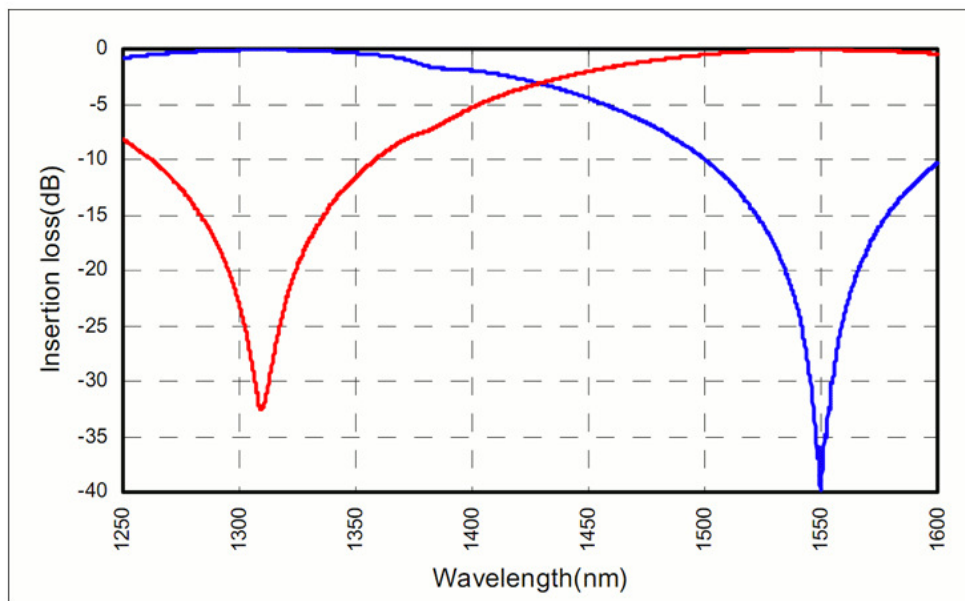


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (WAVELENGTH
DIVISION MULTIPLEXING: WDM) ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Έρευνα

Πάυλος Σταυρόπουλος

Επίβλεψη

Ηλίας Ασαρίδης

Σεπτέμβριος 2013

Περίληψη

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η παρουσίαση της τεχνικής πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος σε δίκτυο οπτικών ινών. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση των αρχών λειτουργίας των οπτικών δικτύων και ειδικότερα μέσω οπτικών ινών σε περιβάλλον πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών ινών. Η πολυπλεξία WDM αντιστοιχεί στην κλασσική πολυπλεξία συχνότητας, όμως αντί για μια συγκεκριμένη συχνότητα ανατίθεται ένα μήκος κύματος σε κάθε οπτικό κανάλι.

Η εργασία αναπτύσσεται σε τρία κεφάλαια, τα οποία σε μια λογική και συνεχή ροή παρουσιάζουν το ζήτημα μελέτης. Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται αναλυτικότερα ο προτεινόμενος κορμός ανάπτυξης της εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά : πολυπλέκτης, αποπολυπλέκτης, οπτικό συζευκτή αστέρα, παθητικό συζευκτή αστέρα, οπτικοί δέκτες, εξέλιξη WDM δικτύωσης, WDM σημείο προς σημείο, add/drop πολυπλέκτη, αρχιτεκτονική WDM δικτύων, δίκτυο εκπομπής-επιλογής, WDM DWDM

Abstract

The subject of this thesis has been the presentation of the technical division multiplexing wavelength optical fiber network. This study aims to analyze the operating principles of optical networks and especially through optical fibers in environment division multiplexing wavelength. In this case achieved exploiting the available bandwidth of the optical fiber. The WDM multiplexing corresponds to conventional frequency multiplexing, but instead a specific frequency assigned to a wavelength of each optical channel.

The work developed in three chapters, which in a sense and streamed present study the issue. In the following pages detail the proposed development branch of labor.

Keywords: multiplexer, demultiplexer, optocoupler star, passive CONJUGATE star, optical receivers, evolution WDM networking, WDM point-to-point, add / drop multiplexers, WDM network architecture, network-broadcast option, WDM DWDM

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ασαρίδη Ηλία για την αγόγγυστη καθοδήγηση, την πολύτιμη συμβουλή και καταλυτική συμβολή του στην ολοκλήρωση της πτυχιακής αυτής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την ανάθεση ενός τόσο ελκυστικού θέματος που άπτεται του πεδίου ενδιαφερόντων μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
i. Αντικείμενο Μελέτης.....	13
ii. Στόχος	13
iii. Μεθοδολογία	14
iv. Ιστορική Εξέλιξη.....	14
1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	17
Εισαγωγή	17
1.1 Μονότροπες Οπτικές Ίνες.....	17
1.2 Πολύτροπες Οπτικές Ίνες.....	18
1.3 Προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής	19
1.4 Κυματική Διάδοση με Οπτικές Ίνες.....	21
1.5 Παράμετροι Εφαρμογής Τεχνολογίας Οπτικών Ινών	23
1.6 Διασπορά.....	26
1.6.1 Διατροπική Διασπορά(Intermodal Dispersion)	27
1.6.2 Ενδοτροπική (Χρωματική) Διασπορά (Intramodal Dispersion).....	28
1.6.3 Διασπορά Πόλωσης του Ρυθμού Μετάδοσης (PMD)	29
1.7 Εξασθένιση.....	30
1.8 Μη Γραμμικά Φαινόμενα	31

1.8.1	Διεγερόμενη Σκέδαση Brillouin, SBC.....	31
1.8.2	Διεγερόμενη Σκέδαση Raman, SRS	32
1.8.3	Self phase modulation, SPM (αυτό-διαμόρφωση φάσης)	32
1.8.4	Cross phase modulation, XPM (ετερο-διαμόρφωση φάσης).....	33
1.8.5	Μείξη Τεσσάρων Κυμάτων	33
1.9	Οπτικοί Πομποί	34
1.10	Οπτικοί Δέκτες	35
2.	ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	37
	Εισαγωγή	37
2.1	Δομή Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων	37
2.2	Οπτική Τεχνολογία.....	39
2.3	Οπτικές Ίνες ως Μέσο Δικτύωσης.....	39
2.3.1	Πλεονεκτήματα Χρήσης Τεχνολογίας Οπτικών Ινών	40
2.3.2	Μειονεκτήματα Χρήσης Τεχνολογίας Οπτικών Ινών	41
2.4	Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος.....	41
2.5	Δίκτυα Μεταγωγής.....	42
2.5.1	Μεταγωγή Κυκλώματος	43
2.5.2	Μεταγωγή Πακέτου	45
2.5.3	Μεταγωγή Μηνύματος	46
2.5.4	Σύγκριση Δικτύων Μεταγωγής.....	46
2.6	Δίκτυα Πρόσβασης Φωνής και Δεδομένων	47

