

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ (ΕΔΡΑ ΣΠΑΡΤΗ)**



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ»



ΤΗΣ

ΡΗΓΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΔΟΚΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΠΙΚΡΑΜΜΕΝΟΣ

ΣΠΑΡΤΗ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Α

2. Β

3. Γ

Τόπος_____

Ημερομηνία_____

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δε μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Όνομα και Επώνυμο Συγγραφέα (Με Κεφαλαία):

.....

Υπογραφή (Ολογράφως, χωρίς μονογραφή):

.....

Ημερομηνία (Ημέρα – Μήνας – Έτος):

.....

Περιεχόμενα	
Πίνακας συντομεύσεων	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	8
1.1 Ιστορική ανασκόπηση	8
2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	10
2.1 Οπτική ίνα	10
2.2 Οπτικό Δίκτυο	13
2.2.1 Οπτικά δίκτυα πρόσβασης (Optical Access Networks)	14
2.2.2 Ζεύξεις	16
2.2.3 Οπτικά δίκτυα 1ης, 2ης και 3ης γενιάς	18
3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	21
3. Παθητικό οπτικό δίκτυο	21
3.1 Τοπολογίες παθητικών οπτικών δικτύων	23
3.1.1 Τοπολογία Δέντρου	23
3.1.2 Τοπολογία Διαύλου	24
3.1.3 Τοπολογία Δακτυλίου	25
3.2 Δομή	26
3.3 Πολυπλεξία και πρωτόκολλα	27
4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	28
4. Είδη πολυπλεξίας	28
4.1 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου	29
4.1.1 APON, BPON	31
4.1.2 EPON	33
4.1.3 GPON	36
4.1.4 10G-PON ή XG-PON	36
4.2 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματοςπολλαπλής πρόσβασης	38
4.3 Πολυπλεξία με διαίρεση οπτικού κώδικα	40
4.4 Υβριδικά TDM/WDM παθητικά δίκτυα	43
5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ	46
5. Πρωτόκολλα	46
5.1 Πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο MAC	46
5.2 SONET	46

5.3	ATM	47
5.4	Ethernet	48
5.5	MultiPoint Control Protocol (MPCP)	50
6°	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	52
6.	Αρχιτεκτονική Δικτύου	52
6.1	Πολυστρωματικές ανθεκτικές στρατηγικές για αυτόματα Switched οπτικά δίκτυα	52
6.2	ASON Multilayer Resilience (Πολυεπίπεδη ελαστικότητα του ASON)	54
6.3	G.8080 SIMULATOR	55
6.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης	59
6.5	Το παθητικό δίκτυο επόμενης γενιάς	66
6.6	Σύγκριση προδιαγραφών και απαιτήσεων PONs	74
6.6.1	Παθητικά οπτικά δίκτυα	74
6.7	Regenerated PONs	81
6.8	Απομακρυσμένο πρωτόκολλο τερματισμού(Remote protocol termination)	82
6.9	Πρόσβαση επόμενης γενιάς(Next-generation access)	84
6.10	Service overlay a la G.984.5	84
6.11	XGPON και OVERLAID PONs	85
6.12	Σύγκριση 10GPON και WDM-PON	86
6.13	Σύγκριση TDM-PONs (BPON, EPON και GPON)	87
7°	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	90
	Επίλογος-Συμπεράσματα	90
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

Πίνακας συντομεύσεων

AON	Active Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arbitrary Waveform Generator
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
CO	Central Office
CPU	Central Processing Unit
CDR	Clock detection and recovery
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTCab	Fiber To The Cabinet
FTTH	Fiber To The Home
IEEE	Institute of Electrical & Electronic
ITU-T	International Telecommunication
NGA	Next-generation architecture
NG-PON	Next Generation Prathetic Optical
OAM	Network
ODN	Operation, maintenance and
OLT	administration
ONT	Optical line termination
	Optical distribution network
	Optical network termination
ONU	Optical Network Unit
PON	Pathetic optical network
SUCCESS	Stanford University Access
QoS	Quality of Service
RE	Reach extender
RN	Remote Nodes
RPT	Synchronous digital hierarchy
SDH	Semiconductor optical amplifier
SOA	Remote protocol terminator
TDM	Time-Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing
A.H.	Άγνωστη Ημερομηνία

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οπτική μεταφορά πληροφοριών μπορεί να χαρακτηριστεί ως το κορυφαίο επίτευγμα στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Η υψηλή απόδοση των οπτικών δικτύων θα έλεγε κανείς πως αποτελεί τη βάση της τεχνολογικής ακμής και των αλμάτων που έχουν συντελεστεί τα τελευταία δέκα χρόνια στον τομέα των επικοινωνιών. Τα οπτικά δίκτυα είτε ήρθαν να καλύψουν την ανάγκη για ολοένα και μεγαλύτερης χωρητικότητας δικτύων είτε έκαναν την ανθρωπότητα όλο και πιο άπληστη δημιουργώντας όλο και μεγαλύτερη δίψα για μεγαλύτερες ταχύτητες.

Όταν ο PaulGreen το 1993 μιλούσε για τη μη πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των οπτικών δικτύων και προέτρεπε σε «χρήση με φαντασία» δεν θα μπορούσε να φανταστεί πως σχεδόν 20 χρόνια μετά, ο άνθρωπος δεν έχει καταφέρει να εκμεταλλευτεί 100% τις μοναδικές δυνατότητές τους παρά την τόσο σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί. Ακόμα το τεράστιο εύρος ζώνης που παρέχουν τα οπτικά δίκτυα δεν χρησιμοποιείται πλήρως (Prat (ed), 2008).

Τα τελευταία χρόνια, οι τομείς των ασύρματων αλλά και των οπτικών δικτύων κερδίζουν συνεχώς έδαφος προσφέροντας μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης και καλύτερη ποιότητα στην υπηρεσία στους πελάτες τους. Οι οπτικές ίνες με τις υψηλές ταχύτητες που προσφέρουν και τις μεγάλες αποστάσεις που διανύουν με μηδαμινές απώλειες και όλο και μειούμενο κόστος

έχουν κατακτήσει ένα μεγάλο κομμάτι της αγοράς. Σε αυτό το σύγχρονο και ανταγωνιστικό περιβάλλον, ο μηχανισμός κατανομής εύρους ζώνης πρέπει να είναι ικανός να καταλαβαίνει τις απαιτήσεις του χρήστη (Sarigiannidis, Papadimitriou, Nicopolitidis, Varvarigos, Louta and Kakali, 2014). Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) αντιπροσωπεύουν έναν από τους πιο πολλά υποσχόμενους παίκτες στο πεδίο του «ίνα στο σπίτι» (fibertohome) καθώς παρέχει στο χρήστη υψηλή ποιότητα δικτύου για απαιτητικές πολυμεσικές υπηρεσίες (Sarigiannidisetal. 2014).

Στην παρούσα εργασία θα γίνει μια παρουσίαση των οπτικών δικτύων και των χαρακτηριστικών τους με ιδιαίτερη μνεία στα παθητικά οπτικά δίκτυα, τις τεχνικές πολυπλεξίας και τα χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας, βασισμένη σε στοιχεία βιβλιογραφικής έρευνας. Επίσης, θα εξετάσουμε τους βασικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή πολλαπλών στρωμάτων ανθεκτικότητας μέσω της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, μελετάμε προσεγγίσεις, δηλαδή την top-down προσέγγιση και την bottom-up προσέγγιση με αποτελέσματα από μια συμβατή μηχανή προσομοιωτή G.8080, που εφαρμόστηκε στην κορυφή του NS2 προσομοιωτή. Επιπλέον, προς τη μελέτη των στρατηγικών ανθεκτικότητας πολλαπλών στρώσεων θα μελετήσουμε έναν κινητήρα προσομοιωτή δικτύου ASON πάνω στο γνωστό εργαλείο προσομοίωσης ns-2 (Network Simulator v.2). και τέλος θα κάνουμε κάποιες συγκρίσεις χαρακτηριστικών π.χ. 10GPON και WDM-PON και των TDM-PONs (BPON, EPON και GPON) κλπ.

1° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1.1 Ιστορική ανασκόπηση

Οι ρίζες για τη θεωρία που οδήγησε στην κατασκευή της οπτικής ίνας τέθηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με την επίλυση των εξισώσεων Maxwell από τους Rayleigh και Sommerfeld. Η σύλληψη όμως της ιδέας του κυματοδηγού με τη μορφή οπτικών ινών έγινε το 1910 από τους Χόνδρο και Debye (Χρέμμος, 2007; Αβραμόπουλος α.η.). Το 1959 πρωτοχρησιμοποιήθηκε ο όρος laser ενώ η μελέτη των laser τη δεκαετία του 1960 έδωσε ώθηση στην ιστορία των οπτικών δικτύων. Το 1965 έγινε η πρώτη χρήση οπτικής ίνας στις οπτικές τηλεπικοινωνίες από τον Kao με μεγάλη απώλεια φωτός (>20dB/Km). Το 1972 η Corning κατασκευάζει οπτική ίνα με απώλεια 4 dB/Km. Το 1977 εγκαθίσταται το πρώτο σύστημα οπτικών τηλεπικοινωνιών (Σικάγο, Η.Π.Α.) ενώ το 1980 η BellTelephone Systems ανακοινώνει σχέδια για την κατασκευή του TAT-8, του πρώτου διατλαντικού δικτύου). Το 1987 εμφανίστηκαν οι ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA). Τη δεκαετία 1990 η ανάγκη να αυξηθεί η χωρητικότητα στην ίνα, οδηγεί στην εξέταση τεχνικών για πολυπλεξία κατά μήκος κύματος ενώ την ίδια περίοδο έγιναν διαθέσιμοι οι ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA). Από το 1996 έως το 1999 δημιουργούνται τα διατλαντικά οπτικά δίκτυα TAT 12/13, TAT 14 και FlagAtlantic-1. Η διέλευση του FlagAtlantic-1 φτάνει τα 5 Tbit/s και περιλαμβάνει 297επαναλήπτες. Από το 2002 είναι εμπορικά διαθέσιμα τα δίκτυα FlagPacific-1, που μεταφέρει συνολικά 10.24Tbit/s δεδομένα σε ένα μήκος 24.000 Km,

αποτελούμενο από 447 επαναλήπτες και το Apollo με μήκος 13000 Km που ενώνει ΗΠΑ, Αγγλία και Γαλλία μεταφέροντας 3.2 Tbit/s. Είναι WDM δίκτυο και χρησιμοποιεί 80 κανάλια των 10 Gbit/s. (Αβραμόπουλος (α.η.); Χειλάς (α.η.).

Σε ό,τι αφορά τα παθητικά οπτικά δίκτυα, τα πρώτης γενιάς παθητικά οπτικά δίκτυα ήταν τα Broadband PON, Gigabit PON και Ethernet PON που ήδη λειτουργούσαν σταθερά το 2008 (Prat (ed), 2008) προσφέροντας συμμετρικά εύρος ζώνης της τάξης των Gigabits διαμοιραζόμενα ανά δέκα χρήστες.

2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1 Οπτική ίνα

Ο χαλκός ως μέσο σύνδεσης παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα καθώς είναι ευάλωτος σε περιβαλλοντικές παρεμβολές, απαιτεί ακρίβεια στη γείωση και είναι επιδεκτικός σε ηλεκτρικές εκκενώσεις. Τη λύση σε αυτά ήρθαν να δώσουν οι οπτικές ίνες οι οποίες είναι νήματα από γυαλί πάχους μικρότερου κι από ανθρώπινη τρίχα δηλαδή με διάμετρο μικρότερη των 8μm μέσα από τα οποία μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα, υπό μορφή φωτεινών παλμών αντί ηλεκτρικών σημάτων. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χλμ. (Wikipedia, (α.η.); Χειλάς (α.η.). Ο πυρήνας των οπτικών ινών είναι τόσο διάφανος που αν φτιάχναμε από το υλικό έναν υαλοπίνακα, θα έβλεπε κανείς μέσα από αυτόν ακόμα κι αν ήταν 5km παχύς. Μια οπτική ίνα αποτελείται από μία δέσμη γυάλινων νημάτων (fibers), κάθε μία από τις οποίες είναι ικανή να μεταδίδει μηνύματα με τη μορφή φωτός. Τα κύματα μεταφέρονται από τον πυρήνα της οπτικής ίνας. Όσο πιο στενός είναι ο πυρήνας, τόσο πιο γρήγορα μεταφέρεται το κύμα φωτός. Η επικάλυψη (cladding), η οποία περιβάλλει την οπτική ίνα κρατάει το φως στον πυρήνα, εμποδίζοντας το σήμα να διασκορπιστεί και να χάσει την ισχύ του. Επιπλέον, υπάρχει μία ακόμη επικάλυψη, η οποία προστατεύει την ίνα από τους περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως η βροχή, η σκόνη, οι γρατσουνιές και το χιόνι.

Οι οπτικές ίνες έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) από τα παραδοσιακά μέσα και έτσι μπορούν να μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες. Επηρεάζονται λιγότερο από

παρεμβολές από ότι τα μεταλλικά καλώδια, είναι πολύ λεπτές και ελαφρές ενώ μεταδίδουν δεδομένα σε ψηφιακή αντί για αναλογική μορφή. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης αλλά και η δυσκολία αλλαγών και προσθηκών στο δίκτυο είναι τα μοναδικά ίσως μειονεκτήματα των οπτικών ινών.

Σύμφωνα με την κυματική θεωρία του Maxwell το φως συμπεριφέρεται ως κύμα κυματοδηγείται με συγκεκριμένες εγκάρσιες κατανομές (ρυθμοί) (Αβραμόπουλος, (α.η.)). Η οπτική ίνα συμπεριφέρεται ως κυματοδηγός. Ο κυματοδηγός είναι ένα φυσικό μέσο ή μονοπάτι, το οποίο επιτρέπει τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως το φως. Λόγω του φαινομένου της απόλυτης εσωτερικής ανάκλασης (total internal reflection) στη διεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα, το φως μπορεί και διαδίδεται κατά μήκος της ίνας με μηδαμινές απώλειες, κάτι που συνάδει με την ακτινική θεώρηση του φωτός.

Με την πάροδο των ετών έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι οπτικών ινών ο κάθε ένας από τους οποίους υποστηρίζει διαφορετικές απαιτήσεις τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Για όλους τους τύπους των οπτικών ινών υπάρχουν διεθνή πρότυπα σχετικά με τα χαρακτηριστικά μετάδοσης καθώς και τα γεωμετρικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά τους. Κάθε οπτικό σήμα μπορεί να δημιουργήσει πολλά διαφορετικά φωτεινά κύματα, τα οποία μπορούν να ταξιδεύουν μέσα στην οπτική ίνα ταυτόχρονα μόνο αν αυτή είναι πολύτροπη (multimode fibers), αλλά με μια μικρή καθυστέρηση. Τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν μονότροπες ίνες (single mode fiber), οι οποίες έχουν πολύ μικρότερο πυρήνα από τις πολύτροπες (multimode fiber). Ο πυρήνας μιας τέτοια οπτικής ίνας έχει επαρκή διάμετρο ώστε να

επιτρέπει στο φως να ταξιδεύει μέσα από αυτήν, αλλά εμποδίζει το σήμα φωτός από το να αναπηδάει κατά πλάτος της διαμέτρου του. Έτσι, το φως ταξιδεύει σε γραμμή σχεδόν ευθεία και το σήμα μπορεί να διαδοθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις και απαιτούνται λιγότεροι επαναλήπτες (repeaters) για τη διάδοσή του.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία μιας ίνας είναι το μήκος κύματος, το παράθυρο λειτουργίας, η συχνότητα, η απόσβεση, η σκέδαση και το εύρος ζώνης.

Το φως που περνά μέσα από τις οπτικές ίνες είναι πέρα από το οπτικό φάσμα και συγκεκριμένα πέρα από την ερυθρή πλευρά του φάσματος με τις πολύτροπες οπτικές ίνες να είναι από τα 800 έως τα 1300 nm μήκους κύματος και τις μονότροπες από 1300 έως 1550 nm.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκριτικός πίνακας.

Χαρακτηριστικά	Πολυτροπικές	Μονοτροπικές
Διάμετρος πυρήνα	50–100 μm	2–10 μm
Τρόποι Διάδοσης	Εκατοντάδες ή χιλιάδες	Μικρός αριθμός
Κατανομή του δ.δ	Βηματική ή βαθμιαία	Βηματική
Ποσοστό εξασθένησης	Υψηλό	Χαμηλό
Ποιότητα διάδοσης παλμών	Χαμηλή (λόγω διασποράς)	Υψηλή
Δυνατότητα σύζευξης	Εύκολη	Δύσκολη
Κόστος αγοράς	Χαμηλό	Υψηλό

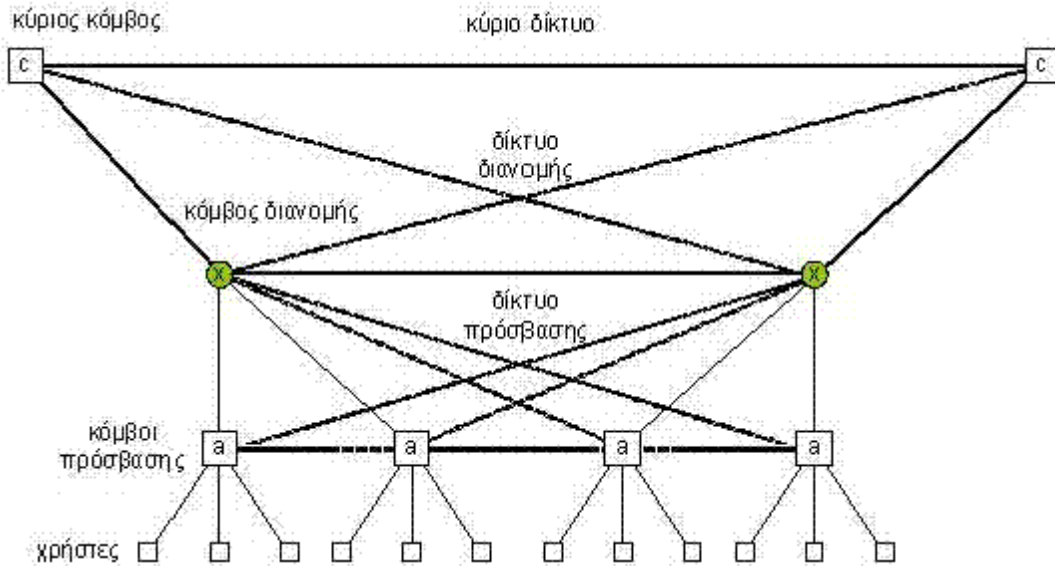
Τεχνικές απαιτήσεις	Περιορισμένες	Υψηλές
---------------------	---------------	--------

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας πολυτροπικών και μονοτροπικών ινών

2.2 Οπτικό Δίκτυο

Η πιο γνωστή χρήση των οπτικών ινών είναι στις τηλεπικοινωνίες. Με την βοήθεια μιας μόνο ίνας μπορεί να μεταδοθεί το σήμα χιλιάδων τηλεφωνημάτων (Green, 1993) και δεκάδες εκπομπές τηλεοπτικών καναλιών.

Οπτικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο υπολογιστών το οποίο χρησιμοποιεί παλμούς από φως για την αναπαράσταση και μετάδοση των δυαδικών ψηφίων αντί για ηλεκτρικού παλμούς και είναι μεγαλύτερα σε χωρητικότητα και πιο αξιόπιστα από εκείνα που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς παλμούς (Χειλάς, α.η.).



Εικόνα 1 Δομή του δικτύου οπτικών ινών

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου οπτικών ινών βασίζεται σε τρεις λογικές μονάδες όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί. Οι μονάδες αυτές είναι :

1. Το δίκτυο κορμού (CoreNetwork), που εκτείνεται σε εθνικό επίπεδο και έχει τοπολογία βρόγχου (meshtopology), δηλαδή κάθε κόμβος επικοινωνεί με κάθε άλλο κόμβο με δίκτυο από σημείο σε σημείο.
2. Το δίκτυο διανομής/ μητροπολιτικό δίκτυο (MetropolitanRing) που είναι συνήθως σε τοπολογία δακτυλίου και συνδέει το δίκτυο κορμού με το δίκτυο πρόσβασης και
3. Το δίκτυο πρόσβασης (AccessRing) στο οποίο συνδέονται οι χρήστες προκειμένου να απολαύσουν την υπηρεσία. Είναι το λεγόμενο lastmileδίκτυο και ξεκινά από τον τοπικό κόμβο πρόσβασης μέχρι τον τελικό χρήστη.

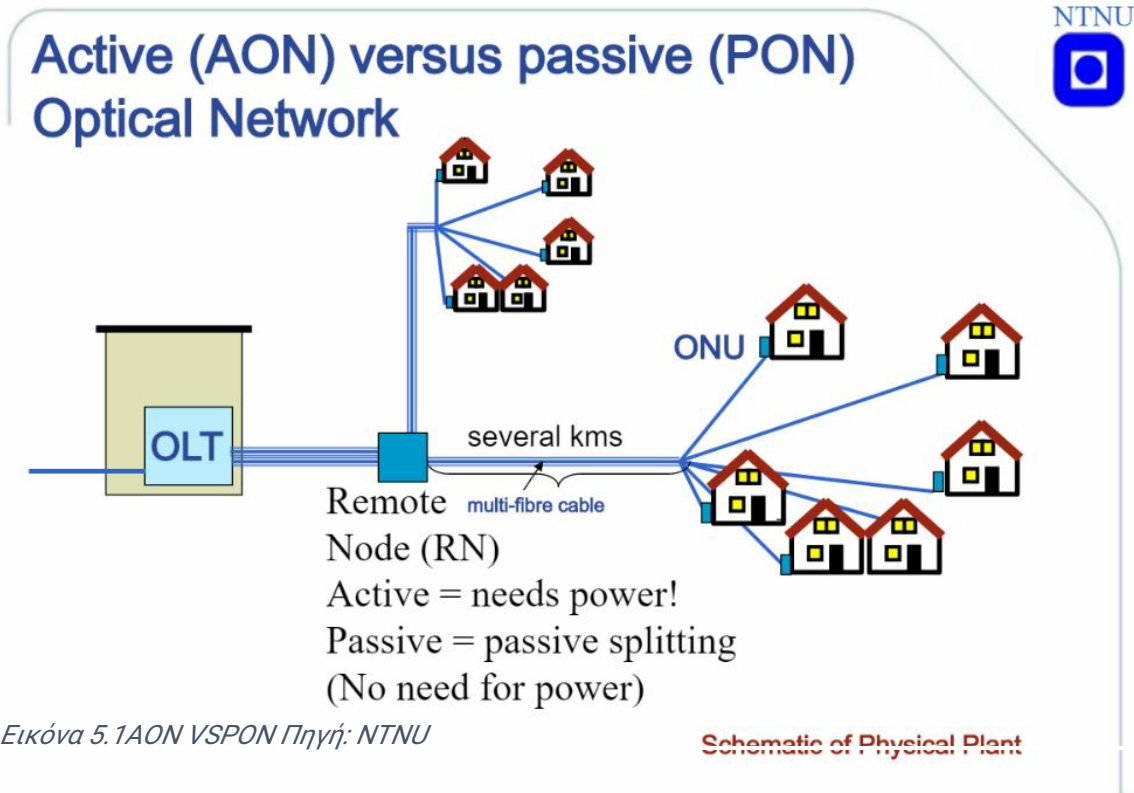
2.2.1 Οπτικά δίκτυα πρόσβασης (Optical Access Networks)

Το δίκτυο κορμού αποτελείται από μία σειρά κόμβων άμεσα

συνδεδεμένων μεταξύ τους μονάχα όμως όταν βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Το δίκτυο διανομής, παρέχει συνδέσεις σημείου-πολλαπλών σημείων μεταξύ των κυρίων κόμβων και των κόμβων πρόσβασης. Στους κόμβους διανομής μπορεί να τοποθετηθεί ενεργός ή παθητικός εξοπλισμός για το διαχωρισμό του σήματος, οπότε αντίστοιχα και το δίκτυο μετονομάζεται σε Ενεργό Οπτικό Δίκτυο (AON, Active Optical Network) ή Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON, Passive Optical Network) αντίστοιχα. Ενεργά ονομάζονται τα στοιχεία που περιλαμβάνουν τις φωτεινές πηγές, τους φωρατές, οι οποίοι πραγματοποιούν τις βασικές λειτουργίες της δημιουργίας και ανίχνευσης του οπτικού σήματος καθώς και τους οπτικούς ενισχυτές που το ενισχύουν κατά τη διάρκεια της διαδρομής του στην οπτική ίνα. Τα παθητικά στοιχεία περιλαμβάνουν τους οπτικούς συνδέσμους και μεταγωγείς, τους οπτικούς διαμορφωτές και συζευκτές που χρησιμεύουν στην επεξεργασία του οπτικού σήματος.

Το δίκτυο πρόσβασης, καταλήγει στις Οπτικές Μονάδες Δικτύου, και αποτελεί τον οπτικό τερματισμό του σήματος. Από εκεί κι έπειτα το σήμα γίνεται ηλεκτρικό και μεταφέρεται μέσω χάλκινου καλωδίου στον χρήστη.

Συνοπτικά τα παθητικά οπτικά δίκτυα είναι δίκτυα οπτικών ινών σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint), τα οποία δεν περιλαμβάνουν ενεργά στοιχεία.



Εικόνα 5.1 AON VSPON Πηγή: NTNU

Οι βασικότερες αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων οι οποίες έχουν επικρατήσει μέχρι και σήμερα είναι :

- Οπτική ίνα μέχρι το Σπίτι (FiberToTheHome, FTTH)
- Οπτική ίνα μέχρι το Κτίριο/Πεζοδρόμιο (FiberToTheBuilding/Curb, FTTB/C)
- Οπτική ίνα μέχρι το Καφάο (FiberToTheCabinet, FTTCab)

Ένα παθητικό δίκτυο οπτικών ινών αποτελείται από την καλωδίωση των οπτικών ινών και από παθητικούς διαχωριστές (splitters), οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα αποστολής του σήματος διαμέσου μία διακλαδωμένης τοπολογίας στους συζευκτές (couplers) όπου γίνεται και ο τερματισμός του. Στον πίνακα που

ακολουθεί, παρατίθενται τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα ενός παθητικού δικτύου.

