



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου  
Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας  
Τμήμα Επιστήμης & Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών  
Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα & Δίκτυα

## Διπλωματική Εργασία

Του φοιτητή

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ του ΑΡΓΥΡΙΟΥ**

ΑΜ: 2011101

Τίτλος

Παθητικά Οπτικά  
Δίκτυα  
τύπου WDM  
με εκτεταμένη προσιτότητα

Επιβλέπουσα:

Χριστίνα (Τάνια) Πολίτη  
Επικ. Καθηγήτρια

Τρίπολη, Μάρτιος 2013

*Στον πατέρα μου, Αργύρη Αλεξόπουλο*

*Στην μητέρα μου, Βασιλική*

*Και στην κ. Αγγελική για  
όλη την βοήθεια και  
στήριξή  
της*

*Στην αξιολάτρευτη γιαγιά μου, Ασημίνα †*

**"Γηράσκω δ' αεί πολλά διαδασκόμενος"**

Τη φράση αυτή, που θα πει «γερνώ μαθαίνοντας πάντα πολλά», την είπε ένας από τους επτά σοφούς της αρχαιότητας, ο νομοθέτης Αθηναίος Σόλωνας. Δείχνει την δίψα και την ακούραστη αγάπη για μάθηση, ως μέσα στα γηρατειά του.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η αναφορά στα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks - PONs) τα οποία έχουν καθιερωθεί σαν τεχνολογική ανάπτυξη αφού έχουν την δυνατότητα να μας παρέχουν υψηλές ταχύτητες δικτύων πρόσβασης. Έτσι, τα παθητικά οπτικά δίκτυα κρίνονται ως η αποτελεσματικότερη λύση για ένα δίκτυο πρόσβασης που έχει σαν δυνατότητα να παρέχει μεταφορά δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς. Έτσι, το κέρδος κόστους που έρχεται ως αποτέλεσμα της μείωσης του αριθμού διεπαφών μεταξύ των κόμβων, έχει επιτρέψει την αυξανόμενη χρήση των PON που παραδίδει ίνα στο σπίτι (Fibre to the Home) και την ίνα στο curb. Εντούτοις, σε πολλές περιπτώσεις, η ανάγκη για υψηλό ποσοστό διάσπασης ή για εκτεταμένη προσιτότητα προσδίδουν μεγάλες απώλειες, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με ενισχυτές. Ταυτόχρονα η ανάγκη για αυξημένη χωρητικότητα στα μελλοντικά παθητικά δίκτυα μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με αύξηση του ρυθμού μετάδοσης είτε με χρήση τεχνολογίας WDM. Για να είναι όμως εφικτή η μετάδοση δεδομένων σε τόσο μεγάλους ρυθμούς, εξασφαλίζοντας παράλληλα υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, απαραίτητη κρίνεται η σχεδίαση και υλοποίηση του φυσικού στρώματος, δηλαδή του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης και του υποστρώματος φυσικού μέσου.

Έτσι θα γίνει μελέτη του φυσικού στρώματος ενός τέτοιου WDM Παθητικού Δικτύου με εκτεταμένη προσιτότητα, μέσω θεωρητικού μοντέλου που αναλύει τις λειτουργικές απαιτήσεις τόσο παθητικών όσο και ενισχυμένων συστημάτων.

Να αναφερθεί ότι τα «WDM-PON» Wavelength Division Multiplexing PON είναι ένας τύπος PON ο οποίος προωθείται τελευταία από διάφορους κατασκευαστές με το επιχείρημα της εκτεταμένης χρήσης διακριτών μηκών κύματος ώστε να μπορεί να ικανοποιηθεί η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για upstream και downstream bandwidth αλλά και για την προστασία κάθε ιδιαίτερης ζεύξης. Η τεχνολογία αυτή ποντάρει στη μελλοντική αύξηση της ζήτησης, μείωση του σχετικού κόστους και ευκολία μαζικής παραγωγής. Η WDM -PON υπόσχεται πολλαπλάσιο εύρος ζώνης σε μεγαλύτερες αποστάσεις αυξάνοντας το περιθώριο απωλειών ισχύος, με αποφυγή των ευαίσθητων σε απώλειες διαχωριστών. Τα πολλαπλά μήκη κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη δημιουργία εικονικών (virtual) PON εγκατεστημένων στην ίδια συσκευή, είτε για την εκμετάλλευση με στατιστική πολυπλεξία χαμηλότερων καθυστερήσεων και μεγαλύτερης ρυθμαπόδοσης.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

**Μ**ε την παρούσα έκδοση ουσιαστικά ολοκληρώνεται η διπλωματική μου εργασία που εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου-*Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Τμήμα Επιστήμης & Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών, Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα & Δίκτυα.*

Από την αρχή τέθηκαν υψηλοί στόχοι τους οποίους κατόρθωσα να κατακτήσω όσο το δυνατόν καλύτερα μπορούσα. Τα χαρακτηριστικά γι' αυτή την εργασία ήταν επιμονή, υπομονή, σκληρή δουλειά, αναζήτηση, το ενδιαφέρον που μου προκάλεσε από την πρώτη στιγμή το θέμα, η διάθεση και το χαμόγελο μου ώστε όλα να πάνε καλά. Κάθε κίνησή μου, κάθε αναζήτησή μου αποτέλεσε την αφετηρία για μια σωστή και ολοκληρωμένη δουλειά.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήθελα πρώτα απ' όλους να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που πάντα υποστηρίζουν ότι αγαπώ!

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην καθηγήτρια κα. Χριστίνα (Τάνια) Πολίτη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές της, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, η οποία με ουσιαστική και αρκετές φορές καταλυτική παρουσία βοήθησε να ξεπεραστούν εμπόδια οργανωτικά και ανεπάρκειας χρόνου.

Ευχαριστώ την φίλη μου, Μυριάνθη Σολωμού για τις συμβουλές της σχετικά με τα σχήματα του κειμένου. Μυριάνθη, η αισθητική σου αντίληψη πάντα με ενθουσιάζει!

Ευχαριστώ επίσης, τον παιδικό μου φίλο, Χρήστο Σμαΐλη, για την καθοδήγησή του και τις συμβουλές του, τον φίλο μου Χρήστο Τζαβάρα, ο οποίος δέχτηκε με χαρά να διορθώσει λάθη και να επισημάνει σημεία που ήθελαν αλλαγή στην εργασία και την κ. Αγγελική Λουμπαρδιά, για όλη την υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Σας θεωρώ φίλους μου!

Επίσης, τους υπεύθυνους της βιβλιοθήκης της Δημητσάνας για την αντιμετώπιση και την πολύτιμη βοήθεια που είχα από αυτούς όσον αφορά το κομμάτι των πληροφοριών, την Ιερά Μητρόπολη της Δημητσάνας για την βοήθειά της και τέλος ευχαριστώ όλους όσους βοήθησαν ώστε η αρχική μου ιδέα να γίνει πραγματικότητα.

Ένα μόνο ευχαριστώ, ίσως είναι λίγο για την φιλοξενία που είχα από τον θείο μου, Γιάννη και την θεία μου, Κική όσο καιρό σπούδαζα Τρίπολη. Σας χρωστάω πολλά!

Παναγιώτη, Αθανασία, Σταυρούλα, Σταύρο, Αναστασία, μέσα μας, κυλάει Δημητσανίτικο αίμα! Σας ευχαριστώ (ξ)αδέρφια μου, για όλα.

Τους συμφοιτητές μου, Χρήστο, Κάλια, Ευσταθία, Σταυρούλα και Νίκη. Να ξέρετε πως η φιλία δεν έχει τέλος.

Το μεγαλύτερο όμως ευχαριστώ αξίζει στην Παναγιώτα Μητροπούλου, που όλα αυτά τα χρόνια με υποστηρίζει, με εμπνυχώνει και ομορφαίνει την ζωή μου και τις ιδέες μου! Γιώτα, ευχαριστώ που υπάρχουν στη ζωή μου...

Τα καλύτερα έπονται!



**Χαράλαμπος Α. Αλεξόπουλος**  
mtpx11101@uop.gr

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

**Κ**ατά κύριο λόγο έχουν καθιερωθεί ως δύο οι προτεινόμενες λύσεις οπτικής δικτύωσης, οι οποίες αποτελούν από μόνες τους δύο μεγάλες κατηγορίες. Η οπτική ίνα στο σπίτι (FTTH) και οι παραδοσιακές τεχνολογίες TDM PON όπως το BPON, DPON, APON κ.ο.κ. Βασικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής οπτικής ίνας στο σπίτι είναι το μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτει αλλά και οι συμμετρικές ταχύτητες που επιταχύνονται διαμέσου μιας ειδικά αφιερωμένης οπτικής ίνας για τις ανάγκες του κάθε χρήστη ξεχωριστά. Αντίθετα, το GPON βασίζεται στη λειτουργία του διαμοιρασμού του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης για τις ανάγκες όλων των χρηστών, έχοντας σαν αποτέλεσμα να είναι ανέφικτες οι συμμετρικές ταχύτητες και παράλληλα περιορίζει τις δυνατότητες κλιμάκωσης του δικτύου.

Η τεχνολογία Ethernet πάνω από WDM PON παρουσιάζει παρόμοια πλεονεκτήματα με ένα δίκτυο Ethernet σημείο προς σημείο. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή χωρητικότητα και οι συμμετρικές ταχύτητες, οι οποίες είναι πολύ πιο υψηλές και αποδοτικές από αντίστοιχες που αφορούν το TDM PON. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι εξομαλύνει σε ικανοποιητικό επίπεδο τα προβλήματα τα οποία προκύπτουν από τον αριθμό των διαθέσιμων οπτικών ινών αλλά και με το πλήθος των συγκολλήσεων και τεμαχισμών που απαιτούνται.

Η πλατφόρμα Ethernet Access έχει την δυνατότητα να εξυπηρετήσει οικιακούς και εταιρικούς χρήστες χωρίς να υπάρχει κάποιος περιορισμός όσον αφορά τις υψηλές ευζωνικές τους απαιτήσεις ενώ παράλληλα παρέχει απεριόριστες δυνατότητες αναβάθμισης των συγκεκριμένων υπηρεσιών. Η λύση στο παραπάνω ζήτημα στηρίζεται στην τεχνολογία Ethernet πάνω από WDM PON, μια τεχνολογία η οποία στην πραγματικότητα προσφέρει ταχύτητες που φτάνουν μέχρι και το 1Gbps ενώ υπόσχεται μελλοντική αύξηση διευρύνοντας τις περιοχές κάλυψης των μητροπολιτικών δικτύων.

Όπως αναφέρθηκε η ανάγκη για υψηλό ποσοστό διάσπασης ή ακόμα και για εκτεταμένη προσιτότητα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες. Αυτές οι απώλειες είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν μόνο με χρήση οπτικής ενίσχυσης. Απ' την άλλη η ανάγκη για μεγαλύτερη χωρητικότητα επιτυγχάνεται με αύξηση του ρυθμού μετάδοσης ή ακόμα πιο συχνά με χρήση τεχνολογίας WDM.

Τα συστήματα πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης χωρητικότητας αλλά παράλληλα έχουν το μειονέκτημα του σχετικά υψηλού κόστους. Έτσι, η χρήση τους περιορίζεται σε εφαρμογή μητροπολιτικών δικτύων και όχι σε δικτύων πρόσβασης.

Παρόλα αυτά, η τεχνολογική πρόοδος όσον αφορά την οπτική δικτύωση και των επιμέρους τεχνολογιών προσφέρει λύσεις στις απαιτήσεις των εκάστοτε εφαρμογών. Αρκεί να πάρουμε σαν παράδειγμα τις απαιτήσεις που έχει ένα δίκτυο μεγάλης απόστασης, όπου οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για παροχή τηλεπικοινωνιακής ζεύξης αστικών κέντρων μεταξύ απομακρυσμένων πόλεων. Η βασική λύση των παραπάνω περιπτώσεων πραγματοποιείται με βάση την αρχή «κόστος ανά bit ανά χιλιόμετρο», καθώς μια τέτοια λύση αποτελείται από τεχνολογικά προηγμένα οπτικά μέρη που έχουν σαν δυνατότητα να εκμεταλλεύονται τα μεγάλα μήκη κύματος ενώ χρησιμοποιούν ενισχυτές υψηλής οπτικής ισχύος. Ο λόγος που γίνεται χρήση οπτικών ενισχυτών είναι για να επιτευχθούν ταχύτητες μεταφοράς. Η χρήση συστημάτων

WDM σε μητροπολιτικά δίκτυα είναι νέα στην υλοποίηση της. Και σε αυτή την περίπτωση τα μητροπολιτικά δίκτυα χρησιμοποιούν προηγμένα ηλεκτρονικά και οπτικά στοιχεία.

Οι λύσεις αυτές αφορούν της κατηγορία «κόστος ανά σύνδεση» και παρόλο που χρησιμοποιούν παρόμοια οπτική τεχνολογία υποστηρίζουν μικρότερες ταχύτητες. Εντέλει, αυτές οι λύσεις έχουν υψηλό κόστος σε σύγκριση με τα δίκτυα μεγάλης απόστασης. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που έχουν τα συστήματα WDM είναι ο προσεκτικός σχεδιασμός του δικτύου και των μηκών κύματος που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε ζεύξη.

Η τεχνολογία WDM PON θεωρείται η πιο σύγχρονη μορφή οπτικής δικτύωσης που χρησιμοποιείται σήμερα. Τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας είναι η εξοικονόμηση μεγάλου αριθμού οπτικών ινών, ενώ έχουμε και σημαντικό περιορισμό των προβλημάτων που χαρακτηρίζουν τα συστήματα TDM PON. Επίσης, ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ότι αυξάνεται σημαντικά η περιοχή κάλυψης του δικτύου, ενώ προφέρονται αυξημένες δυνατότητες κλιμάκωσης και ασφάλειας δεδομένων, από ένα ολοκληρωμένο δίκτυο οικιακών – εταιρικών υπηρεσιών.

Επομένως, σ' ένα σύστημα WDM PON, ένα απλό μήκος κύματος ξεκινάει από το αστικό κέντρο και ανακατευθύνεται προς τον τελικό χρήστη μέσω ενός οπτικού παθητικού δρομολογητή. Η εγκατάσταση αυτού του παθητικού οπτικού δρομολογητή γίνεται εξωτερικά και κατά μήκος της ενδιάμεσης διαδρομής.

Με αυτό τον τρόπο, ένα μήκος κύματος χρησιμοποιείται για οικιακές υπηρεσίες, έχει ταχύτητα μέχρι και 100 Mbps, ενώ ένα δεύτερο μπορεί να εξυπηρετεί εταιρικές ανάγκες. Η λειτουργία και ο ρόλος του παθητικού οπτικού δρομολογητή είναι να χειρίζεται τα μήκη κύματος. Στην σύγχρονη τεχνολογική ανάπτυξη που διανύουμε, ένας παθητικός οπτικός δρομολογητής μπορεί να χειριστεί μέχρι και 32 μήκη κύματος, αριθμός που αναμένεται να αυξηθεί θεαματικά στα άμεσα μέλλον.

Παρόλο που η τεχνολογία WDM PON υποστηρίζει συνδέσεις σημείο προς σημείο, μπορεί να διατηρεί ταυτόχρονα την ανεξαρτησία μεταξύ των μηκών κύματος κατά μήκος ολόκληρης της διαδρομής.

Οι σύγχρονες τεχνολογικές απαιτήσεις που υπάρχουν στην ζωή μας και η ζήτηση υπηρεσιών φωνής, βίντεο, εικόνας και δεδομένων αποτελεί κομμάτι ζωτικής σημασίας στους χρήστες και απαραίτητη εφαρμογή και παροχή από την πλευρά των παρόχων για να εξασφαλίσουν την παρουσία τους στην αγορά. Ένα ολοκληρωμένο διαθέσιμο πακέτο πρέπει να παρέχει επικοινωνία αλλά και διασκέδαση προς τους συνδρομητές- πελάτες με όσο τον δυνατόν μειωμένα λειτουργικά κόστη. Μέσα από το πέρασμα των αιώνων, έχει αποδειχτεί ότι όσο αυξάνονται οι πάροχοι τόσο θα αυξάνονται οι ταχύτητες των υπηρεσιών αλλά και οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητη η αναβάθμιση της υποδομής του δικτύου σε φυσικό επίπεδο, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η παροχή καινοτόμων υπηρεσιών στο μέλλον. Η πλατφόρμα Ethernet Access προφέρει ευελιξία, μεγάλες δυνατότητες κλιμάκωσης και μεγάλο εύρος ζώνης σε εφαρμογές FFTH/FFTB/FFTP.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	3
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	4
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	5
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	7
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ</b> .....	9
<b>ΠΙΝΑΚΕΣ</b> .....	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	12
<b>ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ</b> .....	12
Εισαγωγή [1][2] .....	12
Εύρος Ζώνης [2] .....	13
Οπτικές Ίνες [2][3] .....	14
Βασική Αρχή Λειτουργίας [3] .....	15
Μονότροπες Οπτικές Ίνες [4][5] .....	16
Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM) [1][2].....	17
Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM) [1][3].....	18
Fiber-To-The-Home (FTTH)[7] .....	19
FTTH: Σύγκριση Οπτικών Ινών – Χαλκού .....	20
Αρχιτεκτονικές FTTx .....	20
Οπτική ίνα στο Σπίτι –FTTH[7].....	21
Οπτική Ινα στην Καμπίνα - Fiber To The Cabinet (FTTC) [4] .....	21
Οπτική Ινα στο Κτίριο - Fiber To The Building (FTTB)[8] .....	21
Παθητικά οπτικά δίκτυα [7] .....	22
Βασικά στοιχεία οπτικών δικτύων .....	23
Τοπολογίες [7].....	24
Τοπολογία Δέντρου[7][8] .....	25
Οπτικός διάυλος [8].....	27
Τοπολογία δακτυλίου [7][8] .....	28
Σύγκριση τοπολογιών [8] .....	29
Φυσικό στρώμα [8] .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	34
<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ</b> .....	34
<b>ΔΙΚΤΥΩΝ</b> .....	34
<b>APON (ATM PON) [9][10]</b> .....	34
Χαρακτηριστικά και λειτουργία.....	34
<b>Πλεονεκτήματα των APON δικτύων [8][9]</b> .....	37
<b>EPON (Ethernet-PON)[11][9]</b> .....	38
Χαρακτηριστικά και λειτουργία .....	38
<b>Τα πλεονεκτήματα των δικτύων EPON [9]</b> .....	40
<b>GPON (Gigabit PON) [12][13][14]</b> .....	41
Σύγκριση τεχνολογιών APON, EPON και GPON.....	43
Σύγκριση APON και EPON [9] .....	43
Σύγκριση EPON και GPON [9][12] .....	43

<b>Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 3</b> .....	46
<b>ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ WDM [2][1]</b> .....	46
Εισαγωγή [1][2] .....	47
Εξοπλισμός της τεχνολογίας WDM [1] .....	50
Δίκτυα WDM με συνδέσμους από σημείο σε σημείο [1] .....	52
WDM Δίκτυα Εκπομπής και Επιλογής [1] .....	53
Δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος [1][2] .....	55
Δομικά στοιχεία δικτύων WDM [2][3].....	56
Πηγές Φωτός και Ανιχνευτές [2] .....	56
Αναμεταδότες [16].....	57
Οπτικοί Ενισχυτές [2][17] .....	58
Οπτικός Ενισχυτής Εμβρύου (EDFA) [2][16] .....	58
Οπτικοί Διασταυρωτήρες [1][2][16].....	60
WXC [1] .....	62
WDM Πολυπλέκτες & Αποπολυπλέκτες [2][17] .....	63
Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης [2][17] .....	66
WDM ΔΙΚΤΥΩΣΗ .....	67
Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DWDM.....	69
Η Αρχιτεκτονική των DWDM συστημάτων .....	70
Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CWDM.....	71
Διαφορές μεταξύ των συσκευών αποστολής σημάτων DWDM και CWDM ...	73
Το μέλλον της τεχνολογίας WDM [16] .....	73
<b>Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 4</b> .....	76
<b>ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ WDM - PONS</b> .....	76
Παθητικά Οπτικά Δίκτυα WDM [1][2][3] .....	76
CPON [19].....	79
LARNET [19][20][21][22] .....	80
RITENET [19] [22] .....	81
WDM-PON βασισμένο σε πολλαπλών βαθμίδων AWG [19][23] .....	82
DWDM Super-PON (SPON) [19] [24] [25] [26] .....	82
SUCCESS-DWA PON [19] [27].....	83
<b>Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 5</b> .....	87
<b>Μ Ε Λ Ε Τ Η Φ Υ Σ Ι Κ Ο Υ Σ Τ Ρ Ω Μ Α Τ Ο Σ</b> .....	87
Καθορισμός παραμέτρων και υπολογισμοί σε ζεύξεις WDM [28] .....	87
Καθορισμός βασικών παραμέτρων [28].....	87
Υπολογισμοί σχετικά με την εξασθένιση (ισολογισμός ισχύος της ζεύξης) [28]	88
.....	88
Υπολογισμοί σχετικά με τη διασπορά [28] .....	89
Υπολογισμοί σχετικοί με το θόρυβο (κυρίως τον θόρυβο ASE) [28].....	89
Οπτικά ενισχυμένα PON .....	92
Διατύπωση του προβλήματος .....	94
Μη ενισχυμένο Δίκτυο .....	96
Μη ενισχυμένος σύνδεσμος, χιονοστιβάδας φωτοδίοδων .....	98
Οπτικά ενισχυμένα δίκτυα .....	98
<b>Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 6</b> .....	101
<b>Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α Π Ρ Ο Σ Ο Μ Ο Ι Ω Σ Η Σ</b> .....	101
Συμπεράσματα.....	114
<b>Β Ι Β Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α</b> .....	117



## ΣΧΗΜΑΤΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1. 1 Δομή Οπτικής Ίνας [2] .....	15
Σχήμα 1. 2 Βασική λειτουργία της μεθόδου διάδοσης σε οπτικές ίνες [4] .....	16
Σχήμα 1. 3 Μετάδοση σε Μονότροπη Οπτική Ίνα[5] .....	16
Σχήμα 1. 4 Βασική αρχή λειτουργίας του Συστήματος TDM[1] .....	18
Σχήμα 1. 5 Παράδειγμα εφαρμογής τοπολογίας σε συνδυασμό με την .....	22
Σχήμα 1. 6 Τοπολογίες οπτικών δικτύων πρόσβασης .....	24
Σχήμα 1. 7 Τοπολογία δέντρου .....	26
Σχήμα 1. 8 Τοπολογία διαύλου .....	27
Σχήμα 1. 9 Τοπολογία δακτυλίου .....	29

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2. 1 Ρεύμα ανόδου – καθόδου δικτύου APON [8].....	35
Σχήμα 2. 2 δίκτυο EPON – Ρεύμα καθόδου[8] .....	39
Σχήμα 2. 3 δίκτυο EPON - Ρεύμα ανόδου [8].....	40
Σχήμα 2. 4 Η δομή του πλαισίου στο Downstream [9] .....	42
Σχήμα 2. 5 Πλαίσια Μετάδοσης G-PON [9] .....	42

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3. 1 Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος [6] .....	46
Σχήμα 3. 2 Η εξέλιξη της τεχνολογίας DWDM [1][2].....	49
Σχήμα 3. 3 Βασική δομή ενός δικτύου με μεταδότη και αποδέκτη .....	49
Σχήμα 3. 4 Διάγραμμα δομής ενός συστήματος μετάδοσης WDM. [1] .....	50
Σχήμα 3. 5 διάγραμμα δομής ενός συστήματος WDM [1] .....	50
Σχήμα 3. 6 WDM σύνδεσμος σημείο σε σημείο. [2] .....	53
Σχήμα 3. 7 Δίκτυο WDM εκπομπής και επιλογής με τοπολογία αστέρα με N κόμβους [1] .....	53
Σχήμα 3. 8 Η λειτουργία ενός 4×4 παθητικού συζεύκτη αστέρα.[1].....	54
Σχήμα 3. 9 Οπτικό δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος. [1] .....	55
Σχήμα 3. 10 DFB Vs Fabry-Perot laser [16] .....	57
Σχήμα 3. 11 Μηχανισμός Οπτικής Ενίσχυσης Εμβρύου [16] .....	59
Σχήμα 3. 12 Βασική σχεδίαση Ινο-Οπτικού Ενισχυτή Εμβρύου και ενίσχυση με δύο βαθμίδες [16] .....	60
Σχήμα 3. 13 Οπτικός διασταυρωτήρας [6] .....	61
Σχήμα 3. 14 Λειτουργίες ενός OXC [1] .....	62
Σχήμα 3. 15 WXC2 [1].....	63
Σχήμα 3. 16 Διάταξη συστήματος πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος.[1] .....	64
Σχήμα 3. 17 Αποπολύπλεξη φωτός με διάθλαση σε πρίσμα [1][2] .....	65
Σχήμα 3. 18 Περίθλασης με χρήση φράγματος [1][2] .....	66
Σχήμα 3. 19 Πλέγμα Κυματοδηγών (Arrayed Waveguide Grating-AWG) [1][2] .....	66
Σχήμα 3. 20 Οπτικός πολυπλέκτης προσθαφαίρεσης [1] .....	67

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4. 1 Η αρχιτεκτονική ενός παθητικού Οπτικού Δικτύου WDM [1] .....	76
Σχήμα 4. 2 Η αρχιτεκτονική WDM PON εκπομπής και επιλογής. [1] .....	77
Σχήμα 4. 3 Η αρχιτεκτονική WDM PON δρομολόγησης μήκους κύματος. [1] .....	78
Σχήμα 4. 4 Αρχιτεκτονική CPON [19] .....	79
Σχήμα 4. 5 Αρχιτεκτονική LARNET [20] .....	80
Σχήμα 4. 6 Αρχιτεκτονική RITENET [22] .....	81
Σχήμα 4. 7 Αρχιτεκτονική πολλαπλών βαθμίδων AWG [23] .....	82
Σχήμα 4. 8 Αρχιτεκτονική SUCCESS-DWA PON [27] .....	84

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήμα 5. 1 Μοντέλο ζεύξης WDM για την εκτέλεση υπολογισμών σχετικά με τον θόρυβο[28] .....	90
Σχήμα 5. 2 Ισχύς εισόδου καναλιού $P_{in,v}$ συναρτήσεως του ενισχυτικού βήματος $D$ [28] .....	92
Σχήμα 5. 3 Σχηματική απεικόνιση ενός Pon συστήματος [36] .....	93
Σχήμα 5. 4 στοιχεία ενός PON δικτύου, χρήσιμα για την ανάλυση [36] .....	94
Σχήμα 5. 5 Κατανομή θορύβου .....	96

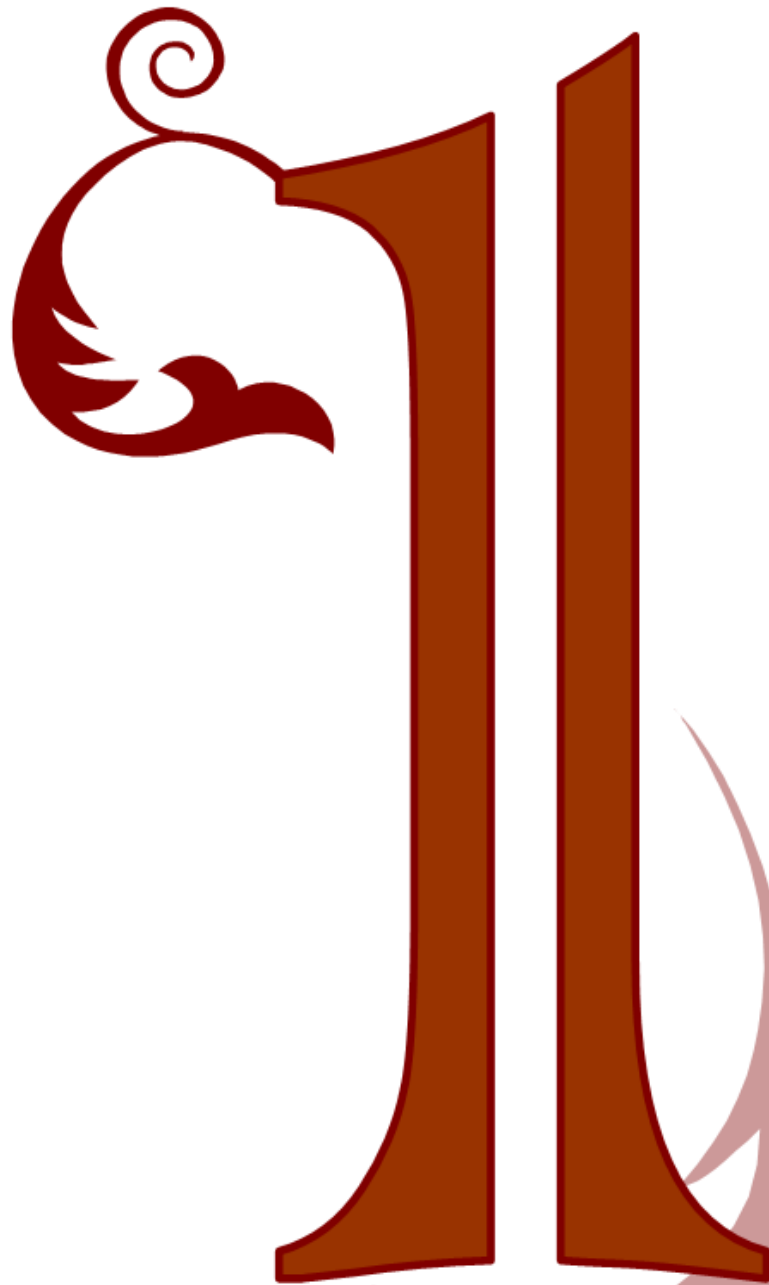
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 6. 1 Η γενική δομή του συστήματος .....	101
Σχήμα 6. 2 bit rate 2.5Gbit/s 32 χρήστες, .....	102
Σχήμα 6. 3bit rate 2.5Gbit/s 1024 χρήστες, .....	103
Σχήμα 6. 4 bit rate 2.5Gbit/s, 32 χρήστες, 120 km απόσταση .....	104
Σχήμα 6. 5bit rate 2.5Gbit/s, 32 χρήστες, 190 km απόσταση .....	105
Σχήμα 6. 6 bit rate 10Gbit/s, 32 χρήστες .....	106
Σχήμα 6. 7 βασικό απλοποιημένο WDM-PON με ενίσχυση .....	107
Σχήμα 6. 8bit rate 2.5Gbit/s .....	108
Σχήμα 6. 9bit rate 2.5Gbit/s, 32 χρήστες, 120 km απόσταση .....	109
Σχήμα 6. 10bit rate 10Gbit/s .....	110
Σχήμα 6. 11bit rate 60Gbit/s .....	111
Σχήμα 6. 12bit rate 60Gbit/s .....	112

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1 Είδη μονότροπης οπτικής ίνας .....	17
Πίνακας 2 Σύγκριση Οπτικών Ινών – Χαλκού .....	20
Πίνακας 3 Σύγκριση τοπολογιών [8] .....	30
Πίνακας 4 bit rate για upstream/downstream κανάλι στα GPON [9] .....	42
Πίνακας 5 Τύποι WDM .....	73

# Παθητικά οπτικά δίκτυα



---

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

#### Εισαγωγή [1][2]

**Ζ**ούμε σε μια κοινωνία όπου τα μέλη της έχουν αρχίσει εδώ και χρόνια να αποκτούν εμπειρία πάνω στον σύγχρονο τρόπο επικοινωνίας, σαν αποτέλεσμα της επανάστασης της πληροφορίας στη καθημερινή τους ζωή. Την τελευταία δεκαετία υπύρξαν αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε, το οποίο από τεχνικής άποψης μπορεί να θεωρηθεί ως μια συλλογή τοπικών δικτύων με συχνά διαφορετικές αρχιτεκτονικές και οικογένειες πρωτοκόλλων, που συνδέονται και επικοινωνούν, μέσω ενός ζεύγους απλών και ευέλικτων πρωτοκόλλων, όπως του ασυνδεδεσμένου πρωτοκόλλου Διαδικτύου (Internet Protocol- IP) και του συνδεδεσμένου πρωτοκόλλου ελέγχου μετάδοσης (transport control protocol TCP) που τρέχει πάνω από το IP. Η εξέλιξη όμως, της επικοινωνίας την οποία επιδιώκουμε έχει πάντα αυξητικές τάσεις και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη ζήτηση για χωρητικότητα δικτύου.

Η ραγδαία εξάπλωση του Διαδικτύου, ακόμα και από την οπτική γωνία της αύξησης του αριθμού των χρηστών, είναι μια από τις πιο βασικές αιτίες για την διαρκώς αυξανόμενη συνολική ζήτηση για χωρητικότητα δικτύου. Το εύρος ζώνης όμως που απαιτείται ξεχωριστά από κάθε χρήστη έχει σημειώσει επίσης μεγάλη αύξηση. Συγκεκριμένα, στα μέσα της δεκαετίας του '90, ο ετήσιος παράγοντας αύξησης του ρυθμού μετάδοσης που απαιτούνταν από κάθε χρήστη ήταν ίσος με οκτώ. Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι οι χρήστες γίνονται διαρκώς περισσότεροι και όλο και πιο απαιτητικοί και έτσι γίνεται όλο και πιο δύσκολο να ικανοποιηθούν οι συνολικές τους απαιτήσεις από άποψη χωρητικότητας.

Σε μια προσπάθεια να βρεθεί η αιτία πίσω από αυτή της αυξανόμενης τάση ζήτησης της χωρητικότητας, εξετάστηκε το φαινόμενο αυτό από την οπτική γωνία της επιστήμης των οικονομικών, λαμβάνοντας υπόψη τον κανόνα κόστους ζήτησης που ισχύει για όλες τις αγορές. Η υψηλή ζήτηση επιτακτικά καλεί για τρόπους μείωσης του κόστους του εύρους ζώνης. Με το πέρασμα των χρόνων, αυτό επιτεύχθηκε με διάφορα τεχνολογικά βήματα. Για παράδειγμα, σε ότι αφορά το τμήμα πρόσβασης του δικτύου, ο πιο αποδοτικός τρόπος εκμετάλλευσης των κοινών καλωδίων χαλκού που είχε εισάγει η τεχνολογία της ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (Digital Subscriber Line –DSL) είχε ως αποτέλεσμα ένα συνολικά χαμηλότερο κόστος ανά παρερχόμενη εύρους ζώνης στο οικιακό χρήστη. Εύρος ζώνης της τάξης του 1Mb/s έγινε πραγματικότητα για τις ευρυζωνικές τεχνολογίες πρόσβασης. Επίσης, η καλωδιακή πρόσβαση, η οποία παρέχει παρόμοιες δυνατότητες σε εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας την ήδη εγκαταστημένη υποδομή της καλωδιακής τηλεόρασης. Υπάρχουν και επιπλέον βελτιώσεις στην ηλεκτρονική τεχνολογία με αποτέλεσμα να έχουν επιτρέψει με ανάλογο τρόπο σε πολλούς χρήστες να έχουν αρχίσει πλέον να μισθώνουν γρηγορότερες γραμμές από το συνηθισμένο.

Αυτό επίσης που έχει οδηγήσει το κόστος του εύρους ζώνης σε όλο και χαμηλότερα επίπεδα είναι ο υψηλός ανταγωνισμός που υπάρχει σε αγορές τόσο επικερδείς όσο αυτή των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Ο ανταγωνισμός αυτός έχει κάνει ιδιαίτερα

αισθητή της παρουσία του μετά της απελευθέρωση της αγοράς των τηλεπικοινωνιών, η οποία αποτελεί πραγματικότητα για πολλά μέρη του κόσμου εδώ και αρκετά χρόνια.

Τώρα όσον αφορά τα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metropolitan Area Networks - MAN), ιεραρχικά βρίσκονται ανάμεσα στα Δίκτυα Κορμού (Long-Haul) και στα Δίκτυα Πρόσβασης (Access Networks).

Ο όρος Δίκτυα Κορμού είναι ίδιας σημασίας με αυτό των Δικτύων Ευρείας Περιοχής (Wide Area Networks - WAN) και αποτελούν τον κορμό του παγκόσμιου δικτύου. Για την ακρίβεια, πρόκειται για διασκορπισμένα γεωγραφικά δίκτυα που παρέχουν υψηλές ταχύτητες επικοινωνίας για τη σύνδεση των διαφόρων τμημάτων τους. Η επικοινωνία αυτή γίνεται εφικτή με χρήση προηγμένων ψηφιακών όπως την τεχνολογία SONET (Synchronous Optical Network) και SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

Μια άλλη κατηγορία δικτύων είναι αυτή των Δικτύων Πρόσβασης, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως από ποικιλία πρωτοκόλλων και υλοποιήσεων και παρέχουν στους χρήστες τους μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ταχύτητα και το εύρος ζώνης. Δίκτυα πρόσβασης χρησιμοποιούνται κυρίως από χρήστες του Internet ή και μεγάλες εταιρίες ή ιδρύματα.

Ανάμεσα στα Δίκτυα Κορμού και στα Δίκτυα Πρόσβασης βρίσκονται τα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metropolitan Area Networks - MAN), των οποίων βασικό πλεονέκτημα είναι ότι έχουν την δυνατότητα να καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές μιας ολόκληρης πόλης καθώς και να συνδέουν επιχειρήσεις ή οποιοδήποτε κτίριο με απαιτήσεις πρόσβασης, ταχύτητας και εύρους ζώνης. Τα χαρακτηριστικά των Μητροπολιτικών δικτύων είναι παρόμοια με αυτά των δικτύων πρόσβασης, σε σχέση με τα διαφορετικά πρωτόκολλα και τις διαφορετικές ταχύτητες.

Οι τεχνολογίες στις οποίες έχουν βασιστεί αυτά τα δίκτυα είναι οι SONET (Synchronous Optical Network) και SDH (Synchronous Digital Hierarchy) και οι τοπολογίες που χρησιμοποιούνται είναι οι σημείο-προς-σημείο (point-to-point), δακτυλίου (ring) με χρήση Πολυπλεκτών Προσθαφαίρεσης (Add/Drop Multiplexers - ADMs).

Οι απαιτήσεις από τα Μητροπολιτικά Δίκτυα είναι μεν να ικανοποιούν τις ανάγκες που δημιουργούνται από τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης στα Δίκτυα Κορμού αλλά και τις αυξανόμενες απαιτήσεις συνδέσεων και τεχνολογιών πρόσβασης μεγάλων ταχυτήτων.

Έτσι έχουν την δυνατότητα εκτός από τη μετάδοση φωνής και μισθωμένων υπηρεσιών να υποστηρίζουν τη διασύνδεση χώρων αποθήκευσης δεδομένων (data storage) αλλά και κατανεμημένες εφαρμογές (distributed applications) και φυσικά μετάδοση video. Όλα αυτά κάνουν τα Μητροπολιτικά δίκτυα κατάλληλα στην υλοποίησή και χρήση τους καθώς η διαφάνεια πρωτοκόλλων και ταχύτητας αλλά και η δυνατότητα για κλιμάκωση μεγέθους (scalability) είναι σημαντικά πλεονεκτήματα.

## Εύρος Ζώνης [2]

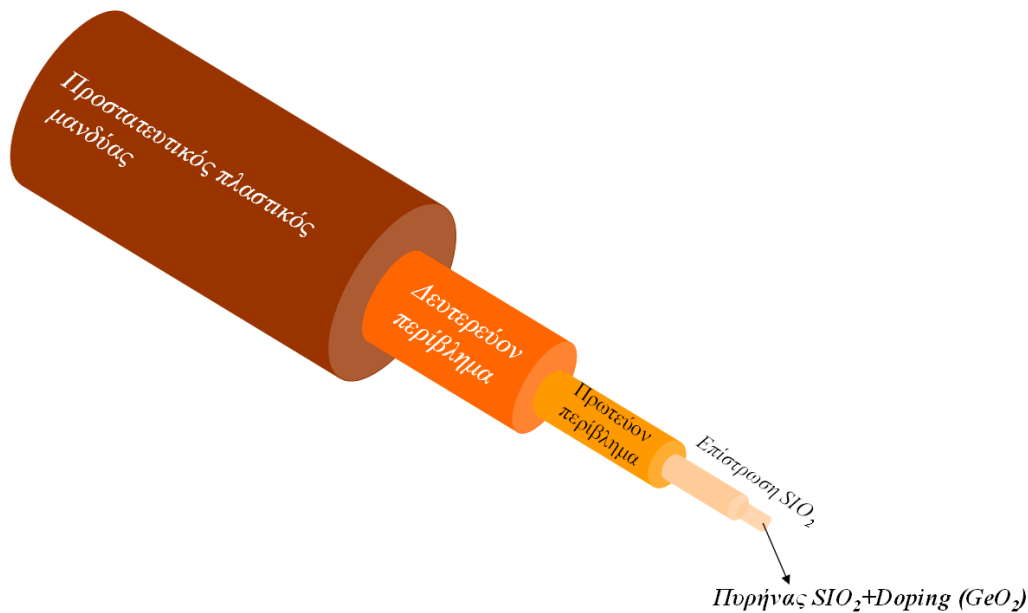
Όπως αναφέρθηκε, από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν εδώ και χρόνια τα δίκτυα είναι η μεγάλη αύξηση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης (bandwidth) τόσο στα εσωτερικά δίκτυα των επιχειρήσεων όσο και στα δίκτυα των ISPs, καθώς η εποχή όπου η κύρια χρήση του διαδικτύου ήταν κυρίως η ανταλλαγή γραπτών μηνυμάτων, έχει περάσει ανεπιστρεπτί. Οι χρήστες που χρησιμοποιούν το διαδίκτυο συνεχώς αυξάνονται, κάνοντας τα όρια του να εξαπλώνονται παντού. Επιπλέον, έχουμε μεγάλη αλλαγή και στον εμπλουτισμό των

υπηρεσιών που παρέχει το Internet στους χρήστες αφού οι μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης προήλθαν από τη συνεχή αύξηση του αριθμού των χρηστών του Internet αλλά και από τις αυξανόμενες απαιτήσεις των δικτυακών εφαρμογών. Όμως, το κόστος για τη μετάδοση αυτού του συνεχώς αυξανόμενου όγκου δεδομένων πρέπει να διατηρείται σε λογικά επίπεδα και η προσφορά του απαιτούμενου εύρους ζώνης να μπορεί να ικανοποιηθεί εύκολα και γρήγορα. Έτσι, κάθε επιχείρηση που δραστηριοποιείται στην παροχή εύρους ζώνης είχε την δυνατότητα εγκατάστασης νέων οπτικών ινών (κάτι το οποίο είναι πολύ δαπανηρό οικονομικά) ή αύξηση του εύρους ζώνης εγκατεστημένων ινών. Όπως αντιλαμβανόμαστε, η αύξηση τους εύρους ζώνης της υπάρχουσας οπτικής ίνας με την αύξηση του αριθμού μηκών κύματος, είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση. Αυτό κατάφερε και έγινε με την χρήση της τεχνολογίας WDM, που θα εξηγήσουμε παρακάτω αναλυτικά. Η Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM) είναι μία νέα τεχνική πολυπλεξίας, η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών ψηφιακών (TDM) σημάτων μέσω της εκχώρησης σε καθένα από αυτά, μιας ιδιαίτερης περιοχής μήκους κύματος.

## Οπτικές Ίνες [□][3]

**Ο**ι οπτικές ίνες θεωρούνται σήμερα ως την πιο αποδοτική λύση στα ενσύρματα μέσα μετάδοσης καθώς παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και κερδίζουν έδαφος συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Η εισβολή των οπτικών ινών στις ενσύρματες επικοινωνίες συνεχώς αυξάνεται, φτάνοντας μάλιστα σε ποσοστό το 40% κάθε χρόνο. Παρακάτω, γίνεται λόγος στην δομή και τα χαρακτηριστικά των οπτικών ινών.

Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από πολύ λεπτές υαλώδεις ίνες και διαθέτουν ικανότητα εκπομπής ίση με τα 2/3 της ταχύτητας του φωτός στο κενό. Το σήμα μεταφέρεται μέσα από τον *πυρήνα-κεντρική ίνα* (core) με την μορφή παλμών φωτός. Ο πυρήνας περιβάλλεται από την *επίστρωση* και αυτή από ένα πλαστικό μανδύα, γνωστός και ως *περίβλημα* και δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία της ίνας κατά την εγκατάσταση, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί. Όλα αυτά περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό μανδύα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

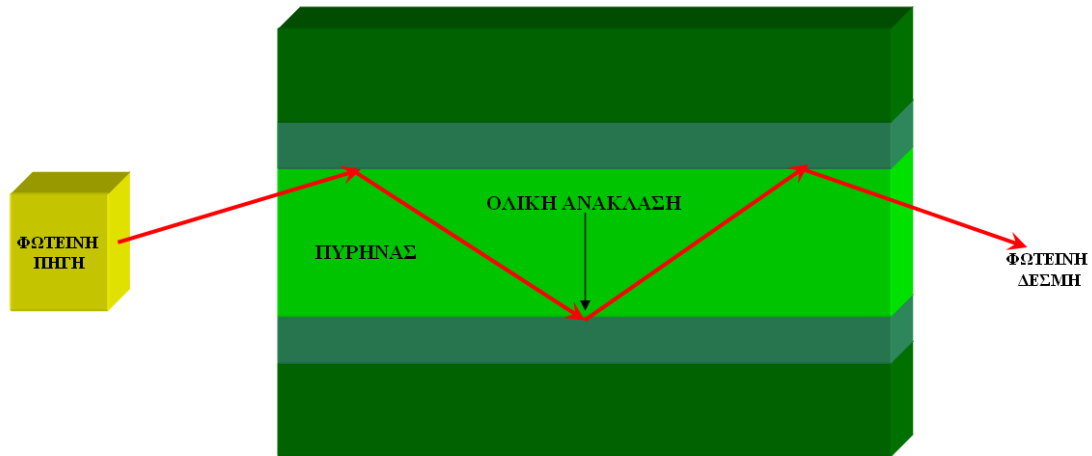


Σχήμα 1. Δομή Οπτικής Ίνας [2]

### Βασική Αρχή Λειτουργίας [3]

**Η** βασική αρχή ακτινοβολίας της οπτικής ίνας βασίζεται στην φύση του φωτός, το οποίο είναι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η διεύθυνση μετάδοσης της ενέργειας του φωτός είναι πάντα ευθύγραμμη, εφόσον δεν παρεμβάλλονται εμπόδια και αποτελεί μία ακτίνα φωτός. Για τα κύματα του φωτός, ισχύουν τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης, όταν αυτά προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Έχουμε τρεις ακτίνες φωτός. Την προσπίπτουσα, την ανακλώμενη και την διαθλώμενη. Οι τρεις, αυτές ακτίνες, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Έτσι, η δέσμη της μεταφερόμενης πληροφορίας, μεταδίδεται μέσω του πυρήνα της οπτικής ίνας (core) και έπειτα προσπίπτει με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της ίνας προς το άλλο άκρο. Για να γίνει σωστή μετάδοση, πρέπει το σήμα να υφίσταται ολικές ανακλάσεις, δηλαδή η ενέργεια της φωτεινής δέσμης να παραμένει εγκλωβισμένη στην οπτική ίνα. Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε ολική ανάκλαση, είναι ο δείκτης διάθλασης του εξωτερικού υλικού να είναι μικρότερος του εσωτερικού και η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία.

Στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε τη βασική λειτουργία της μεθόδου διάδοσης σε οπτικές ίνες. Η επίστρωση είναι με υλικό που έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του πυρήνα. Για να έχουμε πρόσπτωση των ακτίνων με γωνία μεγαλύτερη της οριακής, θα χρησιμοποιήσουμε μικρό αριθμητικό άνοιγμα, το οποίο δίνεται από την σχέση  $NA = \sin \cdot \theta_A$ .



Σχήμα 1. 2 Βασική λειτουργία της μεθόδου διάδοσης σε οπτικές ίνες [4]

## Μονότροπες Οπτικές Ίνες [4][5]

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των μονότροπων οπτικών ινών είναι ότι διαθέτουν πολύ μικρότερο πυρήνα και επιτρέπουν μόνο ευθύγραμμη μετάδοση του φωτεινού σήματος.



Μονότροπη οπτική ίνα.

Σχήμα 1. 3 Μετάδοση σε Μονότροπη Οπτική Ίνα[5]

Οι μονότροπες οπτικές ίνες έχουν πυρήνα με διάμετρο 8 ως 9 microns και το περίβλημα είναι μικρότερου δείκτη διάθλασης. Οι μονότροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση οπτικών σημάτων με χρήση πηγών laser στα 1310 nm και 1510 nm. Έτσι, η πιστότητα του σήματος διατηρείται σε μεγάλη απόσταση και το φαινόμενο της διασποράς περιορίζεται σημαντικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στο μεγαλύτερο εύρος ζώνης για την κατηγορία αυτή των ινών και στη χαμηλότερη εξασθένιση του σήματος κατά τη μετάδοση κάτι που κάνει την χρήση των μονότροπων ινών κατάλληλη για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις αλλά και για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης. Στον παρακάτω πίνακα [6] αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της τυπικής μονότροπης ίνας, της ίνας μετατοπισμένης διασποράς και της ίνα μη μηδενικής μετατοπισμένης διασποράς.



Είδος μονότροπης οπτικής ίνας	Χαρακτηριστικά	ITU-T
Τυπική μονότροπη ίνα Standard Single-mode Fiber (SMF)	Σχεδιάστηκε για να εξασφαλίζει μηδενική διασπορά (zero dispersion) στα 1310nm και να υποστηρίξει long-haul μετάδοση	G.652 <sup>1</sup> G.654
Ίνα μετατοπισμένης διασποράς Dispersion- Shifted Fiber (DSF)	Σχεδιάστηκε για να εξασφαλίζει μηδενική διασπορά (zero dispersion) στα 1550nm	G.653 <sup>2</sup>
Ίνα μη μηδενικής μετατοπισμένης διασποράς Non-zero Dispersion-shifted Fiber (NZDSF)	Σχεδιάστηκε για να εξασφαλίζει χαμηλή διασπορά (small dispersion) στα 1550nm με σκοπό να περιορίσει τα μη γραμμικά φαινόμενα σε WDM συστήματα	G.655 <sup>3</sup>

Πίνακας 1 Είδη μονότροπης οπτικής ίνας

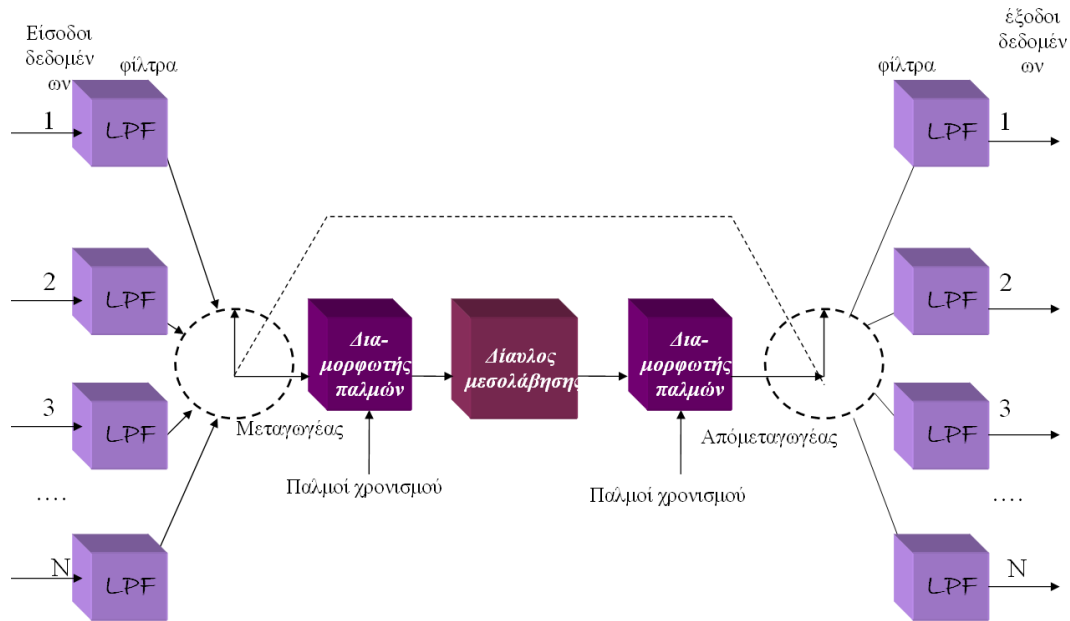
## Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM) [1][2]

**Η** πολυπλεξία (multiplexing) είναι μία τεχνική κατά την οποία ένας αριθμός ανεξάρτητων σημάτων μπορεί να συνδυαστεί σε σύνθετο σήμα κατάλληλο για μετάδοση σε ένα κοινό δίαυλο επικοινωνίας. Για να γίνει όμως μετάδοση ενός αριθμού τέτοιων σημάτων στον ίδιο φορέα, πρέπει τα σήματα να κρατηθούν απομακρυσμένα χωρίς να επηρεάζονται μεταξύ τους και έτσι ώστε να μπορούν να διαχωριστούν εύκολα στη λήψη. Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στο χρόνο ονομάζεται Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM) και η βασική αρχή λειτουργίας της απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

<sup>1</sup> G.652 (standard type): ~ 17 ps/nm/km χρωματική διασπορά στο 3<sup>ο</sup> παράθυρο-Κοινή χρήση

<sup>2</sup> G.653 (dispersion shifted): ~ 0 ps/nm/km χρωματική διασπορά στο 3<sup>ο</sup> παράθυρο- Έμφαση στο μη γραμμικό φαινόμενο της τετρακυματικής μίξης (4-Wave Mixing)

<sup>3</sup> G.655 (non-zero dispersion shifted): ~ 4 ps/nm/km διασπορά - Αποφυγή του μη-γραμμικού φαινομένου της τετρακυματικής μίξης (4-Wave Mixing) - Υψηλότερο Κόστος



Σχήμα 1. 4 Βασική αρχή λειτουργίας του Συστήματος TDM[1]

Όπως παρατηρούμε, στο παραπάνω σχήμα, στην είσοδο του πολυπλέκτη, κάθε σήμα πληροφορίας αρχικά περιορίζεται σε εύρος ζώνης από ένα βαθυπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τις συχνότητες που δεν είναι σημαντικές. Στην συνέχεια οι έξοδοι των βαθυπερατών φίλτρων εφαρμόζονται σε ένα μεταγωγέα του οποίου η λειτουργία είναι διπλής σημασίας, αφού παίρνει ένα στενό εύρος δείγματος από κάθε  $N$  πληροφορίες εισόδου με ρυθμό δειγματοληψίας  $1/T$ , που είναι μεγαλύτερος από το  $2W$ , όπου το  $W$  είναι η συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου εισόδου και στη συνέχεια ενώνει αυτά τα  $N$  δείγματα μέσα σε ένα διάστημα μετάδοσης. Μετά τη διαδικασία μεταγωγής, το πολυπλεγμένο σήμα εισέρχεται σε ένα διαμορφωτή παλμών (pulse modulator), ο οποίος μετασχηματίζει το πολυπλεγμένο σήμα σε μια μορφή πιο κατάλληλη για μετάδοση μέσω του κοινού διαύλου.