2.7	Οπτική Μεταγωγή Πακέτου.....	49
2.8	Διαχείριση Οπτικού Δικτύου	49
3.	ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	53
	Εισαγωγή	53
3.1	Εξελεγκτική Πορεία.....	54
3.2	Φιλοσοφία Πολυπλεξίας Μήκος Κύματος.....	56
3.3	Δομικά Στοιχεία	57
3.3.1	Οπτικοί Τερματισμοί – OLTs	57
3.3.2	Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθήκης – Απομάστευσης – OADMs.....	58
3.3.3	Οπτικές Διασυνδέσεις – OXCs.....	61
3.3.4	Οπτικοί Ενισχυτές.....	62
3.3.5	Μετατροπείς Μήκους Κύματος	64
3.4	Πλεονεκτήματα	64
3.5	Εφαρμογές WDM.....	65
3.6	Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (DWDM).....	66
3.7	Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (CWDM).....	71
3.8	WDM και ATM.....	73
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

Στα πλαίσια απόκτησης του τίτλου σπουδών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος οι σπουδαστές του ιδρύματος καλούνται να συντάξουν μια πτυχιακή μελέτη. Μέσα από αυτό το πόνημα μας δίνεται η δυνατότητα να εμβυθύνουμε τις γνώσεις μας σχετικά με εξειδικευμένα ζητήματα τις επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού. Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται το ζήτημα τεχνικής Πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος σε δίκτυο οπτικών ινών Η μελέτη διήρκησε εννέα μήνες.

i. Αντικείμενο Μελέτης

Η τεχνική της πολυπλεξίας μέσω διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing) αποτελεί την κυρίαρχη τεχνολογία της σύγχρονης οπτικής δικτύωσης. Ως αποτέλεσμα εφαρμογής της τεχνικής είναι η δυνατότητα μετάδοσης πολλών διαφορετικών και ανεξάρτητων οπτικών καναλιών μέσω μιας οπτικής ίνας. Ως εκ τούτου η εις βάθος μελέτη της έχει ιδιαίτερη σημασία. Την εν λόγω τεχνική στοχεύει να καλύψει η παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύοντας τις λειτουργίες πολυπλεξίας (MUX), μετάδοσης σήματος, από-πολυπλεξίας (DEMUX), ενίσχυσης σήματος και ελέγχου της διασποράς στα εν λόγω συστήματα.

ii. Στόχος

Η όλη προσπάθεια φιλοδοξεί να καταλήξει στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης μελέτης που θα αποτελέσει ένα αξιόλογο σημείο τεχνικής αναφοράς στη μηχανική οπτικών συστημάτων.

iii. Μεθοδολογία

Η εργασία αναπτύσσεται σε τρία κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας εστιάζει στα τεχνικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας. Συγκεκριμένα αναλύονται τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, τα δομικά της μέρη (πομποί, δέκτες, κλπ) καθώς και οι παράμετροι εφαρμογής τους.

Στην δεύτερη ενότητα, θέτει ως στόχο την ανάλυση βασικών εννοιών και την αποσαφήνιση των ορισμών και των παραμέτρων που πλαισιώνουν την τεχνολογία των οπτικών δικτύων.

Αντικείμενο μελέτης του τρίτου κεφαλαίου θα αποτελέσει η παρουσίαση της τεχνολογίας πολυπλεξίας μήκους κύματος. Με την πολυπλεξία μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) γίνεται πλήρης αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών ινών.

iv. Ιστορική Εξέλιξη

Η ιδέα της χρησιμοποίησης των ινών γυαλιού για τη μεταφορά ενός οπτικού σήματος επικοινωνιών προήλθε από τον Alexander Graham Bell. Ωστόσο, αυτή η ιδέα έπρεπε υλοποιήθηκε 80 χρόνια αργότερα, μέχρι να κατασκευαστεί γυαλί καλύτερης ποιότητας και ηλεκτρονικά εξαρτήματα χαμηλότερου κόστους, έτσι ώστε να καταστεί χρήσιμη σε πρακτικές εφαρμογές.

Η ανάπτυξη των οπτικών ινών και των συσκευών κατάλληλων για οπτική επικοινωνία ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960.. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 η τεχνολογία της οπτικής επικοινωνίας εξελίχθηκε από απλή περιέργεια και αντικείμενο μελέτης εργαστηρίων σε κυρίαρχη τεχνολογία στον τομέα της επικοινωνίας.

Ανάμεσα στις δεκάδες εφευρέσεις και εξελίξεις που έχουν συμβάλει στην εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας, ξεχωρίζουν τέσσερις που αποτελούν και ορόσημα.

- Δεκαετία 1950** Η εφεύρεση του λέιζερ
- Δεκαετία 1970** Η εφεύρεση οπτικών ινών με πολύ χαμηλές απώλειες
- Δεκαετία 1980** Η εφεύρεση του ενισχυτή οπτικών ινών
- Δεκαετία 1990** Η εφεύρεση του φράγματος τύπου μεταγωγής

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών είναι θεμελιώδης αλλά δεν είναι αποκλειστικά οπτική. Το επόμενο ορόσημο στην τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών έρχεται το 1998 και λέγεται Πολυπλεξία Μήκους Κύματος - Wavelength Division Multiplexing [WDM]. Με αυτή την τεχνολογία δίνεται η δυνατότητα της αποστολής πολλαπλών ανεξάρτητων οπτικών καναλιών μέσα από μια και μόνο οπτική ίνα.

Έτσι δόθηκε η δυνατότητα την τελευταία δεκαετία να έχουμε ραγδαία ανάπτυξη του διαδικτύου το οποίο και εκμεταλλεύεται όλες τις εξελίξεις στην τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών και χρησιμοποιεί μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, έχει μεγαλύτερη διείσδυση στον τελικό χρήστη ακόμα και σε πολύ απομακρυσμένες περιοχές και συνεχώς αναπτύσσεται. Αυτή η ανάπτυξη προϋποθέτει την αντίστοιχη εξέλιξη των τεχνολογιών στις οπτικές επικοινωνίες ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση σε ταχύτητα, χωρητικότητα και αξιοπιστία.

1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας εστιάζει στα τεχνικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας. Συγκεκριμένα αναλύονται τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, τα δομικά της μέρη (πομποί, δέκτες, κλπ) καθώς και οι παράμετροι εφαρμογής τους.

