



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ(PON)**  
**THE EVOLUTION OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS (PON)**

**ΧΡΥΣΙΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**Εισηγητής: ΜΠΟΓΡΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**  
**ΧΡΥΣΙΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**  
**CS151139**

**Εισηγητής: ΜΠΟΓΡΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Μπόγρης Αντώνιος**  
**Ψαρράς Νικόλαος**  
**Μάμαλης Βασίλειος**

**Ημερομηνία εξέτασης**

**14/07/2022**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

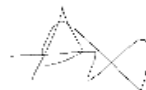
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Χρυσικός Δημήτριος του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 151139 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών πληροφορικής και υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο/Η Δηλών/ούσα



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως αυτό των Παθητικών οπτικών δικτύων. Την προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου, Μπόγγρης Αντώνιος, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω.

## Περίληψη

Η οπτική πρόσβαση αποκτά όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς η ζήτηση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης γίνεται μεγαλύτερη. Οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης είναι η αυξανόμενη επεξεργαστική ισχύς των χρηστών και η ανάπτυξη υπηρεσιών που απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης από αυτό που είναι διαθέσιμο στα σημερινά δίκτυα πρόσβασης. Οι επικρατούσες τεχνικές πρόσβασης, όπως τα ψηφιακά συστήματα συνδρομητικών γραμμών και τα καλωδιακά μόντεμ, είναι ικανές να υποστηρίξουν ρυθμούς πρόσβασης έως και δεκάδες Gbit/s ανά χρήση.

Η οπτική πρόσβαση προσφέρει σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και μεγαλύτερες αποστάσεις μεταφοράς. Το υψηλό κόστος ήταν ο κυριότερος παράγοντας που επιβράδυνε τη διείσδυση της οπτικής πρόσβασης. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες εναλλακτικές έννοιες μεταφοράς για την αντιμετώπιση του προβλήματος του κόστους καθώς και των τεχνικών προβλημάτων. Οι τεχνικές παθητικών οπτικών δικτύων αναμένεται να αποτελέσουν σε μεγάλο βαθμό τις πιο οικονομικές λύσεις. Η παρούσα έκδοση εξετάζει την κατάσταση της τεχνικής της οπτικής πρόσβασης εστιάζοντας στην πληρέστερη επεξήγηση ορισμένων από τις πιο γνωστές έννοιες. Η επισκόπηση συμπληρώνεται με μια αξιολόγηση της βιωσιμότητας των πιο γνωστών εννοιών. Τέλος, συγκρίνεται το κόστος δικτύου ορισμένων εννοιών οπτικής μεταφοράς με βάση τη χρήση της χωρητικότητας του καναλιού μεταφοράς.

## **Abstract**

The optical access is gaining more interest as the demand for higher and higher bandwidth is getting stronger. The major drivers for larger bandwidth are the increasing processing power of user terminals and development of services that require substantially larger bandwidth than available in present day access networks. The prevailing access techniques, such as the digital subscriber line systems and cable modems, are capable of supporting up to few tens of Mbit/s access rates per user, but the transport distance is limited. The optical access offers significantly higher bit rates and longer transport distances. The high cost has been the foremost factor that has been slowing down penetration of the optical access.

A number of alternative transport concepts have been developed to tackle the cost problem as well as the technical ones. The passive optical network techniques are largely anticipated to be the most economical solutions. This publication surveys the state of the art of the optical access concentrating on explaining more thoroughly some of the best known concepts. The survey is complemented with an assessment of the viability of the most well known concepts. Finally network costs of some optical transport concepts are compared based on the utilisation of the transport channel capacity.

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	6
Abstract.....	7
Κατάλογος σχημάτων .....	10
Κατάλογος πινάκων .....	10
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Ορισμοί.....	14
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	16
2. Τεχνολογία οπτικών παθητικών δικτύων.....	21
2.1 Ανάπτυξη προτύπων.....	21
2.2 Χαρακτηριστικά.....	22
2.2.1 Οπτικά εξαρτήματα χαμηλού κόστους.....	22
2.2.2 Απλή αρχιτεκτονική δικτύου (FTTH, FTTC).....	23
2.2.3 Οικονομικά αποδοτική μεταφορά δεδομένων.....	24
2.3 παθητικό οπτικό δίκτυο βασισμένο στο ATM (ATM-PON).....	26
2.4 Ευρυζωνικό οπτικό παθητικό δίκτυο (B-PON).....	27
2.4.1 Convergence(Σύγκλιση) του επιπέδου μετάδοσης.....	27
2.4.2 Transmission concept (point to multipoint).....	29
2.5 Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet.....	30
2.5.2 Πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο.....	31
2.5.3 Transmission concepts.....	34
2.6 Παθητικό οπτικό δίκτυο 2,6 Gbps (G-PON).....	35
2.6.1 Transmission convergence layer.....	35
2.6.2 Πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο G-PON.....	36
2.6.3 Transmission.....	42
2.7 PONs με χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM).....	42
2.8 Super-PON.....	44
2.9 Next Generation PON.....	45
3. Μέθοδοι point-to-point.....	48
3.1 Ψηφιακή πλησιόχρονη ιεραρχία.....	48
3.2 Διαδοχική ψηφιακή ιεραρχία.....	48
3.2.1 SDH επόμενης γενιάς.....	49
3.3 Ethernet.....	50
3.3.1 Πρόσβαση στην υπηρεσία Ethernet.....	51
3.3.2 Υπηρεσίες για τη μεταφορά Ethernet.....	52



3.4 Δίκτυο οπτικών μεταφορών .....	53
4. Τεχνικές τελευταίου μιλίου – last mile.....	55
4.1 Ασύρματη πρόσβαση .....	55
4.2 Ψηφιακή συνδρομητική γραμμή .....	56
4.3 Υβριδικό δίκτυο οπτικών ινών ομοαξονικού τύπου.....	56
4.3.1 Προδιαγραφές διεπαφής υπηρεσίας δεδομένων μέσω καλωδίου .....	58
4.3.2 Ethernet στο σπίτι.....	59
4.3.3 Δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης επόμενης γενιάς.....	60
5. Οπτική μετάδοση .....	62
5.1 Ανάγκες για το επερχόμενο οπτικό δίκτυο πρόσβασης.....	62
5.1.1 Λειτουργικότητα του δικτύου.....	62
5.1.2 Υπηρεσίες για δίκτυα .....	64
5.1.3 Κόστος.....	65
5.1.4 Ενοποίηση δικτύων .....	66
5.2 Αξιολόγηση των μεθόδων παθητικού οπτικού δικτύου .....	67
5.2.1 Ευρυζωνικό οπτικό παθητικό δίκτυο .....	68
5.2.2 Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet.....	69
5.2.3 Δυνατότητα παθητικού οπτικού δικτύου Gigabit.....	71
5.2.4 Παθητικό οπτικό δίκτυο με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος.....	73
5.2.5 Έκτακτο παθητικό οπτικό δίκτυο.....	73
5.3 Αξιολόγηση των διαδικασιών point-to-point.....	74
5.3.1 Ψηφιακές πλειόχρονες και σύγχρονες ιεραρχίες .....	74
5.3.2 Ethernet σημείο-προς-σημείο .....	75
5.3.3 Οπτικό δίκτυο μεταφοράς .....	76
5.4 Αξιολόγηση των μεθόδων πρόσβασης .....	77
5.4.1 Πρόσβαση στην καλωδιακή τηλεόραση .....	77
5.4.2 Πρόσβαση μέσω καλωδιακής γραμμής .....	79
5.4.3 Ασύρματη σύνδεση.....	80
6. Παροχή υπηρεσιών εικονικού ιδιωτικού δικτύου .....	82
6.1 Διαμόρφωση εικονικών ιδιωτικών δικτύων .....	82
6.1.1 Ιδιωτικά εικονικά δίκτυα επιπέδου 1 .....	83
6.1.2 Ιδιωτικά εικονικά δίκτυα επιπέδου 2 .....	83
6.1.3 Ιδιωτικά εικονικά δίκτυα επιπέδου 3 .....	84
6.1.4 Προβλήματα με τη διαμόρφωση εικονικών ιδιωτικών δικτύων.....	85
6.2 Πρωτόκολλο επέκτασης Ethernet.....	87
6.3 Εικονικά ιδιωτικά δίκτυα επιπέδου 2 .....	89
6.3.1 Συνδέσεις ψευδοσυρμάτων .....	89
6.3.2 ATM μέσα σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων.....	92

6.3.3 TDM σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων .....	93
6.3.4 Τα πάντα μεταφέρονται μέσω Ethernet.....	94
6.3.5 Υπηρεσίες εικονικών ιδιωτικών δικτύων στο επίπεδο 2.....	95
<b>6.4 Παροχή εικονικών ιδιωτικών δικτύων επιπέδου 2 με χρήση τεχνολογιών οπτικής πρόσβασης.....</b>	<b>98</b>
6.4.1 Επόμενη γενιά PDH και SDH/SONET .....	98
6.4.2 Ethernet σημείο-προς-σημείο .....	98
6.4.3 Οπτικό παθητικό ευρυζωνικό δίκτυο A .....	99
6.4.4 Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet.....	99
6.4.5 Παθητικό οπτικό δίκτυο με δυνατότητα Gigabit.....	100
<b>7. Συμπεράσματα .....</b>	<b>100</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>103</b>

## Κατάλογος σχημάτων

<a href="#">Εικόνα 1 Κατασκευή και ορολογία ενός ευρυζωνικού δικτύου δεδομένων.....</a>	19
<a href="#">Εικόνα 2 Γενική αρχιτεκτονική και ορολογία PON .....</a>	26
<a href="#">Εικόνα 3 Αρχή μεταφοράς PON.....</a>	27
<a href="#">Εικόνα 4 Κατανομή μήκους κύματος για ένα B-PON μονής ίνας .....</a>	31
<a href="#">Εικόνα 5 Δομή πλαισίου E-PON.....</a>	34
<a href="#">Εικόνα 6 Εύρος και χρονισμός E-PON.....</a>	35
<a href="#">Εικόνα 7 Αρχή μεταφοράς E-PON.....</a>	36
<a href="#">Εικόνα 8 Καθοδικό πλαίσιο G-PON.....</a>	41
<a href="#">Εικόνα 9 Ανερχόμενη ζεύξη πλαίσιο G-PON και γενικά έξοδα.....</a>	43
<a href="#">Εικόνα 10 Απλοποιημένη παρουσίαση του ελέγχου GTC MAC.....</a>	43
<a href="#">Εικόνα 11 Πολυπλεξία υπηρεσιών ATM και GEM στο G-PON.....</a>	45
<a href="#">Εικόνα 12 Τεχνικές WRPON και WPON.....</a>	47
<a href="#">Εικόνα 13 Υβριδικό δίκτυο οπτικών ινών-ομοαξόνων (HFC).....</a>	58
<a href="#">Εικόνα 14 Αρχιτεκτονική DOCSIS.....</a>	59
<a href="#">Εικόνα 15 Αρχιτεκτονική Ethernet-to-the-Home.....</a>	61
<a href="#">Εικόνα 16 Ταξινόμηση εικονικού ιδιωτικού δικτύου.....</a>	85
<a href="#">Εικόνα 17 Ενθυλάκωση Q-in-Q.....</a>	90
<a href="#">Εικόνα 18 Ενθυλάκωση MAC-in-MAC.....</a>	91
<a href="#">Εικόνα 19 Συνδέσεις ψευδοκαλωδίων σε μια σήραγγα PSN.....</a>	93
<a href="#">Εικόνα 20 Ενθυλάκωση ψευδοκαλώδιο.....</a>	94
<a href="#">Εικόνα 21 Ενθυλάκωση επιπέδου 2 Ethernet MPLS.....</a>	95
<a href="#">Εικόνα 22 Γενική μορφή ενθυλάκωσης ATM μέσω PSN.....</a>	96
<a href="#">Εικόνα 23 Ενθυλάκωση εξομοίωσης κυκλώματος SDH/SONET μέσω πακέτου (CEP).....</a>	97
<a href="#">Εικόνα 24 Ενθυλάκωση MPLS over Ethernet.....</a>	98
<a href="#">Εικόνα 25 Μοντέλο αναφοράς υπηρεσίας εικονικού ιδιωτικού τοπικού δικτύου.....</a>	99
<a href="#">Εικόνα 26 Hierarchical Virtual Private LAN Service.....</a>	101

## Κατάλογος πινάκων

<a href="#">Πίνακας 1 Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης ορισμένων τεχνικών ασύρματης πρόσβασης.....</a>	56
<a href="#">Πίνακας 2 Περίληψη των συνηθέστερων τεχνικών xDSL.....</a>	57

<b>Λίστα ακρωνύμων</b>	
<b>Αγγλικά</b>	<b>Μετάφραση σε Ελληνικά</b>
AAL5 ATM Adaptation Layer 5	AAL5 Επίπεδο προσαρμογής ATM 5
AES Advanced Encryption Standard	AES Σύνθετο πρότυπο κρυπτογράφησης
AIX Ames Internet Exchange	AIX Ames Internet Exchange
AN Access Node	AN Κόμβος πρόσβασης
ANSI American National Standard Institute	ANSI Αμερικανικό Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων
AON Active Optical Network	AON Ενεργό οπτικό δίκτυο
A-PON ATM based Passive Optical Network	A-PON Παθητικό οπτικό δίκτυο με βάση το ATM
APS Automatic Protection Switching	APS Αυτόματη μεταγωγή προστασίας
ASB Assured Bandwidth	ASB Διασφαλισμένο εύρος ζώνης
ASON Automatic Switched Optical Network	ASON Αυτόματο οπτικό δίκτυο με μεταγωγή
ASTN Automatic Switched Transport Network	ASTN Δίκτυο αυτόματης μεταγωγής
ATM Asynchronous Transfer Mode	ATM Ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς
AWG Arrayed Waveguide Gratings	AWG Συστοιχίες κυματοδηγών
BEB Best Effort Bandwidth	BEB Εύρος ζώνης βέλτιστης προσπάθειας
BGP Border Gateway Protocol	BGP Πρωτόκολλο συντοριακής πύλης
BoD Bandwidth on Demand	BoD Εύρος ζώνης κατ' απαίτηση
BPI Baseline Privacy Interface	BPI Βασική διεπαφή απορρήτου
B-PON Broadband Passive Optical Network	B-PON Ευρυζωνικό παθητικό οπτικό δίκτυο
CAC Connection Admission Control	CAC Έλεγχος αποδοχής σύνδεσης
CAIDA Cooperative Association for Internet Data Analysis	CAIDA Συνεργατική ένωση για την ανάλυση δεδομένων Διαδικτύου
CATV Community Antenna Television	CATV Community Antenna Television
CDMA Code Division Multiple Access	CDMA Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα
CE Customer Edge	CE Πελάτης Edge
CEP Circuit Emulation over Packet	CEP Εξομοίωση κυκλώματος μέσω πακέτου
CID Channel ID	CID Αναγνωριστικό καναλιού
CM Cable Modem	CM Καλωδιακό μόντεμ
CMTS Cable Modem Termination System	CMTS Σύστημα τερματισμού καλωδιακού μόντεμ
CO Central Office	CO Κεντρικό Γραφείο
CRC Cyclic Redundancy Check	CRC Κυκλικός έλεγχος πλεονασμού
DBA Dynamic Bandwidth Assignment	DBA Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης
DBRu Dynamic Bandwidth Report upstream	DBRu Δυναμική αναφορά εύρους ζώνης ανερχόμενης ζευξης
DES Data Encryption Standard	DES Πρότυπο κρυπτογράφησης δεδομένων
DFB Distributed Feedback	DFB Κατανεμημένη ανατροφοδότηση
DH Distribution Hubs	DH Κόμβοι διανομής
DHCP Dynamic Host Configuration Protocol	DHCP Δυναμικό πρωτόκολλο διαμόρφωσης κεντρικού υπολογιστή
DLCI ID Data Link Connection Identifier	Αναγνωριστικό σύνδεσης σύνδεσης δεδομένων
DOCSIS Data Over Cable Service Interface Specification	DLCI ID
DoS Data over SDH	DOCSIS Προδιαγραφή διασύνδεσης δεδομένων μέσω καλωδιακής υπηρεσίας
DSL Digital Subscriber Line	DoS Δεδομένα μέσω SDH
DSLAM Digital Subscribe Line Access Multiplexer	DSL Ψηφιακή συνδρομητική γραμμή
DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing	Πολυπλέκτης πρόσβασης σε ψηφιακή συνδρομητική γραμμή DSLAM
EDFA Erbium Doped Fibre Amplifiers	DWDM Πυκνή πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος
EFM Ethernet in the First Mile	EDFA Ενισχυτές οπτικών ινών ντοπαρισμένου ερβίου
EFMA Ethernet First Mile Alliance	EFM Ethernet στο πρώτο μίλι
E-LAN Ethernet LAN Service	EFMA Ethernet First Mile Alliance
ELS Ethernet Line Service	E-LAN Υπηρεσία Ethernet LAN
EMS Ethernet Multipoint Service	ELS Υπηρεσία γραμμής Ethernet
EMT Ethernet Multitap	EMS Υπηρεσία πολλαπλών σημείων Ethernet
ENM Ethernet Node Modem	EMT Ethernet Multitap
EoC Ethernet over Coax	ENM Ethernet Node Modem
EPM Ethernet POP Modem	
E-PON Ethernet Passive Optical Network	

ERMS Ethernet Relay Multipoint Service	EoC Ethernet over Coax
ERS Ethernet Relay Service	EPM Ethernet POP Modem
EttH Ethernet-to-the-Home	E-PON Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet
EWO Ethernet Wall Outlet	ERMS Υπηρεσία πολλαπλών σημείων
EWS Ethernet Wire Service	αναμετάδοσης Ethernet
FEC Forward Error Correction	ERS Υπηρεσία αναμετάδοσης Ethernet
FN Fibre Nodes	EttH Ethernet-to-the-Home
FSAN Full Service Access Networks	EWO Ethernet Wall Outlet
FTTB Fibre-To-The-Building	EWS Ethernet Wire Service
FTTC Fibre-To-The-Curb	FEC Forward Error Correction
FTTH Fibre-To-The-Home	FN Κόμβοι οπτικών ινών
FXB Fixed Bandwidth	FSAN Δίκτυα πρόσβασης πλήρους υπηρεσίας
GEM G-PON Encapsulation Method	FTTB Ίνες μέχρι το κτίριο
GFP Generic Framing Procedure	FTTC Ίνες στο προάστιο
G-PON Gigabit capable Passive Optical Network	FTTH Οπτικές ίνες μέχρι το σπίτι
GPRS General Packet Radio Service	FXB Σταθερό εύρος ζώνης
GRE Generic Routing Encapsulation	GEM Μέθοδος ενθυλάκωσης G-PON
GSM Global System for Mobile communications	GFP Γενική διαδικασία πλαισίωσης
HDLC High-level Data Link Control	G-PON Παθητικό οπτικό δίκτυο με δυνατότητα Gigabit
HDTV High Definition Television	GPRS General Packet Radio Service
HE Head-End	GRE Γενική ενθυλάκωση δρομολόγησης
HEC Header Error Control	GSM Παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών
HFC Hybrid Fibre Coaxial	HDLC Έλεγχος ζεύξης δεδομένων υψηλού επιπέδου
HVPLS Hierarchical VPLS	HDTV Τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers	HE Head-End
IETF Internet Engineering Task Force	HEC Έλεγχος σφαλμάτων κεφαλίδας
IPLS IP-only LAN-like Service	HFC Ομοαξονική υβριδική ίνα
IPsec Secure Internet Protocol	HVPLS Ιεραρχικό VPLS
ISDN Integrated Services Digital Network	IEEE Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
OAM Operation, Administration and Maintenance	IETF Ομάδα εργασίας μηχανικής του Διαδικτύου
OAMPDU OAM Protocol Data Units	IPLS IP-only LAN-like Service
OCDM Optical Code Division Multiplexing	IPsec Ασφαλές πρωτόκολλο διαδικτύου
ODN Optical Distribution Network	ISDN Ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων υπηρεσιών
OLT Optical Line Terminal	OAM Λειτουργία, διαχείριση και συντήρηση
ONU Optical Network Terminal	OAMPDU Μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου OAM
OTN Optical Transport Network	OCDM Οπτική πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα
OTP Optical Terminating Points	ODN Οπτικό δίκτυο διανομής
P2P Point-to-point	OLT Τερματικός σταθμός οπτικής γραμμής
PCBd Physical Control Block downstream	ONU Τερματικός σταθμός οπτικού δικτύου
PCM Pulse Code Modulation	OTN Οπτικό δίκτυο μεταφοράς
PDH Plesiochronous Digital Hierarchy	OTP Οπτικά σημεία τερματισμού
PE Provider Edge	P2P Σημείο-προς-σημείο
PLOAM Physical Layer Operation, Administration and Maintenance	PCBd Physical Control Block downstream
PLOAMu Physical Layer OAM overhead upstream	PCM Διαμόρφωση παλμικού κώδικα
PLOu Physical Layer Overhead upstream	PDH Plesiochronous Digital Hierarchy
PLSu Power Levelling Sequence upstream	PE άκρο παρόχου
P-MAC Provider MAC	PLOAM Λειτουργία, διαχείριση και συντήρηση φυσικού επιπέδου
PMD Physical Media Dependent	PLOAMu Physical Layer OAM overhead upstream
PON-ID PON Identification label	PLOu Επιβάρυνση φυσικού στρώματος ανερχόμενη ζεύξη
POTS Plain Old Telephony Service	PLSu Power Levelling Sequence ανερχόμενη ζεύξη
PPP Point-to-Point Protocol	P-MAC MAC παρόχου
PSN Packet-Switched Network	PMD Physical Media Dependent
PW Pseudo Wire	PON-ID Ετικέτα αναγνώρισης PON
PWE Pseudo Wire Emulation	POTS Υπηρεσία απλής τηλεφωνίας
	PPP Πρωτόκολλο σημείο-προς-σημείο
	PSN Δίκτυο μεταγωγής πακέτων

QoS Quality of Service	PW Ψευδοκαλώδιο
RTP Real-time Transport Protocol	PWE Εξομίωση ψευδοκαλωδίου
RTT Round-Trip Time	QoS Ποιότητα υπηρεσίας
SAN Storage Area Network	RTP Πρωτόκολλο μεταφοράς πραγματικού χρόνου
SAToP Structure-Agnostic TDM over Packet	RTT Round-Trip Time
S-CDMA Synchronous CDMA	SAN Δίκτυο περιοχής αποθήκευσης
SCM Sub-Carrier Multiplexing	SAToP Structure-Agnostic TDM over Packet
SCMA Sub-Carrier Multiple Access	S-CDMA Σύγχρονο CDMA
SDH Synchronous Digital Hierarchy	SCM Πολυπλεξία υπο-φορέων
SDM Space Division Multiplexing	SCMA Πολλαπλή πρόσβαση υπο-φορέων
SDU Service Data Unit	SDH Σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία
SIM Subscriber Identity Module	SDM Πολυπλεξία διαίρεσης χώρου
SLA Service Level Agreement	SDU Service Data Unit
SNI System Network Interface	SIM Μονάδα ταυτότητας συνδρομητή
SONET Synchronous Optical Network	SLA Συμφωνία επιπέδου υπηρεσιών
SPD Start of Packet Delimiter	SNI Διασύνδεση δικτύου συστήματος
SR Status Reporting	SONET Σύγχρονο οπτικό δίκτυο
STM-1 Synchronous Transport Mode 1	SPD Διαχωριστής έναρξης πακέτου
TC Transmission Convergence	SR Αναφορά κατάστασης
T-CONT Transmission Container	STM-1 Σύγχρονος τρόπος μεταφοράς 1
TCP Transmission Control Protocol	TC Convergence(Σύγκλιση) μετάδοσης
TDM Time Division Multiplexing	T-CONT Δοχείο μετάδοσης
TDMA Time Division Multiple Access	TCP Πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης
UDP User Datagram Protocol	TDM Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου
UMTS Universal Mobile Telecommunications System	TDMA Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου
UNI User Network Interfaces	UDP Πρωτόκολλο δεδομένων χρήστη
VC Virtual Concatenation	UMTS Παγκόσμιο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών
VCI Virtual Connection Identifier	Διεπαφές δικτύου χρήστη UNI
VLAN Virtual Local Area Network	VC Εικονική συνένωση
VLAN ID Virtual Local Area Network Identifier	VCI Εικονικό αναγνωριστικό σύνδεσης
VMAN Virtual Metropolitan Area Network	VLAN Εικονικό τοπικό δίκτυο
VoD Video on Demand	VLAN ID Εικονικό αναγνωριστικό τοπικού δικτύου
VoIP Voice over IP	VMAN Εικονικό μητροπολιτικό δίκτυο
VPI Virtual Path Identifier	VoD Video on Demand
VPLS Virtual Private LAN Service	VoIP Φωνή μέσω IP
VPN Virtual Private Networks	VPI Εικονικό αναγνωριστικό διαδρομής
VPWS Virtual Private Wire Service	VPLS Εικονική ιδιωτική υπηρεσία τοπικού δικτύου
WAN Wide Area Network	VPN Εικονικά ιδιωτικά δίκτυα
WDM Wavelength Division Multiplexing	VPWS Υπηρεσία εικονικού ιδιωτικού καλωδίου
WLAN Wireless Local Area Network	WAN Δίκτυο ευρείας περιοχής
WPON WDM PON	WDM Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος
WRPON Wavelength Routed PON	WLAN Ασύρματο τοπικό δίκτυο
	WPON WDM PON
	WRPON Wavelength Routed PON

# 1. Εισαγωγή

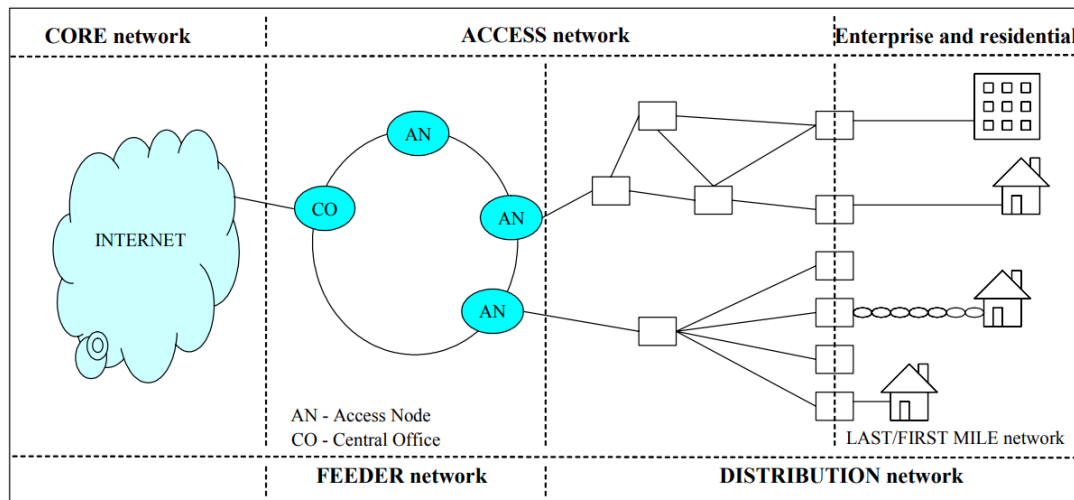
Η οπτική μετάδοση επιτρέπει ταχύτητες δεδομένων δεκάδων Gbit/s για πραγματική ευρυζωνική πρόσβαση πελατών. Αναπτύσσονται διάφορες εναλλακτικές λύσεις, αλλά η δυσκολία με τις περισσότερες από αυτές είναι η ακριβή εγκατάσταση και λειτουργία τους. Η πλειονότητα των χώρων πελατών συνδέεται με το πλησιέστερο κεντρικό γραφείο μέσω χάλκινων καλωδίων, τα οποία πρέπει να αναβαθμιστούν ή να συμπληρωθούν με οπτικές ίνες προκειμένου να επιτευχθεί πραγματική ευρυζωνικότητα. Η εγκατάσταση μιας ολόκληρης νέας υποδομής είναι ένα δαπανηρό εγχείρημα. Για να διατηρηθεί το κόστος εγκατάστασης εντός ρεαλιστικών ορίων, διερευνώνται πολλές εναλλακτικές λύσεις για τον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών προσεγγίσεων για την οπτική μετάδοση. Οι λύσεις που ερευνώνται μπορούν να ταξινομηθούν σε γενικές γραμμές σε ιδέες από σημείο σε σημείο και παθητικές οπτικές ιδέες. Οι συμβατικές μέθοδοι, όπως η σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία (SDH) και το Ethernet, αντιπροσωπεύονται από τις ιδέες σημείο προς σημείο.

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON), όπως το Ethernet PON (E-PON) και το Broadband PON (B-PON), είναι νέο-εισερχόμενα που επιτρέπουν διάφορες απλουστεύσεις της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Παρόλα αυτά, η διαμετακόμιση δεδομένων χρειάζεται πιο προηγμένες τεχνικές ελέγχου πρόσβασης στο μέσο από τις επιλογές point to point. Γίνεται επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης των τεχνικών οπτικής δικτύωσης που είναι κατάλληλες για την ευρυζωνική πρόσβαση των χρηστών. Η βιωσιμότητα αυτών των προσεγγίσεων αξιολογείται με βάση την κατάσταση τυποποίησής τους και πολυάριθμα τεχνικά χαρακτηριστικά και παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευή του δικτύου. Οι πιο εφικτές εναλλακτικές λύσεις εξετάζονται λεπτομερέστερα, για παράδειγμα για τον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών από άποψη κόστους τοπολογιών δικτύου και στρατηγικών ανάπτυξης εικονικών δικτύων.

## 1.1 Ορισμοί

Η τυποποίηση του PON συνεχίζεται και η χρησιμοποιούμενη ορολογία μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το πλαίσιο. Για την αποφυγή παρεξηγήσεων, αξίζει να

Διευκρινιστεί η έννοια ορισμένων όρων που χρησιμοποιούνται συνεχώς σε όλο το έγγραφο. Στόχος είναι η χρήση ορολογίας που έχει υιοθετηθεί από τα πρότυπα και τις συστάσεις, αλλά όταν αυτές δεν προσδιορίζονται, θα χρησιμοποιηθούν οι πιο ευρέως γνωστοί βιομηχανικοί όροι.



Εικόνα 1 Κατασκευή και ορολογία ενός ευρυζωνικού δικτύου δεδομένων.

[https://www.researchgate.net/figure/Construction-and-terminology-of-a-broadband-data-network\\_fig1\\_239549646](https://www.researchgate.net/figure/Construction-and-terminology-of-a-broadband-data-network_fig1_239549646)

Όταν μιλάμε για τα τηλεφωνικά δίκτυα και τα δίκτυα δεδομένων, εννοιολογικοί όροι όπως δίκτυο διανομής (distribution network), πρόσβασης (access network) και το feeder network μπορεί να έχουν διαφορετική σημασία. Το κεφάλαιο επικεντρώνεται στον ορισμό των PON και της μελλοντικής δικτύωσης δεδομένων, η ορολογία του εγγράφου θα είναι η ίδια που χρησιμοποιείται στη δικτύωση δεδομένων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1. Σε ένα περιβάλλον δικτύου δεδομένων, το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από δίκτυα τροφοδοσίας και διανομής. Το δίκτυο του πρώτου μιλίου (που ονομάζεται επίσης και τελευταίο μίλι) είναι το τελευταίο σκέλος του δικτύου διανομής.

Τα PON μπορούν να θεωρηθούν ως οπτικά δίκτυα πρόσβασης ή οπτικά δίκτυα τροφοδοσίας ή/και οπτικά δίκτυα διανομής ανάλογα με την προέλευση και τον προορισμό του οπτικού σήματος. Στη σύσταση G.983.1 της ITU-T, το σημείο εκκίνησης ενός PON ονομάζεται τερματισμός οπτικής γραμμής (OLT) και το τελικό σημείο τερματισμός οπτικού δικτύου (ONT) ή μονάδα οπτικού δικτύου (ONU). Στην ορολογία του κλάδου, το σημείο εκκίνησης αναφέρεται επίσης ως κεντρικό γραφείο

(CO) και το σημείο τερματισμού ως ONU. Στο παρόν έγγραφο, προτιμούμε να χρησιμοποιούμε τους όρους OLT και ONU.

## 1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι βρετανικές τηλεπικοινωνίες πρότειναν αρχικά παθητικά οπτικά δίκτυα το 1987 [1]. Διάφοροι βιομηχανικοί οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένου του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) και του Τομέα Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU-T), θεσπίζουν πρότυπα. Η SCTE καθορίζει επίσης τη ραδιοσυχνότητα μέσω γυαλιού για τη μετάδοση σήματος μέσω παθητικού οπτικού δικτύου.

Από το 1995, η ομάδα εργασίας Full Service Access Network (FSAN), αποτελούμενη από βασικούς παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και κατασκευαστές συστημάτων, εργάστηκε πάνω σε σχέδια οπτικών ινών μέχρι το σπίτι [2]. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) διεξήγαγε περισσότερη έρευνα και τυποποίησε δύο γενιές PON. Το προηγούμενο πρότυπο ITU-T G.983 βασιζόταν στον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM), και ως εκ τούτου είναι γνωστό ως APON (ATM PON).

Με βάση τη μετάδοση κυψελών ATM, τα δίκτυα αυτά είναι γνωστά ως APON (παθητικό οπτικό δίκτυο ATM) και καθορίζονται από το πρότυπο G.983.1 της ITU-T. Ήταν το αρχικό δίκτυο που ορίστηκε από το FSAN (Full Service Access Network). Το APON έχει μέγιστο ρυθμό 155 Mbps, τον οποίο μοιράζονται όλες οι συνδεδεμένες ONUs. Ο αρχικός του περιορισμός ήταν 155 Mbps, ο οποίος στη συνέχεια επεκτάθηκε σε 622 Mbps. Το ATM PON επιτρέπει τη σύνδεση έως 32 συνδρομητών στο PON.

Ολόκληρη η τελική έκδοση του ITU-T G.983 αναφέρεται συχνότερα ως ευρυζωνικό PON ή BPON, λόγω των μεταγενέστερων βελτιώσεων του αρχικού προτύπου APON και της σταθερής μείωσης της χρήσης του ATM ως πρωτοκόλλου. Το πρότυπο ITU-T G.983.x είναι το πρότυπο BPON (Ευρυζωνικό παθητικό οπτικό δίκτυο). Προκύπτει ως εξέλιξη του APON και μοιράζεται τον ίδιο περιορισμό ταχύτητας. Τα δίκτυα BPON βασίζονται επίσης στη μετάδοση κυψελών ATM, αλλά διαφέρουν από το APON στο ότι επιτρέπουν άλλα ευρυζωνικά πρότυπα. Τα δίκτυα BPON καθορίστηκαν για πρώτη



φορά με ρυθμό μετάδοσης ανοδικής και καθοδικής ζεύξης 155 Mbps. Αργότερα, όμως, τροποποιήθηκαν ώστε να περιλαμβάνουν ασύμμετρα κανάλια:

- Κατερχόμενη ζεύξη: 622 Mbps
- Ανερχόμενη ζεύξη: 155 Mbps

Για 1 κοινή ίνα ανερχόμενη ζεύξη και κατερχόμενη ζεύξη ανά ONU:

- Κανάλι downstream: =1480-1500 nm
- Εύρος συχνοτήτων upstream: =1260-1360 nm
- Βίντεο:  $\lambda=1550-1560$  nm

Για κάθε ONU να διαθέτει δύο ίνες, μία για upstream και μία για downstream:

- Κανάλι downstream: =1260-1360 nm
- Εύρος συχνοτήτων upstream: =1260-1360 nm
- Βίντεο:  $\lambda=1550-1560$  nm.

Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα πακέτα μεταβλητού μήκους, το πρότυπο ITU-T G.984 Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON, G-PON) αύξησε τόσο τη συνολική χωρητικότητα όσο και την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης σε σύγκριση με το BPON. Και πάλι, τα πρότυπα παρέχουν πολλές επιλογές ρυθμού μετάδοσης, αλλά ο κλάδος έχει συμφωνήσει σε εύρος ζώνης downstream 2,488 gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbit/s) και σε εύρος ζώνης upstream 1,244 Gbit/s. Η μέθοδος ενθυλάκωσης GPON (GEM) επιτρέπει την εξαιρετικά αποτελεσματική τμηματοποίηση πλαισίων και τη συσκευασία της κυκλοφορίας χρηστών.