Η χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου αυξάνει σημαντικά το εύρος ζώνης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διάταξη πρέπει να διαχειριστεί  $N$  δείγματα που προέρχονται από  $N$  ανεξάρτητες πηγές πληροφορίας σε χρονική περίοδο ίση με το διάστημα δειγματοληψίας. Στην πλευρά λήψης του συστήματος, το λαμβανόμενο σήμα οδηγείται σε έναν αποδιαμορφωτή παλμών (pulse demodulator) που εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία από το διαμορφωτή παλμών. Τα στενού πλάτους δείγματα που παράγονται στην έξοδο του αποδιαμορφωτή, διανέμονται στα κατάλληλα φίλτρα ανακατασκευής μέσω ενός μεταγωγέα (decommutator), που λειτουργεί σε συγχρονισμό με τον μεταγωγέα του πομπού.

## Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM) [1][3]

Μια δεύτερη τεχνική πολυπλεξίας είναι η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στη συχνότητα, η οποία ονομάζεται Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM). Στην αρχή λειτουργίας της FDM τα εισερχόμενα σήματα πληροφορίας είναι βαθυπερατά και τα φάσματά τους δεν έχουν απαραίτητα μη μηδενικές τιμές όσο πλησιάζουμε τη μηδενική συχνότητα.

Μετά το κάθε σήμα εισόδου υπάρχει ένα βαθυπερατό φίλτρο, σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να αποκόπτει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας που δεν συνεισφέρουν στην αναπαράσταση του σήματος και εμποδίζουν τα άλλα σήματα πληροφορίας που μοιράζονται τον κοινό δίαυλο.

Τα φιλτραρισμένα σήματα εφαρμόζονται σε διαμορφωτές που μετατοπίζουν τις περιοχές συχνοτήτων των σημάτων, για να καταλαμβάνουν διαφορετικές μεταξύ τους περιοχές συχνοτήτων. Μια γεννήτρια φέρουσων συχνοτήτων λαμβάνει τις απαραίτητες φέρουσες συχνότητες. Για τη διαμόρφωση, χρησιμοποιούμε τη διαμόρφωση απλής πλευρικής ζώνης. Τα ζωνοπερατά φίλτρα που ακολουθούν τους διαμορφωτές χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν τη ζώνη κάθε διαμορφωμένης κυματομορφής στο προδιαγεγραμμένο εύρος της.

Οι έξοδοι των ζωνοπερατών φίλτρων ενώνονται έτσι ώστε να σχηματίσουν την έξοδο στον κοινό δίαυλο. Στην πλευρά της λήψης χρησιμοποιείται μια σειρά ζωνοπερατών φίλτρων, με τις εισόδους τους συνδεδεμένες παράλληλα, για να διαχωρίσει τα σήματα πληροφορίας με βάση τη ζώνη συχνοτήτων που καταλαμβάνουν. Τελικά, τα αρχικά σήματα πληροφορίας επανακτώνται και οδηγούνται σε ξεχωριστούς αποδιαμορφωτές.

## Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος

**Σ**το δίκτυο κορμού το κύριο ζητούμενο είναι η καλύτερη και βέλτιστη αξιοποίηση της ίνας ώστε να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά δεδομένων μέσα από αυτήν. Έτσι η τεχνολογία της Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) βασίστηκε στην ιδέα ότι σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια δεδομένη φέρουσα συχνότητα. Επομένως από την ίνα μπορούν να διαδοθούν περισσότερα από ένα οπτικό σήμα διαφορετικής συχνότητας που το καθένα από αυτά μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα από τα υπόλοιπα τα οποία αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η συνολική μεταδιδόμενη χωρητικότητα της ίνας. Για να υλοποιηθεί ένα δίκτυο κορμού βασισμένο στην τεχνολογία WDM χρειάζεται η ύπαρξη και συμμετοχή επιπρόσθετων εξαρτημάτων όπως οπτικοί πολυπλέκτες και άποπολυπλέκτες (optical multiplexers & demultiplexers) των οποίων η λειτουργία είναι να συνδυάζουν τα εισερχόμενα οπτικά σήματα (αυτό γίνεται στην εκπομπή από τον λεγόμενο πολυπλέκτη) και στην λήψη να διαχωρίζουν (αποπολυπλέκουν) τα αρχικά οπτικά σήματα, τους οπτικούς πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (add/drop optical multiplexers) και οπτικούς διασταυρωτήρες (διασυνδετές) (optical cross-connect components). Περισσότερες λεπτομέρειες την τεχνολογίας WDM θα αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.

## Fiber-To-The-Home (FTTH)[7]

**Η** τεχνολογία αμιγώς οπτικών δικτύων πρόσβασης αποκαλείται ευρέως Fiber-To-The-Home (FTTH). Πρόκειται για οπτικά δίκτυα πρόσβασης όπου η τερματική συσκευή του (οπτικού) δικτύου (ONU) ανήκει στον τελικό συνδρομητή. Η χωρητικότητα αν και διαφέρει κατά περίπτωση, υπερβαίνει σε κάθε περίπτωση αυτή άλλων εναλλακτικών δικτύων πρόσβασης.

## Χαρακτηριστικά Τεχνολογίας FTTH[7]

- ✓ Πρακτικά απεριόριστη χωρητικότητα πληροφορίας
- ✓ Ευκολία αναβάθμισης – το μέσο δεν περιορίζει την εισαγωγή νέων τεχνικών μετάδοσης
- ✓ Σχετικά εύκολη εγκατάσταση
- ✓ Επιτρέπει συμμετρικές υπηρεσίες
- ✓ Περιορισμένο κόστος λειτουργίας & συντήρησης (σε σχέση με άλλες ενσύρματες τεχνολογίες ευαίσθητες στη γήρανση, κλιματικούς, περιβαλλοντικούς παράγοντες κ.α.), Όλα τα προτερήματα της μετάδοσης μέσω οπτικών ινών
- ✓ Μεγάλες αποστάσεις
- ✓ Ισχύ, ευελιξία, αξιοπιστία
- ✓ Μικρότερης διαμέτρου και βάρους καλώδια
- ✓ Ασφάλεια
- ✓ Ανοχή σε παρεμβολές και θόρυβο (electromagnetic interference EMI)

### FTTH: Σύγκριση Οπτικών Ινών – Χαλκού

Οπτική ίνα	Χαλκός
Χρησιμοποιεί φωτεινά σήματα	Χρησιμοποιεί ηλεκτρικά σήματα
Διηλεκτρικά μη αγώγιμο (nonconductive) υλικό	Ηλεκτρικά αγώγιμο
– Εύρωστο απέναντι σε Η/Μ παρεμβολές (EMI immune)	– Ευάλωτο σε Η/Μ παρεμβολές (EMI)
Χαμηλή διαστολή με τη θερμοκρασία	Υψηλή διαστολή με τη θερμοκρασία
Εύθραστο, σταθερό υλικό	Εύπλαστο υλικό
Χημικά σταθερό	Ευπαθές σε διάβρωση και γαλβανισμό

Πίνακας 2 Σύγκριση Οπτικών Ινών – Χαλκού

### Αρχιτεκτονικές FTTx

Με το γενικό όρο «Fiber to the x (FTTX)», αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί οπτική ίνα για την αντικατάσταση μέρους ή όλου του χαλκού ή άλλων τεχνολογιών στον τοπικό βρόχο. Ανάλογα με το βαθμό συμμετοχής της οπτικής ίνας στη διαμόρφωση του τοπικού βρόχου, διακρίνουμε τρεις υποπεριπτώσεις:

- ✓ Curb, Cabinet,
- ✓ Building,
- ✓ Home,

ανάλογα με τον βαθμό προσέγγισης του συνδρομητή με ίνα.

Πρόκειται για οπτικά δίκτυα πρόσβασης τα οποία στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του μήκους του χάλκινου βρόχου, φέρνοντας το ευρυζωνικό μέσο μετάδοσης (οπτική ίνα) κοντά στον συνδρομητή. Τα δίκτυα FTTx μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- ✓ Οπτική Ινα στην Καμπίνα - Fiber To The Cabinet (FTTC)
- ✓ Οπτική Ινα στο Κτίριο - Fiber To The Building (FTTB)

## Οπτική ίνα στο Σπίτι –FTTH[7]

Σύμφωνα με τον ορισμό του FTTH Council, ως «Fiber to the Home (FTTH)» ορίζεται η τηλεπικοινωνιακή αρχιτεκτονική σύμφωνα με την οποία μία επικοινωνιακή οδός εκτείνεται με χρήση αποκλειστικά οπτικού μέσου από τον εξοπλισμό μεταγωγής ενός δικτυακού παρόχου έως το χώρο διαμονής ή εργασίας κάθε χρήστη. Η οπτική ίνα τερματίζεται εντός του καθαυτού χώρου διαμονής ή εργασίας του καθενός από τους παραπάνω χρήστες. Η προαναφερθείσα επικοινωνιακή οδός παρέχεται με σκοπό την εξυπηρέτηση τηλεπικοινωνιακής κίνησης από και προς ένα ή περισσότερους χρήστες, για μία ή περισσότερες υπηρεσίες και από ή προς έναν ή περισσότερους παρόχους υπηρεσιών. Ο παραπάνω ορισμός δεν συμπεριλαμβάνει αρχιτεκτονικές σύμφωνα με τις οποίες το οπτικό μέσο τερματίζεται εκτός του χώρου διαμονής ή εργασίας του χρήστη.

## Οπτική Ινα στην Καμπίνα - Fiber To The Cabinet (FTTC) [4]

Η οπτική ίνα φτάνει μέχρι μία καμπίνα (ONU) στο πεζοδρόμιο και εξυπηρετεί τους πελάτες της γύρω περιοχής μέσω δικτύου χαλκού, συνήθως του υπάρχοντος τοπικού βρόχου. Η περίπτωση αυτή περιορίζει το μήκος του χαλκού σε μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, επιτρέποντας ταχύτητες πρόσβασης μέχρι μερικές δεκάδες Mb/s, π.χ. χρησιμοποιώντας συστήματα VDSL. Η λύση αυτή θεωρείται κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συνδρομητών, οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε μία μικρή περιοχή (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο) και έχουν σχετικά μικρές απαιτήσεις ταχύτητας πρόσβασης.

## Οπτική Ινα στο Κτίριο - Fiber To The Building (FTTB)[8]

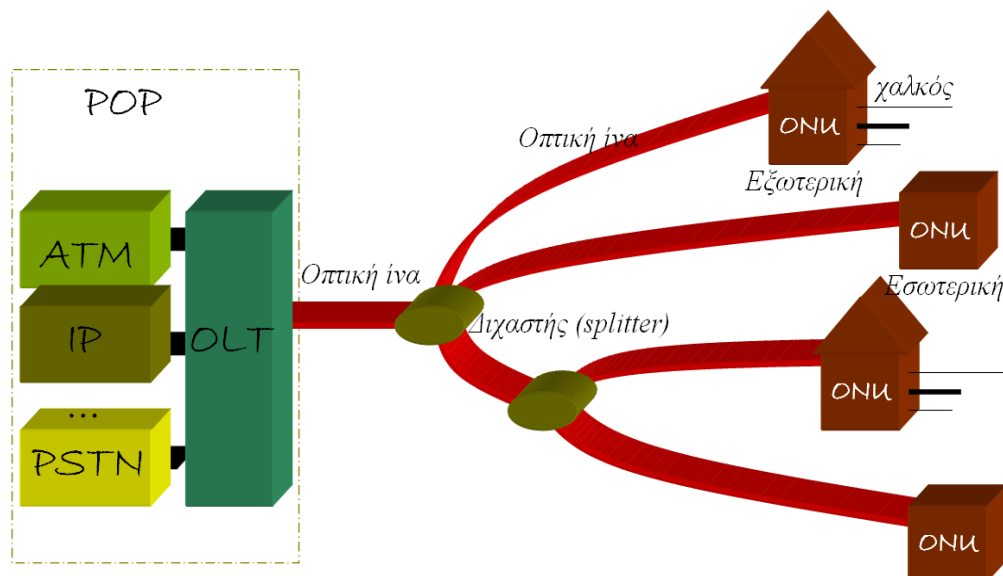
Σύμφωνα με τον ορισμό του FTTH Council, ως «Fiber to the Building (FTTB)» ορίζεται η τηλεπικοινωνιακή αρχιτεκτονική σύμφωνα με την οποία επικοινωνιακή οδός εκτείνεται με χρήση αποκλειστικά οπτικού καλωδίου από τον εξοπλισμό μεταγωγής ενός δικτυακού παρόχου έως τουλάχιστον το όριο της ιδιοκτησίας που περιβάλλει το χώρο διαμονής ή εργασίας ενός ή περισσοτέρων χρηστών και τερματίζεται πριν από τον καθαυτό χώρο διαμονής ή εργασίας του καθενός από τους παραπάνω χρήστες. Το επικοινωνιακό μονοπάτι προς τον ή τους χρήστες ολοκληρώνεται με χρήση άλλου μέσου, όπως ομοαξονικό καλώδιο, συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού ή ασύρματη ζεύξη. Η προαναφερθείσα επικοινωνιακή οδός παρέχεται με σκοπό την εξυπηρέτηση τηλεπικοινωνιακής κίνησης από και προς ένα ή περισσότερους χρήστες, για μία ή περισσότερες υπηρεσίες και από ή προς ένα ή περισσότερους παρόχους υπηρεσιών. Ο παραπάνω ορισμός δεν συμπεριλαμβάνει αρχιτεκτονικές σύμφωνα με τις οποίες το οπτικό μέσο τερματίζεται σε δημόσιο χώρο όπως καμπίνα εξωτερικού χώρου. Είναι προφανές ότι η FTTB αποτελεί μια μεταβατική αρχιτεκτονική για την παροχή υπηρεσιών σε υπάρχοντα κτίρια και μπορεί να είναι συμπληρωματική ως προς την FTTH, η οποία αναπτύσσεται κυρίως σε νέα κτίρια. Βέβαια, με εισαγωγή, σε δεύτερη φάση οπτικών καλωδίων εντός του κτιρίου, η αρχιτεκτονική FTTB μπορεί να μετεξελιχθεί σε πλήρη αρχιτεκτονική FTTH.

Η οπτική ίνα μπαίνει στο κτίριο των συνδρομητών (συγκρότημα γραφείων, πολυκατοικία, σπίτι) και η ONU τοποθετείται εσωτερικά μέσα στο κτίριο εξυπηρετώντας τους συνδρομητές αυτού. Το μήκος του χαλκού περιορίζεται σε αυτό της δομημένης καλωδίωσης του κτιρίου ή ακόμη και μηδενίζεται (οπτική εσωτερική καλωδίωση), επιτρέποντας πρακτικά οποιαδήποτε ταχύτητα πρόσβασης. Η λύση αυτή

θεωρείται κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεμονωμένων μεγάλων επιχειρήσεων, με μεγάλες απαιτήσεις ταχύτητας ή κτιρίων με μεγάλη συγκέντρωση μικρών συνδρομητών (π.χ. εμπορικά και επαγγελματικά κέντρα).

## Παθητικά οπτικά δίκτυα [7]

**Σ**τα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks – PON), η λειτουργία τους βασίζεται σε αυτή από σημείο προς πολλαπλά σημεία. Αυτά τα σημεία δεν περιέχουν ενεργά στοιχεία οπότε και δεν γίνεται μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα περιλαμβάνονται από τρία βασικά στοιχεία, απαραίτητα για την λειτουργία τους : παθητικοί ζεύκτες (couplers), διαιρέτες (splitters) και συνδυαστές (combiners).



Σχήμα 1. 5 Παράδειγμα εφαρμογής τοπολογίας σε συνδυασμό με την αρχιτεκτονική Fiber To The Curb (FTTC)

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα αποτελούν αξιόπιστη λύση για τα Δίκτυα Πρόσβασης (Access Networks – AN) και αυτό γιατί εξασφαλίζουν τη χρήση υπηρεσιών ευρείας ζώνης με οικονομικούς όρους. Με αυτό τον τρόπο, καθίσταστε εφικτή η πρόσβαση από μεμονωμένους χρήστες ή και μικρές επιχειρήσεις, οι οποίοι δεν έχουν τη οικονομική άνεση να κάνουν χρήση οπτικών ινών αποκλειστικής χρήσης. Τα οφέλη από την χρήση των παθητικών οπτικών δικτύων είναι αναμφισβήτητα πολλά και ουσιώδη, γιατί από την μία επιτρέπουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ του κέντρου σύνδεσης και του συνδρομητή και από την άλλη μειώνουν το άρα και το κόστος των

οπτικών ινών στον τοπικό βρόχο. Επίσης, εξασφαλίζουν μεγάλο εύρος ζώνης αφού γίνεται χρήση οπτικών ινών μέχρι το χρήστη. Η αρχιτεκτονική οπτική ίνα στο σπίτι (FTTH) και οπτική ίνα στο κτίριο (FTTB) παρέχουν το μέγιστο εύρος ζώνης εξαιτίας της μεγάλης διεισδυτικότητας της ίνας. Επομένως, η αρχιτεκτονική οπτική ίνα στο πεζοδρόμιο (FTTC) κρίνεται ως η πιο αποδοτική από οικονομικής πλευράς.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα παθητικά οπτικά δίκτυα είναι τύπου σημείου προς πολλαπλά σημεία οπότε είναι κατάλληλα για μετάδοση πληροφορίας ενώ περιορίζουν σε σημαντικό βαθμό τη χρήση πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών στα σημεία διαχωρισμού. Έτσι, η επίπονη και ακριβή διαδικασία συντήρησης και τροφοδότησης των στοιχείων αυτών περιορίζεται σημαντικά. Επίσης, στα σημεία διαχωρισμού εγκαθίστανται παθητικά στοιχεία (αντί για ενεργά), τα οποία έχουν σαν πλεονέκτημα να μην απαιτούν τροφοδοσία, αφού η τοποθέτησή τους γίνεται εσωτερικά στο έδαφος κατά την εγκατάσταση του δικτύου, χωρίς να απαιτούν μελλοντική συντήρηση. Τέλος, μας επιτρέπουν την εύκολη αναβάθμιση σε υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων καθώς και τη χρήση πολλαπλών μηκών κύματος.

Είναι γεγονός ότι η σχεδίαση ενός δικτύου παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα των εν λόγω δικτύων. Έτσι, τα χαρακτηριστικά της χρήσης τεχνολογίας παθητικών οπτικών δικτύων σε Δίκτυα Πρόσβασης υποδεικνύουν τον καθοριστικό ρόλο που έχει η σωστή σχεδίαση του δικτύου. Επομένως, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο τοπικός βρόχος συσσωρεύει κίνηση από ένα μικρό αριθμό χρηστών σε αντίθεση με ένα μητροπολιτικό δίκτυο και έτσι, το κόστος εγκατάστασης και χρήσης αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές, αν όχι τη σημαντικότερη, παράμετρο κατά την διάρκεια του σχεδιασμού του.

## Βασικά στοιχεία οπτικών δικτύων

**T**α βασικά στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στο σχεδιασμό των οπτικών δικτύων είναι τα εξής :

### ***Central Office (CO) – Κεντρικό γραφείο***

Κάθε ίνα τερματίζει σε ένα λεγόμενο κεντρικό γραφείο πάνω σε μια μονάδα οπτικής γραμμής τερματισμού (OLT, Optical Line Terminal), δηλαδή το CO είναι ο κεντρικός τερματικός αποδέκτης από την πλευρά του τηλεπικοινωνιακού παρόχου, όπου κάθε ίνα τερματίζει σε μια πόρτα μιας OLT.

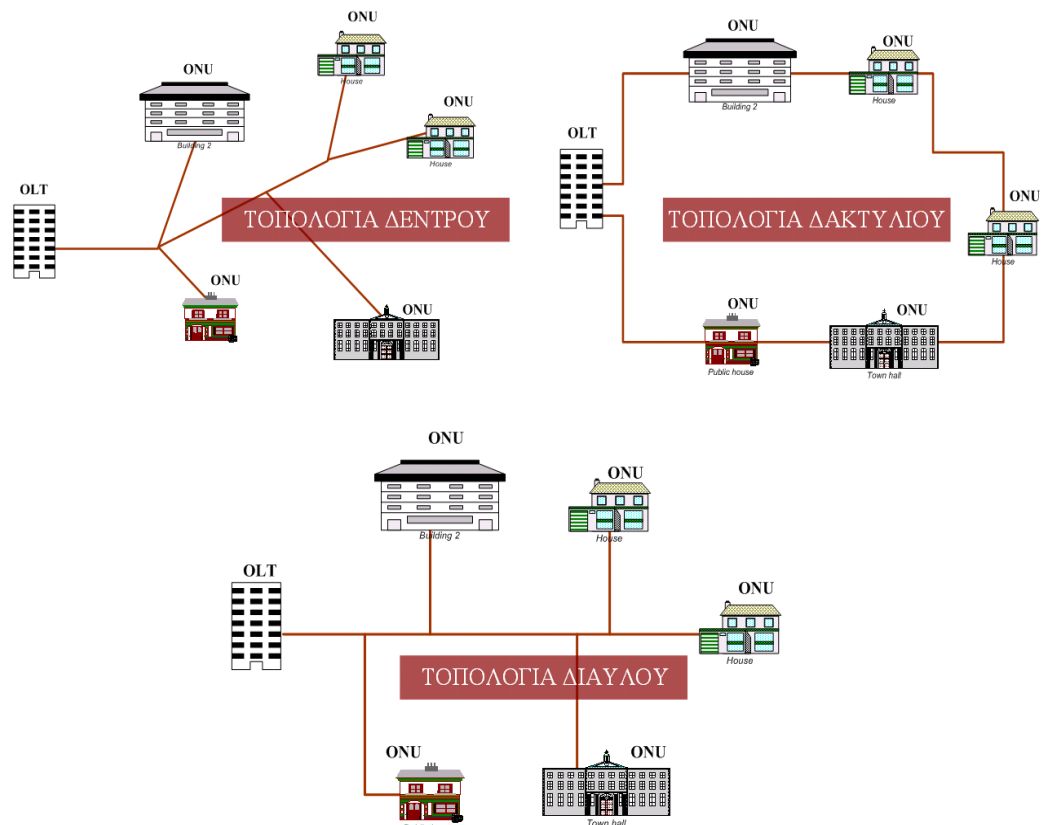
Η OLT είναι η τερματική μονάδα από την μεριά του παρόχου. Ο σχεδιασμός του CO υλοποιείται με εξοπλισμό τέτοιον, ώστε να μπορεί να εξυπηρετεί ποικίλες μορφές επιπέδων δεδομένων, όπως ATM, SONET κ.ο.κ

### *Optical Line Unit (ONU) - Οπτική τερματική μονάδα*

Η ONU είναι η οπτική τερματική μονάδα από την μεριά του χρήστη. Στην ONU γίνεται η οπτοηλεκτρονική μετατροπή καθώς και η αποπολυπλεξία του σήματος. Γενικά η μετάδοση των δεδομένων ή αλλιώς ροή ανόδου από την ONU προς τον πάροχο (upstream) γίνεται στα 1330nm, ενώ η πρόσληψη δεδομένων ή αλλιώς ροή καθόδου στα 1510nm (downstream).

## Τοπολογίες [7]

Οι τοπολογίες που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης είναι αυτές του δακτυλίου, του δέντρου και του διαύλου.



Σχήμα 1. 6 Τοπολογίες οπτικών δικτύων πρόσβασης

Προφανώς, η επιλογή μια από των παραπάνω διαθέσιμων τοπολογιών δεν είναι απλή διαδικασία και πάντα τα κριτήρια είναι η ευκολία που επιδιώκουμε στην



αναβάθμιση, το οικονομικό κόστος, η ασφάλεια που θέλουμε να εξασφαλίσουμε αλλά και η συντήρηση που θέλουμε να παρέχουμε στο δίκτυό μας. Γι' αυτό η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας θα πρέπει πάντα να περιλαμβάνει όσο τον δυνατόν από τα παραπάνω, ανάλογα με τις απαιτήσεις μας.

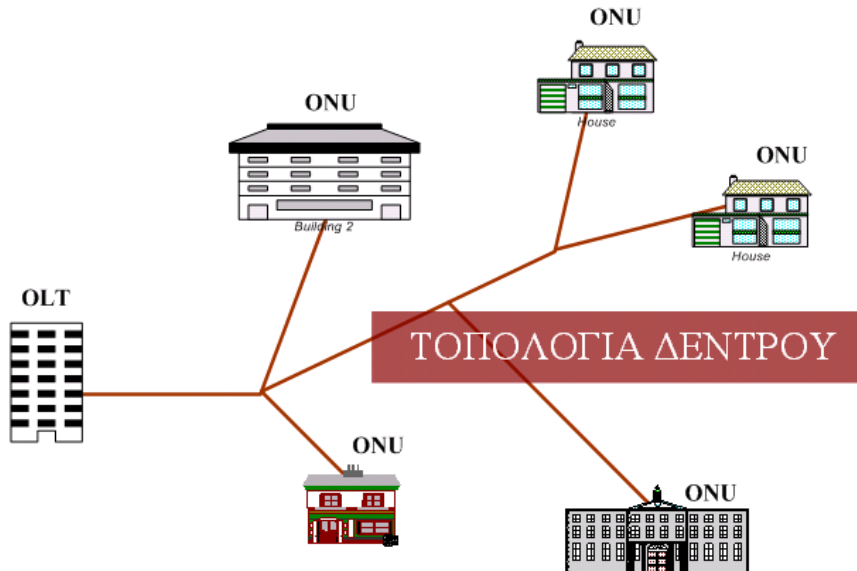
## Τοπολογία Δέντρου[7][8]

**T**ο βασικό χαρακτηριστικό αυτής της τοπολογίας που διέπει και την αρχή λειτουργίας του, είναι το γεγονός ότι το σήμα διαμοιράζεται με την βοήθεια των παθητικών διαχωριστών που τοποθετούνται σε διάφορα σημεία της διακλάδωσης σε διαδοχικές θέσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η οπτική ίνα η οποία εξέρχεται από το κέντρο, να μπορεί να συνδεθεί με πολλά διαφορετικά σημεία τερματισμού. Έτσι, δημιουργεί συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία ή συνδέσεις μιας ONU με πολλές OLT. Το πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι παρέχει και επιτρέπει την κοινή χρήση του εξοπλισμού που βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής αλλά και της οπτικής ίνας, οπότε έχουμε και μειωμένο κόστος.

Απ' την άλλη, ο διαμοιρασμός του σήματος προκαλεί μείωση της οπτικής ισχύος με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα δίκτυο. Η εκπομπή στην άνοδο και η εκπομπή στην κάθοδο αποτελεί σημαντική ιδιότητα αυτής της τοπολογίας και συγκεκριμένα αυτό που την κάνει κατάλληλη είναι ο τρόπος με τον οποίο αυτή συμβαίνει. Ενώ στο σύνολο των περιπτώσεων το σήμα που εκπέμπεται από το τοπικό κέντρο προς τους συνδρομητές αφορά την καθοδική μετάδοση, στην ανοδική εκπομπή γίνεται χρήση ενός συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, του TDMA, που η λειτουργία του βασίζεται στην πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση χρόνου. Έτσι, επιτυγχάνεται πολυπλεξία των δεδομένων που βρίσκονται στο κοινό κανάλι ανόδου. Όμως, για κάτι τέτοιο απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και για το τοπικό κέντρο αλλά και για την πλευρά του συνδρομητή. Συγκεκριμένα, για τις οπτικές πολυπλέξεις / αποπολυπλέξεις χρησιμοποιούνται συσκευές WDM (πολυπλεξίας μήκους κύματος). Η υλοποίηση και εγκατάσταση του εξοπλισμού είναι διαδικασία απλή και εύκολη.

Όσον αφορά την αναβάθμιση της τοπολογίας δέντρου μπορεί να γίνει αποτελεσματικά. Η αποτελεσματικότητα αυτή βρίσκεται εφαρμογή στο γεγονός που παρέχει η δυνατότητα μετάδοσης σε διαφορετικά μήκη κύματος. Έτσι, η προσθήκη

νέων υπηρεσιών με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης γίνεται με εύκολο και γρήγορο τρόπο και ταυτόχρονα δημιουργείται το ζήτημα να προστεθεί απαραίτητος επιπλέον εξοπλισμός, με το ανάλογο πάντα κόστος. Ο επιπλέον εξοπλισμός που χρειάζεται είναι συσκευές τύπου WDM στα ONTs και στη OLT.



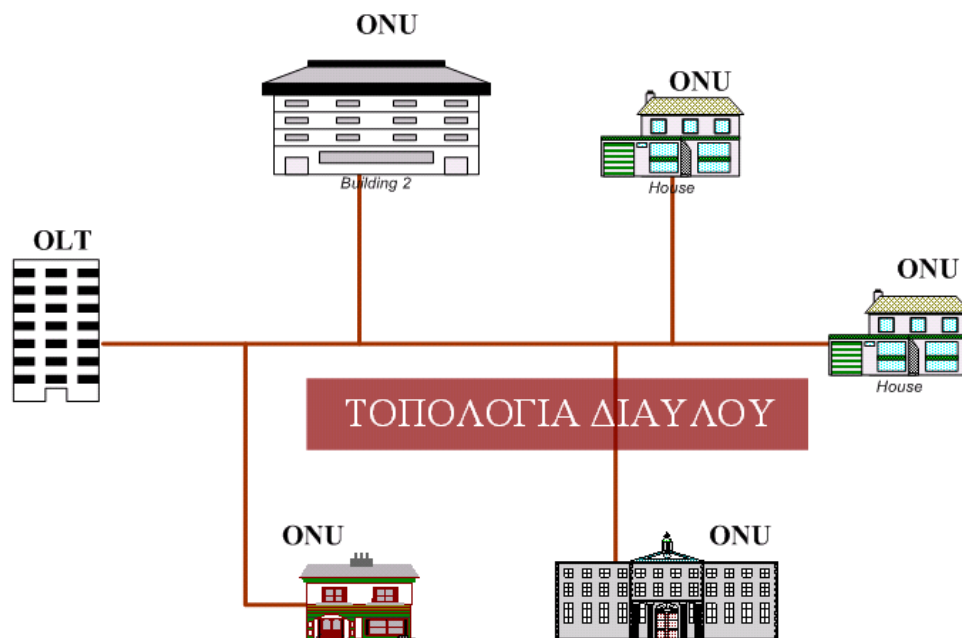
Σχήμα 1. 7 Τοπολογία δέντρου

Η παρακολούθηση του δικτύου και ο εντοπισμός των σφαλμάτων είναι πολύπλοκη διαδικασία καθώς απαιτούν την ανάπτυξη κατάλληλων διαδικασιών ελέγχου. Πολλές φορές επιτυγχάνεται με κατάλληλους αλγορίθμους ελέγχου και διαίτησίας του μέσου, εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων αλλά η συντήρηση γίνεται με απλές διαδικασίες. Τέλος, οι λειτουργίες ασφάλειας μπορεί να περιλαμβάνουν την υλοποίηση τεχνικών κρυπτογράφησης. Η ασφάλεια είναι σύμφωνη με τα πρότυπα των υαρχόντων δημοσίων δικτύων ακόμα και στην περίπτωση που δε χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση.

Οι δομές παθητικών δέντρων είναι κατάλληλες και για την περίπτωση κατανεμημένων υπηρεσιών, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ένα ξεχωριστό μήκος κύματος για κάθε υπηρεσία. Το παθητικό δέντρο παρέχει ένα καλό βαθμό μερισμού πόρων, μειώνοντας έτσι το κόστος ανά συνδρομητή.

## Οπτικός διάυλος [8]

Τα προτερήματα αυτής της τεχνολογίας για τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης είναι ότι ελαχιστοποιεί τον αριθμό των οπτικών πομποδεκτών που χρειάζονται. Η υλοποίηση αυτής της τοπολογίας χρησιμοποιεί διαφορετική οπτική ίνα για κάθε κατεύθυνση. Στην συνέχεια, ένας οπτικός διαχωριστής δεσμεύει λίγο από το οπτικό σήμα στους κόμβους σύνδεσης του συνδρομητή και το κατευθύνει προς αυτόν. Μια τέτοια τοπολογία χρησιμοποιεί σαν βασική συσκευή της έναν ασύμμετρο οπτικό διαχωριστή/συνδυαστή. Ένας οπτικός ενισχυτής έχει σαν λειτουργία να διαχωρίζει στην καθοδική κατεύθυνση από το δίαυλο περίπου το ελάχιστο ποσό οπτικής ισχύος που χρειάζεται για τη σωστή λειτουργία του δέκτη κάθε συνδρομητή. Αυτό επιτρέπει την επαρκή ισχύς στο δίαυλο για τους άλλους συνδρομητές. Στην ανοδική πάλι κατεύθυνση, η ισχύς η οποία εκτέμπεται από τους συνδρομητές, μέσω των δυνδιαστών είναι υπεύθυνη για την συνολική ανοδική κυκλοφορία σε μία ίνα που οδηγεί προς το τοπικό κέντρο. Οι διαφορετικές μεταξύ τους παγιδεύσεις εισάγουν ανακρίβειες στην ποσότητα της οπτικής ισχύος που παγιδεύτηκε. Επομένως, πρέπει να προνοήσουμε για τις αστάθειες που παρουσιάζονται στην απόδοση της παγίδευσης κάτι το οποίο κάνει τον ισολογισμό της ισχύος κρίσιμο στην τοπολογία διαύλου.



Σχήμα 1. 8 Τοπολογία διαύλου

Όπως και στην περίπτωση της τοπολογίας δέντρου, έτσι και εδώ η αναβάθμιση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διαφορετικών μηκών κύματος. Και σε αυτή

την περίπτωση η αξιοπιστία, η συντήρηση και η ασφάλεια είναι αντίστοιχες με αυτής της τοπολογίας δέντρου. Βασικό πλεονέκτημα, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η βέλτιστη κατανομή της οπτικής ίνας σε σύγκριση με το οπτικό δέντρο. Ο αριθμός των οπτικών εξαρτημάτων είναι ο ίδιος αλλά με την σημαντική διαφορά ότι οι παθητικοί παγιδευτές μπορεί να είναι πιο ακριβοί από τους διαχωριστές, εξαιτίας των αυστηρών απαιτήσεων κατασκευής. Αν παραλείψουμε αυτό το γεγονός, το κόστος λειτουργίας της τοπολογίας είναι ίδιο με την περίπτωση της τοπολογίας δέντρου.

### Τοπολογία δακτυλίου [7][8]

**Β**ασική διάταξη αυτής της τοπολογίας είναι οι ζεύξεις από σημείο - σε - σημείο, οι οποίες σχηματικά δημιουργούν ένα δακτύλιο, του οποίου ένας κόμβος είναι το κέντρο μεταγωγής (Εικόνα). Τα πλεονεκτήματα από την χρήση της τοπολογίας είναι το χαμηλό κόστος καθώς και η οικονομία που εξασφαλίζει και αυτό γιατί στο κέντρο χρησιμοποιείται μόνο ένα OLT. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της τοπολογίας αυτής είναι ότι χρησιμοποιεί σχετικά μικρότερο μήκος ίνας από αυτές του δακτυλίου και του διαύλου. Τέλος, ένα επιπλέον πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι η μίσθωση των άδειων χρονοθυρίδων για επαναχρησιμοποίηση και η εκπομπή τους στο επόμενο σταθμό και αυτό γιατί όταν το πακέτο δεομένων φτάσει στον προορισμό του, η πληροφορία αφαιρείται δημιουργώντας έτσι μια κενή χρονοθυρίδα. Η παραπάνω διαδικασία βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα όπου δεν υπάρχει σημαντική τοπική κίνηση και όλες οι μεταγωγές γίνονται στο κέντρο μεταγωγής.



Σχήμα 1. 9 Τοπολογία δακτυλίου

### Σύγκριση τοπολογιών [8]

Είναι πολύ σημαντικό να επιλέξουμε την κατάλληλη κάθε φορά τοπολογία, ανάλογα με τις απαιτήσεις μας στην ευκολία αναβάθμισης, στην αξιοπιστία, στην ασφάλεια, στην συντήρηση και προπαντός ανάλογα με το οικονομικό κόστος. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται όλα τα πλεονεκτήματα των παραπάνω τοπολογιών.

Ένα βασικό στοιχείο που κάνει τα παθητικά οπτικά δίκτυα και των επιμέρους δομών τους να πλεονεκτούν είναι η κατανομή του κόστους στον χρόνο. Αυτό συνεπάγεται με την ευκολία που έχουν στην αναβάθμιση τους. Όπως συμπεραίνουμε από τον παρακάτω πίνακα, η τοπολογία δέντρου πλεονεκτεί και βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε δίκτυα πρόσβασης καθώς παρέχει ευκολία αναβάθμισης, είναι κατάλληλη για παροχή κατακευματισμένων υπηρεσιών, είναι συμβατή με τις υπάρχουσες δομές και τέλος χρησιμοποιεί πολύ απλά οπτικά εξαρτήματα, όπως διαχωριστές.

	Τοπολογία δακτυλίου	Τοπολογία διαύλου	Τοπολογία δέντρου
<i>Ευκολία</i>	<i>Πολύ Καλή</i>	<i>Πολύ Καλή</i>	<i>Πολύ Καλή</i>
<i>Στην αναβάθμιση</i>	<i>Καλή</i>	<i>Καλή</i>	<i>Καλή</i>
<i>Αξιοπιστία</i>	<i>Πολύ Καλή</i>	<i>Πολύ Καλή</i>	<i>Πολύ Καλή</i>
<i>Συντήρηση</i>	<i>Καλή</i>	<i>Καλή</i>	<i>Καλή</i>

<i><b>Εξέλιξη</b></i>	<i><b>Μηδενική</b></i>	<i><b>Μηδενική</b></i>	<i><b>Καλή</b></i>
<i><b>Συμβατότητα</b></i>	<i><b>Μηδενική</b></i>	<i><b>Μηδενική</b></i>	<i><b>Καλή</b></i>
<i><b>Υπηρεσίες</b></i>	<i><b>Αδύνατον</b></i>	<i><b>Αδύνατον</b></i>	<i><b>Ευνοϊκό</b></i>
<i><b>Κόστος εγκατάστασης</b></i>	<i><b>Χαμηλό</b></i>	<i><b>Χαμηλό</b></i>	<i><b>Χαμηλό</b></i>

Πίνακας 3 Σύγκριση τοπολογιών [8]

### Φυσικό στρώμα [8]

Για την ανταλλαγή δεδομένων σ' ένα οπτικό παθητικό δίκτυο πρέπει να υπάρχει σύνδεση, άρα και επικοινωνία, μεταξύ του οπτικού τερματιστή γραμμής (OLT) και της οπτικής μονάδας δικτύου (ONU). Η ανταλλαγή δεδομένων σε ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) βασίζεται στην επικοινωνία σημείου προς πολλαπλά σημεία για την downstream κατάσταση, δηλαδή μετάδοση από το OLT στο ONU. Αντίθετα, είναι πολλαπλών σημείων προς σημείο για το ρεύμα ανόδου. Ο οπτικός τερματιστής γραμμής (OLT) είναι το σημείο προσαρμογής μεταξύ ενός δικτύου PON και ενός δικτύου κορμού και βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής. Από την άλλη, το ONT βρίσκεται στο κτίριο του συνδρομητή και αποτελεί τον τερματιστή του δικτύου (FTTH, FTTB). Ποιο διαδοδομένη και συνηθισμένη είναι η χρήση ONU (FTTC), η οποία παρέχει σημεία προσαρμογής, έτσι ώστε να καλύπτει και να υποστηρίζει περισσότερους από ένα χρήστη, κάτι το οποίο αποτελεί οικονομική λύση.

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο πρόσβασης αντιμετωπίζει προβλήματα κατά την υλοποίηση του σχεδιασμού του, όποια κατηγορία τοπολογίας και αν χρησιμοποιεί. Ένα δίκτυο πρόσβασης που βασίζεται σε PON έχει να αντιμετωπίσει διάφορες προκλήσεις κατά το σχεδιασμό του, ανεξαρτήτως της φυσικής του τοπολογίας, δένδρου, αστέρα κ.τ.λ. Σε πρώτο στάδιο πρέπει να γίνει η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου για το στρώμα δεδομένων. Οι επιλογές είναι οι εξής: SONET, ATM, Ethernet.

Το SONET χρησιμοποιείται ως επι το πλείστον σε πολλά δίκτυα και παράλληλα έχει ανοχή σε τυχόν λάθη, καθώς μπορεί να τα διαχειρίζεται αποτελεσματικά και έγκαιρα. Από την άλλη όμως, αποτελεί αρκετά ακριβό υλικό (hardware) και υψηλό

κόστος για τον τοπικό βρόχο, κάνοντας έτσι το συνολικό του κόστος σημαντικό μειονέκτημα. Επίσης, η χρήση του δεν είναι αποδοτική όταν έχουμε κίνηση δεδομένων.

Το ATM είναι εύχρηστο καθώς μας παρέχει την δυνατότητα διαφορετικών QoS (Quality of Service). Επίσης, παρέχει εγγυημένο εύρος ζώνης στα δεδομένα που υπάρχουν στο OLT και στο ONU και έτσι, είναι εφικτή η μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ο τεμαχισμός των πακέτων και η επανένωση τους στον τερματισμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα στο OLT και στο ONU είναι σε πακέτα IP. Επομένως, για τη μεταφορά μέσω PON είναι απαραίτητη η παραπάνω διαδικασία που συνεπάγεται με επιπρόσθετο κόστος και πολυπλοκότητα στο δίκτυο.

Τέλος, το ETHERNET είναι αποδοτικό στη μεταφορά πακέτων IP. Αποτελεί διαδεδομένο και φθηνό υλικό και μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων των 100Mbps, 1Gbps και 10 Gbps. Παρόλα αυτά για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου απαιτεί την ανάπτυξη τεχνικών QoS.

Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου αν και διαδικασία σημαντική, δεν επαρκεί. Ένα δεύτερο θέμα θα πρέπει να αντιμετωπιστεί για την αποφυγή συγκρούσεων όταν δύο ONU μεταδώσουν σε δύο ταυτόχρονες χρονικές στιγμές και έτσι τα δεδομένα τους θα φτάσουν ταυτόχρονα στο OLT. Γι' αυτό το πρόβλημα, θα πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός των προς τα άνω καναλιών (από τα ONU στο OLT) και υπάρχουν τρεις δυνατοί τρόποι για την πολυπλεξία των δεδομένων: η πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM), η πολυπλεξία χρόνου (TDM) και η πολυπλεξία κώδικα (CDM).

Η πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) παρέχει υψηλό εύρος ζώνης και είναι εύκολα υλοποιήσιμο. Υπάρχει όμως δυσκολία στην αναβάθμιση του και αυτό γιατί κάθε OLT έχει ένα πίνακα αντιστοίχισης για κάθε μήκος κύματος με κάθε ONU και επίσης, έχει υψηλό κόστος, αφού κάθε ONU πρέπει να έχει ένα διαχωριστή μήκους κύματος.

Η πολυπλεξία χρόνου (TDM) έχει βασικό της πλεονέκτημα ότι επιτρέπει σε κάθε ONU να χρησιμοποιεί ένα μέρος της χωρητικότητας του δικτύου. Επίσης, χρειάζεται μόνο ένας μεταδότης στο OLT, χωρίς να μας δεσμεύει ο αριθμός των ONU. Σαν μέθοδος είναι πιο πολύπλοκη από το WDM και προϋποθέτει τον συγχρονισμό όλων των ONU.

Τέλος, η πολυπλεξία κώδικα (CDM) δεν περιορίζει τον αριθμό των χρηστών αλλά από την άλλη πολλοί χρήστες ισούται με πολλές παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών καναλιών, αφού αυτά τα δύο είναι αλληλένδετα.



# Τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων



---

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

---

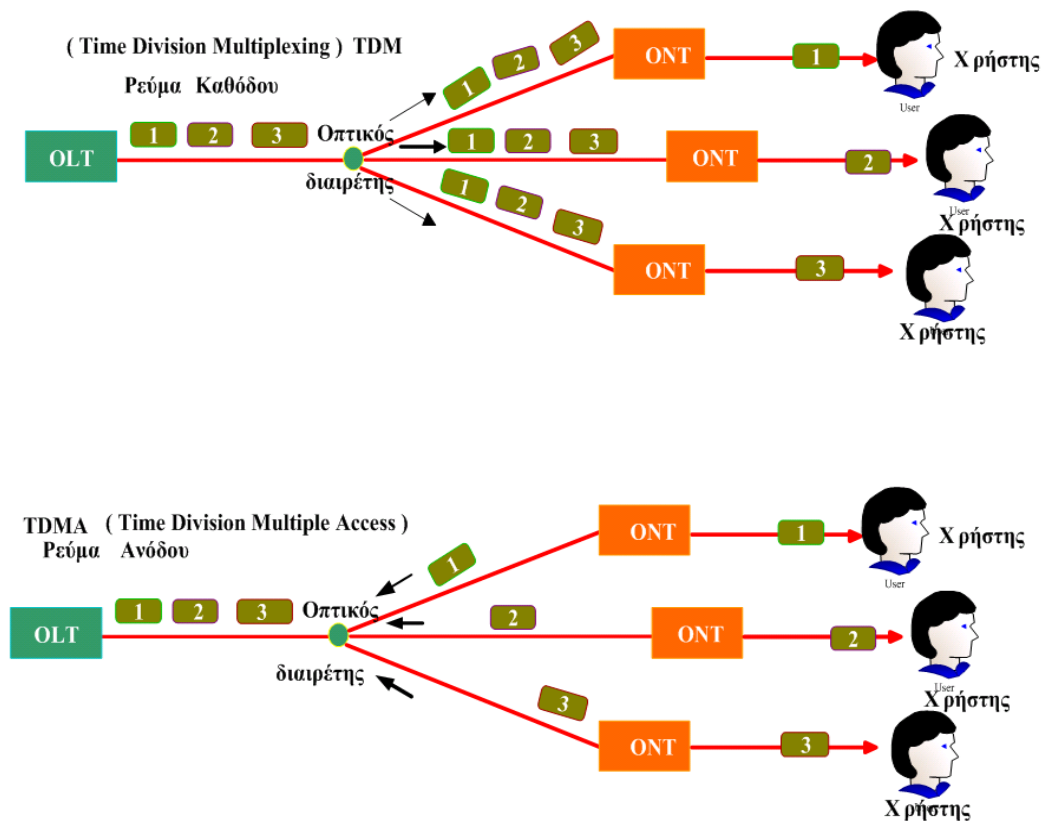
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

#### APON (ATM PON) [9][10]

##### Χαρακτηριστικά και λειτουργία

Ο συνδυασμός της τεχνολογίας παθητικών οπτικών δικτύων- PON με τον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) αναπτύχθηκε το 1995 από την FSAN. Η ύπαρξη και φιλοσοφία αυτού του συνδυασμού αναπτύχθηκε λόγω ότι θεωρήθηκε μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία θα ικανοποιούσε τις απαιτήσεις σε υπηρεσίες των διαφόρων χρηστών. Έτσι, δημιουργήθηκαν τα APON τα οποία υποστήριζαν διάφορες αρχιτεκτονικές όπως τις FTTH, FTTB/C και FTTH/CAB. Ο ATM θεωρήθηκε η πιο λογική και συμφέρουσα για τον τρόπο μεταφοράς δεδομένων, ενώ τα δίκτυα PON για την τοπολογία των δικτύων πρόσβασης. Ο ATM μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά πρωτόκολλα και τα δίκτυα PON θεωρούνται η οικονομικότερη ευρυζωνική οπτική λύση. Έτσι λοιπόν, η πρόταση της FSAN έγινε αποδεκτή ως πρότυπο από την ITU και περιγράφεται στο ITU-T Rec.G.983, όπου δίνονται οι προδιαγραφές για την αρχιτεκτονική, τον εξοπλισμό και τη διαστρωμάτωση του APON, και συγκεκριμένα η περιγραφή του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης δεδομένων και του φυσικού υποστρώματος. Σ' ένα δίκτυο APON στο οποίο θέλουμε να παρέχουμε απλότητα και χαμηλό κόστος θα επιλέξουμε την τεχνική TDM για την προς τα κάτω ζεύξη και για την TDMA ζεύξη θα χρησιμοποιήσουμε TDMA τεχνική. Στο σχήμα που ακολουθεί, μπορούμε να δούμε τις δύο αυτές περιπτώσεις καθώς και τα δομικά στοιχεία που συνθέτουν την εκάστοτε ζεύξη και αποτελούν τα κύρια μέρη του δικτύου. Συγκεκριμένα αυτά είναι η OLT, ONU/ONT και ο παθητικός οπτικός διαιρέτης. Η λειτουργία του οπτικού διαιρέτη είναι να διαμοιράζει την οπτική ίνα επομένως και την χωρητικότητα της. Για την ακρίβεια, σ' ένα δίκτυο APON μία οπτική ίνα διαιρείται παθητικά μέχρι και 64 φορές με αποτέλεσμα 64 ONU/ONT να μοιράζονται τη χωρητικότητα της.



Σχήμα 2. 1 Ρεύμα ανόδου – καθόδου δικτύου APON [8]

Όπως αναφέρθηκε, η λειτουργία ενός οπτικού διαιρετή είναι να μοιράζει την οπτική ίνα έτσι ώστε να εξασφαλίζει στους χρήστες ένα κομμάτι από το εύρος ζώνης. Σημαντική είναι επίσης η μείωση του κόστους, το οποίο μπορεί να μειωθεί ακόμα πιο αισθητά αν μειώσουμε τα οπτικό-ηλεκτρονικά μας στοιχεία που απαιτούνται για το OLT.