1.1 Μονότροπες Οπτικές Ίνες

Οπτικές ίνες που υποστηρίζουν μονάχα ένα οπτικό τρόπο μετάδοσης λέγονται μονότροπες (single mode) και οι τυπικές διαστάσεις του πυρήνα τους (διάμετρος) είναι 8-10 μm . Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5 microns (1 micron είναι 10⁻⁶ μέτρα) έως 10 μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm . Ακτίνα πυρήνα 8 έως 9 μm και διάμετρος περιβλήματος 125 μm . Συνήθως οι μονότροπες ίνες χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων. Για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα η διασπορά εμφανίζεται στα 1310nm και η μικρότερη εξασθένιση στα 1550nm. Αν συνδυαστούν οι παράμετροι : Τιμή αποκοπής και Διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης μπορούμε να έχουμε ένα παράγοντα που χαρακτηρίζει την ευαισθησία της ίνας στο λύγισμα. Υψηλή τιμή αποκοπής και μικρή διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης μας δίνουν μια ίνα αρκετά ανθεκτική στο λύγισμα. Βασικό πλεονέκτημα των μονότροπων ινών είναι ότι δεν

έχουν διασπορά λόγω εσωτερικών τρόπων μετάδοσης, απλώς επειδή η ενέργεια του εκπεμπόμενου παλμού μεταφέρεται μέσω ενός και μόνο τρόπου μετάδοσης. Ωστόσο, η παλμική διεύρυνση δεν εξαφανίζεται εντελώς. Η ταχύτητα ομάδας, που σχετίζεται με τον βασικό τρόπο μετάδοσης, εξαρτάται από την συχνότητα εξαιτίας της χρωματικής διασποράς. (Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης, 2011) Τυπικές παράμετροι μιας μονότροπης ίνας είναι οι εξής :

Πίνακας 1 Τυπικές παράμετροι μιας μονότροπης ίνας

Διάμετρος Μανδύα	125nm
Δείκτης διάθλασης πυρήνα	1.4485
Δείκτης διάθλασης μανδύα	1.4440
Διαφοροποίηση δείκτη διάθλασης	0.003=0.3%

1.2 Πολύτροπες Οπτικές Ίνες

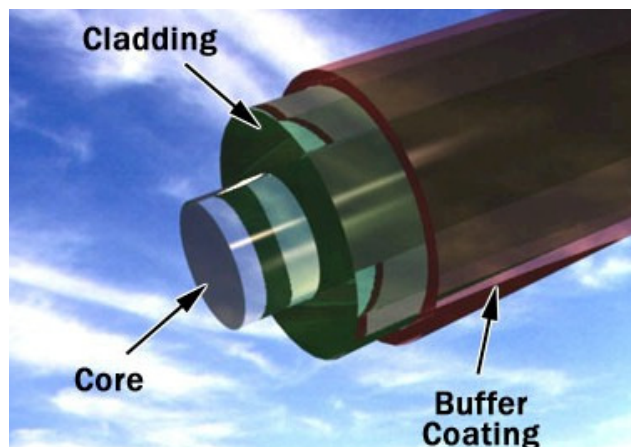
Οπτικές ίνες με περισσότερους από ένα οπτικούς τρόπους μετάδοσης λέγονται πολύτροπες (multi mode) και έχουν τυπικές διαστάσεις πυρήνα (διάμετρος) από 50μm μέχρι και 125mm. (Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης, 2011)

Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι να αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα (γυαλιού) και στη συνέχεια τη διάμετρο της επίστρωσης, δηλαδή του περιβλήματος (cladding). Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε 10⁻⁶ μέτρα (μm). Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50μm / 125μm, 62,5/125, 85/125 ή 100/140. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm. Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode), επειδή έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index). (Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης, 2011)

1.3 Προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτές κυλινδρικές ίνες γυαλιού ή πλαστικού με διάμετρο κάτω των 8μm (δηλαδή πιο λεπτές από μια τρίχα). Είναι διαφανείς και εύκαμπτες. Κατασκευάζονται από εξαιρετικά καθαρό γυαλί, με τρόπο ώστε να αντανακλούν το φως προς τον άξονά τους – να το κρατούν στο εσωτερικό τους. Έτσι, οι δέσμες φωτός μεταδίδονται εύκολα και γρήγορα. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χλμ. χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση. Αυτό σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες είναι πιο αποτελεσματικές από τα χάλκινα καλώδια. Με ένα μόνο ζεύγος οπτικών ινών μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα εκατοντάδες τηλεφωνικές συνδιαλέξεις.

Η γεωμετρική δομή της οπτικής ίνας αποτελείται από δυο ομοαξονικά διαφανή υλικά, που αποτελούν το εσωτερικό κα εξωτερικό τμήμα της. Το εσωτερικό τμήμα καλείται **πυρήνας (core)**, ενώ το εξωτερικό αποτελεί το **περίβλημα (cladding)**. Οι εξωτερικές πλαστικές επικαλύψεις (**coating**) χρησιμοποιούνται μόνο για μηχανική προστασία, όπως συμβαίνει και στα ηλεκτρικά καλώδια



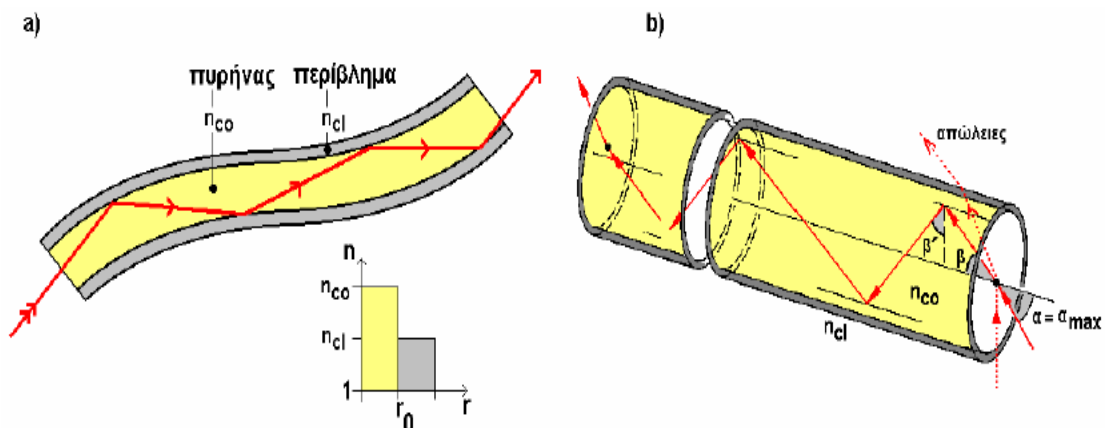
Με την βοήθεια των οπτικών ινών μπορούμε να “αναγκάσουμε” μια φωτεινή δέσμη να ακολουθήσει όποια διαδρομή επιθυμούμε. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι, όπως με ένα εύκαμπτο λάστιχο ποτίσματος μπορούμε να οδηγήσουμε το νερό από την βρύση σε ένα σημείο του κήπου μας, έτσι και με τις οπτικές ίνες μπορούμε να “οδηγήσουμε” το φως από μια ακίνητη πηγή σε οποιοδήποτε σημείο θέλουμε.

