



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του Παπακυπριανού Νικόλαου
Α.Ε.Μ 107**

**Μελέτη και αποτίμηση υβριδικών,
ασύρματων, οπτικών, ευρυζωνικών
δικτύων.**

**Επιβλέποντες καθηγητές:
Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης, Π.Δ. 407/80
Λούτα Μαλαματή, Επικ. Καθηγήτρια**

Κοζάνη (Μάρτιος 2012)

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάμε την συμπεριφορά και την λειτουργία υβριδικών οπτικών-ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων. Στην εισαγωγή της διπλωματικής γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις ανάγκες που έχουν προκύψει τα τελευταία χρόνια από την επανάσταση της τεχνολογίας στον τομέα του Internet και των εφαρμογών.

Η διπλωματική εργασία ξεκινάει με την παρουσίαση των οπτικών δικτύων, επικεντρώνοντας την προσοχή στην αρχιτεκτονική, την δικτύωση και την απόδοση του δικτύου. Στην συνέχεια με την ίδια λογική παρουσιάζονται τα ασύρματα δίκτυα του προτύπου WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Ο στόχος είναι να παρουσιάσουμε και να αναλύσουμε ένα πρότυπο το οποίο να συνδυάζει τις τεχνολογίες αυτές. Ο συνδυασμός αυτός θα χρησιμοποιεί τα δύο μεγάλα πλεονεκτήματα των δικτύων αυτών. Το εύρος ζώνης των οπτικών δικτύων και την κινητικότητα των ασύρματων.

Τα υβριδικά δίκτυα WEN (WiMAX-EPON, που θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο 4) είναι τα δίκτυα αυτά που μπορούν να προσφέρουν τον συνδυασμό των οπτικών και ασύρματων 802.16 τύπου δικτύων με σκοπό την κάλυψη των αναγκών σε εύρος ζώνης στο παρόν και στο μέλλον. Βασικά κριτήρια αυτού του προσανατολισμού είναι τόσο το κόστος όσο και η ευκολία. Το κόστος έχει να κάνει κυρίως με το τελευταίο μίλι μιας και μία κεραία εμβέλειας WiMAX μπορεί να καλύψει μέχρι και την διάμετρο μίας ολόκληρης πόλης. Η ευκολία του υβριδικού δικτύου συνίσταται στο ότι χρησιμοποιώντας ως μέσο τον αέρα αποφεύγουμε την νέα εγκατάσταση οπτικών ινών που κοστίζει.

Στο 5ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός υβριδικού ασύρματου-οπτικού δικτύου. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Η αρχιτεκτονική που μελετήθηκε αναπαριστά ένα δίκτυο WEN και είναι κατάλληλη για μετρήσεις σε απόδοση, καθυστέρηση, απορρίψεις πακέτων κτλ. Πέρα από τα εκτεταμένα και συγκριτικά αποτελέσματα απόδοσης, η παρούσα εργασία επιχειρεί να δώσει μία γενικότερη εικόνα αναφορικά με την απόδοση των υβριδικών δικτύων πρόσβασης που αναμένεται να κυριαρχήσουν στο εγγύς μέλλον.

Abstract

In this dissertation we study the behavior and operation of hybrid optical-wireless broadband networks. The introduction of the dissertation makes extensive reference to the needs that have arisen in recent years since the revolution of technology in the Internet and its applications.

The dissertation begins with the presentation of optical networks, focusing on architecture, networking and network performance. Then with the same logic are presented the wireless networks of the WiMAX standard (Worldwide Interoperability for Microwave Access). The goal is to present and analyze a model which combines these technologies. This combination will use the two major advantages of these networks. The huge bandwidth of optical networks and the wireless mobility.

Hybrid networks WEN (WiMAX-EPON, which will be analyzed in Section 4) are networks that can offer the combination of optical and wireless 802.16 types of networks to meet the needs of bandwidth today and in the future. Key criteria for this approach is both cost and convenience. The cost has to do mainly with the last mile since a WiMAX range antenna can cover up to a diameter of an entire city. The ease of the hybrid network is that using air as a mean of communication we avoid the installation of new fiber optic which costs.

The 5th chapter presents the results of the simulation of a hybrid optical-wireless network. The simulation was implemented with the programming language Matlab. The architecture that was studied represents a WEN network and is suitable for measurements of efficiency, delay, packet dropping, etc. Apart from the extensive and comparative performance results, this paper attempts to give an overall picture regarding the efficiency of hybrid access networks that are expected to dominate in the near future.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και ήταν δίπλα μου όποτε το είχα ανάγκη. Επίσης τους καθηγητές του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την εκπαίδευση και τις γνώσεις που μου προσέφεραν και κυρίως τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κύριο Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη για τις συμβουλές και την καθοδήγησή του. Ακόμη τους συμφοιτητές και φίλους που έκανα στα πέντε χρόνια των σπουδών μου στην Κοζάνη και περάσαμε τόσες όμορφες στιγμές. Τέλος τους ανθρώπους που έχω δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο.

Παπακυπριανού Νικόλαος

Κοζάνη, 1 Μαρτίου 2012

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	1
1.1 Διανύοντας την Zettabyte Εποχή.....	1
1.2 Διακίνηση δεδομένων.....	4
Κεφάλαιο 2 – Οπτικά δίκτυα.....	7
2.1 Γιατί οπτικά δίκτυα.....	8
2.2 Ανάγκες για μεγαλύτερη χωρητικότητα και FTTH.....	10
2.3 Ethernet passive optical networks EPON.....	12
2.3.1 Εισαγωγή στα παθητικά οπτικά δίκτυα PON.....	12
2.3.2 EPON.....	14
2.3.3 TDM/WDM.....	15
2.3.4 MPCP.....	17
2.3.5 Inter-ONU και Intra-ONU.....	18
2.3.6 Online και Offline Scheduling.....	18
2.3.7 Grant Sizing.....	20
2.3.8 Quality of Service – QoS.....	23
Κεφάλαιο 3 – Ασύρματα δίκτυα τύπου WiMAX.....	25
3.1 Εισαγωγή στο WiMAX 802.16.....	25
3.2 Γιατί 802.16 και όχι 802.11;.....	27
3.3 Γενικά Χαρακτηριστικά του WiMAX.....	30
3.3.1 Η εξέλιξη του WiMAX.....	30
3.3.2 Τα μέρη του WiMAX.....	32
3.3.3 Φυσικό επίπεδο.....	34

3.3.3.1 OFDM και OFDMA.....	34
3.3.3.2 QAM-64, QAM-16, QPSK.....	36
3.3.3.3 TDD και FDD.....	39
3.4 WiMAX QoS Service Classes.....	41

Κεφάλαιο 4 – Δίκτυα WEN.....43

4.1 Ιστορικό της σύγκλισης των δικτύων.....	44
4.1.2 Κίνητρο για σύγκλιση.....	45
4.2 Virtual ONU-BS (VOB).....	46
4.3 QoS.....	49
4.3.1 QoS-aware DBA.....	50
4.3.2 Ζήτηση και απόδοση εύρους ζώνης.....	51
4.3.2.1 Ζήτηση εύρους ζώνης.....	54
4.3.2.2 Απόδοση εύρους ζώνης.....	55

Κεφάλαιο 5 – Μελέτη και αποτίμηση ενός δικτύου με μεθόδους προσομοίωσης.....57

5.1 Σχήματα.....	58
5.2 Βασικά Σημεία του Κώδικα.....	62
5.3 Γράφοι και Μετρικές.....	69

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά.....76

6.1 Συμπεράσματα.....	76
6.2 Μελλοντική δουλειά.....	77

Αναφορές

Γλωσσάρι

Λίστα Εικόνων και Πινάκων

Εικόνα 1-1.	Παγκόσμια κίνηση σε Exabytes/μήνα μέχρι το 2015.....	2
Εικόνα 1-2.	Η κίνηση στο πέρασμα των χρόνων	4
Εικόνα 1-3.	Exabytes / μήνα για υπηρεσίες διαδικτύου	5
Εικόνα 1-4.	Παγκόσμια κίνηση σε Exabytes/μήνα.....	6
Πίνακας 1-1.	Περιφερειακοί Ρυθμοί Ανάπτυξης.....	6
Εικόνα 2-1.	FTTx.....	11
Εικόνα 2-2.	Παθητικό οπτικό Δίκτυο PON.....	13
Εικόνα 2-3.	Αρχιτεκτονική ενός δικτύου EPON με έναν OLT και πέντε ONUs.....	15
Εικόνα 2-4.	Κατερχόμενη κίνηση στο οπτικό δίκτυο.....	16
Εικόνα 2-5.	Μηνύματα ελέγχου του MPCP για την διαχείριση του εύρου ζώνης.....	17
Εικόνα 2-6.	Online scheduling για ένα EPON με τρία ONUs.....	19
Εικόνα 2-7.	Offline scheduling για ένα EPON με τρία ONUs.....	20
Εικόνα 2-8.	Μηχανισμός REPORT/GATE με waiting time.....	23
Εικόνα 3-1.	WiMAX 802.16 με Wi-Fi 802.11.....	29
Εικόνα 3-2.	OFDM Διαμόρφωση.....	35
Εικόνα 3-3.	Χρονικό διάστημα φύλαξης OFDM.....	35
Εικόνα 3-4.	OFDM και OFDM.....	36
Εικόνα 3-5.	Διαγράμματα διαμορφώσεων QPSK, 16-QAM, 64-QAM.....	37
Εικόνα 3-6.	Αλλαγή διαμόρφωσης με βάση την απόσταση.....	38
Εικόνα 3-7 .	Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση χρόνου TDD.....	39
Εικόνα 3-8.	Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση συχνότητας FDD.....	40
Πίνακας 3-1.	IEEE 802.16 vs 802.11.....	28
Πίνακας 3-2.	Βασικά πρότυπα IEEE 802.16.....	31
Πίνακας 3-3.	Θετικά και αρνητικά των κατηγοριών υπηρεσιών QoS.....	42
Εικόνα 4-1.	Δίκτυα EPON ως backhaul σε δίκτυα WiMAX 802.16.....	45

Εικόνα 4-2.	WE-Bridge.....	47
Εικόνα 4-3.	Λογική της αρχιτεκτονικής του WE-Bridge.....	48
Εικόνα 4-4.	Δομή πλαισίου IEEE 802.16 TDD.....	51
Εικόνα 4-5.	Ροή αίτησης και απόδοσης εύρους ζώνης.....	53
Πίνακας 4-1.	Σύγκριση QoS μεταξύ 802.16, EPON και WEN.....	51
Εικόνα 5-1.	Ανερχόμενη κίνηση OLT-ONUs.....	59
Εικόνα 5-2.	Ανερχόμενη κίνηση BS-SSs.....	60
Εικόνα 5-3.	Ανερχόμενη κίνηση WEN.....	61
Εικόνα 5-4.	Μορφή αρχείου Output.txt.....	62
Εικόνα 5-5.	Κώδικας για το γέμισμα ουράς κάθε ONU.....	63
Εικόνα 5-6.	Μορφή πίνακα throughput_x για ONU που έχει SSs.....	63
Εικόνα 5-7.	Μηχανισμός υπολογισμού οριζόντων.....	65
Εικόνα 5-8.	Πίνακας Respond.....	66
Εικόνα 5-9.	Χρήση πίνακα Respond.....	67
Εικόνα 5-10.	Αποστολή Report μηνύματος.....	68
Εικόνα 5-11.	Ουρά OLT.....	68
Εικόνα 5-12.	Αξιοποίηση καναλιού.....	69
Εικόνα 5-13.	Αξιοποίηση καναλιού.....	70
Εικόνα 5-13.	Ρυθμοαπόδοση.....	70
Εικόνα 5-14.	Μέση καθυστέρηση πακέτου.....	71
Εικόνα 5-15.	Ρυθμός απόρριψης πακέτων.....	72
Εικόνα 5-16.	Μέση καθυστέρηση πακέτων.....	72
Εικόνα 5-17.	Μέση καθυστέρηση πακέτων για κανάλια 1:5.....	73
Εικόνα 5-18.	Μέση καθυστέρηση πακέτων για κανάλια 1-5 και SS 1-10.....	73
Εικόνα 5-19.	Ρυθμοαπόδοση δικτύου.....	74
Εικόνα 5-20.	Μέση καθυστέρηση πακέτων για ONU=5 και ONU=10.....	75

Πίνακας 5-1.	Χαρακτηριστικά προσομοίωσης.....	71
Εικόνα 6-1.	Ποιότητα υπηρεσιών QoS.....	77

1

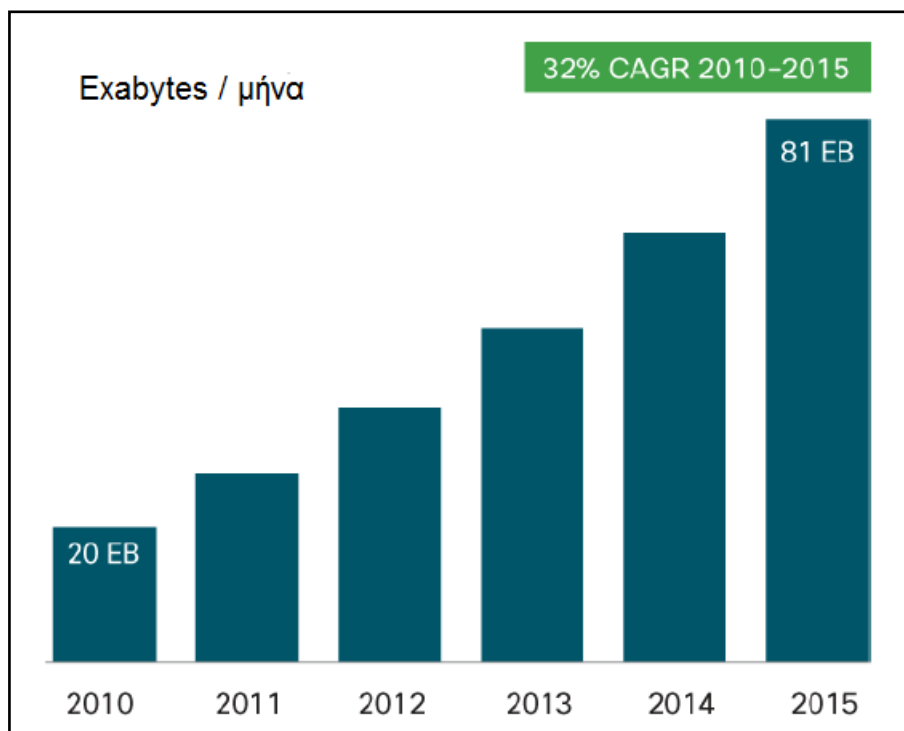
Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια της δεκαετίας του 1990, είναι μια περίοδος που χαρακτηρίστηκε από την «επανάσταση του internet». Μια περίοδος όπου όλο και περισσότεροι άνθρωποι συνδέονταν στο Διαδίκτυο σε καθημερινή βάση ενώ παράλληλα το περιεχόμενο του Διαδικτύου εμπλουτιζόταν καθημερινά. Σήμερα, μόνο λίγα χρόνια μετά, η σύνδεση στο internet δεν είναι μια απλή υπηρεσία, αλλά αποτελεί βασικό τρόπο επικοινωνίας. Η αύξηση αυτή του Διαδικτύου σχετίζεται άμεσα με τις όλο και περισσότερες υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες που πέρα από την απλή αναζήτηση δεδομένων και ειδήσεων, συμπεριλαμβάνουν βίντεο, μουσική, διαδραστική επικοινωνία, κοινωνική δικτύωση κ.α. Για την παροχή όλων αυτών των υπηρεσιών, νέες τεχνολογίες και νέα δίκτυα αναπτύχθηκαν με στόχο την ευρυζωνική πρόσβαση στους καταναλωτές.

1.1 Διανύοντας την Zettabyte εποχή

Η Cisco ανέπτυξε τη μελέτη Cisco VNI Forecast ως μέσο εκτίμησης της μελλοντικής ανάπτυξης στην παγκόσμια διακίνηση δεδομένων IP. Παρουσιάζει στοιχεία σε χρονικό ορίζοντα πέντε χρόνων και παρακάτω μελετάμε τις βασικές εκτιμήσεις της μέχρι και το έτος 2015 [1].

Μπαίνοντας στην zettabyte εποχή η ετήσια παγκόσμια κίνηση IP θα φτάσει το όριο **zettabyte** (966 exabyte ή σχεδόν το 1 zettabyte) μέχρι το τέλος του 2015. Δηλαδή το 2015, η παγκόσμια κίνηση IP θα φτάσει 966 exabytes ετησίως ή 80,5 exabytes τον μήνα όπως βλέπουμε και στην εικόνα 1-1. Η παγκόσμια κίνηση IP έχει αυξηθεί πάνω από οκτώ φορές τα τελευταία 5 χρόνια, και θα τετραπλασιαστεί στην πενταετία 2010-2015 σύμφωνα με τις προβλέψεις. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της (compound annual growth rate - CAGR) είναι 32%. Το 2015, το ισοδύναμο gigabyte όλων των ταινιών που έγινε ποτέ, θα διασχίζει το παγκόσμιο διαδίκτυο κάθε 5 λεπτά και τα παγκόσμια δίκτυα internet θα παραδίδουν 7,5 petabytes κάθε 5 λεπτά.



Εικόνα 1-1. Παγκόσμια κίνηση σε Exabytes/μήνα μέχρι το 2015

Θα υπάρχουν 6 εκατομμύρια νοικοκυριά σε όλο τον κόσμο που θα παράγουν διαδικτυακή κυκλοφορία πάνω από ένα terabyte ανά μήνα, από μόλις μερικές εκατοντάδες χιλιάδες νοικοκυριά το 2010 ενώ πάνω από 20 εκατομμύρια νοικοκυριά θα παράγουν μισό terabyte ανά μήνα. Ο αριθμός των συσκευών που συνδέονται σε δίκτυα IP, θα είναι διπλάσιος του παγκόσμιου πληθυσμού και θα υπάρχουν δύο δικτυακές συσκευές ανά κάτοικο όταν το 2010 υπήρχε μία. Με την αύξηση στις συσκευές και τις δυνατότητες αυτών, η κίνηση IP ανά κάτοικο θα φτάσει τα 11 gigabytes το 2015, από 3 gigabytes ανά κάτοικο του 2010.

Ένα ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό της κίνησης στο διαδίκτυο προέρχεται από συσκευές που δεν είναι υπολογιστές (**non-PC**). Το 2010, μόνο το 3% της παγκόσμιας κίνησης αντιστοιχεί σε non-PC συσκευές, ένα ποσοστό που το 2015 θα αυξηθεί στο 13%. Η κυκλοφορία που προέρχεται από υπολογιστές θα αυξηθεί με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 33%, όταν οι τηλεοράσεις, τα tablets και τα smartphones θα έχουν ρυθμούς ανάπτυξης κυκλοφορίας του 101%, 216% και 144% αντίστοιχα. Η κίνηση των ασύρματων συσκευών θα υπερβαίνει την κίνηση των ενσύρματων συσκευών όπου το 2015 οι ενσύρματες συσκευές θα αντιπροσωπεύουν το 46% της κίνησης IP, όταν οι ασύρματες και κινητές συσκευές θα αντιπροσωπεύουν το 54%. Το 2010, οι ενσύρματες συσκευές αντιπροσώπευαν την πλειονότητα της κίνησης IP με χρήση 63%. Η κίνηση κατά τις ώρες υψηλής κίνησης θα αυξηθεί πέντε φορές το 2015, ενώ η μέση κυκλοφορία θα αυξηθεί τέσσερις φορές. Κατά την διάρκεια της μέσης κυκλοφορίας η κίνηση θα είναι ισοδύναμη με 200 εκατομμύρια χρήστες να κάνουν λήψη βίντεο υψηλής ευκρίνειας συνεχώς. Ενώ κατά την διάρκεια της υψηλής κυκλοφορίας θα είναι ίση με 500 εκατομμύρια χρήστες. Τα πέντε βασικά σημεία για την κίνηση στα επόμενα χρόνια είναι τα εξής:

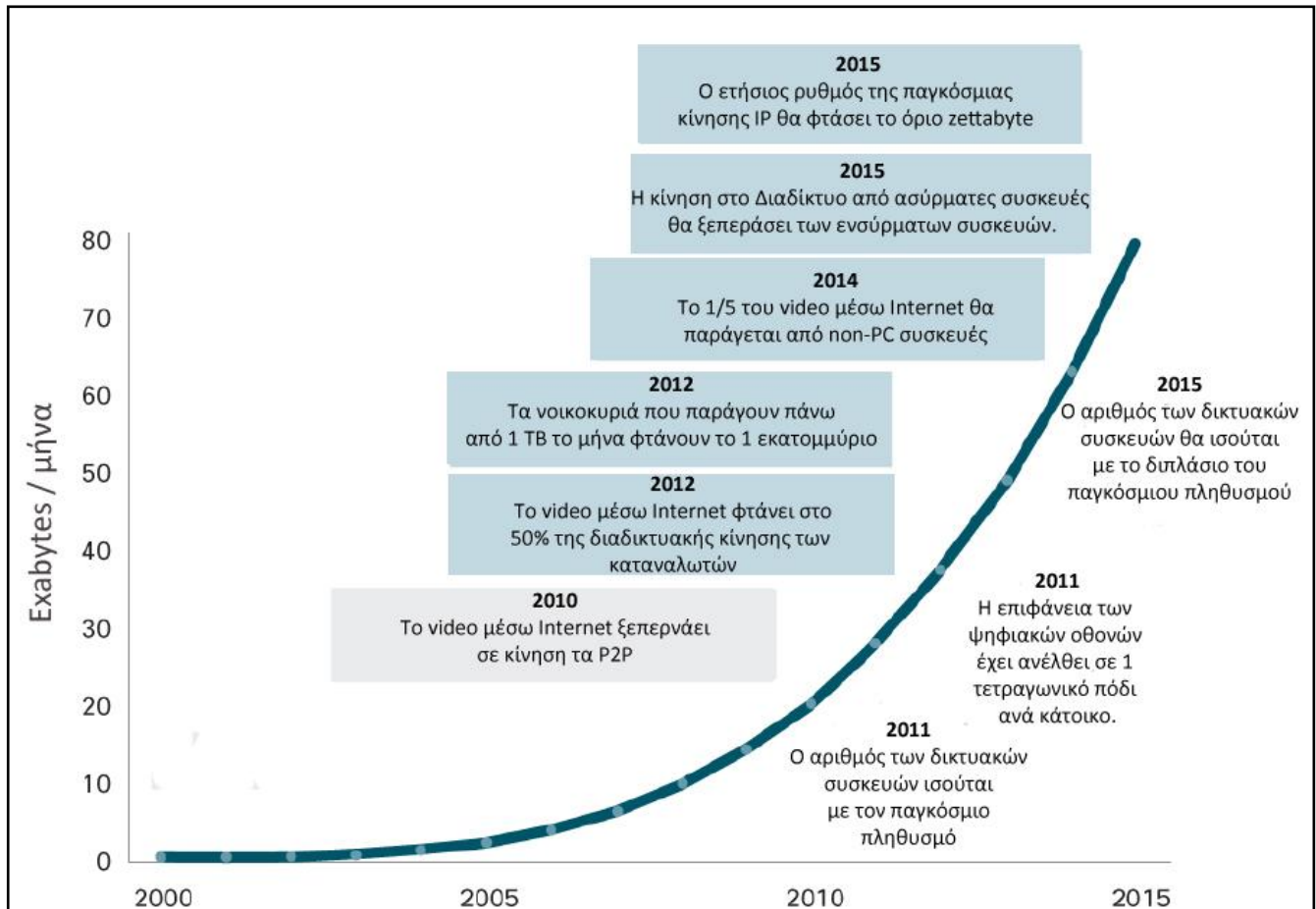
- i. 2012: το βίντεο μέσω Internet θα ξεπεράσει το 50 τοις εκατό της διαδικτυακής κυκλοφορίας των καταναλωτών.
- ii. 2012: Ο αριθμός των νοικοκυριών που παράγουν διαδικτυακή κυκλοφορία πάνω από 1 terabyte ανά μήνα θα φθάσει το ένα εκατομμύριο.
- iii. 2014: Το ένα πέμπτο της διαδικτυακής κυκλοφορίας για βίντεο θα προέρχεται από τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα, και άλλες non-PC συσκευές.
- iv. 2015: η κίνηση στο διαδίκτυο από τις ασύρματες συσκευές θα ξεπεράσει τον όγκο της κίνησης από τις ενσύρματες συσκευές.
- v. 2015: Ο ετήσιος ρυθμός εκτέλεσης της παγκόσμιας κίνησης IP θα φτάσει το όριο zettabyte (966 exabytes).

Τα τρία βασικά σημεία για την παραγωγή της κίνησης στα επόμενα χρόνια είναι τα εξής:

- i. 2011: Στο τέλος του έτους υπάρχουν περισσότερες συσκευές δικτύου από τους ανθρώπους στη γη.
- ii. 2011: Η επιφάνεια των ψηφιακών οθονών έχει ανέλθει σε 1 τετραγωνικό πόδι ανά κάτοικο.

- iii. 2015: Θα υπάρξουν διπλάσιες δικτυωμένες συσκευές από ότι οι άνθρωποι στη γη.

Τα σημεία για την κίνηση στο πέρασμα των χρόνων φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα:

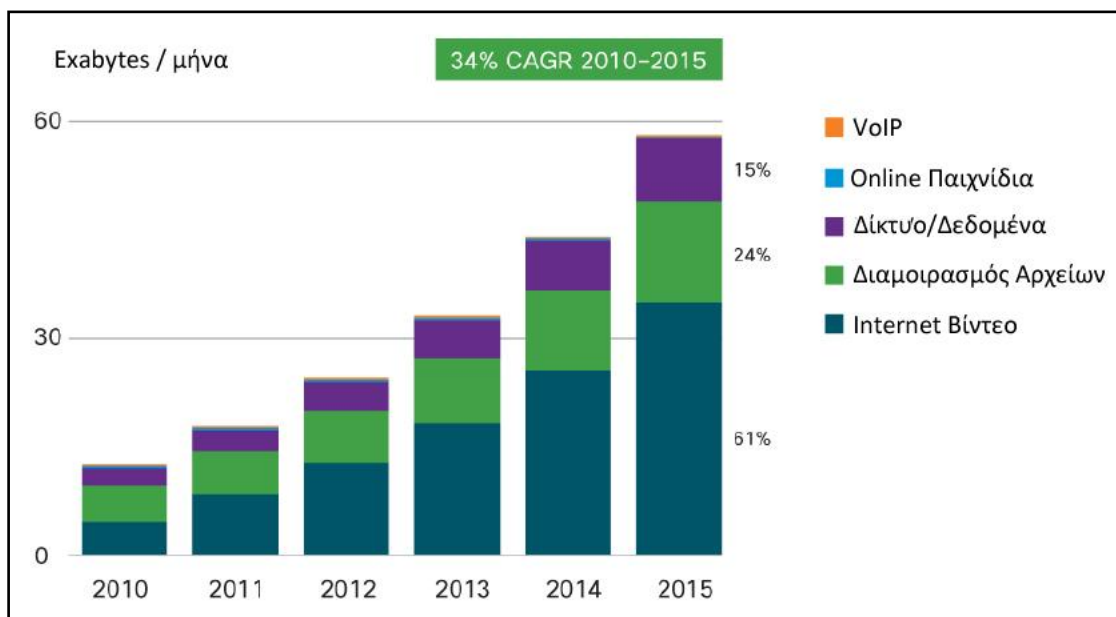


Εικόνα 1-2. Η κίνηση στο πέρασμα των χρόνων

1.2 Διακίνηση δεδομένων

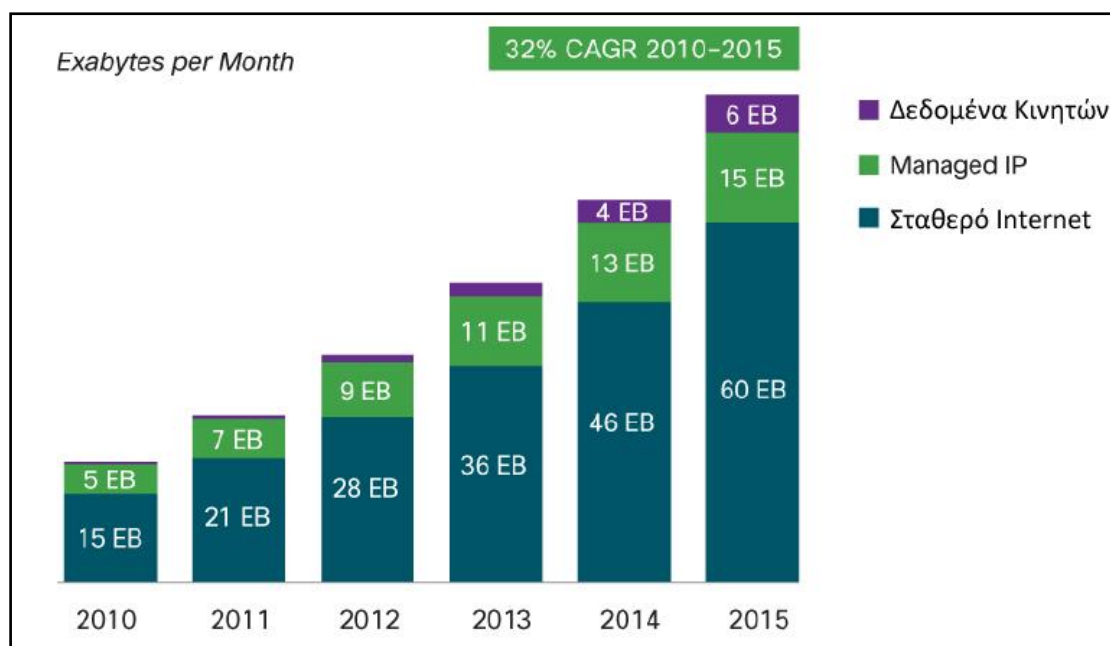
Η παγκόσμια διακίνηση δεδομένων βίντεο στο Internet ξεπέρασε την κυκλοφορία των δικτύων peer-to-peer (P2P) το 2010, και φέτος το βίντεο στο διαδίκτυο θα αντιπροσωπεύει ποσοστό πάνω του 50% της κυκλοφορίας των καταναλωτών. Όπως αναμενόταν, από το 2010 η P2P κυκλοφορία δεν είναι πλέον το μεγαλύτερο είδος κίνησης του διαδικτύου για πρώτη φορά σε 10 χρόνια. Η

χρήση της υπηρεσίας διαδικτυακού βίντεο ήταν στο 40% το 2010 και θα φτάσει το 50% στο τέλος του 2012 όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-3. Το άθροισμα όλων των μορφών βίντεο (τηλεόραση, βίντεο μετά από ζήτηση (Video on Demand - VoD), στο Διαδίκτυο, και P2P) θα συνεχίσει να είναι περίπου στο 90% της παγκόσμιας κίνησης των καταναλωτών μέχρι το 2015. Η υπηρεσία Video-on-Demand θα τριπλασιαστεί μέχρι το 2015 και θα είναι ισοδύναμη με 3 δισεκατομμύρια DVD, ανά μήνα. Επίσης τα υψηλής ευκρίνειας βίντεο μετά από ζήτηση έχουν ήδη ξεπεράσει σε ζήτηση τα βίντεο απλής ευκρίνειας και υπολογίζεται ότι μέχρι το 2015 το 77% της υπηρεσία βίντεο μετά από ζήτηση θα προέρχεται από την ζήτηση για υψηλή ευκρίνεια.



