



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

Συγκριτική Μελέτη Οπτικών Δικτύων Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ι. Μανώλης

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015



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

Συγκριτική Μελέτη Οπτικών Δικτύων Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ι. Μανώλης

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καγάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

.....
Νικόλαος Ι. Μανώλης

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

Copyright © Νικόλαος Ι. Μανώλης 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η εξέλιξη που έχουν γνωρίσει τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα τις τελευταίες δεκαετίες έχει καταγιστικό ρυθμό. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εμφάνιση και εξάπλωση του διαδικτύου. Με το πέρασμα των χρόνων συνεχώς αυξάνεται το ποσοστό των ανθρώπων που χρησιμοποιούν το διαδίκτυο στην καθημερινότητα τους. Πλέον είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Οι υφιστάμενες δομές του τηλεπικοινωνιακού δικτύου δεν μπορούσαν να ανταποκριθούν στις ανάγκες του σύγχρονου χρήστη. Υπήρξε άμεση ανάγκη τα υφιστάμενα δίκτυα να αναβαθμιστούν. Η αντικατάσταση των καλωδίων χαλκού με καλώδια οπτικών ινών αποτέλεσε την ιδανικότερη λύση. Τα δίκτυα κορμού και τα μητροπολιτικά δίκτυα ήταν τα πρώτα που αναβαθμίστηκαν λόγω του πολύ σημαντικού ρόλου τους στην δομή του δικτύου. Το πρόβλημα όμως παρέμενε για το δίκτυο πρόσβασης που δεν μπορούσε να διαχειριστεί τον μεγάλο όγκο δεδομένων που του διοχετευόταν και να παρέχει υψηλές ταχύτητες στον τελικό χρήστη. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα αποτέλεσαν την ιδανικότερη λύση για τα δίκτυα πρόσβασης, τόσο από άποψη κόστους, όσο και από άποψη κατανάλωσης ενέργειας.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να παρουσιάσει τα παθητικά οπτικά δίκτυα του δικτύου πρόσβασης επόμενης γενιάς, καθώς και τις σημαντικότερες υλοποιήσεις τους. Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην δομή των παθητικών οπτικών δικτύων, καθώς επίσης και στις αρχιτεκτονικές και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Στα επόμενα τρία κεφάλαια γίνεται παρουσίαση των σημαντικότερων παθητικών οπτικών δικτύων με κοινό γνώρισμα τους την πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα Broadband Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (BPON), τα οποία βασίστηκαν πάνω στην μέθοδο της ασύγχρονης μεταφοράς δεδομένων. Στο 4ο κεφάλαιο επιχειρείται η αναλυτική παρουσίαση των σημαντικότερων χαρακτηριστικών και λειτουργιών των Ethernet Παθητικών Οπτικών Δικτύων (EPON), τα οποία βασίστηκαν στη μετάδοση πληροφοριών με χρήση Ethernet πλαισίων. Στο 5ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των Gigabit Παθητικών Οπτικών Δικτύων (GPON), τα οποία χρησιμοποιούν την μέθοδο GEM για την ενθυλάκωση δεδομένων στα πλαίσια μεταφοράς τους. Στο 6ο κεφάλαιο επιχειρείται η παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών και των επικρατέστερων αρχιτεκτονικών των Wavelength Division Multiplexing Παθητικών Οπτικών Δικτύων (WDM PON), τα οποία εισάγουν στο δίκτυο πρόσβασης την πολυπλεξία με βάση το μήκος κύματος. Τέλος, στο 7ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύγκριση όλων των παραπάνω παθητικών οπτικών δικτύων, τόσο από πλευράς χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, όσο και από πλευράς κόστους και κατανάλωσης ενέργειας, με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για το μέλλον των παθητικών οπτικών δικτύων στο δίκτυο πρόσβασης.

Λέξεις κλειδιά

Δίκτυα Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς, Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Οπτική ίνα στο πεζοδρόμιο, Οπτική ίνα στις εγκαταστάσεις, Οπτική ίνα στο σπίτι, Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου, Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος, Broadband Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Ethernet Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Gigabit Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Παθητικά Οπτικά Δίκτυα με διαίρεση μήκους κύματος.

Abstract

The telecommunications network has experienced great development in the recent decades. This is mainly due to the emergence and spread of the Internet. As the years go by, the amount of people using the Internet in their daily lives is increasing. Internet is now an integral part of our lives. The existing structures of the telecommunications network could not meet the needs of the modern user. There was an immediate need for existing networks to be upgraded. The replacement of copper cables with fiber optic cables was the ideal solution. The core networks and metropolitan networks were first upgraded because of their very important role in the network structure. But the problem remained for the access network that could not handle the large data volume and provide high speeds to the end user. Passive optical networks were the ideal solution for access networks, both in terms of cost and in terms of energy consumption.

This study aims to present the passive optical networks used in the next generation access network and their most important implementations. The second chapter refers to the structure of passive optical networks, their architectures and their operational characteristics. In the following three chapters are presented the most important time division multiplexing passive optical networks. More specifically, in the third chapter is presented the Broadband Passive Optical Network (BPON), which is based on the asynchronous transfer mode (ATM). The fourth chapter is the detailed presentation of the main features and functions of Ethernet Passive Optical Network (EPON), which is based on transmission using Ethernet frames. The 5th chapter is the presentation of Gigabit Passive Optical Network (GPON), which uses the GEM method for encapsulating data in its transport frames. The sixth chapter aims to present the main characteristics and prevailing architectures of Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM PON), which is the first PON introducing the wavelength division multiplexing in the access network. Finally, in chapter 7 is performed a comparison of all the above passive optical networks, both in terms of features and specifications, but also in terms of cost and energy consumption, in order to extract useful conclusions for the future of passive optical networks in the access network.

Keywords

Next Generation Access Networks, Passive Optical Networks, Fiber to the Curb (FTTC), Fiber to the Premises (FTTC), Fiber to the Home (FTTH), Time Division Multiplexing (TDM), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Broadband Passive Optical Networks (BPON), Ethernet Passive Optical Networks (EPON), Gigabit Passive Optical Networks (GPON), Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks (WDM PON).

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στον τομέα των Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο για την ευκαιρία που μου προσέφερε, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα που αποτελεί εφόδιο για την πορεία μου από εδώ και στο εξής.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον senior researcher του εργαστηρίου, Δημήτρη Αποστολόπουλο, για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε για να ολοκληρώσω την εργασία αυτή, όχι μόνο με τις γνώσεις του, αλλά και με την ψυχολογική υποστήριξή του προς εμένα.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την γυναίκα μου και τον μικρό μας γιο για όλη τους την αγάπη και υποστήριξη όλων αυτών τον καιρό.

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract.....	8
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1. Το διαδίκτυο και η ανάπτυξή του στην σύγχρονη εποχή.....	14
1.2. Το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο	19
1.3. Η εξέλιξη του τηλεπικοινωνιακού δικτύου και το πρόβλημα του bottleneck	20
1.4. Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης (Optical Access Networks)	22
1.4.1. Σημείο προς σημείο οπτικά δίκτυα (point to point optical networks)	22
1.4.2. Ενεργά Ethernet δίκτυα (active Ethernet networks).....	23
1.4.3 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs).....	23
2. ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PASSIVE OPTICAL NETWORKS – PONs)	25
2.1. Γενικά	25
2.2. Δομή.....	25
2.3. Αρχιτεκτονική.....	27
2.4. Τοπολογία	28
2.5. Time Division Multiplexing (Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου)	30
2.6. Time Division Multiple Access (Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου).....	31
2.7. Wavelength Division Multiplexing (Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος, WDM)	32
2.8. Πλεονεκτήματα της χρήσης PONs στο δίκτυο πρόσβασης.....	32
2.9. Υλοποιήσεις PONs	33
3. APON/BPON	34
3.1 Εισαγωγή	34
3.2. Asynchronous Transfer Mode (ATM)	34
3.2.1 Δομή κελιού ATM.....	36
3.3 BPON.....	37

3.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας.....	39
3.4.1 Ροή κίνησης φωνής και δεδομένων.....	39
3.4.2 Προστασία των εγκρίσεων.....	41
3.4.3 Ροή κίνησης βίντεο.....	42
3.5 Έλεγχος κίνησης.....	43
3.5.1 Ανάθεση σταθερού εύρους ζώνης.....	43
3.5.2 Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης.....	44
3.6 Η εγκατάλειψη του BPON.....	45
4. Ethernet PON (EPON).....	47
4.1 Εισαγωγή.....	47
4.2 Αρχιτεκτονική EPON.....	48
4.2.1 OLT και ONU λειτουργίες.....	49
4.2.2 Ροή κίνησης EPON.....	50
4.2.3 Επίπεδα ισχύος οπτικής δέσμης.....	53
4.3 Λειτουργίες MPCP.....	53
4.3.1 Διαδικασία ανίχνευσης.....	53
4.3.2 Ανάθεση εύρους ζώνης.....	54
4.3.3 Μηχανισμός ranging.....	55
4.4 10G-EPON.....	57
5. Gigabit PON (GPON).....	58
5.1 Εισαγωγή.....	58
5.2 Αρχιτεκτονική GPON.....	58
5.2.1 Προδιαγραφές GPON (GPON G.984.1).....	59
5.2.2 Μεταγωγές προστασίας του GPON.....	60
5.3 GPON G.984.2.....	61
5.3.1 Απόδοση οπτικής ισχύος.....	61
5.3.2 Συγχρονισμός και διαχείριση οπτικής ισχύος.....	62
5.3.3 Forward Error Correction (FEC).....	63
5.4. Στρώμα σύγκλισης μετάδοσης GPON (GPON G.984.3).....	64

5.4.1 Πλαίσιο GPON ρεύματος καθόδου	64
5.4.2 Πλαίσιο GPON ρεύματος ανόδου	67
5.4.3 Τμήμα GEM	69
5.4.4 Ανενεργά πλαίσια GEM	71
5.4.5 Κατακερματισμός (Fragmentation)	71
5.4.6 Ασφάλεια πληροφοριών σε ένα GPON δίκτυο	72
5.4.7 Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA).....	73
5.4.8 Μετάδοση μηνυμάτων οργάνωσης, διαχείρισης και συντήρησης (OAM).....	74
5.5 10G-PON	74
6. Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM-PON).....	76
6.1 Γενικά	76
6.2 Αρχιτεκτονική απλού WDM-PON	77
6.3 Χαρακτηριστικά και επιλογές λειτουργίας WDM-PON.....	78
6.3.1 Coarse WDM-PON – Dense WDM-PON	78
6.3.2 Απομακρυσμένος κόμβος	79
6.4 Αρχιτεκτονικές WDM.....	81
6.4.1 Composite PON (CPON).....	81
6.4.2 Local Access Router Network (LARNET).....	82
6.4.3 Remote Interrogation of Terminal Network (RITENET).....	83
6.4.4 Multistage AWG-Based WDM-PON	84
6.4.5 DWDM Super-PON (SPON).....	85
6.4.6 SUCCESS-DWA	86
6.5 Πρωτόκολλα για WDM-PONs	88
6.5.1 Επέκταση MPCP πρωτοκόλλου και WDM-IPACT αλγόριθμος.....	88
6.5.2 WDM-PON DBA πρωτόκολλο για SUCCESS αρχιτεκτονική	89
7. Συγκρίσεις – συμπεράσματα	90
7.1 Σύγκριση προδιαγραφών και απαιτήσεων PONs.....	90
7.1.1 Σύγκριση TDM-PONs	90
7.1.2 Σύγκριση 10GPON και WDM-PON	92

7.2 Ανάλυση κόστους των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε TDM και WDM PONs	93
7.3 Συγκριτικό κατανάλωσης ενέργειας	95
7.4 Σύγκριση κόστους 10GPON και WDM-PON	97
7.5 Συμπεράσματα	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	101

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Το διαδίκτυο και η ανάπτυξή του στην σύγχρονη εποχή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί αλματώδης ανάπτυξη στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Επί χρόνια κύριοι τρόποι επικοινωνίας των ανθρώπων από απόσταση αποτελούσαν το τηλέφωνο, ο τηλεγράφος και αργότερα το φαξ. Παράλληλα, η επίγεια τηλεόραση και το ραδιόφωνο ήταν, και είναι ακόμη και σήμερα, τα πιο διαδεδομένα μέσα μαζικής ενημέρωσης και ψυχαγωγίας των ανθρώπων. Πλέον οι τηλεπικοινωνίες βρίσκονται σε μια πορεία συνεχούς εξέλιξης, προσφέροντας στον άνθρωπο ολοένα και περισσότερες καινοτόμες υπηρεσίες.

Η πρόοδος στον τομέα των δικτύων υπολογιστών και η εξάπλωση του διαδικτύου (internet) έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι επικοινωνούν και συνεργάζονται στη σύγχρονη εποχή. Μεγάλο ποσοστό ανθρώπων, κρατούν επαφή με φίλους και συγγενείς, ενημερώνονται για τις τελευταίες εξελίξεις και παράλληλα διασκεδάζουν, χειριζόμενοι απλώς τα προφίλ τους στα διάφορα μέσα κοινωνικής δικτύωσης.

Η αγορά προϊόντων ποτέ δεν ήταν ευκολότερη υπόθεση από ό,τι είναι σήμερα. Αμέτρητος αριθμός ιστοσελίδων ηλεκτρονικού εμπορίου έχουν κατακλύσει τον παγκόσμιο ιστό. Ο αγοραστής έχει πλέον τη δυνατότητα να συγκρίνει τιμές, να αναζητήσει καλύτερη ποιότητα, να λάβει ταχύτερη και πιο αξιόπιστη εξυπηρέτηση, και όλα αυτά πραγματοποιώντας τις αγορές του ηλεκτρονικά, από τον προσωπικό υπολογιστή του.

Οι αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έχουν μετατρέψει σε εύκολη υπόθεση και την διακίνηση ψηφιακών αρχείων. Εταιρίες αποθήκευσης δεδομένων έχουν κάνει την εμφάνιση τους στο διαδίκτυο και προσφέρουν τη δυνατότητα αποθήκευσης στους servers τους αρχείων κάθε μεγέθους. Αρχεία στα οποία ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση οποιαδήποτε στιγμή, από οποιοδήποτε μέρος και υπολογιστή, ενώ μπορεί επίσης να τα διαμοιράζεται και με άλλους χρήστες.

Επιπλέον, είναι δυνατή η ζωντανή μετάδοση ήχου και εικόνας υψηλής ευκρίνειας. Ως συνέπεια έχουν δημιουργηθεί ιστότοποι οι οποίοι προσφέρουν στον χρήστη τη δυνατότητα να μοιραστεί και

να παρακολουθήσει αμέτρητα βίντεο ή ηχητικά κλιπ για τη διασκέδαση, ενημέρωση και επιμόρφωση του. Παράλληλα μεγάλα τηλεοπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο για να προωθήσουν το προϊόν τους, προβάλλοντας τις εκπομπές τους μέσω αυτού.

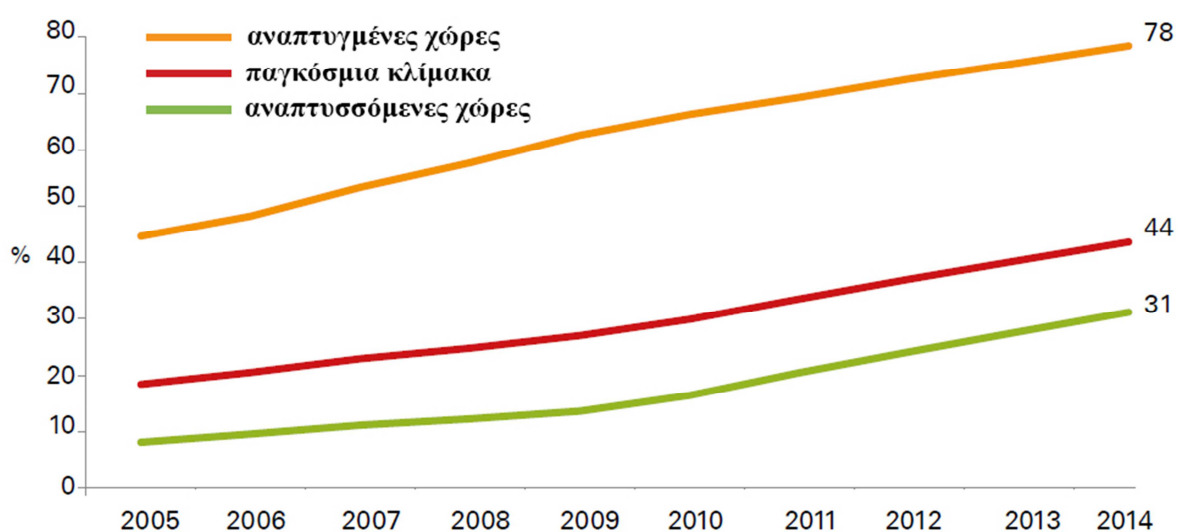
Εκτός από τις δυνατότητες που απολαμβάνει ο απλός χρήστης του δικτύου, οι εξελίξεις στις τηλεπικοινωνίες αξιοποιούνται θετικά και από εταιρίες με στόχο να βελτιώσουν τον τρόπο λειτουργίας τους, και κατ' επέκταση την παραγωγικότητα και τα κέρδη τους. Πέρα από την ανάπτυξη εταιρικών ιστοσελίδων και τη διαφήμιση στο διαδίκτυο, ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αξιοποίησης των προηγμένων υπηρεσιών που προσφέρουν οι τηλεπικοινωνίες σήμερα αποτελούν οι τηλεδιασκέψεις. Με τις τηλεδιασκέψεις είναι εφικτή η επικοινωνία μέσω ζωντανού βίντεο μεταξύ απομακρυσμένων γραφείων εταιριών, γεγονός που επιτρέπει σ' αυτές να περιορίσουν τις μετακινήσεις των υπαλλήλων τους και να κερδίσουν σε χρόνο και έξοδα.

Η ζωντανή μετάδοση υψηλής ευκρίνειας βίντεο έχει παρόμοια εφαρμογή και στον τομέα της ιατρικής. Μέσω της τηλεϊατρικής είναι πλέον δυνατή η παροχή ιατρικών συμβουλών και διαγνώσεων από απόσταση, ενώ επιπρόσθετα μπορούν και πραγματοποιούνται χειρουργικές επεμβάσεις υπό την επίβλεψη ιατρών που βρίσκονται χιλιάδες μέτρα μακριά από τον ασθενή.

Τα παραπάνω είναι μόνο ελάχιστα παραδείγματα για το πόσο σημαντικές είναι οι τηλεπικοινωνίες για τον σύγχρονο άνθρωπο, τόσο σε προσωπικό επίπεδο, όσο και επαγγελματικό.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια χρήσιμα στοιχεία από την ετήσια έκδοση στατιστικών της ITU, ICT Facts and Figures 2014 [1], που αντικατοπτρίζουν πλήρως την εισχώρηση του internet στη ζωή του σύγχρονου ανθρώπου.

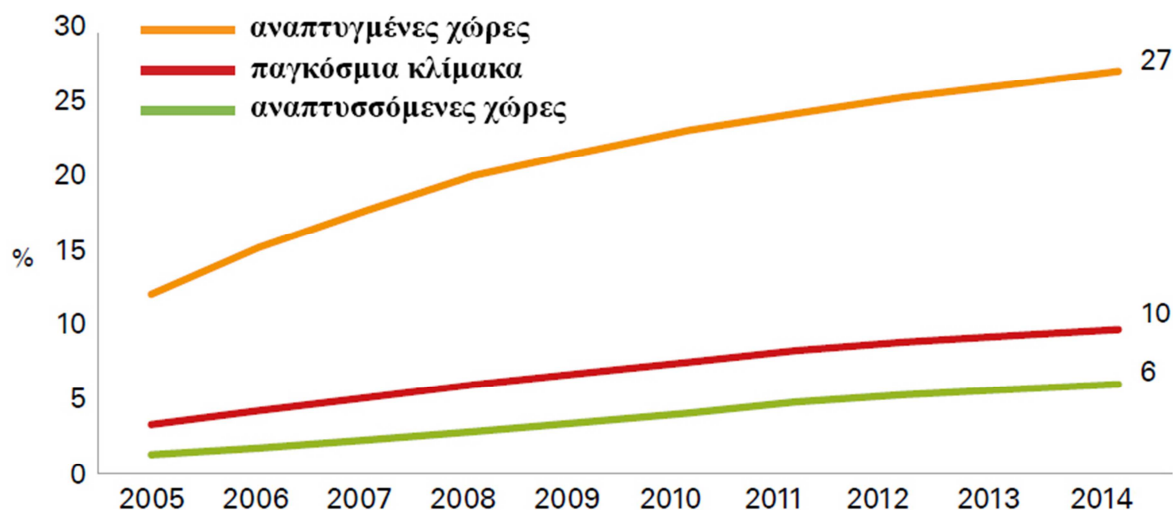
Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται το ποσοστό των νοικοκυριών που έχουν πρόσβαση στο internet από το 2005 έως το 2014, με βάση το πόσο αναπτυγμένη είναι η κάθε χώρα.



Σχ.1.1 – ποσοστό νοικοκυριών με πρόσβαση στο internet

Παρατηρούμε ότι μέσα σε 10 χρόνια έχει σχεδόν διπλασιαστεί το ποσοστό των νοικοκυριών στις αναπτυγμένες χώρες που έχουν πρόσβαση στο internet. Για τις αναπτυσσόμενες χώρες το αντίστοιχο ποσοστό έχει υπερτριπλασιαστεί, ενώ από το 2010 και μετά αναπτύχθει με πολύ ταχύ ρυθμό.

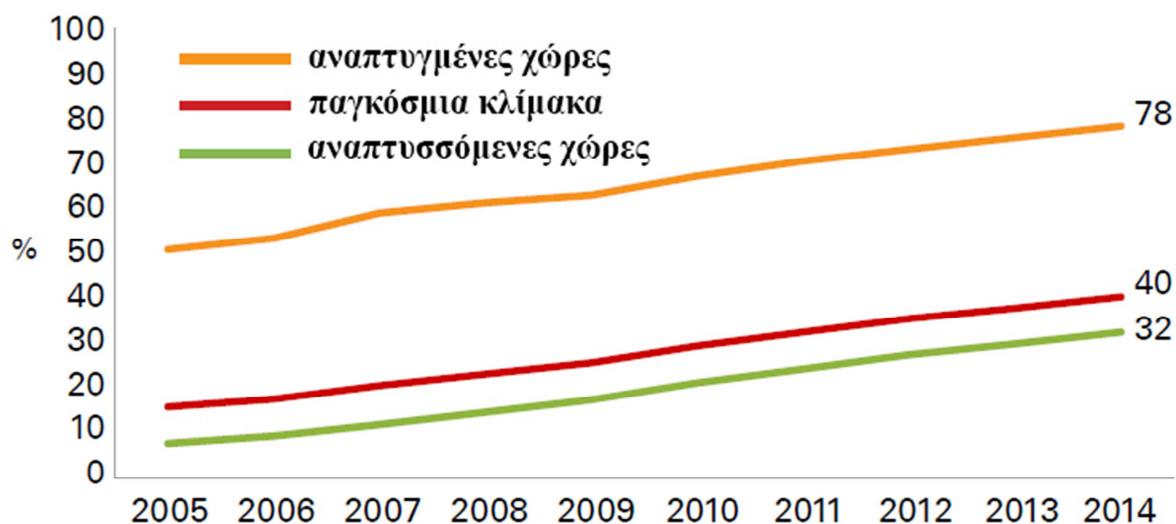
Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται ο αριθμός των σταθερών, ενσύρματων, ευρυζωνικών συνδρομών ανά 100 κατοίκους, με βάση το επίπεδο ανάπτυξης της κάθε χώρας.



Σχ.1.2 – σταθερές (ενσύρματες) συνδρομές ευρυζωνικότητας ανά 100 κατοίκους

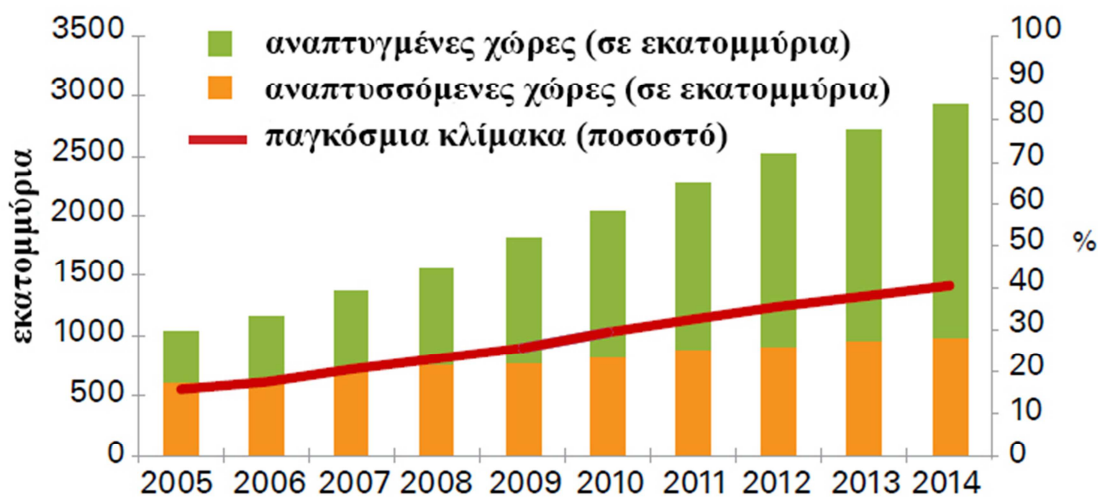
Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει πως στο διάστημα των τελευταίων 10 χρόνων ο αριθμός των σταθερών, ενσύρματων, συνδρομών ευρυζωνικότητας παρουσιάζει αύξηση, όμως ο ρυθμός της αύξησης αυτής έχει πτωτική τάση. Αυτή η συμπεριφορά του ρυθμού αύξησης οφείλεται κυρίως στις αναπτυγμένες χώρες, στις οποίες παρατηρείται μια επιβράδυνση στην εισχώρηση της ευρυζωνικότητας. Παρατηρείται δηλαδή η ανάγκη οι υπηρεσίες ευρυζωνικότητας να γίνουν πιο προσιτές στον πελάτη, προσφέροντας περισσότερες υπηρεσίες, μεγαλύτερες ταχύτητες, μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη επεκτασιμότητα.

Ένα ακόμη χρήσιμο στοιχείο που προκύπτει από τα ετήσια στατιστικά στοιχεία της ITU είναι το ποσοστό των ανθρώπων, παγκοσμίως, που χρησιμοποιούν το internet. Όπως φαίνεται από το επόμενο γράφημα ο αριθμός των ανθρώπων αυτών τα τελευταία δέκα χρόνια έχει υπερδιπλασιαστεί, φτάνοντας το 2014 το 40%. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι ο αριθμός αυτός για τις αναπτυγμένες χώρες φτάνει το 78%, ενώ για τις αναπτυσσόμενες το 32%. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι σήμερα 4 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν χρησιμοποιούν ακόμη το internet, με το 90% αυτών να βρίσκεται στον αναπτυσσόμενο κόσμο.



Σχ.1.3 – ποσοστό ανθρώπων με πρόσβαση στο internet

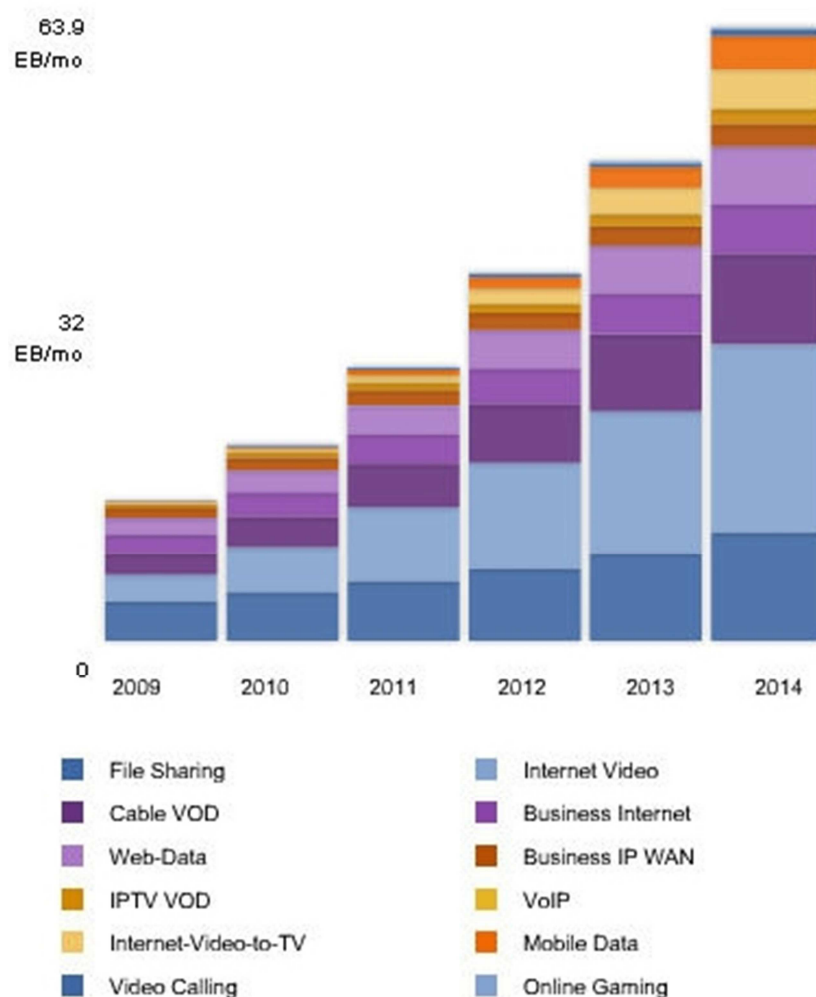
Στο γράφημα που ακολουθεί, τα παραπάνω ποσοστά μεταφράζονται και σε απόλυτους αριθμούς. Παρατηρείται ότι στο τέλος του 2014 ο αριθμός των χρηστών του internet σε παγκόσμια κλίμακα έφτασε τα 3 δισεκατομμύρια. Τα δύο τρίτα αυτών των χρηστών προέρχονται από τον αναπτυγμένο κόσμο. Παράλληλα θα πρέπει να τονιστεί ότι στις αναπτυσσόμενες χώρες ο αριθμός των χρηστών του internet έχει διπλασιαστεί μέσα στα τελευταία 5 χρόνια, από 974 εκατομμύρια το 2009 σε 1.9 δισεκατομμύρια το 2014.



Σχ.1.4 – άνθρωποι με πρόσβαση στο internet, απόλυτος αριθμός και παγκόσμιο ποσοστό

Στα ίδια συμπεράσματα, για την αλματώδη ανάπτυξη του internet, μπορούμε να καταλήξουμε κοιτώντας τα στατιστικά στοιχεία από μια διαφορετική σκοπιά. Στο επόμενο γράφημα απεικονίζονται οι προβλέψεις της εταιρίας CISCO για την ανάπτυξη της κίνησης του διαδικτύου, όπως αυτές δημοσιεύθηκαν τον Ιούνιο του 2010 μέσω του «Visual Networking Index (VNI)

Forecast, 2009-2014» [2]. Η κίνηση όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα μετράται σε exabytes ανά μήνα.



Σχ.1.5 – εκτιμώμενη κίνηση του διαδικτύου σε exabytes ανά μήνα

Εύκολα συμπεραίνεται από τα παραπάνω στοιχεία ότι με το πέρασμα των χρόνων η κίνηση στο διαδίκτυο έχει αυξητικό ρυθμό ανάπτυξης, φτάνοντας το 2014 σε μια εκτίμηση των 63.9 exabytes ανά μήνα. Αντιστοιχεί δηλαδή σε διπλασιασμό της κίνησης μέσα σε μόνο τρία χρόνια. Με μια προσεκτικότερη ματιά, και σύμφωνα με τις ανακοινώσεις της CISCO, παρατηρείται ότι το συντριπτικό ποσοστό της κίνησης αυτής το 2014 αποτελείται μόνο από διάφορες μορφές video (TV, VoD, internet video, peer-to-peer).

Είδαμε λοιπόν, τόσο με παραδείγματα, όσο και με επίσημα στατιστικά στοιχεία, πώς αξιοποιούνται οι σύγχρονες τηλεπικοινωνίες στις μέρες μας προσφέροντας υπηρεσίες τόσο σε μεμονωμένους χρήστες όσο και σε εταιρίες ή οργανισμούς. Πίσω από όλες αυτές τις προσφερόμενες υπηρεσίες βρίσκεται ένα γιγαντιαίο φυσικό δίκτυο που επεκτείνεται από άκρη σε άκρη πάνω στον πλανήτη και μπορεί να φέρει σε επαφή υπολογιστές που βρίσκονται στις πιο απομακρυσμένες

γωνίες του. Διασχίζει ηπείρους, ενώνει χώρες, πόλεις και χωριά. Εξυπηρετεί απλούς οικιακούς χρήστες, εταιρίες κολοσσούς, μικρότερες επιχειρήσεις, πανεπιστήμια, δημόσιους οργανισμούς, νοσοκομεία αλλά και υπηρεσίες στρατού. Ας δούμε ποια είναι η δομή του δικτύου αυτού.

1.2. Το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο

Ο βασικός τρόπος διαχωρισμού του τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε επί μέρους δίκτυα αποτελείται από τα δίκτυα κορμού, τα μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα πρόσβασης [3]:

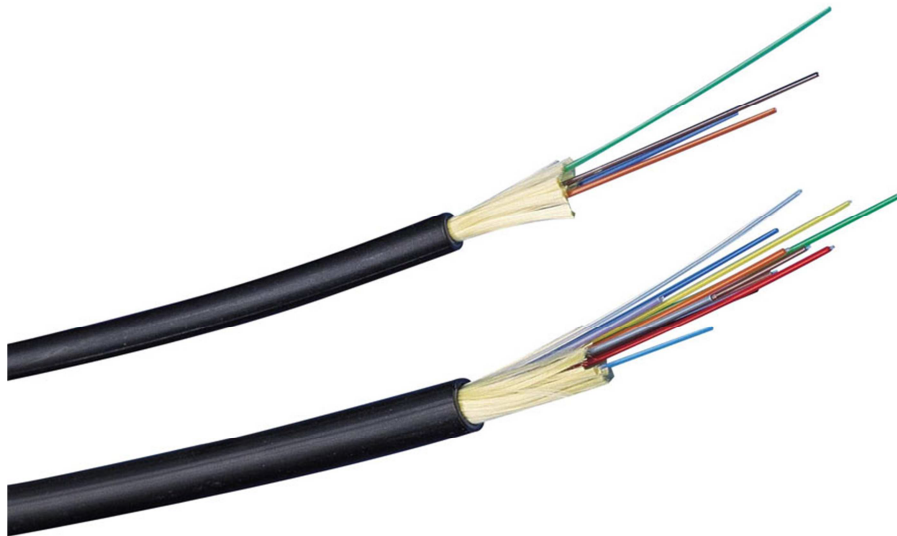
Το **δίκτυο κορμού (core network)**, εύκολα συμπεραίνεται από την ονομασία του ότι αποτελεί τον κορμό του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Μέσω αυτού είναι δυνατή η επικοινωνία ανάμεσα σε μικρότερα δίκτυα (sub-networks). Συνήθως το δίκτυο κορμού αναπτύσσεται ως τα σύνορα της κάθε χώρας και έχει τοπολογία βρόχου (mesh topology). Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο κόμβο με αποκλειστικό δίκτυο σημείο προς σημείο (point to point). Μέσω του δικτύου κορμού είναι δυνατή η επικοινωνία ανάμεσα στα δίκτυα διαφορετικών πόλεων, καθώς επίσης και διαφορετικών χωρών. Συνήθως ο κάθε τηλεπικοινωνιακός πάροχος διαθέτει το δικό του δίκτυο κορμού, το οποίο όμως διασυνδέεται και με τα δίκτυα κορμού άλλων παρόχων. Όπως είναι φυσικό ο όγκος των δεδομένων που μετακινούνται μέσω του δικτύου κορμού είναι τεράστιος. Για το λόγο αυτό και η χωρητικότητα των καλωδίων του είναι αντιστοίχως μεγάλη. Οι συσκευές που συναντώνται στους κόμβους του δικτύου κορμού είναι συνήθως μεταγωγείς (switches) και δρομολογητές (routers).

Τα **μητροπολιτικά δίκτυα (metropolitan networks)** αναπτύσσονται κυρίως σε πόλεις ή μικρότερα αυτόνομα συγκροτήματα κτηρίων, όπως για παράδειγμα σε πανεπιστήμια ή εγκαταστάσεις εταιριών. Είναι και αυτά μια μικρογραφία των δικτύων κορμού. Τα καλώδια που αποτελούν ένα μητροπολιτικό δίκτυο είναι και αυτά μεγάλης χωρητικότητας, όπως αυτά των δικτύων κορμού.

Στον αντίποδα βρίσκεται το **δίκτυο πρόσβασης (access network)** που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των τερματικών χρηστών με τους κόμβους πρόσβασης. Είναι το τελευταίο κομμάτι του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, αυτό που συνήθως ονομάζουμε σαν last-mile δίκτυο. Ξεκινά από τον τοπικό κόμβο πρόσβασης και φτάνει μέχρι τις εγκαταστάσεις του κάθε πελάτη. Από εκεί ξεκινούν και εκεί καταλήγουν τα δεδομένα που διατρέχουν ολόκληρο το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Είναι ένα δίκτυο συνεχώς εξελισσόμενο αφού με το πέρασμα των χρόνων αυξάνονται τόσο οι πελάτες που εξυπηρετεί όσο και οι υπηρεσίες που προσφέρει.

1.3. Η εξέλιξη του τηλεπικοινωνιακού δικτύου και το πρόβλημα του bottleneck

Τα δίκτυα κορμού και τα μητροπολιτικά δίκτυα, από το πρώτα χρόνια ανάπτυξής τους εξοπλίζονταν με καλώδια μεγάλης χωρητικότητας και αντοχής στις κάθε είδους παρεμβολές και εξασθενίσεις. Και αυτό γιατί οι εξ ορισμού είναι δίκτυα που διαχειρίζονται μεγάλο φόρτο δεδομένων, σε μεγάλες αποστάσεις, και με τις μέγιστες δυνατές ταχύτητες. Για τον λόγο αυτόν αποτέλεσαν και τα πρώτα στρώματα του δικτύου που αναβαθμίστηκαν ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. Η ανάγκη για μετάδοση δεδομένων με υψηλό ρυθμό και σε μεγάλες αποστάσεις έχρισε υποχρεωτική την χρησιμοποίηση οπτικών ινών για την υποστήριξη των δικτύων αυτών [4]. Τα καλώδια οπτικών ινών ζυγίζουν λιγότερο από αυτά του χαλκού και η διάμετρος τους είναι πολύ μικρότερη. Σε σύγκριση με τα καλώδια χαλκού μπορούν να μεταφέρουν ένα σήμα με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα και σε μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς να παρουσιάζεται σημαντική μείωση στην ισχύ του. Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων ενώ παράλληλα απαιτούν και λιγότερη ενέργεια για τη διάδοση του σήματος.