Τα δίκτυα πρόσβασης είναι αυτά που συνδέουν τις τερματικές συσκευές των χρηστών με τα τερματικά του οπτικού δικτύου στα τοπικά κέντρα των παροχών (Optical Line Terminals). Αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: σημείο προς σημείο οπτικά δίκτυα (point-to-point), τα ενεργά Ethernet δίκτυα και τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON). Αυτό που διαφοροποιεί αυτά τα τρία είναι τα στοιχεία που θα εγκατασταθούν στη διαδρομή των οπτικών ινών από το κέντρο σύνδεσης προς τα τερματικά των χρηστών.

2.2.2 Ζεύξεις

Τα βασικά δομικά στοιχεία μιας οπτικής ζεύξης είναι ο οπτικός πομπός, που είναι συνήθως laser ημιαγωγού, ο οπτικός δέκτης, χαρακτηριστικό του οποίου είναι ο φωτοανιχνευτής που μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, οι οπτικοί ενισχυτές που αντιμετωπίζουν την πιθανή απώλεια σήματος και τους συνδετήρες.

Ο Paul Green διαιρεί τα συστήματα επικοινωνίας με βάση την τοπολογία σε τρεις κατηγορίες:

1. Την απλή ζεύξη
2. Την πολυσημειακή
3. Και το δίκτυο, υποσύνολο του οποίου είναι η απλή και πολυσημειακή ζεύξη.

Ο ίδιος τονίζει πως για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του δικτύου είναι απαραίτητη η *από οποιονδήποτε*

σε οποιονδήποτε διασύνδεση ενώ η τάση του 1993 (οπότε και γράφτηκε το σύγγραμμα) ήταν οι πολυσημειακές ζεύξεις και τα δίκτυα ώστε να φτάσει το σήμα στους τελικούς οικιακούς χρήστες. Κάτι τέτοιο βέβαια με το χρόνο, σε μεγάλο βαθμό, υλοποιήθηκε.

Σε ό,τι αφορά τις διαφορετικές απαιτήσεις μεταξύ ζεύξεων στις απλές ζεύξεις είναι αρκετό να διαβιβάζεται ο μεγαλύτερος αριθμός bit σε όσο το δυνατόν πιο μεγάλη απόσταση χωρίς επαναλήπτη. Στις πολυσημειακές ζεύξεις οι απαιτήσεις σε ροή δεδομένων είναι τεράστιες αφού προορίζονται για πολυμεσικές εφαρμογές. Στα δίκτυα τέσσερις εφαρμογές επιβάλλουν τις τεχνικές απαιτήσεις του συστήματος σε τάξεις Gigabit και αυτές είναι η οπτική απεικόνιση, η ιατρική εικόνα, η τηλεδιάσκεψη και η διασύνδεση μεταξύ CPU. Αυτές περιγράφουν και τις απαιτήσεις των δικτύων τρίτης γενιάς.

Σε κάθε ζεύξη του δικτύου τρία είναι τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν για τη λειτουργία του:

1. Το εύρος ζώνης του
2. Ο ρυθμός σφαλμάτων του και
3. Η καθυστέρηση που προκαλεί. (Green, 1993).

Σύμφωνα με τον Green στα τρίτης γενιάς δίκτυα όχι μόνο δεκαπλασιάζεται το εύρος ζώνης αλλά βελτιώνεται αισθητά και ο ρυθμός σφαλμάτων αφού στις οπτικές ίνες υπάρχει μεγάλος βαθμός ελέγχου. Αλλά σύμφωνα με τον ίδιο το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των δικτύων τρίτης γενιάς είναι πως είναι ανοικτά σε αλλαγές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτά διαφορετικοί ρυθμοί λειτουργίας και formats.

2.2.3 Οπτικά δίκτυα 1ης, 2ης και 3ης γενιάς

Σε φυσικό επίπεδο επικρατεί ο διαχωρισμός των δικτύων σε πρώτη δεύτερη και τρίτη ή επόμενη γενιά. Στην πρώτη φάση γινόταν απλή αντικατάσταση της οπτικής ίνας, εξακολουθούσε όμως η πληροφορία να μεταδίδεται σε ηλεκτρικό επίπεδο. Στη δεύτερη φάση άρχισαν να μειώνονται οι οπτοηλεκτρικές μετατροπές και σε τρίτη φάση η τεχνολογία οδηγήθηκε σε «allopticalnetworks», δηλαδή αμιγώς οπτικά δίκτυα με πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των οπτικών ινών (Green, 1994). Αυτό που διαχωρίζει τις γενιές είναι ουσιαστικά η ποσότητα της πληροφορίας που μεταδίδεται στη μονάδα χρόνου αλλά και η απόσταση κάλυψης των δικτύων. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς όμως είναι και αυτά χωρισμένα σε στάδια. Για παράδειγμα τα οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς δευτέρου σταδίου (NG-PON2) ξεκίνησαν το 2011 με σκοπό την αύξηση του εύρους ζώνης πέρα από τα 10 Gb/s (Luoetal. 2013).

2.2.3.1 Οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς

Στα πρώτης γενιάς οπτικά δίκτυα συναντώνται οπτικές ζεύξεις σημείου προς σημείο και η οπτική ίνα συνδέει τους δύο κόμβους. Με διαφορετικές μεθόδους πολυπλεξίας επιτυγχάνεται η όποια αύξηση εύρους ζώνης. Η μεταγωγή, η δρομολόγηση, η αναγέννηση παλμών, και η ανάκτηση ρολογιού υλοποιούνται σε ηλεκτρικό επίπεδο, μετά τη μετατροπή των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά. Αυτή η τεχνολογία δεν εκμεταλλευόταν επαρκώς τις δυνατότητες των οπτικών ινών ενώ παρείχε χαμηλές ταχύτητες και υψηλό ρυθμό σφαλμάτων εξαιτίας της οπτοηλεκτρονικής μετατροπής.

2.2.3.2 Οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς

Τα δεύτερης γενιάς δίκτυα τα χάλκινα καλώδια αντικαταστάθηκαν από ίνες αλλά η σύνδεση γινόταν πάλι με εξαρτήματα από χαλκό δημιουργώντας το φαινόμενο bottleneck (Green, 1994). Βασίζονται στην ιδέα της μείωσης των λειτουργιών στο ηλεκτρονικό επίπεδο και τη μείωση των οπτοηλεκτρονικών μετατροπών. Με τεχνικές πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος, η μετατροπή γίνεται μόνο κατά την αποστολή για να προστεθεί η πληροφορία σε ένα μήκος κύματος και την λήψη για να αφαιρεθεί και όχι στους ενδιάμεσους κόμβους. Εδώ επικράτησαν οι τοπολογίες δακτυλίου. Στα δεύτερης γενιάς οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται και οπτικοί καταναμητές που είναι υπεύθυνοι για τη μεταγωγή του οπτικού μήκους κύματος από τη θύρα εισόδου σε άλλο μήκος κύματος στη θύρα εξόδου.

2.2.3.3 Οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς

Στα τρίτης γενιάς δίκτυα στόχος είναι η βελτιστοποίηση της ροής πληροφορίας από ένα δίκτυο εξ ολοκλήρου φτιαγμένο από ίνες όπου θα αποφεύγεται το φαινόμενο bottleneck (Prat (ed), 2008). Τα τρίτης γενιάς δίκτυα είναι ασυνδεδασμένα και η πρόσβαση γίνεται μέσω οπτικών δικτύων πρόσβασης ενώ η μεταγωγή γίνεται είτε κατά πακέτα, είτε με ριπές είτε με ετικέτες που καθορίζουν τη μονάδα - παραλήπτη της πληροφορίας.

Οι Skubic, Ayhan&Dahlfort (2012) διευκρινίζουν πως όταν χρησιμοποιούν τον όρο «επόμενης γενιάς» αναφέρονται σε δίκτυα που παρέχουν ταχύτητες άνω του 1Gbit/s ανά συνδρομητή σε μια παθητική οπτική διάταξη με αναλογία 1 γραμμής ανά 64 χρήστες με μέγιστη χρήση του εύρους ζώνης με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Είναι σύμφωνα με τον Green αμιγώς οπτικά δίκτυα και όλες οι λειτουργίες που αφορούν την επεξεργασία της πληροφορίας εκτελούνται σε οπτικό επίπεδο χωρίς οπτοηλεκτρονικές μετατροπές που δημιουργούσαν σφάλματα και καθυστερήσεις.

3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3. Παθητικό οπτικό δίκτυο

Το πιο εφαρμοσμένο πεδίο πολυσημειακών ζεύξεων είναι η διανομή ψυχαγωγικού υλικού το οποίο παρουσιάζει υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και μετάδοση του σήματος σε όσο δυνατόν περισσότερους συνδρομητές με το μικρότερο δυνατό κόστος (Green, 1993). Οι χιλιομετρικοί περιορισμοί των τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων xDSL οδήγησαν στην έρευνα για την ανάπτυξη των Παθητικών Οπτικών Δικτύων στα δίκτυα πρόσβασης. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα φάνηκαν να είναι μονόδρομος στη λύση του προβλήματος bottleneck (Kazonky, Shaw, Gutierrez, Cheng&Wong 2007). Το παθητικό οπτικό δίκτυο είναι υψηλού εύρους ζώνης οπτικό δίκτυο βασισμένο στο πρωτόκολλο ATM, Ethernet ή TDM (Kramer&Pesavento, 2005)

Πλεονεκτήματα

- Μη ενεργοί οι απομακρυσμένοι κόμβοι

- Πλήρως παθητικό δίκτυο

- Εύκολη μετάδοση βίντεο και δεδομένων

Μειονεκτήματα

- Το ίδιο εύρος ζώνης διαιρείται μεταξύ διάφορων χρηστών

- Διαχωρισμός οπτικής ίνας μεταξύ των θυρών εξόδου (outputports), περιορισμός μέγιστης απόστασης μετάδοσης

- Το ίδιο οπτικό σήμα παραλαμβάνεται από όλες τις

<ul style="list-style-type: none"> • Υλοποίηση με το λιγότερο δυνατό αριθμό πομποδεκτών 	<p>μονάδες (ONUs), πρόβλημα ασφάλειας δικτύων</p> <ul style="list-style-type: none"> • Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για uploading δεν είναι broadcast
<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής • ελαχιστή ινα 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαίτηση για έναν αυστηρό αλγόριθμο για την σύλληψη αντιρρευματικής (upstream) κυκλοφορίας (καταμερισμός χρόνου για την upstream σύνδεση) • Πιο σύνθετοι πομποδέκτες

Πίνακας 2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα PON

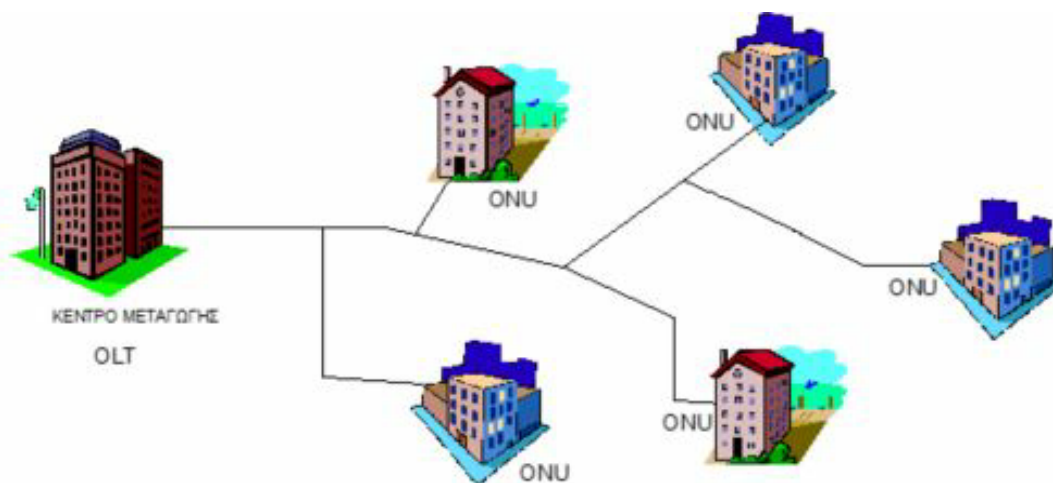
Στα κυριότερα πλεονεκτήματα του παθητικού οπτικού δικτύου(PON) συγκαταλέγονται: η χρήση ελάχιστης οπτικής ίνας, πομποδεκτών και τερματικών γραμμών, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους και ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη ακτίνα λειτουργίας του δικτύου, στα 15 με 20 km εκεί που το DSL έφτανε το μέγιστο στα 4 km. Άλλο ένα προτέρημα των οπτικών ινών είναι το μεγαλύτερο εύρος ζώνης που φτάνει το 1 Gbps. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα θεωρείται ότι ανταποκρίνονται άριστα στις αυξημένες ανάγκες της σύγχρονης τηλεπικοινωνίας για μεγάλο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις με το μικρότερο δυνατό κόστος και για το λόγο αυτό σε αυτά έχει δοθεί βαρύτητα για την έρευνα και ανάπτυξή τους.

Το 2008 περίπου 8.000.000 σπίτια είχαν συνδεθεί σε παθητικά οπτικά δίκτυα, μοιραζόμενα το ίδιο εύρος ζώνης με περίπου άλλους δέκα χρήστες (Prat (ed), 2008). Είναι κοινή αντίληψη άλλωστε πως οι τοπολογία FibertoHome είναι η πιο ανθεκτική στο χρόνο και η μόνη που σίγουρα θα μπορέσει να υποστηρίξει τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

3.1 Τοπολογίες παθητικών οπτικών δικτύων

Υπάρχουν τρεις βασικές τοπολογίες παθητικών οπτικών δικτύων υπάρχουν όμως και διατάξεις που συνδυάζουν πάνω από μία τοπολογία.

3.1.1 Τοπολογία Δέντρου

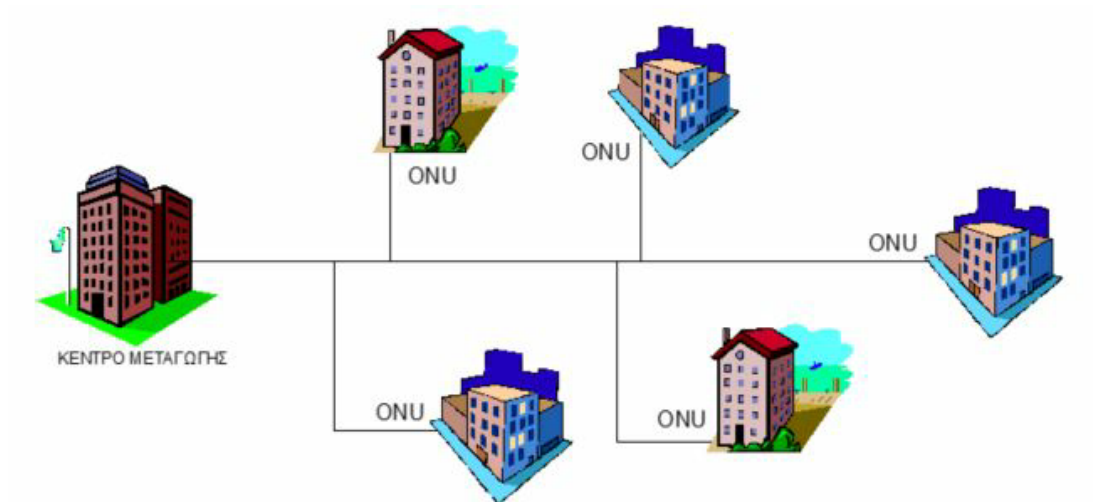


Εικόνα 2 Οπτική Απεικόνιση Τοπολογίας Δέντρου

Στην τοπολογία δέντρου (tree) γίνεται η διαίρεση του σήματος με τη χρήση παθητικών διαχωριστών, οι οποίοι βρίσκονται σε διαδοχικά σημεία διακλάδωσης. Με τον τρόπο αυτό μία οπτική ίνα που εξέρχεται από το τοπικό κέντρο μπορεί να συνδεθεί με πολλά σημεία τερματισμού (ONU), δημιουργώντας συνδέσεις σημείου

προς πολλαπλά σημεία μεταξύ OLT και ONU. Έτσι επιτυγχάνεται η κοινοχρησία του εξοπλισμού που βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής και της οπτικής ίνας με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους. Η τοπολογία δένδρου μεγιστοποιεί την ευελιξία και δεν απασχολεί ενεργά κοστοβόρα στοιχεία (Kazonskyetal. 2007). Στα μειονεκτήματα της τοπολογίας αυτής συγκαταλέγεται η μείωση της οπτικής ισχύος μετά από κάθε διακλάδωση με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από το δίκτυο. Για τη σύνδεση μεγαλύτερου αριθμού χρηστών προτείνεται η χρήση εκπομπών με μεγάλη ισχύ εξόδου ή πολύ ευαίσθητων δεκτών.

3.1.2 Τοπολογία Διαύλου



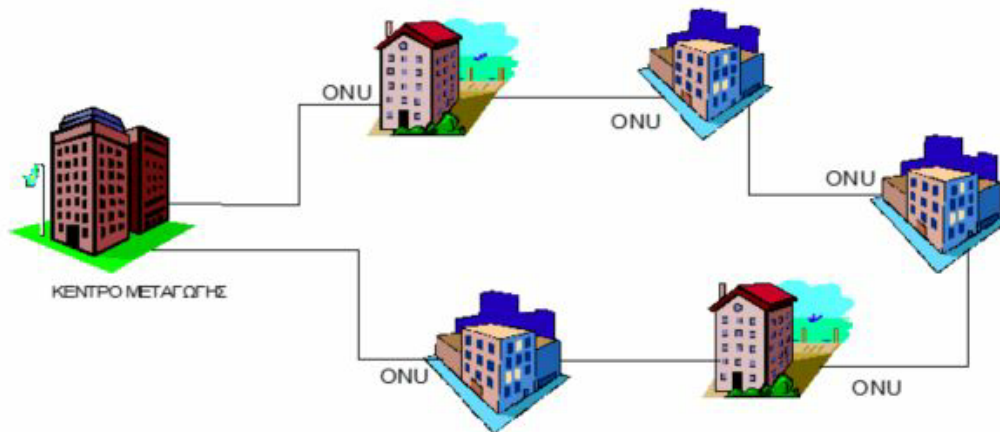
Εικόνα 3 Οπτική απεικόνιση τοπολογίας διαύλου (bus)

Στην τοπολογία διαύλου (bus) για κάθε κατεύθυνση χρησιμοποιείται μία ξεχωριστή ίνα με αποτέλεσμα να μειώνεται στο ο αριθμός των οπτικών πομποδεκτών που χρειάζονται σε σχέση με την τοπολογία δέντρου. Στους κόμβους σύνδεσης του συνδρομητή, ένας οπτικός διαχωριστής παρακρατά ένα μέρος του οπτικού σήματος και το κατευθύνει στον συνδρομητή. Η κύρια

συσκευή σε ένα δίκτυο με τοπολογία διαύλου είναι ο ασύμμετρος οπτικός διαχωριστής/συνδυαστής: στο ρεύμα καθόδου διαχωρίζει από το δίαυλο το ελάχιστο ποσό οπτικής ισχύος που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του δέκτη κάθε συνδρομητή, επιτρέποντας να μείνει στο δίαυλο αρκετή ισχύς για τους άλλους συνδρομητές ενώ στο ρεύμα ανόδου, η ισχύς η οποία εκπέμπεται από τους συνδρομητές οδηγεί στη δημιουργία, μέσω των συνδυαστών, της συνολικής ανοδικής κυκλοφορίας σε μία ίνα που οδηγεί προς το τοπικό κέντρο.

Στα μειονεκτήματα της τοπολογίας αυτής συμπεριλαμβάνεται το γεγονός ότι οι διαφορετικές μεταξύ τους παγιδεύσεις δεν είναι τέλειες με αποτέλεσμα να μην είναι ακριβής πάντα η ποσότητα οπτικής ισχύος που παγιδεύτηκε. Έτσι, ο ισολογισμός της ισχύος είναι κρίσιμος σε αυτόν τον τύπο τοπολογίας γιατί πρέπει να προϋπολογιστούν οι αστάθειες που παρουσιάζονται στην απόδοση της παγίδευσης. Για την αναβάθμιση του δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικάμήκη κύματος, όπως και στην περίπτωση του παθητικού δένδρου. Η τοπολογία διαύλου προσφέρει καλύτερο μερισμό της ίνας σε σύγκριση με την τοπολογία δέντρου.

3.1.3 Τοπολογία Δακτυλίου



Εικόνα 4 Οπτική απεικόνιση τοπολογίας δακτυλίου

Στον παθητικό δακτύλιο (ring) χρησιμοποιούνται σημειακές (point-to-point) ενεργητικές ζεύξεις δημιουργούν δακτύλιο, ένας κόμβος του οποίου είναι το κέντρο μεταγωγής. Η τοπολογία δακτυλίου απαιτεί ένα μόνο OLT, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα οικονομική σε συνδυασμό με το μικρό μήκος ίνας που χρειάζεται.

3.2 Δομή

Το πρώτο κομμάτι ενός παθητικού οπτικού δικτύου είναι ο Οπτικός Τερματιστής Γραμμής (Optical Line Terminal) ή OLT. Αυτός βρίσκεται στο κέντρο σύνδεσης του παρόχου και διαχειρίζεται και το download και το upload κατά μήκος του Οπτικού Δικτύου Διανομής (Optical Distribution Network ή ODN). Στο download ο OLT λαμβάνει την πολυμεσική κίνηση από το μητροπολιτικό δίκτυο και την καθοδηγεί στις Οπτικές Μονάδες δικτύου (Optical Network Units ή ONUs) που βρίσκονται στην πλευρά του χρήστη σύμφωνα με την τοπολογία fiber to the curb. Για το ρεύμα ανόδου (upload) ο OLT λαμβάνει το πολυμεσικό περιεχόμενο και το καθοδηγεί προς το δίκτυο. Η οπτική μονάδα δικτύου είναι το λεγόμενο καφάο. Σε κάθε μεμονωμένο χρήστη υπάρχει ο Οπτικός Τερματιστής Δικτύου (Optical Network Terminal ή ONT) σύμφωνα με

την τοπολογία fibertothebuilding ή fibertothehome όπου τα οπτικά σήματα μεταφράζονται σε υπηρεσίες φωνής, βίντεο και δεδομένων. Αντίστοιχα στο upload μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα σε οπτικά.

Ο οπτικός τερματιστής γραμμής και ο οπτικός τερματιστής δικτύου σε συνδυασμό, επιτρέπουν τη δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (dynamicbandwidthallocation) με σκοπό την αποδοτική μετάδοση της κίνησης δεδομένων.

Η δομή αυτή επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ίνα και την ίδια θύρα OLT μέσω των παθητικών οπτικών διαιρετών (splitters), οι οποίοι διαμοιράζουν το εύρος μετάδοσης δεδομένων σε μια ίνα μεταξύ των χρηστών. Η οπτική ίνα έχει τουλάχιστον δύο διαφορετικά μήκη κύματος, ένα για το download και ένα για το upload. Ένα τρίτο μήκος κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει τη σύνδεση καλωδιακής τηλεόρασης (“RF overlay”).

3.3 Πολυπλεξία και πρωτόκολλα

Βασικό στοιχείο για την επίτευξη ενός επεκτάσιμου παθητικού οπτικού δικτύου με πολύ υψηλή αναλογία διαχωρισμού είναι το υψηλό επίπεδο πολυπλεξίας, απαραίτητο για τη διαχείριση των επιμέρους σημάτων (Prat (ed), 2008) ώστε στο uploading να μην υπάρχει σύγκρουση στην περίπτωση που δύο ONU μεταδώσουν σε χρονικές στιγμές τέτοιες που τα δεδομένα τους θα φτάσουν ταυτόχρονα στο OLT. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι πολυπλεξίας δεδομένων: η πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM), η πολυπλεξία χρόνου (TDM) και η πολυπλεξία κώδικα (CDM). Το ήδη διαθέσιμο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας και οι σύγχρονες συσκευές υψηλής

ταχύτητας επιτρέπουν υψηλά ποσοστά διαχωρισμού μαζί με υψηλό εύρος ζώνης ανά χρήστη. Ο στόχος σε ένα επόμενης γενιάς οπτικό δίκτυο (NgPON) είναι να εκτελέσει την πολυπλεξία με περιορισμένη πολυπλοκότητα (Prat (ed), 2008).