Εικόνα 1-3. Exabytes / μήνα για υπηρεσίες διαδικτύου

Συνολικά, **τα δεδομένα της κινητής** (mobile data traffic) θα αυξηθούν 26 φορές μεταξύ 2010 και 2015. Η κίνηση για mobile data θα αυξηθεί με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης το 92%, φθάνοντας τα 6,3 exabytes ανά μήνα μέχρι το 2015. Επίσης θα αυξηθεί τρεις φορές πιο γρήγορα από ό,τι της σταθερής κίνησης IP. Το παγκόσμιο ποσοστό του συνόλου των IP για τα δεδομένα αυτά ήταν 1%, και θα είναι 8% το 2015. Έτσι η κίνηση για σταθερά δίκτυα προβλέπεται να είναι 60 exabytes από τα 80.5 και 6.3 για τα κινητά ανά μήνα. Χωρίζεται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1-4. Παγκόσμια κίνηση σε Exabytes/μήνα

Γεωγραφικά, η IP κίνηση αυξάνεται ταχύτερα στη Λατινική Αμερική, τη Μέση Ανατολή και την Αφρική. Η κυκλοφορία στην Λατινική Αμερική αυξάνεται με μέσο ετήσιο ρυθμό 50%. Ακολουθεί ο πίνακας με τους περιφερειακούς ρυθμούς ανάπτυξης:

Περιφερειακοί Ρυθμοί Ανάπτυξης		
Περιφέρεια	Exabytes/μήνα	CAGR
Βόρεια Αμερική	22	30%
Δυτική Ευρώπη	19	32%
Ασία και Ειρηνικός	17	35%
Ιαπωνία	5	27%
Λατινική Αμερική	4.7	48%
Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη	3.7	39%
Μέση Ανατολή και Αφρική	2	52%

Πίνακας 1-1. Περιφερειακοί Ρυθμοί Ανάπτυξης

2

Οπτικά Δίκτυα

Από την κατασκευή της πρώτης οπτικής ίνας χαμηλής απώλειας, από την Corning Glass, το 1970 ένα όραμα γεννήθηκε για μία καθολική επικοινωνία, εξ' ολοκλήρου οπτική, από ερευνητές, φορείς παροχής υπηρεσιών, καθώς και το ευρύ κοινό. Αρχίζοντας κατά τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα τεράστιες ποσότητες των οπτικών ινών αναπτύχθηκαν τελικά σε όλο τον κόσμο [2]. Αρχικά, ίνα χρησιμοποιήθηκε σε point-to-point συνδέσεις μετάδοσης ως άμεσο υποκατάστατο για το χαλκό. Ίνες γυαλιού ήταν και είναι το ιδανικό μέσο λόγω των πολλών ανωτέρων ιδιοτήτων τους όπως:

- i. μεγαλύτερο εύρος ζώνης
- ii. χαμηλές απώλειες
- iii. χαμηλό βάρος
- iv. μικρές διαστάσεις
- v. δύναμη και ευελιξία,

- vi. θωράκιση έναντι του θορύβου και της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής
- vii. ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής πληροφορίας
- viii. αντοχή στη διάβρωση

Παρά το γεγονός ότι όλες αυτές οι ιδιότητες καθιστούν την ίνα ένα τεχνολογικό θαύμα, ίνες δεν χρησιμοποιήθηκαν στα δίκτυα μέχρι να συνδεθούν μεταξύ τους με μία σωστά δομημένη αρχιτεκτονική. Ένα οπτικό δίκτυο είναι ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με συνδέσεις μετάδοσης που είναι οπτικές ίνες από άκρη σε άκρη, και σε μια αρχιτεκτονική που έχει σχεδιαστεί για να εκμεταλλεύεται τα μοναδικά χαρακτηριστικά των ινών. Τα περισσότερα από τα συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σήμερα, συμπεριλαμβανομένων και πολλών ειδικευμένων δικτύων, όπως η καλωδιακή τηλεόραση και το κινητό τηλέφωνο, έχουν οπτική ίνα σε κάποιο σημείο της σύνδεσής τους ωστόσο, αυτό δεν τα κάνει καθαρά οπτικά δίκτυα. Σε αρχιτεκτονικές υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούνται δίκτυα που αποτελούνται τόσο από οπτικές όσο και από ηλεκτρονικές συσκευές. Συνεπώς ο όρος οπτικό δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη ένα καθαρά οπτικό δίκτυο από άκρη σε άκρη, αλλά σίγουρα μπορεί να περιλαμβάνει και ηλεκτρονικά μέρη.

2.1 Γιατί οπτικά δίκτυα

Ενώ η οπτική και η φωτονική τεχνολογία προχωρούσε, οι εφαρμογές για point-to-point μεταδόσεις είχαν ήδη εξελιχθεί αρκετά. Για παράδειγμα, στα πρώτα χρόνια της εμφάνισης των οπτικών ινών ήταν σαφές πως με την εισαγωγή πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) στις υπάρχουσες ίνες η χωρητικότητα ενός συνδέσμου ινών θα μπορούσε να αυξηθεί στο πολλαπλάσιο με ελάχιστο κόστος. Ωστόσο, ήταν μόνο στις αρχές της δεκαετίας του 2000 όταν οπτική τεχνολογία είχε ωριμάσει αρκετά ώστε να χρησιμοποιηθεί για την εμπορική ανάπτυξη και χρήση [2].

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, το οπτικό δίκτυο ήταν ακόμα ένα αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης. Νέες οπτικές και φωτονικές συσκευές βρίσκονταν σε φάση ανάπτυξης και ενσωματώθηκαν σε πειραματικά δίκτυα. Αλλά τα πλήρη δίκτυα πολλαπλού μήκους κύματος οπτικής μετάδοσης, μεταγωγής και πρόσβασης χρηστών ήταν ακόμα στην έρευνα και σε στάδιο ανάπτυξης. Εκείνη την εποχή η προώθηση των τεχνολογιών για τη δικτύωση ήταν έντονη, αλλά η ζήτηση για τη φαινομενικά απεριόριστη χωρητικότητα των δικτύων αυτών ήταν ουσιαστικά ανύπαρκτη. Στα επόμενα χρόνια όμως η αύξηση των χρηστών και των αναγκών σε

εύρος ζώνης έκανε την οπτική δικτύωση ως την τεχνολογία που είναι ικανή να πληροί τις ανάγκες αυτές. Έτσι η ζήτηση για τα εν λόγω δίκτυα τελικά δεν άργησε να πραγματοποιηθεί. Με χαμηλού κόστους ευρυζωνικές υπηρεσίες να προσφέρονται στο ευρύ κοινό, η ζήτηση για εφαρμογές βασισμένες στο διαδίκτυο αυξάνεται συνεχώς.

Κατασκευαστές εξοπλισμού και τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι υπηρεσιών, για εμπορικούς σκοπούς, εντάχθηκαν στην ανάπτυξη της οπτικής τεχνολογίας κάνοντας έτσι τις μελέτες πράξη. Η εστίαση της κοινότητας δικτύωσης έχει τώρα μετατοπιστεί προς την οργάνωση, τον έλεγχο, τη τυποποίηση και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Μια τάση που αντικατοπτρίζει την ωρίμανση της οπτικής τεχνολογίας καθώς και την αναγνώριση ότι το οπτικό δίκτυο είναι ένας ιδανικός τρόπος υποστήριξης των σημερινών και των μελλοντικών αναγκών σε ζήτηση. Τα δίκτυα αυτά έχουν διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη μείωση του κόστους των επικοινωνιών, την προώθηση του ανταγωνισμού μεταξύ των φορέων και των παρόχων υπηρεσιών, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ζήτηση για νέες υπηρεσίες.

Εκτός από την προώθηση των τεχνολογιών και της ζήτησης, μια σειρά από άλλες πρόσφατες εξελίξεις συμβάλλουν στην επέκταση και την αποτελεσματικότητα των οπτικών δικτύων. Το ένα είναι η επιτάχυνση της απομάκρυνσης της συμφόρησης στο **τελευταίο μίλι** του δικτύου διανομής, που είναι η γέφυρα μεταξύ του δικτύου υψηλής ταχύτητας οπτικών ινών και των τελικών χρηστών. Αυτό το δίκτυο διανομής όταν αποτελείται από συνεστραμμένα ζεύγη χάλκινων καλωδίων, παρέχεται αρκετά περιορισμένο εύρος ζώνης στους συνδρομητές του τοπικού τηλεφωνικού κέντρου.

Εφ' όσον η συμφόρηση στο τελευταίο μίλι είναι παρούσα τότε τα αποτελέσματα της βελτίωσης στο υπόλοιπο δίκτυο εξακολουθούν να είναι αρκετά περιορισμένα. Η εισαγωγή της ευρυζωνικής πρόσβασης σε οικιακούς πελάτες από τους φορείς παροχής υπηρεσιών είναι ένα βήμα προς την άρση αυτών των περιορισμών. Ωστόσο, η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή DSL (Digital Subscriber Line) παρέχει απλά μία καλή βελτιστοποίηση. Όμως ο απόλυτος τρόπος για την εξάλειψη της συμφόρησης, έτσι ώστε το δίκτυο να παραμένει αποτελεσματικό καθώς η ζήτηση για εύρος ζώνης μεγαλώνει, είναι η άμεση πρόσβαση στο δίκτυο οπτικών ινών από τον τελικό χρήστη. Δηλαδή τεχνολογία εγκατάστασης **Fiber to the home (FTTH)**.

Παρά το γεγονός ότι το FTTH αναπτύχθηκε πριν από πολλά χρόνια, δεν κατάφερε να εδραιωθεί για διάφορους λόγους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους καθώς και την απουσία των υπηρεσιών που θα παρουσίαζαν ενδιαφέρον για τους πελάτες. Κάτι που σήμερα όμως έχει αλλάξει, λόγω της διάδοσης των ευρυζωνικών υπηρεσιών του Internet. Έτσι το μέλλον της ανάπτυξης των δικτύων πρόσβασης οπτικών ινών βρίσκεται στο κομμάτι των τελικών χρηστών. Αυτό τονώνει αναμφίβολα το ενδιαφέρον για νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες που θα επωφεληθούν από την υψηλή ταχύτητα πρόσβασης και με τη σειρά τους θα παράγουν ζήτηση για

περισσότερο εύρος ζώνης. Δυστυχώς το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης οπτικής ίνας στον κόσμο υπό χρησιμοποιείται λόγω του τελευταίου μιλίου συμφόρησης. Όταν κατορθωθεί να αλλάξει αυτό θα είναι ένα κβαντικό άλμα για την κίνηση του δικτύου, με αποτέλεσμα υψηλής απόδοσης οπτικά δίκτυα.

2.2 Ανάγκες για μεγαλύτερη χωρητικότητα και FTTH

Στον αιώνα μας η δικτύωση και η μεταφορά δεδομένων, απαιτούν ταχύτητες πρόσβασης των τελικών χρηστών στο δίκτυο από 100Mb/s έως και 1 GB/s, ενώ την ίδια στιγμή τα δίκτυα κορμού πρέπει διαχειρίζονται χωρητικότητα της τάξης των Pb/s με τους κεντρικούς κόμβους να προσφέρουν throughput αρκετών εκατοντάδων Tb/s. Οι κεντρικοί κόμβοι πρέπει όχι μόνο να υποστηρίζουν δυναμικές διασυνδέσεις αλλά και να προσφέρουν δυνατότητα μεταφοράς με μεταβλητούς ρυθμούς. Επιπλέον στο δίκτυο κορμού θα πρέπει να παρέχεται **εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών** (Quality of Service - QoS) ενώ θα πρέπει να υποστηρίζονται δικτυακές λύσεις που επιτρέπουν στατιστική πολυπλεξία των δικτυακών πόρων. Τα παραπάνω αποτελούν ένα πολυσύνθετο και πολύπλοκο σύνολο απαιτήσεων.

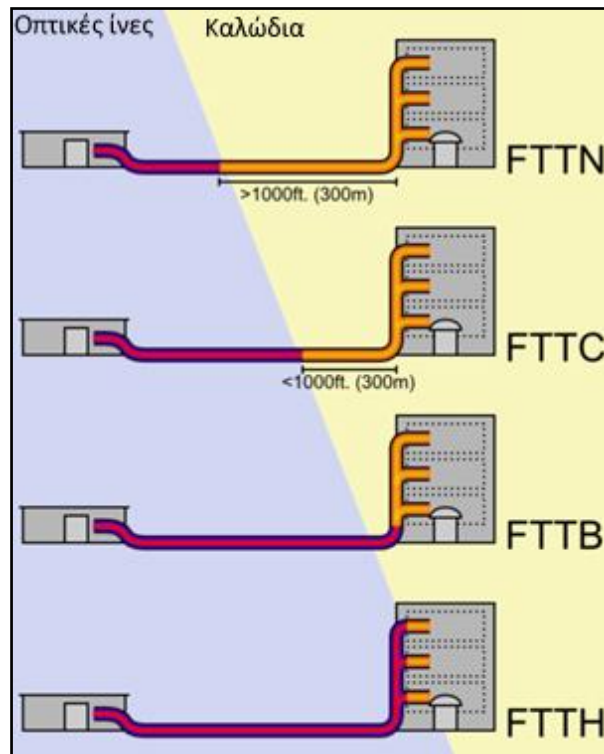
Είναι ευρέως γνωστό ότι η ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι απαιτήσεις για όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης στον τελικό χρήστη αλλά και η παροχή όλο και πιο απαιτητικών υπηρεσιών, έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε μια ραγδαία αύξηση της ανάγκης για μεγαλύτερη χωρητικότητα τόσο στα δίκτυα πρόσβασης όσο και στα κεντρικά δίκτυα κορμού. Στα πρώτα οι ανάγκες αυτές έχουν ήδη αρχίσει να καλύπτονται από τα δίκτυα οπτικών ινών που φθάνουν μέχρι τον τελικό πελάτη (Fiber To The x - FTTx), δίκτυα που έχουν ήδη ξεκινήσει και εγκαθίστανται τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα και μπορούν να προσφέρουν όχι μόνο την χωρητικότητα που απαιτείται σήμερα, αλλά επιπλέον παρέχουν την δυνατότητα μελλοντικής επέκτασής τους σε ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης .

Ο γενικός όρος Fiber to the x (οπτική ίνα μέχρι το x) ή FTTx περιγράφει κάθε αρχιτεκτονική δικτύου που χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για να αντικαταστήσει ολόκληρο ή μέρος του τοπικού βρόχου που χρησιμοποιείται για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών [3]. Οι τέσσερις τεχνολογίες όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-1 που ανήκουν στην οικογένεια FTTx είναι οι εξής:

- i. Fiber to the Node ή Fiber to the Neighborhood (FTTN)
- ii. Fiber to the Curb (FTTC)
- iii. Fiber to the Building (FTTB)

iv. Fiber to the Home (FTTH)

(η διαφορά ανάμεσα στο FTTN και το FTTC είναι μικρή, και συχνά το δεύτερο θεωρείται υποκατηγορία του πρώτου)



Εικόνα 2-1. FTTx

Σήμερα, η οπτική ίνα με πρόσβαση στο χρήστη, το λεγόμενο Fiber-to-the-Home (FTTH), γίνεται μια πραγματικότητα σε πολλές περιοχές του κόσμου, με περισσότερα από 8 εκατομμύρια σπίτια να έχουν ήδη συνδεθεί, ακολουθώντας μια εκθετική αύξηση. Όπως είναι ευρέως αποδεκτό, το FTTH είναι η τεχνολογία που θα είναι σε θέση να υποστηρίξει την επερχόμενη διαδραστική πολυμεσική τεχνολογία. Η προηγμένη point-to-multipoint τεχνολογία με τα **παθητικά οπτικά δίκτυα** (Passive Optical Networks - PON) χρησιμοποιείται για την εφαρμογή FTTH. Η πρώτη γενιά PONS (Broadband PON, Gigabit PON, Ethernet PON) προσφέρουν εύρος ζώνης GB/s το οποίο συνήθως επιμερίζεται μεταξύ μερικών δεκάδων χρηστών.

Στο μέλλον, τα PONS θα είναι διαθέσιμα (με τον ίδιο τρόπο όπως εμείς τώρα χρησιμοποιούμε ψηφιακή συνδρομητική γραμμή, DSL) και θα υπάρξει μεγαλύτερη χωρητικότητα, μικρότερο κόστος, νεότερες υπηρεσίες και Quality of Service (QoS). Οι ερευνητικές δραστηριότητες εστιάζονται στις πιθανές επεκτάσεις των υφιστάμενων GPON και EPON δεδομένου ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να υποστούν περιορισμούς εύρους ζώνης στο μέλλον, μιας και δεν κάνουν χρήση του

πλήρους οπτικού εύρους ζώνης. Οι υψηλές αρχικές κεφαλαιουχικές δαπάνες που απαιτούνται στις νέες FTTH υλοποιήσεις αναγκάζει τους σχεδιαστές του δικτύου και τους φορείς να εγγυώνται στο μέλλον την πλήρη χρήση των υποδομών και την αποφυγή συμφορήσεων σε οποιαδήποτε αύξηση της ζήτησης.

Έτσι, ο κύριος στόχος είναι η μείωση του συνολικού κόστους του δικτύου πρόσβασης με παράλληλη εξασφάλιση εύρους ζώνης ανά χρήστη, με οπτική υποδομή, κατά την οποία θα μπορεί να υποστηρίξει και άγνωστες μελλοντικές ανάγκες. Αυτό έχει οδηγήσει την έρευνα στην προσέγγιση PONS με σχεδόν απεριόριστο εύρος ζώνης. Το χρονοδιάγραμμα για τη μετάβαση των σημερινών συστημάτων PON προς την κατεύθυνση αυτή μπορεί να είναι εξαιρετικά μεταβλητή, ίσως σε ένα χρονικό διάστημα 2-8 ετών, αν και σίγουρα καθοριστικό ρόλο παίζουν οι απρόβλεπτες απαιτήσεις των χρηστών.

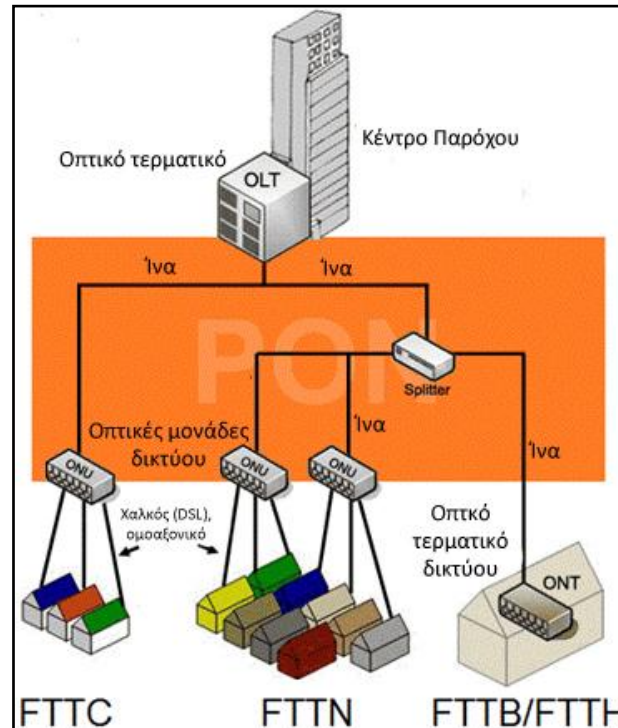
Η Wavelength Division Multiplexing (WDM) τεχνολογία προσφέρει μια νέα διάσταση για την αναβάθμιση σε δίκτυα με αυξημένο εύρος ζώνης. Μια μελλοντική εφαρμογή της επόμενης γενιάς PONS μπορεί να προβλεφθεί μόνο αν χρησιμοποιηθούν νέες αποδοτικές τεχνικές και συσκευές. Η WDM πρόσβαση μπορεί να είναι είτε WDM PON είτε υβριδική TDM/WDM-PON. Η τελευταία προσφέρει ένα υψηλότερο επίπεδο διακριτότητας και επεκτασιμότητας, έτσι ώστε να αποτελεί την κύρια έρευνα. Ωστόσο, υπάρχουν και οι σχετικοί φραγμοί στη μετανάστευση προς την κατεύθυνση WDM στο FTTH όπως το αυξημένο κόστος των WDM στοιχείων στον τομέα της πρόσβασης και της διαθεσιμότητας των τεχνολογικών λύσεων για να εξασφαλιστεί η ισχυρή και απεριόριστη χρήση του διευρυμένου PON.

2.3 Ethernet passive optical networks EPON

2.3.1 Εισαγωγή στα παθητικά οπτικά δίκτυα PON

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (Passive Optical Network - PON) είναι ένα point-to-multipoint δίκτυο το οποίο τροφοδοτεί με ρεύμα οπτικούς διαχωριστές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών μέσω οπτικής ίνας. Τα PON φέρνουν την οπτική ίνα πολύ κοντά στον τελικό χρήστη. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2.2 ανάλογα με το που τερματίζει το PON το σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως FTTN, FTTC, FTTB ή FTTH.

Ένα PON αποτελείται από ένα **οπτικό τερματικό** (Optical Line Terminal - OLT) που βρίσκεται στον φορέα παροχής υπηρεσιών και έναν αριθμό οπτικών μονάδων δικτύου (Optical Network Units - ONUs) κοντά στους τελικούς χρήστες. Ένα PON μειώνει την ποσότητα των ινών και του εξοπλισμού που απαιτούνται από αρχιτεκτονικές point-to-point.



Εικόνα 2-2. Παθητικό οπτικό Δίκτυο PON

Τα κατερχόμενα σήματα (downstream) εκπέμπονται σε κάθε χρήστη μοιραζόμενα μία οπτική ίνα. Χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση για την παρεμπόδιση υποκλοπής. Τα ανερχόμενα σήματα (upstream) συνδυάζονται χρησιμοποιώντας ένα multiple access protocol, συνήθως Time Division Multiple Access (TDMA). Μέσω των OLT παρέχονται στους ONU οι χρονοθυρίδες για upstream επικοινωνία.

Οι γενικές κατηγορίες των PON είναι οι ακόλουθες:

- APON (ATM Passive Optical Network)
- BPON (Broadband PON)
- EPON or GEPON (Ethernet PON)
- GPON (Gigabit PON)
- 10G-EPON (10 Gigabit Ethernet PON)
- RFoG (RFOverGlass)
- WDM PON

Εμείς θα ασχοληθούμε κυρίως με το παθητικά οπτικά δίκτυα ethernet EPON.

2.3.2 EPON

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) θεωρήθηκαν ελκυστικά λόγω της μακροζωίας τους, το χαμηλό λειτουργικό κόστος και το τεράστιο εύρος ζώνης. Όπως αναφέρθηκε υπάρχουν διαφορετικά είδη PONs . Το asynchronous transfer mode (ATM) PON (APON) και το broadband PON (BPON) είναι ATM-based συστήματα. Όπως επίσης και το Gigabit PON (GPON), το οποίο αποτελεί και τον διάδοχο του BPON [4].

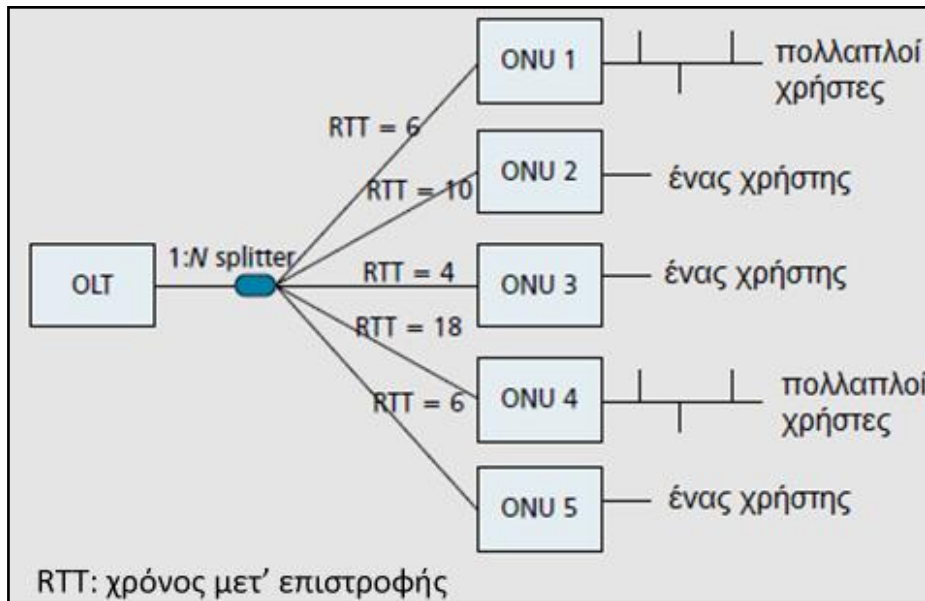
Πρόσφατα, **Ethernet PONS** (EPONs), τυποποιήθηκαν από την IEEE ως 802.3ah Ethernet στο πρώτο μίλι (Ethernet in the First Mile - EFM) και έχουν προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον ακαδημαϊκό κόσμο. Στόχος των EPONs είναι ο συνδυασμός χαμηλού κόστους εξοπλισμού με την απλότητα του Ethernet και το χαμηλό κόστος υποδομής οπτικών ινών PONS. Τα EPONs είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την παροχή επαρκούς εύρους ζώνης για τις νέες υπηρεσίες όπως η βιντεοδιάσκεψη, διανομή παιχνιδιών, IP τηλεφωνία, και video on demand.

Το EPON είναι ένα point-to-multipoint οπτικό δίκτυο πρόσβασης, χαμηλού κόστους, χωρίς ενεργά στοιχεία σε μία διαδρομή από έναν κεντρικό διανομέα έως ένα προορισμό. Σκοπός του EPON είναι παροχή full-services access network (FSAN) με συγχωνευμένα δεδομένα data, video και voice μέσω του ίδιου οπτικού συστήματος πρόσβασης. Το EPON μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες τοπολογίες όπως bus, ring και tree. Η πιο ευρέως διαδεδομένη τοπολογία είναι η τοπολογία δέντρου.

Τα δομικά στοιχεία του EPON είναι:

- i. Optical Line Terminal (OLT)
- ii. Passive Optical Splitter
- iii. Optical Network Unit (ONU)

Το **OLT** παρέχει τη διεπαφή μεταξύ του PON και της υπηρεσίας που παρέχει υπηρεσίες δικτύου. Ενώ το **ONU** αποτελεί το τελευταίο μέρος του PON και είναι η διεπαφή του χρήστη με το οπτικό δίκτυο. Το OLT συνήθως συνδέεται με τα κεντρικά δίκτυα ενώ τα ONUs μπορεί να είναι στο πεζοδρόμιο (FTTC), σε κτήρια (FTTB) ή ακόμη και σε σπίτια (FTTH) όπως βλέπουμε και στην εικόνα 2-2. Στην εικόνα 2-3 συνδεδεμένοι σε κάθε ONU μπορεί να είναι πολλαπλοί τελικοί χρήστες ή gateway devices που να παρέχουν υπηρεσίες broadband video, voice ή data. Βλέπουμε επίσης ότι ο **χρόνος μετ' επιστροφής** (Round Trip Time – RTT) κάθε ONU μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την απόστασή τους από τον OLT.



Εικόνα 2-3. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου EPON με έναν OLT και πέντε ONUs, ο κάθε ένας με διαφορετικό RTT.

2.3.3 TDM/WDM

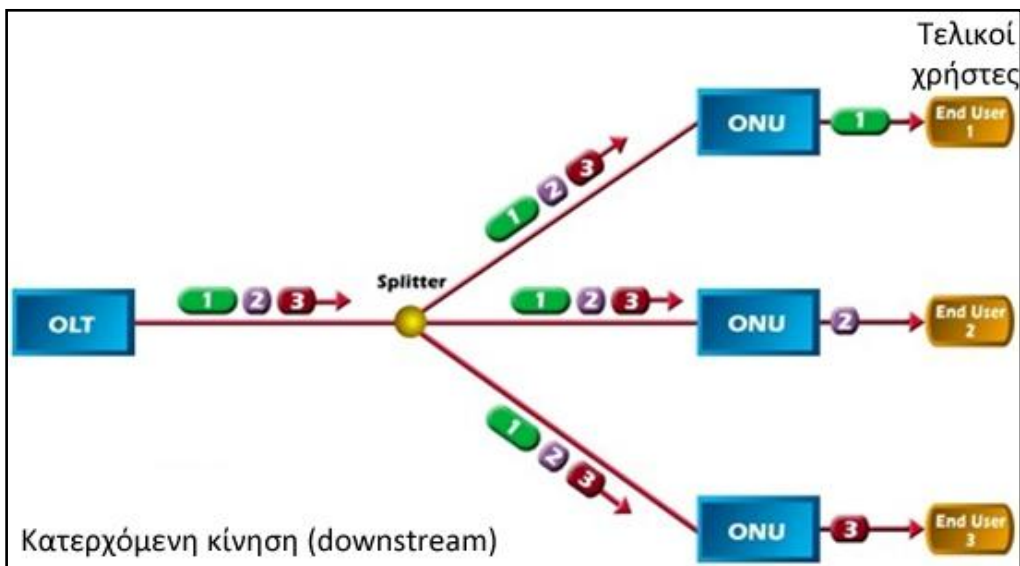
Μέχρι πριν λίγα χρόνια τα EPONs ήταν μονοκαναλικά συστήματα. Δηλαδή, η υποδομή οπτικών ινών μεταφέρει ένα μόνο μήκος κύματος στο κανάλι για downstream και ένα μόνο για upstream. Στην upstream κατεύθυνση (δηλαδή από τον συνδρομητή στο δίκτυο), το εύρος ζώνης καναλιού είναι κοινό σε όλους τους EPON κόμβους χρησιμοποιώντας **πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου** (time division multiplexing –TDM). Με αυτό τον τρόπο, μόνο ένας πομποδέκτης κοινού τύπου για μονό κανάλι χρησιμοποιείται σε όλο το δίκτυο, με αποτέλεσμα την απλοποιημένη λειτουργία του δικτύου και την ευκολότερη συντήρησή του. Τα EPONs με TDM είναι μια ελκυστική λύση για την παροχή μεγαλύτερου εύρους ζώνης με ένα οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Δεδομένου του διαρκώς αυξανόμενου αριθμού χρηστών και της ζήτησης σε εύρος ζώνης, η TDM πολυπλεξία σε EPONs μπορεί να αποτελεί μία οικονομική λύση αλλά σίγουρα χρειάζεται να αναβαθμιστεί προκειμένου να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις. Σαφώς, μία προσέγγιση είναι να αυξηθεί η ταχύτητα στη γραμμή του TDM EPONs. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι EPON πρέπει να αναβαθμιστούν με αντικατάσταση των πομποδεκτών με άλλους πιο γρήγορους, με αποτέλεσμα μια δαπανηρή αναβάθμιση. Εναλλακτικά, τα

TDM EPONs μπορούν να αναβαθμιστούν με πολλαπλά κανάλια μήκους κύματος στην εγκατάσταση οπτικών ινών τα λεγόμενα **WDM EPONs**.

Σε αντίθεση με την TDM προσέγγιση για μεγαλύτερη ταχύτητα , τα WDM EPONs παρέχουν μια ποιοτική αναβάθμιση στο μήκος κύματος των καναλιών τα οποία μπορούν να λειτουργούν με διαφορετικό ρυθμό. Αξιοσημείωτο είναι ότι μπορούν μόνο οι κόμβοι EPON με υψηλότερες απαιτήσεις κίνησης να αναβαθμιστούν χρησιμοποιώντας WDM, ενώ οι κόμβοι EPON με χαμηλότερη κίνηση να παραμένουν αμετάβλητοι. Έτσι, το WDM επιτρέπει στο δίκτυο αναβαθμίσεις οι οποίες θα πραγματοποιούνται σταδιακά όσο οι απαιτήσεις θα αυξάνονται, προσθέτοντας WDM σε κόμβους TDM με αυξημένες ανάγκες σε εύρος ζώνης.

Τα EPONs (όπως και τα PONs γενικότερα) μπορεί να έχουν οποιαδήποτε τοπολογία κατάλληλη για δίκτυα πρόσβασης. Συνήθως, τα EPONs χρησιμοποιούν τοπολογία δέντρου με το κέντρο να βρίσκεται στη ρίζα και τους συνδρομητές που είναι συνδεδεμένοι στους κόμβους να αποτελούν τα φύλλα του δέντρου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-4. Στη ρίζα του δέντρου είναι ένα οπτικό τερματικό (OLT), που βρίσκεται συνήθως στο κέντρο του παρόχου υπηρεσιών ίντερνετ (Internet Server Provider – ISP). Το EPON συνδέει το OLT σε πολλαπλές οπτικές μονάδες δικτύου ONUS μέσα από ένα 1: N οπτικό splitter /combiner.