Η τοπολογία που χρησιμοποιείται στα APON δίκτυα είναι συνήθως αυτή του αστέρα. Για την ακρίβεια γίνεται η χρήση διπλού αστέρα. Η χρήση του πρώτου γίνεται στην OLT, όπου οδηγείται στην διεπαφή ATM-PON και η δεύτερη χρήση της τοπολογίας αστέρα πραγματοποιείται στον οπτικό διαιρέτη. Εκεί γίνεται παθητική διαίρεση της πληροφορίας και έπειτα οδηγείται σε κάθε ONT. Πρέπει να αναφερθεί ότι στο κέντρο μεταγωγής τοποθετείται η OLT και στην ουσία αποτελεί το κέντρο μεταγωγής και το σημείο διασύνδεσης μεταξύ του Δικτύου Πρόσβασης και των σημείων υπηρεσιών στο δίκτυο κορμού (backbone). Τα δεδομένα φθάνουν στο OLT και στην συνέχεια οδηγούνται στον παθητικό διαιρέτη χρησιμοποιώντας την τεχνική

TDM. Το OLT λειτουργεί ως ATM τελικός μεταγωγέας με ATM-σύγχρονη οπτική (SONET) διεπαφή από την πλευρά του δικτύου κορμού και ATM-PON διεπαφή από την πλευρά του συνδρομητή.

Κάθε ONT είναι συγχρονισμένο στο πεδίο του χρόνου με κάθε άλλο ONT και αυτό γιατί κατά το upstream κανάλι χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TDMA. Αυτό θα πραγματοποιηθεί μέσω της διαδικασίας της αποστασιομέτρησης (ranging) των ONU. Η αποστασιομέτρηση (ranging) πραγματοποιείται αφού κάθε OLT πρέπει να καθορίσει πόσο μακριά του βρίσκεται το κάθε ONT, για να του παραχωρήσει τη βέλτιστη χρονική σχισμή μέσα στην οποία θα πρέπει να εκπέμψει. Έτσι, θα αποφευχθούν προβλήματα συγκρούσεων μετάδοσης. Η επόμενη διαδικασία που αφορά την OLT είναι η αποστολή μηνυμάτων παραχώρησης μέσω των κελιών διαχείρισης PLOAM του φυσικού επιπέδου για να γίνει η ανάθεση στο κάθε ONT συγκεκριμένων χρονικών σχισμών. Τέλος, πρέπει να πραγματοποιηθεί προσαρμογή της διεπαφής υπηρεσιών σε ATM από το ONT και στη συνέχεια χρήση της τεχνική TDMA για την επικοινωνία με το OLT.

Αξίζει να τονιστεί πως στα οπτικά παθητικά οπτικά δίκτυα APON γίνεται χρήση μονής οπτικής ίνας. Η ίδια για το upstream αλλά και για το downstream κανάλι. Επομένως θα χρησιμοποιηθούν δύο μήκη κύματος. Συγκεκριμένα, μήκος κύματος-1550 nm για το downstream κανάλι και μήκος κύματος 1310nm για το upstream κανάλι. Η χρήση δυο διαφορετικών μηκών κύματος, αντί για ένα, γίνεται γιατί με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε καλύτερη οπτική απομόνωση για τους πομπούς και τους δέκτες laser ενώ παράλληλα δεν γίνεται χρήση ακριβών διαιρετών δέσμης φωτός. Ο χρήση του κατάλληλου ηλεκτροπτικού εξοπλισμού θα μας εξασφαλίζει την μετατροπή των ATM κελιών σε οπτικό κύμα και την αποστολή τους στο δίκτυο PON. Για την παροχή ασφάλειας στα δίκτυα PON, χρησιμοποιούνται τεχνικές κρυπτογράφησης και αυτό προκύπτει από την ύπαρξη καθοδικών καναλιών κοινοποίησης (broadcast channels).

Μια ακόμα μορφή οπτικού παθητικού δικτύου είναι το Broadband PON (BPON), το οποίο χρησιμοποιείται. Η μοναδική διαφορά του από το APON, είναι ότι χρησιμοποιείται σε δίκτυα που χρειάζονται να υποστηρίξουν επιπλέον ευρυζωνικές υπηρεσίες, όπως υπηρεσίες video.

## Πλεονεκτήματα των APON δικτύων [8][9]

**T**α οφέλη που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες έναντι των καλωδίων χαλκού είναι πολλές και σημαντικές. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι η οικονομική πλευρά που έχει μια οπτική ίνα ειδικά στο κομμάτι τις συντήρησής της. Και αυτός είναι ο κύριος λόγος που ενώ το κόστος μειώνεται – το κέρδος των προμηθευτών αυξάνεται και έτσι κερδίζουν και γίνονται πιο ανταγωνιστικοί στην βιοτεχνία της τεχνολογίας. Στα δίκτυα ATM-PON χρησιμοποιείται μία μόνο οπτική ίνα καθώς οι οπτικές διαπαφές βρίσκονται στα OLT. Αυτή η μια οπτική ίνα έχει την ιδιότητα να εξυπηρετεί έως και 64 τελικές τοποθεσίες χρηστών. Αυτό είναι και η βασική διαφορά των οπτικών συστημάτων σημείο-προς-σημείο και των δικτύων ATM-PON, όπου στα δεύτερα έχουμε μείωση των οπτικών διαπαφών από 64. Πλεονέκτημα των APON δικτύων είναι ότι έχουμε συσσώρευση κελιών ATM στα OLT. Έτσι, οι παρόχοι έχουν την δυνατότητα να εξυπηρετούν πολύ περισσότερους χρήστες σε αντίθεση με την περίπτωση που θα βασιζόμασταν μόνο σε τεχνικές TDM. Επίσης, η τεχνολογία δικτύων APON πλεονεκτεί και απέναντι στα συστήματα πρόσβασης με κυκλώματα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η συγκέντρωση του ATM, η στατιστική πολυπλεξία σε συνδυασμό με την κοινή χρήση των ενεργητικών όπτο-ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μεταξύ των διαιρετών κάνει την χρήση του οικονομική. Ένας ακόμα λόγος είναι η ίδια οπτική ίνα και ο ίδιος οπτικός διαρέτης που μοιράζονται τα ONT. Αυτό έχει σαν συνέπεια τον διαμοιρασμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Με τα απαραίτητα πρωτόκολλα δυναμικής ανάθεσης του εύρους ζώνης παρέχετε στο παροχέα η δυνατότητα να εξυπηρετεί ακόμα περισσότερους χρήστες. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε ένα δίκτυο APON είναι η ATM. Έτσι, το απαιτούμενο εύρος ζώνης προβλέπεται εύκολα από ένα απλό σύστημα διαχείρισης. Επιπλέον, η αύξηση του εύρους ζώνης μια ζεύξης γίνεται εύκολα (για μελλοντική χρήση) και επίσης η χρήση της τεχνολογίας ATM μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε επιθυμητή υπηρεσία. Επίσης, τα ενεργητικά εξαρτήματα του APON τοποθετούνται στο κτήριο του πελάτη ή στο κέντρο μεταγωγής έτσι ώστε να μην υπάρχουν κόστη για συστήματα εφεδρικών μπαταριών αλλά και των εξαρτημάτων εκείνων που πρέπει να είναι ανθεκτικά στις μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας.

## EPON (Ethernet-PON)[11][9]

### Χαρακτηριστικά και λειτουργία

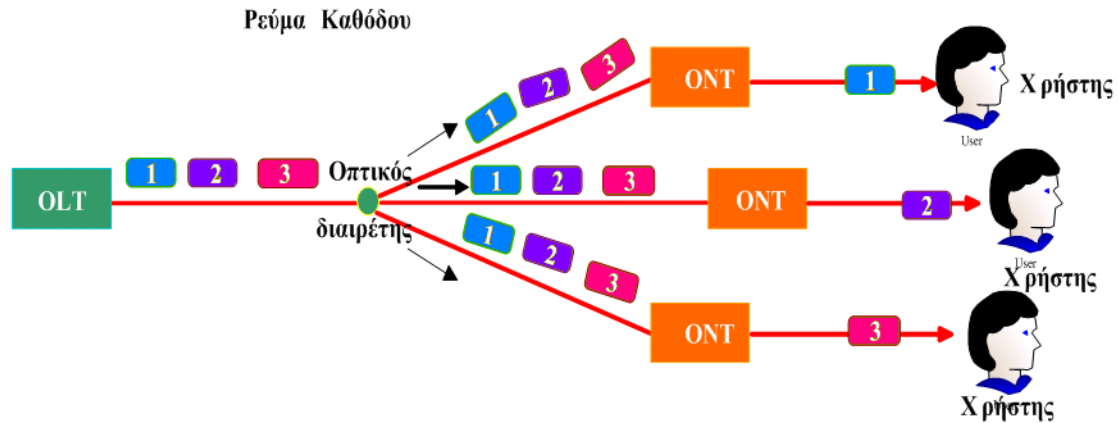
**Μ**ε το πέρασμα των χρόνων και την πρόοδο της τεχνολογίας το μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα APON δίκτυα εξαιτίας της αδυναμίας τους να υποστηρίζουν υπηρεσίες video, το ανεπαρκές τους εύρος, η πολυπλοκότητά τους και το κόστος τους, θεωρήθηκαν μάλλον, ως ακατάλληλη λύση για τον τοπικό βρόχο. Αρχικά, έγινε μια προσπάθεια ανάπτυξης FTTB και FTTC με απώτερο στόχο την ανάπτυξη μίας FTTH αρχιτεκτονικής που θα παρέχει διανομή δεδομένων, video και φωνής πάνω από την ίδια πλατφόρμα.

Το EPON έρχεται να δώσει λύσεις σε όλα τα παραπάνω καθώς παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Επιπλέον, παρέχει ελάττωση κόστους και ευρύτερες υπηρεσίες από το APON ενώ η αρχιτεκτονική του είναι παρόμοια με το G.983 που αφορά στα APON.

Θεμελιώδεις διαφορά μεταξύ APON και EPON είναι ότι τα δεδομένα στο EPON μεταφέρονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 1518 bytes σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3, για το Ethernet. Αντίθετα, στο APON τα δεδομένα μεταφέρονται σε κελιά ATM των 53 bytes, όπως επιβάλλεται από το πρωτόκολλο ATM. Κατά συνέπεια, η μεταφορά σε ένα δίκτυο APON κίνησης που βασίζεται στο IP, στο οποίο τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 65535 bytes, να γίνεται με δυσκολία και χωρίς απόδοση.

Η μεταφορά της IP κίνησης στο APON, απαιτείται αρχικά τα πακέτα να γίνεται σε κομμάτια των 48-bytes. Έπειτα σε κάθε κομμάτι από αυτά πρέπει να ενσωματωθεί μια επικεφαλίδα ATM των 5-bytes. Μια διαδικασία που όπως αντιλαμβανόμαστε είναι χρονοβόρα, πολύπλοκη και προσθέτει επιπλέον κόστος στα ONT και OLT. Επίσης, υπάρχει ένα εύρος ζώνης 5-bytes για κάθε τμήμα δεδομένων των 48-bytes που καταναλώνεται χωρίς λόγο. Όμως, το Ethernet είναι προορισμένο γι' αυτό ακριβώς τον λόγο, καθώς καλύπτει την κίνηση IP και μειώνει τις επικεφαλίδες σε σχέση με το ATM.

Στην συνέχεια, στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η διαδικασία εκπομπής δεδομένων προς τα κάτω από το OLT στα ONU και προς τα άνω στο EPON. Διαδικασίες που όπως βλέπουμε διαφέρουν.



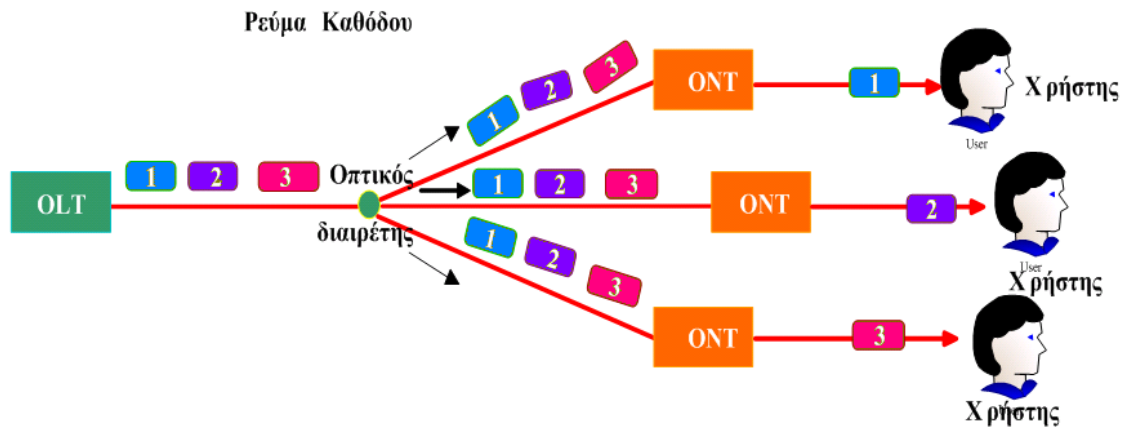
Σχήμα 2. 2 δίκτυο EPON – Ρεύμα καθόδου[8]

υγκεκριμένα στο παραπάνω σχήμα τα δεδομένα εκπέμπονται από το OLT προς τα ONU σε πακέτα μεταβλητού μήκους με μέγιστο μήκος 1518 bytes (πρωτόκολλο IEEE 802.3) . Κάθε πακέτο φέρει μία επικεφαλίδα που αποτελεί το αναγνωριστικό της ONU για τον προορισμό του κάθε πακέτου.

Υπάρχει όμως περίπτωση κάποια από αυτά τα πακέτα να προορίζονται για όλα τα ONU (broadcast packets) ενώ άλλα, για μία δεδομένη ομάδα ONU (multicast packets).

Όπως παρατηρούμε, η ύπαρξη του οπτικού διαρέτη χρησιμοποιείται για να μοιράζει την κίνηση σε τρία διαφορετικά κομμάτια που κάθε ένα φέρει όλα τα πακέτα. Όταν τα πακέτα φτάσουν σε ένα ONU τότε αυτό κρατάει μόνο αυτά που προορίζονται για αυτό και απορρίπτει όλα τα υπόλοιπα . Για παράδειγμα, στο σχήμα μας το ONU 1 δέχεται τα πακέτα 1,2 και 3 αλλά διανέμει στο τελικό χρήστη 1 μόνο το πακέτο 1.

Στην περίπτωση της προς τα άνω ζεύξης, η λειτουργία της οποίας φαίνεται στο επόμενο σχήμα, γίνεται χρήση της τεχνικής TDM. Παρατηρούμε ότι οι χρονικές σχισμές εκπομπής είναι συγχρονισμένες έτσι ώστε να μην γίνονται συγκρούσεις όταν τα πακέτα από διαφορετικά ONU συνδυάζονται στην κοινή ίνα. Για παράδειγμα, το ONU 1 εκπέμπει το πακέτο 1 στην πρώτη χρονική σχισμή, το ONU 2 εκπέμπει το πακέτο 2 στη δεύτερη (μη επικαλυπτόμενη με την πρώτη) χρονική σχισμή και το ONU 3 εκπέμπει το πακέτο 3 στη τρίτη (μη επικαλυπτόμενη με την δεύτερη) χρονική σχισμή.



Σχήμα 2. 3 δίκτυο EPON - Ρεύμα ανόδου [8]

### Τα πλεονεκτήματα των δικτύων EPON [9]

Τα πλεονεκτήματα των δικτύων EPON είναι αναμφισβήτητα πολύ σημαντικά, καθώς θεωρούνται απλά, αποδοτικά και ασύγκριτα λιγότερο δαπανηρά με τις υπόλοιπες εναλλακτικές τεχνολογίες πολλαπλών υπηρεσιών δικτύου πρόσβασης. Τα EPON επίσης, παρέχουν την δυνατότητα της επιπλέον υποστήριξης συνδρομητών καθώς προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλη τεχνολογία παθητικών οπτικών δικτύων. Επίσης, προφέρει περισσότερο εύρος ανά συνδρομητή, καλύτερο QoS και την δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών video. Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου EPON είναι απλή, χωρίς πολύπλοκα και δαπανηρά οικονομικά στοιχεία ATM και SONET, γεγονός που το καθιστά οικονομική λύση. Επιπλέον, η συντήρηση και το κόστος των εξωτερικών εγκαταστάσεων είναι μηδαμινό καθώς δεν γίνεται η χρήση ηλεκτρονικών στοιχείων. Αντίθετα, χρησιμοποιούνται παθητικά στοιχεία των οποίων η διάρκεια ζωής είναι αρκετά μεγάλη. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα την συνολική μείωση του οικονομικού κόστους.

Το γεγονός ότι η τεχνολογία EPON μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες, video και φωνής, μας παρέχει την δυνατότητα να κινηθούμε μέσα σ' ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και άρα αύξηση των εσόδων. Πιο αναλυτικά, τα EPON υποστηρίζουν εξελιγμένες λειτουργίες επιπέδου 2 και επιπέδου 3, μεταγωγή και δρομολόγηση, voice over IP, IP multicast, VPN 802.1Q και κατανομή και μορφοποίηση του εύρους ζώνης.



Τα EPON χαρακτηρίζονται από απλότητα εξαιτίας της χρήσης των τοπολογιών Ethernet. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δίνει μια ευελιξία στους παροχείς όσον αφορά τις υπηρεσίες καθώς μπορούν να τις αναπτύσσουν, να τις προβλέπουν και να τις διαχειρίζονται.

## GPON (Gigabit PON) [12][13][14]

**Η** ανάγκη για να υποστηριχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες του 1Gbps άρα και υψηλότερα bit rates αλλά και το γεγονός ότι το συνολικό πρωτόκολλο θα έπρεπε να είναι ανοιχτό για επανεξέταση έτσι ώστε η τελική μορφή που αυτό θα λάμβανε να είναι η βέλτιστη αλλά και η πιο αποδοτική όσον αφορά στην υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών και λειτουργιών διαχείρισης, συντήρησης και πρόβλεψης, οδήγησαν σε μία νέα λύση, στα δίκτυα GPON. Συγκεκριμένα, τα GPON προσφέρουν πολύ υψηλά bit rates, (έως και 2,048 Gbps) ενώ ταυτόχρονα έχουν την δυνατότητα να υποστηρίζουν την μεταφορά πολλαπλών υπηρεσιών σε απλές διατάξεις και με μεγάλη αποδοτικότητα.

Για να είναι συμβατά με όλες τις τεχνολογίες PON που προηγήθηκαν, τα GPON δίκτυα διατηρούν τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που προηγήθηκαν χρονικά. Βασικό χαρακτηριστικό των GPON είναι το μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι ιδανικά αφού υποστηρίζουν μια μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών φωνής, TDM, video, μισθωμένες γραμμές και επεκτάσεις χωρίς καλώδιο.

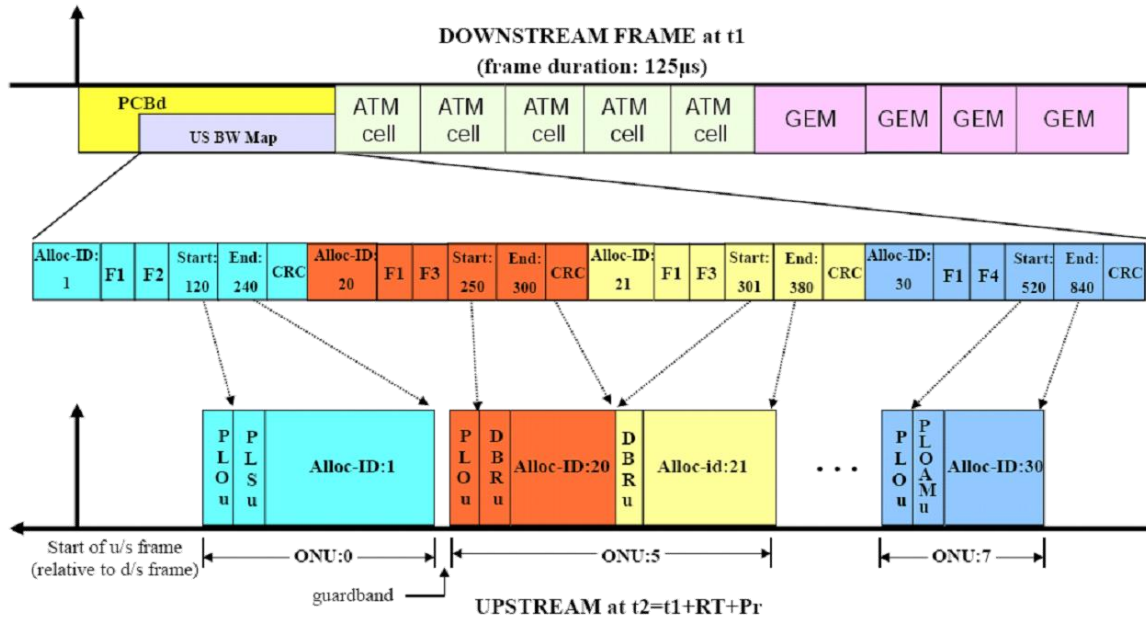
Επίσης, τα GPON δίκτυα υποστηρίζουν και αποστάσεις των 60 km μεταξύ ONT/ONU και OLT. Όσον αφορά όμως την απόσταση αυτή, υπάρχει ο περιορισμός του φυσικού μέσου. Έτσι, η μέγιστη φυσική απόσταση που μπορεί να καλυφθεί είναι ίση με 20 km.

Στον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε τα bit rates που μπορούν να υποστηρίξουν τα GPON δίκτυα για το upstream και το downstream κανάλι καθώς και τα σχήματα με την δομή του πλαισίου στο Downstream και τα πλαίσια μετάδοσης G-PON.

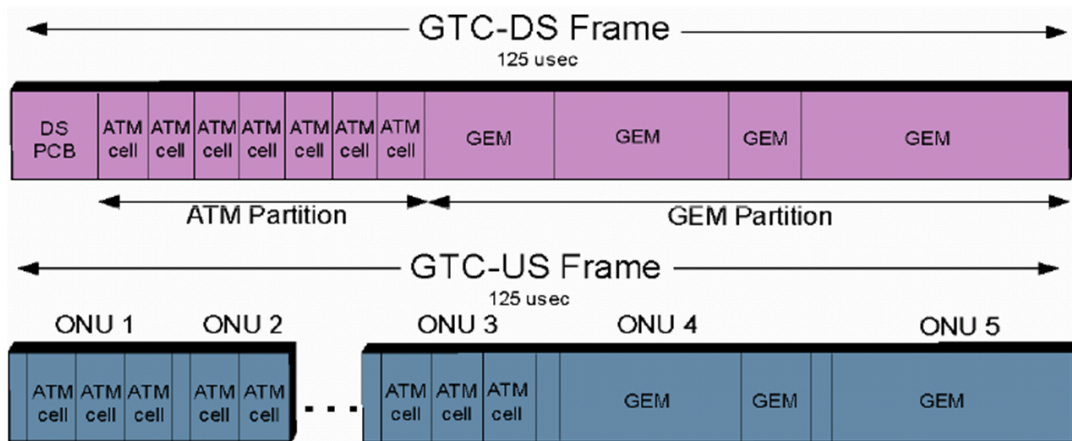
<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>
155 Mbit/s up	1.2 Gbit/s down
622 Mbit/s up	1.2 Gbit/s down

1.2 Gbit/s up	1.2 Gbit/s down
155 Mbit/s up	2.4 Gbit/s down
622 Mbit/s up	2.4 Gbit/s down
1.2 Gbit/s up	2.4 Gbit/s down
2.4 Gbit/s up	2.4 Gbit/s down

Πίνακας 4 bit rate για upstream/downstream κανάλι στα GPON [9]



Σχήμα 2. 4 Η δομή του πλαισίου στο Downstream [9]



Σχήμα 2. 5 Πλαίσια Μετάδοσης G-PON [9]

Όσον αφορά τη διαίρεση του σήματος της οπτικής ίνας στον οπτικό διαιρέτη, μία ρεαλιστική υλοποίηση με βάση το κόστος είναι η διαίρεση 1:64. Τέλος, τα GPON

δίκτυα έχουν μεγάλες δυνατότητες σε λειτουργίες ανάπτυξης, πρόβλεψης και διαχείρισης του δικτύου. Παράλληλα, μας παρέχουν ασφάλεια σε επίπεδο πρωτοκόλλου για την downstream κίνηση αφού φροντίζει έτσι ώστε να μην είναι εύκολη η αποκωδικοποίηση των downstream δεδομένων από άλλους χρήστες, πέρα μόνο από αυτόν για τον οποίο προορίζονται τα δεδομένα. Έτσι, επιτρέπει προς την κατεύθυνση αυτή οικονομικά αποδοτικές υλοποιήσεις.

### **Σύγκριση τεχνολογιών APON, EPON και GPON**

Για να καταλάβουμε σε ποια σημεία υστερεί και σε ποια άλλα πλεονεκτεί η κάθε τεχνολογία θα τα συγκρίνουμε με βάση τη σειρά εμφάνισής τους, έτσι ώστε να έχουμε μια συνολική εικόνα και να κατανοήσουμε τις ανάγκες της εξέλιξης της κάθε τεχνολογίας. Έτσι, αρχικά θα συγκρίνουμε τις τεχνολογίες APON και EPON και θα αναφερθούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους και έπειτα EPON και GPON.

#### **Σύγκριση APON και EPON [9]**

Ο εισηγητής της τεχνολογίας APON είναι οι NTT, BC, κ.α και αρχικά εμφανίστηκε σαν τεχνολογία το 1995. Το πρωτόκολλο Επιπέδου 2 βασίζεται σε ATM και η μεταφορά σε Fixed Cell. Σαν τεχνολογία υποστηρίζει ταχύτητες από 155 έως και 622 Mbps. Βασικός πάροχος Υπηρεσιών είναι η FSAN ILECs. Επίσης, η τεχνική upstream ζεύξη που χρησιμοποιείται είναι η TDMA. Η IP αποδοτικότητα της τεχνολογίας αυτής είναι μέτρια και η αναβάθμιση της δύσκολη. Τέλος, υποστηρίζει ONU λειτουργίες και η κύρια δαπάνη της τεχνολογίας αυτής έχει να κάνει με τους μεταγωγείς ATM. Οι υπηρεσίες που χρησιμοποιεί και υποστηρίζει είναι POTS και Data.

Αντίθετα, στο EPON εισηγητής είναι ο EFM (Ethernet in the First Mile). Το πρωτόκολλο επιπέδου 2 βασίζεται στο Ethernet και η μεταφορά του στο Frame. Υποστηρίζει ταχύτητες από 1.25/1.25 Gbps. Κύριοι πάροχοι υπηρεσιών είναι οι CLECs, ELECs, DLECs, MSOs, ILECs και η τεχνική Upstream ζεύξης που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι TDMA, κ.α., είτε κάποια άλλη τεχνική. Η IP αποδοτικότητα είναι αρκετά καλή και η αναβάθμιση του γίνεται στα 10Gbps. Επίσης, ONU λειτουργίες που παρέχει είναι η δρομολόγηση, η μεταγωγή κ.α. Το βασικό του κόστος είναι οι μεταγωγείς Ethernet και οι υπηρεσίες που εξασφαλίζει αφορούν POTS, Data VOIP, IP Video.

#### **Σύγκριση EPON και GPON [9][12]**

Όπως αναφέραμε εισηγητής της τεχνολογίας EPON είναι το EFM (Ethernet in the First Mile). Επίσης, πρέπει να συμπληρωθεί ότι όσον αφορά τις κλάσεις του οπτικού δικτύου διανομής (ODN classes) που χρησιμοποιεί είναι η κλάση και η κλάση B.

Υποστηρίζει ταχύτητες από 1.25/1.25 Gbps ενώ η ταχύτητα της Upstream ζεύξης είναι πάντα 1.25 Gbps οπότε δεν χρειάζεται πάντα τέτοια ταχύτητα στην upstream ζεύξη. Τέλος, η απόδοση του είναι μικρή και αυτό οφείλεται στις μεγάλες IP επικεφαλίδες, με αποτέλεσμα να φορτώνεται το δίκτυο. Όσον αφορά το κόστος αυτής της τεχνολογίας, η τεχνική TDM στα EPON και η μεταφορά φωνής υπαγορεύουν επιπρόσθετες ανάγκες για Hardware/Software για τα VoIP schemes, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερα λειτουργικά έξοδα.

Εισηγητής στα GPON είναι η FSAN και οι κλάσεις του οπτικού δικτύου διανομής (ODN classes) που χρησιμοποιεί είναι η A , B , C. Η χρήση της ODN class C οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους για την τοπολογία μέσω διπλασιασμού των end-users σε κάθε δένδρο PON. Οι ταχύτητες που υποστηρίζει είναι 1.25,2.5Gbps(d)/155,622 Mbps ή 1.25,2.5Gbps(u). Επίσης, παρέχει πολλές επιλογές αναβάθμισης και η ταχύτητα της Upstream ζεύξης καθορίζεται ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες που χρειαζόμαστε κάθε φορά. Η απόδοση των GPON δικτύων είναι μεγάλη και επίσης έχουν την δυνατότητα να υποστηρίζουν μεταφορά υπηρεσιών στην πρωταρχική τους τυποποίηση και για αυτό τα standard για Jitter και καθυστερήσεις ικανοποιούνται χωρίς αύξηση του κόστους.

# Πολυπλεξία μήκους κύματος WDM



---

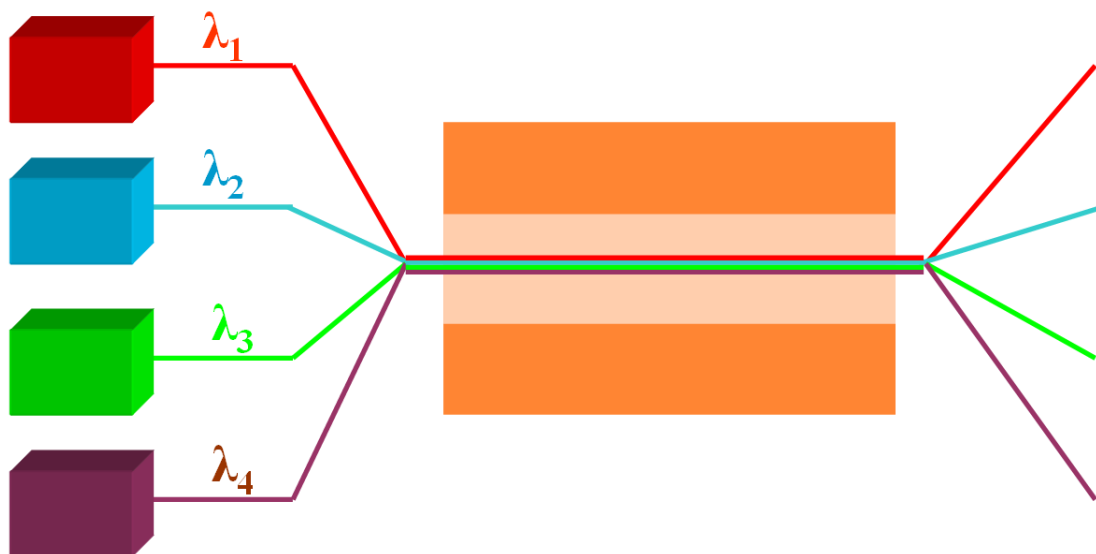
Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ WDM [2][1]

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*) εφαρμόζεται έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των οπτικών ινών και για την μεγιστοποίηση του μεταφερόμενου όγκου δεδομένων μέσα από μια ίνα. Η τεχνολογία Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος συνίσταται στην πολυπλεξία οπτικών σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και την μετάδοσή τους μέσα από μια μόνο οπτική ίνα. Συγκεκριμένα, ο τρόπος λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας βασίζεται στο γεγονός ότι σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα. Υπάρχει όμως πιθανότητα μέσα από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα από ένα, διαφορετικά μεταξύ, τους σήματα με διαφορετική συχνότητα ή και διαφορετικού μήκους κύματος που το καθένα θα μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα. Για να γίνει κατανοητή η Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος αρκεί να δούμε το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. 1 Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος [6]

Ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται σαν διακριτά μήκη κύματος ή σαν κανάλια μέσω της οπτικής ίνας και στην συνέχεια αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Η συνολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα της χωρητικότητας των εισερχόμενων σημάτων. Σημαντική διαφορά από την τεχνολογία TDMA είναι ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται με ανεξάρτητο τρόπο σε σχέση με τα υπόλοιπα. Όπως αντιλαμβανόμαστε, κάθε κανάλι έχει το δικό του, αποκλειστικό, εύρος ζώνης.

Σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα μεγάλης αύξησης της χωρητικότητας μετάδοσης. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα της

χρήσης της τεχνολογίας WDM είναι ότι αποτελεί μια αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο οπότε είναι δυνατή η διαφανής υποστήριξη της TDM τεχνολογίας αλλά και δεδομένων τυποποιήσεων (ATM, Gigabit Ethernet, ESCON και Fibre Channel). Αυτή η ικανότητα έχει σαν αποτέλεσμα τη διασύνδεση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του κοινού φυσικού μέσου.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ότι παρέχει *Κλιμάκωση Μεγέθους (Scalability)* και αυτό γιατί υπάρχει η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της οπτικής ίνας και συγκεκριμένα σε περιπτώσεις μητροπολιτικών και επιχειρησιακών δικτύων.

Τέλος, η τεχνολογία WDM μας παρέχει γρήγορη και δυναμική παροχή δικτυακών συνδέσεων, εξασφαλίζοντας μας υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων για ικανοποίηση αναγκών των χρηστών μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα. [15]

## Εισαγωγή [1][2]

Στην δεκαετία του '80 οι περισσότερες εταιρίες τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούν καλώδια οπτικών ινών. Όμως, η εξάπλωση και η κυριαρχία της οπτικής ίνας ευνοήθηκε από την αποδοχή εκ μέρους της βιομηχανίας, κάποιων τεχνολογιών υλοποίησης όπως είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο ή Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (SONET/SDH). Τα οπτικά δίκτυα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τα αμιγώς οπτικά δίκτυα (all-optical) και τα αδιαφανή (opaque). Όμως ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να είναι μονοκαναλικό ή πολυκαναλικό με πολύπλεξη διαίρεσης μήκους κύματος (WDM).

Τα μονοκαναλικά οπτικά δίκτυα έχουν ρυθμούς μετάδοσης που περιορίζονται από την ταχύτητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που βρίσκονται στους ενδιάμεσους σταθμούς. Η τεχνική της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος επιλύει αυτό το πρόβλημα, διαιρώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά κανάλια μικρότερου εύρους, τα οποία μπορούν να υποστηριχθούν από τα ηλεκτρονικά των ενδιάμεσων σταθμών. Οι λειτουργίες της πολύπλεξης και της αποπολύπλεξης των καναλιών γίνονται στο οπτικό πεδίο χωρίς να είναι αναγκαίο να γίνουν μετατροπές από οπτικό σε ηλεκτρικό και αντίστροφα.

Πρέπει να τονιστεί ότι η τεχνική WDM επιτρέπει την υλοποίηση αμιγώς οπτικών δικτύων με ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των πολλών gigabits/second, χρησιμοποιώντας οπτική τεχνολογία που είναι αυτή τη στιγμή διαθέσιμη.

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών δικτύων είναι ότι μας παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης αλλά και ευκολία στην εγκατάσταση και τη συντήρηση. Από την άλλη, η ποιότητα του σήματος είναι πολύ καλύτερη όπως και τα χαρακτηριστικά ασφάλειας.

Τα οπτικά δίκτυα βρίσκουν πολλές εφαρμογές, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται τα τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Οι βασικές εφαρμογές των οπτικών δικτύων βρίσκουν υλοποίηση σε ευρυζωνικές οικιακές εφαρμογές, στον χώρο της ιατρικής, στην ανάκτηση και διανομή ιατρικών εικόνων και φυσικά στο Internet και στο Παγκόσμιο ιστό. Επίσης, σε πολυμεσικές διασκέψεις αλλά και την εκπαίδευση από απόσταση. Τέλος, σε γραφικά και οπτικές αναπαραστάσεις.

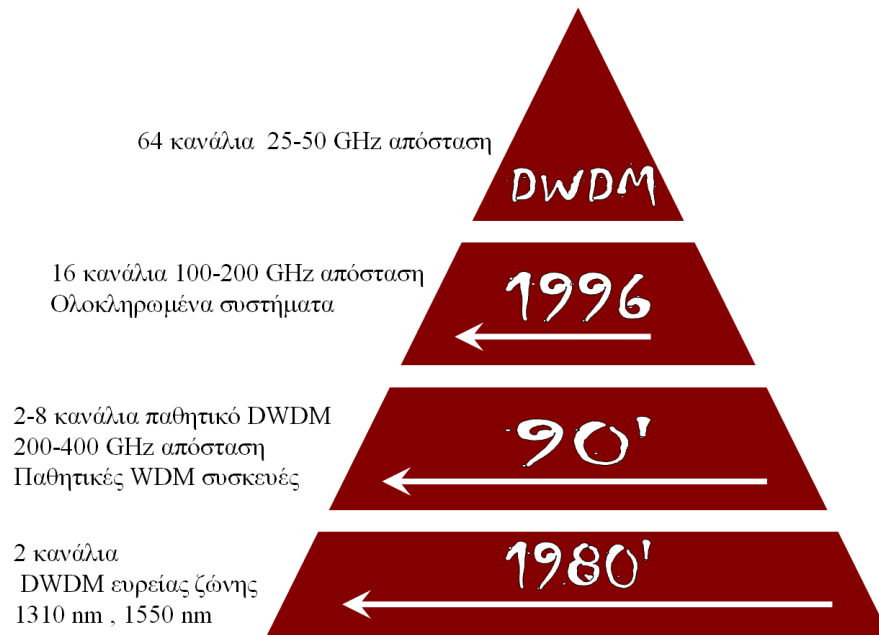
Αρχικά, στην τεχνολογία WDM, ήταν υλοποιήσιμη μόνο η παράλληλη μετάδοση δεδομένων σε δυο μήκη κύματος, με μεγάλο διάστημα μεταξύ τους και για μικρές αποστάσεις διάδοσης του σήματος. Για να περιοριστεί αυτό το πρόβλημα όμως, έπρεπε να βελτιωθούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες αλλά και να υπάρξουν κάποιες νέες θεμελιώδεις τεχνολογίες.

Η πολύπλεξη περισσότερων από δυο μηκών κύματος ανά ίνα και η τεχνολογία της πυκνής πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος (DWDM), οφείλουν την ύπαρξή τους στην ανάπτυξη των τεχνολογιών των οπτικών φίλτρων αλλά και των κατευθυνόμενων λέιζερ με στενή ζώνη συχνοτήτων. Επίσης, η αύξηση των διανυόμενων αποστάσεων και κατά συνέπεια η αύξηση της βιωσιμότητας του συστήματος DWDM, οφείλτε στην λειτουργία του οπτικού ενισχυτή σταθερής απολαβής, ο οποίος συνδέεται ακριβώς πριν την ίνα εκπομπής για να ενισχύσει το οπτικό σήμα. Υπάρχουν όμως και άλλες τεχνολογίες που συνέβαλαν στην εξέλιξη της τεχνικής DWDM. Μια τέτοια τεχνολογία είναι οι βελτιωμένες οπτικές ίνες με χαμηλότερες απώλειες και καλύτερα χαρακτηριστικά μετάδοσης και μια δεύτερη τεχνολογία είναι οι συσκευές, όπως τα φράγματα περίθλασης Bragg που χρησιμοποιούνται στους οπτικούς πολυπλέκτες προσθήκης/εξαγωγής μηκών κύματος.

Η αύξηση των απαιτήσεων για εύρος ζώνης από το δίκτυο είναι μια συνέπεια που έχει η εξέλιξη των τεχνολογιών και των εφαρμογών του διαδικτύου και του παγκόσμιου ιστού, ειδικά των τελευταίων χρόνων. Αυτό είναι και το κινητήριο έναυσμα της έρευνας στο πεδίο του WDM, η οποία έχει επιφέρει σημαντική πρόοδο. Τα αμιγώς οπτικά συστήματα με τεχνολογία WDM και δρομολόγηση κύματος αποτελούν μια εφαρμόσιμη λύση για τα δίκτυα ευρείας και μητροπολικής περιοχής του μέλλοντος καθώς και για το διαδίκτυο της επόμενης γενιάς. Η διαφορά των δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούν ψηφιακούς πίνακες είναι η διαφάνεια ως προς το πρωτόκολλο και η απλούστερη διαχείριση και επεξεργασία, κάτι το οποίο αποτελεί και βασικό πλεονέκτημα.

Στις αρχές τις δεκαετίας του 90 εμφανίστηκε μια νέα γενιά συστημάτων WDM. Τα συστήματα WDM στενής ζώνης. Η ονομασία τους αυτή προκύπτει στο γεγονός ότι χρησιμοποιούνταν από 2 έως 8 κανάλια. Τα κανάλια αυτά απέχουν μεταξύ τους 400GHz και βρισκόταν στο παράθυρο μετάδοσης των 1550 nm. Αργότερα, περίπου στα μέσα της δεκαετίας του '90 εμφανίστηκαν συστήματα DWDM με 16 έως 40 κανάλια που απείχαν από 100 μέχρι 200GHz. Η εξέλιξη όμως των συστημάτων DWDM δεν έμεινε εκεί. Με την πάροδο των χρόνων έγινε εφικτή η πολύπλεξη 64 έως 160 καναλιών με μικρές μεταξύ τους αποστάσεις (διαστήματα των 50 ή και των 25 GHz). Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε την εξέλιξη της τεχνολογίας DWDM.

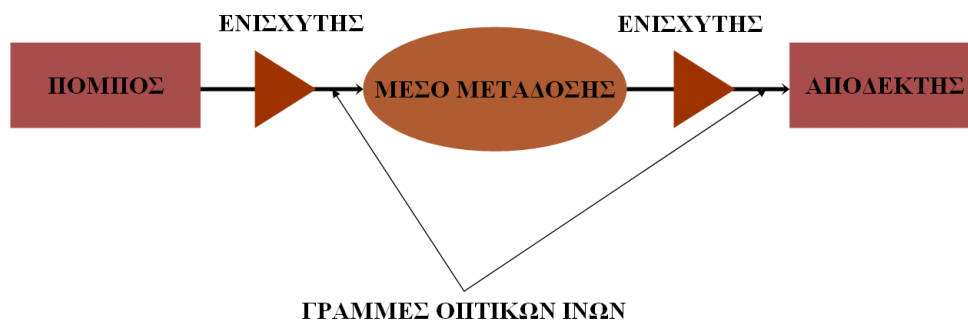




Σχήμα 3. 2 Η εξέλιξη της τεχνολογίας DWDM [1][2]

Παρόλο που έχουμε αύξηση του πλήθους των μηκών κύματος, αυτό δημιουργεί μια παράλληλη μείωση των αποστάσεων μεταξύ των μηκών κύματος αλλά και αύξηση της πυκνότητας τους. Η προσθήκη/εξαγωγή μηκών κύματος παρέχει μια ευελιξία στον χειρισμό και διαχείριση του συστήματος ενώ το οπτικό μας δίκτυο περιλαμβάνεται από στοιχεία μεταγωγής και στοιχεία που δεν αφορούν τεχνικές μεταγωγής.

Τα στοιχεία μεταγωγής χρησιμοποιούνται στη δικτύωση λόγω του ότι είναι προγραμματιζόμενα. Τα υπόλοιπα στοιχεία χρησιμοποιούνται σαν οπτικοί σύνδεσμοι.

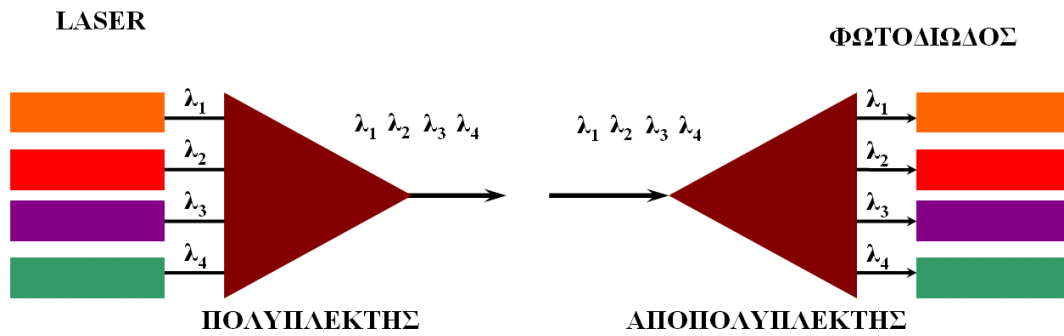


Σχήμα 3. 3 Βασική δομή ενός δικτύου με μεταδότη και αποδέκτη

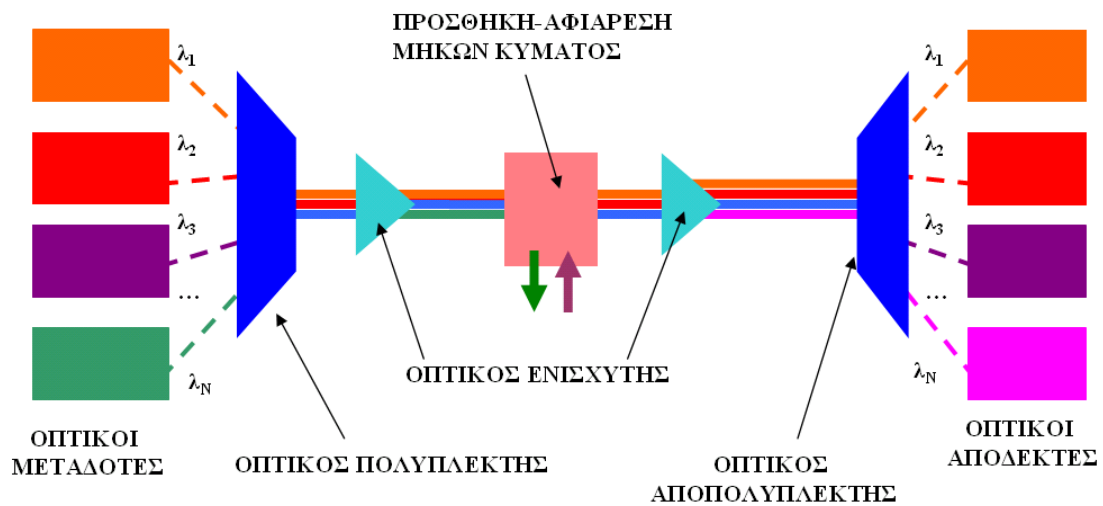
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- ✓ οι πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες WDM
- ✓ οι συνδυαστές/διαχωριστές

- ✓ οι δίοδοι εκπομπής φωτός
- ✓ οι φωτοδίοδοι
- ✓ οι δρομολογητές μήκους κύματος
- ✓ τα λέιζερ
- ✓ οι μετατροπείς μήκους κύματος
- ✓ τα οπτικά φίλτρα
- ✓ οι παθητικοί συζεύκτες αστέρα
- ✓ και οι κατευθυντικοί συζεύκτες.



Σχήμα 3. 4 Διάγραμμα δομής ενός συστήματος μετάδοσης WDM. [1]



Σχήμα 3. 5 διάγραμμα δομής ενός συστήματος WDM [1]

## Εξοπλισμός της τεχνολογίας WDM [1]

**Τ**α βασικά στοιχεία της WDM τεχνολογίας είναι οι οπτικές ίνες που εμφανίζουν χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση στο αντίστοιχο φάσμα μηκών κύματος, οι συσκευές ακτινών laser στην πλευρά της μετάδοσης και οι οπτικοί ενισχυτές (optical amplifiers), που ο λόγος χρήσης τους είναι για να ενισχύουν το σήμα και να το μεταφέρουν σε μεγάλες αποστάσεις. Οι συσκευές οπτικής ενίσχυσης είναι αναγκαίοι λόγω της εξασθένησης του οπτικού σήματος κατά τη μεταφορά του μέσα από την ίνα. Επίσης, η χρήση αυτών των συσκευών μας παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης ενίσχυσης όλων των μηκών κύματος, χωρίς να είναι απαραίτητη η αρχική μετατροπή των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά.

Στην περίπτωση της τεχνολογίας WDM, που κρίνεται απαραίτητη η εκπομπή υψηλών φορτίων σε υψηλές αποστάσεις, ο ιδανικός τύπος οπτικού ενισχυτή είναι ο Οπτικός Ενισχυτής Σταθεροποιημένου Εμβρύου, όπως θα δούμε και στην συνέχεια. Τέλος, το χαρακτηριστικό των οπτικών ενισχυτών είναι η ανεξαρτησία από πρωτοκόλλα και Bit Rate του οπτικού σήματος, γεγονός που επιτρέπει το συνδυασμό διαφορετικών πρωτοκόλλων (ATM, SONET, Gigabit Ethernet κτλ.) σε οποιοδήποτε Bit Rate. Η χρήση των οπτικών ενισχυτών έκαναν το WDM οικονομικά εφικτό.

Ένα ακόμα βασικό στοιχείο της WDM τεχνολογίας είναι οι συσκευές φωτοανίχνευσης (photodetectors), στην πλευρά του δέκτη, οι οποίες συναντιούνται δύο γενικούς τύπους:

- ✓ Τις θετικές-εσωτερικές- αρνητικές φωτοδιόδους (PIN photodiodes), όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αντίστροφη αρχή λειτουργίας των LEDs (τα οποία μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα σε φωτεινά), μετατρέποντας τα φωτεινά σήματα σε ηλεκτρόνια μέσω μιας σχέσης 1:1.
- ✓ και τις φωτοδιόδους χιονοστιβάδας (APD photodiodes) που έχουν την δυνατότητα να μας παρέχουν επιπλέον σαν λειτουργία την διεργασία της ενίσχυσης, μέσω της μετατροπής ενός φωτονίου σε πολλά ηλεκτρόνια. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των PIN φωτοδίοδων είναι το χαμηλό κόστος και η αξιοπιστία, ενώ οι APD φωτοδιόδοι έχουν υψηλότερη ακρίβεια και ευαισθησία.

Τέλος, έχουμε την χρήση των οπτικών πολυπλεκτών ελεγχόμενης πολύπλεξης (add/drop optical multiplexers) και των οπτικών αποπολυπλεκτών (optical demultiplexers). Ο ρόλος του οπτικού πολυπλέκτη είναι να συνδυάσει τα διαφορετικά σήματα, το καθένα με διαφορετικό μήκος κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Αντίστοιχα, η λειτουργία του αποπολυπλέκτη είναι να ξεχωρίζει τα πολυπλεγμένα σήματα σε διαφορετικές ροές και τα οδηγεί στους οπτικούς δέκτες. Να σημειώσουμε ότι πολλές συσκευές πολύπλεξης – απόπολύπλεξης είναι εντελώς παθητικά στοιχεία και συμπεριφέρονται σαν πρίσματα υψηλής ακρίβειας, που συνδυάζουν και διαχωρίζουν τα χρώματα του οπτικού σήματος. Όπως και τα πρίσματα, τα περισσότερα παθητικά στοιχεία λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και όταν αντιστραφεί η φορά του φωτός.

Οι οπτικές ίνες μπορούν να συνδεθούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ένας τρόπος είναι να τερματίζονται σε ακροδέκτες (connectors) και να βυσματώνονται σε πρίζες ινών. Οι ακροδέκτες χάνουν περίπου 10-20% του φωτός αλλά διευκολύνουν την αναδιάταξη των συστημάτων. Ένας δεύτερος τρόπος είναι η μηχανική ένωση. Οι μηχανικές ενώσεις απλά τοποθετούν τα δύο κομμένα άκρα αντικριστά σε μια ειδική θήκη και τα συγκροτούν. Η ευθυγράμμιση μπορεί να βελτιωθεί περνώντας φως μέσα από την ένωση και κάνοντας στη συνέχεια μικρές διορθώσεις ώστε να μεγιστοποιηθεί το σήμα. Οι μηχανικές ενώσεις επιφέρουν απώλεια 10% του φωτός. Τέλος, η σύνδεση μπορεί να γίνει με την τήξη των δύο κομματιών της οπτικής ίνας. Η σύντηξη είναι αρκετά καλή, όσο μια ενιαία οπτική ίνα, αλλά βέβαια και εδώ υπεισέρχεται μια μικρή ποσότητα εξασθένησης. Σε όλους τους τύπους της ένωσης είναι δυνατόν να

συμβούν ανακλάσεις στο σημείο της ένωσης και η ανακλώμενη ενέργεια μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στο σήμα.