Μέχρι τα μέσα του 2008, η Verizon είχε προσθέσει πάνω από 800.000 γραμμές. Η British Telecom, η BSNL, η Saudi Telecom Company, η Etisalat και η AT&T πραγματοποιούσαν προηγμένες δοκιμές στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ινδία, τη Σαουδική Αραβία, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και τις Ηνωμένες Πολιτείες, αντίστοιχα. Τα δίκτυα GPON εφαρμόζονται επί του παρόντος σε πολλά δίκτυα σε όλο τον κόσμο και οι τάσεις δείχνουν ότι τα δίκτυα GPON θα παρουσιάσουν μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης από άλλες τεχνολογίες PON.

Το G.987 ορίζει το 10G-PON με downstream ταχύτητες 10 Gbit/s και upstream ταχύτητες 2,5 Gbit/s. Η διαμόρφωση είναι "G-PON-like" και προορίζεται να συνυπάρχει με συσκευές GPON στο ίδιο δίκτυο [4].

Το ασφαλές παθητικό οπτικό δίκτυο (SPON) αναπτύχθηκε το 2009 από την Cable Manufacturing Business για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις SIPRNet της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ. Συνδυάζει την τεχνολογία παθητικού οπτικού δικτύου gigabit (GPON) και το προστατευμένο σύστημα διανομής (PDS) [5]. Οι αλλαγές στα πρότυπα NSTISSI 7003 για το PDS και η εντολή της ομοσπονδιακής κυβέρνησης για τεχνολογίες GREEN επέτρεψαν στην ομοσπονδιακή κυβέρνηση να αξιολογήσει τις δύο τεχνολογίες ως εναλλακτικές λύσεις για το ενεργό Ethernet και τις συσκευές κρυπτογράφησης. Ο επικεφαλής αξιωματικός πληροφοριών του στρατού εξέδωσε διαταγή με την οποία έδωσε εντολή για τη χρήση της τεχνολογίας μέχρι το τέλος του οικονομικού έτους 2013. Εταιρείες όπως η Telos Corporation [6] την προωθούν στον στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών.

Η εξέλιξη του πιο εξελιγμένου προτύπου που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται είναι το BPON. Η ITU-T παρήγαγε το σύνολο των προτύπων ITU-T G.984.x για το PON χωρητικότητας Gigabit, τα οποία χρησιμεύουν ως βάση για το πρότυπο GPON, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ταχέως αναπτυσσόμενη ζήτηση και να λειτουργήσει καλύτερα με την πρόοδο της τεχνολογίας των επικοινωνιών (Gigabit PON). Το καθοδικό κανάλι του GPON υποστηρίζει μεταβλητές ταχύτητες μετάδοσης που κυμαίνονται από 622 Mbps έως 2,488 Gbps. Παρόμοια με το BPON, το πρότυπο αυτό επιτρέπει τόσο τη συμμετρική όσο και την ασύμμετρη μεταφορά δεδομένων με τις ακόλουθες ταχύτητες μετάδοσης για το καθένα: συμμετρική μετάδοση: τόσο τα downstream όσο και τα upstream κανάλια επιτρέπουν ταχύτητες μεταφοράς μεταξύ 622 Mbps και 2,488 Gbps. Διαφορετικοί ρυθμοί ροής για τα κανάλια downstream και upstream:

- Κανάλι downstream: έως και 2,488 Gbps.
- Κανάλι upstream: έως και 1,244 Gbps.

Τα μήκη κύματος των εργασιών που καθορίζουν το πρότυπο GPON ποικίλλουν ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται 1 ή 2 ίνες για κάθε ONT. Ωστόσο, και για τα δύο

σύνολα, χρησιμοποιείται ένα αποκλειστικό μήκος κύματος για τη μετάδοση βίντεο από το OLT στα ONTs, το οποίο διαφέρει από εκείνα που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ομιλίας και δεδομένων. Κοινή χρήση μίας μόνο ίνας ανά ONT για μετάδοση και λήψη:

- Κανάλι downstream: =1480-1500 nm
- Εύρος συχνοτήτων upstream: =1260-1360 nm
- Βίντεο:  $\lambda=1550$  nm

Κάθε ONT απαιτεί δύο οπτικές ίνες, μία για μετάδοση και μία για λήψη.

- Κανάλι downstream: =1260-1360 nm
- Εύρος συχνοτήτων upstream: =1260-1360 nm
- Βίντεο:  $\lambda=1550$  nm.

Το 2004, το IEEE 802.3 ενέκρινε το πρότυπο Ethernet PON (EPON ή GEAPON) 802.3ah-2004 στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας Ethernet in the first mile. Το EPON είναι ένα δίκτυο "μικρών αποστάσεων" [1] που χρησιμοποιεί πακέτα Ethernet, συνδέσεις οπτικών ινών και ένα μόνο επίπεδο πρωτοκόλλου. Το EPON χρησιμοποιεί επίσης κανονικά πλαίσια Ethernet με ταχύτητες upstream και downstream 1 gigabit ανά δευτερόλεπτο. Το EPON είναι εφαρμόσιμο σε δίκτυα με επίκεντρο τα δεδομένα, καθώς και σε δίκτυα φωνής, δεδομένων και βίντεο με πλήρη υπηρεσία. Επικυρώθηκε η τροποποίηση 10 Gbit/s EPON ή 10G-EPON του IEEE 802.3av στο IEEE 802.3. Το 10G-EPON παρέχει 10/1 Gbit/s. Στην κατερχόμενη ζεύξη, υποστηρίζει την ταυτόχρονη λειτουργία των προτύπων IEEE 802.3av και IEEE 802.3ah στο ίδιο PON σε 10 Gbit/s σε ένα μήκος κύματος και 1 Gbit/s σε ένα δεύτερο μήκος κύματος. Σε ένα μόνο κοινόχρηστο (1310 nm) κανάλι ανερχόμενης ζεύξης, μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα το IEEE 802.3av και το 1 Gbit/s 802.3ah.

Το 2014, εγκαταστάθηκαν περισσότερες από 40 εκατομμύρια θύρες EPON, γεγονός που την καθιστά την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία PON παγκοσμίως. Στο πλαίσιο των απαιτήσεων του DOCSIS Provisioning of EPON (DPoE), το EPON

παρέχει το πλαίσιο για τις εμπορικές υπηρεσίες των παρόχων καλωδιακής τηλεόρασης.

Οι upstream ή downstream συνδέσεις σε δίκτυα που βασίζονται στο Ethernet δεν απαιτούν καμία μετατροπή ή ενθυλάκωση, επειδή το 10G EPON είναι πλήρως διαλειτουργικό με άλλα πρότυπα Ethernet. Αυτή η τεχνολογία ενσωματώνεται αβίαστα με οποιαδήποτε επικοινωνία με βάση το IP ή με πακέτα, και λόγω της επικράτησης των εγκαταστάσεων Ethernet σε σπίτια, γραφεία και άλλες τοποθεσίες, η εγκατάσταση του EPON είναι συνήθως προσιτή.

## 2. Τεχνολογία οπτικών παθητικών δικτύων

Το παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) είναι ένα δίκτυο που μεταδίδει δεδομένα στον οπτικό τομέα μεταξύ του OLT και της ONU ή του ONT1, με τον τρόπο μεταφοράς του οπτικού σήματος να είναι παθητικός. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές του οπτικού δικτύου (μεταξύ πομπού και δέκτη) δεν τροφοδοτούνται με ρεύμα, δηλαδή δεν χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές συσκευές. Η βασική αρχή του PON συνοψίζεται στο [1] ως εξής: "Η βασική προϋπόθεση του PON είναι να μοιράζεται ο κεντρικός τερματικός σταθμός οπτικής γραμμής (OLT) και η οπτική ίνα τροφοδοσίας μεταξύ όσο το δυνατόν περισσότερων μονάδων οπτικού δικτύου (ONUs) είναι πρακτικά δυνατό, δεδομένων των οικονομικά αποδοτικών οπτικών".

### 2.1 Ανάπτυξη προτύπων

Στη δεκαετία του 1980, αρκετοί από τους κορυφαίους μεταφορείς στον κόσμο συνεργάστηκαν για την εφαρμογή λύσεων οπτικής πρόσβασης στα δίκτυά τους, σηματοδοτώντας την έναρξη της δραστηριότητας PON. Λόγω του ακριβού κόστους και της σχετικά περιορισμένης ζήτησης εκείνη την εποχή, πολλά προγράμματα παρέμειναν μόνο ως δοκιμαστικές εκδόσεις. Η δημοτικότητα του Διαδικτύου στη δεκαετία του 1990 αύξησε την ανάγκη για αποδοτική ευρυζωνική σύνδεση.

Η κοινοπραξία Full Service Access Networks (FSAN) ιδρύθηκε το 1995 από μια ομάδα επτά μεγάλων φορέων εκμετάλλευσης δικτύων με σκοπό την ανάπτυξη ενός τυποποιημένου συνόλου προδιαγραφών για οπτικά συστήματα πρόσβασης. Αυτό κορυφώθηκε με τη σύσταση G.902 της ITU-T το 1998 και την υιοθέτηση από την ITU-T το 1999 των αναθεωρημένων απαιτήσεων του συστήματος PON 155 Mbit/s (σύσταση G.983 της σειράς ITU-T). Αυτό αναφερόταν ως το ευρυζωνικό PON (B-PON) ή το PON με βάση τον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) (A-PON ή ATM-PON) [3] Ενώ η FSAN και η ITU-T εργάζονταν για την ενίσχυση του B-PON, το Ethernet κέρδιζε ολοένα και περισσότερο έδαφος. Η IEEE δημιούργησε την ερευνητική ομάδα Ethernet in the First Mile (EFM), η οποία τελικά εξελίχθηκε στην ομάδα εργασίας IEEE 802.3ah.

Αυτή η ομάδα εργασίας έχει μια υπο-ομάδα εργασίας E-PON που τυποποίησε την τεχνολογία συμμετρικού PON 1 Gbit/s με βάση το Ethernet. Οι εργασίες ολοκληρώθηκαν και η αρχική έκδοση του προτύπου έγινε αποδεκτή το καλοκαίρι του 2004 [4]. Η Ethernet First Mile Alliance (EFMA) άρχισε να προωθεί το Ethernet που βασίζεται σε πρότυπα ως στρατηγική πρώτου μιλίου. Το 2001, η συνεργασία FSAN ξεκίνησε μια νέα προσπάθεια για την τυποποίηση των δικτύων PON που λειτουργούν σε ρυθμούς δεδομένων μεγαλύτερους από 1 Gbit/s [2]. Οι εργασίες βασίστηκαν στα πρότυπα B-PON και GFP (Generic Framing Procedure). Η εργασία ολοκληρώθηκε γρήγορα. Το 2003 δημοσιεύθηκε το αρχικό προσχέδιο του υλικού της σύστασης G.984 της ITU-T ή του προτύπου Gigabit-capable PON (G-PON).

## **2.2 Χαρακτηριστικά**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η έρευνα PON επικεντρώνεται σε δύο τομείς: Η EFMA/IEEE ορίζει τα PON που βασίζονται στο Ethernet, ενώ η FSAN/ITU-T ορίζει τα PON που βασίζονται στο ATM και το GFP. Οι λειτουργικές έννοιες και οι μέθοδοι ελέγχου πρόσβασης στα μέσα που θα δημιουργηθούν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ αυτών των δύο έργων τυποποίησης. Ορισμένες πτυχές του ίδιου του δικτύου PON είναι ανεξάρτητες από το λειτουργικό πρωτόκολλο και αντιμετωπίζονται πανομοιότυπα και στις δύο προσπάθειες τυποποίησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνδέονται κυρίως με ζητήματα φυσικού επιπέδου, δομής δικτύου και ονοματολογίας, τα οποία υπαγορεύονται από τη θεμελιώδη έννοια που διέπει τις λύσεις PON: τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν οι κοινές ιδιότητες PON.

### **2.2.1 Οπτικά εξαρτήματα χαμηλού κόστους**

Οι κύριες πηγές δαπανών για τη λειτουργία ενός υφιστάμενου δικτύου είναι η συντήρηση του εξοπλισμού και η κατανάλωση ενέργειας. Η ιδέα του PON είναι η χρήση παθητικών εξαρτημάτων, τα οποία δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια ή συντήρηση. Αυτά τα εξαρτήματα είναι υπεύθυνα για τη διανομή της κυκλοφορίας σε πολλές ίνες μεταξύ ενός OLT και πολλαπλών ONUs. Για την επίτευξη του στόχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη εξαρτημάτων. Στα δίκτυα PON με πολυπλεξία

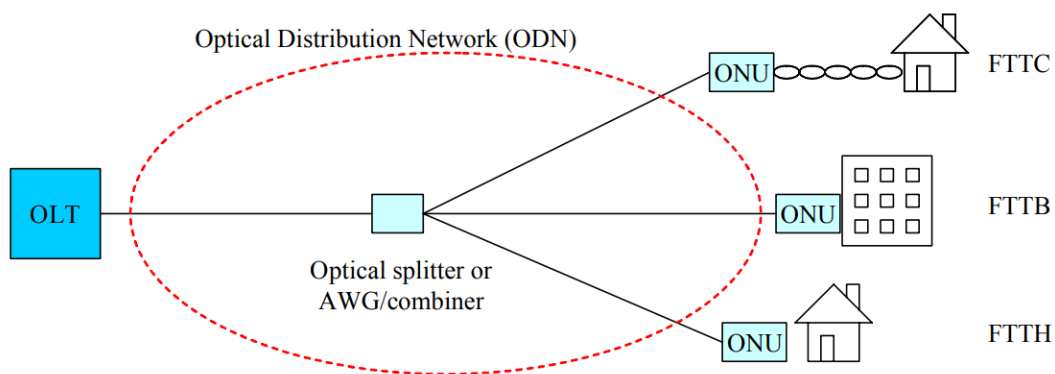
διαίρεσης χρόνου (TDM) χρησιμοποιείται ο οπτικός διαχωριστής/συνδυαστής. Διανέμει την οπτική ισχύ από τον OLT σε όλες τις ONUs και συγχωνεύει τα σήματα ανερχόμενης ζεύξης από τις ONUs σε ένα ενιαίο καλώδιο. Για τη διανομή της κίνησης σε δίκτυα πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM), χρησιμοποιούνται οι συσκευές Arrayed Waveguide Gratings (AWG). Μια συσκευή που χρησιμοποιεί AWG μπορεί να διαιρέσει τα μήκη κύματος και να τα δρομολογήσει σε διαφορετικές ίνες. Στη διαδρομή ανερχόμενη ζεύξη του OLT, τα μήκη κύματος συγχωνεύονται σε μία μόνο ίνα. Παρόλο που οι γραμμές μεταφοράς ενός δικτύου PON δεν απαιτούν ηλεκτρονικά εξαρτήματα, απαιτούνται τροφοδοτούμενοι πομποδέκτες στο OLT και στις ONUs, όπου τερματίζει η ίνα. Λόγω του γεγονότος ότι η πλευρά του OLT απαιτεί μόνο έναν πομποδέκτη για την αλληλεπίδραση με τις ONUs, διατηρείται η αποδοτικότητα κόστους. Δεδομένου ότι το OLT και οι ONUs τοποθετούνται σε περιοχές όπου η ηλεκτρική ενέργεια είναι άμεσα διαθέσιμη, η τροφοδοσία ρεύματος συχνά δεν συνεπάγεται πρόσθετο κόστος.

### **2.2.2 Απλή αρχιτεκτονική δικτύου (FTTH, FTTC)**

Το δίκτυο πρόσβασης, που μερικές φορές είναι γνωστό ως "δίκτυο πρώτου μιλίου", συνδέει τα κεντρικά γραφεία (CO) του παρόχου υπηρεσιών με τους πελάτες σε επιχειρήσεις και κατοικίες. Στη βιβλιογραφία, το δίκτυο αυτό είναι επίσης γνωστό ως δίκτυο πρόσβασης συνδρομητών ή τοπικός βρόχος [3]. Η ζήτηση για μια νέα γενιά υπηρεσιών έντασης εύρους ζώνης και η παράδοση τηλεφώνου, δεδομένων και βίντεο στους πελάτες πυροδότησε έντονο ανταγωνισμό μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών στις ΗΠΑ. Αυτές οι βελτιώσεις ώθησαν τους παγκόσμιους παρόχους υπηρεσιών να επενδύσουν σε FTTx (Fiber To The x). Το FTTx είναι μια συντομογραφία που περιλαμβάνει πολλές τεχνολογίες οπτικής πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένων των Fiber To The Node (FTTN), Fiber To The Curb (FTTC), Fiber To The Business-or Building-(FTTB), Fiber To The Home (FTTH) και Fiber To The Premises (FTTP)[4]. Το ενεργό οπτικό δίκτυο (AON) και το παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) είναι οι δύο σημαντικότερες τοπολογίες FTTH που παρουσιάζουν ενδιαφέρον σήμερα (PON).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η έννοια PON περιγράφει ένα οπτικό δίκτυο διανομής (ODN) στο οποίο η κυκλοφορία μεταφέρεται οπτικά μεταξύ ενός OLT και πολλών

ONUs. Έχουν οριστεί τρία εναλλακτικά συστήματα PON. Ανάλογα με τον προορισμό της ίνας, αυτά έχουν ελαφρώς διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών. Η ιδέα του Fibre-To-The-Curb (FTTC) προσφέρει στους τελικούς χρήστες ασύμμετρη και συμμετρική ευρυζωνική πρόσβαση, καθώς και πρόσβαση στην απλή τηλεφωνική υπηρεσία (POTS) και στο ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων υπηρεσιών (ISDN), εκτός από τις υπηρεσίες ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (DSL). Η ιδέα του Fiber-To-The-Building (FTTB) για πολυκατοικίες (MDUs) επιτρέπει POTS και ISDN καθώς και ασύμμετρη και συμμετρική ευρυζωνική συνδεσιμότητα. Το FTTB για εταιρείες προσφέρει επίσης υπηρεσίες ιδιωτικής γραμμής. Η οπτική ίνα στο σπίτι (FTTH) επιτρέπει ασύμμετρη και συμμετρική ευρυζωνική συνδεσιμότητα, καθώς και POTS και ISDN, σε σπίτια που συνδέονται απευθείας με οπτική ίνα.



Εικόνα 2 Γενική αρχιτεκτονική και ορολογία PON

### 2.2.3 Οικονομικά αποδοτική μεταφορά δεδομένων

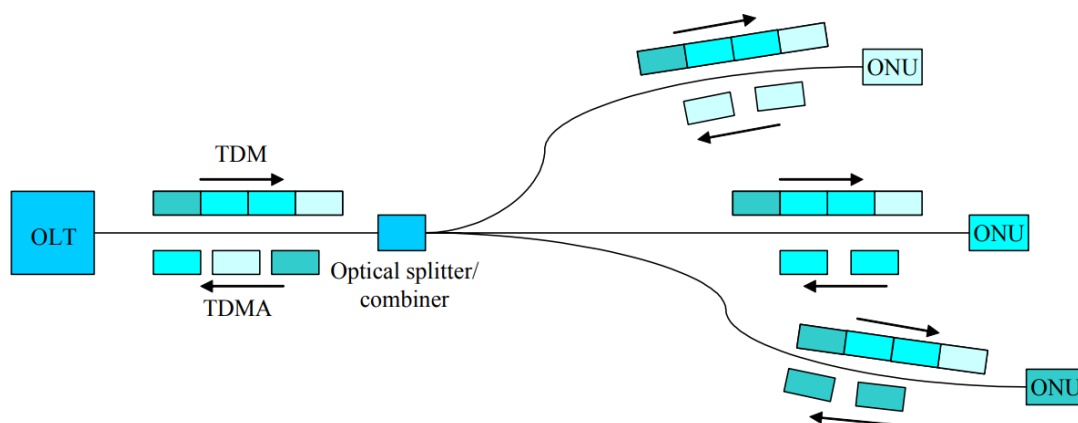
Σε ένα δίκτυο PON, τα σήματα δεδομένων αποστέλλονται στην καθοδική κατεύθυνση από ένα σε πολλά και στην ανερχόμενη ζεύξη από πολλά σε ένα. Κατά συνέπεια, η ισχύς του σήματος downstream διαιρείται σε έναν κατανεμητή και διανέμεται σε όλες τις ONUs μέσω γραμμών οπτικών ινών που συνδέονται με τον κατανεμητή. Ο αριθμός των ONUs που μπορούν να συνδεθούν με έναν διαχωριστή περιορίζεται από την απώλεια ισχύος που προκαλείται από τον διαχωριστή και τις γραμμές οπτικών ινών OLT-to-ONU. Λόγω του γεγονότος ότι η απώλεια ισχύος είναι συνάρτηση της απόστασης μετάδοσης, η μεγαλύτερη σύνδεση ONU καθορίζει το όριο όταν η ισχύς κατανέμεται εξίσου σε όλες τις συνδέσεις. Θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει



στοιχεία γραμμικού συνδυαστή διαχωριστή (Linear Divider Combiner, LDC) για την εξίσωση της ισχύος του σήματος στις διεπαφές εισόδου κάθε ONU.

Ωστόσο, τα LDC βρίσκονται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης, οπότε αντί αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές πολυπλεξίας, συνήθως γνωστές ως WDM-PON. Η συζήτηση των WDM-PONs γίνεται αργότερα στο παρόν κείμενο. Η πτυχή της μετάδοσης της ιδέας PON επιτρέπει την αποτελεσματική παροχή υπηρεσιών μονόδρομης μετάδοσης, όπως η καλωδιακή τηλεόραση. Όσον αφορά τις αμφίδρομες υπηρεσίες δεδομένων, η λύση PON απαιτεί περισσότερη εξέταση. Το πιο κρίσιμο σημείο στην αμφίδρομη μετάδοση είναι ο οπτικός διαχωριστής/συνδυαστής, ο οποίος εκτελεί αποκλειστικά παθητικές οπτικές διεργασίες. Στην ανερχόμενη ζεύξη, αυτό σημαίνει ότι οι ροές δεδομένων από διάφορες ONUs συγχωνεύονται και αποστέλλονται στον OLT.

Τα σήματα από διάφορες ONUs ενδέχεται να επικαλύπτονται στον συνδυαστή εάν δεν είναι συγχρονισμένα, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση του σήματος και την απώλεια δεδομένων στον δέκτη. Αυτό το ζήτημα έχει επιλυθεί από τους οργανισμούς τυποποίησης που εργάζονται πάνω σε αυτό, καθορίζοντας συγκεκριμένες διαδικασίες αίτησης και χορήγησης που πρέπει να χρησιμοποιούνται μεταξύ του OLT και των ONUs για τον υπολογισμό της καθυστέρησης. Ως εκ τούτου, και τα τρία πρότυπα ή κατευθυντήριες γραμμές χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA) για την ανερχόμενη ζεύξη και πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDM) για την κατερχόμενη ζεύξη. Το Σχήμα 3 απεικονίζει αυτή την αρχή μεταφοράς.



Εικόνα 3 Αρχή μεταφοράς PON.

Λόγω της διασταύρωσης, τα σήματα ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης δεν μπορούν να σταλούν στο ίδιο μήκος κύματος στην ίδια ίνα χωρίς παρεμβολές. Αυτό υποδηλώνει ότι είναι πιο πρακτικό να καθοδηγείται η κίνηση ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενη ζεύξη σε διαφορετικές οπτικές ίνες, εάν μοιράζονται το ίδιο μήκος κύματος. Εάν χρησιμοποιείται μία μόνο ίνα, η κίνηση κατερχόμενης ζεύξης και ανερχόμενης ζεύξης πρέπει να καταλαμβάνει διαφορετικά μήκη κύματος. Συνήθως, τα πρότυπα PON διατηρούν το μήκος κύματος 1490 nm για τη μετάδοση downstream και το μήκος κύματος 1310 nm για την κίνηση upstream. Τα πρότυπα διευκολύνουν το WDM καθορίζοντας διακριτά μήκη κύματος για κάθε υπηρεσία. Επί του παρόντος, τα PON λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης έως και 2,5 Gbit/s, κάτι που είναι εκπληκτικό δεδομένου του δύσκολου περιβάλλοντος μεταφοράς.

Τα οπτικά συστήματα burst mode που μπορούν να ανακτήσουν το επίπεδο σήματος και το χρονισμό σε επίπεδο bit από πολυάριθμους τελικούς σταθμούς [10] παρέχουν τη μεγαλύτερη τεχνολογική πρόκληση. Καθώς η κατερχόμενη ζεύξη σε ένα PON γίνεται από μία σε πολλές, η ασφάλεια της επικοινωνίας καθίσταται ζωτικής σημασίας. Διάφοροι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης έχουν παρουσιαστεί ως λύση στο δίλημμα της ασφάλειας κατερχόμενης ζεύξης. Στην ανερχόμενη ζεύξη, τα δεδομένα μεταφέρονται από σημείο σε σημείο και η ασφάλεια της επικοινωνίας είναι λιγότερο σημαντική.

Η εκχώρηση ενός μοναδικού μήκους κύματος σε κάθε τελικό χρήστη είναι μια μέθοδος για την εξασφάλιση της μετάδοσης δεδομένων. Η μέθοδος αυτή, ωστόσο, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί τυποποιημένη λύση, καθώς ο αριθμός των μηκών κύματος δεν κλιμακώνεται καλά με τον αριθμό των τελικών χρηστών. Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα του δικτύου και την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), η ασφάλεια της σύνδεσης δικτύου μπορεί επίσης να αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Η προστασία στα PON παρέχεται συχνά με πρόσθετες ίνες και μεταγωγή προστασίας.

### **2.3 παθητικό οπτικό δίκτυο βασισμένο στο ATM (ATM-PON)**

Η ITU-T μετονόμασε τελικά το σύστημα σε ευρυζωνικά παθητικά οπτικά δίκτυα (B-PON). Αρχικά, το FSAN αναφερόταν στο σύστημα ως ATM-PON, αλλά τώρα έχει μετονομαστεί σε B-PON. Ο όρος ATM-PON ή ο κοινώς χρησιμοποιούμενος A-PON

οδήγησαν στην εσφαλμένη αντίληψη ότι το σύστημα υποστηρίζει αποκλειστικά υπηρεσίες ATM, πράγμα που δεν ίσχυε. Ως εκ τούτου, η FSAN αποφάσισε να τροποποιήσει την ονομασία σε B-PON προκειμένου να χαρακτηρίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την ικανότητα του συστήματος να παρέχει ευρυζωνικές υπηρεσίες, όπως πρόσβαση Ethernet, διανομή βίντεο και υπηρεσίες μισθωμένης γραμμής υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, τα ονόματα A-PON και ATM-PON εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται συχνότερα από το B-PON για την αναπαράσταση των PON με βάση το ATM.

## **2.4 Ευρυζωνικό οπτικό παθητικό δίκτυο (B-PON)**

Το σύστημα ευρυζωνικής οπτικής πρόσβασης που ορίζεται από τη σειρά προτύπων G.983 της ITU-T βασίζεται στην έννοια των παθητικών οπτικών δικτύων. Η ITU-T αναφέρεται σε αυτό το πρότυπο ως πρότυπο B-PON. Όλα τα χαρακτηριστικά είναι συμβατά με τις προηγούμενες κατευθυντήριες γραμμές. Έχουν γίνει επικαιροποιήσεις στο πρότυπο προκειμένου να προσαρμοστεί καλύτερα η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών με βάση το WDM. Το πρότυπο B-PON είναι βελτιστοποιημένο για εφαρμογές με χαμηλότερους ρυθμούς γραμμής και βασίζεται στα πλεονεκτήματα του ATM για την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών [5]. Το B-PON χρησιμοποιείται ήδη ευρέως στην Ασία και υπάρχουν ακόμη και προτάσεις για τη χρήση του στις Ηνωμένες Πολιτείες.

### **2.4.1 Convergence(Σύγκλιση) του επιπέδου μετάδοσης**

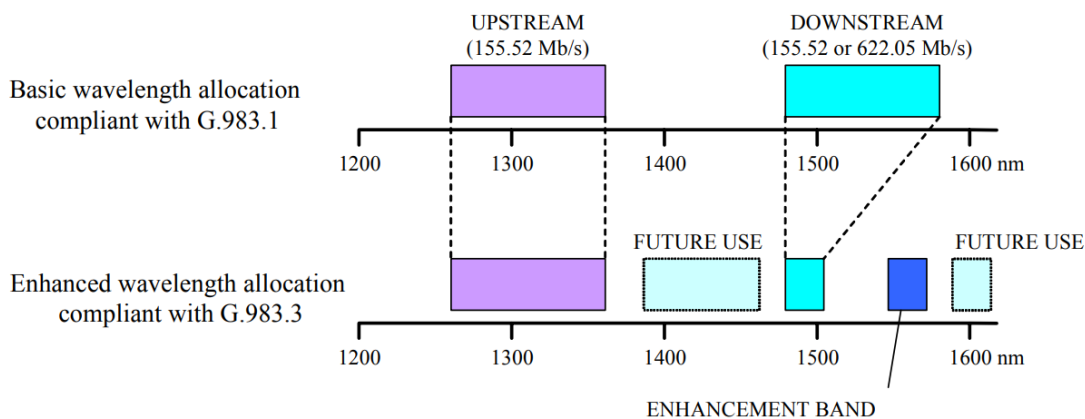
Στην καθοδική κατεύθυνση, το στρώμα Convergence(Σύγκλιση)ς μετάδοσης B-PON χρησιμοποιεί TDM, ενώ στην ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιείται TDMA. Τα πρότυπα του φυσικού στρώματος προβλέπουν ελάχιστη απόσταση 20 χιλιομέτρων μεταξύ μιας ONU και ενός OLT [5]. Η λογική εμβέλεια του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) του B-PON περιορίζεται στα 20 χιλιόμετρα μεταξύ της πλησιέστερης και της πιο απομακρυσμένης ONU και μπορεί να αναγνωρίσει έως και 64 διαφορετικές

ONU. Προς το παρόν έχουν καθοριστεί οι ακόλουθοι ονομαστικοί ρυθμοί γραμμής για την κίνηση downstream/upstream:

- 155,52 Mbit/s / 155,52 Mbit/s
- 622,08 Mbit/s / 155,52 Mbit/s
- 622,08 Mbit/s / 622,08 Mbit/s
- 1244,16 Mbit/s / 155,52 Mbit/s
- 1244,16 Mbit/s / 622,08 Mbit/s.

Οι συγκεκριμένες τεχνικές κατανομής μήκους κύματος για την κίνηση downstream και upstream καθορίζονται από το πρότυπο B-PON. Το προηγούμενο πρότυπο BPON επιφυλάσσει το παράθυρο μήκους κύματος 1260-1300 nm τόσο για την downstream όσο και για την upstream κυκλοφορία στην περίπτωση ενός συστήματος διπλής ίνας. Για την καθοδική κατεύθυνση σε ένα σύστημα μίας ίνας, χρησιμοποιείται το παράθυρο 1480-1550 nm. Η νέα κατανομή μήκους κύματος έγινε για να ενισχυθούν τα PON με υποστήριξη B για τη μετάδοση και την πολυεκπομπή οικονομικά αποδοτικών υπηρεσιών παροχής βίντεο, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας εκτέλεσης ποικίλων σεναρίων ανάπτυξης και σχημάτων διαμόρφωσης, καθώς και ενός ευρέος φάσματος ψηφιακών υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας.

Η νέα τεχνική κατανομής μήκους κύματος [6] διαιρεί το παράθυρο μήκους κύματος κατερχόμενης ζεύξης στην κανονική ζώνη (1480-1500 nm) και στη ζώνη βελτίωσης κατερχόμενης ζεύξης. Η ζώνη ενίσχυσης προσφέρει δύο επιλογές παραθύρων: 1539-1565 nm για επιπλέον ψηφιακές υπηρεσίες και 1550-1560 nm για διανομή βίντεο και συναφείς υπηρεσίες. Μεταξύ των καθορισμένων παραθύρων μήκους κύματος παραμένουν ξεχωριστές ζώνες προστασίας και ορισμένες ζώνες έχουν παραμεριστεί για μελλοντική χρήση.



Εικόνα 4 Κατανομή μήκους κύματος για ένα B-PON μονής ίνας

[.https://www.researchgate.net/figure/Wavelength-allocation-for-a-single-fibre-B-PON\\_fig3\\_239549646](https://www.researchgate.net/figure/Wavelength-allocation-for-a-single-fibre-B-PON_fig3_239549646)

## 2.4.2 Transmission concept (point to multipoint)

Λαμβάνοντας υπόψη απλώς τα μηνύματα PLOAM και το overhead των κυψελών ATM, η μέγιστη αξιοποίηση της καθοδικής ζεύξης είναι περίπου 87 %. Η μέγιστη αξιοποίηση της ζεύξης στην ανοδική κατεύθυνση είναι 86% όταν λαμβάνονται υπόψη μόνο τα bytes των επικαλύψεων. Δεδομένου ότι οι ONUs συχνά μεταδίδουν σήματα PLOAM προς τα πάνω, η πραγματική χρήση του εύρους ζώνης προς τα πάνω είναι χαμηλότερη. Επιπλέον, οι αναθέσεις παραθύρων εύρους μπορεί να επηρεάσουν την αποδοτικότητα της μεταφοράς προς τα κάτω και προς τα πάνω.

Παρόμοια με το ATM, η χωρητικότητα για την κίνηση downstream και upstream κατανέμεται στα δίκτυα B-PON. Η χωρητικότητα μεταφοράς μπορεί να ιεραρχηθεί ανάλογα, παρέχοντας QoS για το σύστημα, υπό την προϋπόθεση ότι οι ONUs διαθέτουν διακριτές ουρές για τα διάφορα είδη κίνησης T-CONT. Στο B-PON, οι απαιτήσεις μεταβολής των κυψελών είναι οι ίδιες με αυτές του ATM, και η καθυστέρηση μεταφοράς μεταξύ μιας ONU και ενός OLT πρέπει να είναι μικρότερη από 1,5 χιλιοστά του δευτερολέπτου για να εξασφαλιστεί η μεταφορά φωνής με την καλύτερη δυνατή ποιότητα. Η αξιόπιστη απόδοση του δικτύου απαιτεί συστήματα ανοχής σφαλμάτων και την ανάπτυξη προστατευτικών μέτρων για την αποκατάσταση των καθιερωμένων συνδέσεων σε περίπτωση βλάβης. Η ανοχή σε σφάλματα δηλώνει

την ικανότητα του δικτύου να συνεχίσει να λειτουργεί όπως έχει προγραμματιστεί σε περίπτωση αποτυχίας ή πολλών αποτυχιών. Ένα σύστημα με ανοχή σε σφάλματα συχνά ενσωματώνει μέσα για την ανάκτηση από σφάλματα, όπως πλεονάζοντα εξοπλισμό, συνδέσεις ή μονάδες λογισμικού, και σε σοβαρές περιπτώσεις, επανεκκίνηση του συστήματος ή των συστατικών του. Η προστασία των υφιστάμενων συνδέσεων αποτελείται από επιπλέον μονοπάτια και δυνατότητες κόμβων δικτύου για την ανακατεύθυνση της κυκλοφορίας από κατεστραμμένα μονοπάτια σε εφεδρικά μονοπάτια. Η κατευθυντήρια γραμμή B-PON καθορίζει τέσσερις στρατηγικές προστασίας που βασίζονται στην αυτόματη μεταγωγή προστασίας (APS) [8].

Το APS χρησιμοποιεί ελεγχόμενη από τον OLT αναγκαστική μεταγωγή, αυτοματοποιημένη μεταγωγή και επιλογή επαναληπτικών/μη επαναληπτικών τρόπων λειτουργίας. Το B-PON OAM συμμορφώνεται με τις αρχές λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης της σύστασης ITU-T I.610. Ωστόσο, λόγω της point-to-multipoint δομής του φυσικού μέσου, πολλά μηνύματα που παρέχονται από τον OLT στις ONUs είναι ξεπερασμένα, καθώς οι ONUs είναι ουσιαστικά σκλάβοι του OLT και δεν μπορούν να αξιοποιήσουν τις ειδοποιήσεις. Τα σήματα από το OAM αντιστοιχίζονται στα πεδία μηνυμάτων των κυττάρων PLOAM. Επιπλέον, η δυνατότητα του B-OAM PON επιτρέπει τη διαχείριση της εγκατάστασης, της απόδοσης, των σφαλμάτων και της ασφάλειας.