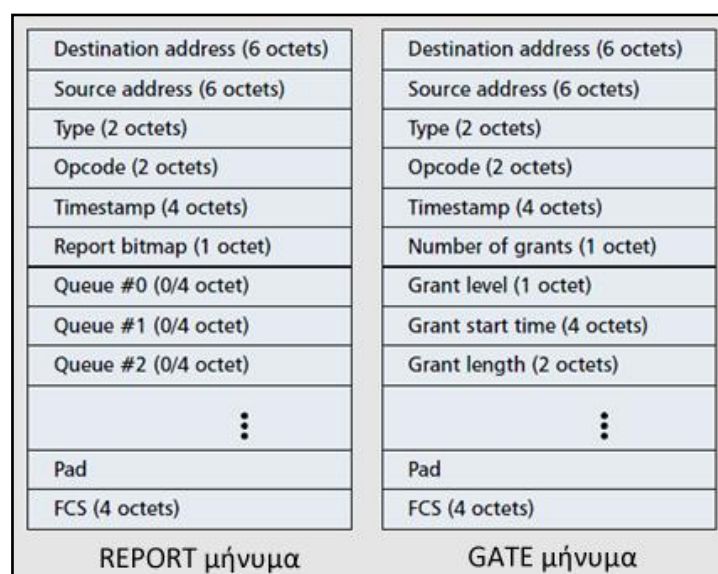
Εικόνα 2-4. Κατερχόμενη κίνηση στο οπτικό δίκτυο

Κάθε ONU λαμβάνει δεδομένα από τους χρήστες του. Για την υποστήριξη διαφοροποιημένων υπηρεσιών κάθε ONU μπορεί να χρησιμοποιεί ουρές προτεραιότητας, μία για κάθε κίνηση. Γενικά, ο μετ 'επιστροφής χρόνος (RTT)

μεταξύ του OLT και των ONU είναι διαφορετικός για κάθε ένα όπως είδαμε και στην εικόνα 2-3. Λόγω του οπτικού splitter/combiner, ο OLT είναι σε θέση να μεταδίδει τα δεδομένα σε όλους τους ONUs όταν πρόκειται για downstream κίνηση όπως βλέπουμε και στην εικόνα 2-4. Όσο για το upstream, τα ONU αδυνατούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους απευθείας. Αντ' αυτού, κάθε ONU είναι σε θέση να στείλει δεδομένα μόνο στο OLT. Έτσι, όσον αφορά το downstream ενός EPON, το δίκτυο μπορούμε να το θεωρήσουμε ως point-to-multipoint και όσο για το upstream μπορεί να θεωρηθεί ως multipoint-to-point. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, το αρχικό Ethernet MAC πρωτόκολλο δεν λειτουργεί σωστά, δεδομένου ότι στηρίζεται σε broadcast μέσο. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός διαίτησίας Multipoint Control Protocol (MPCP).

2.3.4 MPCP

Για να αυξήσουμε την χρήση του εύρους ζώνης στο upstream, το OLT με την χρήση κάποιας πολιτικής εκχωρεί δυναμικά μια μεταβλητή χρονοθυρίδα σε κάθε ONU με βάση τις απαιτήσεις του σε bandwidth . Για να διευκολυνθεί η διαδικασία το **MPCP** (Multi-Point Control Protocol) χρησιμοποιείται σε κάθε ONU. Εκτός από τις βασικές λειτουργίες (registration, υπολογισμός RTT κτλ.) το MPCP παρέχει το συντονισμό στη διαβίβαση των δεδομένων από το ONU στο OLT. Το MPCP, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-5, χρησιμοποιεί δύο τύπους μηνυμάτων για τη διευκόλυνση της διαίτησίας: το REPORT και το GATE. Κάθε ONU έχει μια σειρά από ουρές, ενδεχομένως με κάποια προτεραιότητα, που έχουν πλαίσια Ethernet έτοιμα για αποστολή στο OLT. Το REPORT μήνυμα που χρησιμοποιείται από ένα ONU αναφέρει τις απαιτήσεις εύρους ζώνης στο OLT [6].



Εικόνα 2-5. Τα μηνύματα ελέγχου του MPCP για την διαχείριση του εύρους ζώνης

Με τη λήψη ενός **REPORT** μηνύματος, το OLT το περνά στον **DBA** (Dynamic Bandwidth Allocation) αλγόριθμο του. Ο αλγόριθμος παράγει πρόγραμμα μετάδοσης για όλα τα ONUs ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση στο κανάλι. Ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: με inter-ONU προγραμματισμό και με intra-ONU προγραμματισμό. Ο inter-ONU προγραμματισμός διαιτητεύει τις μεταδόσεις των διαφόρων ONUs, ενώ ο intra-ONU προγραμματισμός διαιτητεύει τις μεταδόσεις των διαφόρων ουρών προτεραιότητας σε κάθε ONU.

2.3.5 Inter-ONU και Intra-ONU

Υπάρχουν δύο πιθανές εφαρμογές. Είτε ο inter-ONU προγραμματισμός να υλοποιείται στο OLT, και το κάθε ONU να εκτελεί τους δικούς του intra-ONU προγραμματισμούς, είτε και οι δύο inter-ONU και intra-ONU να εφαρμόζονται στο OLT [5]. Μετά την εκτέλεση του DBA αλγορίθμου, το OLT μεταδίδει μηνύματα **GATE** ώστε να παραχωρήσει δικαιώματα μετάδοσης σε κάθε ONU. Κάθε GATE μήνυμα μπορεί να υποστηρίξει έναν αριθμό από δικαιώματα μετάδοσης. Κάθε δικαίωμα μετάδοσης περιέχει την ώρα έναρξης μετάδοσης και το μήκος μετάδοσης (όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-5). Κάθε ONU ενημερώνει το τοπικό ρολόι του με βάση το timestamp που περιέχεται στο δικαίωμά του για μετάδοση. Έτσι, κάθε ONU είναι σε θέση να αποκτήσει και να διατηρήσει συγχρονισμό με τους υπόλοιπους κόμβους.

Κάθε ONU στέλνει πλαίσια Ethernet κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του παραθύρου σύμφωνα με τον αντίστοιχο intra-ONU προγραμματισμό. Το παράθυρο μετάδοσης μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλά πλαίσια Ethernet αλλά ο κατακερματισμός πακέτων δεν επιτρέπεται. Ως συνέπεια, εάν το επόμενο πακέτο δεν ταιριάζει στο τρέχων παράθυρο μετάδοσης, θα πρέπει να αναβληθεί για την επόμενη φορά. Πρέπει να επισημάνουμε ότι το MPCP δεν καθορίζει κάποιο συγκεκριμένο DBA αλγόριθμο. Το MPCP παρέχει απλώς ένα πλαίσιο για την εφαρμογή των διαφόρων αλγορίθμων DBA.

2.3.6 Online και Offline Scheduling

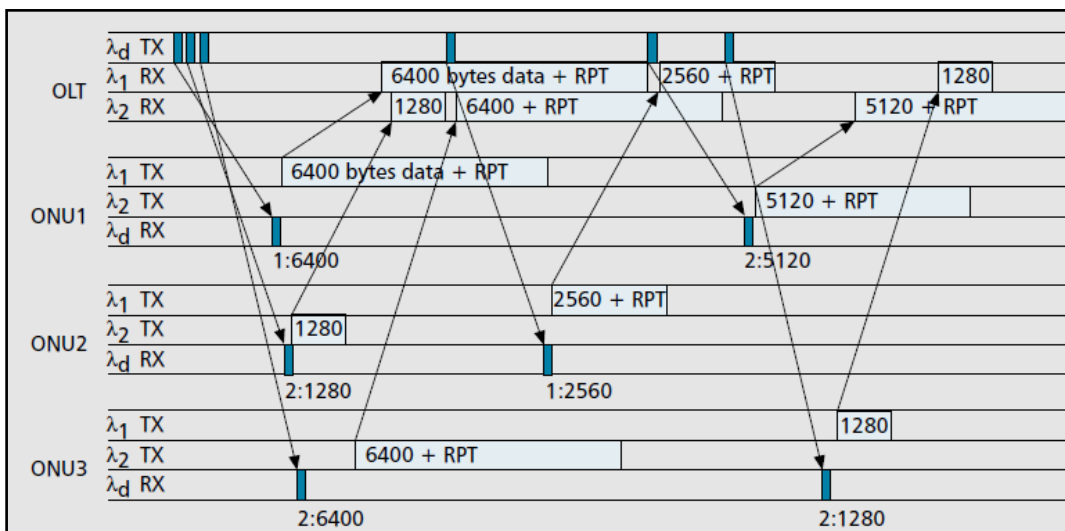
Σε συμβατικά TDM μονοκαναλικά EPONs ο DBA αλγόριθμος περιορίζεται στον προγραμματισμό της upstream ροής στο κανάλι με ενιαίο μήκος κύματος, ενώ στα

WDM EPONs ο προγραμματισμός πρέπει να λάβει υπόψη του τα διαφορετικά μήκη κύματος που υποστηρίζουν τα ONUs. Με άλλα λόγια, σε WDM EPONs οι αποφάσεις δεν έχουν να κάνουν μόνο με το πότε και για πόσο χρονικό διάστημα θα μεταδίδει το ONU αλλά και σε ποιο κανάλι με μήκος κύματος θα γίνει η μετάδοση. Σχετικά με αυτό εισάγουμε και δύο ακόμα τρόπους για τα WDM EPONs: online και offline scheduling [4].

Online scheduling

Σε ένα online scheduler το OLT λαμβάνει αποφάσεις με βάση τα αιτήματα και χωρίς σφαιρική γνώση των απαιτήσεων εύρους ζώνης όλων των ONUs. Μια βασική online scheduling πολιτική για το WDM EPON είναι να προγραμματίσει την μετάδοση για ένα ONU στο κανάλι μήκους κύματος που υποστηρίζεται από το ONU και είναι πιο άμεσα διαθέσιμο, γνωστή η πολιτική και ως next available supported channel (NASC). Το ποσό του εύρους ζώνης που θα χορηγηθεί σε ένα ONU μπορεί να καθορίζεται σε συνάρτηση με οποιονδήποτε από τους υπάρχοντες μηχανισμούς DBA για μονοκαναλικά EPONs.

Η παρακάτω εικόνα 2-6, απεικονίζει το online scheduling για ένα EPON με τρία ONUs, που χρησιμοποιεί πολιτική NASC. Κάθε ONU έχει ένα κανάλι για την κατερχόμενη κίνηση και δύο κανάλια για την ανερχόμενη. Τα ONU ενημερώνουν μέσω του μηνύματος REPORT το OLT για το μέγεθος της πληροφορίας που θέλουν να μεταδώσουν. Μόλις το OLT λάβει το REPORT απευθείας προγραμματίζει την μετάδοση της ανερχόμενης κίνησης του αντίστοιχου ONU και του στέλνει το μήνυμα GATE που περιλαμβάνει σε ποιο κανάλι και για πόσο θα μεταδώσει το ONU.

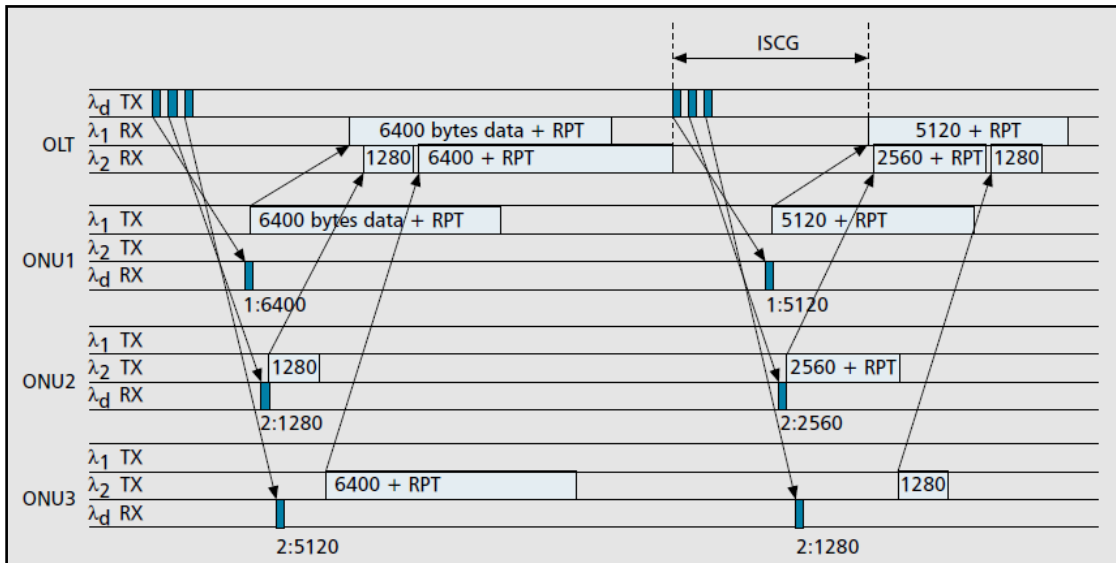


Εικόνα 2-6. Online scheduling για ένα EPON με τρία ONUs

Offline scheduling

Σε ένα offline scheduler τα ONUs προγραμματίζονται να μεταδώσουν αφού το OLT λάβει όλα τα MPCP REPORT μηνύματα από όλα τα ONUs, επιτρέποντας του έτσι να λάβει υπόψη του τις τρέχουσες απαιτήσεις εύρους ζώνης όλων των ONUS κατά τον προγραμματισμό. Δεδομένου ότι ένας offline scheduler παίρνει αποφάσεις για τον προγραμματισμό όλων των ONUs, όλα τα REPORT μηνύματα τα οποία επισυνάπτονται στο τέλος της ροής των δεδομένων θα πρέπει να έχουν παραληφθεί. Αυτό απαιτεί ότι ο αλγόριθμος προγραμματισμού εκτελείται αφού ο OLT λάβει το Report και του τελευταίου ONU. Λόγω αυτού, ένα κενό μεταξύ των κύκλων προγραμματισμού εισάγεται, στο οποίο αναφερόμαστε ως inter-scheduling cycle gap (ISCG) και παρουσιάζεται και στην εικόνα 2-7.

Ο offline scheduling προγραμματισμός των WDM EPONs μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους αλγόριθμους για να αποφασιστεί τελικά με ποιά σειρά θα μεταδώσει κάθε κόμβος. Ένα παράδειγμα είναι ο least flexible job (LFJ) ο οποίος δίνει προτεραιότητα στα ONUs που υποστηρίζουν το μικρότερο αριθμό καναλιών.



Εικόνα 2-7. Offline scheduling για ένα EPON με τρία ONUs

2.3.7 Grant Sizing

Είδαμε στα προηγούμενα υποκεφάλαια πως χρησιμοποιείται ο μηχανισμός του MPCP για την ζήτηση και την απόδοση εύρους ζώνης καθώς και πως το OLT παίρνει

τις αποφάσεις με βάση online ή offline προγραμματισμό. Το Grant Sizing είναι το πόσο τελικά εύρος ζώνης θα αποδοθεί σε κάθε ONU (δηλαδή για πόσο χρόνο θα μεταδώσει) και μπορεί να χωριστεί σε πέντε μεγάλες κατηγορίες [6]:

- Fixed Bandwidth Allocation
- Gated Bandwidth Allocation
- Limited Bandwidth Allocation
- Limited with excess distribution
- Credit-Based Bandwidth Allocation

Fixed Bandwidth Allocation:

Το Fixed Bandwidth Allocation (FBA) χορηγεί σε κάθε ONU ένα σταθερό χρονικό διάστημα για κάθε κύκλο εξυπηρέτησης. Ένας κύκλος εξυπηρέτησης ορίζεται ως ο χρόνος που περνάει μέχρι κάθε ONU να μεταδώσει τα δεδομένα του στο OLT. Το FBA λειτουργεί ακριβώς όπως το Time Division Multiple Access (TDMA), στο οποίο η χρονοθυρίδα που θα μεταδώσει κάθε ONU έχει καθοριστεί εκ των προτέρων και αγνοείται το πραγματικό ποσοστό άφιξης κυκλοφορίας.

Από την στιγμή που δεν υπάρχει επιβάρυνση προγραμματισμού με βάση τα REPORT και GATE μηνύματα (για ζήτηση και απόδοση), το FBA είναι απλό στην εφαρμογή του. Από την άλλη πλευρά όμως, ένα ONU θα καταλάβει το κανάλι για τις χρονοθυρίδες που του αναλογούν, ακόμη και αν δεν υπάρχουν πλαίσια για τη μετάδοση, με αποτέλεσμα να αυξάνει την καθυστέρηση για όλα τα πλαίσια Ethernet των υπολοίπων ONUs. Έτσι πολλά δεδομένα αργούν να μεταδοθούν, κάτι που οδηγεί σε ανεπαρκή αξιοποίηση του upstream καναλιού δεδομένων το οποίο χαραμίζεται με ONUs που δεν έχουν πληροφορία να μεταδώσουν όταν είναι η σειρά τους.

Gated Bandwidth Allocation:

Στο Gated bandwidth allocation το χρονικό διάστημα που θα μεταδώσει ένα ONU είναι όσο ζήτησε με βάση την ουρά του χωρίς κάποιον περιορισμό. Αυτή η τεχνική παρέχει χαμηλό μέσο όρο καθυστέρησης αλλά δεν παρέχει επαρκή έλεγχο για την εξασφάλιση ισότητας μεταξύ των ONUs.

Limited Bandwidth Allocation:

Το Limited bandwidth allocation (LBA), παρακολουθεί την κίνηση με τον μηχανισμό REPORT/GATE. Το πόσο χρόνο θα μεταδώσει ο ONU οριοθετείται από το B_{max} , το οποίο είναι ο μέγιστος χρόνος που έχει ορίσει το OLT ότι μπορεί να μεταδώσει και έχει καθοριστεί μετά από υπολογισμούς. Συνεπώς όταν το μέγεθος της ουράς που αναφέρεται είναι λιγότερο από αυτό το όριο, το OLT ικανοποιεί το αίτημα εύρους ζώνης του ONU, διαφορετικά χορηγείται το B_{max} .

Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι λόγω της δυναμικότητας του LBA το πότε θα μεταδώσει κάθε ONU και για πόσο, αλλάζει κάθε φορά. Χρησιμοποιώντας το B_{max} αποτρέπεται η μονοπωλιακή χρήση του upstream καναλιού από ένα μόνο ONU. Οι υπολογισμοί για το B_{max} αν δεν είναι επαρκείς (δηλαδή ότι ζητάει κάθε ONU να είναι μεγαλύτερο του B_{max}) τότε υπάρχει πρόβλημα και χρειάζεται επαναυπολογισμός.

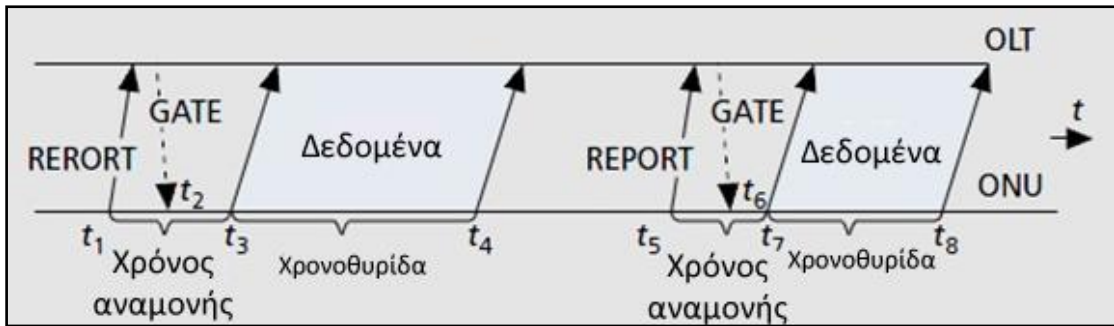
Limited with Excess Distribution

Το Limited with Excess Distribution δεν χρησιμοποιεί σταθερό B_{max} αλλά μεταβλητό ανάλογα με την ζήτηση για εύρος ζώνης. Όπως και το Limited bandwidth allocation αποτρέπει την μονοπωλιακή χρήση του καναλιού αλλά επιπλέον βελτιώνει την πολυπλεξία.

Τα ONUs που συμμετέχουν στο δίκτυο χωρίζονται σε δύο μέρη: στα underloaded και στα overloaded ONUs. Τα underloaded ONUs είναι αυτά που η δήλωσή τους για ανάγκες σε bandwidth είναι μικρότερες από το B_{max} . Ενώ τα overloaded ONUs είναι αυτά που οι ανάγκες τους είναι μεγαλύτερες. Έτσι τα overloaded ONUs κάνουν χρήση του περισευόμενου bandwidth των underloaded.

Credit-Based Bandwidth Allocation

Χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό REPORT/GATE κάθε ONU περιμένει κάποιο χρονικό διάστημα από την στιγμή που έστειλε το REPORT μήνυμα μέχρι τελικά να στείλει τα πλαίσια που δήλωσε. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-8 όταν το ONU στείλει στο OLT το REPORT μήνυμα, τότε δηλώνει μόνο τα πλαίσια που είχε στην ουρά μέχρι και την χρονική στιγμή t_1 στην οποία έστειλε το REPORT. Ως εκ τούτου τα πλαίσια που έφτασαν μεταξύ του t_1 και του t_3 (t_3 ο χρόνος που στέλνει τα δεδομένα, μόνο αυτά όμως που αιτήθηκε μέχρι το t_1) πρέπει να αιτηθούν για αποστολή την επόμενη φορά.



Εικόνα 2-8. Μηχανισμός REPORT/GATE με waiting time

Για να δοθεί μία λύση σε αυτό το πρόβλημα ο CBA λαμβάνει υπόψη τα πλαίσια που φτάνουν για μετάδοση κατά την διάρκεια του waiting time προσθέτοντας ένα credit στις απαιτήσεις κάθε ONU. Το bandwidth που αποδίδεται λοιπόν είναι το $B_{grant} = B_{queue} + C$ με το B_{queue} να είναι το αιτούμενο εύρος ζώνης μέχρι την χρονική στιγμή t_1 και το C να είναι το credit. Το credit μπορεί να είναι είτε κάτι σταθερό είτε κάτι μεταβλητό και χρησιμοποιείται για να μεταδοθούν τα πλαίσια (όλα ή ένα μέρος) που έφτασαν κατά το waiting time.

2.3.8 Quality of Service – QoS

Εκτός από την κατανομή εύρους ζώνης στην upstream επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων οπτικών κόμβων, είναι απαραίτητο για ένα ONU να παρέχει πολλαπλές υπηρεσίες σε διαφορετικούς τελικούς χρήστες. Μια πρακτική προσέγγιση των πολλαπλών υπηρεσιών είναι η κατηγοριοποίηση της κυκλοφορίας ενός ONU σε διαφορετικές τάξεις (QoS).

Η υψηλής προτεραιότητας κατηγορία είναι η **Expedited Forwarding (EF)**, η οποία είναι ευαίσθητη στις καθυστερήσεις και απαιτεί εγγυήσεις εύρους ζώνης. Η μεσαίας τάξης προτεραιότητα είναι η **Assured Forwarding (AF)**, η οποία δεν είναι ευαίσθητη στις καθυστερήσεις, αλλά απαιτεί εγγυήσεις εύρους ζώνης. Η χαμηλής προτεραιότητας τάξη είναι η **Best Effort (BE)**, που δεν είναι ούτε ευαίσθητη στις καθυστερήσεις ούτε απαιτεί εγγυήσεις εύρους ζώνης [6].

Τα ONUs ταξινομούν και ξεχωρίζουν την κίνηση τους σε διαφορετικές ουρές προτεραιότητας. Τα πλαίσια που ανήκουν σε διαφορετικές τάξεις περιέχονται στις αντίστοιχες ουρές προτεραιότητας τους. Όλες οι ουρές μοιράζονται το ίδιο buffer. Όταν ο buffer είναι γεμάτος, εισερχόμενα πλαίσια με μεγαλύτερη προτεραιότητα αντικαταστούν χαμηλότερης προτεραιότητας πλαίσια, ενώ τα εισερχόμενα χαμηλής

προτεραιότητας απορρίπτονται αμέσως. Η κατάσταση των πολλαπλών ουρών στα ONU αναφέρεται στο OLT μέσω του μηνύματος Report.

Κλείνοντας, τα EPONs προορίζονται όχι μόνο για να έχουν την καλύτερη best-effort κίνηση δεδομένων, αλλά επίσης, αναμένεται να μεταφέρουν φωνή και βίντεο που έχουν αυστηρές απαιτήσεις εύρους ζώνης και καθυστέρησης, καθώς και delay jitter sensitivity. Όπως είδαμε παραπάνω ο απλούστερος τρόπος για να διευκολυνθεί το QoS είναι να παρέχει διαφορετικές κατηγορίες κυκλοφορίας στην κίνηση και στις υπηρεσίες.

Τα πλαίσια των ουρών διαβιβάζονται σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Για παράδειγμα στην αυστηρή προτεραιότητα πρώτα εξυπηρετούνται τα πλαίσια με την υψηλή προτεραιότητα. Τα BE πλαίσια μπορούν να μεταδοθούν μόνο όταν οι άλλες δύο ουρές είναι άδειες. Δίνοντας διαφορετικό βάρος σε κάθε ουρά, τα υψηλής προτεραιότητας πλαίσια που φθάνουν στο waiting time μπορούν να αντικαταστήσουν τα χαμηλής προτεραιότητας ακόμα και αν αυτά μπήκαν στην σειρά πριν το waiting time. Π.χ. στην εικόνα 2-7 αν ένα πλαίσιο EF φθάσει κατά τη διάρκεια του waiting time (δηλαδή, από το t5 μέχρι t7) θα περάσει μπροστά από AF και BE πλαίσια, που έφτασαν νωρίτερα (δηλαδή, πριν από t5). Ως εκ τούτου, χαμηλότερης προτεραιότητας πλαίσια υποφέρουν από ανεξέλεγκτη αυξανόμενη καθυστέρηση ή ακόμα και απόρριψη.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο των οπτικών δικτύων αναλύσαμε την λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα αποτελούν την πύλη για την είσοδο μας στην ευρυζωνικότητα. Επικεντρωθήκαμε κυρίως στο ethernet PON που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας των οπτικών δικτύων με την απλότητα του ethernet. Μελετήσαμε την επικοινωνία και πώς επιλέγεται κάποια πολιτική διαιτησίας ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών για απόδοση ποιότητας υπηρεσιών.

Παρόλο όμως που η οπτική ίνα με το πέρασμα των χρόνων έχει έρθει πιο κοντά, μεγάλη είναι η συζήτηση και η έρευνα για το περίφημο τελευταίο μίλι. Οι έρευνες έχουν στραφεί στην αναζήτηση μίας αποδοτικής, οικονομικής και εύκολης στην εγκατάσταση λύσης. Έτσι το επόμενο βήμα ήταν η ανάπτυξη της ευρυζωνικότητας χρησιμοποιώντας ως μέσο τον αέρα. Στο επόμενο κεφάλαιο μελετάμε την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων.

3

Ασύρματα δίκτυα τύπου WiMAX

3.1 Εισαγωγή στο WiMAX 802.16

Όπως είδαμε και στην αρχή, μεγάλο μέρος των ερευνών εστιάζεται στο λεγόμενο τελευταίο μίλι. Με την κατάργηση, σε πολλές χώρες, των νομικών περιορισμών στο τηλεφωνικό σύστημα και το άνοιγμα της αγοράς, επιτρέπεται σε ανταγωνιστές της εδραιωμένης τηλεφωνικής εταιρίας να προσφέρουν υπηρεσίες τηλεφωνίας και πρόσβασης στο Internet με υψηλή ταχύτητα και εύρος ζώνης. Υπάρχει μεγάλη ζήτηση, ωστόσο το πρόβλημα είναι ότι η σύνδεση οπτικών ινών, ομοαξονικών καλωδίων, ή ακόμη και καλωδίων συνεστραμμένου ζεύγους κατηγορίας 5 σε εκατομμύρια σπίτια και επιχειρήσεις είναι ακριβή.

Την απάντηση έρχονται να δώσουν τα ευρυζωνικά δίκτυα. Η κατασκευή μίας μεγάλης κεραίας σε ένα λόφο έξω από τη πόλη και η εγκατάσταση κεραιών σε κτίρια πελατών είναι μία πολύ ευκολότερη και φτηνή λύση από ότι το σκάψιμο χαντακιών και το πέρασμα νέων καλωδίων. Οι ανταγωνίστριες εταιρείες τηλεπικοινωνιών ενδιαφέρονται ιδιαίτερα για την παροχή ασύρματης υπηρεσίας επικοινωνίας πολλών Megabit για φωνή, πρόσβαση στο Internet, βίντεο κατόπιν

αιτήσεως, online παιχνίδια κ.λπ. Παρόλα αυτά μέχρι πριν λίγα χρόνια κάθε φορέας επινοούσε το δικό του σύστημα, κάτι που οδήγησε στην έλλειψη προτύπων. Συνεπώς το υλικό και το λογισμικό δεν μπορούσαν να παραχθούν μαζικά, γεγονός που κρατούσε τις τιμές ψηλά και την αποδοχή χαμηλά. Η βιομηχανία κατάλαβε γρήγορα ότι το βασικό στοιχείο που έλειπε ήταν η ύπαρξη ενός προτύπου για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Ζητήθηκε λοιπόν από την IEEE να σχηματίσει μια επιτροπή, αποτελούμενη από άτομα του ακαδημαϊκού χώρου και στελέχη μεγάλων εταιριών, για να σχεδιαστεί τελικά το πρότυπο.

Ο επόμενος διαθέσιμος αριθμός στο χώρο αριθμοδότησης του 802 ήταν ο **802.16**. Η δουλειά άρχισε τον Ιούλιο του 1999 και το τελικό πρότυπο εγκρίθηκε τον Απρίλιο του 2002. Επισήμως το πρότυπο ονομάζεται **Worldwide Interoperability for Microwave Access** ή εν συντομία **WiMAX**. Έτσι αποκαλείται η τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης η οποία λειτουργεί με παρεμφερή τρόπο με το Wi-Fi, ωστόσο με πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια. Συγκεκριμένα, ενώ το Wi-Fi εξασφαλίζει εμβέλεια επικοινωνίας μέχρι 100 μέτρα, το WiMAX φθάνει περισσότερο από 35 χιλιόμετρα. Ωστόσο πολλοί προτιμούν την αναφορά του ως ασύρματο MAN ή ασύρματο τοπικό βρόχο.

Το WiMAX θα χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών ευρυζωνικής πρόσβασης στο Ιντερνέτ σε τελικούς χρήστες, με εξοπλισμό ιδιαίτερα εύκολο στην εγκατάσταση. Με τον ίδιο τρόπο που σήμερα εγκαθιστά κανείς στον υπολογιστή του μια κάρτα δικτύωσης Wi-Fi, μελλοντικά θα εγκαθιστά μια κάρτα WiMAX η οποία θα του επιτρέπει να χρησιμοποιήσει από τον οικιακό του χώρο (και όχι μόνο) τις ασύρματες υπηρεσίες που θα παρέχουν οι ISP (Internet Server Providers) [7].

Σημαντικά Πλεονεκτήματα:

Το WiMAX έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των σημερινών ασύρματων και ενσύρματων συνδέσεων όπως:

1) Νέα τεχνολογία με ολοένα αυξανόμενη υποστήριξη από τους κατασκευαστές αλλά και από την επιστημονική κοινότητα.

2) Αύξηση του ανταγωνισμού αφού ιδιωτικές εταιρείες θα έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν ανεξάρτητα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και υπηρεσιών Internet, με πολύ μεγάλη ευκολία, καθώς δεν απαιτείται η εγκατάσταση καλωδίων σε κάθε σημείο της χώρας.

3) Υποστήριξη backbone συνδέσεων και έξυπνων κεραιών

4) Ο συνδρομητής θα μπορεί να χρησιμοποιήσει τη σύνδεσή του από οπουδήποτε ακόμη και εν κινήσει μέσα στην πόλη ή και ολόκληρη τη χώρα. Κάτι

που δεν είναι εφικτό με τις σημερινές συνδέσεις ADSL, ούτε και με την τεχνολογία Wi-Fi, λόγω της περιορισμένης της εμβέλειας.

5) Σε αντίθεση με ένα ενσύρματο δίκτυο που θα χρειαζόταν πολλούς μήνες ή και χρόνια για να ολοκληρωθεί η εγκατάστασή του, ένα δίκτυο WiMAX που θα καλύπτει μια ευρεία περιοχή μπορεί να εγκατασταθεί σε λίγες μέρες.

6) Μετακομίζοντας σε άλλη περιοχή, ο συνδρομητής δεν θα χρειαστεί να κάνει ενεργοποίηση ευρυζωνικής σύνδεσης στον νέο του χώρο, όπως ισχύει για τις γραμμές ADSL. Αφού θα καλύπτεται από το ασύρματο σήμα του παρόχου υπηρεσιών WiMAX, μπορεί να αρχίσει άμεσα να χρησιμοποιεί τη σύνδεσή του.

7) Λόγω των υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, το WiMAX θα επιτρέπει επίσης την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων ή ακόμη και βιντεοκλήσεων τελευταίας γενιάς.

3.2 Γιατί 802.16 και όχι 802.11?

Το ερώτημα που ίσως γεννάται είναι γιατί να μην χρησιμοποιηθεί το 802.11 για ευρυζωνικά δίκτυα και να χρειάζεται ένα νέο πρότυπο; Υπάρχουν πολύ καλοί λόγοι για τη μη χρησιμοποίηση του 802.11, και κυρίως το ότι το 802.11 και το 802.16 λύνουν διαφορετικά προβλήματα.

Τα περιβάλλοντα στα οποία λειτουργούν τα δίκτυα 802.11 και 802.16 είναι παρόμοια σε μερικά σημεία, και κυρίως στο ότι σχεδιάστηκαν για την παροχή ασύρματων επικοινωνιών υψηλού εύρους ζώνης. Διαφέρουν όμως, σε βασικά σημεία όπως το ότι το 802.11 παρέχει υπηρεσίες εντός κτιρίων (και σε μικρή εμβέλεια εκτός) κάτι που σημαίνει ότι δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες των κινητών δικτύων. Δεν υποστηρίζουν μετανάστευση από κυψέλη σε κυψέλη ενώ αντιθέτως μεγάλο μέρος του 802.16 ασχολείται με την κινητικότητα. Επίσης προκειμένου να διατηρηθεί χαμηλό κόστος των πομποδεκτών στο 802.11 δεν χρησιμοποιείται πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία όπως στο 802.16.