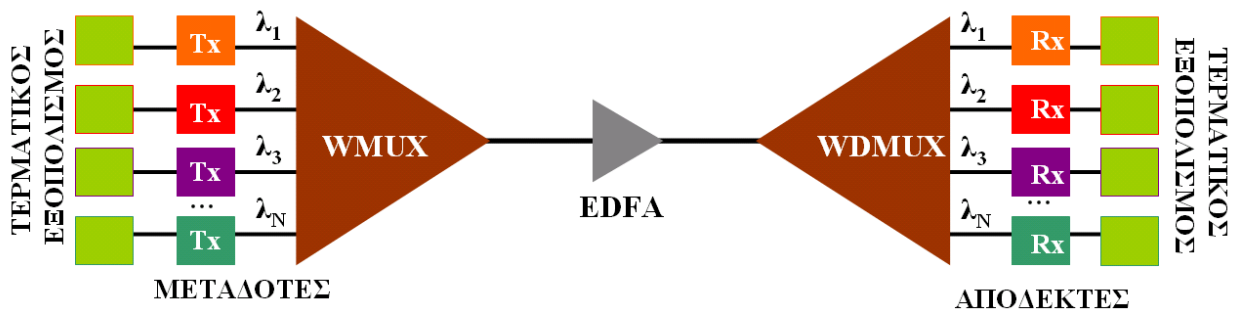
Όλα τα παραπάνω θα αναλυθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου.

## Δίκτυα WDM με συνδέσμους από σημείο σε σημείο [1]

**Η** αναβάθμιση των απλών μεμονομένων συνδέσεων σε WDM συνδέσεις από σημείο σε σημείο θεωρείται ως πιο το σημαντικό βήμα εξέλιξης της τεχνολογίας WDM με τα βασικά χαρακτηριστικά της υπάρχουσας υποδομής. Όμως εδώ, οι WDM σύνδεσμοι ενώνονται μέσω ενός μη οπτικού, δηλαδή ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Έτσι, οι δυο κόμβοι που επικοινωνούν μέσω κάθε συνδέσμου WDM ανταλλάζουν δεδομένα κάνοντας χρήση πολλαπλών διαφορετικών καναλιών ( μήκη κύματος ) ταυτόχρονα και WDM συζευκτών αστέρα εξαιτίας της τεχνικής WDM. Η οπτική ίνα και η επικοινωνία που μας εξασφαλίζει θα ήταν πιο αποδοτική αν ήταν διπλής κατευθύνσεως. Μια άλλη εναλλακτική, θα ήταν να έχουμε έναν WDM από σημείο σε σημείο σύνδεσμο διπλής οπτικής ίνας, όπου η κάθε ίνα θα χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για τη ροή δεδομένων σε μια κατεύθυνση.

Τα δίκτυα WDM με συνδέσμους από σημείο σε σημείο αποτέλεσε τον λόγο που έχουν αρχίσει πολλοί φορείς να επενδύουν κεφάλαια για να ακολουθήσουν αυτή τη τάση αναβάθμισης σε WDM συνδέσμους. Ο βασικότερος λόγος είναι οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης από τους πελάτες τους και το ότι οι WDM συνδέσμοι από σημείο σε σημείο αποτελούν την πιο οικονομικά αποδοτική λύση σε σύγκριση με άλλες επιλογές για την επιθυμητή αύξηση της χωρητικότητας.

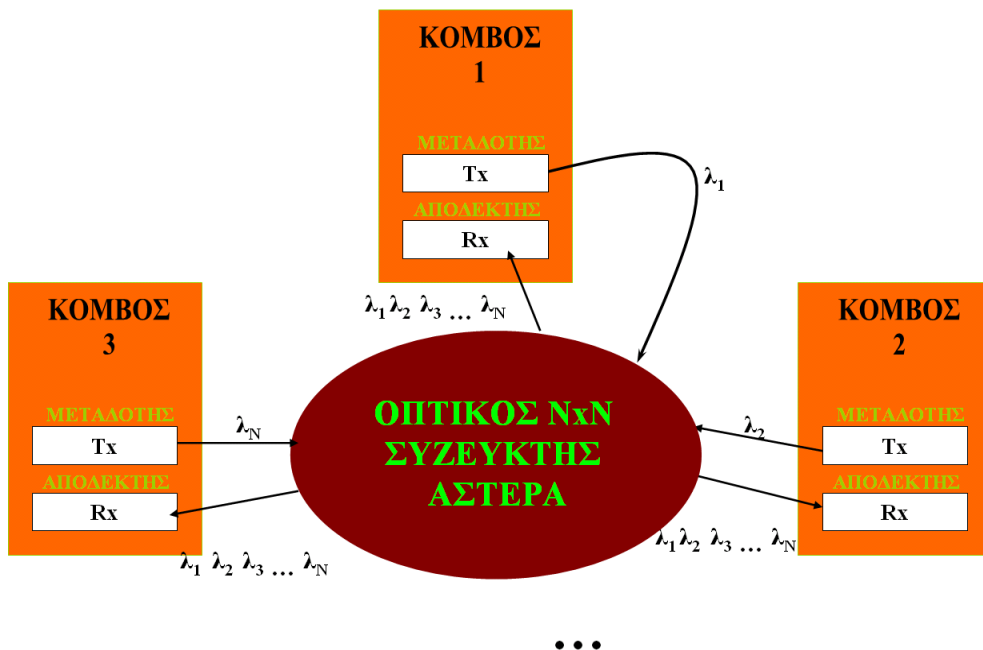
Όπως παρατηρούμε και στο παρακάτω σχήμα, ένας WDM σύνδεσμος αποτελείται από δύο κόμβους, στα δυο άκρα του συνδέσμου που έχουν πολλές θύρες εισόδου/εξόδου. Έχει πολλά διαφορετικά interfaces διασυνδέσεις σε κάθε θύρα, έτσι ώστε να παρέχει επικοινωνία μέσω διαφόρων πρωτοκόλλων πάνω από το σύνδεσμο. Επίσης, περιλαμβάνει ηλεκτρο-οπτικούς μετατροπείς για την μετάδοση σε διαφορετικά μήκη κύματος (κανάλια) και κατάλληλους αποδέκτες για κάθε μήκος κύματος, οι οποίοι μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρονική μορφή στα άκρα του συνδέσμου. Τέλος, απαραίτητο στοιχείο του είναι οι WDM πολυπλέκτες /αποπολυπλέκτες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι μετά τους μεταδότες, για WDM πολύπλεξη, και πριν το οπτικό σήμα φτάσει στους αποδέκτες, για WDM αποπολύπλεξη. Υπάρχουν όμως και ενισχυτές που η λειτουργία τους εξασφαλίζει επαρκή ισχύ σήματος κατά τη διαδρομή του από το ένα άκρο στο άλλο.



Σχήμα 3. 6 WDM σύνδεσμος σημείο σε σημείο. [2]

## WDM Δίκτυα Εκπομπής και Επιλογής [1]

Ένα WDM Δίκτυο εκπομπής και επιλογής αποτελείται από έναν οπτικό παθητικό συζεύκτη αστέρα  $N \times N$  (passive star coupler) και από  $N$  κόμβους. Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν συντονισμένο μεταδότη και ένα συντονιζόμενο ή μεταβλητό αποδέκτη. Ένα τέτοιο δίκτυο WDM εκπομπής και επιλογής με τοπολογία αστέρα με  $N$  κόμβους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κάθε κόμβος έχει ένα μεταδότη, σταθερά συντονισμένο σε ένα από τα  $N$  διαθέσιμα μήκη κύματος και ένα μεταβλητό αποδέκτη.



Σχήμα 3. 7 Δίκτυο WDM εκπομπής και επιλογής με τοπολογία αστέρα με  $N$  κόμβους [1]

Κάθε μεταδότης και κάθε αποδέκτης συνδέεται με έναν οπτικό συζεύκτη αστέρα μέσω ξεχωριστών οπτικών ίνων. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι οπτικών ίνων για να επικοινωνεί με τον κεντρικό συζεύκτη αστέρα. Η παρουσία του σταθερά συντονισμένου μεταδότη είναι ουσιαστική γιατί μεταδίδει μόνο σε ένα σταθερό μήκος κύματος στο οποίο θεωρείται πως είναι μονίμως συντονισμένος απ' την αρχή.

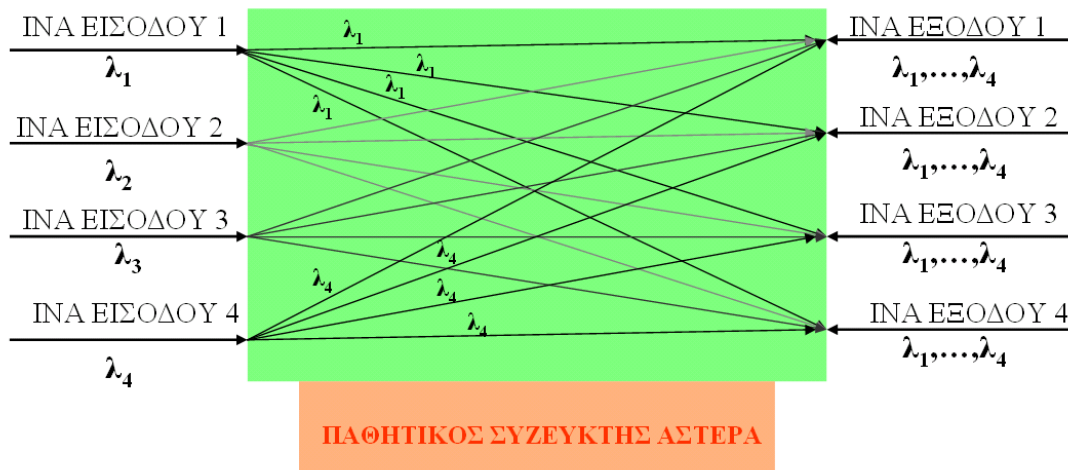
Από την άλλη, η λειτουργία των μεταβλητών αποδεκτών είναι να λαμβάνουν σε διάφορα μήκη κύματος. Αυτό γίνεται καθώς έχουν την δυνατότητα να συντονίζονται στο μήκος κύματος (κανάλι) που είναι επιθυμητό κάθε φορά, αρκεί αυτό να είναι μέσα στην περιοχή συντονισμού τους. Ο οπτικός  $N \times N$  παθητικός συζεύκτης αστέρας είναι παθητική συσκευή που δεν χρειάζεται τροφοδοσία και παρέχει ευκολία στον χειρισμό του. Η ισχύς ενός σήματος που μεταδίδεται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος και εισέρχεται από μια ίνα εισόδου διαιρείται σε κομμάτια και μοιράζεται σε ίσα μέρη σε όλες τις θύρες εξόδου στις οποίες εμφανίζεται ακριβώς στο ίδιο μήκος κύματος.

Στο παρακάτω σχήμα διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο ένα σήμα στο μήκος κύματος  $\lambda_1$  από την ίνα εισόδου 1 και ένα άλλο στο μήκος κύματος  $\lambda_4$  από την ίνα εισόδου 4, εκπέμπονται σε όλες τις ίνες εξόδου.

Στο δίκτυο WDM εκπομπής και επιλογής κάθε κόμβος  $i=1, \dots, N$  χρησιμοποιεί το μεταδότη για να μεταδώσει ένα σήμα σε ένα ξεχωριστό μήκος κύματος  $\lambda_i$ , το οποίο του δίνεται από την αρχή για αποκλειστικά δική του χρήση. Ο οπτικός  $N \times N$  συζεύκτης αστέρα έχει αρχικά σαν ικανότητα να συνδυάζει τα σήματα τα οποία λαμβάνει από κάθε κόμβο μέσω των ινών αποστολής και έπειτα στέλνει σε κάθε κόμβο τη μίξη των σημάτων μέσω των οπτικών ινών λήψης. Η λειτουργία του συζεύκτη σχετίζεται με την εκπομπή των σημάτων που λαμβάνει το δίκτυο από κάθε κόμβο σε όλους. Έπειτα κάθε κόμβος χρησιμοποιεί τον οπτικό αποδέκτη του Rx για να επιλέξει το μήκος κύματος που του αντιστοιχεί.

Βασικό πλεονέκτημα ενός WDM Δικτυού εκπομπής και επιλογής είναι ότι υποστηρίζει μεταδόσεις πολυεκπομπής multicast, εκτός από τις συνήθεις απλές μεταδόσεις unicast.

Αν όλοι οι κόμβοι-προορισμοί μιας πολυεκπομπής που γίνεται σε κάποιο μήκος κύματος συντονίσουν τους αποδέκτες τους σε αυτό το μήκος κύματος, τότε οι υπηρεσίες multicast υποστηρίζονται με άμεσο τρόπο. Υπάρχει όμως και ένας περιορισμός σε αυτά τα δίκτυα και συγκεκριμένα, αν δυο σταθμοί θέλουν να στείλουν οπτικά σήματα την ίδια χρονική στιγμή, αναγκαστικά πρέπει να επιλέξουν διαφορετικά μήκη κύματος (κανάλια) για να μεταδώσουν. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα ένα σήμα να ενσωματώνεται στο άλλο και η πληροφορία μας να φτάνει αλλοιωμένη και συνεπώς άχρηστη στους αποδέκτες. Αυτό ονομάζεται σύγκρουση (collision).



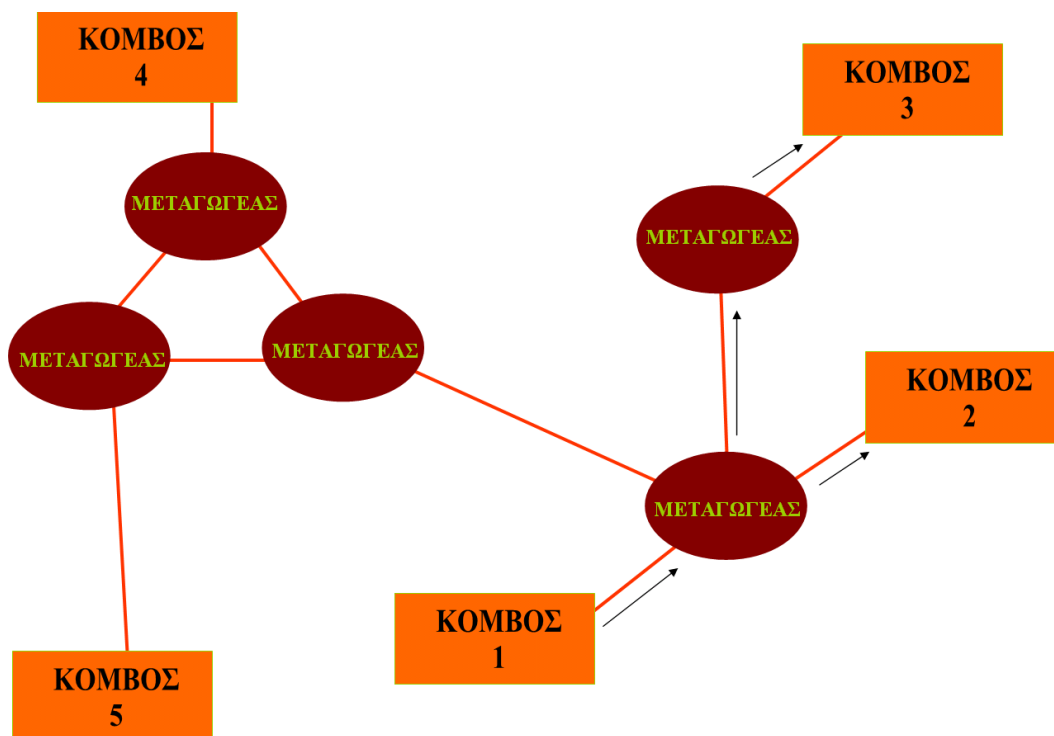
Σχήμα 3. 8 Η λειτουργία ενός  $4 \times 4$  παθητικού συζεύκτη αστέρα. [1]

Τα συνολικά διαθέσιμα μήκη κύματος-κανάλια πρέπει να διαμοιραστούν μεταξύ των διαφόρων κόμβων, δηλαδή των χρηστών του δικτύου. Όμως υπάρχει ένα σύνολο κανόνων, πρωτόκολλων, που έχει τη δυνατότητα να παρέχει συντονισμό μεταξύ των χρηστών του δικτύου και να αποφασίζει αυτό τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργήσει.

Ωστόσο, υπάρχει και ένα ακόμα μειονέκτημα της χρήσης οπτικού NxN παθητικού συζεύκτη αστέρα και αυτό είναι το πολύ μεγάλο μέρος απώλειας της οπτικής ισχύος που χάνεται καθώς ένα πολύ μικρό μέρος αυτής φτάνει στις θύρες εισόδου του συζεύκτη και φτάνει στις θύρες εξόδου του. Έστω, λοιπόν ότι έχουμε N κόμβους που μεταδίδουν την ίδια χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας τα μήκη κύματος που τους έχουν ανατεθεί. Ο συζεύκτης θα παραδώσει στις θύρες εξόδου του μόνο το  $1/N$  της ισχύος κάθε σήματος που φτάνει στις εισόδους του. Η απώλεια της ισχύος κάνει τα WDM Δίκτυα εκπομπής και επιλογής κατάλληλα μόνο για τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα (LANs και MANs) όπου ο αριθμός των συνολικών κόμβων δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος.

### Δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος [1][2]

Τα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος έχουν σαν βασικό χαρακτηριστικό τη χρήση OADMs και OXCs και προαιρετικά η χρήση μεταβλητών οπτικών μεταδοτών και αποδεκτών. Και σε αυτή την κατηγορία δικτύων μπορούν να είναι ενός ή περισσοτέρων βημάτων. Έτσι, από την μία έχουμε τα δίκτυα που χρησιμοποιούν σταθερούς μεταδότες και αποδέκτες και κάνουν αποκλειστική χρήση μεταγωγής κυκλώματος. Στην ειδική περίπτωση που οι μεταδότες είναι μεταβλητοί, τότε τα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούν είτε μεταγωγή κυκλώματος είτε μεταγωγή πακέτου ή και σε συνδυασμό των δυο. Από την άλλη, έχουμε τα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος πολλών βημάτων. Αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούν οπτικούς και ηλεκτρονικούς μεταγωγείς και κάνουν χρήση μεταγωγής κυκλώματος ή ακόμα μεταγωγή πακέτου ή και σε συνδυασμό και των δυο.



Σχήμα 3. 9 Οπτικό δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος. [1]

Όσον αφορά την δομική σύσταση αυτής της κατηγορίας δικτύων, αποτελούνται από ένα σύνολο οπτικών μεταγωγέων που διασυνδέονται με οπτικές γραμμές μετάδοσης.

Κάθε κόμβος του δικτύου διαθέτει έναν οπτικό μεταγωγέα, μεταδότες και αποδέκτες που στέλνουν και λαμβάνουν πληροφορίες από και προς το δίκτυο. Υπάρχει περίπτωση μέσα στον ίδιο σύνδεσμο να γίνονται παράλληλες μεταδόσεις στον ίδιο σύνδεσμο και έτσι για να αποφύγουμε οποιαδήποτε παρεμβολή πρέπει οι μεταδόσεις να γίνονται σε διαφορετικά μήκη κύματος. Έτσι, το οπτικό σήμα πρέπει να δρομολογηθεί από τους ενδιάμεσους μεταγωγείς δημιουργώντας ένα μονοπάτι γνωστό και ως «μονοπάτι φωτός» το οποίο αποτελείται από διάφορα μήκη κύματος, αν υπάρχουν στο δίκτυο (lightpath). Υπάρχει όμως και η πιθανότητα ο περιορισμός της συνέχειας του μήκους κύματος (wavelegh continuity constraint) σε ένα μονοπάτι φωτός να επιβάλλει τη χρήση ενός μόνο μήκους κύματος σε όλη τη διαδρομή μέσα στο δίκτυο.

## Δομικά στοιχεία δικτύων WDM [2][3]

**T**α βασικά στοιχεία της τεχνολογίας WDM, με βάση και τη θέση τους στο Δίκτυο, είναι τα εξής :

- **Οπτική ίνα**

Εμφανίζει χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση στην φασματική περιοχή μετάδοσης. Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η παρουσία *οπτικών ενισχυτών (optical amplifiers)* για την ενίσχυση του σήματος και τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις.

- **Πηγές laser**

Για την παροχή με χρήση αναμεταδοτών μηκών κύματος εξαιρετικής ακρίβειας και σταθερότητας.

- **Οπτικούς Πολυπλέκτες και Αποπολυπλέκτες (optical multiplexers & demultiplexers)**

Επιτρέπουν το συνδυασμό των εισερχόμενων προς μετάδοση σημάτων (σημείο εκπομπής) ή το διαχωρισμό του οπτικού σήματος στα στοιχειώδη σήματα που το απαρτίζουν (σημείο λήψης), αντίστοιχα.

- **Συσκευές φωτοανίχνευσης (photodetectors)**

- **Οπτικούς πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (add/drop optical multiplexers) και οπτικούς διασταυρωτήρες (optical cross-connect components).**

## Πηγές Φωτός και Ανιχνευτές [2]

**O**ι πηγές φωτός και οι συσκευές φωτοανίχνευσης (Light Sources and Detectors) βρίσκονται στα αντίθετα άκρα ενός συστήματος οπτικής εκπομπής. Συγκεκριμένα οι πηγές/πομποί οπτικών σημάτων έχουν σαν ρόλο να μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε παλμούς φωτός, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την εξωτερική διαμόρφωση ενός συνεχούς οπτικού σήματος ή ακόμα και με τη χρήση κατάλληλης συσκευής παραγωγής άμεσα διαμορφωμένων παλμών φωτός. Για



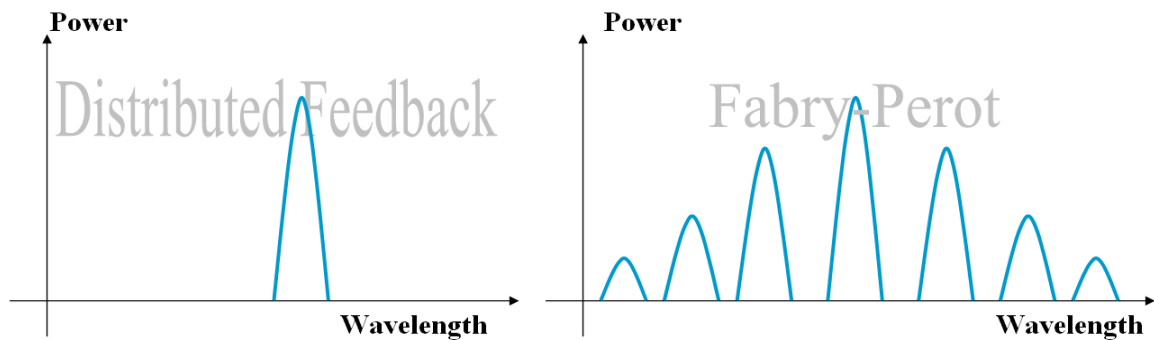
αυτή την διαδικασία έχουμε λοιπόν τους δίοδους φωτοεκπομπής (LED's) και τους δίοδους ακτινών Laser η αλλιώς ημιαγωγούς Laser.

Οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LED's) εξασφαλίζουν μικρές ταχύτητες που ωστόσο είναι κατάλληλες για εφαρμογές με ταχύτητες χαμηλότερες από 1 Gbps. Η ακτινοβολία που παράγουν είναι γενικά σε ένα ευρύ φάσμα. Κύρια χρήση αυτών των διατάξεων είναι συνήθως εφαρμογές πολύτροπων οπτικών ινών.

Οι ημιαγωγοί laser (semiconductor lasers) έχουν κυριαρχήσει στην χρήση τους καθώς τα χαρακτηριστικά τους και η απόδοση, τους καθιστά προτιμότερους. Δύο είναι τα βασικότερα είδη laser που χρησιμοποιούνται.

- Τα laser *κατανεμημένης ανάδρασης -Distributed Feedback (DFB)*
- και τα laser *Fabry-Perot*.

Όπως παρατηρούμε και στο σχήμα που ακολουθεί η μοναδική διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τύπων laser έγκειται στο γεγονός, ότι τα laser *κατανεμημένης ανάδρασης* εκπέμπουν ένα μόνο μήκος κύματος, ενώ τα laser Fabry-Perot εκπέμπουν πολλά μήκη κύματος το ένα κοντά στο άλλο.



Σχήμα 3. 10 DFB Vs Fabry-Perot laser [16]

Όσον αφορά τις *συσκευές φωτοανίχνευσης*, έχουμε δύο γενικούς τύπους Τις φωτοδιόδους PIN (Positive Intrinsic Negative) και τις φωτοδιόδους χιονοστιβάδας APD (Avalanche PhotoDiodes).

Οι φωτοδιόδοι PIN (Positive Intrinsic Negative) βασίζονται στην αντίστροφη αρχή λειτουργίας των LED's, καθώς μετατρέπουν τα φωτεινά σήματα σε ηλεκτρόνια μέσω μιας σχέσης 1:1. Οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας APD (Avalanche PhotoDiodes) παρέχουν επιπλέον και τη διεργασία της ενίσχυσης, μέσω της μετατροπής ενός φωτονίου σε πολλά ηλεκτρόνια σε αντίθεση με την πρώτη κατηγορία. Στα βασικά πλεονεκτήματα των PIN φωτοδίοδων είναι το χαμηλό κόστος και η αξιοπιστία, ενώ οι APD φωτοδιόδοι έχουν μεγαλύτερο κόστος, υψηλότερη ακρίβεια αλλά και ευαισθησία.

### Αναμεταδότες [16]

**Χ**ρησιμοποιούμε αναμεταδότες (Transponders) για να δημιουργήσουμε οπτικά σήματα που θα είναι συμβατά με την τεχνολογία WDM. Ο λόγος για την χρήση τους έγκυτε στο γεγονός ότι τα οπτικά σήματα που τροφοδοτούν τους αναμεταδότες προέρχονται από άλλα ινοοπτικά δίκτυα και δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις των συστημάτων WDM. Συγκεκριμένα, ο ρόλος του κάθε αναμεταδότη

είναι να λαμβάνει ένα οπτικό σήμα και στην συνέχεια να εξάγει μέσω ηλεκτροοπτικής αποδιαμόρφωσης το αντίστοιχο ψηφιακό σήμα πληροφορίας και έτσι να διαμορφώνει ένα laser. Τα χαρακτηριστικά του laser αυτού (μήκος κύματος εκπομπής, οπτική ισχύς εξόδου, εύρος μήκους κύματος) πρέπει να είναι συγκεκριμένα και συμβατά με τις απαιτήσεις της τεχνολογίας WDM. Επίσης, πρέπει να είναι υψηλής απόδοσης και να μπορεί να εκπέμπει σε μία από τις προκαθορισμένες (για τη ζεύξη WDM) περιοχές μήκους κύματος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται ισάριθμα οπτικά κανάλια που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ενός ψηφιακού σήματος πληροφορίας. Η χρήση των εξασθενιστών στις εξόδους των αναμεταδοτών γίνεται για την προσαρμογή της οπτικής ισχύος στις απαιτήσεις του πολυπλέκτη και των οπτικών ενισχυτών που ακολουθούν.

## Οπτικοί Ενισχυτές [2][17]

**Η** εξασθένιση του οπτικού σήματος κατά τη μετάδοσή του μέσα από την ίνα είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στα δίκτυα WDM. Η ενίσχυση του οπτικού σήματος καθίσταται απαραίτητη και γίνεται με χρήση οπτικών ενισχυτών. Πριν ακόμα αναπτυχθούν οι οπτικοί ενισχυτές ο μοναδικός τρόπος ενίσχυσης τους σήματος ήταν μέσω ηλεκτρικής αναγέννησης. Η διαδικασία της αναγέννησης σε πρώτο στάδιο μετατραπεί το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, έπειτα το ενισχύει και τελικά ξαναμετατρέπει σε οπτικό και έπειτα το μεταδίδει. Η διαδικασία της αναγέννησης απαιτεί μία ξεχωριστή συσκευή (regenerator - αναγεννητή) για κάθε μήκος κύματος. Ο οπτικός ενισχυτής λύνει αυτό το μειονέκτημα που καθιστά την χρήση της μεθόδους της αναγέννησης προβληματική καθώς μπορεί να ενισχύσει ταυτόχρονα όλα τα μήκη κύματος σε μια ίνα. Οι οπτικοί ενισχυτές έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα ανεξαρτησίας τους από πρωτόκολλα και ρυθμό μετάδοσης κάτι το οποίο εξασφαλίζει ευελιξία στο γεγονός ότι μια σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει διάφορα πρωτόκολλα (ATM, SONET, PPP κ.α), με οποιονδήποτε ρυθμό μετάδοσης. Το μέγεθος των οπτικών ενισχυτών είναι μικρό και έχει εξίσου μικρές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ. Η χρήση των οπτικών ενισχυτών μας παρέχει ενίσχυση της ισχύος του σήματος μετά από διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης, οι οποίες προκαλούν απώλειες στο σύστημα και συγκεκριμένα στην τεχνολογίας WDM που εξετάζουμε, η οποία επιβάλλει την εκπομπή υψίρρυθμων σημάτων και σε μεγάλες αποστάσεις. Ο ιδανικός τύπος οπτικού ενισχυτή είναι ο Ivo-Οπτικός Ενισχυτής Εμβρύου (Erbium-Doped Fiber Amplifier-EDFA) που θα αναλύσουμε στην συνέχεια.

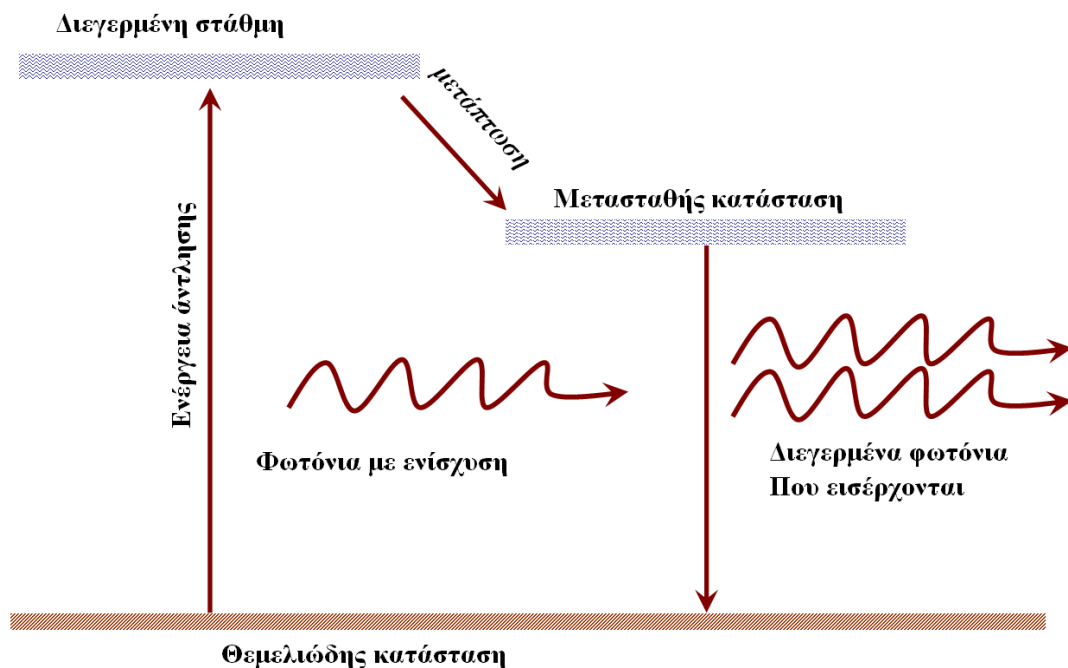
## Οπτικός Ενισχυτής Εμβρύου (EDFA) [2][16]

**Ο**ι πιο διαδεδομένοι οπτικοί ενισχυτές σήμερα είναι οι Ivo- Οπτικοί Ενισχυτές Εμβρύου (Erbium-Doped Fibre Amplifiers - EDFAs). Οι ενισχυτές αυτοί αποτελούνται από μια οπτική ίνα, της οποίας ο πυρήνας είναι νοθευμένος με ιόντα Εμβρύου. Έτσι όταν τροφοδοτηθεί με τη δέσμη ενός laser άντλησης (pump laser) θα ξεκινάει μια διαδικασία αναστροφής πληθυσμών, η οποία οδηγεί σε ενίσχυση των πολυπλεγμένων οπτικών σημάτων. Στους περισσότερους οπτικούς ενισχυτές η οπτική ενίσχυση πραγματοποιείται στην περιοχή 1525 - 1565 nm και οι ζεύξεις WDM λειτουργούν στο οπτικό παράθυρο των 1550 nm. Η παρουσία των ιόντων Εμβρύου στο υλικό της ίνας ενίσχυσης, δημιουργεί μια δομή τριών

ενεργειακών ζωνών, με ενεργειακές διαφορές. Η επίδραση της δέσμης του laser άντλησης έχει σαν αποτέλεσμα τα φωτόνια να μεταφέρονται στην ανώτερη ζώνη, από την οποία μεταπίπτουν στην ενδιάμεση. Η ζώνη αυτή είναι μετασταθής (metastable) και διαθέτει μεγάλο χρόνο ημιζωής κάτι το οποίο παρέχει συσσώρευση ηλεκτρονίων και αναστροφής πληθυσμών σε βάρους της βασικής ζώνης.

Έτσι ξεκινάει εξαναγκασμένη εκπομπή (lasing) η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φωτονίων μηκών κύματος  $\lambda = 1525-1565$  nm και την ενίσχυση του αρχικού οπτικού σήματος .

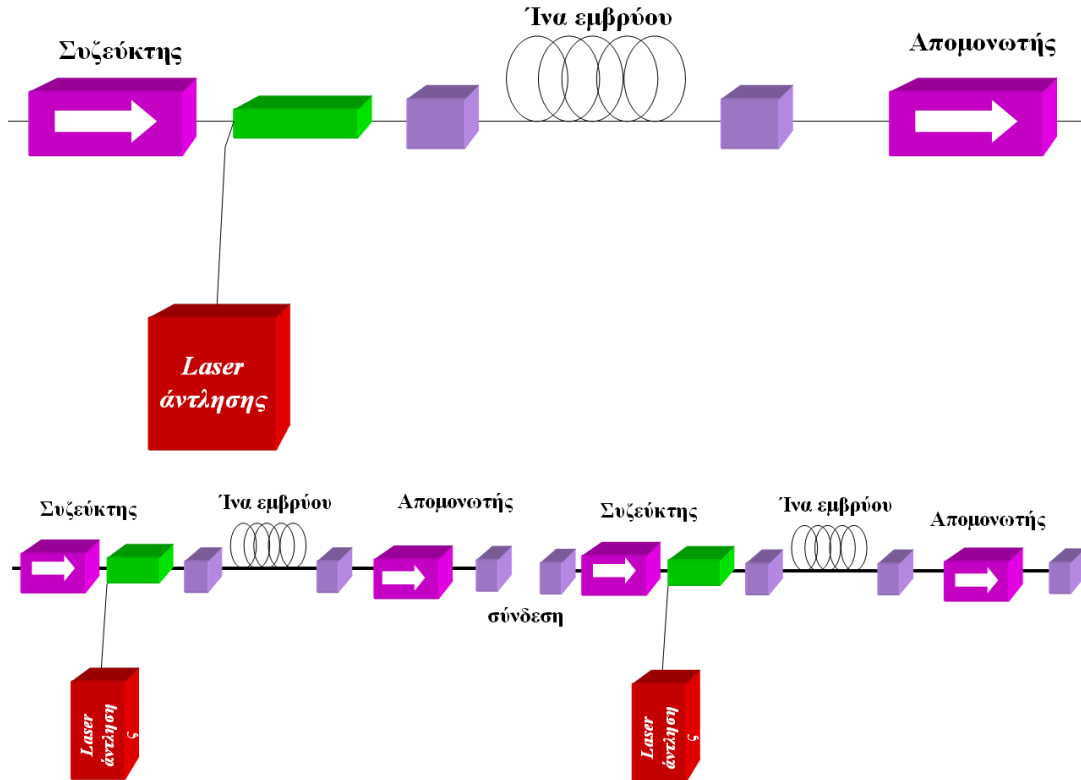
Η διαδικασία των οπτικών ενισχυτών ίνας εμβρύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου διακρίνουμε αρχικά τη διεργασία άντλησης, η οποία πραγματοποιείται με laser μήκους κύματος 1480 nm, τα οποία προσφέρουν μεγαλύτερες ενισχύσεις αλλά και υψηλότερο θόρυβο.



Σχήμα 3. 11 Μηχανισμός Οπτικής Ενίσχυσης Εμβρύου [16]

Ο μηχανισμός Οπτικής ενίσχυσης Εμβρύου χρησιμοποιείται για την ενίσχυση σημάτων διαφορετικών μηκών κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να ενωθούν πολλοί ενισχυτές στην σειρά για να διαδώσουν το οπτικό σήμα μέσω μιας οπτικής ίνας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Όμως, ο μέγιστος αριθμός των οπτικών ενισχυτών αυτού του είδους που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε περιορίζεται στον αριθμό των πέντε ενισχυτών έτσι ώστε να αποφύγουμε τον θόρυβο που εισάγει η χρήση τους. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο ρόλος ενός οπτικού ενισχυτή σε μία ζεύξη WDM, μπορεί να ποικίλει, καθώς ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενίσχυση της οπτικής ισχύος του οπτικού σχήματος (booster amplifier) μετά την έξοδο του πολυπλέκτη, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς ή ακόμα και σαν ενισχυτής γραμμής (in-line amplifier) για την ενίσχυση του σήματος σε τακτές αποστάσεις (συνήθως 80-120 km). Τέλος, η χρήση του δεν περιορίζεται εκεί καθώς χρησιμοποιείται πριν την είσοδο του αποπολυπλέκτη, για να εξασφαλίσει στο οπτικό σήμα, να αποκτήσει επαρκή ισχύ που θα χρειαστεί στην διαδικασία της αποπολυπλεξίας και τη λήψη των

αποπολυπλεγμένων καναλιών από τους επιμέρους δέκτες. Η χρήση του σε αυτή την περίπτωση είναι ως προενισχυτής (pre-amplifier). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η βασική διάταξη ενός Ινο-Οπτικού Ενισχυτή Εμβρύου καθώς και η περίπτωση ενίσχυσης με δύο βαθμίδες, βάση της οποίας καταφέρνουμε ενίσχυση με χαμηλό θόρυβο στην πρώτη βαθμίδα και μεγαλύτερη ενίσχυση στην δεύτερη.



Σχήμα 3. 12 Βασική σχεδίαση Ινο-Οπτικού Ενισχυτή Εμβρύου και ενίσχυση με δύο βαθμίδες [16]

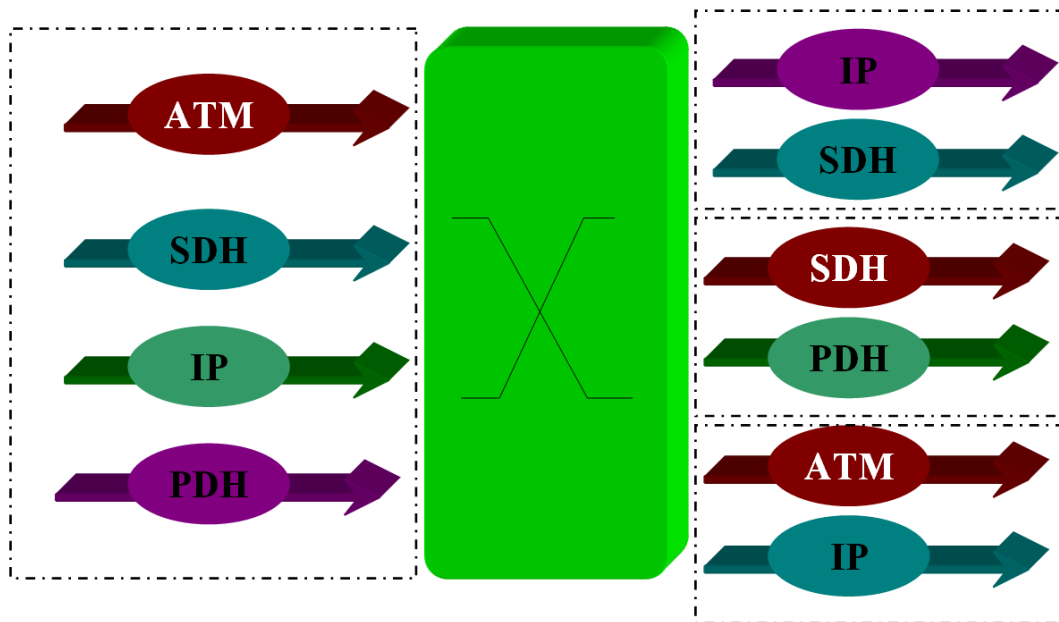
Τα μειονεκτήματα της χρήσης οπτικών ενισχυτών ίνας εμβρύου είναι ότι λειτουργούν στο διάστημα 1530-1560 nm, με ελάχιστη εξασθένηση του σήματος στην περιοχή 1500-1600nm. Επιπλέον, έχουμε το φαινόμενο του crosstalk και αυτό γιατί η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών μηκών κύματος είναι μικρή, στο διάστημα 0.8-1.6nm. Τα μειονεκτήματα αυτά μας οδήγησαν στην χρήση μια άλλης τεχνολογίας, ικανής να λειτουργεί στο διάστημα 1528-1610nm, στους οπτικούς ενισχυτές *Silica Erbium fiber-based Dual-band fiber amplifier (DBFA)*.

Οι οπτικοί ενισχυτές DBFA έχουν παρόμοια λειτουργία με αυτούς της ίνας Εμβρύου, με την διαφορά ότι λειτουργούν σε πρόσθετο διάστημα, κάτι που τους κάνει καλύτερους από τους ενισχυτές ίνας εμβρύου, αφού φτάνουν στον κόρο πιο αργά και άρα εμφανίζουν λιγότερο θόρυβο.

## Οπτικοί Διασταυρωτήρες [1][2][16]

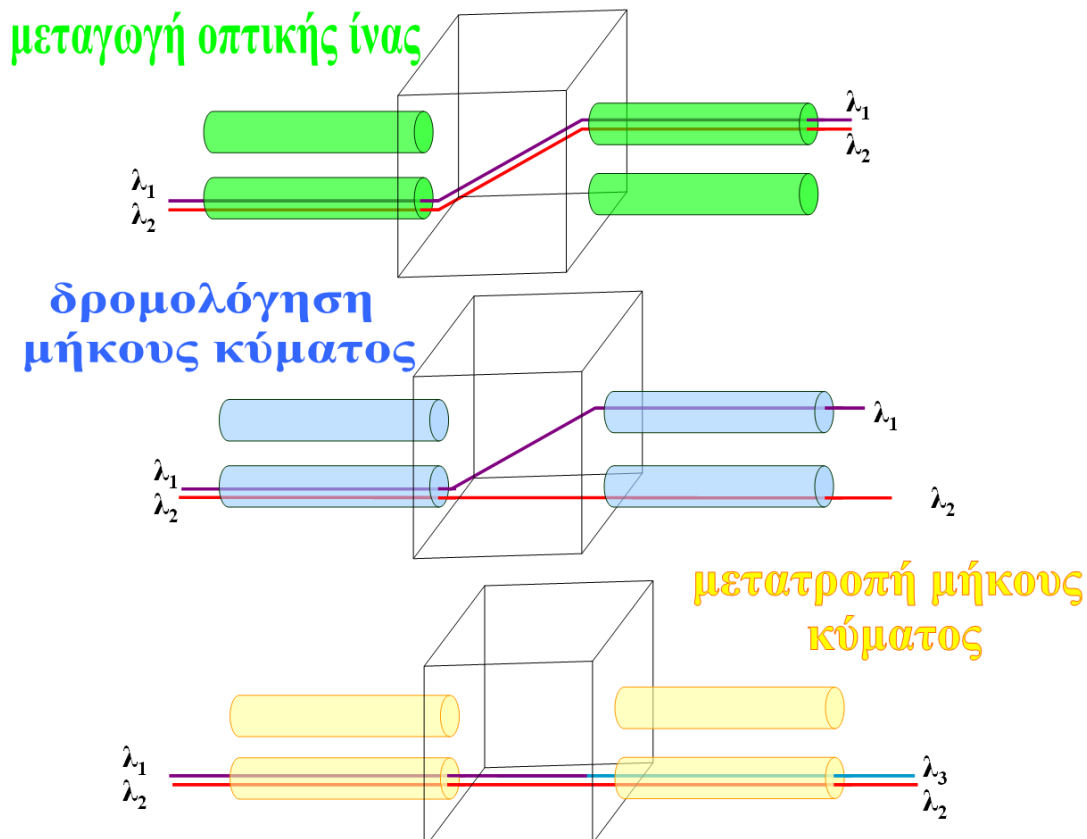
Ένας οπτικός διασταυρωτήρας (*Optical Cross Connect – OXC*) είναι μια διάταξη N οπτικών εισόδων και N οπτικών εξόδων. Η εξελιγμένη μορφή ενός οπτικού διασταυρωτήρα μπορεί να δρομολογήσει οπτικά κανάλια στο

οπτικό επίπεδο από κάθε είσοδο σε κάθε έξοδο και μάλιστα δυναμικά. Αυτό έχει μεγάλη σημασία για την ανάπτυξη ευέλικτων ολο-οπτικών δικτύων (all-optical networks).



Σχήμα 3. 13 Οπτικός διασταυρωτήρας [6]

Στην οπτική περιοχή χρειάζεται ένα στοιχείο δικτύου τέτοιο έτσι ώστε να μπορεί να δέχεται διάφορα μήκη κύματος στις εισόδους του και να τα εξάγει στις αντίστοιχες εξόδους. Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο οπτικός διασταυρωτήρας (OXC) χρειάζεται τρία βασικές λειτουργίες. Η πρώτη λειτουργία αφορά την μεταγωγή οπτικής ίνας, για να μπορούν να οδηγούνται τα μήκη κύματος από μια οπτική ίνα εισόδου σε μια άλλη διαφορετική όμως, οπτική ίνα εξόδου. Η δεύτερη λειτουργία αφορά την δυνατότητα δρομολόγησης συγκεκριμένων μηκών κύματος από μια οπτική ίνα εισόδου σε πολλαπλές οπτικές ίνες εξόδου. Τέλος, η λειτουργία της μετατροπής μήκους κύματος εκφράζει την λειτουργία του επαναχρωματισμού των εισερχόμενων μηκών κύματος και τη μετάδοσή τους με άλλη συχνότητα στην έξοδο.



Σχήμα 3. 14 Λειτουργίες ενός OXC [1]

Η χρήση οπτικών διασταυρωτήρων στοχεύει στην μείωση του χρόνου διασταύρωσης (cross-connection time) αλλά και στην μείωση των απωλειών παρεμβολής και η επίτευξη υψηλής διακαναλικής απομόνωσης στην αποφυγή αλληλοπαρεμβολών.

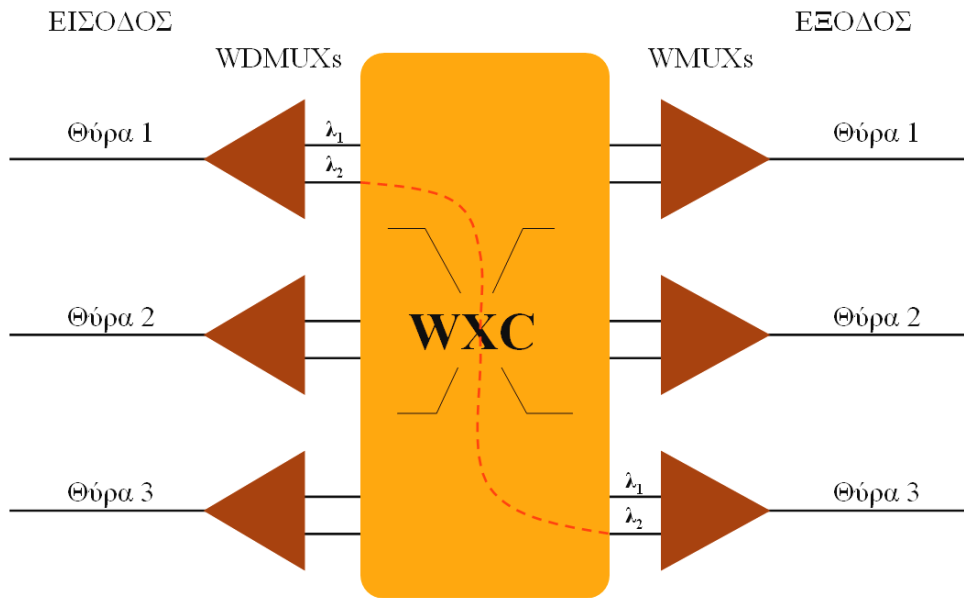
## WXC [1]

**T**ο βασικότερο δομικό στοιχείο των δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος είναι ο κόμβος δρομολόγησης μήκους κύματος. Κάθε κόμβος λειτουργεί στην πραγματικότητα ως διασύνδεση μηκών κύματος (wavelength crossconnects-WXCs) ή σαν μια οπτική διασύνδεση (optical crossconnects-OPCs).

Για να καταλάβουμε την λειτουργία ενός κόμβου WXC, ο οποίος έχει πολλές θύρες εισόδου/εξόδου και μετάγει τα σήματα φωτός των θυρών εισόδου στις θύρες εξόδου του, αρκεί να κατανοήσουμε την λειτουργία ενός DCS που διασυνδέει και μετάγει πολλές ροές δεδομένων. Κάθε θύρα εισόδου και κάθε μήκος κύματος είναι υπεύθυνα για την δρομολόγηση για κάθε εισερχόμενο σήμα (δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος). Επίσης, οι WXCs έχουν διάφορες τοπικές θύρες, οπτικές ή ηλεκτρικές, όπου ξεκινούν και τερματίζονται τα μονοπάτια φωτός. Μονοπάτι φωτός ονομάζεται ένα αμιγώς οπτικό μονοπάτι σε ένα ζεύγος τελικών κόμβων. Στην ουσία είναι μια λογική σύνδεση υψηλής ταχύτητας για ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους.

Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίσταται ο WXC κόμβος 2 του Δίκτυου δρομολόγησης μήκους κύματος με τοπολογία πλέγματος που είδαμε πιο πάνω. Συγκεκριμένα,

παρατηρούμε την απαραίτητη ύπαρξη των πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών μήκους κύματος και η μεταγωγή για το μονοπάτι φωτός ΑΔ στο  $\lambda_2$ .



Σχήμα 3. 15 WXC2 [1]

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο κόμβος του δικτύου μας έχει τρεις θύρες εισόδου, τρεις θύρες εξόδου και μια τοπική θύρα διπλής κατεύθυνσης που τον συνδέει με τον τελικό κόμβο Β. Στην πραγματικότητα υπάρχουν ζεύγη θυρών εισόδου/εξόδου, απ' την στιγμή που έχουμε συνδέσεις διπλής κατεύθυνσης, με ζεύγος οπτικών ινών, αυτού του WXC με άλλους. Η ύπαρξη των πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών μήκους κύματος είναι απαραίτητη για τα εξερχόμενα και εισερχόμενα σήματα φωτός από τον και στον WXC κόμβο. Χρησιμοποιούμε πολυπλέκτη προσθήκης και εξαγωγής μηκών κύματος (WADM) ή οπτικό πολυπλέκτη προσθήκης και εξαγωγής (OADM) όταν ένας κόμβος WXC έχει μόνο δυο ζεύγη θυρών εισόδου και εξόδου ή ακόμα και όταν μπορεί να συνδεθεί μόνο με άλλους δυο WXCs μέσω δυο συνδέσεων διπλής κατεύθυνσης, χωρίς να λάβουμε υπόψη άλλες θύρες που μπορεί να χρησιμοποιούνται για προστασία σε περίπτωση βλάβης,

## WDM Πολυπλέκτες & Αποπολυπλέκτες [2][17]

**Μ**ια μονότροπη οπτική ίνα διαθέτει πολύ μεγάλο εύρος ζώνης. Η τεχνική της πολύπλεξης μήκους κύματος θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική στην προσπάθεια αξιοποίησης αυτού του μεγάλου εύρους ζώνης.

Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ένα κανάλι οπτικής ίνας ισούται με 30 THz. Έτσι, με χρήση της τεχνικής του WDM είναι εφικτός ο συνδυασμός πολλών μηκών κύματος στην ίδια ίνα. Η χρήση πολυπλεκτών με διαίρεση μήκους κύματος για την πολύπλεξη πολλών μηκών κύματος στην ίδια ίνα πραγματοποιήθηκε και έγινε εφικτή

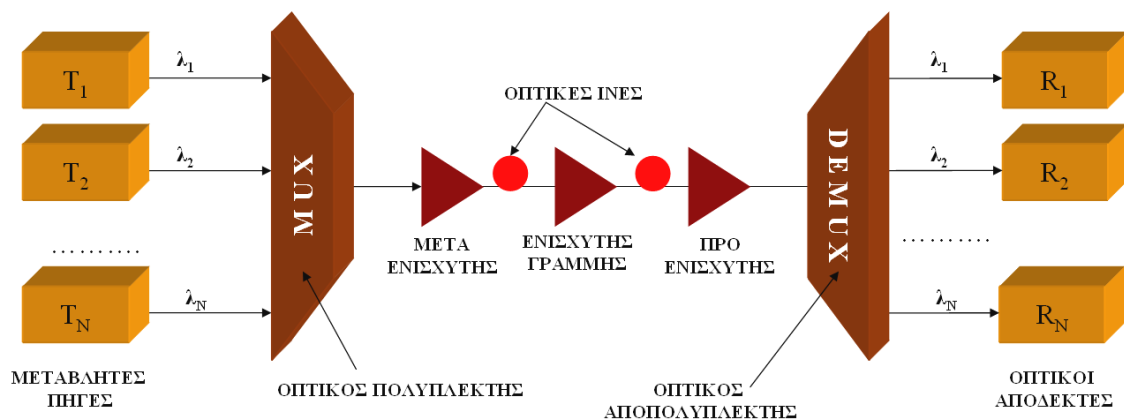


με χρήση οπτικών ενισχυτών με μεγάλο εύρος. Η τεχνική του WDM βελτιώνει τις δυνατότητες του οπτικού συστήματος.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος WDM είναι :

- ✓ Η χρωματική διασπορά της οπτικής ίνας
- ✓ Η έλλειψη ομοιομορφίας στην απολαβή των ενισχυτών EDFA στην επιθυμητή ζώνη μηκών κύματος
- ✓ Τα φαινόμενα σκέδασης
- ✓ Τα μη γραμμικά φαινόμενα
- ✓ Οι αντανακλάσεις από συγκολλήσεις και συνδετήρες

Τα πρώτα συστήματα χρησιμοποιούσαν μόνο δυο μήκη κύματος στα 1310 και 1550 nm οπότε και η απόσταση μεταξύ των καναλιών ήταν πολύ μεγάλη. Αργότερα όμως η χρήση ενισχυτών EDFA επέτρεψε την ανάπτυξη τεχνικών μείωσης των αποστάσεων μεταξύ των μηκών κύματος. Οι αποστάσεις στα WDM συστήματα είναι 1000, 400, 200, 100, 50 GHz ή 8, 3.2, 1.6, 0.8, και 0.4 nm στην περιοχή των 1550 nm. Συστήματα πυκνής πολύπλεξης ονομάζουμε τα συστήματα WDM με αποστάσεις μικρότερες ή ίσες των 200 GHz (dense wavelength division multiplexing-DWDM).



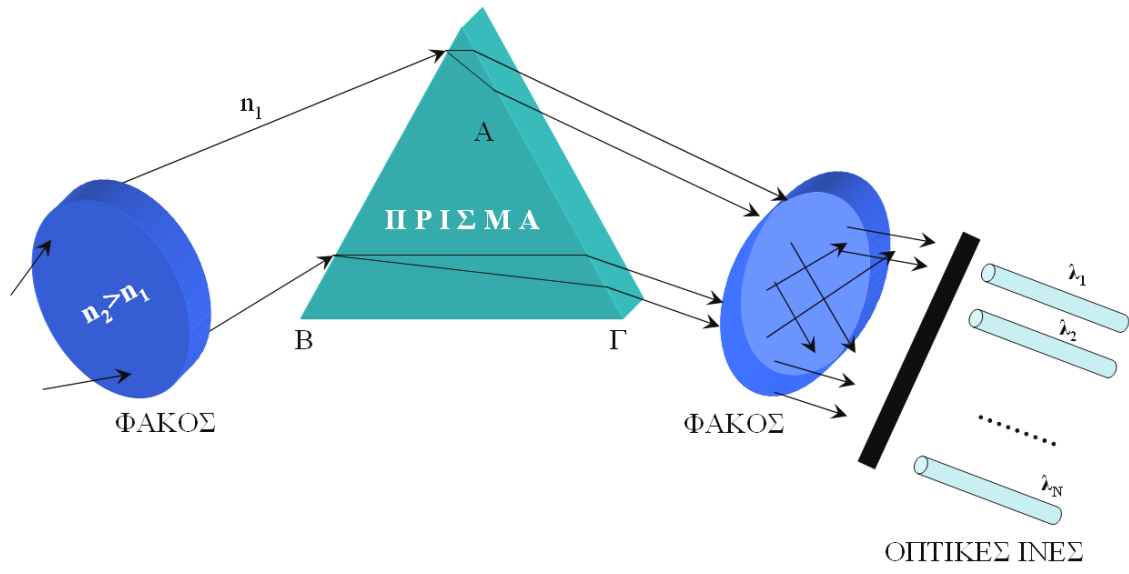
Σχήμα 3. 16 Διάταξη συστήματος πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος.[1]

Η χρήση DWDM πολυπλεκτών, αποπολυπλεκτών μπορεί να χειριστεί κανάλια με μικρές αποστάσεις μεταξύ τους. Ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων απαιτεί στενές ζώνες διέλευσης με πλάτος συνήθως 0.4 nm, καθώς και αναδίπλωση για την απόρριψη των γειτονικών καναλιών. Τέλος, χρειάζεται σταθερότητα στη λειτουργία υπό αυξημένη θερμοκρασία.

Οι πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες μπορούν να είναι είτε παθητικές είτε ενεργητικές συσκευές, όσον αφορά το σχεδιασμό τους. Το κομμάτι των παθητικών σχεδιασμών αφορά σε πρίσματα, φράγματα περίθλασης ή φίλτρα. Σε αντίθεση, το κομμάτι των ενεργών σχεδιασμών συνδυάζει παθητικές συσκευές με μεταβλητά φίλτρα. Η ελαχιστοποίηση της συνακρόασης και η μεγιστοποίηση της διάκρισης μεταξύ των καναλιών αποτελούν τα βασικότερα σημεία στο σχεδιασμό αυτών των συσκευών. Όσον αφορά το πρώτο, την συνακρόαση, είναι ένα μέτρο του πόσο καλά είναι διαχωρίσιμα τα κανάλια, ενώ η διάκριση των καναλιών μετρά την ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.

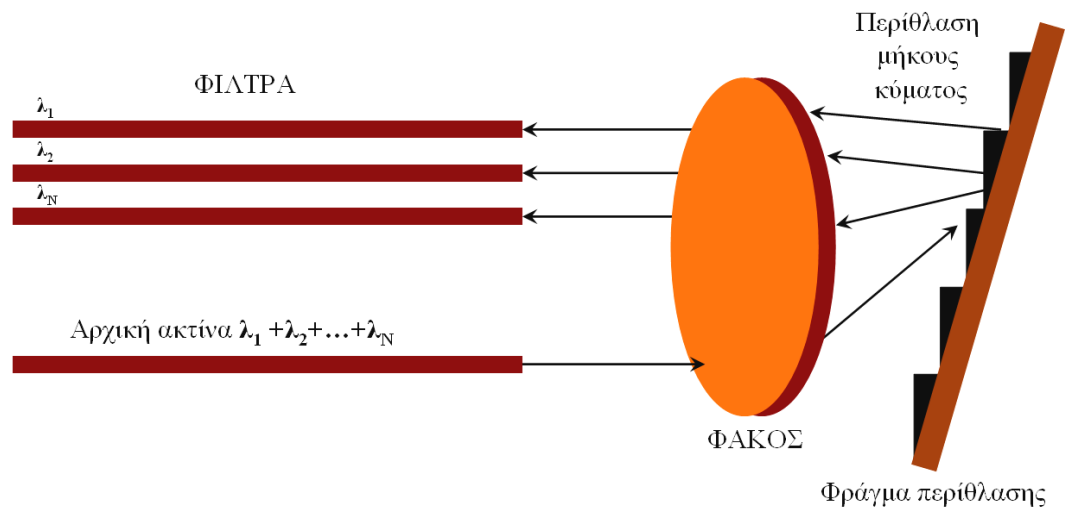


Η πολύπλεξη ή αποπολύπλεξη φωτός μπορεί να γίνει σε απλή μορφή με χρήση ενός πρίσματος. Έτσι, μια παράλληλη ακτίνα πολυχρωματικού φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια ενός πρίσματος και κάθε μήκος κύματος διαθλάται διαφορετικά. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο του ουρανίου τόξου. Στο φως που προκύπτει, κάθε μήκος κύματος απέχει από το επόμενο κατά μια γωνία. Με χρήση ενός φακού, ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος μπορεί να οδηγηθεί στην είσοδο μιας ίνας. Έτσι, αν τα ίδια στοιχεία χρησιμοποιηθούν αντίστροφα, μπορεί να γίνει πολύπλεξη μηκών κύματος σε μία ίνα. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία αποπολύπλεξης μέσω διάθλασης σε πρίσμα.



Σχήμα 3. 17 Αποπολύπλεξη φωτός με διάθλαση σε πρίσμα [1][2]

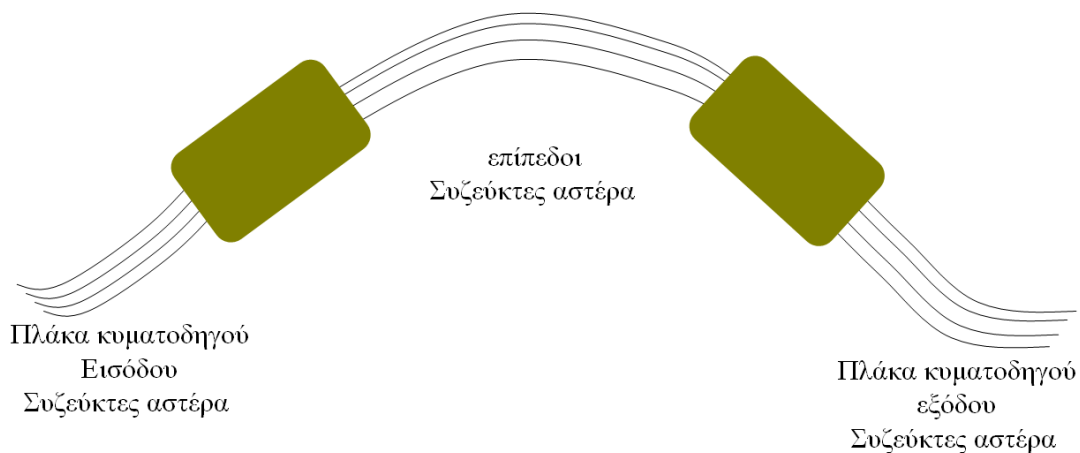
Στο επόμενο σχήμα διακρίνουμε και μια ακόμα τεχνική πολύπλεξης η οποία βασίζεται στις αρχές της περίθλασης και της οπτικής παρεμβολής. Συγκεκριμένα όταν πολυχρωματικό φως προσπίπτει σε ένα φράγμα περίθλασης τότε κάθε μήκος κύματος περίθλαται υπό διαφορετική γωνία και συνεπώς σε άλλο σημείο στο χώρο.



Σχήμα 3. 18 Περίθλασης με χρήση φράγματος [1][2]

Οι συσκευές AWG ή αλλιώς οι οπτικοί δρομολογητές κυματοδηγών ή φράγματα κυματοδηγών αποτελούνται από μια διάταξη καμπυλών κυματοδηγών, στους οποίους η διαφορά στο μήκος διαδρομής μεταξύ γειτονικών καναλιών είναι σταθερή. Στην είσοδο και την έξοδο οι κυματοδηγοί συνδέονται με κοιλότητες. Όταν το φως εισέρχεται στην κοιλότητα εισόδου περίθλαται και εισέρχεται στη διάταξη των κυματοδηγών.

Ωστόσο, υπάρχει και μια ακόμη τεχνική η οποία είναι βασισμένη στις αρχές της συμβολής του φωτός. Η τεχνική του πλέγματος κυματοδηγών (AWG). Σε αυτή την τεχνική μια συσκευή AWG, που έχει την λειτουργία ενός οπτικού κυματοδηγού δρομολόγησης και αποτελείται από μια σειρά κυματοδηγών με καμπυλόγραμμο κανάλια με σταθερή διαφορά στο μήκος μετάδοσης, όπως βλέπουμε στο σχήμα.



Σχήμα 3. 19 Πλέγμα Κυματοδηγών (Arrayed Waveguide Grating-AWG) [1][2]

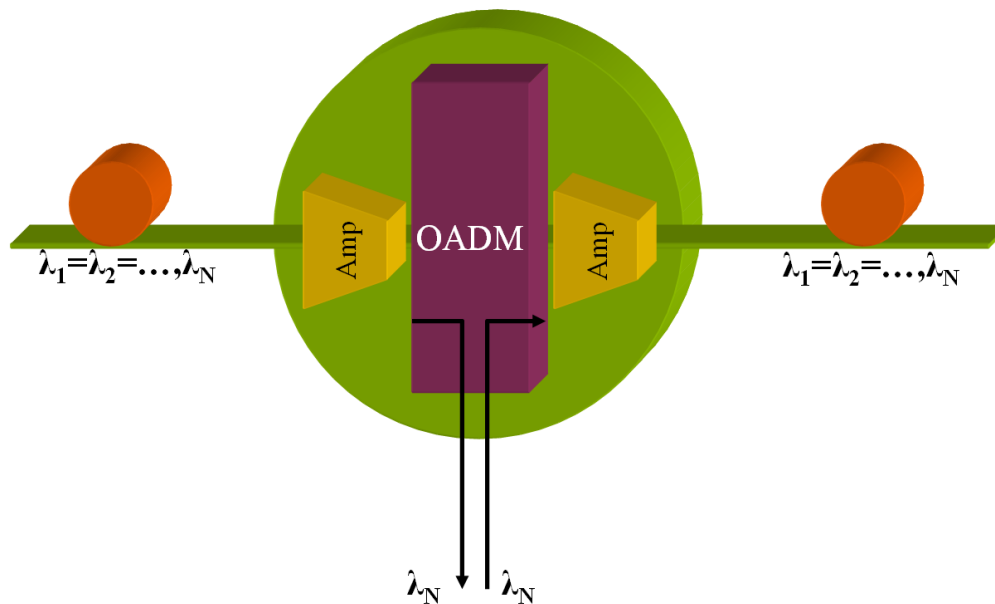
Οι τεχνικές AWG και των φίλτρων πολλαπλών στρωμάτων φαίνεται να υπερτερούν.

Η τεχνική των φίλτρων παρεμβολής προσφέρει υψηλή σταθερότητα και απομόνωση μεταξύ των καναλιών με ικανοποιητικό κόστος, έχοντας ωστόσο μεγάλες απώλειες παρεμβολής του συστήματος (insertion losses). Η τεχνική AWG έχει ως βασικότερο πλεονέκτημα τη δυνατότητα σχεδιασμού ώστε οι διαδικασίες πολύπλεξης / αποπολύπλεξης να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπλέον, είναι κατάλληλη όταν απαιτείται μεγάλος αριθμός καναλιών, ενώ εμφανίζει χαμηλότερες απώλειες παρεμβολής (insertion losses). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η θερμοκρασιακή ευαισθησία των διατάξεών της, καθιστώντας την έτσι ακατάλληλη για ορισμένα περιβάλλοντα.

## Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης [2][17]

Οι Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης είναι μια ειδική κατηγορία οπτικών πολυπλεκτών που συμβάλουν στη δημιουργία εξολοκλήρου οπτικών δικτύων. Ο ρόλος τους και η χρήση τους είναι συγκεκριμένοι και αφορούν την εξαγωγή (dropping) του σύνθετου οπτικού σήματος και πολλές φορές την εισαγωγή (adding) ενός ή περισσότερων οπτικών καναλιών. Ένας Οπτικός Πολυπλέκτης

Προσθαφαίρεσης - OADM έχει την ίδια λειτουργία με τις αντίστοιχες ADM/SONET διατάξεις, με μοναδική ουσιαστική διαφορά ότι δεν μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό πριν το διαχωρισμό. Ένας Οπτικός Πολυπλέκτης Προσθαφαίρεσης - OADM μπορεί να εισάγει/εξάγει αριθμό καναλιών από 4 έως 32.



Σχήμα 3. 20 Οπτικός πολυπλέκτης προσθαφαίρεσης [1]

Υπάρχουν δύο κατηγορίες στους Οπτικούς Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης . Ο ένας είναι μια σταθερή με φυσικό τρόπο διαμορφωμένη ώστε να εξαγάγει (drop) συγκεκριμένα και προκαθορισμένα μήκη κύματος και ο δεύτερος τύπος είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να επιλέγει τα μήκη κύματος προτού τα εισάγει αλλά και ποια να εξαγάγει.

## WDM ΔΙΚΤΥΩΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθεί η τεχνική με την οποία συνδυάζεται η τεχνολογία WDM με αρχιτεκτονικές δικτύου υψηλότερων επιπέδων ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση των μεγάλων ρυθμών μετάδοσης. Ο συνδυασμός του WDM με τις αρχιτεκτονικές υψηλότερων επιπέδων δημιουργεί μεγάλη πολυπλοκότητα στα οπτικά δίκτυα, γεγονός που προκαλεί προβλήματα, όπως το μεγάλο κόστος υλοποίησης και η δυσκολία επέκτασης ενός οπτικού δικτύου.

Ο λόγος που δημιουργήθηκαν οι αρχιτεκτονικές SONET και SDH οφείλεται στην χρήση της οπτικής μετάδοσης σε backbone δίκτυα στα οποία συνδέονται πελάτες με διαφορετικές ανάγκες σε ταχύτητες πρόσβασης και διαφορετικού τύπου εξοπλισμό ήταν ένας από τους λόγους που οδήγησαν στην δημιουργία προτύπων περιγραφής του τρόπου μεταφοράς δεδομένων πάνω από ένα οπτικό δίκτυο και κυρίως του τρόπου διασύνδεσης πάνω σε ένα οπτικό δίκτυο. Έτσι, οι αρχιτεκτονικές SONET και SDH καθορίζουν πρότυπα για τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων πάνω από οπτικά δίκτυα καθώς και τους τρόπους ομαδοποίησης και μετάδοσης των δεδομένων σε πλαίσια. Ουσιαστικά, οι αρχιτεκτονικές SONET/SDH αποτελούν ένα επίπεδο που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο των οπτικών ινών και του ακριβούς τρόπου

μετάδοσης του οπτικού σήματος μέσα από αυτές. Παρόλα αυτά όμως, τον τελευταίο καιρό αρχίζει μια έντονη αμφισβήτηση της χρησιμότητας ύπαρξης του επιπέδου SONET/SDH, η οποία έχει οδηγήσει στην υλοποίηση συστημάτων WDM που δεν απαιτούν την ύπαρξη συστήματος SONET/SDH για την παροχή υπηρεσιών σε αρχιτεκτονικές υψηλότερων επιπέδων.

Όπως ήδη αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, μια λύση για την δημιουργία δικτύων τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν τις νέες απαιτητικές για εύρος ζώνης εφαρμογές, είναι η τεχνολογία πολυπλεξίας μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing).

Η τεχνολογία αυτή βασίστηκε στο γεγονός που αποτέλεσε και αρχική ιδέα ότι σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα, έτσι είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας ( $\lambda$ ) ή αλλιώς διαφορετικού χρώματος μιας και μιλάμε για οπτικά σήματα τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύει και μία ροή δεδομένων. Όμως, η πολυπλεξία στο ίδιο μέσο, παραπάνω του ενός σήματος με διαφορετικές συχνότητες, συνεπώς και διαφορετικά μήκη κύματος δεν ήταν κάτι το νέο. Για την ακρίβεια χρησιμοποιείται από παλιά στις εκπομπές ραδιοφώνου αλλά και σε άλλες εφαρμογές. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια έγινε εφικτή η υλοποίηση της και στα οπτικά δίκτυα. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση σήματος και στις οπτικές ίνες, με τα πρώτα WDM συστήματα να εμφανίζονται σε εργαστήρια στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Ενώ εκείνα τα πρώτα συστήματα ξεκίνησαν με το να συνδυάζουν 2 σήματα (μήκη κύματος), τα πιο σύγχρονα συστήματα φτάνουν μέχρι και τα 160.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μεταφορά πληροφορίας μέσω οπτικών καναλιών (optical channels), τα οποία έχουν ένα κοινό μέσο μεταφοράς, την οπτική ίνα. Έτσι είναι δυνατή η αύξηση και η καλύτερη διαχείριση της χωρητικότητας των ήδη υπάρχοντων οπτικών ινών, χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση νέων (που έχει μεγάλο κόστος).

Η τεχνολογία WDM είναι επομένως ένας τύπος πολυπλεξίας συχνότητας (FDM – Frequency Division Multiplexing). Παρότι το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας και άρα οι δύο όροι τυπικά σημαίνουν το ίδιο πράγμα, ο όρος πολυπλεξία συχνότητας (FDM) έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται για τις ραδιοφωνικές μεταδόσεις, ενώ ο όρος πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) για τις οπτικές επικοινωνίες. Έτσι, η πολυπλεξία μήκους κύματος είναι η τεχνική μετάδοσης πληροφορίας μέσα από οπτική ίνα, η οποία επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση bits ή αλλιώς τη σειριακή μετάδοση χαρακτήρων. Είναι γνωστό πως τα οπτικά σήματα όταν ταξιδεύουν κατά μήκος ακόμα και της πιο διαφανούς ίνας για μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα εξασθενούν σε μη ανιχνεύσιμα σήματα. Ο μόνος τρόπος για την επίτευξη οπτικής επικοινωνίας σε αποστάσεις παραπάνω από κάποια τέτοια απόσταση ήταν η ενίσχυση του σήματος μέσω μιας οπτικοηλεκτρονικής διαδικασίας.

Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται η μετατροπή του οπτικού σήματος με χρήση ενός οπτικού ανιχνευτή (light detector), σε ηλεκτρικό το οποίο ενισχύεται και έπειτα ξαναμετατρέπεται σε οπτικό μέσω ενός laser. Δυστυχώς όμως, οι οπτικοί ανιχνευτές (που υπήρχαν) δεν μπορούσαν να διακρίνουν οπτικά σήματα διαφορετικών μηκών κύματος με έναν αποτελεσματικό τρόπο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ενίσχυση καθενός σήματος ξεχωριστά. Λύση σε αυτό το πρόβλημα έδωσε μια τεχνική που καθιστά δυνατή την ενίσχυση του οπτικού σήματος κατευθείαν, χωρίς να απαιτείται η μετατροπή του πρώτα σε ηλεκτρικό. Η τεχνική αυτή ονομάζεται οπτική ενίσχυση εμβρύου (erbium-doped optical amplifier) και λειτουργεί ως εξής:

Το εξασθενημένο οπτικό σήμα εισόδου διεγείρει τα ιονισμένα άτομα εμβρύου που βρίσκονται στην έξοδο της οπτικής ίνας τα οποία με την σειρά τους εκπέμπουν οπτικό σήμα στο ίδιο μήκος κύματος με την ακτινοβολία που τα διέγειρε. Συνεπώς, επειδή αυτή η τεχνική διατηρεί το μήκος κύματος του σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση σημάτων διαφορετικών μηκών κύματος που ταξιδεύουν παράλληλα στην ίδια οπτική ίνα. Έτσι, αλυσίδες τέτοιων οπτικών ενισχυτών μπορούν να συνδυαστούν για την διάδοση του οπτικού σήματος διαμέσου ίνας για χιλιάδες χιλιόμετρα. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί πως οι οπτικοί ενισχυτές δουλεύουν ικανοποιητικά στο κομμάτι εκείνο του φάσματος, στο οποίο λειτουργούν τα συστήματα οπτικών ινών. Επίσης, είναι προφανές πως στα δύο άκρα της οπτικής ίνας απαιτούνται κάποιες διατάξεις οι οποίες θα διαχωρίζουν τα οπτικά σήματα διαφορετικών μηκών κύματος. Γι' αυτό το σκοπό μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε διαφορικά φίλτρα ή δικτυώματα περίθλασης. Τα πρώτα όμως παρουσιάζουν ατέλειες όταν τα πολυπλεγμένα μήκη κύματος είναι πολλά και τα διαφορετικά μήκη κύματος κοντά. Ενώ αντίστοιχα τα δικτυώματα περίθλασης μπορούν να διαχωρίσουν παράλληλα πολλά μήκη κύματος με σχετικά απλές διατάξεις και εξοπλισμό. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο γεγονός ότι όταν τα οπτικά σήματα προσπίπτουν πάνω στο δικτύωμα περιθλώνται κατά μία γωνία η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος τους. Η αντίστροφη διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην είσοδο της ίνας, δηλαδή τα διάφορα οπτικά σήματα που πρόκειται να πολυπλεχτούν «στοχεύονται» πάνω στο δικτύωμα με γωνία ανάλογη του μήκους κύματος τους και οδηγούνται προς μία και μοναδική διεύθυνση. Η ποιότητα και ο τρόπος κατασκευής του δικτυώματος αποτελούν βασικά στοιχεία της τεχνολογίας πολύπλεξης.

Πιο αναλυτικά, ο αριθμός των αυλακιών πάνω στο δικτύωμα καθορίζει σημαντικά και τον αριθμό των διαφορετικών καναλιών που μπορούν να πολυπλεχτούν. Επίσης, ένα καλά κατασκευασμένο δικτύωμα παρουσιάζει μικρότερες απώλειες, μειώνει το φαινόμενο της πόλωσης και τέλος, περιορίζει σημαντικά την «παραδιαφωνία» (near-end Cross talk) και έτσι επιτρέπει την δικατευθυντικότητα στην ίδια οπτική ίνα. Το μέρος του φάσματος που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία WDM είναι δυο παράθυρα στις περιοχές γύρω από τα 1300nm, στο οποίο παράθυρο έχουμε την ελάχιστη διασπορά σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο μέρος του φάσματος και το άλλο είναι στην περιοχή των 1550 nm στο οποίο αντίστοιχα έχουμε την ελάχιστη εξασθένιση. Σε καθένα από τα δύο παράθυρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα εύρος ζώνης γύρω στα 15.000 Ghz. Με άλλα λόγια το εύρος των παραθύρων είναι γύρω στα 100nm. Θεωρητικά σ' αυτό το εύρος είναι δυνατόν να οριστούν γύρω στα 3000 διαφορετικά κανάλια με διαφορά μεταξύ τους 0,03 nm.

## Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DWDM

**Τ**α συστήματα WDM μπορούν να μεταδώσουν μέχρι 24 κανάλια αλλά η τάση της τεχνολογίας είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα στα 128 και παραπάνω μέσα από μια ίνα. Σήμερα, η τεχνική DWDM (Dense Wave Division Multiplexing = Πυκνή Πολυπλεξία στο πεδίο του Μήκους Κύματος) έχει ενταχθεί στην τεχνική WDM. Από τεχνικής απόψεως είναι η ίδια μεθοδολογία αλλά στην πραγματικότητα η DWDM εμπεριέχει περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης. Συχνά οι δύο αυτές τεχνικές αναφέρονται σαν μια WDM, χωρίς να διακρίνεται η ειδοποιός διαφορά. Η τεχνολογία DWDM είναι η περισσότερα υποσχόμενη τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων μέσα από οπτικές ίνες και συνίσταται στην

πολυπλεξία (multiplexing) σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος (wavelength) και στην μετάδοσή τους μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων ανά οπτική ίνα, που προκύπτει από την άθροιση των ρυθμών μεταφοράς κάθε σήματος διαφορετικού μήκους κύματος. Με τα σημερινά δεδομένα είναι δυνατή η πολυπλεξία σαράντα τέτοιων σημάτων σε μια και μόνο οπτική ίνα, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό 10 Gb/s, κάτι που οδηγεί σε συνολικό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων ίσο με 400 Gb/s.

Η δυνατότητα για μεταφορά IP πακέτων πάνω από δίκτυα DWDM, δύο τεχνικών που η κάθε μια στον τομέα της αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη λύση, διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο όσον αφορά σε μεθόδους για γρήγορη μεταφορά δεδομένων με ταυτόχρονη ενοποίηση των υπαρχόντων δικτύων. Στα DWDM συστήματα τα μήκη κύματος του φωτός βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, συνήθως 100GHz ή περίπου 0,75nm χωριστά. Τα DWDM συστήματα μέσω διεθνών καθορισμένων κριτηρίων χρησιμοποιούν DFB laser επικεντρωμένα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και διαχωρισμένα μεταξύ τους σε 100, 200 ή 50 GHz σχετισμένα στα 1,5nm, 0,75nm ή 0,38nm αντίστοιχα. Το κεντρικό μήκος κύματος μιας τυπικής DFB laser εφαρμογής κατευθύνεται με 0,08nm/°C. Σε διάταξη 100GHz μια αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος λειτουργίας κατά 10oC θα τοποθετούσε το μήκος κύματος του laser σε μια γειτονική μπάντα. Σε ένα DWDM laser, το chip είναι τοποθετημένο σε ένα θερμοηλεκτρικό ψύκτη ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία και έτσι να ελέγχεται το μήκος του κύματος.

## Η Αρχιτεκτονική των DWDM συστημάτων

**Η** αρχιτεκτονική που εφαρμόζεται για την υλοποίηση της τεχνολογίας DWDM μπορεί να ακολουθεί δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Η μία είναι η αρχιτεκτονική ανοικτών συστημάτων DWDM, στην οποία ο εξοπλισμός που υλοποιεί την τεχνολογία είναι ανεξάρτητος από τον υπόλοιπο δικτυακό εξοπλισμό και μιλώντας αφαιρετικά αυτό που προσφέρει είναι η παροχή μιας ροής δεδομένων σε ταχύτητες 2,5 Gbps μέχρι 10Gbps, σε οποιονδήποτε χρειάζεται αυτό το εύρος ζώνης με την αφιέρωση ενός μήκους κύματος. Εδώ, η έξοδος του WDM συστήματος είναι τυποποιημένες οπτικές διεπαφές (interfaces) και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από οποιοδήποτε εξοπλισμό. Το πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η μεγάλη ευελιξία που παρέχει στους διαχειριστές μιας και μπορεί να γίνει επιλογή και επένδυση σε εξοπλισμό και εύρος ζώνης που είναι απαραίτητο και όχι καθοδηγούμενο από τον υπάρχοντα εξοπλισμό και την εταιρία κατασκευής.

Η δεύτερη αρχιτεκτονική είναι η ολοκλήρωση της τεχνολογίας με άλλες ενεργές δικτυακές συσκευές, όπως ATM switches, SONET/SDH Add Drop –Multiplexers και IP routers. Σ' αυτήν την περίπτωση, ο εξοπλισμός που απαιτείται παρέχεται σαν modules για τις συσκευές που αναφέρθηκαν. Στόχος είναι η διαχειριστική απλότητα και η αποφυγή δυσλειτουργιών σε περιπτώσεις που γίνεται προσπάθεια συνεργασίας εξοπλισμού από διαφορετικούς κατασκευαστές. Φυσικά, η επιλογή για το ποια από τις δύο αρχιτεκτονικές θα ακολουθήσει κάθε οργανισμός – εταιρία στη ανάπτυξη της υποδομής του σαφώς είναι υποκειμενική και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που διαφοροποιούνται για κάθε έναν από αυτούς.

Πάντως, φαίνεται να υπερισχύει ο κανόνας ότι όταν πρόκειται για συνδέσεις σε μεγάλη απόσταση (πχ υπερωκεάνιες συνδέσεις) τότε επιλέγεται κατά κύριο λόγο η ανοιχτή αρχιτεκτονική ενώ τείνει να γίνεται η ολοκλήρωση της νέας τεχνολογίας με

άλλες δικτυακές συσκευές όταν πρόκειται για συνδέσεις μικρότερες των 65 χιλιομέτρων.

Όσον αφορά το κόστος αυτής της αρχιτεκτονικής, πρέπει να κατανοήσουμε αρχικά ότι η τεχνολογία DWDM αναπτύχθηκε σε ερευνητικό επίπεδο πριν αρκετά χρόνια και σαν πλεονέκτημα της είχε το γεγονός ότι έδινε τη δυνατότητα για τη μεταφορά περισσότερων δεδομένων, γρηγορότερα και φθηνότερα. Σήμερα πια η υλοποίηση της είναι γεγονός και προσφέρει τη δυνατότητα να αναβαθμιστούν οι οπτικές συνδέσεις με κόστος μόλις το 1/3 σε σχέση με την κλασική μέθοδο πρόσθεσης νέων οπτικών ινών. Το κόστος μάλιστα αυτό αναμένεται να μειωθεί και άλλο καθώς η τεχνολογία των lasers και των οπτικών ενισχυτών είναι ακόμα νέα και συνεχώς θα βελτιώνεται, με αποτέλεσμα να υποχωρούν οι τιμές στα συστήματα προτελευταίας γενιάς.

Συμπερασματικά, η τεχνολογία πολυπλεξίας μήκους κύματος εισάγει πολλά νέα δεδομένα στην αξιοποίηση των οπτικών δικτύων.

Πρώτον, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της νέας τεχνολογίας είναι η δυνατότητα για πολλαπλασιασμό του εύρους ζώνης που παρέχεται από μια οπτική ίνα. Τα 2,5Gbps που ήταν μέχρι τώρα το εύρος ζώνης που μπορούσε να δώσει μια εγκατάσταση οπτικής ίνας, πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα μέχρι 100, ο οποίος όμως δεν είναι στάσιμος αλλά συνεχώς αυξάνεται. Επιπλέον, ένα ακόμα χαρακτηριστικό που κάνει την DWDM τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική για τους μεγάλους παρόχους (Internet Service Providers) είναι το γεγονός ότι για την ενίσχυση του οπτικού σήματος προκειμένου αυτό να διανύσει αποστάσεις μεγαλύτερες από 65 – 70 km, δεν απαιτούνται πλέον οι κλασικές οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρικό προκειμένου να το ενισχύσουν αλλά γίνεται χρήση οπτικού ενισχυτή, ο οποίος λειτουργεί το ίδιο ανεξάρτητα από τον αριθμό των διαφορετικών μηκών κύματος και το bit rate που έχουν τα σήματα. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το μέγεθος της οικονομίας που γίνεται παρατίθεται το εξής παράδειγμα.

Έστω ένα οπτικό link μήκους 600 χιλιομέτρων, το οποίο αποτελείται από 8 ζευγάρια οπτικών ινών. Ένα οπτικό δίκτυο SONET/SDH για να προσφέρει το απαιτούμενο connectivity μεταξύ των δύο άκρων θα χρειαζόταν 72 οπτικοηλεκτρονικούς ενισχυτές.

Αντίστοιχα, με χρήση της τεχνολογίας WDM στη ίδια εγκατάσταση οπτικών ινών θα χρειαζόμασταν μόνο 4 οπτικούς ενισχυτές. Επιπλέον, αυτο χωρίς περαιτέρω αλλαγές, θα μπορούσε να γίνει αναβάθμιση του link μεταξύ των δύο άκρων, απλά κάνοντας χρήση περισσότερων καναλιών, δηλαδή περνώντας κι άλλα μήκη κύματος από την ίδια οπτική ίνα. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η οικονομία που γίνεται δεν είναι μόνο στον αριθμό των ενισχυτών αλλά και στο γεγονός ότι δεν υπάρχει πλέον η ανάγκη για δημιουργία των υποδομών εκείνων που θα ήταν απαραίτητες για την στέγαση και την τροφοδοσία των 72 ενισχυτών.

Τέλος, η χρήση της τεχνολογίας WDM προσφέρει την δυνατότητα για εύκολη αναβάθμιση της υποδομής, αφού η δημιουργία μιας νέας εικονικής ίνας μπορεί να γίνει άμεσα και χωρίς ιδιαίτερο κόστος. Πέραν αυτού, η τεχνολογία είναι εντελώς διαφανής και στο bit rate αλλά και στα πρωτόκολλα που έχουν εφαρμοστεί.

## Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CWDM

**Η** τραχύς μήκους κύματος διαίρεσης πολυπλεξίας (CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing) είναι μια τεχνολογία μεταφοράς πολύ-πρωτοκόλλων, που παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη στην αγορά λόγω των

ιδιοτήτων του χαμηλότερου κόστους και της απλότητας στον σχεδιασμό της.

Η CWDM τεχνολογία πρόκειται για μια οικονομική τεχνολογία τόσο σε πρόσβαση όσο και στην αγορά δικτύων κορμού και ειδικά σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως 31 μίλια). Παραδίδει τα πολλαπλάσια μήκη κύματος μέσω μιας οπτικής ίνας σε ένα μέρος του κόστους και πολυπλοκότητας των συστημάτων DWDM.

Ένας πιο ακριβής ορισμός του CWDM είναι «μια μορφή διαίρεσης και πολυπλεξίας μήκους κύματος που έχει ευρύτερα διαστήματα μεταξύ των μηκών κύματος από αυτά που χρησιμοποιούνται στο WDM. Επίσης, αντίθετα από άλλες μορφές WDM, χρησιμοποιεί ένα πολύ ευρύτερο φωτονιακό φάσμα ζωνών από άλλα τέτοια συστήματα, τα οποία συχνά είναι περιορισμένα σε μια ή δύο ζώνες». (Μέχρι 18 μήκη κύματος μπορούν να σταλούν χρησιμοποιώντας μερικά σχέδια CWDM). Η CWDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω από πολύτροπες και μονότροπες ίνες, αν και οι αποστάσεις του σήματος είναι γενικά πιο σύντομες από το DWDM.

Οι τεχνολογίες CWDM ήταν σε χρήση από την αρχή της δεκαετίας του '80, πολύ πριν από τη γενική αποδοχή της WDM στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Οι αρχικές επεκτάσεις περιλάμβαναν μήκη κύματος με διαστήματα 25 nm με παράθυρο 850 nm πάνω από την πολύτροπες ίνες σε τοπικά δίκτυα. Οι εφαρμογές περιλάμβαναν την ολυδιαυλική τηλεοπτική διανομή, αμφίδρομες ευαίσθητες πληροφορίες τηλεμετρίας και ελέγχους λανθάνουσας κατάστασης που διαβιβάζονται πέρα από μια ενιαία οπτική ίνα.

Στα αρχικά στάδια, η CWDM τεχνολογία δεν είχε συγκεκριμένα πρότυπα και υπήρξε αρχική σύγχυση στον καθορισμό της έννοιας και της αίτησής της. Αυτό άλλαξε στο τέλος της δεκαετίας του '90, όταν η CWDM έτυχε ενδιαφέροντος από διάφορες ομάδες εργασίες που ασχολούνταν κυρίως με την επίλυση των προβλημάτων διασποράς και απώλειας για 10 Gigabit Ethernet LANs και μερικές 10Gbe WAN εφαρμογές.

	<b>Coarse WDM (περιλαμβάνεται το WWDM)</b>	<b>WDM</b>	<b>DWDM (περιλαμβάνεται το ultra dense WDM)</b>
<b>Κενά μεταξύ καναλιών</b>	Μεγάλα, από 1,6nm (200GHz) μέχρι 25nm	Χρησιμοποιούνται lasers μήκους κύματος 1310nm σε συνδυασμό με lasers μήκους κύματος 1550nm	Μικρά, από 200GHz και κάτω
<b>Μπάντες συχνότητας που χρησιμοποιούνται</b>	O, E, S, C και L	O και C	C και L
<b>Κόστος ανά κανάλι</b>	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό
<b>Αριθμός καναλιών που παραδίδονται</b>	17-18 το πολύ	2	Εκατοντάδες
<b>Ιδανική</b>	Μικρές αποστάσεις	PON (Passive	Μεγάλες



<b>εφαρμογή</b>	(short-haul), Metro	Optical Network)	αποστάσεις (long-haul)
-----------------	---------------------	------------------	------------------------

Πίνακας 5 Τύποι WDM

## Διαφορές μεταξύ των συσκευών αποστολής σημάτων DWDM και CWDM

**Η** ενέργεια που καταναλώνεται από μια συσκευή αποστολής σημάτων DWDM είναι περίπου 20 φορές η ενέργεια που καταναλώνεται από μια συσκευή αποστολής σημάτων CWDM.

Για ένα WDM σύστημα 16 καναλιών, οι συσκευές αποστολής σημάτων CWDM καταναλώνουν περίπου 4Watt, ενώ η ίδια λειτουργία σε ένα σύστημα DWDM μπορεί να καταναλώσει πάνω από 80 Watt. Εξαιτίας των παραπάνω ζητημάτων, η συσκευασία μιας συσκευής αποστολής σημάτων λέιζερ DWDM, είναι ακριβότερη από μια μη ψυχόμενη συσκευή αποστολής σημάτων λέιζερ CWDM. Κατά συνέπεια, τμήματα συσκευών αποστολής σημάτων DWDM έχουν χαρακτηριστικά τέσσερις έως πέντε φορές το κόστος των αντίστοιχων CWDM.

Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται στα πολυδιαυλικά συστήματα CWDM είναι ουσιαστικά οι ίδιοι με εκείνους που χρησιμοποιούνται σε συστήματα DWDM. Οι μπροστινές άκρες αυτών των δεκτών χρησιμοποιούν τους wavelength agnostic PIN ή Avalanche Photodiode detectors (APDs) που καλύπτουν ολόκληρη τη ζώνη ITU CWDM. Το όφελος των ανιχνευτών PIN είναι το χαμηλότερο κόστος. Αντίθετα, το όφελος των ανιχνευτών APD είναι μια βελτίωση 9-10 dB στην ευαισθησία δεκτών.

Τα φίλτρα CWDM εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας τη λεπτή τεχνολογία φίλτρων (TFF). Είναι διαθέσιμα είτε ως απλού διαύλου συσκευές φίλτρων είτε ως ενσωματωμένες συσκευές πολυδιαυλωτών/αποπολυπλεκτών. Οι διάφορες διαμορφώσεις αυτών των συσκευών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εφαρμοστούν σε έναν πολυδιαυλικό οπτικό add/drop πολυπλέκτη. Τα φίλτρα CWDM μπορούν να είναι εξειδικευμένα για την ομοιοκατευθυνόμενη μετάδοση στα δίκτυα δύο-ινών ή για αμφίδρομη μετάδοση στα δίκτυα μονότροπης ίνας. Η τελευταία επιλογή έχει τα πλεονεκτήματα χαμηλότερου κόστους για τις εφαρμογές μισθωμένης οπτικής ίνας (leased-fiber).

Τα φίλτρα CWDM είναι εγγενώς λιγότερο ακριβά από τα φίλτρα DWDM λόγω του μικρότερου αριθμού στρώματων στο σχέδιο φίλτρων. Χαρακτηριστικά υπάρχουν πάνω από 100 στρώματα που απαιτούνται για 200 GHz όπως χρησιμοποιούνται στα προϊόντα metro DWDM, σε αντίθεση με μόνο 50 στρώματα σε φίλτρο 20nm στα προϊόντα metro CWDM. Το αποτέλεσμα είναι πιο σύντομος χρόνος κατασκευής, λιγότερα υλικά και υψηλότερη κατασκευή για τα φίλτρα CWDM. Κατά συνέπεια, οι δαπάνες φίλτρων CWDM είναι γενικά λιγότερο από 50% του κόστους των αντιστοίχων φίλτρων DWDM.

## Το μέλλον της τεχνολογίας WDM [16]

**Η** τεχνολογία WDM έχει να κάνει με το φυσικό επίπεδο των δικτύων. Δημιουργήθηκε και αναπτύχθηκε για να βελτιώσει τα φυσικά ενσύρματα μέσα που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Ενώ αρχικά, έχουμε την

βελτίωση της τεχνολογίας των laser και στη συνέχεια την χρήση των οπτικών ενισχυτών, αργότερα επιτεύχθηκε η παράλληλη μετάδοση σημάτων διαμέσου των οπτικών ινών. Αν λάβουμε υπόψη μας τον οικονομικό κομμάτι μια τέτοιας υλοποίησης και την ανταγωνιστικότητα απέναντι σε άλλες επιλογές, η τεχνολογία WDM είναι η πιο συμφέρουσα. Να σημειωθεί ότι τα κύρια χαρακτηριστικά που εξετάζουμε σε κάθε τεχνολογία είναι οι δυνατότητες που μας παρέχει, το χαμηλό κόστος σε σύγκριση με την απόδοση και τέλος οι ταχύτητες που υποστηρίζει.

Η τεχνολογία WDM έχει σαν βασικό πλεονέκτημα ότι παρέχει τη δυνατότητα για μεταφορά περισσότερων δεδομένων, ταχύτερα και σε χαμηλότερο κόστος. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας προσφέρει τη δυνατότητα να αναβαθμιστούν οι οπτικές συνδέσεις με πολύ χαμηλότερο από το μισό κόστος της εγκατάστασης νέων οπτικών ινών. Το γεγονός ότι η τεχνολογία των laser και των οπτικών ενισχυτών είναι ακόμα νέα και συνεχώς θα βελτιώνεται μας εξασφαλίζει ότι το κόστος θα μειωθεί και άλλο μελλοντικά.

Η τεχνολογία πολυπλεξίας μήκους κύματος εισάγει πολλά νέα δεδομένα στην αξιοποίηση των οπτικών δικτύων καθώς μας παρέχει τη δυνατότητα για αύξηση του εύρους ζώνης, που παρέχεται από μια οπτική ίνα. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM είναι ότι υποστηρίζει μεγάλο πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών μετάδοσης και πρωτοκόλλων, πάνω από το οπτικό επίπεδο. Τέλος, ένα ακόμα θετικό σημείο είναι η ενίσχυση του οπτικού σήματος, ικανή έτσι ώστε να διανύσει αποστάσεις μεγαλύτερες από 65-70 km. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην γίνετε χρήση των κλασικών οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων που μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρικό, προκειμένου να το ενισχύσουν. Έτσι, προτιμούμε την χρήση οπτικού ενισχυτή που έχει την δυνατότητα να λειτουργεί ανεξάρτητα από το πλήθος των διαφορετικών μηκών κύματος και ρυθμού μετάδοσης των σημάτων.

Επιπλέον, χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι η ευκολία στην αναβάθμιση της υποδομής, ενεργοποιώντας μια νέα εικονική ίνα χωρίς ιδιαίτερο κόστος.

Η τεχνολογία WDM συνεχίζει να αναπτύσσεται με συνεχώς ανοδική πορεία, εξασφαλίζοντας διαθέσιμο εύρος ζώνης για μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης για μεταφορά δεδομένων. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της εξέλιξης είναι η ανάπτυξη οπτικών δικτύων WDM, όπου οι διαδικασίες ενίσχυσης, αναγέννησης, μεταγωγής, δρομολόγησης κλπ. θα γίνονται στο οπτικό επίπεδο (optical layer).

# Αρχιτεκτονικές WDM-PONs



---

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

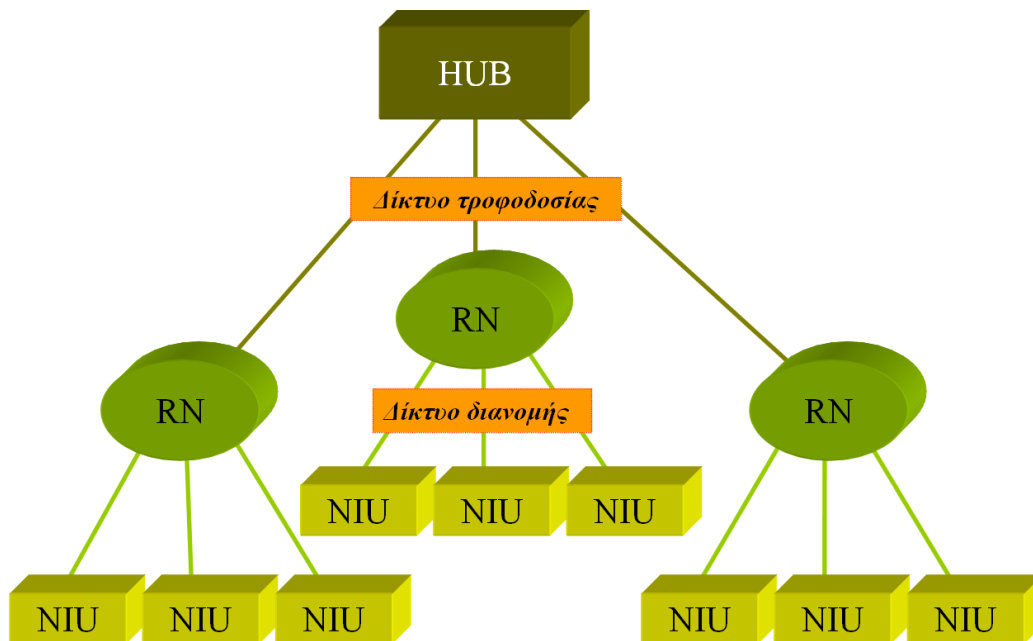
---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ WDM - PONS

#### Παθητικά Οπτικά Δίκτυα WDM [1][2][3]

Η κατηγορία WDM δικτύων βρίσκει εφαρμογή ως την πιο κατάλληλη λύση υψηλής ταχύτητας για το τμήμα τοπικής πρόσβασης του δικτύου, δηλαδή το τμήμα που φτάνει μέχρι τα σπίτια ή τις επιχειρήσεις. Το μέσο μετάδοσης που χρησιμοποιείται πιο διαδεδομένα στο τμήμα πρόσβασης είναι το συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων χαλκού, το οποίο χρησιμοποιείται και στην εφαρμογή των δικτύων τηλεφωνίας. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός παθητικού Οπτικού Δικτύου WDM.



Σχήμα 4. 1 Η αρχιτεκτονική ενός παθητικού Οπτικού Δικτύου WDM [1]

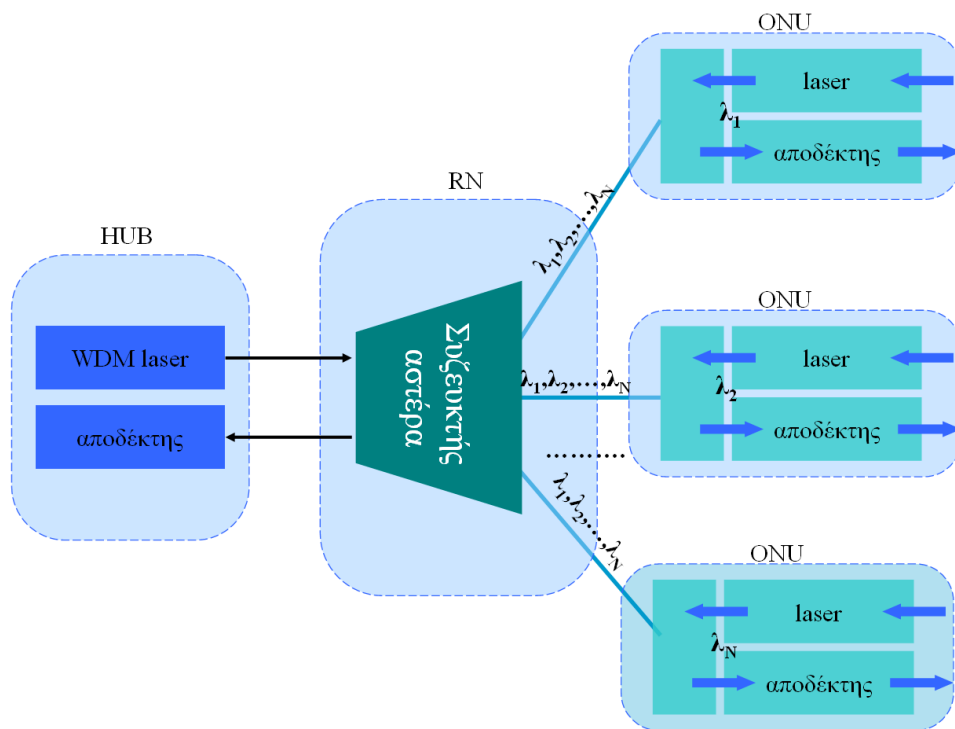
όπως παρατηρούμε ο ομφαλός hub, συνδέεται με απομακρυσμένους κόμβους (remote nodes-RNs) που βρίσκονται κοντά στους συνδρομητές. Κάθε απομακρυσμένος κόμβος συνδέεται σε διάφορες μονάδες διασύνδεσης με το δίκτυο (network interface units-NIUs) που καθεμιά τους εξυπηρετεί έναν ή περισσότερους συνδρομητές. Το τμήμα του δικτύου πρόσβασης από τον ομφαλό (hub) ως τους απομακρυσμένους κόμβους είναι το δίκτυο τροφοδοσίας (feeder) και από τους απομακρυσμένους κόμβους στις διάφορες μονάδες διασύνδεσης είναι το δίκτυο διανομής (distribution).

Ο ομφαλός περιλαμβάνει τερματικό εξοπλισμό, ο οποίος αποτελεί την πηγή των σημάτων όχι όμως της πληροφορίας που στέλνονται στους συνδρομητές. Η πληροφορία τροφοδοτείται μέσω ενός αριθμού συνδέσεων σε ορισμένους απομακρυσμένους κόμβους που βρίσκονται κοντά στους συνδρομητές.

Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης ακολουθούν γενικά την ίδια αρχιτεκτονική με τη μόνη διαφορά ότι οι διάφορες μονάδες διασύνδεσης με το δίκτυο-NIUs συνήθως καλούνται μονάδες οπτικού δικτύου (optical network units-ONUs).

Θα ήταν έξυπνο να μην χρησιμοποιήσουμε το τμήμα πρόσβασης των οπτικών δικτύων καθώς είναι προτιμότερο να αποτελείται από απλές παθητικές συσκευές, όπως είναι οι συζεύκτες και οι παθητικοί δρομολογητές αντί για περίπλοκες συσκευές με υψηλές και ειδικές απαιτήσεις δικτυακού ελέγχου. Αυτά τα δίκτυα ονομάζονται παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks-PONs) ενώ τα ακόμη πιο εξελιγμένα που ενσωματώνουν την τεχνολογία WDM ονομάζονται **WDM PONs**.

Ένα PON είναι οικονομικά αποδοτικό και με πρακτική αξία εφαρμογής αν οι κόμβοι ONUs είναι όσο γίνεται πιο απλοί και φθηνοί. Οι απομακρυσμένοι κόμβοι-RNs και ο ομφαλός hub μπορεί να έχουν κάπως μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και να είναι πιο ακριβά αφού το κόστος τους διαμοιράζεται. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την αρχιτεκτονική ενός WDM PON εκπομπής και επιλογής (broadcast and select WDM PON architecture).



Σχήμα 4. 2 Η αρχιτεκτονική WDM PON εκπομπής και επιλογής. [1]

Το WDM PON εκπομπής και επιλογής είναι μια καλή λύση που μπορεί να υλοποιηθεί με οπτικές συσκευές σχετικά χαμηλού κόστους.

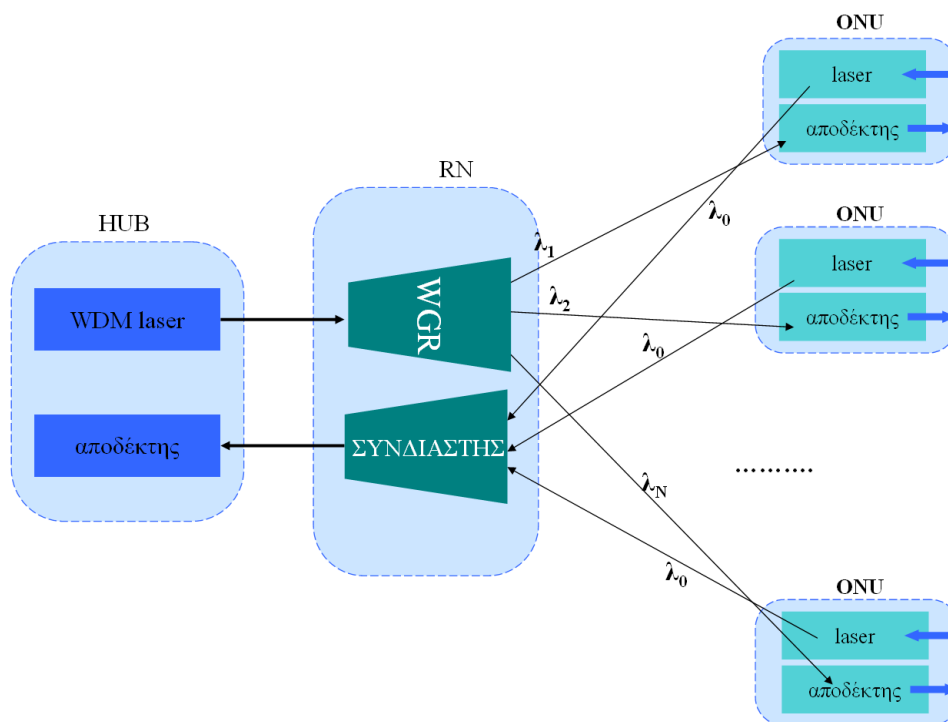
Στο εσωτερικό μέρος του ομφαλού τοποθετείται μεταδότης με δυνατότητα συντονισμού σ' όλη τη περιοχή των διαθέσιμων μηκών κύματος, καθώς και ένας αποδέκτης για τα δεδομένα που έρχονται απ' τις μονάδες οπτικού δικτύου- ONUs (upstream traffic). Η downstream κίνηση από τον ομφαλό προς τους συνδρομητές εκπέμπεται μέσω ενός παθητικού συζεύκτη αστέρα, ο οποίος είναι τοποθετημένος μέσα στον απομακρυσμένο κόμβο-RN, προς όλες τις ONUs. Οι σύνδεσμοι μεταξύ RN και ONUs μεταφέρουν την ίδια κίνηση και έτσι έχουμε ένα δίκτυο διανομής με

εκπομπή. Κάθε ONU έχει ένα κανάλι για αποκλειστική χρήση χάρη τη χρήση της τεχνολογίας WDM. Έτσι, έχουμε αφιερωμένο εύρος ζώνης (dedicated bandwidth) που ανατίθεται από το δίκτυο τροφοδοσίας σε κάθε ONU. Οι μονάδες οπτικού δικτύου λαμβάνουν ακριβώς το ίδιο WDM σήμα και πρέπει με κάποιο τρόπο να φιλτράρουν απ' αυτό το μήκος κύματος που έχουν για αποκλειστική τους χρήση.

Η upstream κίνηση όλων των ONUs μεταφέρεται πάνω σε ένα και μόνο κανάλι, το οποίο μοιράζονται οι ONUs με χρήση μιας κατάλληλης μεθόδου πολλαπλής προσπέλασης. Μέσα στον απομακρυσμένο κόμβο βρίσκεται ένας συζεύκτης που λειτουργεί ως συνδυαστής της upstream κίνησης, η οποία στη συνέχεια κατευθύνεται προς τον αποδέκτη του ομφαλού.

Η χρήση παθητικού συζεύκτη έχει και τα μειονεκτήματά της, καθώς επιφέρει απώλειες διάσπασης, καθώς το  $1/N$  της ισχύος του σήματος παραδίδεται σε κάθε μονάδα οπτικού δικτύου. Γεγονός που καθιστά ανέφικτη την κάλυψη πολλών συνδρομητών.

Έτσι, μια νέα αρχιτεκτονική, αυτή της WDM PON δρομολόγησης μηκών κύματος (wavelength routing WDM PON architecture) μειώνει το πρόβλημα των απωλειών διάσπασης της αντίστοιχης αρχιτεκτονικής εκπομπής και επιλογής. Η υλοποίηση είναι πολύ απλή και εύκολη καθώς το μόνο που γίνεται είναι η αντικατάσταση του συζεύκτη αστέρα με έναν  $N \times N$  παθητικό δρομολογητή (WGR) μέσα στον απομακρυσμένο κόμβο. Η αρχιτεκτονική WDM PON δρομολόγησης μηκών κύματος (wavelength routing WDM PON architecture) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4. 3 Η αρχιτεκτονική WDM PON δρομολόγησης μήκους κύματος. [1]

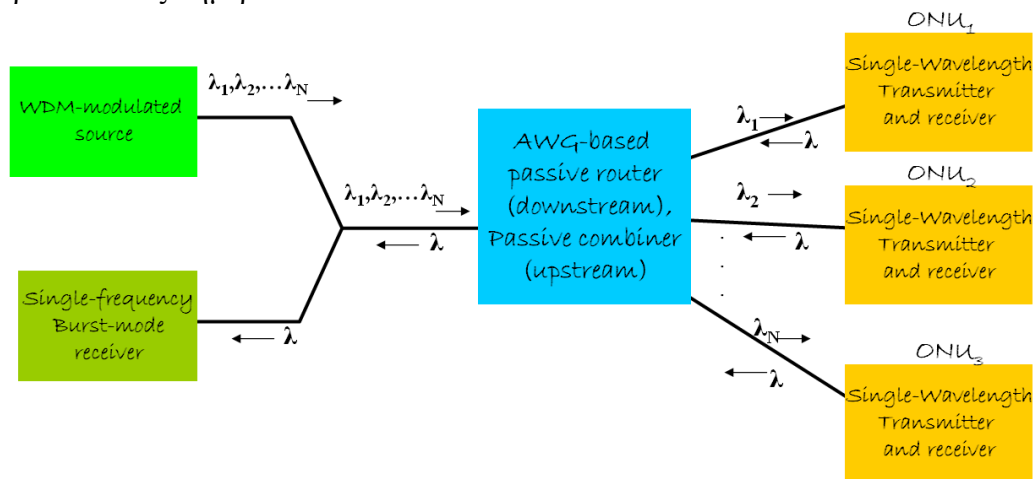
Με αυτό τον τρόπο οι σύνδεσμοι διανομής μεταφέρουν μόνο το κατάλληλο κανάλι για κάθε μονάδα οπτικού δικτύου, με αποτέλεσμα το δίκτυο διανομής να βασίζεται σε αυτή τη περίπτωση στη μεταγωγή. Αυτό, το κάνει πιο κατάλληλο για υπηρεσίες μεταγωγής. Τα δυο παραπάνω WDM PONs εντάσσονται στις αρχιτεκτονικές « οπτική ίνα ως το πεζοδρόμιο » (fiber to the curb-FTTC ) και « ίνα ως το σπίτι » (fiber

το the home-FTTH), οι οποίες διαφέρουν ως προς το πόσο κοντά στα σπίτια θεωρούνται ότι βρίσκονται οι μονάδες οπτικού δικτύου.

Στην αρχιτεκτονική FTTC καλώδια χαλκού συνδέουν μία μονάδα οπτικού δικτύου με διάφορα σπίτια, ενώ στην αρχιτεκτονική FTTH, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι τα ίδια τα σπίτια.

Στην πράξη, το να φτάσει η τεχνολογία WDM μέχρι το τμήμα πρόσβασης του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως το επόμενο, λογικά αναμενόμενο βήμα μετά την εισαγωγή και διείσδυση της στο βασικό κορμό του δικτύου και στη συνέχεια σε μητροπολιτικές περιοχές.

Έχουν προταθεί πολλές αρχιτεκτονικές WDM-PON για την παροχή επεκτασιμότητας που λείπει στα παραδοσιακά PONs. Μια απλή προσέγγιση για την αύξηση της ικανότητας ενός TDM-PON είναι να οριστεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος για κάθε χρήστη. Ωστόσο, η λύση αυτή προσφέρει υψηλές επιδόσεις σε υψηλό κόστος π.χ., κάθε φορά που ένας χρήστης κλείνει τη σύνδεσή του, τότε ο αντίστοιχος πομποδέκτης στην OLT είναι αδρανής και δεν θα είναι σε θέση να υποστηρίξει άλλους χρήστες, στην οποία περίπτωση ο πόρος στα αριστερά του δικτύου είναι αχρησιμοποίητος. Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναθεωρηθούν ορισμένες από τις αντιπροσωπευτικές WDM -PON αρχιτεκτονικές, που έχουν προταθεί έως σήμερα.



Σχήμα 4. 4 Αρχιτεκτονική CPON [19]

## CPON [19]

Για την επίλυση του περιορισμού επεκτασιμότητας των παραδοσιακών PONs, μία από τις πρώτες προτάσεις αρχιτεκτονικής WDM-PON βασίζεται στην έννοια AWG των WDM στα 1550 nm ροής καθόδου (downstream) και ένα μόνο μήκος κύματος στα 1300 nm ροής ανόδου (upstream), που διαμοιράζεται μέσω του Time Division Multiple Access (TDMA). Παρόλο που ο προηγούμενος σχεδιασμός αυτής της αρχιτεκτονικής χρησιμοποιούσε χωριστές ίνες για upstream και downstream καταστάσεις, προτάθηκε ένας ολοκληρωμένος τύπος συσκευής για να πραγματοποιήσει την WDM δρομολόγηση σε ένα παράθυρο μήκους κύματος και το μήκος κύματος ανεξάρτητης ισχύος συνδυάζεται σε ένα δεύτερο παράθυρο σε μονή ίνα μέσω CWDM. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει αναφερθεί ως το σύνθετο PON (CPON) στη βιβλιογραφία. Το μονό μήκος κύματος, ο δέκτης καταίγισμού (burst-mode receiver), χρησιμοποιείται στην OLT για να λάβει το (upstream) σήμα ροής ανόδου.

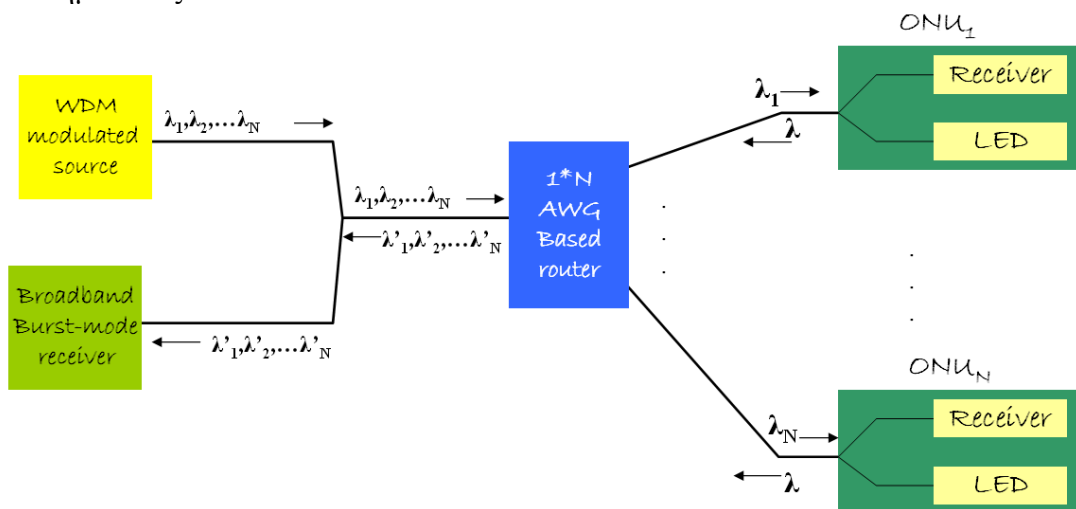


Ο burst-mode δέκτης καλείται να συγχρονιστεί με το ρολόι σημάτων των διαφορετικών ONUs εκπομπής, οι οποίες μπορεί να είναι σε διαφορετικές αποστάσεις από την OLT. Το σχήμα 6.8 δείχνει το σχεδιάγραμμα ενός CPON.

Το CPON αποφεύγει τα μειονεκτήματα του upstream WDM, αλλά περιορίζεται στο γεγονός της μιας μόνο συχνότητας λέιζερ, όπως μιας δίοδου λέιζερ κατανομημένης-ανάδρασης (DFB LD) στην ONU, μπορεί να είναι οικονομικά απαγορευτική.

## LARNET [19][20][21][22]

**Η** LARNET (τοπική πρόσβαση δρομολόγησης δικτύου) αρχιτεκτονική επιχειρεί να αντιμετωπίσει τον περιορισμό CPON, χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα πηγών στην ONU, όπως είναι μια ανέξοδη δίοδος εκπομπής φωτός (LED), της οποίας φάσμα είναι τεμαχισμένο σε φέτες από την AWG, βασισμένο στη δρομολόγηση σε διαφορετικές οπτικές ζώνες στην ανοδική κατεύθυνση. Το βελτιωμένο LED (edge emitting LED) εκπέμπει ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, που επικεντρώνεται γύρω από ένα μήκος κύματος σε σύγκριση με το λέιζερ DFB, το οποίο εκπέμπει μόνο ένα μήκος κύματος του φωτός. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του βελτιωμένου LED (edge emitting LED) είναι ότι κάθε ONU μπορεί να έχει την ίδια συσκευή, σε αντίθεση με το DFB λέιζερ σε κάθε ONU. Η αρχιτεκτονική LARNET περιλαμβάνει ένα φάσμα πηγών από κάθε ONU που εισάγεται σε διαφορετικές θύρες του δρομολογητή AWG. Ανάλογα με τη θύρα εισόδου, το μήκος κύματος (στοιχείο), που είναι τεμαχισμένο στην θύρα εξόδου είναι διαφορετικό. Ως εκ τούτου, στη πόρτα εξόδου, υπάρχουν συνιστώσες (στοιχεία) του μήκους κύματος, που η καθεμία αντιστοιχεί σε μια πηγή εισόδου ONU. Το καθοδικό (downstream) σήμα με τα πολλαπλά μήκη κύματος συνιστώσων στο CO παράγεται από ένα multifrequency λέιζερ (MFL), το οποίο είναι συνδεδεμένο επάνω στην ίνα μετάδοσης μέσω ενός 1.3 ή 1.5μm πολυπλέκτη. Ο ευρυζωνικός δέκτης αναπτύσσεται επίσης στο CO, ο οποίος μπορεί να λάβει κάθε φασματική συνιστώσα του άκρου που εκπέμπουν LED. Στην ουσία, η OLT στο CO μπορεί να λάβει κάθε μήκος κύματος από οποιοδήποτε ONU. Η ύπαρξη ενός ενιαίου δέκτη στην OLT προϋποθέτει ότι το upstream κανάλι είναι διαμοιρασμένο μεταξύ των ONUs, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα όπως TDMA.



Σχήμα 4. 5 Αρχιτεκτονική LARNET [20]

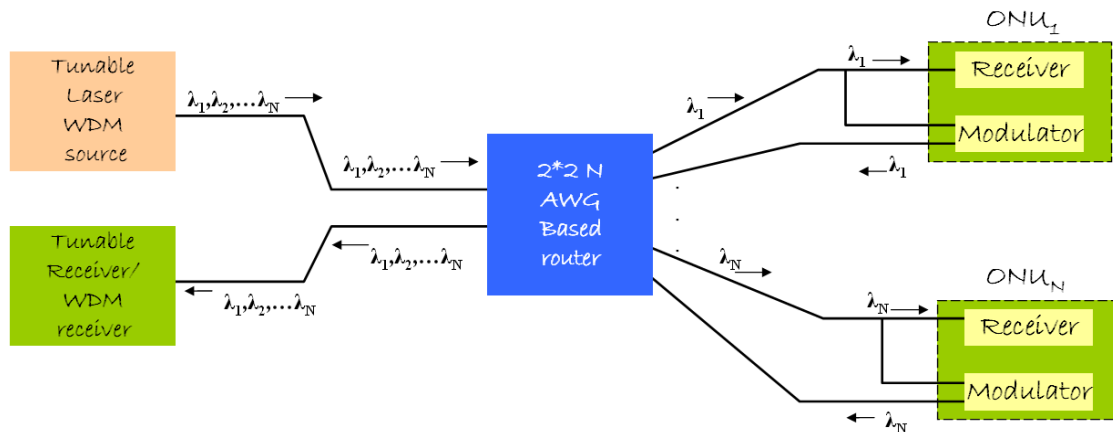


Τα Edge-emitting LED είναι πολύ φθηνότερα σε σύγκριση με το DFB λέιζερ, έτσι μειώνεται το κόστος των ONU. Ο περιορισμός με την αρχιτεκτονική αυτή είναι ότι ο φασματικός τεμαχισμός σε ένα ευρύ φάσμα πηγών από AWG μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη απώλεια ισχύος. Ως εκ τούτου, οι αποστάσεις από τις OLT στις ONU είναι σημαντικά μειωμένες στην αρχιτεκτονική LARNET.

## RITENET [19] [22]

Το RITENET (απομακρυσμένη αίτηση των τερματικών δικτύου), στοχεύει στην αποφυγή του πομπού στην ONU, διαμορφώνοντας το downstream σήμα από την OLT και στέλνοντας το πίσω στην upstream κατεύθυνση. Στην ONU, το φως είναι χωρισμένο με παθητικό τρόπο, με ένα μέρος του φωτός να ανιχνεύεται από το δέκτη. Το υπόλοιπο είναι τροφοδοτημένο πίσω προς το CO μέσω διαμορφωτή. Το σήμα από της OLT είναι διαμοιρασμένο για downstream και upstream μέσω της κοινής χρήσης του χρόνου. Ένα βασικός δρομολογητής AWG  $2 \times 2$  χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των μηκών κύματος.

Στο CO, το συντονισμένο λέιζερ του οποίου οι τρόποι ταιριάζουν με εκείνους του AWG, έχει βηματικά μήκη κύματος μέσω των καναλιών της ONU. Ως εκ τούτου, τα upstream και downstream κανάλια πρέπει να είναι διαμοιρασμένα με τις ONUs, χρησιμοποιώντας TDMA ή δυναμική κατανομή εύρους ζώνης. Εναλλακτικά, όπως έχει προταθεί σε κάποιες πρόσφατες αρχιτεκτονικές, μια σειρά από πομπούς και δέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην OLT. Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των καναλιών δεν είναι απαραίτητη. Δεδομένου ότι το ίδιο οπτικό κανάλι χρησιμοποιείται τόσο για upstream όσο και για downstream, πρέπει να διαχωριστούν σε δύο διαφορετικές ίνες.



Σχήμα 4. 6 Αρχιτεκτονική RITENET [22]

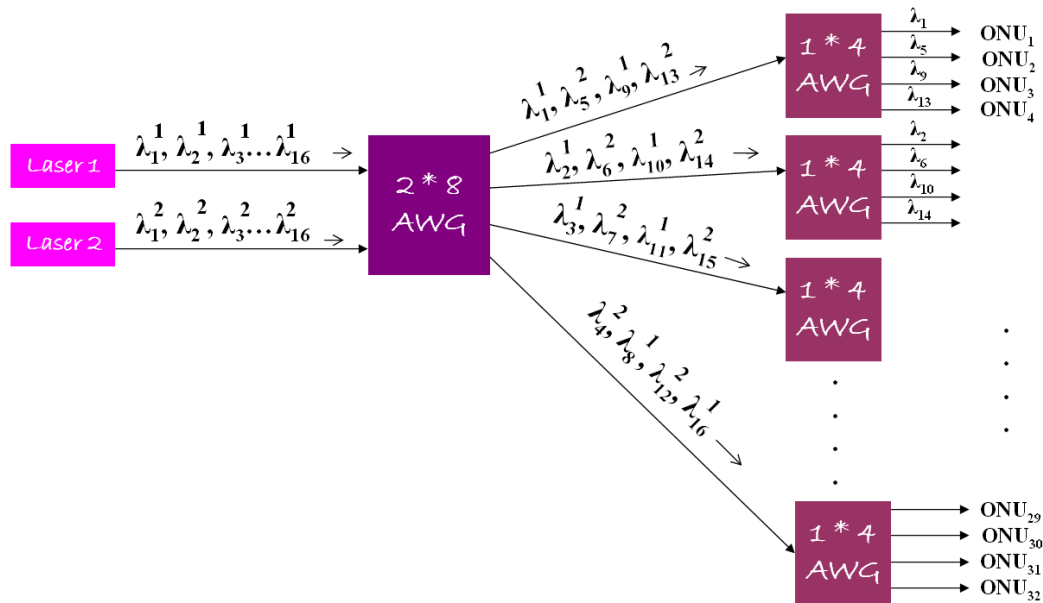
Ενώ το RITENET βοηθά στη μείωση του κόστους του τελικού τερματικού στην ONU, η απόσταση από την OLT στην ONU είναι πολύ μικρότερη, γιατί το σήμα από την OLT τώρα έχει να ταξιδέψει το διπλάσιο της απόστασης. Ο αριθμός των ινών που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική αυτή διπλασιάζεται, διπλασιάζοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Επίσης, στην OLT χρησιμοποιείται είτε συντονισμένο λέιζερ ή μια σειρά από πομπούς και δέκτες, που κάνει το RITENET να είναι πιο ακριβό σε σχέση με την αρχιτεκτονική CPON και LARNET. Η αρχιτεκτονική, όμως, έχει κάποια πλεονεκτήματα, όπως η διαθεσιμότητα των συμμετρικού εύρους ζώνης στις upstream και downstream κατευθύνσεις. Επίσης, το

upstream σήμα δεν αντιμετωπίζει τις απώλειες φασματικού τεμαχισμού, που παρατηρήθηκαν στο LARNET.

### WDM-PON βασισμένο σε πολλαπλών βαθμίδων AWG [19][23]

Οι παραπάνω αρχιτεκτονικές έχουν δύο βασικούς περιορισμούς: (1) δυσκολία στην επέκταση του αριθμού των ONUs όταν το δίκτυο είναι διαρρυθμισμένο και (2) περιορισμένο αριθμό χρηστών, επειδή η τεχνολογία κατασκευής περιορίζει το μέγεθος AWG. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, προτάθηκε μία αρχιτεκτονική πολλαπλών βαθμίδων. Αυτή η αρχιτεκτονική, η οποία αναφέρεται πολλαπλά ως WDM-PON, εκμεταλλεύεται την περιοδική ιδιότητα δρομολόγησης του AWG, έτσι ώστε η επαναχρησιμοποίηση ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος για περισσότερους από έναν συνδρομητή να είναι δυνατή. Αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει επεκτασιμότητα σε εύρος ζώνης, καθώς και στον αριθμό των χρηστών, είτε με την πρόσληψη πρόσθετων μηκών κύματος στην CO είτε με επικαλυπτόμενα πολλαπλά στάδια AWGs με την αύξηση της AWG τραχύτητας σε κάθε στάδιο.

Ο δείκτης του μήκους κύματος δηλώνει τον αριθμό του μήκους κύματος, ενώ ο εκθέτης δηλώνει την πηγή  $\lambda_i^j$  (π.χ.,  $\lambda_1^2$  δηλώνει μήκος κύματος 1 από laser 2). Αυτή η ιδέα έχει πολλά πλεονεκτήματα. Το κληροδότημα ONU-ONU1 προς ONU8-παραμένει ανεπηρέαστο και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται τα μήκη κύματος  $\lambda_1^1$  προς  $\lambda_4^1$  και  $\lambda_1^2$  για  $\lambda_4^2$ . Το κληροδότημα  $2 \times 8$  AWG καναλιών διατηρείται και 8 νέα  $1 \times 4$  AWGs κανάλια χρησιμοποιούνται για την επέκταση του δικτύου.



Σχήμα 4. 7 Αρχιτεκτονική πολλαπλών βαθμίδων AWG [23]

### DWDM Super-PON (SPON) [19] [24] [25] [26]

Το PON είναι περιορισμένο στην απόσταση μετάδοσής του και στον αριθμό των κόμβων, που μπορεί να υποστηρίξει λόγω περιορισμού της ισχύος. Για παράδειγμα, η μέγιστη απόσταση μετάδοσης της EPON είναι 20 χλμ. και ο μέγιστος αριθμός των κόμβων-χρηστών, που μπορεί να υποστηρίξει, είναι 32. Αρκετοί διαχειριστές δικτύων ενδιαφέρονται για τη διεύρυνση του φάσματος των

υπηρεσιών, ενώ παρακάμπτουν τα τοπικά κέντρα, προκειμένου να μειώσουν σημαντικά τα έξοδα λειτουργίας. Το σούπερ-PON (SPON) καλύπτει ένα φάσμα πάνω από 100 χιλιόμετρα με ένα λόγο διαχωρισμού, που φθάνει τα 2000 με τη βοήθεια οπτικών ενισχυτών (Optical Amplifier OAs). Οι οπτικοί ενισχυτές τοποθετούνται σε μακρινή απόσταση και μετά το πρώτο στάδιο διάσπασης. Επομένως, αυτό παρέχει αρκετή ισχύ για τον προϋπολογισμό του συστήματος. Τα οφέλη του κόστους απορρέουν όχι μόνο από την κοινή χρήση πόρων, αλλά και από την εδραίωση της μεταγωγής κέντρων. Όμως, το μονό μήκος κύματος του SPON έχει περιορισμούς στο εύρος ζώνης, δεδομένου ότι το μήκος κύματος το διαμοιράζονται πολλές ONUs.

Μια DWDM SPON προτείνεται, ώστε να αυξηθεί το εύρος της ζώνης, παρέχοντας αρκετά μήκη κύματος και στις δύο κατευθύνσεις. Κάθε  $1 \times N$  PON διαχωριστής ισχύος χρησιμοποιεί δύο DWDM κανάλια, ένα για upstream και το άλλο για downstream. Το "μπλε" μισό (1525 nm-1543 nm) της C-band φέρει downstream κανάλια, ενώ το "κόκκινο" το ήμισυ (1547 nm-1565 nm) φέρει upstream κανάλια, τα οποία χωρίζονται σε κόκκινα χαμηλού κόστους ή μπλε φίλτρα (RBF). Η ONU χρησιμοποιεί μια κοινή πηγή. Ένας διαμορφωτής ηλεκτρικής απορρόφησης-ενισχυτής οπτικών ημιαγωγών (EAM-SOA) μπορεί να λειτουργήσει ως ένα άχρωμο ONU, που χρησιμοποιείται όχι μόνο για τη διαφοροποίηση, αλλά και για την ενίσχυση. Το επαναληπτικό κέντρο-site περιέχει λέιζερ αναπαραγωγής συνεχούς κύματος (continuous-wave seed laser CW), ακολουθούμενο από ένα ηλεκτρονικό ενισχυτή, που διανέμει μία upstream οπτική πηγή σε κάθε ONU, που βρίσκεται μέσα σε μία ομάδα διαιρέτη PON. Όλα τα upstream μήκη κύματος ενισχύονται από ένα προενισχυτή EDFA, πριν διαχωριστούν σε κάθε δέκτη στην OLT.

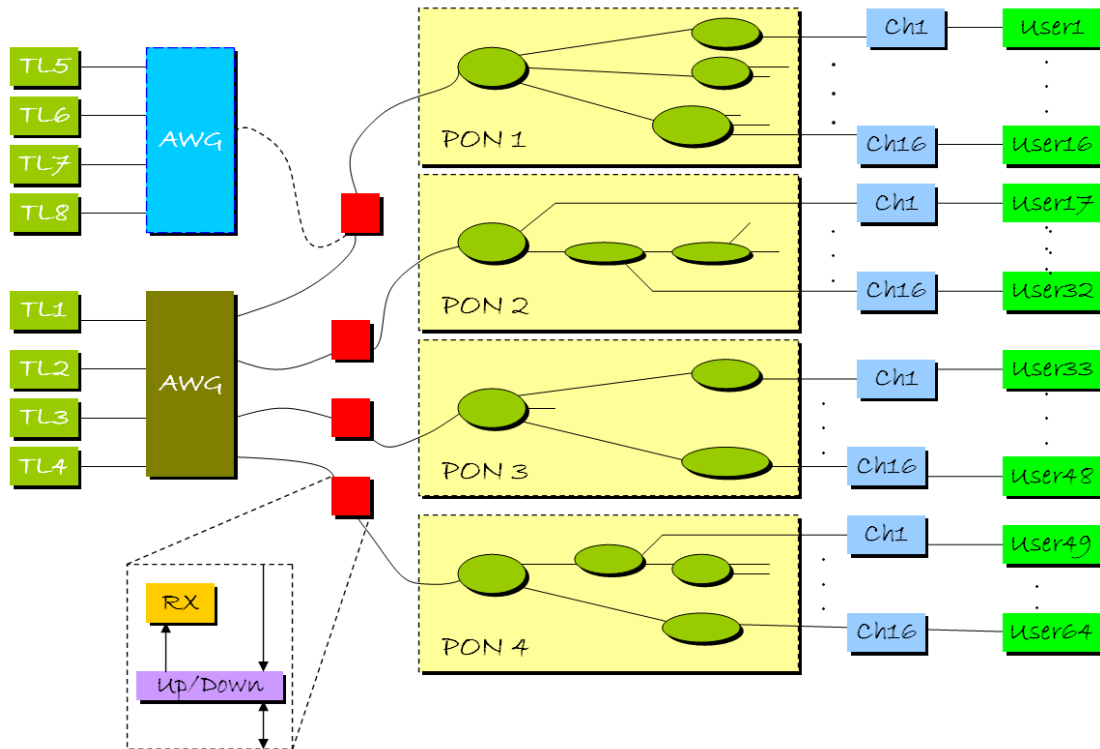
Παρόλο που αυτή η αρχιτεκτονική SPON κάνει δυνατή την εξυπηρέτηση μεγάλων αποστάσεων και φιλοξενεί πολλούς κόμβους πρόσβασης, χρησιμοποιεί ενεργά τμήματα, όπως οπτικούς ενισχυτές και πηγές αναπαραγωγής στη μέση της εγκατάστασης, με συνέπεια να απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια και επομένως και τακτική συντήρηση. Επομένως δεν είναι παθητική, πράγμα που είναι η θεμελιώδης απαίτηση για ένα PON δίκτυο. Επομένως, η αρχιτεκτονική αυτή θα πρέπει να ανταγωνιστεί άλλες λύσεις μετρό όσον αφορά το κόστος και την ευκολία διαχείρισης.

## SUCCESS-DWA PON [19] [27]

Το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ δυναμικής πρόσβασης ανάθεσης μήκους κύματος (SUCCESS-DWA) PON αρχιτεκτονική έχει ως στόχο να προσφέρει επεκτασιμότητα με την εισαγωγή δυναμικής κατανομής μήκους κύματος (DWA), για την παροχή κατανομής εύρους ζώνης σε πολλά φυσικά PONs. Αυτό γίνεται, ενώ ο υφιστάμενος αυθαίρετος τομέας που αναπτύσσονται τα PON παραμένει άθικτος.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την αρχιτεκτονική του δικτύου της SUCCESS-DWA PON. Χρησιμοποιεί συντονισμένα λέιζερ (TLs) και AWG στο CO, ενώ WDM φίλτρα και δέκτες burst-mode χρησιμοποιούνται εντός των ONUs. Η Upstream και downstream κίνηση διαχωρίζεται με ένα ευρείας ζώνης WDM φίλτρο, που εδρεύει μεταξύ του AWG και το PON. Αυτή η αρχιτεκτονική προϋποθέτει ότι όλα τα μήκη κύματος από την OLT μπορούν να φτάσουν σε όλες τις ONUs όλων των επιμέρους φυσικών PONs. Η TL<sub>1</sub> μπορεί να φτάσει στο PON<sub>1</sub> μέσω AWG καναλιών (1, 5, 9, . . .). Μπορεί να φθάσει επίσης στο PON<sub>2</sub> μέσω καναλιών (2, 6, 10, . . .) και το ίδιο για PON<sub>3</sub> και PON<sub>4</sub>. Έτσι, μια TL μπορεί να επικοινωνεί με όλους τους χρήστες σε μια συγκεκριμένη PON, προσδιορίζοντας το μήκος κύματος που εντάσσεται στο βασικό εύρος (passband) του χρήστη και το μήκος κύματος εξόδου της AWG προς το

συγκεκριμένο PON. Η αρχιτεκτονική παρέχει επεκτασιμότητα με αρχική ανάπτυξη ενός TL και μίας AWG στο CO, η οποία εξυπηρετεί πολλούς συνδρομητές σε διαφορετικά PONs. Καθώς η ζήτηση αυξάνεται, η αρχιτεκτονική μπορεί να αναπτυχθεί-επεκταθεί με την προσθήκη περισσότερων TLs στην AWG ή με την προσθήκη άλλης AWG μαζί με περισσότερες TLs.



Σχήμα 4. 8 Αρχιτεκτονική SUCCESS-DWA PON [27]

Η SUCCESS-DWA PON απαιτεί έναν κατάλληλο αλγόριθμο προγραμματισμού, δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένα TL, που μπορεί να έχει πρόσβαση σε κάθε χρήστη σε κάθε δεδομένη στιγμή και το TL είναι κοινό στοιχείο, δεδομένου ότι ο αριθμός των TLs είναι συνήθως μικρότερος από τον αριθμό των χρηστών. Το χρονοδιάγραμμα πρέπει να διατηρεί την αμεροληψία, να αποφεύγει τη σύγκρουση, και να μεγιστοποιεί τη χρήση της TLs. Μία προσέγγιση απασχολεί πολλές εικονικές ουρές εξόδου για την αποφυγή head-of-line blocking και τη μακρύτερη-πρώτη ουρά (longest-first queuing) του συστήματος ή οποιουδήποτε άλλου είδους σοφιστικό σενάριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η σειρά, στην οποία να εξυπηρετούνται οι ουρές. Χρειάζεται κατάλληλη εποπτεία, ώστε να αποκλειστεί το ενδεχόμενο δύο TLs να έχουν πρόσβαση στην ίδια ουρά ταυτόχρονα, εφόσον κάθε ουρά μπορεί να εξυπηρετείται από πολλές TLs. Αυτή η προσέγγιση αποφεύγει την εγγενή σύγκρουση, αλλά περιορίζει την επεκτασιμότητα για μεγάλο αριθμό χρηστών. Μια άλλη προσέγγιση απασχολεί την ουρά στους πομπούς. Τα εισερχόμενα πακέτα αποδίδονται στον πομπό με τη μικρότερη ουρά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση. Για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν δύο πακέτα κεφαλής στον ίδιο τελικό χρήστη αλληλεπικαλυπτόμενα σε διάφορες ουρές, ο προγραμματιστής μπορεί να παρακολουθεί τους προορισμούς του τελευταίου πακέτου στις ουρές και να αποδώσει το εισερχόμενο πακέτο στην TL ουρά, αν έχουν τον ίδιο προορισμό.

Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) μπορεί να επιτευχθεί, θέτοντας προτεραιότητες των πακέτων όταν τα αναθέτουμε στις ουρές.

# Μελέτη φυσικού στρώματος



**Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΜΕΛΕΤΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

#### Καθορισμός παραμέτρων και υπολογισμοί σε ζεύξεις WDM [28]

#### Καθορισμός βασικών παραμέτρων [28]

Ο καθορισμός των βασικών παραμέτρων μιας ζεύξης WDM (όπως και κάθε άλλης τηλεπικοινωνιακής ζεύξης) αρχίζει με την καταγραφή χαρακτηριστικών όπως ο τύπος της ζεύξης (χερσαία, υποβρύχια κ.οκ.), τα γεωγραφικά της στοιχεία (κόμβοι και μεταξύ τους αποστάσεις), η διαθέσιμη καλωδιακή υποδομή (εφόσον υπάρχει), η αναμενόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση (συνάρτηση των παρεχόμενων υπηρεσιών) κλπ. Ειδικά, για την καλωδιακή υποδομή, σημαντικά στοιχεία θεωρούνται ο τύπος (π.χ G.652 ή G.653) και οι επιδόσεις (κυρίως ως προς της εξασθένιση και την διασπορά) των χρησιμοποιούμενων ινών, δεδομένου ότι καθορίζουν τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα της ζεύξης (π.χ αν οι ίνες είναι μετατοπισμένης διασποράς, η πολυπλεξία περισσότερο των 8 σημάτων καθίσταται προβληματική λόγω του φαινομένου της τετρακυματικής μίξης).

Στην συνέχεια και με βάση τα παραπάνω στοιχεία, καθορίζονται ο αριθμός, ο τύπος (SDH/PDH) και η τάξη (π.χ. STM-16) των πολυπλεγμένων σημάτων. Επί του παρόντος, σε επίπεδο πραγματικών εφαρμογών, είναι δυνατή η επίτευξη συνολικού ρυθμού μετάδοσης 320Gbit/s, σε αποστάσεις των 600km χωρίς αναγέννηση. Η πολυπλεξία σημάτων διαφορετικού τύπου και τάξης είναι καταρχήν εφικτή, αλλά συνήθως με μεγαλύτερο κόστος.

Όσον αφορά τους αναμεταδότες  $T_n$  ( $n=1,2,\dots,N$ ), η χρήση τους έστω και αν αυξάνει το κόστος της ζεύξης, είναι επιβεβλημένη αν η ζεύξη WDM προορίζεται να παρεμβληθεί σε υφιστάμενο ινοοπτικό δίκτυο. Ο λόγος είναι ότι τα οπτικά χαρακτηριστικά των σημάτων που πρόκειται να πολυπλεχθούν είναι μάλλον απίθανο να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των συστημάτων WDM (π.χ. αυστηρά καθορισμένο μήκος κύματος από το πλέγμα τιμών ITU-T). Οι περισσότεροι αναμεταδότες μπορούν να επεξεργάζονται οπτικά σήματα και από τα δύο παράθυρα (1310 και 1500 nm), σε κάθε περίπτωση όμως, τα οπτικά σήματα στην έξοδο των αναμεταδοτών καταλαμβάνουν προκαθορισμένα και συμβατά με το πλέγμα της ITU-T κανάλια από το οπτικό παράθυρο των 1500nm. Τέλος, η συνολική (μετά την πολυπλεξία και ενίσχυση) οπτική ισχύς που διοχετεύεται στην οπτική ίνα (δηλαδή η ισχύς του πολυπλεγμένου σήματος) δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 17 dBm (50mW) που προδιαγράφεται, για λόγους οπτικής ασφάλειας, ως την μέγιστη ανεκτή τιμή οπτικής ισχύος σε ίνα.

Όσον αφορά τις χρησιμοποιούμενες ίνες, αν αυτές είναι τύπου G.652, τότε η συνηθέστερη περίπτωση είναι σύστημα WDM 16-32 σημάτων των 2,5 Gbit/s (συνολική χωρητικότητα 40-80 Gbit/s), ενώ αν η ίνα είναι «μετατοπισμένης διασποράς», τότε λόγω του φαινομένου της τετρακυματικής μίξης είναι δυνατή η πολυπλεξία μέχρι 8 σημάτων με ανομοιόμορφη κατανομή των αντίστοιχων καναλιών.

Τέλος, σε ότι αφορά τους επιμέρους δέκτες, η σημαντικότερη τεχνική παράμετρος που χαρακτηρίζει και την ποιότητα της ζεύξης συνολικά είναι ο λόγος δυφιακών σφαλμάτων BER), δηλαδή το ποσοστό των εσφαλμένων αναγνωρίσεων παλμών από πλευράς δέκτη (το «1» εκλαμβάνεται ως «0» και αντίστροφα). Για το τυχαίο κανάλι «ν», ο BER είναι συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου OSNR, στην είσοδο του αντίστοιχου πολυπλέκτη και συνήθως απαιτείται να είναι της τάξης του  $10^{-12}$ .

## Υπολογισμοί σχετικά με την εξασθένηση (ισολογισμός ισχύος της ζεύξης) [28]

**Σ**τόχος του ισολογισμού ισχύος της ζεύξης είναι η επιβεβαίωση ότι η ισχύς κάθε αποπολυπλεγμένου καναλιού, στην είσοδο του αντίστοιχου επιμέρους δέκτη είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη αυτού. Σε περίπτωση που η απαίτηση αυτή δεν ικανοποιείται, τοποθετούνται στη ζεύξη πρόσθετοι ενισχυτές γραμμής.

Στην πράξη, για την εκάστοτε ζεύξη WDM προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή η μέγιστη ανεκτή εξασθένηση  $A_{max}$  από την έξοδο του οπτικού ενισχυτή ισχύος (στην πλευρά του πομπού) μέχρι την είσοδο του προενισχυτή (στην πλευρά του δέκτη). Για ζεύξεις πολύ μεγάλου ή εξαιρετικά μεγάλου μήκους κύματος, χωρίς οπτικούς ενισχυτές γραμμής, η  $A_{max}$  συνήθως δεν υπερβαίνει τα 33 dB και μειώνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των οπτικών ενισχυτών γραμμής.

Κατά τον ισολογισμό της ισχύος, συνολική εξασθένηση  $A_{tot}$ , θα πρέπει να είναι μικρότερη από της προδιαγραφόμενη μέγιστη ανεκτή εξασθένηση  $A_{max}$  ( $A_{tot} < A_{max}$ ), για τον υπολογισμό της  $A_{tot}$ , συνυπολογίζονται τα παρακάτω:

- ✓ Ο συντελεστής εξασθένησης της οπτικής ίνας  $a_f$  (dB/km). Τυπική τιμή, για το παράθυρο των 1500nm, είναι τα 0,3 dB/km, η δε συνολική εξασθένηση κατά μήκος της ίνας εκφράζεται από τον όρο  $a_f L$  (dB), όπου  $L$ (km) το μήκος της ίνας.
- ✓ Οι απώλειες σύνδεσης πομπού-ίνας, ίνας-δέκτη, οι απώλειες στους συνδετήρες και τις συγκολλήσεις (σε dB) κλπ. Τυπικές τιμές για αυτές τις απώλειες είναι τα 2dB για σύνδεση πομπού ίνας ή ίνας δέκτη και τα 0,1-0,5 dB για κάθε σύνδεση ή συγκόλληση κατά μήκος του καλωδίου. Οι παραπάνω απώλειες είτε δίνονται χωριστά είτε συμπεριλαμβάνονται σε έναν ενιαίο όρο  $A_{con}$  (dB).
- ✓ Ένα πρόσθετο περιθώριο  $\Pi$  (dB) που πρέπει να προβλέπει πιθανή υποβάθμιση των επιδόσεων της ζεύξης λόγω γήρανσης, περιβαλλοντικών παραμέτρων, μουφών κλπ (τυπικές τιμές 4-10dB).

Με βάση το παραπάνω θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω απαίτηση:

$$A_{tot} = a_f L + A_{con} + \Pi < A_{max}$$

Σε περίπτωση που η παραπάνω σχέση δεν ικανοποιείται, θα πρέπει στην ζεύξη να παρεμβληθούν οπτικοί ενισχυτές γραμμής. Αν  $G_{1,tot}$  (dB) η συνολική απολαβή των ενισχυτών αυτών, τότε η σχέση διαμορφώνεται όπως παρακάτω, όπου  $A_{max}-\epsilon$  είναι η νέα τιμή της μέγιστης αποδεκτής απόσβεσης που λαμβάνει υπόψη της ύπαρξη ενισχυτών γραμμής:

$$A_{tot} = a_f L + A_{con} + \Pi - G_{1,tot} < A_{max} - \epsilon$$

Αξίζει να σημειωθούν τα εξής:



- ✓ Η ισχύς εισόδου των αναμεταδοτών συνήθως (και ανάλογα με τον κατασκευαστή) δεν μπορεί να είναι χαμηλότερη από -5 dBm. Για τον λόγο αυτόν, πριν την εισαγωγή των επιμέρους οπτικών σημάτων στους αναμεταδότες, συνήθως χρησιμοποιούνται αναγεννητές.
- ✓ Η συνολική μεταδιδόμενη ισχύς δια μέσου της οπτικής ίνας δεν μπορεί να υπερβαίνει (για λόγους ασφαλείας των χειριστών ) τα 17 dBm.
- ✓ Η τυπική ευαισθησία των επιμέρους δεκτών για σήματα στάθμης STM-16 και BER=10<sup>-12</sup> είναι περίπου -27 dBm.

### Υπολογισμοί σχετικά με τη διασπορά [28]

**A**ναφορικά με τη διασπορά, ο κατασκευαστής προδιαγράφει τη μέγιστη ανεκτή διασπορά σε s/nm για το ρυθμό μετάδοσης ανά πολυπλεγμένο σήμα και για τον τύπο του καλωδίου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί (ίνες G.652, G.653 κλπ.). από τη σύγκριση της τιμής αυτής και του συντελεστή διασποράς, προκύπτει η μέγιστη δυνατή απόσταση (χωρίς αντιστάθμιση διασποράς) για την εκάστοτε ζεύξη.

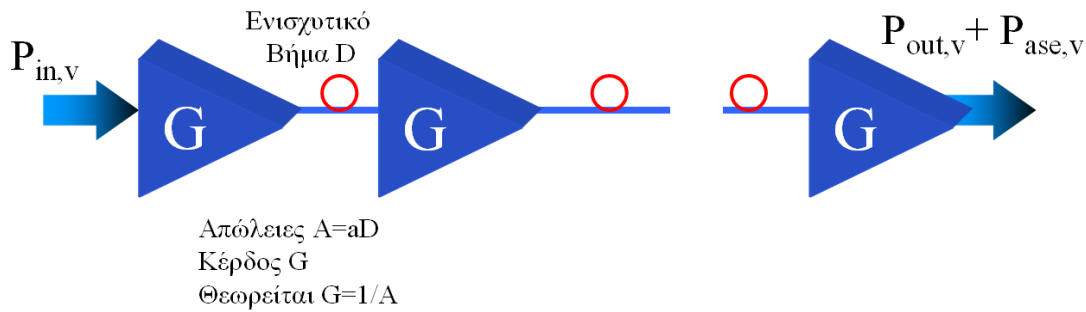
### Υπολογισμοί σχετικοί με το θόρυβο (κυρίως τον θόρυβο ASE) [28]

**H** συσσώρευση θορύβου ASE, κατά τις διαδοχικές ενισχύσεις υποβαθμίζει τον οπτικό σηματοθορυβικό λόγο OSNR, της ζεύξης και επιβάλλει την , κατά τακτές αποστάσεις, αναγέννηση του σύνθετου σήματος.