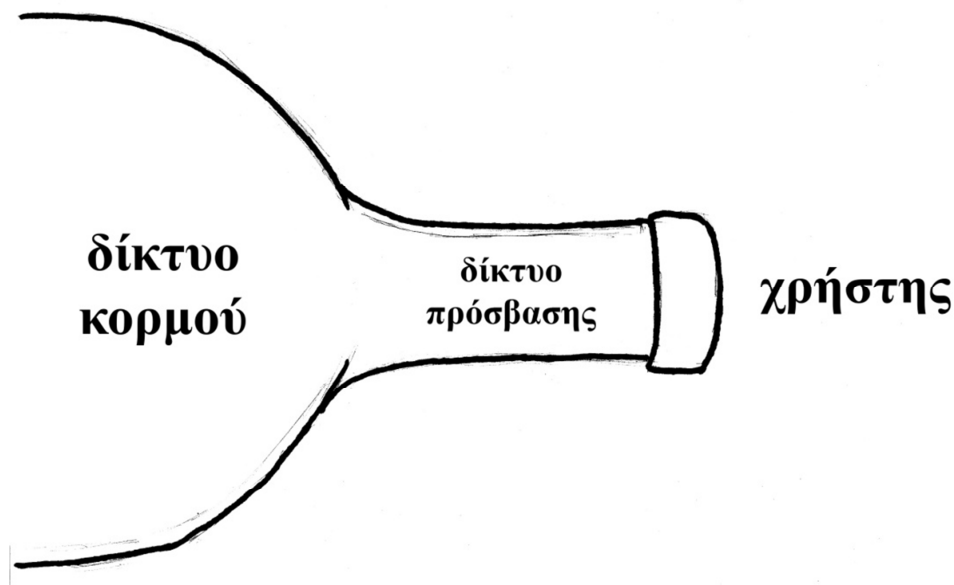


Σχ.1.6 – καλώδιο οπτικών ινών

Ενώ λοιπόν η χρήση οπτικής ίνας αποτελεί ιδανική λύση για το δίκτυο κορμού και τα μητροπολιτικά δίκτυα, στα δίκτυα πρόσβασης η ένα προς ένα αντικατάσταση των καλωδίων χαλκού με οπτικές ίνες από τον τοπικό κόμβο πρόσβασης μέχρι τον τερματισμό είναι μια πολύ δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία. Τα δίκτυα πρόσβασης αποτελούν τον τελευταίο κρίκο της αλυσίδας που συνδέει την δικτυακή υποδομή του παρόχου με τις εγκαταστάσεις του χρήστη. Αυτό μεταφράζεται σε μεγάλο αριθμό τερματικών στοιχείων. Οπότε θα χρειαζόμασταν πολλαπλάσιο αριθμό οπτικών πομποδεκτών σε σχέση με αυτούς που χρησιμοποιούνται στα μητροπολιτικά δίκτυα και στα δίκτυα

κορμού. Αυτό μεταφράζεται σε αυξημένο κόστος για την τοποθέτηση και συντήρηση των στοιχείων αυτών ενώ απαιτεί και περισσότερο χώρο για να φιλοξενήσει τον αναγκαίο εξοπλισμό, τόσο στον τοπικό κόμβο πρόσβασης (κέντρο σύνδεσης – central office) όσο και στις εγκαταστάσεις των πελατών. Για τον λόγο αυτό οι προϋπάρχουσες υποδομές του τηλεφωνικού δικτύου, με τα καλώδια χαλκού, προτιμήθηκαν για τα δίκτυα πρόσβασης για πολλά χρόνια.

Η παραπάνω διαφοροποίηση ανάμεσα στη δομή του δικτύου κορμού και του δικτύου πρόσβασης είναι η αιτία του προβλήματος της συμφόρησης κίνησης στο σημείο της διεπαφής των δύο δικτύων, γνωστό με τον χαρακτηρισμό **access network bottleneck** (στόμιο μπουκαλιού).



Σχ.1.7 – το πρόβλημα του bottleneck

Το δίκτυο πρόσβασης αδυνατεί να ανταποκριθεί βέλτιστα στον φόρτο που του μεταβιβάζεται από το δίκτυο κορμού. Και αυτό γιατί η χρησιμοποίηση καλωδίων χαλκού περιορίζει σημαντικά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κατά μήκος του δικτύου (4KHz ανά κατεύθυνση μετάδοσης) καθώς και την απόσταση του κέντρου σύνδεσης με τα τερματικά στοιχεία. Παράλληλα απαιτείται και η τοποθέτηση ειδικού εξοπλισμού στις εγκαταστάσεις του πελάτη ώστε να ελέγχει τον όγκο δεδομένων που μεταδίδονται και να αποφεύγεται η υπερφόρτωση του δικτύου. Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα της μειωμένης ταχύτητας αλλά και της περιορισμένης απόστασης από το κέντρο σύνδεσης, η αναζήτηση νέων τεχνικών αναβάθμισης και ανάπτυξης του δικτύου πρόσβασης αποτελούσε μονόδρομο για τις εταιρίες παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Έπρεπε να βρεθεί τρόπος να αξιοποιηθούν τα προτερήματα των καλωδίων οπτικών ινών με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα πρόσβασης, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προταθεί και εφαρμοστεί αρκετές και διαφορετικές υλοποιήσεις οπτικών δικτύων πρόσβασης (Optical Access Networks, OAN) που σκοπό έχουν να

περιορίσουν το κόστος κατασκευής και συντήρησης και παράλληλα να είναι και εύκολα αναβαθμίσιμες.

1.4. Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης (Optical Access Networks)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης τροφοδοτούν τα μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα κορμού συλλέγοντας δεδομένα από του τελικούς χρήστες του δικτύου. Είναι υπεύθυνα για τη σύνδεση των τερματικών συσκευών, στις ιδιοκτησίες των χρηστών, με τους OLTs (Optical Line Terminals), στα τοπικά κέντρα των παρόχων. Γενικά μπορούμε να διαχωρίσουμε τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης σε τριών ειδών υλοποιήσεις [5]: (α) σημείο προς σημείο οπτικά δίκτυα (point to point), (β) ενεργά Ethernet δίκτυα, και (γ) παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks - PONs). Οι τρεις αυτές υλοποιήσεις διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα στοιχεία που εγκαθίστανται στη διαδρομή των οπτικών ινών από το κέντρο σύνδεσης (central office) προς τις εγκαταστάσεις των πελατών.

1.4.1. Σημείο προς σημείο οπτικά δίκτυα (point to point optical networks)

Ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης αναφέρεται ως σημείο προς σημείο όταν υπάρχει μια αποκλειστική σύνδεση μεταξύ του κέντρου σύνδεσης του παρόχου και της οπτικής τερματικής συσκευής (Optical Network Terminal, ONT) στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Από τη στιγμή που ανάμεσα στον OLT και σε κάθε πελάτη υπάρχει μια αφιερωμένη οπτική ίνα, έχουμε λιγιστές απώλειες στο οπτικό σήμα. Το κόστος σύνδεσης είναι ανεξάρτητο του αριθμού των συνδεδεμένων χρηστών στον OLT αφού ο κάθε χρήστης έχει τον δικό του, αποκλειστικό, δίαυλο επικοινωνίας. Η απλή αρχιτεκτονική ενός point to point δικτύου και οι χαμηλές απώλειες ισχύος σήματος επιτρέπουν την χρησιμοποίηση φθηνών οπτικών στοιχείων στο δίκτυο.

Βασικές παράμετροι σχεδιασμού για point to point δίκτυα αποτελούν η μεγάλη πυκνότητα σε καλώδια, ο τερματισμός και η διαχείριση των καλωδίων οπτικών ινών, καθώς επίσης και η πυκνότητα σε θύρες δικτύου. Η πυκνότητα θυρών και καλωδίων οπτικών ινών εξαρτάται αναλογικά από το μέγεθος του κέντρου σύνδεσης του παρόχου. Συνήθως οι πάροχοι χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό από πλαίσια διανομής οπτικού δικτύου (Optical Distribution Frames – ODF) για να τερματίζουν τα οπτικά καλώδια, ενώ χρησιμοποιούν και καλώδια patch για να συνδέουν τους χρήστες του δικτύου με τις διαθέσιμες θύρες του OLT.

Η σημείο προς σημείο αρχιτεκτονική αποτελεί μια ιδανική λύση για τα δίκτυα πρόσβασης του μέλλοντος αφού επιτρέπει εγγενώς την ανοικτή πρόσβαση στο δίκτυο και την άνευ προηγουμένου αύξηση του εύρους ζώνης. Είναι ένας απλός τρόπος για την παροχή triple play (τηλέφωνο, internet,

τηλεόραση) υπηρεσιών. Η προσέγγιση αυτή γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής τα τελευταία χρόνια σε παρόχους τηλεπικοινωνιών από την Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη.

1.4.2. Ενεργά Ethernet δίκτυα (active Ethernet networks)

Τα ενεργά Ethernet δίκτυα χρησιμοποιούν εξοπλισμό που τροφοδοτείται από παροχή ρεύματος, όπως switches και routers (συσκευές που συναντώνται στον απομακρυσμένο κόμβο του δικτύου), για την μετάδοση του οπτικού σήματος. Αυτό επιτρέπει στους παρόχους των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών να έχουν τον πλήρη έλεγχο των δομών τους, παρέχοντας έτσι στους πελάτες τους εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίες.

Όπως και στα point to point δίκτυα, τα ενεργά Ethernet δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν στον κάθε πελάτη τους αποκλειστική σύνδεση Ethernet. Αυτό σημαίνει ότι το εύρος ζώνης είναι ικανό να εξυπηρετήσει υπηρεσίες triple play, καθώς και άλλες πιο απαιτητικές υπηρεσίες. Επίσης, τα καλώδια των οπτικών ινών μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν, ενώ και ο προϋπολογισμός ισχύος μπορεί να υπολογιστεί το ίδιο εύκολα. Παράλληλα, αφού το ενεργό Ethernet δίκτυο είναι σημείο προς σημείο, δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στον λόγο της απόστασης μεταξύ του κέντρου σύνδεσης και του απομακρυσμένου κόμβου, και της απόστασης μεταξύ του απομακρυσμένου κόμβου και των εγκαταστάσεων του πελάτη. Επιπρόσθετα, επειδή το εύρος ζώνης είναι αποκλειστικό για τον κάθε χρήστη του δικτύου, οι πάροχοι έχουν τον πλήρη έλεγχο του bandwidth (εύρος ζώνης) που μπορούν να διαθέσουν στον κάθε χρήστη, καθώς επίσης και της ποιότητας των υπηρεσιών.

Η μορφή ενός ενεργού Ethernet δικτύου μπορεί να μειώσει δραματικά τον αριθμό των καλωδίων οπτικών ινών που τερματίζουν στο κέντρο σύνδεσης του παρόχου, απολαμβάνοντας ταυτόχρονα όλα τα προνόμια ενός δικτύου σημείου προς σημείο. Ωστόσο, απαιτεί σημαντική επένδυση για την ανάπτυξη του δικτύου από το κέντρο σύνδεσης ως τον πελάτη. Για την συνένωση των σημάτων των οπτικών ινών που έρχονται από τις εγκαταστάσεις των πελατών απαιτείται οι ενεργές συσκευές (switches, routers) του δικτύου να εγκατασταθούν σε ειδικές καμπίνες που παρεμβάλλονται ανάμεσα στο κέντρο σύνδεσης και τους χρήστες του δικτύου.

1.4.3 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs)

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα είναι δίκτυα σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint) στα οποία δεν υπάρχουν ενεργά στοιχεία στη διαδρομή ανάμεσα στο κέντρο σύνδεσης του παρόχου και στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Αντιθέτως, τοποθετούνται μόνο παθητικά οπτικά στοιχεία, τα οποία και καθοδηγούν τα σήματα μετάδοσης μέσα από συγκεκριμένα κανάλια μήκους κύματος από τις ONUs προς τον OLT, και αντίστροφα. Η αντικατάσταση των ενεργών στοιχείων με παθητικά μειώνει σημαντικά το κόστος για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους αφού εξαλείφει την ανάγκη

παροχής ηλεκτρικής ισχύος σε αυτά. Παράλληλα τα παθητικά στοιχεία δεν χρειάζονται συντήρηση και επισκευή αφού δεν έχουν απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και σε επεξεργασία σημάτων.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να αναδείξει το πόσο σημαντικά είναι τα παθητικά οπτικά δίκτυα για το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πρόσβασης. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται μια ανάλυση της δομής, της αρχιτεκτονικής και των χαρακτηριστικών των παθητικών οπτικών δικτύων. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα πιο σημαντικά από τα δίκτυα αυτά, όπως είναι τα Broadband PONs, τα Ethernet PONs, τα Gigabit PONs, αλλά και τα πιο πρόσφατα, και σε συνεχή ανάπτυξη, Wavelength-Division Multiplexing PONs. Στο τελευταίο κεφάλαιο, επιχειρείται μέσα από διάφορες συγκρίσεις και αποτελέσματα ερευνών να δοθεί μια απάντηση ως προς την κατεύθυνση στην οποία θα κινηθούν στο μέλλον τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρόσβασης.

2.

ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PASSIVE OPTICAL NETWORKS – PONs)

2.1. Γενικά

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) είναι δίκτυα οπτικών ινών σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint), τα οποία δεν περιλαμβάνουν ενεργά στοιχεία. Δεν έχουμε δηλαδή μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό κατά μήκος του δικτύου. Έτσι λοιπόν, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον είναι παθητικοί διαιρέτες (passive splitters), παθητικοί ζεύκτες (passive couplers) και παθητικοί συνδυαστές (passive combiners).

Η χρήση των PONs στα δίκτυα πρόσβασης αποτελεί στις μέρες μας μονόδρομο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ικανοποιούν αποτελεσματικά την ανάγκη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων για αυξημένο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις ενώ παράλληλα μειώνουν σε μεγάλο βαθμό και το κόστος ανάπτυξης, λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου πρόσβασης.

2.2. Δομή

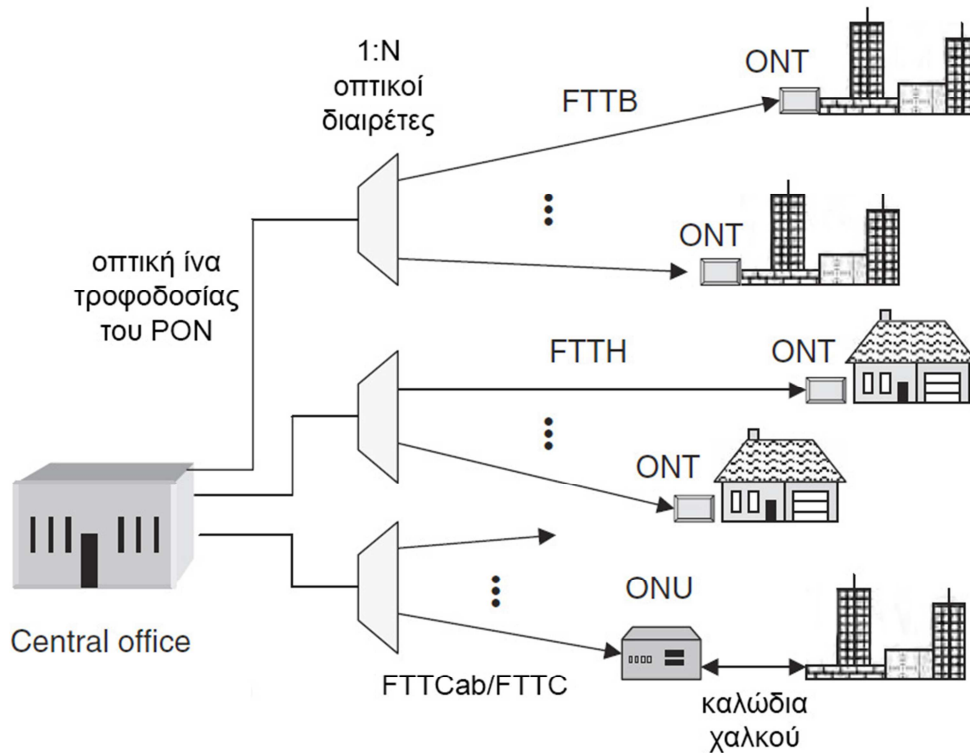
Η δομή ενός παθητικού οπτικού δικτύου [3] ξεκινά από τον **Οπτικό Τερματιστή Γραμμής (Optical Line Terminal, OLT)**. Ο OLT συναντάται στο κέντρο σύνδεσης του τηλεπικοινωνιακού παρόχου και διαχειρίζεται και τα δυο ρεύματα κίνησης κατά μήκος του Οπτικού Δικτύου Διανομής (Optical Distribution Network, ODN), σε αποστάσεις μέχρι 20km. Για το ρεύμα καθόδου η λειτουργία του OLT συνίσταται στο να υποδέχεται κίνηση φωνής, δεδομένων και video από το δίκτυο κορμού, ή το μητροπολιτικό δίκτυο, και να την οδηγεί σε όλες τις Οπτικές Μονάδες Δικτύου (Optical Network Units, ONUs) ή τους Οπτικούς Τερματιστές Δικτύου (Optical Network Terminals, ONTs) του ODN. Αντίστοιχα και για το ρεύμα ανόδου ο OLT υποδέχεται πολλαπλούς τύπους

φωνής, δεδομένων και video από τους χρήστες του δικτύου και τους οδηγεί στους προορισμούς τους. Ο κάθε OLT είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να διαχειρίζεται την κίνηση σε πολλά PONs ταυτοχρόνως.

Η **Οπτική Μονάδα Δικτύου (Optical Network Unit, ONU)** συναντάται συνήθως στο πεζοδρόμιο (Fiber to the Curb, FTTC). Για το λόγο αυτό ο εξοπλισμός που περιέχει μέσα της θα πρέπει να μην είναι ευάλωτος σε μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας. Παράλληλα το κέλυφος της ONU θα πρέπει να έχει αντοχή απέναντι σε τυχόν βανδαλισμούς και να μην επιτρέπει την εισχώρηση του νερού της βροχής. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να υπάρχει παροχή ηλεκτρικής ισχύος για την ONU, μαζί με εφεδρικές μπαταρίες για περιπτώσεις διακοπής της παροχής.

Ο **Οπτικός Τερματιστής Δικτύου (Optical Network Terminal, ONT)** βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του πελάτη (Fiber to the Home, FTTH – Fiber to the Building, FTTB), και του παρέχει υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του αφορά στην παροχή μιας οπτικής σύνδεσης με το PON, από τη σκοπιά της ροής ανόδου, με την μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε οπτικά. Αντίστοιχα και για τη ροή καθόδου, έχουμε μετατροπή των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά. Σε συνδυασμό με τον OLT, ο ONT επιτρέπει την δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (dynamic bandwidth allocation) με σκοπό την όσο το δυνατόν πιο αρμονική και αποδοτική μετάδοση της κίνησης που καταφθάνει σε αυτόν από τους χρήστες του δικτύου. Το μέγεθος του ONT ποικίλει ανάλογα με το αν εξυπηρετεί μόνο μια οικία ή πολύ μεγαλύτερα συγκροτήματα κτηρίων.

Στη διαδρομή από τον OLT μέχρι τις ONUs και τους ONTs παρεμβάλλονται διαιρέτες και συνδυαστές για τον διαχωρισμό του οπτικού σήματος σε περισσότερα ή τον συνδυασμό πολλών σημάτων σε ένα αντίστοιχα.



Σχ.2.1 – αρχιτεκτονική παθητικού οπτικού δικτύου

2.3. Αρχιτεκτονική

Οπτική ίνα στο πεζοδρόμιο (Fiber to the Curb, FTTC)

Στην υλοποίηση FTTC [3] η οπτική ίνα φτάνει μέχρι 300m από τον πελάτη, όπου συνήθως τοποθετείται μια καμπίνα (ONU), και στη συνέχεια η πληροφορία μεταφέρεται μέσω του δικτύου χαλκού στο τερματικό του δικτύου. Σε μια τέτοια περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο οπτικοί πομποδέκτες. Παρόλο που μειώνουμε κατά πολύ την απόσταση που πρέπει να διανύσει η πληροφορία μέσω καλωδίων χαλκού, δεν παύει να υπάρχει απώλεια ταχύτητας για τη διαδρομή από την καμπίνα προς τις εγκαταστάσεις του πελάτη. Να σημειώσουμε ότι σε αυτή την αρχιτεκτονική απαιτείται μέσα στον περιορισμένο χώρο της καμπίνας, που συνήθως βρίσκεται στο πεζοδρόμιο, να τοποθετηθεί πολύπλοκος μετατροπέας για τη μετάβαση από το οπτικό δίκτυο στο δίκτυο χαλκού. Η Fiber to the Curb λύση μπορεί να έχει ως μειονέκτημα την απώλεια ταχύτητας μέχρι να φτάσει η πληροφορία στον συνδρομητή αλλά υπερέρχει στο γεγονός ότι το κόστος υλοποίησης της είναι σχετικά μικρό, αφού το κόστος της αγοράς, τοποθέτησης και λειτουργίας της καμπίνας μοιράζεται στον μεγάλο αριθμό χρηστών που εξυπηρετεί αυτή.

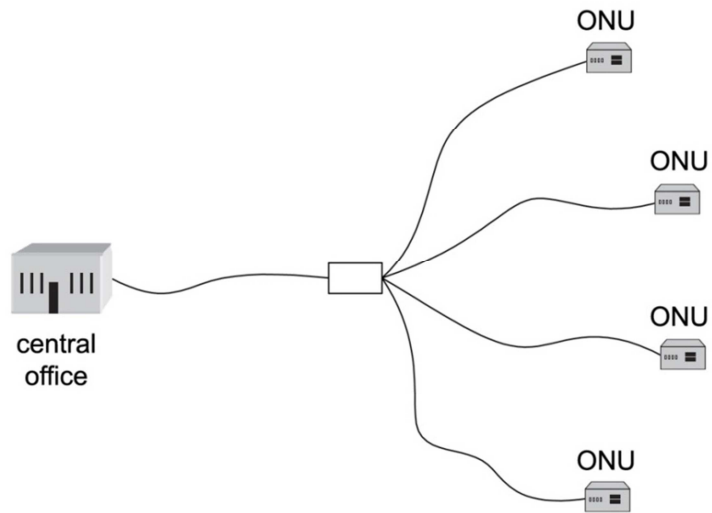
Οπτική ίνα στις εγκαταστάσεις (Fiber to the Premises, FTTP)

Στην FTTP [3] περίπτωση μπορούμε να αναπτύξουμε ένα δίκτυο μόνο με οπτικές ίνες, οι οποίες να φτάνουν μέχρι τις εγκαταστάσεις του πελάτη. Συνήθως αυτή η υλοποίηση εφαρμόζεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος ονομάζεται Οπτική ίνα στο σπίτι (Fiber to the Home, FTTH). Εδώ η οπτική ίνα φτάνει μέχρι μέσα στο χώρο διαμονής του πελάτη χωρίς να χρησιμοποιούνται καθόλου καλώδια χαλκού. Ο δεύτερος τρόπος ονομάζεται Οπτική ίνα στο κτήριο (Fiber to the Building, FTTB). Σε αυτή την περίπτωση η οπτική ίνα φτάνει μέχρι το κτήριο όπου στεγάζονται πολλές οικίες ή επιχειρήσεις. Από εκεί μέσω ιδιόκτητου δικτύου απλώνεται σε όλους τους χώρους του κτηρίου. Στην υλοποίηση Fiber to the Premises χρειαζόμαστε ένα ζευγάρι οπτικών ινών (όταν η υλοποίηση περιλαμβάνει μια οπτική ίνα για κάθε ρεύμα κίνησης) για κάθε οικία (FTTH) ή κτήριο (FTTB). Απαιτούνται $2N$ οπτικοί πομποδέκτες, όπου N είναι ο αριθμός των τερματισμών της οπτικής ίνας. Είναι λοιπόν μια υλοποίηση πολύπλοκη και ακριβή για να την συντηρείς. Μια λύση σε αυτή την περίπτωση, που βελτιώνει το δίκτυο, αποτελεί η χρησιμοποίηση μιας οπτικής ίνας (για μεταφορά σημάτων και από τα δύο ρευμάτα κίνησης) από το κέντρο σύνδεσης μέχρι το πεζοδρόμιο, στη καμπίνα του παρόχου. Από εκεί αποχωρούν οπτικές ίνες προς το κτήριο του καταναλωτή. Σε αυτή την περίπτωση χρειαζόμαστε $2N+2$ οπτικούς πομποδέκτες, όμως κερδίζουμε χώρο μέσα στο κέντρο σύνδεσης και παράλληλα χρησιμοποιούμε λιγότερα μέτρα οπτικής ίνας.

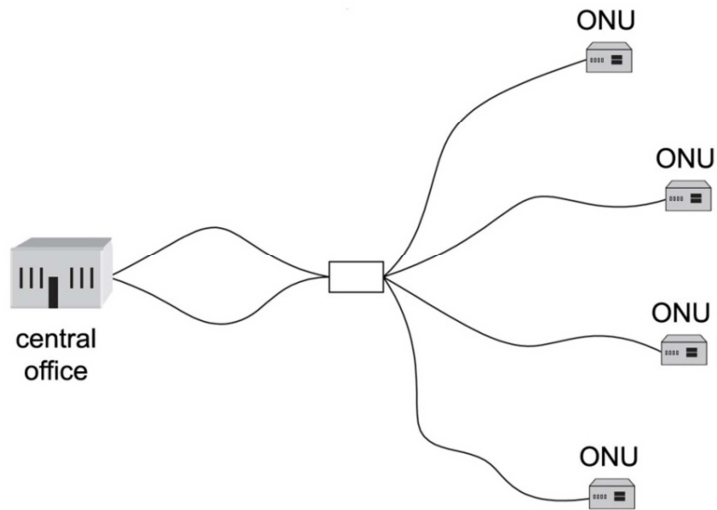
2.4. Τοπολογία

Παρατηρώντας ένα δίκτυο PON με φορά αυτή της ροής καθόδου, έχουμε να κάνουμε με ένα δίκτυο σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint). Παρόμοια, για τη ροή ανόδου έχουμε να κάνουμε με ένα δίκτυο πολλαπλών σημείων προς σημείο (multipoint to point). Τα σημεία που το σήμα διαχωρίζεται προς πολλαπλές κατευθύνσεις, ή αντίστροφα, αποτελούν τους απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου.

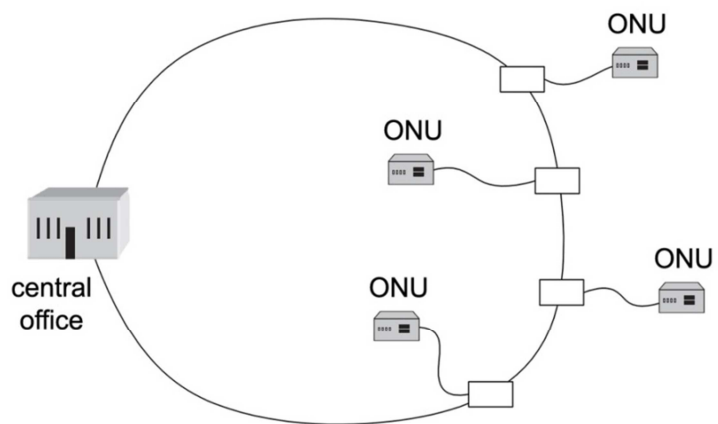
Υπάρχουν πολλές τοπολογίες point to multipoint κατάλληλες για ένα δίκτυο πρόσβασης. Ίσως οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες είναι η τοπολογία δέντρου, η τοπολογία δέντρου με πλεονάζων κορμό, η τοπολογία δακτυλίου, και η τοπολογία διαύλου [6]:



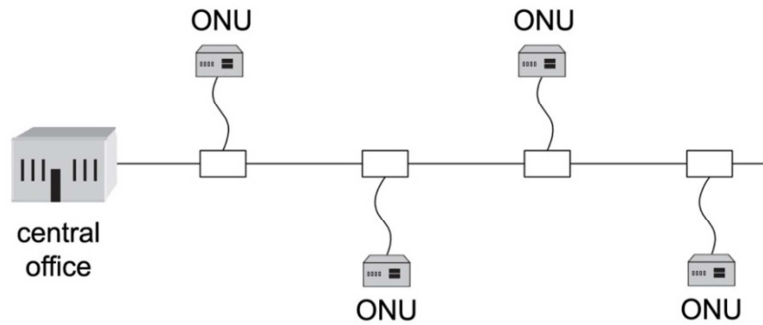
Σχ.2.2α – τοπολογία δέντρου



Σχ.2.2.β – τοπολογία δέντρου με πλεονάζων κορμό



Σχ.2.2.γ – τοπολογία δακτυλίου

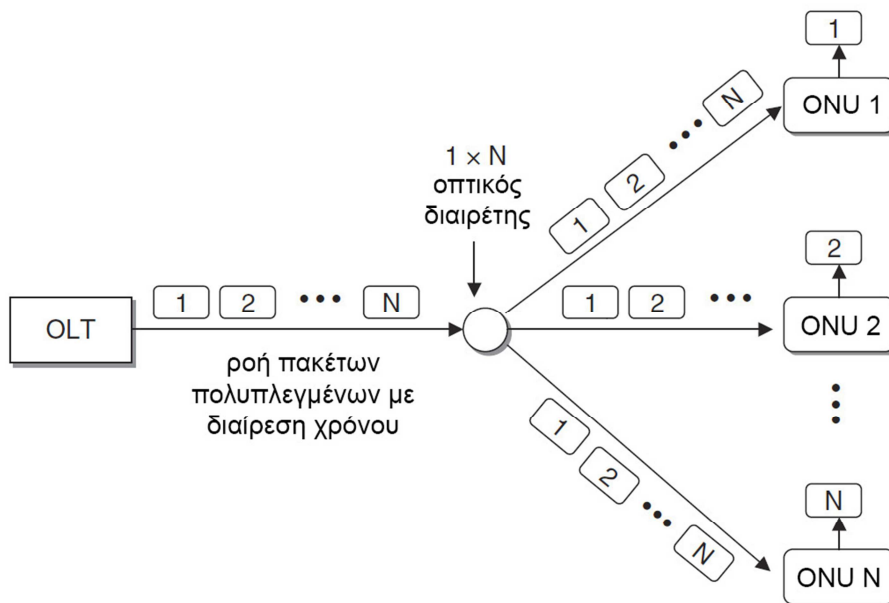


Σχ.2.2.δ – τοπολογία διαύλου

Να σημειωθεί ότι στα παθητικά οπτικά δίκτυα η τοπολογία που προτιμάται κατά κόρον είναι αυτή του δέντρου.

2.5. Time Division Multiplexing (Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου)

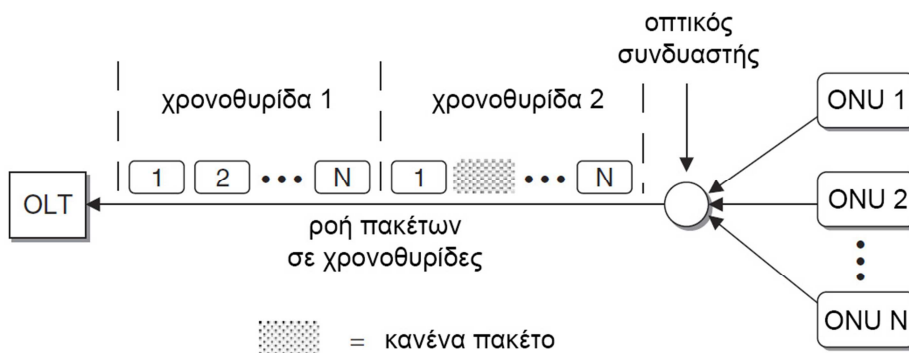
Ένα από τα δομικά χαρακτηριστικά των παθητικών οπτικών δικτύων είναι αυτό της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM) [3]. Τα PONs που χρησιμοποιούν αυτή την μέθοδο πολυπλεξίας στο ρεύμα καθόδου αναφέρονται ως TDM-PONs. Όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, ο OLT χρησιμοποιεί την TDM πολυπλεξία για να συνδυάσει τις εισερχόμενες ροές φωνής και δεδομένων που προορίζονται για τους χρήστες του PON. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν N διαφορετικές ροές πληροφοριών που εισέρχονται στον OLT, κάθε μία από τις οποίες έχει ρυθμό μετάδοσης M bits per second (bps), τότε TDM μέθοδος τις πολυπλέκει μεταξύ τους σε διαδοχικά πλαίσια (frames) δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης $N \times M$ bps. Τα frames αυτά, τα οποία στο πεδίο της επικεφαλίδας τους μεταφέρουν πληροφορίες για τη διεύθυνση προορισμού τους, μεταδίδονται από τον OLT προς τις διάφορες ONUs με τη μορφή broadcasting. Η κάθε ONU λαμβάνει και φιλτράρει τα δεδομένα κρατώντας μόνο αυτά που προορίζονται για αυτήν. Απαραίτητη είναι ίσως και η εφαρμογή κρυπτογράφησης στα δεδομένα της ροής καθόδου αφού όλες οι ONUs έχουν πρόσβαση στις πληροφορίες της ροής καθόδου. Η μέθοδος TDM πολυπλεξίας έχει ως σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του bandwidth του μέσου μεταφοράς, μοιράζοντάς το αποτελεσματικά ανάμεσα στις ONUs. Στο παρακάτω παράδειγμα TDM πολυπλεξίας, τα πακέτα $1, 2, \dots, N$ προορίζονται για τις αντίστοιχες ONUs.



Σχ.2.3 – παράδειγμα TDM πολυπλεξίας

2.6. Time Division Multiple Access (Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου)

Η μεταφορά πληροφοριών στη ροή ανόδου είναι λίγο πιο πολύπλοκη διαδικασία από αυτή της ροής καθόδου, και αυτό γιατί όλες οι ONUs θα πρέπει να μοιραστούν το ίδιο μήκος κύματος με βάση τον χρόνο. Για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των εκπομπών διαφορετικών ONUs, το PON χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) [3]. Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει ένα παράδειγμα TDMA πρόσβασης N ONUs στο ρεύμα ανόδου ενός PON. Τα πακέτα 1,2,...,N προέρχονται από τις αντίστοιχες ONUs.



Σχ.2.4 – παράδειγμα TDMA πρόσβασης

Το διαθέσιμο bandwidth της ροής ανόδου διαιρείται σε χρονοθυρίδες και κατανέμεται στις ONUs από τον OLT με βάση τις ανάγκες της κάθε μιας. Για να αποφεύγονται οι συγκρούσεις

δεδομένων προερχόμενα από διαφορετικές ONUs, το PON διαθέτει μηχανισμούς που δίνουν έγκριση για μετάδοση στην κάθε ONU ξεχωριστά, σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή τα δεδομένα που καταφθάνουν στον OLT να προέρχονται από μία μόνο ONU. Από την στιγμή που κάθε ONU βρίσκεται σε διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο σύνδεσης, ο OLT χρησιμοποιεί την τεχνική ranging για να μετρήσει τις λογικές αποστάσεις ανάμεσα στις ONUs και αυτόν. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε η κάθε ONU να ρυθμίσει τις μεταδόσεις της ανάλογα και να αποφύγει τις συγκρούσεις.

2.7. Wavelength Division Multiplexing (Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος, WDM)

Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) [4] αποτελεί ίσως την επικρατέστερη μέθοδο πολυπλεξίας για τα επόμενης γενιάς PONs. Σε αντίθεση με την TDM μέθοδο, στη WDM μέθοδο χρησιμοποιούνται διαφορετικού μήκους κύματος κανάλια επικοινωνίας ανάμεσα στον OLT και την κάθε ONU, τόσο για τη ροή ανόδου, όσο και για τη ροή καθόδου. Έτσι λοιπόν παρέχεται στη κάθε ONU δικό της, αφιερωμένο, μήκος κύματος το οποίο χρησιμοποιεί αποκλειστικά για την επικοινωνία της με τον OLT. Με αυτή την μέθοδο είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του φυσικού μέσου από την κάθε ONU.

2.8. Πλεονεκτήματα της χρήσης PONs στο δίκτυο πρόσβασης

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης παθητικών οπτικών δικτύων στα δίκτυα πρόσβασης:

- Επιτρέπουν την αποδοτική λειτουργία του δικτύου σε αποστάσεις έως και 20km μεταξύ του κέντρου σύνδεσης (CO) και της ONU. Ισχυρό πλεονέκτημα σε σχέση με τα 5.5km που μπορεί να φτάσει μια γραμμή DSL με χρήση καλωδίων χαλκού.
- Λόγω της point to multipoint μορφής τους, επιτρέπουν τη παροχή υπηρεσιών μεγάλου εύρους ζώνης σε μεμονωμένους χρήστες ή μικρές επιχειρήσεις χωρίς μεγάλη οικονομική επιβάρυνση για αυτούς. Αυτό γιατί μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας είναι δυνατόν να διαμοιράζεται το σήμα σε πολλούς χρήστες χωρίς μάλιστα απώλειες στον ρυθμό μετάδοσης. Έτσι λοιπόν έχουμε εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων συνδρομητών με τη χρήση ελάχιστου δυνατού αριθμού οπτικών ινών.
- Περιορίζουν σε σημαντικό βαθμό την χρήση μεγάλου αριθμού καλωδίων οπτικών ινών, εξοικονομώντας χώρο τόσο στο κέντρο σύνδεσης όσο και στον απομακρυσμένο βρόχο του δικτύου.

- Παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης στο δίκτυο, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σημαντικά μεγαλύτερων από Gbit/sec.
- Μπορούν να μεταδίδουν υπηρεσίες video (broadcasting) παράλληλα με υπηρεσίες φωνής ή δεδομένων, εκμεταλλευόμενα συγκεκριμένη περιοχή μήκους κύματος στη ροή καθόδου.
- Απαλλάσσουν τον πάροχο από το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ενεργών στοιχείων πολυπλεξίας στα σημεία διαχωρισμού του σήματος. Αντί για αυτά χρησιμοποιούνται, μικροί σε μέγεθος, παθητικοί οπτικοί διαχωριστές που δεν απαιτούν παροχή ρεύματος ενώ επίσης δεν χρειάζονται κάποια ιδιαίτερη συντήρηση. Αυτό έχει αντίκτυπο και στο κόστος υπηρεσιών για τους τερματικούς χρήστες, το οποίο περιορίζεται σημαντικά.
- Αφήνουν μεγάλα περιθώρια για αναβάθμιση του δικτύου στο μέλλον (δίκτυα PONs νέας γενιάς) και τη παροχή πρόσθετων υπηρεσιών, επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με την αξιοποίηση και άλλων περιοχών μήκους κύματος.