Μέχρι σήμερα το Wi-Fi επιτρέπει την πρόσβαση στο Ιντερνέτ σε πολύ μικρή εμβέλεια γύρω από τα σημεία πρόσβασης, όπως σε αεροδρόμια, συνεδριακούς χώρους ή ξενοδοχεία. Το WiMAX θα είναι σε θέση να κάνει το ίδιο σε εμβέλεια ολόκληρης πόλης, τα κτήρια της οποίας θα καλύπτουν με το σήμα τους οι εταιρίες παροχής internet. Επειδή το 802.16 λειτουργεί σε ένα ολόκληρο τμήμα μίας πόλης, οι αποστάσεις που εμπλέκονται μπορεί να είναι αρκετά χιλιόμετρα, γεγονός που

σημαίνει ότι η ισχύς την οποία βλέπει ο σταθμός βάσης μπορεί να διαφέρει από σταθμό σε σταθμό.

Αυτή η διακύμανση επηρεάζει το λόγο σήματος προς θόρυβο, ο οποίος με τη σειρά του επιβάλλει πολλαπλές μεθόδους διαμόρφωσης. Επίσης η ανοιχτή επικοινωνία πάνω από μία πόλη σημαίνει ότι η ασφάλεια και η προστασία του απορρήτου είναι ουσιώδεις και υποχρεωτικές. Επιπλέον κάθε κυψέλη είναι πιθανό να έχει πολύ περισσότερους χρήστες από μια τυπική κυψέλη 802.11, και οι χρήστες αυτοί αναμένεται να χρησιμοποιούν πολύ περισσότερο εύρος ζώνης από ότι ένα τυπικός χρήστης 802.11. Για το λόγο αυτό χρειάζεται περισσότερο φάσμα απ' όσο μπορούν να παρέχουν οι ζώνες ISM, γεγονός που αναγκάζει το 802.16 να λειτουργεί στην υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων.

Η διαχείριση σφαλμάτων και η ποιότητα υπηρεσιών σε ένα δίκτυο 802.16 αποκτά μεγαλύτερη σημασία απ' ό,τι σε ένα ασύρματο κτιριακό δίκτυο. Αν και το 802.11 παρέχει κάποια υποστήριξη για κίνηση δεδομένων πραγματικού χρόνου, δεν σχεδιάστηκε πραγματικά για τηλεφωνία και βαριά χρήση πολυμέσων. Αντίθετα, το 802.16 υποστηρίζει πλήρως αυτές τις εφαρμογές, επειδή προορίζεται τόσο για οικιακή όσο και για εταιρική χρήση.

Συνοψίζοντας, το 802.11 σχεδιάστηκε σαν ethernet με δυνατότητα κίνησης, ενώ το 802.16 σχεδιάστηκε για να είναι κάτι σαν ασύρματη καλωδιακή τηλεόραση. Οι διαφορές αυτές είναι τόσο μεγάλες ώστε τα πρότυπα που προκύπτουν είναι πολύ διαφορετικά, επειδή προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν διαφορετικούς τομείς.

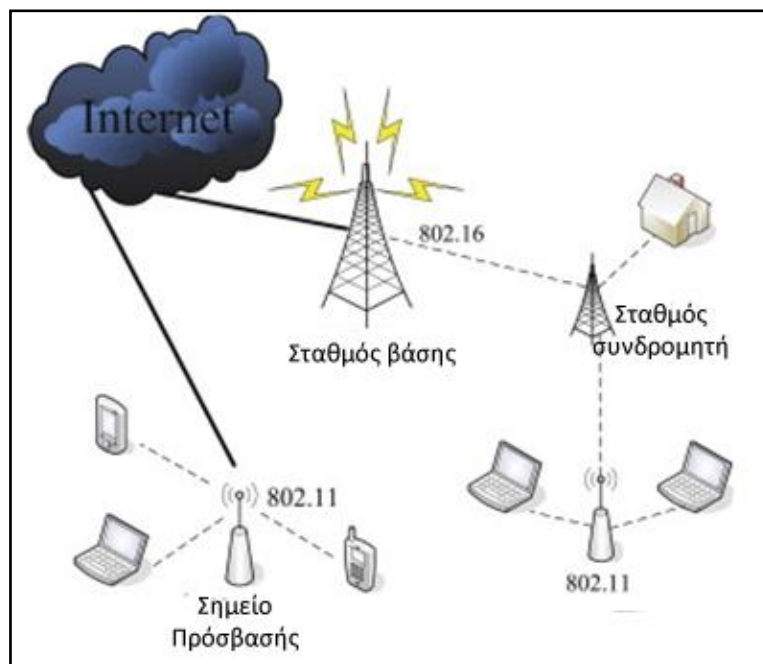
Παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα που δείχνει συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο ασύρματων τεχνολογιών:

IEEE 802.16 vs 802.11		
	802.11	802.16
Απόσταση	100m	7-10km, με εμβέλεια έως και 50km
Αριθμός χρηστών	μερικούς δεκάδες	χιλιάδες
Κάλυψη	Κτιριακή	Ολόκληρη πόλη, χρήση προηγμένων κεραιών
Απόδοση	54Mbps	>70Mbps
Καθυστερήσεις	0.8\ms	10\ms δεδομένου όμως ότι οι αποστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες και multipath
MAC	Ανταγωνισμός	Κεντρική διαχείριση
Duplexing	Ασύμμετρη TDD μόνο	TDD/FDD/HFDD συμμετρική και

		ασύμμετρη
QoS	Χωρίς εγγύηση καθυστέρησης και απόδοσης	Εγγυήσεις QoS
Διαφορετικότητα χρηστών	Όλοι οι χρήστες γίνονται αποδέκτες των ίδιων υπηρεσιών	Διαφορετικοί χρήστες μπορεί να έχουν διαφορετική εξυπηρέτηση υπηρεσιών
Ασφάλεια	WEP, WPA, WPA2	128-bit 3DES και 1024-bit RSA

Πίνακας 3-1. IEEE 802.16 vs 802.11

Κλείνοντας το υποκεφάλαιο με τις διαφορές μεταξύ 802.11 και WiMAX 802.16 θα πρέπει να πούμε ότι όπως αναφέραμε και νωρίτερα το κάθε ένα έχει τον δικό του προσανατολισμό. Ουσιαστικά απαντάμε στο γιατί υπήρχε η ανάγκη ενός καινούργιου προτύπου και δεν χρησιμοποιήθηκε το φαινομενικά υπάρχων 802.11. Μην ξεχνάμε ότι το 802.11 την στιγμή που γράφεται αυτή η διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ευρέως και σίγουρα θα αποτελέσει υποστηρικτή και κομμάτι της τεχνολογίας του WiMAX. Όπως δείχνει και η παρακάτω εικόνα το Wi-Fi συνδυάζεται και χρησιμοποιείται ως gateway συσκευή για εσωτερικούς χώρους σε συνεργασία με ένα σταθμός βάσης WiMAX.



Εικόνα 3-1. WiMAX 802.16 με Wi-Fi 802.11

3.3 Γενικά Χαρακτηριστικά του WiMAX

3.3.1 Η εξέλιξη του WiMAX

Μολονότι η ευρυζωνική εποχή προωθήθηκε αρχικά από την εξέλιξη των οπτικών τεχνολογιών και του DSL, η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και οικονομικά αποδοτικού δικτύου ασύρματης πρόσβασης, το οποίο θα επέκτεινε την υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητα πέρα από τους περιορισμούς της ενσύρματης υποδομής και θα υποστήριζε τελικά και την κινητή επικοινωνία, έγινε σύντομα απαίτηση πρωτεύουσας σημασίας.

Όπως αναφέραμε το WiMAX 802.16 λόγο των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει καθώς και τον μεγάλο αριθμό χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει αναγκάστηκε να λειτουργεί στην υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων. Αρχικά το πρώτο πρότυπο 802.16 που εμφανίστηκε το 2001 λειτουργούσε στις συχνότητες 10 έως 66 GHz, τη μόνη περιοχή όπου υπήρχε ακόμη αχρησιμοποίητο φάσμα. Εν συνεχεία δημιουργήθηκε το 802.16c και 802.16a το οποίο σχεδιάστηκε για να λειτουργεί στις συχνότητες 2GHz με 11GHz.

Η υποσχόμενη λύση στο πρόβλημα της παροχής ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης σε μια εκτενή περιοχή κάλυψης, κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν των Μητροπολιτικών Δικτύων (Metropolitan Area Networks - MANs) είναι το πρωτόκολλο **802.16-2004** το οποίο απευθυνόταν σε σταθερά συστήματα και λειτουργούσε σε συχνότητα μέχρι 11 GHz.

Το IEEE 802.16 ήταν αρχικά σχεδιασμένο αποκλειστικά για ακίνητα τερματικά. Το 2005 παρουσιάστηκε η τροποποιημένη έκδοση IEEE **802.16e**, ή αλλιώς **Mobile WiMAX**, η οποία ενσωματώνει όλες εκείνες τις αλλαγές και προσθήκες που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών. Τα συστήματα WiMAX και Mobile WiMAX που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα βασίζονται στο IEEE 802.16e-2005, που αποτελεί μία τροποποίηση του πρωτοκόλλου IEEE 802.16-2004, και καθιερώθηκε το Δεκέμβριο του 2005.

Αν και το M-WiMAX υποστηρίζει την κυψελοειδή αρχιτεκτονική, τόσο ο αρχικός όσο και ο μετέπειτα προσανατολισμός του απέχουν αρκετά από τα κλασσικά κυψελοειδή συστήματα. Μία βασική διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι το IEEE 802.16e απευθύνεται κυρίως σε διαδικτυακούς χρήστες, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στην επικοινωνία φωνής μέσω IP (Voice over IP - VoIP) αντί για την

παραδοσιακή τηλεφωνική συνδιάλεξη. Επιπλέον, το M-WiMAX δε λειτουργεί ανταγωνιστικά ως προς τα κινητά δίκτυα 3^{ης} γενιάς, αλλά κινείται περισσότερο στην υλοποίηση μεμονωμένων σταθμών βάσης για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων και σχετικά τοπικών αναγκών [8].

Ειδικότερα, το έναυσμα για την διαμόρφωση του προτύπου IEEE 802.16 και ακολούθως του IEEE 802.16e υπήρξε η απόλυτη επιτυχία και αποδοχή του προτύπου IEEE 802.11, το οποίο είναι το καθολικά χρησιμοποιούμενο πρότυπο στην περίπτωση των ασύρματων τοπικών (Wireless LANs). Έτσι, η ιδέα πίσω από το M-WiMAX ήταν η δημιουργία ενός συστήματος το οποίο θα κατορθώσει να μεταφέρει την αποτελεσματικότητα και τα προτερήματα του IEEE 802.11 σε μία ευρύτερη περιοχή κάλυψης. Ο στόχος λοιπόν του M-WiMAX είναι να μπορέσει ο χρήστης να έχει μία αξιόπιστη και ευρυζωνική διαδικτυακή εμπειρία ανεξάρτητα από την κατάσταση κινητικότητας στην οποία βρίσκεται και χωρίς να υπόκειται στους περιορισμούς της οπτικής επαφής με την κεραία βάσης. Για αυτό το λόγο, σε αντιδιαστολή με το IEEE 802.11 εισάγει τον πρόσθετο περιορισμό της παροχής εγγυημένης ποιότητας υπηρεσιών μέσω της κεντρικής διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζουμε έναν πίνακα με τα βασικά πρότυπα εξέλιξης του WiMAX [9].

Βασικά πρότυπα IEEE 802.16			
	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Χρονολογία ολοκλήρωσης	Δεκέμβριος 2001	Ιούνιος 2004	Δεκέμβριος 2005
Ζώνη συχνοτήτων	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	2GHz-11GHz για σταθερά 2GHz-6GHz για κινητά
Εφαρμογή	Fixed LOS (line on site)	Fixed NLOS	Fixed and mobile NLOS
Αρχιτεκτονική MAC	Point-to-Multipoint, mesh	Point-to-Multipoint, mesh	Point-to-Multipoint, mesh
Σύστημα μετάδοσης	Single carrier only	Single carrier, 256 OFDM or 2,048 OFDM	Single carrier, 256 OFDM or scalable OFDM with 128, 512, 1,024, or 2,048 subcarriers
Διαμόρφωση	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Ρυθμός μετάδοσης	32Mbps-134.4 Mbps	1Mbps-75Mbps	1Mbps-75Mbps
Πολυπλεξία	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA

Duplexing	TDD and FDD	TDD and FDD	TDD and FDD
Εύρος ζώνης καναλιού	20MHz, 25MHz, 28MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz
Εφαρμογή WiMAX	Καμία	256 - OFDM σαν σταθερό WiMAX	Επέκταση OFDMA σαν Mobile WiMAX

Πίνακας 3-2. Βασικά πρότυπα IEEE 802.16

Ένας από τους κυριότερους λόγους της συγκέντρωσης έντονου ερευνητικού ενδιαφέροντος είναι πως, προκειμένου να υποστηρίξει τις αυξημένες απαιτήσεις των σύγχρονων διαδικτυακών εφαρμογών εντός των στενών φασματικών ορίων του ασύρματου καναλιού και ενάντια στις δυσχερείς συνθήκες ασύρματης διάδοσης, το M-WiMAX προδιαγράφει την υλοποίηση ενός φυσικού επιπέδου το οποίο χρησιμοποιεί το σύνολο των πιο νεωτεριστικών και αποδοτικών τεχνολογιών μετάδοσης. Αντίθετα, τα πρωτόκολλα των επιπέδων πάνω από το επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Medium Access Control) δεν παραγράφονται λεπτομερώς, αλλά αφήνονται να επιλεγούν ελεύθερα, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε υλοποίησης. Ουσιαστικά λοιπόν, το πρότυπο IEEE 802.16e δεν αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα, αλλά μία καινοτόμο λύση για το πρόβλημα του τοπικού βρόγχου, δηλαδή για την παροχή συνδεσιμότητας μεταξύ του δικτύου κορμού και του τελικού χρήστη.

Υπό αυτό το πρίσμα και δεδομένης της βελτιστοποιημένης παραμετροποίησης των μηχανισμών του φυσικού του επιπέδου, εκτός από αυτόνομος κόμβος κινητών υπηρεσιών, το M-WiMAX μπορεί κάλλιστα να λειτουργήσει και ως ένα πρόσθετο δίκτυο πρόσβασης στα πλαίσια μιας ευρύτερης αρχιτεκτονικής, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς.

3.3.2 Τα μέρη του WiMAX

Το πρότυπο IEEE 802.16 όπως αναφέρθηκε, σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz και υποστηρίζει ταχύτητες ασύρματης μετάδοσης μεγαλύτερες από 70Mbps. Το WiMAX σχεδιάστηκε κατά βάση ώστε να καλύπτει κυρίως συνδέσεις σημείου προς πολλά

σημεία χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για συνδέσεις σημείου προς σημείο καθώς και τοπολογίες mesh.

Η διαμόρφωση η οποία κυρίως χρησιμοποιείται όπως είδαμε και στον πίνακα 3-2 είναι η **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και η εξέλιξή της **OFDMA** (Orthogonal frequency-division multiple access). Πρόκειται για μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά φαινόμενα εξωτερικών παρεμβάσεων, ειδικότερα στις συχνότητες άνω των 2 GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί, και θα την αναλύσουμε στο επόμενο υποκεφάλαιο. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά του προτύπου είναι η υποστήριξη:

- Ποιότητας υπηρεσιών QoS
- Έξυπνων-προσαρμοστικών κεραιών (Adaptive Antenna System – AAS)
- Διαφορετικών τύπων δικτύων, όπως ATM και Ethernet, για καλύτερη διασυνδεσιμότητα.

Ένα σύστημα WiMAX αποτελείται από δύο βασικά μέρη:

Έναν σταθμό βάσης WiMAX: Ο σταθμός βάσης αποτελείται από τις ηλεκτρονικές εγκαταστάσεις και έναν πύργο WiMAX. Χαρακτηριστικά, ένας σταθμός βάσης μπορεί να καλύψει ακτίνα μεγαλύτερη των 35 χιλιομέτρων. Φυσικά όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον σταθμό βάσης τόσο μειώνεται και η απόδοση. Οποιοσδήποτε ασύρματος κόμβος μέσα στην περιοχή κάλυψης θα είναι σε θέση να έχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

Έναν δέκτη WiMAX: ο δέκτης και η κεραία θα μπορούσαν να είναι ένα αυτόνομο κιβώτιο ή μια κάρτα που βρίσκεται στο laptop ή τον υπολογιστή μας. Όπως σήμερα συνδεόμαστε με τον φορητό μας υπολογιστή σε ένα δίκτυο Wi-Fi έτσι και στο μέλλον η πρόσβαση στο σταθμό βάσης WiMAX θα είναι παρόμοια, αλλά η κάλυψη πολύ μεγαλύτερη. Διάφοροι σταθμοί βάσεων μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσεις μεγάλης ταχύτητας, κάτι που επιτρέπει την μετάβαση ενός συνδρομητή WiMAX από έναν σταθμό βάσης σε κάποιον άλλο ενώ κινείται. Μπορούμε να πούμε ότι όπως σήμερα χρησιμοποιούμε την κινητή τηλεφωνία παντού, έτσι και με την νέα ασύρματη τεχνολογία θα έχουμε πλήρη υποστήριξη ευρυζωνικότητας χωρίς διακοπή ακόμα και όταν ταξιδεύουμε.

Με βάση την κινητικότητα των χρηστών του ασύρματου δικτύου τους διακρίνουμε σε:

Σταθερά Τερματικά:

Το πρότυπο 802.16-2004 που ήταν ο αντικαταστάτης των 802.16, 802.16 a/c είναι σχεδιασμένο για συνδέσεις σταθερής πρόσβασης. Αναφέρεται και ως σταθερό ασύρματο fixed wireless (πίνακας 3-2) γιατί χρησιμοποιεί κεραιές που είναι

τοποθετημένες στον χώρο του συνδρομητή όπως στην οροφή του σπιτιού ή του κτηρίου. Κάτι σαν τα δορυφορικά πιάτα που χρησιμοποιούνται για την δορυφορική τηλεόραση. Στο 802.16-2004 προβλέπονται επίσης και εσωτερικές εγκαταστάσεις, οι οποίες όμως ενδεχομένως να μην είναι το ίδιο αποδοτικές. Βλέπουμε τελικά ότι το πρότυπο αυτό, παρέχει μία αξιόπιστη λύση για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στο τελευταίο μίλι του δικτύου, έχοντας την δυνατότητα να είναι μία εναλλακτική ασύρματη τεχνολογία σε σχέση με τις xDSL γραμμές καθώς και με τις γραμμές οπτικών ινών.

Φορητά Τερματικά:

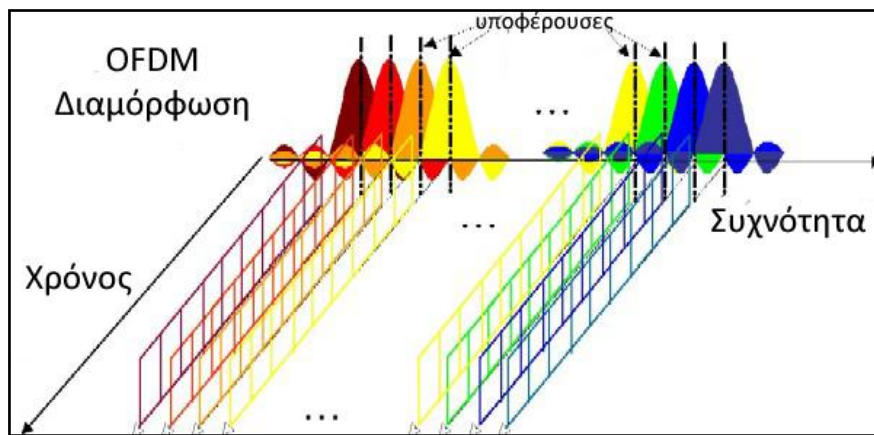
Για τα φορητά τερματικά όπως είδαμε είναι υπεύθυνο ένα μετέπειτα πρότυπο, το 802.16e, το οποίο αποτέλεσε την εξέλιξη στο ήδη υπάρχον 802.16-2004. Σκοπός του είναι η προσθήκη φορητότητας και η δυνατότητα για άμεση σύνδεση φορητών συσκευών στο WiMAX δίκτυο. Χρησιμοποιεί την OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), παρόμοια με την OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing), δηλαδή ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας, αλλά πιο εξελιγμένη.

3.3.3 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX βασίζεται στην ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας ((Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). Η OFDM είναι το σύστημα μετάδοσης που επιλέγεται για να επιτρέψει υψηλής ταχύτητας μεταφορά δεδομένων, βίντεο και πολυμέσων επικοινωνίας. Πέρα από το WiMAX, χρησιμοποιείται από τα περισσότερα εμπορικά συστήματα ευρυζωνικών επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένου του DSL και του Wi-Fi. Είναι ένα αποτελεσματικό σύστημα για μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα χωρίς οπτική επαφή. Στο υποκεφάλαιο αυτό, καλύπτονται τα βασικά της OFDM και γίνεται μια επισκόπηση του φυσικού επιπέδου του WiMAX.

3.3.3.1 OFDM και OFDMA

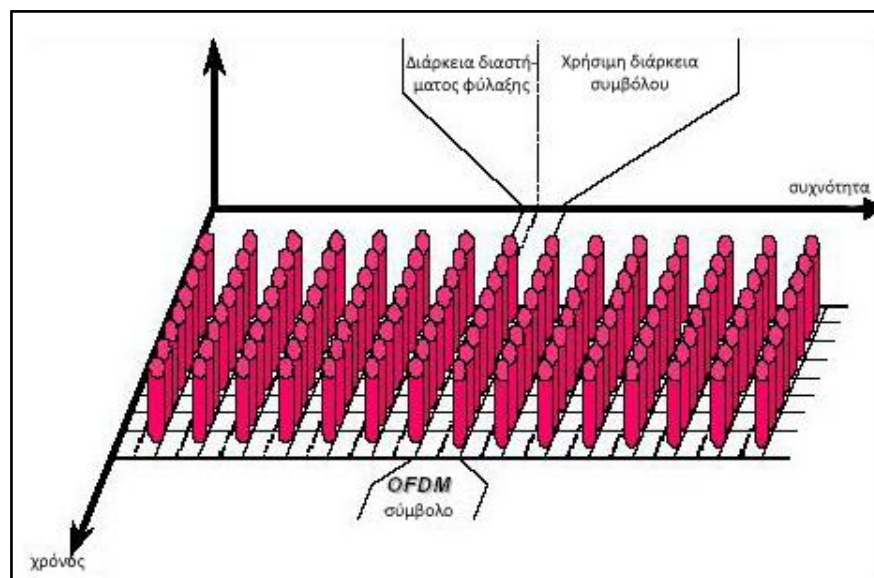
Η **OFDM** ανήκει στην οικογένεια των συστημάτων μεταφοράς πολυκαναλικής διαφοροποίησης, η οποία βασίζεται στην ιδέα της διαίρεσης μιας υψηλής ροής δεδομένων σε διάφορες παράλληλες χαμηλότερου ρυθμού, οι οποίες κωδικοποιούνται σε διαφορετικές φέρουσες συχνότητες [9]. Σχηματικά, η διαίρεση αυτή μπορεί να παρασταθεί με ένα διάγραμμα από μικρά τετραγωνάκια (κυψέλες), όπως φαίνεται στην εικόνα 3-2:



Εικόνα 3-2. OFDM Διαμόρφωση

Στον έναν άξονα, υπάρχει η συχνότητα και στον άλλο ο χρόνος. Κάθε χρονικό διάστημα αυτού του σχήματος, ονομάζεται **OFDM symbol** και κάθε περιοχή συχνότητας υποφέρουσα. Με αυτό τον τρόπο κάθε υποφέρουσα συχνότητα που θα χρησιμεύσει για την διαμόρφωση των δεδομένων, έχει την δική της περιοχή.

Ένα πρόβλημα που πρέπει να λύσουμε με τις τόσες πολλές υποφέρουσες, είναι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Αυτό λύνεται εξασφαλίζοντας την μαθηματική ορθογωνιότητα των συναρτήσεων των υποφερουσών, ώστε να μην παρεμβάλει η μία την άλλη. Από εκεί προκύπτει και το Orthogonal της διαμόρφωσης OFDM. Ένα ακόμη πρόβλημα που υπάρχει, είναι το φαινόμενο της **ενδοσυμβολικής παρεμβολής** (inter-symbol interference - ISI), δηλαδή ενός τύπου ενδοδιαμόρφωσης του κάθε συμβόλου, με το επόμενο του. Αυτό λύνεται με την εισαγωγή ενός χρονικού διαστήματος φύλαξης (Guard Interval), που εισάγεται πριν από κάθε περίοδο ενός OFDM συμβόλου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

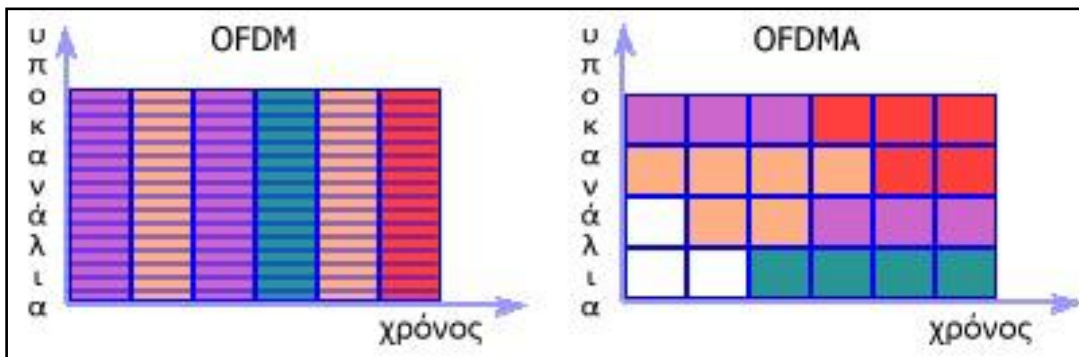


Εικόνα 3-3. Χρονικό διάστημα φύλαξης OFDM

Η πολυκαναλική διαμόρφωση ελαχιστοποιεί ή εξαλείφει την διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference - ISI). Λόγω της μεγάλης ανοχής στη διασυμβολική παρεμβολή η OFDM είναι η καταλληλότερη μέθοδος για μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων.

Όπως είδαμε και στον πίνακα 3-2 το 802.16-2004 που δημιουργήθηκε για τα σταθερά δίκτυα WiMAX χρησιμοποιεί πολυπλεξία OFDM. Στο 802.16-2005 όμως το οποίο εστιάζει σε κινητούς χρήστες (το λεγόμενο Mobile WiMAX) χρησιμοποιεί την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας με πολλαπλούς χρήστες (Orthogonal frequency-division multiple access –OFDMA).

Η **OFDMA** είναι μια multiuser έκδοση του δημοφιλούς OFDM. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται στην OFDMA με την ανάθεση ενός υποσυνόλου των υποφερουσών (subcarrier) σε μεμονωμένους χρήστες. Αυτό, επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση από διάφορους χρήστες. Η βασική διαφορά τους όπως βλέπουμε και στην εικόνα 3-4 είναι ότι στην OFDMA πέρα από την καταχώρηση χρηστών με βάση τον χρόνο, πραγματοποιείται και η καταχώρησή τους με βάση της συχνότητα. Έτσι στην OFDM ένας χρήστης μπορεί να μεταδώσει σε κάθε χρονοθυρίδα ενώ στην OFDMA στην ίδια χρονοθυρίδα μπορούν να μεταδώσουν πολλαπλοί χρήστες από διαφορετικά υποκανάλια [10].



Εικόνα 3-4.

OFDM και OFDMA

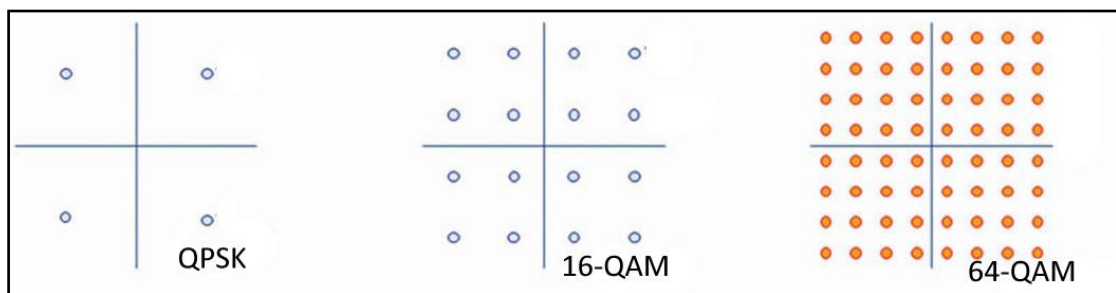
3.3.3.2 QAM-64, QAM-16, QPSK

Είδαμε μέχρι τώρα τον τρόπο που χωρίζουμε ένα κανάλι σε OFDM σύμβολα, πώς εισάγουμε τις υποφέρουσες, πόσες χρησιμοποιούμε και πώς τις προστατεύουμε από παρεμβολές. Δεν είπαμε όμως πώς τις διαμορφώνουμε. Δεδομένου λοιπόν ότι

στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες η μετάδοση δεν πραγματοποιείται με βάση τα bits αλλά με βάση τα σύμβολα, η ακολουθία των bits θα πρέπει να απεικονιστεί σε μία ακολουθία συμβόλων με βάση τον αστερισμό της διαμόρφωσης που θα επιλεγεί. Η **τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους** (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) **τάξης M** (M-QAM) αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα σχήματα διαμόρφωσης στις σύγχρονες ψηφιακές επικοινωνίες. Κάθε σύμβολο διαμορφωμένο κατά **M-QAM** αντιστοιχεί σε $\log_2 M$ bits και για το λόγο αυτό λέγεται ότι μια M-QAM διαμόρφωση έχει απόδοση $\log_2 M$ bits/symbol. Μία ακόμη τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως ονομάζεται **κωδικοποίηση μετατόπισης φάσης με ορθογωνισμό** (Quadrature Phase Shift Keying - QPSK).

Οι έννοιες του εύρους ζώνης, του ρυθμού συμβόλων και του ρυθμού μετάδοσης bit συγχέονται συχνά. Το εύρος ζώνης ενός μέσου είναι το εύρος συχνοτήτων που περνούν μέσα από αυτό με ελάχιστη εξασθένηση. Κάθε δείγμα αντιστοιχεί σε ένα κομμάτι πληροφορίας, δηλαδή ένα σύμβολο. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός συμβόλων είναι το πλήθος συμβόλων/δευτερόλεπτο που λαμβάνονται. Η τεχνική διαμόρφωσης (για παράδειγμα QPSK) καθορίζει το πλήθος bit/σύμβολο. Ο ρυθμός μετάδοσης bit είναι το πλήθος των πληροφοριών που στέλνονται μέσω του καναλιού, και είναι ίσος με το πλήθος των συμβόλων/δευτερόλεπτο επί το πλήθος των bit/σύμβολο.

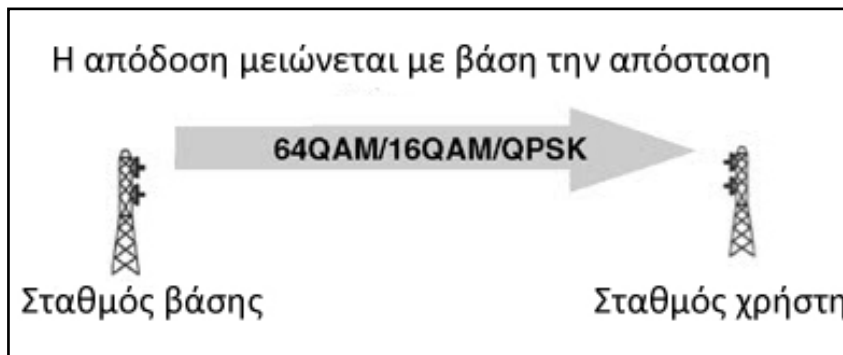
Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στα 802.16 ασύρματα δίκτυα είναι η **QPSK, 16-QAM, 64-QAM**. Τα διαγράμματα της εικόνα 3-5 δείχνουν τους επιτρεπόμενους συνδυασμούς πλάτους και φάσης και ονομάζονται διαγράμματα αστερισμού (constellation diagrams).