Γι’ αυτό λέμε ότι μια οπτική ίνα είναι ένας **φωτοαγωγός ή φωτοοδότης**. Κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τρία μέρη:

- Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα, που ονομάζεται **πυρήνας** και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως.

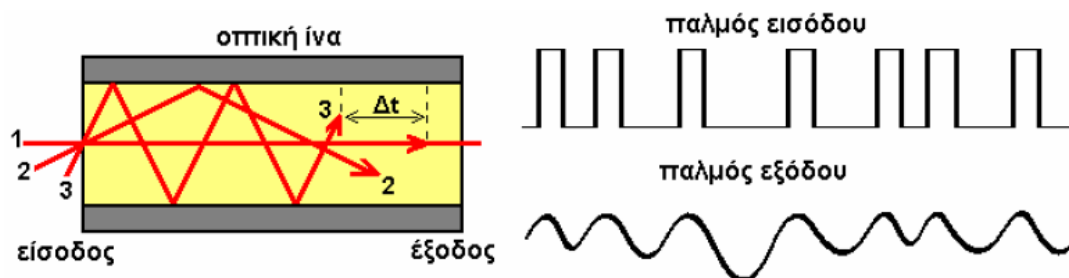
- Την επικάλυψη (απλή ή πολλαπλή), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα, για να παθαίνει το φως συνεχείς ολικές ανακλάσεις. Η επικάλυψη αυτή ονομάζεται μανδύας
- Το **περίβλημα**, που είναι ένα αδιαφανές πλαστικό

Το φως εισέρχεται από την πρώτη μετωπική επιφάνεια και διαδίδεται με πολλαπλές ολικές ανακλάσεις μεταξύ πυρήνα και περιβλήματος. Μια δέσμη φωτός, που προσπίπτει σε γωνία α ($\alpha < \alpha_{\max}$) και διαθλάται σε γωνία β , ανακλάται στα τοιχώματα του περιβλήματος σε γωνία $\beta' = 90^\circ - \beta$.



Εικόνα 1 Σχηματική τομή οπτικής ίνας, προβολή διάθλασης φωτός

Μαθηματική ερμηνεία: Από το νόμο του Snell έχουμε τη σχέση: $n_0 \sin \alpha = n \cos \beta$, όπου n_0 είναι ο δείκτης διάθλασης του εξωτερικού χώρου. Για την ολική ανάκλαση ισχύει επίσης η σχέση: $n \cos \beta = n_{cl} \sin 90^\circ$. Συμβατικά ένας παλμός φωτός αντιστοιχεί στο 'bit' "1", ενώ η απουσία φωτός αντιστοιχεί στο "bit" "0".



Εικόνα 2 Η μορφή ενός παλμού που διέρχεται δια μιας πολυτροπικής ίνας έχει ευρεία χωρική κατανομή και κάθε «σημείο» του διανύει τη δική του διαδρομή. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία υποδοχής, τόσο μεγαλύτερο είναι και το πλήθος των διαφορετικών διαδρομών. Μια τέτοια ίνα καλείται πολυτροπική. Το αριθμητικό άνοιγμα NA καθορίζει και το εύρος ζώνης

της ίνας. Το φαινόμενο της διασποράς μπορεί να αλλοιώσει έναν παλμό κατά την έξοδό του από την ίνα.

1.4 Κυματική Διάδοση με Οπτικές Ίνες

Οι εξισώσεις Maxwell για οπτικές ίνες με αγωγίμο μέσο χωρίς ελεύθερα φορτία έχουν την μορφή

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) &= 0, \\ \nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0.\end{aligned}$$

Τα διανύσματα E και H περιγράφουν το ηλεκτρονικό και μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα, ενώ τα διανύσματα D και B είναι η ηλεκτρική και μαγνητική πυκνότητα ροής που σχετίζονται με τα πεδία E και H ως

$$\begin{aligned}\vec{D}(\vec{r}, t) &= \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t), \\ \vec{B}(\vec{r}, t) &= \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t).\end{aligned}$$

Οι σταθερές ϵ_0 και μ_0 καλούνται ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ενώ η πόλωση P σχετίζεται σε οπτικές ίνες με το ηλεκτρικό πεδίο E στο πεδίο της συχνότητας ως

$$\vec{P}(\vec{r}, \omega) = \epsilon_0 \chi(\vec{r}, \omega) \vec{E}(\vec{r}, \omega)$$

Συνδυάζοντας τις δύο πρώτες σχέσεις προκύπτει ότι

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \nabla \times \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}(\vec{r}, t)}{\partial t^2}.$$

Παίρνοντας τον μετασχηματισμό της ως άνω σχέσης και λαμβάνοντας υπόψη

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}, t)) - \nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t)$$

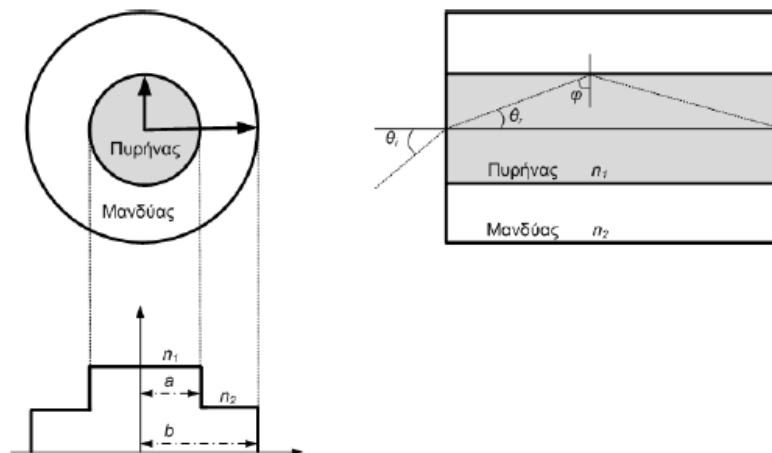
Βρίσκουμε ότι

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) = (1 + \chi(\vec{r}, \omega)) \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}, \omega) = \epsilon(\vec{r}, \omega) \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}, \omega)$$