2.9. Υλοποιήσεις PONs

Ξεκινώντας από το 1998, οι δύο μεγαλύτεροι οργανισμοί δημιουργίας προτύπων, η ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector) και η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) έχουν προτείνει αρκετές διαφορετικές υλοποιήσεις Παθητικών Οπτικών Δικτύων. Οι επικρατέστερες από αυτές, οι οποίες αναφέρονται στην παρούσα εργασία, είναι αυτές των APON/BPON (ATM-PON/Broadband-PON), EPON (Ethernet-PON), GPON (Gigabit-PON) και WDM-PON (Wavelength Division Multiplexed-PON).

3.

APON/BPON

3.1 Εισαγωγή

Τα APON (ATM-PON) και BPON (Broadband-PON) δίκτυα στην ουσία αποτελούν διαφορετικές ονομασίες για την ίδια οικογένεια παθητικών οπτικών δικτύων, η οποία βασίζεται πάνω στη σειρά συστάσεων G.983 της ITU-T [7].

Το 1995 η ένωση Full Service Access Network (FSAN), στην οποία συμμετέχουν μερικοί από τους μεγαλύτερους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, ανεξάρτητα εργαστήρια δοκιμών και προμηθευτές εξοπλισμού, στοχεύοντας στην καλύτερη εξυπηρέτηση των εταιρικών πελατών, παρέχοντάς τους πολλαπλές υπηρεσίες ευρυζωνικότητας, κατέληξε στην σχεδίαση ενός παθητικού οπτικού δικτύου που βασίζεται πάνω στην ασύγχρονη μέθοδο μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode, ATM). Το πρότυπο αυτό αρχικά ονομάστηκε APON, αλλά σύντομα επικράτησε η ονομασία BPON ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε στενή σύνδεση με την μέθοδο ATM. Ήταν το 1998 όταν η ITU-T ξεκίνησε την προτυποποίηση των δικτύων BPON μέσω της σειράς συστάσεων G.983.

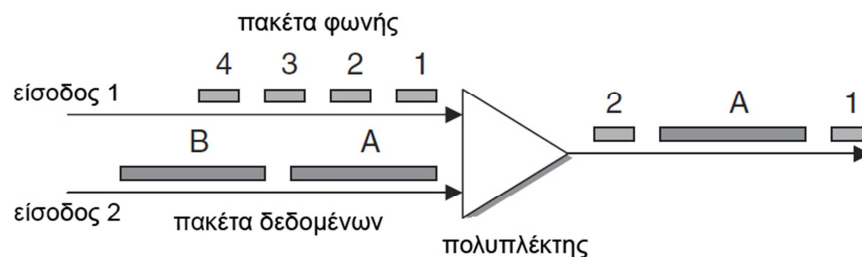
3.2. Asynchronous Transfer Mode (ATM)

Η ασύγχρονη μέθοδος μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode, ATM) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες για τη μεταφορά σημάτων φωνής, δεδομένων και βίντεο [7]. Σκοπός της σχεδίασης της μεθόδου ATM ήταν η σύνδεση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων με τα δίκτυα υπολογιστών. Σχεδιάστηκε λοιπόν για να υποστηρίξει ένα δίκτυο που διαθέτει τόσο υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων, όσο και υπηρεσίες μεταφοράς φωνής και βίντεο πραγματικού χρόνου (real-time video).

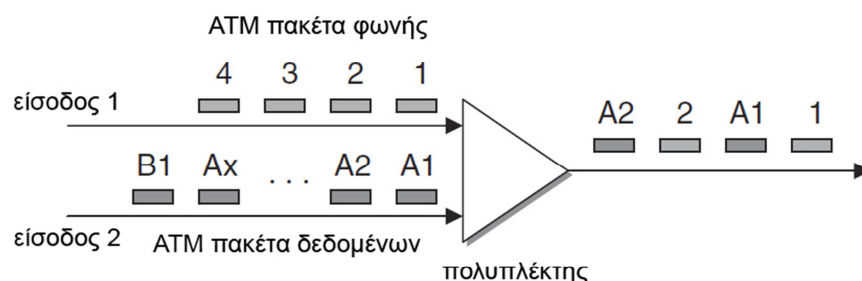
Η ATM μέθοδος χρησιμοποιεί ασύγχρονη πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (asynchronous time-division multiplexing) και κωδικοποιεί τα δεδομένα σε μικρά, σταθερού μήκους πακέτα, τα οποία αναφέρονται ως κελιά ATM. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά της σε σχέση με το πρωτόκολλο διαδικτύου IP, καθώς και το Ethernet, όπου χρησιμοποιούνται μεταβλητού μήκους πακέτα και

πλαίσια αντίστοιχα. Τα κελιά ATM έχουν σταθερό μήκος 53 bytes. Αυτό το μήκος επιλέχθηκε αρχικά για να μην «κολλούν» τα μικρού μήκους πακέτα φωνής σε ουρές αναμονής πίσω από πακέτα δεδομένων μεγάλου μήκους, έτσι ώστε οι τηλεφωνικές συνδιαλέξεις να πραγματοποιούνται χωρίς προβλήματα.

Στο επόμενο σχέδιο παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για το πώς μια ροή δεδομένων φωνής αποτελούμενη από μικρούς μήκους πακέτα (1,2,3 κτλ) πολυπλέκεται με μια ροή δεδομένων μεγάλου μήκους (A,B κτλ). Αν πραγματοποιείται απλή TDM πολυπλεξία μεσολαβεί πολύς χρόνος μεταξύ των πακέτων φωνής 1 και 2, αφού παρεμβάλλεται ανάμεσα τους το μεγάλο μήκους πακέτο A. Αντιθέτως, με τη χρήση της ATM μεθόδου, τόσο τα πακέτα φωνής όσο και τα πακέτα δεδομένων κωδικοποιούνται σε σταθερού μήκους κελιά ATM. Στη συνέχεια, τα κελιά αυτά παρεμβάλλονται μεταξύ τους και μεταδίδονται στο μέσο μεταφοράς. Επιπλέον, επειδή η ATM μέθοδος χρησιμοποιεί μεγάλης ταχύτητας συνδέσεις μετάδοσης, τα μήκους 53-bytes κελιά καταφθάνουν στον προορισμό τους με τον ίδιο, γρήγορο, ρυθμό που εισέρχονται και στον πολυπλέκτη. Ο ATM εξοπλισμός που βρίσκεται στα σημεία προορισμού επανασυναρμολογεί τα κελιά ATM στα αρχικά πακέτα μεγάλου μήκους. Έτσι λοιπόν ένα δίκτυο ATM μπορεί να μεταφέρει κίνηση ευαίσθητη στον χρόνο, όπως βίντεο πραγματικού χρόνου, και απλή κίνηση δεδομένων, μη ευαίσθητη στον χρόνο, χωρίς να γίνεται εμφανής στους χρήστες ο κατακερματισμός των πακέτων σε κελιά ATM, καθώς και η επανασυναρμολόγησή τους.



Πολυπλεξία βάση απλής μεθόδου TDM



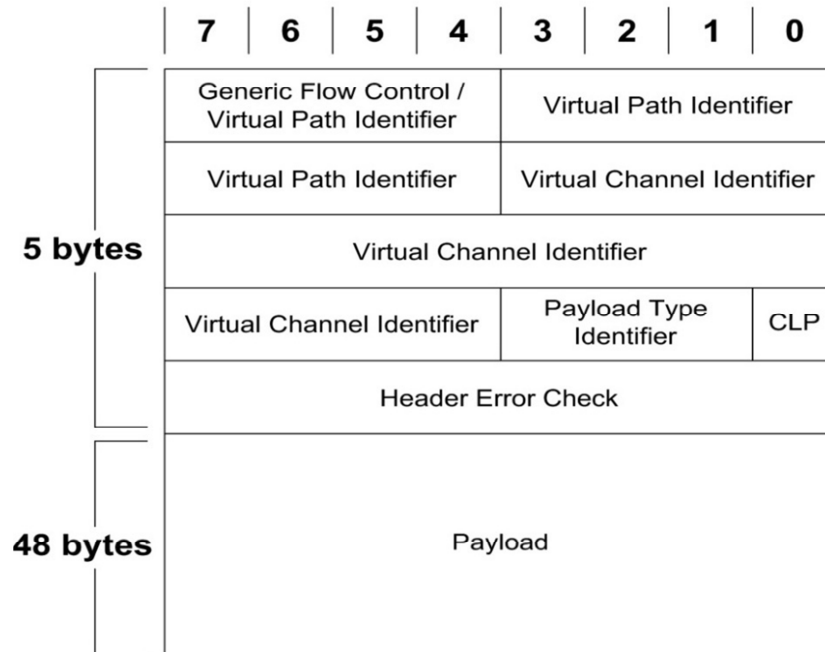
Πολυπλεξία βάση μεθόδου ATM

Σχ.3.1 – σύγκριση TDM και ATM πολυπλεξίας

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της ATM μεθόδου είναι ότι για να ξεκινήσει η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο τερματικών συσκευών ενός δικτύου με ATM υποστήριξη, θα πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί ένα εικονικό κύκλωμα (virtual circuit) μεταξύ των δυο συσκευών. Αυτό το εικονικό κύκλωμα μπορεί είτε να τερματίζεται μετά το τέλος της ανταλλαγής δεδομένων είτε να παραμένει μόνιμα στο δίκτυο.

3.2.1 Δομή κελιού ATM

Ένα κελί ATM [8] αποτελείται από την επικεφαλίδα (overhead), μήκους 5 bytes, και το ωφέλιμο φορτίο (payload), μήκους 48 bytes. Ανάλογα με την διεπαφή (interface) του δικτύου, τα πρώτα 4 bits της επικεφαλίδας χρησιμοποιούνται είτε για Generic Flow Control (για user-network interface), είτε αποτελούν και αυτά μέρος του πεδίου Virtual Path Identifier (για network-network interface). Έτσι λοιπόν το μήκος του Virtual Path Identifier (VPI) είναι είτε 8, είτε 12 bits αντίστοιχα. Αμέσως μετά το VPI ακολουθεί το πεδίο Virtual Channel Identifier (VCI), μήκους 16 bits. Τα VPI και VCI χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τον επόμενο προορισμό του κελιού ATM καθώς αυτό περνάει μια σειρά από ATM switches μέχρι να φτάσει στον τελικό προορισμό του. Το πεδίο Payload Type Identifier (PTI), που ακολουθεί τα VPI και VCI, είναι αυτό που δηλώνει ποιο είναι το περιεχόμενο του payload. Αν δηλαδή το κελί περιέχει πληροφορίες για τον χρήστη ή πληροφορίες σχετικές με την οργάνωση, διαχείριση και συντήρηση του δικτύου. Το πεδίο Cell Loss Priority (CLP) που ακολουθεί, είναι ένα bit σημαία που, ανάλογα με την τιμή του, ορίζει αν το κελί αυτό μπορεί να απορριφθεί από το δίκτυο σε περίπτωση συμφόρησης (CLP=1) ή όχι (CLP=0). Το πεδίο ελέγχου Header Error Check (HEC) χρησιμοποιεί έναν 8-bit CRC αλγόριθμο για την εύρεση και διόρθωση λαθών στην επικεφαλίδα των ATM κελιών. Στη περίπτωση που υπάρχει λάθος μόνο σε ένα bit τότε αυτό διορθώνεται, αλλιώς, όταν τα λάθη είναι περισσότερα του ενός bit, τότε το κελί αυτό απορρίπτεται.



Σχ.3.2 – δομή ATM κελιού

3.3 BPON

Το Broadband παθητικό οπτικό δίκτυο (BPON) είναι ένα point-to-multipoint οπτικό δίκτυο πρόσβασης το οποίο χρησιμοποιεί κελιά ATM για να παρέχει υπηρεσίες ευρυζωνικότητας (broadband) ανάμεσα στον OLT, στο κέντρο σύνδεσης του παρόχου, και πολλαπλές ONUs (ή ONTs), διασκορπισμένες μέσα στα όρια κάλυψης του κέντρου (σε μέγιστη απόσταση 20km) [9].

Τα δεδομένα που φτάνουν στον OLT από το δίκτυο κορμού, με σκοπό να κινηθούν στη ροή καθόδου του δικτύου πρόσβασης, ενθυλακώνονται σε κελιά ATM και δρομολογούνται προς τον παθητικό διαιρέτη μέσω της μεθόδου TDM (Time Division Multiplexing). Η κάθε ONU φιλτράρει τα εισερχόμενα δεδομένα και κρατά μόνο αυτά που προορίζονται για εκείνη. Το ποια δεδομένα θα κρατηθούν και ποια δεδομένα θα απορριφθούν από την ONU προκύπτει από την ανάγνωση των πεδίων GFC-VPI-VCI της επικεφαλίδας του κάθε κελιού ATM.

Για τη κατεύθυνση της ροής ανόδου χρησιμοποιείται η μέθοδος TDMA (Time Division Multiple Access), στην οποία κάθε ONU πρέπει να συγχρονιστεί τις υπόλοιπες ONUs του δικτύου ώστε να χρησιμοποιούν το συνολικό bandwidth εναλλάξ, ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ο συγχρονισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας ranging του OLT. Πιο συγκεκριμένα, ο OLT θα πρέπει να προσδιορίσει το πόσο μακριά βρίσκεται η κάθε ONU από αυτόν και να της παραχωρήσει μια όσο το δυνατόν καλύτερη χρονική θυρίδα, μέσα στην οποία θα μπορεί να στείλει τα προς αποστολή δεδομένα της χωρίς να παρεμβάλλονται εκπομπές από άλλες ONUs. Μόλις ο OLT καθορίσει αυτούς τους χρόνους τότε, μέσω μηνυμάτων λειτουργίας, διαχείρισης και

συντήρησης του φυσικού στρώματος (Physical Layer Operation, Administration and Maintenance, PLOAM), ενημερώνει την κάθε ONU για τους χρόνους αυτούς.

Σε ένα δίκτυο BPON μπορούν να συνδεθούν μέχρι και 64 ONUs (λόγος διαχωρισμού 1:64), και να μοιραστούν το bandwidth μιας μόνο οπτικής ίνας χρησιμοποιώντας την ATM μέθοδο μετάδοσης και μια σειρά από παθητικούς διαιρέτες (splitters) και συνδυαστές (combiners). Η χρήση αυτής της αρχιτεκτονικής επιτυγχάνει τη σημαντική μείωση του κόστους των υπηρεσιών για τον τελικό χρήστη.

Όπως σε όλα τα είδη των παθητικών οπτικών δικτύων μπορούμε να έχουμε υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν είτε δύο καλώδια οπτικών ινών (ένα για κάθε κατεύθυνση), είτε ένα καλώδιο που να μεταφέρει και τα δυο ρεύματα. Στη δεύτερη περίπτωση, έχει επιλεγθεί η περιοχή των 1310nm για εκπομπή στη ροή ανόδου, και η περιοχή των 1490nm για εκπομπή στη ροή καθόδου.

Στο ρεύμα καθόδου χρησιμοποιείται η περιοχή μήκους κύματος των 1490nm για μεταφορά δεδομένων και φωνής μαζί, τα οποία ενθυλακώνονται σε κελιά ATM από τον εξοπλισμό που βρίσκεται στον OLT. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, τα κελιά ATM είναι πακέτα μήκους 53 bytes τα οποία περιέχουν 48 bytes πληροφορίας και 5 bytes επικεφαλίδας. Το πρότυπο G.983 προσφέρει ένα μέγιστο εύρος ζώνης των 1.2 Gbps για την μεταφορά δεδομένων στη ροή καθόδου. Η περιοχή των 1310nm χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη μεταφορά υπηρεσιών φωνής και δεδομένων στο ρεύμα ανόδου. Το μήκος κύματος της ροής ανόδου χρησιμοποιεί την ίδια οπτική ίνα που μεταφέρει και τα σήματα της ροής καθόδου. Για την άνοδο, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων φτάνει τα 622 Mbps.

Μια τρίτη περιοχή μήκους κύματος, αυτή των 1550nm, χρησιμοποιείται για τη μετάδοση υπηρεσιών video στο ρεύμα καθόδου του δικτύου, από τον OLT προς τις ONUs. Η υπηρεσίες video εκπέμπονται ανεξάρτητα από τις ενθυλακωμένες σε κελιά υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Τα σήματα video μπορεί να είναι είτε αναλογικά, είτε ψηφιακά, ενώ τα δυο αυτά format μπορούν επίσης να εκπέμπονται και ταυτόχρονα σαν ανεξάρτητα κανάλια video σε διαφορετικές συχνότητες. Επιπρόσθετα, τόσο standard definition όσο και high definition τηλεοπτικά προγράμματα μπορούν επίσης να μεταδίδονται ταυτόχρονα μέσω της ίδια οπτικής ίνας στη περιοχή των 1550nm.

Η πολυπλεξία και ο διαχωρισμός των τριών ανεξάρτητων περιοχών του μήκους κύματος στον OLT και τις ONUs πραγματοποιούνται με τη χρήση CWDM πολυπλεκτών (Coarse Wavelength Division Multiplexers).

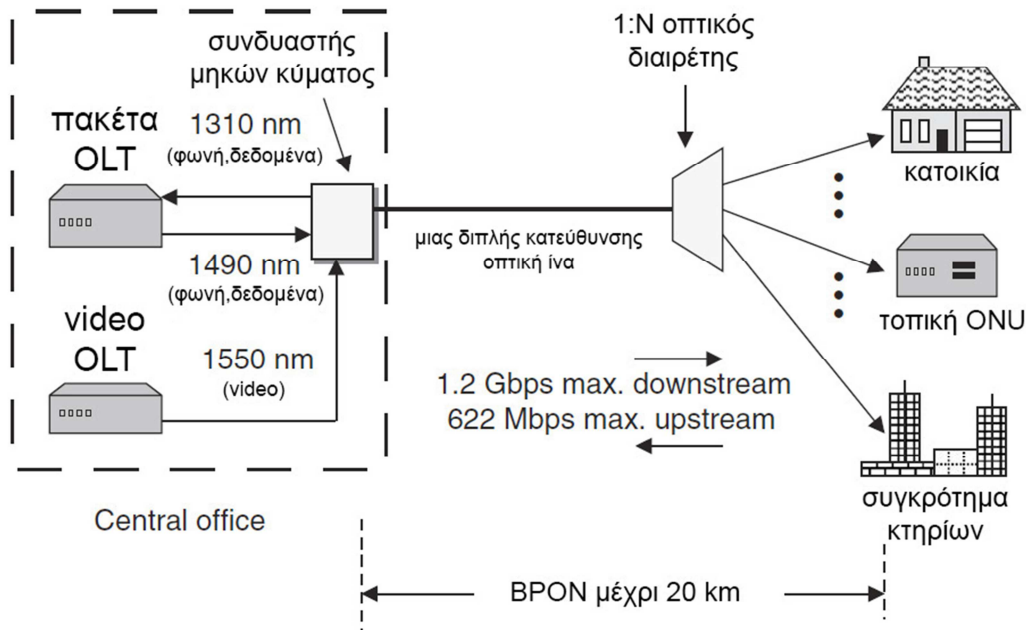
Οι υπηρεσίες φωνής και δεδομένων στη περιοχή των 1490nm του ρεύματος καθόδου μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο time-division multiplexing (TDM) σε κελιά ATM. Για το ρεύμα ανόδου και τη περιοχή των 1310nm, οι υπηρεσίες φωνής και δεδομένων (με τη μορφή κελιών ATM) μεταδίδονται με την εφαρμογή του πρωτοκόλλου time-division multiple access (TDMA).

3.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Σημαντικές παράμετροι για τη διατήρηση της υψηλής ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών σε ένα BPON αποτελούν η αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, η αποδοτική διαχείριση των περιεχομένων των buffer της κάθε ONU, καθώς επίσης και ο κατάλληλος συγχρονισμός της κίνησης στο ρεύμα ανόδου κατά μήκος του μέσου μεταφοράς (οπτική ίνα) του PON.

3.4.1 Ροή κίνησης φωνής και δεδομένων

Στο σχέδιο που ακολουθεί απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική και δομή λειτουργίας ενός BPON δικτύου [3]. Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω κωδικοποιημένης ροής NRZ (Non Return to Zero).



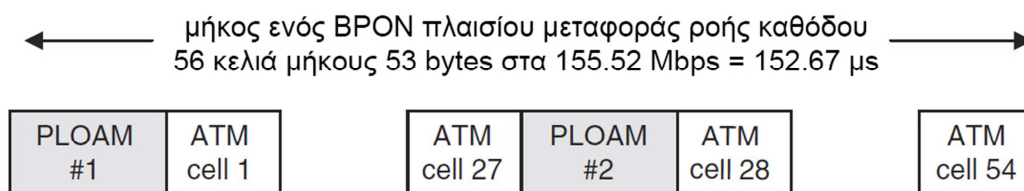
Σχ.3.3 – αρχιτεκτονική και δομή λειτουργίας BPON

Ο OLT στο κέντρο σύνδεσης (central office) αποτελεί την διεπαφή ανάμεσα στο δίκτυο κορμού του παρόχου και τους χρήστες του BPON. Όταν από το δίκτυο κορμού καταφθάνουν στον OLT πακέτα φωνής και δεδομένων, ο OLT μεταφέρει αυτά τα πακέτα, με τη μορφή κελιών ATM, προς τις ONUs του BPON χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της πολυπλεξίας με βάση τον χρόνο. Οι επιλογές για τον ρυθμό μετάδοσης στο ρεύμα καθόδου ενός BPON είναι 155.52Mbps, 622.08Mbps και 1244.16Mbps.

Ένα ειδικό πλαίσιο μεταφοράς και μια δομή χρονοθυρίδων χρησιμοποιούνται για την αποστολή και λήψη κελιών. Όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχέδιο, για έναν ρυθμό μετάδοσης

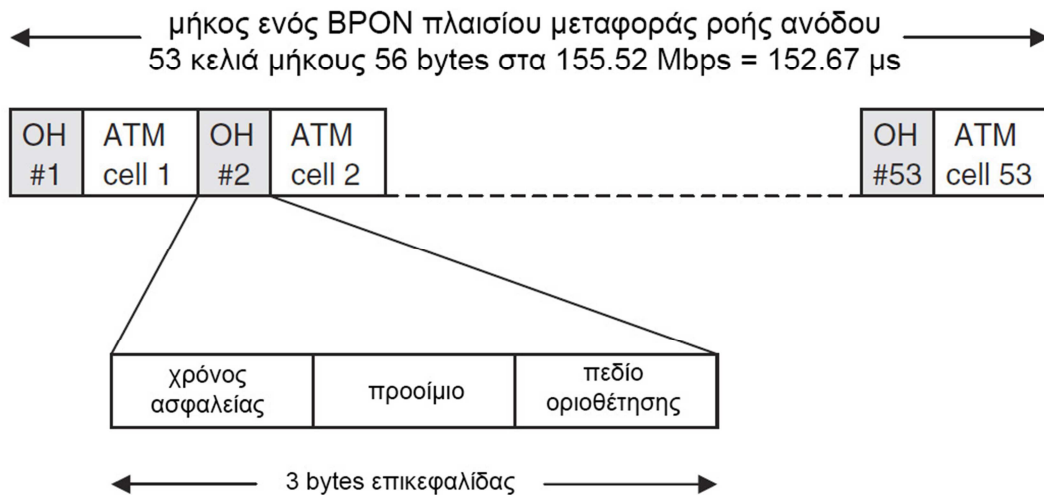
155.52Mbps, το πλαίσιο αυτό για το ρεύμα καθόδου αποτελείται από 56 κελιά ATM με μήκος 53 bytes το καθένα. Υπάρχουν δυο είδη κελιών για το ρεύμα καθόδου. Το πρώτο είδος είναι τα κελιά δεδομένων, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες σηματοδότησης, πληροφορίες σχετικές με την ATM λειτουργία, διοίκηση και διαχείριση, καθώς επίσης και δεδομένα των χρηστών. Το δεύτερο είδος είναι τα κελιά λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού στρώματος (Physical Layer OAM – PLOAM). Αυτά τα κελιά είναι υπεύθυνα για τον συγχρονισμό του PON, τον έλεγχο λαθών, την προστασία, την συντήρηση αλλά και την κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Ένα πλαίσιο ρεύματος καθόδου με ρυθμό μετάδοσης 155.52Mbps περιέχει δύο PLOAM κελιά, ένα στην αρχή του πλαισίου και ένα στη μέση του, καθώς επίσης και 54 κελιά δεδομένων [9]. Αφού λοιπόν μόνο 54 από τα 56 κελιά μεταφέρουν πληροφορίες, ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης είναι $54/56 \times 155.52\text{Mbps} = 149.97\text{Mbps}$. Σε ένα ρυθμό μετάδοσης των 155.52Mbps η χρονική διάρκεια του κάθε πλαισίου είναι 152.67μs. Το μέγεθος του πλαισίου καθόδου φτάνει τα 224 κελιά για ρυθμό μετάδοσης 622.08Mbps, και τα 448 κελιά για ρυθμό μετάδοσης 1244.16Mbps. Ο αριθμός των κελιών PLOAM που περιέχονται σε αυτά τα πλαίσια είναι 8 και 16 αντίστοιχα.



Σχ.3.4 – δομή BPON πλαισίου μεταφοράς ροής καθόδου

Στο σχέδιο που ακολουθεί παρατίθεται η δομή του πλαισίου μεταφοράς του ρεύματος ανόδου με ρυθμό μετάδοσης τα 155.52Mbps [9]. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν 53 κελιά, καθένα από τα οποία έχει μήκος 56 bytes. Τα 3 επιπλέον bytes του κάθε κελιού αποτελούν την επικεφαλίδα, την οποία ο OLT μπορεί να διαχειριστεί για διάφορες λειτουργίες. Τα 3 bytes της επικεφαλίδας περιέχουν minimum 4 bits χρόνου ασφαλείας, ένα πεδίο προοιμίου και ένα πεδίο οριοθέτησης. Ο χρόνος ασφαλείας (guard time) παρέχει μια απαραίτητη χρονική απόσταση ανάμεσα στα κελιά από διαφορετικές ONUs ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις. Οι πληροφορίες που περιέχονται στο πεδίο του προοιμίου χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η διαφορά φάσης των εισερχομένων κελιών ATM σε σχέση με το τοπικό ρολόι στον OLT, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την δημιουργία bit συγχρονισμού. Το πεδίο οριοθέτησης είναι ένα μοναδικό μοτίβο από bits που υποδεικνύουν την έναρξη ενός εισερχόμενου κελιού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον συγχρονισμό bytes. Η κίνηση στη ροή ανόδου περιέχει επίσης PLOAM κελιά τα οποία προέρχονται από την κάθε ONU. Ο OLT είναι αυτός που καθορίζει τον ρυθμό μετάδοσης των κελιών PLOAM της κάθε ONU. Ο μικρότερος ρυθμός είναι αυτός του ενός PLOAM κελιού κάθε 100ms.



Σχ.3.5 – δομή BPON πλαισίου μεταφοράς ροής ανόδου

Αφού οι ONUs χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο time-division multiple access (TDMA) για την αποστολή πληροφοριών στον OLT, κάθε ONU θα πρέπει να συγχρονιστεί με τις υπόλοιπες. Για να το επιτύχει αυτό ο OLT χρησιμοποιεί την διαδικασία ranging, η οποία μπορεί και προσδιορίζει την απόσταση που βρίσκεται η κάθε ONU από τον OLT. Μόλις αυτή η απόσταση γίνει γνωστή, ο OLT αναθέτει σε κάθε ONU μια ειδική χρονοθυρίδα μέσα στην οποία μπορεί να μεταδώσει χωρίς να έχει παρεμβολές από άλλες ONUs. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ένταξης εγκρίσεων μετάδοσης μήκους ενός bit μέσα στα PLOAM κελιά της ροής καθόδου. Κάθε PLOAM κελί περιέχει 27 εγκρίσεις, τις οποίες μπορούν και διαβάζουν όλες οι ONUs. Ωστόσο, κάθε πλαίσιο της ροής ανόδου χρειάζεται μόνο 53 εγκρίσεις (όσες και τα κελιά που μεταφέρει), οι οποίες μεταφέρονται μέσα στα δύο κελιά PLOAM του πλαισίου καθόδου με ρυθμό μετάδοσης τα 155.52Mbps. Αυτό συνεπάγεται πως η τελευταία έγκριση, του δεύτερου PLOAM κελιού, είναι ανενεργή. Στην περίπτωση της ασύμμετρης μετάδοσης (π.χ. 622Mbps για τη ροή καθόδου και 155Mbps για τη ροή ανόδου), οι εγκρίσεις 3 έως 8 του κάθε κελιού PLOAM είναι ανενεργές και δεν χρησιμοποιούνται από τις ONUs. Όταν μια ONU θέλει να στείλει πληροφορίες, ελέγχει τους αριθμούς των εγκρίσεων στα δυο πρώτα PLOAM κελιά και τους συγκρίνει με τον δικό της αριθμό. Αν υπάρχει ταιρίασμα τότε η ONU μπορεί να στείλει τις πληροφορίες της.

3.4.2 Προστασία των εγκρίσεων

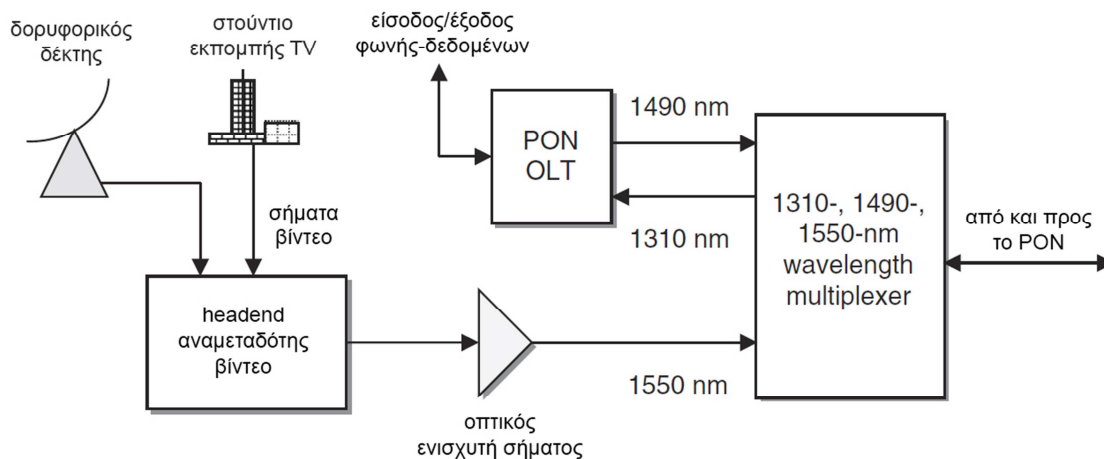
Ένας κυκλικός έλεγχος πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check – CRC) χρησιμοποιείται για την προστασία της ακεραιότητας ενός γκρουπ επτά εγκρίσεων μετάδοσης [3]. Η μέθοδος CRC είναι ένας πολυωνυμικός κώδικας που βασίζεται σε μια διαδικασία διωνυμικής διαίρεσης. Η διαδικασία κωδικοποίησης χρησιμοποιεί ένα μπλοκ από bits πληροφοριών και μια ακολουθία περιττών bits για να ελέγξει για σφάλματα στο μπλοκ πληροφοριών. Για το ρεύμα καθόδου μιας σύνδεσης BPON

δικτύου, η μέθοδος CRC προστατεύει ένα γκρουπ επτά εγκρίσεων μετάδοσης ενός PLOAM κελιού. Το πολυώνυμο γεννήτρια της CRC μεθόδου είναι το $g(x)=x^8+x^2+x+1$. Ένα πολυώνυμο σαν αυτό μπορεί να προστατέψει μέχρι και 15 bytes και είναι ικανό να εντοπίσει μέχρι 3 bits λαθών. Στο δεύτερο PLOAM κελί, η έβδομη, ανενεργή έγκριση, η οποία προστίθεται στις έξι πραγματικές εγκρίσεις, χρησιμοποιείται και αυτή σαν ένα μέρος του γκρουπ των εγκρίσεων που συμμετέχουν στον υπολογισμό της μεθόδου CRC. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι σε ένα σύστημα BPON είναι δυνατός μόνο ο εντοπισμός των λαθών και όχι η διόρθωση τους. Έτσι, όταν ένας δέκτης λαμβάνει από την CRC μέθοδο ότι ένα μπλοκ πληροφοριών περιέχει λάθη, τότε απορρίπτεται όλο το μπλοκ.

3.4.3 Ροή κίνησης βίντεο

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, η περιοχή των 1550nm χρησιμοποιείται από τα BPON για τη μετάδοση υπηρεσιών video προς τους χρήστες του δικτύου [3]. Ο εξοπλισμός του κέντρου σύνδεσης που σχετίζεται με την μετάδοση βίντεο περιλαμβάνει έναν headend αναμεταδότη ο οποίος λαμβάνει περιεχόμενο από διάφορες αναλογικές και ψηφιακές εκπομπές βίντεο. Ο αναμεταδότης μεταδίδει αυτές τις υπηρεσίες προς τους συνδρομητές του δικτύου με τη χρήση του ίδιου πρότυπου συστήματος πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται και στην καλωδιακή τηλεόραση (Cable TV).

Δεδομένου ότι για τη ροή καθόδου οι υπηρεσίες βίντεο μεταδίδονται σε διαφορετική περιοχή μήκους κύματος από ότι τα πακέτα φωνής και δεδομένων (1550nm και 1490nm αντίστοιχα), για το λόγω αυτό οι δυο μεταδόσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε συστήματος κωδικοποίησης στο βίντεο.



Σχ.3.6 – δομή λειτουργίας BPON με υποστήριξη video

Αμέσως μετά τον αναμεταδότη βίντεο συναντάμε τον οπτικό ενισχυτή σήματος, ο οποίος ενισχύει το οπτικό σήμα πριν αυτό σταλθεί στην ίνα τροφοδοσίας του BPON δικτύου. Αυτή η

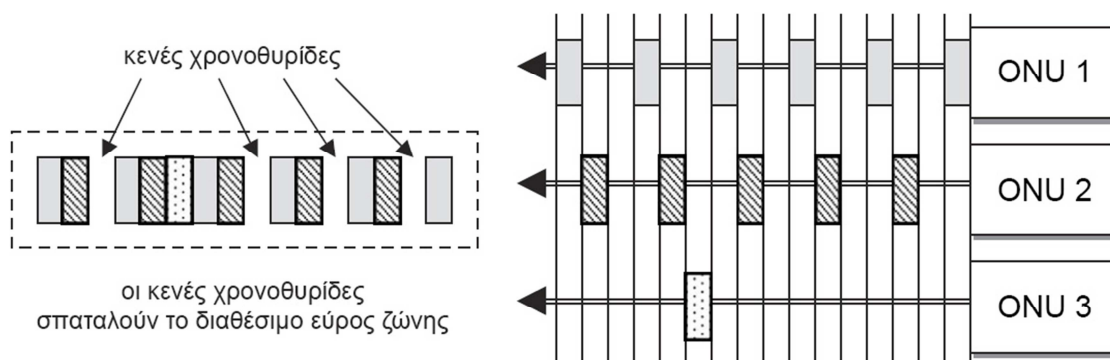
ενίσχυση του σήματος είναι απαραίτητη για να έχουμε έναν επαρκή λόγο σήματος προς θόρυβο για το βίντεο στις εγκαταστάσεις του συνδρομητή.

3.5 Έλεγχος κίνησης

Οι χρήστες που εξυπηρετούνται από μια ONU έχουν ένα ευρύ φάσμα από ανάγκες σε υπηρεσίες και σε χρήση bandwidth. Έτσι λοιπόν, οι πάροχοι υπηρεσιών πωλούν ξεχωριστά πακέτα συνδρομών σε κάθε χρήστη, προσαρμοσμένα στις ανάγκες του καθενός. Παλιότερα το διαθέσιμο bandwidth για κάθε χρήστη ήταν σταθερό και εγγυημένο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες bandwidth να παραμένουν αχρησιμοποίητες, από τη στιγμή που οι χρήστες δεν είχαν πληροφορίες προς αποστολή στις χρονοθυρίδες που τους παραχωρούσε το δίκτυο. Ένας πιο αποδοτικός τρόπος κατανομής του εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη είναι ο δυναμικός, ο οποίος συνυπολογίζει τις ανάγκες των χρηστών σε κάθε δεδομένη στιγμή.

3.5.1 Ανάθεση σταθερού εύρους ζώνης

Στο πιο απλοϊκό σενάριο ανάθεσης εύρους ζώνης [3], οι υπηρεσίες που προσφέρονται στον κάθε πελάτη περιλαμβάνουν συγκεκριμένη, σταθερή τιμή bandwidth, με την τιμή αυτή να διαφέρει ανάλογα με το κόστος το οποίο είναι διατεθειμένος να πληρώσει ο πελάτης. Η σταθερή κατανομή δεν είναι αποτελεσματική ως προς τη χρήση του εύρους ζώνης. Αν ένας συνδρομητής δεν έχει πληροφορίες προς αποστολή κατά τη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας, αυτό το ανεκμετάλλευτο κομμάτι του bandwidth δεν μπορεί να διατεθεί σε άλλους συνδρομητές που το έχουν ανάγκη. Στο παρακάτω σχέδιο απεικονίζεται ένα σενάριο ανάθεσης σταθερού εύρους ζώνης:



Σχ.3.7 – σενάριο ανάθεσης σταθερού εύρους ζώνης

Στο σενάριο του σχεδίου, ας δεχτούμε ότι σε κάθε μία ONU έχει ανατεθεί σταθερό εύρος ζώνης ύψους 5Mbps. Ας υποθέσουμε επίσης ότι η ONU 2 έχει έναν μεγάλο όγκο από δεδομένα που περιμένουν στην ουρά ενώ η ONU 3 δεν έχει δεδομένα προς αποστολή. Σε αυτή τη περίπτωση ένα

μικρό μόνο κομμάτι του bandwidth της ONU 3 χρησιμοποιείται για την αποστολή ανενεργών κελιών, με σκοπό τη διατήρηση του συγχρονισμού στη σύνδεση με τον OLT. Από τη στιγμή που η κατανομή του εύρους ζώνης είναι σταθερή, η ONU 2 δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει τα κενά κομμάτια του εύρους ζώνης που έχει ανατεθεί στην ONU 3. Έτσι λοιπόν ένα μεγάλο μέρος του bandwidth του BPON παραμένει αχρησιμοποίητο.