Εικόνα 3-5. Διαγράμματα αστερισμού διαμορφώσεων QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Η ισχύς των σημάτων μειώνεται ανάλογα με την απόσταση από το σταθμό βάσης όπως επίσης και ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Για αυτό το λόγο οι τρεις διαμορφώσεις χρησιμοποιούνται ανάλογα με την απόσταση του σταθμού του συνδρομητή από το σταθμό βάσης.

Με τη χρήση ενός ισχυρού συστήματος διαμόρφωσης, το WiMAX προσφέρει υψηλή απόδοση σε μεγάλη απόσταση, με υψηλού επίπεδου φασματική απόδοση και με ανεκτικότητα στις αντανάκλασεις των σημάτων. Μια δυναμικά προσαρμοζόμενη διαμόρφωση επιτρέπει το BS να εναλλάσσει την απόδοση ανάλογα με την απόσταση. Για παράδειγμα, εάν ο BS δεν μπορεί να δημιουργήσει μια ισχυρή σύνδεση με ένα μακρινό συνδρομητή χρησιμοποιώντας το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης 64-QAM, περνάει στην 16-QAM ή QPSK, οι οποίες μειώνουν την απόδοση και αυξάνουν την πραγματική εμβέλεια. Στην εικόνα 3-6 βλέπουμε πώς τα συστήματα διαμόρφωσης εξασφαλίζουν απόδοση πάνω από την απόσταση.



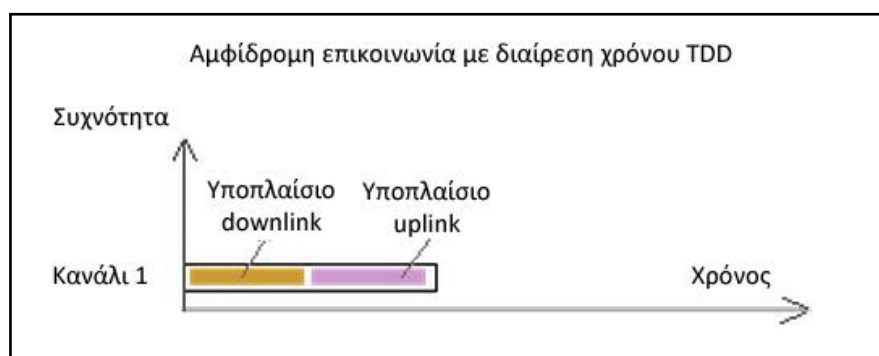
Εικόνα 3-6. Αλλαγή διαμόρφωσης με βάση την απόσταση

Παρατηρούμαι λοιπόν ότι για κοντινούς συνδρομητές χρησιμοποιείται η 64-QAM, ενώ για συνδρομητές σε μεσαία απόσταση η 16-QAM και για μακρινούς η QPSK. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση, τόσο μικρότερη είναι και η εγγύηση ποιότητας υπηρεσιών. Σε γενικές γραμμές όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των bits ανά σύμβολο που διαβιβάζονται, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός δεδομένων για ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης [7]. Έτσι, όταν απαιτούνται πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων για ένα δεδομένο εύρος ζώνης, χρησιμοποιούνται ανώτερης τάξης QAM διαμορφώσεις, όπως 64-QAM και 16-QAM. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των bits ανά σύμβολο, τόσο πιο ευάλωτο το σύστημα είναι σε διασυμβολική παρεμβολή (ISI) και στον θόρυβο. Γενικά οι απαιτήσεις ενός περιβάλλοντος σε λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) καθορίζουν τη μέθοδο διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί στο περιβάλλον. Η QPSK είναι πιο ανεκτική σε παρεμβολές από ότι οι 16-QAM και 64-QAM. Για το λόγο αυτό, όπου τα σήματα αναμένεται να είναι ανθεκτικά στο θόρυβο και σε άλλες βλάβες λόγω μεγάλης απόστασης, η QPSK είναι η κανονική επιλογή.

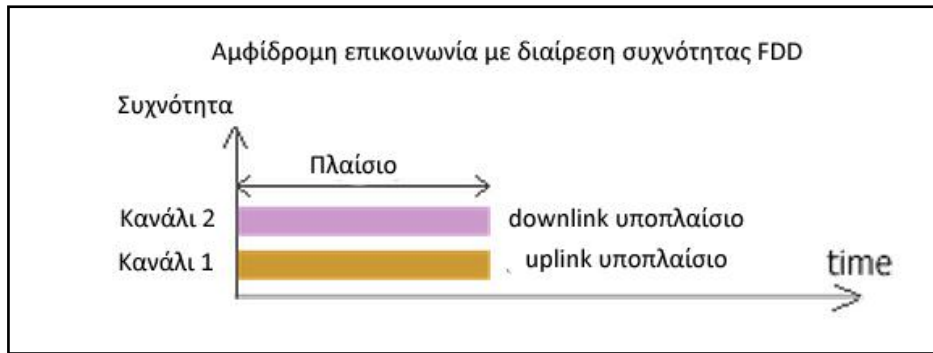
3.3.3.3 TDD και FDD

Με δεδομένο το στόχο δημιουργίας ενός ευρυζωνικού συστήματος, και με βάση τους παραπάνω φυσικούς περιορισμούς, οι σχεδιαστές του 802.16 δούλεψαν σκληρά για να χρησιμοποιήσουν αποδοτικά το διαθέσιμο φάσμα. Ένα πράγμα το οποίο δεν τους άρεσε ήταν ο τρόπος με τον οποίο δουλεύουν τα GSM και D-AMPS. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν διαφορετικές αλλά ίσες ζώνες συχνοτήτων για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη κυκλοφορία. Για τη φωνή η κίνηση είναι συνήθως συμμετρική, αλλά για την πρόσβαση στο Internet συχνά υπάρχει περισσότερη κατερχόμενη κίνηση από ανερχόμενη. Έτσι το 802.16 παρέχει ένα πιο εύελκτο τρόπο κατανομής του εύρους ζώνης.

Χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι, που υποστηρίζονται από το φυσικό επίπεδο των OFDM και OFDMA, αμφίδρομη επικοινωνία με **διαίρεση συχνότητας** (Frequency Division Duplexing - FDD) και αμφίδρομη επικοινωνία με **διαίρεση χρόνου** (Time Division Duplexing - TDD). Στην TDD το πλαίσιο χωρίζεται σε δύο υποπλαίσια: ένα πλαίσιο κατερχόμενης ζεύξης που ακολουθείται από ένα πλαίσιο ανερχόμενης ζεύξης χωρισμένα από ένα μικρό διάστημα ασφαλείας. Για να υποστηρίξει διαφορετικά προφίλ κίνησης ο λόγος του downlink υποπλαισίου, σε σχέση με του uplink μπορεί να είναι από 3:1 έως και 1:1. Στην FDD η δομή του πλαισίου είναι η ίδια αλλά τα downlink και uplink υποπλαίσια μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικά κανάλια. Η διαφορά TDD και FDD φαίνεται πιο ξεκάθαρα στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 3-7 . Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση χρόνου TDD



Εικόνα 3-8. Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση συχνότητας FDD

Μερικά από τα σημερινά σταθερά WiMAX συστήματα χρησιμοποιούν FDD. Οι περισσότερες όμως αναπτύξεις WiMAX, λειτουργούν με TDD λόγω των πλεονεκτημάτων της. Η TDD επιτρέπει μια πιο ευέλικτη κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ uplink και downlink, και δεν απαιτεί ζεύγη φάσματος, έχει επίσης ένα αμοιβαίο κανάλι που μπορεί να αξιοποιηθεί για την επεξεργασία και ο πομποδέκτης του είναι σχεδιασμένος με βάση την απλότητα. Το μειονέκτημα της TDD είναι η ανάγκη για συγχρονισμό με πολλούς σταθμούς βάσης για την εξασφάλιση της συνύπαρξης χωρίς παρεμβολές [9].

3.4 WiMAX QoS Service Classes

Το IEEE 802.16 πρότυπο ορίζει πέντε κατηγορίες υπηρεσιών QoS [10]:

- i. Unsolicited Grant Scheme (UGS)
- ii. Extended Real Time Polling Service (ertPS)
- iii. Real Time Polling Service (rtPS)
- iv. Non Real Time Polling Service (nrtPS)
- v. Best Effort Service (BE).

Κάθε μία από αυτές έχει τις δικές της παραμέτρους QoS, όπως ελάχιστες απαιτήσεις throughput και περιορισμούς στο delay/jitter. Αφού γίνει ανάλυση για το κάθε ένα θα παρουσιαστεί ένα συγκριτικό πίνακακι των κατηγοριών αυτών.

UGS: Η κατηγορία αυτή παρέχει μια σταθερή περιοδική κατανομή στο εύρος ζώνης. Όταν η σύνδεση έχει ρυθμιστεί, δεν στέλνονται οποιαδήποτε άλλα αιτήματα. Η υπηρεσία έχει σχεδιαστεί για σταθερό bit rate (CBR) και για κυκλοφορία σε πραγματικό χρόνο. Οι κύριοι παράμετροι QoS είναι ο μέγιστος υποστηριζόμενος

ρυθμός (maximum sustained rate - MST), η μέγιστη αναμονή καθυστέρησης και το jitter.

ertPS: Αυτή η υπηρεσία υποστηρίζει σιωπηλή περίοδο (silence suppression) και έχει σχεδιαστεί για VoIP. Κατά τη διάρκεια της σιωπηλής περιόδου δεν στέλνεται κίνηση. Η ertPS υπηρεσία είναι παρόμοια με την UGS στο ότι ο σταθμός βάσης (base station - BS) διανέμει το μέγιστο ρυθμό όταν είναι σε ενεργή κατάσταση, αλλά δεν διανέμει εύρος ζώνης κατά τη διάρκεια της περιόδου σιωπής. Πρέπει ωστόσο ο BS να χειρίζεται τους κινητούς σταθμούς (mobile station - MS) κατά την διάρκεια της περιόδου σιωπής ώστε να μπορεί να γνωρίζει πότε σταματάει η περίοδος αυτή. Οι παράμετροι QoS είναι οι ίδιοι με της UGS κατηγορίας.

rtPS: Αυτή η κατηγορία υπηρεσίας είναι για μεταβλητό ρυθμό bit (variable bit rate - VBR) σε πραγματικό χρόνο κυκλοφορίας, όπως συμπιεσμένο βίντεο MPEG. Σε αντίθεση με την UGS, στην rtPS οι απαιτήσεις σε bandwidth ποικίλουν και έτσι ο BS πρέπει να χειρίζεται ξεχωριστά κάθε MS για να υπολογίσει πόσο bandwidth θα του διανέμει τελικά. Οι παράμετροι QoS είναι παρόμοιοι με της UGS αλλά ο ελάχιστος ρυθμός δεσμευμένης κυκλοφορίας και ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός κυκλοφορίας θα πρέπει να καθορίζονται χωριστά. Για την UGS και την ertPS, αυτές οι δύο παράμετροι είναι ίδιοι.

nrtPS: Αυτή η κατηγορία υπηρεσίας είναι για κυκλοφορία μη-πραγματικού χρόνου VBR (non-real-time VBR) χωρίς εγγυήσεις καθυστέρησης. Μόνο ο ελάχιστος ρυθμός είναι εγγυημένος, και το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (file transfer protocol - FTP) είναι ένα παράδειγμα εφαρμογών που κάνουν χρήση αυτή της κλάσης υπηρεσίας.

BE: Τα περισσότερα δεδομένα κίνησης εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή. Η BE δεν έχει εγγυήσεις ούτε στην καθυστέρηση ούτε στο throughput. Το εύρος ζώνης που θα χορηγηθεί σε ένα σταθμό MS για αυτή την κατηγορία είναι αυτό που περίσσεψε από τις άλλες κλάσεις. Στην πράξη, οι περισσότερες υλοποιήσεις επιτρέπουν να προσδιοριστεί ο ελάχιστος ρυθμός δεσμευμένης κυκλοφορίας και ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός κυκλοφορίας ακόμα και για αυτήν την κατηγορία.

Επίσης για κίνηση μη πραγματικού χρόνου, η προτεραιότητα κίνησης είναι ακόμα μία παράμετρος QoS που μπορεί να διαφοροποιηθεί μεταξύ των διαφορετικών συνδέσεων ή των χρηστών ακόμα και μέσα στην ίδια κλάση υπηρεσίας. Παρακάτω έχουμε έναν συγκριτικό πίνακα όπως παρουσιάζονται τα θετικά και τα αρνητικά των υπηρεσιών QoS:

QoS	Θετικά	Αρνητικά
UGS	Δεν υπάρχει επιπλέον επιβάρυνση. Εγγυημένη καθυστέρηση για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου	Δεν γίνεται σωστή χρήση του bandwidth αφού απονέμεται χωρίς να λάβει υπόψη τις ανάγκες
ertPS	Βέλτιστη καθυστέρηση και αποτελεσματική επιβάρυνση στα δεδομένα	Χρειάζεται η χρήση κάποιου μηχανισμού διαιτησίας και ένας μηχανισμός που θα επιτρέπει στο BS να γνωρίζει πότε ξεκινάει η κίνηση κατά την σιωπηλή περίοδο
rtPS	Βέλτιστη και αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων	Χρειάζεται η ζήτηση εύρους ζώνης και η διαιτησία καθυστέρησης
nrtPS	Παρέχει αποτελεσματικότητα για κίνηση μη πραγματικού χρόνου με ελάχιστο ρυθμό.	-
BE	Παρέχει αποτελεσματικότητα για BE κίνηση	Δεν παρέχει εγγύηση. Κάποιες συνδέσεις πιθανόν να υπονομεύονται για μεγάλο χρονικό διάστημα

Πίνακας 3-3. Θετικά και αρνητικά των κατηγοριών υπηρεσιών QoS

Συμπεράσματα

Το WiMAX 802.16 αποτελεί την εξέλιξη του ασύρματου 802.11. Έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την ευρυζωνικότητα καλύπτοντας μεγάλες περιοχές με σταθερούς ή κινητούς χρήστες. Βλέπουμε πως επηρεάζεται η λειτουργία του με βάση την απόσταση και πως προσαρμόζεται στις αλλαγές με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών.

Για τις ανάγκες της ευρυζωνικότητας παρουσιάσαμε ως τώρα τόσο τα οπτικά όσο και τα ασύρματα δίκτυα, το κάθε ένα με τα δικά του πλεονεκτήματα. Σκοπός μας όμως δεν είναι η επιλογή μιας από τις δύο τεχνολογίες ως η λύση στο μέλλον, αλλά ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός τους. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο υβριδικό ευρυζωνικό, οπτικό, ασύρματο δίκτυο.

4

Δίκτυα WEN

Τα IEEE 802.16 και Ethernet Passive Optical Network (EPON) είναι δύο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για ευρυζωνική πρόσβαση υψηλής χωρητικότητας τόσο για ασύρματα δίκτυα όσο και για ενσύρματα δίκτυα πρόσβασης. Και οι δύο μπορούν να αναπτυχθούν για να διευκολύνουν τη σύνδεση μεταξύ των τελικών χρηστών και το Διαδίκτυο, αλλά εάν λειτουργούν χωριστά κάθε μία από αυτές πάσχει από ορισμένα μειονεκτήματα. Έτσι λοιπόν για να συνδυαστεί το πλεονέκτημα εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων με το χαρακτηριστικό της κινητικότητας των ασύρματων επικοινωνιών, προτείνεται η **σύγκλιση** των τεχνολογιών EPON και 802.16 [11].

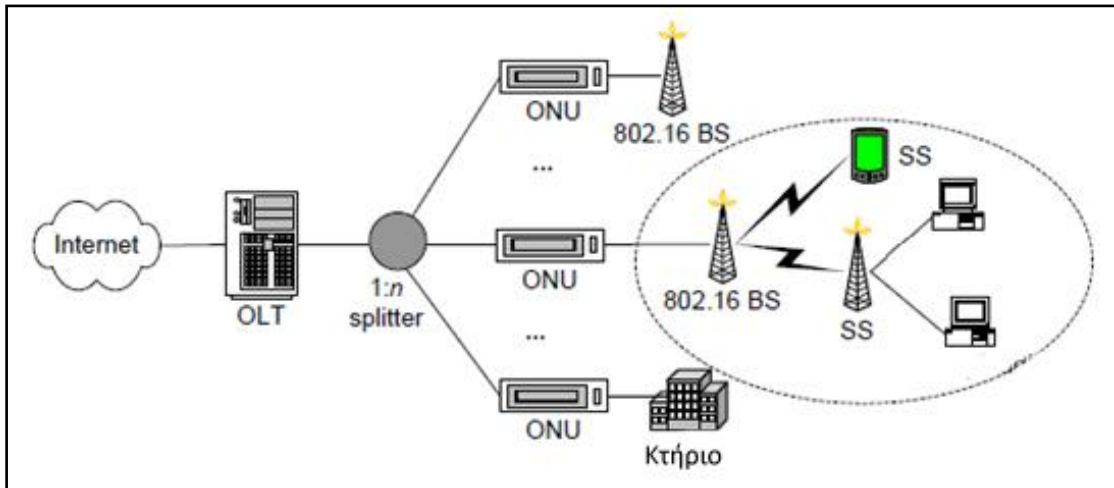
4.1 Ιστορικό της σύγκλισης των δικτύων

Κατά την τελευταία δεκαετία, η χωρητικότητα των δικτύων έχει παρουσιάσει σημαντική αύξηση ώστε να ανταποκριθεί στην ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση εύρους ζώνης των χρηστών του δικτύου, και στην υποστήριξη νέων ευρυζωνικών εφαρμογών, όπως η βιντεοδιάσκεψη, video on demand (VoD), η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV), διαδραστικά παιχνίδια, κλπ. Έτσι τα δίκτυα πρόσβασης, που συνδέουν κατοικίες και μικρές επιχειρήσεις με τα κεντρικά δίκτυα, πρέπει να αναβαθμιστούν ώστε να επιτρέψουν τις end-to-end υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας με ποιότητα υπηρεσιών (QoS).

Όπως φαίνεται και στην έρευνα του Κεφαλαίου 1, έχουμε γίνει μάρτυρες μιας ραγδαίας ανάπτυξης για την ευρυζωνική πρόσβαση σε τεχνολογίες σταθερής και κινητής υποδομής του δικτύου. Στο τομέα σταθερών δικτύων, τα παθητικά οπτικά δίκτυα έχουν λάβει μεγάλη προσοχή και από τις βιομηχανίες και από την ακαδημαϊκή κοινότητα ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την υποστήριξη δικτύων πρόσβασης ευρυζωνικών υπηρεσιών, αφού παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Ειδικότερα, το Ethernet PON μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ο πρωταρχικός τύπος της PON τεχνολογίας. Μειώνοντας έτσι την ανάπτυξη οπτικών ινών και διατηρώντας μία εγγενώς καλή σύνδεση με το δίκτυο Ethernet, το οποίο έχει ωριμάσει αρκετά σαν τεχνολογία και χρησιμοποιείται ευρέως στην καθημερινότητά μας. Από την άλλη πλευρά, όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο την τεράστια εμπορική επιτυχία των ασύρματων LAN (IEEE 802.11), έχουν ακολουθήσει νέες γενιές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης όπως το WiMAX (IEEE 802.16) που παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε μεγαλύτερη κάλυψη και με καλύτερη υποστήριξη του QoS.

Το IEEE 802.16 θεωρείται μια ασύρματη τεχνολογία με πολλές πιθανές εφαρμογές αφού μπορεί να παρέχει υψηλή χωρητικότητα εύρους ζώνης, μεγάλη κάλυψη δικτύου, ισχυρές δυνατότητες QoS και φθηνή ανάπτυξη δικτύου με χαμηλό κόστος συντήρησης. Ανάλογα με τις εφαρμογές και την επένδυση το IEEE 802.16 δίκτυο μπορεί να λειτουργεί με δύο τρόπους: είτε ως point-to-Multipoint είτε ως mesh mode. Στην PMP λειτουργία, ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί πολλαπλούς συνδρομητικούς σταθμούς. Στην λειτουργία mesh mode, οι SSs (subscriber stations) επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς άμεση παρέμβαση του BS. Ωστόσο, αν η κίνηση που προορίζεται για ένα SS προέρχεται απ'ο το Internet (π.χ. video-on-demand) ή χρειάζεται να μεταδώσει κάτι στο Internet (όπως ανέβασμα φωτογραφιών από μια φορητή συσκευή), τότε θα πρέπει αναγκαστικά αυτή η πληροφορία να διαβιβαστεί

μέσω κάποιου BS. Εδώ παίζει και το ρόλο του το EPON δίκτυο. Είναι αυτό που θα συνδέσει τα BSs με το Internet όπως βλέπουμε και στην εικόνα 4-1.



Εικόνα 4-1. Δίκτυα EPON ως backhaul σε δίκτυα WiMAX 802.16

Το EPON είναι ένα point-to-multipoint οπτικό δικτύου πρόσβασης, χωρίς ενεργά στοιχεία στην διαδρομή πηγή - προορισμού. Η τοπολογία της εγκατάστασης, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2, μπορεί να πάρει διάφορες μορφές όπου η μετάδοση γίνεται ανάμεσα σε ένα οπτικό τερματικό (OLT) και πολλαπλές οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs). Το OLT συνήθως συνδέεται με τα δίκτυα κορμού, ενώ τα ONUs με τις γειτονιές, τα κτίρια, ακόμα και τις κατοικίες (FTTN, FTTC, FTTB και FTTH αντίστοιχα). Η σύνδεση με κάθε ONU μπορεί να αποτελείται από πολλαπλούς τελικούς χρήστες ή gateway συσκευές παροχής ευρυζωνικότητας για βίντεο, φωνή ή υπηρεσίες δεδομένων. Ένα ONU μπορεί να συνδεθεί με ένα κτίριο ή με έναν σταθμό βάσης, ο οποίος μπορεί να έχει πολλαπλούς χρήστες. Μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η χρήση ενός δικτύου EPON ως backhaul για πολλαπλά IEEE 802.16 δίκτυα. Στην συνέχεια της διπλωματικής θα αποκαλούμε τα δίκτυα **WiMAX-EPON** σαν **WEN**. Τέλος σαν εικονικό **ONU-BS (VOB)** θα αποκαλούμε την συγχώνευση EPON ONU με σταθμό βάσης 802.16. Το ονομάζουμε εικονικό μιας και δεν υπάρχει τέτοια συσκευή ακόμα. Οι παραπάνω όροι βασίστηκαν στο [11].

4.1.2 Κίνητρο για Σύγκλιση

Παρακάτω παραθέτουμε μερικά βασικά σημεία της αιτιολόγησης της σύγκλισης των τεχνολογιών EPON και 802.16:

Πρώτον, οι περισσότεροι 802.16 σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι ήδη με θύρα ethernet οπότε η σύνδεση τους είναι κάτι εύκολο. **Δεύτερον**, οι δύο τεχνολογίες έχουν πολλές ομοιότητες όσο αφορά την αίτηση και την κατανομή του εύρους ζώνης καθώς και στους μηχανισμούς QoS που υποστηρίζουν. **Τρίτον**, η σύγκλιση των EPON με το WiMAX δίνει τη δυνατότητα να συνδυαστεί το πλεονέκτημα εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων με τη δυνατότητα της κινητικότητας των ασύρματων επικοινωνιών.

Επιπλέον, αυτή η ενοποίηση επιτρέπει το σχεδιασμό της από κοινού κατανομής και κράτησης του εύρους ζώνης, εισαγωγή ελέγχου σύνδεσης και χρήση συστημάτων προγραμματισμού μεταφοράς. Η συνεργασία των τεχνολογιών είναι πιο πιθανό να παρέχει μια σχεδόν ιδανική λύση στο σύστημα για συνολική διαχείριση των πόρων, συμπεριλαμβανομένων των πόρων της καλωδιακής και της ασύρματης επικοινωνίας. Συνεπώς αναμένεται καλύτερη υποστήριξη QoS και βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος σε ρυθμοαπόδοση και καθυστέρηση.

4.2 Virtual ONU-BS (VOB)

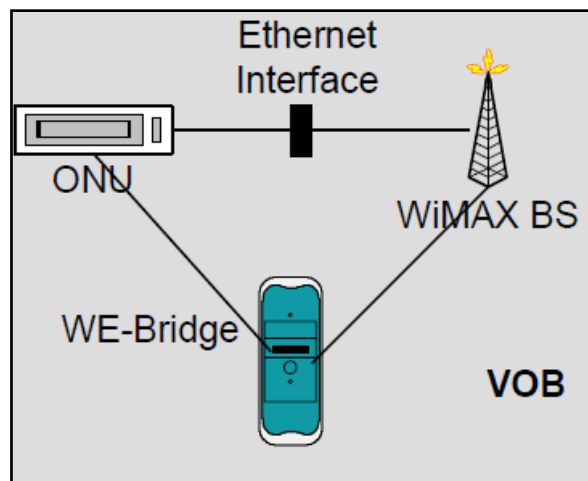
Όπως είπαμε χρησιμοποιούμε τον όρο εικονικό για τον κόμβο ONU με BS μιας και ακόμα δεν έχει υλοποιηθεί κάτι τέτοιο πέρα από ότι στην έρευνα. Η ενοποίηση των δικτύων αυτών απαιτεί κάποιες προσαρμογές ώστε να μπορέσει τελικά να λειτουργήσει επιτυχώς. Μία τέτοια προσαρμογή αφορά την ροή και την μετάβαση των δεδομένων από το ένα δίκτυο στο άλλο.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι ενοποίησης των αρχιτεκτονικών EPON και 802.16. Είτε να προσαρμόζονται τα EPON Ethernet πλαίσια σε 802.16 MAC PDUs (Protocol Data Units) ή να προσαρμόζεται ένα 802.16 δίκτυο για να τρέξει EPON πρωτόκολλα MAC. Ωστόσο, οι παραπάνω αρχιτεκτονικές που απαιτούν φυσική ενοποίηση πάσχουν από ένα κρίσιμο μειονέκτημα: δεν είναι τυποποιημένες[11]. Επιπλέον, και οι δύο σε μεγάλο βαθμό απαιτούν προσαρμοσμένη υλική διεπαφή η οποία είναι δαπανηρή και δύσκολη. Μην ξεχνάμε ότι οι βιομηχανίες συνήθως διστάζουν να επενδύσουν, προτού αποδειχθούν με πειστικό τρόπο τα οφέλη που προσφέρουν οι τεχνολογίες που προτείνονται. Για παράδειγμα, οι βιομηχανίες θα ήθελαν να ξέρουν ποιιά προηγμένα πρωτόκολλα QoS μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κορυφή αυτών των ολοκληρωμένων υποδομών και το πώς αυτά τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι μπορούν να ωφελήσουν τους τελικούς χρήστες και τη συνολική απόδοση του δικτύου, με ένα οικονομικό και αποδοτικό τρόπο. Ως εκ τούτου, ο

ιδανικός τρόπος θα ήταν αρχικά να διερευνηθούν οι κοινοί αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα QoS, σε μια εικονική ολοκληρωμένη υποδομή η οποία θα αναλυθεί ώστε να γίνει έλεγχος και σύγκριση των κερδών σε σχέση με τα κόστη.

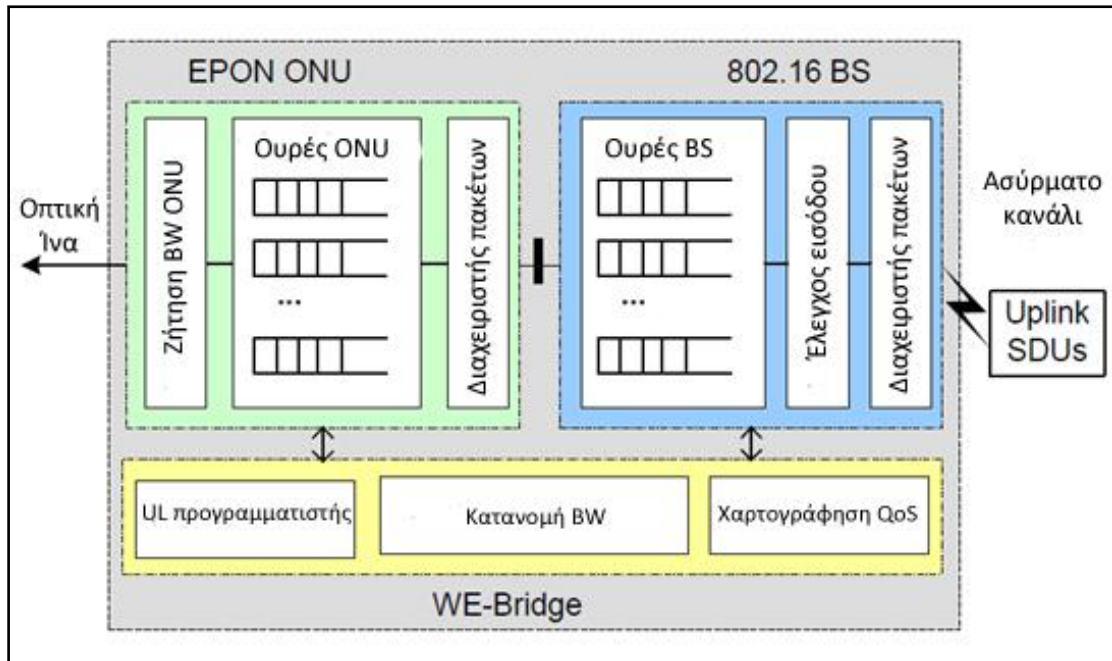
Μία ενότητα λογισμικού που ονομάζεται **WE-Bridge** [11] εισάγεται ώστε να συντονιστεί από κοινού η κατανομή των πόρων ανάμεσα στο 802.16 BS και το ONU. Η WE-Bridge είναι συνδεδεμένη στο ONU και στο BS του VOB, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-2. Θα μπορούσαμε εδώ να πούμε ότι η φυσική ύπαρξη του VOB όταν υπάρχει θα αποτελείται από τρία μέρη:

- i. ένα ONU, που συνδέεται με
- ii. ένα 802.16 BS μέσω του προτύπου διασύνδεσης Ethernet και
- iii. μία ξεχωριστή WE-Bridge που εκτελεί του αλγορίθμους κατανομής και προγραμματισμού.



Εικόνα 4-2. WE-Bridge

Η εσωτερική λογική της αρχιτεκτονικής διάταξης του υλικού σε VOB φαίνεται στην εικόνα 4-3, το οποίο απεικονίζει τα σημαντικά δομικά στοιχεία και τις σχέσεις τους υπό το πλαίσιο της ανερχόμενης μεταφοράς δεδομένων.



Εικόνα 4-3. Λογική της αρχιτεκτονικής του WE-Bridge

Συνεχίζοντας στον τρόπο επικοινωνίας, το IEEE 802.16 πρότυπο παρέχει μια σειρά από μηχανισμούς για την επίτευξη αξιόπιστης μετάδοσης μέσω ασύρματης σύνδεσης. Το πρωτόκολλο MAC είναι connection-oriented, όπου όλες οι επικοινωνίες, είτε για τον έλεγχο των δεδομένων είτε για την μετάδοση των μηνυμάτων, ξεκινούν με εγκατάσταση σύνδεσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ένας SS μπορεί να διαπραγματευθεί τις αρχικές απαιτήσεις QoS με τον BS. Οι απαιτήσεις αυτές μπορεί να αλλάξουν αργότερα. Επίσης μια νέα σύνδεση ενός SS μπορεί να καθοριστεί από το ίδιο μετά από ζήτηση. Οι εργασίες του MAC των SSs συντονίζονται από τον BS μέσω του uplink MAP (UL-MAP) και του downlink MAP (DLMAP), εκπέμποντας μηνύματα προς τα SSs στην αρχή του κάθε downlink υποπλαισίου. Οι χάρτες αυτοί ενημερώνουν τα SSs για τον χρόνο έναρξης και την ώρα λήξης της ανερχόμενης/κατερχόμενης κίνησής τους. Το MAC του κάθε 802.16 SS ενσωματώνει στη συνέχεια Service Data Units (SDUs) από εφαρμογές σε συγκεκριμένα Protocol Data Units (PDUs) σταθερού μήκους κεφαλίδας 802.16, μεγέθους έξι bytes και τα στείλει σε ώρες μετάδοσης που χορηγούνται από το BS όπως φαίνεται και δεξιά στην εικόνα 4-3.

Διαχειριστής πακέτων

Για να υποστηρίξει μια ποικιλία υπηρεσιών δικτύου με διαφορετικές απαιτήσεις QoS, το WEN πρέπει να προβλέπει το ενδεχόμενο διαφοροποίησης QoS στο σχεδιασμό του MAC. Ένας αποτελεσματικός τρόπος είναι να χρησιμοποιούνται

ουρές προτεραιότητας. Όπως φαίνεται στο 4-3, τα ανερχόμενα SDUs έχουν ταξινομηθεί σε ένα σύνολο κλάσεων από τον διαχειριστή πακέτων τόσο στον BS όσο και στον ONU σύμφωνα με τις απαιτήσεις του για QoS και στη συνέχεια έχουν προωθηθεί στις αντίστοιχες ουρές προτεραιότητας.