## **2.5 Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet**

Η ομάδα εργασίας IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile (EFM) επινόησε την ιδέα του παθητικού οπτικού δικτύου Ethernet (E-PON) και το πρότυπο εκδόθηκε τον Σεπτέμβριο του 2004 [9]. Το E-PON δίνει έμφαση στον καθορισμό δικτύων οπτικών ινών από σημείο σε πολλαπλά σημεία με βάση το Ethernet.

### **2.5.1 Στρώμα για τη Convergence(Σύγκλιση) μεταφοράς**

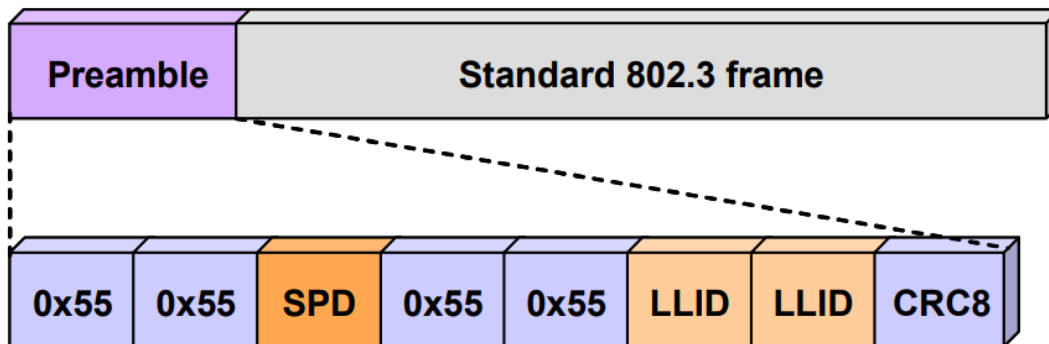
Το πρωτόκολλο μεταφοράς E-PON βασίζεται στην πρότυπη δομή πλαισίου Ethernet και χρησιμοποιεί τόσο τεχνικές TDM όσο και TDMA για την καθοδική και την ανερχόμενη ζεύξη, αντίστοιχα. Η ταχύτητα μετάδοσης είναι 1 Gbit/s με κωδικοποίηση μπλοκ 8B10B, με αποτέλεσμα ρυθμό γραμμής 1,25 Gbit/s. Η μέγιστη λογική απόσταση μεταξύ ONUs και OLT δεν περιορίζεται από το πρωτόκολλο. Τα πλαίσια Ethernet μεταφέρουν τη ροή δεδομένων και κάθε ONU λαμβάνει μόνο τα πλαίσια που απευθύνονται σε αυτήν. Στην ανερχόμενη ζεύξη, σε κάθε ONU ανατίθεται μια χρονοθυρίδα κατά την οποία μπορεί να στείλει πακέτα δεδομένων.

Το Logical Link ID είναι ένα αναγνωριστικό 2 byte που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση ONU, την εξομοίωση σημείου προς σημείο και την εξομοίωση σημείου προς πολλαπλά σημεία (LLID). Το E-PON ορίζει ένα δίκτυο μίας ίνας που λειτουργεί σε μήκος κύματος κατερχόμενη ζεύξη 1490 nm και σε μήκος κύματος ανερχόμενης ζεύξης 1310 nm [9]. Αυτό καθιστά διαθέσιμο το παράθυρο μήκους κύματος 1550 nm για νέες υπηρεσίες όπως τα ιδιωτικά δίκτυα WDM και τα δίκτυα κοινοτικής κεραίας τηλεόρασης (CATV) [10]. Το στρώμα PMD (Physical Media Dependent) του EPON καθορίζει εναλλακτικές οπτικές εμβέλειες 10 χιλιομέτρων για μικρή εμβέλεια και 20 χιλιομέτρων για μεγάλη εμβέλεια. Αυτό επιτρέπει την ανάμειξη διαφόρων τύπων PMD και έχει ως αποτέλεσμα ένα ευρύ φάσμα αναλογιών διαχωρισμού και μηκών διέλευσης. Οι πομποδέκτες E-PON χρησιμοποιούν λέιζερ καταναμημένης ανάδρασης (DFB) ή Fabry-Perot ή λέιζερ επιφανειακής εκπομπής κάθετης κοιλότητας (VCSEL), των οποίων οι τιμές αναμένεται να μειωθούν καθώς ωριμάζει η αγορά και η τεχνολογία.

### **2.5.2 Πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο**

Ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) του E-PON βασίζεται στο υποεπίπεδο Multi-point MAC Control, μια επέκταση του υποεπιπέδου Ethernet MAC Control. Προσφέρει δυναμική κατανομή εύρους ζώνης και παρέχει διαχείριση σε πραγματικό χρόνο των λειτουργιών του υποστρώματος MAC, όπως ο έλεγχος μετάδοσης πολλαπλών σημείων και η εμβέλεια. Το πλαίσιο E-PON βασίζεται στο πρότυπο πλαισίου Ethernet. Το πεδίο του προοιμίου έχει ενημερωθεί ώστε να περιλαμβάνει ένα πεδίο αναγνώρισης λογικής σύνδεσης (LLID) 2 byte, έναν οριοθέτη

έναρξης πακέτου (SPD) που μεταδίδεται ως 0xD5 και ένα πεδίο CRC8 που υπολογίζεται από το πρώτο bit του SPD έως το τελευταίο bit του LLID. Το πρώτο bit του πεδίου LLID υποδεικνύει τον τρόπο λειτουργίας (point-to-point ή broadcast) και τα επόμενα 15 bit προσδιορίζουν την ONU [9]. Η ετικέτα LLID εισάγεται και αποσύρεται από το υποεπίπεδο εξομοίωσης, το οποίο βρίσκεται κάτω από το επίπεδο Ethernet MAC. Στο σχήμα 5 απεικονίζεται η δομή του πλαισίου του δικτύου E-PON.



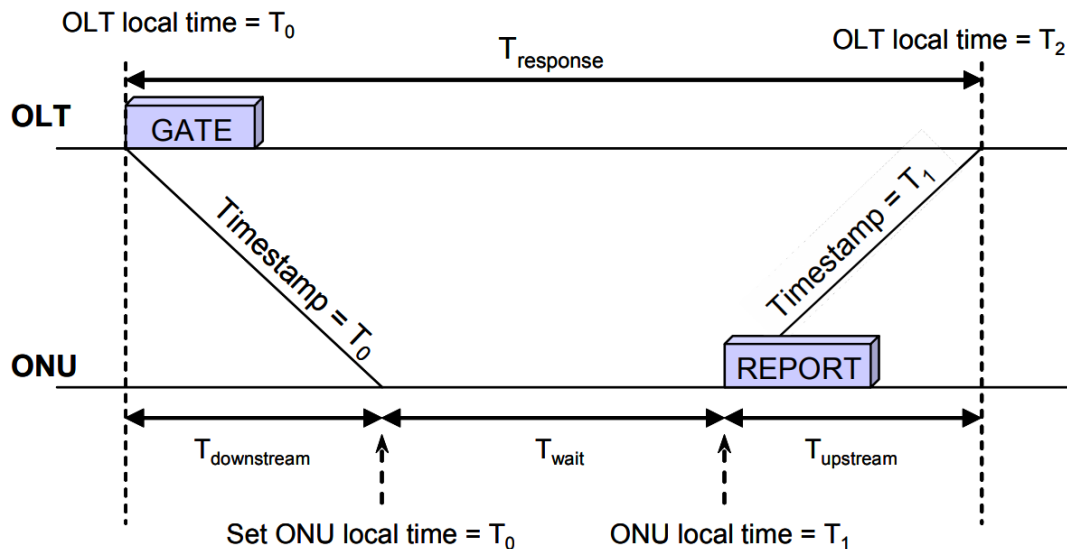
Εικόνα 5 Δομή πλαισίου E-PON.

Στην ανερχόμενη ζεύξη, το πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλών σημείων (MPCP) χειρίζεται τις ειδικές ανάγκες συντονισμού της κυκλοφορίας [10]. Χρησιμοποιεί μηνύματα ελέγχου MAC 64 byte και είναι ένα πρωτόκολλο βασισμένο σε πλαίσιο. Το MPCP περιέχει μηνύματα για αίτηση και ανάθεση εύρους ζώνης, διαπραγμάτευση παραμέτρων, διαχείριση, εύρος τιμών, αυτόματη ανίχνευση ONU και εγγραφή. Έχει επίσης τη δυνατότητα να προσδιορίζει εάν τα λέιζερ ONU έχουν υποβαθμιστεί ή όχι με την πάροδο του χρόνου. Το υποεπίπεδο ελέγχου MAC πολλαπλών σημείων είναι μια επέκταση του υποεπιπέδου ελέγχου MAC που επιτρέπει τη λειτουργία MPCP.

Αυτό το επίπεδο είναι απαραίτητο για τις δραστηριότητες point-to-multipoint και το πρότυπο Ethernet αξιολογεί τώρα πέντε νέα μηνύματα ελέγχου: GATE, REPORT, REGISTER, REGISTER REQUEST και REGISTER ACK. Το OLT και οι ONUs υπολογίζουν τοπικές χρονοσφραγίδες χρησιμοποιώντας μετρητές 32-bit [9]. Κάθε 16 ns, οι μετρητές αυξάνονται. Κατά τη διάρκεια της περιόδου εμβέλειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, ο OLT προσθέτει μια χρονοσφραγίδα στο μήνυμα εμβέλειας και η λαμβάνουσα ONU μηδενίζει τον μετρητή της με βάση τη χρονοσφραγίδα. Στη συνέχεια, η ONU δημιουργεί ένα μήνυμα απόστασης που περιέχει την τρέχουσα χρονοσφραγίδα της ONU και το παραδίδει στον OLT. Στη συνέχεια, το OLT υπολογίζει τον χρόνο διαδρομής (RTT) και χρησιμοποιεί αυτόν τον αριθμό για να καθορίσει πότε πρέπει να εκχωρηθούν επιχορηγήσεις σε αυτή την ONU. Εάν ο OLT επιθυμεί να λάβει

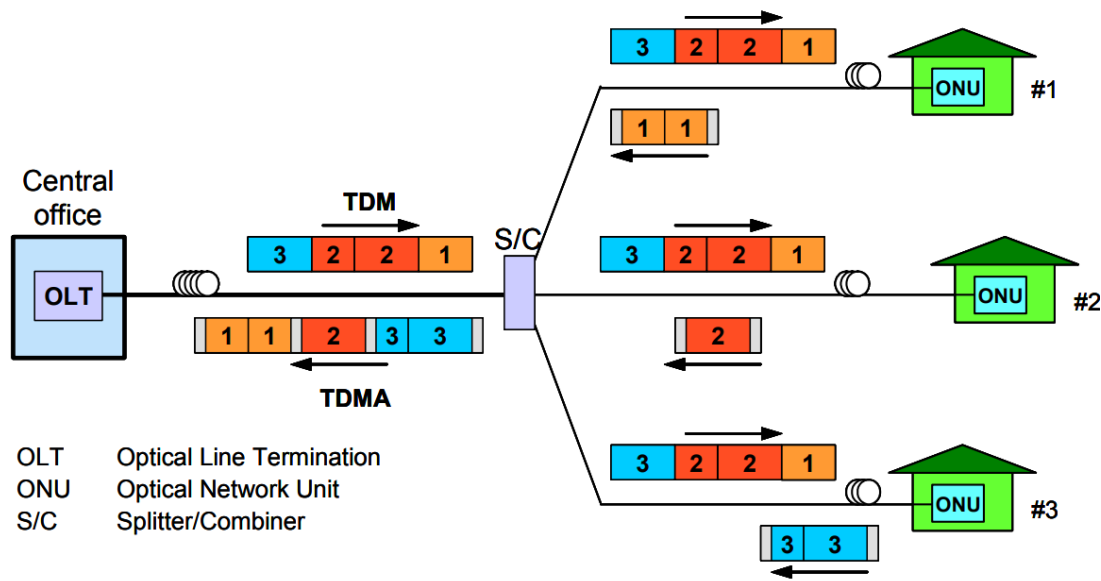


ένα μήνυμα τη χρονική στιγμή  $T$ , θα στείλει ένα μήνυμα GATE στην ONU με την οδηγία να ξεκινήσει τη μετάδοση τη χρονική στιγμή  $T$  μείον το χρόνο κυκλικής διαδρομής (RTT).



Εικόνα 6 Εύρος και χρονισμός E-PON

Με βάση προκαθορισμένα κριτήρια και κανονισμούς, το OLT κατανέμει χρονοθυρίδες σε κάθε εγγεγραμμένη ONU, η οποία μπορεί στη συνέχεια να στείλει όσα δεδομένα είναι εφικτό να στείλει εντός της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Τα δεδομένα μεταφέρονται σε πλαίσια Ethernet διαφορετικού μεγέθους και είναι πιθανό να μην χρησιμοποιούνται όλες οι χρονοθυρίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 [11]. Αυτό το χαρακτηριστικό αυξάνει τη δυσκολία του σχεδιασμού του δικτύου, ιδίως όταν η χρήση του δικτύου είναι υψηλή. Το μήκος μιας χρονοθυρίδας θα πρέπει να καθορίζεται έτσι ώστε τα μεταφερόμενα πλαίσια να μπορούν να γεμίσουν ολόκληρη τη θυρίδα, αφήνοντας το μικρότερο δυνατό ποσό χαμένου χώρου. Μετά την αρχικοποίηση του δικτύου, ο OLT αρχίζει να ρυθμίζει τις χρονοθυρίδες για κάθε ONU με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες για την κατάσταση της ουράς ONU. Αυτή η κατανομή εύρους ζώνης μπορεί να είναι στατική ή δυναμική και απαγορεύεται ο κατακερματισμός πακέτων μέσα σε χρονοθυρίδες ανερχόμενη ζεύξη. Στην κατερχόμενη ζεύξη, μόνο τα πλαίσια που φέρουν την ετικέτα LLID θα γίνονται δεκτά για περαιτέρω επεξεργασία από τις ONU. Οι τεχνικές κρυπτογράφησης εξασφαλίζουν την εμπιστευτικότητα των επικοινωνιών.



Εικόνα 7 Αρχή μεταφοράς E-PON.

### 2.5.3 Transmission concepts

Το E-PON είναι μια βελτίωση του προτύπου Ethernet που επιτρέπει την εξομοίωση από σημείο σε σημείο με τροποποίηση του προοιμίου. Έτσι, το E-PON είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει τις ήδη αναπτυγμένες δυνατότητες του Ethernet, όπως ο έλεγχος εύρους ζώνης και η ουρά προτεραιότητας 802.1p. Στα δίκτυα point-to-multipoint, η ασφάλεια της επικοινωνίας καθίσταται ζήτημα που θα επιλυθεί με την προσθήκη μιας τεχνικής κρυπτογράφησης, πιθανότατα AES. Η αποδοτικότητα των PON εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους παράγοντες του δικτύου και τη μεταδιδόμενη κίνηση, οι οποίοι είναι πολύ μεταβλητοί. Από την άποψη της απόδοσης ενός δικτύου, η διάρκεια των διατιθέμενων χρονοθυρίδων είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας. Λαμβάνοντας υπόψη το μεταβλητό μήκος πακέτων, μπορεί να είναι πρόκληση η ελαχιστοποίηση της ποσότητας των χαμένων bits σε μια χρονοθυρίδα. Προφανώς, το μέγεθος του πακέτου που παραδίδεται είναι επίσης σημαντικό για την αποδοτικότητά του, καθώς τα μικρότερα πακέτα έχουν πολύ υψηλή επιβάρυνση. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η κυκλοφορία ελέγχου.

Το E-PON χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο G.975 Forward Error Correction (FEC), το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Reed-Salomon [12]. Ένα πλαίσιο E-PON

περιέχεται σε ένα πλαίσιο FEC που περιέχει ισοτιμία και άλλα bits FEC καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας FEC. Οι μέθοδοι προστασίας E-PON βρίσκονται επί του παρόντος υπό διερεύνηση. Η δυνατότητα OAM του E-PON επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων να παρακολουθούν την υγεία του δικτύου και να εντοπίζουν αμέσως τη θέση των αποτυχημένων συνδέσεων ή των καταστάσεων σφάλματος [10]. Οι πληροφορίες OAM μεταφέρονται σε αργά πλαίσια πρωτοκόλλου γνωστά ως OAM Protocol Data Units (OAMPDUs), τα οποία παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες ελέγχου και κατάστασης για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την αποσφαλμάτωση δικτύων με δυνατότητα OAM. Τα OAMPDUs ανταλλάσσονται μεταξύ των οντοτήτων OAM που βρίσκονται στα αντίθετα άκρα μιας σύνδεσης PON, δηλαδή στο OLT και στις ONUs, και δεν αποστέλλονται στο δίκτυο από τους πελάτες MAC (π.χ. γέφυρες ή μεταγωγείς).

## **2.6 Παθητικό οπτικό δίκτυο 2,6 Gbps (G-PON)**

Η σειρά συστάσεων G.984 της ITU-T έχει ως στόχο να χαρακτηρίσει ένα ευέλικτο δίκτυο πρόσβασης σε οπτικές ίνες ικανό να ικανοποιεί τις ανάγκες εύρους ζώνης των επιχειρηματικών και οικιακών υπηρεσιών. Αναφέρεται ως Gigabit-capable PON (G-PON) [13] και σκοπός του είναι να βελτιώσει το σύστημα B-PON με την επανεκτίμηση της υποστηρικτικής υπηρεσίας, της πολιτικής ασφάλειας και της υποδομής οπτικών ινών. Επιπλέον, προσπαθεί να διατηρήσει όσο το δυνατόν περισσότερα συνιστώμενα χαρακτηριστικά του B-PON για να διευκολύνει την προς τα πίσω συμβατότητα με τα υπάρχοντα δίκτυα B-PON.

### **2.6.1 Transmission convergence layer**

Το πρωτόκολλο μεταφοράς G-PON κάνει χρήση του TDM στην καθοδική κατεύθυνση και του TDMA στην ανερχόμενη ζεύξη. Το πρότυπο G-PON ορίζει τους ονομαστικούς ρυθμούς γραμμής του συστήματος κατερχόμενη ζεύξη και ανερχόμενη ζεύξη ως εξής:

- 1244,16 Mbit/s / 155,52 Mbit/s

- 1244,16 Mbit/s / 622,08 Mbit/s
- 1244,16 Mbit/s / 1244,16 Mbit/s
- 2488,32 Mbit/s / 155,52 Mbit/s
- 2488.32 Mbit/s / 622.08 Mbit/s
- 2488.32 Mbit/s / 1244.16 Mbit/s
- 2488.32 Mbit/s | 2488.32 Mbit/s.

Στο επίπεδο Convergence(Σύγκλιση)ς μετάδοσης G-PON (TC), η μέγιστη λογική εμβέλεια μεταξύ ενός OLT και μιας ONU είναι 60 km, αν και η μέγιστη διαφορική απόσταση οπτικών ινών μεταξύ της πιο απομακρυσμένης και της πιο κοντινής ONU είναι 20 km [14]. Αυτή η απόσταση διαφοράς περιορίζεται στα 20 χιλιόμετρα προκειμένου να διατηρηθεί το μέγεθος του παραθύρου εμβέλειας εντός των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας. Όσον αφορά την αναλογία διαχωρισμού, το στρώμα TC προσφέρει αναλογίες διαχωρισμού έως 128, προβλέποντας την επέκταση των οπτικών μονάδων στο μέλλον. Επιτρέπει επίσης τη μεταφορά ενός σήματος ρολογιού 8 kHz και την παράδοση ενός σήματος αναφοράς 1 kHz, τα οποία παραδίδονται στις ONUs από τον OLT μέσω ενός σήματος ελέγχου. Το G-PON καθορίζει δύο δυνατότητες για τη φυσική εμβέλεια: 10 ή 20 χιλιόμετρα, με τα 10 χιλιόμετρα να είναι η μέγιστη απόσταση για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, όπως 1,25 Gbit/s και υψηλότερους. Η τεχνική διευθυνσιοδότησης ONU επιτρέπει την ταυτοποίηση έως και 253 ONU στο ίδιο δίκτυο. Ένα μήκος κύματος επικάλυψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή πρόσθετων υπηρεσιών στους συνδρομητές. Συνεπώς, το G-PON πρέπει να εγκαταλείψει τη ζώνη βελτίωσης που περιγράφεται στο G.983.3 [6].

### **2.6.2 Πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο G-PON**

Encapsulation Method (GEM) [15] έχει σχεδιαστεί για τη μεταφορά δεδομένων κυκλώματος και πακέτων σε δίκτυα G-PON. Τα πλαίσια G-PON μεταδίδουν επίσης επικοινωνία ATM, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Το GEM ενσωματώνεται στο

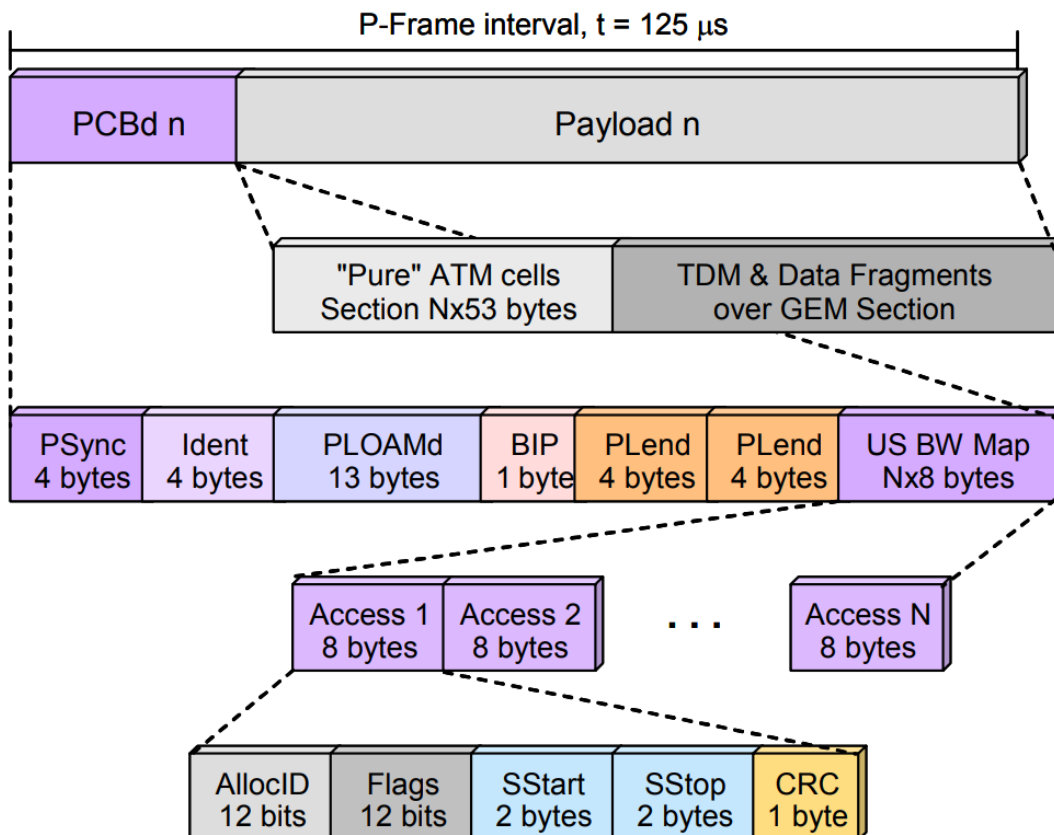
εσωτερικό του τμήματος PON και είναι ανεξάρτητο από το είδος της διεπαφής δικτύου συστήματος (SNI) στο OLT ή τους τύπους των διεπαφών δικτύου χρήστη (UNI) στην ONU, σύμφωνα με τις ίδιες αρχές με τη νεοσύστατη διαδικασία γενικής πλαισίωσης (GFP). Για να είναι δυνατές όλες οι πιθανές υπηρεσίες, η μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης σήματος πρέπει να περιοριστεί σε 1,5 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Το πρότυπο G-PON σκοπεύει να επιτρέψει όλες τις υπάρχουσες υπηρεσίες μεταφοράς καθώς και τις μελλοντικές υπηρεσίες.

Στην καθοδική κατεύθυνση, το G-PON χρησιμοποιεί την ίδια δομή πλαισίου με το SDH. Κάθε 125 μικροδευτερόλεπτα, ένα πλαίσιο μεταφέρεται ανερχόμενη ζεύξη και κατερχόμενη ζεύξη, επιτρέποντας τη διανομή ρολογιού και τη σύγχρονη μεταφορά δεδομένων. Η ταχύτητα μετάδοσης καθορίζει το μέγεθος του πλαισίου, το οποίο είναι 19440 bytes για 1,24 Gbit/s και 38880 bytes για 2,5 Gbit/s [15]. Το Physical Control Block (PCBd), το οποίο προηγείται κάθε κατερχόμενης ζεύξης πλαισίου, έχει το ίδιο εύρος μήκους για κάθε μία από τις προαναφερθείσες ταχύτητες δεδομένων και εξαρτάται από τον αριθμό των δομών κατανομής ανά πλαίσιο [16]. Πριν από τη μετάδοση στην εξερχόμενη σύνδεση μεταφοράς, το downstream πλαίσιο που φαίνεται στο Σχήμα 8 κωδικοποιείται και κωδικοποιείται με γραμμή NRZ (Non-Return to Zero). Ακολουθούν οι ρόλοι των πεδίων του καθοδικού πλαισίου:

- Το πεδίο Psync κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας το πρότυπο συγχρονισμού 0xB6AB31E0. Οι ONUs λαμβάνουν αυτό το μοτίβο μέσω των φυσικών μπλοκ ελέγχου (PCBd) και συγχρονίζονται με το μοτίβο bit.
- Τα λιγότερο σημαντικά 30 bit του πεδίου ident περιλαμβάνουν έναν μετρητή υπερ-πλασίων που αυξάνεται κατά ένα για κάθε υπερ-πλαίσιο. Κάθε ONU πρέπει να εφαρμόζει έναν τοπικό μετρητή υπερ-πλασίων για ανοχή σε σφάλματα.
- Το πεδίο PLOAMd μεταφέρει το μήνυμα PLOAM. Το πεδίο Plend περιέχει το μήκος του ωφέλιμου φορτίου, το οποίο μεταδίδεται δύο φορές για ανθεκτικότητα σε σφάλματα. Διαθέτει ξεχωριστό πεδίο 12 bit για το μήκος του χάρτη εύρους ζώνης (BWmap) και το μήκος του τμήματος ATM. Το πραγματικό μήκος του BWmap είναι οκταπλάσιο του παρεχόμενου αριθμού, ενώ το μήκος

του χάρτη ATM είναι πενήντα τρεις φορές μεγαλύτερο από το παρεχόμενο ποσό. Οκτώ bit προορίζονται για τον κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (CRC).

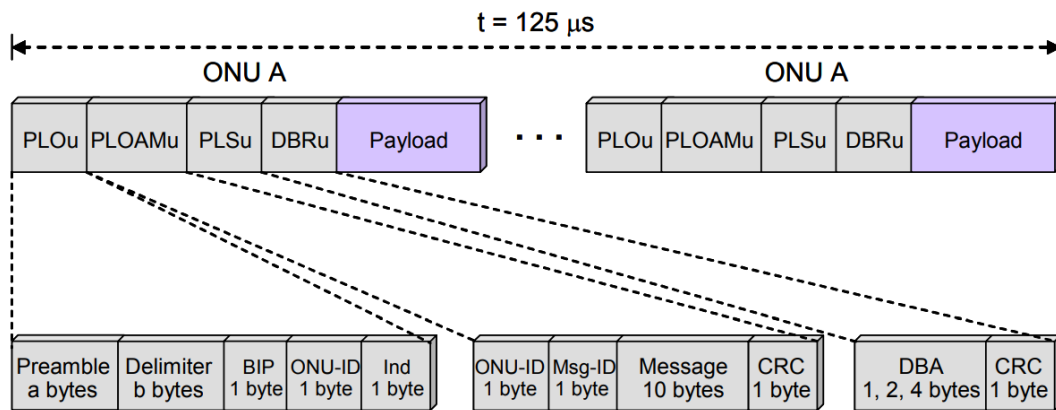
- Το πεδίο BWmap είναι ένα κλιμάκιο που καθορίζει πότε μια ONU μπορεί να αρχίσει τη μετάδοση, τι είδους κίνηση (τύπος T-CONT) μπορεί να στείλει και πότε μπορεί να τερματίσει τη μετάδοση.
- Το AllocID είναι ένα αναγνωριστικό κατανομής T-CONT. Το πεδίο Flags καθορίζει τα απαραίτητα μηνύματα ελέγχου που πρέπει να μεταδοθούν εντός της συγκεκριμένης περιόδου. Τα εναλλακτικά μηνύματα περιλαμβάνουν την ακολουθία ισοστάθμισης ισχύος (PLSu), το σήμα για τη χρήση FEC και το DBRu.
- Το πεδίο SStart περιέχει την ώρα έναρξης της μετάδοσης. Ξεκινώντας από το μηδέν στην αρχή ενός upstream πλαισίου, ο χρόνος μετριέται σε bytes.
- Το πεδίο SStop περιέχει τον χρόνο τερματισμού της μετάδοσης.



Εικόνα 8 Καθοδικό πλαίσιο G-PON.

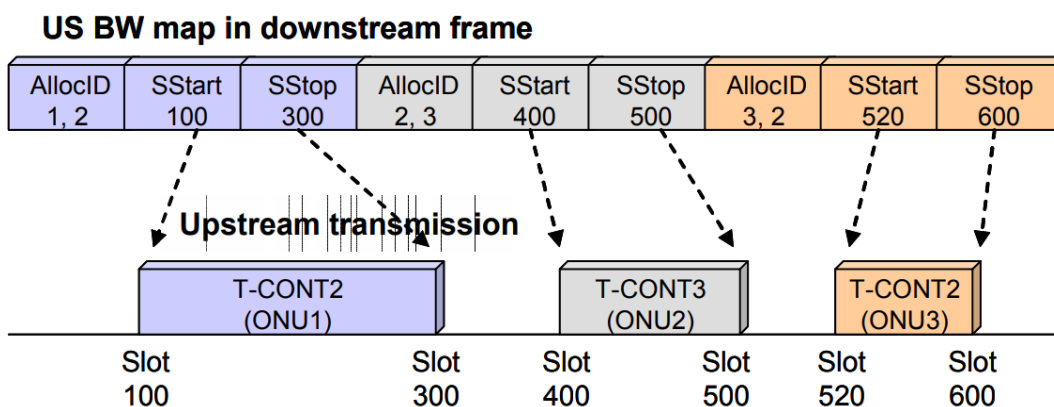
Στην ανερχόμενη ζεύξη , πολλές ONUs μπορούν να στείλουν δεδομένα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πλαισίου σύμφωνα με τις κατανομές χρονοθυρίδων που πραγματοποιούνται από τον OLT. Τα upstream πλαίσια μπορούν να μεταφέρουν τέσσερις τύπους overhead: Physical Layer Overhead (PLOu), Physical Layer OAM overheads (PLOAMu), Power Levelling Sequence upstream (PLSu) και Dynamic Bandwidth Report upstream (DBRu) [15][16]. Ο OLT υποδεικνύει με τη χρήση του πεδίου downstream frames flag, εάν οι πληροφορίες PLOAMu, PLSu ή DBRu πρέπει να αποστέλλονται κατά τη διάρκεια κάθε κατανομής. Το Σχήμα 9 παρουσιάζει το upstream πλαίσιο και το frame overhead. Οι λειτουργίες των πεδίων του ανερχόμενης ζεύξης πλαισίου είναι οι ακόλουθες:

- Το πεδίο PLOu περιλαμβάνει την προγραμματιζόμενη επιβάρυνση του φυσικού επιπέδου (προοίμιο και διαχωριστικό) και τρία επιπλέον πεδία για τη μετάδοση του δείκτη ONU. Το ONU-ID προσδιορίζει την ONU που μεταδίδει, ενώ το πεδίο δείκτη μεταφέρει την αναφορά κατάστασης της ONU σε πραγματικό χρόνο στον OLT.
- Το πεδίο PLOAMu περιέχει το μήνυμα PLOAM.
- Οι ONU χρησιμοποιούν το πεδίο PLSu 120 byte για μέτρα ελέγχου ισχύος. Με βάση τα δεδομένα, το οπτικό δυναμικό εύρος που βλέπει ο OLT μπορεί να τροποποιηθεί.
- Το πεδίο DBRu περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με μια οντότητα T-CONT, ενώ το πεδίο DBA περιέχει την κατάσταση κυκλοφορίας του εν λόγω T-CONT.
- Το upstream payload, το οποίο ακολουθεί το προηγούμενο upstream overhead, περιέχει κύτταρα ATM, πλαίσια περιορισμένα με GEM και αναφορές DBA.



Εικόνα 9 G-PON frame uplink and overhead

Η διαδικασία εύρεσης του εύρους στο G-PON είναι συγκρίσιμη με εκείνη στο B-PON. Μια ONU περιέχει οκτώ διαφορετικές καταστάσεις, καθεμία με ξεχωριστή λειτουργία. Αφού περάσει από τις φάσεις αρχικής λειτουργίας, αναμονής, ρύθμισης εύρους ισχύος, ανάθεσης ONU-ID και απόστασης, επιτυγχάνεται η κανονική κατάσταση λειτουργίας. Επιπλέον, υπάρχουν καταστάσεις για συγκεκριμένες περιπτώσεις βλάβης του δικτύου. Για την ανερχόμενη ζεύξη, το σύστημα Convergence(Σύγκλιση)ς μετάδοσης G-PON διενεργεί έλεγχο πρόσβασης στα μέσα. Στη θεμελιώδη έννοια, τα downstream πλαίσια ενημερώνουν τις ONUs για τη χρονοθυρίδα κατά τη διάρκεια της οποίας μπορούν να μεταδίδουν. Επιπλέον, τα downstream πλαίσια περιλαμβάνουν πληροφορίες συγχρονισμού για τις ONUs [15, 16]. Το σχήμα 10 παρουσιάζει την ιδέα του MAC.



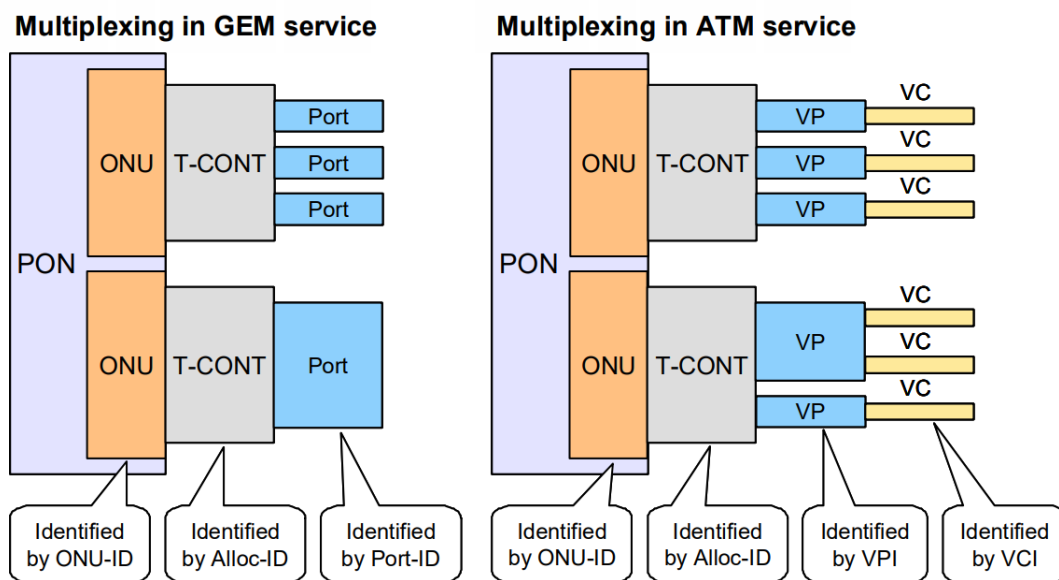
Εικόνα 10 Απλοποιημένη παρουσίαση του ελέγχου GTC MAC.