3.5.2 Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης

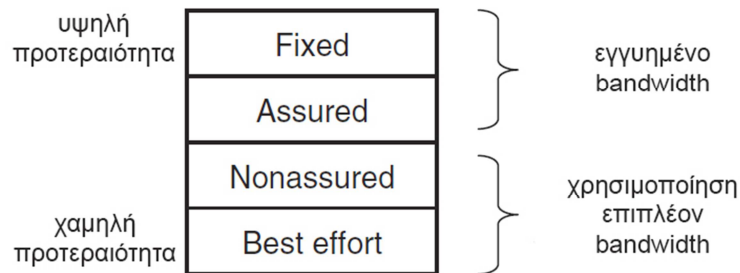
Όταν χρησιμοποιείται ανάθεση σταθερού εύρους ζώνης, τα buffers σε μια ONU αρχίζουν και γεμίζουν με πληροφορίες οι οποίες πρέπει να σταλούν με τη μορφή μετάδοσης εκρηκτικής ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρές καθυστερήσεις και αυξομειώσεις στη κίνηση των κελιών, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος. Επιπλέον, όταν τα buffers γεμίζουν πλήρως, η κυκλοφοριακή συμφόρηση μπορεί να προκαλέσει την απόρριψη κελιών. Αυτή η κατάσταση μπορεί να αντιμετωπιστεί σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση της δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης.

Η δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) [3] είναι μια μεθοδολογία που επιτρέπει την ταχύτερη ανακατανομή του εύρους ζώνης στο PON ανάλογα με τις απαιτήσεις σε κίνηση. Η μέθοδος αυτή ελέγχεται από τον OLT, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τις εγκρίσεις που επιτρέπουν σε κάθε ONU να εκπέμψει σε συγκεκριμένες χρονοθυρίδες. Ο έλεγχος της κίνησης για το ρεύμα της ανόδου γίνεται με την απονομή εγκρίσεων σε ξεχωριστά δοχεία μεταφοράς (Traffic Containers, TCONTs). Τα δοχεία μεταφοράς αποτελούν διαφορετικές κατηγορίες χειρισμού της κίνησης για το ρεύμα ανόδου, που ορίζονται μέσα σε μια ONU.

Για να προσδιορίσει ένας OLT τον αριθμό των εγκρίσεων που πρέπει να αναθέσει σε μια ONU θα πρέπει να ξέρει την κατάσταση της κίνησης των δοχείων μεταφοράς που σχετίζονται με αυτήν την ONU. Δύο πιθανοί τρόποι για γνωρίζει ο OLT την κατάσταση αυτή είναι η μέθοδος αναφοράς κατάστασης και η διαδικασία παρακολούθησης των ανενεργών κελιών. Στην μέθοδο αναφοράς κατάστασης, το κάθε δοχείο μεταφοράς υποδεικνύει τον αριθμό των πακέτων που περιμένουν για μετάδοση στα buffers του. Μόλις ο OLT λάβει αυτές τις πληροφορίες τότε ανακατανέμει τις εγκρίσεις του στις διάφορες ONUs αναλόγως. Αντιθέτως, η διαδικασία παρακολούθησης ανενεργών κελιών συντελείται μόνο στον OLT. Όταν μια ONU δεν έχει πληροφορίες σε αναμονή προς αποστολή, μόλις λάβει μια έγκριση στέλνει στη ροή ανόδου ένα ανενεργό κελί, δηλώνοντας έτσι ότι το buffer της είναι κενό. Με αυτόν τον τρόπο ο OLT ενημερώνεται ότι οι εγκρίσεις για αυτό το δοχείο μεταφοράς μπορούν να ανατεθούν σε άλλα δοχεία.

Αν μια ONU έχει μεγάλη ουρά αναμονής στα buffers της, τότε ο OLT μπορεί να αναθέσει πολλαπλά δοχεία μεταφοράς σε αυτήν την ONU. Επιπρόσθετα, τα δοχεία μεταφοράς μπορούν να διακριθούν σε πέντε διαφορετικούς τύπους, ανάλογα με τις παραμέτρους χειρισμού της κάθε ONU από το δίκτυο, όπως αυτές έχουν συμφωνηθεί ανάμεσα στον πάροχο και στον κάθε χρήστη, όπως

π.χ. η προτεραιότητα υπηρεσιών και η Quality of Service (QoS). Η προτεραιότητα υπηρεσιών έχει να κάνει με την τιμή του παρεχόμενου bandwidth, και εκτείνεται από χαμηλή έως υψηλή προτεραιότητα, όπως φαίνεται στο επόμενο σχέδιο:



Σχ.3.8 – βαθμίδες προτεραιοτήτων υπηρεσιών

Το fixed bandwidth είναι εγγυημένο, σταθερό bandwidth και δεν μπορεί να ελεγχθεί δυναμικά. Ωστόσο, επειδή η τιμή του είναι σταθερή, είτε υπάρχει μετάδοση δεδομένων, είτε όχι, έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Το assured bandwidth είναι επίσης εγγυημένο, αλλά ανατίθεται δυναμικά μόνο κατά τη διάρκεια πραγματικής μετάδοσης δεδομένων. Έτσι, είναι και αυτό υψηλής προτεραιότητας. Τα non-assured bandwidth και best-effort bandwidth ανατίθενται δυναμικά υπό τον έλεγχο της συνάρτησης δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης. Το επόμενο σχέδιο συνοψίζει τους τύπους των δοχείων μεταφοράς και τις συναφείς παραμέτρους διαχείρισής τους.

Τύποι δοχείων μεταφοράς (T-CONTs)		
Τύπος T-CONT	Εκχωρούμενο Bandwidth	Χαρακτηριστικά
T-CONT 1	Fixed	Εγγυημένο bandwidth για χρονο-ευαίσθητες εφαρμογές
T-CONT 2	Assured	Εγγυημένο bandwidth για μη χρονο-ευαίσθητες εφαρμογές
T-CONT 3	Nonassured	Minimum εγγυημένο bandwidth με επιπλέον μη εγγυημένο bandwidth για μη χρονο-ευαίσθητες εφαρμογές
T-CONT 4	Best effort	Δυναμικά εκχωρούμενο bandwidth ανεξάρτητο από το εγγυημένο bandwidth
T-CONT 5	All	Μίξη όλων των παραπάνω τύπων

Σχ.3.9 – παράμετροι διαχείρισης δοχείων μεταφοράς

3.6 Η εγκατάλειψη του BPON

Τα BPON αποτέλεσαν τον πρόδρομο όλων των παθητικών οπτικών δικτύων που κυριαρχούν στις μέρες μας. Στα χρόνια που αποτελούσαν την μοναδική πρόταση για το δίκτυο πρόσβασης είχαν να του προσφέρουν πρωτοφανή πλεονεκτήματα. Ταχύτητες μετάδοσης 1244 Mbps για τη ροή καθόδου και 622 Mbps για τη ροή ανόδου. Μέγιστη εμβέλεια του δικτύου τα 20 km, απόσταση

πολύ μεγαλύτερη από τα 5.5 Km που προσέφεραν οι γραμμές DSL των καλωδίων χαλκού. Λόγος διαχωρισμού του οπτικού σήματος 1:64, χαρακτηριστικό που επέτρεπε στους παρόχους να μειώσουν σημαντικά τις τιμές των προσφερόμενων υπηρεσιών τους αφού πολλοί χρήστες μοιράζονταν την ίδια οπτική ίνα. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα αποτέλεσαν κληρονομιά και για τις επόμενες γενιές των TDM παθητικών οπτικών δικτύων.

Ωστόσο, η πρόοδος της τεχνολογίας και η συνεχής ανάγκη για την εύρεση της βέλτιστης λύσης δεν άργησε να οδηγήσει στην εγκατάλειψη της χρήσης των BPON δικτύων, σε αρκετό μεγάλο ποσοστό, και την στρόφη σε πιο σύγχρονα TDM PONs. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα BPON περιορίζονταν στην μετάδοση συγκεκριμένου μήκους ATM κελιών, γεγονός που οδηγούσε σε πολύ μεγάλο κατακερματισμό των δεδομένων. Βέβαια το πιο μεγάλο πλεονέκτημα των EPON και GPON, που ακολούθησαν, είναι φυσικά οι μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και για τα δύο ρεύματα της κίνησης. Έτσι λοιπόν οι πάροχοι στράφηκαν προς τα πιο σύγχρονα TDM PONs.

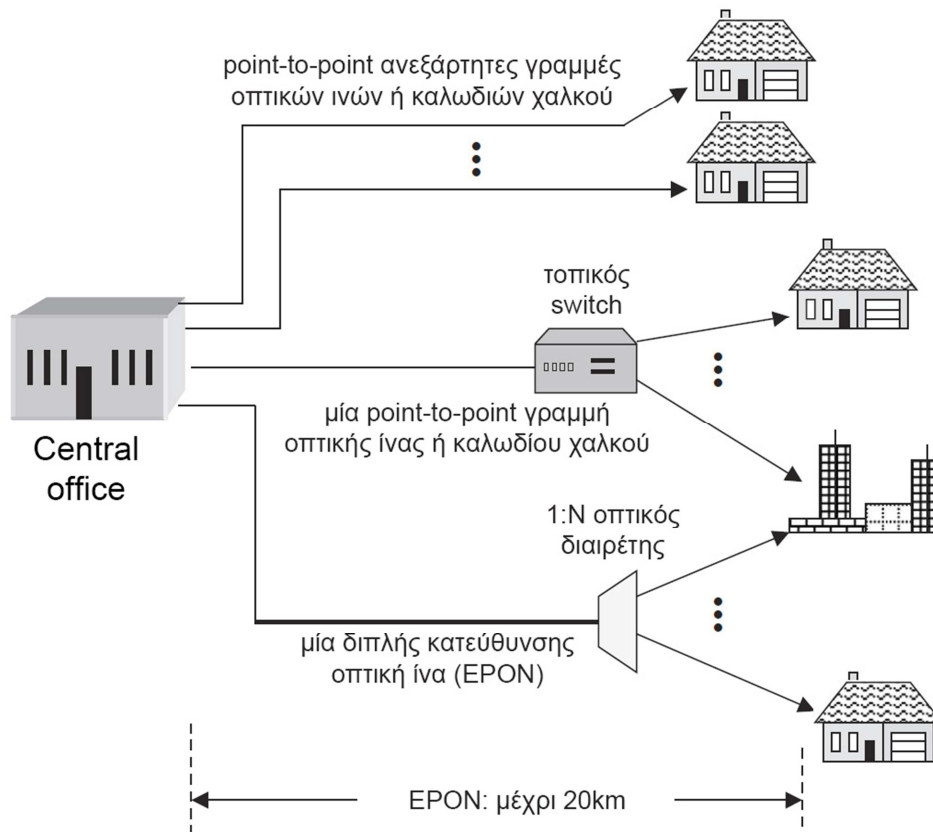
4.

Ethernet PON (EPON)

4.1 Εισαγωγή

Το Ethernet έχει εξελιχθεί στο πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας στα τοπικά δίκτυα (LANs), ενώ έχει προεκταθεί τόσο στα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) όσο και στα δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs). Η χρήση του Ethernet σαν τεχνολογία μετάδοσης στο πρώτο μίλι (Ethernet at First Mile, EFM) επιτρέπει την ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης με IP και Ethernet δυνατότητες, όπου τα δεδομένα μεταφέρονται ενθυλακωμένα μέσα σε Ethernet MAC πλαίσια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή του κόστους και της πολυπλοκότητας της μετατροπής ανάμεσα σε διαφορετικά πρωτόκολλα, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει με τις υλοποιήσεις BPON. Επιπρόσθετα, η χρησιμοποίηση Ethernet στο πρώτο μίλι επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να εκμεταλλευτούν τα υπάρχοντα, και γνώριμα σε αυτούς, εργαλεία διαχείρισης και ανάλυσης του δικτύου, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός απλού δικτύου Ethernet.

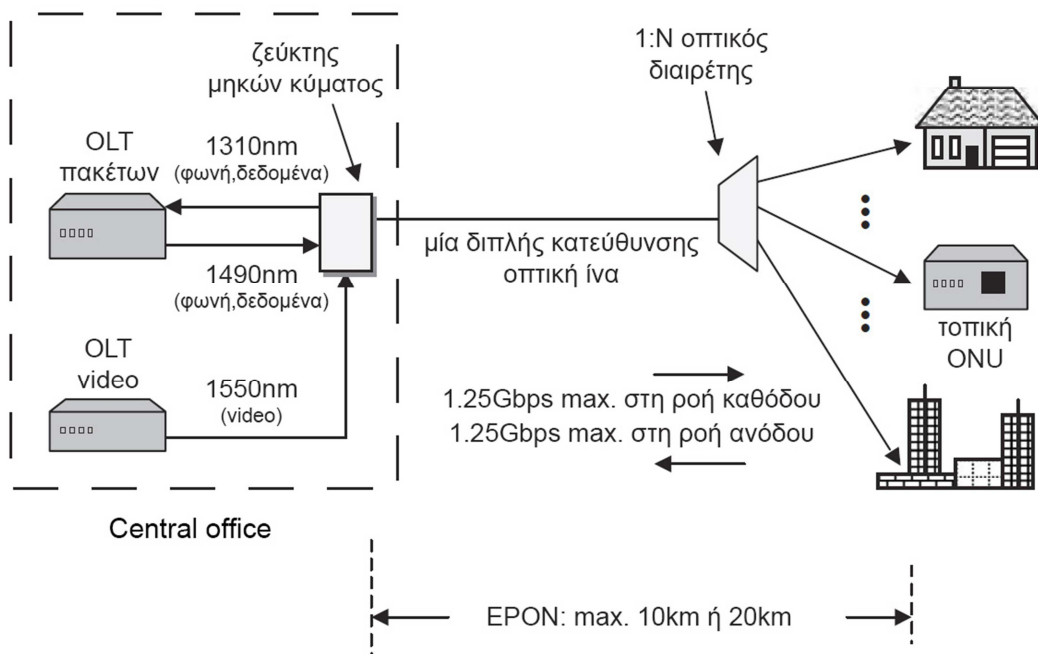
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την υλοποίηση Ethernet στο πρώτο μίλι [3]. Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, ο ένας αφορά στην ανάπτυξη δικτύων EPON (γνωστά και ως GEAPON, Gigabit Ethernet PON), ενώ οι άλλοι δύο χρησιμοποιούν point-to-point συνδέσεις, είτε μέσω καλωδίων χαλκών, είτε μέσω οπτικών ινών, ανάμεσα στους χρήστες και στο κέντρο σύνδεσης.



Σχ.4.1 – υλοποιήσεις EPON

4.2 Αρχιτεκτονική EPON

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός δικτύου EPON και η δομή λειτουργίας του. Η αρχιτεκτονική ακολουθεί την τυπική αρχιτεκτονική ενός PON όπως έχει περιγραφεί παραπάνω. Συγκεκριμένα, μια οπτική ίνα οδηγείται από το κέντρο σύνδεσης του παρόχου προς έναν οπτικό διαιρέτη. Από εκεί αποχωρούν πολλαπλές ίνες (συνήθως 64 ή 32) προς τις διάφορες ONUs (ή ONTs). Όπως αναφέρεται στο στάνταρντ 802.3ah-2004 της IEEE [10], η μέγιστη απόσταση μετάδοσης ανάμεσα στον OLT και σε μια ONU είναι είτε 10km, είτε 20km. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του οπτικού διαιρέτη (αν ο λόγος διαχωρισμού είναι 1:32, ή 1:64), αλλά και από το αν χρησιμοποιούνται οπτικά καλώδια κλάσης B (για τη μικρότερη απόσταση), ή κλάσης C (για τη μεγαλύτερη απόσταση). Ανεξάρτητα από τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης, η μικρότερη δυνατή απόσταση μιας ONU από τον OLT ορίζεται στα 0.5km.



Σχ.4.2 – αρχιτεκτονική και δομή λειτουργίας EPON

Όπως στα δίκτυα BPON, έτσι και στα EPON χρησιμοποιείται η περιοχή μήκους κύματος των 1490nm για μετάδοση κίνησης φωνής και δεδομένων στη ροή καθόδου, ενώ για τη ροή ανόδου χρησιμοποιείται η περιοχή των 1310nm. Το παράθυρο των 1550nm είναι διαθέσιμο για άλλες υπηρεσίες, όπως μετάδοση (broadcasting) video από τον OLT προς τους χρήστες.

Αφού βασίζεται στο Gigabit Ethernet πρωτόκολλο, ένα EPON δίκτυο έχει ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης τα 1250Mbps, τα οποία μεταδίδονται με τη χρήση κωδικοποίησης 8B10B. Σε αυτή την κωδικοποίηση δύο επιπλέον περιττά bits ενσωματώνονται σε κάθε 8-bit μπλοκ δεδομένων, με σκοπό να παρέχουν επαρκή χρόνο για την ανάκτηση του σήματος, αλλά και να διαθέτουν υπηρεσίες παρακολούθησης λαθών στη μετάδοση. Λόγω αυτής της κωδικοποίησης μπορούμε να πούμε ότι ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης είναι ίσος με 1Gbit/s.

4.2.1 OLT και ONU λειτουργίες

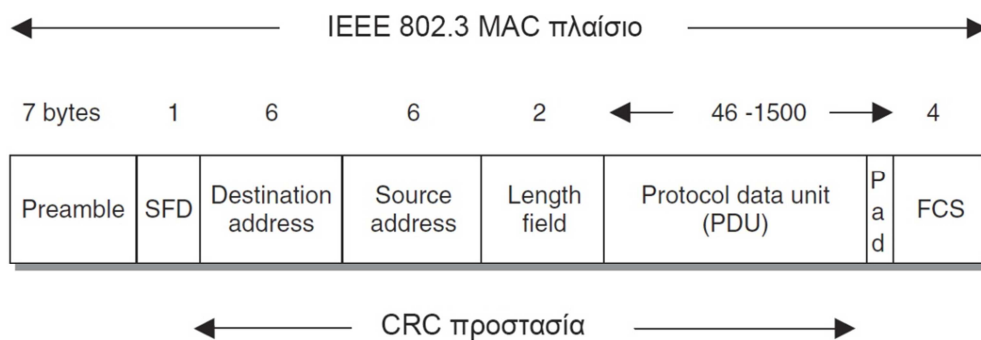
Παρόμοια με τις άλλες αρχιτεκτονικές δικτύων PON, ο OLT σε ένα EPON συμπεριφέρεται σαν ελεγκτής-διαχειριστής του δικτύου. Όλες οι επικοινωνίες συντελούνται ανάμεσα στον OLT και τις ONUs, οπότε δεν υπάρχει απευθείας επικοινωνία ανάμεσα στις ONUs. Μερικές από τις βασικές λειτουργίες του OLT περιλαμβάνουν τα παρακάτω [3]:

- Προσδιορίζει αδιαλείπτως αν υπάρχει κάποια ONU που να έχει προστεθεί, ή να έχει αποχωρήσει, από το δίκτυο. Αυτή η λειτουργία είναι γνωστή ως λειτουργία αναγνώρισης.
- Ελέγχει τη διαδικασία εγγραφής των νέων ONUs στο δίκτυο.

- Αναθέτει διαφορετικές τιμές bandwidth στη κατεύθυνση της ροής ανόδου για την κάθε ONU ξεχωριστά.
- Πραγματοποιεί τη διαδικασία ranging για να υπολογίσει το χρόνο καθυστέρησης μετάδοσης ανάμεσα στον OLT και στην κάθε ONU.
- Παράγει μηνύματα με χρονοσήμανση για να συγχρονίζει τις ONUs με την καθολική ώρα του EPON.

4.2.2 Ροή κίνησης EPON

Τα δεδομένα που κινούνται μέσα σε ένα δίκτυο EPON μεταφέρονται μέσα σε πλαίσια Ethernet. Στο σχέδιο που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα βασικό Ethernet MAC πλαίσιο, το οποίο μπορεί να ποικίλλει σε μήκος από 72 μέχρι 1526 bytes [10].



Σχ.4.3 – βασικό Ethernet MAC πλαίσιο

Οι λειτουργίες των οκτώ πεδίων του πλαισίου είναι οι εξής:

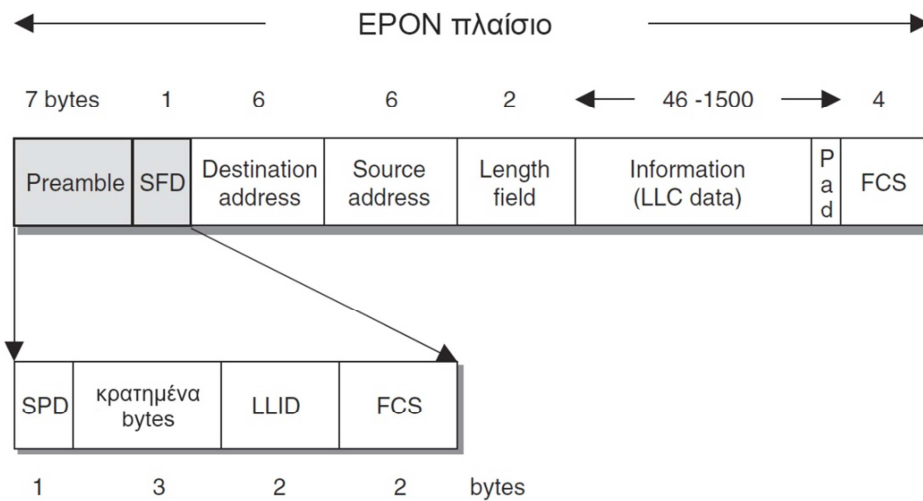
- **Προοίμιο (Preamble).** Το πλαίσιο ξεκινά με ένα προοίμιο μήκους 7 bytes το οποίο επαναλαμβάνει 7 φορές το 8-bit μοτίβο 01010101 (0x55). Αυτό το μοτίβο ενημερώνει ότι ακολουθεί ένα πλαίσιο και ενεργοποιεί τον δέκτη για να συγχρονιστεί με την αρχή του πλαισίου αυτού.
- **Πεδίο οριοθέτησης έναρξης πλαισίου (Start Frame Delimiter, SFD).** Αυτό το 1-byte πεδίο έχει τη μορφή 11010101 (0xd5), όπου τα δύο συνεχόμενα 1 σηματοδοτούν την έναρξη του πλαισίου. Με αυτόν τον τρόπο οδηγείται ο δέκτης ώστε να εντοπίσει το πρώτο bit του πλαισίου.
- **Διεύθυνση προορισμού (Destination Address, DA).** Αυτό το 6-byte πεδίο περιέχει την φυσική διεύθυνση του επόμενου προορισμού του πακέτου. Το πρώτο bit της DA κάνει διάκριση για τον αν το πλαίσιο απευθύνεται μόνο σε έναν χρήστη ή είναι εκπομπή προς πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Το δεύτερο bit προσδιορίζει αν η διεύθυνση προορισμού είναι μια διεύθυνση του τοπικού δικτύου ή μια παγκόσμια διεύθυνση.

- **Διεύθυνση πηγής (Source Address, SA).** Αυτό το 6-byte πεδίο περιέχει τη φυσική διεύθυνση της τελευταίας συσκευής του δικτύου που προώθησε το πακέτο. Αυτή η συσκευή θα μπορούσε να είναι αυτή από την οποία ξεκίνησε την διαδρομή του το πακέτο, ή κάποιος ενδιάμεσος διακομιστής που το παρέλαβε και το προώθησε.
- **Μήκος πεδίου PDU.** Αυτό το πεδίο, μήκους 2 bytes, προσδιορίζει τον αριθμό των bytes του πεδίου Protocol Data Unit (PDU), το οποίο αποτελεί το πεδίο που μεταφέρει όλα τα δεδομένα προς τους χρήστες. Αφού το μέγιστο επιτρεπτό μήκος ενός πλαισίου Ethernet είναι 1526 bytes, το PDU μπορεί να έχει μέγιστο μήκος τα 1520 bytes.
- **Protocol Data Unit (PDU).** Το πεδίο PDU περιέχει δεδομένα του Logical Link Control (LLC) υποστρώματος και είναι ένα μεταβλητού μήκους πεδίο πληροφοριών. Η λειτουργία του LLC έγκειται στην παροχή διευθύνσεων και μηχανισμών ελέγχου για την ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε χρήστες του δικτύου.
- **Γέμισμα (Pad).** Το πεδίο γεμίσματος περιέχει bytes τα οποία προστίθενται στο τέλος του πλαισίου ώστε να διασφαλίσουν ότι το μήκος του είναι τουλάχιστον 64 bytes. Το μήκος αυτό είναι το ελάχιστο απαραίτητο ώστε να λειτουργεί ο μηχανισμός εντοπισμού συγκρούσεων πλαισίων.
- **Frame Check Sequence (FCS).** Το πεδίο αυτό περιέχει πληροφορίες για τον εντοπισμό λαθών μέσα στο πλαίσιο. Βασίζεται πάνω σε έναν 32-bit μηχανισμό CRC. Ο CRC χρησιμοποιεί τα bits των πεδίων DA, SA, μήκος PDU, PDU για να πραγματοποιήσει μια δυαδική διαίρεση στο σταθμό εκκίνησης του πλαισίου. Το αποτέλεσμα αυτής της διαίρεσης προστίθεται στο πλαίσιο και επανελέγχεται μόλις αυτό φτάσει στον προορισμό του. Αν υπάρχει διαφορά στο αποτέλεσμα, τότε έχει συμβεί κάποιο λάθος στη μετάδοση του πλαισίου, οπότε αυτό απορρίπτεται.

Σε ένα EPON, το προοίμιο δεν είναι απαραίτητο λόγω της full-duplex φύσης λειτουργίας του δικτύου. Αυτό είναι καλό γιατί επιτρέπει την ενσωμάτωση της διεύθυνσης της ONU μέσα στο πλαίσιο Ethernet. Έτσι, αντί να αυξάνεται το μήκος της επικεφαλίδας του Ethernet πλαισίου, ώστε να ορίζεται ποια ONU είναι η παραλήπτης του πλαισίου, αυτή η πληροφορία αντικαθιστά κάποια από τα bits του προοιμίου του βασικού Ethernet πλαισίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μήκος ενός πλαισίου EPON να είναι ίσο με το μήκος ενός βασικού Ethernet πλαισίου. Το πεδίο του προοιμίου αντικαθίσταται κατά σειρά με τα ακόλουθα, σχετικά με το EPON, πεδία [10]:

- Ένα 1-byte πεδίο οριοθέτησης έναρξης πακέτου (Start Packet Delimiter, SPD), το οποίο περιέχει πληροφορίες συγχρονισμού. Αυτό το byte συγχρονισμού αποστέλλεται κάθε 2 ms για να κρατά συγχρονισμένες τις ONUs με τον OLT
- Τρία bytes κρατημένα για μελλοντική χρήση
- Ένα 2-byte πεδίο με ονομασία Logical Link Identifier (LLID)

- Ένα 2-byte πεδίο FCS που περιέχει πληροφορίες για τον εντοπισμό λαθών στο πλαίσιο EPON.



Σχ.4.4 – πλαίσιο EPON

Στη κατεύθυνση της ροής καθόδου, ο OLT εκπέμπει Ethernet πλαίσια προς τις ONUs. Αυτό είναι συμβατό με την εν γένει φύση της μετάδοσης του πρωτοκόλλου Ethernet. Η κάθε ONU λαμβάνει και φιλτράρει τα EPON πλαίσια βασισμένη στην ετικέτα LLID που προστίθεται στο κάθε πλαίσιο από τον OLT. Για παράδειγμα, μια ONU θα απορρίψει πλαίσια που προορίζονται για άλλες ONUs, καθώς επίσης και πλαίσια που η ίδια έχει εκπέμψει με μορφή broadcasting προς το δίκτυο. Όταν μια ONU στέλνει δεδομένα προς τον OLT προσθέτει στο πλαίσιο το δικό της, μοναδικό, LLID που της έχει ανατεθεί από τον OLT κατά τη φάση εγγραφής της διαδικασίας ανίχνευσης νέων ONUs στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι αυτό το LLID έχει ισχύ μόνο μέσα στο EPON, αφού η ONU αφαιρεί το LLID πριν στείλει τα πακέτα στον εξοπλισμό του χρήστη.

Σε αντίθεση με το πεδίο LLID που είναι μοναδικό για κάθε ONU, όλες οι ONUs ανταποκρίνονται στο Single Copy Broadcast (SCB) LLID. Το SCB παρέχει έναν αποδοτικό μηχανισμό στον OLT για να μεταδίδει πληροφορίες προς όλες τις ONUs με τη μέθοδο broadcasting και όχι ξεχωριστά για κάθε μια.

Για τη κατεύθυνση της ροής ανόδου, μια ειδική διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις μεταξύ πακέτων που εκπέμπονται ταυτοχρόνως από διαφορετικές ONUs. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από το ειδικά για αυτόν τον σκοπό Multipoint Control Protocol (MPCP). Το πρωτόκολλο αυτό διαιτητεύει την πρόσβαση στο κανάλι επικοινωνίας ανάμεσα στο κέντρο σύνδεσης και τους χρήστες του EPON δικτύου. Μια από τις λειτουργίες που εκτελεί το πρωτόκολλο MPCP είναι να αναθέτει το bandwidth της ροής ανόδου δυναμικά στους διάφορους συνδρομητές του δικτύου.

4.2.3 Επίπεδα ισχύος οπτικής δέσμης

Είναι στη φύση ενός PON δικτύου τα πακέτα να καταφθάνουν στον OLT με εκρηκτική ροή, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις τόσο στην ισχύ του σήματος, όσο και στη φάση του, σε διαδοχικές χρονοθυρίδες [3]. Αυτή η μεγάλη διακύμανση συμβαίνει γιατί είναι πολύ πιθανό διαδοχικά πακέτα να προέρχονται από διαφορετικές ONUs. Αυτές οι ONUs μπορεί να βρίσκονται σε σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις από τον OLT. Από τη στιγμή που οι τυπικοί οπτικοί δέκτες είναι σχεδιασμένοι να λαμβάνουν οπτικά σήματα με σταθερό πλάτος και φάση, δεν είναι κατάλληλοι για την μετάδοση εκρηκτικής ροής των PONs. Είναι λοιπόν αναγκαία η χρησιμοποίηση δεκτών λήψης εκρηκτικής ροής ώστε να προσαρμόζονται άμεσα στις διακυμάνσεις ισχύος και φάσεως του οπτικού σήματος για διαδοχικά πακέτα.

Να σημειωθεί ότι οι διακυμάνσεις στην ισχύ δεν είναι πρόβλημα για τις ONUs, από τη στιγμή που το σήμα σε αυτές προέρχεται μόνο από τον OLT. Ωστόσο, όπως συμβαίνει και σε άλλα PONs, τα lasers των ONUs θα πρέπει να κλείνουν όταν δεν χρησιμοποιούνται. Έτσι λοιπόν, ενώ οι ONUs ενός EPON χρησιμοποιούν οπτικούς πομπούς εκρηκτικής ροής για το ρεύμα ανόδου, για το ρεύμα καθόδου αρκούνται σε απλούς οπτικούς δέκτες.

4.3 Λειτουργίες MPCP

Ένα EPON χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MPCP (Multi-Point Control Protocol) για να ρυθμίζει την κίνηση τόσο στη ροή καθόδου όσο και στη ροή ανόδου [11]. Οι διαδικασίες, τις οποίες επιτελεί το MPCP, αφορούν τον αυτόματο εντοπισμό νέων ONUs, την εγγραφή τους στο δίκτυο, τον μηχανισμό ranging, τον προσδιορισμό των αναγκών σε bandwidth και την ανάθεση του σε κάθε ONU. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα 64-byte μηνύματα ελέγχου:

1. Τα μηνύματα GATE και REPORT χρησιμοποιούνται για την ανάθεση και απαίτηση σε bandwidth αντίστοιχα.
2. Τα μηνύματα REGISTER_REQUEST, REGISTER, και REGISTER_ACK χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της αυτόματης ανίχνευσης ONU, την εγγραφή ONU, και τον μηχανισμό ranging αντίστοιχα.

4.3.1 Διαδικασία ανίχνευσης

Ο OLT περιοδικά ανοίγει ένα χρονικό παράθυρο ανίχνευσης με σκοπό να επιτρέψει σε νέες ONUs να δηλώσουν την παρουσία τους στο δίκτυο. Το παράθυρο αυτό ανοίγει με την μετάδοση ενός μηνύματος ανίχνευσης GATE, το οποίο περιέχει πληροφορίες για το μήκος του χρονικού παράθυρου καθώς και τον χρόνο έναρξης του. Όπως είναι λογικό οι ONUs που είναι ήδη γραμμένες στο δίκτυο αγνοούν το μήνυμα ανίχνευσης GATE.

Οι ONUs που δεν έχουν εγγραφεί στο δίκτυο ανταποκρίνονται στο μήνυμα ανίχνευσης GATE μεταδίδοντας πίσω ένα μήνυμα REGISTER_REQ. Το μήνυμα αυτό περιέχει την MAC διεύθυνση της ONU, καθώς επίσης και τον αριθμό των εγκρίσεων που έχει την δυνατότητα να λάβει από τον OLT. Ένας ειδικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες να έχουμε συγκρούσεις μηνυμάτων στην προσπάθεια πολλών ONUs να εγγραφούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού παράθυρου ανίχνευσης. Ο αλγόριθμος σε γενικές γραμμές λειτουργεί έτσι ώστε κάθε ONU να καθυστερεί την μετάδοση της κατά ένα τυχαίο χρονικό διάστημα σε σχέση με την έναρξη του χρονικού παράθυρου ανίχνευσης.

Όταν ο OLT λάβει το μήνυμα REGISTER_REQ από μια ONU, της αναθέτει ένα LLID, σχετίζοντας το συγκεκριμένο LLID με την διεύθυνση MAC της ONU. Στη συνέχεια ο OLT στέλνει ένα μήνυμα REGISTER στην ONU με σκοπό να την ενημερώσει για το LLID της, τον χρόνο που απαιτεί ο OLT για συγχρονισμό, και να επιβεβαιώσει τον μέγιστο αριθμό των εγκρίσεων που μπορεί η ONU να διαχειριστεί. Ο χρόνος συγχρονισμού του OLT είναι ο χρόνος που απαιτεί ο OLT ώστε να συγχρονιστεί με την εκρηκτική ροή του ρεύματος ανόδου της ONU. Ο χρόνος αυτός προσδιορίζεται με την μετάδοση πολλαπλών 16-bit όμοιων πακέτων δεδομένων που στέλνει η ONU σαν μη ενεργά ζεύγη κώδικα στο ξεκίνημα της εκρηκτικής ροής.

Αφού η ONU επεξεργαστεί το μήνυμα REGISTER, στέλνει πίσω ένα μήνυμα REGISTER_ACK σαν απάντηση σε ένα μήνυμα GATE του OLT. Τυπικά, μια ONU εγγράφεται σε χρόνο μικρότερο του ενός δευτερολέπτου.

Να σημειωθεί ότι το πρωτόκολλο διαθέτει μηχανισμούς για την διαγραφή μιας ONU από το δίκτυο (αν π.χ. παρέλθει ένα χρονικό διάστημα χωρίς η ONU να έχει επικοινωνήσει με τον OLT), καθώς επίσης και για την επανεγγραφή της.

4.3.2 Ανάθεση εύρους ζώνης

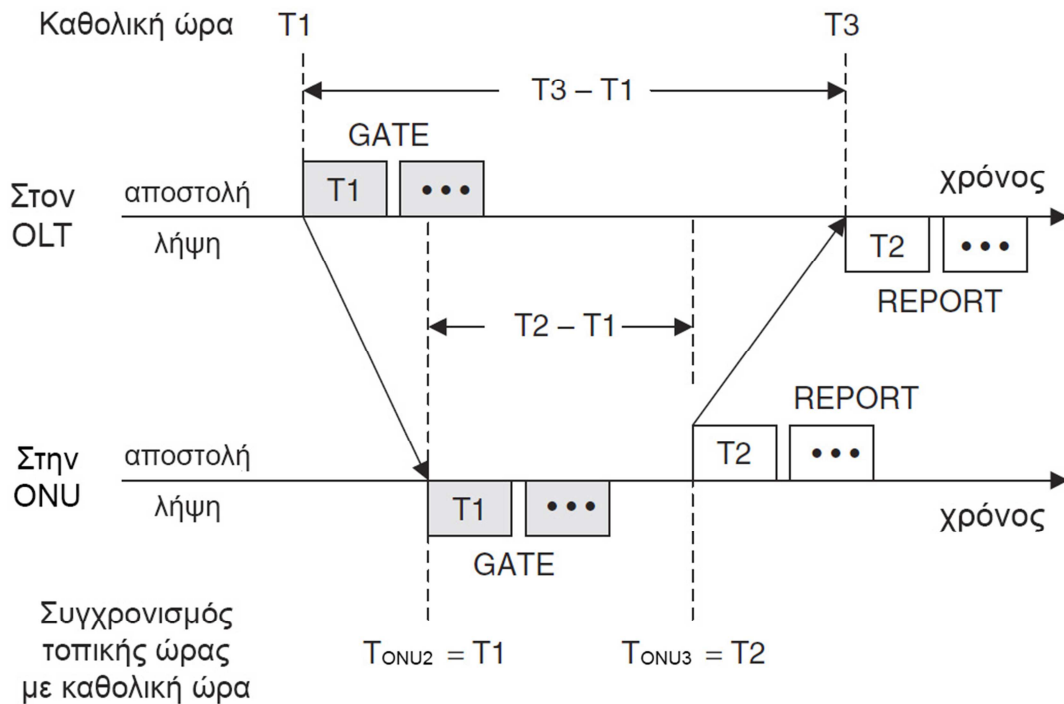
Σε ένα δίκτυο πρόσβασης, οι χρήστες του συνήθως αποστέλλουν την κίνηση τους προς το δίκτυο με εκρηκτική ροή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα μητροπολιτικά δίκτυα ή τα δίκτυα ευρείας περιοχής, όπου η ροή της κίνησης συνήθως είναι σχετικά ομαλή, ως συνέπεια της συνάθροισης και αποστολής κίνησης από πολλές πηγές. Για να διαχειριστεί σωστά αυτή την κατάσταση ένα PON, το bandwidth του ρεύματος ανόδου διαιρείται σε χρονοθυρίδες. Ο OLT ελέγχει και αναθέτει αυτές τις μονάδες μέτρησης χρόνου στις διάφορες ONUs ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης. Αυτές οι χρονοθυρίδες μπορούν να ανατεθούν δυναμικά, τη στιγμή που απαιτείται από την κάθε ONU, ή μπορούν να κρατηθούν εξαρχής για την κάθε ONU. Χρησιμοποιώντας δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης, κάθε κρατημένες χρονοθυρίδες ή αχρησιμοποίητα κομμάτια χρονοθυρίδων, μπορούν να κατανεμηθούν δυναμικά από τον OLT προς τις ONUs που τις έχουν ανάγκη.

Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, το πρωτόκολλο MPCP για να βοηθήσει στην ανάθεση και αναφορά του απαιτούμενου bandwidth μέσα σε ένα EPON, δημιουργεί τα μηνύματα ελέγχου

REPORT και GATE, μήκους 64 bytes το καθένα. Η ONU χρησιμοποιεί το μήνυμα REPORT ως αγγελιοφόρο απαίτησης bandwidth από τον OLT. Τυπικά αυτό γίνεται με την αναφορά της κατάστασης των ουρών αποστολής της ONU, αφού η κάθε ONU έχει μια σειρά από buffers όπου αποθηκεύονται προσωρινά τα Ethernet πλαίσια που περιμένουν για αποστολή. Ένα μήνυμα REPORT μπορεί να αναφέρει στον OLT την κατάσταση μέχρι οκτώ ουρών αποστολής, με την κάθε ουρά να μπορεί να έχει πολλαπλά κατώφλια. Μια ONU που αναφέρει την κατάσταση οκτώ ουρών αναμονής μπορεί να έχει μέχρι δύο κατώφλια για την κάθε ουρά. Αν η ONU έχει μόνο μια ουρά, τότε επιτρέπεται να αναφέρει μέχρι 13 κατώφλια. Όταν ο OLT λάβει ένα μήνυμα REPORT τότε το προωθεί στον αλγόριθμο δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης. Αυτός ο αλγόριθμος καταρτίζει το πρόγραμμα χρήσης της ροής ανόδου για όλες τις ONUs. Όταν ο προγραμματισμός χρήσης της ροής ανόδου ολοκληρωθεί από την DBA, τότε ο OLT μεταδίδει μηνύματα GATE προς τις ONUs για να τους εκχωρήσει εγκρίσεις για χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Κάθε μήνυμα GATE μπορεί να υποστηρίξει μέχρι τέσσερις εγκρίσεις μετάδοσης δεδομένων.

4.3.3 Μηχανισμός ranging

Για να μπορέσει μια ONU να εκπέμψει σε συγκεκριμένες χρονοθυρίδες, θα πρέπει πρώτα να συγχρονιστεί με τον OLT και τις υπόλοιπες ONUs. Αυτός ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω μιας ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου συγχρονισμού με χρονοσήμανση ανάμεσα στον OLT και την ONU [11]. Ως εκ τούτου, μια έγκριση για μετάδοση προς μια ONU καθορίζει επίσης την έναρξη μετάδοσης αλλά και τη διάρκεια της για την συγκεκριμένη ONU. Κάθε ONU ενημερώνει το ρολόι της διαβάζοντας τη χρονοσήμανση που περιέχεται σε κάθε μήνυμα έγκρισης μετάδοσης που λαμβάνει. Με αυτή την διαδικασία, κάθε ONU αποκτά και διατηρεί συγχρονισμό με τα υπόλοιπα στοιχεία του EPON.



Σχ.4.5 – διαδικασία συγχρονισμού OLT με ONU

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία απόκτησης συγχρονισμού με το υπόλοιπο EPON. Πρώτα ο OLT αποστέλλει ένα μήνυμα GATE τη χρονική στιγμή T1, η οποία βασίζεται στο καθολικό ρολόι που βρίσκεται σε αυτόν. Μια ONU λαμβάνει το μήνυμα GATE σε τοπική ώρα T_{ONU2} και επαναφέρει το ρολόι της στη χρονική στιγμή T1. Στη συνέχεια, η ONU στέλνει ένα μήνυμα REPORT προς τον OLT, τη χρονική στιγμή T_{ONU3} , η οποία είναι τώρα η ίδια με την καθολική ώρα T2. Έτσι, η χρονοσήμανση στο μήνυμα REPORT αναφέρει τη χρονική στιγμή T2. Ο OLT λαμβάνει το μήνυμα REPORT την καθολική ώρα T3. Ο χρόνος της round-trip καθυστέρησης μπορεί τώρα να υπολογιστεί από τον OLT από τη παρακάτω εξίσωση:

$$RTT = (T3 - T1) - (T2 - T1) = T3 - T2$$

Η round-trip καθυστέρηση λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της σχετικής απόστασης της ONU από τον OLT, και τον ορισμό του χρόνου έναρξης της εκρηκτικής ροής της ONU στο ρεύμα ανόδου.

Πολλές φορές ο χρόνος round-trip καθυστέρησης μπορεί να παρουσιάσει απόκλιση κατά τη διάρκεια επικοινωνίας μεταξύ ONU και OLT. Όταν αυτή η απόκλιση ξεπεράσει μια συγκεκριμένη προκαθορισμένη τιμή, τότε αυτή αποτυπώνεται και δηλώνεται σαν κατάσταση απόκλισης χρόνου round-trip καθυστέρησης. Η απόκλιση αυτή μπορεί να δηλωθεί είτε από τον OLT, είτε από την ONU, ανάλογα με το ποιο στοιχείο του δικτύου θα την εντοπίσει πρώτο.

4.4 10G-EPON

Το 2006 η IEEE δημιούργησε μια ομάδα εργασίας με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου προτύπου. Τελικώς, το 2009 εγκρίθηκε το πρότυπο 802.3av-2009 [12] για τα δίκτυα 10G-EPON. Όπως φανερώνεται και από την ονομασία αυτών των παθητικών οπτικών δικτύων, βασίζονται στο προϋπάρχον EPON και μπορούν να υποστηρίξουν ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 10Gbit/s για συμμετρική μετάδοση, και των 10Gbit/s - 1Gbit/s για ασύμμετρη μετάδοση. Τα νέα αυτά δίκτυα υιοθετούν τον μηχανισμό Forward Error Correction (FEC) για προστασία από λάθη στη μετάδοση, και συγκεκριμένα τον αλγόριθμό Reed-Solomon (255,223) για την μετάδοση στα 10Gbit/s και τον Reed-Solomon (255,239) για την μετάδοση στα 1Gbit/s. Σε σχέση με τα απλά EPON δίκτυα που εκπέμπουν στα 1490nm για το ρεύμα καθόδου, και 1310nm για το ρεύμα ανόδου, τα 10G-EPONs χρησιμοποιούν την περιοχή των 1260-1280nm για το ρεύμα καθόδου, και την περιοχή των 1575-1580nm για το ρεύμα ανόδου.

Τα 10G-EPONs αποτελούν απόγονο των EPONs και ο λόγος δημιουργίας τους είναι η αντικατάσταση των EPONs με σκοπό να ανταποκρίνονται στις αυξημένες ανάγκες των συνδρομητών όπως αυτές διαμορφώνονται με το πέρασμα τον χρόνων.

5.

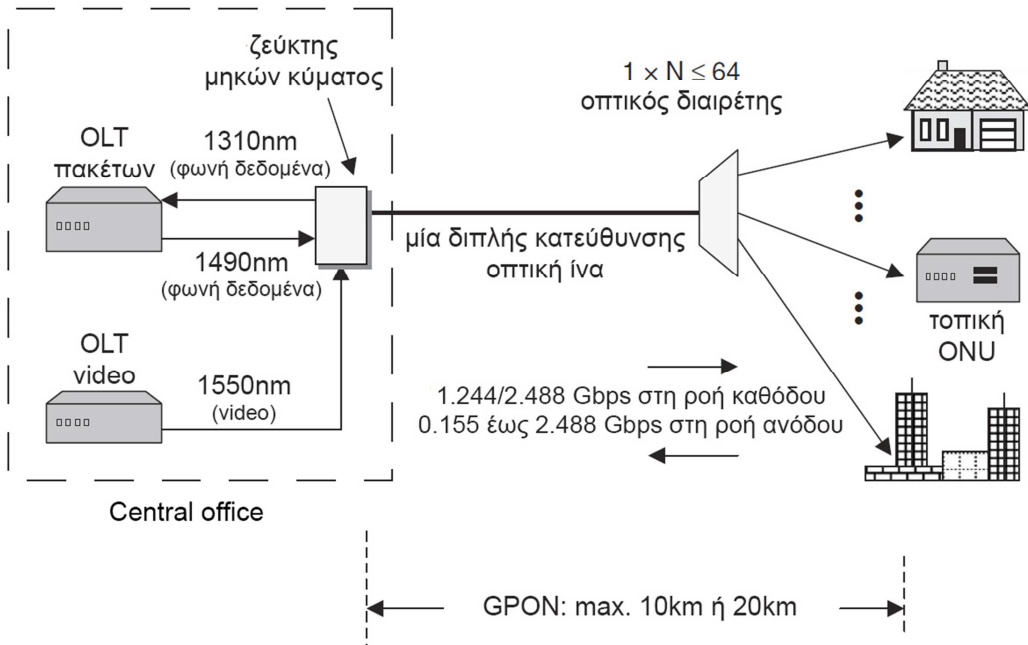
Gigabit PON (GPON)

5.1 Εισαγωγή

Το 2001 η FSAN (Full Service Access Network Group) στράφηκε στην σχεδίαση του GPON (Gigabit Passive Optical Network) με σκοπό την ανάπτυξη παθητικών οπτικών δικτύων με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερους του ενός gigabit. Δυο χρόνια αργότερα η ITU-T προχώρησε στην προτυποποίηση του πρωτοκόλλου GPON μέσω της σειράς συστάσεων G.984. Πολλά από τα χαρακτηριστικά προγενέστερων προτύπων διατηρήθηκαν και στο GPON ώστε να είναι συμβατό με τις τεχνολογίες που είχαν ήδη αναπτυχθεί. Εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, τα GPONs παρέχουν πλήρη υποστήριξη υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών φωνής, Ethernet, ATM, μισθωμένες γραμμές και επεκτάσεις χωρίς καλώδιο, αξιοποιώντας το στρώμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence Layer, GTC Layer), που αναπτύχθηκε βασισμένο στη μέθοδο Generic Framing Procedure (GFP) της ITU-T G.7041 [13].

5.2 Αρχιτεκτονική GPON

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο, η διάταξη ενός GPON δικτύου ακολουθεί τα χνάρια της κλασσικής μορφής ενός PON [3], όπως αυτό έχει περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Παράλληλα διατηρεί ένα μεγάλο αριθμό από λειτουργίες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε BPON και EPON δίκτυα, όπως για παράδειγμα, η δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης και η χρήση μηνυμάτων οργάνωσης, διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου.



Σχ.5.1 – αρχιτεκτονική και δομή λειτουργίας GPON

Ωστόσο, σε αντίθεση με την αρχιτεκτονική των BPON και EPON, τα οποία είχαν αναπτυχθεί από την οπτική σκοπιά των προμηθευτών εξοπλισμού, ο τρόπος λειτουργίας και σχεδίασης των GPON καθοδηγείται από τις ανάγκες του πελάτη. Αυτό αντικατοπτρίζεται στις απαιτούμενες προδιαγραφές των υπηρεσιών GPON, οι οποίες περιγράφονται στην σύσταση G984.1. Αυτή η σύσταση λαμβάνει υπόψη τις συλλογικές απαιτήσεις των κορυφαίων παρόχων υπηρεσιών επικοινωνίας στον κόσμο.

5.2.1 Προδιαγραφές GPON (GPON G.984.1)

Στο πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι σημαντικότερες των προδιαγραφών ενός GPON δικτύου [13]:

Παράμετροι	Προδιαγραφές
Υπηρεσίες	Full-service: π.χ. 10/100 BASE-T Ethernet, αναλογική τηλεφωνία, SONET/SDH TDM, ATM
Ρυθμός μετάδοσης	Ροή καθόδου: 1.244 και 2.448 Gbps Ροή ανόδου: 155 Mbps, 622 Mbps, 1.244 Gbps, 2.488 Gbps
Φυσική εμβέλεια	10 ή 20 km maximum
Λόγος διαχωρισμού	1:64 (μέγιστος αριθμός 64 ONUs)
Μήκη κύματος	Φωνή/δεδομένα ροής καθόδου: 1480nm με 1500nm Φωνή/δεδομένα ροής ανόδου: 1260nm με 1360nm Video ροής καθόδου: 1550nm με 1560nm

Σχ.5.2 – προδιαγραφές GPON

Πρώτα από όλα, ένα GPON θα πρέπει να είναι full-service δίκτυο. Κάτι που σημαίνει ότι θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει στους συνδρομητές του όλων των ειδών τις υπηρεσίες. Αυτό συμπεριλαμβάνει 10 και 100 Mbps Ethernet, αναλογική τηλεφωνία, συνδέσεις T1/E1 (δηλαδή 1.544 και 2.448 Mbps), ATM συνδέσεις των 155 Mbps, καθώς επίσης και υψηλού εύρους ζώνης μισθωμένες γραμμές.

Οι ονομαστικές τιμές ρυθμού μετάδοσης για το ρεύμα καθόδου είναι 1.25 Gbps και 2.5 Gbps, ενώ για το ρεύμα ανόδου οι τιμές είναι 155 Mbps, 622 Mbps, 1.25 Gbps και 2.5 Gbps. Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να είναι είτε συμμετρικοί (ίδιος ρυθμός μετάδοσης και για τα δύο ρεύματα), είτε ασύμμετροι, με τους υψηλότερους ρυθμούς να χρησιμοποιούνται στην κατεύθυνση από τον OLT προς τις ONUs.

Τα μήκη κύματος ορίζονται στην περιοχή των 1480nm με 1500nm για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων της ροή καθόδου, ενώ αντίστοιχα, για τη ροή ανόδου ορίζονται στην περιοχή των 1260nm με 1360nm. Επομένως οι μέσες τιμές των 1490nm και 1310nm είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα BPON και EPON δίκτυα. Επιπρόσθετα, η περιοχή των 1550nm με 1560nm χρησιμοποιείται για μετάδοση video στο ρεύμα καθόδου (broadcasting).

Ανάλογα με τις προδιαγραφές των οπτικών πομποδεκτών, η φυσική εμβέλεια ενός GPON δικτύου φθάνει maximum τα 10 ή 20 km. Παράλληλα, ο λόγος διαχωρισμού φτάνει το 1:64, εξυπηρετώντας έτσι μέγιστο αριθμό 64 ONUs.

Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω κωδικοποιημένης ροής NRZ (Non Return to Zero).

5.2.2 Μεταγωγές προστασίας του GPON

Το GPON υποστηρίζει μεταγωγές προστασίας με τη χρήση πλεοναζουσών οπτικών ινών [13]. Η διαδικασία των μεταγωγών προστασίας, είτε στον OLT, είτε στην ONU, ενεργοποιείται από τον εντοπισμό κατάστασης απώλειας σήματος (Loss of Signal, LOS) ή απώλειας πλαισίου (Loss of Frame, LOF). Οι μεταγωγές μπορούν να συμβαίνουν είτε αυτόματα, είτε χειροκίνητα από κάποιον αρμόδιο τεχνικό. Το πρωτόκολλο της διαδικασίας αυτής είναι πολύ πιο πολύπλοκο για point-to-multipoint συστήματα από ότι για point-to-point.

Υπάρχουν κυρίως δυο ειδών διαμορφώσεις μεταγωγών προστασίας στα PON δίκτυα:

- Τύπου B διαμόρφωση, στην οποία υπάρχουν πλεονάζουσες οπτικές ίνες μόνο στην διαδρομή από τον OLT μέχρι τον παθητικό διαιρέτη. Αυτή η διαμόρφωση κρατάει χαμηλά το κόστος υλοποίησης ενός τέτοιου δικτύου, αλλά προσφέρει προστασία μόνο στην πλευρά από τον παθητικό διαιρέτη προς τον OLT.
- Τύπου C διαμόρφωση, στην οποία υπάρχουν πλεονάζουσες οπτικές ίνες τόσο στην πλευρά του OLT, όσο και σε αυτήν των ONUs. Σε αυτή την διαμόρφωση είναι δυνατή η ανάκαμψη

από απώλειες σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Επομένως μπορεί το κόστος να είναι υψηλό, ωστόσο το δίκτυο διακρίνεται για την μέγιστη αξιοπιστία του.

Η τύπου B διαμόρφωση προστατεύει από απώλειες που οφείλονται στον OLT καθώς και στην ίνα που τον συνδέει με το παθητικό διαιρέτη. Σε αντίθεση, η τύπου C διαμόρφωση προστατεύει από απώλειες που οφείλονται στις ONUs και στις οπτικές ίνες του δικτύου. Παράλληλα στην τύπου C διαμόρφωση είναι δυνατόν να μεταφέρεται πρόσθετη κίνηση μέσω των οπτικών συνδέσεων που αποτελούν εναλλακτικούς δρόμους προστασίας.

Με τη χρήση και των δυο διαμορφώσεων, ο OLT καταφέρνει να προστατεύει το δίκτυο απέναντι σε απώλειες που εντοπίζονται τόσο από τον ίδιο, όσο και από τις ONUs. Να σημειωθεί ότι είναι δυνατή η παρουσία τόσο προστατευόμενων, όσο και απροστάτευτων ONUs στο ίδιο PON δίκτυο. Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν συστήματα όπου X αριθμός από προστατευόμενα PONs μπορούν να προστατεύουν N αριθμό από ενεργά PONs (αρχιτεκτονική $X:N$, με X αριθμός ανάμεσα στο 1 και στο N). Με την $X:N$ αρχιτεκτονική, οι ONUs σε ένα PON μπορούν επίσης να προστατεύονται χρησιμοποιώντας ως εναλλακτική διαδρομή μια σύνδεση στην ενεργή οπτική ίνα ενός άλλου PON.

Το GPON χρησιμοποιεί μια POPUP διεργασία για την εφαρμογή των μεταγωγών προστασίας. Η διεργασία POPUP επιτρέπει στο σύστημα να αποφύγει περιττές μεταγωγές στην προσπάθεια του να ανακτήσει τα απολεσθέντα δεδομένα. Όταν μια ONU εντοπίζει LOS ή LOF, μπαίνει σε μια κατάσταση POPUP και ενημερώνει τον OLT μέσα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, είτε ο OLT μεταγάγει όλους τις ONUs σε εφεδρικές διαδρομές οπτικών ινών, είτε η ONU μετάγεται από μόνη της σε εφεδρική διαδρομή προστασίας. Και οι δυο επιλογές περιλαμβάνουν την ανταλλαγή POPUP μηνυμάτων μεταξύ OLT και ONUs, ενώ αν είναι απαραίτητο οι ONUs ξαναπερνούν από διαδικασία ranging.

5.3 GPON G.984.2

Η σύσταση G.984.2 της ITU-T [16] περιγράφει τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές για το φυσικό στρώμα του GPON, το οποίο ισοδυναμεί με το αντίστοιχο φυσικό στρώμα του μοντέλου αναφοράς OSI. Οι προδιαγραφές συμπεριλαμβάνουν μετατροπές σήματος από ηλεκτρικό σε οπτικό, από οπτικό σε ηλεκτρικό, καθώς επίσης ανάκτηση χρόνου, και μηχανισμούς διόρθωσης λαθών.

5.3.1 Απόδοση οπτικής ισχύος

Κύριο μέλημα της G.984.2 ήταν να ορίσει λεπτομερώς την απόδοση των οπτικών πομποδεκτών στις αποστάσεις μετάδοσης των 10 και 20 km. Για υπολογισμούς κόστους ισχύος, το GPON

χρησιμοποιεί τις ίδιες κλάσεις οπτικών που έχουν οριστεί και στα BPON δίκτυα. Οι κλάσεις αυτές είναι οι εξής:

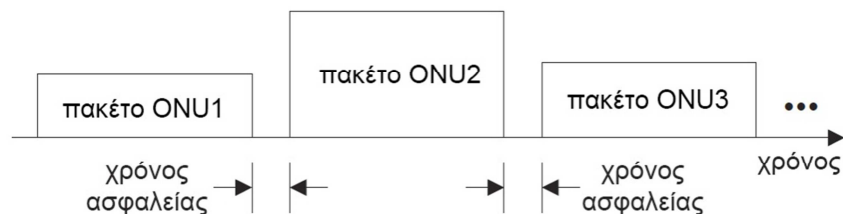
- Κλάση A: 5 έως 20 dB
- Κλάση B: 10 έως 25 dB
- Κλάση C: 15 έως 30 dB

Σε αυτές τις τιμές εξασθένησης σήματος εμπεριέχονται απώλειες που προκύπτουν από την οπτική ίνα, από συναρμογές, συνδέσμους, καθώς και οπτικούς διαχωρισμούς. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πιθανή εμφάνιση πρόσθετων υποβαθμίσεων σήματος, οι οποίες προκύπτουν από πρόσθετες συναρμογές, ή και πρόσθετα μήκη ινών, λόγω επισκευής οπτικών καλωδίων, επιδράσεις από περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς επίσης και απρόβλεπτες φθορές στη λειτουργία των παθητικών στοιχείων του δικτύου.

5.3.2 Συγχρονισμός και διαχείριση οπτικής ισχύος

Ένα σημαντικό σκέλος της G.984.2 αφορά στις προδιαγραφές των χρονικών παραμέτρων της μετάδοσης εκρηκτικής ροής (ισοδύναμα, της μετάδοσης της ONU προς τον OLT στο ρεύμα ανόδου). Αν και το GPON είναι ένα σύγχρονο δίκτυο στο οποίο ο OLT ενημερώνει τις ONUs για το πότε μπορούν να μεταδώσουν, αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει μια χρονική αβεβαιότητα. Παρόλο που αυτό συμβαίνει και στα BPON και EPON δίκτυα, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης (που αντιστοιχούν σε συντομότερους παλμούς στην μετάδοση εκρηκτικής ροής) μετατρέπουν αυτή την αβεβαιότητα σε πολύ κρίσιμη παράμετρο ενός GPON δικτύου.

Από τη στιγμή που η διαδικασία ranging έχει περιορισμένη ακρίβεια, ένας χρόνος ασφαλείας προστίθεται ανάμεσα σε διαδοχικές εκρηκτικές μεταδόσεις από ONUs με σκοπό να αποφευχθούν οι συγκρούσεις ανεξάρτητων πακέτων. Αυτός ο τρόπος διευθέτησης παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ.5.3 – προσθήκη χρόνου ασφαλείας ανάμεσα σε εκρηκτικές ροές

Ο χρόνος ασφαλείας εξαρτάται από παράγοντες όπως η καθυστέρηση του χρόνου ανοίγματος του laser της επόμενης μετάδοσης εκρηκτικής ροής, η καθυστέρηση του χρόνου κλεισίματος του laser και το απομένον ρεύμα ουράς της προηγούμενης εκρηκτικής ροής, που οφείλεται στους

χρόνους εκφόρτισης των στοιχείων του δέκτη στον OLT, και τη διασπορά στις τιμές του χρόνου ισοστάθμισης καθυστέρησης (Equalization Delay, EqD) της κάθε ONU.

Αν μια ONU βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τον OLT, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο αισθητήρας φωτός του OLT να ανιχνεύσει μια σχετικά μεγάλης οπτικής ισχύος δέσμη φωτός από την συγκεκριμένη ONU. Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του αισθητήρα φωτός του OLT, η σύσταση G984.2 επιτρέπει στον πομπό της ONU να ελέγχει την οπτική ισχύ του σήματός της, επιλέγοντας να εφαρμόσει πάνω του μια από τις τρεις διαθέσιμες λειτουργίες ισχύος. Στην λειτουργία 1, ο πομπός της ONU λειτουργεί στο κανονικό επίπεδο οπτικής ισχύος του. Στις λειτουργίες 2 και 3, η οπτική ισχύς περιορίζεται κατά 3 και 6 dB αντίστοιχα σε σχέση με την τιμή της στην λειτουργία 1. Έτσι, αν ο OLT λάβει ένα δυνατή ισχύος σήμα, μπορεί να δώσει εντολή στην ONU να ελαττώσει την ισχύ του σήματος της.

5.3.3 Forward Error Correction (FEC)

Η σύσταση G.984.2, στοχεύοντας στη συγκράτηση του κόστους των οπτικών πομποδεκτών σε χαμηλά επίπεδα, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων, ορίζει την χρήση της τεχνικής ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών Forward Error Correction (FEC). Η χρησιμοποίηση της FEC στα GPON δίκτυα είναι απαραίτητη εξαιτίας των υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων που μειώνουν την οπτική ισχύ του σήματος με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω της μείωσης της ευαισθησίας του δέκτη λόγω των υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η χρησιμοποίηση ευρύτερου bandwidth προσθέτει περισσότερο θόρυβο στον δέκτη. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω της χρωματικής διασποράς, η οποία αυξάνεται ανάλογα με τους ρυθμούς μετάδοσης, και επηρεάζει αρνητικά την ισχύ του οπτικού σήματος. Έτσι, με την χρησιμοποίηση της FEC επιτυγχάνεται η διατήρηση 3 έως 6 dB παραπάνω ισχύος.

Η FEC είναι μια τεχνική μαθηματικής επεξεργασίας σήματος που κωδικοποιεί τα δεδομένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εντοπίζει και να διορθώνει λάθη στη μετάδοση. Αυτό που συμβαίνει με την χρησιμοποίηση της FEC είναι ότι μεταδίδονται επιπλέον πληροφορίες παράλληλα με τα προς μετάδοση δεδομένα. Αν κάποια από αυτά τα δεδομένα χαθούν στην πορεία, ή φθάσουν με λάθη στον προορισμό τους, οι επιπρόσθετες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να επανασυναρμολογηθούν τα δεδομένα που μεταδόθηκαν. Συνήθως το μέγεθος των επιπλέον πληροφοριών είναι μικρό, οπότε η χρήση FEC κωδικών δεν δεσμεύει μεγάλο μέρος του διαθέσιμου bandwidth.

Οι πιο γνωστοί κώδικες διόρθωσης λαθών είναι οι κυκλικοί κώδικες. Αυτοί χαρακτηρίζονται από τη χρήση των συμβόλων (n,m) , όπου το n ισοδυναμεί με τον αριθμό που προκύπτει από την άθροιση των m bits των δεδομένων προς αποστολή με τα bits των επιπλέον πληροφοριών που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του κώδικα. Παρόλο που με τη πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι κυκλικών κωδικών, οι Reed-Solomon (RS) FEC κώδικες είναι από αυτούς που

ταιριάζουν καλύτερα στα οπτικά σήματα. Έχουν μικρού μήκους επικεφαλίδα, μεγάλο κέρδος κωδικοποίησης, ενώ μπορούν να διορθώσουν λάθη σε μεταδόσεις εκρηκτικού ροής (bursts). Ο κώδικας RS (255,239) χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Αυτό ο κώδικας μετατρέπει 239 bits δεδομένων σε 255 bits προς μετάδοση, προσθέτοντας έτσι ένα 7% σε επικεφαλίδα.

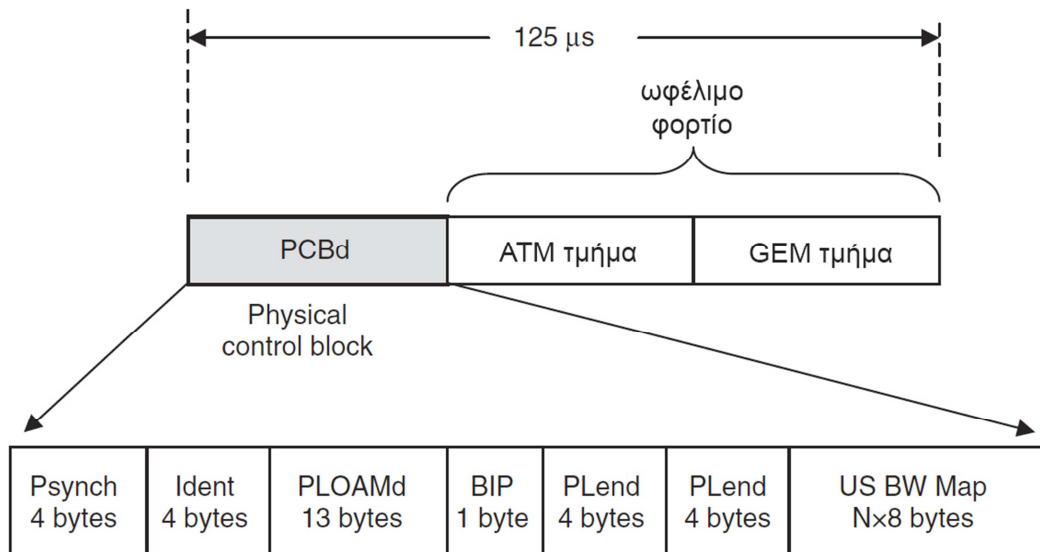
5.4. Στρώμα σύγκλισης μετάδοσης GPON (GPON G.984.3)

Η σύσταση G.984.3 της ITU-T περιγράφει το στρώμα σύγκλισης μετάδοσης του GPON (GPON Transmission Convergence layer, GTC layer) [17], το οποίο ισοδυναμεί με το στρώμα 2 (στρώμα ζεύξης δεδομένων) του μοντέλου αναφοράς OSI. Προσδιορίζει την δομή του πλαισίου ενός GPON δικτύου, το πρωτόκολλο MAC (Media Access Control protocol), τον μηχανισμό ranging, τις λειτουργίες διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου, και την μέθοδο κρυπτογράφησης των πληροφοριών που μεταδίδονται.

5.4.1 Πλαίσιο GPON ρεύματος καθόδου

Για να μπορούν στο πλαίσιο μεταφοράς ενός GPON δικτύου να φιλοξενοούνται, με αποδοτικό τρόπο, όλοι οι τύποι υπηρεσιών (π.χ. ATM, TDM, Ethernet), είναι απαραίτητη η χρήση της μεθόδου ενθυλάκωσης GPON Encapsulation Method (GEM). Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε μια παραλλαγή της μεθόδου Generic Framing Procedure της σύστασης G.7041 της ITU-T, η οποία παρέχει τις προδιαγραφές για την αποστολή πακέτων IP σε δίκτυα SONET ή SDH.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η δομή ενός πλαισίου GPON, το οποίο έχει σταθερή διάρκεια 125μs. Το πλαίσιο αποτελείται από ένα πεδίο PCB (Physical Control Block) και ένα πεδίο payload (ωφέλιμο φορτίο), το οποίο περιλαμβάνει ένα κομμάτι αμιγώς ATM δεδομένων και ένα κομμάτι GEM δεδομένων.



Σχ.5.4 – πλαίσιο GPON ροής καθόδου

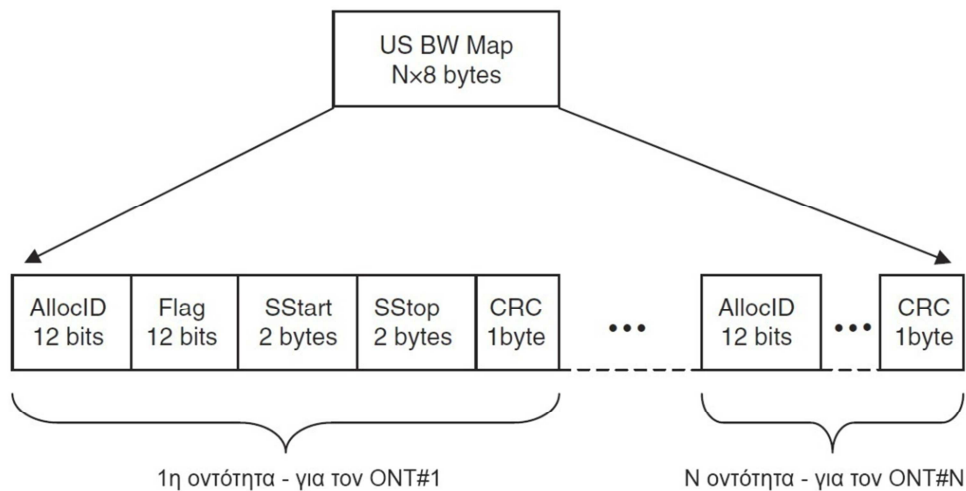
Ο τομέας του PCB μεταφέρει πληροφορίες επικεφαλίδας φυσικού στρώματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την διαχείριση του δικτύου.

Για τη κατεύθυνση της ροής καθόδου, το πεδίο PCB περιέχει τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Ένα μήκους 4 bytes **πεδίο συγχρονισμού πλαισίου (Psync)**.
- Ένα μήκους 4 bytes πεδίο **Ident**, το οποίο περιέχει έναν μετρητή των 8 kHz, ένα bit κατάστασης της FEC για τη ροή καθόδου, ένα bit μετάβασης του κλειδιού κρυπτογράφησης, και 8 bits κατάστασης δεσμευμένα για περαιτέρω χρήση.
- Ένα μήκους 13 bytes πεδίο με ονομασία **Physical Layer OAM (PLOAM)**, το οποίο χειρίζεται λειτουργίες όπως ειδοποιήσεις σχετικές με OAM.
- Ένα 1-byte πεδίο **Bit Interleaved Parity (BIP)**, το οποίο περιέχει την ισότητα των διαστρωμένων bits όλων των bytes που έχουν μεταδοθεί από την στιγμή που μεταδόθηκε το προηγούμενο πεδίο BIP χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η ισότητα του FEC πεδίου (εφόσον αυτό υπάρχει).
- Ένα μήκους 4 bytes πεδίο με ονομασία **Payload Length Indicator (PLend)**, το οποίο περιέχει το μήκος του πεδίου χαρτογράφησης εύρους ζώνης του ρεύματος ανόδου και το μήκος του τμήματος ATM. Το περιεχόμενο του πεδίου αυτού αποστέλλεται δύο φορές για επιβεβαίωση. Η ONU επιλέγει την εκπομπή με τα λιγότερα λάθη.
- Ένα N x 8-byte **πεδίο χαρτογράφησης εύρους ζώνης του ρεύματος ανόδου (US BW map)**, το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάθεση N χρονοθυρίδων εκπομπής προς τις ONUs.

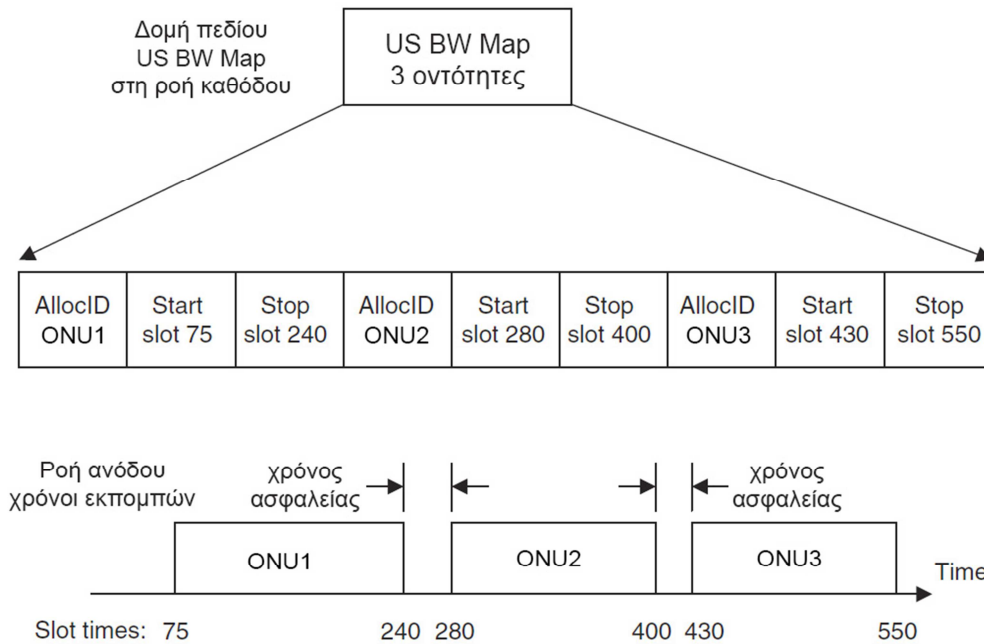
Το US BW map πεδίο περιέχει N οντότητες συνυφασμένες με N χρονοθυρίδες προορισμένες για τις ONUs. Κάθε 8-byte πεδίο αποτελείται από τα εξής υποπεδία:

- Ένα 12-bit πεδίο με ονομασία **Allocation Identifier (AllocID)**, το οποίο ανατίθεται σε κάθε ONU.
- 12 bits σημαίες που επιτρέπουν την μετάδοση διαφόρων μπλοκ επικεφαλίδας φυσικού στρώματος στη ροή ανόδου για κάποια καθορισμένη ONU.
- Ένα 2-byte πεδίο **Start Pointer (SStart)**, το οποίο καθορίζει τον χρόνο έναρξης του παραθύρου μέσα στο οποίο επιτρέπεται η μετάδοση στο ρεύμα ανόδου. Ο χρόνος αυτός μετράται σε bytes.
- Ένα 2-byte πεδίο **Stop Pointer (SStop)**, το οποίο δηλώνει τη χρονική στιγμή που κλείνει το παράθυρο μέσα στο οποίο επιτρέπεται η μετάδοση στο ρεύμα ανόδου.
- Ένα 1-byte πεδίο **CRC** το οποίο παρέχει τη δυνατότητα για εντοπισμό μέχρι 2 bits λάθους στο US BW Map, καθώς επίσης και τη διόρθωση ενός bit λάθους.



Σχ.5.5 – δομή πεδίου US BW Map

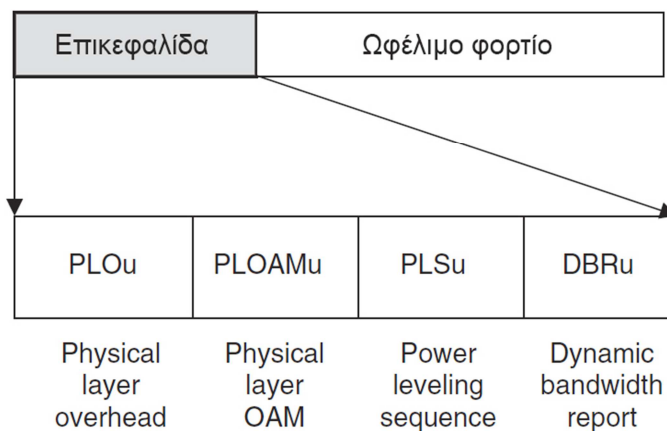
Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κατανομής χρονοθυρίδων για τρεις διαφορετικές ONUs. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα περιέχονται τρεις οντότητες στο US BW Map. Παράλληλα απεικονίζεται και η ροή ανόδου που περιέχει τις εκπομπές των ONUs, μαζί με τους απαραίτητους χρόνους ασφαλείας.