Για κάθε 802.16 κατηγορία υπηρεσιών, μια ουρά προτεραιότητας συνήθως διατηρείται σε κάθε SS και BS. Δεδομένου ότι τα EPON και 802.16 διατηρούν το καθένα τις δικές του ουρές προτεραιότητας και ακολουθούν τον δικό τους τρόπο ταξινόμησης των πακέτων, τίθεται το ζήτημα του πώς θα χαρτογραφηθούν τα πακέτα από ουρές BS στις ουρές των ONU, διατηρώντας παράλληλα τις απαιτήσεις QoS και αντίστροφα. Το έργο εκτελείται από τη μονάδα χαρτογράφησης QoS στο WE-Bridge.

Όλες οι ουρές στον BS ή ONU μοιράζονται την ίδια εσωτερική μνήμη σταθερού μεγέθους. Εάν ένα πακέτο υψηλής προτεραιότητας βρει την αντίστοιχη μνήμη γεμάτη κατά τη στιγμή της άφιξής του, τότε μπορεί να πάρει την θέση της μνήμης που δεσμεύτηκε για πακέτα χαμηλότερης προτεραιότητας. Εάν ένα χαμηλότερης προτεραιότητας πακέτο φτάσει και διαπιστωθεί ότι η ουρά του είναι γεμάτη τότε το πακέτο απορρίπτεται. Ως εκ τούτου, χαμηλής προτεραιότητας πακέτα θα υποφέρουν από υψηλή απώλεια και μερικές φορές όταν η κίνηση υψηλής προτεραιότητας πακέτων είναι μεγάλη γίνεται αποκλειστική εκμετάλλευση των πόρων από αυτά. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, κάποιο είδος αστυνόμευσης της κυκλοφορίας πρέπει να διενεργείται σε κάθε BS ώστε να ελέγχεται η εισαγωγή κάθε είδους κίνησης των τελικών χρηστών. Αυτό γίνεται από τη μονάδα ελέγχου εισαγωγής η οποία τοποθετεί τα εισαγόμενα πακέτα στις ουρές των BS. Ο έλεγχος εισαγωγής είναι ένας από τους αποτελεσματικούς μηχανισμούς για την παροχή δικαιοσύνης μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών των κυκλοφοριών χωρίς να παραβιάζονται οι QoS συμφωνίες. Πολλοί μηχανισμοί ελέγχου εισαγωγής μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία για EPON και για WiMAX.

4.3 QoS

Το QoS υποστηρίζεται πλήρως για να επιτρέψει τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών τόσο στο πρότυπο EPON όσο και στο 802.16. Ωστόσο, το QoS και οι σχετικοί αλγόριθμοί του, όπως ο έλεγχος εισαγωγής και ο προγραμματισμός, μένουν αδιευκρίνιστοι και έχουν εφαρμογή σε μεμονωμένες περιπτώσεις. Ως τώρα οι ερευνητικές κοινότητες έχουν πραγματοποιήσει μεγάλο ερευνητικό έργο για το σχεδιασμό των διαφόρων αλγορίθμων QoS σε EPON και 802.16. Κάθε αλγόριθμος που αναπτύσσεται βελτιώνει μια συγκεκριμένη πτυχή του πολύπλοκου συστήματος.

Ένας από αυτούς του αλγόριθμους, είναι αυτός που παρουσίασαν οι συγγραφείς του [11] οι οποίοι εισήγαγαν και τον όρο WEN που αναφέρθηκε νωρίτερα. Ο QoS-aware DBA αποτελεί μια καλή προσέγγιση στο θέμα της ποιότητας υπηρεσιών για τα υβριδικά δίκτυα και θα αναλύεται παρακάτω η βασική του λογική.

4.3.1 QoS-aware DBA

Ξανακοιτώντας στην αρχιτεκτονική WEN στις εικόνες, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η πρόκληση για QoS-aware DBA βρίσκεται στο όριο σύγκλισης της συσκευής VOB. Πιο συγκεκριμένα, η εστίαση βρίσκεται για το πώς να χαρτογραφήσει το 802.16 τη διαφοροποιημένη κίνηση στις κατάλληλες ουρές του EPON και το αντίστροφο. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-3, τόσο το BS όσο και το ONU διατηρούν ένα σύνολο από ουρές προτεραιότητας. Τα πακέτα που προορίζονται για αποστολή και περνάνε στις ουρές του BS θα πρέπει να χαρτογραφηθούν και να προωθηθούν στις αντίστοιχες ουρές κλάσεων των EPONs. Μετά από μικρές προσαρμογές, πολλοί μεμονωμένοι αλγόριθμοι QoS για προγραμματισμό και έλεγχο εισόδου εξακολουθούν να ισχύουν και για τα WEN.

Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2 που αναλύσαμε τις υπηρεσίες των EPON, ο διαχωρισμός τους έγινε σε τρεις κατηγορίες: best effort (BE), assured forwarding (AF) και expedited forwarding (EF). Η EF είναι για υπηρεσίες φωνής και εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση, που απαιτούν οριοθέτηση στην καθυστέρηση και στην διακύμανση καθυστέρησης (jitter). Η AF χρησιμοποιείται για υπηρεσίες που δεν είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, αλλά απαιτούν εγγύηση εύρους ζώνης. Ενώ η BE για υπηρεσίες όπως το e-mail που δεν απαιτούν καμία εγγύηση για οποιαδήποτε καθυστέρηση, jitter ή εύρος ζώνης.

Κατά παρόμοιο τρόπο όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3 για το WiMAX, το IEEE 802.16 πρότυπο καθορίζει πέντε κατηγορίες υπηρεσιών. Αυτές χρησιμοποιούνται προκειμένου να φιλοξενήσει τις εφαρμογές των διαφορετικών απαιτήσεων των υπηρεσιών και είναι οι ακόλουθες: Unsolicited Grant Service (UGS), real-time Polling Service (rtPS), extended real-time Polling Service (ertPS), non-realtime Polling Service (nrtPS) και BE.

Το UGS έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου (με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης) που παράγουν σταθερού μεγέθους πακέτα δεδομένων σε περιοδική βάση, όπως η T1/E1 και voice over IP (VoIP). Το rtPS έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει σε πραγματικό χρόνο ροές δεδομένων που αποτελούνται από μεταβλητού μεγέθους πακέτα δεδομένων που δημιουργούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όπως το βίντεο. Το ertPS είναι παρόμοιο με το rtPS, αλλά με ιδιαίτερη έμφαση σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως η υπηρεσία

VoIP με σιωπηλή περίοδο (silence suppression). Το nrtPS έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίξει ροές δεδομένων με ανοχή στην καθυστέρηση που αποτελούνται από μεταβλητού μεγέθους πακέτα δεδομένων για τα οποία συνήθως απαιτείται ένα ελάχιστο ποσοστό ροής δεδομένων. Τέλος το BE χρησιμοποιείται για να περιγράψει όλες τις άλλες υπηρεσίες που δεν απαιτούν εγγυήσεις QoS.

Σύμφωνα με την προσέγγιση μας, στα δίκτυα WEN για να αποφεύγεται η αδικία και η μονοπωλιακή χρήση του καναλιού σε βάρος της BE υπηρεσίας, αποδίδεται σε όλους του τύπους υπηρεσιών ένα ελάχιστο Bandwidth . Επίσης κάνουμε κάποιες συγχωνεύσεις, και έτσι δεν διακρίνουμε την nrtPS με την BE υπηρεσία όσον αφορά την απόδοση bandwidth. Δηλαδή τα πακέτα του 802.16 BS των υπηρεσιών nrtPS και BE αντιστοιχίζονται στην BE ουρά του ONU. Ακόμα το rtPS περιλαμβάνει το ertPS. Ως αποτέλεσμα, οι πέντε τύποι υπηρεσιών του 802.16 στο WEN συναθροίζονται σε τρεις τύπους δηλαδή, UGS, rtPS and BE. Έτσι αντιστοιχίζονται με τους τρεις τύπους υπηρεσιών του EPON, EF, AF και BE αντίστοιχα. Όπως η παραπάνω περιγραφή δείχνει η EPON EF έχει πολλές ομοιότητες με την 802.16 UGS ενώ οι απαιτήσεις QoS της EPON AF είναι παρόμοιες με αυτές των 802.16 rtPS / ertPS. Ως αποτέλεσμα, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι ουρές προτεραιότητας ενός ONU είναι πανομοιότυπες με τις ουρές προτεραιότητας του 802.16 BS.

Στην πράξη, αυτό διασφαλίζεται με τη διαβίβαση όλων των πακέτων του 802.16 στις αντίστοιχες ουρές του ONU για την ανερχόμενη ζεύξη όπως και το αντίστροφο για την κατερχόμενη ζεύξη. Αυτή η ένα-προς-ένα χαρτογράφηση πακέτων υποστηρίζεται πλήρως από τα VOBs, επειδή ένα ONU είναι άμεσα συνδεδεμένο με το BS μέσω Ethernet καλώδιο και η χωρητικότητα σε εύρος ζώνης είναι σχεδόν ίδια. Έτσι μπορούμε ακόμα να τα μελετάμε σαν να υπήρχαν τρεις ουρές προτεραιότητας στο VOB. Έτσι ένας DBA αλγόριθμος του VOB λειτουργεί με αυτές τις λογικές ουρές προτεραιότητας. Λόγω της άμεσης χαρτογράφησης πακέτων μεταξύ των 802.16 ουρών με τις αντίστοιχες ONU, οι ουρές VOB λαμβάνουν τη μορφή των φυσικών ουρών ONU για τη μετάδοση uplink και τη μορφή των φυσικών ουρών BS για τη μετάδοση downlink. Παρακάτω έχουμε ένα συγκεντρωτικό πίνακα για την συγχώνευση των QoS υπηρεσιών στο δίκτυο WEN.

Σύγκριση QoS μεταξύ 802.16, EPON και WEN		
802.16	EPON	WEN
UGS	EF	UGS/EF
rtPS	AF	rtPS&ertPS/AF
ertPS		
nrtPS	BE	nrtPS&BE/BE
BE		

Πίνακας 4-1. Σύγκριση QoS μεταξύ 802.16, EPON και WEN

4.3.2 Ζήτηση και απόδοση εύρους ζώνης

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζουμε το βασικό σκελετό που στηρίζεται η αρχιτεκτονική του QoS-aware DBA αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος δεν θα μελετηθεί αναλυτικά μιας και ξεφεύγει από την θεματολογία της παρούσας διπλωματικής. Αναλύεται όμως ένα κομμάτι του, ώστε να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση ζήτησης και απόδοσης bandwidth σε ένα WEN δίκτυο.

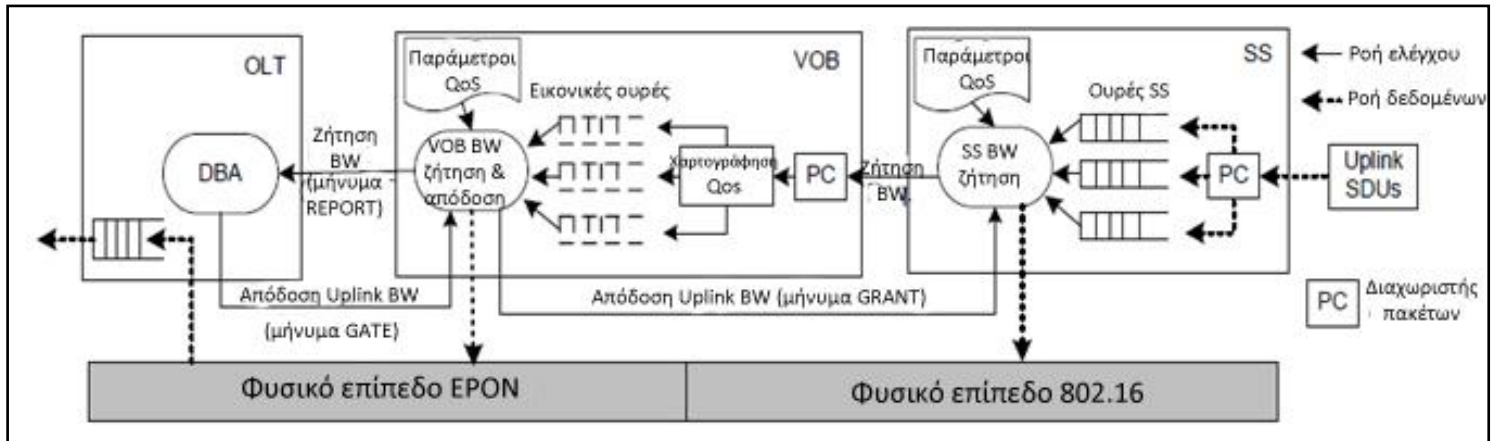
Πρώτα απ 'όλα, ορίζουμε δύο όρους: **client station** και **server station**, για εύκολη περιγραφή του WEN δικτύου και των DBA αλγορίθμων. Ο client station είναι μία συσκευή που κάνει αίτηση εύρους ζώνης. Ειδικότερα, πρόκειται για ένα SS όταν μιλάμε για 802.16 δίκτυα και ένα ONU για EPON δίκτυα. Ο server station είναι η συσκευή που παρέχει εύρος ζώνης ή ακριβέστερα χορηγεί χρονοθυρίδες στους client stations που αιτήθηκαν για εύρος ζώνης.

Σε ένα δίκτυο WEN ένας server station μπορεί να είναι ένας VOB που εξυπηρετεί πολλαπλούς SSs σε ασύρματο δίκτυο 802.16, ή ένας OLT που συγκεντρώνει την κίνηση από πολλαπλούς VOBs του οπτικού δικτύου. Στην περίπτωση μας, ένας client station μπορεί επίσης να είναι ταυτόχρονα και server station. Για παράδειγμα, ένα SS, ενώ δρα ως client station σε ένα VOB, είναι επίσης ένας server station που εξυπηρετεί πολλαπλές συνδέσεις. Από τη στιγμή που χρησιμοποιούμε EPON σαν backhaul για δίκτυα 802.16, το OLT είναι ο τελικός σταθμός διακομιστή για όλους τους σταθμούς, καθώς ακόμα και η αίτηση εύρους ζώνης από ένα SS τελικά χορηγείται από το OLT. Υπάρχουν δύο ζεύγη client-server σε σταθμούς WEN, τα VOB-OLT και SS-VOB.

Στην κανονική λειτουργία του δικτύου, κάθε client station αναφέρει περιοδικά το **αίτημα του για εύρος** ζώνης στον αντίστοιχο server station. Μετά την παραλαβή της αίτησης, ο server station περνά αυτές τις πληροφορίες στην τοπική μονάδα **DBA**. Ο DBA εκτελεί μία σειρά κατανομής εύρους ζώνης και στη συνέχεια, δημιουργεί μηνύματα επιχορήγησης. Αυτά τα μηνύματα μεταδίδονται σε client stations, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να διαβιβάσουν τα δεδομένα τους στις χρονοθυρίδες που τους αποδόθηκαν. Αν ένας server station δεν έχει διαθέσιμο εύρος ζώνης τότε θα υποβάλλει αίτημα στον δικό του server station για μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Η εικόνα 4-5 απεικονίζει τη ροή της διαδικασίας με έμφαση στην αίτηση και απόδοση εύρους ζώνης. Οι ουρές του VOB παρουσιάζονται ως εικονικές ουρές από διακεκομμένες γραμμές, διότι αντιπροσωπεύουν το εύρος ζώνης που ζητήθηκε για

τα πραγματικά δεδομένα. Αυτή η διαδικασία αίτησης και απόδοσης εύρους ζώνης υποστηρίζεται από το πρωτόκολλο MPCP.



Εικόνα 4-5. Ροή αίτησης και απόδοσης εύρους ζώνης

Στην περίπτωση του EPON για αίτηση εύρους ζώνης, χρησιμοποιείται το μήνυμα REPORT ενώ για απόδοση το μήνυμα GATE. Όσο αφορά το 802,16 χρησιμοποιείται επίσης ένας μηχανισμός παρόμοιος με εκείνον του MPCP. Αυτοί οι τυποποιημένοι μηχανισμοί έχουν καθοριστεί με ακριβή μορφή για αίτηση και απόδοση εύρους ζώνης, δημιουργώντας τα κατάλληλα μηνύματα έπειτα από επεξεργασία. Ωστόσο, είναι απλώς μηχανισμοί για τη διευκόλυνση κατανομής εύρους ζώνης και είναι ανεξάρτητοι από κάποιο συγκεκριμένο DBA αλγόριθμο. Με άλλα λόγια, τα πρότυπα αυτά δεν καθορίζουν αλγόριθμους κατανομής εύρους ζώνης. Σημειώνεται ότι τα VOBs χρησιμοποιούν MPCP για αίτηση εύρους ζώνης και τον μηχανισμό των 802.16 για την απόδοση εύρους ζώνης.

Η κατανομή εύρους ζώνης πραγματοποιείται από τους server stations και είναι απαραίτητη τόσο για downlink όσο και για uplink. Από την στιγμή που ο server station όπως ο OLT ή ο BS γνωρίζει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τα downlink δεδομένα, η downlink κατανομή εύρους ζώνης είναι συνήθως πιο απλή και πιο προβλέψιμη. Συνεπώς, επικεντρωνόμαστε κυρίως στην ανερχόμενη κατανομή εύρους ζώνης που απαιτεί μια αποτελεσματική συνεργασία ενός server station και των αντίστοιχων client stations. Η συνεργασία περιλαμβάνει επιπλέον μηνύματα ελέγχου (όπως είδαμε REPORT και GATE) που διαβιβάζονται μεταξύ server και client stations με συντονισμένο τρόπο. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε την αίτηση και την απόδοση εύρους ζώνης για ένα δίκτυο WEN.

4.3.2.1 Ζήτηση εύρους ζώνης

Για το μέρος του EPON-OLT στο WEN, η ζήτηση εύρους ζώνης ακολουθεί την τυπική διαδικασία, όπως ορίζεται στο MPCP. Δεν λειτουργεί ανταγωνιστικά και είναι περισσότερο σαν τον μηχανισμό polling του 802.16 που θα δούμε αμέσως. Στα 802.16 δίκτυα, υπάρχουν δύο τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ζητηθεί εύρος ζώνης: contention mode και polling mode.

Στο **contention mode**, ένας SS πρέπει να ανταγωνιστεί έναντι των άλλων SSs, κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου ανταγωνισμού, ώστε να διαβιβάσει το PDU του με το αιτούμενο εύρος ζώνης. Όταν μια σύγκρουση συμβαίνει, ένας βοηθητικός μηχανισμός ενεργοποιείται. Το contention mode ορίζεται συνήθως στα πρότυπα για να χρησιμοποιηθεί από τις BE υπηρεσίες.

Από την άλλη πλευρά, στο **polling mode**, ο BS ανιχνεύει τους ενεργούς SSs στους οποίους στέλνει το μήνυμα polling και αυτοί απαντούν στέλνοντας PDU με το αιτούμενο εύρος ζώνης. Προφανώς, το polling mode δεν λειτουργεί ανταγωνιστικά, μπορεί να προβλέπει την καθυστέρηση και ως εκ τούτου είναι πιο κατάλληλο για υπηρεσίες ευαίσθητες στην καθυστέρηση.

Η γενική προσέγγιση στις έρευνες είναι ένας πιο έξυπνος μηχανισμός ελέγχου της πολυπλοκότητας. Για να αποφευχθεί αυτή η πολυπλοκότητα, γίνεται π.χ. να εξαιρεθεί η διαδικασία αίτησης για τις BE υπηρεσίες αναλογώντας τους ένα σταθερό μέρος του bandwidth σε κάθε SS. Οπότε ο χρόνος ανταγωνισμού μπορεί να χρησιμοποιείται από τις υπόλοιπες υπηρεσίες υψηλότερης προτεραιότητας. Το πόσο bandwidth αναλογίζεται για τις υπηρεσίες BE μπορεί να αποφασίζεται είτε μετά από πρόβλεψη είτε μέσω κάποιου προγραμματισμού.

Ακόμη και για μη ανταγωνιστικές αιτήσεις εύρους ζώνης, υπάρχει επίσης η ανάγκη μείωσης της επιβάρυνσης της σηματοδότησης. Υπό αυτό το πρίσμα, μία πρόταση είναι ένας μηχανισμός αίτησης με δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο λαμβάνει χώρο στα SSs. Το κάθε SS συγχωνεύει τα αιτήματα για εύρος ζώνης που δέχεται από τους δικούς του χρήστες, σε ένα σταθερού μεγέθους αίτημα το οποίο στέλνει στο VOB. Το VOB το οποίο δέχεται τα αιτήματα όλων των SSs, τα στέλνει στο OLT σε ένα σταθερού μεγέθους MPCP REPORT μήνυμα.

Η πληροφορία ζήτησης εύρους ζώνης ανά κλάση μεταβιβάζεται από τους client stations στους server stations. Αυτό επιτρέπει στον server station να κατανέμει τους

πόρους μεταξύ των client stations με επίγνωση QoS. Έτσι οι client stations με αυστηρότερες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών μπορούν να εξυπηρετηθούν πιο γρήγορα, ειδικά όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο σταθμό του διακομιστή δεν είναι επαρκές για να ικανοποιήσει όλα τα αιτήματα.

4.3.2.2 Απόδοση εύρους ζώνης

Λαμβάνοντας υπόψη τους τρόπους απόδοσης εύρους ζώνης τόσο για τα EPON όσο και για τα 802.16, συνοψίζεται η απόδοση εύρους ζώνης στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- i. coarse-grained grant per client station (GPCS)
- ii. medium-grained grant per class (GPCI)
- iii. fine-grained grant per service flow (GPSF).

Η πρώτη κατηγορία **GPCS** επιτρέπει στον server station να χορηγήσει εύρος ζώνης σε κάθε client station και από εκεί και πέρα είναι ευθύνη του να το διαθέσει όπως κρίνει στις υπηρεσίες του. Στο **GPCI** απαιτείται από τον server station να προσδιορίσει το ποσό του εύρους ζώνης, που έχει ανάγκη κάθε client station για κάθε κλάση υπηρεσιών του(Class of Service - CoS). Σε αντίθεση, το **GPSF** παραχωρεί εύρος ζώνης για κάθε ροή υπηρεσίας. Σημειώνουμε ότι κάθε ροή υπηρεσίας έχει ένα μοναδικό τύπο CoS ωστόσο το GPSF είναι πιο λεπτομερειακό από το GPCI.

Προφανώς, το GPCS απολαμβάνει την πιο σημαντική επεκτασιμότητα, καθώς δίνει στους client stations την ευελιξία να αποφασίζουν για την χρήση του εύρους ζώνης που τους χορηγείται. Οι client stations φυσικά είναι καλύτερα ενημερωμένοι για τις τοπικές πληροφορίες της κυκλοφορίας τους. Αυτό μειώνει την επιβάρυνση σηματοδοσίας στην κατερχόμενη ζεύξη και εξαλείφει την καθυστέρηση που προκαλείται από την μετάδοση περισσότερης πληροφορίας. Επιπλέον, ο server station στη λειτουργία GPCS δεν χρειάζεται να παρακολουθεί την ροή πληροφοριών ανά πελάτη, προκειμένου να πάρει αποφάσεις κατανομής εύρους ζώνης.

Ολοκληρώνοντας το GPCS χρησιμοποιείται στο OLT για να εγγυηθεί την δικαιοσύνη στην απονομή εύρους ζώνης μεταξύ των VOBs, ενώ το GPCI χρησιμοποιείται στα VOBs για την εγγύηση CoS. Εάν το OLT χρησιμοποιεί το GPSF, τότε θα πρέπει να εκπέμπει εκατοντάδες ή και χιλιάδες πακέτα πληροφοριών ανά ροή, καταναλώνοντας έτσι σημαντική ποσότητα του εύρους ζώνης. Επιπλέον, το OLT, το οποίο συνδέει το συνολικό δίκτυο πρόσβασης στο Internet, πρέπει να είναι

σε θέση να αντιμετωπίσει μαζική πληροφορία μεγάλου μεγέθους. Τα VOBs μέσω του GPCI κατανέμουν το bandwidth ανά SS και ανά κλάση. Με κάθε SS να έχει έναν intra-SS προγραμματισμό, ώστε να μπορεί να καθορίσει της ανάγκες των διαφορετικών υπηρεσιών του με βάση το bandwidth που του αποδόθηκε. Καταλαβαίνουμε έτσι ότι όσο πηγαίνουμε προς στην άκρη του δικτύου η διακριτότητα των υπηρεσιών αυξάνεται με σκοπό την καλύτερη αποδοτικότητα των πόρων κατανομής.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η δυνατότητα της σύγκλισης των σύγχρονων τεχνολογιών της οπτικής και ασύρματης επικοινωνίας, χωρίς μεγάλες αλλαγές στον ήδη υπάρχων εξοπλισμό. Εάν λειτουργούν χωριστά κάθε μία πάσχει από ορισμένα μειονεκτήματα ενώ όταν συνδυαστούν, έχουμε μεγάλο εύρος ζώνης για κινητούς χρήστες. Το υβριδικό δίκτυο εξασφαλίζει την ποιότητα υπηρεσιών για τους χρήστες του και είναι μία πολλά υποσχόμενη λύση στο θέμα της ευρυζωνικότητας. Προσανατολίζεται στις μελλοντικές ανάγκες της αγοράς με γνώμονα την καλύτερη παροχή υπηρεσιών δικτύωσης..

5

Μελέτη και αποτίμηση ενός δικτύου με μεθόδους προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η προσομοίωση που υλοποιήθηκε σε Matlab για WEN δίκτυα. Παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα λειτουργίας του δικτύου σχεδιασμένο στο Microsoft Visio, αναλύουμε κάποια βασικά σημεία του κώδικα, και τέλος παρουσιάζουμε τις γραφικές παραστάσεις απόδοσης με τα αποτελέσματα για την κίνηση και την καθυστέρηση του δικτύου. Μελετάμε το υβριδικό δίκτυο τόσο ενιαία όσο και αυτόνομα στα δύο τμήματά του: το οπτικό και το ασύρματο.

Στο κεφάλαιο 4 είδαμε ότι η ανερχόμενη κίνηση είναι το αντικείμενο της κύριας μελέτης. Επικεντρωνόμαστε συνεπώς στην ανερχόμενη κατανομή εύρους ζώνης που απαιτεί μια αποτελεσματική συνεργασία ενός server station και των αντίστοιχων client stations. Στην κατερχόμενη κίνηση ο server station γνωρίζει όλες τις πληροφορίες οπότε μπορεί εύκολα να ρυθμίσει την κυκλοφορία.

Ο στόχος της προσομοίωσης ήταν ο προγραμματισμός ενός υβριδικού δικτύου το οποίο να λειτουργεί online. Δηλαδή οι αποφάσεις για απόδοση bandwidth να γίνονται χωρίς να γνωρίζει ο server station (είτε είναι κάποιος ONU είτε είναι ο OLT) τις απαιτήσεις όλων των κόμβων στο δίκτυο συνολικά. Αποφασίζει με βάση το αίτημα που έρχεται, λαμβάνοντας υπόψη τον ορίζοντα των καναλιών του και τον χρόνο με επιστροφή του κόμβου. Επίσης ορίζει ένα σταθερό μέγεθος παραθύρου, το οποίο αποτελεί το όριο του μεγέθους σε bytes που μπορεί να μεταδώσει ένας

client station σε κάθε κύκλο. Όσο για την λειτουργία με χρήση πολλών καναλιών, επιλέγεται το πιο άμεσα διαθέσιμο. Στην συνέχεια περνάμε στην ανάλυση του οπτικού μέρους.

5.1 Σχήματα

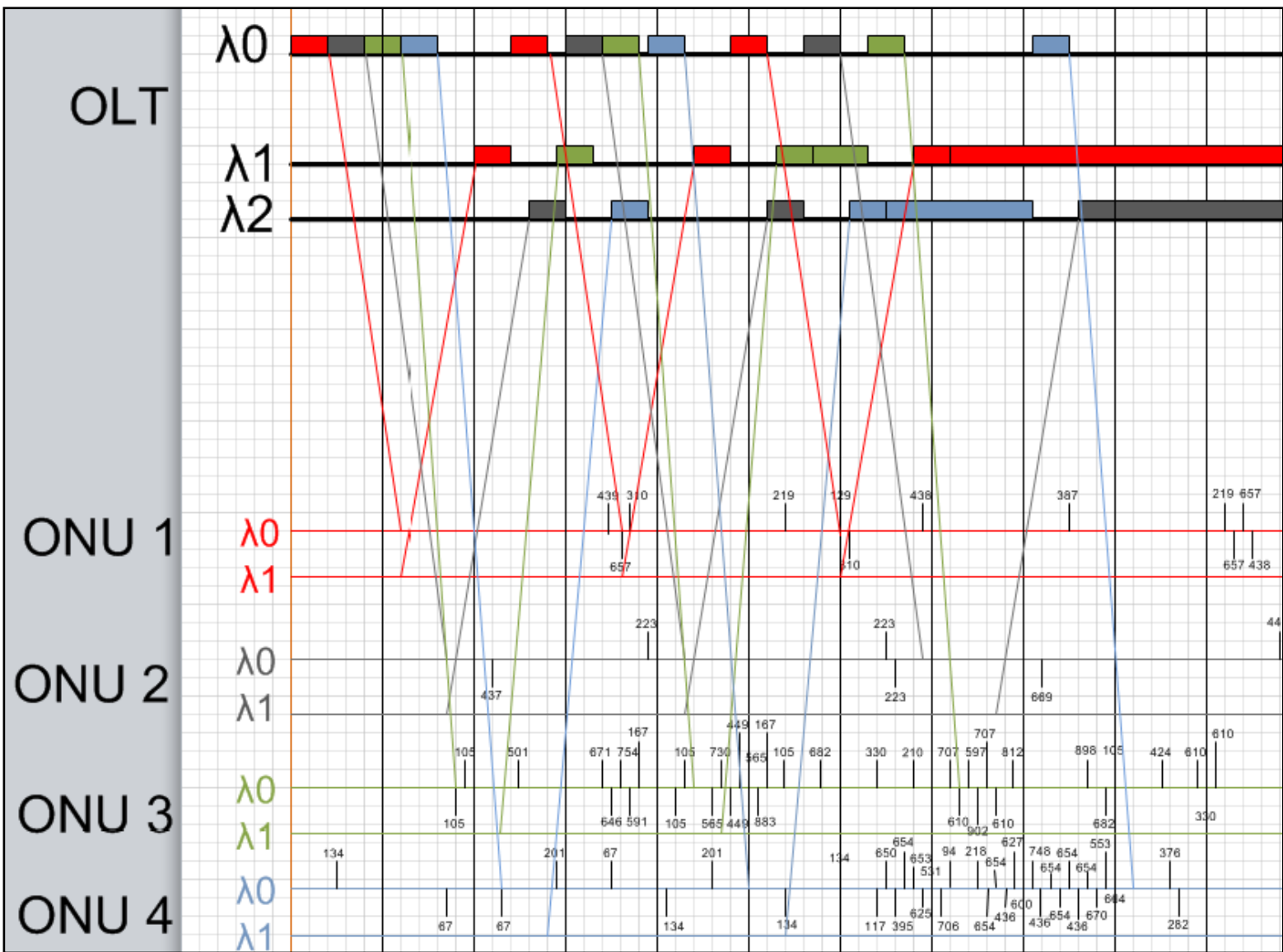
Οπτικό

Παραθέτουμε παρακάτω το σχήμα την ανερχόμενης κίνησης που σχεδιάστηκε για το οπτικό EPON μέρος του δικτύου. Στο παράδειγμά μας στην εικόνα 5-1 έχουμε τέσσερα οπτικά τερματικά (ONUs) client stations συνδεδεμένους με το OLT, ο οποίος είναι ο server station και λειτουργεί ως backhaul για τους κόμβους αυτούς. Κάθε ONU αποτελείται από ένα κανάλι ελέγχου (λ0) και από ένα κανάλι δεδομένων (λ1) καθώς και την δική του ουρά. Τα πακέτα που φθάνουν στις ουρές των ONUs είναι αυτά που φαίνονται στο κανάλι ελέγχου και ο αριθμός τους είναι σε bytes. Στον κώδικά μας ο OLT μπορεί να έχει από ένα μέχρι δώδεκα κανάλια δεδομένων, ενώ στο συγκεκριμένο παράδειγμα βάλαμε δύο κανάλια δεδομένων (λ1,λ2) και ένα κανάλι ελέγχου (λ0). Επίσης υποστηρίζει μέχρι και 32 ONUs και έχει την δική του ουρά.