Όπως σημειώθηκε παραπάνω (βλ. κεφάλαιο Δομή) στο παθητικό οπτικό δίκτυο η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται μεταξύ του OLT και της ONU ή ενός ONT. Η ανταλλαγή δεδομένων είναι σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multiple points) για το download, δηλαδή μετάδοση από το OLT στο ONU, ενώ είναι πολλαπλών σημείων για το upload. Το OLT αποτελεί το σημείο προσαρμογής μεταξύ του παθητικού δικτύου και του δικτύου κορμού, το οποίο μπορεί να υπακούει στα πρωτόκολλα IP, ATM ή SONET και βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής. Ένα ακόμα λοιπόν χαρακτηριστικό του παθητικού οπτικού δικτύου πρόσβασης είναι το πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιηθεί για το στρώμα δεδομένων: SONET, ATM ή Ethernet.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4. Είδη πολυπλεξίας

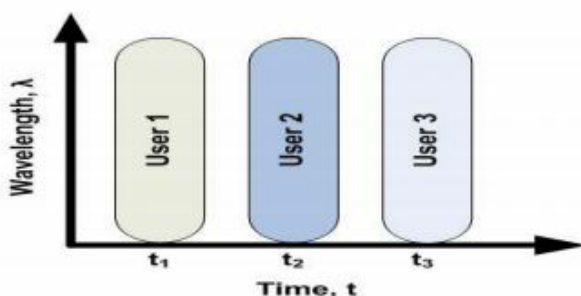
Τα είδη πολυπλεξίας σύμφωνα με τον Prat (2008) συνοψίζονται σε τρία:

- Η οπτική και ηλεκτρική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (OTDM, ETDM) όπου ο κάθε χρήστης έχει πρόσβαση σε ιδιωτικές θυρίδες χρόνου. Αυτό μπορεί να είναι είτε στατικό είτε

δυναμικό όπως στην οπτική μεταγωγή πακέτων (optical packet switching), προσφέροντας δυναμική μεταγωγή εύρους ζώνης (DBA) για διαφορετικές απαιτήσεις. Αν ο ρυθμός μετάδοσης είναι 10 Gbps για οπτικά κανάλια και το εκχωρημένο εύρος ζώνης στα 100 Mbps κατά μέσο όρο ανά χρήστη, το επίπεδο πολυπλεξίας για τους ενεργούς χρήστες είναι της τάξης του 100.

- Η διαίρεση ηλεκτρικής συχνότητας, γνωστή και διαμόρφωση υποφέρουσας (subcarrier multiplexing SCM) για ραδιόφωνο πάνω σε ίνα (RoF), xDSL κ.α: κάθε τερματιστής οπτικού δικτύου έχει μια προκαταχωρημένη συχνότητα, όλα τα κανάλια συνδυάζονται στον απομακρυσμένο κόμβο και αποπολυπλέκονται στον τερματιστή οπτικής γραμμής. Αυτή η μέθοδος είναι πιο συμβατή με τα τρέχοντα συστήματα αλλά έχει υψηλό επίπεδο θορύβου.
- Η διαίρεση μήκους κύματος προσφέρει τις μεγαλύτερες δυνατότητες με ένα επίπεδο διαίρεσης από 20 έως 100 μήκη κύματος ανά ίνα.
- Μία ιδιαίτερη και όχι ευραίως διαδεδομένη τεχνική είναι η οπτική πόλωση (state of optical polarization domain SOP) η οποία βρισκόταν, όταν ο Prat συνέτασσε τη συλλογή του το 2008, υπό έρευνα. Επίσης ο ίδιος αναφέρει και την πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (CDM) η οποία μελετά τεχνικές συσχέτισης σε μαθηματικό επίπεδο.

4.1 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου



Εικόνα 5 Καταμερισμός χρόνου - μήκους κύματος

Η TDM (Time Division Multiplexing) τεχνολογία βασίζεται

στη διαίρεση χρόνου. Τα PONs που χρησιμοποιούν αυτή την μέθοδο πολυπλεξίας στο download αναφέρονται ως TDM-PONs. Ο OLT χρησιμοποιεί την TDM πολυπλεξία για να συνδυάσει τις εισερχόμενες ροές. Αν υπάρχουν N διαφορετικές ροές πληροφοριών που εισέρχονται στον OLT, κάθε μία από τις οποίες έχει ρυθμό μετάδοσης M bits per second (bps), τότε TDM μέθοδος τις πολυπλέκει μεταξύ τους σε διαδοχικά πλαίσια (frames) δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης NxM bps. Τα frames αυτά, τα οποία στο πεδίο της επικεφαλίδας τους μεταφέρουν πληροφορίες για τη διεύθυνση προορισμού τους, μεταδίδονται από τον OLT προς τις διάφορες ONUs με τη μορφή broadcasting. Η κάθε ONU λαμβάνει και φιλτράρει τα δεδομένα κρατώντας μόνο αυτά που προορίζονται για αυτήν. Απαραίτητη είναι όμως και η εφαρμογή κρυπτογράφησης στα δεδομένα της ροής καθόδου αφού όλες οι ONUs έχουν πρόσβαση στις πληροφορίες της ροής καθόδου. Η μέθοδος TDM πολυπλεξίας έχει ως σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του bandwidth του μέσου μεταφοράς, μοιράζοντάς το αποτελεσματικάνάμεσα στις ONUs.

Η μεταφορά πληροφοριών στη ροή ανόδου είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία από αυτή της ροής καθόδου, γιατί όλες οι ONUs θα πρέπει να μοιραστούν το ίδιο μήκος κύματος με βάση τον χρόνο. Για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των εκπομπών διαφορετικών ONUs, το δίκτυο χρησιμοποιεί πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας TDMA είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης από τα ONUs του ίδιου καναλιού μετάδοσης και η μετάδοση δεδομένων στο ίδιο μήκος κύματος σε διαφορετικά παράθυρα μετάδοσης. Επίσης, σημαντική είναι και η δυνατότητα αλλαγής του εύρους ζώνης που έχει ανατεθεί σε κάθε ONU, με

αλλαγή του μεγέθους της χρονοθυρίδας που του έχει ανατεθεί. Μπορεί ακόμα και να εφαρμόσει στατιστική πολυπλεξία για να αξιοποιήσει πλήρως τη χωρητικότητα καναλιού του PON. Τέλος, το χαμηλό κόστος εξοπλισμού των χρηστών, η εύκολη προσθήκη νέων χρηστών στο δίκτυο καθώς και η σημαντική πρόοδος σχετικά με την τυποποίηση (standardization) και την εφαρμογή της τα τελευταία χρόνια, την καθιστούν ως μία από τις επικρατέστερες τεχνολογίες. Με τη χρήση της τεχνολογίας καταμερισμού του χρόνου (time-sharing), γίνεται δυνατή η διαίρεση της χωρητικότητας του καναλιού για κάθε ONU. Με αυτόν τον τρόπο οι πομποί και οι δέκτες των ONUs είναι συντονισμένοι σε μια συχνότητα λειτουργίας και τελικά χρειάζονται μόνο έναν πομποδέκτη στο OLT για να επικοινωνήσουν.

Ωστόσο με την έλευση και την αύξηση της ζήτησης για μεγαλύτερο εύρος ζώνης για την κάλυψη αλλαγών τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας και τριών διαστάσεων, το εύρος ζώνης που προσφέρει η μέθοδος δεν είναι πια επαρκές (Kazovsky et al, 2007).

Οι τρεις επικρατέστερες κατηγορίες της TDMA τεχνολογίας για δίκτυα PON είναι οι εξής:

4.1.1 APON, BPON

Αποτελούν συνδυασμό της τεχνολογίας των παθητικών οπτικών δικτύων και της ασύγχρονης μεταφοράς. (Asynchronous Transfer Mode – ATM). Είναι οι πρώτες κατηγορίες παθητικών οπτικών δικτύων που εκδόθηκαν το 1995

και τυποποιήθηκαν από την ITU-T με την προδιαγραφή G.983. Ο ρυθμός μετάδοσης των δικτύων αυτών καθορίστηκε στην αρχή να είναι συμμετρικός, με 155 Mbps ροή τόσο για το upload όσο και το download. Αυτό άλλαξε αργότερα ώστε να επιτρέπει ασύμμετρες, ανοδικές ροές στα 155 Mbps και καθοδικές στα 622 Mbps αλλά και συμμετρικές μεταδόσεις στα 622 Mbps. Το BPON έβρισκε μέχρι πρόσφατα εφαρμογή στα δίκτυα με ρυθμό 622 Mbit/s στην κατερχόμενη κατεύθυνση και 155 Mbit/s ή 622 Mbit/s στην ανερχόμενη και με 32-64 διαμέριση (wavelength division multiplexing).

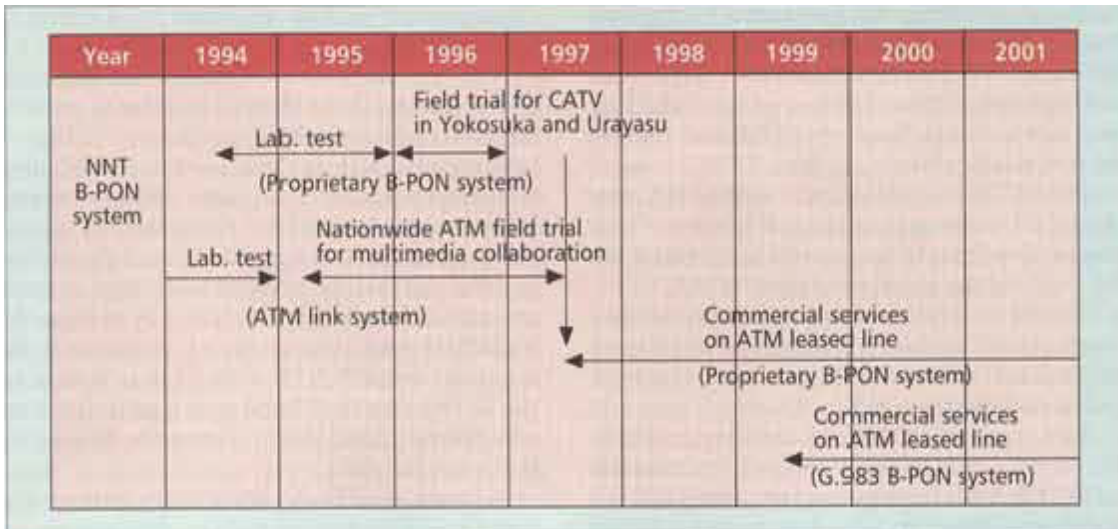
Στο APON χρησιμοποιείται τοπολογία διπλού αστέρα. Ένας αστέρας βρίσκεται στο OLT και εκεί η διεπαφή του ευρυζωνικού δικτύου για τις υπηρεσίες διαιρείται λογικά και οδηγείται στη διεπαφή ATM-PON. Ο δεύτερος αστέρας βρίσκεται στο διαιρέτη όπου η πληροφορία διαιρείται παθητικά και οδηγείται σε κάθε ONT. Στο APON χρησιμοποιείται μία οπτική ίνα για το upstream και το downstream οπότε χρησιμοποιούνται δύο μήκη κύματος-1550 nm για την κάθοδο και 1310 nm για την άνοδο. Θα μπορούσε χρησιμοποιηθεί ένα μήκος κύματος, όμως τα δύο παρέχουν καλύτερη οπτική απομόνωση για πομπές και δέκτες laser ενώ εξαλείφουν την ανάγκη για διαιρέτες δέσμης φωτός.

Επειδή πάντως υπάρχουν καθοδικά κανάλια κοινοποίησης (broadcast channels) στα παθητικά οπτικά δίκτυα PON, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιούνται τεχνικές κρυπτογράφησης για ασφάλεια. Το APON μπορεί να μεταφέρει και πακέτα Ethernet και να υποστηρίζει T1.

Το Broadband PON (BPON) που με την πάροδο του χρόνου εισήχθη και χρησιμοποιείται, είναι παρόμοιο με το APON με τη διαφοροποίηση ότι πρόκειται για δίκτυα που υποστηρίζουν ευρυζωνικές υπηρεσίες (ITU-T G.983.1, 2005) χρησιμοποιώντας

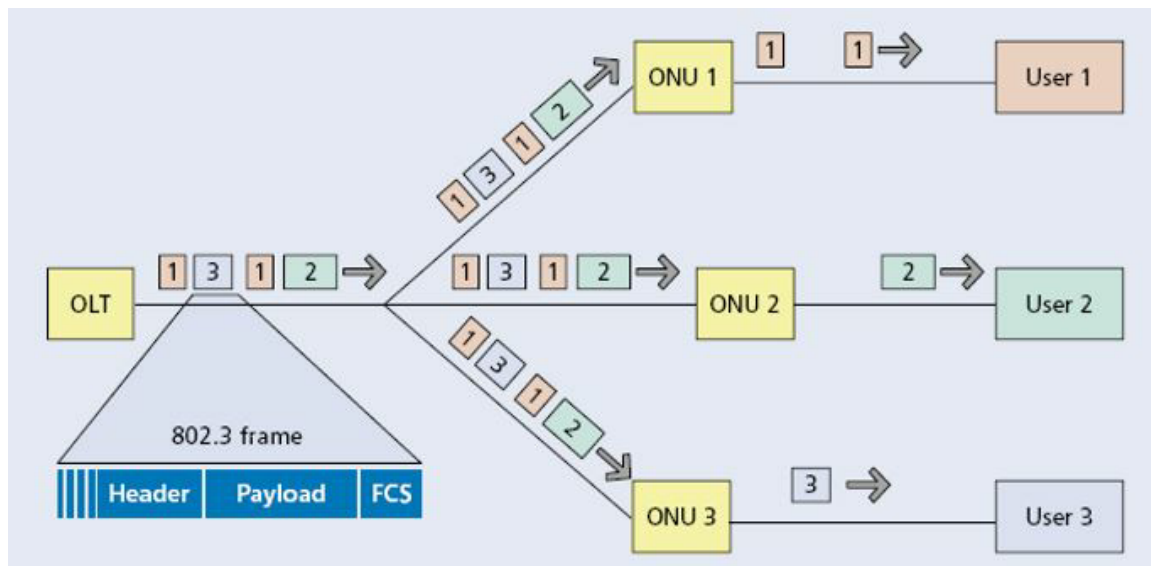
κελιά ATM. Το BPON είναι ένα point-to-multipoint οπτικό δίκτυο πρόσβασης προσφέρει υπηρεσίες ευρυζωνικότητας ανάμεσα στο OLT, στο κέντρο σύνδεσης του παρόχου, και πολλαπλές ONU (ή ONT), μέσα στα όρια κάλυψης του κέντρου και σε μέγιστη απόσταση 20 χιλιομέτρων (ITU-T G.983.1, 2005). Τα δεδομένα που φτάνουν στον OLT από το δίκτυο κορμού, για download μπαίνουν στα κελιά ATM και δρομολογούνται προς τον παθητικό διαιρέτη μέσω πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου. Η ONU φιλτράρει τα εισερχόμενα δεδομένα και κρατά μόνο αυτά που προορίζονται για εκείνη βάσει των πεδίων GFC-VPI-VCI της επικεφαλίδας του κάθε κελιού ATM.

Για τη κατεύθυνση της ροής ανόδου χρησιμοποιείται η μέθοδος πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου πολλαπλής πρόσβασης, στην οποία κάθε ONU συγχρονίζεται με τις υπόλοιπες ONU του δικτύου και χρησιμοποιούν το συνολικό εύρος ζώνης εναλλάξ, σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα μέσω της διαδικασίας ranging. Δηλαδή ο τερματιστής οπτικής γραμμής προσδιορίζει πόσο μακριά βρίσκεται η κάθε ONU από αυτόν και της παραχωρεί την καλύτερη δυνατή χρονική θυρίδα, μέσα στην οποία θα μπορεί να στείλει τα δεδομένα της χωρίς την παρεμβολή εκπομπών άλλων ONU.



Εικόνα 6 Ανάπτυξη του B-PON

4.1.2 EPON



Εικόνα 7 Κυκλοφορία καθοδικής ροής σε EPON

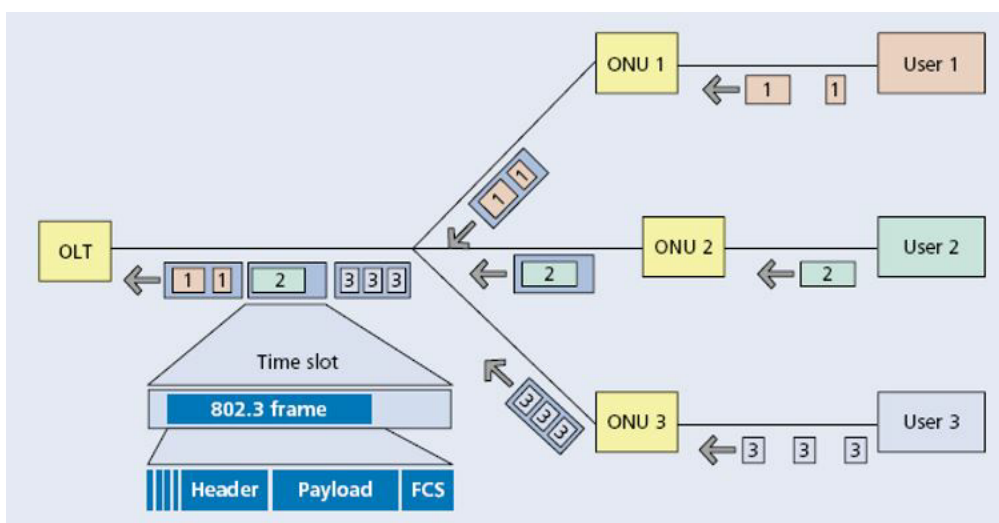
Το Ethernet PON οριστικοποιήθηκε και τυποποιήθηκε το 2004 με την προδιαγραφή IEEE 802.3ah. Διαφέρει από τα APON και BPON επειδή χρησιμοποιεί μόνο το Ethernet σαν πρωτόκολλο τουστρώματος ζεύξης. Επιτρέπει ταχύτητες της τάξης των 1,25

Gbit/s και φτάνει μέχρι τα 20km απόσταση. Οι Kramer και Pesavento θεωρούν πως τα EPONs, αντιπροσωπεύοντας την σύγκλιση του χαμηλού κόστους του εξοπλισμού Ethernet με την χαμηλού κόστους υποδομή σε ίνα, είναι ο επικρατέστερος υποψήφιος για τα δίκτυα επόμενης γενιάς.

Σε ένα δίκτυο EPON η επεξεργασία των μεταδιδόμενων δεδομένων καθόδου από το OLT σε πολλαπλές ONU διαφέρει σημαντικά από τη μετάδοση δεδομένων στο ρεύμα ανόδου από πολλαπλές ONU στο OLT.

Στο ρεύμα καθόδου τα μεταδιδόμενα δεδομένα από το OLT περνούν στις ONU σε πακέτα διαφορετικού μήκους που φτάνουν τα 1.518 bytes σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.3. Κάθε πακέτο φέρει μια «επικεφαλίδα» που αναφέρει σε ποια ONU πρέπει να πάει. Στον διαχωριστή η κυκλοφορία χωρίζεται σε τρία σήματα, ένα για κάθε ONU. Όταν τα δεδομένα φτάσουν στην ONU, δέχεται τα πακέτα που απευθύνονται σε αυτήν και απορρίπτει εκείνα που προορίζονται για άλλες.

Στην ανοδική ροή χρησιμοποιείται πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, στην οποία οι μεταδόσεις γίνονται με τη χρήση χρονοθυρίδων. Οι χρονοθυρίδες συγχρονίζονται έτσι ώστε τα πακέτα ανόδου από κάθε ONU να μην ανακατεύονται το ένα με το άλλο αφού τα δεδομένα είναι στην ίδια ίνα.



Εικόνα 8 Κυκλοφορία Ανοδικής ροής σε EPON

APONs	EPONs
<ul style="list-style-type: none">• Τα δεδομένα μεταδίδονται σε σταθερού μήκους κυψέλες 53 byte σύμφωνα με το πρωτόκολλο ATM• Δεν μεταδίδουν δεδομένα, βίντεο και φωνή από μία πλατφόρμα• Δεν παρέχουν επαρκές εύρος ζώνης• Είναι ακριβά• Δεν παρέχουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων	<ul style="list-style-type: none">• Τα δεδομένα μεταδίδονται σε διαφορετικού μήκους πακέτα που φτάνουν μέχρι και 1.518 byte σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.3 για Ethernet• Διανέμουν δεδομένα, βίντεο και φωνή μέσω της ίδιας πλατφόρμας• Προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης• Είναι πιο οικονομικά• Παρέχουν μεγαλύτερο εύρος υπηρεσιών

Πίνακας 3 Σύγκριση APON-EPON

4.1.3 GPON

Είναι ο επίσημος διάδοχος των APON/BPON. Οριστικοποιήθηκε το 2005, με την προδιαγραφή G.984 από τον τομέα τυποποίησης της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών και ακόμα αναπτύσσεται.

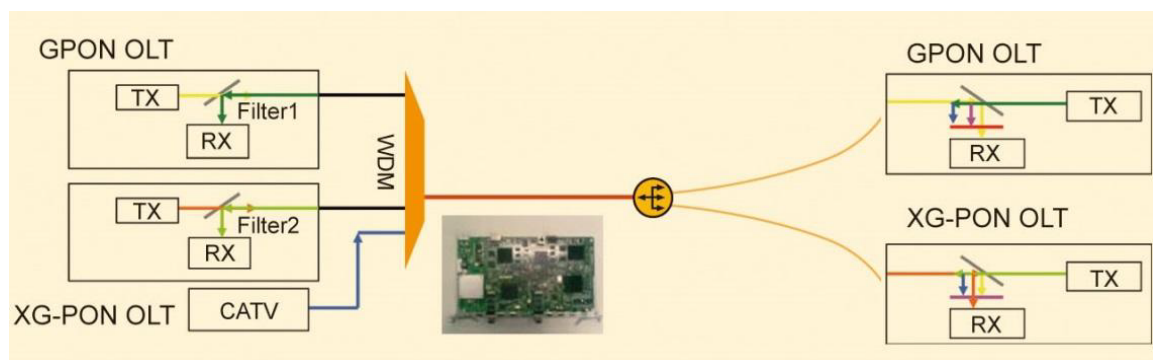
Επιτρέπει ρυθμό μετάδοσης 2,5Gbits/s στην downstream και 1,25Gbits/s στην upstream. Προκειμένου να είναι συμβατό με τις προηγούμενες τεχνολογίες χρησιμοποίησε χαρακτηριστικά των APON. Το GPON υποστηρίζει 64-128 διαμέριση (waysplit). Μπορεί να κάνει χρήση της τεχνολογίας ATM αλλά και του Ethernet ενώ παρέχει και υπηρεσίες φωνής και μισθωμένες γραμμές και επεκτάσεις χωρίς καλώδιο αξιοποιώντας το στρώμα σύγκλισης μετάδοσης (TransmissionConvergenceLayer, GTCLayer), που αναπτύχθηκε με βάση στη μέθοδο GenericFramingProcedure (GFP) της ITU-TG.7041 (ITU-T G.984.1, 2008). Μπορεί να φτάσει μέχρι τα 60km σε απόσταση.

4.1.5 10G-PON ή XG-PON

Το 10G-PON ή XG-PON ή SuperPON παρουσιάστηκε το 2010 από την ITU ως διάδοχος του GPON, ικανός για ταχύτητες που φτάνουν τα 10 Gbit/s με το υπάρχον δίκτυο οπτικών ινών (Wikipedia (α.η.); ITU-T, 2010). Η οπτική ίνα μοιράζεται σε πολλούς συνδρομητές σε ένα δίκτυο που ονομάζεται FTTx με τρόπο που κάνει κέντρο το μεγαλύτερο κομμάτι του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, συχνά εκτοπίζοντας τα χάλκινα τηλεφωνικά καλώδια. Τα 10 Gbits/s διαμοιραζόμενης χωρητικότητας αναφέρονται στην ροή καθόδου σε όλους τους χρήστες που συνδέονται στο ίδιο παθητικό οπτικό δίκτυο. Η ροή ανόδου ανέρχεται στα 2.5Gbits/s και χρησιμοποιεί τεχνικές πολυπλεξίας για να αποφύγει την ανάμιξη των πλαισίων δεδομένων. Οι χρήστες έχουν μια συσκευή δικτύου που μετατρέπει τα οπτικά σήματα σε σήματα που αναγνωρίζει η καλωδίωση του κτηρίου όπως τα Ethernet και τα παλιά τηλεφωνικά καλώδια.

Το XG-PON κληρονόμησε από το G-PON: τις αρχές διαστρωμάτωσης TC, τη δυναμική κατανομή εύρους ζώνης, την ποιότητα της υπηρεσίας και τη διαχείριση της κίνησης και την απομακρυσμένη διαχείριση της ΟΝΥμέσω του OMCI (G.988) (ITU-T, 2010). Βελτίωσε το GPON βελτιώνοντας τους μηχανισμούς ασφάλειας και εξοικονόμησης ενέργεια, προσφέροντας επιλογές συγχρονισμού επιτρέποντας κινητές εφαρμογές υποστήριξης δικτύων ενώ διευκόλυνε τον έλεγχο απόδοσης και αύξησε την απόσταση κάλυψης του δικτύου στα 135 χιλιόμετρα (Kazonky, 2007).

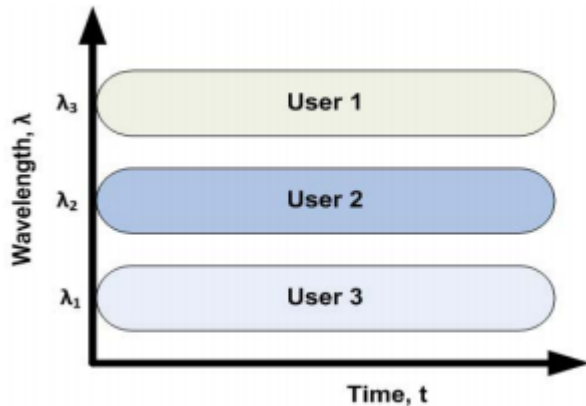
Αναπτύσσεται σε τοπολογία δένδρου και αποτελείται από δύο βασικά ενεργά στοιχεία, για παράδειγμα τον τερματιστή οπτικής γραμμής στο κεντρικό γραφείο (CO) και πολλαπλές μονάδες οπτικού δικτύου στην πλευρά των χρηστών, και ένα παθητικό στοιχείο για παράδειγμα ένα splitter/combiner που διαχωρίζει και συνθέτει πολλαπλές οπτικές ίνες που πηγαίνουν από τις μονάδες στους τερματιστές (Sarigiannidis, Papadimitriou, Nicopolitidis, Varvarigos, Louta&Kakali, 2014). Μάλιστα οι Sarigiannidis, Papadimitriou, Nicopolitidis, Varvarigos, Louta&Kakali προτείνουν μια διάταξη με το όνομα IFAISTOS που στόχο έχει τη δικαιότερη κατανομή του εύρους ζώνης ανάμεσα στους χρήστες.