Ο OLT μεταδίδει δείκτες σε PCBds που υποδεικνύουν τη χρονική στιγμή κατά την οποία κάθε ONU μπορεί να ξεκινήσει και να τερματίσει την ανερχόμενη μετάδοσης της. Έτσι, μόνο μία ONU κάθε φορά μπορεί να έχει πρόσβαση στο μέσο και δεν



υπάρχει επικάλυψη κατά την κανονική λειτουργία. Οι τιμές των δεικτών προσδιορίζονται σε bytes, επιτρέποντας στο OLT να διαχειρίζεται το μέσο με bandwidth granularity 64 kbit/s. Με το δυναμικό χρονοπρογραμματισμό είναι δυνατή η αλλαγή των τιμών των δεικτών σε minimum granularity και η επίτευξη διαχείρισης εύρους ζώνης σε λεπτότερο επίπεδο. Transport Container είναι το όνομα της οντότητας μεταφοράς δεδομένων στο G-PON, όπως και στο B-PON (T-CONT).

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 11, υποστηρίζει πέντε κλάσεις προτεραιότητας και έχει τροποποιηθεί ώστε να επιτρέπει την πολυπλεξία υπηρεσιών ATM και GEM. Ένα ή και τα δύο σχήματα πολυπλεξίας υπηρεσιών μπορεί να υποστηρίζονται από μια ONU και ένας τύπος T-CONT πρέπει να εκχωρηθεί σε κάθε σχήμα πολυπλεξίας και τάξη προτεραιότητας. Η λειτουργία Status Reporting (SR) και η λειτουργία Non Status Reporting (NSR) υποστηρίζονται από το G-PON DBA για κάθε T-CONT. Το OLT πρέπει να υποστηρίζει και τους δύο τρόπους λειτουργίας, αν και η προαιρετική λειτουργία αναφοράς DBA επιτρέπει την απλούστευση των ONUs. Παρόμοια με το B-PON, κατά τη μεταφορά κίνησης ATM οι κατανομές εύρους ζώνης ελέγχονται από τον αριθμό των κυψελών ATM. Οι κατανομές εύρους ζώνης για την κυκλοφορία GEM καθορίζονται από τον αριθμό των κυττάρων GEM με καθορισμένο μέγεθος [15].



Εικόνα 11 Πολυπλεξία υπηρεσιών ATM και GEM στο G-PON.

<https://forum.huawei.com/enterprise/en/huaweis-access-network-gpon-protocol-analysis/thread/603938-100181>

### 2.6.3 Transmission

Το G-PON υποστηρίζει την κατανομή χωρητικότητας σε minimum granularity 64 kbit/s και περιλαμβάνει ενσωματωμένη υποστήριξη για πέντε κλάσεις προτεραιότητας που αποτελούνται από διάφορα T-CONTs, παρόμοια με το B-PON. Η συνιστώσα ATM του G-PON είναι συγκρίσιμη με εκείνη του B-PON, αλλά το G-PON χειρίζεται διάφορα τεχνικά ζητήματα με διαφορετικό τρόπο και τα δύο συστήματα είναι ασύμβατα. Τα κλειδιά 128 bit χρησιμοποιούνται από το προηγμένο σύστημα κρυπτογράφησης (AES) για την παροχή ασφάλειας επικοινωνίας. Οι ONUs παράγουν τα κλειδιά κατόπιν αιτήματος του OLT. Η χρήση των συνδέσεων μεταφοράς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δικτύου, τη διαμόρφωση και τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές μεταφοράς.

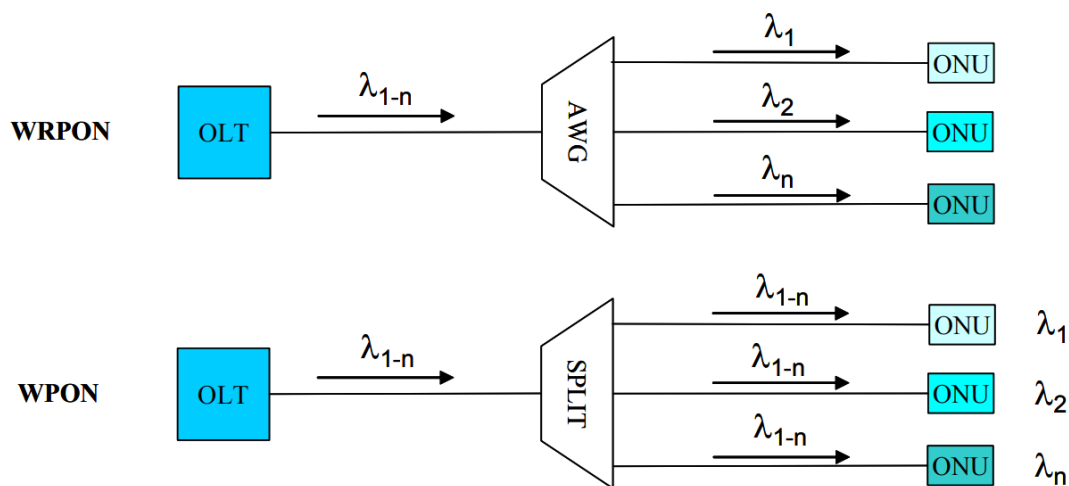
Το G-PON είναι μια αποδεκτή μέθοδος για τη μεταφορά κίνησης ATM και υπερέρχει για τη μετάδοση δεδομένων. Το G-PON παρέχει επίσης μεγάλη αποδοτικότητα για την εγγενή κίνηση ομιλίας και συμβατότητα για πολλές υπηρεσίες με ενθυλάκωση GEM [16]. Η αυτόματη μεταγωγή και η αναγκαστική μεταγωγή λαμβάνονται υπόψη για τις μεθόδους προστασίας GPON. Η προστασία είναι ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που αυξάνει την αξιοπιστία του δικτύου [16]. Σε περιβάλλοντα που είναι επιρρεπή σε σφάλματα, οι προαιρετικές προσεγγίσεις διόρθωσης σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC) μπορούν επίσης να αυξήσουν την αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Η χρήση ενός FEC αυξάνει τον προϋπολογισμό σύνδεσης κατά περίπου 3-4 dB, επιτρέποντας μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης bit, μεγαλύτερα μήκη OLT-to-ONU και υψηλότερους λόγους διαχωρισμού για ένα ενιαίο δέντρο PON. Το G-PON διαθέτει ισχυρά χαρακτηριστικά OAM που διευκολύνουν τη διαχείριση της υπηρεσίας από άκρο σε άκρο. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι συγκρίσιμα με εκείνα των δικτύων B-PON και SDH και αναλύονται περαιτέρω στο [17].

## 2.7 PONs με χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM)

Το WDM-PON είναι μια τυπική συντομογραφία για τα παθητικά οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM).

Επιπλέον, έχει διεξαχθεί έρευνα για να εξηγηθεί η εφαρμογή πρόσθετων προσεγγίσεων πολυπλεξίας και διαχείρισης μήκους κύματος σε δίκτυα PON. Οι προσεγγίσεις WDM έχουν χρησιμοποιηθεί συχνότερα στην καθοδική κατεύθυνση και μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν ως broadcast and select PONs (WPONs) και wavelength routed PONs (WRPONs). Στα WPONs, όλα τα μήκη κύματος αποστέλλονται σε όλα τα PONs μέσω ενός οπτικού διαχωριστή, με την επιλογή μήκους κύματος να γίνεται στην ONU. Με τη βοήθεια του AWG, τα κανάλια μήκους κύματος δρομολογούνται στις ONUs στο WRPON. Τα πρότυπα και οι κατευθυντήριες γραμμές PON παρέχουν παράθυρα μήκους κύματος για συγκεκριμένες υπηρεσίες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη μέθοδο WPON. Το σχήμα 12 απεικονίζει τις θεμελιώδεις έννοιες του WRPON και του WPON.



Εικόνα 12 Τεχνικές WRPON και WPON.

Η προσέγγιση WDM-PON της ανερχόμενη ζεύξη μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα από την κατερχόμενη ζεύξη. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η ανάπτυξη ενός μόνο μήκους κύματος σε συνδυασμό με TDMA. Παρ' όλα αυτά, αυτή η διαμόρφωση δεν μπορεί να χειριστεί συμμετρικούς ρυθμούς δεδομένων. Εάν η συμμετρία είναι απαραίτητη, η επιλογή δρομολόγησης μήκους κύματος μπορεί να είναι προτιμότερη τόσο στην ανερχόμενη ζεύξη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη. Τα PON μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία πρόσθετων μεθόδων πολυπλεξίας, μερικές από τις οποίες περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω. Περισσότερες πληροφορίες για τα WDM-PONs υπάρχουν στα [18], [19] και [20]. Η πολυπλεξία υποφερόντων (SCM) χρησιμοποιείται για την ανεξάρτητη πολυπλεξία πολυάριθμων καναλιών δεδομένων

στο ίδιο οπτικό κανάλι. Εκτός από την ανεξαρτησία των καναλιών, η SCM παρέχει ελευθερία όσον αφορά τον τύπο διαμόρφωσης και τον συγχρονισμό καναλιών.

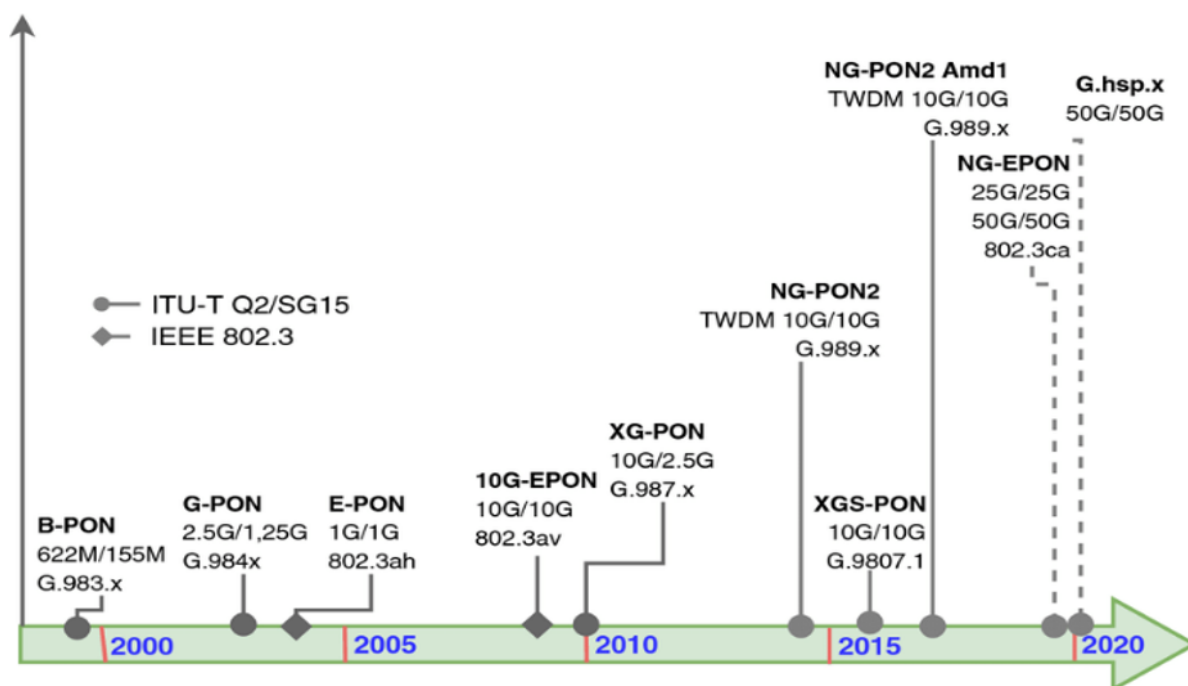
Τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης υποφερόντων (SCMA) έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν αναλογικά ηλεκτρονικά, τα οποία είναι λιγότερο ολοκληρωμένα και πιο δαπανηρά από τα ψηφιακά ηλεκτρονικά. Η οπτική πολυπλεξία διαίρεσης κωδικού (OCDM) περιλαμβάνει τη χρονική και/ή φασματική αλλοίωση του οπτικού σήματος. Στόχος είναι η πολυπλεξία πολυάρθρων σημάτων δεδομένων σε ένα μόνο κανάλι μήκους κύματος, παρέχοντας σε κάθε σήμα ολόκληρο το εύρος ζώνης διαμόρφωσης του πομπού και του δέκτη. Δεν υπάρχει απαίτηση για συγχρονισμό ή εύρος μεταξύ των σημάτων και η χωρητικότητα κάθε καναλιού μπορεί να ελέγχεται ξεχωριστά. Η πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (SDM) είναι μια λέξη που χρησιμοποιείται περιστασιακά όταν πολλές ροές δεδομένων πολυπλέκονται στη δική τους ίνα, δημιουργώντας έτσι μεγάλο αριθμό συνδέσεων από σημείο σε σημείο. Η SDM μπορεί να είναι η πιο αποδοτική επιλογή εάν υπάρχει διαθέσιμη σκοτεινή ίνα και δεν απαιτείται οπτική ενίσχυση.

## 2.8 Super-PON

Χρησιμοποιώντας οπτικούς ενισχυτές, το Super-PON είναι μια κατασκευή δικτύου παρόμοια με το PON που παρέχει σημαντικά μεγαλύτερο λόγο διαχωρισμού. Στην καθοδική διαδρομή χρησιμοποιούνται ενισχυτές οπτικών ινών με ντοπάρισμα έρβιου (EDFAs/1,5m), ενώ στην ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιούνται οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών (SOAs/1,3m). Το Super-PON δεν είναι τυποποιημένο, αν και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε από τα PON που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική B-PON που περιγράφεται στο [21], έχει καταδειχθεί ο λόγος διαχωρισμού 1:2048, ο ρυθμός μετάδοσης προς τα κάτω 2,4 Gbit/s και ο ρυθμός μετάδοσης προς τα πάνω 311 Mbit/s.

## 2.9 Next Generation PON

Η εξέλιξη των Παθητικών Οπτικών Δικτύων πέρασε πολλά βήματα προς το NG-PON2 τα οποία έχουν αναφερθεί πιο πάνω. Αναπτύχθηκε για να καλύψει ανάγκες για μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες PON από τις FSAN, ITU-T και IEEE . Επιπλέον, υπάρχουν πολλές υλοποιήσεις της τεχνολογίας PON, όπως η λειτουργία Asynchronous Transfer Mode (ATM) over Passive optical network τυποποιημένο ως G.983.1 και G.983.2 το έτος 1995 με 155 Mbps upstream και 155 Mbps downstream, ευρυζωνικό παθητικό οπτικό δίκτυο (BPON) με τα πρότυπα G.983.3 έως G.983.5 το έτος 2000 αυξάνοντας τους ρυθμούς δεδομένων στα 625 Mbps downstream, Gigabit Passive Optical Network (GPON) με 2,5 Gbps downstream και 1,25 Gbps upstream που τυποποιήθηκε το έτος 2001 ως G.984.1 έως G.984.4. το παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet (EPON) είναι τυποποιημένο από την IEEE το 2001 ως IEEE 802.3ah για υποστήριξη συμμετρικού 1Gbps upstream και downstream. Το παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet 10 Gigabit (10G-EPON) αύξησε τους ρυθμούς δεδομένων upstream και downstream στα 10 Gbps και τυποποιήθηκε ως IEEE 802.3av το έτος 2007.[7]



Εικόνα 27 Generations

<https://www.broadband-forum.org/ng-pon2-council?cn-reloaded=1>

Το XG-PON είναι το πρώτο στάδιο των προτύπων επόμενης γενιάς από το FSAN/ITU-T που ξεκίνησε το 2007 ως τυπική σειρά G.987.x με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Gbps και 2,5 Gbps upstream. Το κύριο καθήκον του XG-PON ήταν η κατασκευή ενός PON που να συνυπάρχει με υπάρχοντα και συμβατότητα προς τα πίσω με το GPON παλαιού τύπου.

Η νέα προσέγγιση, NG-PON2, αύξησε τη χωρητικότητα του PON σε τουλάχιστον 40 Gbps και προσφέρει υπηρεσίες 1 Gbps ή περισσότερο με πλατφόρμες και πρότυπα. Έχει σχεδιαστεί για να καλύψει ένα ευρύ φάσμα αναγκών επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρήσεων και εφαρμογές backhaul για κινητά καθώς και πρόσβαση σε κατοικίες. Αυτό σημαίνει ότι το NG-PON2 μπορεί να υποστηρίξει αυξημένη χωρητικότητα, υψηλότερες αναλογίες φωτός προς θύρα (higher light-to-port ratios), βελτιωμένη διαλειτουργικότητα και βελτιωμένες υπηρεσίες.

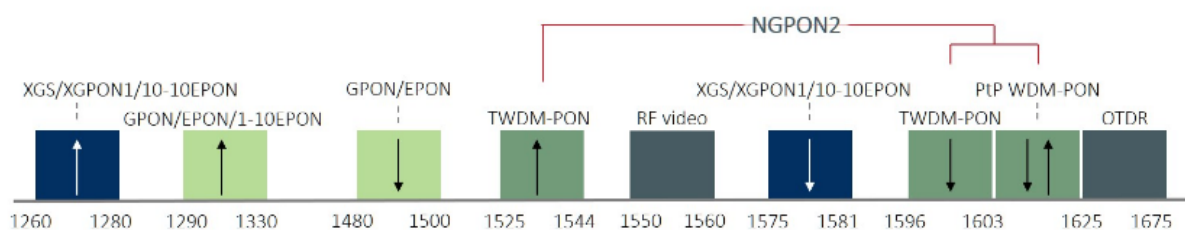
- TDM-PON : αυτή η πρόταση είναι να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης bit του προκαθορισμένου XG-PON1 από 10 Gbps έως 40 Gbps. Αυτή η λύση απαιτεί ηλεκτρονικά συστήματα πολύ υψηλής ταχύτητας δεδομένων που δεν είναι ακόμη διαθέσιμα.
- WDM-PON: αυτή η προσέγγιση παρέχει ένα αποκλειστικό κανάλι μήκους κύματος για το καθένα χρήστη με ταχύτητα δεδομένων 1 Gbps. Θα χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο φάσμα μήκους κύματος με υψηλή απόδοση, επομένως το εξαιρετικά πυκνό WDM θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού των χρηστών. Το κύριο πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι το υψηλό κόστος.
- Ψηφιακό OFDM-PON: χρησιμοποιεί τρεις τύπους OFDM-PON που κάθε ένα ισχύει QAM και FFT για τη δημιουργία ψηφιακών σημάτων OFDM.
- FSAN/ITU-T οι προσεγγίσεις PON μπορούν να χωριστούν κυρίως σε G-PON παλαιού τύπου που τυποποιούνται το 2014, βραχυπρόθεσμη εξέλιξη NG-PON1 (XG-PON) τυποποιημένη από το 2010 και NG-PON2 η οποία θεωρείται μεσοπρόθεσμη τυποποίηση που ξεκίνησε από την εξέλιξη στα μέσα του 2013 με την πάροδο του χρόνου έως το 2015.

Το δίκτυο NG-PON2 μπορεί να υλοποιηθεί σε διαφορετικές δομές, συμπεριλαμβανομένου του OSDM-PON, TWDM-PON και στοιβαγμένο XG-PON.

## Χαρακτηριστικά

- NGPON2 (TWDM) επεκτάσιμο από 40Gbps: 4 μήκη κύματος 10 Gbps ανά μήκος κύματος σήμερα μεταβαίνοντας στα 8x80 Gbps στο μέλλον.
- Bonding capable: Πολλά μήκη κύματος μπορεί να συνδέονται με κανάλια για να παρέχουν υπηρεσίες πάνω από 10 Gbps με τα πρότυπα εργασίας σε εξέλιξη.
- Συμμετρικοί και ασύμμετροι ρυθμοί bit για να ταιριάζουν σε οποιαδήποτε υπηρεσία. Επιπλέον, υποστηρίζει 10 Gbps κάτω ανά μήκος κύματος και 10 Gbps επάνω ή 2,5 Gbps επάνω ανά μήκος κύματος
- Tunable: Το ONU χρησιμοποιεί συντονισμένο οπτικό για να συντονιστεί δυναμικά στα προβλεπόμενα μήκη κύματος
- Coexistence: mux μήκους κύματος για συνδυασμό μηκών κύματος NG-PON2 σε μία ίνα και συνύπαρξη στοιχείο για συνδυασμό άλλων τεχνολογιών σε μία ίνα με NG-PON2
- Δυνατότητες WDM από σημείο σε σημείο στην ίδια υποδομή (4-8 μήκη κύματος)

## Wavelengths



Εικόνα 28 Wavelengths

<https://www.broadband-forum.org/ng-pon2-council?cn-reloaded=1>

### **3. Μέθοδοι point-to-point**

Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια επισκόπηση των τυπικών προσεγγίσεων σημείο προς σημείο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή οπτικής πρόσβασης σε οικιακούς και εμπορικούς πελάτες. Αρκετές από τις προαναφερθείσες στρατηγικές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως λύσεις τοπικής περιοχής, δηλαδή για τη μεταφορά δεδομένων εκτός των ONUs.

#### **3.1 Ψηφιακή πλησιόχρονη ιεραρχία**

Η ψηφιακή ιεραρχία Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) είναι ένα παλαιότερο πρωτόκολλο μετάδοσης φωνής. Το PDH εξακολουθεί να χρησιμοποιείται συχνά, για παράδειγμα για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ σταθμών βάσης και ελεγκτών σταθμών βάσης σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τα E0, E1, E2, E3 και E4 αντιστοιχούν σε ρυθμούς γραμμής 64 kbit/s, 2,048 Mbit/s, 8,448 Mbit/s, 34,368 Mbit/s και 139,264 Mbit/s, αντίστοιχα. Η τυποποιημένη διαμόρφωση παλμικού κώδικα (PCM) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή αναλογικών σημάτων ομιλίας σε ψηφιακή μορφή. Ένα ψηφιακό κανάλι ομιλίας με κωδικοποίηση PCM μεταφέρεται σε ένα E0.

#### **3.2 Διαδοχική ψηφιακή ιεραρχία**

Παγκοσμίως, τόσο η Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (SDH) όσο και το αμερικανικό ισοδύναμό της Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (SONET) χρησιμοποιούνται εκτενώς στα δίκτυα μεταφοράς. Αν και οι στρατηγικές αυτές δημιουργήθηκαν τη δεκαετία του 1980, δεν φαίνεται ότι θα αντικατασταθούν σύντομα. Ένας λόγος γι' αυτό είναι οι πρόσφατες αναβαθμίσεις των προτύπων και ένας άλλος η σημαντική επένδυση σε αυτές τις μεθόδους.

Για τους λόγους αυτούς, οι φορείς εκμετάλλευσης δεν είναι πρόθυμοι να αντικαταστήσουν γρήγορα τα υπάρχοντα δίκτυα SDH/SONET με άλλες επιλογές. Το SDH είναι μια ιεραρχική έννοια μεταφοράς με ταχύτητες γραμμών STM-1, STM-4,



STM-16 και STM-64 155,52 Mbit/s, 622,08 Mbit/s, 2488,32 Mbit/s και 9953,28 Mbit/s, αντίστοιχα. Κάθε ταχύτητα γραμμής έχει τη δική της μορφή πλαισίου και η δυνατότητα OAM περιλαμβάνεται στη δομή του πλαισίου. Ανεξάρτητα από το ρυθμό γραμμής, κάθε μετάδοση πλαισίου διαρκεί ακριβώς 125 μικρο-δευτερόλεπτα.

### 3.2.1 SDH επόμενης γενιάς

Το πρότυπο SDH είναι βελτιστοποιημένο για τη μεταφορά καναλιών φωνής, η οποία θέτει αρκετά διαφορετικές απαιτήσεις στο δίκτυο από ό,τι η μεταφορά δεδομένων. Αναμένεται ότι μέσα σε λίγα χρόνια, οι εταιρείες θα μεταβούν σε τηλεφωνικές υπηρεσίες βασισμένες σε πακέτα, και ο αριθμός των συνδρομητών συμβατικών υπηρεσιών φωνής θα πλησιάσει τελικά το μηδέν. Ο μηχανισμός που επιτρέπει τις υπηρεσίες φωνής βασισμένες σε πακέτα είναι το Voice over Internet Protocol (VoIP), το οποίο έχει προκαλέσει σημαντικό ενδιαφέρον.

Αυτό υποδηλώνει ότι το παλαιό SDH δεν θα είναι σε θέση να ικανοποιήσει την αυξημένη ζήτηση για υπηρεσίες δεδομένων στο μέλλον. Είναι επίσης σημαντικό να θυμόμαστε ότι οι χρήστες των παλαιών υπηρεσιών δεν θα εξαφανιστούν εν μία νυκτί. Ο μηχανισμός μεταφοράς του SDH επόμενης γενιάς επιτρέπει στις παλιές και τις νέες υπηρεσίες να συνυπάρχουν στο ίδιο δίκτυο χωρίς να αλληλοεπηρεάζονται. Η ιδέα Data over SDH (DoS) είναι η μεθοδολογία πίσω από το SDH επόμενης γενιάς. Το DoS είναι μια μέθοδος μεταφοράς που επιτρέπει την αποτελεσματική ενσωμάτωση ποικίλων διεπαφών δεδομένων στο SDH. Είναι σημαντικό ότι η κατανομή του εύρους ζώνης σε αυτές τις διεπαφές μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να διαταραχθεί η τρέχουσα κυκλοφορία SDH, επιτρέποντας τη λειτουργία των παλαιών υπηρεσιών παράλληλα με τις νέες υπηρεσίες που παρέχονται μέσω DoS. Το σύστημα DoS αποτελείται από τρεις τεχνικές: Generic Framing Procedure (GFP), Virtual Concatenation (VC) και Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS), οι οποίες έχουν τυποποιηθεί από την ITU-T και το American National Standard Institute (ANSI). Διάφοροι μηχανισμοί διασύνδεσης για DoS έχουν ήδη τυποποιηθεί και θα καθοριστούν όταν παραστεί ανάγκη [22].

- Η γενική διαδικασία πλαισίωσης (GFP) παρέχει έναν απλό μηχανισμό ενθυλάκωσης για την κίνηση δεδομένων με βάση το πλαίσιο (Ethernet, IP/PPP, RPR, Fibre Channel, ESCON κ.λπ.) μέσω μιας διαδρομής μεταφοράς TDM, π.χ. SDH/SONET ή οπτικό δίκτυο μεταφοράς (OTN).
- Η εικονική συνένωση (VC) παρέχει ένα ευέλικτο σχήμα κατανομής εύρους ζώνης, μετακίνηση granularity και χρήση της χωρητικότητας της ζεύξης SDH που είναι κοντά σε εκείνη του Ethernet.
- Το Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS) παρέχει σηματοδότηση από άκρο σε άκρο για δυναμική προσαρμογή της χωρητικότητας κατά τη χρήση VC σε συνδέσεις SDH.

### 3.3 Ethernet

Το 2004, το IEEE 802.3 ενέκρινε το πρότυπο Ethernet PON (EPON ή GEAPON) 802.3ah-2004 ως μέρος της πρωτοβουλίας Ethernet στο πρώτο μίλι. Το EPON είναι ένα δίκτυο "μικρών αποστάσεων" που χρησιμοποιεί πακέτα Ethernet, συνδέσεις οπτικών ινών και ένα μόνο επίπεδο πρωτοκόλλου. [9] Το EPON χρησιμοποιεί επίσης κανονικά πλαίσια Ethernet με ταχύτητες ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης 1 gigabit ανά δευτερόλεπτο. Το EPON είναι εφαρμόσιμο σε δίκτυα με επίκεντρο τα δεδομένα, καθώς και σε δίκτυα φωνής, δεδομένων και βίντεο με πλήρη υπηρεσία. Επικυρώθηκε η τροποποίηση 10 Gbit/s EPON ή 10G-EPON του IEEE 802.3av στο IEEE 802.3. Το 10G-EPON παρέχει 10/1 Gbit/s. Το σχέδιο μήκους κύματος κατερχόμενης ζεύξης υποστηρίζει την ταυτόχρονη λειτουργία των προτύπων IEEE 802.3av και IEEE 802.3ah στο ίδιο PON σε 10 Gbit/s σε ένα μήκος κύματος και 1 Gbit/s σε ένα δεύτερο μήκος κύματος. Σε ένα μόνο κοινόχρηστο (1310 nm) ανερχόμενο κανάλι, μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα το IEEE 802.3av και το 1 Gbit/s 802.3ah.

Το 2014, εγκαταστάθηκαν περισσότερες από 40 εκατομμύρια θύρες EPON, γεγονός που την καθιστά την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία PON παγκοσμίως. Στο πλαίσιο των απαιτήσεων του DOCSIS Provisioning of EPON (DPoE), το EPON

παρέχει το πλαίσιο για τις εμπορικές υπηρεσίες των παρόχων καλωδιακής τηλεόρασης.

Οι upstream ή downstream συνδέσεις σε δίκτυα που βασίζονται στο Ethernet δεν απαιτούν καμία μετατροπή ή ενθυλάκωση, επειδή το 10G EPON είναι πλήρως διαλειτουργικό με άλλα πρότυπα Ethernet. Αυτή η τεχνολογία ενσωματώνεται αβίαστα με οποιαδήποτε επικοινωνία με βάση το IP ή με πακέτα, και λόγω της επικράτησης των εγκαταστάσεων Ethernet σε σπίτια, γραφεία και άλλες τοποθεσίες, η εγκατάσταση του EPON είναι συνήθως προσιτή.

Το EPON είναι ένας τύπος δικτύων που βασίζονται στο Ethernet και βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.3. Ένα EPON συνδυάζει φθινό εξοπλισμό Ethernet με υποδομή οπτικών ινών και στέλνει απευθείας μηνύματα δεδομένων Ethernet. Προσφέρει 1 Gbps τόσο στην ανερχόμενη ζεύξη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη κατεύθυνση. Αυτές οι δυνατότητες επιτρέπουν στα EPON να μεταφέρουν κίνηση φωνής, δεδομένων και βίντεο. Το EPON χρησιμοποιεί τα παράθυρα 1310 nm και 1490 nm για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη μετάδοση, αντίστοιχα. Αυτό το πρότυπο επιτρέπει τη μετάδοση downstream και upstream μέσω μιας μονότροπης ίνας με μέγιστη εμβέλεια 10 km μεταξύ του διαχωριστή και της ONU, με δυνατότητα επέκτασης του μήκους στα 20 km. Το πρότυπο EPON ορίζει ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος για τη μετάδοση βίντεο από το OLT στις ONUs. Αυτά είναι τα μήκη κύματος:

Κανάλι downstream: =1480-1500 nm

Εύρος συχνοτήτων ανερχόμενη ζεύξη: =1260-1360 nm

Βίντεο:  $\lambda$ =1550-1560 nm

### **3.3.1 Πρόσβαση στην υπηρεσία Ethernet**

Οι υπηρεσίες πρόσβασης Ethernet αντιπροσωπεύουν τη φυσική εξέλιξη προς την πρόσβαση των χρηστών με βάση τα πακέτα. Οι υπηρεσίες αυτές προσφέρουν μεταβλητό εύρος ζώνης (μεγαλύτερη ευελιξία από τη μετάδοση E1 ή STM-1), είναι συμβατές με γραμμές οπτικών ινών ή χαλκού και διαθέτουν απλή διεπαφή για τον

εξοπλισμό των συνδρομητών. Είναι σημαντικό ότι οι υπηρεσίες πρόσβασης Ethernet επιτρέπουν ένα κλιμακούμενο μοντέλο εσόδων για τους μεταφορείς, καθώς μπορούν να πωλούν σωλήνες δεδομένων σχεδόν οποιοδήποτε μεγέθους στους πελάτες και πολλοί τύποι υπηρεσιών μπορούν να παρέχονται μέσω της ίδιας φυσικής σύνδεσης. Επιπλέον, οι υπηρεσίες μπορούν να προστεθούν ή να βελτιωθούν χωρίς να αλλάξει η διεπαφή χρήστη. Ωστόσο, υπάρχει μια βεβαιότητα. Το υποκείμενο δίκτυο πρέπει να επιτρέπει υπηρεσίες μεταφοράς Ethernet προκειμένου να υποστηρίξει υπηρεσίες πρόσβασης Ethernet [23].

### 3.3.2 Υπηρεσίες για τη μεταφορά Ethernet

Οι υπηρεσίες Ethernet Wide Area Network (WAN) είναι μια άλλη ονομασία για τις υπηρεσίες μεταφοράς Ethernet. Αυτές οι υπηρεσίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε γενικές γραμμές ως σημείο-προς-σημείο ή σημείο-προς-πολλαπλά σημεία. Παρά την κατηγοριοποίηση, τα ακόλουθα προβλήματα κλιμάκωσης και αξιοπιστίας είναι εμφανή στα μητροπολιτικά δίκτυα all-Ethernet [24, 25]:

- Περιορισμοί στον αριθμό των πελατών Το αναγνωριστικό εικονικού τοπικού δικτύου (VLAN ID) που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της κίνησης αποτελείται από 12 bits, περιορίζοντας τον φορέα σε 4096 καταναλωτές. - Παρακολούθηση υπηρεσιών Το Ethernet δεν διαθέτει εγγενή μηχανισμό παρακολούθησης υπηρεσιών.
- Κλιμακωσιμότητα του L2 backbone Το Πρωτόκολλο Spanning Tree δεν κλιμακώνεται για το εύρος ζώνης, αλλά μπλοκάρει έναν ορισμένο αριθμό θυρών σε τοπολογίες δακτυλίου για την αποφυγή βρόχων.
- Η ετικέτα VLAN παροχής υπηρεσιών πρέπει να μεταφέρεται σε ολόκληρο το δίκτυο, πράγμα που δεν είναι εύκολη διαδικασία και καθιστά δύσκολη την κλιμάκωση του δικτύου.

- Συμβατότητα με παλαιότερες εγκαταστάσεις Το Frame Relay εφαρμόζεται ευρέως, επομένως η διαλειτουργικότητα μεταξύ των υπηρεσιών Ethernet και Frame Relay είναι απαραίτητη.

Υπηρεσία σημείο προς σημείο: Γνωστή και ως Ethernet Line Service (ELS), υποδιαιρείται σε Ethernet Wire Service (EWS) και Ethernet Relay Service (ERS) (ERS). Η EWS είναι το ισοδύναμο του Ethernet μιας ιδιωτικής γραμμής ή υπηρεσίας ιδιωτικού καλωδίου [24], στην οποία δημιουργείται μια ενιαία φυσική σύνδεση μεταξύ δύο τοποθεσιών. Ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης (ενθυλάκωση πλαισίου ή εγγενής μεταφορά οντοτήτων), μπορούν να παρέχονται διάφορες λειτουργίες τελικού σημείου. Το ERS είναι το ισοδύναμο του Ethernet με την υπηρεσία FR [24], η οποία δημιουργεί πολυάριθμες συνδέσεις σημείο προς σημείο μεταξύ δύο τοποθεσιών. Αυτό περιλαμβάνει το συντονισμό των αναγνωριστικών Ethernet VLAN και επιτρέπει την πολυπλεξία υπηρεσιών από τοποθεσία σε τοποθεσία. Κατά συνέπεια, παρέχει τόσο την επιχειρηματική σύνδεση Hub-and-Spoke όσο και τη συνδεσιμότητα μεταξύ παρόχου υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP) και καταναλωτή.

Η υπηρεσία πολλαπλών σημείων προς πολλαπλά σημεία είναι επίσης γνωστή ως υπηρεσία τοπικού δικτύου Ethernet (E-LAN) και μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες: Ethernet Multipoint Service (EMS) και Ethernet Relay Multipoint Service (ERMS). Το EMS είναι το ισοδύναμο του WAN με τη λειτουργία πολλαπλών σημείων του Ethernet σε τοπικό δίκτυο [24]. Τα πλαίσια Unicast μεταδίδονται μέσω των κανονικών δυνατοτήτων αυτοεκμάθησης και προώθησης των γεφυρών Ethernet, ενώ τα πλαίσια εκπομπής αναπαράγονται σε όλες τις θέσεις. Για παράδειγμα, το EMS είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη σύνδεση πολυάριθμων πανεπιστημιούπολεων. Το ERMS είναι ένας συνδυασμός EMS και ERS που επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση υπηρεσιών πολλαπλών σημείων επιπέδου 2 και πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω του ίδιου UNI. Οι ISP που επιθυμούν να προσφέρουν πολυπλεγμένες υπηρεσίες πολλαπλών σημείων προς πολλαπλά σημεία αξιοποιούν αυτή την τεχνολογία.