Σχ.5.6 – συσχετισμός US BW Map με κατανομή χρονοθυρίδων στη ροή ανόδου

5.4.2 Πλαίσιο GPON ρεύματος ανόδου

Η κίνηση του ρεύματος ανόδου ενός GPON δικτύου αφορά στην συνεχόμενη μετάδοση πληροφοριών από μια ή περισσότερες ONUs. Η σειρά με την οποία τα πλαίσια φτάνουν στον OLT βασίζεται στην κατανομή χρονοθυρίδων όπως αυτή έχει απονεμηθεί από τον OLT. Για να είναι επιτυχής η λήψη πλαισίων εκρηκτικής ροής, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μια επικεφαλίδας, συγκεκριμένου μεγέθους, στην αρχή της κάθε εκρηκτικής ροής. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η δομή ενός πλαισίου του ρεύματος ανόδου, το οποίο αποτελείται από έως τέσσερις τύπους πεδίων επικεφαλίδας, και ένα μεταβλητού μεγέθους πεδίο ωφέλιμου φορτίου, το οποίο περιέχει την εκρηκτική ροή.



Σχ.5.7 – πλαίσιο GPON ροής ανόδου

Η επικεφαλίδα του πλαισίου αποτελείται από τα εξής πεδία:

- Το πεδίο Physical Layer Overhead (PLO) στην έναρξη της εκρηκτικής ροής περιέχει το προοίμιο, το οποίο διασφαλίζει την σωστή λειτουργία του φυσικού στρώματος.
- Το πεδίο Physical Layer Operation, Administration, and Management (PLOAM) είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση μηχανισμών όπως το ranging, η ενεργοποίηση των ONUs, και οι ειδοποιήσεις OAM. Αυτό το μήκους 13 bytes πεδίο περιέχει τα μηνύματα PLOAM, όπως αυτά περιγράφονται στη σύσταση G.983.1, και προστατεύεται από λάθη σε bits μέσω ενός CRC ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα στάνταρντ πολυώνυμο εντοπισμού και διόρθωσης λαθών.
- Το πεδίο Power Leveling Sequence (PLS) περιέχει πληροφορίες για το ύψος της ισχύος των lasers των ONUs όπως αυτό το αντιλαμβάνεται ο OLT. Με τις πληροφορίες αυτές, ο OLT μπορεί να χρησιμοποιεί το πεδίο PLS για να ρυθμίσει το ύψος της ισχύος των lasers.
- Το πεδίο Dynamic Bandwidth Report (DBR) ενημερώνει τον OLT για το μήκος των ουρών αναμονής του κάθε AllocID σε μια ONU. Αυτό επιτρέπει στον OLT να κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης με τον καλύτερο τρόπο. Το DBR πεδίο προστατεύεται από λάθη σε bits με τη χρήση ενός CRC ελέγχου.

Η μετάδοση των PLOAM, PLS, DBR πεδίων είναι προαιρετική, ανάλογα με την τιμή των σηματοφόρων του ρεύματος καθόδου στο πεδίο US BW Map.

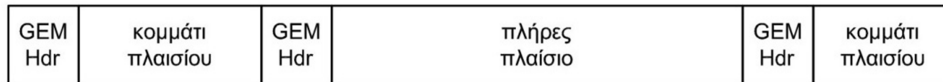
Το payload του ρεύματος ανόδου ακολουθεί τα πεδία της PLO. Το payload αποτελείται από δεδομένα στα οποία έχουν ανατεθεί χρονικές θυρίδες, για την δρομολόγηση τους, από τον OLT στο πεδίο US BW Map του ρεύματος καθόδου. Οι αναθέσεις στο πεδίο US BW Map γίνονται για κάθε ένα Alloc-ID. Οπότε σε μια συγκεκριμένη ONU μπορεί να έχουν δοθεί πολλαπλές κατανομές εύρους ζώνης μέσα στο ίδιο πλαίσιο ρεύματος ανόδου. Οι κατανομές αυτές μπορούν να στέλνονται μέσα στην ίδια εκρηκτική ροή, ώστε να αποφευχθεί η επανάληψη της PLO ανάμεσα στις κατανομές. Σε αυτές τις περιπτώσεις αρκεί η μετάδοση της PLO μόνο μια φορά, στην έναρξη της εκρηκτικής ροής. Το πεδίο US BW Map από τον OLT αναθέτει συνεχόμενες κατανομές θέτοντας τον χρόνο τερματισμού της μιας κατά μια μονάδα μικρότερο από τον χρόνο έναρξης της επόμενης. Παρόλα αυτά η αποστολή πολλαπλών κατανομών εύρους ζώνης προσθέτει πολυπλοκότητα στο πλαίσιο της ροής ανόδου.

Η περιοχή payload του ρεύματος ανόδου μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή από τις τρεις που περιγράφονται στο επόμενο σχεδιάγραμμα:

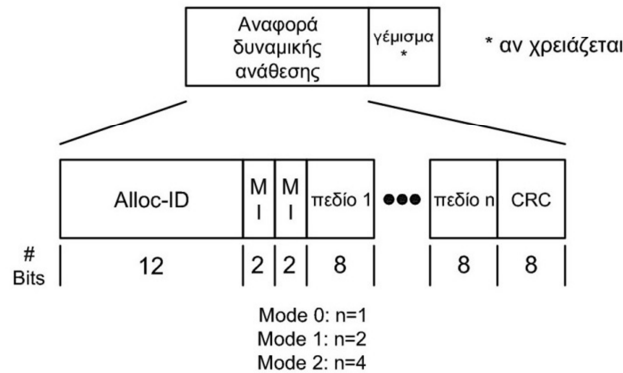
(α) Παράδειγμα payload ρεύματος ανόδου με κελιά ATM



(β) Παράδειγμα payload ρεύματος ανόδου με πλαίσια GEM



(γ) Παράδειγμα ολόκληρου μηνύματος αναφοράς δυναμικής ανάθεσης μιας ONU



Σχ.5.8 – μορφές payload πεδίου της ροής ανόδου

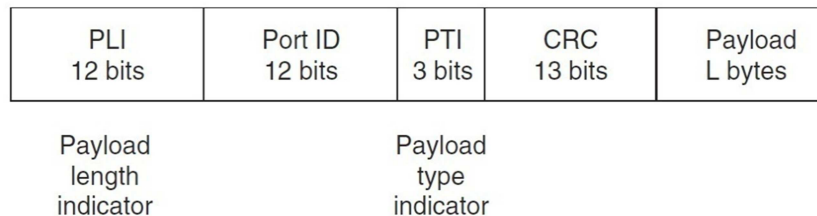
Στο (α) η περιοχή payload αποτελείται από ATM κελιά, στο (β) αποτελείται από πλαίσια GEM, ενώ στο (γ) παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός ολόκληρου μηνύματος αναφοράς δυναμικής ανάθεσης μιας ONU (ONU DBA report message). Στο (β) το payload ξεκινά με το τελευταίο κομμάτι ενός τεμαχισμένου πλαισίου GEM, ακολουθούμενο από ένα πλαίσιο GEM που ενθυλακώνει πλήρως ένα πλαίσιο ωφέλιμης πληροφορίας και τελειώνει με το πρώτο κομμάτι ενός νέου τεμαχισμένου πλαισίου GEM. Αφού κάθε μία ONU μπορεί να λάβει αναθέσεις εύρους ζώνης για πολλαπλά Alloc-IDs, είναι δυνατόν η εκρηκτική ροή του ρεύματος ανόδου μιας ONU να περιέχει συνδυασμό από ATM και GEM δεδομένα.

5.4.3 Τμήμα GEM

Η μέθοδος ενθυλάκωσης του GPON λειτουργεί παρόμοια με την ATM μέθοδο. Η διαφορά έγκειται στο μεταβλητό μήκος των πλαισίων σε αντίθεση με το σταθερό μήκος των κελιών ATM. Έτσι, η GEM μέθοδος προσφέρει ένα γενικό μέσο για την αποστολή διαφόρων υπηρεσιών πάνω σε ένα GPON δίκτυο. Το μήκος του ενθυλακωμένου ωφέλιμου φορτίου μπορεί να φτάνει τα 1500

bytes. Αν μια ONU έχει ένα πακέτο προς αποστολή, το οποίο είναι μεγαλύτερο από 1500 bytes, τότε θα πρέπει να το κατακερματίσει σε μικρότερα κομμάτια ώστε να είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια. Τα κομμάτια αυτά επανασυναρμολογούνται στην αρχική τους μορφή όταν φτάσουν στον προορισμό τους.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η δομή του τμήματος GEM, η οποία αποτελείται από τέσσερα πεδία επικεφαλίδας και ένα πεδίο ωφέλιμου φορτίου μήκους L bytes.



Σχ.5.9 – δομή τμήματος GEM

Τα πεδία επικεφαλίδας είναι τα εξής:

- Το 12-bit πεδίο Payload Length Indicator (PLI), το οποίο μεταφέρει το μήκος σε bytes του ενθυλακωμένου ωφέλιμου φορτίου.
- Το 12-bit πεδίο Port Identification Number, το οποίο ενημερώνει σε ποια ροή κίνησης ανήκει το ενθυλακωμένο κομμάτι.
- Το 3-bit πεδίο Payload Type Indicator (PTI), το οποίο διευκρινίζει αν το κομμάτι αυτό είναι το τελευταίο μιας ροής κίνησης ενός χρήστη, αν η ροή κίνησης είναι κορεσμένη, ή αν το ωφέλιμο φορτίο περιέχει OAM πληροφορίες.
- Το 13-bit πεδίο Cyclic Redundancy Check (CRC) για έλεγχο λαθών στην επικεφαλίδα, το οποίο επιτρέπει την διόρθωση δύο εσφαλμένων bits και την ανίχνευση τριών λαθών σε bits επικεφαλίδας.

Να σημειωθεί ότι πριν την εκπομπή ενός GEM πλαισίου, εφαρμόζεται πάνω στην επικεφαλίδα του η συνάρτηση του αποκλειστικού OR με δεύτερο όρισμα το μοτίβο 0x0XB6AB31E055.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου GEM είναι ότι παρέχει ένα αποδοτικό τρόπο για την ενθυλάκωση και τον κατακερματισμό των πακέτων πληροφορίας των χρηστών του δικτύου. Ο λόγος για την χρήση της ενθυλάκωσης στα GPON δίκτυα είναι ότι επιτρέπει την σωστή διαχείριση των πολλαπλών ροών κίνησης από διαφορετικές ONUs που μοιράζονται μία κοινή οπτική σύνδεση. Ο σκοπός του κατακερματισμού είναι η αποτελεσματική αποστολή των πακέτων ενός χρήστη, ανεξάρτητα από το μέγεθος τους, καθώς επίσης και επιτυχής ανάκτηση των πακέτων αυτών, από τα παράθυρα μετάδοσης του φυσικού στρώματος του GPON, στην αρχική μορφή τους.

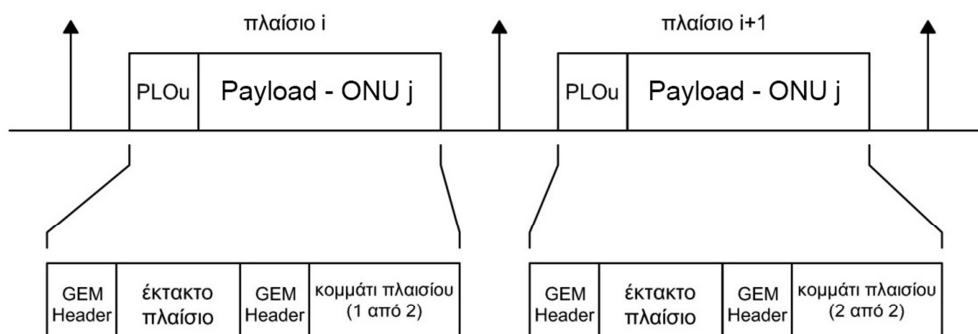
5.4.4 Ανενεργά πλαίσια GEM

Υπάρχουν περιπτώσεις που η ONU ή ο OLT δεν έχουν δεδομένα προς αποστολή κατά τη διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ανεκμετάλλευτο εύρος ζώνης γεμίζεται με ανενεργά GEM πλαίσια. Ένα ανενεργό GEM πλαίσιο έχει μηδενικό μήκος payload, ενώ η επικεφαλίδα του απαρτίζεται μόνο από μηδενικά bits. Αφού στην επικεφαλίδα εφαρμόζεται η συνάρτηση αποκλειστικού OR με το μοτίβο 0x0xB6AB31E055, αυτή είναι και η τιμή των επικεφαλίδων των μεταδιδόμενων ανενεργών πλαισίων GEM.

Είναι πιθανόν στο τέλος ενός τομέα, ή του payload, να υπάρχει διαθέσιμο bandwidth που να θέλει γέμισμα με ανενεργά bits, αλλά το μήκος του να είναι μικρότερο από τα 5 bytes ενός ανενεργού πλαισίου GEM. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μεταδίδεται ένα μέρος από το ανενεργό πλαίσιο το οποίο χωράει στα διαθέσιμα bytes. Ο δέκτης μπορεί να αναγνωρίσει την επικεφαλίδα του ανενεργού κομματιού και να το απορρίψει. Αφού κάθε κομμάτι πληροφορίας ή payload ξεκινά με επικεφαλίδα GEM, η οριοθέτηση των πλαισίων GEM θα κλονιστεί μόνο για λίγο και θα επανέλθει αμέσως στο ξεκίνημα του επόμενου τομέα ή ωφέλιμου φορτίου.

5.4.5 Κατακερματισμός (Fragmentation)

Προκειμένου να εξυπηρετηθεί κίνηση από πολλαπλές ONUs είναι συνήθως προτιμότερο να κατακερματιστεί ένα πλαίσιο Ethernet σε μικρότερα. Κατακερματίζοντας ένα μεγάλο πακέτο δεδομένων σε μικρότερα μας επιτρέπεται η αποστολή ενός έκτακτου πλαισίου κατά τη διάρκεια μετάδοσης του μεγαλύτερου, μικρότερης προτεραιότητας, πλαισίου. Επιπρόσθετα, αφού το 12-bit PLI επιτρέπει μήκος payload μέχρι 4096 bytes, ο κατακερματισμός είναι απαραίτητος για μεγαλύτερου μεγέθους πλαίσια, όπως τα 9600-byte «jumbo» Ethernet πλαίσια. Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, τα κομμάτια στέλνονται μέσα σε μικρότερα GEM πλαίσια κατά μήκος πολλαπλών πλαισίων GTC. Παρόλο που αυτού του είδους ο κατακερματισμός μπορεί να πραγματοποιείται και στα δυο ρεύματα μεταφοράς, χρησιμοποιείται κυρίως για αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του ρεύματος ανόδου.



Σχ.5.10 – παράδειγμα κατακερματισμού για τη ροή ανόδου

Κάθε GEM payload πρέπει να ξεκινά με μια επικεφαλίδα GEM. Πιο συγκεκριμένα, ένα κατακερματισμένο πλαίσιο δεν επιτρέπεται να κινείται κατά μήκος GTC πλαισίων χωρίς επικεφαλίδα GEM στην αρχή κάθε payload. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, τα πρώτα και τα ενδιάμεσα κομμάτια (αν υπάρχουν) μεταδίδονται με τη χρήση ενός PTI κωδικού που δηλώνει ότι το GEM πλαίσιο δεν περιέχει το τέλος των πλαισίου δεδομένων του πελάτη. Το δίκτυο PON παραδίδει τα κομμάτια με τη σειρά που αυτά μεταδόθηκαν. Ο OLT θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τα PTI, Alloc-ID και Port-ID για την επανασυναρμολόγηση του πλαισίου δεδομένων του πελάτη. Κάθε Alloc-ID μπορεί να έχει μέχρι δύο ανοιχτά κομμάτια.

Τα περισσότερα υψηλής προτεραιότητας πραγματικού χρόνου δεδομένα δεν χρειάζεται να σταλούν πιο συχνά από κάθε 125μs. Έτσι λοιπόν αυτό επιτρέπει την απλοποίηση της διαδικασίας εισόδου έκτακτων δεδομένων πραγματικού χρόνου. Από το να εισάγονται στην μέση μια μετάδοσης του ρεύματος ανόδου, μπορούν πάντα να στέλνονται στο ξεκίνημα κάθε payload, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Τυπικά, ωστόσο, η TDM κίνηση έχει δικό της Alloc-ID και μεταδίδεται σε ξεχωριστές μεταδόσεις εκρηκτικής ροής.

5.4.6 Ασφάλεια πληροφοριών σε ένα GPON δίκτυο

Όπως συμβαίνει και σε άλλης μορφής παθητικά δίκτυα, η κίνηση της ροής καθόδου μεταδίδεται από τον OLT προς τις ONUs με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε μήνυμα να μπορεί να ληφθεί από όλες τις ONUs του GPON. Έτσι, το GPON πρότυπο περιγράφει τη χρήση ενός μηχανισμού ασφαλείας για να διαφυλάξει ότι όλοι οι χρήστες επιτρέπεται να έχουν πρόσβαση μόνο στα δεδομένα που προορίζονται για αυτούς. Επιπλέον, ένας τέτοιος μηχανισμός διασφαλίζει ότι δεν είναι πιθανή η απειλή από κακόβουλες υποκλοπές. Ένα παράδειγμα ενός σημείο προς σημείο μηχανισμού κρυπτογράφησης είναι το Advanced Encryption Standard (AES), το οποίο χρησιμοποιείται για να προστατεύει τις πληροφορίες που περιέχονται στο πεδίο του ωφέλιμου φορτίου ενός πλαισίου GPON. Η κρυπτογράφηση είναι μια μέθοδος στην οποία τα δεδομένα μετατρέπονται σε μια ασαφή μορφή, στο σημείο εκκίνησης της αποστολής τους, για να προστατευθούν από μη εξουσιοδοτημένη ανάγνωση, τροποποίηση, χρήση, ή καταστροφή καθώς αυτά ταξιδεύουν στο δίκτυο.

Ο αλγόριθμος AES κρυπτογραφεί και αποκρυπτογραφεί μπλοκ δεδομένων μήκους 128 bits το καθένα. Τα κλειδιά αποκρυπτογράφησης των δεδομένων έχουν μήκη 128, 192, ή 256 bits, γεγονός που κάνει την κρυπτογράφηση εξαιρετικά δύσκολο να ξεπεραστεί. Ένα τέτοιο κλειδί μπορεί να αλλάζει περιοδικά (π.χ. κάθε ώρα), χωρίς αυτό να επηρεάζει τη ροή της κίνησης στο δίκτυο.

5.4.7 Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA)

Η πιο βασική μέθοδος ανάθεσης στη ροή ανόδου είναι η ισομερής διάθεση του εύρους ζώνης σε όλες τις ONUs. Αυτή η μέθοδος δεν είναι καθόλου αποδοτική, ειδικά στη μετάδοση πακέτων, αφού οι ανάγκες για bandwidth από τις ONUs σπάνια είναι οι ίδιες για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Σημαντική αξιοποίηση του εύρους ζώνης μπορεί να γίνει αν η ανάθεση στη ροή ανόδου γίνεται δυναμικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε ONU. Αν και η ITU-T δεν διευκρινίζει κάποιον συγκεκριμένο αλγόριθμο δυναμικής ανάθεσης, ωστόσο στην G983.4 ορίζει το πλαίσιο και τον μηχανισμό για την ενσωμάτωση δυναμικής ανάθεσης στα BPON και GPON δίκτυα. Συγκεκριμένα η G983.4 ορίζει δυο διαφορετικούς μηχανισμούς DBA.

Στη πρώτη μέθοδο, οι ONUs έχουν έναν παθητικό ρόλο. Ο OLT είναι αυτός που παρακολουθεί πόσο bandwidth χρησιμοποιεί η κάθε ONU, βασιζόμενος πάνω στον αριθμό των ανενεργών κελιών ATM ή πλαισίων GEM που λαμβάνει στα πλαίσια GTC του ρεύματος ανόδου. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή αναφέρεται και ως «καθορισμός με βάση τα ανενεργά κελιά». Μια άλλη ονομασία της μεθόδου αυτής είναι η «στρατηγική μη αναφοράς κατάστασης». Σε μια ONU δίδεται περισσότερο bandwidth όταν η αξιοποίηση του εύρους ζώνης της ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Τα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επικεντρώνεται στην απλότητα και αποφεύγει τη χρησιμοποίηση εύρους ζώνης της ροής ανόδου για αναφορά αναγκών σε bandwidth από τις ONUs. Ωστόσο, το μειονέκτημα της είναι η αργή ανταπόκριση από τον OLT στις ανάγκες bandwidth των ONUs.

Στη δεύτερη μέθοδο, οι ONUs αναφέρουν την κατάσταση του buffer τους στον OLT. Γι' αυτό το λόγο η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως «αναφορά κατάστασης buffer» ή «στρατηγική αναφοράς κατάστασης». Μια άμεση έκκληση για bandwidth σε έναν τύπο T-CONT αποστέλλεται μέσω του πεδίου Indicator της PLOu. Η πιο λεπτομερής αναφορά για την κατάσταση του buffer για κάθε ένα T-CONT μεταφέρεται μέσω του πεδίου DBRu. Ο OLT χρησιμοποιεί όλες αυτές τις πληροφορίες για να καθορίσει πιο είναι το κατάλληλο εύρος ζώνης για το κάθε Alloc-ID.

Να σημειωθεί πως ο κάθε OLT μπορεί να χρησιμοποιεί παράλληλα και τους δυο μηχανισμούς δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης.

Η DBA μπορεί να χειρίζεται πολλαπλά Alloc-IDs για μια ONU, με το κάθε Alloc-ID να λειτουργεί ξεχωριστά. Οι τύποι T-CONT χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των εγκρίσεων bandwidth για το κάθε Alloc-ID.

Η σειρά προτεραιότητας για τους τύπους bandwidth, από την υψηλότερη στη χαμηλότερη προτεραιότητα, είναι (α) το σταθερό bandwidth, (β) το εγγυημένο bandwidth, (γ) το μη εγγυημένο bandwidth και (δ) το μέγιστο διαθέσιμο bandwidth. Οι πρώτοι δυο τύποι είναι τύποι εγγυημένου εύρους ζώνης, ενώ οι δυο τελευταίοι αναφέρονται και ως τύποι «επιπλέον εύρους ζώνης». Το «πλεονάζον εύρος ζώνης» είναι ίσο με το «επιπλέον εύρος ζώνης» μείον το εύρος ζώνης που

κρατείται για άλλες χρήσεις, όπως αυτές της οργάνωσης, διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου. Διαθέσιμο για τη δυναμική ανάθεση είναι φυσικά το «πλεονάζον εύρος ζώνης».

5.4.8 Μετάδοση μηνυμάτων οργάνωσης, διαχείρισης και συντήρησης (OAM)

Το GPON έχει τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς για την επικοινωνία OAM πληροφοριών. Τα ενσωματωμένα OAM κανάλια, καθώς και τα πεδία PLOAM αποστέλλονται σαν ένα μέρος των πλαισίων και των δυο κατευθύνσεων. Τα ενσωματωμένα OAM κανάλια είναι πεδία δεδομένων πραγματικού χρόνου που μεταδίδουν πληροφορίες όπως λάθη στη μετάδοση bits, αναφορές RDI και αναφορές της DBA κατάστασης.

Τα πεδία PLOAM παρέχουν έναν αποδοτικό μηχανισμό για τη μετάδοση πρόσθετων OAM πληροφοριών. Ένα PLOAM πεδίο έχει μήκος 13 bytes, συμπεριλαμβανομένων των ενός byte για το ONU-ID, ενός byte για το Message-ID, δέκα bytes για τα OAM δεδομένα, και ένα byte για τον έλεγχο λαθών CRC-8. Για καλύτερη αξιοποίηση του bandwidth, τα PLOAM μηνύματα της ροής ανόδου αποστέλλονται μόνον όταν τα ζητήσει ο OLT. Συγκεκριμένα, ένας από τους σηματοφόρους, μήκους 1 bit, της επικεφαλίδας φυσικού στρώματος της ροής ανόδου (PLOu) επιτρέπει στην ONU να ενημερώσει τον OLT ότι υπάρχει ένα OAM μήνυμα που αναμένει για αποστολή.

Ο τρίτος OAM μηχανισμός είναι η χρησιμοποίηση των OAM ATM κελιών, όπως ορίζεται από την ITU-T I.610. Παρόμοια, τα OAM GEM πλαίσια είναι ανάλογα με τα OAM ATM κελιά και επίσης χρησιμοποιούν 48-byte I.610 μηνύματα.

5.5 10G-PON

Το 2010, η ITU-T, μέσω της σειράς συστάσεων G.987 [18], πρότεινε τη δημιουργία ενός εξελιγμένου GPON δικτύου, το οποίο μπορεί να λειτουργεί σε ρυθμούς μετάδοσης της τάξεως των 10Gbit/s. Το δίκτυο αυτό φέρει την ονομασία 10G-PON. Πιο συγκεκριμένα, για την ασύμμετρη μετάδοση, το δίκτυο (με την ειδική ονομασία XG-PON1) λειτουργεί σε ρυθμούς 10Gbit/s για τη ροή καθόδου και 2.5Gbit/s για τη ροή ανόδου. Παρόμοια, για την συμμετρική μετάδοση, το δίκτυο αυτό (με την ειδική ονομασία XG-PON2) λειτουργεί σε ρυθμό 10Gbit/s και για τα δύο ρεύματα. Στη περίπτωση της συμμετρικής μετάδοσης ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί ότι οι ONUs εξοπλίζονται με πιο ακριβά lasers μετάδοσης εκρηκτικής ροής, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις σε bandwidth της ροής ανόδου. Σε σχέση με τα απλά GPON δίκτυα που εκπέμπουν στα 1490nm για το ρεύμα καθόδου, και 1310nm για το ρεύμα ανόδου, τα 10G-PONs χρησιμοποιούν την περιοχή των 1260-1280nm για το ρεύμα καθόδου, και την περιοχή των 1575-1580nm για το ρεύμα ανόδου.

Τα 10G-PONs αποτελούν απόγονο των GPONs και ο λόγος δημιουργίας τους είναι η αντικατάσταση των GPONs με σκοπό να ανταποκρίνονται στις αυξημένες ανάγκες των δικτύων πρόσβασης, όπως αυτές ορίζονται από τις απαιτήσεις των χρηστών σε όγκο δεδομένων.

6.

Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM-PON)

6.1 Γενικά

Τα παραδοσιακά TDM παθητικά οπτικά δίκτυα, συνδυάζουν την υψηλή χωρητικότητα που παρέχουν οι οπτικές ίνες, με το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου εξαιτίας των παθητικών οπτικών στοιχείων της υποδομής τους. Η οπτική δέσμη μοιράζεται μέσω ενός παθητικού διαιρέτη σε πολλούς συνδρομητές. Σαν συνέπεια, ο αριθμός των ONUs είναι περιορισμένος λόγω της εξασθένησης του οπτικού σήματος από την οπτική διαίρεση, αλλά και λόγω του ρυθμού λειτουργίας των οπτικών πομποδεκτών που χρησιμοποιούνται στο κέντρο σύνδεσης και τις ONUs. Οι μέχρι σήμερα προδιαγραφές των δικτύων αυτών επιτρέπουν την εξυπηρέτηση 32 ONUs μέχρι τη μέγιστη απόσταση των 20km, ή 64 ONUs μέχρι την μέγιστη απόσταση των 10km. Η λύση των WDM-PONs προσφέρει επεκτασιμότητα, αφού μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά μήκη κύματος πάνω στην ίδια οπτική ίνα, διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης για κάθε μήκος κύματος, ενώ δεν επηρεάζεται και από απώλειες λόγω οπτικής διαίρεσης.

Να σημειωθεί ότι ένα WDM-PON είναι ανεξάρτητο από πρωτόκολλα και σήματα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μεταφέρει οποιασδήποτε μορφής οπτικό σήμα. Πολλών ειδών πρωτόκολλα μεταφοράς, όπως τα EPON, BPON, Ethernet, SONET κ.α., μπορούν να χρησιμοποιούν τα WDM-PONs σαν φυσικό στρώμα. Αυτό βέβαια απαιτεί την παρουσία οπτικών δεκτών στον OLT και τις ONUs που καλύπτουν τις προδιαγραφές του πρωτόκολλου μεταφοράς που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

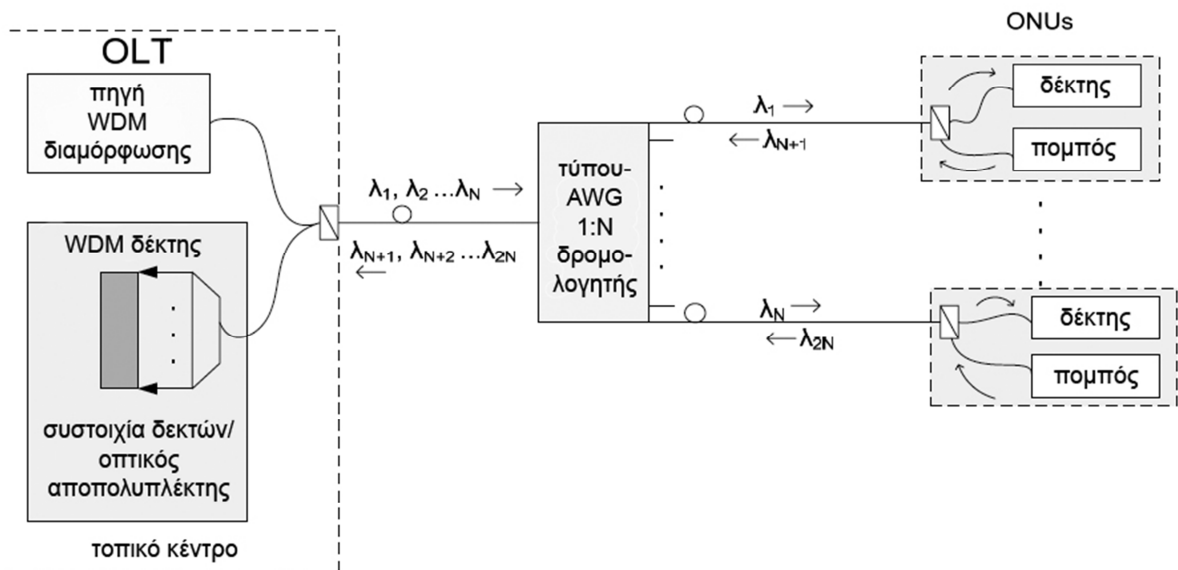
6.2 Αρχιτεκτονική απλού WDM-PON

Η πιο απλή προσέγγιση για τη δημιουργία ενός WDM-PON περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση ενός καναλιού μήκους κύματος για τη σύνδεση του OLT με κάθε ONU, για κάθε μία από τις κατευθύνσεις της ροής κίνησης [20]. Αυτή η προσέγγιση δημιουργεί μια point-to-point σύνδεση ανάμεσα στο κέντρο σύνδεσης και κάθε ONU, η οποία διαφέρει από την point-to-multipoint τοπολογία ενός παραδοσιακού TDM-PON. Σε ένα WDM-PON κάθε ONU μπορεί να λειτουργεί με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης μέχρι κατάληψης όλου του bandwidth του συγκεκριμένου καναλιού μήκους κύματος. Επιπρόσθετα, κανάλια διαφορετικού μήκους κύματος μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης εάν αυτό είναι απαραίτητο. Σαν συνέπεια αυτής ιδιότητας, είναι δυνατόν μέσα από το ίδιο δίκτυο να παρέχονται διαφορετικών ειδών υπηρεσίες, με διαφορετικές απαιτήσεις σε bandwidth για την κάθε μία.

Για την κατεύθυνση της ροής καθόδου ενός WDM-PON, τα κανάλια διαφορετικού μήκους κύματος οδηγούνται από τον OLT προς τις ONUs με τη χρήση ενός παθητικού δρομολογητή φράγματος συστοιχίας κυματοδηγών (passive arrayed waveguide grating router) που βρίσκεται στον απομακρυσμένο κόμβο, στη θέση που βρισκόταν ο παθητικός διαιρέτης των TDM-PONs. Παράλληλα μια πηγή εκπομπής σε πολλαπλά μήκη κύματος βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του OLT ώστε να εκπέμπει όλα αυτά τα διαφορετικού μήκους κύματος σήματα προς τις ONUs.

Για την κατεύθυνση της ροής ανόδου, ο OLT χρησιμοποιεί είναι WDM αποπολυπλέκτη μαζί με μια συστοιχία δεκτών για να λαμβάνει όλα τα σήματα της ροής ανόδου. Κάθε ONU είναι εξοπλισμένη με ένα πομπό και έναν δέκτη για τη μετάδοση και λήψη των σημάτων στα «δικά της» μήκη κύματος.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, οι εκπομπές στα δυο ρεύματα συμβαίνουν σε διαφορετικά κανάλια μήκους κύματος, και τα κανάλια αυτά είναι διαχωρισμένα με τη χρήση coarse WDM (CWDM). Μέσα σε κάθε κανάλι τα μήκη κύματος διαχωρίζονται περαιτέρω με τη χρήση dense WDM (DWDM).



Σχ.6.1 – τυπικό παράδειγμα WDM-PON

Ίσως η πιο σημαντική απαίτηση από ένα WDM-PON είναι να είναι εύκολα επεκτάσιμο τόσο σε σχέση με το εύρος ζώνης που διαθέτει στους χρήστες του, όσο και στον αριθμό των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει. Για να μπορεί να γίνει αυτό θα πρέπει οι οπτικές συσκευές που απαιτεί ένα τέτοιο δίκτυο να είναι οικονομικά εφικτό να αποκτηθούν.

6.3 Χαρακτηριστικά και επιλογές λειτουργίας WDM-PON

Για την σχεδίαση και ανάπτυξη ενός WDM-PON είναι απαραίτητο πρώτα από όλα να επιλέξουμε τα μήκη κύματος που θα χρησιμοποιηθούν για τα διάφορα κανάλια, καθώς επίσης και τις αποστάσεις αυτών. Αυτή η επιλογή βασίζεται κατά πολύ στις οπτικές συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν στον OLT και τις ONUs. Υπάρχουν πολλές επιλογές από πομπούς, δέκτες, πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν [20].

6.3.1 Coarse WDM-PON – Dense WDM-PON

Όταν ένα WDM-PON υποστηρίζει κανάλια μήκους κύματος με πλάτος μεγαλύτερο των 20nm τότε έχουμε να κάνουμε με ένα **Coarse WDM-PON (CWDM-PON)**. Αν χρησιμοποιείται όλο το εύρος των μηκών κύματος που παρεμβάλλονται από τα 1271nm μέχρι τα 1611nm, με πλάτος κάθε καναλιού τα 20nm, τότε έχουμε ένα σύνολο από 18 κανάλια CWDM προς εκμετάλλευση. Μια οπτική ίνα χαμηλής εξασθένισης (low-water-peak), η οποία εξαφανίζει την εξασθένιση σήματος στην περιοχή των 1370-1410nm, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπομπή σε όλο το φασματικό

πλέγμα. Ωστόσο η διασπορά του σήματος είναι ένας παράγοντας που περιορίζει την απόσταση της εκπομπής, ειδικά όταν ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων γίνεται πολύ μεγάλος.

Αφού στα CWDM-PONs δεν απαιτείται αυστηρή ρύθμιση των μηκών κύματος, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ενός θερμοηλεκτρικού ψύκτη (thermo-electric cooler, TEC), γεγονός που τα κάνει πιο φθηνά από τα DWDM-PONs. Επιπλέον, ο πολυπλέκτης μηκών κύματος με χαμηλές παρεμβολές μεταξύ των καναλιών μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στα CWDM-PONs περιορίζοντας ακόμη περισσότερο το κόστος σε σχέση με τα DWDM-PONs.

Βασικό μειονέκτημα των CWDM-PONs είναι ο αριθμός των διαφορετικών καναλιών μήκους κύματος, ο οποίος είναι πολύ περιορισμένος. Για τον λόγο αυτό, τα CWDM-PONs δίκτυα δεν έχουν εύκολη επεκτασιμότητα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται απλές οπτικές ίνες με water-peak εξασθένιση. Επιπρόσθετα, τα κανάλια μικρότερου μήκους κύματος παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες, περιορίζοντας έτσι και την απόσταση της εκπομπής αλλά και τον λόγο διαχωρισμού.

Τα PONs με **πυκνή διαίρεση μήκους κύματος (Dense WDM, DWDM)** έχουν πλάτος καναλιών που είναι πολύ μικρότερο από αυτό των CWDM-PONs. Συνήθως το πλάτος των DWDM είναι μικρότερο από 3.2nm, και αυτό γιατί σκοπός τους είναι όχι μόνο η εκπομπή σε μεγάλο αριθμό καναλιών διαφορετικού μήκους κύματος, αλλά και σε μικρή περιοχή του οπτικού φάσματος. Για point-to-point WDM υλοποιήσεις έχει προταθεί η χρήση lasers που εκπέμπουν σε συχνότητες με διαφορά 100GHz από laser σε laser. Ως κεντρική συχνότητα έχουν επιλεγεί τα 193.1THz(1553.52nm) ενώ η περιοχή εκπομπής εκτείνεται από τα 191.7THz(1563.86nm) μέχρι τα 196.1THz(1528.77nm). Αυτό το διάστημα των 100GHz ανάμεσα στις συχνότητες εκπομπής των lasers έχει επικρατήσει σε πολλά DWDM συστήματα, ωστόσο στο εμπόριο έχουν διατεθεί πλέον και δίοδοι laser με διαστήματα των 50GHz. Η χρησιμοποίηση των νέων αυτών lasers θα μπορούσε να αυξήσει ακόμη περισσότερο τον αριθμό των καναλιών.

Στα DWDM-PONs το μήκος κύματος του κάθε οπτικού πομπού θα πρέπει να παρακολουθείται και να ελέγχεται προσεκτικά για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ γειτονικών καναλιών. Για τον λόγο αυτό τα DWDM-PONs κοστίζουν περισσότερο από τα CWDM-PONs, όσον αφορά την εγκατάστασή τους, αφού χρειάζονται συσκευές ρύθμισης του μήκους κύματος, καθώς επίσης και ελέγχου της θερμοκρασίας στα διάφορα στοιχεία του δικτύου.