Καθώς $(\mu_0 \epsilon_0)^{-1} = c$. Η σύνθετη επιδεκτικότητα ϵ είναι γενικά μιγαδική τιμή, και το πραγματικό μέρος της αντιστοιχεί στο δείκτη διάθλασης n της ίνας, ενώ το φανταστικό μέρος τις απώλειες α . οι απώλειες σε οπτικές ίνες είναι συνήθως μικρές, οπότε η επιδεκτικότητα προσεγγίζεται με n^2 και τελικά προκύπτει η εξίσωση διάδοσης σε οπτικές ίνες

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) = \frac{n^2 \omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}, \omega) = k_0^2 n^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega)$$

Με k_0 τη σταθερά διάδοσης στο κενό.



Εικόνα 3 Γεωμετρία οπτικών ινών

1.5 Παράμετροι Εφαρμογής Τεχνολογίας Οπτικών Ινών

Διακρίνεται πλήθος παραμέτρων που καθορίζουν την πετυχημένη εφαρμογή του συστήματος. Για κάθε παράμετρο δίνονται τυπικές τιμές που αναφέρονται σε κάθε πιθανή εφαρμογή των οπτικών καλωδίων καθώς και πρακτικά παραδείγματα για κάθε περίπτωση. Οι παράμετροι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Παράμετροι εγκαταστάσεων
- Περιβαλλοντικές παράμετροι

Οι χαρακτηριστικές παράμετροι εγκαταστάσεων εξασφαλίζουν την επιτυχή εγκατάσταση των καλωδίων, τα οποία είναι :

- Η ελάχιστη συνιστώμενη ακτίνα κάμψης, και η ακτίνα κάμψης κατά την εγκατάσταση (σε ίντσες ή mm)
- Η διάμετρος του καλωδίου
- Η ελάχιστη συνιστώμενη ακτίνα κάμψης και η ακτίνα κάμψης κατά την Εγκατάσταση¹
- Η διάμετρος καλωδίου, εμπεριεχόμενων καλωδίων και σωλήνων απομόνωσης²

Περιοριστικούς παράγοντες μπορεί επίσης να αποτελούν η διάμετρος των εμπεριεχόμενων καλωδίων και ο απομονωτής σωλήνας του καλωδίου. Στις περιπτώσεις των διαρρηγνυόμενων καλωδίων, η διάμετρος των εμπεριεχομένων

¹ Η ελάχιστη συνιστώμενη ακτίνα κάμψης κατά την εγκατάσταση αποτελεί την ελάχιστη ακτίνα στην οποία επιτρέπεται το καλώδιο να καμφθεί, ενώ φορτίζεται από το μέγιστο συνιστώμενο φορτίο. Η ακτίνα αυτή περιορίζεται περισσότερο από τα υλικά του καλωδίου, παρά από τις ίδιες τις ίνες. Η επιτρεπόμενη αυτή κάμψη δεν προκαλεί μόνιμη αλλαγή των απωλειών σήματος ή θραύση των ινών ή θραύση οποιουδήποτε σημείου του καλωδίου. Συνήθως, η ακτίνα αυτή καθορίζεται ως 20 φορές η διάμετρος του καλωδίου που κάμπτεται. Ο καθορισμός του χαρακτηριστικού αυτού είναι σημαντικός κατά την έλξη του καλωδίου (χειροκίνητη ή μηχανική) μέσα από σωληνώσεις ή σε μεγάλου μήκους διαδρομές.

² Το καλώδιο θα πρέπει να χωράει στην προβλεπόμενη για εγκατάσταση θέση. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για καλώδια που πρόκειται να τοποθετηθούν μέσα σε σωληνώσεις, ενώ δεν είναι σημαντικό για τις περιπτώσεις απευθείας ταφής, ανάρτησης από οροφές ή τοποθέτησης πάνω σε οδηγούς. Εάν ο διαθέσιμος χώρος αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, τότε ίσως το μέγεθος της διαμέτρου προσδιορίζει τελικά ποιον τύπο καλωδίου θα διαλέξουμε. Εάν πρέπει να επιλέξουμε τη μικρότερη διάμετρο, τότε οι σχεδιάσεις MFPT είναι οι κατάλληλες (είναι οι μικρότερης διαμέτρου).

καλωδίων πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη διάμετρο του βύσματος σύνδεσης.

Οι περιβαλλοντικές παράμετροι είναι τα χαρακτηριστικά εκείνα που απαιτούνται για την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του καλωδίου στο περιβάλλον του. Υπάρχουν τέτοια χαρακτηριστικά:

<p>Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας</p>	<p>Όταν τα καλώδια βρίσκονται σε ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας, τα πλαστικά υλικά συστέλλονται και διαστέλλονται με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς από αυτούς των γυάλινων ινών (περί τις 100 φορές). Αυτές οι συστολές και διαστολές οδηγούν σε μηχανικές κάμψεις των ινών, μικροσκοπικού επιπέδου. Είτε η ίνα συμπιέζεται κατά τη συστολή του πλαστικού εξωτερικού σωλήνα, είτε τραβιέται προς τα έξω καθώς το πλαστικό διαστέλλεται. Και στις δύο περιπτώσεις, η ίνα αναγκάζεται να πάρει τη μορφή της μικροσκοπικά ανομοιόμορφης επιφάνειας του πλαστικού.</p>
<p>Φορτίο μακροπρόθεσμης χρήσης</p>	<p>Τα περισσότερα καλώδια οπτικών ινών σχεδιάζονται για χρήση χωρίς σημαντικό φορτίο. Ιδιαίτερα σημαντικά φορτία εμφανίζονται σε εφαρμογές κατακόρυφων διαδρομών, σε άξονες ανελκυστήρων, σε πύργους ραδιοφώνου ή τηλεόρασης και σε εναέρια καλώδια εξωτερικού χώρου.</p> <p>Στις περιπτώσεις αυτές, τα καλώδια υπόκεινται σε φορτία είτε των ιδίων είτε οφειλόμενα σε εξωτερικά αίτια, όπως είναι ο άνεμος, το χιόνι και ο πάγος. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται από τις αποστάσεις μεταξύ των στύλων ανακρέμασης.</p>
<p>Πυραντοχή</p>	<p>Η αντίσταση στην πυρκαγιά απαιτείται ιδιαίτερα σε εφαρμογές πλοίων και αεροσκαφών. Στις περιπτώσεις αυτές, απαιτείται η χρήση καλωδίων από υλικά ανθεκτικά στη φωτιά. Πολλά συνήθη υλικά ανθεκτικά στη φωτιά είτε είναι στη συνήθη τους μορφή είτε μπορούν να γίνουν τέτοια με τη χρήση ορισμένων προσθετικών ουσιών.</p>
<p>Αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV)</p>	<p>Εάν τα καλώδια προορίζονται για συνεχή εξωτερική χρήση, τότε απαιτείται ο καθορισμός της αντοχής ή της σταθερότητας στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Σε διαφορετική περίπτωση, η συνεχής έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί απώλεια της ευκαμψίας και θραύση του εξωτερικού περιβλήματος του καλωδίου. Τα περισσότερα καλώδια, που προορίζονται για διαρκή εξωτερική χρήση, διαθέτουν περίβλημα από μαύρο πολυαιθυλένιο, επειδή το υλικό αυτό απορροφά την ακτινοβολία UV και δε διαθέτει πλαστικοποιητές που εξατμίζονται με την πάροδο του χρόνου.</p>