### **3.4 Δίκτυο οπτικών μεταφορών**

Το SDH δεν είναι σε θέση να μεγιστοποιήσει τις δυνατότητες της προσέγγισης WDM. Η ομάδα μελέτης 15 της ITU-T έχει δημιουργήσει μια σειρά κατευθυντήριων γραμμών (G.709.x) για την οπτική μεταφορά [26] σε μια προσπάθεια να απλοποιήσει τη διαχείριση των δικτύων WDM. Αυτές περιλαμβάνουν θέματα αρχιτεκτονικής, διασύνδεσης και διαχείρισης, τα οποία μαζί αναφέρονται ως δίκτυο οπτικής μεταφοράς. Λόγω του γεγονότος ότι το OTN μπορεί να θεωρηθεί ως μια βελτιωμένη έκδοση της ιδέας SDH, έχει πολλά χαρακτηριστικά με το SDH, όπως μια ιεραρχική τοπολογία δικτύου και μια μορφή πλαισίου. Το OTN χρησιμοποιεί ανάλογες τεχνικές διαχείρισης και παρακολούθησης για τις οπτικές διαδρομές και τα κανάλια, όπως το SDH στα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς.

Το OTN καθορίζει αντιστοιχίσεις πλαισίων για διάφορους τύπους σημάτων πελάτη οπτικού επιπέδου, όπως το SDH και το GFP. Επιπλέον, η προδιαγραφή G.8080 του Automatic Switched Optical Network (ASON) έχει αναπτυχθεί σύμφωνα με την κατευθυντήρια γραμμή G.807/Y.1302 του Automatic Switched Transport Network (ASTN) για την αυτόματη παροχή OTN. Επί του παρόντος, η ιεραρχική δομή OTN ορίζει ταχύτητες γραμμής 2666 Mbit/s, 10709 Mbit/s και 43014 Mbit/s για OTU-1, OTU-2 και OTU-3, αντίστοιχα.

## 4. Τεχνικές τελευταίου μιλίου – last mile

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια σύντομη εισαγωγή στις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές του τελευταίου μιλίου και άλλες λύσεις για την υλοποίηση υπηρεσιών πρόσβασης σε δεδομένα.

### 4.1 Ασύρματη πρόσβαση

Καθώς τα πολύ-λειτουργικά κινητά τερματικά γίνονται κοινός τόπος, η ασύρματη πρόσβαση αναμένεται να αυξηθεί σε δημοτικότητα στο μέλλον. Αυτό επηρεάζει τις ανάγκες σύνδεσης μεταξύ των σταθμών βάσης και άλλων συσκευών δικτύου, καθώς είναι απαραίτητη η διαχείριση και ο έλεγχος του εύρους ζώνης για συγκεκριμένες τεχνικές. Στον πίνακα 1 παρατίθενται οι κοινές ασύρματες τεχνολογίες μαζί με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης bit στο κανάλι τους [28].

Technique	Bit rate per channel
GSM	14.4 kbit/s
HSCSD	57.6 kbit/s
GPRS	115.2 kbit/s
EDGE	384 kbit/s
UMTS (Rel99)	2 Mbit/s
CDMA2000	3 Mbit/s
Wi-Fi (IEEE802.11b)	11 Mbit/s
WLAN (IEEE802.11g)	54 Mbit/s

Πίνακας 1 Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης ορισμένων τεχνικών ασύρματης πρόσβασης.

## 4.2 Ψηφιακή συνδρομητική γραμμή

Το ADSL είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για οικιακές ευρυζωνικές συνδέσεις. Οι προσεγγίσεις DSL μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλό εύρος ζώνης, αλλά μόνο σε περιορισμένη απόσταση. Καθώς αυξάνονται οι ρυθμοί bit του DSL, η εμβέλεια του σήματος μειώνεται και ο συνδυασμός μετάδοσης μέσω οπτικών ινών και χάλκινων γραμμών γίνεται μια βιώσιμη εναλλακτική λύση. Μία από τις εναλλακτικές λύσεις που παρουσιάζονται είναι ένα υβριδικό δίκτυο PON-DSL. Το PON χρησιμοποιείται για τη μεταφορά επικοινωνιών υψηλού εύρους ζώνης σε μια περιοχή ή ένα κτίριο με κράσπεδο, ενώ το DSL χρησιμοποιείται για τη διανομή των σημάτων στους τελικούς χρήστες. Οι πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις DSL παρουσιάζονται στον πίνακα 2 [29].

Technique	Supported data rates
ADSL	~1 Mbit/s upstream and ~8 Mbit/s downstream (6 km)
HDSL	1.544 Mbit/s symmetric
SDSL	up to 2.32 Mbit/s symmetric
VDSL	~13 Mbit/s upstream and ~22 Mbit/s downstream (14.5 Mbit/s up to 1.5 km and 58 Mbit/s up to 0.3 km)

Πίνακας 2 Περίληψη των συνηθέστερων τεχνικών xDSL.

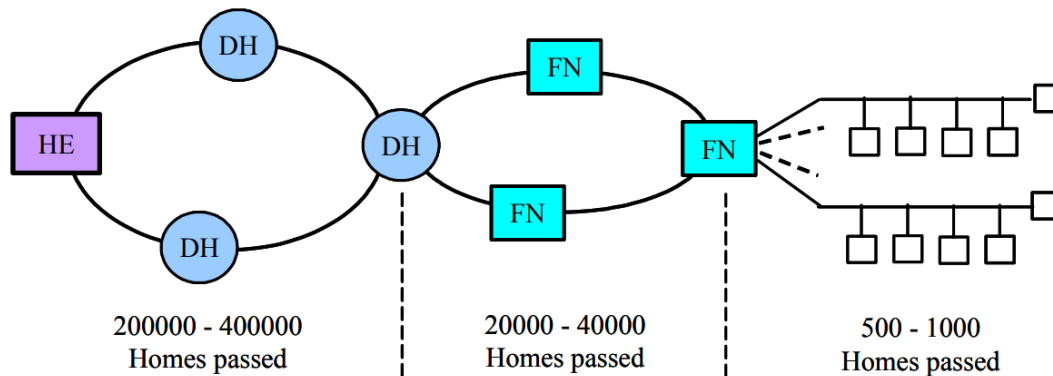
## 4.3 Υβριδικό δίκτυο οπτικών ινών ομοαξονικού τύπου

Τα υβριδικά ομοαξονικά δίκτυα οπτικών ινών (HFC) συνδυάζουν τη μετάδοση μέσω οπτικών ινών και ομοαξονικών καλωδίων και χρησιμοποιούνται ευρέως στα δίκτυα κοινοτικής κεραίας τηλεόρασης (CATV). Τα τηλεοπτικά σήματα μεταφέρονται από μια κεντρική τοποθεσία μέσω γραμμών οπτικών ινών σε ένα σημείο όπου μετατρέπονται σε ηλεκτρονική μορφή. Από το σημείο αυτό, τα ηλεκτρονικά σήματα αποστέλλονται στους οικιακούς καταναλωτές μέσω ομοαξονικών καλωδίων.

Το οπτικό τμήμα του δικτύου βελτιώνει την ποιότητα του σήματος και μειώνει τον αριθμό των ηλεκτρικών ενισχυτών, παρέχοντας ένα οικονομικά αποδοτικό μέσο



μεταφοράς τηλεοπτικών σημάτων σε τεράστιες αποστάσεις [30]. Σε πυκνοκατοικημένα μέρη, όπως οι μεγάλες πόλεις, ο αριθμός των κατοικιών που συνδέονται σε ένα τμήμα δικτύου μπορεί να φτάσει τις 20.000. Στο Σχήμα 13 απεικονίζεται ο σχεδιασμός της καλωδίωσης ενός τυπικού δικτύου HFC. Το δίκτυο HFC αποτελείται από τρία στοιχεία. Το head-end (HE) μεταδίδει οπτικά σήματα εκπομπής σε (περίπου δέκα) κόμβους διανομής (DH).



Εικόνα 13 Υβριδικό δίκτυο οπτικών ινών-ομοαξόνων (HFC).

Αυτοί μεταδίδουν τα οπτικά σήματα εκπομπής σε (περίπου 40) κόμβους οπτικών ινών (FN), οι οποίοι μετατρέπουν τα οπτικά σήματα σε ηλεκτρονική μορφή και τα διανέμουν σε (28) τμήματα διαύλου ομοαξονικού καλωδίου, καθένα από τα οποία συνδέεται με 500-1000 κατοικίες. Μοναδικά χαρακτηριστικά διακρίνουν το οπτικό σήμα από το HE στο FN. Είναι η μόνη διαδεδομένη εφαρμογή της αναλογικής διαμόρφωσης στα λέιζερ επικοινωνιών.

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως πολυπλεξία υπο-φερόντων (SCM). Στο κέντρο διανομής, το σήμα προετοιμάζεται σαν να επρόκειτο να μπει κατευθείαν στο καλώδιο. Έτσι, συνδυάζονται διάφοροι υπο-φορείς RF για να δημιουργηθεί μια ενιαία σύνθετη ροή με εύρος ζώνης 500 MHz. Αυτή η ροή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την αναλογική διαμόρφωση ενός πομπού λέιζερ [30].

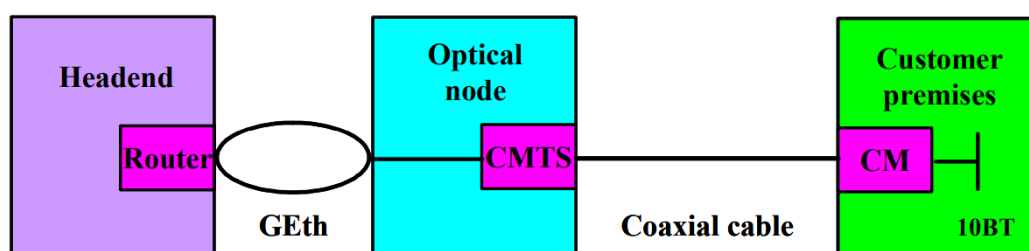
Επιπλέον, τα δίκτυα HFC υποστηρίζουν υπηρεσίες πρόσβασης σε δεδομένα. Στο καλωδιακό τμήμα του δικτύου, τα δεδομένα μεταφέρονται προς τα πάνω και προς τα κάτω χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification protocol). Επιπλέον, είναι σήμερα διαθέσιμη η τεχνολογία EtoH (Ethernet-to-the-Home).

### 4.3.1 Προδιαγραφές διεπαφής υπηρεσίας δεδομένων μέσω καλωδίου

Η μετάδοση υπηρεσιών δεδομένων στα δίκτυα CATV βασίζεται πλέον στο πρότυπο DOCSIS, το οποίο θεσπίστηκε από κοινοπραξία βορειοαμερικανικών εταιρειών καλωδιακής τηλεόρασης. Το euroDOCSIS, το ευρωπαϊκό ισοδύναμο του προτύπου, χρησιμοποιεί κάπως διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων από το DOCSIS. Και τα δύο πρότυπα χρησιμοποιούν συχνότητες πάνω από τα τηλεοπτικά κανάλια για μεταδόσεις προς τα κάτω και κάτω από τα τηλεοπτικά κανάλια για μεταδόσεις προς τα πάνω.

Ως αποτέλεσμα των σημερινών τεχνικών κατανομής συχνοτήτων CATV, η προσβάσιμη ζώνη ανερχόμενης ζεύξης είναι στενότερη από τη ζώνη κατερχόμενης ζεύξης. Επιπλέον, οι διαταραχές, όπως αυτές που προκαλούνται από οικιακές συσκευές, υποβαθμίζουν την ποιότητα των ανοδικών μεταφορών δεδομένων στην ανοδική ζώνη. Το ζήτημα της ζώνης συχνοτήτων ανερχόμενης ζεύξης αντιμετωπίστηκε πρόσφατα από το πρότυπο DOCSIS 2.0, το οποίο προσφέρει έως και 30 Mbit/s ανερχόμενη ζεύξη και 50 Mbit/s κατερχόμενη ζεύξη [31, 32].

Επειδή τα αδρανή κανάλια εκπομπής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά δεδομένων, το διαθέσιμο εύρος ζώνης downstream είναι σχεδόν απεριόριστο. Η ομάδα Cable Labs μόλις άρχισε να αναπτύσσει το πρότυπο DOCSIS 3.0, το οποίο αναμένεται να παρέχει ταχύτητες δεδομένων 100 Mbit/s upstream και 200 Mbit/s downstream για τους τελικούς πελάτες [33].



Εικόνα 14 Αρχιτεκτονική DOCSIS.

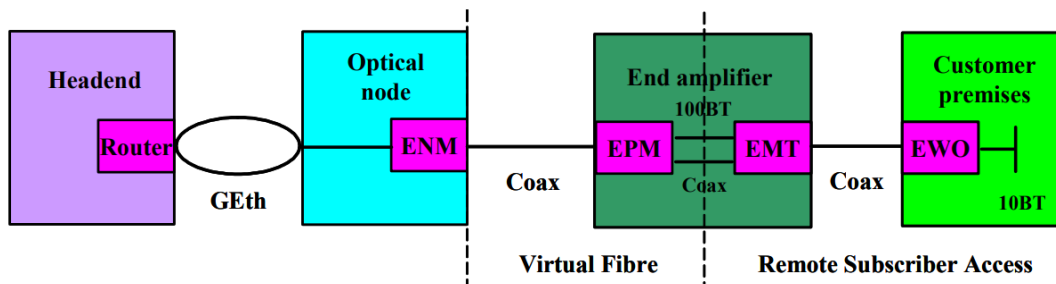
Το Σχήμα 14 απεικονίζει την αρχιτεκτονική διάταξη του DOCSIS. Παρόμοια με ό,τι φαίνεται στην Εικόνα 13, το σύστημα καλωδίωσης μεταξύ του HE και των καταναλωτών απεικονίζεται στην Εικόνα 13. Η μεταφορά Ethernet χρησιμοποιείται για τις οπτικές γραμμές μεταξύ του HE και των οπτικών κόμβων, ενώ η μεταφορά DOCSIS

χρησιμοποιείται μεταξύ του οπτικού κόμβου και των πελατών. Σε έναν οπτικό κόμβο περιλαμβάνεται ένα σύστημα τερματισμού καλωδιακού μόντεμ (CMTS) για την αποστολή και τη λήψη σημάτων από και προς τους πελάτες. Οι θέσεις των πελατών συνδέονται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας καλωδιακά μόντεμ (CM). Οι υπολογιστές και άλλες οικιακές συσκευές δεδομένων συνδέονται με τις θύρες Ethernet των μόντεμ.

### **4.3.2 Ethernet στο σπίτι**

Το Ethernet to the Home (EttH) είναι μια μέθοδος που καθιερώθηκε πρόσφατα από την Teleste Oyj. Ο στόχος ήταν να παρακαμφθεί ο περιορισμός του εύρους ζώνης των συστημάτων DOCSIS [34]. Το EttH χρησιμοποιεί τις τεχνικές εικονικής ίνας και απομακρυσμένης πρόσβασης συνδρομητών, οι οποίες παρέχουν απομόνωση του πιο ευαίσθητου σε παρεμβολές τμήματος δικτύου από το υπόλοιπο τμήμα ενός καλωδιακού δικτύου. Μια αμφίδρομη γραμμή δεδομένων μπορεί να μεταδοθεί μεταξύ ενός οπτικού κόμβου και των εγκαταστάσεων ενός πελάτη χρησιμοποιώντας αποδοτική διαμόρφωση και την προσέγγιση της εικονικής ίνας.

Το Σχήμα 15 απεικονίζει τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του EttH. Το HE παραδίδει δεδομένα σε οπτικούς κόμβους μέσω γραμμών Gigabit Ethernet. Ως μεταγωγέας Ethernet, ένας οπτικός κόμβος παραδίδει πλαίσια δεδομένων σε έναν αριθμό τμημάτων ομοαξονικού καλωδίου. Κάθε διασύνδεση τμήματος ενσωματώνει ένα Ethernet Node Modem (ENM) που διαμορφώνει και μεταδίδει ένα σήμα Ethernet μέσω του ομοαξονικού καλωδίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτό. Στην κατεύθυνση της αντίστροφης μετάδοσης, το ENM λαμβάνει και αποδιαμορφώνει ένα σήμα Ethernet από τη θέση του πελάτη. Το αποδιαμορφωμένο σήμα πολυπλέκεται στη συνέχεια με σήματα από άλλα ομοαξονικά τμήματα για να δημιουργηθεί μια ροή πλαισίων Ethernet.



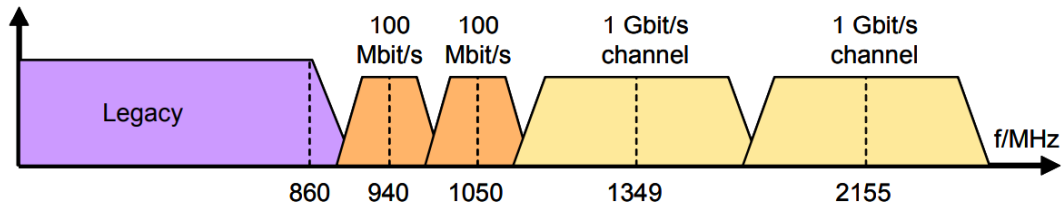
Εικόνα 15 Αρχιτεκτονική Ethernet-to-the-Home.

Αυτή η ροή δεδομένων παραδίδεται στο HE μέσω μιας οπτικής σύνδεσης Gigabit Ethernet. Το διαμορφωμένο σήμα Ethernet από ένα Ethernet Network Modem (ENM) καταλήγει σε ένα Ethernet POP Modem (EPM), το οποίο προσφέρει μια τοπική διασύνδεση Ethernet σε ένα Ethernet Multitap (EMT) ή σε οποιοδήποτε άλλο σύστημα πρόσβασης συνδρομητών που υποστηρίζει τη μεταφορά Ethernet. Το EMT λειτουργεί ως μεταγωγέας Ethernet που συνδέεται με πολλές συνδέσεις Ethernet 10 Mbit/s. Το EttH παρέχει την υπηρεσία Ethernet over Coax (EoC)- η απομακρυσμένη πρόσβαση συνδρομητών αναφέρεται στη δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω του δικτύου φορέα HFC χρησιμοποιώντας μια συμβατική διασύνδεση Ethernet.

Κάθε σήμα Ethernet στα 10 Mbit/s μεταδίδεται μαζί με το τηλεοπτικό σήμα μέσω της οικιακής ομοαξονικής σύνδεσης. Στη θέση του πελάτη, τα τηλεοπτικά σήματα λαμβάνονται από μια κανονική πρίζα CATV, ενώ το σήμα Ethernet λαμβάνεται μέσω μιας πρίζας Ethernet Wall Outlet (EWO). Με τον άλλο τρόπο, το EWO μεταδίδει το σήμα Ethernet μέσω της ομοαξονικής σύνδεσης στο EMT. Έτσι, το EWO παρέχει μια κανονική διασύνδεση Ethernet 10 Mbit/s στον τελικό χρήστη.

#### 4.3.3 Δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης επόμενης γενιάς

Το σύστημα Ευρυζωνικού Δικτύου Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς (NBAN), όπως ορίζεται στο [35], είναι μια αναβάθμιση καλωδιακού δικτύου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 16, χρησιμοποιεί το ανεκμετάλλευτο φάσμα συχνοτήτων ομοαξονικού καλωδίου από 909 έως 2466 MHz για να ενεργοποιήσει δύο κανάλια Ethernet 100 Mbit/s και δύο κανάλια Ethernet 1 Gbit/s. Επιπλέον, μπορεί να προσφέρει πρόσθετες υπηρεσίες, όπως Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP), Connection Admission Control (CAC), διακομιστές τοπολογίας και Network Management System (NMS).



Εικόνα 16 Κατανομή συχνοτήτων NBAN.

Οι παλαιότεροι ενισχυτές καλωδιακών δικτύων δεν υποστηρίζουν συχνότητες NBAN-συνεπώς, η υιοθέτηση αυτού του συστήματος απαιτεί είτε την αναβάθμιση των υφιστάμενων ενισχυτών είτε την εγκατάσταση νέων ενισχυτών. Συνήθως, τα τμήματα καλωδιακού δικτύου χρησιμοποιούν ενισχυτές σε πλήρη ισχύ και η μόνη εφικτή μέθοδος για την εφαρμογή του NBAN είναι η αντικατάσταση όλων των σημερινών ενισχυτών. Αυτό είναι δαπανηρό, και ως εκ τούτου το NBAN δεν χρησιμοποιείται συνήθως.

## 5. Οπτική μετάδοση

Στο παρόν κεφάλαιο αξιολογείται η βιωσιμότητα και η ανθεκτικότητα των εννοιών για τις οπτικές μεταφορές που περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Η αξιολόγηση βασίζεται στα κριτήρια που αναφέρονται στην επόμενη ενότητα.

### 5.1 Ανάγκες για το επερχόμενο οπτικό δίκτυο πρόσβασης

Για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων για τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης, είναι απαραίτητη μια θεώρηση των μελλοντικών υπηρεσιών πρόσβασης, των εφαρμογών και των απαιτήσεων των τελικών χρηστών. Σε ένα χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ έργο θεματικού δικτύου για τις τεχνολογίες της κοινωνίας της πληροφορίας (IST) με την ονομασία OPTIMIST (Optical Technologies in Motion for the IST Programme), καθορίστηκαν οι μελλοντικές προοπτικές για την οπτική δικτύωση. Τα αποτελέσματα του έργου ήταν σημαντικά για τον καθορισμό των ακόλουθων ορισμών.

#### 5.1.1 Λειτουργικότητα του δικτύου

##### Οικιακοί πελάτες

Οι πελάτες που χρησιμοποιούν υπηρεσίες με επίκεντρο την τηλεόραση, όπως τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV), βίντεο κατά παραγγελία (VoD), εικόνα σε εικόνα, τηλεοπτική μετάδοση, προσωπική συσκευή εγγραφής βίντεο, τηλεοπτικό/ηχητικό jukebox, ανταλλαγή εικόνας/βίντεο και διαδραστική τηλεοπτική τηλεφωνία, ενδέχεται να απαιτούν ρυθμούς μετάδοσης έως και 20 Mbit/s. Αυτό ισχύει μόνο εάν παρέχεται ένας τηλεοπτικός σταθμός κάθε φορά. Εάν είναι επιθυμητοί πολλοί ταυτόχρονοι τηλεοπτικοί σταθμοί, απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Οι πελάτες που χρησιμοποιούν υπηρεσίες με επίκεντρο τον υπολογιστή, όπως πρόσβαση στο Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, ζωντανή τηλεόραση στον υπολογιστή, διαδραστικά παιχνίδια VoD και ανταλλαγή εικόνας/βίντεο, ενδέχεται να απαιτούν ρυθμούς μετάδοσης bit έως και 5 Mbit/s. Στο ανερχόμενο ζεύξη, απαιτούνται ταχύτητες

αιχμής έως και 2 Mbit/s για την παροχή λειτουργικότητας της υπηρεσίας και την ανταλλαγή δεδομένων σε κάθε μία από τις παραπάνω καταστάσεις χρηστών.

### **Επιχειρηματικοί πελάτες (μικρές επιχειρήσεις)**

Η πρόσβαση στο Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (VPN), οι επεκτάσεις LAN, οι τηλεδιασκέψεις και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο που βασίζεται σε διακομιστή αποτελούν πιθανές προσφορές για μικρές επιχειρήσεις. Για να είναι δυνατές αυτές οι υπηρεσίες, απαιτείται ρυθμός μετάδοσης έως και 10 Mbit/s ανά χρήστη και στις δύο κατευθύνσεις μεταφοράς.

### **Επιχειρηματικοί πελάτες (μεγάλες επιχειρήσεις)**

Όταν χρησιμοποιούν δίκτυα αποθήκευσης (SAN), μισθωμένες γραμμές ή υπηρεσίες VPN, οι μεγάλες εταιρείες απαιτούν συμμετρικά κανάλια μεταφοράς με ελάχιστη απαίτηση εύρους ζώνης 10 Gbit/s. Εάν η προσφορά υπηρεσιών περιορίζεται σε τηλεφωνικές υπηρεσίες, τηλεδιασκέψεις και πρόσβαση στο Διαδίκτυο, μπορεί να αρκεί ένας ρυθμός πρόσβασης 1 Gbit/s και στις δύο κατευθύνσεις μεταφοράς.

### **Υπεροχή της υπηρεσίας (QoS)**

Η φωνητική και η βιντεοδιάσκεψη είναι αμφίδρομες υπηρεσίες που χρειάζονται ελάχιστη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Για παράδειγμα, η επικοινωνία VoIP απαιτεί η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο να μην υπερβαίνει τα 150 χιλιοστά του δευτερολέπτου (ή τα 400 χιλιοστά του δευτερολέπτου για διεθνείς κλήσεις) [37]. Υπάρχουν μέθοδοι για την εξασφάλιση χαμηλής καθυστέρησης από άκρο σε άκρο στα παλαιά δίκτυα, αλλά ο θεμελιώδης μηχανισμός στα δίκτυα πακέτων είναι η διάκριση πακέτων.

### **Granularity**

Granularity υποδεικνύει το μέγεθος της μικρότερης μονάδας κατανομής της μεταφορικής ικανότητας του δικτύου και σε ορισμένα δίκτυα επηρεάζει επίσης τον ελάχιστο χρόνο κύκλου ή την καθυστέρηση μεταξύ διαδοχικών στροφών μετάδοσης μιας συσκευής δικτύωσης. Η μικρότερη granularity είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική υποστήριξη υπηρεσιών, ιδίως στα δίκτυα πρόσβασης. Μπορεί επίσης

να βοηθήσει στη μείωση των καθυστερήσεων και στη μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων του δικτύου μεταφοράς.

### **Διαθεσιμότητα**

Βλάβες εξαρτημάτων ή καλωδίων/ινών μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την μη προσβασιμότητα μιας σύνδεσης. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου, οι χρήστες του δικτύου μπορεί να επιλέξουν να περιμένουν την επίλυση του προβλήματος από τον επισκευαστή ή να επιθυμούν την ανα-δρομολόγηση της κυκλοφορίας τους μέσω εναλλακτικής οδού εν αγνοία τους. Στο τελευταίο σενάριο, πρέπει να αναπτυχθεί εκ των προτέρων ένας μηχανισμός προστασίας του δικτύου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαθεσιμότητας του δικτύου με πρόσθετο κόστος.

### **5.1.2 Υπηρεσίες για δίκτυα**

#### **Διπλό παιχνίδι**

Σε ολόκληρο τον κλάδο, η ιδέα ενός ενιαίου δικτύου που παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες τηλεφώνου, δεδομένων και τηλεόρασης παραμένει ισχυρή. Ορισμένοι έχουν δηλώσει ακόμη ότι αν η οπτική ίνα φτάσει στις κατοικίες, αυτό θα καταστεί εφικτό. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το απαραίτητο εύρος ζώνης, αυτό το τριπλό παιχνίδι μπορεί να είναι ήδη εφικτό. Ωστόσο, οι ακόλουθες ανησυχίες απαιτούν περαιτέρω προσπάθειες για να συμφωνηθούν δημόσια και να νομοθετηθούν:

#### **Ανοικτή πρόσβαση**

Το κλειδί για την ενεργοποίηση των μελλοντικών μοντέλων υπηρεσιών δικτύου είναι η ανοικτή πρόσβαση. Ο σκοπός της ανοικτής πρόσβασης είναι να επιτραπεί σε οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσιών να χρησιμοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή για να προσεγγίσει τους τελικούς καταναλωτές. Αυτό περιλαμβάνει συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών (SLA) μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων και των παρόχων υπηρεσιών και συχνά δεν εμποδίζεται από την υποκείμενη μέθοδο μεταφοράς. Στον τομέα αυτό μπορεί να καταγραφεί συνεχής πρόοδος.



## **Διαμόρφωση εικονικής διαδρομής**

Η ανάγκη για εικονικές συνδέσεις δικτύου, όπως τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (VPN), αυξάνεται συνεχώς και τα δίκτυα πρέπει να είναι σε θέση να εγκαθιστούν, να διαχειρίζονται και να τερματίζουν αυτές τις συνδέσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα και σε διάφορες περιστάσεις. Η διατήρηση των συνδέσεων αποτελεί ζήτημα στην κινητή δικτύωση. Οι εικονικές συνδέσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μεταγωγή, παρέχοντας μια ταχύτερη μέθοδο κατεύθυνσης της κυκλοφορίας μεταξύ δύο τοποθεσιών σε σχέση με τη δρομολόγηση βάσει IP ή Ethernet.

## **Ασφάλεια**

Η ασφάλεια των δικτύων έχει ιδιαίτερη σημασία για όλους μας. Πριν από τη δημιουργία ενός δικτύου, οι σχεδιαστές πρέπει να εξετάσουν πώς να αποφύγουν πιθανή κακή χρήση, επιτρέποντας όμως επαρκή ευελιξία. Τα στοιχεία ασφαλείας πρέπει πάντα να επιτρέπουν την προστασία της ιδιωτικής ζωής και το κατάλληλο εύρος ζώνης.

## **Επεκτασιμότητα**

Τα μελλοντικά δίκτυα θα πρέπει να προσφέρουν απομακρυσμένη και δυναμική αναδιαμόρφωση ώστε να προσαρμόζονται αποτελεσματικά στις κυμαινόμενες απαιτήσεις πόρων του δικτύου. Το εύρος ζώνης κατ' απαίτηση (BoD) είναι ένα παράδειγμα υπηρεσίας που προκαλεί δυναμική μεταβολή των πόρων του δικτύου. Επιπλέον, η δομή και η αρχιτεκτονική ενός δικτύου θα πρέπει να διευκολύνει τις ενημερώσεις και να επιτρέπει την επεκτασιμότητα σε απόκριση στις αλλαγές του αριθμού των συνδέσεων δικτύου.

### **5.1.3 Κόστος**

#### **Στοιχεία δικτύου**

Η πλειονότητα των δαπανών του δικτύου πρόσβασης οφείλεται στις φυσικές συνδέσεις δικτύου και στην εγκατάστασή τους. Τα στοιχεία του δικτύου, όπως οι συγκεντρωτές και οι μεταγωγείς, μπορούν επίσης να συμβάλουν σημαντικά στο συνολικό κόστος του δικτύου. Κατά την εγκατάσταση νέων υπηρεσιών, το κόστος εγκατάστασης στον τελικό χρήστη είναι επίσης σημαντικό. Τα μελλοντικά στοιχεία του δικτύου θα πρέπει να είναι φθηνά, ανθεκτικά και απλά στην εγκατάσταση, προκειμένου να διατηρηθούν οι δαπάνες δικτύωσης σε διαχειρίσιμο επίπεδο. Επιπλέον, θα πρέπει να μειωθεί η πολυπλοκότητα του δικτύου και των εξαρτημάτων, καθώς και η απαίτηση για ενέργεια, ψύξη και φυσικό χώρο.

### **Απλή συντήρηση**

Οι απαιτήσεις συντήρησης των στοιχείων του δικτύου θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται και η απομακρυσμένη διαμόρφωση και αυτοματοποίηση θα πρέπει να επιτρέπει τις απαραίτητες εργασίες συντήρησης, όπως ο έλεγχος, η παρακολούθηση και η παροχή. Επιπλέον, τα δίκτυα θα πρέπει να επιτρέπουν τη λειτουργικότητα plug-and-play.

### **Προσαρμοστικότητα**

Το περιβάλλον του δικτύου τείνει να αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και είναι πιο αποδοτικό να προσαρμόζεται η τρέχουσα υποδομή σε αυτές τις αλλαγές παρά να δημιουργείται ένα νέο δίκτυο. Ακόμη και η μερική επαναχρησιμοποίηση παρωχημένου εξοπλισμού και στοιχείων δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους. Εάν το σενάριο αναβάθμισης του δικτύου έχει προγραμματιστεί εκ των προτέρων, οι πάροχοι δικτύου μπορούν απλώς να εφαρμόσουν αυτό το είδος πολιτικής "πληρώνω όσο μεγαλώνω".

## **5.1.4 Ενοποίηση δικτύων**

### **Ετερογενής δικτύωση**

Η Convergence(Σύγκλιση) των δικτύων που βασίζονται στο Πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP) υποδηλώνει ότι τα δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες

μεταφοράς θα συνεργάζονται. Για να μπορέσουν τα διάφορα δίκτυα να συνεργαστούν πλήρως, πρέπει να αντιμετωπιστούν διάφορα τεχνολογικά ζητήματα. Μεταξύ αυτών είναι η απρόσκοπτη περιαγωγή, η κάθετη μεταβίβαση και η μικρο-κινητικότητα [38]. Το δίκτυο μεταφοράς που συνδέει τις διάφορες τοποθεσίες κινητών δικτύων πρέπει να είναι ικανό να υποστηρίξει ετερογενή δικτύωση.

### **Η έννοια της διαλειτουργικότητας**

Η εισαγωγή νέων, ανεξάρτητων από το δίκτυο υπηρεσιών θα αυξήσει τη ζήτηση για διαλειτουργικότητα. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην επανάσταση της κινητής τηλεφωνίας, η οποία μας οδηγεί στην υιοθέτηση μιας νέας προοπτικής. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ταχεία μετάβαση μεταξύ πολλαπλών ασύρματων πρωτοκόλλων είναι μια κρίσιμη τεχνολογική πρόκληση. Μια άλλη ανησυχία με τα συστήματα που βασίζονται σε κυκλώματα είναι η στοίβαξη και η επιβάρυνση σηματοδότησης. Για να είναι αποτελεσματικές οι λύσεις δια-λειτουργικότητας, η υποκείμενη τεχνολογία μεταφοράς πρέπει να υποστηρίζει τόσο τις συνδέσεις μεταγωγής πακέτων όσο και τις συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος.

### **Ικανότητα μετακίνησης πακέτων**

Ορισμένοι έχουν προτείνει ότι ένα συγκλίνον δίκτυο θα μεταφέρει στο μέλλον όλη την κυκλοφορία σε πακέτα IP (κατά προτίμηση IPv6). Η μεταφορά πακέτων θα μπορούσε να παρέχει την απαραίτητη διαφάνεια για να διευκολύνει την αποτελεσματική μετάβαση των κινητών υπηρεσιών μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών μεταφοράς. Επιπλέον, υπάρχει η απαίτηση να παρέχονται διάφορες υπηρεσίες σε ένα ενιαίο δίκτυο και η μεταφορά με βάση τα πακέτα φαίνεται να είναι η βέλτιστη προσέγγιση για το σκοπό αυτό αυτή τη στιγμή.

## **5.2 Αξιολόγηση των μεθόδων παθητικού οπτικού δικτύου**

Οι προσεγγίσεις PON επιδιώκουν ταχύτητες δεδομένων Mbit/s. Η σύσταση H.fsv-opreq της ITU-Draft T [39] υποδεικνύει ότι για μια ποικιλία υπηρεσιών, το FTTH θα

πρέπει να έχει ελάχιστο εύρος ζώνης downstream/upstream 10/2 Mbit/s. Αντίθετα, το συμβούλιο FTTH [40] έχει θέσει τον αντικειμενικό ρυθμό δεδομένων στα 100 Mbit/s. Όπως πάντα, η πρόβλεψη του μέλλοντος είναι δύσκολη, και το κύριο πλεονέκτημα του FTTH είναι η επεκτασιμότητά του, η οποία συνεπάγεται ότι μόλις εγκατασταθεί η οπτική ίνα στο σπίτι, είναι εφικτός σχεδόν οποιοσδήποτε ρυθμός δεδομένων.

### **5.2.1 Ευρυζωνικό οπτικό παθητικό δίκτυο**

Το σύνολο των συστάσεων της ITU-T για το B-PON έχει ολοκληρωθεί και η ανάπτυξη του G-PON συνεχίζεται τώρα. Εν τω μεταξύ, το B-PON ωριμάζει και νέες παγκόσμιες εγκαταστάσεις βρίσκονται σε εξέλιξη, ιδίως στην Ασία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Η αποτελεσματικότητα του B-PON παρέχει ταχύτητες δεδομένων downstream έως και 1,24 Gbit/s και upstream έως και 622 Mbit/s, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των οικιακών πελατών και των μικρών επιχειρήσεων.

Το σύστημα που βασίζεται στο ATM προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση και λεπτή ανάλυση granularity, επομένως η κατανομή του εύρους ζώνης για διαφοροποιημένη κυκλοφορία και η λειτουργία του δικτύου σε πλήρη δυναμικότητα δεν θα πρέπει να είναι προβληματική. Επιπλέον, το B-PON παρέχει τέσσερα τυποποιημένα συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούν σύστημα αυτόματης προστασίας (APS) [1].

