i> χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο <i>ADAMAS</i>	140
Σχήμα 6-1: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον <i>Simple Packing</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	142
Σχήμα 6-2: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον <i>Simple Packing</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	143

Σχήμα 6-3: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον <i>Simple Packing</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	143
Σχήμα 6-4: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον <i>Simple Packing</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	144
Σχήμα 6-5: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον <i>Simple Packing</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	145
Σχήμα 6-6: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον <i>Simple Packing</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	145
Σχήμα 6-7: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον <i>FFDH-FIFO</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	146
Σχήμα 6-8: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον <i>FFDH-FIFO</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	147
Σχήμα 6-9: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον <i>FFDH-FIFO</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	147
Σχήμα 6-10: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον <i>FFDH-FIFO</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	148
Σχήμα 6-11: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον <i>FFDH-FIFO</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	149
Σχήμα 6-12: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον <i>FFDH-FIFO</i> αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	149

Σχήμα 6-13: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	150
Σχήμα 6-14: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	151
Σχήμα 6-15: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	152
Σχήμα 6-16: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	152
Σχήμα 6-17: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	153
Σχήμα 6-18: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον FFDH-SORTED αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	154
Σχήμα 6-19: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	154
Σχήμα 6-20: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	155
Σχήμα 6-21: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	156
Σχήμα 6-22: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	156
Σχήμα 6-23: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)....	157

Σχήμα 6-24: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον OCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	158
Σχήμα 6-25: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	158
Σχήμα 6-26: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	159
Σχήμα 6-27: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	160
Σχήμα 6-28: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot)..	160
Σχήμα 6-29: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot)..	161
Σχήμα 6-30: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον eOCSA αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	162
Σχήμα 6-31: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	162
Σχήμα 6-32: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....	163
Σχήμα 6-33: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....	164
Σχήμα 6-34: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ μέσης καθυστέρησης και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 50 slot).....	164

Σχήμα 6-35: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 1 έως 360 slot).....165

Σχήμα 6-36: Σχεδιάγραμμα σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και πλήθους αιτήσεων για τον ADAMAS αλγόριθμο (Τυχαίες αιτήσεις από 200 έως 360 slot).....166

Παράρτημα Β: Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1: Οικογένεια προτύπων 802.16 της IEEE.....	10
Πίνακας 1-2: Mobility εναντίον Throughput.....	15
Πίνακας 1-3: WiMAX QoS.....	24
Πίνακας 1-4: Εφαρμογές WiMAX.....	27
Πίνακας 1-5: Σενάρια χρήσης του WiMAX.....	28
Πίνακας 2-1: Παράμετροι επέκτασης του OFDMA.....	65
Πίνακας 3-1: Κατηγορίες εφαρμογών και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.....	68
Πίνακας 3-2: Απαιτήσεις διαφόρων υπηρεσιών.....	86
Πίνακας 4-1: Κλάσεις εφαρμογών του WiMAX όπως έχουν ορισθεί από το WiMAX Forum, με το απαιτούμενο εύρος ζώνης, καθυστέρηση και jitter.....	98
Πίνακας 4-2: Αντιστοιχία κλάσεων εφαρμογών και κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας.....	98
Πίνακας 4-3: Κλάσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS) που υποστηρίζονται στο 802.16e (Mobile WiMAX).....	99
Πίνακας 4-4: Συγκεντρωτική παρουσίαση κλάσεων υπηρεσιών στο IEEE802.16d.....	101
Πίνακας 4-5: Σύγκριση σταθερού WiMAX και WiFi.....	113
Πίνακας 4-6: Σχετική απόδοση.....	114
Πίνακας 4-7: Κάλυψη.....	114
Πίνακας 4-8: Ποιότητα Υπηρεσιών.....	115
Πίνακας 4-9: Εμβέλεια.....	115
Πίνακας 4-10: Κλιμάκωση.....	116
Πίνακας 4-11: Ασφάλεια.....	116
Πίνακας 5-1: Δέκα τυχαίες αιτήσεις.....	116
Πίνακας 5-2: Οι δέκα αιτήσεις του Πίνακα 1 σε φθίνουσα σειρά μεγέθους.....	117