Σε πρώτη φάση ο OLT στέλνει μήνυμα GATE σε κάθε σταθμό ζητώντας να τον ενημερώσουν για το μέγεθος των πακέτων που έχουν στις ουρές τους. Λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό RTT κάθε σταθμού και την άφιξη των υπόλοιπων πακέτων στα κανάλια του, ο OLT υποδεικνύει μέσω του GATE μηνύματος πότε να μεταδώσουν οι σταθμοί τα αιτήματά τους χωρίς να γίνει σύγκρουση.

Κάθε ONU απαντάει με ένα REPORT μήνυμα. Επισημαίνουμε εδώ ότι ο ONU απλά ενημερώνει για το τι έχει μέχρι την χρονική στιγμή που ρωτήθηκε, από το OLT, χωρίς να το μεταδώσει. Εν συνεχεία ο OLT λαμβάνει το αίτημα και προγραμματίζει την μετάδοση του ONU στις επόμενες διαθέσιμες χρονοθυρίδες. Έπειτα στην αποστολή του επόμενου GATE μηνύματος εκτός από την ερώτηση για το τι υπάρχει προς μετάδοση, επιτρέπει στο ONU να μεταδώσει ολόκληρο ή μέρος του μεγέθους της ουράς που αιτήθηκε στο προηγούμενο REPORT μήνυμα.

Παρατηρούμε στο σχήμα ότι το ONU 3 είναι αυτό που στέλνει πρώτο δεδομένα ουράς. Εν συνεχεία ακολουθούν τα ONU 4, 1, 2. Για μεγαλύτερη ευκολία στο σχήμα υπάρχει μια διαχωριστική γραμμή μεταξύ του REPORT και των δεδομένων που φτάνουν στα κανάλια δεδομένων του OLT. Τέλος με κάθε άφιξη υπάρχει και ένα Guard Time (GT) πέντε χρονοθυρίδων μεταξύ των αφίξεων των REPORT μηνυμάτων. Είναι νοητό ενώ στο σχήμα που ακολουθεί για το ασύρματο μέρος φαίνεται και πιο ξεκάθαρα.



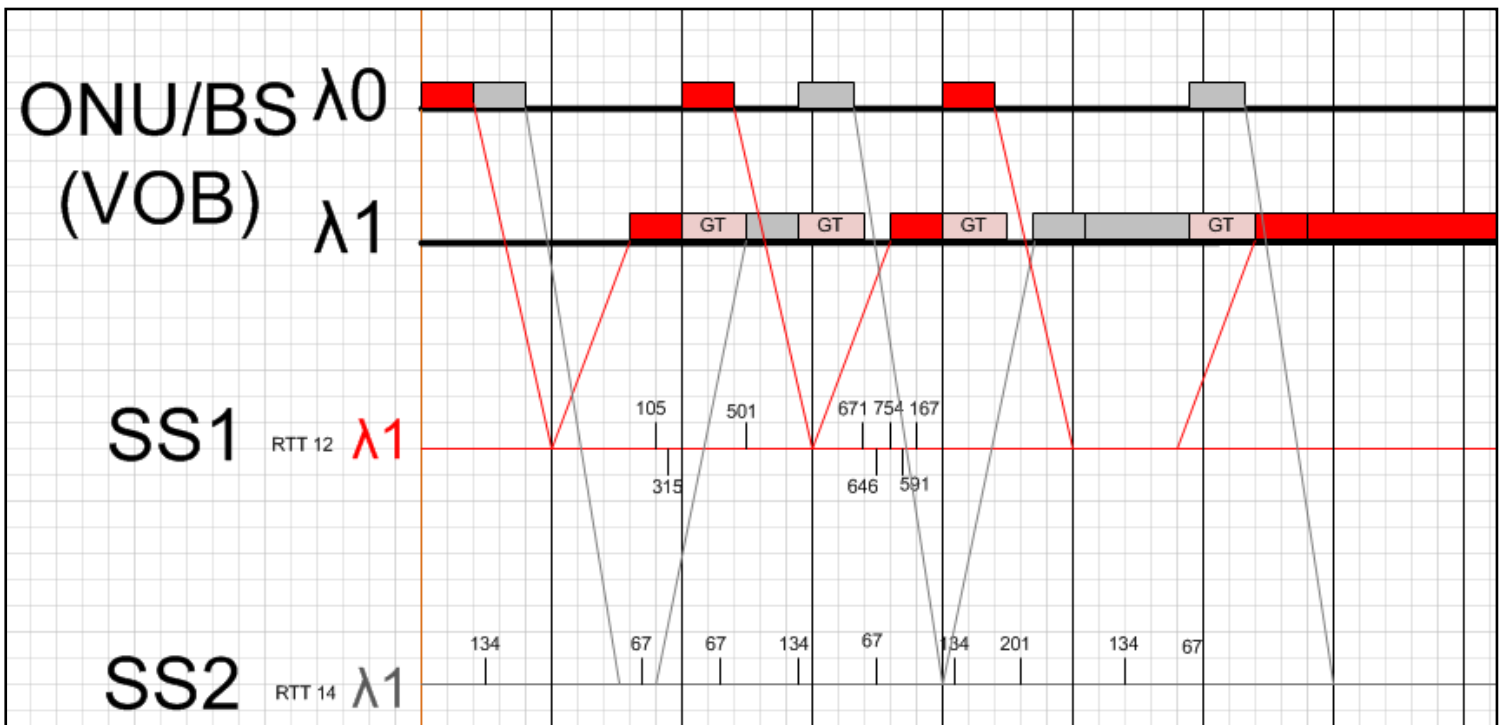
Εικόνα 5-1. Ανερχόμενη κίνηση OLT-ONUs

Ασύρματο

Παραθέτουμε παρακάτω το σχήμα την ανερχόμενης κίνησης που σχεδιάστηκε για το 802.16 ασύρματο μέρος του δικτύου. Στο παράδειγμά μας στην εικόνα 5-2 έχουμε δύο ασύρματα τερματικά (SSs) client stations συνδεδεμένους με το Base station (και επειδή μιλάμε για WEN δίκτυα κατ' επέκταση το VOB) ο οποίος είναι ο server station και λειτουργεί ως backhaul για τους κόμβους αυτούς. Κάθε SS έχει την δική του ουρά και ένα κανάλι. Τα πακέτα που φθάνουν στις ουρές των SSs είναι αυτά που φαίνονται στο κανάλι τους και ο αριθμός είναι σε bytes. Το VOB έχει δύο κανάλια, ένα δεδομένων και ένα ελέγχου, καθώς και την δική του ουρά.

Αρχικά όπως και στο οπτικό μέρος ο VOB στέλνει μήνυμα σε κάθε σταθμό ρωτώντας τους για το μέγεθος των πακέτων που έχουν στις ουρές τους. Λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό RTT κάθε σταθμού και την άφιξη των υπόλοιπων πακέτων στα κανάλια του ο VOB υποδεικνύει στο μήνυμα που στέλνει τότε να μεταδώσουν οι σταθμοί τα αιτήματά τους χωρίς να γίνει σύγκρουση.

Ο μηχανισμός είναι αντίστοιχος με τον MPCP με κάθε SS να απαντάει με ένα μήνυμα και να ενημερώνει για το τι έχει μέχρι την χρονική στιγμή που ρωτήθηκε από το VOB, χωρίς να το μεταδίδει. Εν συνεχεία ο VOB προγραμματίζει κάθε SS να μεταδώσει σε συγκεκριμένες χρονοθυρίδες και ενημερώνει τους ασύρματους κόμβους. Παρατηρούμε στο σχήμα ότι το SS 2 αν και ρωτήθηκε δεύτερο είναι αυτό που τελικά μεταδίδει πρώτο μιας και ήταν αυτό που είχε αφήξει δεδομένων πριν το SS1. Εν συνεχεία ακολουθεί το SS 1.



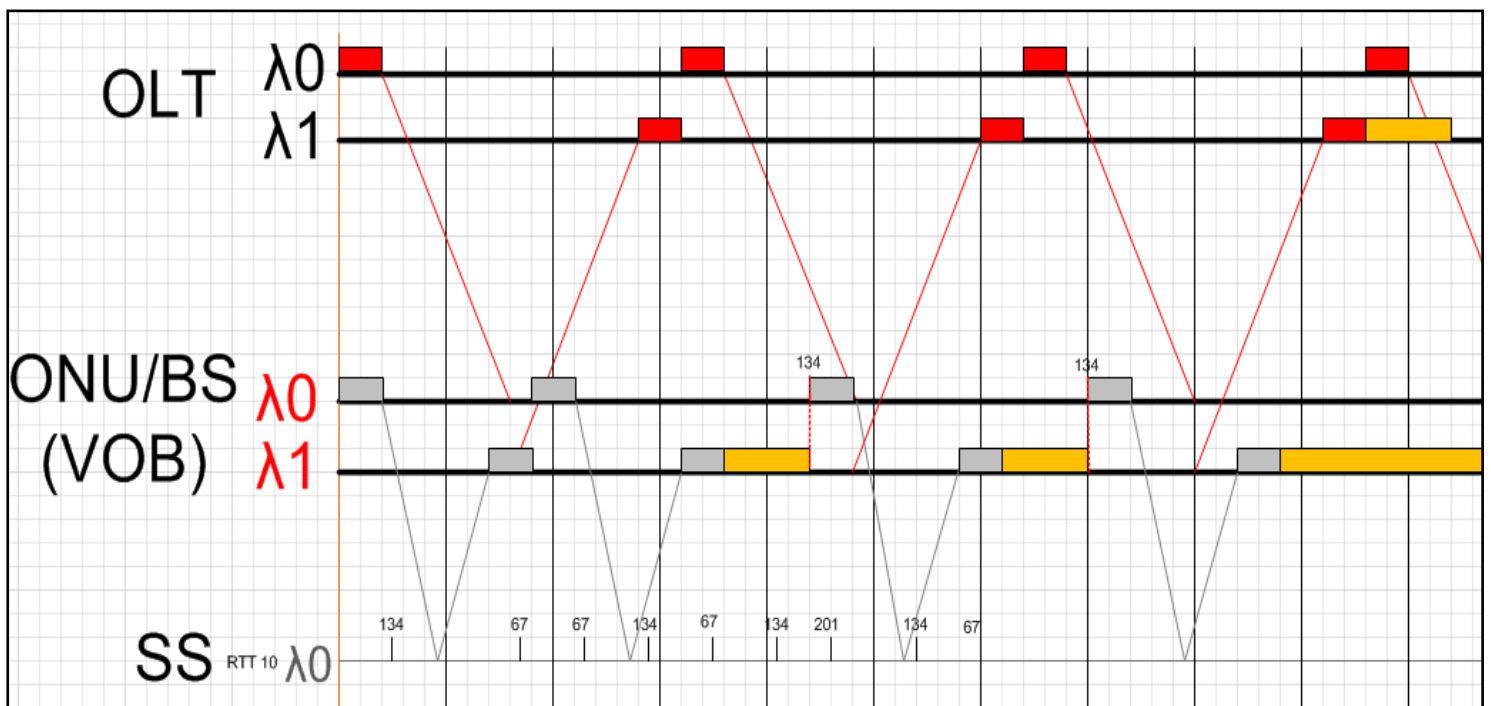
Εικόνα 5-2. Ανερχόμενη κίνηση BS-SSs

WEN

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα την ανερχόμενης κίνησης που σχεδιάστηκε για το συνολικό δίκτυο. Για λόγους απλότητας και ευκολότερης αναπαράστασης της κίνησης χρησιμοποιήσαμε ένα SS με ένα κανάλι, ένα ONU και ένα OLT με ένα κανάλι δεδομένων και ένα κανάλι ελέγχου το καθένα.

Η διαδικασία αίτησης και αποστολής των δεδομένων είναι ο συνδυασμός του ασύρματου και του οπτικού μέρους που περιγράψαμε νωρίτερα. Με πορτοκαλί για να ξεχωρίζουν είναι τα δεδομένα που αποστέλλονται. Οι αριθμοί αναφέρονται στα bytes των ουρών των κόμβων. Κάθε μήνυμα GATE αποστέλλεται αφού παραδοθεί πρώτα το προηγούμενο REPORT όπως φαίνεται και στο σχήμα.

Τα δεδομένα της ουράς του SS αρχικά περνάνε στην ουρά του VOB και εν συνεχεία στην ουρά του OLT. Για παράδειγμα βλέπουμε ότι τα πρώτα 134 bytes της ουράς του SS που βρίσκονται στην ουρά του την χρονική στιγμή 5 δηλώνονται στο VOB, και αποστέλλονται την χρονική στιγμή 37 για να φτάσουν τελικά την χρονική στιγμή 44 στην ουρά του. Εν συνεχεία το VOB, το οποίο κατά την άφιξη του πρώτου GATE δεν είχε κάτι προς μετάδοση, δηλώνει τα 134 bytes την χρονική στιγμή 48. Τελικά τα μεταδίδει στο 80 για να φτάσουν στην ουρά του OLT στο 104. Συνεπώς υπάρχει μια διαδικασία όπου σταδιακά τα πακέτα μεταφέρονται από τις ουρές των ασύρματων κόμβων στους οπτικούς.



Εικόνα 5-3. Ανερχόμενη κίνηση WEN

5.2 Βασικά Σημεία του Κώδικα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλύσουμε κάποια βασικά σημεία της προσομοίωσης. Η προσομοίωση είναι ένα δίκτυο WEN που αποτελείται από ένα OLT το οποίο μπορεί να έχει μέχρι και 32 ONUs. Το κάθε ONU-VOB με την σειρά του μπορεί να έχει από μηδέν μέχρι number SSs. Το κάθε ONU και SS έχει διαφορετικό χρόνο με επιστροφή (RTT) ο οποίος για τις ανάγκες της προσομοίωσης δίνετε τυχαία μεταξύ ενός κάτω και ενός άνω ορίου. Και τα τρία μέρη του δικτύου έχουν τις δικές τους ουρές οι οποίες γεμίζουν όσο τρέχει η προσομοίωση. Ο αριθμός του κάθε πακέτου, ο χρόνος άφιξης στην ουρά και το μέγεθος, βρίσκονται στα αρχεία output.txt από την οποία παίρνει την πληροφορία η προσομοίωση. Τα αρχεία αυτά δημιουργήθηκαν από μία συνάρτηση σε γλώσσα προγραμματισμού C και έχουν την ακόλουθη μορφή:

Packet ID	Χρόνος άφιξης	Μέγεθος (bytes)
1	0.000035	310
2	0.000035	129
3	0.000036	219
4	0.000036	219
5	0.000036	219
6	0.000037	310
7	0.000054	219
8	0.000060	129
9	0.000061	310
10	0.000069	219

Εικόνα 5-4. Μορφή αρχείου Output.txt

Ανάλυση του οπτικού μέρους του δικτύου

Στο οπτικό μέρος του δικτύου το OLT μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερα από ένα κανάλια δεδομένων. Συγκεκριμένα, στα πειράματα που ακολουθούν το εύρος των διαθέσιμων καναλιών είναι 1-12. Ο κώδικας που φαίνεται στην εικόνα 5-5 είναι αυτός που τρέχει σε κάθε χρονοθυρίδα ώστε να γεμίσει την ουρά του ONU.

Ουσιαστικά ο πίνακας throughput_k (όπου k ο αριθμός του ONU) περιέχει τα δεδομένα που έρχονται στην ουρά κάθε χρονική στιγμή. Όταν το ONU δεν έχει ασύρματους κόμβους SSs η μορφή του πίνακα throughput_x είναι σαν αυτή της

εικόνας 5-4 αφού αρχικοποιήθηκε από το output.txt. Όταν όμως έχεις ασύρματους κόμβους αυτό σημαίνει ότι δεν αρχικοποιείται η ουρά του από κάποιο output.txt αλλά από τα δεδομένα των ουρών των SSs.

```

%queue=====
if isempty(eval(['throughput_' num2str(k)]))~=1
  while eval(['table_ts(k)<=size(throughput_' num2str(k) ',1) && throughput_' num2str(k) '(table_t
    total_onu_packets=total_onu_packets+1;
    total_onu_bytes=total_onu_bytes+eval(['throughput_' num2str(k) '(table_ts(k),3);']);
    if eval(['queue_size(k) + throughput_' num2str(k) '(table_ts(k),3)<=10000'])
      queue_size(k) = queue_size(k) + eval(['throughput_' num2str(k) '(table_ts(k),3);']);
      eval(['queue_onu_' num2str(k) '(end+1,:)=throughput_' num2str(k) '(table_ts(k),:);']);
      queue_pointer(k)=queue_pointer(k) + 1;

      gen_onu_packets=gen_onu_packets+1;
      gen_onu_bytes=gen_onu_bytes+eval(['throughput_' num2str(k) '(table_ts(k),3);']);
    else
      drop_packets(k)=drop_packets(k)+1;
      drop_bytes(k)=drop_bytes(k)+eval(['throughput_' num2str(k) '(table_ts(k),3);']);
    end
    table_ts(k)= table_ts(k) +1;
  end
end
end

```

Εικόνα 5-5. Κώδικας για το γέμισμα ουράς κάθε ONU.

Οι ουρές αυτές των SSs μπορεί να αρχικοποιήθηκαν από αρχεία output αλλά η μορφή τους στον throughput πίνακα αλλάζει γιατί μεταφέρουμε πληροφορία που χρειαζόμαστε για τις μετρικές στο τέλος. Έτσι π.χ. για να ξέρουμε πότε ένα πακέτο μπήκε στην ουρά του SS μέχρι να φτάσει τελικά στο OLT μεταφέρουμε, όπως βλέπουμε και στην εικόνα 5-6, άλλες δύο τιμές. Τον χρόνο που μπήκε αρχικά στην ουρά του SS και τον αριθμό του SS.

Packet ID	Χρονική στιγμή εισόδου στην ουρά του ONU	Μέγεθος (bytes)	Χρονική στιγμή εισόδου στην ουρά του SS	Αριθμός SS
1	147	310	35	1
2	147	129	35	1
3	147	219	36	1
4	147	219	36	1
5	147	219	36	1
6	147	310	37	1
7	201	219	54	1
8	201	129	60	1
9	201	310	61	1
10	299	219	69	1

Εικόνα 5-6. Μορφή πίνακα throughput_x για ONU που έχει SSs

Όπως βλέπουμε και στον κώδικα αρχικά γίνεται έλεγχος αν το throughput έχει δεδομένα. Καταλαβαίνουμε ότι αν είναι άδειο δεν χρειάζεται να γίνει κάποιος έλεγχος για γέμισμα της ουράς αφού δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση.

Στον βρόγχο While γίνονται κάποιο έλεγχοι ώστε να μην ξεπερνιέται το μέγεθος του πίνακα throughput και οδηγούμαστε σε λάθος λόγο προσπάθεια του κώδικα να προσπελάσει στοιχείο του πίνακα που δεν υπάρχει (π.χ. να προσπαθήσει να έχει πρόσβαση στο κελί 11 όταν ο πίνακας είναι μεγέθους 10).

Εν συνεχεία γίνεται έλεγχος αν το μέγεθος του πακέτου χωράει στην ουρά η οποία στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει μέγεθος 10.000 bytes. Αν χωράει εισέρχεται στην ουρά αλλιώς γίνεται απόρριψη. Παρακάτω παραθέτουμε κάποιες μεταβλητές με μία σύντομη εξήγηση:

table_ts(k) : είναι ο αριθμός των πακέτων που ελέγχθηκαν, για είσοδο στην ουρά, από κάθε ONU (k ο αριθμός κάθε ONU).

total_onu_packets : τα συνολικά πακέτα που έφτασαν για να αποσταλούν.

total_onu_bytes : το συνολικό μέγεθος των πακέτων που έφτασαν για να αποσταλούν.

queue_size(k) : το μέγεθος της ουράς του κάθε k ONU.

queue_onu_k : η ουρά του κάθε ONU που έχει την μορφή είτε της 5-1 είτε της 5-3.

queue_pointer(k) : δείκτης στο τελευταίο στοιχείο της ουράς του κάθε k ONU.

gen_onu_packets : τα συνολικά πακέτα που μπήκαν στις ουρές των ONUs.

gen_onu_bytes : το συνολικό μέγεθος των πακέτων που μπήκαν στις ουρές των ONUs.

drop_packets(k) : τα συνολικά πακέτα που απορρίφθηκαν από τις ουρές των ONUs.

drop_bytes(k) : το συνολικό μέγεθος των πακέτων που απορρίφθηκαν από τις ουρές των ONUs.

Παρακάτω αναλύεται ο μηχανισμός που χρησιμοποιήθηκε για τους ορίζοντες των καναλιών. Ο πίνακας `Horizon_queue` κρατάει την ουρά μετάδοσης των διάφορων ΟΝUs και ταξινομείτε, μετά από κάθε αλλαγή, στο τέλος ώστε να μεταδίδει ο πρώτος στην σειρά.

Στην γραμμή 5 φαίνεται ότι γίνεται επιλογή του καναλιού με τον μικρότερο ορίζοντα, δηλαδή το πιο άμεσα διαθέσιμο. Στην συνέχεια, το OLT που γνωρίζει τους χρόνους μετ' επιστροφής των ΟΝUs, υπολογίζει αν θα υπάρξει κάποια καθυστέρηση στην μετάδοση του REPORT μηνύματος από το ΟΝU και το ενημερώνει μέσω του GATE μηνύματος. Αυτές οι πληροφορίες περνάνε στον πίνακα `Respond` στον οποίο κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα ΟΝU. Στο δεύτερο κελί κάθε γραμμής μπαίνει η χρονική στιγμή που ρωτάτε το ΟΝU για το τι έχει προς μετάδοση. Στο τρίτο κελί είναι η χρονική στιγμή που υπαγορεύει το OLT στο ΟΝU να μεταδώσει την απάντηση για την αποφυγή συγκρούσεων. Τέλος έχουμε την ταξινόμηση των οριζόντων των ΟΝUs και την ταξινόμηση.

```

if Horizon_queue(1,1)==timeslot && Horizon_queue(1,2)==k
    busy_ts=timeslot+4;

    %Επιλογή καναλιού με τον μικρότερο ορίζοντα
    [minval, chanel] = min(Hor);

    %Υπολογισμός καθυστέρησης
    result = timeslot + 4 + (2*RTT_2(k));
    if result>=Hor(chanel)
        delay=0;
    else
        delay=Hor(chanel)-result;
    end

    %Υπολογισμός ορίζοντα καναλιών
    Hor(chanel)=result + +delay + 9 + Respond(k,1);
    Horizon_queue(1,1)=Hor(chanel)-5;

    %Καταχώρηση πληροφοριών στο Respond
    Respond(k,2)= timeslot + 4 +RTT_2(k);
    Respond(k,3)= Respond(k,2) + delay;

    %Ταξινόμηση Horizon_queue
    for h_q_p=1:number_onus
        if Horizon_queue(h_q_p,1)<busy_ts && h_q_p<=number_onus
            Horizon_queue(h_q_p,1)=busy_ts;
            busy_ts=busy_ts+4;
        end
    end
    Horizon_queue = sortrows (Horizon_queue);
end

```

Εικόνα 5-7.

Μηχανισμός υπολογισμού οριζόντων

Πριν προχωρήσουμε στο επόμενο κομμάτι κώδικα θα κάνουμε μία ανάλυση του πίνακα Respond ώστε να είναι ευκολότερη η κατανόηση της χρήσης του στην συνέχεια. Ο πίνακας Respond έχει αριθμό γραμμών ίσο με το πλήθος των ONUs και οχτώ στήλες. Στην εικόνα 5-5 έχουμε τον πίνακα Respond για ένα παράδειγμα με τέσσερα ONUs.

Ο λόγος που ο πίνακας Respond περιέχει πληροφορίες τόσο για αυτή όσο και για την επόμενη μετάδοση έχει να κάνει με την ιδιαιτερότητα του μηχανισμού MPCP. Όπως αναλύσαμε εκτενώς ο κάθε κόμβος αρχικά δηλώνει τι έχει για να το μεταδώσει τελικά στον επόμενο κύκλο μετάδοσης. Έχουμε λοιπόν παρακάτω τον κώδικα που δείχνει πως κάθε ONU υπολογίζει τη μέγεθος της μετάδοσης από την ουρά του.

Χρονική διάρκεια επόμενης μετάδοσης (σε timeslots)	Χρονική στιγμή άφιξης GATE μηνύματος	Χρονική στιγμή αποστολής REPORT μηνύματος	Δείκτης ουράς στο πακέτο που θα είναι πρώτο μετά την επόμενη μετάδοση	Χρονική διάρκεια αυτής της μετάδοσης (σε timeslots)	Δείκτης ουράς στο πακέτο που θα είναι πρώτο μετά την μετάδοση	Μέγεθος επόμενης ουράς προς μετάδοση (σε bytes)	Μέγεθος ουράς προς μετάδοση (σε bytes)
77	814	933	7	80	8	1442	1485
72	920	997	7	72	7	1338	1338
77	654	735	8	80	6	1435	1484
78	752	816	10	81	9	1455	1511

Εικόνα 5-8.

Πίνακας Respond

Αναλύοντας το κομμάτι κώδικα της εικόνας 5-9 βλέπουμε ότι την χρονική στιγμή που το GATE μήνυμα φτάνει στο ONU αρχικά μεταφέρονται οι προηγούμενες πληροφορίες που ήταν αποθηκευμένες στον πίνακα Respond σε άλλα κελιά. Αυτές οι πληροφορίες πρέπει να υπάρχουν γιατί αφορούν την μετάδοση των δεδομένων που θα γίνει αμέσως μετά.

Στην γραμμή έξι γίνεται έλεγχος αν υπάρχει κάτι στην ουρά για μετάδοση ώστε να μην γίνει άδικα προσπέλαση. Αν δεν υπάρχει τότε δηλώνεται ότι δεν χρειάζεται δέσμευση εύρους ζώνης ($\text{Respond}(k,1)=0$ και $\text{Respond}(k,4)=0$).

Αν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση τότε γίνεται έλεγχος αν το πακέτο προς μετάδοση ξεπερνάει το μέγεθος παραθύρου (που εξηγήσαμε στην αρχή του κεφαλαίου) που έχει οριστεί από το παραλήπτη και είναι 1.518 bytes. Αν το ξεπερνάει τότε θα μεταδοθεί στον επόμενο κύκλο μετάδοσης και την θέση του παίρνουν άλλα πακέτα που πιθανόν να χωρούν. Παρακάτω στην γραμμή με την εντολή ceil αυτό που κάνουμε είναι να μετατρέπουμε τα bytes των δεδομένων που θα μεταδοθούν σε χρονοθυρίδες, κάτι που βοηθάει στους υπολογισμούς για το πόσο χρόνο θα είναι κατειλημμένο το κανάλι. Επίσης, η ταξινόμηση γίνεται με

σκοπό να διαχωριστούν τα πακέτα που ενώ είναι στην ουρά, μέχρι την χρονική στιγμή άφιξης του μηνύματος GATE, τελικά δεν μεταδίδονται.

```

if Respond(k,2)==timeslot
    Respond(k,5)=Respond(k,1);
    Respond(k,6)=Respond(k,4);
    Respond(k,8)=Respond(k,7);

    if eval(['isempty(queue_onu_' num2str(k) ')==1'])
        Respond(k,1)=0;
        Respond(k,4)=1;
    else
        counter=Respond(k,4);
        sum=0;
        sum_count=0;
        if eval(['counter~=size(queue_onu_' num2str(k) ',1)+1'])
            while eval(['queue_onu_' num2str(k) '(counter,2)<=timeslot']);
                if sum+eval(['queue_onu_' num2str(k) '(counter,3)'])<=1518
                    sum=sum+eval(['queue_onu_' num2str(k) '(counter,3);']);
                    eval(['queue_onu_' num2str(k) '(counter,1)=0;']);
                    sum_count=sum_count+1;
                end
                counter=counter+1;
                if eval(['counter==size(queue_onu_' num2str(k) ',1)+1'])
                    break;
                end
            end
        end
        Respond(k,1)=ceil ((sum*8)/(1.5*(10^9))/(10^-7));
        Respond(k,4)=sum_count+1;
        Respond(k,7)=sum;
        eval(['queue_onu_' num2str(k) '= sortrows (queue_onu_' num2str(k) ',1);']);
    end
end
end

```

Εικόνα 5-9.

Χρήση πίνακα Respond

Το τελευταίο κομμάτι κώδικα που παρουσιάζουμε για το οπτικό μέρος του δικτύου έχει να κάνει με την χρονική στιγμή αποστολής του Report μηνύματος από το ONU. Για να φεύγει το μήνυμα Report από το ONU στο OLT με δεδομένα προϋποθέτει ότι θα υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση, εξ ου και ο έλεγχος για το Respond(k,5)~0. Εν συνεχεία έχει διαφορά αν τα δεδομένα προέρχονται από ONU με ή χωρίς SS. Αν προέρχονται από ONU με SSs πρέπει να περαστεί μαζί και ο αρχικός χρόνος που μπήκαν τα δεδομένα στην ουρά του SS. Για αυτό έχουμε κυκλώσει την διαφορά με κόκκινο. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πότε μπήκε και πότε βγήκε ένα πακέτο από τις ουρές για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης των πακέτων στο τέλος.


```

if Respond(k,3)==timeslot
  if Respond(k,5)~=0
  ] for j=1:Respond(k,6)-1
    if eval(['size(queue_onu_' num2str(k) ',2)==3'])
      eval(['olt(end+1,:)=[size(olt,1)+1 timeslot+RTT_2(k)+4+Respond(k,5) queue_onu_' num2str(k) '(j,3) queue_onu_' num2str(k) '(j,2) k:']]);
    else
      eval(['olt(end+1,:)=[size(olt,1)+1 timeslot+RTT_2(k)+4+Respond(k,5) queue_onu_' num2str(k) '(j,3) queue_onu_' num2str(k) '(j,4) k:']]);
    end
  end
end
eval(['queue_onu_' num2str(k) '= queue_onu_' num2str(k) '(Respond(k,6):end,1:end)']);
queue_size(k)=queue_size(k)-Respond(k,8);
queue_pointer(k)=queue_pointer(k) - Respond(k,6) +1;

thr_onu=thr_onu+Respond(k,8);
usedtime_onu=usedtime_onu+Respond(k,5);
end
end

```

Εικόνα 5-10. Αποστολή Report μηνύματος

Στη συνέχεια τα δεδομένα που μεταδόθηκαν αφαιρούνται από την ουρά του ONU, καθώς και το μέγεθος τους. Επίσης αλλάζει ο δείκτης της ουράς του ONU. Η μεταβλητή `thr_onu` αναφέρεται στο σύνολο των bytes που μεταδόθηκαν επιτυχώς ενώ το `used_time` για το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιήθηκε το κανάλι. Τελικά όλα τα δεδομένα καταλήγουν στην ουρά του OLT στη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 5-10.

Packet ID	Χρόνος άφιξης	Μέγεθος (bytes)	Χρονική στιγμή εισόδου 1ης φοράς σε ουρά (ONU ή SS)	#ONU
1	411	310	35	1
2	411	129	35	1
3	411	219	36	1
4	411	219	36	1
5	411	219	36	1
6	411	310	37	1
7	559	219	54	1
8	559	129	60	1
9	559	310	61	1
10	751	219	69	1

Εικόνα 5-11. Ουρά OLT

Κλείνοντας το υποκεφάλαιο της ανάλυσης του οπτικού μέρους, πρέπει να αναφερθεί ότι το ασύρματο μέρος λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο και δεν χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση. Οι βασικές διαφορές στις οποίες χρειάστηκε να εστιάσουμε αναλύθηκαν και στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρικές απόδοσης του δικτύου.

5.3 Γράφοι και μετρικές

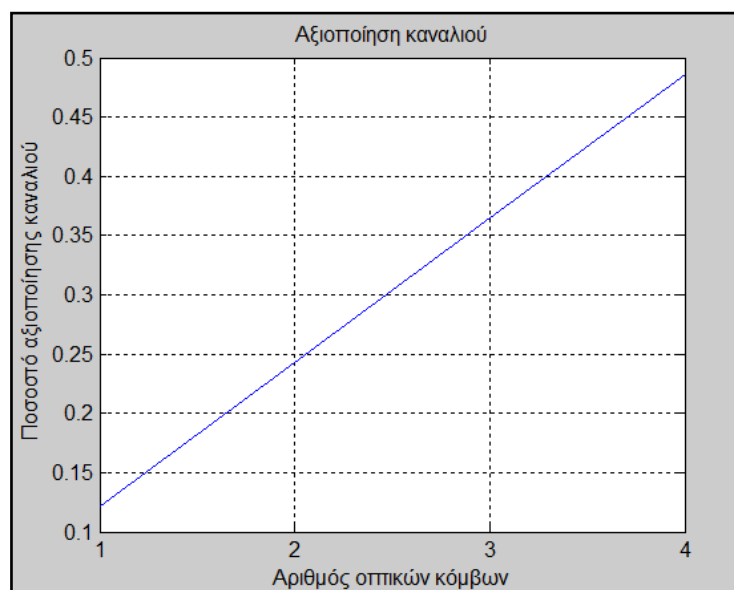
Μετά την παρουσίαση του κώδικα σειρά έχουν οι μετρικές. Είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διαφορετικά σενάρια από τα οποία βγαίνουν τελικά τα συμπεράσματα για την λειτουργία του δικτύου. Οι μετρικές που μας δίνει η προσομοίωση που σχεδιάστηκε για δίκτυα WEN είναι οι ακόλουθες: πακέτα και bytes που απορρίφθηκαν καθώς και αυτά που δεν έγινε απόρριψη, σύνολο πακέτων και bytes που δημιουργήθηκαν, ρυθμός απόρριψης πακέτων, ρυθμός απόρριψης δεδομένων, μέση καθυστέρηση πακέτων, αξιοποίηση καναλιού και απόδοση, τόσο για το ασύρματο μέρος όσο και για το οπτικό.