### **Παροχές**

Παρόμοια με το ATM, το B-PON μεταδίδει αποτελεσματικά την παλαιά φωνή και άλλες ευαίσθητες στην καθυστέρηση υπηρεσίες χωρίς να εισάγει σημαντική επιβάρυνση στη μεταφορά πακέτων. Τα εικονικά μονοπάτια και οι συνδέσεις ATM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή χωρητικότητας μεταφοράς. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν κρυπτογράφηση σύμφωνα με το πρότυπο προηγμένης κρυπτογράφησης με ιδιωτικό κλειδί παρέχουν ασφαλή επικοινωνία (AES). Αυτές οι λύσεις παρέχουν αρκετή ασφάλεια για την οικιακή επικοινωνία δεδομένων. Το B-PON παρέχει ποικιλία ρυθμίσεων ρυθμού γραμμής για την ανερχόμενη ζεύξη και την κατερχόμενη ζεύξη, με μέγιστο υποστηριζόμενο λόγο διαχωρισμού 32, επιτρέποντας επαρκή επεκτασιμότητα.

## **Οικονομική αποδοτικότητα**

Λόγω των αυστηρών απαιτήσεων καθυστέρησης και επιδόσεων, τα φυσικά εξαρτήματα B-PON υπόκεινται σε αρκετά αυστηρά πρότυπα ποιότητας, τα οποία επηρεάζουν την τιμολόγηση των εξαρτημάτων. Οι τιμές των οπτικών εξαρτημάτων μειώνονται σταθερά και η τάση αυτή θα συνεχιστεί εάν τα συστήματα PON χρησιμοποιηθούν εκτενώς. Επιπλέον, το B-PON προσφέρει δυνατότητες απομακρυσμένης συντήρησης και plug-and-play.

## **Convergence(Σύγκλιση)**

Το προσαρμοστικό στρώμα μεταφοράς ATM υποστηρίζει τη μεταφορά με βάση τα πακέτα και τη Convergence(Σύγκλιση) του δικτύου. Ωστόσο, το στρώμα προσαρμογής ATM είναι λιγότερο ευέλικτο από τη μέθοδο που βασίζεται στο GFP και στερείται των δυνατοτήτων του GFP.

### **5.2.2 Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet**

Το πρότυπο E-PON εγκρίθηκε το καλοκαίρι του 2004. Το πρότυπο δεν καθορίζει κανέναν αλγόριθμο για τη δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (DBA), αφήνοντας την απόφαση αυτή στον κατασκευαστή του εξοπλισμού. Τελικά, ένας ή περισσότεροι από τους προτεινόμενους αλγορίθμους DBA μπορεί να γίνουν το de facto πρότυπο, αλλά στο μεταξύ, οι κατασκευαστές προσφέρουν πολλές μεθόδους. Επιπλέον, το E-PON απαιτεί πιο περίπλοκους αλγορίθμους για τη βέλτιστη κατανομή πόρων από ό,τι το G-PON ή το B-PON.

Αυτή η απεικόνιση βασίζεται στο γεγονός ότι τα δίκτυα B-PON και G-PON επιτρέπουν τον κατακερματισμό πακέτων, αλλά τα δίκτυα E-PON όχι. Πριν από την κατανομή των επιχορηγήσεων στις ONUs, το OLT πρέπει να γνωρίζει τα μεγέθη των upstream πακέτων, προκειμένου να διαθέτει έναν αποτελεσματικό μηχανισμό DBA. Καθώς αυτό αποτελεί εμπόδιο για τους κατασκευαστές, η κατανομή E-timeslot του PON μπορεί να γίνει ευκολότερα διαχειρίσιμη με την εκχώρηση σταθερών χρονοθυρίδων σε κάθε

ONU. Η χρήση της χωρητικότητας μεταφοράς μειώνεται, αλλά το E-PON αντισταθμίζει μέσω ενός σχετικά απλού μηχανισμού DBA.

## **Επιδόσεις**

Επί του παρόντος, η πλειονότητα των οικιακών δεδομένων μεταφέρεται σε πακέτα Ethernet, γεγονός που αποτελεί πρωταρχικό πλεονέκτημα του E-PON. Το E-PON παρέχει επαρκές εύρος ζώνης για κατοικίες και μικρές εταιρείες, ωστόσο το σημερινό πρότυπο 1 Gbit/s μπορεί να καλύψει μόνο εν μέρει τις απαιτήσεις εύρους ζώνης μεγαλύτερων εταιρειών. Το E-PON προσφέρει ευελιξία όπως το Ethernet με *variable granularity* (μεταβαλλόμενο μέγεθος πακέτων) και διάκριση κίνησης βάσει ουράς προτεραιότητας, τα οποία είναι βελτιστοποιημένα για παράδοση δεδομένων βάσει πακέτων. Η μεταφορά με μεταβαλλόμενο μέγεθος πακέτου μπορεί να οδηγήσει σε ποικίλες καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο, υποβαθμίζοντας την ποιότητα της υπηρεσίας. Ωστόσο, με αποτελεσματικό DBA, οι καθυστερήσεις μπορούν να ελεγχθούν εντός αποδεκτών παραμέτρων. Η απόδοση του E-PON σε σενάρια κόπωσης του δικτύου εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τον αλγόριθμο DBA που εφαρμόζεται. Η επιβάρυνση του ρυθμού γραμμής κατά 25% που προκύπτει από την κωδικοποίηση μπλοκ 8B10B αποτελεί μειονέκτημα του E-PON. Το E-PON παρέχει το υψηλότερο επίπεδο λογικής επεκτασιμότητας, ωστόσο δεν καθορίζει πρωτόκολλα ασφαλείας.

Το Providers Ethernet παρέχει μεταφορά τόσο υπηρεσιών δεδομένων που βασίζονται σε πακέτα όσο και παραδοσιακών τηλεφωνικών υπηρεσιών. Οι φωνητικές πληροφορίες αντιστοιχίζονται σε πακέτα Ethernet προκαθορισμένου μεγέθους, παρόμοια με τον τρόπο λειτουργίας του ATM, αλλά με μικρότερη αποτελεσματικότητα [41]. Το VoIP, το οποίο χρησιμοποιείται ήδη παγκοσμίως, είναι η προτιμώμενη στρατηγική. Εάν οι νέες υπηρεσίες μεταφοράς Ethernet ανταποκρίνονται στις προσδοκίες, το E-PON μπορεί επίσης να παρέχει αποτελεσματική παροχή VLAN. Το Ethernet ήταν πάντα επεκτάσιμο, και το ίδιο ισχύει και για το E-PON. Κατά τρόπο

παρόμοιο με τα προηγούμενα PON, η ασφάλεια της επικοινωνίας εξαρτάται από την κρυπτογράφηση των δεδομένων.

### **Αποδοτικότητα κόστους**

Από την αρχή της ανάπτυξης του E-PON, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας ήταν ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα. Επειδή οι φυσικές απαιτήσεις των οπτικών εξαρτημάτων δεν είναι τόσο αυστηρές όσο στα συστήματα B-PON και G-PON, χάνεται κάποια αποδοτικότητα, ιδίως στην ανερχόμενη κατεύθυνση. Επομένως, τα εξαρτήματα E-PON μπορούν να γίνουν πιο προσιτά. Επιπλέον, το E-PON είναι συμβατό με τη δυνατότητα plug-and-play του Ethernet και την απομακρυσμένη συντήρηση. Το Ethernet χρησιμοποιεί πακέτα OAM για πληροφορίες διαχείρισης, επομένως είναι απλή η εισαγωγή νέων δυνατοτήτων διαχείρισης.

### **Convergence(Σύγκλιση)**

Το E-PON βασίζεται εξ ολοκλήρου στο Ethernet, το οποίο παρέχει μετάδοση που βασίζεται αποκλειστικά σε πακέτα. Δεδομένου ότι το στοιχείο που μεταφέρεται μέσα σε ένα πλαίσιο Ethernet είναι ένα πακέτο IP, το E-PON είναι επίσης ικανό να υποστηρίξει ετερογενή δικτύωση.

### **5.2.3 Δυνατότητα παθητικού οπτικού δικτύου Gigabit**

Το G-PON δημιουργήθηκε από το B-PON για να διαχειρίζεται μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων, αν και δεν είναι συμβατό με το B-PON λόγω διαφορετικών τεχνολογικών λύσεων. Είναι συμβατό με τις παραδοσιακές υπηρεσίες δικτύου και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επαύξηση ή την αντικατάσταση των δικτύων SDH.

### **Επιδόσεις**

Παρόμοια με το B-PON, το G-PON επιτρέπει πολλαπλούς ανοδικούς και καθοδικούς ρυθμούς γραμμής. Παρέχει τον μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων από τα τρία PON που

μελετήθηκαν, 2,5 5Gbit/s και στις δύο κατευθύνσεις μεταφοράς. Επιπλέον, υποστηρίζονται το παλαιό ATM και οποιαδήποτε μεταφορά με βάση τα πακέτα. Ακόμη και οι δυνατότητες μεταφοράς Ethernet είναι αποδοτικές, καθώς μέρος της επιβάρυνσης Ethernet λαμβάνεται κατά την ενθυλάκωση. Επιπλέον, το G-PON παρέχει κατακερματισμό πακέτων, επιτρέποντας τη βέλτιστη χρήση του μέσου μεταφοράς. Οι μηχανισμοί QoS και προστασίας στο B-PON ακολουθούν τις ίδιες αρχές. Το G-PON παρέχει επαρκές εύρος ζώνης και QoS για οικιακούς χρήστες και μικρές εταιρείες, ενώ μπορεί να χειριστεί ακόμη και ορισμένες επιχειρηματικές υπηρεσίες. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους, το G-PON προσφέρει τις καλύτερες επιδόσεις μεταξύ των τριών εξεταζόμενων PON.

## **Υπηρεσίες**

Το G-PON έχει σχεδιαστεί για την αποτελεσματική υποστήριξη όλων των ιστορικών, σημερινών και μελλοντικών υπηρεσιών. Η προσέγγιση προσαρμοστικότητας του GEM, η οποία μπορεί να επεκταθεί για να χειριστεί τη μελλοντική τεχνολογία, το καθιστά αυτό δυνατό. Το G-PON είναι ανώτερο από το EPON όσον αφορά την επεκτασιμότητα λόγω των πολλών δυνατοτήτων ρυθμού γραμμής και, κυρίως, του μεγαλύτερου διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η AES είναι η πιο προηγμένη από τις διαθέσιμες μεθόδους κρυπτογράφησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη ασφάλειας. Το G-PON υποστηρίζει το ίδιο πρότυπο κατανομής μήκους κύματος με το B-PON και παρέχει ισοδύναμο QoS με το B-PON. Όσον αφορά την παροχή κίνησης, το G-PON χρησιμοποιεί τα ίδια αναγνωριστικά θύρας 12 bit με τα αναγνωριστικά Ethernet VLAN και τα αναγνωριστικά εικονικών καναλιών ATM.

## **Αποδοτικότητα κόστους**

Λόγω των αυστηρότερων φυσικών κριτηρίων για τα στοιχεία μεταφοράς, το G-PON δεν μπορεί να ανταγωνιστεί το E-PON από άποψη τιμής. Κατά συνέπεια, η απόδοση έχει κόστος. Το G-PON είναι το πιο εξελιγμένο από τα εξεταζόμενα PON, δημιουργώντας προβλήματα συντήρησης. Η απομακρυσμένη συντήρηση ακολουθεί το ίδιο πρότυπο με τα δίκτυα SDH/SONET, το οποίο είναι ήδη αναγνωρίσιμο από τους φορείς εκμετάλλευσης σε όλο τον κόσμο. Με τη βοήθεια της μεταφοράς B-PON, το G-



PON μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσαρμόσιμη λύση που υποστηρίζει την αρχή "pay as you grow".

### **Convergence(Σύγκλιση)**

Το G-PON παρέχει την καλύτερη υποστήριξη για ετερογενή δικτύωση μεταξύ όλων των PON. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του G-PON είναι το επίπεδο προσαρμοστικότητας με βάση το GFP, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει οποιαδήποτε υπηρεσία, είτε είναι προσανατολισμένη στο πακέτο είτε στο κύκλωμα.

#### **5.2.4 Παθητικό οπτικό δίκτυο με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος**

Το WDM-PON επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών σε πολλαπλά μήκη κύματος. Η υλοποίηση πολλών καναλιών μήκους κύματος, καθένα από τα οποία μπορεί να εκχωρηθεί σε ορισμένες υπηρεσίες ή καταναλωτές, αποδίδει υψηλή χωρητικότητα μεταφοράς. Ενδεικτικά, ο συντελεστής εξασθένησης της οπτικής ίνας είναι 0,5 dB/km, ενώ ο συντελεστής εξασθένησης του χάλκινου καλωδίου είναι περίπου 30 dB/km σε σύγκριση με τη συμβατική ηλεκτρική διαμετακόμιση. Επιπλέον, οι μετατροπείς μήκους κύματος είναι παθητικά εξαρτήματα χαμηλού κόστους και αναπτύσσονται συνεχώς φθηνότερες εναλλακτικές λύσεις [42].

#### **5.2.5 Έκτακτο παθητικό οπτικό δίκτυο**

Το SuperPON, επίσης γνωστό ως ενεργό οπτικό δίκτυο (AON), είναι μια εναλλακτική μέθοδος οπτικής δικτύωσης που προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα στον σχεδιασμό του δικτύου. Τα ενεργά εξαρτήματα επιτρέπουν την εμβέλεια του δικτύου ή τις αναλογίες διαχωρισμού να είναι όσο υψηλές απαιτείται, χωρίς να απαιτούνται συμβιβασμοί λόγω ανεπαρκούς ισχύος σήματος. Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας στο SuperPON, πρέπει να

χρησιμοποιηθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ενεργών και παθητικών οπτικών στοιχείων που υλοποιούν πολλά μήκη κύματος.

Έτσι, οι πλεονεκτικότερες πτυχές και των δύο συστημάτων μπορούν να συμπεριληφθούν σε ένα ενιαίο δίκτυο. Τα ενεργά εξαρτήματα του SuperPON είναι πιο δαπανηρά από τα παθητικά εξαρτήματα και απαιτούν τροφοδοσία και ίσως ψύξη στο ερμάριο. Το υψηλό κόστος μπορεί να διανεμηθεί σε μια ευρύτερη βάση χρηστών είναι μια έγκυρη δήλωση.

## **5.3 Αξιολόγηση των διαδικασιών point-to-point**

### **5.3.1 Ψηφιακές πλειόχρονες και σύγχρονες ιεραρχίες**

Η PDH ως τεχνολογία έχει δημιουργηθεί για την παλαιά μετάδοση φωνής και δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ιδέα επιβίωσης υπό το πρίσμα των προαναφερθέντων περιορισμών. Για την παλαιά SDH, μπορεί να εξαχθεί το ίδιο συμπέρασμα, αν και με διαφορετικό σκεπτικό. Χρησιμοποιώντας την ενθυλάκωση ATM ή το πρωτόκολλο PPP (Point-to-Point protocol), το ιστορικό SDH διευκολύνει τη μεταφορά δεδομένων με βάση πακέτα. Η αναποτελεσματικότητα της υποστήριξης υπηρεσιών δεδομένων, δηλαδή η κατανομή εύρους ζώνης και η προσαρμοστικότητα, είναι η κύρια αιτία της μη επιβίωσής του. Ο SDH επόμενης γενιάς περιλαμβάνει βελτιώσεις που τον καθιστούν νόμιμο ανταγωνιστή στην αγορά υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων- ως εκ τούτου, η συζήτηση που ακολουθεί επικεντρώνεται αποκλειστικά στον SDH επόμενης γενιάς.

#### **Επιδόσεις**

Χρησιμοποιώντας συνδεσιμότητα σημείο-προς-σημείο, η επόμενη γενιά SDH παρέχει την απαραίτητη χωρητικότητα για μικρές εταιρείες και ακόμη και για ορισμένες μεγάλες επιχειρήσεις. Η προσέγγιση SDH επιτρέπει μόνο συμμετρικές συνδέσεις και μόνο υβριδικά συστήματα μπορούν να φιλοξενήσουν αποτελεσματικά ασύμμετρες οικιακές συνδέσεις (π.χ. SDH συμπληρωμένο με PON ή xDSL). Το SDH παρέχει

αποτελεσματική προστασία με καθυστέρηση αποκατάστασης μικρότερη από 50 χιλιοστά του δευτερολέπτου, με αποτέλεσμα εξαιρετική διαθεσιμότητα. Δεν είναι δυνατή η κατανομή των πόρων του δικτύου τόσο εύκολα όσο με την επισήμανση VLAN του Ethernet, αλλά μπορούν να παρασχεθούν κατάλληλες δυνατότητες κατανομής.

### **Υπηρεσίες**

Χρησιμοποιώντας την τεχνική εικονικής συνένωσης και προσαρμογής της χωρητικότητας των συνδέσεων, την απομακρυσμένη παροχή και την κλιμακούμενη κατανομή εύρους ζώνης, το SDH επόμενης γενιάς παρέχει granularity συγκρίσιμη με αυτή του Ethernet. Η κίνηση SDH διεκπεραιώνεται εξ ολοκλήρου εντός του δικτύου του φορέα εκμετάλλευσης και διαχειρίζεται από τον εξοπλισμό του φορέα εκμετάλλευσης, επομένως δεν τίθεται θέμα ασφάλειας. Η επόμενη γενιά SDH μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια τεχνολογία δικτύου σε υβριδικά συστήματα, προσφέροντας υπηρεσίες μεταφοράς σε δίκτυα πρόσβασης B-PON, E-PON και G-PON, για παράδειγμα.

### **Αποδοτικότητα κόστους**

Το SDH επόμενης γενιάς εξακολουθεί να είναι πιο δαπανηρό από το Ethernet, αλλά παρέχει ένα ισχυρό επίπεδο προσαρμοστικότητας που μπορεί να χειριστεί οποιαδήποτε υπηρεσία. Η δυνατότητα μετάδοσης εγγενών υπηρεσιών εκτός από την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών αποτελεί αναμφισβήτητο πλεονέκτημα του SDH επόμενης γενιάς. Οι ιστορικές υπηρεσίες SDH μπορούν να μεταφέρονται ως έχουν στα δίκτυα SDH επόμενης γενιάς, επιτρέποντας σταδιακές αναβαθμίσεις του δικτύου χωρίς να επηρεάζονται οι σημερινές υπηρεσίες και παρέχοντας περισσότερο χρόνο για τα συμβατικά δίκτυα.

## **5.3.2 Ethernet σημείο-προς-σημείο**

### **Επιδόσεις**

Το Ethernet άμεσης διαδρομής παρέχει επαρκή χωρητικότητα για μεγάλες εταιρείες και μπορεί να εξεταστεί και από μικρές επιχειρήσεις. Εάν το εύρος ζώνης δεν μοιράζεται σε πολλά νοικοκυριά, μπορεί να είναι απαγορευτικά δαπανηρό για τους οικιακούς πελάτες. Οι πάροχοι Το Ethernet προσφέρει υπηρεσίες βασισμένες σε πακέτα και μόνο τα δίκτυα Resilient Packet Ring (RPR) παρέχουν δυνατότητες προστασίας. Επιπλέον, το Ethernet υποστηρίζει μεταγωγή και κατανομή εύρους ζώνης για την παροχή πόρων δικτύου.

### **Αποδοτικότητα κόστους**

Το Ethernet έχει λιγότερες αυστηρές απαιτήσεις σε επίπεδο jitter και ισχύος από ό,τι το OTN ή το SDH, επομένως τα εξαρτήματα του Ethernet μπορούν να κατασκευαστούν με λιγότερα χρήματα. Οι συσκευές Ethernet είναι λιγότερο εξελιγμένες από τις συσκευές SDH και OTN, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδοτικότητα και η χρήση του δικτύου.

### **Convergence(Σύγκλιση)**

Το Ethernet είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς που βασίζεται σε πακέτα και διευκολύνει τη Convergence(Σύγκλιση) των δικτύων με επίκεντρο την IP.

### **5.3.3 Οπτικό δίκτυο μεταφοράς**

#### **Επιδόσεις**

Λόγω της τεράστιας χωρητικότητάς του και του ακριβούς κόστους, το OTN δεν μπορεί να θεωρηθεί για οικιακή χρήση ή χρήση σε μικρές επιχειρήσεις. Στο μέλλον, ορισμένοι τεράστιοι οργανισμοί μπορεί να το θεωρήσουν χρήσιμο. Το OTN παρέχει διαχείριση του μήκους κύματος, ισχυρή διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός και επίπεδα παρακολούθησης συνδέσεων tandem, διαφανή μεταφορά σημάτων πελατών και δυνατότητες μεταγωγής [26]. Επιπλέον, παρέχει αποτελεσματική προστασία και επισκευή.

## **Αποδοτικότητα κόστους**

Το OTN αναπτύσσεται για τη διαχείριση πολυάριθμων καναλιών μήκους κύματος υψηλής ταχύτητας, γεγονός που απαιτεί εξοπλισμό που είναι τόσο εξελιγμένος όσο και δαπανηρός. Convergence(Σύγκλιση) Το OTN διευκολύνει την ετερογενή δικτύωση και τη διαλειτουργικότητα πολλών τύπων δικτύων. Το OTN είναι ικανό να μεταφέρει σήματα πελάτη με βάση διάφορες τεχνολογίες μεταφοράς, όπως το ATM, το Ethernet και το IP.

## **5.4 Αξιολόγηση των μεθόδων πρόσβασης**

### **5.4.1 Πρόσβαση στην καλωδιακή τηλεόραση**

#### **Επιδόσεις**

Το φάσμα συχνοτήτων ανερχόμενης ζεύξης για τα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης περιορίζεται συνολικά σε 60 MHz στην Ευρώπη και 37 MHz στις Ηνωμένες Πολιτείες [43]. Ένα τμήμα αυτής της συχνότητας είναι επίσης ευαίσθητο σε διακοπές από κοινό οικιακό εξοπλισμό. Οι παρεμβολές εμποδίζουν την υιοθέτηση αποτελεσματικών σχημάτων διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης. Το ζήτημα αυτό επιλύθηκε στο DOCSIS 2.0 με τη χρήση βελτιωμένων αλγορίθμων πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση σύγχρονου κώδικα (SCDMA) και πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA) [44], με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται περίπου τριπλάσιος ρυθμός δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης σε σχέση με το DOCSIS 1.1.

Στη μέθοδο Ethernet-to-the-Home (EttH), ο τελικός ενισχυτής απομονώνει το δίκτυο συνδρομητών από το υπόλοιπο καλωδιακό δίκτυο (βλέπε Σχήμα 15), αποτρέποντας τη διάδοση των διαταραχών στο δίκτυο. Σχεδόν 1,5 φορές ο δυναμικός ρυθμός δεδομένων του DOCSIS 2.0 καθίσταται δυνατός με την ελεύθερη από διακοπές διέλευση [34]. Η EttH προμηθεύει περαιτέρω τους καταναλωτές με μια πρίζα Ethernet 10 Mbit/s. Λόγω του κόστους της υλοποίησής του, το δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης

επόμενης γενιάς (NBAN) δεν μπορεί να θεωρηθεί δημοφιλής προσέγγιση. Η απόδοση ενός συστήματος καλωδιακού δικτύου επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι σε ένα καλωδιακό τμήμα. Το εύρος ζώνης ανά χρήστη αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των πελατών ανά τμήμα. Ακόμη και τα συστήματα DOCSIS 1.x διαθέτουν επαρκές εύρος ζώνης λόγω της χρήσης σχετικά μικρών τμημάτων. Εάν τα εξαιρετικά μικρά τμήματα δεν είναι εφικτά, οι οικιακοί πελάτες και οι πελάτες μικρών επιχειρήσεων μπορούν να λάβουν υψηλότερο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας DOCSIS 2.0 ή Ether Transport (μεταφορά Ethernet). Το NBAN είναι επίσης μια βιώσιμη επιλογή για μεγάλους οργανισμούς. Όταν ένα μόντεμ DOCSIS έχει δεδομένα να μεταφέρει, ζητά πρώτα από το σύστημα τερματισμού καλωδιακού μόντεμ (CMTS) να ορίσει μια χρονοθυρίδα μετάδοσης ή μπορεί να προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει ανοικτές χρονοθυρίδες μετάδοσης που είναι προσβάσιμες σε όλα τα μόντεμ. Η συζήτηση με το CMTS είναι χρονοβόρα και μπορεί να οδηγήσει σε σχετικά μεγάλες περιόδους αναμονής, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του TCP [45]. Ο χρονοπρογραμματισμός πακέτων με βάση την προτεραιότητα υποστηρίζεται από το DOCSIS 1.1 και 2.0 και οι δυσκολίες ασφάλειας έχουν επιλυθεί με την ειδικά κατασκευασμένη έννοια Baseline Privacy Interface (BPI) και το Data Encryption Standard (DES). Το ETTH χρησιμοποιεί μεταγωγή Ethernet, επιτρέποντας στους καταναλωτές να λαμβάνουν μόνο τα πακέτα που απευθύνονται σε αυτούς χωρίς την ανάγκη περαιτέρω κρυπτογράφησης. Το NBAN είναι ένα δίκτυο σημείο-προς-σημείο και η ασφάλεια της επικοινωνίας είναι εγγενής σε αυτή την τεχνολογία.

### **Αποδοτικότητα κόστους**

Πολυάριθμες επενδύσεις σχετίζονται με την υποδομή του καλωδιακού δικτύου και οι φορείς εκμετάλλευσης προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν την απόδοση αυτών των επενδύσεων. Επιπλέον, το δίκτυο περιλαμβάνει έναν αριθμό ενισχυτών που απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία. Λόγω της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού του δικτύου, ο οποίος χειρίζεται διάφορες συχνότητες και τεχνικές διαμόρφωσης, είναι δαπανηρή η αντικατάσταση των παλαιών συσκευών με νέες. Όταν το δίκτυο καθίσταται απαρχαιωμένο, μια προσέγγιση για τη μείωση του κόστους αναβάθμισης θα ήταν η αντικατάσταση τουλάχιστον ενός μέρους του με οπτικό δίκτυο και η αποφυγή της

απόκτησης υπερβολικού αριθμού δαπανηρού ηλεκτρικού εξοπλισμού. Το EttH επιτρέπει επίσης την κατάργηση του μόντεμ τελικού χρήστη, το οποίο απαιτείται για τα συστήματα που βασίζονται στο DOCSIS.

### **Convergence(Σύγκλιση)**

Το DOCSIS, το EttH και το NBAN επιτρέπουν τη μεταφορά πακέτων Ethernet και τηρούν τη Convergence(Σύγκλιση) των δικτύων που βασίζονται στην IP.

## **5.4.2 Πρόσβαση μέσω καλωδιακής γραμμής**

### **Επιδόσεις**

Τα xDSL παρέχουν συχνά ασύμμετρο εύρος ζώνης, με μεγαλύτερη χωρητικότητα downstream από ό,τι upstream. Ωστόσο, το συμμετρικό εύρος ζώνης μπορεί να υποστηριχθεί μόνο σε μικρές αποστάσεις, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για οικιακούς πελάτες και πελάτες μικρών επιχειρήσεων που βρίσκονται κοντά στο DSLAM. Οι προσεγγίσεις xDSL δεν μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη χωρητικότητα για μεγαλύτερες επιχειρήσεις. Τα συστήματα xDSL προσφέρουν διαφοροποιημένες υπηρεσίες εγκαθιστώντας Ethernet πάνω από ATM και κατανέμοντας χωρητικότητα μεταφοράς μέσω εικονικών καναλιών ATM. Δεδομένου ότι οι DSLAM καθοδηγούν τα πακέτα δεδομένων στα καθορισμένα κανάλια, η ασφάλεια της επικοινωνίας διατηρείται και η υποκλοπή γίνεται εξαιρετικά δύσκολη.

### **Αποδοτικότητα κόστους**

Ο καταναλωτής πρέπει να αγοράσει ή να νοικιάσει τον απαραίτητο εξοπλισμό για να αποκτήσει ένα μόντεμ DSL. Κάθε κατοικία διαθέτει ήδη συνδεδεμένα συνεστραμμένα καλώδια χαλκού και η χρήση υπηρεσιών xDSL δεν αποκλείει τη χρήση συμβατικού τηλεφώνου. Οι DSLAM και άλλες συσκευές δικτύου αυξάνουν τα έξοδα δικτύωσης του φορέα εκμετάλλευσης.

## **Convergence(Σύγκλιση)**

Λόγω του γεγονότος ότι τα xDSL προσφέρουν μετάδοση Ethernet μέσω ATM, είναι επίσης συμβατά με τη Convergence(Σύγκλιση) δικτύων που βασίζονται σε IP.

### **5.4.3 Ασύρματη σύνδεση**

#### **Επιδόσεις**

Θεωρητικά, οι τεχνολογίες τρίτης γενιάς (3G), όπως το Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), παρέχουν επαρκές εύρος ζώνης για υπηρεσίες διαδικτύου και τηλεόρασης χαμηλής ανάλυσης, καθώς και για τηλεδιασκέψεις. Ωστόσο, ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών εντός της εμβέλειας ενός σταθμού βάσης, το εύρος ζώνης ανά χρήστη ενδέχεται να μην επαρκεί. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν ζώνες υψηλών συχνοτήτων παρέχουν λύση σε αυτό το ζήτημα. Οι σταθμοί βάσης WLAN επιτρέπουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων πρόσβασης, ωστόσο, λόγω της ζώνης υψηλών συχνοτήτων, η εμβέλειά τους είναι περιορισμένη.

Ως εκ τούτου, τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για την κάλυψη μικροσκοπικών περιοχών, όπως τα hotspots και οι καφετέριες. Επιπλέον, το WLAN μπορεί να θεωρηθεί λύση πρόσβασης για νοικοκυριά και μικρές επιχειρήσεις. Στην ασύρματη πρόσβαση, προέχει η υποστήριξη της κινητικότητας. Τα τρέχοντα πρότυπα (GSM, GPRS, UMTS) παρέχουν κινητικότητα μέσω δύσκολα διαχειρίσιμων, περίπλοκων δικτύων. Προβλέπεται, ωστόσο, ότι αυτή η κατάσταση θα αλλάξει τα επόμενα χρόνια [38]. Ένα άλλο ζήτημα που σχετίζεται με τα WLAN είναι η τιμολόγηση ή ο τρόπος χρέωσης των πελατών για την ασύρματη πρόσβαση. Μια επιλογή που συνιστάται είναι η χρήση της κάρτας SIM (Subscriber Identity Module) που βασίζεται στο GSM για την ταυτοποίηση και την τιμολόγηση στα δίκτυα WLAN [47]. Αποδοτικότητα κόστους Όσον αφορά τα GSM, GPRS και UMTS, μπορεί να δηλωθεί ότι αυτά τα περίπλοκα συστήματα δεν ανταποκρίνονται στη συνθήκη αποδοτικότητας κόστους [46]. Ένα WLAN που υποστηρίζει τη μεταφορά Ethernet θα ήταν μια ανώτερη επιλογή. Ωστόσο,



είναι αδύνατο να παρασχεθεί συγκρίσιμη ικανότητα κινητού δικτύου μέσω ενός WLAN με βάση το Ethernet.

### **Convergence(Σύγκλιση)**

Η διαλειτουργικότητα μεταξύ των ασύρματων τεχνολογιών καθίσταται ολοένα και πιο ζωτικής σημασίας και θα πρέπει να είναι εφικτή η μετάβαση μεταξύ τεχνολογιών χωρίς να διακόπτεται μια σύνδεση ή μια επικοινωνία που βρίσκεται σε εξέλιξη. Αυτό το είδος απόδοσης είναι σήμερα ανέφικτο λόγω της σηματοδότησης και των εξελιγμένων συστημάτων- συνεπώς, η δομή του δικτύου θα πρέπει να αλλάξει στο εγγύς μέλλον. Τα κινητά τηλέφωνα θα χρησιμοποιούν επίσης πιο εξελιγμένους τρόπους για τον εντοπισμό των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.

## 6. Παροχή υπηρεσιών εικονικού ιδιωτικού δικτύου

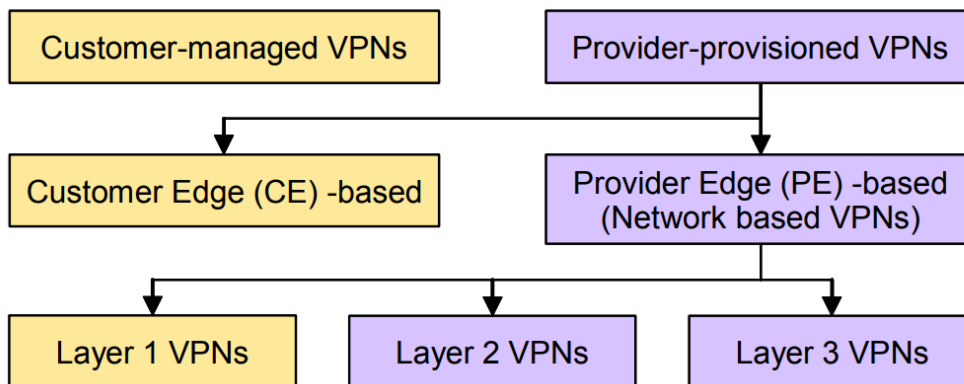
Τα VPN έχουν γίνει ένας κερδοφόρος κλάδος για τους παρόχους δικτύων, οι οποίοι προσφέρουν στους πελάτες ασφαλείς μεθόδους μεταφοράς για τη σύνδεση διαφορετικών τοποθεσιών LAN. Η διαδικασία δημιουργίας αυτών των καναλιών στο δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης είναι γνωστή ως παροχή VPN. Οι πιο πρόσφατες ανάγκες παροχής υπηρεσιών VPN δεν καλύπτονται από τα σημερινά μεγάλα συστήματα μεταφοράς [49], όπως προκύπτει από τις προβλέψεις της αγοράς. Αυτό έχει οδηγήσει σε προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων τεχνικών παροχής υπηρεσιών VPN. Δεδομένου ότι αναμένεται ότι περισσότερο από το 90% της κυκλοφορίας IP προέρχεται μέσω Ethernet-LANs [50], επικεντρωνόμαστε στις υπηρεσίες VPN που βασίζονται στο Ethernet, αλλά εξετάζουμε επίσης εν συντομία εναλλακτικές επιλογές VPN.

### 6.1 Διαμόρφωση εικονικών ιδιωτικών δικτύων

Ένα VPN μπορεί να χαρακτηριστεί ως περιορισμένη επικοινωνία μεταξύ μιας συλλογής τοποθεσιών που χρησιμοποιούν μια κοινή ραχοκοκαλιά με κίνηση που δεν σχετίζεται με τη σύνδεση [51]. Οι πάροχοι υπηρεσιών αναζητούν εδώ και αρκετό καιρό καινοτόμες μεθόδους παροχής υπηρεσιών VPN για εταιρικούς πελάτες. Συνδυάζουν ανάγκες όπως η αποτελεσματική αξιοποίηση του κεντρικού δικτύου μεταγωγής πακέτων, ένα υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης στην ανάπτυξη και συντήρηση των VPN και η ικανότητα παροχής ποικίλων υπηρεσιών μέσω της ίδιας υποδομής.

Οι μέθοδοι VPN κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις αρμοδιότητες διαχείρισης, με αποτέλεσμα να διακρίνονται σε μεθόδους που διαχειρίζεται ο πελάτης και σε μεθόδους που παρέχονται από τον πάροχο [51]. (βλ. Σχήμα 17). Η τυποποίηση έχει δώσει προτεραιότητα στην τελευταία μέθοδο, η οποία υποδιαιρείται με βάση την τοποθέτηση του ειδικού εξοπλισμού VPN. Τα VPN που βασίζονται στην άκρη του πελάτη (CE) διακρίνονται από τα VPN που βασίζονται στην άκρη του παρόχου (PE). Τα VPNs επιπέδου 1 (L1VPNs), τα VPNs επιπέδου 2 (L2VPNs) και τα VPNs επιπέδου 3

(L3VPNs) είναι περαιτέρω ταξινομήσεις των VPNs με βάση το PE, συχνά γνωστά ως VPNs με βάση το δίκτυο (L3VPNs).



Εικόνα 16 Ταξινόμηση εικονικού ιδιωτικού δικτύου.