Παράρτημα Γ: Ακρωνύμια

WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
LAN	Local Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
GPRS	General Packet Radio Service
3G	3 rd Generation
GSM	Global System for Mobile communications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
1G	1 st Generation
AMPS	Advanced Mobile Phone System
NMT	Nordic mobile telephone
TACS	Total Access Communication System
2G	2 nd Generation
TDMA	Time Division Multiple Access
FDD	Frequency Division Duplexing
TDD	Time Division Duplexing
EDGE	Enhanced Data rate for GSM Evolution
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
DL	Downlink
1xEVDO	Evolution-Data Optimized
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
4G	4 th Generation
IP	Internet Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
LMSC	Local and Metropolitan Area Networks Standards Committee
JTC1	Joint Technical Committee 1
ISO	International Organization for Standardization
IEC	International Electrotechnical Commission
OSI	Open Systems Interconnections
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
PHY	Physical layer
ITU	International Telecommunication Union
DSL	Digital Subscriber Line
BS	Base Station
SS	Subscriber Station
PMP	Point-to-Multipoint
MP-MP	Multipoint-to-Multipoint
MWS	Multimedia Wireless Systems
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
AP	Access Point
WirelessMAN-SC	Wireless Metropolitan Area Network-Single Carrier
LOS	Line-Of-Sight
S-OFDMA	Scalable-Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
ETSI BRAN HIPERLAN/2	European Telecommunication Standards Institute Broadband Radio Access Networks High Performance Radio LAN/2

APIB MMAC	Association of Radio Industries and Business Multimedia Mobile Access Communications
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
DES	Data Encryption Standard
ITU-R	International Telecommunication Union–Radiocommunication Sector
IMT	International Mobile Telecommunications
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ISDN	Integrated Services Digital Network
PSTN	Public Switched Telephone Network
PDA	Personal Digital Assistant
AES	Advanced Encryption Standard
VLAN	Virtual Local Area Network
SLA	Service Level Agreement
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
NLOS	Non-Line-of-Sight
BPSK	Binary Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service
SSL	Secure Socket Layer
ISP	Internet Service Provider
MRC	Maximal-Ratio Combining
ARQ	Automatic Repeat Request
FEC	Forward Error Correction
FDM	Frequency Division Multiplexing
DFT	Discrete Fourier Transform

FFT	Fast Fourier Transform
VLSI	Very Large Scale Integration
ISI	Inter Symbol Interference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ICI	Inter Carrier Interference
IFI	Inter Frame Interference
PSD	Power Spectral Density
SER	Symbol Error Rate
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
RF	Radio Frequency
CP	Cyclic Prefix
TCP	Transmission Control Protocol
PQ	Priority Queueing
WFQ	Weighted Fair Queueing
WRR	Weighted Round Robin
CBQ	Class Based Queueing
IETF	Internet Engineering Task Force
IntServ	Integrated Services
DiffServ	Differentiated Services
TC	Traffic Control
RSVP	Resource Reservation Protocol
ToS	Type Of Service
RSPEC	Request SPECification
TSPEC	Traffic SPECification

DS	Differentiated Services
PHB	Per-Hop Behavior
BB	Bandwidth Broker
DSCP	DiffServ Code Point
VoIP	Voice over IP
RED	Random Early Detection
RAR	Resource Allocation Request
RAA	Resource Allocation Answer
FIFO	First-In-First-Out
CBWFQ	Class-Based Weighted Fair Queueing
MDRR	Modified Deficit Round Robin
CoS	Class of Service
AWG	Applications Working Group
UGS	Unsolicited Grant Service
rtPS	Real-time Polling Service
ErtPS	Enhanced real-time Polling Service
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service
BE	Best Effort
WISP	Wireless Internet Service Provider
MAC-CS	Medium Access Control – Convergence Sublayer
MAC-CP	Medium Access Control – Common Part
MAC-PS	Medium Access Control – Privacy Sublayer
ATM	Asynchronous Transfer Mode
SDU	Service Data Unit
PDU	Protocol Data Unit
UL	Uplink

SFID	Service Flow ID
CID	Connection ID
DSC	Dynamic Service Change
DSD	Dynamic Service Delete
DSA	Dynamic Service Activate
CQICH	Channel Quality Indicator sub-Channel
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
SoC	System on a Chip
IMS	IP Multimedia System
PUSC	Partially Used Sub-Channelization
NP-complete	Nondeterministic Polynomial time-complete
FFDH	First Fit Decreasing Height Algorithm
OCSA	One Column Striping with non-increasing Area first mapping Algorithm
eOCSA	Enhanced One Column Striping with non-increasing Area first mapping Algorithm
MS	Mobile Station
ADAMAS	Adaptive Mapping Scheme