Εικόνα 8 GPON&XGPON στο ίδιο δίκτυο

4.2 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματοςπολλαπλής πρόσβασης

Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος WDMA



(WavelengthDivisionMultipleAccess) θεωρείται η μέθοδος των παθητικών δικτύων επόμενης γενιάς (Prat (ed), 2008)). Βασίζεται στη διαίρεση του καναλιού μετάδοσης κατά μήκος κύματος. Στο σύστημα WDMA κάθε κανάλι καταλαμβάνει ένα στενό εύρος ζώνης γύρω από ένα κεντρικό μήκος κύματος. Περιγράφεται από την ITU-T με το πρότυπο G.983. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται κανάλια διαφορετικού μήκους κύματος ανάμεσα στον OLT και την ONU και για τη ροή ανόδου και για τη ροή καθόδου. Η WDMείναι η βασική μορφή πολυπλεξίας στα δίκτυα κορμού και στα μητροπολιτικά δίκτυα όπου υποστηρίζονται παραπάνω από 100 διαφορετικά μήκη κύματος. Ενδεικτικά, ένα δίκτυο EPON χρησιμοποιεί μήκος κύματος $\lambda_1=1490\text{nm}$ στην καθοδική και $\lambda_2=1310\text{nm}$ στην ανοδική ροή. ΗWDMA αποτελεί καλή λύσηγια παθητικά οπτικά δίκτυα γιατί προσφέρει σε κάθε χρήστη τη δυνατότητα να εκμεταλλευτεί τη συνολική χωρητικότητα ενός μήκους κύματος. Σε σύγκριση με τα τη μέθοδο πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM), τα παθητικά δίκτυα με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου προσφέρουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης

(Kazonskyetal. 2007).Βασικό της μειονέκτημά αποτελεί το υψηλό κόστος εξοπλισμού του χρήστη καθώς κάθε πρέπει να τοποθετήσει πομπούς laser μεταβλητού μήκους κύματος για να μπορέσει να μεταδώσει σε όποιο μήκος κύματος υποστηρίζει το δίκτυο.

Η αρχιτεκτονική του WDM μοιάζει με της TDM τεχνολογίας με τη διαφορά ότι το WDM-PON παραχωρεί στο χρήστη ένα μήκος κύματος, ενώ το TDM-PON παραχωρεί μία χρονοθυρίδα. Έτσι στο WDM-PON αντί για παθητικό διαιρέτη (splitter), υπάρχει μια παθητική οπτική συσκευή (ArbitraryWaveformGenerator-AWG) που επιτρέπει χωρική διανομή της οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο. Ήδη από το 1984 σε εργαστηριακό πείραμα είχε αποδειχθεί πως αυτή η μέθοδος είναι ένας απλός τρόπος διεύρυνσης της χωρητικότητας σε ένα ήδη εγκατεστημένο δίκτυο (Green, 1994).

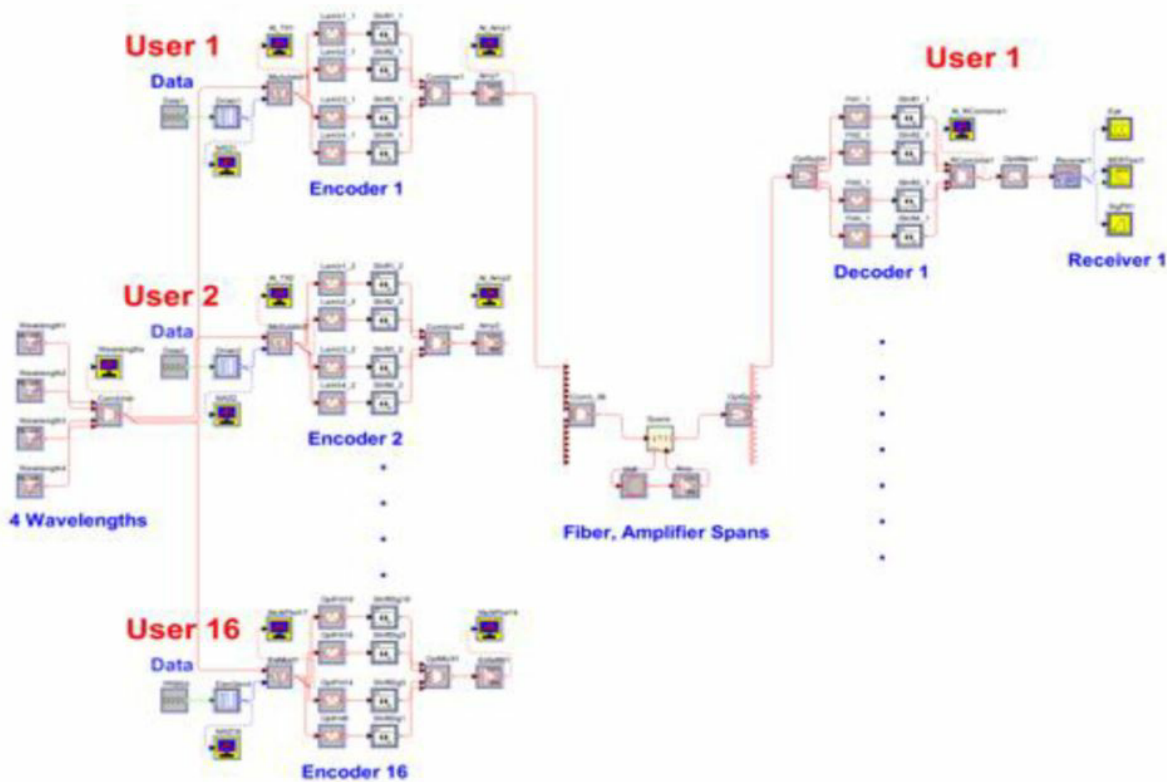
Τα συστήματα WDM χωρίζονται σε δύο μοτίβα μήκους κύματος: το coarse και το dense από τα οποία προκύπτουν οι ονομασίες CWDM και DWDM. Τα CoarseWDM παρέχουν μέχρι 16 κανάλια μέσα από πολλαπλά παράθυρα μετάδοσης από ίνες σιλικόνης (Wikipedia. α.η). Το DWDM χρησιμοποιεί παράθυρο μετάδοσης της C-Band(1530 nm-1560 nm) transmissionwindow αλλά με πυκνή διαυλοποίηση.

Σύγκριση TDMXGPON με WDM PON

Σε σχέση με τα XGPON, τα WDM PON παρέχουν σταθερό εύρος μετάδοσης 1.25 Gbps ανά κανάλι (Μανώλης, 2015) με μέγιστο ρυθμός μετάδοσης που φτάνει ακόμα και τα 10 Gbit στο

δευτερόλεπτο ανά κανάλι. Ταυτόχρονα αγγίζουν αποστάσεις έως 40 χιλιόμετρα και μία ίνα μπορεί να αντιστοιχεί ακόμα και σε 128 χρήστες!

4.3 Πολυπλεξία με διαίρεση οπτικού κώδικα

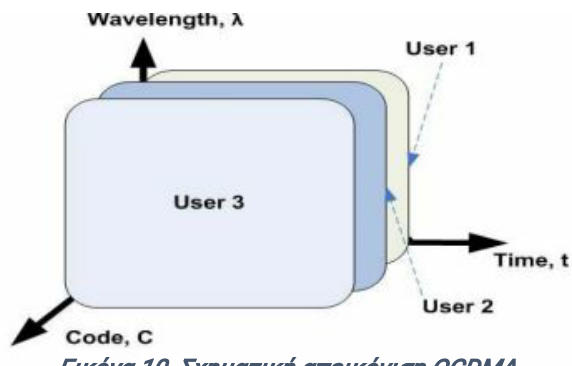


Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση OCDMA

Η πολυπλεξία με διαίρεση οπτικού κώδικα βασίζεται στη διαίρεση του καναλιού με βάση τον οπτικό κώδικα και ανήκει στην οικογένεια τεχνικών φασματικής εξάπλωσης. Στην τεχνική αυτή αντί για χρονοθυρίδες (TDMA) ή μήκη κύματος (WDMA) αποδίδεται στα δεδομένα κάθε χρήστη ένας κωδικός, δίνοντας θα έλεγε κανείς μια τρίτη διάσταση στο φάσμα (βλ. εικόνα).

Στην OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) κατά τη μετάδοση, κάθε bit δεδομένων προκειμένου να μεταδοθεί,

κωδικοποιείται στον πομπό (encoding) ενώ στον δέκτη αποκωδικοποιείται (decoding) ώστε να ανακτηθεί. Αυτές οι διαδικασίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης συνθέτουν την οπτική κωδικοποίηση (optical coding).



Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση OCDMA

Πλεονεκτήματα

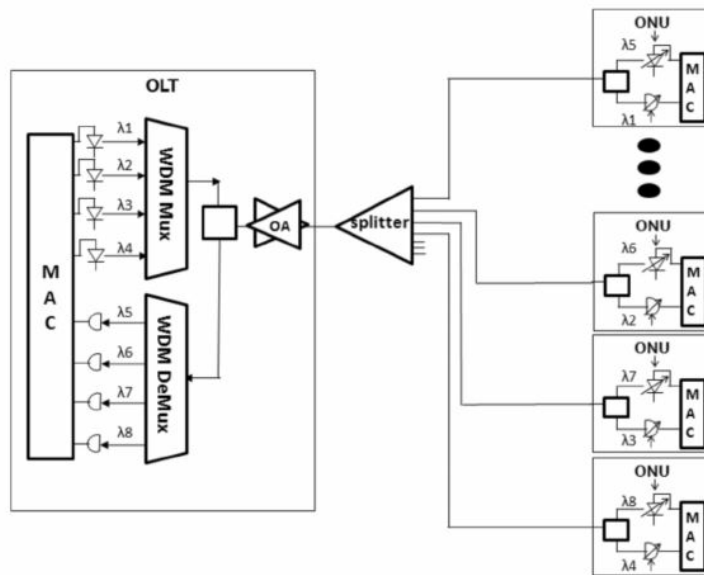
Η OCDMA προσφέρει μεγάλο αριθμό καναλιών και η υποστήριξη επιπρόσθετων χρηστών στο δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρό κόστος χωρίς να επηρεάζεται το εύρος ζώνης των υπόλοιπων χρηστών. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της OCDMA τεχνολογίας, είναι η δυνατότητα ασύγχρονης μετάδοσης που απλοποιεί τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο, σε αντίθεση με την TDMA η οποία απαιτεί αυστηρό συγχρονισμό. Στην πολυπλεξία με βάση τον κώδικα μεταδίδονται πολλαπλά σήματα ταυτόχρονα, στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με τις ίδιες τεχνικές διαμόρφωσης και εισάγονται οι έννοιες κέρδος χωρητικότητας και ασφάλεια. Σύμφωνα με το νόμο Shannon-Hartly για τη χωρητικότητα καναλιού οριοθετημένης ζώνης, για μια δεδομένη ισχύ σήματος, η χωρητικότητα του καναλιού αυξάνεται όσο διευρύνεται το εύρος ζώνης ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και το επίπεδο θορύβου. Έτσι γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση δεδομένων διατάξεων. Ακόμη συγκριτικά με την TDMA και WDMA, η OCDMA προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφαλείας.

Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα αυτής τεχνολογίας περιορίζουν την εφαρμογή της. Τα σημαντικότερα είναι τα εξής: έχει υψηλό κόστος διατάξεων, η φασματική εξάπλωση μειώνει την απόδοση σε σχέση με την WDMA και η διασπορά λόγω του υψηλού κωδικοποιημένου ρυθμού μετάδοσης του σήματος περιορίζει την απόσταση των ONUs από το OLT. Ως πρόβλημα της μεθόδου έχει αναφερθεί και η υψηλή στάθμη θορύβου όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται (Kazovsky, 2007). Η τεχνολογία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από μεγάλο αριθμό χρηστών μόνο όταν αυτοί μεταδίδουν περιοδικά, αφού η απόδοση της μειώνεται αισθητά όταν οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα και δημιουργούν παρεμβολές. Έτσι παρουσιάζεται το πλεονέκτημα της επίτευξης της στατιστικής πολυπλεξίας απευθείας στο φυσικό επίπεδο του δικτύου. Αν εκμεταλλευτεί κατάλληλα αυτή η πολυπλεξία, μπορεί να επιτευχθεί και αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος.

Οι διαφορετικές διαστάσεις πολυπλεξίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και συνδυαστικά (Prat, ed, 2008), δημιουργώντας υβριδικές μορφές πολυπλεξίας απαραίτητες για την επόμενη γενιά οπτικών δικτύων. Εξαιρετικά δυνατός φαίνεται ο συνδυασμός TDM και WDM.

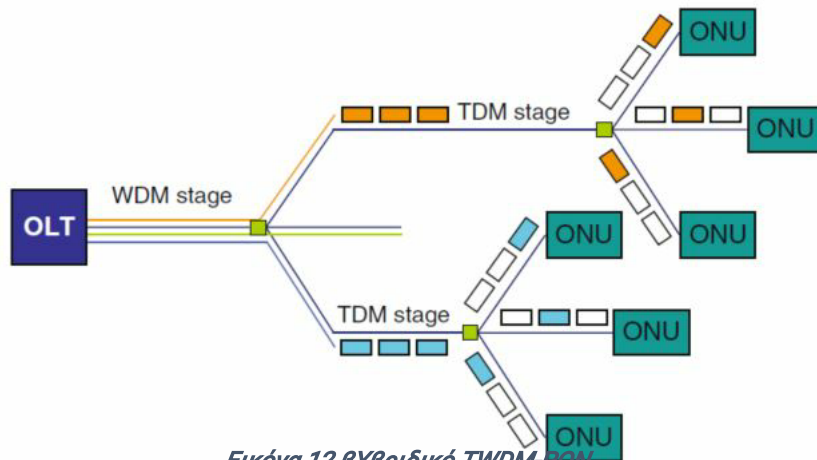
4.4 Υβριδικά TDM/WDM παθητικά δίκτυα



Εικόνα 11 Δίκτυο TWDM-PON

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι υβριδικές μορφές πολυπλεξίας είναι χαρακτηριστικό των παθητικών δικτύων επόμενης γενιάς. Ήδη από το 2012 έχει επιλεχτεί η μέθοδος πολυπλεξίας TWDM ως πρωτεύουσα λύση για τη δεύτερη γενιά παθητικών οπτικών δικτύων επόμενης γενιάς (Luo, Zhou, Effenberger, Yan, Peng, QianandMa, 2013). Δεδομένων των υφιστάμενων υποδομών και των αυξανόμενων απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, το ζήτημα είναι η μετάβαση στην τεχνολογία WDM-PON με ευπροσάρμοστο και οικονομικό τρόπο. Κάποια υβριδικά TDM/WDM PON μοντέλα έχουν προταθεί, συμπεριλαμβανομένων των Hybrid PON της Samsung και του SUCCESS-DWA και του SUCCESS-HPON του Στάνφορντ. Οι παραλλαγές SUCCESS-DWA και SUCCESS-HPON που προτάθηκαν από το πανεπιστήμιο του Stanford, παρέχουν μια ομαλή μετάβαση από τις υλοποιήσεις TDM στις WDM-PON. Το SUCCESS-HPON παρέχει εύρος ζώνης συγκρίσιμο με τις απλές WDM-PON, αλλά σε χαμηλότερα κόστη. Αυτό επιτυγχάνεται καταργώντας την εγκατάσταση των laser στο χώρο των συνδρομητών και τοποθετώντας την στους κύριους καταναμητές. Σε αυτή την

περίπτωση, ένα συνεχές κύμα στέλνεται από τον κύριο καταναμητή στους συνδρομητές. Με αυτό θα διαμορφώσουν τα δεδομένα που θα στείλουν πίσω στο δίκτυο. Με την αφαίρεση των laser και την τοποθέτησή του στους κύριους καταναμητές, η εγκατάσταση γίνεται πολύ πιο οικονομική αφού μειώνονται οι ακριβές συσκευές



Εικόνα 12 υβριδικό TWDM-PON

που πρέπει να τοποθετηθούν στο σύστημα.

Στο σχήμα φαίνεται η βασική δομή ενός υβριδικού δικτύου TWDM-PON. Τέσσερα XG-PONs συνδέονται με τη χρήση τεσσάρων ζευγών μήκους κύματος.

Μια ακόμη αναβάθμιση B-PON με τη χρήση τόσο πολυπλεξίας χρόνου όσο και πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος περιλαμβάνει χρήση της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος στην ροή καθόδου για μετάδοση βίντεο (Ueda et al, 2001). Στην περίπτωση αυτή μπορεί είτε να χρησιμοποιηθούν δύο ίνες (μία για κάθε μορφή πολυπλεξίας και αντίστοιχα ροής) είτε μία με χρήση μόνο πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (ο.π.). Κάτι τέτοιο όμως δε προσφέρει ουσιαστικά πλεονεκτήματα αφού και πάλι το μέγιστο μήκος της γραμμής ανέρχεται και πάλι στα 20 χιλιόμετρα.

Τύπος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
-------	---------------	---------------

πολυπλεξίας		
WDM	<ul style="list-style-type: none"> • Παρέχει υψηλό εύρος ζώνης • Είναι εύκολο στην υλοποίηση 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος, αφού κάθε ONU πρέπει να έχει ένα διαχωριστή μήκους κύματος. • Δυσκολία αναβάθμισης, γιατί το OLT έχει έναν πίνακα αντιστοίχισης για κάθε μήκος κύματος με κάθε ONU. Η προσθήκη μιας επιπλέον ONU θα ήταν δύσκολη.
TDM	<ul style="list-style-type: none"> • Επιτρέπει σε κάθε ONU να χρησιμοποιεί ένα κλάσμα της χωρητικότητας του δικτύου. • Μόνο ένας μεταδότης είναι απαραίτητος στο OLT ανεξαρτήτως του αριθμού των ONUs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από το WDM. • Απαιτεί το συγχρονισμό των ONUs.
CDM	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των χρηστών. • Παρέχει ασφάλεια. 	<ul style="list-style-type: none"> • Οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών καναλιών αυξάνονται όσο αυξάνουν οι χρήστες. • Το υλικό πρέπει να έχει τη δυνατότητα να χειριστεί ρυθμούς δεδομένων πολύ υψηλότερους από αυτούς των χρηστών.

Πίνακας 4 Σύγκριση μεθόδων πολυπλεξίας

5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5. Πρωτόκολλα

5.1 Πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο MAC

Το σύστημα σύγκλισης μετάδοσης του G-PON προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης για τη ροή ανόδου. Τα πλαίσια στο upstream δηλαδή δείχνουν τις επιτρεπτές θέσεις για κίνηση στα πλαίσια GTC ανόδου, τα οποία συγχρονίζονται με τα πλαίσια GTC καθόδου. Έτσι μόνο μία ONU είναι δυνατό να έχει πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης στη δεδομένη χρονική στιγμή. Έτσι, εάν το δίκτυο λειτουργεί σωστά, δεν εμφανίζονται διαμάχες για τη πρόσβαση στο μέσο όπως επίσης και συγκρούσεις κατά τη μετάδοση των πακέτων.

5.2 SONET

Το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (Synchronous Optical Networking SONET) και το αντίστοιχό του για την Ευρώπη Synchronous Digital Hierarchy (SDH) είναι προτυποποιημένα πρωτόκολλα μεταφοράς πολλαπλών ψηφιακών ροών ταυτόχρονα μέσω οπτικών ινών με τη χρήση laser ή led. Το SONET ορίζει οπτικά σήματα και μια δομή σύγχρονων πλαισίων για ψηφιακή κυκλοφορία σε πολυπλεξία (Cisco, 2006). Είναι ένα σύνολο προτύπων που ορίζουν τους ρυθμούς και τους τύπους για οπτικά δίκτυα που καθορίζονται από τις ANSI T1.105, ANSI T1.106, and ANSI T1.117.

Το SONET και το SDH βασίζονται σε μια δομή που έχει μια

βασική μορφή πλαισίου και ταχύτητας. Το πλαίσιο που χρησιμοποιεί το SONET είναι το Synchronous Transport Signal (STS) με το βασικό σήμα STS-1 στα 51.84 Mbps. Ένα πλαίσιο STS-1 μπορεί να κομιστεί μέσω ενός σήματος OC-1 (Cisco, 2005). Ο τύπος πλαισίου που χρησιμοποιεί το SDH είναι το Synchronous Transport Module (STM), με το βασικό επίπεδο σήματος στα 155.52 Mbps. Ένα πλαίσιο STM-1 μπορεί να κομιστεί σε ένα σήμα OC-3 (Cisco, 2005).

Και το SONET και το SDH ιεραρχούν τις ταχύτητες σηματοδότησης. Πολλαπλά χαμηλού επιπέδου σήματα μπορούν να πολυπλεχτούν και να σχηματίσουν υψηλότερου επιπέδου σήματα.

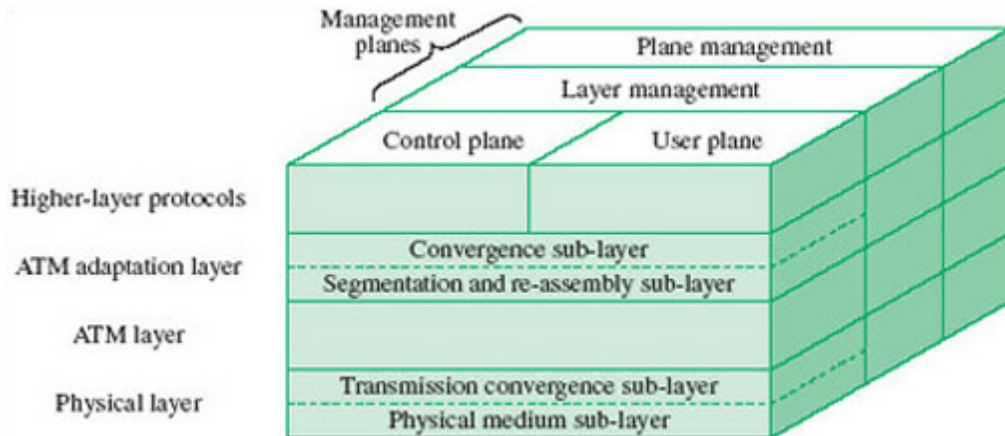
Το πλαίσιο STS-1 αποτελείται από οκτάδες εννέα σειρών και ενενήντα στηλών (protocols.com, α.η.). Οι πρώτες τρεις στήλες χρησιμοποιούνται από το Transport Overhead (TOH) και περιέχουν πληροφορίες πλαισίωσης, ελέγχου λάθους, διαχείρισης και ωφέλιμου φορτίου. Τα δεδομένα χρησιμοποιούν τις υπόλοιπες 87 στήλες από τις οποίες η πρώτη χρησιμοποιείται από το Path Overhead (POH).

5.3 ATM

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου ασύγχρονης μεταφοράς έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει δεδομένα με μια σειρά εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (The Open University, α.η.). Τα δεδομένα του χρήστη χωρίζονται σε μικρά, καθορισμένου μήκους κελιά και μεταφέρονται μέσω εικονικών συνδέσεων. Το ATM βασίζεται σε υψηλού ρυθμού δεδομένων φυσικά κυκλώματα και η απλή δομή των κελιών ATM επιτρέπει να γίνεται η εναλλαγή στο hardware,

κάτι που βελτιώνει την ταχύτητα και απόδοση των μεταγωγών.

Η **εικόνα 13** παρουσιάζει το μοντέλο αναφοράς για το ATM.



Εικόνα 13 Τα επίπεδα του σήματος στο ATM

5.4 Ethernet

Τα δεδομένα που κινούνται μέσα σε ένα οπτικό παθητικό EPON μεταφέρονται μέσα σε πλαίσια Ethernet. Το πλαίσιο Ethernet MAC μπορεί να ποικίλλει σε μήκος από 72 μέχρι 1526 bytes και περιλαμβάνει οκτώ πεδία.

1. Προοίμιο (Preamble). Με αυτό ξεκινά το πλαίσιο και έχει μήκος 7 bytes και ενεργοποιεί τον δέκτη για να συγχρονιστεί με την αρχή του πλαισίου αυτού. Μπορεί να παραληφθεί.
2. Πεδίο οριοθέτησης έναρξης πλαισίου (Start Frame Delimiter, SFD). Αυτό το πεδίο ενός byte σηματοδοτεί την έναρξη του πλαισίου. Έτσι οδηγείται ο δέκτης ώστε να εντοπίσει το πρώτο bit του πλαισίου.
3. Διεύθυνση προορισμού (Destination Address, DA). Αυτό το πεδίο μήκους 6-byte περιέχει την φυσική διεύθυνση του επόμενου προορισμού του πακέτου. Το πρώτο bit διακρίνει

- αν το πλαίσιο απευθύνεται σε έναν χρήστη ή είναι εκπομπή προς πολλαπλούς χρήστες την ίδια στιγμή. Το δεύτερο bitδιευκρινίζει αν η διεύθυνση προορισμού είναι διεύθυνση του τοπικού δικτύου ή μια παγκόσμια διεύθυνση.
4. Διεύθυνσηπηγής (Source Address, SA). Αυτό πεδίο έχει ίδιο μήκος με την DA και περιέχει τη φυσική διεύθυνση της τελευταίας συσκευής του δικτύου που προώθησε το πακέτο. Αυτή η συσκευή μπορεί να είναι αυτή από την οποία ξεκίνησε την διαδρομή του το πακέτο, ή κάποιος ενδιάμεσος διακομιστής που το παρέλαβε και το προώθησε.
 5. ΜήκοςπεδίουProtocol Data Unit. Αυτό το πεδίο έχει μήκος 2 bytes και προσδιορίζει τον αριθμό των bytes του πεδίου ProtocolDataUnit(PDU), το οποίο μεταφέρει όλα την πληροφορία στους χρήστες.
 6. ProtocolDataUnit (PDU). Περιέχει όλη την πληροφορία από δεδομένα του LogicalLinkControl (LLC) υποστρώματος και το μέγιστο μέγεθός του είναι 1520 bytes.Το LLC παρέχει διευθύνσεις και μηχανισμούς ελέγχου για την ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα στους χρήστες.
 7. Γέμισμα (Pad). Το πεδίο αυτό περιέχει bytesπου προστίθενται στο τέλος του πλαισίου προκειμένου να διασφαλιστεί το τυπικό μήκος των 64 bytes για να λειτουργεί ο μηχανισμός εντοπισμού συγκρούσεων πλαισίων.
 8. Frame CheckSequence (FCS). Παρέχει πληροφορίες για την ύπαρξη λαθών μέσα στο πλαίσιο. Βασίζεται σε ένανμηχανισμό CRC 32-bit. Αυτός χρησιμοποιεί τα bits των πεδίων DA, SA, μήκος PDU και PDU για να υλοποιήσει μια δυαδική διαίρεση στο σταθμό εκκίνησης του πλαισίου. Το αποτέλεσμα αυτής της διαίρεσης προστίθεται στο πλαίσιο και επανελέγχεται μόλις αυτό φτάσει στον προορισμό του. Αν υπάρχει διαφορά

στο αποτέλεσμα, τότε υπάρχει λάθος στη μετάδοση του πλαισίου και αυτό απορρίπτεται.