Αντοχή στην καταστροφή από τρωκτικά	Σε περιβάλλοντα με τρωκτικά, απαιτείται η προστασία των θαμμένων καλωδίων από τη φθορά την οποία μπορεί να προξενήσουν. Τελευταία, αποφεύγεται η χρήση θωρακισμένων καλωδίων, και αντί αυτών τα θαμμένα καλώδια τοποθετούνται μέσα σε σωληνώσεις, οι οποίες παρέχουν την προστασία που παλαιότερα παρείχαν τα θωρακισμένα καλώδια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ίσως απαιτηθεί η χρήση θωρακισμένων καλωδίων.
Αντοχή στην υγρασία / νερό	Όταν το καλώδιο πρόκειται να λειτουργήσει μέσα σε περιβάλλον νερού, τότε απαιτείται η χρήση ενός ειδικού τύπου καλωδίου. Ένα τέτοιο καλώδιο διαθέτει ειδική γέμιση μέσα σε κάθε χαλαρή σωλήνα απομονωτή, καθώς και υλικά που μπλοκάρουν τον κενό χώρο μεταξύ των σωλήνων. Χρήση διαφορετικού τύπου καλωδίων από αυτόν οδηγεί σε αύξηση των απωλειών σήματος και τελικά σε θραύση των ινών. Επιπρόσθετα, καλώδια χωρίς γέμιση και υλικά μπλοκαρίσματος ενεργούν ως σωλήνες που διοχετεύουν νερό μέχρι τις απολήξεις στα ηλεκτρονικά τμήματα της εγκατάστασης. Ορισμένοι κατασκευαστές διαθέτουν καλώδια μόνο με γέμιση, τα οποία όμως δεν είναι τόσο υδατοστεγή όσο τα καλώδια που διαθέτουν εκτός από γέμιση και υλικά μπλοκαρίσματος.
Αντίσταση στην αγωγιμότητα κάτω από πεδία υψηλής τάσης	Σε ορισμένες εφαρμογές κάτω από την επίδραση πεδίων υψηλής τάσης, τα καλώδια οπτικών ινών θα πρέπει να είναι μη-αγώγιμα. Ορισμένα από αυτά εκτίθενται σε τάσεις έως και 1.000.000 volts. Σε άλλες εφαρμογές, τα καλώδια οπτικών ινών δε θα πρέπει να έλκουν τους κεραυνούς. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, απαιτούνται πλήρως διηλεκτρικές κατασκευές, οι οποίες είναι διαθέσιμες στο εμπόριο
Τοξικότητα	Σε ορισμένες εφαρμογές, π.χ. σε πλοία, αεροσκάφη και μέσα μαζικής μεταφοράς, απαιτούνται καλώδια χωρίς αλογόνα. Η ύπαρξη αλογόνων, κατά την καύση, παράγει τοξικά αέρια που προσβάλλουν τους πνεύμονες και διαβρώνουν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Τα καλώδια αυτά, είναι 10-15% περισσότερο ακριβά από τα καλώδια PVC. Επιπρόσθετα, σε ορισμένες περιοχές, π.χ. στη Νέα Υόρκη, απαιτείται η καταγραφή όλων των εγκατεστημένων καλωδίων, ώστε να παρακολουθούνται τα εμπεριεχόμενα υλικά. Τα καλώδια που κατασκευάζονται για την Ευρωπαϊκή και Ιαπωνική αγορά απαιτείται να είναι επίσης ελεύθερα αλογόνων.
Αντοχή στις εκδορές	Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το καλώδιο κινδυνεύει να γδαρθεί, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση στις εκδορές. Η προδιαγραφή αυτή αφορά το υλικό του περιβλήματος του καλωδίου.
Αντίσταση στη ραδιενέργεια	Όταν τα καλώδια πρόκειται να εγκατασταθούν σε περιβάλλον με ιονίζουσα ακτινοβολία, όπως π.χ. στον πυρήνα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, στο διάστημα, σε ένα θάλαμο ακτίνων X, κτλ, τότε απαιτείται τα υλικά κατασκευής τόσο του καλωδίου όσο και της ίνας να είναι ανθεκτικά στις ακτινοβολίες.

Αντίσταση στις συγκρούσεις	Σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτείται ο καθορισμός της αντίστασης του καλωδίου σε μηχανικές συγκρούσεις. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων αφορούν στρατιωτικές εφαρμογές σε τακτικά περιβάλλοντα, εφαρμογές συνεργειών δημοσιογραφίας, και οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, κατά την οποία είναι δυνατό να πέσουν πάνω στα καλώδια βαριά αντικείμενα. Πρακτικά, τα περισσότερα καλώδια οπτικών ινών είναι αρκετά ανθεκτικά στις συγκρούσεις.
-----------------------------------	--

1.6 Διασπορά

Στον τομέα των οπτικών ινών ονομάζουμε διασπορά τη διεύρυνση του χρόνου ενός παλμού καθώς αυτός ταξιδεύει μέσα στην ίνα.³ Καθώς ένας παλμός διευρύνεται, μπορεί να πλατύνει αρκετά και έτσι να προκαλεί παρεμβολές στους γειτονικούς παλμούς που βρίσκονται μέσα στην ίνα. Η διασπορά λοιπόν περιορίζει το διάστημα ανάμεσα στα bits και το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης σε ένα οπτικό κανάλι. Τα είδη διασποράς είναι τα εξής :

- intermodal or modal dispersion (διατροπική διασπορά)
- intramodal dispersion (ενδοτροπική διασπορά)
- διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)

η διασπορά τρόπων διάδοσης αυξάνει με την αύξηση του διανυόμενου μήκους ίνας, ενώ για σταθερό μήκος ίνας περιορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (ελάχιστη χρονική απόσταση μεταξύ παλμών). Σαν αποτέλεσμα, η μετάδοση πάνω από πολυρυθμικές ίνες περιορίζεται σε λίγα χιλιόμετρα και ρυθμούς μετάδοσης που δεν υπερβαίνουν τις εκατοντάδες Mbps.