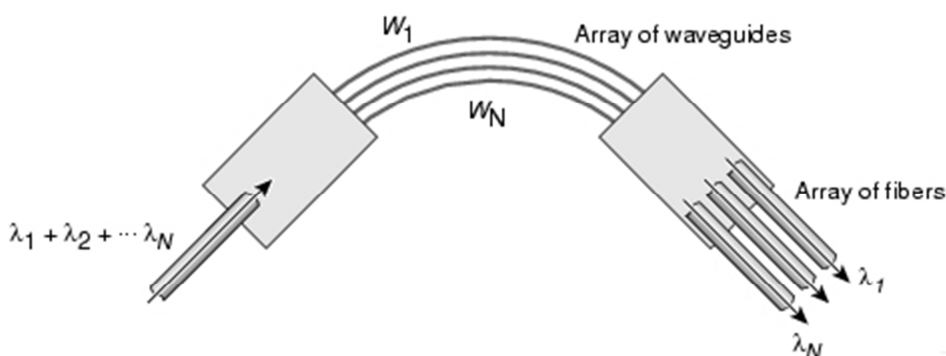
6.3.2 Απομακρυσμένος κόμβος

Στον απομακρυσμένο κόμβο ενός PON μπορεί να βρίσκεται είτε ένα ενεργός διαιρέτης, είτε ένας παθητικός δρομολογητής μηκών κύματος. Ο ενεργός διαιρέτης διαμοιράζει όλα τα εισερχόμενα σήματα εξίσου στις θύρες εξόδου του, απαιτώντας την ύπαρξη ενός φίλτρου μηκών κύματος στην κάθε ONU. Οι απώλειες εισόδου και εξόδου, καθώς και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι σημαντικές παράμετροι για την επιλογή ενός ενεργού διαιρέτη. Παρόλο που το κόστος ενός τέτοιου διαιρέτη είναι μικρό, ενώ και η κατασκευή του είναι απλή, απαιτεί την χρήση φίλτρων με

διαφορετικά κεντρικά μήκη κύματος σε κάθε ONU. Επιπρόσθετα, η απώλεια σήματος με τη χρήση διαιρέτη είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή από τη χρήση δρομολογητή μηκών κύματος.

Το φράγμα συστοιχίας κυματοδηγών (Arrayed Waveguide Grating – AWG) [19] είναι μια συσκευή που καταφέρνει επιτυχώς να λειτουργήσει σε μεγάλων αποστάσεων WDM δίκτυα τόσο σαν πολυπλέκτης/αποπολυπλέκτης, όσο και σαν add-drop πολυπλέκτης (ADM). Η λειτουργία του αφορά στην δρομολόγηση κάθε καναλιού μήκους κύματος σε συγκεκριμένη θύρα εξόδου, αποπολυπλέκοντας έτσι την ίδια στιγμή πολλαπλά μήκη κύματος.

Μια οπτική δέσμη που μεταφέρει ένα WDM σήμα, αποτελούμενο από πολλαπλά κανάλια διαφορετικού μήκους κύματος, εισέρχεται στην πρώτη περιοχή του AWG. Εκεί, αρχίζει να διευρύνεται και προσπίπτει σε μια σειρά από κυματοδηγούς. Ο κάθε κυματοδηγός έχει μήκος που διαφέρει από τον προηγούμενο και τον επόμενο κατά ένα σταθερό μήκος ΔL . Τα οπτικά κύματα διατρέχουν τους κυματοδηγούς και φθάνουν στη τρίτη περιοχή του AWG με μια διαφορά φάσης, ανάλογη με το μήκος του κάθε κυματοδηγού. Τελικώς, ανάλογα με τη διαφορά φάσης της κάθε οπτικής δέσμης, η οποία εξαρτάται και από το μήκος κύματος, οι συνιστώσες του WDM σήματος διαχωρίζονται και οδηγούνται σε διαφορετικές εξόδους. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται συνοπτικά ο τρόπος λειτουργίας του φράγματος συστοιχίας κυματοδηγών:



Σχ.6.2 - λειτουργία φράγματος συστοιχίας κυματοδηγών (AWG)

Η ιδιότητα της περιοδικότητας που διαθέτει ο AWG του επιτρέπει να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σαν πολυπλέκτης και αποπολυπλέκτης. Η κυκλική της φύση επιτρέπει την χωρική επαναχρησιμοποίηση των διαφόρων καναλιών μήκους κύματος. Όταν οι μεταδότες του ρεύματος ανόδου χρησιμοποιούν μήκη κύματος τα οποία διαφέρουν από αυτά του ρεύματος καθόδου κατά ακέραια πολλαπλάσια της ελεύθερης φασματικής περιοχής (Free Spectral Range – FSR) του AWG, η ίδια θύρα εξόδου του AWG μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για μετάδοση στη ροή ανόδου, όσο και για μετάδοση στη ροή καθόδου. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα φίλτρο CWDM στην ONU για τον διαχωρισμό των δύο σημάτων. Ωστόσο, αν το ρεύμα ανόδου χρησιμοποιεί το ίδιο μήκος κύματος με το ρεύμα καθόδου, τότε θα πρέπει να ανατεθούν δύο διαφορετικές θύρες εξόδου στην ONU και να χρησιμοποιηθεί ένας $2 \times N$ AWG στον απομακρυσμένο κόμβο.

Εκτός από τον απομακρυσμένο κόμβο, ο AWG συναντάται και στον χώρο του OLT όπου λειτουργεί σαν ένας WDM αποπολυπλέκτης μαζί με μια συστοιχία οπτικών δεκτών για την λήψη των σημάτων από τις ONUs.

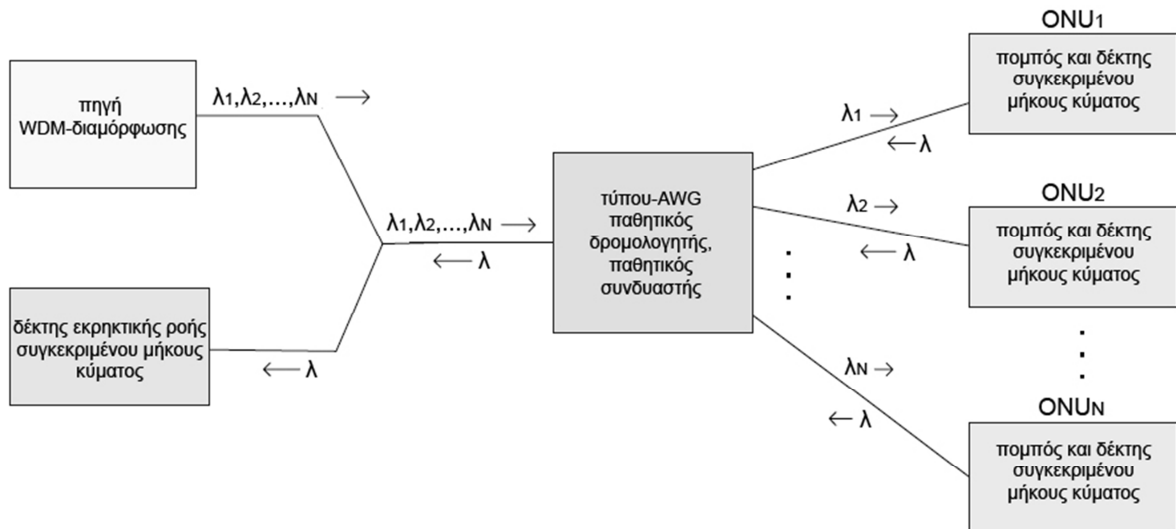
Να σημειωθεί ότι οι απώλειες εισόδου στον AWG παραμένουν αμετάβλητες με την αύξηση των χρηστών του δικτύου, ενώ είναι και σημαντικά μικρότερες από αυτές ενός παθητικού οπτικού διαιρέτη.

6.4 Αρχιτεκτονικές WDM

Αρκετές WDM-PONs αρχιτεκτονικές έχουν προταθεί με κύριο χαρακτηριστικό αυτό της επεκτασιμότητας. Ένα χαρακτηριστικό που απουσιάζει από τα παραδοσιακά TDM-PONs. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ένας προφανής τρόπος να αυξηθεί το bandwidth ενός TDM-PON είναι να ανατεθεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος σε κάθε χρήστη. Ωστόσο, αυτή η λύση είναι μια επιλογή πολύ υψηλού κόστους. Επιπρόσθετα, μια τέτοιας μορφής PON παρουσιάζει και το εξής μειονέκτημα. Όποτε ένα χρήστης τερματίζει την σύνδεση του με το PON, τότε ο αντίστοιχος πομποδέκτης στον OLT παραμένει ανενεργός και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλους χρήστες. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων έχουν προταθεί διάφορες αρχιτεκτονικές, οι σημαντικότερες των οποίων αναφέρονται παρακάτω [20].

6.4.1 Composite PON (CPON)

Μια από τις πρώιμες προτάσεις WDM-PON αρχιτεκτονικής για την επίλυση του προβλήματος της επεκτασιμότητας αφορά στη χρήση του δρομολογητή AWG με σκοπό την εφαρμογή WDM πολυπλεξίας στην περιοχή των 1550nm, για το ρεύμα καθόδου, και τη χρήση ενός μόνο μήκους κύματος, στην περιοχή των 1300nm, για το ρεύμα ανόδου, το οποίο θα μοιράζονται οι χρήστες με τη χρήση της TDMA μεθόδου. Παρόλο που μια αρχική σχεδίαση αυτής της αρχιτεκτονικής πρόβλεπε τη χρήση διαφορετικών οπτικών ινών για τα δυο ρεύματα κίνησης, ωστόσο προτάθηκε η χρήση μιας ολοκληρωτικού τύπου συσκευής, η οποία κάνει WDM δρομολόγηση σε ένα παράθυρο μήκων κύματος, ενώ παράλληλα κάνει συνδυασμό μηκών κύματος, ανεξαρτήτου ισχύος, σε ένα δεύτερο παράθυρο, μέσα σε μια μόνο οπτική ίνα, με τη χρήση της CWDM μεθόδου. Αυτή η αρχιτεκτονική αναφέρεται ως composite PON (CPON). Ένας, συγκεκριμένου μήκους κύματος, δέκτης εκρηκτικής μετάδοσης χρησιμοποιείται στον OLT για να λαμβάνει το σήμα της ροής ανόδου, ενώ οι ONUs είναι εξοπλισμένες με συγκεκριμένου μήκους κύματος πομπούς και δέκτες.

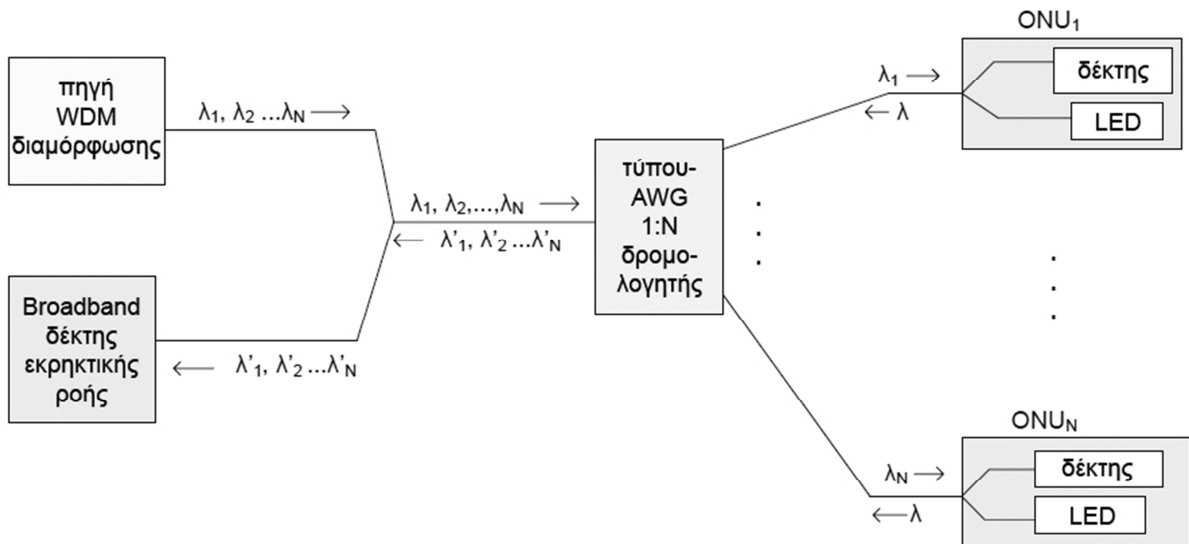


Σχ.6.3. – αρχιτεκτονική CPON

6.4.2 Local Access Router Network (LARNET)

Η αρχιτεκτονική LARNET σκοπό έχει να ξεπεράσει διάφορους περιορισμούς της CPON αρχιτεκτονικής εξοπλίζοντας τις ONUs με οπτικές πηγές ευρέως φάσματος. Μια τέτοια συσκευή είναι η light-emitting diode (LED), της οποίας το οπτικό φάσμα τεμαχίζεται από τον AWG δρομολογητή σε διαφορετικές περιοχές οπτικού σήματος για το ρεύμα της ανόδου. Η edge-emitting LED εκπέμπει ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος επικεντρωμένα γύρω από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, σε σύγκριση με το DFB laser (Distributed Feedback laser), το οποίο εκπέμπει μόνο σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης edge-emitting LED είναι ότι όλες οι ONUs μπορούν να είναι εξοπλισμένες με την ίδια συσκευή αντί να χρησιμοποιούν DFB lasers με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους.

Η αρχιτεκτονική LARNET παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Κάθε ευρύ φάσμα μηκών κύματος που προέρχεται από μια ONU εισέρχεται στον AWG δρομολογητή από πολλαπλές θύρες εισόδου. Ανάλογα με τη θύρα εισόδου, το φάσμα αυτό τεμαχίζεται ανάλογα ώστε στην κάθε θύρα εξόδου να καταλήγει διαφορετικό κομμάτι αυτού. Για τη ροή καθόδου, το οπτικό σήμα, το οποίο μεταφέρει πληροφορίες σε πολλαπλά μήκη κύματος, εκπέμπεται από ένα multifrequency laser (MFL). Ένας broadband δέκτης (σε αντίθεση με τον δέκτη εκρηκτικής ροής ενός μόνο μήκους κύματος που χρησιμοποιείται στην CPON αρχιτεκτονική) εγκαθίσταται στον OLT και μπορεί να λαμβάνει οποιαδήποτε περιοχή φάσματα της edge-emitting LED. Στην ουσία, ο OLT μπορεί να λαμβάνει οποιοδήποτε μήκος κύματος από οποιαδήποτε ONU.



Σχ.6.4 – αρχιτεκτονική LARNET

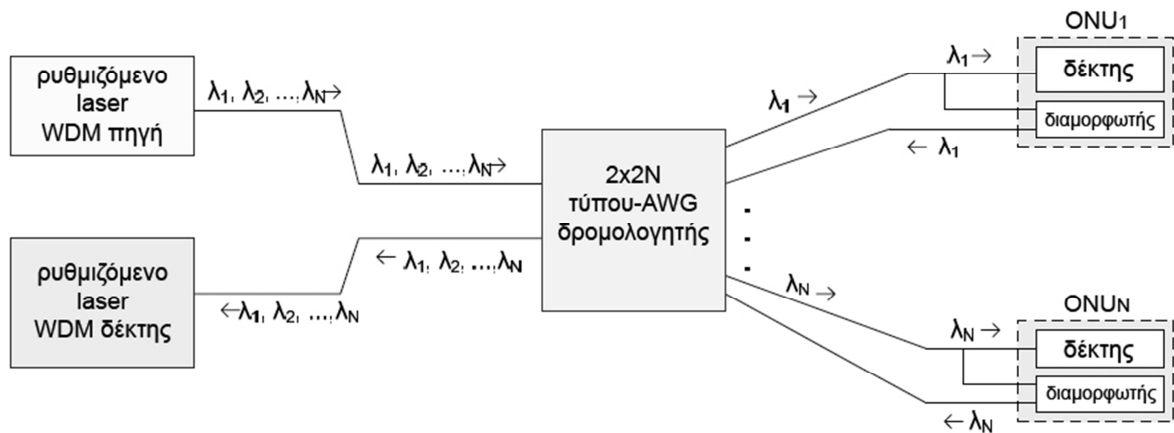
Οι edge-emitting LEDs είναι πολύ φθηνότερες από τα DFB lasers, οπότε με την LARNET αρχιτεκτονική μειώνεται κατά πολύ το κόστος εξοπλισμού των ONUs. Το μειονέκτημα της LARNET είναι ότι ο τεμαχισμός του οπτικού φάσματος σε περιοχές από έναν AWG δρομολογητή μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη απώλεια ισχύος σήματος. Για τον λόγο αυτό, οι αποστάσεις του OLT από τις ONUs στη LARNET περιορίζονται αρκετά.

6.4.3 Remote Interrogation of Terminal Network (RITENET)

Η RITENET αρχιτεκτονική στοχεύει στην μη χρησιμοποίηση πομπών στις ONUs. Αντ' αυτών επιδιώκεται η διαμόρφωση του σήματος της ροής καθόδου που έρχεται από τον OLT και η επαναχρησιμοποίηση του για τη ροή ανόδου. Συγκεκριμένα, στην ONU, το σήμα διαχωρίζεται από έναν παθητικό διακόπτη, με ένα τμήμα του μόνο να εντοπίζεται από τον δέκτη. Το υπόλοιπο τμήμα του οπτικού σήματος επανατροφοδοτείται προς τον OLT μέσω ενός διαμορφωτή. Το σήμα από τον OLT χρησιμοποιείται και από τα δύο ρεύματα κίνησης, εναλλάξ, με βάση το χρόνο (time sharing). Ένας $2 \times 2N$ AWG δρομολογητής χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τα μήκη κύματος προς τους προορισμούς τους.

Στο κέντρο σύνδεσης, ένα ρυθμιζόμενο laser εκπέμπει ανά διαστήματα σε τόσα διαφορετικά μήκη κύματος, όσα και οι ONUs του δικτύου. Έτσι, τόσο το ρεύμα ανόδου, όσο και το ρεύμα καθόδου, θα πρέπει να μοιράζονται στις ONUs του δικτύου είτε με την μέθοδο TDMA είτε με δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης. Μια εναλλακτική πρόταση στη χρήση του ρυθμιζόμενου laser, είναι η χρησιμοποίηση μια διάταξης από πομπούς και δέκτες στον χώρο του OLT. Σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται η εναλλάξ χρήση των δυο ρευμάτων αφού τα δεδομένα εκπέμπονται ταυτόχρονα σε διαφορετικά μήκη κύματος προς όλες τις ONUs. Επειδή στην αρχιτεκτονική

RITENET, τα δυο ρεύματα κίνησης χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος στην διαδρομή από τον OLT προς την ONU, και αντίστροφα, είναι προτιμότερο τα δυο ρεύματα να οδηγούνται σε διαφορετικές οπτικές ίνες. Το παρακάτω σχέδιο παρουσιάζει μια τέτοια αρχιτεκτονική RITENET.



Σχ.6.5 – αρχιτεκτονική RITENET

Παρόλο που η RITENET βοηθά στον να περιοριστούν σημαντικά τα κόστη για τον εξοπλισμό στις ONUs, η απόσταση από τον OLT προς την ONU είναι πολύ μικρότερη, αφού το σήμα θα πρέπει να ταξιδέψει από τον OLT προς την ONU και μετά να επιστρέψει πίσω. Παράλληλα, ο αριθμός των ινών που χρησιμοποιεί μια τέτοια αρχιτεκτονική είναι διπλάσιος, διπλασιάζοντας έτσι και τα κόστη εγκατάστασης και επίβλεψης του δικτύου. Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση είτε ρυθμιζόμενου laser, είτε διάταξης πομποδεκτών στον OLT αυξάνει το κόστος σε σχέση με την CPON αρχιτεκτονική.

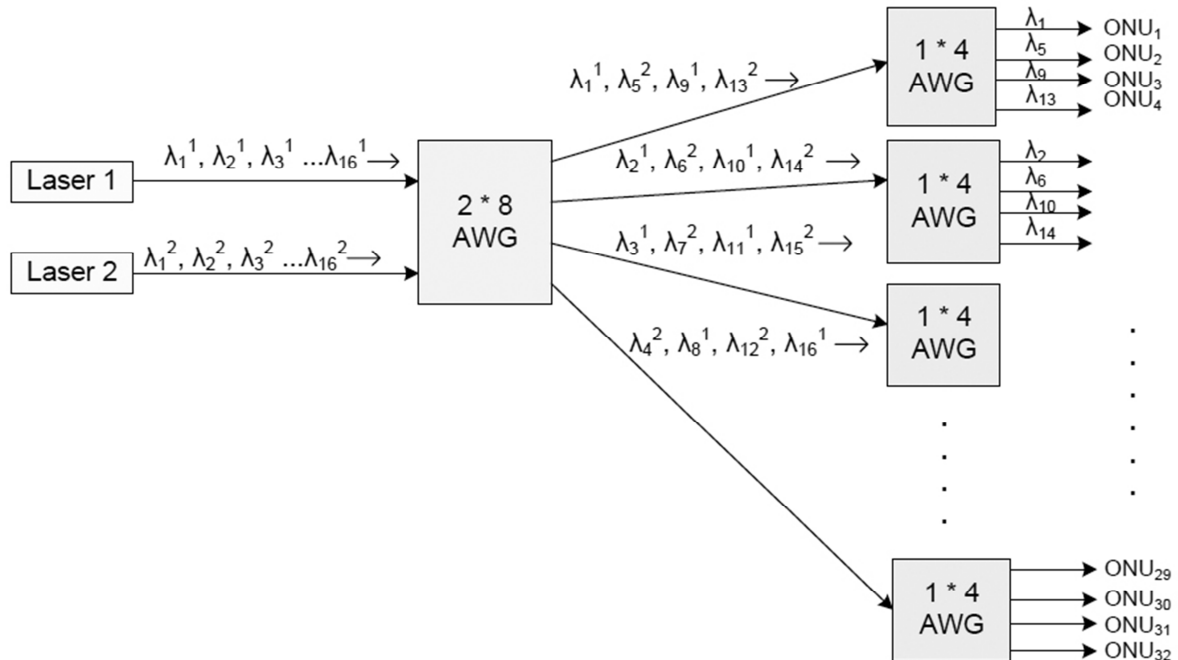
Βέβαια, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική έχει και κάποια πλεονεκτήματα, όπως αυτό της δυνατότητας παροχής συμμετρικού bandwidth στα δυο ρεύματα κίνησης, αλλά και το γεγονός ότι το σήμα της ροής ανόδου δεν παρουσιάζει απώλειες ισχύος από τεμαχισμό του φάσματος, όπως συμβαίνει στα LARNET δίκτυα.

6.4.4 Multistage AWG-Based WDM-PON

Στις προαναφερθείσες αρχιτεκτονικές υπάρχουν δύο περιορισμοί. Πρώτον, η δυσκολία στο να αυξηθείς τον αριθμό των ONUs του δικτύου, και δεύτερον, ο περιορισμένος αριθμός χρηστών του δικτύου λόγω του λόγου διαχωρισμού του AWG. Για να ξεπεραστούν οι συγκεκριμένοι περιορισμοί προτάθηκε μια αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων. Η αρχιτεκτονική αυτή, που αναφέρεται ως Multistage WDM-PON, εκμεταλλεύεται την περιοδική ιδιότητα του AWG, ώστε η επαναχρησιμοποίηση ενός μήκους κύματος να είναι δυνατή για περισσότερους του ενός χρήστες του δικτύου. Μέσω της Multistage WDM-PON αρχιτεκτονικής υπάρχει η δυνατότητα της επεκτασιμότητας τόσο του bandwidth, όσο και των χρηστών του δικτύου, είτε με την προσθήκη

επιπλέον μηκών κύματος στον OLT, είτε με τη χρήση περισσότερων του ενός AWGs στα διάφορα στάδια του δικτύου.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η αρχιτεκτονική αυτή. Με τη χρήση 8 νέων 1x4 AWGs μπορούμε από ένα δίκτυο 8 μηκών κύματος και 8 ONUs να καταλήξουμε σε ένα δίκτυο με 32 ONUs.



Σχ.6.6 – αρχιτεκτονική Multistage τύπου-AWG WDM-PON

6.4.5 DWDM Super-PON (SPON)

Δύο από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των παθητικών οπτικών δικτύων είναι, πρώτον, η περιορισμένη φυσική εμβέλεια, και δεύτερον, το όριο στον αριθμό των οπτικών τερματικών τα οποία μπορούν να συνδεθούν σε αυτά. Για παράδειγμα, στα EPON η μέγιστη απόσταση εκπομπής είναι τα 20km και ο μέγιστος αριθμός οπτικών τερματικών που μπορούν να υποστηριχθούν σε αυτή την απόσταση είναι 32. Λύση απέναντι σε αυτά τα μειονεκτήματα μπορεί να παρέχει η αρχιτεκτονική Super-PON, η οποία καλύπτει αποστάσεις μεγαλύτερες ακόμη και των 100km, ενώ ο λόγος διαχωρισμού μπορεί να φτάσει στο 1:2000. Όλα αυτά επιτυγχάνονται με τη χρήση οπτικών ενισχυτών (optical amplifiers – OAs). Οι οπτικοί ενισχυτές τοποθετούνται στην μεγάλη μήκους ίνα τροφοδότη του δικτύου, και αμέσως μετά το σημείο διαχωρισμού του σήματος. Με αυτό τον τρόπο παρέχεται αρκετή οπτική ισχύς στο δίκτυο ώστε το σήμα να ταξιδεύει μεγάλες αποστάσεις. Βέβαια, αν το δίκτυο SPON υποστηρίζει μόνο ένα μήκος κύματος, τότε υπάρχει ο περιορισμός στον αριθμό των ONUs που μπορεί να εξυπηρετήσει.

Για να αυξηθεί το διαθέσιμο bandwidth του δικτύου, η λύση είναι η χρήση DWDM πολυπλεξίας ώστε να παρέχεται μεγάλος αριθμός μηκών κύματος και για τις δύο κατευθύνσεις της ροής

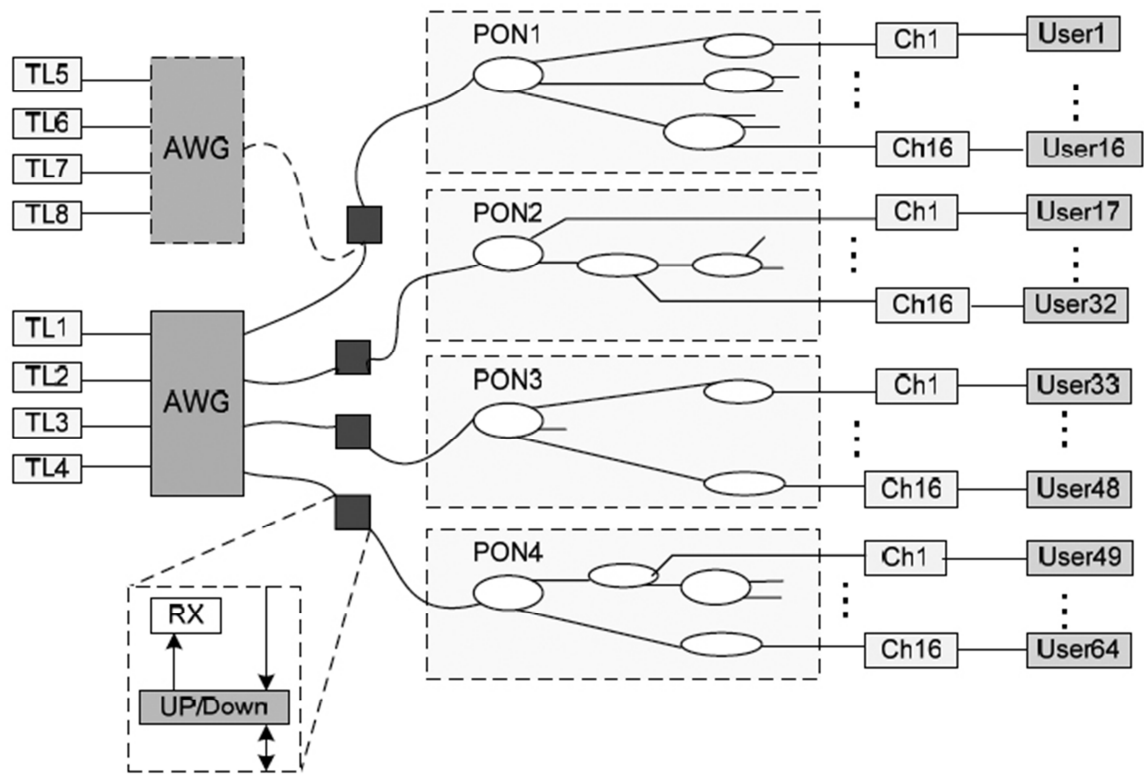
δεδομένων. Κάθε οπτικός διαχωριστής του δικτύου χρησιμοποιεί δύο περιοχές DWDM πολυπλεξίας. Η μια περιοχή (1525-1543nm) χρησιμοποιείται για την μεταφορά σημάτων στο ρεύμα καθόδου, ενώ η άλλη περιοχή (1547-1565nm) χρησιμοποιείται για το ρεύμα ανόδου. Οι δυο περιοχές διακρίνονται μεταξύ τους με τη χρήση απλών οπτικών φίλτρων. Ένας ηλεκτροαπορροφητικός διαμορφωτής - ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής (electroabsorption modulator – semiconductor optical amplifier, EAM-SOA) μπορεί να λειτουργήσει σαν μια «άχρωμη» ONU (colorless ONU) που χρησιμοποιείται τόσο για διαμόρφωση, όσο και για ενίσχυση του σήματος.

Παρόλο που η αρχιτεκτονική Super-PON επιτυγχάνει μεγάλες αποστάσεις λειτουργίας και μπορεί να εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό κόμβων, ωστόσο χρησιμοποιεί οπτικές συσκευές που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους, επομένως και συνεχή επίβλεψη και επισκευή. Για το λόγο αυτό η SPON αρχιτεκτονική δεν μπορεί να θεωρεί παθητική.

6.4.6 SUCCESS-DWA

Η Stanford University Access Dynamic Wavelength Assignment (SUCCESS-DWA) αρχιτεκτονική στοχεύει στην εύκολη επεκτασιμότητα του δικτύου υιοθετώντας δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης για την παροχή μοιραζόμενου bandwidth σε πολλαπλά PONs. Αυτό μάλιστα επιτυγχάνεται χωρίς επιπλέον παρεμβάσεις στα ήδη εγκατεστημένα PONs.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια SUCCESS-DWA αρχιτεκτονική. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ρυθμιζόμενα lasers και AWGs στο κέντρο σύνδεσης, ενώ οι ONUs εξοπλίζονται με WDM φίλτρα και δέκτες εκρηκτικής ροής. Τα δύο ρεύματα κίνησης διαχωρίζονται μέσω ενός WDM φίλτρου που εγκαθίσταται μεταξύ του AWG και του PON. Βασική ιδέα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι όλα τα μήκη κύματος από τον OLT μπορούν να φτάσουν σε όλες τις ONUs, ανεξάρτητα σε ποιο PON ανήκουν αυτές. Επομένως ένα ρυθμιζόμενο laser μπορεί να επικοινωνήσει με οποιονδήποτε χρήστη ενός PON γνωρίζοντας ποιο μήκος κύματος φθάνει σε αυτόν και μέσω ποιας εξόδου του AWG που επικοινωνεί με το PON αυτό. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει επεκτασιμότητα στο δίκτυο, αρχικά εγκαθιστώντας ένα ρυθμιζόμενο laser και έναν AWG στο κέντρο σύνδεσης, τα οποία εξυπηρετούν πολλούς χρήστες σε διαφορετικά PONs, και όσο οι απαιτήσεις του δικτύου μεγαλώνουν, μπορούν να προστίθενται επιπλέον ρυθμιζόμενα lasers ή και επιπλέον AWGs.



Σχ.6.7 – αρχιτεκτονική SUCCESS WDM-PON

Η SUCCESS-DWA αρχιτεκτονική απαιτεί να υπάρχει ένας ειδικός αλγόριθμος προγραμματισμού, αφού ένα ρυθμιζόμενο laser μπορεί να επικοινωνεί με έναν χρήστη κάθε φορά, και φυσικά τα lasers είναι πολύ λιγότερα από τους χρήστες του δικτύου. Μια πρόταση είναι η δημιουργία ουρών αναμονής στη πλευρά των ρυθμιζόμενων lasers. Εκεί τα lasers μπορούν, για παράδειγμα, να εξυπηρετούν πρώτα τις ουρές αναμονής με το μεγαλύτερο μήκος. Παράλληλα, θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος ώστε δύο διαφορετικά lasers να μην εξυπηρετούν τον ίδιο χρήστη. Μια τέτοια λύση αποφεύγει τις συγκρούσεις στο δίκτυο αλλά δεν προσφέρει μεγάλη επεκτασιμότητα στην περίπτωση που ο αριθμός των χρηστών είναι σημαντικά μεγάλος σε σχέση με τα lasers. Μια άλλη προσέγγιση υιοθετεί ουρές αναμονής στους μεταδότες του δικτύου. Τα εισερχόμενα πακέτα ανατίθενται στον μεταδότη με την μικρότερη ουρά αναμονής, ώστε να περιοριστούν σημαντικά οι καθυστερήσεις. Μάλιστα, για να αποφεύγεται δύο πακέτα με κοινό προορισμό να ταξιδεύουν προς τον τελικό χρήστη μέσω διαφορετικών ουρών αναμονής, ο αλγόριθμος φροντίζει ώστε να γνωρίζει πάντα τον προορισμό του κάθε πακέτου που έχει προστεθεί τελευταίο στην ουρά αναμονής. Έτσι επιτυγχάνεται πιο αποδοτική μετάδοση των πακέτων.

6.5 Πρωτόκολλα για WDM-PONs

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, τα WDM-PON είναι ανεξάρτητα από πρωτόκολλα μεταφοράς και σήματα. Ειδικότερα, αν ένα κανάλι ενός WDM-PON λειτουργεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα κανάλια του ίδιου PON, τότε όπως είναι λογικό δεν χρειάζεται η χρήση ενός επιπλέον πρωτοκόλλου επικοινωνίας για χρήση του κοινού μέσου μεταφοράς. Έτσι λοιπόν, αν ένα μήκος κύματος έχει ανατεθεί σε ένα EPON σύστημα, τότε αρκεί το MAC πρωτόκολλο του EPON συστήματος εφόσον δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις με άλλα κανάλια, διαφορετικών μηκών κύματος. Ωστόσο, ένας τέτοιος τρόπος λειτουργίας WDM-PON δεν είναι αποδοτικός όσον αφορά την διαχείριση του διαθέσιμου bandwidth, ειδικότερα σε περιπτώσεις που κάποια κανάλια είναι υπερφορτωμένα με κίνηση ενώ άλλα χρησιμοποιούνται ελάχιστα. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η κοινή χρήση ενός καναλιού μήκους κύματος από πολλές ONUs. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια επιβάλλεται η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου διαχείρισης των μηκών κύματος, το οποίο εξυπηρετεί αποδοτικά την επικοινωνία ανάμεσα στον OLT και τις ONUs. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο μπορεί να χειρίζεται τα ρυθμιζόμενα lasers και τα WDM φίλτρα του PON. Επιπρόσθετα, χρειάζεται και ένας νέος αλγόριθμος δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης, ο οποίος αναθέτει όχι μόνο χρονοθυρίδες, αλλά και μήκη κύματος σε κάθε OLT και ONU, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους.

Επειδή τα WDM-PONs είναι επόμενης γενιάς παθητικά δίκτυα, βρίσκονται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης και σχεδίασης, οπότε και οι αντίστοιχες προτάσεις για νέα πρωτόκολλα επικοινωνίας και νέους αλγόριθμους είναι ακόμη σε πρώιμα στάδια. Δύο από αυτές τις προτάσεις για πρωτόκολλα επικοινωνίας αναφέρονται στη συνέχεια [20].

6.5.1 Επέκταση MPCP πρωτοκόλλου και WDM-IPACT αλγόριθμος

Το MPCP πρωτόκολλο είναι το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας στα EPON δίκτυα, το οποίο αναθέτει χρονοθυρίδες σε κάθε ONU, ανάλογα με τις απαιτήσεις της για το ρεύμα της ανόδου. Η επέκταση του MPCP πρωτοκόλλου για τα την αναβάθμιση των EPONs σε WDM-PONs, αναθέτει όχι μόνο χρονοθυρίδες, αλλά και μήκη κύματος. Συγκεκριμένα, κατά την διαδικασία ανίχνευσης και εγγραφής, ο OLT, μέσω του μηνύματος REGISTER_REQUEST, λαμβάνει πληροφορίες για τον τύπο του πομπού και του δέκτη της κάθε ONU (ρυθμιζόμενου ή σταθερού μήκους κύματος), για τον χρόνο που απαιτεί η οποιαδήποτε ρύθμιση, καθώς επίσης και για τα υποστηριζόμενα μήκη κύματος. Με τη λήψη του μηνύματος, ο OLT έχει πλέον τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να μπορεί να αναθέτει τα διάφορα μήκη κύματος, ανάλογα με τον φόρτο που παρουσιάζεται στο κάθε κανάλι, στις κατάλληλες ONUs. Οι πληροφορίες για την ανάθεση ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος σε μια ONU μεταφέρονται μέσω των μηνυμάτων GATE. Επιπλέον, ένα μήνυμα RECEIVER_CONFIGURATION αποστέλλεται από τον OLT προς κάθε ONU ώστε να ρυθμίσουν καταλλήλως τα οπτικά φίλτρα τους. Η επιβεβαίωση από τις ONUs μεταφέρεται προς τον OLT μέσω

ενός μηνύματος RECEIVER_CONFIGURATION_ACKNOWLEDGE. Ο αλγόριθμός που αποφασίζει για την βέλτιστη χρησιμοποίηση των διαφόρων μηκών κύματος ονομάζεται WDM-IPACT. Αποτελεί μια βελτίωση στον αλγόριθμο IPACT για δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης σε EPON δίκτυα.