5.5 MultiPoint Control Protocol (MPCP)

Το πρωτόκολλο MPCP βασίζεται στα Ethernet μηνύματα «GATE» και «REPORT». Πρώτα το μήνυμα GATE διαβιβάζεται από τον OLT σε μια ONU για να ορίσει μία χρονοθυρίδα μετάδοσης (transmission timeslot). Έπειτα η ONU χρησιμοποιεί το μήνυμα REPORT για να περιγράψει τις τοπικές της συνθήκες (πχ. κατάληψη ουράς αναμονής κτλ) στον OLT, για να διαθέσει κατάλληλα το εύρος ζώνης. Τα δύο αυτά μηνύματα αποτελούν πλαίσια του υποεπιπέδου MAC control (Kramer, 2001; Gaglianella, α.η).

Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας του MPCP: η ανάθεση εύρους ζώνης και ο αυτόματος εντοπισμός. Η ανάθεση εύρους ζώνης έχει σα σκοπό τη διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ του OLT και των ONUs, ενώ η λειτουργία του αυτόματου εντοπισμού αφορά τον εντοπισμό των ONUs που έχουν ενεργοποιηθεί πρόσφατα (το MPCP πρέπει να ξεκινά κατά περιόδους τη διαδικασία εντοπισμού).

Πρωτόκολλα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
SONET	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοχή στα λάθη • Διαχείριση λαθών • Χρησιμοποιείται σε πολλά δίκτυα 	<ul style="list-style-type: none"> • Ακριβό υλικό (hardware) • Μεγάλο κόστος για τοπικό βρόχο • Μη αποδοτικό για κίνηση δεδομένων
ATM	<ul style="list-style-type: none"> • Είναι δυνατή η παροχή διαφορετικών QoS (Quality of Service) και εγγυημένου εύρους ζώνης στα δεδομένα που υπάρχουν στο OLT και στις ONUs, ώστε να είναι εφικτή η μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου. 	<ul style="list-style-type: none"> • Επειδή τα δεδομένα τόσο στο OLT όσο και στις ONUs είναι σε πακέτα IP, για τη μεταφορά μέσω PON είναι απαραίτητος ο τεμαχισμός των πακέτων και η επανασυναρμολόγηση τους στο άλλο άκρο. Αυτό δημιουργεί επιπρόσθετο κόστος και πολυπλοκότητα στο δίκτυο. • Απαιτεί ανάπτυξη τεχνικών QoS για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου.
Ethernet	<ul style="list-style-type: none"> • Είναι αποδοτικό στη μεταφορά πακέτων IP • Διαδεδομένο και φθηνό υλικό. • Υποστηρίζει διάφορους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων (100 Mbit/s, 1 Gbit/s, 10 Gbit/s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτεί την ανάπτυξη τεχνικών QoS για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου.

Πίνακας 5 Συγκριτικός πίνακας πρωτοκόλλων

6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6. Αρχιτεκτονική Δικτύου

6.1 Πολυστρωματικές ανθεκτικές στρατηγικές για αυτόματα Switched οπτικά δίκτυα

Σήμερα, διάφοροι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων και πάροχοι υπηρεσιών προσπαθούν να επωφεληθούν από τα οπτικά δίκτυα που μπορούν να χειριστούν τα σταδιακά αυξανόμενα φορτία κυκλοφορίας δεδομένων, ενώ διαθέτουν ελάχιστο κεφάλαιο (CAPEX) και λειτουργικές δαπάνες (OPEX). Η πρόκληση αυτή οδηγεί στην πρόοδο μίας από τις κύριες τάσεις στην οπτική δικτύωση, η οποία είναι η εισαγωγή ενός επιπέδου ελέγχου που επιτρέπει οπτική νοημοσύνη του δικτύου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών των ευφυών οπτικών δικτύων είναι τα Αυτόματα Switched οπτικά δίκτυα(ASON) που καθορίζονται στο πεδίο εφαρμογής ITU-T G.8080. Μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών, τα ASONs επιτρέπουν αυξημένη αξιοπιστία του δικτύου μέσω της υποστήριξης μιας σειράς από ανθεκτικά χαρακτηριστικά.

Τα ASONs προορίζονται να τα δίκτυα κορμού που ενεργούν ως εξυπηρετητές για μια σειρά από δίκτυα πελάτη(client) (π.χ., IP, ATM, SDH). Έτσι, αυτά συνδέονται άμεσα με διαφορετικά υποδίκτυα, είτε με ένα peer-to-peer, επικάλυψης δίκτυο ή επαυξημένο μοντέλο δικτύου. Στα πλαίσια αυτά των ετερογενών δικτύων, με στρατηγικές ανθεκτικότητας πολλαπλών στρώσεων, έρχονται σε πρώτο πλάνο. Τα Multi-layer ανθεκτικά συστήματα προσπαθούν να ανακτηθούν από μια αποτυχία, με την πρώτη προσπάθεια, ώστε να βρούμε μια εναλλακτική διαδρομή σε ένα από τα στρώματα (π.χ., το οπτικό στρώμα). Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, οι πολυστρωματικές στρατηγικές απόδοσης ελέγχου προς τα άλλα

στρώματα (π.χ. στρώμα IP / ATM), προσπαθούν να ανακτήσουν την αποτυχία. Η ενασχόληση με τις αποτυχίες σε πολλαπλά στρώματα οδηγεί σε αυξημένη ανθεκτικότητα, αλλά θέτει επίσης πρόσθετες προκλήσεις που αφορούν τη διασύνδεση των στρωμάτων, τη στρατηγική συντονισμού τους και τον αντίκτυπό τους στην αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Ανάλογα με το είδος της βλάβης, είναι επιθυμητή η ανάκτηση στο υψηλότερο ή χαμηλότερο στρώμα. Επίσης, είναι πιθανό ότι, περισσότερα από ένα στρώματα ανιχνεύουν την αποτυχία, είτε άμεσα (δηλαδή, ένας κόμβος παρατηρεί μία απώλεια σήματος σε μία από τις θύρες του) ή έμμεσα (για παράδειγμα, όταν ένας κόμβος παρατηρεί έλλειψη απαντήσεων από ένα γειτονικό κόμβο). Το να επιτρέπεται σε όλα τα στρώματα να επιχειρήσουν την αποκατάσταση αποτυχίας ταυτόχρονα, θα οδηγήσει πιθανότατα σε αρνητικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, απαιτείται κάποια μορφή συντονισμού μεταξύ των στρωμάτων.

Στην εργασία αυτή, εξετάζουμε τους βασικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή πολλαπλών στρωμάτων ανθεκτικότητας και μελετάμε ορισμένα από αυτά μέσω της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, εξετάζουμε προσεγγίσεις, δηλαδή την top-down προσέγγιση και την bottom-up προσέγγιση. Η έμφαση δίνεται σε δύο προσεγγίσεις από κάτω προς τα πάνω και συγκεκριμένα το χρονόμετρο αναμονή-off (HOT) και την προσέγγιση για το διακριτικό σήμα ανάκτησης (RTS). Προς το παρόν, προκύπτουν αυτά τα αποτελέσματα από μια συμβατή μηχανή προσομοιωτή G.8080, που εφαρμόστηκε στην κορυφή του NS2 προσομοιωτή. Αυτή η νέα μηχανή προσομοιωτής που παρουσιάζεται μπορεί επίσης να επιτρέψει μια καλύτερη κατανόηση των ρυθμίσεων προσομοίωσης.

6.2 ASON Multilayer Resilience (Πολυεπίπεδη ελαστικότητα του ASON)

Όπως ήδη αναφέραμε, οι multi-layer στρατηγικές ανθεκτικότητας στο πεδίο του ASONs συνεπάγονται τόσο στο οπτικό όσο και το στρώμα πελάτη, (π.χ., IP / MPLS στρώμα) προς ανάκτηση από τις αποτυχίες. Οι στρατηγικές αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: από πάνω προς τα κάτω και από κάτω προς τα πάνω. Σύμφωνα με την από πάνω προς τα κάτω στρατηγική, το ανώτερο στρώμα επιχειρεί να επισκευάσει τη βλάβη πρώτα, και αν αυτό δεν είναι εφικτό, ο έλεγχος μεταφέρεται στο αμέσως κατώτερο στρώμα. Από την άλλη πλευρά, σε μια από κάτω προς τα πάνω προσέγγιση, το χαμηλότερο επίπεδο είναι το πρώτο για να προσπαθήσει και να εφαρμόσει την αποκατάσταση σε αποτυχία. Υποθέτοντας, ότι το κατώτερο στρώμα αποτύχει, ειδοποιεί το ανώτερο στρώμα, έτσι ώστε να προσπαθήσει.

Κάθε μία από αυτές τις οικογένειες των συστημάτων μπορεί να υλοποιηθεί μέσω διαφόρων μηχανισμών. Στο πεδίο εφαρμογής του παρόντος εγγράφου, θα επικεντρωθούμε σε δύο διακριτούς μηχανισμούς που σχετίζονται με τις στρατηγικές κάτω προς τα πάνω, δηλαδή τις Hold Off Timer and Recovery Token Signal προσεγγίσεις. Ειδικότερα:

- Στο πλαίσιο της στρατηγικής hold-off timer based bottom-up, το ανώτερο στρώμα δεν μπορεί να προβεί σε οποιαδήποτε ενέργεια αποκατάστασης - ακόμη και αν αυτό έχει ανιχνεύσει την ίδια την αποτυχία - έως ότου λήξει το λεγόμενο χρονόμετρο hold-off και η αποτυχία δεν έχει ακόμη αποκατασταθεί. Έτσι, ο HOT

μηχανισμός διευκρινίζει ότι το κατώτερο στρώμα (δηλαδή οπτικό στρώμα) προσπαθεί να ανακτήσει την αποτυχία μέσα σε ένα χρονικό διάστημα που υποδεικνύεται από ένα χρονόμετρο. Η δράση της ανάκαμψης κλιμακώνεται στο ανώτερο στρώμα, όταν το χρονόμετρο λήξει και η ανάκαμψη εξακολουθεί να εκκρεμεί.

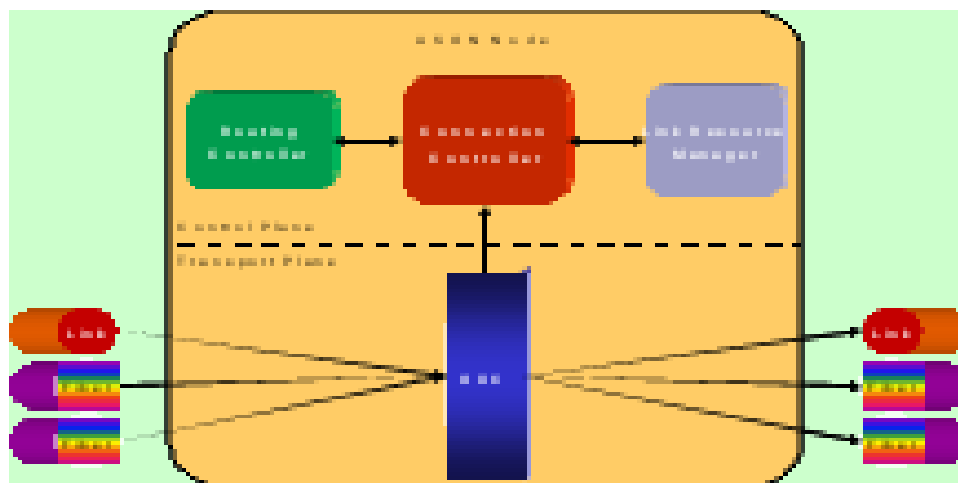
- Το διακριτικό σήμα ανάκαμψης αποτελεί έναν άλλο μηχανισμό κάτω προς τα πάνω, χρησιμοποιώντας ένα ειδικό σήμα (δηλαδή τη «συμβολική ανάκαμψη») για να συντονιστούν οι δράσεις αποκατάστασης των δύο στρωμάτων. Ειδικότερα, το κατώτερο στρώμα επιχειρεί να ανακτήσει την αποτυχία χωρίς κανένα περιορισμό στο χρονοδιάγραμμα, όπως στην περίπτωση που πρέπει να κρατήσει μακριά το χρονόμετρο. Όταν το κάτω στρώμα συνειδητοποιεί ότι δεν είναι δυνατόν να αποκατασταθεί η βλάβη, η αποκατάσταση μεταδίδεται στο άνω στρώμα μέσω ενός διακριτικού σήματος αποκατάστασης που στέλνεται στο ανώτερο στρώμα. Ειδικότερα, το κατώτερο στρώμα αποστέλλει το «recovery token signal» στο άνω στρώμα, τη στιγμή που συνάγει ότι δεν μπορεί να διορθώσει την αποτυχία.

Ενώ η HOT μέθοδος υλοποιείται στο επίπεδο του ελέγχου της εξέλιξη της τεχνολογίας οπτικών στοιχείων, ο μηχανισμός RTS είναι ακόμα υπό εξέταση / ανάπτυξη και δεν υπάρχουν άμεσα διαθέσιμες εφαρμογές και υλοποιήσεις.

6.3G.8080 SIMULATOR

Προς τη μελέτη των στρατηγικών ανθεκτικότητας πολλαπλών στρώσεων θα μελετήσουμε έναν κινητήρα προσομοιωτή δικτύου ASON πάνω στο γνωστό εργαλείο προσομοίωσης ns-2 (Network Simulator v.2). Αυτή η μηχανή προσομοίωσης υποστηρίζει multi-layer στρατηγικές ανθεκτικότητας από κάτω προς τα πάνω, με βάση τα ASON (δηλαδή GMPLS) μηνύματα σηματοδότησης και τις αποκλειστικές εφαρμογές των δύο σημάτων, για συμβολική ανάκαμψη και τους μηχανισμούς hold-off χρονομέτρων.

Το NS2 χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση του στρώματος πρωτοκόλλου δικτύου, καθώς και των στρωμάτων πρωτοκόλλου πάνω από αυτό. Η εφαρμογή μιας συμβατής μηχανής G.8080 ήταν, επομένως, ένα θέμα της ενίσχυσης του NS2 με την ικανότητα χειρισμού του οπτικού στρώματος, μαζί με τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την επεξεργασία των μηνυμάτων σηματοδότησης ASON. Η βασική συνιστώσα του κινητήρα προσομοίωσης είναι ο κόμβος ASON που αποτελείται από ένα οπτικό συστατικό Switching και διαθέτει ένα διακόπτη και ένα επίπεδο ελέγχου. Η **εικόνα 14** απεικονίζει τα κύρια συστατικά του κόμβου ASON του προσομοιωτή, που είναι το Optical Cross Connect, η σύνδεση του ελεγκτή, ο ελεγκτής δρομολόγησης και ο Διαχειριστής Σύνδεσμος Πόρων.



Εικόνα 14 Δομή του κόμβου ASON

Το Optical Cross Connects (OXC) αποτελεί το επίπεδο μεταφοράς του οπτικού δικτύου. Είναι υπεύθυνο για την αλλαγή της κυκλοφορίας από ένα εισερχόμενο ζεύγος ινών/ μήκος κύματος σε ένα εξερχόμενο. Ο ελεγκτής σύνδεσης (CC) είναι το πιο σημαντικό συστατικό στο Control Plane. Χειρίζεται ένα GMPLS / RSVP-TE συμβατό υποσύνολο μηνυμάτων που επιτρέπει τη δημιουργία και τη διατήρηση των βάσεων δεδομένων τοπολογίας, τη δημιουργία και τη διαγραφή των lightpaths και τη δημιουργία εναλλακτικών lightpaths σε περίπτωση αστοχιών σηματοδότησης. Η δρομολόγηση ελεγκτής (RC), διατηρεί τη βάση δεδομένων τοπολογίας και τον πίνακα δρομολόγησης του κόμβου. Το τελευταίο υπολογίζεται με βάση έναν αλγόριθμο υπολογισμού διαδρομής δρομολόγησης (π.χ. Dijkstra) χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τη βάση δεδομένων της τοπολογίας. Τέλος, ο Link Resource Manager (LRM) παρακολουθεί την πορεία των συνδέσεων που είναι δίπλα στον κόμβο, καθώς και την κατάσταση (δωρεάν, παρεχόμενη κ.λπ.) των πόρων.

Η μηχανή προσομοίωσης λειτουργεί με βάση το μοντέλο επικάλυψης. Τα δίκτυα IP πελάτη και τα ASNs λειτουργούν αποτελεσματικά απομονωμένα μεταξύ τους. Κάθε φορά που ένα IP πακέτο -όχι αυτό που ανήκει σε ένα (πελάτη), της ροής της κυκλοφορίας που χρησιμοποιεί ένα υπάρχον lightpath- εισέρχεται στην προσομοίωση οπτικών δικτύων και η δημιουργία μιας κατεύθυνσης lightpaths ενεργοποιείται. Η σηματοδότηση που απαιτείται γι' αυτό το είδος των λειτουργιών γίνεται μέσω ενός ειδικού δικτύου Data Communications (DCN), η οποία, για τους

σκοπούς της προσομοίωσης είναι λογικά ασύνδετη, αλλά μοιράζεται την ίδια φυσική τοπολογία με το δίκτυο WDM μεταφορών.

Οι κόμβοι ASON ανιχνεύουν τις αποτυχίες ινών από την απώλεια του Φωτός, που υλοποιείται ως μια ειδική κατάσταση του προσομοιωμένου κόμβου. Μετά από αυτήν την ανίχνευση, στέλνουν κατάλληλα σήματα κατά μήκος των προσβεβλημένων lightpaths, να ενημερώσουν τους υπόλοιπους συμμετέχοντες κόμβους και να απενεργοποιήσουν τα lightpaths. Μετά την παραλαβή αυτών των σημάτων, η είσοδος των κόμβων οδηγεί τη διαδικασία για την εξεύρεση και τη θέσπιση εναλλακτικών end-to-end lightpaths για τις ροές της προσβεβλημένης κυκλοφορίας. Με αυτόν τον τρόπο, η ανθεκτικότητα στο οπτικό στρώμα υποστηρίζεται στον προσομοιωτή.

Εκτός από το παραπάνω ενιαίο στρώμα αποκατάστασης, ο κινητήρας προσομοίωσης υποστηρίζει επίσης, μια ανθεκτική πολυεπίπεδη λειτουργία προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τη στρατηγική κάτω προς τα πάνω. Σε αυτή τη λειτουργία, είτε σήματα token ανάκτησης ή hold-off χρονόμετρα ενεργοποιούνται, με βάση την αρχική διαμόρφωση του πειράματος προσομοίωσης. Στην περίπτωση του RTS, το σήμα αποστέλλεται σε ένα LSR από ένα κόμβο εισόδου ASON, αμέσως μετά ο τελευταίος αποτυγχάνει να βρει ένα εναλλακτικό lightpath για μια ροή πακέτων. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση του HOT μηχανισμού ένα χρονόμετρο ενεργοποιείται μετά την ανίχνευση της αποτυχίας και αν λήξει, χωρίς η αποτυχία αυτή να ανακτηθεί στο οπτικό στρώμα, το στρώμα IP / MPLS κινεί τους μηχανισμούς αποκατάστασης του.

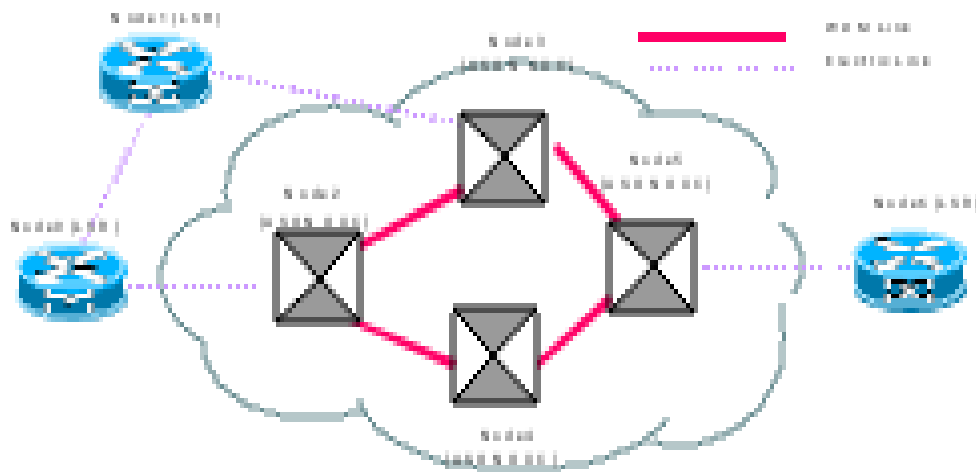
Στο πεδίο εφαρμογής των σεναρίων προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι κυκλοφορίας: ο Constant Bit Rate (CBR) και τα Exponential μοτίβα κίνησης, που παρέχονται από τον πυρήνα του κινητήρα NS2. Δύο κύριες παραμέτρους του δικτύου μετρήθηκαν: ο χρόνος αποκατάστασης και η Packet Loss Ratio (PLR). Σαν χρόνο αποκατάστασης, θεωρούμε, το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ της εμφάνισης της βλάβης και την ολοκλήρωση της αναδιάταξης του δικτύου. Ο Δείκτης Packet Loss, από την άλλη πλευρά, υπολογίζεται ως το ποσοστό των μεταδιδόμενων πακέτων που έπεσαν από βλάβες του δικτύου. Σε περίπτωση οπτικών δικτύων, δεν υπάρχουν πακέτα που μεταδίδονται με οπτικούς κόμβους. Ωστόσο, δεδομένου ότι το ASON είναι ένα δίκτυο server για πολλούς πελάτες (όπως IP ή ATM), το PLR θα μπορούσε να ορίζεται ως το ποσοστό των μειωμένων πακέτων που μεταδίδονται μέσω του οπτικού δικτύου, όπως φαίνεται από το δίκτυο του πελάτη.

6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Χρησιμοποιώντας τη μηχανή προσομοίωσης ASON, πραγματοποιήσαμε πειράματα με βάση την τοπολογία προσομοίωσης ενός IP / MPLS μέσω του δικτύου ASON.

Η **εικόνα 15**, απεικονίζει την φυσική διαμόρφωση των πειραμάτων προσομοίωσης. Αυτό περιλαμβάνει ένα οπτικό δίκτυο (τομέα) που αποτελείται από ASON οπτικές συνδέσεις (OXC κόμβους). Οι OXCs κόμβοι, συνδέονται με WDM ίνες (δίκτυο μεταφοράς) και ηλεκτρικές συνδέσεις (δίκτυο σηματοδότησης). Συνδεδεμένα με το οπτικό δίκτυο είναι επίσης, οι δρομολογητές

(συγκεκριμένα MPLS Label Switched δρομολογητές), οι οποίοι συνδέονται με τις ηλεκτρικές συνδέσεις. Τα δίκτυα πελάτη, φορτώνουν το οπτικό δίκτυο που βασίζεται σε ένα συνδυασμό των CBR, Exponential και Pareto κυκλοφορία διανεμόντων πακέτων, η οποία έχει διαμορφωθεί στο πεδίο του περιβάλλοντος προσομοίωσης, όπως απαιτείται από το συγκεκριμένο πείραμα.



Εικόνα 15 Φυσική διαμόρφωση Δικτύου σε πειράματα προσομοίωσης

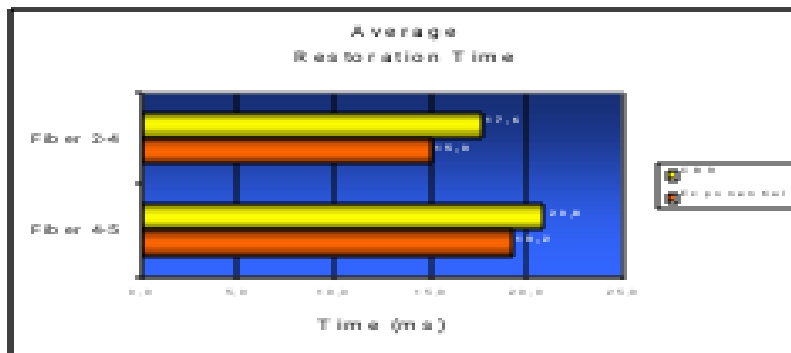
Στο πεδίο εφαρμογής της εν λόγω φυσικής διαμόρφωσης, μελετήσαμε κόμβους και συνδέσμους αποτυχίας που συμβαίνουν στο οπτικό δίκτυο. Ο κόμβος και ο σύνδεσμος αποτυχίας κινούν διαδικασίες αποκατάστασης, που αφορούν αποκλειστικά και μόνο το οπτικό στρώμα (δηλαδή μόνο αποκατάσταση στρώματος), ή και τα δύο στρώματα πελάτη IP/MPLS και το οπτικό στρώμα (δηλαδή την αποκατάσταση πολλών στρώσεων). Ενώ δόθηκε βάση στην αποκατάσταση πολλαπλών στρώσεων, πραγματοποιήθηκαν επίσης, ορισμένα μόνο πειράματα αποκατάστασης, κυρίως ως επικύρωση του κινητήρα προσομοίωσης.