### 6.1.1 Ιδιωτικά εικονικά δίκτυα επιπέδου 1

Η ομάδα μελέτης 13 της ITU-T έχει καθορίσει προδιαγραφές και αρχιτεκτονικά μοντέλα υψηλού επιπέδου για τα L1VPN που έχουν φτάσει σε ώριμη κατάσταση [52]. Τα L1VPN χρησιμοποιούν και βελτιώνουν τους κοινούς μηχανισμούς ελέγχου και διαχείρισης των L2VPN και L3VPN και τους εφαρμόζουν στο δίκτυο επιπέδου 1 για τη δημιουργία υπηρεσιών VPN μέσω TDM και OTN. Ωστόσο, τα L1VPNs είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής αυτού του άρθρου.

### 6.1.2 Ιδιωτικά εικονικά δίκτυα επιπέδου 2

Τα παραδοσιακά VPN επιπέδου-2 παρέχονται ως VPN μισθωμένων γραμμών και ασφαλή VPN που φιλοξενούνται στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Στα VPN μισθωμένης γραμμής, οι τοποθεσίες των πελατών συνδέονται μέσω ενός ξεχωριστού δικτύου κορμού επιπέδου-2 χρησιμοποιώντας χειροκίνητα παρεχόμενα στατικά εικονικά κανάλια. Στα VPN στις εγκαταστάσεις του πελάτη, όλα τα χαρακτηριστικά VPN υλοποιούνται στον εξοπλισμό του πελάτη και ο πάροχος υπηρεσιών είναι υπεύθυνος

μόνο για τη σύνδεση μεταξύ των τοποθεσιών του πελάτη. Τεχνικά, οι συμβατικές υπηρεσίες επιπέδου 2 μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

### **Ethernet LAN**

Η τυποποιημένη ετικέτα 802.1Q, η οποία φέρει ένα αναγνωριστικό VLAN, παρέχει μια απλή μέθοδο για το διαχωρισμό της κυκλοφορίας μεταξύ διαφόρων LAN. Το αναγνωριστικό VLAN είναι μια αναγνώριση 12 bit που επιτρέπει την υποστήριξη 4094 διαφορετικών LAN.

### **Εικονικά κυκλώματα ATM**

Το ATM είναι η τυπική μέθοδος για την παροχή VPN εδώ και αρκετό καιρό. Ανάλογα με τη διασύνδεση, η επικεφαλίδα ATM περιέχει είτε 24 είτε 28 bit για την ταυτοποίηση εικονικών κυκλωμάτων. Αυτά τα bit διαχωρίζονται σε δύο πεδία: 16 bits για το πεδίο Virtual Channel Identifier (VCI), 8 bits για τη διεπαφή χρήστη προς δίκτυο (UNI) και 12 bits για τη διεπαφή δικτύου προς δίκτυο (NNI) για το πεδίο Virtual Path Identifier (VPI). Αυτά παρέχουν σε ένα δίκτυο 256 εικονικές διαδρομές UNI ή 4096 NNI και 65536 εικονικά κανάλια μέσα σε κάθε διαδρομή.

### **Κατοπτρισμός αναμετάδοσης**

Το Frame Relay είναι επίσης μια κοινή και καθιερωμένη μέθοδος για διαφανείς λύσεις επικάλυψης μεταφοράς. Το Frame Relay Data Link Connection Identifier (DLCI ID) προσφέρει 10, 17 ή 24 bits για την αναγνώριση εικονικών διαδρομών, με υποστήριξη έως και 17 εκατομμυρίων VLANs.

### **6.1.3 Ιδιωτικά εικονικά δίκτυα επιπέδου 3**

Τα VPN επιπέδου 3 παρέχονται μέσω δικτύων MPLS (Multi-Protocol Label Switching) ή δικτύων IP, δηλαδή IP tunneling πάνω από δίκτυο μεταγωγής πακέτων (PSN), και διαχειρίζονται από έναν μόνο ή μια ομάδα παρόχων υπηρεσιών που συνεργάζονται

μεταξύ τους. Η δυνατότητα L3VPN υλοποιείται σε συσκευές άκρου παρόχου και δρομολογείται μέσω συσκευών πυρήνα παρόχου που δεν έχουν επίγνωση VPN (δρομολογητές πυρήνα IP, μεταγωγείς MPLS ή δρομολογητές μεταγωγής ετικέτας, LSR) μέσω σηράγγων VPN. Από τεχνική άποψη, οι υπηρεσίες VPN επιπέδου 3 μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής.

### **VPN που χρησιμοποιούν GRE**

Το Generic Routing Encapsulation (GRE) είναι ένας μηχανισμός για την ενθυλάκωση ενός πακέτου IP μέσα σε ένα άλλο πακέτο IP και τη δημιουργία εικονικών σηράγγων σε ένα δίκτυο. Η αγορά έχει μετατοπιστεί σταδιακά προς τα MPLS L3VPN για την υλοποίηση IP VPN μεγάλης κλίμακας [53].

### **Τα VPN που βασίζονται σε MPLS**

Η ενθυλάκωση MPLS είναι μια πρόσφατα αναπτυχθείσα μέθοδος για την επικόλληση μιας ετικέτας MPLS σε οποιοδήποτε πακέτο ή πλαίσιο και τη δρομολόγησή του μέσω ενός δικτύου MPLS [54]. Συνεπώς, οι αποτελεσματικές δυνατότητες προστασίας και αποκατάστασης και η επεκτασιμότητα του MPLS μπορούν να αξιοποιηθούν στην παροχή VPN.

### **Τα VPN που βασίζονται στο IPsec**

Η ασφαλής IP (IPsec) είναι μια εναλλακτική μέθοδος ενθυλάκωσης VPN με βάση την IP. Προσφέρει πολύτιμα χαρακτηριστικά, όπως η ισχυρή κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο, αλλά επειδή δεν συνδέεται άμεσα με τα VPN Ethernet, είναι εκτός του αντικειμένου αυτού του άρθρου [49].

## **6.1.4 Προβλήματα με τη διαμόρφωση εικονικών ιδιωτικών δικτύων**

Οι υπηρεσίες ATM και Frame Relay επιπέδου 2 κυριαρχούν στα έσοδα των κορυφαίων παρόχων υπηρεσιών μεταξύ των προσεγγίσεων VPN που περιγράφηκαν

προηγουμένως [55]. Παρ' όλα αυτά, οι υπηρεσίες αυτές παρέχονται συχνά σε ογκώδη εξειδικευμένα δίκτυα L2, με απαγορευτικά δαπανηρή εγκατάσταση, ρυθμίσεις και παρακολούθηση. Από την άλλη πλευρά, προσφέρουν διαφανή ταξίδια μεταξύ συγκεκριμένων τοποθεσιών και αφήνουν τη διαχείριση της κίνησης στους πελάτες. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό για τις επιχειρήσεις που επιδιώκουν να διασφαλίσουν την ασφάλεια και τη διαχείριση της κυκλοφορίας τους. Εναλλακτικά, μπορεί να θεωρηθεί ως ανεπάρκεια, επειδή δεν θέλουν όλοι οι πελάτες να πληρώνουν ξεχωριστό προσωπικό διαχείρισης ΤΠ για τη διαχείριση των υπηρεσιών ΤΠ τους. Επί του παρόντος, ο κλάδος δημιουργεί υπηρεσίες μεταφοράς επιπέδου 2 με βάση το Ethernet για να λύσει τις ανησυχίες της πολυπλοκότητας, της δύσκολης διαχείρισης και του υψηλού κόστους.

Το Ethernet χρησιμοποιείται για την κατασκευή συνδέσεων LAN εδώ και αρκετό καιρό, αλλά η αύξηση των αναγκών VPN έχει καταστήσει αναποτελεσματικές τις παραδοσιακές λύσεις VLAN και MAC. Η έκρηξη του πίνακα διευθύνσεων MAC στους μεταγωγείς του παρόχου, ο περιορισμένος χώρος αναγνωριστικών VLAN, η απομόνωση και η αλληλεπίδραση των πρωτοκόλλων ελέγχου του παρόχου και του πελάτη, η υλοποίηση διαφόρων λειτουργιών διαχείρισης της κίνησης για την τήρηση των συμβατικών SLA και ο σχεδιασμός αποτελεσματικών εργαλείων OAM [50] είναι τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται. Αυτές οι ανησυχίες είναι συλλογικά γνωστές ως ζητήματα επεκτασιμότητας του metro Ethernet.

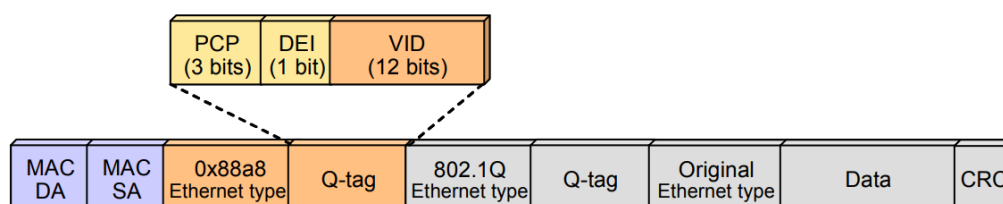
Τα VPN επιπέδου 3 παρέχουν μεγαλύτερη επεκτασιμότητα και απλότητα στην παροχή υπηρεσιών με τη διοχέτευση πακέτων IP μέσω δικτύων IP ή MPLS. Το MPLS παρέχει εξαιρετικές δυνατότητες πολυπλεξίας, υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης και εξαιρετικές ιδιότητες μηχανικής κίνησης. Το MPLS είναι επίσης κλιμακούμενο, καθώς δεν χρειάζεται να γνωρίζει την παρουσία άλλων τοποθεσιών και οι εταιρικοί δρομολογητές άκρων πρέπει απλώς να αλληλεπιδρούν με τους γείτονές τους. Με το MPLS, οι οργανισμοί δεν μπορούν να ελέγχουν τη δική τους δρομολόγηση, απαιτώντας από τον πάροχο υπηρεσιών να συμμετέχει και να διατηρεί τις διευθύνσεις IP του πελάτη, όπως συνηθίζεται κατά την πώληση υπηρεσιών IP. Αυτό υποδηλώνει ότι το MPLS δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσφορά υπηρεσιών επικάλυψης δικτύου L2VPN.

## 6.2 Πρωτόκολλο επέκτασης Ethernet

Οι προτεινόμενες αναβαθμίσεις Q-in-Q και MAC-in-MAC [50], [55] επιλύουν τα προβλήματα κλιμάκωσης στην παροχή Ethernet VLAN επιτρέποντας την εισαγωγή πολλαπλών διαδοχικών ετικετών VLAN ή διευθύνσεων MAC σε ένα πλαίσιο Ethernet. Επιπλέον, έχει προταθεί μια νέα ετικέτα, η ετικέτα Virtual MAN (VMAN), για την αντικατάσταση της ετικέτας VLAN στα πλαίσια Ethernet. Όλες αυτές οι τροποποιήσεις αποσκοπούν στη βελτίωση της επεκτασιμότητας του δικτύου Ethernet.

### Q-in-Q

Το IEEE 802.1ad έχει τυποποιήσει την τεχνολογία Q-in-Q, επίσης γνωστή ως stacked VLAN ή VLAN stacking, και επί του παρόντος διατίθενται εμπορικές λύσεις. Η προσέγγιση Q-in-Q ελέγχει τα αναγνωριστικά VLAN είτε ως ξεχωριστά αναγνωριστικά, καθιερώνοντας έναν σαφή διαχωρισμό μεταξύ των VLAN παρόχου και πελάτη, είτε ως συνδυασμένα VID, επιτρέποντας τη χρήση μιας μεγαλύτερης περιοχής VLAN. Μόνο το πρώτο σχήμα είναι συμβατό με το πρότυπο 802.1Q, το οποίο περιορίζει τον αριθμό των χρηστών VLAN σε 4094. Η στοίβαξη δύο VID επιτρέπει σε κάθε έναν από τους 4094 πελάτες να δημιουργήσει έως και 4094 εικονικές συνδέσεις [56]. Το Σχήμα 18 απεικονίζει την ενθυλάκωση Q-in-Q και τα πεδία πληροφοριών της ετικέτας VLAN υπηρεσίας, τα οποία περιλαμβάνουν το σημείο κωδικού προτεραιότητας (PCP), τον δείκτη επιλεξιμότητας απόρριψης (DEI) και το αναγνωριστικό VLAN (VID) [89].



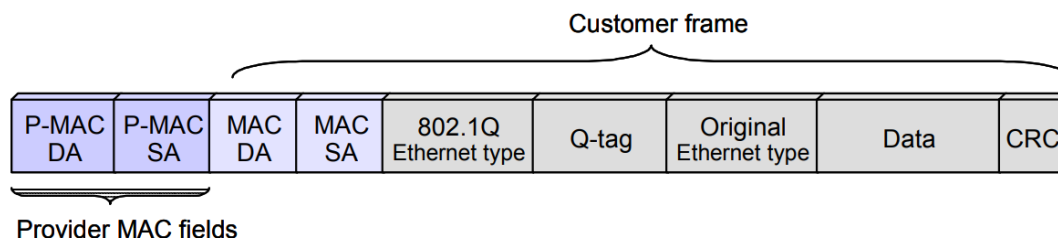
Εικόνα 17 Ενθυλάκωση Q-in-Q.

### Εικονική ετικέτα MAN (VMAN)

Η νέα ετικέτα VMAN εισάγεται από τη λύση VMAN. Η έννοια είναι παρόμοια με την ετικέτα VLAN, με τη διαφορά ότι η ετικέτα είναι μεγαλύτερη σε αυτή την περίπτωση. Η αρχική έννοια VMAN είχε 24 bits για τη δημιουργία εικονικών μονοπατιών σε μητροπολιτικά δίκτυα [56].

## MAC-in-MAC

Παρόμοια με την Q-in-Q είναι η ιδέα MAC-in-MAC, συχνά γνωστή ως MAC address stacking (MAS) με VLAN stacking. Για να αυξηθεί η επεκτασιμότητα, είναι απαραίτητο να υπάρχουν διακριτές διευθύνσεις MAC πελατών και παρόχων (P-MAC) (βλ. Σχήμα 19). Αυτό το σύστημα προσφέρει διαφάνεια στην αναγνώριση υπηρεσιών και στο πρωτόκολλο ελέγχου συνδρομητών. Είναι επίσης κλιμακούμενο, αλλά έχει αυξημένη επιβάρυνση [56]. Διευρυμένη επικεφαλίδα πλαισίου Ethernet - Η ομάδα μελέτης επέκτασης πλαισίου IEEE 802.3 [57] διερευνά επί του παρόντος τις επεκτάσεις πλαισίου Ethernet. Οι επεκτάσεις επιτρέπουν οποιαδήποτε ή όλες τις προαναφερθείσες επεκτάσεις και χαρακτηριστικά πρωτοκόλλου, συμπεριλαμβανομένης της ενθυλάκωσης Ethernet MPLS, του πλαισίου 802.1AE MACSec και του πλαισίου 802.1ad με ετικέτες.



Εικόνα 18 Ενθυλάκωση MAC-in-MAC.

Οι επεκτάσεις πρωτοκόλλου Ethernet ενισχύουν την επεκτασιμότητα του Ethernet. Το Q-in-Q επιτρέπει τη στοίβαξη δικτύων, αλλά περιορίζεται σε 4094 συνδρομητές VLAN. Το MAC-in-MAC καταπολεμά την έκρηξη του πίνακα διευθύνσεων MAC εμποδίζοντας τους μεταγωγείς πυρήνα να αποθηκεύουν μεγάλο αριθμό καταχωρήσεων διευθύνσεων MAC [56]. Και οι δύο μέθοδοι συνεπάγονται πρόσθετη επιβάρυνση μεταφοράς, η οποία επηρεάζει κυρίως εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση με μικροσκοπικά μεγέθη πακέτων, όπως το VoIP και το TDM over Ethernet. Δεν είναι



όλες οι προτεινόμενες αναβαθμίσεις συμβατές με το πρότυπο Ethernet, και οι προσθήκες στο υπάρχον πρότυπο αναμένονται [57].

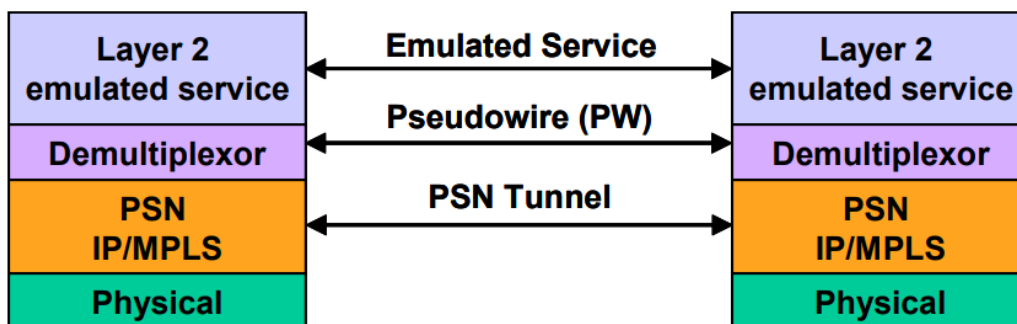
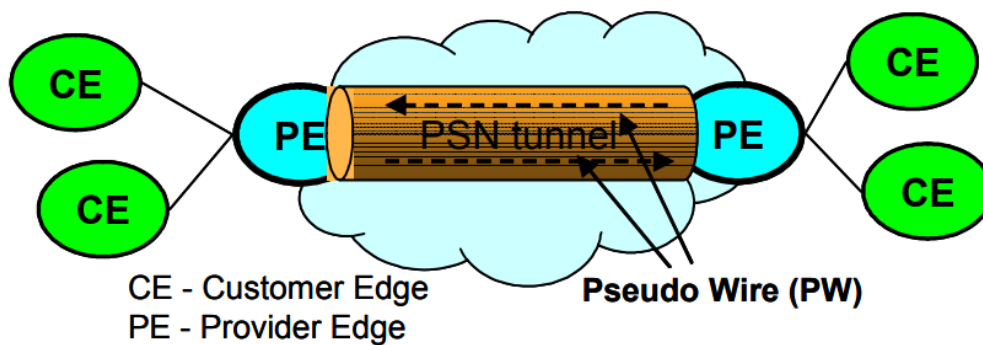
### **6.3 Εικονικά ιδιωτικά δίκτυα επιπέδου 2**

Οι μέθοδοι για την προσφορά υπηρεσιών L2 πάνω από δίκτυα μεταγωγής πακέτων (PSN) παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον. Επί του παρόντος, υπάρχουν πρωτοβουλίες για την τυποποίηση της μεταφοράς της κυκλοφορίας επιπέδου-2 σε υπάρχοντα δίκτυα IP και MPLS. Το "Pseudo Wire Emulation Edge to Edge (PWE3)" [58] και οι ομάδες εργασίας "Layer-2 Virtual Private Networks (L2vpn)" [59] της Internet Engineering Task Force (IETF) ασχολούνται με το θέμα αυτό. Προτείνουν την εξομοίωση κυκλωμάτων Ethernet, ATM, SDH/SONET και Frame Relay μέσω PSN. Αυτές οι έννοιες βασίζονται στη διαμετακόμιση ενθυλακωμένης επικοινωνίας επιπέδου 2 μέσω ενός δικτύου που παρέχει συνδέσεις ψευδοκαλωδίου (PW) από άκρο σε άκρο.

#### **6.3.1 Συνδέσεις ψευδοσυρμάτων**

Στις προτάσεις της IETF, οι σήραγγες VPN μιμούνται τη συμπεριφορά μιας σύνδεσης ή ενός καλωδίου σε μια υποδομή χωρίς σύνδεση και οι σήραγγες αναφέρονται ως ψευδοκαλώδια (PW) ή μισθωμένες γραμμές πακέτων. [60]. Ένα PW είναι η σύνδεση μεταξύ δύο κυκλωμάτων σύνδεσης και συσκευών άκρου παρόχου (PE). Frame Relay DLCIs, ATM VPI/VCIs, θύρες Ethernet, VLANs, συνδέσεις HDLC, συνδέσεις PPP σε μια φυσική διασύνδεση, σύνοδοι PPP μέσω μιας σήραγγας L2TPv3 (Layer-2 Tunneling Protocol version 3), MPLS LSPs κ.λπ. Τα PWs είναι αμφίδρομες συνδέσεις μέσω του PSN, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20. Οι συνδέσεις μπορούν να διαμορφωθούν χειροκίνητα ή να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα σηματοδότησης όπως το Border Gateway Protocol (BGP), το LDP [63] ή τις δυνατότητες σηματοδότησης του L2TPv3 [62]. Τα PWs πρέπει να δημιουργηθούν πριν από τη δημιουργία του εξομοιωμένου κυκλώματος και να καταστραφούν όταν το εξομοιωμένο κύκλωμα δεν υπάρχει πλέον.

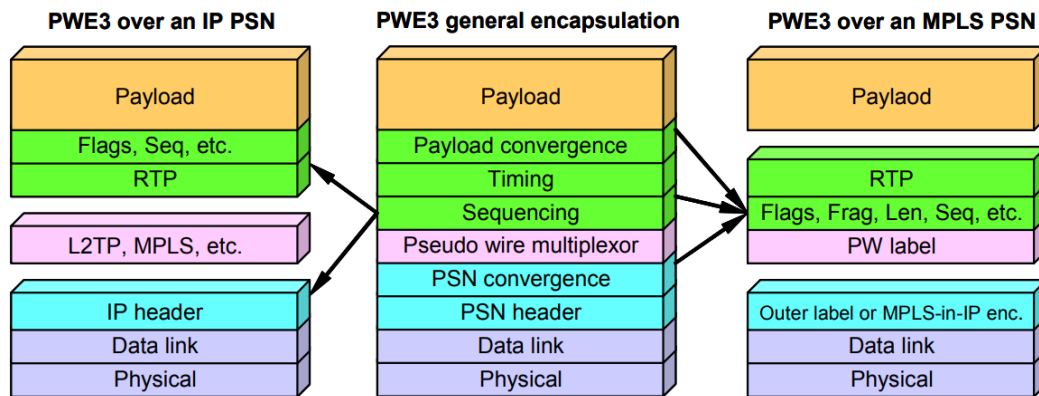
Είναι δυνατόν να κατασκευαστούν πολλά PW μεταξύ τελικών σημείων και στη συνέχεια να ανατεθούν διακριτοί τύποι κυκλοφορίας σε κάθε PW ή να κατασκευαστεί μόνο ένα PW και να χρησιμοποιηθούν αναγνωριστικά και μεταγωγή για τη διάκριση της κυκλοφορίας. Κατά την αντιγραφή της υπηρεσίας επιπέδου-2 στο δίκτυο PSN, το ωφέλιμο φορτίο επιπέδου-2 εφοδιάζεται πρώτα με μια κεφαλίδα PW που αποτελείται από ένα πεδίο πολυπλέκτη που προσδιορίζει το συγκεκριμένο PW στο οποίο ταξιδεύει το πακέτο. Για να ταξιδέψει ένα πακέτο από ένα τελικό σημείο PW σε ένα άλλο τελικό σημείο PW, πρέπει να διασχίσει μια σήραγγα PSN, η οποία απαιτεί μια επιπλέον επικεφαλίδα PSN. Το Σχήμα 21 απεικονίζει παραδείγματα ενθυλάκωσης δεδομένων για την εξομοίωση PW (PWE) μέσω IP και MPLS. Εφόσον ένα PSN είναι ικανό να παραδίδει κεφαλίδες ενθυλάκωσης PW, επιτρέπεται σύμφωνα με το πρωτόκολλο IETF να χρησιμεύσει ως επίπεδο μεταφοράς. Το L2TP χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση PW σε δίκτυα IP, ενώ το LDP χρησιμοποιείται σε δίκτυα MPLS [53].



Εικόνα 19 Συνδέσεις ψευδοκαλωδίων σε μια σήραγγα PSN.

Το L2TPv3 είναι μια επέκταση του L2TP που επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα για τη μεταφορά κίνησης εκτός PPP. Η ενθυλάκωση της κίνησης MPLS L2 αναφέρεται συνήθως ως ενθυλάκωση "draft-Martini" [64], από το όνομα του συγγραφέα του πρώτου προσχεδίου του Διαδικτύου. Τα PWs κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας την ενθυλάκωση draft-Martini με τη δημιουργία ενός ζεύγους

εικονικών συνδέσεων MPLS μονής κατεύθυνσης μεταξύ των τερματικών σημείων, μία για την εξερχόμενη κίνηση και μία για τη λήψη της κίνησης. Τα δίκτυα ATM, Ethernet, Frame Relay και SDH/SONET υποστηρίζονται πλέον από την ενθυλάκωση MPLS L2. Οι τεχνικές αυτές αναλύονται στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 20 Ενθυλάκωση ψευδοκαλώδιο.

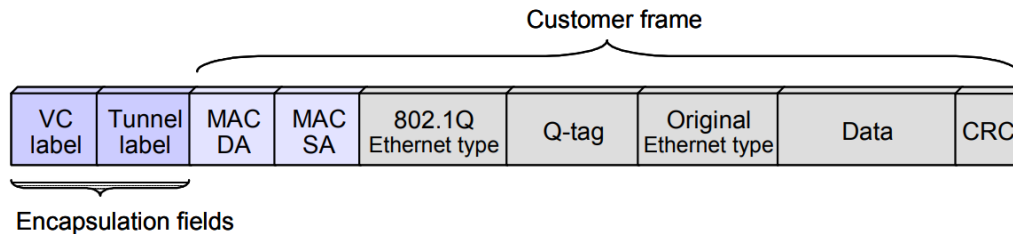
## Ethernet σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων

**Ethernet over IP** Τα Ethernet PWs διαμορφώνονται ως σύνοδοι L2TPv3 μέσω του δικτύου IP. Μια σύνοδος ξεκινά με την παροχή μιας θύρας Ethernet ή ενός VLAN και τη σύνδεσή της με ένα PW. Ένα PW μπορεί να είναι είτε μια θύρα Ethernet είτε ένα VLAN Ethernet, επιτρέποντας τη σύνδεση μεταξύ δύο φυσικών θυρών ή LAN Ethernet. Σε κάθε PW εκχωρείται ένα PW ID που το προσδιορίζει μοναδικά. Το L2TPv3 ενθυλακώνει την πλήρη επικεφαλίδα Ethernet, εκτός από τον πρόλογο, ανεξάρτητα από την παρουσία της ετικέτας 802.1Q. Για τον τύπο PW θύρας Ethernet, τα πλαίσια μεταδίδονται μεταξύ των θυρών χωρίς να τροποποιείται η επικεφαλίδα. Αφού το πακέτο ταξιδέψει μέσω του PW, οι ετικέτες VLAN μπορούν να τροποποιηθούν στις λειτουργίες Native Service Processing (NSP).

## Ethernet μέσω MPLS

Χρησιμοποιώντας στοχευμένο LDP, τα Ethernet PWs σε ένα δίκτυο MPLS διαμορφώνονται ως εικονικές συνδέσεις MPLS [64]. ("draft Martini" ενθυλάκωση). Η ενθυλάκωση είναι συγκρίσιμη με το L2TPv3 με τη διαφορά ότι ο τύπος θύρας του PW

αναφέρεται ως raw mode PW και ο τύπος VLAN του PW αναφέρεται ως tagged mode PW. Στην εικόνα 22 απεικονίζεται η συμπερίληψη της επικεφαλίδας MPLS στο πλαίσιο Ethernet.



Εικόνα 21 Ενθυλάκωση επιπέδου 2 Ethernet MPLS.

### 6.3.2 ATM μέσα σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων

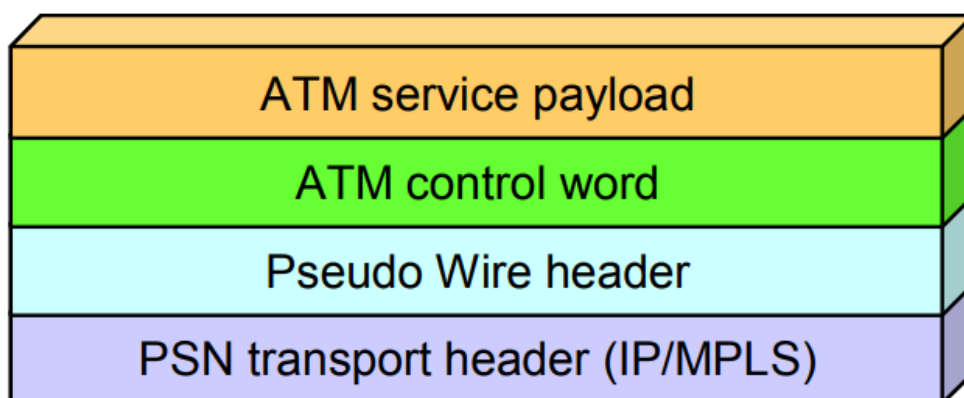
#### ATM μέσω IP

Τα ATM PWs μέσω ενός δικτύου IP εγκαθίστανται ως σύνοδοι L2TPv3 [65] και το ωφέλιμο φορτίο υπηρεσίας ATM μπορεί να παραδοθεί με δύο τρόπους: Λειτουργία AAL5-SDU και λειτουργία κυψέλης. Κάθε εικονικό κύκλωμα AAL5 αντιστοιχίζεται σε μια σύνοδο L2TP στη λειτουργία AAL5-SDU. Χωρίς ρυμουλκούμενο ή bytes συμπλήρωσης, κατασκευάζονται μονάδες δεδομένων υπηρεσίας AAL5. Στη λειτουργία κυψέλης, οι κυψέλες ATM μεταφέρονται σε μια σύνοδο L2TP είτε ως μεμονωμένες κυψέλες είτε ως πολλές κυψέλες συνδεδεμένες σε ένα ενιαίο πακέτο. Τα κύτταρα ATM μεταδίδονται χωρίς το πεδίο Header Error Control (HEC) και το μέγιστο μέγεθος μονάδας μεταφοράς της συνόδου καθορίζει τον αριθμό των συνδεδεμένων κυττάρων ανά πακέτο.

#### ATM μέσω MPLS

Τα ATM PWs πάνω από ένα δίκτυο MPLS εγκαθίστανται ως εικονικές συνδέσεις MPLS χρησιμοποιώντας στοχευμένο LDP (ενθυλάκωση "draft Martini") [64], και η μεταφορά του ωφέλιμου φορτίου της υπηρεσίας ATM μπορεί να βασίζεται σε ενθυλάκωση λειτουργίας ένα προς ένα ή N προς ένα. Μόνο η επιλογή N-to-one είναι απαραίτητη, η οποία αντιστοιχίζει πολλές εικονικές συνδέσεις ή μονοπάτια ATM σε

ένα μόνο PW. Η λειτουργία ένα προς ένα αντιστοιχίζει μία μόνο εικονική σύνδεση σε ένα μόνο PW. Η διαφανής ενθυλάκωση AAL5 περιλαμβάνει επιπλέον δύο προαιρετικές μεθόδους: ενθυλάκωση μονάδας δεδομένων υπηρεσίας και μονάδας δεδομένων ωφέλιμου φορτίου. Το Σχήμα 23 απεικονίζει τη συνολική μορφή της ενθυλάκωσης ATM μέσω PSN. Η επικεφαλίδα PSN εξαρτάται από το υποκείμενο δίκτυο μεταφοράς και το Σχήμα 21 περιγράφει τις υποθετικές επικεφαλίδες καλωδίων. Η λέξη ελέγχου ATM περιέχει σημαίες και ένδειξη του είδους του ωφέλιμου φορτίου PW. Είναι προαιρετική για τη μεταφορά ATM σε λειτουργία κυψέλης.



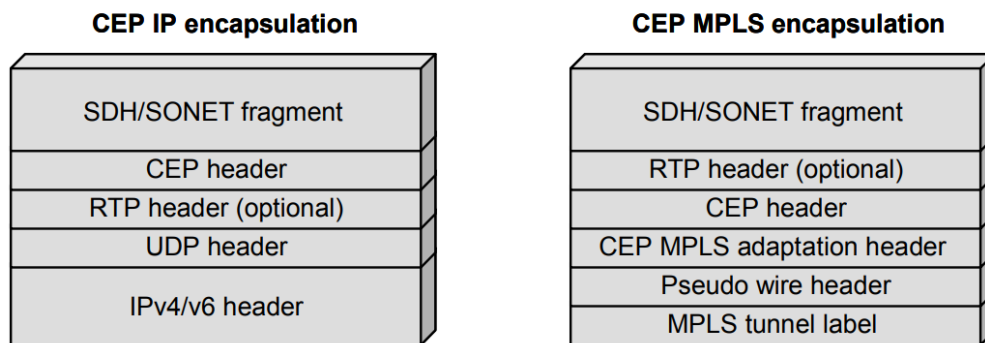
Εικόνα 22 Γενική μορφή ενθυλάκωσης ATM μέσω PSN.

### 6.3.3 TDM σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων

Η IETF έχει διερευνήσει την εξομοίωση κυκλωμάτων TDM και το [66] ορίζει δύο διαφορετικές τεχνικές για TDM πάνω από PSN: μεταφορά με επίγνωση δομής και μεταφορά χωρίς επίγνωση δομής. Για TDM με οποιαδήποτε ποσότητα δομής που επιβάλλεται από την ευθυγράμμιση πλαισίων, εξετάζεται η μεταφορά με επίγνωση δομής, ενώ η μεταφορά με άγνοια δομής μελετάται για μη δομημένο TDM. Το μη δομημένο TDM υποδηλώνει ότι κάθε bit είναι ανοικτό για τα δεδομένα του χρήστη.

Το πρωτόκολλο SAToP (structure-independent TDM over packet) [67] προσφέρει έναν τρόπο για την ενθυλάκωση ροών bit TDM (E1, T1, E3, T3) ως ψευδοκαλώδια μέσω PSN. Το πρωτόκολλο αγνοεί εντελώς κάθε δομή που θα μπορούσε να τεθεί σε αυτά τα σήματα, συμπεριλαμβανομένης της δομής που παρέχεται από την κανονική

πλαίσιο TDM. Αυτή η εξομοίωση είναι κατάλληλη για καταστάσεις στις οποίες οι συσκευές δικτύου του παρόχου υπηρεσιών δεν χρειάζεται να κατανοούν τα δεδομένα TDM ή να συμμετέχουν στη σηματοδότηση TDM. Υπάρχουν τρία είδη μεθόδων με επίγνωση της δομής: structurelocking [68], structure-indication [66] και structure-reassembly [66].



Εικόνα 23 Ενθυλάκωση εξομοίωσης κυκλώματος SDH/SONET μέσω πακέτου (CEP).

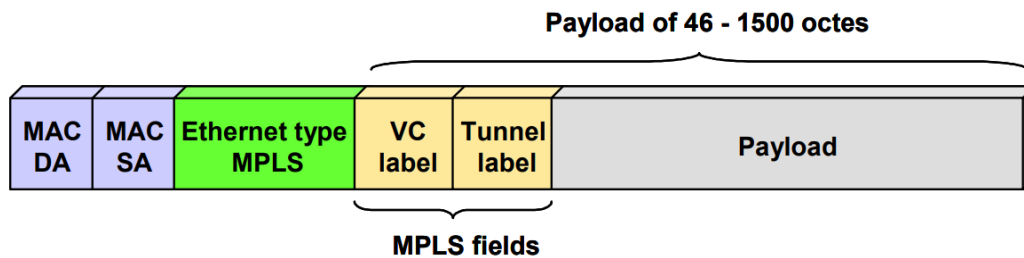
Η προσέγγιση κλειδώματος δομής ορίζει ότι κάθε πακέτο πρέπει να ξεκινά από την αρχή μιας δομής TDM και να περιλαμβάνει μια πλήρη δομή ή αναπόσπαστα πολλαπλάσιά της. Η δομο-δήλωση επιτρέπει στα πακέτα να περιέχουν αυθαίρετα κομμάτια των θεμελιωδών δομών, αλλά χρησιμοποιεί δείκτες για να επισημάνει την αρχή κάθε δομής. Η αρχιτεκτονική προσομοίωσης κυκλώματος SDH/SONET μέσω πακέτων (CEP) βασίζεται στις προαναφερθείσες τεχνικές TDM μέσω PSN [69]. Το Σχήμα 23 απεικονίζει τη διαδικασία ενθυλάκωσης CEP.

#### 6.3.4 Τα πάντα μεταφέρονται μέσω Ethernet

MPLS over Ethernet ἡ Η μέθοδος ενθυλάκωσης MPLS επιτρέπει τη μεταφορά πολλών πρωτοκόλλων. Για να αξιοποιηθεί αυτό στη μεταφορά Ethernet, η IETF καθιερώνει έναν εξειδικευμένο τύπο πλαισίου Ethernet και μηχανισμό ενθυλάκωσης για το MPLS. Το Σχήμα 24 απεικονίζει την κύρια ιδέα της ενθυλάκωσης MPLS over Ethernet.