Για τους υπολογισμούς που σχετίζονται με τον θόρυβο ASE, χρησιμοποιείται το μοντέλο ζεύξης WDM ου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- P<sub>in,v</sub>**: Είναι η ισχύς του καναλιού “v” κατά την είσοδό του στον πρώτο οπτικό ενισχυτή.
- P<sub>out,v</sub>**: Είναι η ισχύς του καναλιού “v” κατά την έξοδό του από τον τελευταίο ενισχυτή
- D**: Είναι η απόσταση μεταξύ των οπτικών ενισχυτών
- L**: Είναι το συνολικό μήκος ζεύξης
- G**: Είναι το κέρδος του οπτικού ενισχυτή
- A**: Είναι ο συντελεστής εξασθένησης της ζεύξης (σε dB/km)
- A**: Είναι η συνολική εξασθένηση, για μήκος D της ζεύξης (D είναι το ενισχυτικό βήμα) εκφρασμένη ως καθαρός αριθμός
- M**: Είναι ο αριθμός των οπτικών ενισχυτών κατά μήκος της ζεύξης (M=L/D)
- P<sub>ASE,v</sub>**: Είναι η ισχύς του θορύβου ASE (σε W) και το κανάλι “v”
- n<sub>sp</sub>**: Είναι ο συντελεστής θορύβου (τυπική τιμή n<sub>sp</sub>=5 dB=3)
- OSNR<sub>v</sub>**: Είναι ο οπτικός σηματοθορυβικός λόγος, ως καθαρός αριθμός, για το κανάλι

**B:** Είναι το ισοδύναμο εύρος ζώνης θορύβου (τυπική τιμή  $0,1\text{nm}=12,5\text{ Ghz}$ )



Σχήμα 5. 1 Μοντέλο ζεύξης WDM για την εκτέλεση υπολογισμών σχετικά με τον θόρυβο [28]

Η απαίτηση που τίθεται εδώ είναι οι απώλειες κατά μήκος της ζεύξης, να εξισορροπούνται απόλυτα από το κέρδος των διαδοχικών ενισχύσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι :

$$P_{in,v} = P_{out,v}$$

Που για το ενισχυμένο βήμα μήκους  $D$  «μεταφράζεται» ως

$$A \equiv 10^{-aD/10} = \frac{1}{G} \Leftrightarrow G = 10^{aD/10}$$

Στην έξοδο « $v$ » του τελευταίου ενισχυτή, για το κανάλι « $v$ » ισχύει ότι

$$OSNR_v = \frac{P_{out,v}}{P_{ASE,v}}$$

Η ισχύς του θορύβου ASE, ανά ενισχυτή, δίνεται από τον τύπο

$$P_{ASE,v,1} = 2 \cdot n_{sp} \cdot \left( \frac{hc}{\lambda_v} \right) \cdot (G-1) \cdot B = 2 \cdot n_{sp} \cdot \left( \frac{hc}{\lambda_v} \right) \cdot (10^{aD/10} - 1) \cdot B$$

Οπότε για τους  $M$  ενισχυτές, ισχύει ότι

$$P_{ASE,v} = M \cdot P_{ASE,v,1} = \left( \frac{L}{D} \right) \cdot 2n_{sp} \cdot \left( \frac{hc}{\lambda_v} \right) (10^{aD/10} - 1) \cdot B$$

Δεδομένου ότι, με βάση την  $OSNR_v = \frac{P_{out,v}}{P_{ASE,v}}$  ισχύει ότι

$$P_{out,v} = P_{ASE,v} \cdot OSNR_v$$

Από την  $P_{ASE,v} = M \cdot P_{ASE,v,1} = \left(\frac{L}{D}\right) \cdot 2n_{sp} \cdot \left(\frac{hc}{\lambda_v}\right) (10^{aD/10} - 1) \cdot B$  προκύπτει ότι

$$P_{out,v} = P_{ASE,v,1} \cdot OSNR_v = \left(\frac{L}{D}\right) \cdot 2n_{sp} \cdot \left(\frac{hc}{\lambda_v}\right) (10^{aD/10} - 1) \cdot B \cdot OSNR_v$$

Έτσι, με δεδομένη την απαίτηση  $P_{in,v} = P_{out,v}$ , προκύπτει ότι

$$P_{in,v} = \left(\frac{L}{D}\right) \cdot 2n_{sp} \cdot \left(\frac{hc}{\lambda_v}\right) (10^{aD/10} - 1) \cdot B \cdot OSNR_v$$

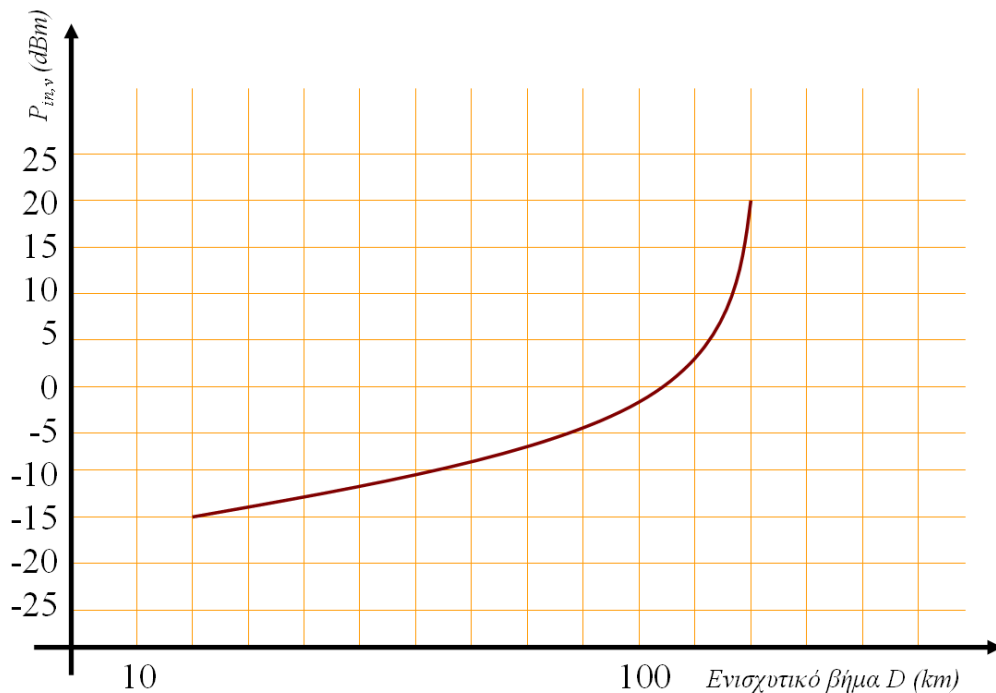
Στην παραπάνω σχέση, τυπικές τιμές για ορισμένες παραμέτρους είναι οι:

$$n_{sp}=5\text{dB}, \lambda_v=1550\text{ nm}, a=0,3\text{ dB/km}, B=0,1\text{ nm} (=12,5\text{ GHz})$$

Θέτοντας τις παραπάνω τιμές στην σχέση

$$P_{in,v} = \left(\frac{L}{D}\right) \cdot 2n_{sp} \cdot \left(\frac{hc}{\lambda_v}\right) (10^{aD/10} - 1) \cdot B \cdot OSNR_v, \text{ προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.}$$

Ισχύς εισόδου καναλιού  $P_{in,v}$  συναρτήσει του ενισχυτικού βήματος  $D$ . Σύμφωνα με την παρακάτω γραφική παράσταση, μια μεταδιδόμενη (ανά πολυπλεγμένο σήμα) οπτική ισχύς  $P_{in,v}=5\text{ dBm}$  (συνολική, για 16 σήματα, μεταδιδόμενη ισχύς ίση με 17 dBm απαιτείται απόσταση μεταξύ των ενισχυτών (ενισχυτικό βήμα)  $D=100\text{km}$  (εξασθένιση, με  $a=0,3\text{ dB/km}$ , ίση με  $A=aD=30\text{ dB}$ )



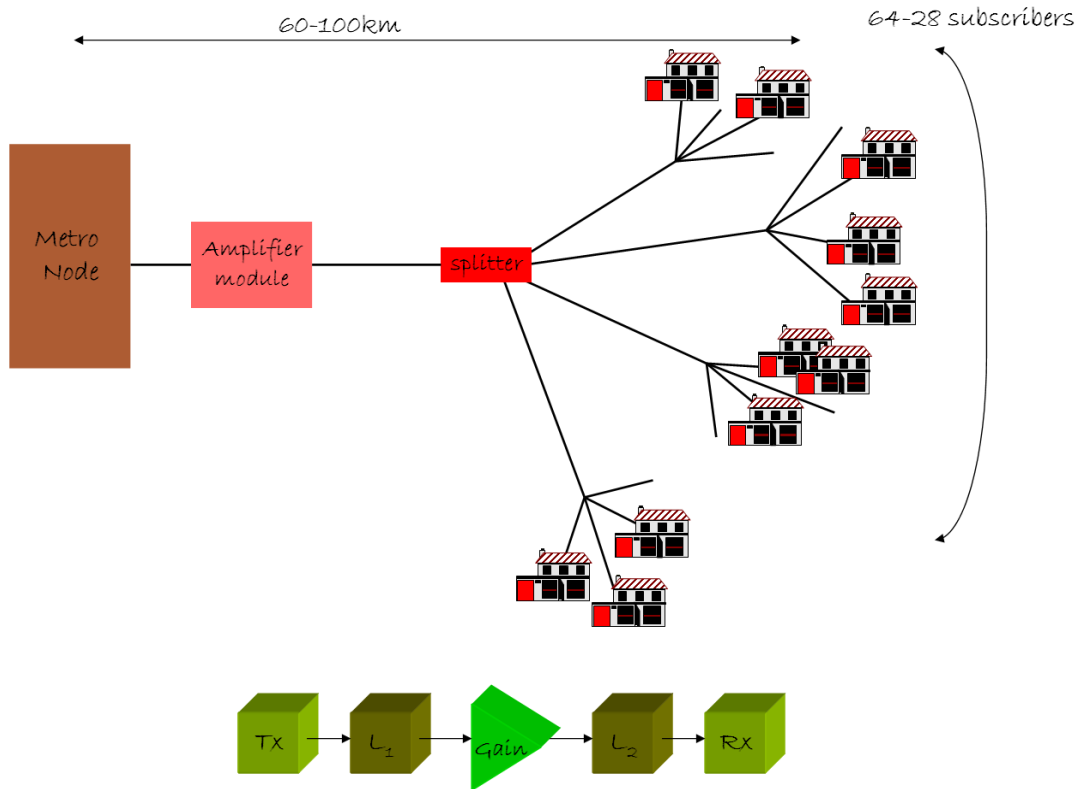
### Σχήμα 5. 2 Ισχύς εισόδου καναλιού $P_{in,v}$ συναρτήσει του ενισχυτικού βήματος $D$ [28]

Εξέλιξη του οπτικού σηματοθορυβικού λόγου  $OSNR_v$  ( για το κανάλι “v”) κατά μήκος ζεύξης με αναγεννητικό βήμα  $D=100\text{km}$  ( $A=aD=30\text{ dB}$ ). Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός διαδοχικών ενισχύσεων, προκειμένου ο  $OSNR_v$  (που υποβαθμίζεται λόγω συσσώρευσης θορύβου ASE) να υπερβαίνει την ελάχιστη αποδεκτή τιμή (περί τα 15 dB). Ενώ η οπτική ισχύς του καναλιού «v» ακολουθεί μια περιοδική μεταβολή (εξασθένιση και ενίσχυση), ο θόρυβος ASE (ο οποίος εξασθενεί σε κάθε ενισχυτικό βήμα), μετά από κάθε ενίσχυση παρουσιάζεται αυξημένος. Αυτό έχει ως συνέπεια, ο  $OSNR_v$  του καναλιού «v» να υποβαθμίζεται συνεχώς, μέχρις ότου φτάσει σε μια τιμή που θεωρείται το ελάχιστο αποδεκτό κατώφλι. Έτσι ο μέγιστος αριθμός διαδοχικών ενισχυτών (πριν απαιτηθεί ενίσχυση του σήματος) είναι ίσος με 6.

## Οπτικά ενισχυμένα PON

Τα τελευταία πέντε χρόνια παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση της ζήτησης για υψηλή ταχύτητα πρόσβασης σε λύσεις τόσο για επιχειρηματική όσο και οικιακή χρήση. Μελλοντικά λειτουργικά σενάρια προβλέπουν ότι η αύξηση της κίνησης θα είναι άνω του 50% ετησίως, [19][29] και για να στηριχθεί οικονομικά το παρόν επίπεδο ανάπτυξης θα απαιτηθεί μείωση κόστους καθώς η τιμή ανά εύρος ζώνης που έχει μέχρι στιγμής δεν επιτυγχάνεται από τεχνολογικής ανάπτυξης και μόνο. Μία βιώσιμη λύση είναι η μείωση του ποσού του εξοπλισμού (διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων) εντός του δικτύου. Συνεπώς, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για λύσεις πρόσβασης που βασίζονται σε παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs). [19][29][30] Κεντρική θέση σε αυτό, ιδίως για την εκτεταμένη πρόσβαση σε PONs που μπορεί να καλύψει αποστάσεις των 100 km ή περισσότερο, είναι η ανάγκη για χαμηλό κόστος και χαμηλή ισχύς ενισχυτή. Οι ενισχυτές ημιαγωγού οπτικών ινών (SOA) έχουν ένα σαφή ρόλο να διαδραματίσουν σε αυτό το πλαίσιο, ιδιαίτερα επειδή η άνοδος κυκλοφορίας (upstream traffic) μπορεί να τοποθετηθεί στα 1,3  $\mu\text{m}$ , όπου οι glassbased τεχνολογίες του ενισχυτή που ανταγωνίζονται, δεν είναι αποδοτικές. Εδώ έχουμε έκθεση σχετικά με μια πειραματική και θεωρητική αξιολόγηση για την εκτεταμένη πρόσβαση στο PON συμπεριλαμβανομένων και των SOAs. Στην ανάλυση αυτή εξετάζεται η επίδραση μιας ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (ASE). Η ASE είναι συνήθως συνδεδεμένη ως πηγή θορύβου. Εντούτοις, στην περίπτωση των PONs, χρησιμοποιείται περιορισμένο οπτικό φίλτράρισμα (τα πλάτη του φίλτρου μπορεί να 20 nm ή ακόμη και 40 nm), το οποίο δεν είναι επαρκές. Με περιορισμένο οπτικό φίλτράρισμα σε ενισχυμένα συστήματα, η ισχύς της ASE μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο το σήμα ισχύος και συνεπώς εισάγει μια απόκλιση που μοιάζει με την απώλεια της εξαφάνισης λόγου (extinction ratio) (ER). Το αποτέλεσμα αυτό δεν περιλαμβάνεται συνήθως εντός των μοντέλων-συστημάτων. Η ανάλυση δείχνει ότι η παράλειψη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στην απόδοση μοντελοποίησης των 5 dB ή περισσότερο. [19] [31-34]

Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός PON παρουσιάζεται στο Σχ. 5.3, Το οποίο είναι ένα δίκτυο αποτελούμενο από μια διαδρομή μετάδοσης και διαχωριστή σύνδεσης χρηστών στο δίκτυο πυρήνα.



Σχήμα 5. 3 Σχηματική απεικόνιση ενός Pon συστήματος [36]

Γενικά, τα PONs είναι σχεδιασμένα για 20 km απώλειες κορμού και με 32-τρόπο διαχωρισμού της απώλεια (split loss). Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, η απώλεια του κορμού μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη, και είναι επιθυμητό να χωρέσει έναν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών (που οδηγεί σε αυξημένη απώλεια διαιρέτη). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενίσχυση του σήματος κάνοντας χρήση ενισχυτών σε κατάλληλο στάδιο στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής. Η ενίσχυση πρέπει να είναι αμφίδρομη, και κατά συνέπεια οι λύσεις οπτικών ινών- βάση ενισχυτή είναι περιορισμένες για την σύνδεση (τέλος ο χρήστης στο δίκτυο πυρήνα) εφόσον αυτό είναι γενικά εφαρμόζόμενο σε 1.300 nm.

Η βέλτιστη θέση για έναν ενισχυτή σε ένα PON είναι στο σημείο εξισορρόπησης μεταξύ της απώλειας διάσπασης και της απώλειας της ίνας κορμού. Ο ενισχυτής μπορεί να χαρακτηριστεί ως ενισχυτής ισχύος, ενισχυτής γραμμής, ή προενισχυτής αμέσως πριν από ένα δέκτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ενισχυτής τοποθετείται σε βέλτιστη θέση πριν από τον διαχωριστή, αλλά αυτό μπορεί να μην είναι πάντα δυνατό ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας σε αυτό το σημείο. Η λειτουργία του PON μπορεί εύκολα να αναλυθεί χρησιμοποιώντας πρότυπο γραμμικό σήμα μοντέλων, όπου οι επιπτώσεις της τοποθέτησης του ενισχυτή μπορεί να σχετίζονται με την τροφοδοσία του συστήματος προϋπολογισμού για ένα δεδομένο ποσοστό σφαλμάτων bit (BER). [19][31] Μέχρι σήμερα, ταπειραματικά αποτελέσματα που έχουν αναφερθεί, υποστηρίζονται από αυτόν τον τύπο ανάλυσης, αλλά οι περισσότεροι έχουν περιοριστεί σε δέκτες pin .

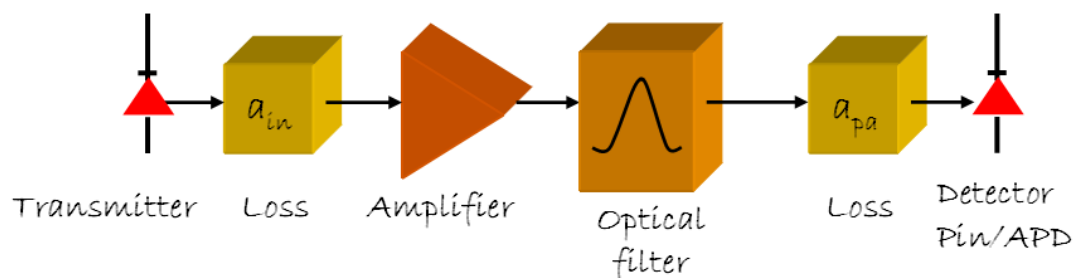
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε μια πιο γενική θεώρηση όσον αφορά δέκτες βασισμένους τόσο το pin όσο και σε φωτοδίοδους χιονοστιβάδας (APDs). Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται συνήθως για να βελτιώσουν την ισχύ στο δέκτη εντός

PONs. Επιπλέον, το κέρδος γραμμικών χαρακτηριστικών του SOA αντισταθμίζεται, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι το κέρδος εξαρτάται από την ισχύ εισόδου και από τη βασική αρχή του κορεσμού. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα PONs εμπεριέχουν φίλτρα (οπτικά φίλτρα των 20 nm είναι τα πιο κοινά), η επίδραση της ASE από τον ενισχυτή πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Συχνά, αυτή η επίδραση της ASE αντικατοπτρίζει το θόρυβο στο δέκτη. Ωστόσο, εκτός από τη συνεισφορά του θορύβου από την ASE, ως αποτέλεσμα του περιορισμένου φιλτραρίσματος, η αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρονίων (ASE), η οποία η ίδια αποτελεί σημαντικό επίπεδο ενέργειας στη μετάδοση του «μηδέν», στην πραγματικότητα υποβαθμίζει το συνολικό σύστημα και ονομάζεται δείκτης απόσβεσης ή λόγος διαγραφής (extinction ratio ER). Έτσι, ο λόγος διαγραφής ER έχει αντίκτυπο στην απόδοση του δικτύου, συνεπώς πρέπει να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο ανάπτυξης ενός δικτύου.

### Διατύπωση του προβλήματος

Τα παρακάτω στοιχεία του δικτύου είναι χρήσιμα για την ανάλυση (Σχ. 5.4):

- ✓ Ο πομπός, η ισχύς και ο δείκτης απόσβεσης ( ER)
- ✓ Η απώλεια πριν από τον ενισχυτή (απώλεια ίνας κορμού), το κέρδος των ενισχυτών, Το  $P_{sat}$  και το σχήμα θορύβου (NF)
- ✓ Το postamplification φιλτράρισμα
- ✓ Η postamplification απώλεια (splitter και απώλεια ίνας κορμού)
- ✓ Η επιδόσεις δέκτη, οι πηγές θορύβου, συμπεριλαμβανομένης της εξάρτησης του κέρδους από χιονοστιβάδα
- ✓ Η επιρροή του ASE σχετικά με τα μηδενικά στο εσωτερικό της μετάδοσης (υποβάθμιση της ER).



Σχήμα 5. 4 στοιχεία ενός PON δικτύου, χρήσιμα για την ανάλυση [36]

Με βάση ότι τα ποσοστά δεδομένων για δίκτυα PON είναι γενικά χαμηλά (<2,5 Gbits/ s), η επίδραση της διασποράς δεν έχει περιληφθεί. Ο λόγος σήματος προς το θόρυβο (SNR) στο δέκτη καθορίζει τη συνολική απόδοση του συστήματος:

$$SNR = \frac{\text{average signal power}}{\text{noise power}} = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2}$$

Η ισχύς σήματος  $I_p$  είναι ανάλογη της ανταπόκρισης της διόδου,  $R$ , και της έντασης του λαμβανόμενου σήματος, όπου ο  $Prec$  είναι η ισχύς σήματος στο δέκτη. Ο όρος θόρυβου  $\sigma_{TOT}^2$  αντιπροσωπεύει το συνολικό θόρυβο λειτουργίας τόσο για το “1” όσο και για το “0”.

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη αναφορά στο ρυθμό εσφαλμένων bit ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς μετρείται η απόδοση του δέκτη καθώς και η απόδοση του συστήματος.

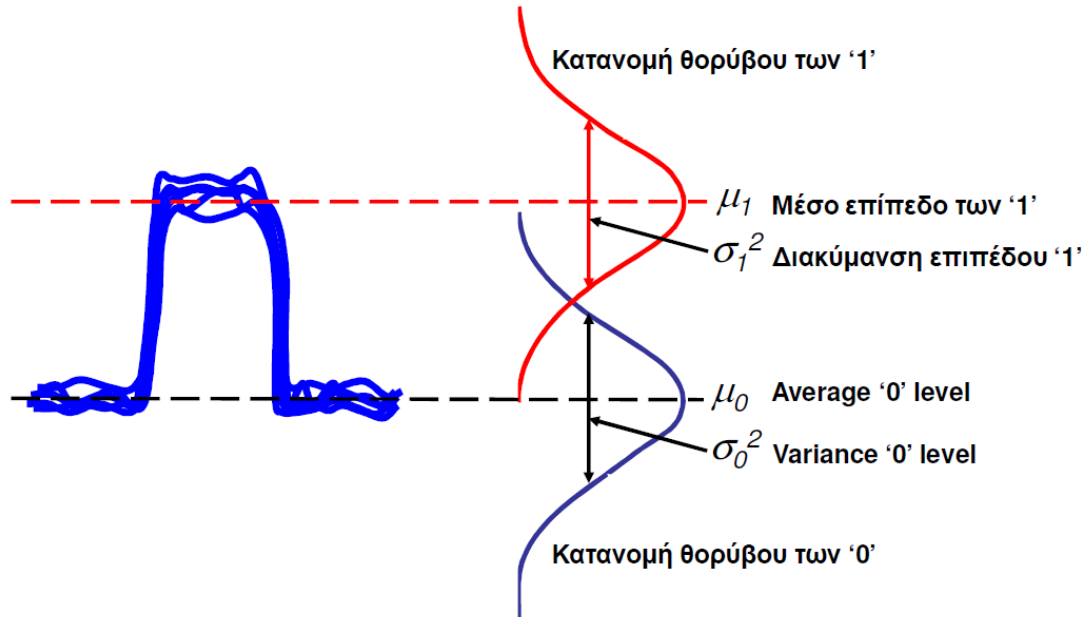
Ρυθμός εσφαλμένων bit, ορίζεται σαν η πιθανότητα εσφαλμένης αναγνώρισης ενός bit από το κύκλωμα απόφασης του δέκτη. Στο σχήμα 7.3(α) παρουσιάζονται σχηματικά οι διακυμάνσεις του σήματος, που λαμβάνονται από το κύκλωμα απόφασης, το οποίο υφίστανται δειγματοληψία στον χρόνο απόφασης  $t_D$ , που καθορίζεται μέσω της ανάκτησης των παλμών χρονισμού. Η δειγματοληπτική τιμή  $I$  μεταβάλλεται από bit σε bit με μέση τιμή  $I_1$  ή  $I_0$ , ανάλογα με το αν το bit αντιστοιχεί στο 1 ή στο 0 της αλληλουχίας των bit. Το κύκλωμα απόφασης συγκρίνει τις τιμές αυτές με μια τιμή κατωφλίου  $I_D$  και το ονομάζει bit 1 αν  $I > I_D$  ή bit 0 αν  $I < I_D$ . Σφάλμα εμφανίζεται αν  $I < I_D$  για bit 1 λόγω του θορύβου του δέκτη. Επίσης, σφάλμα εμφανίζεται και αν  $I > I_D$  για bit 0. Η πιθανότητα σφάλματος μπορεί να οριστεί ως εξής [37]

$$BER = \rho(1)P(0/1) + \rho(0)P(1/0) \quad (\alpha)$$

όπου  $\rho(1)$  και  $\rho(0)$  είναι η πιθανότητα λήψης 1 και 0 αντίστοιχα,  $P(0/1)$  είναι η πιθανότητα απόφασης 0 όταν λαμβάνεται 1 και  $P(1/0)$  είναι η πιθανότητα απόφασης 1 όταν λαμβάνεται 0. Επειδή τα bit 1 και 0 έχουν τις ίδιες πιθανότητες εμφάνισης,  $\rho(1) = \rho(0) = 1/2$  τότε το BER γίνεται:

$$BER = 1/2 [P(0/1) + P(1/0)] \quad (\beta)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται πως οι  $P(0/1)$  και  $P(1/0)$  εξαρτώνται από τη συνάρτηση της πυκνότητας της πιθανότητας  $p(I)$  της τιμής δειγματοληψίας  $I$ . Ο συναρτησιακός τύπος της  $p(I)$  εξαρτάται από τη στατιστική της πηγής θορύβου, που ευθύνεται για τις διακυμάνσεις του ρεύματος. Ο θερμικός θόρυβος περιγράφεται από την Γκαουσιανή στατιστική με μέσο όρο μηδέν και διακύμανση  $\sigma_\tau^2$ . Μια συνηθισμένη προσέγγιση, ο θόρυβος βολής θεωρείται σαν τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή και για τους δέκτες p-i-n και APD (με διαφορετική διακύμανση  $\sigma_s^2$ ). Το άθροισμα των δύο τυχαίων Γκαουσιανών μεταβλητών είναι μια τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή, η τιμή δειγματοληψίας  $I$  έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με διακύμανση  $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_\tau^2$  [37]



Σχήμα 5. 5 Κατανομή θορύβου

Η μέση τιμή και η διακύμανση διαφέρουν για τα bit 1 και 0. Αν  $\sigma_1^2$  και  $\sigma_0^2$  είναι οι αντίστοιχες διακυμάνσεις, οι πιθανότητες συνθήκης δίνονται από τις σχέσεις: [37]

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right)$$

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right)$$

$$P(0/0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right)$$

Αντικαθιστώντας τις δυο αυτές εξισώσεις στην εξίσωση (β), το BER μορφοποιείται ως εξής:

$$BER = \frac{1}{4} \left( \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right) \right)$$

Η εξίσωση αυτή μας δείχνει ότι ο BER εξαρτάται από το κατώφλι απόφασης  $I_D$ . Η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται όταν επιλέξουμε το  $I_D$  έτσι ώστε

$$\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}} = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \equiv Q$$

### Μη ενισχυμένο Δίκτυο

**Ε**ίναι χρήσιμο να αξιολογηθεί ο προϋπολογισμός για την ισχύ δικτύου (power budget) για την περίπτωση που δεν έχουμε οπτική ενίσχυση. Σε αυτό το σενάριο, το διάγραμμα του Σχ. 2α απλοποιεί την περίπτωση όπου υπάρχει



μόνο ένα πομπός, απώλεια καναλιού, και ο δέκτης. Για την περίπτωση του δέκτη pin, το SNR είναι :

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} = \frac{R^2 \cdot P_{rec}^2}{2 \cdot q \cdot (R \cdot P_{rec} + I_D) \cdot B + 4 \cdot \left( \frac{kT}{R_L} \right) \cdot F_N \cdot B}$$

Ο πρώτος όρος στον παρονομαστή περιγράφει το θόρυβο βολής με συνδυασμό την ισχύ του σήματος,  $P_{rec}$ , και ρεύμα σκότους της διόδου  $I_d$ ,  $q$  είναι φορτίο ηλεκτρονίου και  $B$  είναι το εύρος ζώνης δέκτη (2,5 GHz). Ο δεύτερος όρος του παρονομαστή περιγράφει τη θερμική συνεισφορά του θορύβου, όπου  $k$  σταθερά Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ,  $T$  είναι η θερμοκρασία θορύβου (300 K), και  $R_L$  είναι η αντίσταση εισόδου. Η συνεισφορά του θορύβου από τον ενισχυτή εκφράζεται μέσω του όρου: παράγοντας θορύβου  $F_N$ . Ο θερμικός θόρυβος και το ρεύμα σκότους δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον, δεδομένου ότι έχουν ελάχιστη συμβολή στο συνολικό θόρυβο. Η επίδοση αυτή είναι το σημείο αναφοράς, με το οποίο θα αξιολογήσει την επίδραση του οπτικού ενισχυτή. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να ξαναγραφεί ως [37]

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} = \frac{R^2 \cdot P_{rec}^2}{2 \cdot q \cdot R \cdot P_{rec} \cdot B + i_N^2}$$

Όπου  $i_N^2$

είναι το ρεύμα θορύβου που σχετίζεται με όλα τα ηλεκτρικά παραγόμενα όρια θορύβου, παρέχοντας ένα εύχρηστο μηχανισμό για την αντιμετώπιση του θερμικού θορύβου για ένα ευρύ φάσμα τύπων δέκτη.

$$BER = 0.5 \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

Όπου  $Q$ , που αναφέρεται ως ο Q-factor, δίνεται από την σχέση

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Η  $Q^2 = SNR$  όπως εκφράζεται στην εξίσωση 1

Γι' αυτό το  $i_N^2$  μπορεί να ρυθμιστεί για να παρέχει ένα σημείο αναφοράς απόδοσης χωρίς λεπτομερή γνώση σχεδιασμού του δέκτη όσον αφορά την σχεδίαση μέσω της προδιαγραφής επιδόσεων από άποψη του BER και το εύρος ζώνης δεδομένων. Τυπικοί pin δέκτες για PON ή χονδροειδείς μήκος κύματος πολυπλεξίας με διαίρεση (CWDM) έχουν ευαισθησία μεταξύ 2.5 Gbits/s και BER  $10^{-10}$  (που ισοδυναμεί με  $Q^2 = 40$ ),  $i_N^2$  και ως εκ τούτου, η θερμική συνεισφορά του θορύβου μπορεί να εκτιμηθεί από αυτό το σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε μεταγενέστερη ανάλυση.

Πέρα από αυτό, ο λόγος διαγραφής ER του πομπού εκφράζεται ως εξής. Για τον καθορισμό του νέου ER, ως ο λόγος των ισχύων (λόγος διαγραφής) του 1 και 0,  $r_e = P_1 / P_0$ , εάν η μέση ισχύς μιας διαβίβασης είναι  $P_{AVE} = (P_1 + P_0) / 2$ , τότε μπορούν να καθοριστούν περαιτέρω

$$P_0 = 2 \cdot P_{AVE} \cdot \left[ \frac{1}{1 + r_e} \right]$$

$$P_1 = 2 \cdot P_{AVE} \cdot \left[ \frac{r_e}{1+r_e} \right]$$

Ως συνέπεια, ο παράγοντας Q στο δέκτη γίνεται

$$Q = \frac{P_{AVE}}{\sigma_1^2 + \sigma_0^2} \cdot \left[ \frac{1-r_e}{1+r_e} \right]^2$$

και η ποινή της ισχύς που συνδέεται με την ατελή ER μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Αυτό επίσης φαίνεται στο Σχ. 3, Που επίσης παριστάνει την BER για έναν πομπό με 10 dB ER μειώνοντας την ποινή της ισχύς σε 0,87 dB. [19] [38]

### Μη ενισχυμένος σύνδεσμος, χιονοστιβάδας φωτοδιόδων

Στην συνέχεια, για να υπάρχει μια ολοκληρωμένη άποψη για τα μη ενισχυμένα δίκτυα PON, πρέπει να εξεταστούν οι επιδόσεις ενός τέτοιου συστήματος με APD δέκτη. Στους δέκτες APD η συνιστώσα του θερμικού θορύβου παραμένει η ίδια, διότι προέρχονται από συστατικά, που δεν είναι μέρος της διαδικασίας ενίσχυσης. Ωστόσο, ο όρος του θορύβου βολής, πρέπει να τροποποιηθεί λόγω της διαδικασίας πολλαπλασιασμού χιονοστιβάδα. Για μια APD, ο συνολικός θόρυβος βολής περιγράφεται από

$$\sigma_s^2 = 2 \cdot q \cdot M^2 F_A \cdot (R \cdot P_{in} + I_D) \cdot B$$

Όπου  $\sigma_s^2$  είναι η διακύμανση του θορύβου βολής, M είναι το κέρδος χιονοστιβάδας,  $I_D$  είναι το APD ρεύμα σκότους, R είναι η ανταπόκριση κέρδους, B είναι το εύρος ζώνης δέκτη, και  $F_A$  είναι ο συντελεστής θορύβου των APD.

Οι παράμετροι των APD μέσω του συντελεστή ιονισμού  $k_A$ , ο οποίος λαμβάνει μια τιμή μεταξύ 0 και 1 περιγράφεται από τον τύπο

$$F_A(M) = k_A \cdot M + (1 - k_A) \cdot \left( 2 - \frac{1}{M} \right)$$

Στην ανάλυση  $k_A$  υποτίθεται ότι είναι 0,55, υψηλότερο από ότι θα μπορούσε να είναι, αναμενόμενο για τις καλύτερες APDs. Ωστόσο, μια υψηλή  $k_A$  ήταν επί σκοπού δοσμένη δεδομένου ότι συσκευές των PONs θα πρέπει να προσδιορίζονται για μαζική παραγωγή. Η μείωση της αξίας του  $k_A$  θα βελτιώσει την απόδοση του συστήματος αλλά δεν επηρεάζει σημαντικά το υπόλοιπο της μοντελοποίησης. Η εκτίμηση του BER χρησιμοποιώντας APD δέκτες, η εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} = \frac{M^2 \cdot R^2 \cdot P_{rec}^2}{2 \cdot q \cdot M^2 \cdot F_A(R \cdot P_{rec} + I_D) \cdot B + 4 \cdot \left( \frac{kT}{R_L} \right) \cdot F_N \cdot B}$$

Τα ακριβή αριθμητικά στοιχεία του συντελεστή πολλαπλασιασμού, περίσσεια του NF, και του ρεύματος σκότους δεν είναι πάντα εύκολο να αποκτήθούν από φύλλα δεδομένα. Ωστόσο κάποιες προσεγγίσεις μπορεί να γίνουν για να παραχθούν ακριβής τάσεις απόδοσης.

### Οπτικά ενισχυμένα δίκτυα

Τα βασικά μοντέλα περιγράφουν ότι η απόδοση συστήματος μπορεί να ενισχυθεί λαμβάνοντας υπόψη οπτικό κέρδος και οι συναφείς περίοδοι θορύβου. Ο πρόσθετος θόρυβος εξαρτημάτων που συνδέονται με την διαδικασία της ενίσχυσης μπορούν να περιγραφούν ως εξής :

$$\sigma_1^2 = \sigma_T^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{ASE}^2 + \sigma_{S-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2$$

$$\sigma_0^2 = \sigma_T^2 + \sigma_{ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2$$

Όπου  $\sigma_1^2$  είναι η διακύμανση του θορύβου του 1, είναι το άθροισμα του  $\sigma_T^2$ , δηλαδή το σήμα του επαγωγικού θορύβου βολής. Το  $\sigma_{ASE}^2$  είναι ο θόρυβος βολής που προέρχεται από την ισχύ ASE- και  $\sigma_{S-ASE}^2$  είναι ο θόρυβος που προέρχεται από τον ρυθμό μεταξύ του σήματος και του συστήματος ισχύος, και  $\sigma_{ASE-ASE}^2$  είναι ο παλμός θορύβου που προέρχεται από τα εξαρτήματα του ASE. Ομοίως το  $\sigma_0^2$  είναι η διακύμανση του θορύβου 0 και περιλαμβάνει τα  $\sigma_T^2$ ,  $\sigma_{ASE}^2$ , και  $\sigma_{ASE-ASE}^2$  και με τη σειρά, καθένα από αυτά μπορεί να μεντελοποιηθεί ως

$$\sigma_S^2 = 2 \cdot q \cdot I_p \cdot B_e = 2 \cdot q \cdot R \cdot P_{rec} \cdot B_e = 2 \cdot q \cdot R \cdot a \cdot G \cdot P_{rec} \cdot B_e$$

Όπου  $q$  είναι το φορτίο ηλεκτρονίων,  $R$  είναι η αποκρισιμότητα της διόδου,  $P_{rec}$  είναι η λαμβανόμενη οπτική ισχύς, και  $B_e$  είναι ο δέκτης εύρους ζώνης. Ο όρος  $G$  σχετίζεται με το κέρδος του ενισχυτή και ένα είναι η απώλεια της μετά ενίσχυσης (οι απώλειες μεταξύ του ενισχυτή και δέκτη). Ομοίως, ο θόρυβος βολής που σχετίζεται με την ισχύ ASE, είναι  $\sigma_{ASE}^2 = 2qI_{ASE}B_e = 2qR_a P_{ASE} B_e$ , όπου  $P_{ASE}$  είναι η ισχύς ASE με το δέκτη.

$$\sigma_{S-ASE}^2 = 4 \cdot R^2 \cdot G \cdot a^2 \cdot P_0 \cdot p_{ASE} \cdot B_e = 4 \cdot R^2 \cdot G \cdot a^2 \cdot P_{rec} \cdot P_{ASE}^{B_e}$$

Όπου η  $P_{ase}$  είναι η ισχύς ASE της φασματικής πυκνότητας ισχύος και  $p_{ase} = P_{ase}$  είναι η ισχύς ASE στο ηλεκτρικό εύρος ζώνης. Ο θόρυβος μεταξύ των εξαρτημάτων ASE ποσοτικοποιείται μέσω  $\sigma_{ASE-ASE}^2 = 2R^2 a^2 \rho_{ASE}^2 B_0 B_e = 2R^2 a^2 P_{ASE}^{Be} P_{ASE}^{Bo} \frac{P_{ASE}^{Bs} P_{ASE}^{Bo}}{P_{ASE}^{Bo}}$ , όπου  $P_{ASE}^{Bo}$  είναι η ισχύς ASE που περιέχεται εντός του οπτικού εύρους ζώνης.

# Αποτελέσματα προσομοίωσης

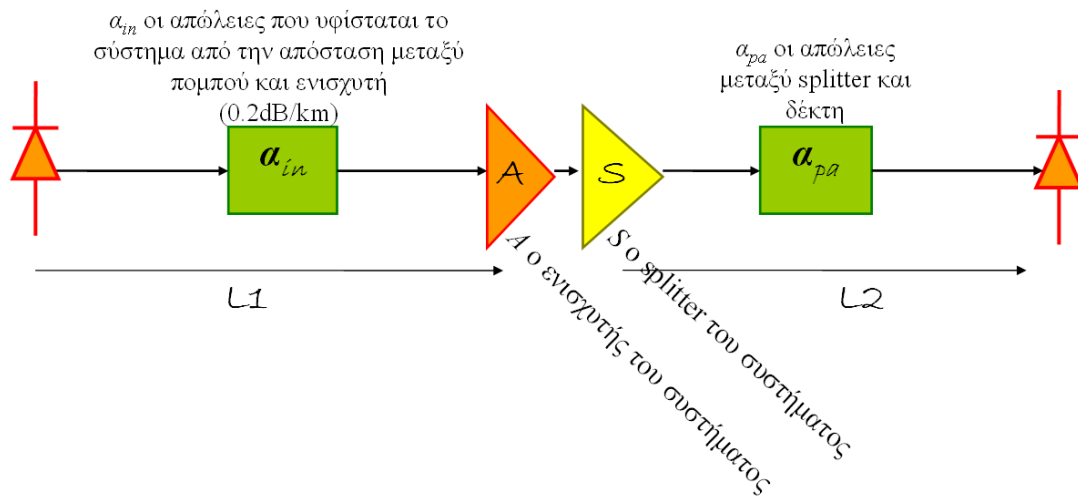


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκαν σε πρόγραμμα matlab και σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα συμπεράσματα όσον αφορά την απόδοση και το όφελος που αφορούν το κέρδος, την απόσταση, τον αριθμό των χρηστών αλλά και την αύξηση της ποσότητας κατά τη μετάδοση των δεδομένων πληροφορίας, κάνοντας χρήση ενισχυτή. Επίσης θα υπάρξει συμπέρασμα σχετικά με την βελτιστοποίηση των δικτύων PON, χρησιμοποιώντας δίκτυα νέας γενιάς σε συνδυασμό με την χρήση ενισχυτή.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε τη γενική δομή του συστήματος που θα μελετήσουμε στην συνέχεια.

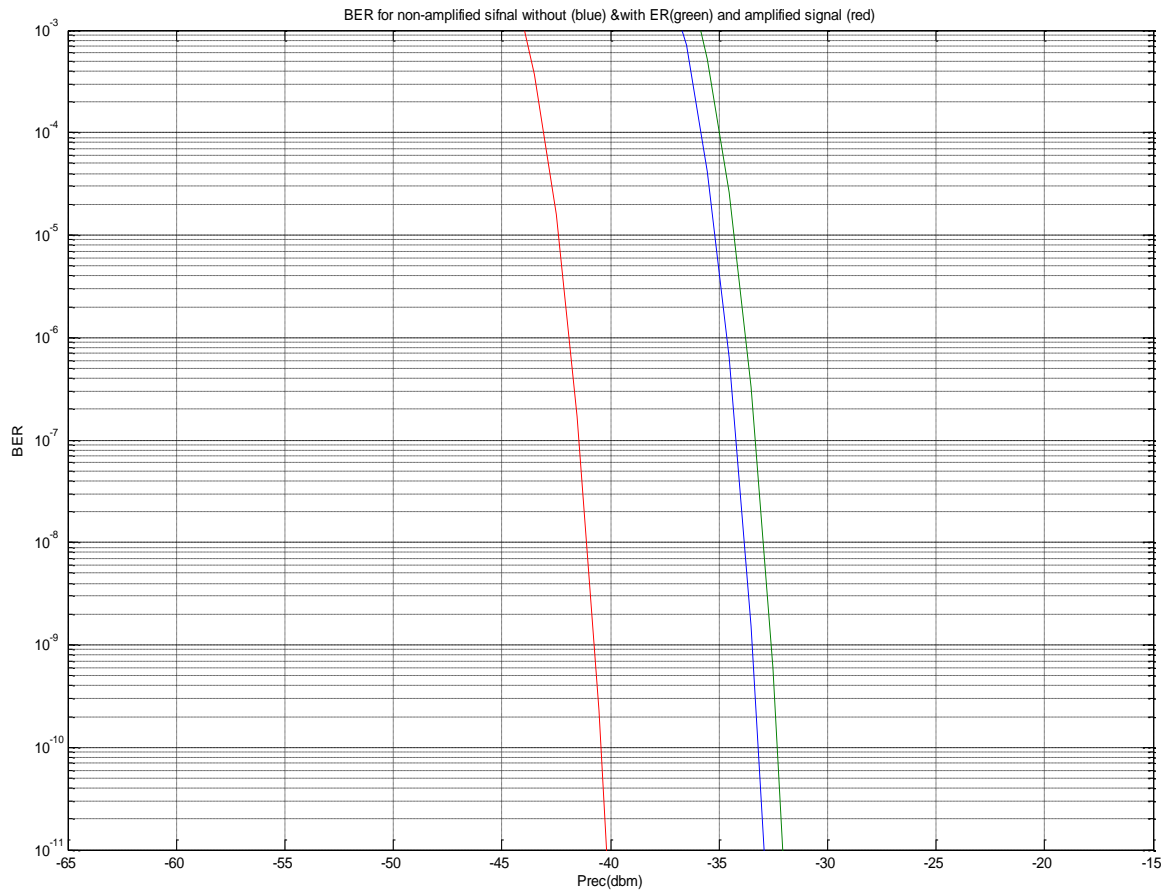


Σχήμα 6. 1 Η γενική δομή του συστήματος

Στο παραπάνω σχήμα,  $\alpha_{in}$  είναι οι απώλειες που δέχεται το σύστημα από την απόσταση μεταξύ πομπού και ενισχυτή και έχει τιμή 0.2dB/km. Επίσης,  $\alpha_{pa}$  είναι οι απώλειες μεταξύ splitter και δέκτη. Με  $A$  συμβολίζουμε τον ενισχυτή του συστήματος και με  $S$  τον splitter, του οποίου οι απώλειες θα υπολογιστούν ανεξάρτητα, (οι απώλειες για 32 χρήστες είναι  $\log_2(n)*3+2$ =splitterlosses) για να έχουμε μια σχετικά μεγάλη ευελιξία στον αριθμό των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα μας.

Στις μετρήσεις που ακολουθούν έχουμε υποθέσει ότι το Bit rate είναι (2.5 - 60) Gbit/s, το κέρδος χιονοστιβάδας (Avalanche gain) ότι είναι 10, η P1 ισχύς εκπομπής είναι 5.6 mW και ο λόγος διαγραφής (Extinction Ratio) ότι είναι 10. Επίσης οι χρήστες μας 32, το ακόρεστο κέρδος ενισχυτή είναι στην τιμή των 20dB, η ισχύς κορεσμού στα 13dBm και τέλος οι αποστάσεις  $L1$  (Απόσταση πομπού-splitter) και  $L2$  (Απόσταση ενισχυτή-δέκτη) από 25Km, η κάθε μια.

Αρχικά λοιπόν, θα εξετάσουμε το σενάριο όπου έχουμε ένα απλό παραδοσιακό TDM-PON δίκτυο χωρίς την χρήση του ενισχυτή, ένα δεύτερο στο οποίο θα έχουμε συμπεριλάβει τον λόγο διαγραφής (ER) και ένα τρίτο όπου έχει γίνει τοποθέτηση ενισχυτή στη μέση της απόστασης, πριν από τον splitter. Ένα τέτοιο σενάριο περιγράφεται στο σχήμα που ακολουθεί.



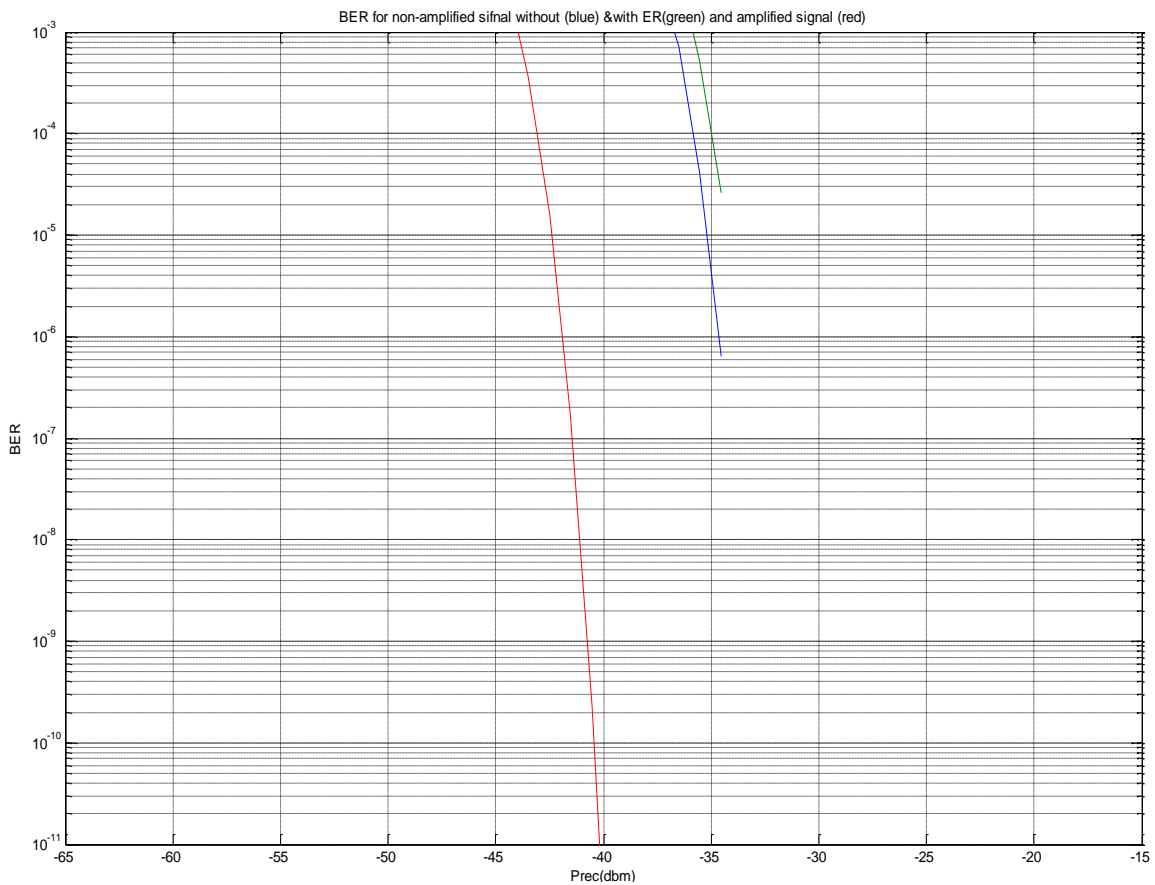
Σχήμα 6. 2 bit rate 2.5Gbit/s 32 χρήστες,

- ✓ TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON

Όσον αφορά το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON και το ενισχυμένο θα πραγματοποιηθούν δύο ξεχωριστές, διαφορετικές μετρήσεις όπου στο πρώτο δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής και στην άλλη έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι στα 2.5 Gbit/s για συνολικά 32 χρήστες. Το σημείο αναφοράς είναι το back-to-back (BTB) που θεωρώντας άπειρο ER η ευαισθησία του δέκτη APD είναι περίπου στα -32,91 dBm (μπλε καμπύλη). Η υποβάθμιση του ER στον πομπό στα 10dB έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πέναλτι, της τάξης των 0,87dB, όπως φαίνεται και η χαρακτηριστική διαφορά των δυο καμπύλων του TDM-PON BTB και TDM-



PON 10dB BTB (μπλε και πράσινη καμπύλη αντίστοιχα). Παρατηρούμε ότι κλίση που έχουν οι δύο καμπύλες, BTB και 10dB ER BTB, είναι ίδια και αυτό γιατί η κυρίαρχη διεργασία θορύβου που είναι ο θερμικός θόρυβος, είναι ίδιος και στις δύο περιπτώσεις. Πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη περίπου 7,2 dB (κόκκινη γραμμή) και αυτό γιατί η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης και έτσι η ίνα μας καλύπτει μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  7 dB, σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο. Όπως καταλαβαίνουμε, **το κέρδος των 7,2dB**, μας δίνει την δυνατότητα είτε να αυξήσουμε τον αριθμό των χρηστών, είτε την απόσταση. Σε θεωρητική προσέγγιση, για ρυθμό μετάδοσης 2.5 Gbit/s και μήκος συνολικά 50Km με χρήση ενισχυτή στην μέση της απόστασης, έχουμε 1024 χρήστες, όπου αυτό είναι και το δεύτερο σενάριο μας.



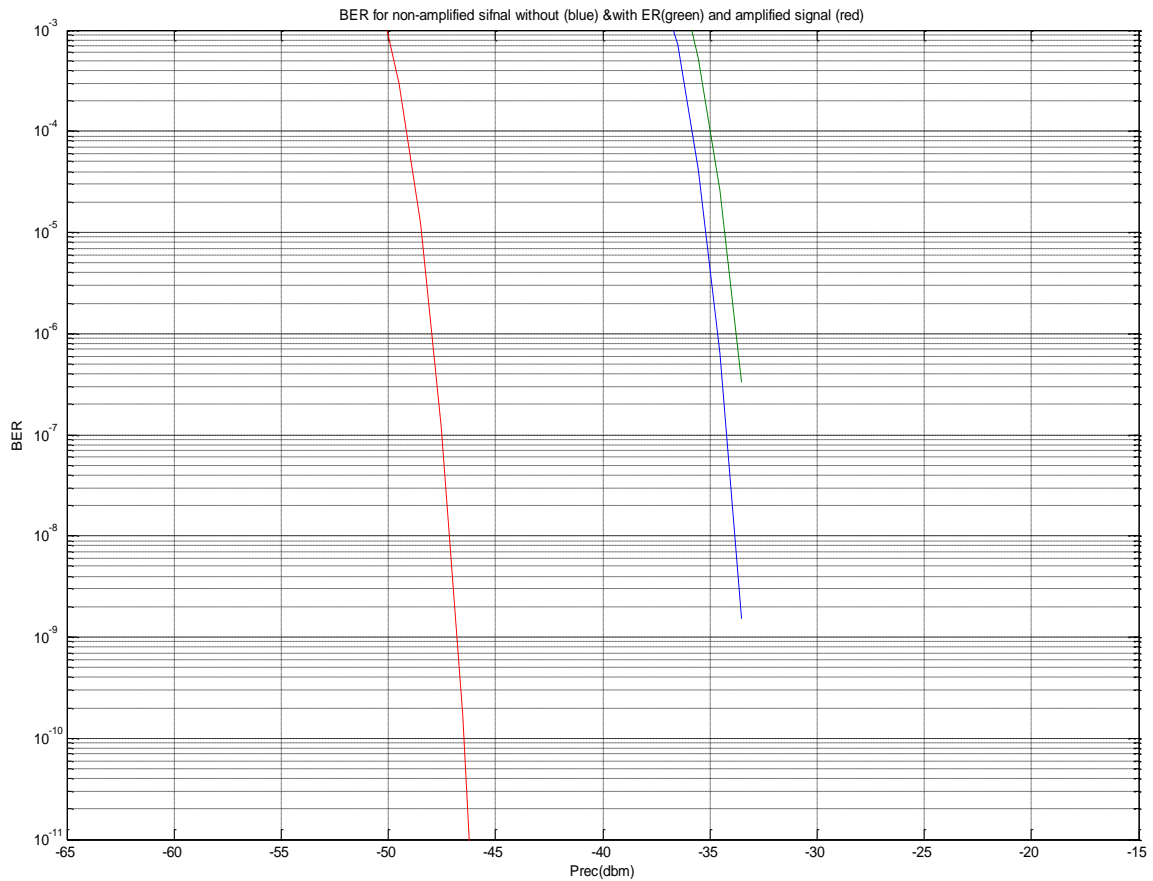
Σχήμα 6. 3bit rate 2.5Gbit/s 1024 χρήστες,

- ✓ TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON

Και εδώ στο μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON και στο ενισχυμένο θα πραγματοποιηθούν δύο ξεχωριστές, διαφορετικές μετρήσεις όπου στο πρώτο δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής και στην άλλη έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι στα 2.5 Gbit/s για συνολικά 1024 πλέον χρήστες. Σε αυτή την περίπτωση η ευαισθησία του APD δέκτη είναι στα -40,10dBm για BER  $10^{-11}$ . Πλέον η μόνη χαρακτηριστική καμπύλη που είναι ορατή είναι αυτή του ενισχυμένου TDM-PON

που παριστάνεται με κόκκινο χρώμα. Αντίθετα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB για τόσο υψηλό αριθμό χρηστών βρίσκονται σε μη επιθυμητά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των χρηστών είναι τόσο μεγάλος που αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και το BER να είναι μεγάλο.

Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί μια μέτρηση όπου έχουμε αυξήσει την απόσταση της ζεύξης μας σε  $60\text{km}+60\text{km}=120\text{km}$ .