Στο πεδίο εφαρμογής των σεναρίων αποκατάστασης, η ανάκτηση της αποτυχίας εκτελείται στο οπτικό στρώμα, με βάση τα ακόλουθα βήματα:

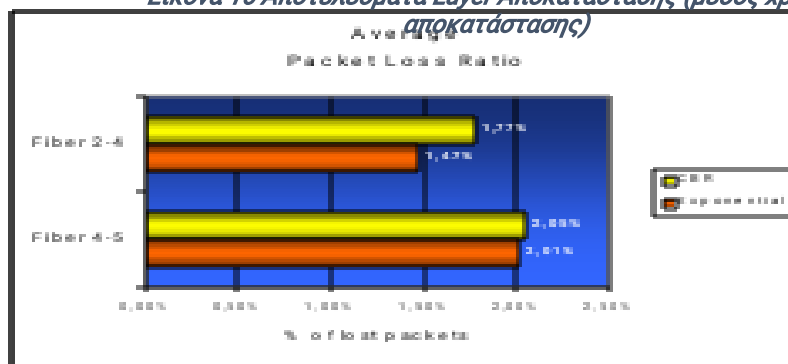
Εντοπισμός εναλλακτικού οπτικού μονοπατιού με τη χρήση των ελεγκτών σύνδεσης και δρομολόγησης, από τους κόμβους του οπτικού δικτύου.

Ρύθμιση του εναλλακτικού οπτικού μονοπατιού, μέσα από τη δημιουργία και την επεξεργασία των αντίστοιχων ASON μηνυμάτων, σε όλους τους κόμβους που διασχίζονται από το οπτικό μονοπάτι σηματοδότησης.

Οι **εικόνες 16 και 17** αντίστοιχα, παρουσιάζουν το μέσο χρόνο αποκατάστασης και την απώλεια πακέτων στο πεδίο εφαρμογής δύο διακριτών σεναρίων που συνεπάγονται σε αποτυχίες σύνδεσης μεταξύ OXCs 2 και 4 (δηλαδή αποτυχία Fiber2-4), καθώς και μεταξύ των κόμβων 4 OXCs και 5 (δηλαδή αποτυχία Fiber4-5). Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν μέσο όρο μετρήσεων κατά τη διάρκεια αρκετών διαδικασιών προσομοίωσης. Αυτά τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά και κοντά σε παρόμοια πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε μια πραγματική πλατφόρμα δοκιμών, η οποία είναι μια πρώτης τάξης απόδειξη της καλής λειτουργίας του προσομοιωτή. Επιπλέον, τα σενάρια αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ακριβής θέση της αποτυχίας σε συστήματα ανάκτησης end-to-end που απασχολούν τη δρομολόγηση προέλευσης είναι πολύ σημαντική. Αυτό οφείλεται, στον αποτυχημένο χρόνο που απαιτείται να φτάσει στον κόμβο πηγής (δηλαδή ο κόμβος εισόδου του οπτικού πεδίου). Συγκεκριμένα, οι αποτυχίες που αφορούν τις συνδέσεις που διαθέτουν υψηλότερα hop counts από τους κόμβους εισόδου, χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να ανακάμψουν, σε σύγκριση με τις περιπτώσεις με χαμηλότερο hop counts.



Εικόνα 16 Αποτελέσματα Layer Αποκατάστασης (μέσος χρόνος αποκατάστασης)

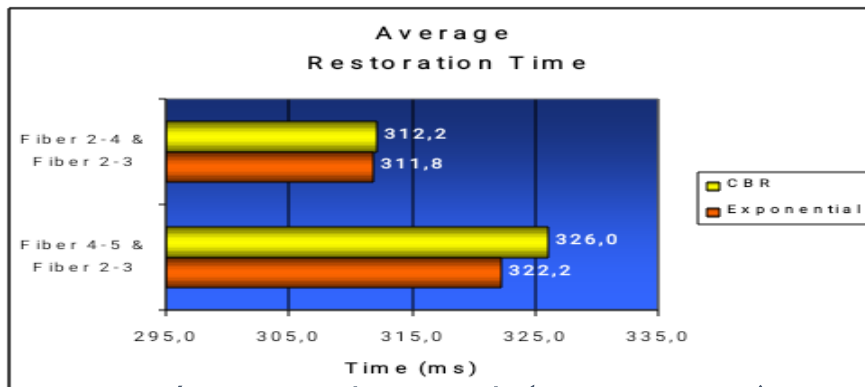


Εικόνα 17 Αποτελέσματα Layer Αποκατάστασης (PLR)

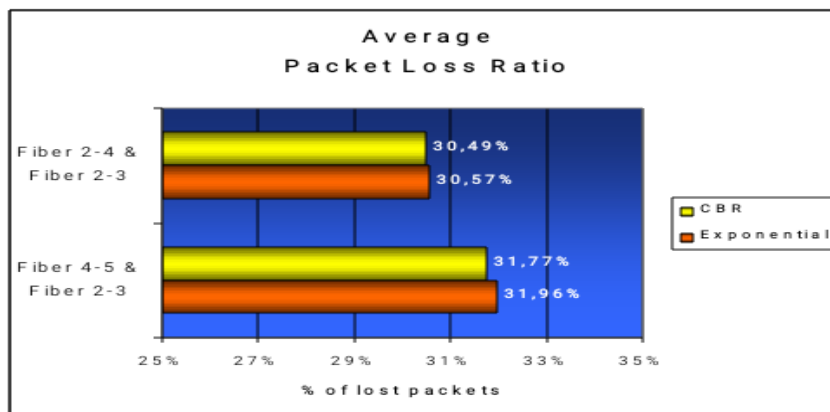
Τα Multi-Layer πειράματα αποκατάστασης βασίστηκαν σε δύο διαφορετικά σενάρια που στοχεύουν σε διαφορετικά ζεύγη συνδέσμων τοπολογίας που απεικονίζονται στην **εικόνα 15**: Αποτυχίες και στις δύο συνδέσεις nodes2-4 και nodes2-3 Αποτυχίες και στις δύο συνδέσεις nodes4-5 και nodes2-3

Η επιλογή των αποτυχημένων συνδέσεων διεξήχθη, με σκοπό να οδηγεί σε κάποια λύση μόνο στην περίπτωση που η αποκατάσταση στο οπτικό στρώμα δεν είναι εφικτή. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις το στρώμα IP / MPLS έπρεπε να αναλάβει την ανάκαμψη η οποία βασίζεται, είτε στην ανάκαμψη του Token Σήματος (RTS) ή του μηχανισμού Hold off timer (HOT).

Στην περίπτωση του RTS σήματος, εστάλη το σήμα στο στρώμα IP / MPLS, που δείχνει ότι δεν είναι δυνατή η δημιουργία οπτικού μονοπατιού. Ο Node0 είναι ο αποδέκτης του σήματος που χρησιμοποιεί δικούς του μηχανισμούς, για να βρεθεί μια εναλλακτική λύση LSP. Στην περίπτωση HOT, το Node0 περιμένει για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ώστε να ανακτηθεί η αποτυχία από το οπτικό στρώμα. Για τον σκοπό αυτό, το χρονόμετρο ορίστηκε στα 300ms. Μετά τη λήξη του χρονοδιακόπτη και αν υποτεθεί ότι δεν έχει ανακτηθεί η αποτυχία, ο node0 ξεκινά μια προσπάθεια αποκατάστασης (δηλαδή νέα εγκατάσταση LSP). Οι μετρήσεις που μελετήθηκαν στις δύο RTS και HOT είναι οι ίδιες όπως και στην περίπτωση του στρώματος αποκατάστασης. Οι **εικόνες 18 και 19** αντιστοιχούν στη HOT προσομοίωση, ενώ στις **εικόνες 20 και 21** αντιστοιχεί ο μηχανισμός RTS. Κάθε ένα από τα σχήματα αυτά δείχνει τα αποτελέσματα για δύο σενάρια αποτυχίας.



Εικόνα 18 HOT Mechanism Results (avg. restoration time)



Εικόνα 19 HOT Mechanism Results (PLR)

Σημαντικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από αυτά τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

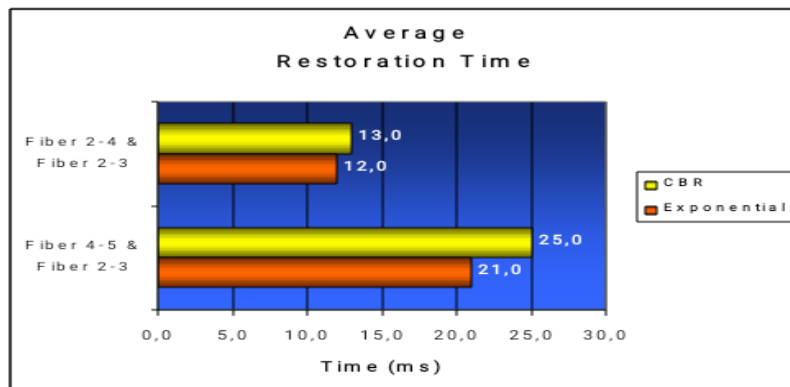
Στην περίπτωση όπου η ανάκαμψη επιχειρείται σε δύο στρώματα, ο μηχανισμός RTS αποδίδει καλύτερα από τον HOT, δεδομένου ότι δεν εξαρτάται από το χρονοδιακόπτη (δηλαδή 300ms). Έτσι, ο RTS είναι πιο δυναμικός και μπορεί να ανταποκρίνεται περισσότερο στις βλάβες του δικτύου.

Η φτωχή απόδοση του HOT μηχανισμού, θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας top-down στρατηγικής αποκατάστασης που θα μπορούσε να παράγει πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

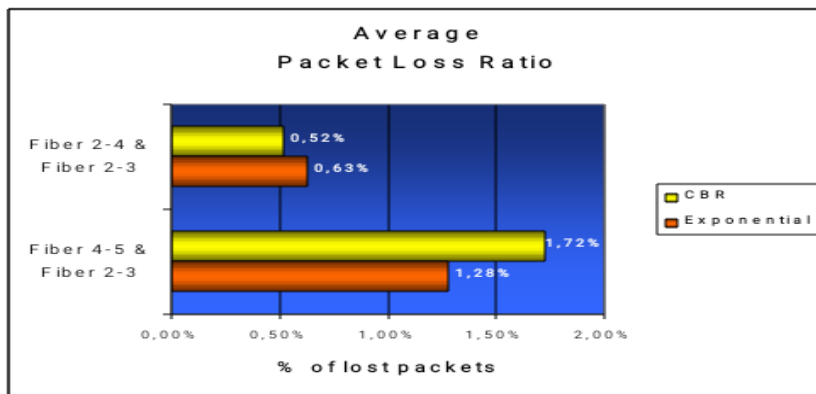
Το Exponential traffic πάσχει από αποτυχίες σε σχέση με τις CBR ροές. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο "on" και "off" χαρακτήρα της Exponential traffic. Τη στιγμή που οι ίνες και οι κόμβοι τυχαίνει να είναι προς τα κάτω, η κίνηση κυριαρχείται από το " on " χρονικό διάστημα, και στη συνέχεια ένα μεγαλύτερο από το αναμενόμενο τμήμα των μεταδιδόμενων πακέτων, έχουν πέσει. Έτσι, ο ακριβής χρόνος που θα παρουσιαστεί μια βλάβη σε ένα δεδομένο δίκτυο είναι σημαντικός.

Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ HOT και RTS, η μέθοδος RTS διαθέτει ένα πιο σύνθετο σχέδιο και συνεπάγεται σε έναν ορισμένο τρόπο ερμηνείας από τα χαμηλότερα στα υψηλότερα σήματα και το αντίστροφο. Δεδομένου του αριθμού των διαφορετικών συνδυασμών επιπέδων δικτύου που πραγματοποιούνται, αυτό δεν είναι ένα απλό έργο. Από την άλλη

πλευρά, η hold-off τεχνική χρονοδιακόπτη είναι πολύ πιο απλή και εύκολη να αναπτυχθεί σε σύγχρονα δίκτυα. Αυτό γίνεται, με την κατάλληλη τελειοποίηση του χρονοδιακόπτη, που μπορεί να φθάσει σε αποδεκτά επίπεδα απόδοσης.



Εικόνα 20 RTS Mechanism Results (avg. restoration time)



Εικόνα 21 RTS Mechanism Results (PLR)

Το διακριτικό σήμα αποκατάστασης φάνηκε να είναι πολύ ελπιδοφόρο και προτιμότερο, ώστε να δοθεί καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, ο RTS μηχανισμός έχει μειονεκτήματα στο ότι το πιο σημαντικό γι' αυτόν είναι η πολυπλοκότητα και η έλλειψη της πραγματικής ανάπτυξης. Στην περίπτωση των δικτύων πολλαπλών

στρωμάτων-επιπέδων, η λύση ενός συμβολικού σήματος είναι σίγουρα προτιμότερη από το hold-off χρονόμετρο. Το γεγονός ότι η διαχείριση ενός τέτοιου δικτύου γίνεται με την ίδια αρχή για ευκολότερη ανάπτυξη μηχανισμών σήματος ανάκαμψης, καθιστά τα πλεονεκτήματά του απτά στον χειριστή. Παρ' όλα αυτά, στην κοινή υπόθεση των πολλών multi-client δικτύων, η χρήση των χρονομέτρων hold-off φαίνεται να είναι πιο κατάλληλη.

Έχοντας τον κινητήρα προσομοίωσης G.8080, βασική προϋπόθεση για την εκτέλεση συμπληρωματικών πειραμάτων είναι να αποκτήσει ο προσομοιωτής δυνατότητες για το χειρισμό πρόσθετων αστοχιών (π.χ., που αφορούν όχι μόνο στα οπτικά δίκτυα, αλλά και στον κόμβο του λογισμικού και τον έλεγχο του δικτύου DCN), όπως περιγράφεται στο. Επιπλέον, τα ζητήματα που σχετίζονται με την διασυνεργασία μεταξύ στρώσεων με σκοπό την υποστήριξη των δραστηριοτήτων της ανθεκτικότητας, όπως αυτές παρουσιάζονται στο, θα πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν.

6.5 Το παθητικό δίκτυο επόμενης γενιάς

Αφού αναφέρθηκαν τα επί μέρους στοιχεία των δικτύων στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί καλύτερα το παθητικό οπτικό δίκτυο επόμενης γενιάς. Εξαιτίας της εξέλιξης στα φωτονικά δίκτυα ήδη από το 2007 είναι δυνατή η μετάδοση 10 Tb/s ανά οπτική ίνα (Kazonkyetal 2007). Πλέον ο τελικός χρήστης απολαμβάνει πολυμεσικές υπηρεσίες όπως videondemand, υψηλής ευκρίνειας τηλεόραση, e-learning, διαδραστικά παιχνίδια, υπηρεσίες φωνής μέσω IP. Ταυτόχρονα υπάρχουν τεχνολογίες που συναγωνίζονται μεταξύ τους για το ποια θα επικρατήσει: οι ασύρματες επικοινωνίες, οι διάφορες διατάξεις οπτικών δικτύων και τα

μικτά δίκτυα μεταξύ άλλων.

Ακόμα και αυτά που λέμε «δίκτυα επόμενης γενιάς» όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχουν και αυτά τις δικές τους «γενιές». Για παράδειγμα ο Kozavscy και οι συνεργάτες του χρησιμοποιούν την κατηγοριοποίηση C+1 και C+2.

Η «μάχη» που δίνεται ανάμεσα στις τεχνολογίες που προτείνονται έχει τρία χαρακτηριστικά: ποια θα προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, σε μεγαλύτερη απόσταση και όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες (Trojer, Dahlfors, Hood & Mickelsson, 2008) με το μικρότερο δυνατό κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και τη μικρότερη κατανάλωση ρεύματος (Kylafas&Soldatos, 2005). Η μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: με τον μεγαλύτερο ανταγωνισμό ανάμεσα στους προμηθευτές και την αύξηση του όγκου παραγωγής (Uedaetal, 2001).

6.5.1 C+1 Generation PONs

Τα παθητικά δίκτυα που επιχειρούν μια ήπια αναβάθμιση με τον υπάρχοντα εξοπλισμό κατηγοριοποιούνται ως C+1 (Kozavscy, 2007). Σε αυτή την περίπτωση αντί να αντικατασταθεί η προϋπάρχουσα υπηρεσία γίνεται ουσιαστικά μια καλύτερη εκμετάλλευση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου. Έτσι τα λαμβάνοντα σήματα πρέπει να διαχωρίζονται κατά τη λήψη. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις τεχνικές:

1. Χρήση νέου μήκους κύματος για την αποστολή του αναβαθμισμένου σήματος με τον υπάρχοντα εξοπλισμό (WDM).
2. Χρήση τεχνικών SCM για τη μετακίνηση του σήματος έξω από το βασικό εύρος του υπάρχοντος σήματος.

3. Διαμόρφωση του φάσματος του νέου σήματος με την τεχνική κωδικοποίησης για να μειωθεί η παρέμβαση από το υπάρχον σήμα.

Στην πρώτη περίπτωση (WDM) όσο αυξάνονται τα κανάλια που χρησιμοποιούνται αυξάνεται και ο θόρυβος. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να μειωθεί με την εναλλαγή του μήκους κύματος στην άνοδο και την κάθοδο στο εύρος βελτίωσης (Kozavscy, 2007). Απαιτεί αναδιάρθρωση στην ONU και να εξοπλιστεί με CWDM MUX/DMUX.

Ο ρόλος της διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) μπορεί να είναι πολλαπλός (Prat (ed), 2008, σ.8):

- Να διαχωρίζει υπηρεσίες
- Να διαχωρίζει παρόχους
- Να επιτρέπει την αναδρομολόγηση της υπηρεσίας και
- Να επιτρέπει τη μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Ταυτόχρονα εμφανίζονται τρεις υποπεριπτώσεις σε ό,τι αφορά την εκχώρηση του μήκους κύματος των καναλιών: στατική κατανομή, ημι-στατική κατανομή και δυναμική κατανομή.

Με την κατανομή ενός ή περισσότερων μηκών κύματος για ένα συνεκτικό-ομοειδές σύνολο υπηρεσιών, οι υπηρεσίες μπορούν να διαχωριστούν με βάση το μήκος κύματος. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τους παρόχους, αφού έτσι μπορούν να έχουν συγκεκριμένες συχνότητες για συγκεκριμένους πελάτες κι έτσι να καθορίζεται και η τιμολογιακή τους πολιτική (Prat (ed), 2008, σ.8).

Στη δεύτερη περίπτωση (SCM) τα βελτιωμένα και τα υπάρχοντα σήματα διαχωρίζονται στο ηλεκτρικό πεδίο. Οι δύο μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν.

Στην τρίτη περίπτωση το σήμα προσαρμόζεται στη λήψη (Kazonky, 2007) δεν απαιτείται άλλος εξοπλισμός.

COMPARISON OF THE ENABLING TECHNOLOGIES IN C + I GENERATION PON

	Hardware Pre-arrangement or Retrofit	Transmission Efficiency	Flexibility	Estimated Cost
WDM	Required	100%	Low	High (Downstream) Low (Upstream)
SCM	Optional	100%	Low	Medium
SSLC ¹	Not required	<100%	High	Low

¹SSLC: Spectral-Shaping Line Coding

Πίνακας 5 Σύγκριση τεχνολογιών της γενιάς πιπρηικών οικών στι πιπρη. κάζονκγεία. ζου/

Σχετικά με την αύξηση της απόστασης, υπάρχουν δύο τρόποι να επιτευχθεί (Trojeretal, 2008). Είτε με τη χρήση επεκτατών μιας πλευράς (singlesidedextenders) είτε με τη χρήση επεκτατών που τοποθετούνται στο μέσο της διάταξης (mid-spanextenders). Το σύστημα αυτό απαιτεί διαφάνεια, καλή απόδοση της απαιτώμενης δαπάνης και καλή εφαρμογή πάνω στα υπάρχοντα συστήματα (Trojeretal, 2008). Ωστόσο αυτές οι εφαρμογές δεν βασίζονται τόσο στην μέγιστη χρησιμοποίηση της υπάρχουσας ίνας αλλά στην τοποθέτηση ενδιάμεσων στοιχείων στα δίκτυα και προσφέρουν επέκταση της τάσης των πέντε μόλις χιλιομέτρων ενώ οι τεχνολογίες που περιγράφονται παρακάτω προσφέρουν επέκταση της τάξης των 60 χιλιομέτρων, όπως τα GPON με τη χρήση οπτικών ενισχυτών

(optical amplifiers). Η μέθοδος αυτή όμως είναι και ακριβή και παρουσιάζει υψηλά επίπεδα θορύβου, τα οποία για να εξαλειφθούν απαιτείται επιπλέον ακριβός εξοπλισμός.

6.5.2 C+2 Generation PONs

Τα παθητικά δίκτυα που προσπαθούν να ανταπεξέλθουν στις ολοένα και αυξανόμενες μελλοντικές ανάγκες με ακόμα πιο δυναμικό και ρηξικέλευθο τρόπο αναφέρονται ως C+2 και η χωρητικότητά τους ανέρχεται σε αρκετά gigabit ανά δευτερόλεπτο ανά χρήστη (Kozanecy et al, 2007). Ο Kozanecy και οι συνεργάτες του έχουν εντοπίσει σχετικά κάποιες τεχνικές.

1 WDM-PONS με συντονίσιμα στοιχεία

Τα συντονίσιμα λέιζερ προσφέρουν ευελιξία και μειώνουν το κόστος παραγωγής ωστόσο είναι ακριβά ως επένδυση. Οι συντονίσιμοι δέκτες μπορούν να εφαρμοστούν με τη χρήση συντονιζόμενου οπτικού φίλτρου και ευρυζωνικής φωτοδιόδου. Είναι μια επίσης ακριβή μέθοδος. Εναλλακτικά έχει προταθεί η χρήση συντονισιμων φωτοανιχνευτών με ενσωματωμένο μηχανισμό φιλτραρίσματος στο φωτόνιο ανίχνευσης.

2 WDM-PONS βασισμένα σε καταμερισμό του φάσματος

Δημιουργείται μια «χτένα» οπτικών σημάτων όπου το καθένα έχει μοναδικό μήκος κύματος που επιλέγεται για συγκεκριμένη μονάδα οπτικού δικτύου ONU. Με τη χρήση φίλτρων τα μήκη κύματος συντονίζονται. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για τη μείωση του θορύβου. Η μέθοδος θεωρείται εύκολη από άποψη εκτέλεσης και χαμηλού κόστους.

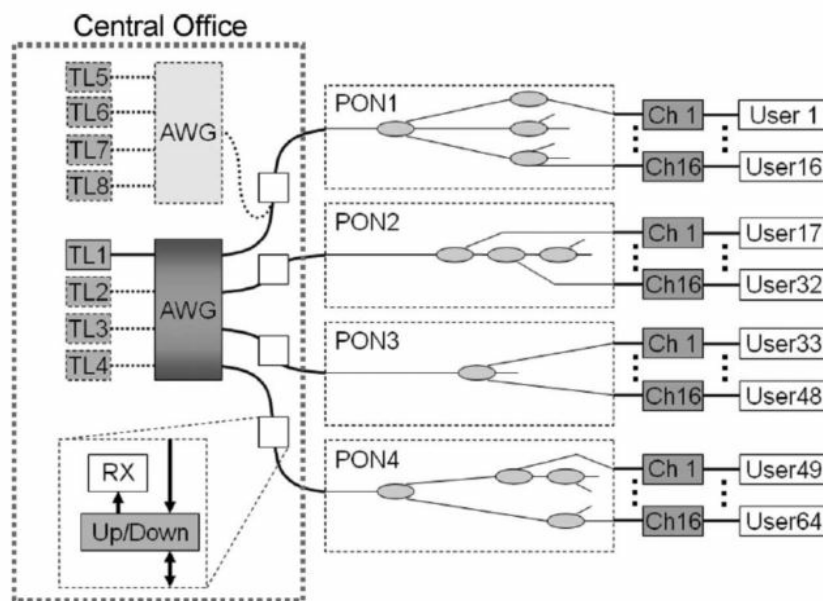
3 Με την απομόνωση ροής λέιζερ (Injection Locking). Όταν ένα

εξωτερικό οπτικό σήμα μικρού εύρους εγχέεται σε ένα πολλαπλών μηκών λέιζερ, αυτό κλειδώνει σε μία συχνότητα. Είναι μια απλή και οικονομική μέθοδος.