³ <http://conta.uom.gr/conta/ekpaidevsh/seminaria/thlematikes/Optical/optical%20fiber.htm>

1.6.1 Διατροπική Διασπορά(Intermodal Dispersion)

Ένα είδος διασποράς είναι η intermodal dispersion, η οποία προκαλείται όταν πολλές καταστάσεις του ίδιου σήματος διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες στην ίνα. Αυτό το είδος διασποράς δεν εμφανίζεται στις μονότροπες ίνες.

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υπό παλμών, ο καθένας με την χαρακτηριστική του γωνία πρόσπτωσης μέσα στην ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διαφέρει λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Ως αποτέλεσμα προκύπτει οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα να φτάσουν στο τέλος της ίνας με ελάχιστα διαφορετικούς χρόνους. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει αρκετά τις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών. (Α. Αναγνωστάκη, 2011) Η διατροπική διασπορά δημιουργεί τα εξής προβλήματα :

- Μείωση του εύρους μετάδοσης (Mbit/s)
- Μείωση της απόδοσης μετάδοσης

Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της modal διασποράς μέσα σε μια ίνα. Ο κάθε ρυθμός διάδοσης μεταφέρει ενέργεια από και προς κάποιον άλλο. Οι ρυθμοί χαμηλής τάξης (ρυθμοί με μικρή γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετατρέπονται σε ρυθμούς υψηλής τάξης (μεγάλη γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετά τη μεταφορά ενέργειας. Το mode coupling, όπως ονομάζεται το προηγούμενο φαινόμενο, λαμβάνει χώρα περισσότερο σε σημεία «μη καθαρότητας» του πυρήνα, σε κολλήσεις (splices) και σε απότομα λυγίσματα της οπτικής ίνας. Στις σύγχρονες ίνες, ήταν δυνατό να μειώσουμε το mode coupling, βελτιώνοντας την ποιότητα της ίνας. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την ουσιαστική αδρανοποίηση του παράγοντα διαφοράς χρόνου δt . Η διαφορά αυτή δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους της ίνας, αλλά σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

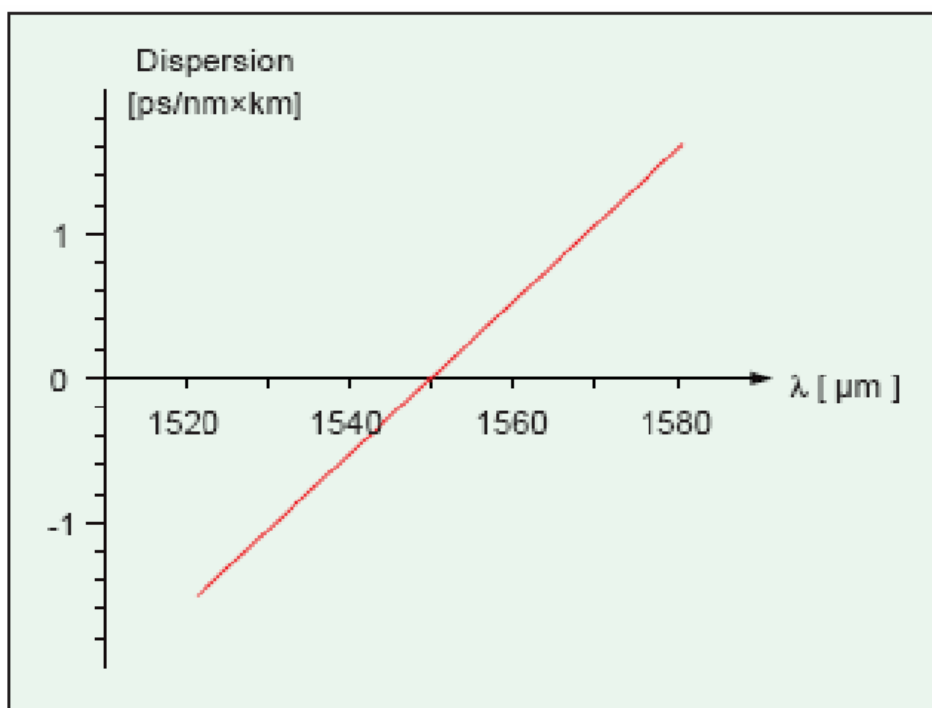
$$\delta t \approx \sqrt{\text{fiberlength } (L)}$$

Η modal διασπορά μπορεί να αδρανοποιηθεί πλήρως, μειώνοντας τη διάμετρο του πυρήνα, έτσι ώστε να διαδίδεται μέσα στην ίνα μόνο ένας ρυθμός, ο θεμελιώδης (μονότροπη οπτική ίνα).

1.6.2 Ενδοτροπική (Χρωματική) Διασπορά (Intramodal Dispersion)

Ακόμα και στην περίπτωση που αντιμετωπιστεί εξολοκλήρου το φαινόμενο της διατροπικής διασποράς και επιτευχθεί η μετάδοση να γίνεται μόνο στον θεμελιώδη ρυθμό μέσα στην ίνα, θα συνεχιστεί να υπάρχει διασπορά του συγκεκριμένου ρυθμού. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται ενδοτροπική ή χρωματική διασπορά. Η ενδοτροπική διασπορά μέσα σε μια μονότροπη ίνα συνίσταται από τη διασπορά υλικού και τη διασπορά κυματοδηγού. (Α. Αναγνωστάκη, 2011)

Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310 nm, όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν. Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνο αν μεταβληθεί η σύσταση του γυαλιού στον πυρήνα και στον μανδύα της ίνας. Η διασπορά κυματοδηγού οφείλεται στο προφίλ δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού και μπορεί να διορθωθεί μόνο αλλάζοντας αυτό το προφίλ.