Αρχικά στο παράδειγμα 1, επικεντρωνόμαστε στο οπτικό μέρος με ένα απλό σενάριο. Στο παράδειγμα 2 η προσομοίωση τρέχει για περισσότερο χρόνο για ένα πιο πολύπλοκο σενάριο. Ακολουθεί η ανάλυσή τους.

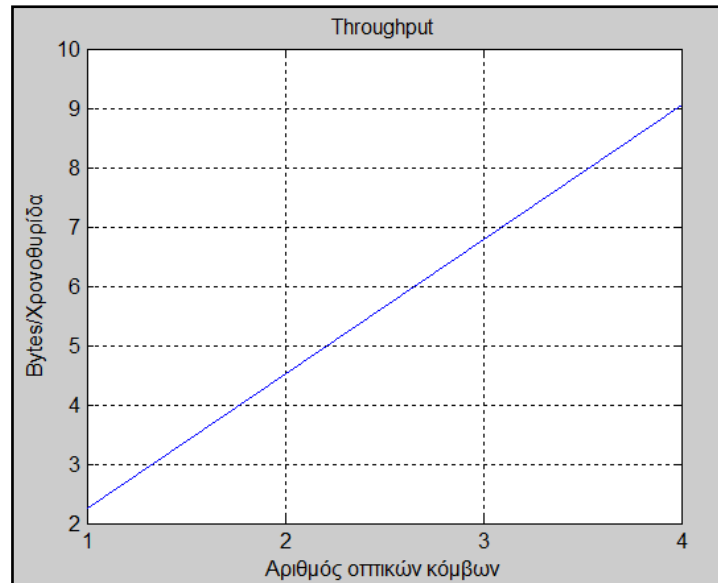
Παράδειγμα 1

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιείται μεταβλητός αριθμός οπτικών κόμβων από ένα έως τέσσερα ONU, και με δύο ασύρματους κόμβους ο καθένας. Όλοι οι οπτικοί κόμβοι έχουν το ίδιο αριθμό ασύρματων κόμβων, με τις ίδιες ουρές και ίδιους χρόνους διάδοσης με επιστροφή.

Στα αποτελέσματα παρατηρούμε αύξηση στην αξιοποίηση του δικτύου όσο ο αριθμός των οπτικών κόμβων αυξάνεται. Αυτό είναι λογικό αφού για τον ίδιο χρόνο προσομοίωσης μεγαλώνει ο χρόνος που χρησιμοποιείται το κανάλι δεδομένων. Το ίδιο συμβαίνει και με την απόδοση όπως βλέπουμε παρακάτω:



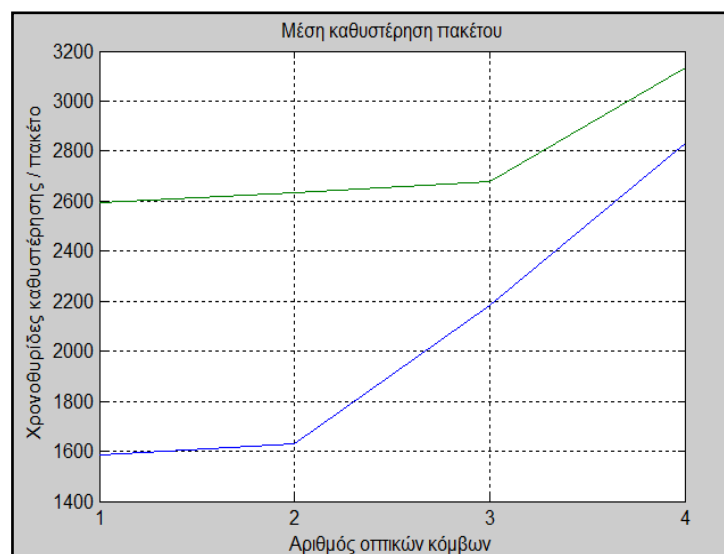
Εικόνα 5-12. Αξιοποίηση καναλιού



Εικόνα 5-13. Ρυθμοαπόδοση

Τέλος για το παράδειγμα 1, θα δούμε την μέση καθυστέρηση πακέτου η οποία αυξάνεται, αφού ο κάθε κόμβος περιμένει τότε θα ελευθερωθεί το κανάλι ώστε να μπορέσει να μεταδώσει. Έτσι τα πακέτα πρέπει να παραμείνουν περισσότερο χρόνο στις ουρές τους, με αποτέλεσμα το τρενάρισμα της μετάδοσής τους.

Η μέση καθυστέρηση για το σενάριο του παραδείγματος 1 αναπαριστάται από την μπλε γραμμή. Με πράσινο είναι η μέση καθυστέρηση που προκύπτει όταν διπλασιάζουμε τους χρόνους μετ' επιστροφής των οπτικών κόμβων στο ίδιο σενάριο. Παρατηρούμαι ότι λόγω της αύξησης του RTT η μέση καθυστέρηση πακέτου μεγαλώνει. Είναι λογικό αφού στον ίδιο χρόνο γίνονται λιγότερες μεταδόσεις πακέτων και το κανάλι ελέγχου περιμένει περισσότερο χρόνο για την άφιξη των Report μηνυμάτων των σταθμών.



Εικόνα 5-14. Μέση καθυστέρηση πακέτου

Συνεπώς φαίνεται στο πρώτο παράδειγμα πως επηρεάζεται το οπτικό μέρος του δικτύου με την αύξηση των κόμβων και την αλλαγή του χρόνου με επιστροφή. Στην συνέχεια το παράδειγμα 2 αποτελεί ένα πιο αναλυτικό σενάριο.

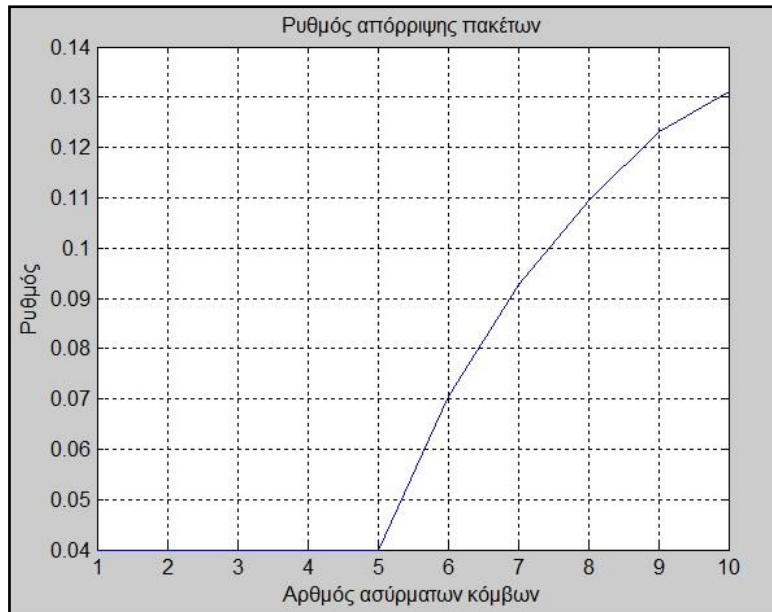
Παράδειγμα 2

Στο 2^ο παράδειγμα ο στόχος είναι να φανεί πως ανταποκρίνεται το δίκτυο στην αύξηση των ασύρματων κόμβων. Αρχικά ορίζονται κάποια βασικές μεταβλητές για το σενάριο της προσομοίωσης που θα τρέξει. Οι μεταβλητές αυτές φαίνονται στο πίνακάκι 5-1.

Χαρακτηριστικά προσομοίωσης	
Χρόνος εκτέλεσης	1.000 μsecond
Χρόνος μετ' επιστροφής ONU	50 μsecond
Χρόνος μετ' επιστροφής SS	5 μsecond
Μέγεθος ουράς οπτικών κόμβων	25.000 bytes
Μέγεθος ουράς ασύρματων κόμβων	2.500 bytes
Μέγεθος παραθύρου	1518 bytes

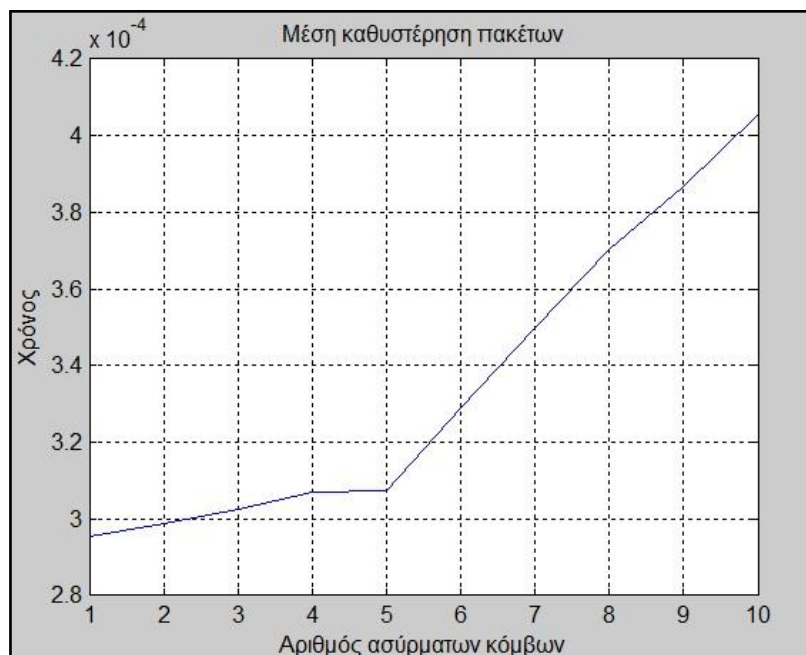
Πίνακας 5-1. Χαρακτηριστικά προσομοίωσης

Στην συνέχεια παρακολουθείται η συμπεριφορά του οπτικού δικτύου το οποίο αποτελείται από πέντε οπτικούς κόμβους και κάθε φορά αυξάνεται κατά έναν ασύρματο κόμβο, ξεκινώντας από ένα έως δέκα. Στην εικόνα 5-15 αναπαριστάται το ποσοστό της απόρριψης των πακέτων για το δίκτυο αυτό. Φαίνεται ότι αρχικά ο ρυθμός απόρριψης παραμένει σταθερός για κάποιους κόμβους, και μετά τον πέμπτο αρχίζει να ανεβαίνει σταδιακά. Αυτό συμβαίνει γιατί μέχρι ένα σημείο το δίκτυο μπορεί να ανταποκρίνεται χωρίς να απορρίπτει πακέτα. Η μεγάλη αλλαγή είναι ότι μετά τον πέμπτο ασύρματο κόμβο θα υπάρχουν ONU με δύο ασύρματους κόμβους. Πλέον το δίκτυο για να ανταποκριθεί ξεκινάει να απορρίπτει πακέτα από τις ουρές (έχουμε πέντε οπτικά δίκτυα και κάθε φορά αυξάνεται ο αριθμός των ασύρματων κόμβων κατά ένα. αυτό σημαίνει ότι από τους έξι ασύρματους κόμβους και μετά αρχίζουν να αποκτούν από δύο ασύρματους κόμβους ο καθένας, ξεκινώντας από τον πρώτο οπτικό κόμβο).



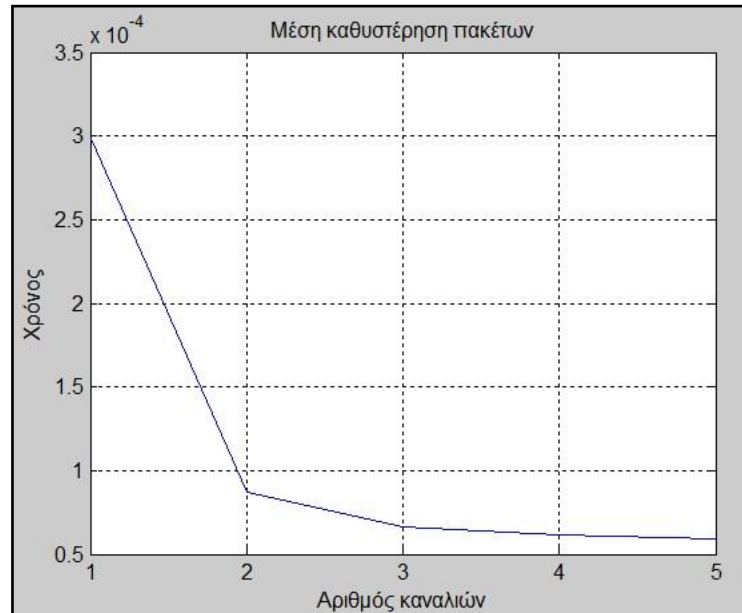
Εικόνα 5-15. Ρυθμός απόρριψης πακέτων (x =αριθμός SS , y = πακέτα)

Μετά τον ρυθμό απόρριψης πακέτων περνάμε στον γράφο της μέσης καθυστέρησης πακέτων. Όπως και στο οπτικό μέρος που μελετήσαμε στο παράδειγμα 1 έτσι και εδώ με την αύξηση των κόμβων η μέση καθυστέρηση πακέτων μεγαλώνει. Αυτό είναι λογικό αφού το κανάλι κατακλύζεται από ολοένα και περισσότερους ανταγωνιστικούς χρήστες οι οποίοι παίρνουν σειρά για να μεταδώσουν στο κανάλι, με αποτέλεσμα όλες οι αφήξεις να υπόκεινται σε καθυστερήσεις. Και πάλι παρατηρείται μεγάλη αύξηση όταν οι οπτικοί κόμβοι αρχίσουν να έχουν περισσότερους από έναν ασύρματους κόμβους.



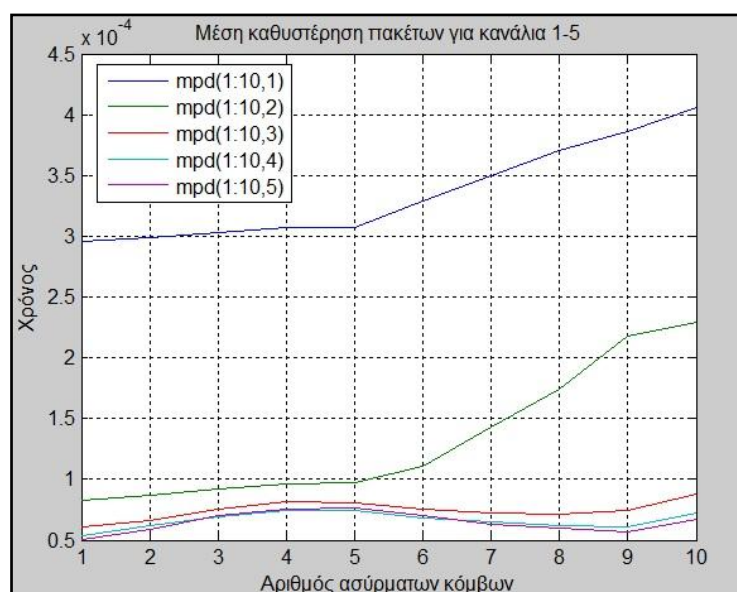
Εικόνα 5-16. Μέση καθυστέρηση πακέτων (x =αριθμός SS, y =sec)

Ένας τρόπος να μειωθεί η μέση καθυστέρηση πακέτου είναι να χρησιμοποιήσουμε περισσότερα κανάλια. Έτσι δίνουμε «ανάσα» στο δίκτυο αφού με την προσθήκη καναλιών μπορεί να γίνει ταυτόχρονη μετάδοση από περισσότερους χρήστες. Ο γράφος 5-17 είναι για πέντε οπτικούς κόμβους οι οποίοι έχουν δύο ασύρματους κόμβους ο καθένας. Στον άξονα x είναι τα κανάλια 1 έως 5.



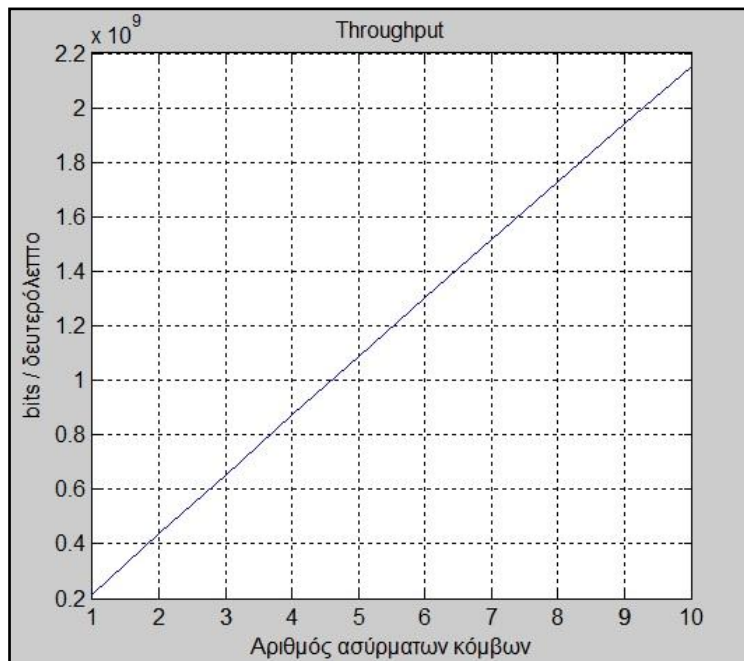
Εικόνα 5-17. Μέση καθυστέρηση πακέτων για κανάλια 1:5 (x =αριθμός καναλιών, y =sec)

Συνολικά για τα πέντε οπτικά τερματικά με δέκα ασύρματους κόμβους και για κανάλια 1-5 έχουμε τον γράφο της εικόνα 5-18. Όπου mpd (mean packet delay) είναι η μέση καθυστέρηση πακέτων και βλέπουμε ότι όσο αυξάνουμε τα κανάλια τόσο έχουμε πτώση στον χρόνο καθυστέρησης.



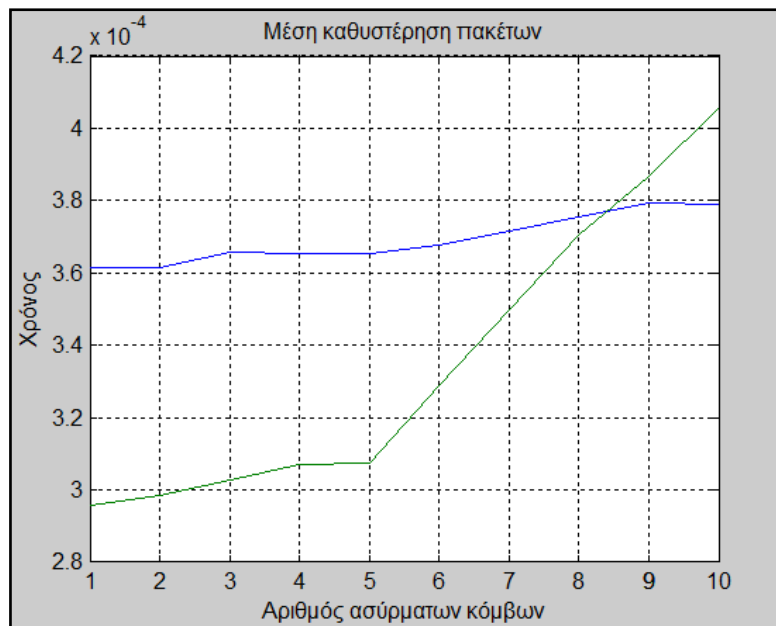
Εικόνα 5-18. Μέση καθυστέρηση πακέτων για κανάλια 1-5 και SS 1-10 (x =αριθμός SS, y =sec)

Στη συνέχεια μελετάται η ρυθμοαπόδοση του δικτύου για πέντε οπτικούς κόμβους με ένα ως δέκα ασύρματους χρήστες ο καθένας. Στον γράφο της εικόνας 5-19 παρατηρείται αύξηση της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου όσο αυξάνουμε τους κόμβους και αυτό γιατί γίνεται καλύτερη χρήση του δικτύου με βάση τις παραμέτρους που ορίσαμε. Ένα παράδειγμα για να γίνει πιο κατανοητό το αποτέλεσμα του γράφου είναι να σκεφτεί κανείς ένα πολύ γρήγορο δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται μόνο για χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Ουσιαστικά το δίκτυο αυτό υπό χρησιμοποιείται αφού σχεδιάστηκε για να παρέχει υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες. Έτσι και με το υβριδικό δίκτυο του σεναρίου.



Εικόνα 5-19. Ρυθμοαπόδοση δικτύου (x=αριθμός SS, y=bps)

Ο τελευταίος γράφος που θα δούμε είναι η σύγκριση για την μέση καθυστέρηση πακέτων διπλασιάζοντας τον αριθμό των οπτικών κόμβων. Με μπλε χρώμα είναι το δίκτυο με δέκα οπτικούς κόμβους και με πράσινο χρώμα για πέντε. Παρατηρούμαι ότι το δίκτυο με τους δέκα οπτικούς κόμβους είναι πιο σταθερό στις αυξομειώσεις του, αφού κάθε φορά προστίθεται και από ένας ασύρματος κόμβος χωρίς μεγάλες εκπλήξεις στην κίνηση. Κανένας οπτικός κόμβος του δεν θα φτάσει να έχει πάνω από έναν ασύρματο κόμβο ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο για τους πέντε οπτικούς κόμβους (όπως και στην περίπτωση του ρυθμού απόρριψης της εικόνας 5-15 και στην μέση καθυστέρησης πακέτου της εικόνας 5-16). Όπως φαίνεται και από τον γράφο έχει μεγάλη διαφορά όταν οι οπτικοί κόμβοι αρχίσουν να αποκτούν και δεύτερο ασύρματο κόμβο οδηγώντας την καθυστέρηση σε απότομη αύξηση και τελικά ξεπερνώντας αυτή των δέκα οπτικών (μετά τους οχτώ ασύρματους κόμβους).



Εικόνα 5-20. Μέση καθυστέρηση πακέτων για ONU=5 και ONU=10(x =αριθμός SS, y =sec)

Συμπεράσματα

Μέσα από την ανάλυση του κώδικα και των γράφων που μας δίνονται κλίνει το μεγαλύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας. Υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί μεταβλητών που μπορούν να τρέξουν για την προσομοίωση και να φανεί η συμπεριφορά των δικτύων WEN. Η προσομοίωση αποτέλεσε μεγάλο μέρος της εντριβής με τα υβριδικά δίκτυα και στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πεδία που μπορεί να επεκταθεί.

6

Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά

6.1 Συμπεράσματα

Το μέλλον της ανάπτυξης των δικτύων πρόσβασης οπτικών ινών βρίσκεται στο κομμάτι των τελικών χρηστών. Αυτό τονώνει αναμφίβολα το ενδιαφέρον για νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες που θα επωφεληθούν από την υψηλή ταχύτητα πρόσβασης και με τη σειρά τους θα παράγουν ζήτηση για περισσότερο εύρος ζώνης. Δυστυχώς το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης οπτικής ίνας στον κόσμο υπό χρησιμοποιείται λόγω του τελευταίου μιλίου συμφόρησης. Όταν κατορθωθεί να αλλάξει αυτό θα είναι ένα κβαντικό άλμα για την κίνηση του δικτύου, με αποτέλεσμα υψηλής απόδοσης ευρυζωνικά δίκτυα.

Είδαμε πως η κατασκευή μίας μεγάλης κεραιάς σε ένα λόφο έξω από τη πόλη και η εγκατάσταση κεραιών σε κτίρια πελατών είναι μία πολύ ευκολότερη και φτηνότερη λύση από το σκάψιμο χαντακιών και το πέρασμα καλωδίων. Έτσι ίσως το κβαντικό άλμα των οπτικών δικτύων να γίνει τελικά σε συνδυασμό με την εξέλιξη και χρήση των νέων ασύρματων τεχνολογιών.

Πάνω απ' όλα, τα μαθήματα του παρελθόντος μας δείχνουν ότι τα δίκτυα του αύριο πρέπει να είναι πιο ευέλικτα για να προσαρμοστούν στην συνεχή εξέλιξη των νέων και ακόμη άγνωστων υπηρεσιών. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι όταν τα οπτικά δίκτυα ήταν ακόμα σε εμβρυακή μορφή, οι χρήσεις που προβλέπονταν για αυτά ήταν υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές όπως υψηλής ανάλυσης ιατρική αρχειοθέτηση εικόνων και απομακρυσμένη χρήση υπερυπολιστών. Χρήσεις που θα χρησιμοποιούνταν από ένα πολύ μικρό μέρος του πληθυσμού. Σήμερα αυτές οι εφαρμογές δεν αντιπροσωπεύουν παρά ένα μικρό μέρος της παγκόσμιας κίνησης του διαδικτύου, αφού οι τεράστιες δυνατότητες του παγκόσμιου συστήματος επικοινωνίας προσφέρονται σε κάθε κοινό άνθρωπο. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πλήρως ότι τα δίκτυα του σήμερα πρέπει να είναι προσανατολισμένα στο μέλλον έτσι ώστε να είναι έτοιμα για τις επόμενες απρόβλεπτες εξελίξεις.

6.2 Μελλοντική δουλειά

Η μελλοντική δουλειά αφορά την περαιτέρω επέκταση του κώδικα για την εκ νέου μελέτη και αποτίμηση των δικτύων WEN. Δημιουργήσαμε το βασικό μοντέλο του δικτύου αυτού ώστε να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του και για να μπορούμε να συγκεντρώσουμε αποτελέσματα για την κίνηση των δικτύων αυτών.

Η προσθήκη ποιότητας υπηρεσιών είναι μία επέκταση που μπορεί να γίνει. Έτσι πέρα από τον αριθμό πακέτου, τον χρόνο άφιξης στην ουρά και τα bytes θα πρέπει να έχουμε ακόμα μία μεταβλητή στα στοιχεία των πακέτων που εισέρχονται στις ουρές των κόμβων. Αυτή η μεταβλητή θα αναπαριστά το QoS όπως βλέπουμε και στην εικόνα 6-1.

Packet ID	Χρόνος άφιξης	Μέγεθος (bytes)	Ποιότητα υπηρεσιών (QoS)
1	155	498	2
2	156	222	1
3	156	222	1
4	157	498	3
5	157	171	2
6	158	171	2
7	158	171	3
8	158	363	1
9	159	363	1
10	160	363	3

Εικόνα 6-1. Ποιότητα υπηρεσιών QoS

Όπως αναλύσαμε και στο κεφάλαιο 4 των δικτύων WEN η ποιότητα υπηρεσιών αναπαριστάται από τις τρεις συγχωνευμένες κατηγορίες (UGS/EF, rtPS & ertPS/AF, nrtPS & BE/BE). Έτσι θα έχουμε έναν αριθμό από το 1 έως το 3 που θα υποδεικνύει σε ποια κατηγορία QoS ανήκει το πακέτο. Από εκεί και πέρα όταν ο κόμβος ρωτάτε για να δηλώσει τι έχει προς μετάδοση, θα κάνει μία ταξινόμηση των πακέτων της ουράς του δίνοντας προτεραιότητα στην ποιότητα υπηρεσιών. Έτσι στην επόμενη μετάδοση θα μεταδοθούν πρώτα τα πακέτα με τον μεγαλύτερο αριθμό προτεραιότητας.

Το πώς θα λειτουργεί τελικά το QoS εξαρτάται από τον τρόπο που θα προγραμματίσουμε την ταξινόμηση. Καταλαβαίνουμε ότι μία απλή ταξινόμηση αδιαφορεί για τα πακέτα χαμηλότερης προτεραιότητας αφού θα μεταδοθούν μόνο σε περίπτωση που μείνει κάποιος διαθέσιμος χώρος από τα πακέτα υψηλότερης προτεραιότητας. Συνεπώς θα υποφέρουν από μεγάλες καθυστερήσεις και αν η κίνηση στο δίκτυο είναι αυξημένη πιθανόν μην μεταδοθούν και ποτέ. Συνεπώς δεν μπορούμε να βασιστούμε στην απλή ταξινόμηση αλλά στον προγραμματισμό κάποιας που θα προνοεί για όλες τις κατηγορίες, δίνοντας διαφορετικό «βάρος» σε κάθε μία χωρίς να υπάρχει μονοπωλιακή χρήση του καναλιού.

Η σημαντικότερη επέκταση όμως στην λειτουργία των δικτύων WEN είναι η διαφορετική προσέγγιση στην λειτουργία των κόμβων VOB. Η μεγάλη αλλαγή έχει να κάνει με την άμεση επικοινωνία του σταθμού βάσης OLT με τους ασύρματους κόμβους SS. Αυτό δεν αποκλείει φυσικά την χρήση των ONU αφού αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του δικτύου. Αλλάζει όμως σημαντικά τον τρόπο της μετάδοσης των πακέτων, μειώνοντας τις καθυστερήσεις, αφού μιλάμε για μία πιο άμεση επικοινωνία.

Αναφορές

- [1]. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2010-2015
 - [2]. Thomas E. Stern, Georgios Ellinas, Krishna Bala: Multiwavelength Optical Networks, Second Edition, 2009
 - [3]. Josep Prat: Next-Generation FTTH Passive Optical Networks-2008
 - [4]. Michael P. McGarry, Martin Reisslein, Martin Maier: WDM ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORKS -2006
 - [5]. Michael P. McGarry, Martin Reisslein, Martion Maier: Ethernet Passive Optical Network Architectures and Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms-2008
 - [6]. Yuanqiu Luo, Nirwan Ansari: Bandwidth Allocation for Multiservice Access on EPONS-2005
 - [7]. Andrew S. Tanenbaum: Δίκτυα Υπολογιστών-2003
 - [8]. Kwang-Cheng Chen, J. Roberto B. de Marca: MobileWiMAX -2008
 - [9]. Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed: Fundamentals of WiMAX-2007
 - [10]. Chakchai So-In, Raj Jain, Abdel-Karim Tamimi: Scheduling in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks: Key Issues and a Survey-2009
 - [11]. Kun Yang, Shumao Ou, Ken Guild, Hsiao-Hwa Chen: Convergence of Ethernet PON and IEEE 802.16 Broadband Access Networks and its QoS-Aware Dynamic Bandwidth Allocation Scheme-2009
- Chinlon Lin: Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home-2006
- P. J. Louis: Broadband crash course-2002

Γλωσσάρι

CAGR - compound annual growth rate

VoD - Video on Demand

QoS - Quality of Service

FTTN - Fiber to the Node ή Fiber to the Neighborhood

FTTC - Fiber to the Curb

FTTB - Fiber to the Building

FTTH - Fiber to the Home

PON - Passive Optical Networks

WDM - Wavelength Division Multiplexing

OLT - Optical Line Terminal

ONU - Optical Network Unit

APON - ATM Passive Optical Network

BPON - Broadband PON

EPON ή GEPON - Ethernet PON

GPON - Gigabit PON

10G-EPON - 10 Gigabit Ethernet PON

APON - asynchronous transfer mode PON

EFM - Ethernet in the First Mile

FSAN - Full-Services Access Network

RTT - Round Trip Time

TDM – Time Division Multiplexing

WDM – Wavelength Division Multiplexing

MPCP - Multipoint Control Protocol

DBA - Dynamic Bandwidth Allocation

NASC - Next Available Supported Channel

ISCG - Inter-Scheduling Cycle Gap

LFJ - Least Flexible Job

LBA – Limited Bandwidth Allocation

CBA - Credit-Based Bandwidth Allocation

EF - Expedited Forwarding

AF - Assured Forwarding

BE - Best Effort

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

MAC – Medium Access Control

OFDM -Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access

UGS - Unsolicited Grant Scheme

ertPS - Extended Real Time Polling Service

rtPS - Real Time Polling Service

nrtPS - Non Real Time Polling Service

BE - Best Effort Service

BS – Base Station

MS – Mobile Station

SS – Subscriber Station

PDU – Protocol Data Unit

SDU – Service Data Unit

GPCS - Grant Per Client Station

GPCI – Grant Per Class

GPSF – Grant Per Service Flow