- 4 Με τη χρήση συγκεντρωτικών πηγών φωτός (CentralizedLightSources ή CLSs): Ο τερματιστής οπτικής γραμμής (OLT) παρέχει οπτικά σήματα στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), όπου τα οπτικά σήματα διαμορφώνονται με την άνοδο των δεδομένων και στέλνονται πίσω στο OLT. Αφού όλες οι πηγές φωτός βρίσκονται στον OLT, οι απαιτήσεις σε μήκος κύματος είναι περιορισμένες εξαιτίας του ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Εξωτερικοί διαμορφωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ροή ανόδου. Ωστόσο υπάρχουν πολλά εμπόδια στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου.
- 5 Εξελικτικές αρχιτεκτονικές από τα παθητικά δίκτυα TDM στα WDM:

Η μετάβαση πρέπει να γίνει χωρίς τη διακοπή των υπάρχοντων δικτύων και υπηρεσιών. Έτσι έχουν προταθεί αρχιτεκτονικές που επιτρέπουν την ομαλή εξέλιξη και βασίζονται στην υπόθεση πως η τρέχουσα γενιά δικτύων TDM θα είναι μακρά κι οι πάροχοι δεν θα είναι πρόθυμοι να καταβάλουν το κόστος ενός εξολοκλήρου νέου WDM-PON. Το StanfordUniversityaccess (SUCCESS) dynamicwavelengthallocation (DWA) γνωστό και ως SUCCESS-DWAPON είναι ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης που επιτρέπει την ευέλικτη μετά από το TDM-PON στο υβριδικό TDM/WDM-PON και στο WDM-PON ανάλογα με τις απαιτήσεις για εύρος ζώνης. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος είναι τα γρήγορα συντονίσιμα λέιζερ TL, οι κυκλικοί AWG (ArrayedWaveguideGrating) και τα λεπτά φίλτρα WDM. Η δομή είναι συμβατή με τα TDM-PON που δεν επηρεάζεται από την

εφαρμογή του SUCCESS-DWAPON. Στη βασική δομή ένας κυκλικός κυματοδηγός AWG πολυπλέκει τα συντονισιμα λείζερ και κατευθύνει τις εξόδους του λείζερ σε φυσικά παθητικά δίκτυα, ανάλογα με το μήκος κύματος. Κάθε παθητική μονάδα σε κάθε παθητικό δίκτυο περιέχει ένα καθορισμένου μήκους κύματος φίλτρο και έναν δέκτη burst-mode. Το κλειδί είναι ότι η ζώνη διέλευσης του φίλτρου ONU προσανατολίζει την ελεύθερη φασματική περιοχή του AWG. Το μοντέλο αυτό όμως περιορίζει τον συνολικό αριθμό χρηστών. Στα πλεονεκτήματά του περιλαμβάνονται η ήπια μετάβαση, το λογικό κόστος και η ικανότητα κλιμάκωσης με τη χρήση περισσότερων συντονισιμων στοιχείων στον τερματιστή.



SUCCESS-DWA architecture.

Εικόνα 22 Αρχιτεκτονική SUCCESS-DWA

Στο βιβλίο που έχει επιμεληθεί ο Prat «Next-Generation FTTH Passive Optical Networks» παρουσιάζεται μια μέθοδος δυναμικής αναδιάρθρωσης δικτύου με τη χρήση ευέλικτης πολυπλεξίας

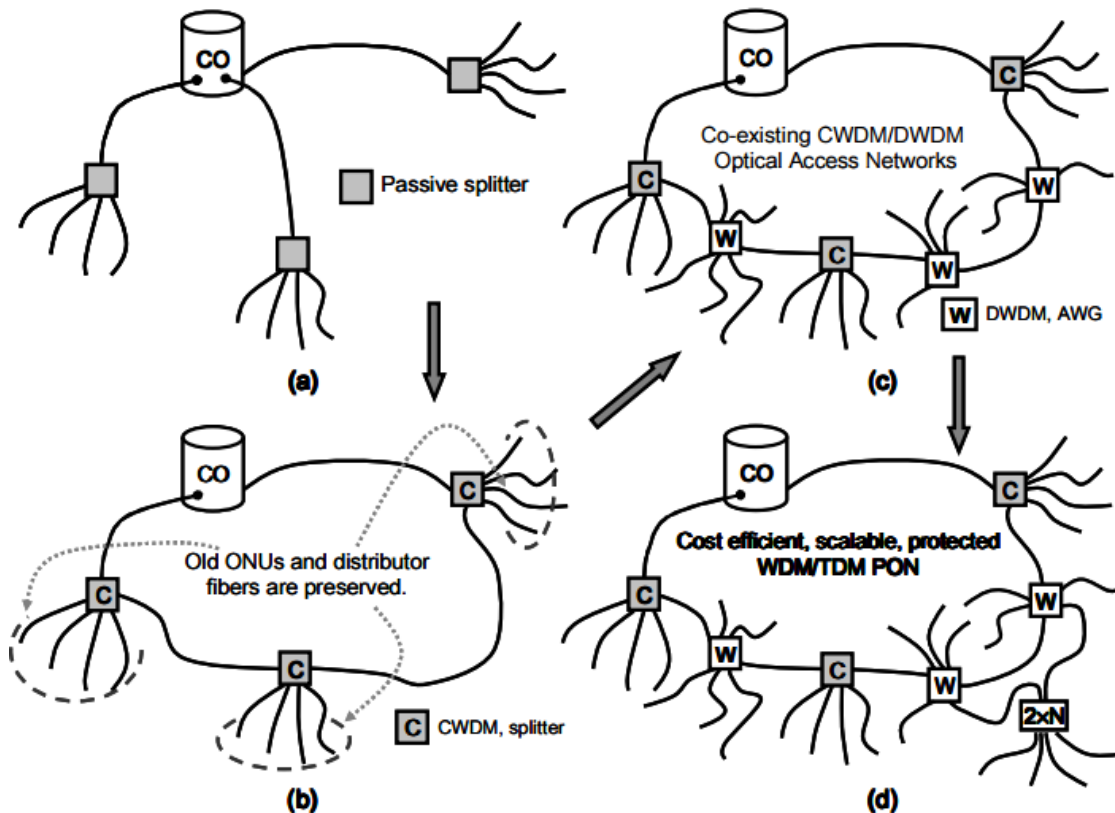
διαίρεσης μήκους κύματος.



Εικόνα 23 Δυναμική Αναδιάρθρωση με ευέλικτη πολυπλεξία WDM

Ο ίδιος προτείνει ως επικρατέστερη τεχνολογία την ημιστατική απόδοση μήκους κύματος.

Προτεινόμενη Δομή



Εικόνα 24 Μετάβαση από TDM σε WDM PON Πηγή: Gutierrez et al.

Το σχέδιο του Strantford, το SUCCESS φαίνεται η πιο οικονομική και λειτουργική μορφή εξέλιξης αφού προσφέρει ήπια, σταδιακή μετάβαση από την πολυπλεξία χρόνου στην πολυπλεξία μήκους κύματος με λογικό κόστος, χρησιμοποιώντας ρυθμιζόμενο λέιζερ στον OLT. Ένας αλγόριθμος δυναμικής ανάθεσης του bandwidth έχει προταθεί για την αποδοτικότερη απόδοση του δικτύου (Μανώλης, 2015).

Ένα κεντρικό γραφείο (CO) παρέχει υπηρεσία σε τρία υπάρχοντα TDM-PON σε τοπολογία δέντρου. Κάθε ένα από αυτά απαιτεί αποκλειστική καλωδίωση και τερματιστή οπτικής γραμμής μέσα στο κεντρικό γραφείο.

Σε πρώτη φάση τούς παθητικούς διαχωριστές (splitters) του TDM δικτύου αντικαθίστανται από απομακρυσμένους κόμβους (RNs) που αποτελούνται από παθητικούς ζεύκτες και λεπτά φίλτρα που εισάγουν χονδροειδή πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος. Η τροφοροτική ίνα κάθε TDM-PON αντικαθίσταται από μία ίνα σε τοπολογία δακτυλίου που ενώνει όλα τα τοπικά δίκτυα που εξυπηρετεί το κεντρικό γραφείο. Από πλευράς μονάδας οπτικού δικτύου η λειτουργία του οπτικού δικτύου παραμένει ακριβώς η ίδια κι έτσι το δίκτυο συνεχίζει κανονικά τη λειτουργία του. Καθώς οι χρήστες απαιτούν υψηλότερο εύρος ζώνης, στο τοπικό δίκτυο εγκαθίσταται ένας δακτύλιος. Οι WDM ONU που συνδέονται με αυτά τα τοπικά δίκτυα έχουν ένα κανάλι πυκνής πολυπλεξίας μήκους κύματος ανάμεσα σε αυτές και τον OLT στο CO. Για περαιτέρω αναβάθμιση της χωρητικότητας μπορεί RSOA modulator να αντικατασταθεί από ένα σταθεροποιημένο λέιζερ.

6.6 Σύγκριση προδιαγραφών και απαιτήσεων PONs

6.6.1 Παθητικά οπτικά δίκτυα

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (GPON) και τα Ethernet παθητικά οπτικά δίκτυα (EPON), όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι δύο πρότυπα που ανοίγουν τη πόρτα για νέες ευκαιρίες τόσο για τους πωλητές όσο και για και τους διάφορους φορείς εκμετάλλευσης.

Μεγάλοι προμηθευτές, συμπεριλαμβανομένης της Ericsson, έχουν προσθέσει τη τεχνολογία PON στα ευρυζωνικά τους χαρτοφυλάκια πρόσβασης και οι φορείς σε όλο τον κόσμο έχουν δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας σε συνδυασμό με VDSL2 (οπτικές ίνες) ή σε κατοικήσιμες περιοχές(οπτικές ίνες έως το σπίτι, FTTH).

Τα τρία βασικά πρότυπα PON είναι το BPON (Ευρυζωνική PON), GPON και EPON. Το BPON και ο διάδοχός του, GPON προέρχονται από την ITU-T που χρηματοδοτείται από το FSAN. Το EPON είναι μια IEEE επιλογή που αναπτύχθηκε από το IEEE Ethernet σε μια πρωτοβουλία του First Mile (EFM). Δεδομένου ότι οι φορείς εκμετάλλευσης οδηγούν το GPON μέσω FSAN, το πρότυπο GPON χρειάζεται περισσότερη καθοδήγηση από ό, τι το EPON.

Παρά το γεγονός ότι και τα τρία συστήματα δουλεύουν για την ίδια αρχή, υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους (**βλ. Πίνακα 7**).

Characteristics	EPON	BPON	GPON
Standard	IEEE 802.3ah	ITU-T G.983	ITU-T G.984
Protocol	Ethernet	ATM	Ethernet, TDM
Rates (Mbps)	1250 down / 1250 up, 8b10b-encoded	622 down, 155 up	2488 down, 1244 up
Span (km)	10	20	20
Split-ratio	16	32	64

Πίνακας 7 Κύριες PON Τεχνολογίες και Ιδιότητες

6.6.2 Η εξέλιξη του GPON

Μετά από κάποιες μικρές αναπτύξεις του BPON, η βιομηχανία συνειδητοποίησε ότι ένα οπτικό δίκτυο διανομής BPON-based (ODN) δεν μπορούσε να αναβαθμιστεί σταδιακά σε οποιεσδήποτε τεχνολογίες επόμενης γενιάς. Εν συντομία, τα logistics της αναβάθμισης ενός ολόκληρου PON ταυτόχρονα ήταν τρομακτικό, καθώς και το κόστος της εγκατάστασης ενός παράλληλου αναβάθμιση PON ήταν απαγορευτικός. Έτσι, αυξήθηκε η ανάγκη στο ότι πρέπει να γίνουν αναβαθμίσεις επόμενης γενιάς για το ODN.

Υπήρχαν και εξακολουθούν να είναι, πολλοί οι υποψήφιοι για τα συστήματα PON επόμενης γενιάς. Η κοινότητα ITU έτσι συνταχθεί σε G.984.5, διατηρώντας μήκη κύματος για χρήση από τις εφαρμογές της επόμενης γενιάς χωρίς να περιορίζονται οι δυνατότητές τους. Αντίθετα, η κοινότητα EPON είδε τους περιορισμούς στο εύρος ζώνης ως το πιο σοβαρό πρόβλημα και αμέσως άρχισε την εργασία στα 10Gbps EPON (802.3av) ως διάδοχος των 1Gbps EPON.

Τα οικονομικά της πραγματικής ανάπτυξης, οδήγησαν την ITU-T, που υποστηρίζεται από την FSAN, για να ξεκινήσει να εργάζεται πάνω σε ένα πρότυπο που μπορεί να επεκταθεί για GPON και έχει οριστεί προσωρινά ως G.984.re.8

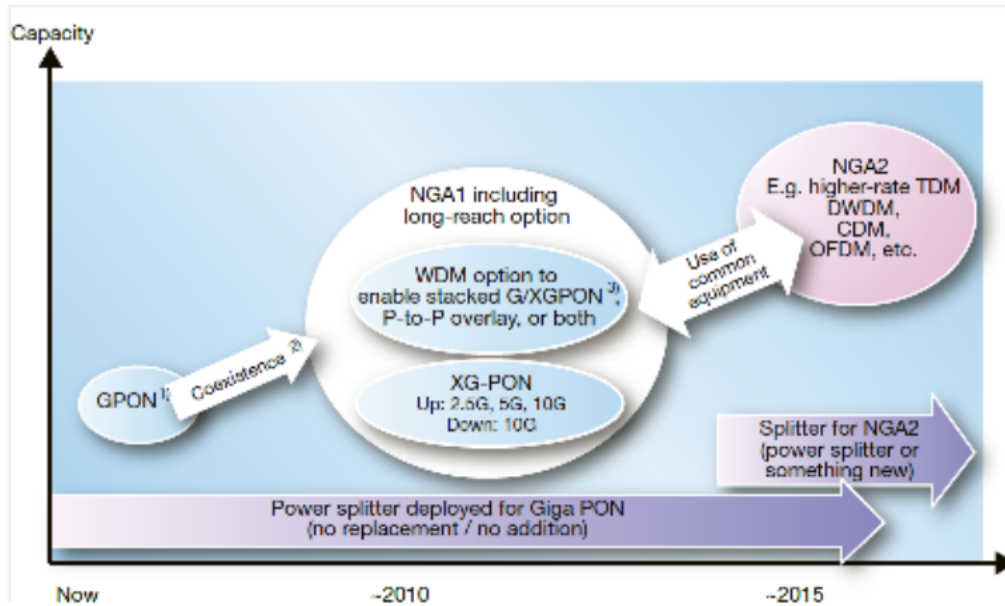
Αυτή η προδιαγραφή επιτρέπει οι οπτικοί ενισχυτές ή αναγεννητές σήματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν:

- να επεκτείνουν την πρόσβασή για 60 χιλιόμετρα
- να αυξηθεί η αναλογία διαχωρισμού ή
- να επιτευχθεί ένας συνδυασμός και των δύο.

Η αρχιτεκτονική επόμενης γενιάς (NGA) ορίζει δύο στάδια της εξέλιξης (**εικόνα 25**): τα NGA1 και NGA2. Αρχικά, το NGA1 είναι συμβατό με αναπτύξεις GPON, σύμφωνα με το G.984.5. Στην συνέχεια, αναμένεται ότι τα NGA1 συστήματα θα είναι εμπορικά. Ορισμένοι NGA1 υποψήφιοι είναι:

- το XGPON1, το οποίο υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 10Gbps προς τα κάτω και 2.5Gbps προς τα πάνω
- το συμμετρικό XGPON2, που υποστηρίζει 10Gbps προς τα κάτω και προς τα πάνω και
- επιλογή WDM να επικαλύψει PONs και σημείο-σημείο συνδέσεις στην ίδια ίνα υποδομής με ενίσχυση G.984.5 μπάντες.

Το NGA2 μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα νέο δίκτυο οπτικών ινών, θεσπίζοντας ειδικότερα την ικανότητα να χρησιμοποιείται πυκνή πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) διαχωριστών, αντί διαιρετών ισχύος, που μοιράζονται στους χρήστες με διαφορετικά μήκη κύματος στο ίδιο ODN.



Εικόνα 25 Αρχιτεκτονική επόμενης γενιάς (NGA)

6.6.3 Long-reach PON

Τα βασικά συστήματα GPON υποστηρίζουν μια μέγιστη φυσική απόσταση από 20 χιλιόμετρα σε 32-way split ή 10 χιλιόμετρα σε 64-way split. Αν και όλο αυτό κρίνεται επαρκή για τις περισσότερες περιπτώσεις εγκατάστασης, η βιομηχανία αναζητά ένα Link προϋπολογισμού για δύο λόγους:

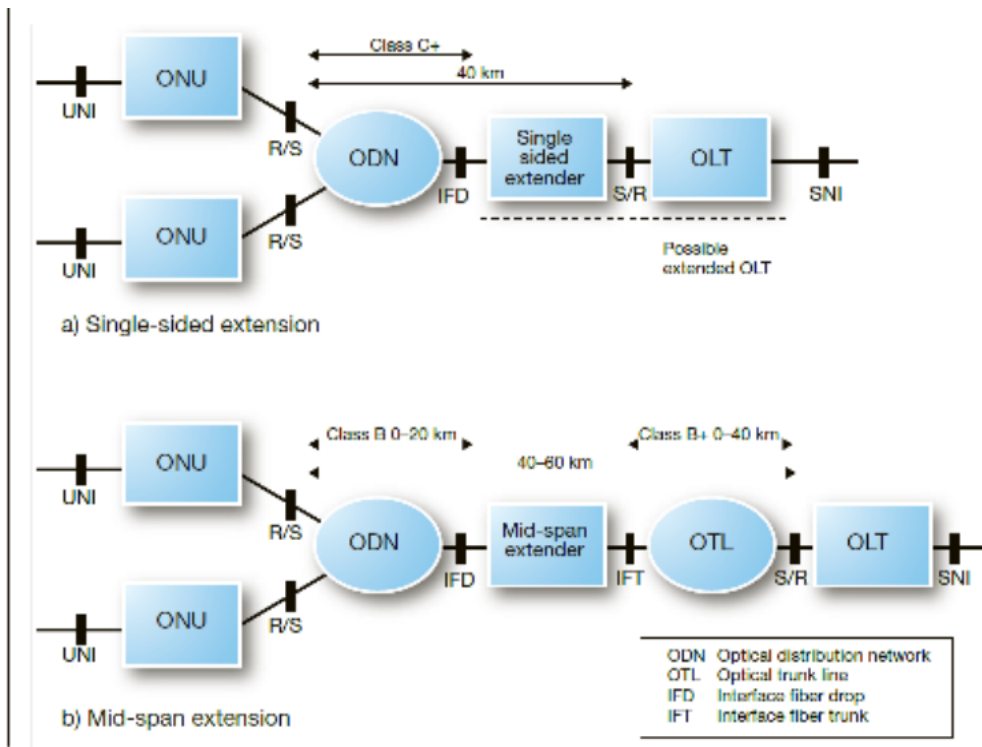
- Μεγαλύτερη εμβέλεια: Η PONs επέκταση που υποστηρίζει 100 χιλιόμετρα με απλούστευση της αρχιτεκτονικής του δικτύου και μείωση των λειτουργικών εξόδων.
- Αυξημένη αναλογία split: Η διαίρεση του 64 split ή ακόμη και 128 split θα μείωνε το κόστος ανά συνδρομητή μιας τεχνολογίας PON. Μια μελλοντική υπόσχεση είναι η παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού για τις επιχειρήσεις. Κατά συνέπεια, οι φορείς εκμετάλλευσης επιθυμούν να εξυπηρετούν ένα μεγάλο αριθμό χρηστών για κάθε PON με

κοινό εξοπλισμό. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για επέκταση της εμβέλειας (**εικόνα 25**).

Για να επιτύχει, μια προέκταση του REACH πρέπει να συμμορφώνονται με τις ακόλουθες βασικές απαιτήσεις:

1. Πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικές - δηλαδή, πρέπει οι επιχειρήσεις να υποστηρίζουν την ανάπτυξη της επέκτασης του REACH.
2. Πρέπει να είναι διαφανής στο GPON OLTs που βρίσκεται στην πλευρά του δικτύου και των οπτικών δικτύων (ONT) σχετικά με τους χρήστες.
3. Θα πρέπει να είναι διαθέσιμο για την έγκαιρη ανάπτυξη GPON.

Η **εικόνα 26** συγκρίνει διαφορετικές προσεγγίσεις για την ενίσχυση της απόδοσης της επέκτασης του REACH. Τεχνικές μπορούν να επεκτείνουν την πρόσβασή του σε 5 χιλιόμετρα. Επίσης, οπτικοί ενισχυτές (ίνα, ημιαγωγοί ή διανεμητές) μπορεί να αυξήσουν τον προϋπολογισμό σύνδεσης σε 60 χιλιόμετρα ή περισσότερο.



Εικόνα 26 Τρόποι για επέκταση της εμβέλειας

6.6.4 Οπτικά ενισχυμένα PONs

Οπτικοί ενισχυτές (ΟΑ) μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε GPON είτε για να ενισχυθεί η ισχύς μετάδοσης στην πλευρά OLT ή για να λειτουργήσει ο ενισχυτής in-line.

Ένα τυπικό GPON RE περιλαμβάνει:

- τα φίλτρα μήκους κύματος για το διαχωρισμό upstream and downstream σημάτων
- ενισχυτή για κάθε κατεύθυνση και
- οπτικά φίλτρα διέλευσης ζώνης upstream and downstream οδηγίων για περιορισμό του θορύβου.

Επίσης, ίνες και οπτικοί ενισχυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν να επεκταθεί η εμβέλεια ενός συστήματος GPON με ένα 64 pilit σε 60 χιλιόμετρα. Ο Πίνακας 8 μας δείχνει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνολογιών ενισχυτή σε ένα ODN. Σημείωση: οι αριθμοί στις παρενθέσεις δείχνουν την σχετική απόδοση των διαφορετικών χαρακτηριστικών του ενισχυτή. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, οι ενισχυτές οπτικών σημάτων (SOA) είναι η πιο ελπιδοφόρα μορφή ενισχυτών. Παρ'όλα αυτά, οι SOA-based REACH εμφανίζουν υψηλά ποσοστά θορύβου (ιδιαίτερα στο O-band) και είναι συγκριτικά ακριβοί. Από την άλλη πλευρά, οι REs βασίζονται σε οπτική ενίσχυση με κόστος.

(😞 NOT SUITED, 😐 SUITED, 😊 VERY WELL SUITED)

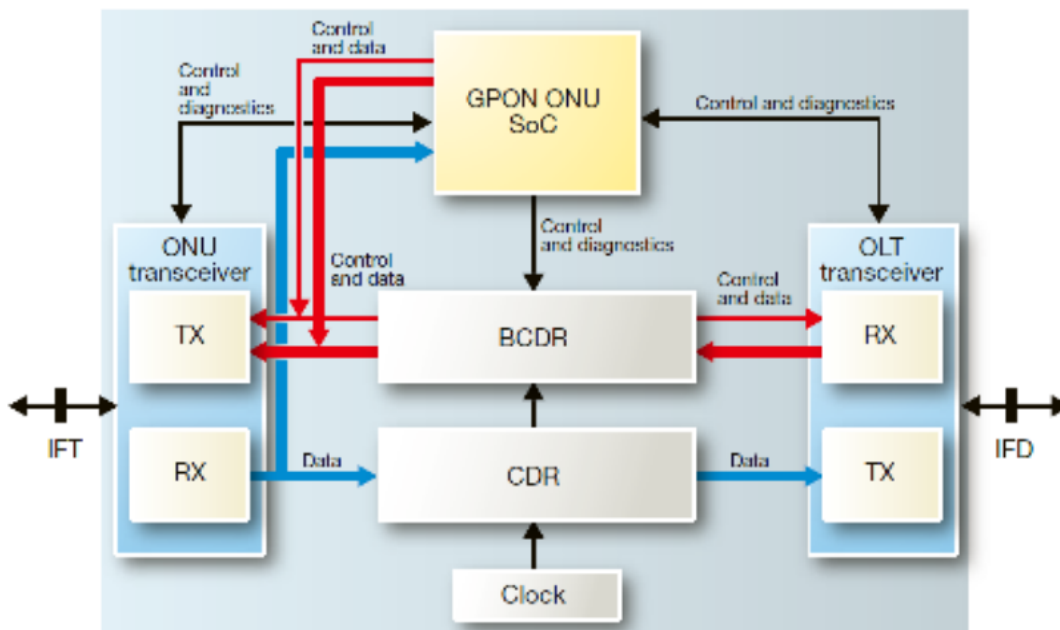
Characteristic	xDFA (fiber amplifiers)		QD-SOA (optical amplifiers)		Raman (non-linear amplifier)
	Upstream (O-band)	Downstream (S-band)	Upstream (O-band)	Downstream (S-band)	
Maturity	😞	😞	😞	😞	😞
Size	😐 (2-3)	😐 (2-3)	😐 (0.5-1)	😐 (0.5-1)	😐 (1)
Cost	😞 (4-10)	😐 (3-8)	😐 (3)	😐 (2.5)	😐 (0.5-1)
Power consumption	😐 (2-4)	😐 (2-4)	😐 (0.5-1)	😐 (0.5-1)	😐 (0.5)
Gain	😞	😞	😊	😞	😞
Optical bandwidth	😞	😞	😞	😞	😞
Noise	😞	😞	😞	😞	😞
Overall	😞	😐	😊	😞	😞

Πίνακας 8 Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τεχνολογιών ενισχυτή σε ένα ODN

6.7 Regenerated PONs

Σε ένα βελτιωμένο PON, το σήμα ανανεώνεται με τη βοήθεια της οπτικής-ηλεκτρικής-οπτικής μετατροπής. Η **εικόνα 27** απεικονίζει ένα τυπικό 3R RE. Η 3R RE περιέχει OLT και ONT πομποδέκτες, καθώς και την ανίχνευση και την ανάκτηση ρολογιού (CDR), μονάδες upstream and downstream κατευθύνσεων. Για τη διαχείριση, η RE περιέχει μια οπτική μονάδα δικτύου (ONU) που τερματίζει το φυσικό OAM στρώμα και το OMCI (ONT διαχείριση ελέγχου) κανάλι διαχείρισης. Το ενσωματωμένο ONU είναι μέρος του μοντέλου διαχείρισης. Το REs βασίζεται στην αναγέννηση του σήματος και παρουσιάζει επίσης κάποια προβλήματα:

- Burst αναγνώριση από ONT
- Ασυμβατότητες λογισμικού
- Προβλήματα με το πρότυπο OLT



Εικόνα 27 3R RE

6.8 Απομακρυσμένο πρωτόκολλο τερματισμού (Remote protocol termination)

Για την κατασκευή του TDM οπτικού δέντρου, το πρωτόκολλο G.984 ποτέ δεν είχε την πρόθεση να ανταγωνίζονται με αξιόπιστα πρωτόκολλα, όπως τα πρωτόκολλα σύγχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (SDH) ή 802.3 Ethernet για point-to-point συνδέσεις.