6.5.2 WDM-PON DBA πρωτόκολλο για SUCCESS αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική SUCCESS-DWA PON χρησιμοποιεί ρυθμιζόμενα lasers στον OLT και ένα φίλτρο σε κάθε ONU, έτσι ώστε ο OLT να μπορεί να επικοινωνεί με την κάθε ONU. Κάθε ρυθμιζόμενο laser είναι προγραμματισμένο έτσι ώστε να επικοινωνεί με διάφορες ONUs, ευρισκόμενες σε διαφορετικά συστήματα PONs, απλά μόνο μεταβάλλοντας το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει. Ένας αλγόριθμός δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης έχει προταθεί για τέτοιου είδους δίκτυα, ο οποίος αυξάνει την αποδοτική λειτουργία του δικτύου βρίσκοντας τον κατάλληλο μήκος κύματος για τον κατάλληλο φόρτο κίνησης. Τα εισερχόμενα σήματα από το δίκτυο κορμού, διαχωρίζονται σε υψηλής προτεραιότητας (high priority) και σε καλύτερης δυνατής εξυπηρέτησης (best effort) κίνηση, και στη συνέχεια οδηγούνται στην αντίστοιχες ουρές προτεραιότητας, ώστε να ανατεθούν προς μετάδοση από τα κατάλληλα lasers. Ο αλγόριθμός ορίζει ότι η υψηλής προτεραιότητας κίνηση οδηγείται άμεσα στον προγραμματιστή μήκους κύματος, ενώ η κίνηση καλύτερης δυνατής εξυπηρέτησης αποθηκεύεται προσωρινά στο buffer, μέχρι να ανατεθεί σε κάποιο laser. Αφού εξυπηρετηθεί πρώτα η υψηλής προτεραιότητας κίνηση, στην συνέχεια εξυπηρετούνται και τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στο buffer.

7.

Συγκρίσεις – συμπεράσματα

Μέσα από τα προηγούμενα κεφάλαια έγινε μια παρουσίαση των σημαντικότερων παθητικών οπτικών δικτύων, από τις πρώτες υλοποιήσεις τους, μέχρι τις πιο πρόσφατες, αλλά και αυτές που αναμένεται να πάρουν σάρκα και οστά στα επόμενα χρόνια. Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο επιχειρείται μια σύγκριση αυτών τόσο σε επίπεδο προδιαγραφών και απαιτήσεων, όσο και σε επίπεδο κόστους κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας αλλά και κατανάλωσης ενέργειας. Σκοπός είναι να εντοπίσουμε τους τομείς που υπερτερεί η καθεμία υλοποίηση και να καταλήξουμε σε αυτή που συγκεντρώνει τις περισσότερες πιθανότητες για να χρησιμοποιηθεί ευρέως τα επόμενα χρόνια.

7.1 Σύγκριση προδιαγραφών και απαιτήσεων PONs

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί πως μια σύγκριση των προδιαγραφών και απαιτήσεων του κάθε παθητικού οπτικού δικτύου θα πρέπει σε πρώτο στάδιο να αφορά τις διαφορετικές υλοποιήσεις των TDM-PONs και σε δεύτερο στάδιο τα WDM-PONs, αφού πρόκειται για δύο τεχνολογίες που διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τον τρόπο αξιοποίησης των διαφόρων περιοχών του μήκους κύματος.

7.1.1 Σύγκριση TDM-PONs

Όσον αφορά τα TDM-PONs, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι σημαντικότερες διαφορές αλλά και τα κοινά σημεία των BPON, EPON και GPON [21].

	TDM-PONs		
	BPON	EPON	GPON
Standard	ITU G.983	IEEE 802.3ah	ITU G.984

Εύρος ζώνης	Μέχρι 622Mbit/s για τη ροή ανόδου & 1.2Gbit/s για τη ροή καθόδου	1.25 Gbit/s και για τα δύο ρεύματα κίνησης	Μέχρι 2.488Gbit/s και για τα δύο ρεύματα κίνησης
Λόγος διαχωρισμού	1:64	1:64 (αρχικά υποστήριζε 1:16)	1:64
Κώδικας γραμμής	Κωδικοποίηση NRZ	8B/10B	Κωδικοποίηση NRZ
Μήκη κύματος	1310nm για μια ίνα ανά κατεύθυνση, 1310nm για το ρεύμα ανόδου και 1490nm για το ρεύμα καθόδου για μία ίνα και για τις δυο κατευθύνσεις	1310nm για το ρεύμα ανόδου και 1490nm για το ρεύμα καθόδου	1310nm για μια ίνα ανά κατεύθυνση, 1310nm για το ρεύμα ανόδου και 1490nm για το ρεύμα καθόδου για μία ίνα και για τις δυο κατευθύνσεις
Εναλλαγές προστασίας	Ναι	Όχι	Ναι
Φυσική απόσταση	20km	10 και 20km	10 και 20km
Ενθυλάκωση	ATM πλαίσια (αυστηρά 53 bytes)	Καμία ενθυλάκωση (απευθείας πλαίσια Ethernet)	GEM ενθυλάκωση
Χρήση FEC	Όχι	RS(255,239)	RS(255,239)
Οργάνωση, διαχείριση & συντήρηση	PLOAM και ATM	802.3ah OAM Ethernet πλαίσια	Πεδία του GTC πλαισίου και ATM/GEM OAM

Σχ.7.1 – σύγκριση προδιαγραφών TDM-PONs

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, εύκολα μπορεί κάποιος να συμπεράνει πως τόσο τα GPONs, όσο και τα EPONs, υπερτερούν σε πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά έναντι των BPONs. Ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η χρήση FEC, καθώς και το αυστηρό μήκος των 53 bytes για τα ATM πλαίσια είναι μερικοί από τους πιο σημαντικούς λόγους για τους οποίους η λύση της χρησιμοποίησης BPON για το δίκτυο πρόσβασης έδωσε γρήγορα τη θέση της στα νεότερα TDM παθητικά δίκτυα.

7.1.2 Σύγκριση 10GPON και WDM-PON

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, τόσο η IEEE όσο και η ITU ασχολήθηκαν με την περαιτέρω ανάπτυξη των EPON και GPON και κατέληξαν στα αντίστοιχα πρότυπα των 10GEPON και 10GPON. Έδωσαν έτσι τη δυνατότητα για ρυθμούς μετάδοσης που αγγίζουν τα 10Gbps για το ρεύμα καθόδου και τα 2.5Gbps για το ρεύμα ανόδου. Και ενώ τα TDM δίκτυα εκσυγχρονίζονταν για να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις αυξημένες ανάγκες σε bandwidth, ένας νέος τρόπος αξιοποίησης των διαθέσιμων μηκών κύματος, με τη χρήση WDM-PONs, πρόσφερε νέες δυνατότητες στα δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια συνοπτική σύγκριση χαρακτηριστικών των 10GPON και WDM-PON [22].

	10GPON	WDM-PON
Standard	ITU G.984	Δεν έχει προτυποποιηθεί
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στο ρεύμα καθόδου	10Gbps σε κοινή χρήση (320Mbps ανά συνδρομητή)	1.25Gbps ανά κανάλι
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στο ρεύμα ανόδου	2.5Gbps σε κοινή χρήση	1-10Gbit/s ανά κανάλι
Λόγος διαχωρισμού	1:64	1:128
Φυσική απόσταση	20km	40km

Σχ.7.2 – σύγκριση χαρακτηριστικών 10GPON και WDM-PON

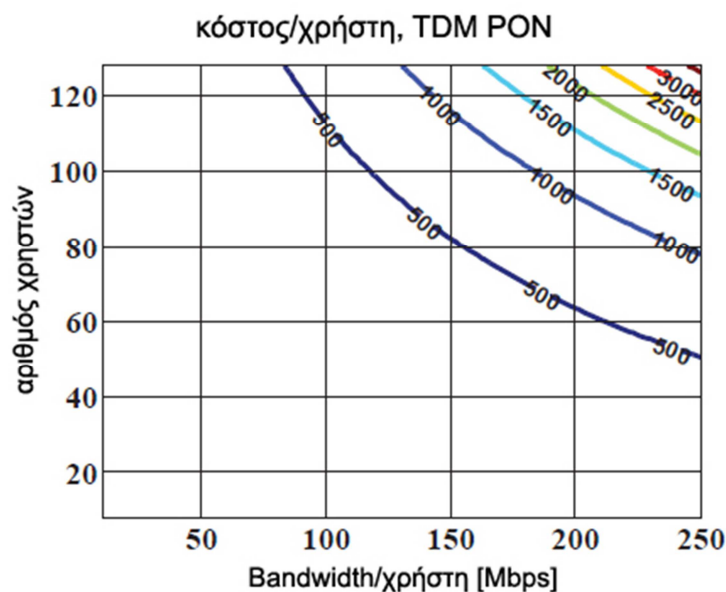
Με μια προσεκτική παρατήρηση του παραπάνω πίνακα, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι τα WDM-PONs υπερτερούν σε χαρακτηριστικά όπως η φυσική απόσταση και ο λόγος διαχωρισμού, ενώ στις περιπτώσεις που το δίκτυο εξυπηρετεί πολλούς χρήστες το WDM-PON προσφέρει μεγαλύτερο bandwidth στον κάθε χρήστη αφού του προσφέρει την πλήρη αξιοποίηση ενός καναλιού μήκους κύματος. Αυτό το χαρακτηριστικό τους έχει το πλεονέκτημα ότι προσφέρει περισσότερη ασφάλεια στον κάθε χρήστη αφού το κάθε κανάλι είναι αφιερωμένο σε έναν μόνο χρήστη και δεν υπάρχει κοινή χρήση σε κανένα σημείο του δικτύου.

7.2 Ανάλυση κόστους των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε

TDM και WDM PONs

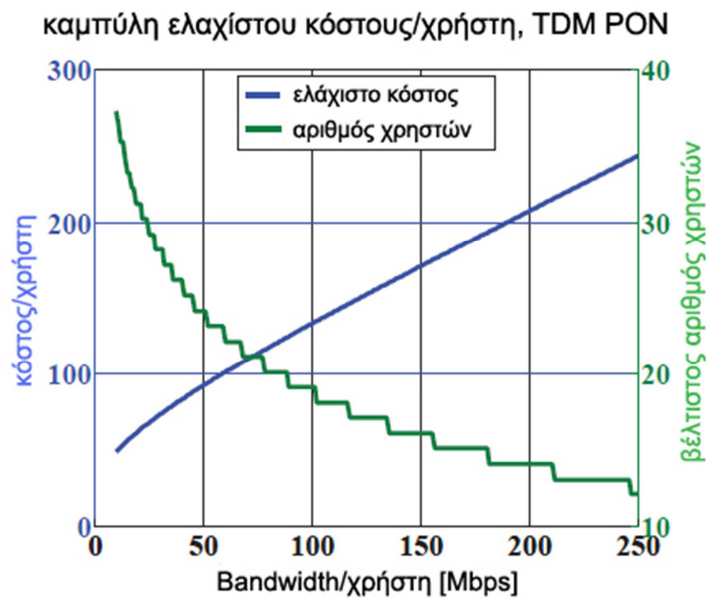
Στις μέρες μας, πολύ πάροχοι υπηρεσιών internet δίνουν πρόσβαση στους συνδρομητές τους μέσω παθητικών οπτικών δικτύων. Παρόλο που τα περισσότερα από αυτά τα δίκτυα είναι TDM τεχνολογίας, η χρήση WDM τεχνολογίας υπόσχεται καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης και για το λόγο αυτό τα WDM-PONs αναμένεται να είναι πιο συμφέροντα οικονομικά στις περιπτώσεις που θέλουμε μέγιστο ρυθμό δεδομένων ανά συνδρομητή. Μια ανάλυση κόστους των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα TDM και WDM PONs, όπως δημοσιεύεται στο «Hardware Cost and Capacity Analysis of Future TDM- and WDM-PON Access Networks» [23], δίνει αρκετά συμπεράσματα για τις περιπτώσεις στις οποίες υπερτερεί η μία τεχνολογία έναντι της άλλης. Το πιο σημαντικό από όλα τα συμπεράσματα είναι ότι η TDM τεχνολογία είναι πιο «φθηνή» στα χαμηλά bandwidths, αλλά όσο το bandwidth μεγαλώνει τόσο ισχυροποιείται και προτιμάται η WDM τεχνολογία. Όλα αυτά αφορούν περιοχές μεγάλης πυκνότητας χρηστών, όπως π.χ. μητροπολιτικά δίκτυα.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνάρτηση κόστους των στοιχείων ενός TDM-PON. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι τιμές κόστους ανά χρήστη εξαρτημένες από τον αριθμό των χρηστών και το μέγιστο bandwidth ανά χρήστη. Κάθε γραμμή του σχήματος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο κόστος ανά χρήστη. Από αυτά προκύπτει ότι όταν αυξάνεται τόσο ο αριθμός των χρηστών, όσο και η τιμή του bandwidth ανά χρήστη, τότε αυξάνεται κατά πολύ και το κόστος ανά χρήστη.



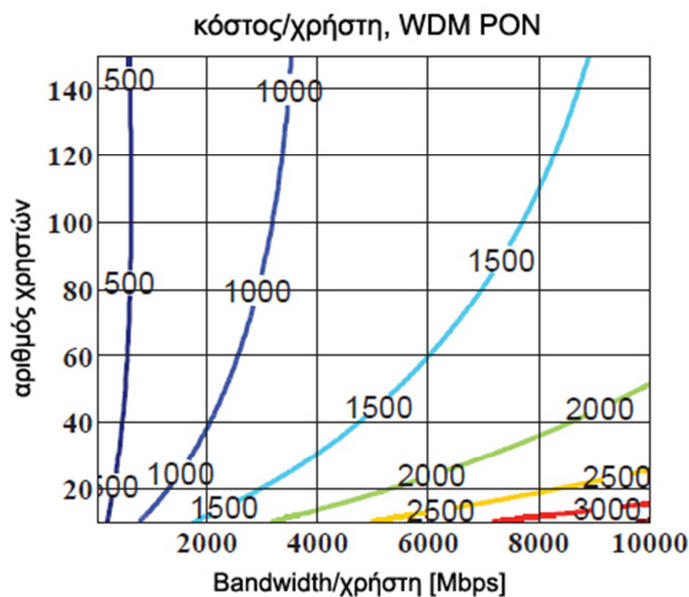
Σχ.7.3 – συνάρτηση κόστους των στοιχείων ενός TDM PON ανά χρήστη

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνάρτηση ελαχίστου κόστους των στοιχείων ανά χρήστη ενός TDM-PON με τη μπλε γραμμή, ενώ με τη πράσινη γραμμή ο βέλτιστος αριθμός χρηστών του δικτύου.



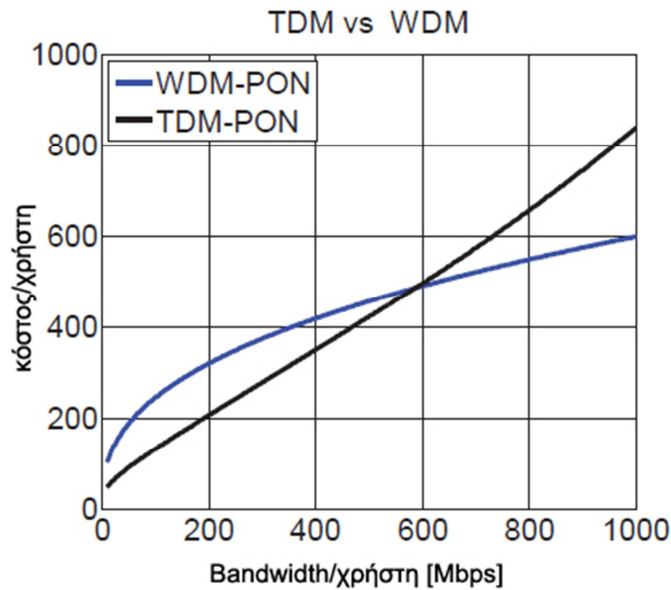
Σχ.7.4 – καμπύλη ελαχίστου κόστους των στοιχείων ενός TDM PON ανά χρήστη

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα κόστους των στοιχείων ενός WDM-PON. Είναι εμφανές από το σχήμα ότι όταν πρόκειται για μικρό αριθμό χρηστών, το κόστος είναι υπερβολικά μεγάλο. Είναι πιο συμφέρον για τους παρόχους στις περιπτώσεις λίγων χρηστών να χρησιμοποιούν σημείο προς σημείο δίκτυα, γιατί είναι δίκτυα πολύ απλά οπότε το κόστος των στοιχείων τους είναι αρκετά μειωμένο.



Σχ.7.5 – συνάρτηση κόστους των στοιχείων ενός WDM PON ανά χρήστη

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι συναρτήσεις ελαχίστου κόστους στοιχείων ανά χρήστη τόσο του TDM-PON όσο και του WDM-PON.



Σχ.7.6 – σύγκριση TDM και WDM PONs

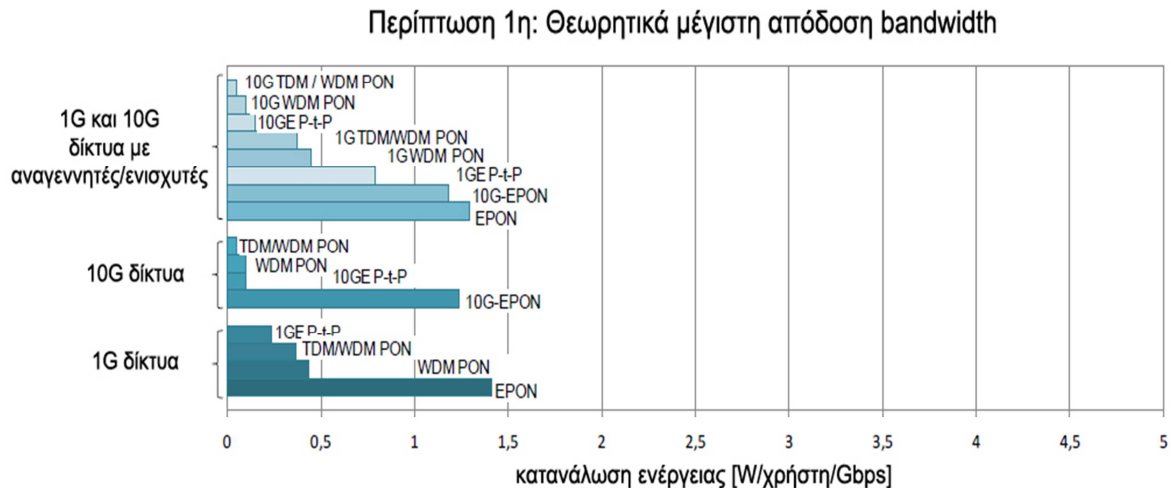
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι για τιμές bandwidth ανά χρήστη μεγαλύτερες των 600Mbps είναι προτιμότερη η ανάπτυξη WDM-PONs παρά TDM-PONs.

7.3 Συγκριτικό κατανάλωσης ενέργειας

Η νέες «bandwidth-hungry» εφαρμογές του ιντερνέτ, καθώς επίσης και ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συνδρομητών του δικτύου πρόσβασης, έχουν οδηγήσει στην σχεδίαση και ανάπτυξη νέας γενιάς παθητικών οπτικών δικτύων. Οι πολιτικές προστασίας του περιβάλλοντος, όπως επίσης και ο διαχρονικός στόχος της μείωσης του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας, αποτελούν ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να αντιμετωπιστεί από τα δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς.

Ας δούμε ένα υβριδικό TDM/WDM PON συγκρινόμενο στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας με ένα point-to-point Ethernet δίκτυο, ένα 1G-EPON και ένα 10G-EPON. Όπως αναφέρεται στο «Power Efficiency of Extended Reach 10G-EPON and TDM/WDM PON» [24] η σύγκριση αφορά σε δίκτυα συμμετρικών ρυθμών μετάδοσης για τα δύο ρεύματα κίνησης, ενώ εξετάζεται και η περίπτωση χρήσης στοιχείων που αναγεννούν ή ενισχύουν το οπτικό σήμα για να αυξήσουν την εμβέλεια του δικτύου. Για το WDM-PON έχουν χρησιμοποιηθεί colorless ONUs με ανακλαστικούς SOAs (RSOAs), οι οποίοι δεν απαιτούν πομπούς laser στις ONUs και διατηρούν το κόστος όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Επιπρόσθετα, στο WDM-PON χρησιμοποιούνται 32 κανάλια μήκους κύματος σε περιοχές των 100GHz.

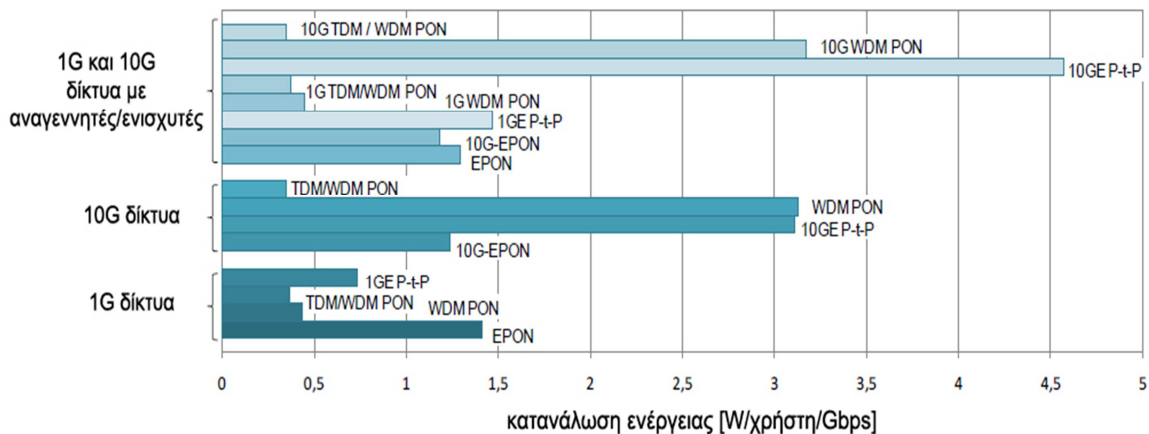
Στον πίνακα που ακολουθεί απεικονίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε Watts/χρήστη/Gbps με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται πλήρως το διαθέσιμο bandwidth σε όλα τα υπό εξέταση δίκτυα. Από τα στοιχεία προκύπτει ότι τα TDM/WDM PONs και τα απλά WDM PONs είναι η πιο συμφέρουσες λύσεις τόσο για τις τοπολογίες των 10G όσο και για τις τοπολογίες των 1-10G με τη χρήση αναγεννητών/ενισχυτών. Μόνο στην περίπτωση της τοπολογίας του 1G υπάρχει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για ένα point-to-point EPON δίκτυο.



Σχ.7.7 – σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας στο σενάριο μέγιστης αξιοποίησης bandwidth

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας σε Watts/χρήστη/Gbps σε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο κατά το οποίο δεν γίνεται πλήρης εκμετάλλευση του διαθέσιμου bandwidth εφαρμόζοντας κάποιους περιορισμούς στο τοπικό κέντρο. Αυτό είναι φυσιολογικό αφού στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν δίκτυα στα οποία οι χρήστες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα όλο το bandwidth που τους αντιστοιχεί. Από τον πίνακα προκύπτει ότι και σε αυτή την ρεαλιστική περίπτωση τα υβριδικά TDM/WDM PONs αποτελούν την συμφέρουσα λύση ως προς την κατανάλωση ενέργειας σε όλες τις περιπτώσεις. Όσον αφορά τα απλά WDM PONs παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν καλύτερη κατανάλωση ενέργειας από τα αντίστοιχα EPON δίκτυα μόνο στη περίπτωση των 1G δικτύων χωρίς αναγεννητές ή ενισχυτές.

Περίπτωση 2η: Ρεαλιστική περιορισμένη απόδοση bandwidth



Σχ.7.8 – κατανάλωσης ενέργειας στο σενάριο μερικής αξιοποίησης bandwidth

7.4 Σύγκριση κόστους 10GPON και WDM-PON

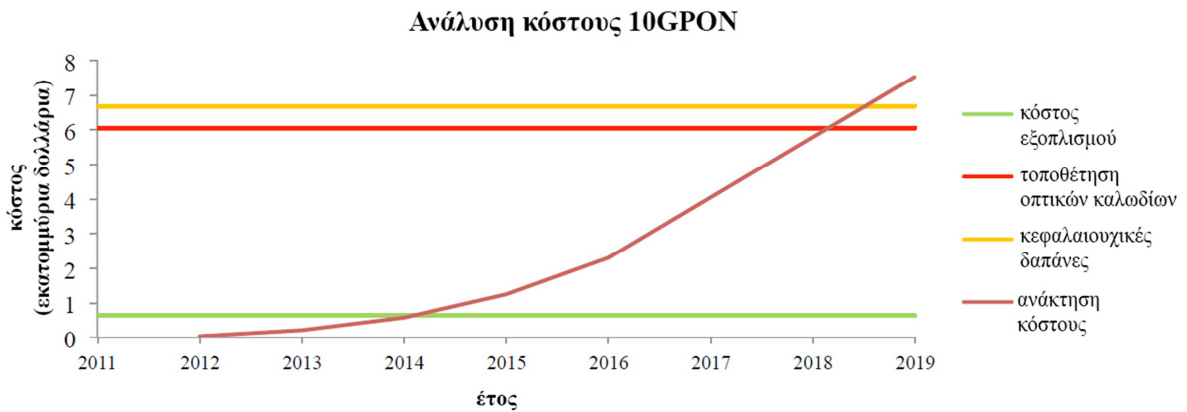
Μια σύγκριση κόστους ανάμεσα σε ένα 10GPON και ένα WDM-PON επιχειρείται στο «Technological and cost-based comparison of next generation PON technologies: 10GPON and WDM PON» [22]. Συγκεκριμένα αφορά την ανάπτυξη των συγκεκριμένων FTTH δικτύων σε μια προστακτική περιοχή 10000 τερματικών χρηστών.

Το υπό εξέταση κόστος περιλαμβάνει τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), τις δαπάνες παροχής υπηρεσιών, τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου, καθώς επίσης και τις δαπάνες marketing για την προσέγγιση νέων συνδρομητών στο δίκτυο.

Μια παραδοχή για την σύγκριση αυτή αφορά την διεύθυνση του υπό εξέταση δικτύου στην αγορά. Υπολογίζεται ότι ξεκινώντας από την χρονιά 0, το ποσοστό της διεύθυνσης αυξάνεται σταδιακά ανά χρονιά και σταθεροποιείται στο 20% τη χρονιά 5.

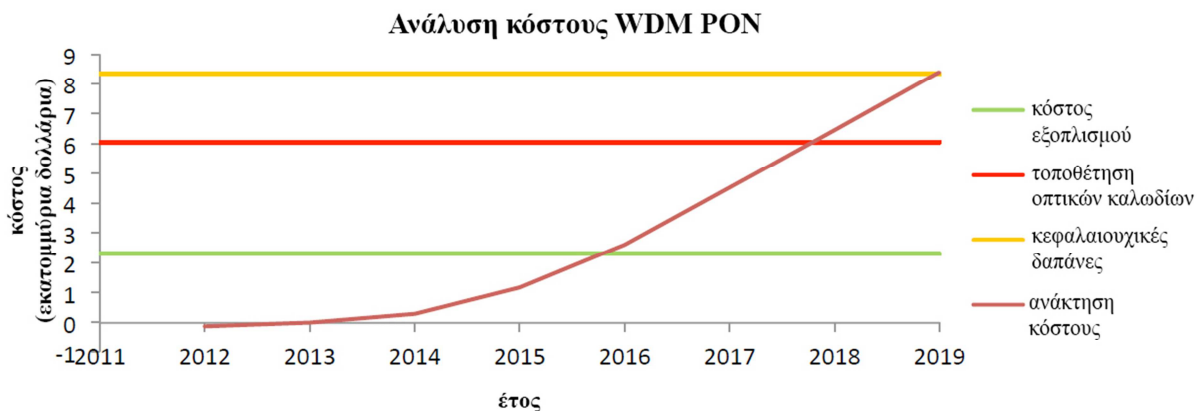
Μια ακόμη παραδοχή αφορά τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού του δικτύου, η οποία ορίζεται στα 7 χρόνια, καθώς επίσης και τη διάρκεια ζωής του οπτικού καλωδίου, η οποία ορίζεται στα 10 χρόνια. Σύμφωνα με αυτές τις υποθέσεις, καθώς και με την παραδοχή ότι η διεύθυνση του δικτύου θα φτάσει στο 20%, ένας από τους στόχους της ανάλυσης, ο οποίος καθορίζει και την τιμολογιακή πολιτική, είναι να αποσβεστεί το κόστος του εξοπλισμού στα 4 χρόνια, και το κόστος των οπτικών καλωδίων στα 8 χρόνια.

Με βάση τα παραπάνω προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα για τις καμπύλες κόστους του 10GPON. Να σημειωθεί ότι για να ανακτήσει ο πάροχος το αρχικό ποσό κόστους του εξοπλισμού σε 4 χρόνια και το κόστος των οπτικών καλωδίων σε 7 χρόνια θα πρέπει να χρεώνει την υπηρεσία στα 104\$ τον μήνα.



Σχ.7.9 – καμπύλες ανάλυσης κόστους για τη λύση 10GPON

Για το WDM PON αντίστοιχα προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα για τις καμπύλες κόστους του. Να προστεθεί ότι για να ανακτήσει ο πάροχος το αρχικό κόστος του εξοπλισμού σε 4 χρόνια και το κόστος των οπτικών καλωδίων σε 7 χρόνια θα πρέπει να χρεώνει την υπηρεσία στα 126\$ τον μήνα.



Σχ.7.10 – καμπύλες ανάλυσης κόστους για τη λύση WDM PON

Από την σύγκριση των παραπάνω μπορούμε να πούμε πως το WDM PON έχει υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης εν συγκρίσει με το 10GPON, και αυτό αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των πελατών που εξυπηρετεί. Για το λόγο αυτό, για να γίνει απόσβεση κόστους εξοπλισμών σε 4 χρόνια και κόστους οπτικών ινών σε 8 χρόνια, θα πρέπει ο συνδρομητής του WDM PON να πληρώνει μηνιαίως 1.21 φορές περισσότερα χρήματα από τον συνδρομητή του 10GPON, για την παροχή ίσου bandwidth και στις δύο περιπτώσεις. Όλα αυτά βέβαια ισχύουν για περιοχή ενός προαστίου 10000 τετραμετρικών χρηστών.

Μπορεί σε μια ανάλυση σαν την παραπάνω η επιλογή του 10GPON να φαίνεται ως κατάλληλο αλλά δεν πρέπει να παραβλέψουμε και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ένα WDM PON. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός WDM PON είναι η εμβέλεια του. Σε αντίθεση με ένα 10GPON που μπορεί να καλύψει δίκτυο έως 20km, το WDM PON μπορεί να φτάσει να καλύπτει αποστάσεις ακόμη και 40km. Επιπλέον, τα WDM PONs έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να

παρέχουν υψηλότερο bandwidth από τα 10GPON, σε μεγάλο αριθμό συνδρομητών, και σε συμμετρική μορφή. Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι OLTs που χρησιμοποιούνται στα WDM PONs καταναλώνουν πολύ μικρότερη ενέργεια από τους αντίστοιχους OLTs των 10GPONs. Αυτό είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό όταν το δίκτυο πρόσβασης απλώνεται σε μεγάλες περιοχές, με πολλούς συνδρομητές, και φυσικά με απαίτηση για μεγάλο αριθμό OLTs.

7.5 Συμπεράσματα

Είναι αναμφισβήτητο πως οι απαιτήσεις των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων έχουν ως συνισταμένη την παροχή υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης. Με το πέρασμα των χρόνων ο παγκόσμιος ιστός γιγαντώνεται, οι χρήστες του αυξάνονται, ενώ συνεχώς γίνονται διαθέσιμες νέες υπηρεσίες προς αυτούς. Οι απαιτήσεις για επιπλέον bandwidth συνεχώς αυξάνονται. Για να ανταπεξέλθει το δίκτυο πρόσβασης στις νέες συνθήκες που διαμορφώνονται είναι απαραίτητη η μετάβαση εξ' ολοκλήρου από τα καλώδια χαλκού σε καλώδια οπτικών ινών.

Τα TDM παθητικά οπτικά δίκτυα αποτέλεσαν μια αρκετά φθηνή και εύκολα υλοποιήσιμη λύση για την αναβάθμιση του δικτύου πρόσβασης. Από τις πρώτες υλοποιήσεις των APON-BPON, μέχρι αυτές των EPON και GPON, αλλά και τις πιο πρόσφατες των 10GEPON και 10GPON, ένας ήταν ο κοινός βασικός στόχος, η υποστήριξη ακόμη μεγαλύτερης ταχύτητας μετάδοσης της πληροφορίας σε όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες, και σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερες αποστάσεις.

Τα τελευταία χρόνια, σε μια προσπάθεια καλύτερης αξιοποίησης του bandwidth έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές αρχιτεκτονικές WDM-PONs. Το διαφορετικό που προσφέρουν τα WDM-PONs σε σχέση με τα TDM PONs είναι η καλύτερη εξερεύνηση της μάντας των συχνοτήτων με σκοπό την βέλτιστη αξιοποίηση της. Έχουν προταθεί λύσεις ανάπτυξης υβριδικών παθητικών δικτύων (TDM και WDM PONs), αλλά και λύσεις αποκλειστικής χρήσης WDM PON. Στόχος αυτής της προσπάθειας είναι η μετάβαση του δικτύου πρόσβασης στην τοπολογία FTTH και στην αφιέρωση ενός καναλιού συχνοτήτων μιας ίνας σε κάθε συνδρομητή.

Όσον αφορά τη μέχρι τώρα ανάπτυξη των TDM-PONs ανά τον κόσμο, κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η χρήση της τοπολογίας δέντρου. Συναντάμε την χρήση GPON δικτύων σε χώρες της Ευρώπης και της Βορείου Αμερικής, ενώ τα EPON δίκτυα προτιμούνται στην Ασία. Ειδικότερα, η χρήση των EPON δικτύων υποστηρίχτηκε από χώρες όπως η Ιαπωνία και η Νότιος Κορέα, ενώ τώρα γνωρίζει τεράστια εξάπλωση και στη Κίνα. Η εξάπλωση αυτή είναι ικανή να μειώσει κατά πολύ τα κόστη κατασκευής των δικτύων αυτών, καθώς επίσης να επηρεάσει και τις στρατηγικές επιλογές πάνω στο θέμα αυτό χωρών της Ανατολικής Ευρώπης, όπως η Ρωσία και η Λευκορωσία, που μπορούν να ακολουθήσουν το παράδειγμα της Κίνας. Σχετικά με τις ΗΠΑ, η κύρια τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι αυτή των GPON δικτύων, ενώ είναι πιθανή και η παρουσία ορισμένων EPON υλοποιήσεων. Στην Ευρώπη από την άλλη, χώρες που ηγούνται στην ανάπτυξη FTTH/B

υλοποιήσεων, όπως οι Λιθουανία, Σουηδία, Νορβηγία, Σλοβενία και Σλοβακία, χρησιμοποιούν GPON δίκτυα, δείχνοντας τον δρόμο στις χώρες που τις ακολουθούν.

Από τα συγκριτικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο μπορούμε να συμπεράνουμε πως το μέλλον των παθητικών δικτύων πρόσβασης έχει να κάνει με την ισχυρή παρουσία των WDM PONs. Αυτή την στιγμή σε όλον τον κόσμο, η συντριπτική πλειοψηφία των παθητικών δικτύων που έχουν αναπτυχθεί αποτελείται από TDM PONs. Η μετάβαση στα WDM PONs, στις περιοχές που υπάρχουν ήδη TDM PONs, είναι πιο συμφέρον να γίνει σταδιακά με τον εμπλουτισμό των υπαρχόντων δικτύων και την δημιουργία υβριδικών PONs. Να γίνει δηλαδή εκμετάλλευση των υφισταμένων δομών ώστε να κρατηθεί χαμηλά το κόστος της ανάπτυξης των νέων δικτύων αλλά και να ακολουθηθεί ο ρυθμός εισχώρησης της αρχιτεκτονικής FTTH, ο οποίος αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε χαμηλή τιμή. Με το πέρασμα των χρόνων όμως, και με τις υπάρχουσες προτάσεις παθητικών οπτικών δικτύων, μοιάζει να είναι μονόδρομος η μετάβαση όλου του δικτύου πρόσβασης σε WDM υλοποιήσεις με την οπτική ίνα να φτάνει μέχρι τον τελικό χρήστη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ITU, ICT Facts and Figures 2014, 2014
- [2] CISCO, Visual Networking Index (VNI) Forecast 2009-2014, 2010
- [3] Gerd Keiser, FTTX Concepts and Applications, John Wiley & Sons Inc., 2006
- [4] Biswanath Mukherjee, Optical WDM Networks, Springer US, 2006
- [5] N. Ansari and J. Zhang, Media Access Control and Resource Allocation: For NextGeneration Passive Optical Networks, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-1-4614-3939-4 1, © The Authors 2013
- [6] Neophytos (Neo) Antoniadou, Georgios Ellinas, Ioannis Roudas, WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering, Springer Science & Business Media, 2011
- [7] Paul E. Green Jr., Fiber to the Home - The New Empowerment, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons Inc., 2006
- [8] Microsoft Technet, ATM Cell Structure, <https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc976978.aspx>
- [9] ITU-T G.983.1 (2005) Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)
- [10] IEEE Standard 802.3ah-2004
- [11] Kramer, G., Mukherjee, B. and Maislos, A. (2003) Ethernet Passive Optical Networks, in IP over WDM: Building the Next-Generation Optical Internet (ed S. Dixit), John Wiley & Sons, Inc.
- [12] IEEE Standard 802.3av-2009
- [13] ITU-T G.984.1 (2008) Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics
- [14] ITU-T G.7041/Y.1303 Generic framing Procedure

- [15] Ivica Cale, Aida Salihovic, Matija Ivekovic, Gigabit Passive Optical Network – GPON, Proceedings of the ITI 2007 29th Int. Conf. on Information Technology Interfaces, June 25-28, 2007, Cavtat, Croatia
- [16] ITU-T G984.2 (2003) Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification
- [17] ITU-T G984.3 Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification
- [18] ITU-T G984.7 (2010) Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Long reach
- [19] Josep Prat Editor, Next-Generation FTTH Passive Optical Networks – Research Towards Unlimited Bandwidth Access, Springer Science + Business Media B.V, 2008
- [20] Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke and Huan Song, Sunhee Yang, Glen Kramer, Kwangjoon Kim, Biswanath Mukherjee, Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review, © 2005 Optical Society of America JON 7837 November 2005 / Vol. 4, No. 11 / JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING
- [21] Steven S. Gorshe, FTTH/FTTC Technologies and Standards, China Communications December 2006
- [22] Chandan Bhagat, Kedar Raje, Rohit Shetye, Amit Vaity, Technological and cost-based comparison of next generation PON technologies: 10GPON and WDM PON, University of Colorado, Boulder, 2 May 2011
- [23] József Czékus, Péter Megyesi, Attila Mitcsenkov, and Dániel Mazroa, Hardware Cost and Capacity Analysis of Future TDM- and WDM-PON Access Networks, Budapest University of Technology and Economics, Hungary
- [24] Ana Lovrić, Slaviša Aleksić, Power Efficiency of Extended Reach 10G-EPON and TDM/WDM PON, Vienna University of Technology, Institute of Broadband Communications