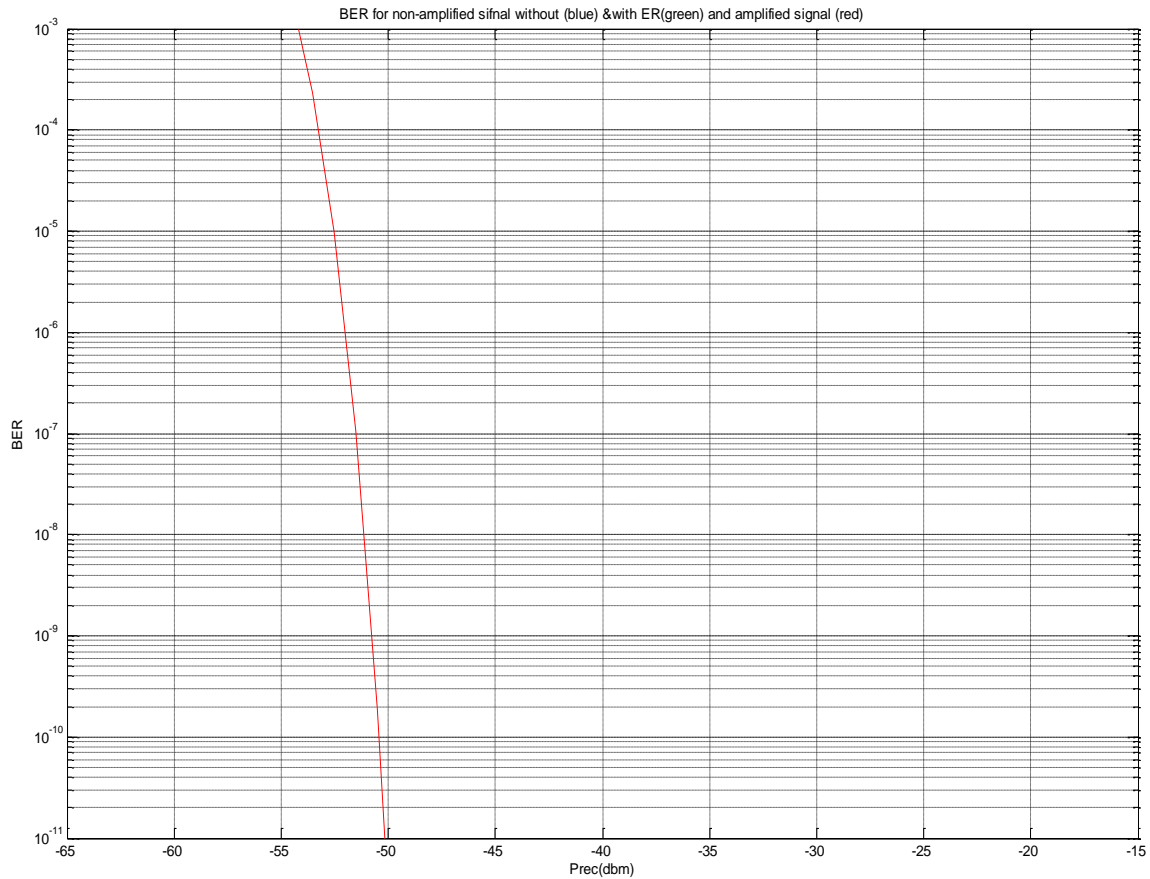
Σχήμα 6. 4 bit rate 2.5Gbit/s, 32 χρήστες, 120 km απόσταση

- ✓ TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON

Και σε αυτό το σενάριο έχουμε δύο ξεχωριστές, διαφορετικές μετρήσεις για το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON και για το ενισχυμένο, όπου στο πρώτο δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής και στην άλλη έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι στα 2.5 Gbit/s για συνολικά 32 χρήστες και για απόσταση 120 km. Σε αυτή την περίπτωση η ευαισθησία του APD δέκτη είναι στα  $-46,18\text{dBm}$  για BER  $10^{-11}$ . Η μόνη χαρακτηριστική καμπύλη που είναι σε επιτρεπτά όρια ( $10^{-9}$ ) είναι αυτή του ενισχυμένου TDM-PON που παριστάνεται με κόκκινο χρώμα. Αντίθετα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB για τόσο μεγάλη απόσταση βρίσκονται σε μη επιθυμητά επίπεδα ( $>10^{-9}$ )



Και στο επόμενο σενάριο συγκρίναμε τις επιδόσεις που παρουσιάζει καθένα από τις τρεις περιπτώσεις δικτύων μας όταν αυξήσαμε την απόσταση της ζεύξης μας σε  $95 \text{ km} + 95 \text{ km} = 190$  όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

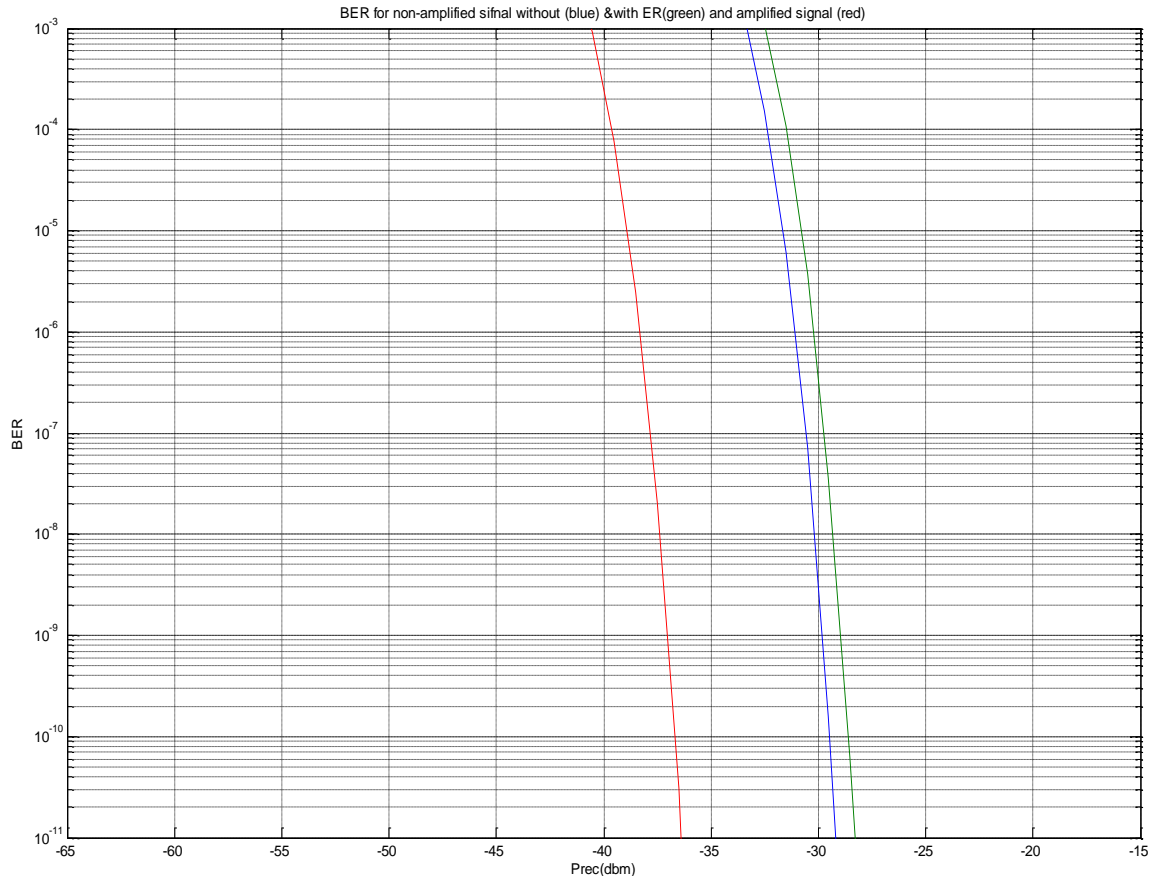


Σχήμα 6. 5bit rate 2.5Gbit/s, 32 χρήστες, 190 km απόσταση

- ✓ TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON

Έχουμε και εδώ δύο ξεχωριστές, διαφορετικές μετρήσεις για το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON και για το ενισχυμένο, όπου στο πρώτο δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής και στην άλλη έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι στα 2.5 Gbit/s για συνολικά 32 χρήστες και για απόσταση 190 km. Σε αυτή την περίπτωση η ευαισθησία του APD δέκτη είναι στα -50,10dBm για BER  $10^{-11}$ . Και εδώ η μόνη χαρακτηριστική καμπύλη που είναι ορατή είναι αυτή του ενισχυμένου TDM-PON που παριστάνεται με κόκκινο χρώμα. Αντίθετα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB για τόσο μεγάλη απόσταση βρίσκονται σε μη επιθυμητά επίπεδα.

Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο για την περίπτωση του TDM-PON δικτύου, μελετήθηκε η επίδραση της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης αφού κρατήσαμε σταθερούς τους χρήστες μας και την απόσταση μετάδοσης μας στα 50km. Έτσι λοιπόν στο σχήμα που ακολουθεί βγαίνουν τα παρακάτω συμπεράσματα.



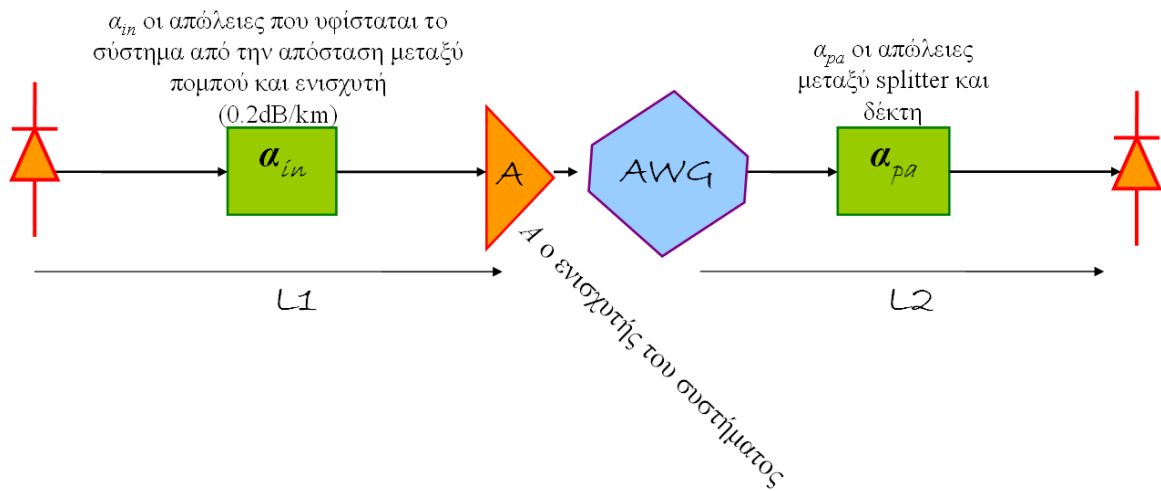
Σχήμα 6. 6 bit rate 10Gbit/s, 32 χρήστες

- ✓ TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON

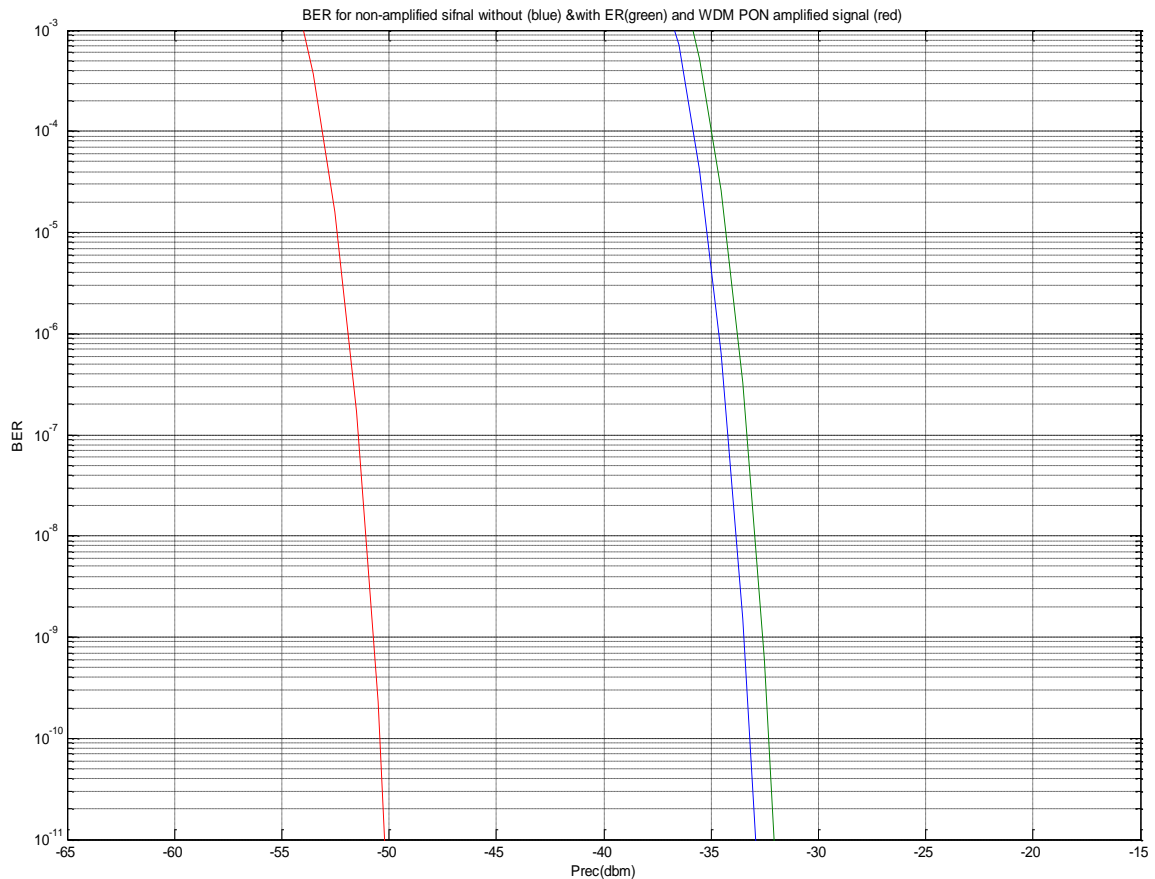
Και στην τρίτη περίπτωση για το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON και για το ενισχυμένο θα πραγματοποιηθούν δύο ξεχωριστές, διαφορετικές μετρήσεις όπου στο πρώτο δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής και στην άλλη έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων αυξήθηκε στα 10 Gbit/s για συνολικά 32 χρήστες. Το σημείο αναφοράς είναι το back-to-back (BTB) που θεωρώντας άπειρο ER η ευαισθησία του δέκτη APD είναι περίπου στα -29 dBm (μπλε καμπύλη). Η υποβάθμιση του ER στον πομπό στα 10dB έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πέναλτι, της τάξης των 0,87dB, όπως φαίνεται και η χαρακτηριστική διαφορά των δυο καμπύλων του TDM-PON BTB και TDM-PON 10dB BTB (μπλε και πράσινη καμπύλη αντίστοιχα). Η κλίση που έχουν οι δύο καμπύλες, BTB και 10dB ER BTB, είναι ίδια και αυτό γιατί η κυρίαρχη διεργασία θορύβου που είναι ο θερμικός θόρυβος, είναι ίδιος και στις δύο περιπτώσεις. Η βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη στα -36dBm (κόκκινη γραμμή) συνέβει γιατί η APD συνδυάστηκε με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης και έτσι η ίνα μας καλύπτει μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  7 dB, σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο.

Και εδώ το κέρδος των 7dB, μας δίνει την δυνατότητα είτε να αυξήσουμε τον αριθμό των χρηστών, είτε την απόσταση. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και μια πιθανή του αύξηση δρα με τον ίδιο τρόπο και στις τρεις περιπτώσεις των δικτύων μας παρέχοντας μια μείωση **βελτιστοποίηση της ευαισθησίας**.

Σαν δεύτερη περίπτωση θα εξετάσουμε ένα WDM-PON δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος από την OLT σε κάθε ONU και για τη ροή ανόδου δεδομένων και για τη ροή καθόδου δεδομένων. Βασικό στοιχείο και ουσιώδη διαφορά είναι ότι αντικαταστάθηκε ο splitter με μια AWG όπως στο σχήμα που ακολουθεί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών κατά το ελάχιστο, πλέον οι απώλειες κατά τον διαμοιρασμό των μηκών κύματος στις ONUs για 32 χρήστες είναι 6,8 dB. Αντίθετα, με την χρήση splitter οι απώλειες για 32 χρήστες είναι  $\log_2(n)*3+2=\text{splitterlosses}$ , όπου n ο αριθμός των χρηστών στο δίκτυο όπου εδώ είναι  $n=32$ .



Σχήμα 6. 7 βασικό απλοποιημένο WDM-PON με ενίσχυση

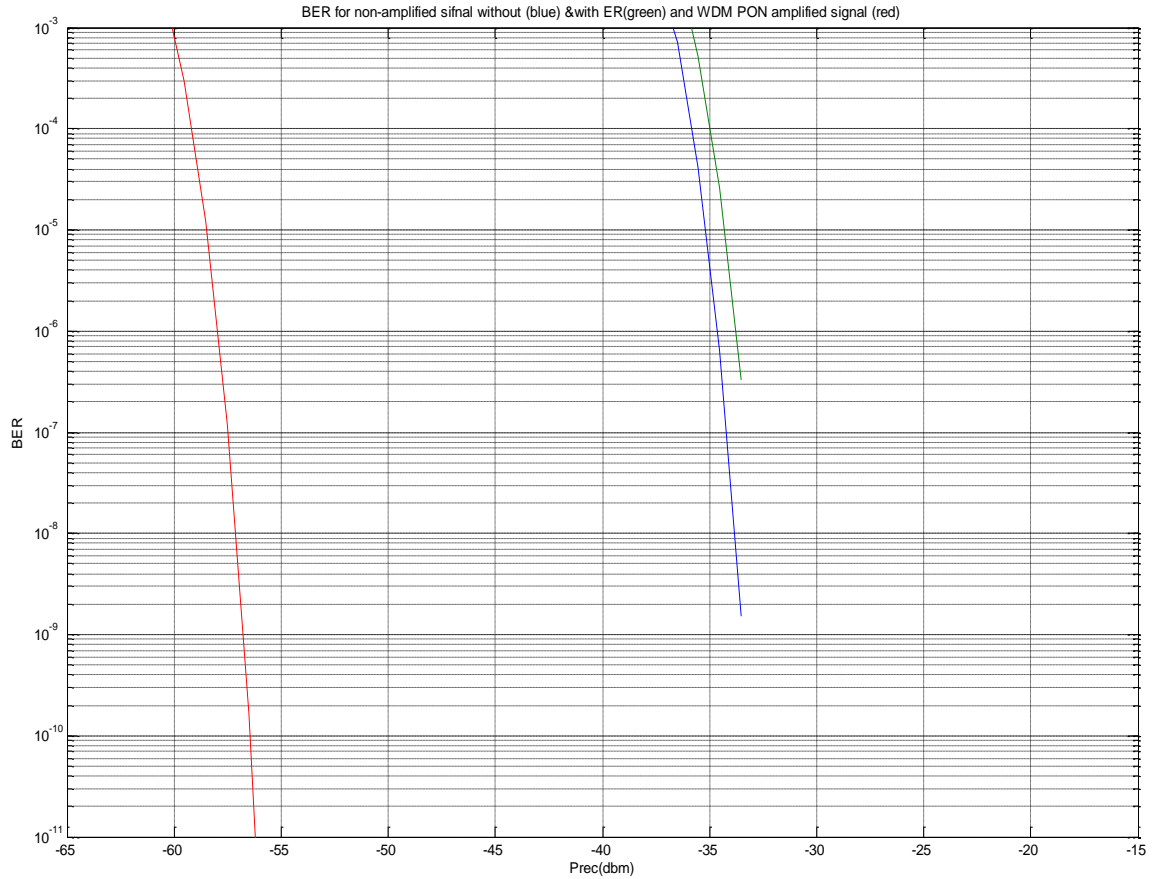


Σχήμα 6. 8bit rate 2.5Gbit/s

- 32 χρήστες
- ✓ ενισχυμένο WDM-PON
- ✓ μη ενισχυμένα TDM-PON BTB

Σε αυτό το σενάριο γίνεται σύγκριση σε ενισχυμένο δίκτυο WDM-PON και σε μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON στο οποίο έχουν πραγματοποιηθεί δύο διαφορετικές μετρήσεις, μια χωρίς να υπολογίσουμε το λόγο διαγραφής και η άλλη λαμβάνοντας υπόψη το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Και εδώ ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 2.5 Gbit/s και το σημείο αναφοράς είναι το back-to-back (BTB) μη ενισχυμένης ευαισθησίας, όπου με άπειρο ER είναι περίπου στα -33 dBm (μπλε καμπύλη). Μια υποβάθμιση του ER στον πομπό σε 10dB παράγει πέναλι της τάξης των 0,87dB με την ίδια κλίση. Επίσης από το διάγραμμα διαπιστώνουμε μια ακόμα πιο βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη στα -51,1 dBm δηλαδή ένα κέρδος των 10db αφού συνδυάσουμε την APD με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης που καλύπτει η ίνα με μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  των 7 dB σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο. Όπως καταλαβαίνουμε η χρήση της αρχιτεκτονικής WDM-PON μας επιτρέπει να έχουμε ακόμα πιο βελτιωμένα αποτελέσματα (κατά 18 dB), σε σύγκριση με το TDM-PON δίκτυο με χρήση ενισχυτή. Το εύρος των 18db μας παρέχει τη δυνατότητα να το εκμεταλλευτούμε είτε για αύξηση του αριθμού των χρηστών είτε για αύξηση της απόστασης.

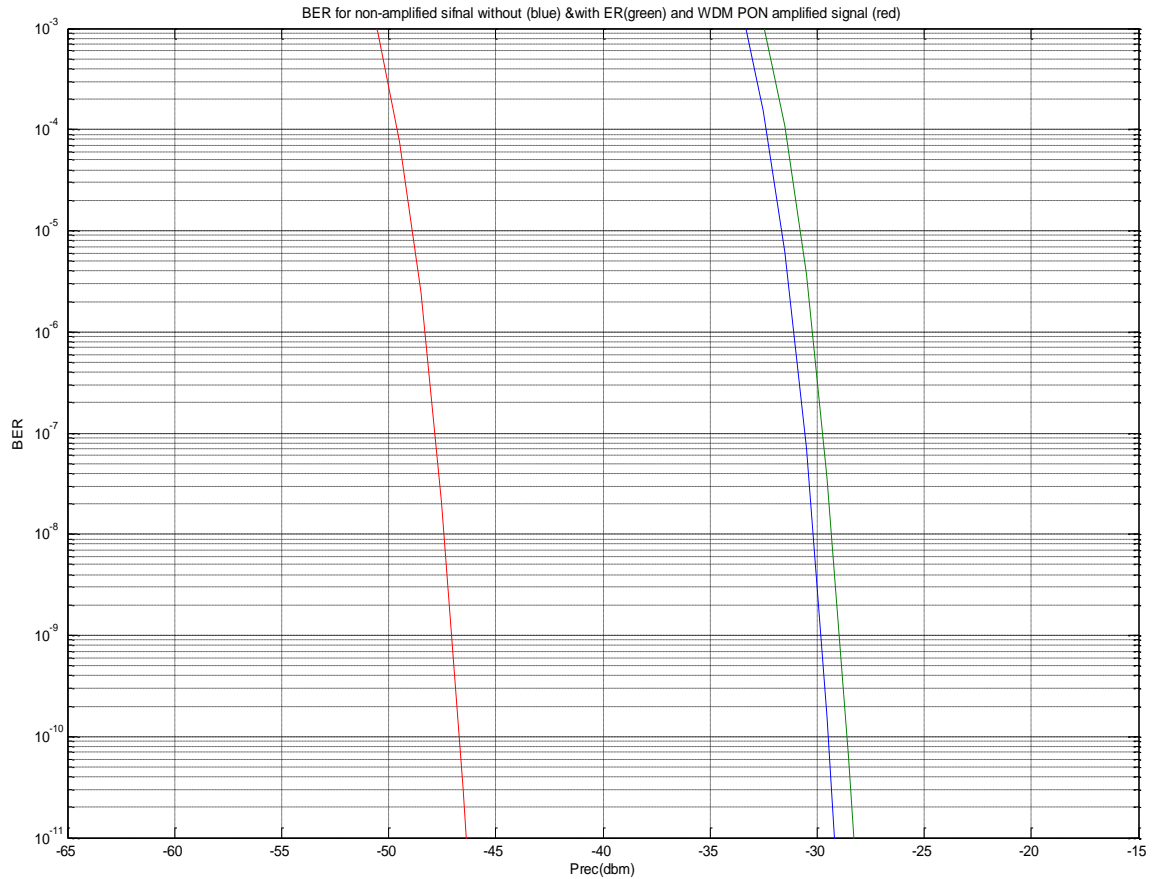
Η αύξηση της απόστασης θα είναι το επόμενο σενάριο που θα πραγματοποιήσουμε.



Σχήμα 6. 9bit rate 2.5Gbit/s, 32 χρήστες, 120 km απόσταση

- ✓ WDM-PON με χρήση AWG
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON

Και σε αυτό το σενάριο έχουμε δύο ξεχωριστές, διαφορετικές μετρήσεις για το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON και για το ενισχυμένο, όπου στο πρώτο δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής και στην άλλη έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι στα 2.5 Gbit/s για συνολικά 32 χρήστες και για απόσταση 120 km. Σε αυτή την περίπτωση η ευαισθησία του APD δέκτη είναι στα -56,2dBm για BER  $10^{-11}$ . Η μόνη χαρακτηριστική καμπύλη που είναι σε επιτρεπτά όρια ( $10^{-9}$ ) είναι αυτή του ενισχυμένου WDM-PON που παριστάνεται με κόκκινο χρώμα. Αντίθετα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB για τόσο μεγάλη απόσταση βρίσκονται σε μη επιθυμητά επίπεδα ( $>10^{-9}$ )

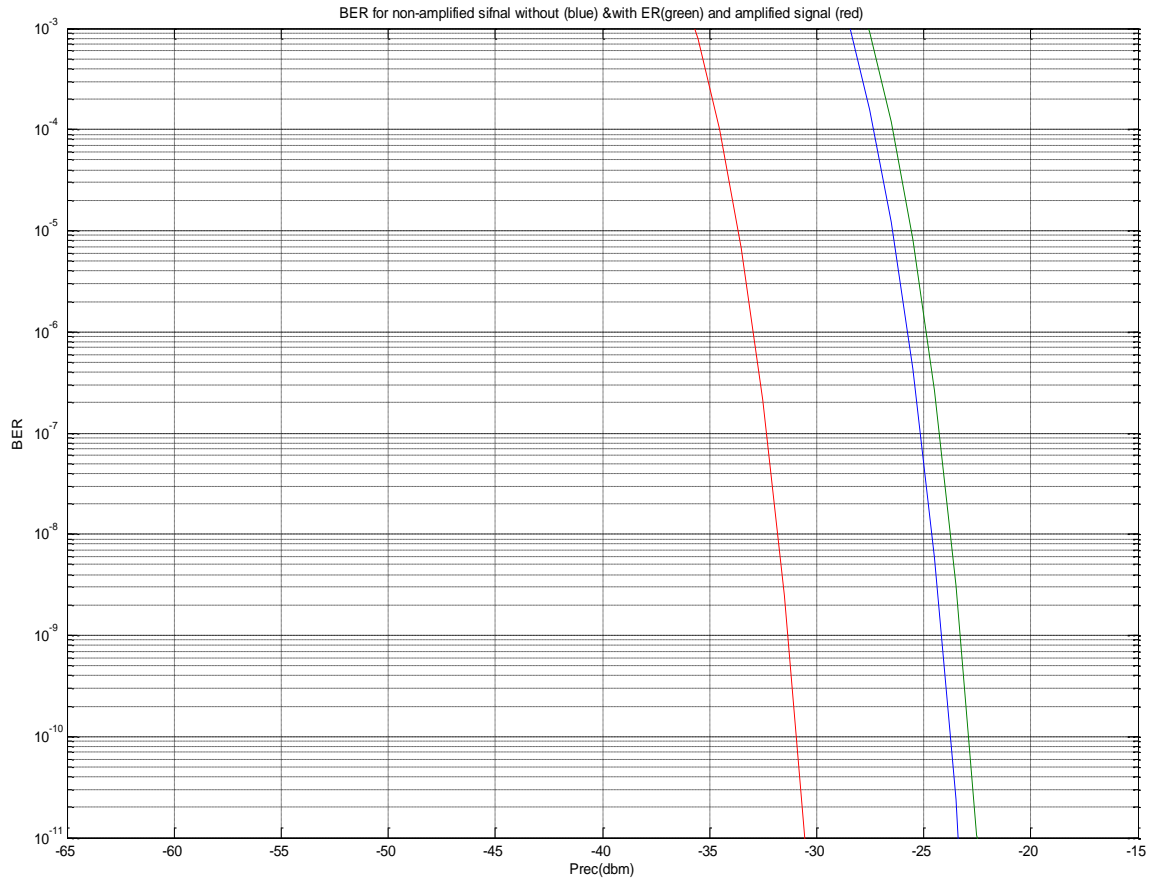


Σχήμα 6. 10bit rate 10Gbit/s

- ✓ ενισχυμένο WDM-PON με χρήση AWG
- ✓ και μη ενισχυμένα TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB.

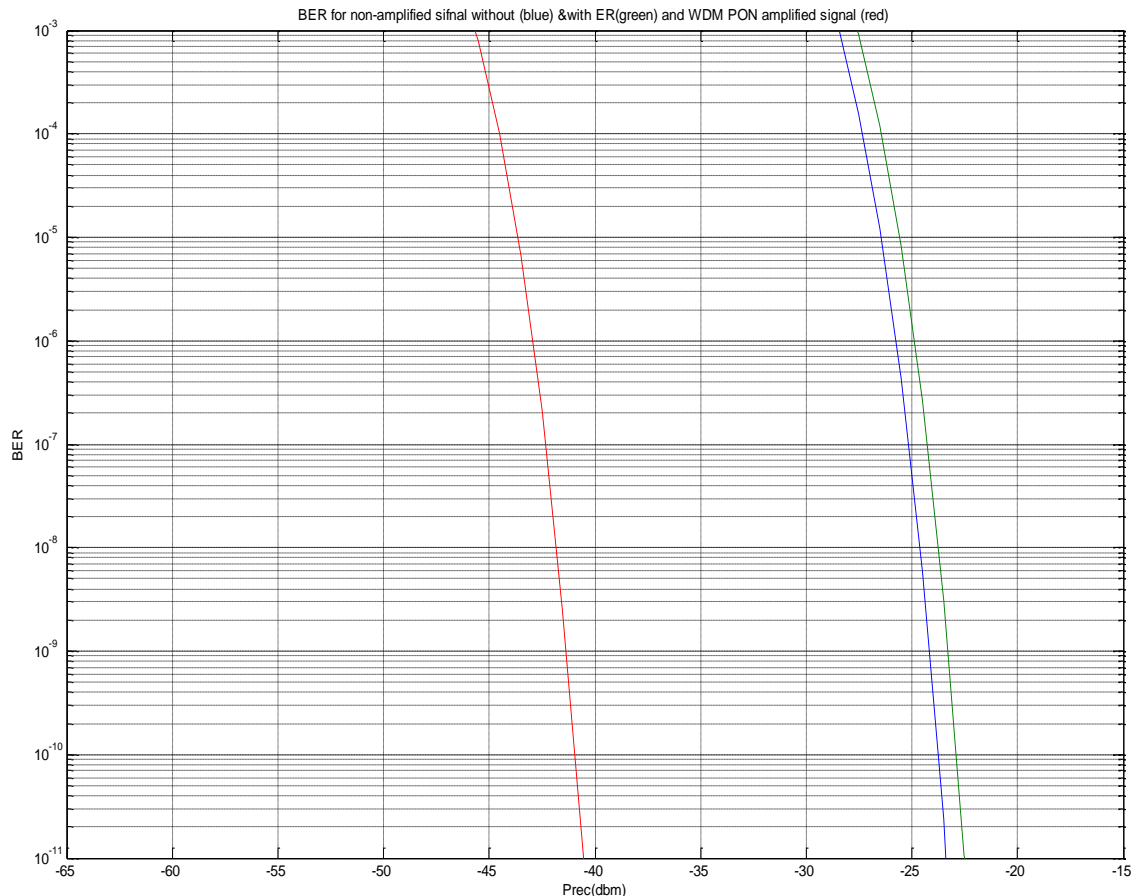
Η παραπάνω γραφική παραστάση αφορά WDM-PON με χρήση AWG καθώς και μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON, όπου έχουμε πραγματοποιήσει δυο διαφορετικές μετρήσεις λαμβάνοντας και μη, το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON. Εδώ έχουμε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Gbit/s.

Από τις χαρακτηριστικές προκύπτει μια βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη κατά 17,5dB για το WDM-PON, όπως και στην περίπτωση του TDM-PON BTB- TDM-PON 10dB BTB και ενισχυμένου TDM-PON όπου είχαμε κέρδος 7db. Και αυτό συμβαίνει όταν η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στη μέση της απόστασης, και έχουμε μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  των 7 dB, σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο. Το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι όσο ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων αυξάνεται το κέρδος που διαθέτουμε είτε για αύξηση της απόστασης είτε για αύξηση του αριθμού των χρηστών μειώνεται.



Σχήμα 6. 11bit rate 60Gbit/s

- ✓ TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB
- ✓ ενισχυμένο TDM-PON



Σχήμα 6. 12bit rate 60Gbit/s

- ✓ ενισχυμένο WDM-PON με χρήση AWG
- ✓ και μη ενισχυμένα TDM-PON BTB
- ✓ TDM-PON 10dB BTB.

Ακόμα και να αυξήσουμε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 60Gbit/s, θα λάβουμε τα ίδια αποτελέσματα με το εξής συμπέρασμα :

**Η βελτιστοποίηση της ευαισθησίας μειώνεται, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται.**

Έτσι, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης προκαλεί υποβάθμιση του SNR άρα και η τιμή της ευαισθησίας του δέκτη για συγκεκριμένο BER υποβαθμίζεται.

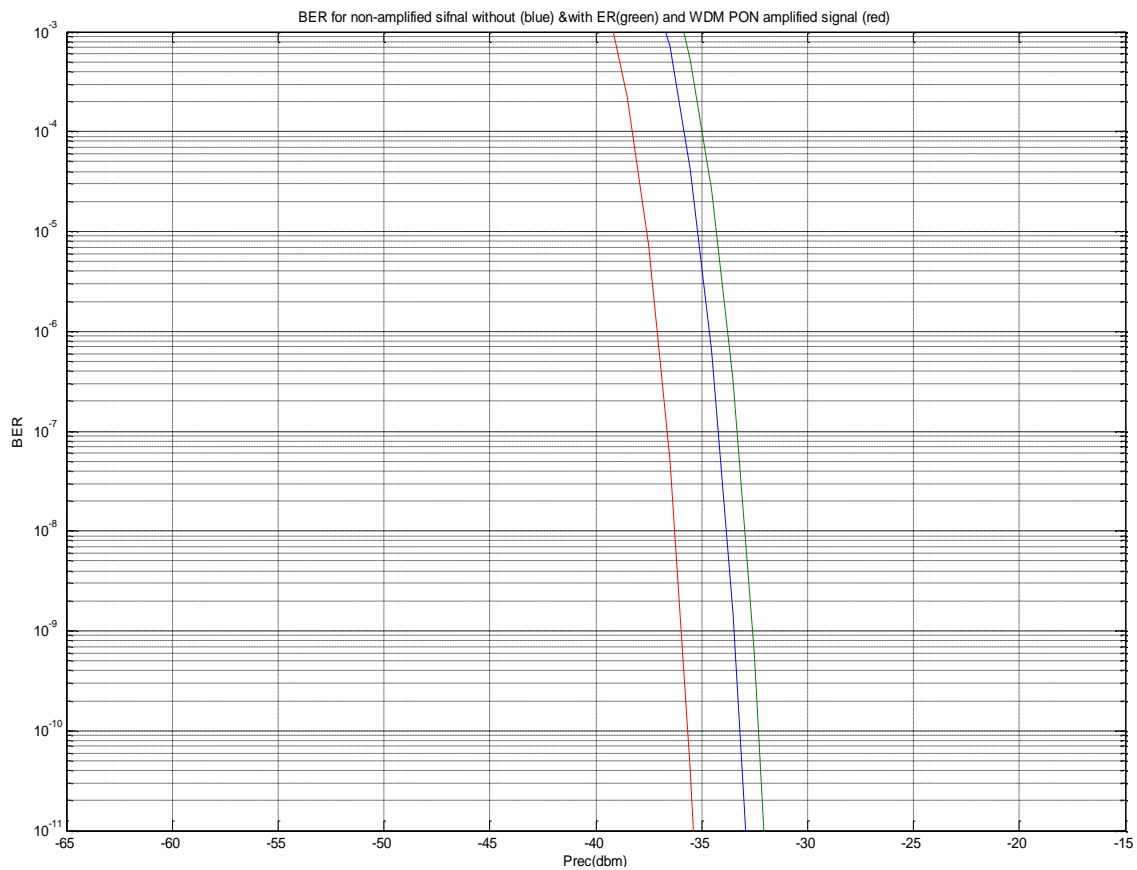
Η χρήση του ενισχυτή αυξάνει το bit rate, χωρίς να μειώνει το BER στον δέκτη. Και εδώ το BER του δέκτη για μη ενισχυμένο δίκτυο δεν φαίνεται στα δύο τελευταία σχήματα

Τέλος, να αναφερθεί ότι η χρήση του εύρους ζώνης του οπτικού φίλτρου παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση καθώς και στη μελέτη ενός δικτύου, με ενισχυτή. Συγκεκριμένα, ένα στενό οπτικό φίλτρο έχει μικρότερη υποβάθμιση ευαισθησίας του δέκτη και αυτό γιατί εισάγει λιγότερο θόρυβο από το οπτικό φίλτρο, που έχει ευρύτερο εύρος ζώνης.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση έχουμε εξετάσει ένα ακόμα σενάριο για να δούμε ακριβώς την λειτουργία ενός WDM PON δικτύου. Σε αντίθεση λοιπόν με ένα TDM PON που χρησιμοποιεί έναν παθητικό διαμοιραστή (splitter) , ο οποίος για



ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 2,5 Gbit/sec μοιράζει την ισχύ για 32 χρήστες συνολικά- το WDM PON για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης, μοιράζει ισχύ για κάθε ένα από τους 32 χρήστες με 2,5 Gbit/sec. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση η ισχύς που φτάνει στον ενισχυτή είναι πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των χρηστών. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι 2.5 Gbit/s για 32 χρήστες και το σημείο αναφοράς είναι το back-to-back (BTB) μη ενισχυμένης ευαισθησίας, όπου με άπειρο ER είναι περίπου στα -33 dBm (μπλε καμπύλη). Μια υποβάθμιση του ER στον πομπό σε 10dB παράγει πέναλτι της τάξης των 0,87dB με την ίδια κλίση. Επίσης από το διάγραμμα διαπιστώνουμε μια ακόμα πιο βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη στα -35,3 dBm δηλαδή ένα κέρδος των 2,3db αφού συνδυάσουμε την APD με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης που καλύπτει η ίνα με μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  των 7 dB σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο.



bit rate 2.5Gbit/s

32 χρήστες

- ✓ ενισχυμένο WDM-PON
- ✓ μη ενισχυμένα TDM-PON BTB

**T**α παθητικά οπτικά δίκτυα οπτικών ινών (PONs) προτιμώνται ως μέσο παράδοσης για την πρόσβαση σε επιλύσεις δικτύου. Το οικονομικό οφέλος που προκύπτει από τη μείωση του αριθμού των διασυνδέσεων μεταξύ των κόμβων έχει επιτρέψει την αυξανόμενη ανάπτυξη ενός δικτύου PON, παρέχοντας τη χρήση της αρχιτεκτονικής ίνα στο σπίτι (fiber to the home) και ίνα στο πεζοδρόμιο (fiber to the curb). Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, η ανάγκη για υψηλή διάσπαση αναλογιών (split ratios) ή ακόμα και για εκτεταμένη-απόσταση απαιτεί ενίσχυση για την αντιμετώπιση πρόσθετων απωλειών. Οι ενισχυτές ίνας Εμβρίου (Erbium-doped

amplifiers) έχουν περιορισμένη χρήση στα δίκτυα PONs από τότε που τα λειτουργικά μήκη κύματος συνήθως περιλαμβάνουν σύνδεση των 1,3  $\mu\text{m}$ .

Από την άλλη, οι ενισχυτές ημιαγωγών οπτικών σημάτων (SOAs) προσφέρουν μια λύση χαμηλού κόστους και μεγάλου όφελος με μια πορεία μετάβασης προς την ολοκλήρωση της αναπτυξιακής επιλογής και περιλαμβάνουν την χρήση του ως προενισχυτές, ενισχυτές, ή midspan ενισχυτές.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί μια θεωρητική οπτική που αναλύει το ενισχυμένο σύστημα επιχειρησιακών απαιτήσεων και δικαιολογεί αυτή την ανάλυση μέσω της διεξαγωγής του πειράματος με την βοήθεια προσομοίωσης. Η ανάλυση εισάγει στις γνώσεις μας το dc offset που εισάγεται στο δέκτη ως αποτέλεσμα των σημαντικών ενισχυμένων αυθόρμητων ισχυρών εκπομπών σε ενισχυμένο PONs, όπου τα πλάτη του φίλτρου είναι συνήθως 20 nm ή μεγαλύτερα.

## Συμπεράσματα

**Η** τεχνολογία TDM-PON Time Division Multiplexing – Passive Optical Network είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μας παρέχει μεγάλη χωρητικότητα αλλά παράλληλα να έχει και σχετικά μικρό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου. Τα δίκτυα TDM-PON χρησιμοποιούν δύο μήκη κύματος, ένα για την κάθε ροή που χρειαζόμαστε και συγκεκριμένα, ένα μήκος κύματος για τη ροή καθόδου δεδομένων και ένα μήκος κύματος για τη ροή ανόδου δεδομένων. Η χρήση του παθητικού διαμοιραστή του δικτύου έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό του αριθμού των ONUs. Αυτό έρχεται σαν συνέπεια της εξασθένησης από τον splitter και από το ρυθμό μετάδοσης των πομποδεκτών. Έτσι ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει 32 ONUs σε μια μικρή απόσταση από την OLT και ακόμα μικρότερη για 64 ONUs.

Λύση στο πρόβλημα της επεκτασιμότητας ήρθε να δώσει η τεχνολογία WDM-PON αφού έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει πολλαπλά μήκη κύματος στην ίδια υποδομή οπτικών ινών. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι δεν έχουμε απώλειες ισχύος γιατί ο διαμοιραστής έχει αντικαταστεί από ένα AWG. Η τεχνολογία WDM-PON χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος από την OLT σε κάθε ONU, το ίδιο για τη ροή ανόδου και καθόδου δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο κάθε ONU μπορεί να λειτουργήσει με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης του μήκους κύματος ενός καναλιού.

Από την άλλη η χρήση του ενισχυτή μας παρέχει ένα ακόμα πιο βελτιωμένο δίκτυο που σε σύγκριση με το αρχικό μη ενισχυμένο δίκτυο, μας παρέχει καλύτερα αποτελέσματα, ασχέτως του μειονεκτήματος της εισαγωγής θορύβου.

Η χρήση ενισχυτή σε ένα δίκτυο TDM-PON εξασφαλίζει μια βελτίωση στην ευαισθησία δέκτη περίπου 7,5 dB, όταν η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης (μέγιστη απόσταση 50 Km). Αυτό το κέρδος προσφέρεται είτε για αύξηση του αριθμού των χρηστών, είτε για αύξηση της απόστασης, που πλέον μπορεί να μεταφερθούν δεδομένα μέσα στην οπτική ίνα. Από την άλλη ο μέγιστος αριθμός χρηστών για bit rate 2.5 και μήκος συνολικά 50Km με ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης είναι 1024 χρήστες. Ένα ακόμα συμπέρασμα είναι ότι με την χρήση του ενισχυτή αυξάνουμε το bit rate, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα του σήματος στον δέκτη για ρυθμούς μετάδοσης 10Gb/s και 60Gb/s.

Με την χρήση της αρχιτεκτονικής WDM-PON φαίνεται ότι έχουμε ακόμα πιο βελτιωμένα αποτελέσματα κατά 18 dBm, σε σύγκριση με το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON όπως και για ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON. Και εδώ το κέρδος των

18dBm προσφέρεται είτε για αύξηση του αριθμού των χρηστών, είτε για αύξηση της απόστασης, που πλέον μπορεί να μεταφερθούν δεδομένα μέσα στην οπτική ίνα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι και εδώ με την χρήση του ενισχυτή αυξάνουμε το bit rate, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα του σήματος στον δέκτη για ρυθμούς μετάδοσης 10Gb/s και 60Gb/s.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε λαμβάνει μόνο την επιρροή των απωλειών και της ενίσχυσης και για να είναι ακριβή τα συμπεράσματα θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα ακριβές μοντέλο για τη μετάδοση στην ίνα (μη γραμμικότητες και διασπορά) καθώς και ένα ακριβές μοντέλο για τον ενισχυτή.

Η χρήση του ενισχυτή ,παρόλο που επιτρέπει την εισαγωγή θορύβου, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που καθιστούν την εφαρμογή του σημαντική, ώστε να βελτιστοποιήσουν είτε την απόδοση στις εφαρμογές που απαιτούνται, είτε να διαμορφώσουν μια καινούργια δομή δικτύων, που θα ξεφεύγει από την κλασική δομή του PON δικτύου και σε συνδυασμό με τις ήδη προαναφερόμενες αρχιτεκτονικές να μειώσουν δραματικά και ουσιαστικά το κόστος υλοποίησης και εφαρμογής του, ώστε πλέον να γίνουν ένα σοβαρός και υπολογίσιμος και συνάμα αδιαφιλονίκητος παίκτης στην ανάπτυξη δικτύων, που απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων, σε συνδυασμό με την ταχύτερη μετάδοσή τους.



---

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Οπτικά Δίκτυα Τεχνολογίας WDM-Τοπικά και Μητροπολιτικά Δίκτυα, G.I Papadimitriou , P.A. Tsimoulas, M.S. Obaidat, A.S Pomportsis, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
2. Χ. Γιανακόπουλος, Π. Κανελλόπουλος, Χ. Ντόκος - Πολυπλεξία Μήκους Κύματος (Εργασία για το μεταπτυχιακό μάθημα *Αλγοριθμικά Θέματα Δικτύων & Τηλεματικής*, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών)
3. Intracom S.A. - Τηλεπικοινωνίες με Οπτικές Ίνες
4. Α. Αλεξόπουλος, Γ. Λαγογιάννης - Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα Υπολογιστών
5. Extreme Networks - Single Mode vs. Multi-Mode Optical Fibers(<http://www.extremenetworks.com/libraries/abstracts/optics.asp> )
6. Marconi Academy - Introduction to Dense Wavelength Division Multiplexing
7. Ιάκωβος Βενιέρης : Δίκτυα ευρείας ζώνης 2003
8. Ενσύρματα Δίκτυα Πρόσβασης Ευρείας Ζώνης Σημειώσεις για το μάθημα: Δίκτυα Πρόσβασης Ευρείας Ζώνης (K\_E02) Θεοφάνης Γ. Ορφανουδάκης
9. ITU Rec. G.983.1, Study Group 15, “Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON),” Oct. 1998.
10. ITU-T Rec. G.983.4, “A Broadband Optical Access System with Increased Service Capability Using Dynamic Bandwidth Assignment,” Geneva, Switzerland, Oct. 15–26, 2001.
11. G. Kramer, G. Pesavento, “Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next- Generation Optical Access Network”, IEEE Communications Magazine , February 2002
12. ITU Rec. G.984.3, Study Group 15, “Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission Convergence Layer Specification,” Geneva, Switzerland, Oct. 21–31, 2003.
13. ITU-T Rec. G.7041, “Generic Framing Procedure,” Dec. 2001.
14. J. Angelopoulos, et Al., “Efficient Transport of Packets with QoS in an FSAN-Aligned GPON”, IEEE Communications Magazine, February 2004,

15. Καραγιαννάκης Γεώργιος - IP over SONET/SDH over WDM vs. IP over WDM (Εργασία για το μεταπτυχιακό μάθημα *Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων*, Τμήμα Μεταπτυχιακών σπουδών στα Πληροφοριακά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας)
16. Χ. Βασιλόπουλος, Γ. Παγιατάκης - Συστήματα Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος (WDM)
17. Cisco Systems Inc. - Introduction to DWDM for Metropolitan Networks
18. Alcatel - Optical Networks (White Paper)
19. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited] (Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke and Huan Song, Sunhee Yang, Glen Kramer, Kwangjoon Kim, Biswanath Mukherjee)
20. M. Zirngibl, C. H. Joyner, L. W. Stulz, C. Dragone, H. M. Presby, and I. P. Kaminow, "LARNET, a local access router network," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 7, 215–217 (1995).
21. J. D. Angelopoulos, E. K. Fragoulopoulos, and I. S. Venieris, "Comparison of traffic control issues between regular PONs and super-PONs," in 9th Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE, 1998), Vol. 2, pp. 769–773.
22. J. Kani, M. Teshima, K. Akimoto, N. Takachio, S. Suzuki, K. Iwatsuki, and M. Ishii, "A WDM based optical access network for wide-area gigabit access services," *IEEE Opt. Commun. Mag.* 41, S43–S48 (2003).
23. G. Mayer, M. Martinelli, A. Pattavina, and E. Salvadori, "Design and cost performance of the multistage WDM PON access networks," *J. Lightwave Technol.* 18, 121–142 (2000).
24. N. J. Frigo, P. D. Magill, T. E. Darcie, P. P. Iannone, M. M. Downs, B. N. Desai, U. Koren, T. L. Koch, C. Dragone, and H. M. Presby, "RITENet: a passive optical network architecture based on the remote interrogation of terminal equipment," <http://ieeexplore.ieee.org> (1994).
25. J. D. Angelopoulos, N. I. Lepidas, E. K. Fragoulopoulos, and I. S. Venieris, "TDMA multiplexing of ATM cells in a residential access SuperPON," *IEEE J. Select. Areas Commun.* 16, 1123–1133 (1998).
26. G. Talli and P. D. Townsend, "Feasibility demonstration of 100 km reach DWDM superPON with upstream bit rates of 2.5 Gb/s and 10 Gb/s," presented at the Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California, 6-11 March 2005.

27. F. An, K. S. Kim, D. Gutierrez, S. Yam, E. Hu, K. Shrikhande, and L. G. Kazovski, "SUCCESS: a next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture," *J. Lightwave Technol.* 22, 2557–2569 (2004).
28. Ινδοοπτικές Επικοινωνίες – Τεχνολογία – Εφαρμογές, Γεράσιμος Παγιατάκης
29. J.R. Stern, "Optical wideband subscriber loops and local area networks in the UK," in *Proceedings of ICC, Amsterdam*, May 14–17, 1984.
30. R.P. Davey and D. B. Payne., "The future of optical transmission in access and metro networks—an operator's view," in *31st European Conference on Optical Communication (IEEE, 2005)*, pp. 53–56.
31. L. Spiekman, D. Piehler, P. Iannone, K. Reichmann, and H. Lee, "Semiconductor optical amplifiers for FTTx," in *9th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE, 2007)*, pp. 48–50.
32. R. P. Davey, P. Healey, I. Hope, P. Watkinson, D. B. Payne, O. Marmur, J. Ruhmann, and Y. Zuiderveld, "DWDM reach extension of a GPON to 135 km," *J. Lightwave Technol.* 24, 29–31 (2006).
33. N. Suzkuki and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 ONU splits and 58 km reach," in *31st European Conference on Optical Communication (IEEE, 2005)*, pp. 141–142.
34. P. Townsend, P. Healey, C. Ford, L. Johnston, P. Townley, I. Lealman, L. Rivers, S. Perrin, and R. Moore, "Reflective SOAs for spectrally sliced WDM-PONs," in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, A. Sawchuk, ed., Vol. 70 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 2002)*, pp. 352–353.
35. G. S. Kinsey, J. C. Campbell, and A. G. Dentai, "Waveguide avalanche photodiode operating at 1.55  $\mu\text{m}$  with a gain-bandwidth product of 320 GHz," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 13, 842–845 (2001).
36. Optically amplified passive optical networks: a power budget analysis C. Michie, A. E. Kelly, J. McGeough, S. Karagiannopoulos and I. Andonovic
37. Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες (Govind P. Agrawal)
38. PTB3J88–5638 data sheet, <http://www.neophotonics.com/index/index.php>