Η Reach επέκταση δεν είναι τίποτα περισσότερο από την προσθήκη μιας μακράς point-to-point γραμμής κορμού στο GPON ODN point-to-multipoint.

Στη γραμμή κορμού, ωστόσο, η εξειδίκευση του point-to-multipoint GPON πρωτόκολλου είναι ένα μειονέκτημα από την άποψη του συγχρονισμού του δέκτη, της δυναμική περιοχή, της λειτουργία διαχείρισης ενέργειας, τα περιθώρια θορύβου και το jitter προϋπολογισμό. Επιπλέον, τα πλεονεκτήματα των πρωτοκόλλων για συνδέσεις με μετάδοση από σημείο σε σημείο δεν είναι διαθέσιμα. Ως εκ τούτου, το πρωτόκολλο απομακρυσμένου τερματικού(RPT), παρακάμπτει τα προβλήματα αυτά.

Από την άποψη της καθυστέρησης, του προϋπολογισμού, της αναλογίας split, της συντήρησης, των υπάρχοντων οπτικών εξαρτημάτων και του λογισμικού, ένα RPT φαίνεται να είναι ακριβώς σαν ένα GPON OLT στο κοινόχρηστο τμήμα του ODN (το δέντρο TDM). Αλλά αντί του πρωτόκολλου PON, η RPT χρησιμοποιεί το σωστό εργαλείο για κάθε ανταλλαγή. Για καλύτερα αποτελέσματα, συνίσταται τα 10Gbps Ethernet uplinks. Το πρότυπο προστασίας Ethernet, όπως η ομάδα συνάθροισης συνδέσεων (802.3ad) και το πρωτόκολλο δένδρων (802.1w), υπάρχουν για ένα εφεδρικό σύστημα.

Η RTP έχει σχεδιαστεί για να φιλοξενήσει επόμενη γενιάς

τεχνολογικές επιλογές πρόσβασης, όπως υψηλότερη ταχύτητα TDM-based PONs, WDMbased PONs, ή και τα δύο.

Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι το κόστος, το μέγεθος και η κατανάλωση ενέργειας ενός προστατευόμενου απομακρυσμένου RPT είναι τα ίδια όπως και για μια αναγεννητή (regenerator) αλλά λιγότερα απ' ότι για ένα οπτικό ενισχυτή (Κανόνας 1). Σε αντίθεση με άλλες RE προσεγγίσεις, μια RPT προσέγγιση βασίζεται στην υπάρχουσα τεχνολογία, τα πρότυπα, και τα συστατικά (κανόνας 2) και μπορεί να παραδοθεί εντός του κανονικού χρονικό πλαίσιο ανάπτυξης του προϊόντος (κανόνας 3). Ο **πίνακας 9** παρουσιάζει τη σύγκριση των G.984.re REs και RPT.

	G984.re	RPT
Ready for early GPON deployment	No	Can be developed expeditiously – no unknowns
Interoperability with existing OLT/ONTs	No	ONT – OK. OLT – OK with some modification
Can be used for 20/40/60km extension and 64- or 128-way split	In theory. Any number of issues must be resolved	OK
40 km trunk	OK	OK
100 km trunk	Not without change to delay time definitions	OK
Compatible with existing G984 series	No	OK
Hardened for outside plant deployment	TBD	TBD
Eye-safe	Depends on choice of technology	OK

Πίνακας 9 Σύγκριση G.984.re REs και RPT.

6.9 Πρόσβαση επόμενης γενιάς(Next-generation access)

Τώρα που το GPON έχει τυποποιηθεί και είναι στην παραγωγή, η οπτική κοινότητα πρόσβασης έχει αρχίσει τη συζήτηση με υποψήφιες τεχνολογίες για πρόσβαση επόμενης γενιάς. Οι highlevel απαιτήσεις για ένα σύστημα NGA1 είναι ήδη σαφές, ως εξής:

1. Fiber-lean σενάριο - που είναι, η συνεργασία με GPON στην ίδια ODN. Το NGA1 πρέπει να υποστηρίζει τη δυνατότητα αναβάθμισης, ένας συνδρομητής σε μια στιγμή.
2. Σημαντική βελτίωση στην απόδοση σε σχέση με GPON από την άποψη του ρυθμού. Κοινόχρηστο χωρητικότητας τουλάχιστον 10Gbps στο downstream και 2.5 ή 5Gbps στο upstream κατεύθυνση.
3. Το NGA1 πρέπει να έχει ιδιαίτερη ευελιξία όσον αφορά της συνύπαρξης(GPON και G.984.re), δυνατότητα αναβάθμισης σε υψηλότερες αναλογίες split, και την υποστήριξη του ειδικού σκοπού επικαλύψεων (για παράδειγμα, επιχειρηματικές υπηρεσίες).
4. Κόστος συγκρίσιμο με GPON.

6.10 Service overlay a la G.984.5

Το G.984.5 ορίζει ένα εύρος μήκους κύματος για επιπλέον σήματα υπηρεσιών που επικαλύπτονται μέσω WDM. Ειδικότερα, περιλαμβάνει:

- μήκος κύματος που θα διατεθεί για μελλοντική χρήση (Σχήμα 5). Επίσης, το G.984.5 προσδιορίζει τρεις προαιρετικές ζώνες ενίσχυσης με την επιλογή 1 στη ζώνη

E (water-peak band), η επιλογή 2 στο C- και L-ζώνες, και το συγκρότημα RF, ως επιλογή 3, για τις μελλοντικές υπηρεσίες που παρέχονται με επικάλυψη βίντεο.

- τα χαρακτηριστικά του μήκους κύματος για φίλτρα που προστατεύουν το GPON downstream σήμα στην ONT / ONU από παρεμβολές
- GPON upstream μήκος κύματος για τη μείωση επιλογών, με δωρεάν φάσμα στο O-band για μελλοντικές υπηρεσίες.

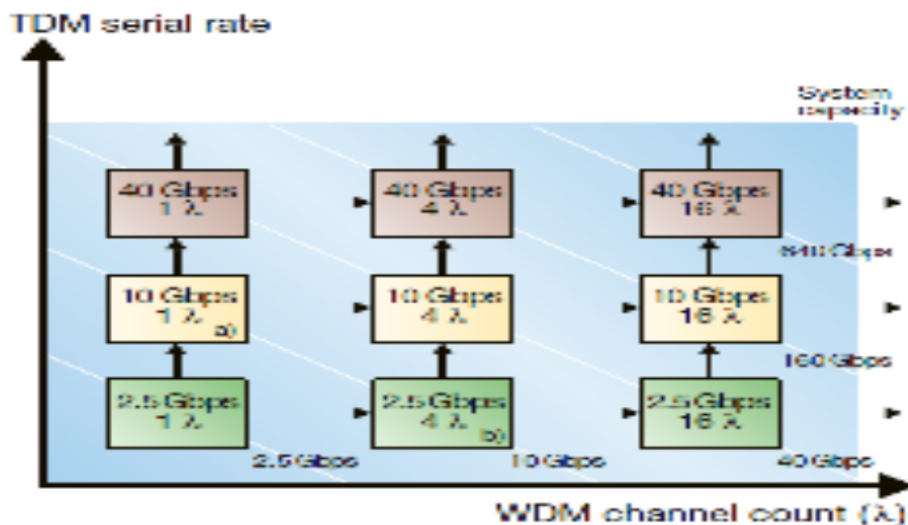
6.11 XGPON και OVERLAID PONs

Υπάρχουν βασικά δύο τρόποι για την αύξηση της ικανότητας ενός συστήματος TDM-based PON για NGA1 σε συμμόρφωση με τις βασικές απαιτήσεις.

Η **εικόνα 27** δείχνει ότι μπορεί κανείς να επιταχύνει το 2.5Gbps GPON σύστημα σε 10Gbps (XGPON) και να επικαλύψει αυτό σε ένα ξεχωριστό G.984.5 μήκος κύματος. Θα μπορούσε επίσης να επικαλύψει τέσσερα χρωματιστά συστήματα 2.5Gbps GPON μέσω πολυπλεκτών WDM σε τέσσερα διαφορετικά μήκη κύματος στην ίδια ODN και να ληφθεί 10Gbps συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

Η πολυπλοκότητα και το κόστος ενός XGPON συστήματος είναι σε υψηλή ισχύ, υψηλή ταχύτητας και χρησιμοποιούν ειδικό διαμορφωμένο λέιζερ. Η ίδια η ODN παραμένει αμετάβλητη. Το κόστος της PON κυριαρχείται από τον πολλαπλασιασμό του OLT εξοπλισμού και την ενδιάμεση αναβάθμιση του ODN με μήκος κύματος (Υβρίδια διαχωριστές, τα οποία περιλαμβάνουν χαμηλού σήματος διαχωριστές ισχύος και τεσσάρων καναλιών WDM

πολυπλέκτες).



Εικόνα 27

6.12 Σύγκριση 10GPON και WDM-PON

Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η IEEE και η ITU ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη των EPON και GPON και κατέληξαν στα αντίστοιχα πρότυπα των 10GEPON και 10GPON. Δόθηκε λοιπόν η δυνατότητα για ρυθμούς μετάδοσης στα 10Gbps για το ρεύμα καθόδου και τα 2.5Gbps για το ρεύμα ανόδου. Και ενώ τα TDM δίκτυα εκσυγχρονίζονταν ένας νέος τρόπος αξιοποίησης των διαθέσιμων μηκών κύματος, με τη χρήση WDM-PONs, πρόσφερε νέες δυνατότητες στα δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς. Στον **πίνακα 10** παρουσιάζεται μια σύγκριση χαρακτηριστικών των 10GPON και WDM-PON.

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

Πίνακας 10 Σύγκριση των 10GPON και WDM-PON.

Παρατηρούμε ότι τα WDM-PONs υπερτερούν σε χαρακτηριστικά όπως η φυσική απόσταση και ο λόγος διαχωρισμού, όπως επίσης και στις περιπτώσεις που το δίκτυο εξυπηρετεί πολλούς χρήστες το WDM-PON προσφέρει μεγαλύτερο bandwidth στον κάθε χρήστη.

Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι προσφέρει περισσότερη ασφάλεια στον κάθε χρήστη αφού το κάθε κανάλι είναι αφιερωμένο σε έναν και μόνο χρήστη και όχι σε περισσότερους ταυτόχρονα.

6.13 Σύγκριση TDM-PONs (BPON, EPON και GPON)

Οι διαφορές αλλά και οι ομοιότητες των TDM-PONs (BPON, EPON και GPON), παρουσιάζονται στον **πίνακα 11** που ακολουθεί.

	BPON	EPON	GPON
Standard	ITU G.983	IEEE 802.3ah	ITU G.984
Εύρος ζώνης	622Mbit/s για ροή ανόδου και 1.2Gbit/s για τη ροή καθόδου	1.25 Gbit/s και για τα δύο ρεύματα	2.488Gbit/s και για τα δύο ρεύματα
Λόγος διαχωρισμού	1:64	1:64	1:64
Μήκη κύματος	1310nm για το ρεύμα ανόδου και 1490nm για το ρεύμα καθόδου	1310nm για το ρεύμα ανόδου και 1490nm για το ρεύμα καθόδου	1310nm για το ρεύμα ανόδου και 1490nm για το ρεύμα καθόδου για
Εναλλαγές προστασίας	Ναι	Όχι	Ναι
Φυσική απόσταση	20km	10 και 20km	10 και 20km
Ενθυλάκωση	ATM πλαίσια (53 bytes)	(μόνο πλαίσια Ethernet)	GEM
Χρήση FEC	Όχι	RS(255,239)	RS(255,239)
Διαχείριση & συντήρηση	PLOAM και ATM	802.3ah OAM Ethernet πλαίσια	GTC πλαίσιο και ATM/GEM OAM

Πίνακας 11 Σύγκριση TDM-PONs (BPON, EPON και GPON)

Παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, πως τόσο τα GPONs, όσο και τα EPONs, υπερτερούν σε πολλά χαρακτηριστικά έναντι των BPONs. Για το λόγο αυτό, το BPON έδωσε γρήγορα τη θέση του στα νεότερα TDM παθητικά δίκτυα.

7° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Επίλογος-Συμπεράσματα

Οι ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης οδηγούν σε περεταίρω διερεύνηση των δυνατοτήτων των οπτικών δικτύων. Το υψηλό εύρος ζώνης και το χαμηλό κόστος έχουν αναγάγει τα παθητικά οπτικά δίκτυα σε επικρατούσα τεχνολογία στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου είχε φανεί σαν μια ικανοποιητική λύση ωστόσο το φαινόμενο bottleneck δημιούργησε την ανάγκη για πιο σύνθετες λύσεις. Η τρέχουσα τεχνολογία GPON είναι μια ισχυρή επιλογή, βαθέων ινών ευρυζωνικής πρόσβασης. Σοβαρές προσπάθειες για την τυποποίηση και την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, έχουν σταθερά επεκταθεί, και για τη συνολική λειτουργία των GPON, που κάνει την τεχνολογία πιο ευέλικτη από την άποψη της ανάπτυξης και των υπηρεσιών και κάνει την υποδομή ινών "Futureproof."

Η επιλογή REACH, όπως ορίζεται σήμερα σε FSAN, θα καταστήσει δυνατή την αύξηση της διάρκειας του συστήματος σε 60 χιλιόμετρα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φτάσουν απομακρυσμένοι πελάτες ή να φιλοξενήσει περισσότερους χρήστες σε ένα PON.

Από την άποψη της συνύπαρξης, το GPON είναι πλήρως προετοιμασμένο για το μέλλον. Συστήματα επόμενης γενιάς, για παράδειγμα, XGPON, επικαλύπτονται με PON, ή κάποια άλλη τεχνολογία.

Τα τρίτης γενιάς δίκτυα είναι ακόμα ένα πεδίο που επιδέχεται αρκετή έρευνα αφού στην σύγχρονη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μέθοδοι και αρχιτεκτονικές. Τα υβριδικά

δίκτυα θα είναι αυτά που θα κυριαρχήσουν στο μέλλον, μέχρι την πλήρη αντικατάσταση του υπάρχοντος δικτύου από ένα για την οποία όμως απαιτούνται γενναίες αποφάσεις σχετικά με τη χρηματοδότηση για την σοβαρή αναβάθμιση του δικτύου η οποία αργά ή γρήγορα θα είναι μονόδρομος. Στο μεταξύ η ήπια μετάβαση τύπου SUCCESS δίνει λειτουργικά τη λύση.

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα έχουν δώσει λύσεις στην ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για γρήγορη μεταφορά πληροφοριών, είτε αυτές είναι δεδομένα, βίντεο ή φωνή. Ωστόσο υπάρχουν χαρακτηριστικά τους που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Ένα από αυτά είναι η ασφάλεια, αφού εξαιτίας της point-to-multipoint τοπολογίας τους είναι ευάλωτα σε δολιοφθορές (Kazonkyetal. 2007). Στα δίκτυα Πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου αυτό μπορεί να γίνει είτε με την άρνηση υπηρεσίας (όταν μια ONU ρυθμίζεται κακόβουλα μόνο σε ροή ανόδου με ενέργεια τόση που μπλοκάρει μία οι περισσότερες ONU), είτε με υποκλοπή είτε με τη χρήση μιας «μεταμφιεσμένης ONU» που μπορεί να στέλνει πλαίσια ελέγχου και διαχείρισης προσπαθώντας να κλέψει εύρος ζώνης ή να επιτεθεί στο σύστημα.

Ένα άλλο επίκαιρο στοιχείο διερεύνησης είναι η όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση σε ρεύμα, ιδίον των παθητικών δικτύων, που όμως αποτελεί στοιχείο για έρευνα για την περαιτέρω απόδοση με λιγότερους πόρους.

Στην συνέχεια, η εφαρμογή πολλαπλών επιπέδων ανθεκτικότητας σε ASONs απαιτεί μηχανισμούς για το συντονισμό των δράσεων αποκατάστασης των διαφόρων επιπέδων. Στην εργασία αυτή μελετήσαμε δύο δημοφιλείς μηχανισμούς που επιτρέπουν το συντονισμό bottom-up του οπτικού επιπέδου και του επιπέδου πελάτη (π.χ., IP / MPLS). Η αξιολόγηση αυτών των μηχανισμών έχει ενισχύσει το NS-2 προσομοιωτή, τον ASON, και τους οπτικούς κόμβους του δικτύου. Χρησιμοποιώντας το βελτιωμένο προσομοιωτή έχουμε διεξάγει πειράματα ανθεκτικότητας σε ενιαίο στρώμα επικύρωσης της λειτουργίας του κινητήρα προσομοίωσης, καθώς και στρατηγικές για την ανθεκτικότητα πολλαπλών στρώσεων που απασχολούν είτε το Hold Off Timer ή το Recovery Token Signal μηχανισμό συντονισμού επιπέδων. Ως γενική παρατήρηση που απορρέει από τις διάφορες προσομοιώσεις αποκατάστασης, οι end-to-end εναλλακτικές lightrpaths είναι μια πολύ αποτελεσματική λύση, αλλά με περιορισμούς.

Τα πειράματα έδειξαν ότι η ακριβής θέση της αποτυχίας σε συστήματα ανάκτησης από άκρο σε άκρο είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, μια downstream αποτυχία όταν συμβεί, χρειάζεται περισσότερο χρόνο για την ανάκαμψη. Έτσι, μια αναδιάταξη του δικτύου σε τοπικό παρακάμπτει ένα σημείο αποτυχίας, που μερικές φορές είναι πιο κατάλληλη και λιγότερο χρονοβόρα. Βέλτιστα αποτελέσματα θα μπορούσαν ενδεχομένως να προκύψουν με βάση ένα συνδυασμό των βραχυπρόθεσμων τοπικών εναλλακτικών lightrpaths μαζί με ένα long-term end-to-end.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ATM protocol architecture. (α.η.). The Open University. Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση <http://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/computing-and-ict/systems-computer/protocols-multi-service-networks/content-section-4.1>
- A brief overview of SONET technology, (June2005). Cisco. Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical/synchronous-optical-network-sonet/13567-sonet-tech-tips.html>
- Frenzel, L. (2014). What's the difference between EPON and GPON optical fiber networks? ElectronicDesign. Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση <http://electronicdesign.com/what-s-difference-between/what-s-difference-between-epon-and-gpon-optical-fiber-networks>
- G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics, (2008). ITU-T. Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>
- Gaglianello, B. (α.η). MPCP: Multi-Point Control Protocol for EPONs. Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση http://www.ieee802.org/linksec/meetings/Sep02/Gaglianello_sec_1_0902.pdf

- Gutierrez, D., Kim, K.S, An, F.T, Kazovsky, (α.η.). SUCCESS-HPON: Migrating from TDM-PON to WDM-PON. Ανακτήθηκε ηλεκτρονικά τον Σεπτέμβριο του 2016 από τον ιστότοπο <http://citeseerx.ist.psu.edu/>
- ITU-T G.983.1 (2005) Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON) Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1-200501-I/en>
- Kazovsky, L., Shaw, W.T, Gutierrez, D., Cheng, N. & Wong, S.W. (2007). Next-Generation Optical Access Networks. Journal of lightwave technology, vol. 25, no. 11. p.p.3428- 3442. Ανακτήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2016 από τη διεύθυνση <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4397122>
- Koonen, T. (2006). Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When? Proceedings of the IEEE Proc. IEEE, 94(5), 911-934. doi:10.1109/jproc.2006.873435
- Kramer, G. (2001). Multi-Point Control Protocol (MPCP). Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση www.ieee802.org/3/efm/public/nov01/kramer_1_1101.pdf
- Kramer, G. & Pesavento, G. (2005). Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next- Generation Optical Access Network. IEEE communications Magazine 40 (2), 66-73.

- Kylafas, G. & Soldatos, J. (2005). ASONS: an automatically switched optical networks simulator. *Journal Computer Communications archive*, Vol. 28 Issue 2, February, 2005. p. 224-235
- Lévesque, M., Ivănescu, L., & Maier, M. (2014). Next-Generation Optical Access Networks: Trends, Challenges, and Applications. *Encyclopedia of Information Science and Technology*, Third Edition, 5984-5996.
- Luo, Y, Zhou, X., Effenberger, Fr., Yan, X., Peng, G., Qian, Y. and Ma, Y. (2013). Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2). *Journal of Lightwave Technology*, Vol 31, No.4. p.p. 587-592.
- Prat (ed), J. (editor) (2008). Next – Generation FTTH Passive optical networks: Research towards unlimited bandwidth access. Barcelona: Springer.
- Sarigiannidis, P., Papadimitriou, G., Nicopolitidis, P., Varvarigos, E., Louta, M., & Kakali, V. (2014). IFAISTOS: A fair and flexible resource allocation policy for next-generation passive optical networks. *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. doi:10.1109/icumt.2014.7002071

- Skubic, B., Betou, E. I., Ayhan, T., & Dahlfort, S. (2012). Energy-efficient next-generation optical access networks. *IEEE Commun. Mag. IEEE Communications Magazine*, 50(1), 122-127. doi:10.1109/mcom.2012.6122542
- Synchronous Optical Network (SONET) Transport Systems: Common Generic Criteria (October 2009). TelcordiaGR-253-CORE, Issue 5. Ανακτήθηκε ηλεκτρονικά από το σύνδεσμο <http://telecom-info.telcordia.com/site/cgi/ido/docs.cgi?ID=SEARCH&DOCUMENT=GR-253&>
- Trojer, E., Dahlfort, St., Hood, D. & Mickelsson H. (2008). Current and next-generation PONs: A technical overview of present and future PON technology. *Ericsson Review No.2*, 2008. p.64-69.
- Ueda, H., Okada, K., Ford, B., Mahony, G., Hornung, S., Faulkner, D., . . . Erickson, J. (2001, December). Deployment status and common technical specifications for a B-PON system. *IEEE Communications Magazine*, 39(12), 134-141. doi:10.1109/35.968824
- Yuanqiu, L., Zhou, X., Effenberger, F., Yan, X., Peng, G., Qian, Y. and Ma, Y. (2013). "Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2)." *J. Lightwave Technol. Journal of Lightwave Technology* 31.4: 587-93.

- XG-PON General features - G.987.1 (2010). ITU-T. Ανακτήθηκε τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/com15/Documents/tutorials/Optical_access_transmission.pdf
- Αβραμόπουλος, Η. (α.η.). Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Ανακτήθηκε ηλεκτρονικά τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Susthmata_metadoshs/Enotita_1a_OptikaSustimataMetadosis.pdf
- Μανώνης, Ι.Ν. (2015). Συγκριτική Μελέτη Οπτικών Δικτύων Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Οπτική ίνα, (α.η.). Βικιπαίδεια. Ανακτήθηκε ηλεκτρονικά τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%80%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%AF%CE%BD%CE%B1
- Χειλάς, Σ. Κ. (α.η.). Οπτικά δίκτυα (σημειώσεις μαθήματος). Σέρρες: ΤΕΙ Σερρών Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών. Ανακτήθηκε ηλεκτρονικά τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση http://conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/seminaria/M_NetworkTech/optical.pdf

- Χρέμμος Δ. Ι., (Απρίλιος, 2007). Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση οπτικών διατάξεων σύζευξης κυματοδηγών και συντονιστών με μεθόδους ολοκληρωτικών εξισώσεων. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ανακτήθηκε ηλεκτρονικά τον Αύγουστο του 2016 από τη διεύθυνση <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/5890/1/PD2007-0018.pdf>
- Steven S. Gorshe, FTTH/FTTC Technologies and Standards, China Communications December 2006
- Chandan Bhagat, Kedar Raje, Rohit Shetye, Amit Vaity, Technological and cost-based comparison of next generation PON technologies: 10GPON and WDM PON, University of Colorado, Boulder, 2 May 2011
- Berger, et al. "Generalized MPLS Signaling - RSVP-TE Extensions", Internet Draft, September 2002
- D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, G. Swallow, RFC 3209: "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels", December 2001
- Cavazzoni C., Lehr G., Manzalini A., Moro R., Pauluhn U., Vasseur J. Wauter N. ' The IP/MPLS over ASON/GMPLS Testbed of the IST project LION', in the Proc. of the 28th European Conference on Optical Communication, Copenhagen Denmark, September 8-12 2002 (ECOC 2002').

- Pin-Han Ho and Hussein T. Mouftah, "A framework for service guaranteed shared protection in WDM mesh networks", IEEE Communications Magazine, February 2002, pp.97-104
- Guangzhi Li, Jennifer Yates, Dongmei Wang, and Charles Kalmanek, "Control plane design for reliable optical networks", IEEE Communications Magazine, February 2002, pp.90-96
- Wojciech Bigos, Artur Lasoń, Giannis A. Pikrammenos, Stefanos Politis, Frank Tetzlaff, "OAM Information Flow and its Role in the Resilience of an ASON", ONDM 2003, February 2003, Budapest, Hungary.
- Bernstein Research: Fiber: Revolutionizing the Bell's Telecom Networks. May 2004
- Baker J., Cagenius, G., Goodwin, C., Hansson, M. and Hatas, M.: Deep-fiber broadband access networks. Ericsson Review, Vol. 84(2007)1, pp. 4-8
- G.993.2, Very high-speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2). ITU-T, 02/2006
- 4 G.983.1-5, A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation. ITU-T, 03/2001
- G.984.1-5, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON). ITU-T, 03/2003

- IEEE 802.3ah, Ethernet in the First Mile Task Force, www.ieee802.org/3/efm/
- Full-service Access Network (FSAN), www.fsanweb.org
- G.984.re draft, Draft G-PON optical reach extension. ITU-T, 12/2007
- Davey, R.P., et al.: Designing long-reach optical access networks. BT Technology Journal, Vol. 24 No. 2, 04/2006
- Trojer, E., et al.: Optical Access Network Evolution, NOC 2007, Stockholm, 06/2007