#### Σήραγγες L2TP μέσω Ethernet

Οι σήραγγες L2TP μπορούν να δημιουργηθούν πάνω από IP, με αποτέλεσμα μια στοίβα πρωτοκόλλων κυκλοφορίας μεταφοράς σήραγγας Ethernet/IP/L2TP.



Εικόνα 24 Ενθυλάκωση MPLS over Ethernet.

### Αμέσως μέσω Ethernet

Οι λύσεις MPLS και IP μέσω Ethernet παρέχουν ένα συγκριτικά υψηλό ποσό επιβάρυνσης. Για το λόγο αυτό, έχουν διερευνηθεί διάφορες λύσεις για τη μεταφορά διαφορετικών τύπων επικοινωνίας μέσω δικτύων μεταφοράς Ethernet. Ωστόσο, καμία από αυτές δεν βρίσκεται προς το παρόν υπό προτυποποίηση. Έχουν μελετηθεί ειδικά πρωτόκολλα για τη μεταφορά ATM μέσω Ethernet [70], [71] και τη μετάδοση TDM μέσω E-PON [41].

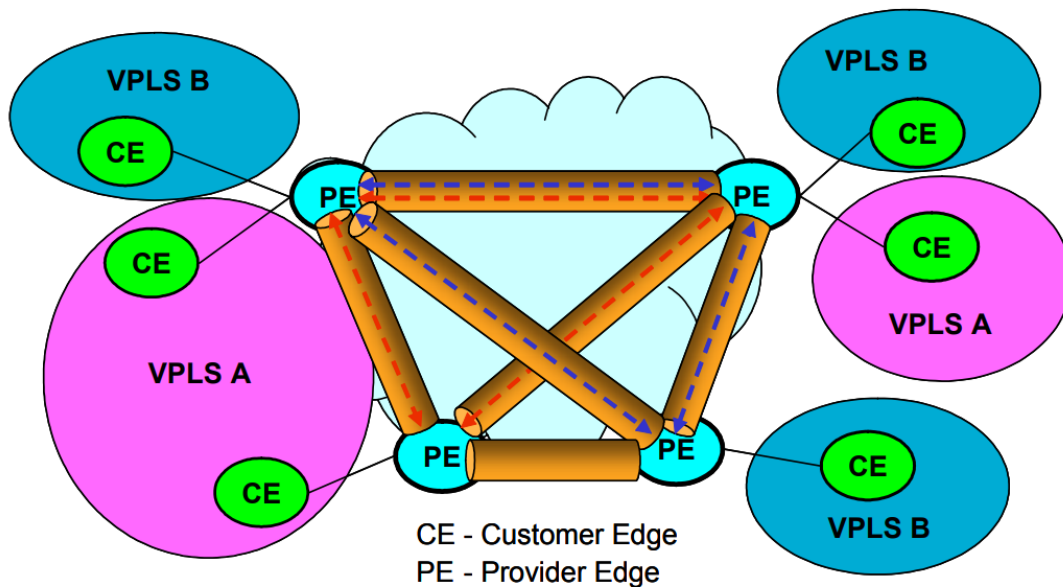
### 6.3.5 Υπηρεσίες εικονικών ιδιωτικών δικτύων στο επίπεδο 2

Η ομάδα I3vnp της IETF δημιουργεί ένα πλαίσιο για τα L2VPN που παρέχονται από τον πάροχο με στόχο την τυποποίηση των πρωτοκόλλων και τη δυνατότητα διαλειτουργικότητας [72]. Η υποδομή αποτελείται από τις υπηρεσίες Virtual Private Wire Service (VPWS), Virtual Private LAN Service (VPLS) και IP-only LAN-like Service (IPLS). Στο [73] μελετώνται περαιτέρω οι ανάγκες των υπηρεσιών.

#### Υπηρεσία εικονικού ιδιωτικού καλωδίου (VPWS)

Το VPWS του L2VPN ορίζει μια υπηρεσία σημείο-προς-σημείο μεταξύ των ΚΕ. Αυτού του είδους η υπηρεσία προσφέρεται εδώ και αρκετό καιρό μέσω των κορμών ATM και

Frame-Relay, αλλά το VPWS περιγράφει μια μέθοδο για την παροχή της ίδιας υπηρεσίας μέσω των δικτύων IP ή/και MPLS.



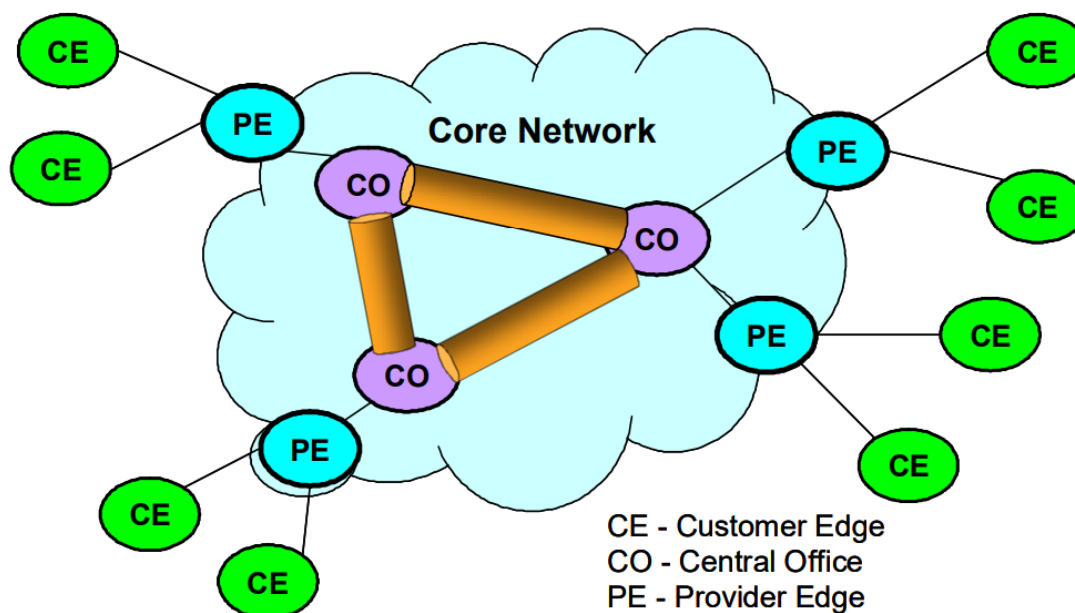
Εικόνα 25 Μοντέλο αναφοράς υπηρεσίας εικονικού ιδιωτικού τοπικού δικτύου.

### Εικονική ιδιωτική υπηρεσία LAN (VPLS)

Το L2VPN VPLS μιμείται ένα LAN με πλήρεις δυνατότητες εκμάθησης και μεταγωγής μεταξύ των τοποθεσιών πελατών. Στην Εικόνα 28 απεικονίζεται το μοντέλο αναφοράς VPLS, στο οποίο τόσο το VPLS A όσο και το VPLS B είναι προσομοιωμένα LAN μέσω ενός PSN. Η εξομοίωση LAN VPLS είναι προσαρμόσιμη, αλλά έχει όλους τους περιορισμούς του πρωτοκόλλου Ethernet, όπως διευθύνσεις MAC, εκμάθηση, μετάδοση και πλημμύρα. Μόνο με τη δημιουργία ενός πλήρους πλέγματος μεταξύ όλων των συσκευών PE που συμμετέχουν στο VPLS μπορούν να αποφευχθούν οι καταιγίδες εκπομπής και οι βρόχοι. Αυτό μπορεί να είναι εντάξει σε μικρά δίκτυα, αλλά σε μεγαλύτερα δίκτυα μπορεί να αναμένονται προβλήματα επεκτασιμότητας. Το ιεραρχικό VPLS (HVPLS), το οποίο επιτρέπει την κλιμάκωση του VPLS με την ενσωμάτωση κεντρικών γραφείων (CO) ή HUBs, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος κλιμάκωσης. Αυτά τα CO είναι διασυνδεδεμένα και πολλά PE μπορούν να συνδεθούν με κάθε CO [49, 53]. Έτσι, ο αριθμός των COs μπορεί να διατηρηθεί στο ελάχιστο και η υπηρεσία μπορεί να παραμείνει επεκτάσιμη.



Το Σχήμα 26 απεικονίζει τη φιλοσοφία σχεδιασμού του HVPLS. Όπως εξηγείται στο [74], ένα VPLS μπορεί να δημιουργηθεί και να συντηρηθεί μέσω της σηματοδότησης του πρωτοκόλλου πολλαπλών πρωτοκόλλων συνοριακής πύλης (MBGP). Το BGP χρειάζεται ένα ξεχωριστό επίπεδο ελέγχου για την επικοινωνία πληροφοριών προσπελασιμότητας, ενώ η χρήση ψευδοκαλωδίων για την υλοποίηση του VPLS μέσω MPLS εξαλείφει την ανάγκη για ξεχωριστό επίπεδο ελέγχου [75]. Σε αυτή την περίπτωση, οι πληροφορίες προσπελασιμότητας συλλέγονται χρησιμοποιώντας τις συμβατικές λειτουργίες γέφυρας μάθησης του επιπέδου δεδομένων. τα ψευδοκαλώδια πρέπει να συνδεθούν με διευθύνσεις MAC. Τα PE θα πρέπει να είναι σε θέση να μαθαίνουν δυναμικά διευθύνσεις MAC και να προωθούν και να αναπαράγουν πακέτα μέσω φυσικών θυρών και ψευδοσυρμάτων, καθώς η στατική ρύθμιση δεν είναι βιώσιμη. Δεν απαιτείται κανένα πρωτόκολλο spanning, καθώς η προώθηση πλήρους πλέγματος και η προώθηση splithorizon αρκούν για τη δημιουργία μιας τοπολογίας χωρίς βρόχους.



Εικόνα 26 Hierarchical Virtual Private LAN Service.

## **6.4 Παροχή εικονικών ιδιωτικών δικτύων επιπέδου 2 με χρήση τεχνολογιών οπτικής πρόσβασης**

Γενικά, απαιτούνται δύο είδη παροχής για την οπτική πρόσβαση. Πρώτον, στην οπτική ζεύξη εκχωρείται ένα αναγνωριστικό ζεύξης συγκεκριμένης τεχνικής ή μια ετικέτα/ταυτότητα δρομολόγησης και στο ηλεκτρικό τμήμα του δικτύου χρησιμοποιούνται εικονικά αναγνωριστικά διαδρομής για την κατανομή της κυκλοφορίας. Όλα τα PON χρησιμοποιούν παρόμοιες στρατηγικές για την παροχή, ωστόσο το μέγεθος των αναγνωριστικών διαφέρει. Οι τεχνολογίες point-to-point έχουν τις δικές τους μοναδικές τεχνικές για την παροχή. Τα αναγνωριστικά παροχής που αφορούν συγκεκριμένες τεχνικές εξετάζονται λεπτομερέστερα παρακάτω.

### **6.4.1 Επόμενη γενιά PDH και SDH/SONET**

Στην επόμενη γενιά PDH και SDH/SONET, οι λογικές συνδέσεις σημείο-προς-σημείο παρέχονται χρησιμοποιώντας ένα 8-bit Channel ID (CID), το οποίο βρίσκεται στην κεφαλίδα επέκτασης σημείου-σημείου GFP [77]. Οι τεχνολογίες υψηλότερου επιπέδου, όπως το Ethernet και τα L3VPN, κάνουν περαιτέρω παροχή. Το GFP προσφέρει μια αποτελεσματική τεχνική μετάδοσης εκτός από την παλιά μεταφορά PSTN: το transparent mapped GFP (GFP-T) [78]. Το GFP-T μετασχηματίζει δεδομένα κωδικοποιημένα με μπλοκ 8B10B σε μπλοκ κώδικα 64B65B, επιτρέποντας την εγγενή μεταφορά κωδικοποιημένων σημάτων 8B10B σε δίκτυα SDH/SONET, ενώ καταναλώνει μικρότερο εύρος ζώνης από το αρχικό σήμα. Αυτή η λύση είναι εφαρμόσιμη σε μια ποικιλία τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου του Ethernet και της πλειονότητας των μεθόδων δικτύων αποθήκευσης (SAN) [22].

### **6.4.2 Ethernet σημείο-προς-σημείο**

Τα τελικά σημεία σύνδεσης στο Ethernet σημείο-προς-σημείο (P2P) αναγνωρίζονται από τις διευθύνσεις MAC της συσκευής σύνδεσης. Καθώς οι συνδέσεις είναι φυσικές,

δεν απαιτείται ένα μοναδικό αναγνωριστικό σύνδεσης. Το Ethernet χρησιμοποιεί ένα συμβατικό αναγνωριστικό VLAN 12-bit και πολυάριθμες μη τυποποιημένες βελτιώσεις για την παροχή εικονικών διαδρομών. Οι εναλλακτικές λύσεις Q-in-Q και MAC-in-MAC προσφέρουν παροχή πολλαπλών επιπέδων με τη στοίβαξη πολλών αναγνωριστικών VLAN ή διευθύνσεων MAC [50]. Έχει προταθεί μια νέα ετικέτα Ethernet με αναγνωριστικό VMAN 24-bit για την παροχή κίνησης σε μητροπολιτικά δίκτυα [79]. Επί του παρόντος, αυτές και άλλες προσεγγίσεις διερευνώνται για ενσωμάτωση στην επέκταση του πλαισίου Ethernet 802.3 [57].

### **6.4.3 Οπτικό παθητικό ευρυζωνικό δίκτυο A**

B-PON OLT ενσωματώνει δυνατότητες διασύνδεσης εικονικών μονοπατιών ATM, επιτρέποντας τη χρήση όλων των 12 bit ενός αναγνωριστικού εικονικής διαδρομής (VPI) για την παροχή εικονικών διαδρομών σε ένα δέντρο B-PON. Το B-PON διαθέτει αναγνωριστικό PON 8 bit, αλλά μπορεί να φιλοξενήσει μόνο 64 οπτικές συνδέσεις. Το PON ID χρησιμοποιείται για τη διεύθυνση των κυψελών πληροφοριών διαχείρισης, ενώ το VPI προσδιορίζει τις κυψέλες δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται ως αποτέλεσμα του τύπου μεταφοράς εκπομπής στην καθοδική κατεύθυνση, ο οποίος επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση της πολυεκπομπής ATM. Στην ανερχόμενη ζεύξη, το PON ID δεν είναι απαραίτητο επειδή το OLT διανέμει χρονοθυρίδες μετάδοσης και γνωρίζει πάντα ποια ONU μεταδίδει.

### **6.4.4 Παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet**

Οι οπτικές συνδέσεις E-PON αναγνωρίζονται από ένα αναγνωριστικό λογικής σύνδεσης (LLID) 15 bit, το οποίο επιτρέπει τη διευθυνσιοδότηση 32768 ONUs. Όλες οι προαναφερθείσες τυποποιημένες διαδικασίες Ethernet μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω της παροχής εικονικής διαδρομής. Το E-PON, όπως και άλλες παραλλαγές του Ethernet, δεν υποστηρίζει παλαιές υπηρεσίες ή οποιαδήποτε εγγενή μεταφορά εκτός του Ethernet. Οι E-PON ONUs λαμβάνουν μόνο τα πλαίσια που επισημαίνονται με το μοναδικό LLID ή το αναγνωριστικό εκπομπής τους. Η

πολυεκπομπή χρησιμοποιεί φιλτράρισμα πολυεκπομπής επιπέδου MAC, δηλαδή τα πλαίσια που έχουν μια διεύθυνση MAC πολυεκπομπής επισημαίνονται με ένα συγκεκριμένο LLID και μεταδίδονται σε όλες τις ONUs, οι οποίες στη συνέχεια αναγνωρίζουν και επεξεργάζονται τα πλαίσια πολυεκπομπής.

#### **6.4.5 Παθητικό οπτικό δίκτυο με δυνατότητα Gigabit**

Οι οπτικές συνδέσεις G-PON αναγνωρίζονται από ένα 8-bit ONU ID, επιτρέποντας τη διευθυνσιοδότηση 254 μοναδικών ONUs. Για την παροχή εικονικής διαδρομής, το G-PON χρησιμοποιεί ένα 12-bit GEM port ID και ένα 12-bit ATM VPI με βάση το B-PON. Τα αναγνωριστικά ONU χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μεταφορά πληροφοριών ελέγχου, ενώ τα αναγνωριστικά θύρας ή τα VPI χρησιμοποιούνται για την ταυτοποίηση πλαισίων δεδομένων. Ωστόσο, το GEM δεν παρέχει μεταφορά δεδομένων πολλαπλής διανομής. Το G-PON είναι πλήρως συμβατό με το B-PON, επιτρέποντας την απλή ενημέρωση των δικτύων B-PON. Παρόμοια με την επόμενη γενιά SDH/SONET, υποστηρίζει επίσης την παλιά μεταφορά PSTN και Ethernet, αλλά δεν επιτρέπει τη διαφανή μεταφορά όπως το GFP-T. Η βασισμένη σε πλαίσιο μεταφορά Ethernet μέσω της επόμενης γενιάς PDH, SDH/SONET ή G-PON δεν προσθέτει επιβάρυνση, δεδομένου ότι το κενό μεταξύ των πλαισίων, το προοίμιο και η ένδειξη έναρξης πλαισίου αντικαθίστανται από μια κεφαλίδα GFP ή GEM ίδιου μεγέθους. Τα αφαιρεθέντα πεδία επιστρέφονται στο σημείο τερματισμού της οπτικής σύνδεσης.

## **7. Συμπεράσματα**

Καθώς ωριμάζουν οι νέες υπηρεσίες που χρειάζονται πραγματική ευρυζωνικότητα, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, η ζήτηση για οπτική πρόσβαση αυξάνεται. Οι απαιτούμενοι ρυθμοί πρόσβασης ξεκινούν από μερικές δεκάδες Mbit/s ανά χρήστη, ενώ 100 Mbit/s ανά άτομο είναι ο συνήθως αναμενόμενος στόχος για την παροχή

πραγματικής ευρυζωνικότητας. Οι πιο διαδεδομένες σήμερα επιλογές ευρυζωνικής πρόσβασης βασίζονται σε διάφορες τεχνολογίες DSL και καλωδιακού μόντεμ. Τα DSL μπορούν να παρέχουν ταχύτητες πρόσβασης μερικών δεκάδων Mbit/s, αλλά μόνο σε μικρές αποστάσεις. Τα καλωδιακά μόντεμ λειτουργούν σε δίκτυα CATV, και όταν ο αριθμός των χρηστών ανά τμήμα δικτύου είναι υψηλός, ο διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης γίνεται αρκετά χαμηλός. Αυτό ισχύει και για την επερχόμενη ιδέα DOCSIS 3.0.

Οι τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, όπως τα WLAN, προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης που πλησιάζουν το όριο των 100 Mbit/s, αλλά η απόσταση μεταφοράς είναι εξαιρετικά μικρή. Είναι σαφές ότι, όταν αυτές οι προσεγγίσεις συνδυάζονται με την οπτική μετάδοση, μπορεί να αποσταλεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε μεγαλύτερες αποστάσεις στους τελικούς χρήστες. Εξαιτίας του υψηλού κόστους εγκατάστασης οπτικών ινών και της έλλειψης οικονομικά αποδοτικών επιλογών τερματικών, η οπτική πρόσβαση δεν έχει ακόμη εκραγεί. Τα συμβατικά συστήματα σημείο-προς-σημείο, όπως το SDH και το σημείο-προς-σημείο Ethernet, μπορούν να παρέχουν άφθονο εύρος ζώνης αλλά είναι εγγενώς ακριβά. Νέες λύσεις, όπως τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON), έχουν αναπτυχθεί για να λύσουν το πρόβλημα του κόστους, διατηρώντας παράλληλα την υψηλή απόδοση των οπτικών ινών.

Το παρόν έγγραφο εξηγεί τις βασικές αρχές των PON και εξετάζει τις τεχνικές αποχρώσεις των πιο γνωστών εννοιών: B-PON, E-PON και G-PON. Το E-PON, το G-PON, το Ethernet από σημείο σε σημείο και η πρόσφατα σχεδιασμένη έννοια EtrH συγκρίνονται προκειμένου να καταδειχθεί η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των PON. Το EtrH σχεδιάστηκε για να προσφέρει υπηρεσίες δεδομένων σε δίκτυα CATV. Ενσωματώνει οπτική και ηλεκτρική μετάδοση, αλλά μπορεί επίσης να αναπτυχθεί ως ένα μόνο οπτικό σύστημα συγκρίσιμο με τις τεχνολογίες PON. Αξιοποιώντας τη χωρητικότητα της ζεύξης μεταφοράς, προσδιορίζεται ο αριθμός των τμημάτων δικτύου και των οπτικών διεπαφών που πρέπει να αναπτυχθούν για την εξυπηρέτηση μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής και ενός πληθυσμού χρηστών. Περαιτέρω, αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των σχέσεων κόστους δικτύου των συγκριτικών επιλογών πρόσβασης. Σύμφωνα με την έρευνα, το G-PON έχει την υψηλότερη αξιοποίηση και απαιτεί τα λιγότερα τμήματα δικτύου και οπτικές διεπαφές για την εξυπηρέτηση ενός συγκεκριμένου πληθυσμού πελατών με γνωστή ζήτηση ρυθμού προσπέλασης.

Το EttiH και το Ethernet σημείο-προς-σημείο έχουν ίσα ποσοστά χρησιμοποίησης και αποδίδουν κάπως καλύτερα από το E-PON. Ωστόσο, το E-PON έχει μεγαλύτερο ονομαστικό ρυθμό δεδομένων από αυτές τις δύο τεχνολογίες, επιτρέποντάς του να λειτουργεί με λιγότερα τμήματα δικτύου και οπτικές συνδέσεις. Το EttiH ακολουθεί, και είναι προφανές ότι το Ethernet σημείο-προς-σημείο απαιτεί τα περισσότερα τμήματα δικτύου για την εξυπηρέτηση του ίδιου αριθμού πελατών με τις άλλες εξεταζόμενες προσεγγίσεις. Το κόστος κατασκευής ενός δικτύου πρόσβασης είναι ευθέως ανάλογο του αριθμού των απαραίτητων τμημάτων δικτύου και των οπτικών συνδέσεων. Αν και οι εκτιμήσεις δεν παρέχουν συγκεκριμένο κόστος δικτύου για οποιαδήποτε από τις εξεταζόμενες μεθόδους πρόσβασης, αναδεικνύουν τη σχέση κόστους μεταξύ των διαφόρων τρόπων. Με βάση τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν, είναι προφανές ότι οι λύσεις PON είναι οικονομικά αποδοτικές. Η διαφορά μεταξύ του E-PON και του G-PON ήταν αμελητέα, και λόγω των ακριβών οπτικών συνδέσεων του E-less PON, μπορεί να είναι στην πραγματικότητα η πιο οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση.

Η διαλειτουργικότητα, η δυνατότητα κλιμάκωσης σε πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις και η πολυπλοκότητα και το κόστος του OAM είναι άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση της επιβιωσιμότητας μιας έννοιας οπτικής πρόσβασης. Όσον αφορά τη διαλειτουργικότητα, το ερώτημα είναι πόσο αποτελεσματικά μια έννοια οπτικής πρόσβασης υποστηρίζει άλλα μοντέλα μεταφοράς. Το G-PON έχει ενσωματωμένη υποστήριξη για μια ποικιλία άλλων ιδεών μεταφοράς, ενώ οι έννοιες που βασίζονται στο Ethernet υποστηρίζουν μόνο τη μεταφορά που βασίζεται στο Ethernet. Από την άποψη του OAM, οι λύσεις σημείο-προς-σημείο είναι συνήθως οι πιο εύκολες στη διαχείριση. Η επεκτασιμότητα έχει πολλές διαστάσεις και όταν συζητάμε για την οπτική πρόσβαση, η διαθεσιμότητα των δυνατοτήτων μεταφοράς γίνεται μια ουσιαστική μέτρηση. Όλα τα συστήματα που αναλύθηκαν επιτρέπουν εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (VPN) με βάση το Ethernet, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

Το μόνο πρόβλημα είναι ότι ο διαθέσιμος χώρος διευθύνσεων για τα VPN είναι περιορισμένος σε όλα τα σχέδια που παρουσιάστηκαν. Παρόλα αυτά, νέες τεχνολογίες και επεκτάσεις του χώρου διευθύνσεων VPN διερευνώνται τώρα. Όσον αφορά την επεκτασιμότητα, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι οι αρχές point-to-point μπορεί να καταστούν ανέφικτες σε εξαιρετικά μεγάλες εγκαταστάσεις λόγω του τεράστιου

αριθμού οπτικών πομποδεκτών που απαιτούνται στο κεντρικό γραφείο. Λαμβάνοντας υπόψη αυτόν τον φυσικό περιορισμό, φαίνεται ότι τα PON έχουν ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον.

## Βιβλιογραφία

- [1] Effenberger F. J., Ichibangase H. & Yamashita H. "Advances in Broadband Passive Optical Networking Technologies." IEEE Communications Magazine, Dec. 2001, pp. 118-124.
- [2] The Passive Optical Networks Forum. <http://www.ponforum.org>.
- [3] Flexlight Networks, "G-PON - The Next Big Thing in Optical Access Networks, A Comparison Between E-PON, APON and the emerging G-PON Technology," [www.flexlight-networks.com](http://www.flexlight-networks.com), Sept. 2002.
- [4] IEEE Standard 802.3AH, "CSMA/CD access method and physical layer specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers and Management Parameters for Subscriber Access Networks," 2004.
- [5] ITU-T Recommendation G.983.1, "Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)," Oct 1998.
- [6] ITU-T Recommendation G.983.3, "A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation," March 2001.
- [7] ITU-T Recommendation G.983.4, "A broadband optical access system with increased service capability using dynamic bandwidth assignment," Nov. 2001.
- [8] ITU-T Recommendation G.983.5, "A broadband optical access system with enhanced survivability," Jan 2002.
- [9] IEEE Standard 802.3AH, "CSMA/CD access method and physical layer specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers and Management Parameters for Subscriber Access Networks," June 2004.
- [10] Pesavento, G. "Ethernet Passive Optical network (E-PON) architecture for broadband access," Optical Networks Magazine, Jan./Feb. 2003.

- [11] Kramer, G. & Pesavento, G. "Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network", *IEEE Communications Magazine*, Feb. 2002, pp. 66-73.
- [12] ITU-T Recommendation G.975, "Forward error correction for submarine systems", Oct. 2000.
- [13] ITU-T Recommendation G.984.1, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General characteristics", March 2003.
- [14] ITU-T Recommendation G.984.2, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification", March 2003.
- [15] ITU-T Recommendation G.984.3, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification", Feb. 2004.
- [16] Angelopoulos, J. D., Argyriou, T., Zontos, S., Ringoot, E. & Van Caenegem T. "Efficient Transport of Packets with QoS in an FSAN-Aligned G-PON", *IEEE Communications Magazine*, Feb. 2004, pp. 92-98.
- [17] ITU-T Recommendation G.984.4, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification", June 2004.
- [18] An, F.-T., Kim, K. S., Hsueh, Y.-L., Rogge, M., Shaw, W.-T. & Kazovsky, L. "Evolution, Challenges and Enabling Technologies for Future WDM-Based Optical Access Networks", 2nd Symposium on Photonics, Networking and Computing, Sept. 2003, pp. 1449-1453.
- [19] Martínez, A., Muñoz, P., Capmany, J., Sales, S., Ortega, B. & Pastor, D. "Multiservice Hybrid Radio Over Fiber and Baseband AWG-PON Using CWDM and Spectral Periodicity of Arrayed Waveguide Gratings", *IEEE Photonics Technology Letters*, Feb. 2004, Vol. 16, No. 2, pp. 599-601.
- [20] Maier, G., Martinelli, M., Pattavina, A. & Salvadori, E. "Design and Cost Performance of the Multistage WDM-PON Access Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Feb. 2017, Vol. 18, No. 2, pp. 125-143.
- [21] Van de Voorde, I., Martin, C., Vandevège, J. & Qiu, X. "The SuperPON Demonstrator: An Exploration of Possible Evolution Paths for Optical Access Networks", *IEEE Comm. Magazine*, Feb. 2015, pp. 74-82.



- [22] Bonenfant, P. & Rodriguez-Moral, A. 'Generic Framing Procedure (GFP): The Catalyst for Efficient Data over Transport', IEEE Communications Magazine, May 2021, pp. 72-79.
- [23] Brockners, F., Finn, N. & Phillips, S. 'Metro Ethernet - Deploying extended Campus using Ethernet Technology', Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'03), 2013.
- [24] Gorshe, S. 'Ethernet Transport Services - The Current State of the Art', PMC-Sierra, Technology white paper, Issue 1.0, [www.pmc-sierra.com/cgi-bin/download\\_p.pl?res\\_id=5169&filename=ethernet\\_transport\\_wp\\_p1\\_005169.pdf](http://www.pmc-sierra.com/cgi-bin/download_p.pl?res_id=5169&filename=ethernet_transport_wp_p1_005169.pdf), May 2003.
- [25] Metro Ethernet Forum, <http://www.metroethernetforum.com/>.
- [26] ITU-T. Optical Transport Network (OTN) tutorial. <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf>.
- [27] ITU-T Recommendation G.7043, 'Virtual concatenation of PDH signals', July 2004.
- [28] Vriendt, J., LainÈ, P., Lerouge, C. & Xu, X. 'Mobile Network Evolution A Revolution on the Move', IEEE Communications Magazine, April 2020, pp. 104-111.
- [29] Kerpez, J. 'DSL Spectrum Management Standard', IEEE Communications Magazine, Nov. 2002, pp. 116-123.
- [30] Dutton, J. 'Understanding Optical Communications', International Technical Support Organization, <http://www.redbooks.ibm.com>, Sept. 1998.
- [31] Fellows, D. & Jones, D. 'DOCSIS Cable Modem Technology', IEEE Communications Magazine, March 2021, pp. 202-209.
- [32] Kuo, W.-K., Kumar, S. & Kuo, C.-C. 'Improved Priority Access, Bandwidth Allocation and Traffic scheduling for DOCSIS Cable Networks', IEEE Transactions on Broadcasting, Dec. 2013, Vol. 49, No. 4., pp. 371-382.
- [33] Cable Digital News, 'CableLabs Launches DOCSIS 3.0 Effort, Takes Over NGNA Project', <http://www.cabledatcomnews.com/nov04/nov04-2.html>, Nov 2004.

- [34] Bryssinck, R., Rjissemus, M. & Waal, J. 'Ethernet to the Home – A revolutionary technology for high speed data access over cable', Teleste White Paper, <http://www.teleste.fi/>, Sept. 2004.
- [35] Dravida, S., Gupta, D., Nanda, S., Rege, K., Strombosky, J. & Tandon, M. 'Broadband Access over Cable for Next-Generation Services: A Distributed Switch Architecture', IEEE Comm. Mag., August 2021, pp. 116–124.
- [36] FP5-IST, Thematic Network project, 'Optical Technologies in Motion for the IST Programme (OPTIMIST)', <http://www.ist-optimist.org>, 2000–2004.
- [37] Goode, B. 'Voice over Internet Protocol (VoIP)', Proceedings of the IEEE, Sept. 2020, Vol. 90, No. 9, pp. 1495–1517.
- [38] Mahonen, P., Riihijarvi, J., Petrova, M. & Shelby, Z. 'Hop-by-hop toward future mobile broadband IP', IEEE Communications Magazine, March 2004, Vol. 42, Issue 3, pp. 138–146.
- [39] ITU-T, 'Audiovisual and Multimedia – Operator Requirements', Draft Recommendation H.fsv-opreq v1.0, Feb 2003.
- [40] FTTH council, <http://www.ftthcouncil.org>.
- [41] Nam, H. S., Park, T. J., Cho, K. S., Lee, H. S. & Lee H. H. 'TDM over E-PON in access network', The 6th International Conference on Advanced Communication Technology, Feb. 2014, Vol. 1, pp. 279–282.
- [42] Heikkinen, V., Aikio, J., Alajoki, T., Hiltunen, J., Mattila, A.-J., Ollila, J. & Karioja, P. 'Single-mode tuning of a 1540-nm diode laser using a Fabry-Perot interferometer', IEEE Photonics Technology Letters, April 2014, Vol. 16, Issue 4, pp. 1164–1166.
- [43] Cloonan, T. 'DOCSIS 2.0 Getting to Know the New Kid on the Block', Arris White Paper, Version 2.0, [http://www.arrisi.com/products\\_solutions/applications/white\\_papers/DOCSIS\\_20\\_Getting\\_To\\_Know\\_The\\_New\\_Kid.pdf](http://www.arrisi.com/products_solutions/applications/white_papers/DOCSIS_20_Getting_To_Know_The_New_Kid.pdf), Oct. 2020.
- [44] Terayon, 'DOCSIS 2.0 and advanced S-CDMA: maximizing the data return path', Terayon White Paper, <http://www.terayon.com>, 2021.

- [45] Liao, W. & Ju H.-J. 'Adaptive slot allocation in DOCSIS-based CATV networks', IEEE Transactions on Multimedia, June 2014, Vol. 6, Issue 3, pp. 479-488.
- [46] Steele, R. 'Full-ahead to where?' ECWT 2000 Paris, October 2000.
- [47] Ala-Laurila, J., Mikkonen, J. & Rinnemaa, J. 'Wireless LAN access network architecture for mobile operators', IEEE Communications Magazine, Nov 2001, Vol. 39, Issue 11, pp. 82-89.
- [48] Weldon, M. & Zane, F. 'The economics of fibre to the home revisited', Bell Labs Technical Journal, July 2003, Vol. 8, Issue 1, pp. 181-206.
- [49] Daniel, A. 'IP virtual private networks - a service provider perspective' IEEE Proceedings on Communications, Feb 2019, Vol. 151, Issue 1, pp. 62-70.
- [50] Chiruvolu, G., Ge, A., Elie-Dit-Cosaque, D., Ali, M. & Rouyer, J. 'Issues and approaches on extending Ethernet beyond LANs', IEEE Communications Magazine, March 2014, Vol. 42, Issue 3, pp. 80-86.
- [51] Carugi, M. & De Clercq, J. 'Virtual private network services: scenarios, requirements and architectural constructs from a standardization perspective', IEEE Communications Magazine, June 2014, Vol. 42, Issue 6, pp. 116-122.
- [52] Takeda, T., Inoue, I., Aubin, R. & Carugi, M. 'Layer 1 virtual private networks: service concepts, architecture requirements, and related advances in standardization', IEEE Communications Magazine, June 2017, Vol. 42, Issue 6, pp. 132-138.
- [53] Halabi, S. 'Metro Ethernet', Cisco Press, Sept. 2003, ISBN 1-58705-096-X.
- [54] Rosen, E. & Rekhter, Y. 'BGP/MPLS VPNs'. RFC 2547, March 1999.
- [55] Knight, P. & Lewis, Y. 'Layer 2 and 3 virtual private networks: taxonomy, technology, and standardization efforts', IEEE Communications Magazine, June 2018, Vol. 42, Issue 6, pp. 124-131.
- [56] Chiruvolu, G., Krogfoss, B. & Ge, A. 'Encapsulation schemes to extend Ethernet to Metropolitan Area Networks - A comprehensive analysis of popular and evolving encapsulation schemes for Metro-Ethernet', Alcatel White Paper, [http://www.bitpipe.com/detail/RES/1077207861\\_892.html](http://www.bitpipe.com/detail/RES/1077207861_892.html), 2014.

- [57] IEEE 802.3 Frame Expansion Study Group, [http://www.ieee802.org/3/frame\\_study/](http://www.ieee802.org/3/frame_study/) [58] IETF Pseudo Wire Emulation Edge to Edge (pwe3) working group, <http://www.ietf.org/html.charters/pwe3-charter.html>.
- [59] IETF Layer 2 Virtual Private Networks (l2vpn) working group, <http://www.ietf.org/html.charters/l2vpn-charter.html>.
- [60] M. Hajduczenia, and H. da Silva, "Next Generation PON Systems - Current Status," Int. Conf. Transparent, Optical Networks, France., 2009, pp. 1
- [61] Kani, J , Next-generation PON- Part I: Technology Roadmap and General Requirements , IEEE Communications magazine, 2009 , vol , no , p.43 – 49