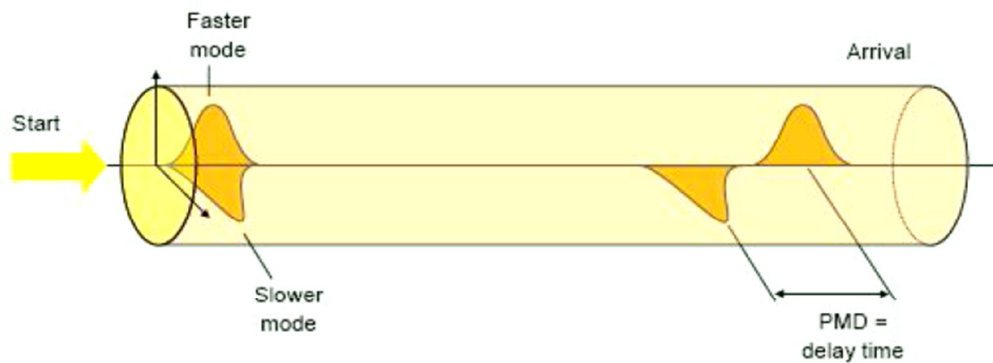
Εικόνα 4 Χρωματική διασπορά για μια ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

1.6.3 Διασπορά Πόλωσης του Ρυθμού Μετάδοσης (PMD)

Η μονότροπη διάδοση δεν είναι ποτέ στην πραγματικότητα μονότροπη. Υπάρχουν πάντα δυο ρυθμοί διάδοσης, όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο «Βασικές γνώσεις οπτικής». Όταν το φως εισέρχεται στην ίνα από το laser, τα πεδία αυτά είναι σύγχρονα και κάθετα μεταξύ τους. Κάθε ένα από αυτά τα πεδία αποτελεί έχει διαφορετική πόλωση. Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης στο τέρμα της ίνας των δυο αυτών ρυθμών διαφορετικής πόλωσης, ονομάζεται διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης ή PMD και είναι της τάξης των psec. Μετρώντας για ένα χιλιόμετρο ο παράγοντας PMD μιας ίνας έχει μονάδα ps / \sqrt{km} , αυτό συμβαίνει λόγω του mode coupling. Κάποιες από τις πρώτες οπτικές ίνες και κάποιες ίνες χαμηλής ποιότητας που κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα έχουν παράγοντα PMD μέχρι και $6 ps / \sqrt{km}$ ενώ ίνες υψηλής ποιότητας έχουν παράγοντα μικρότερο από 0.2 . Οι οργανισμοί τυποποίησης προτείνουν ο παράγοντας PMD μιας ίνας να μην ξεπερνά το $1/10$ της περιόδου bit. Αυτό μεταφράζεται σε μέγιστο PMD $40 ps$ για σύστημα $2.5 Gbit/s$ και $10 ps$ για σύστημα $10 Gbit/s$. Για μια ζεύξη $400 km$ οι τιμές PMD είναι :

- $40/\sqrt{400} = 2 ps / \sqrt{km}$ για σύστημα $2.5 Gbit/s$
- $10/\sqrt{400} = 0.5 ps / \sqrt{km}$ για σύστημα $10 Gbit/s$

Η τιμή 0.5 είναι η τυποποιημένη τιμή που απαιτείται για οπτικά καλώδια ζεύξης. Νέες απαιτήσεις για υψηλότερα bit rate θα είναι 0.1 για σύστημα $40 Gbit/s$.



Εικόνα 5 Διεύρυνση παλμού λόγω PMD

1.7 Εξασθένιση

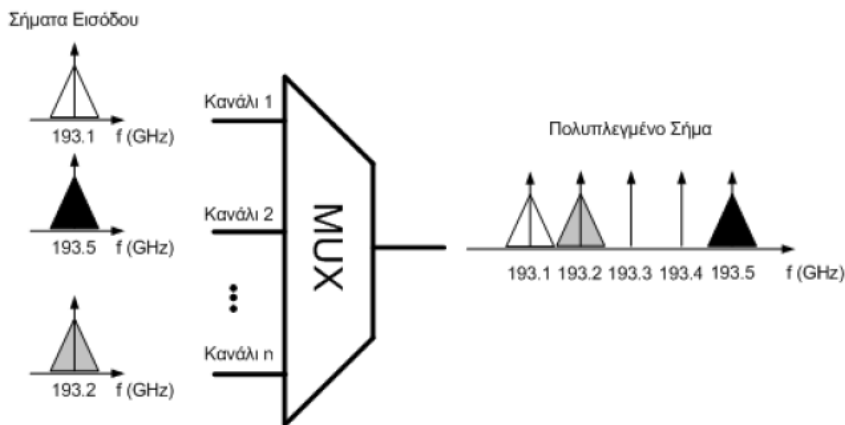
Η οπτική ίνα όπως και κάθε μέσο μετάδοσης παρουσιάζει απώλειες οι οποίες συντελούν στην εξασθένιση του μεταδιδόμενου σήματος. Αν υποθέσουμε ότι ο οπτικός πομπός στέλνει την ισχύ P_t και ο οπτικός δέκτης λαμβάνει ισχύ P_r τότε η εξασθένιση ορίζεται ως

$$\gamma = \frac{P_r}{P_t}$$
$$\gamma_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(\gamma) = 10 \cdot \log_{10}(P_r) - 10 \cdot \log_{10}(P_t).$$

Η εξασθένιση των οπτικών ινών στην περιοχή των 1,55 μ m ισούται με 0,18dB/Km. Σημειώνεται ότι η οπτική ισχύς μετράται σε W ή mW (10^{-3} W). Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μονάδες μέτρησης όπως τα dBW & dBm που ορίζονται ως

$$P_{dBW} = 10 \cdot \log_{10}(P_W)$$
$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(P_{mW})$$

Για παράδειγμα 1mW ισούται με 0 dBm και -30dBW. Η εξασθένιση των οπτικών ινών αντισταθμίστηκε με την υλοποίηση οπτικών ενισχυτών ίνας με προσμίξεις σπάνιων γαιών. Ανάλογα με τη σπάνια γαία η οποία προσμειγνύεται στην ίνα είναι δυνατόν να ενισχυθεί οπτικό σήμα το οποίο ανήκει στην S-, C- ή L-Band. Συγκεκριμένο παράδειγμα αποτελεί το έρβιο, το οποίο έχει φάσμα εκπομπής στην περιοχή των 1,55 μ m και δίνει τη δυνατότητα ενίσχυσης στην C-band. Οι ενισχυτές σπάνιων γαιών δίνουν την δυνατότητα ταυτόχρονης ενίσχυσης πολλαπλών καναλιών, γεγονός το οποίο συντέλεσε καίρια στην ανάπτυξη συστημάτων πολυπλεγμένων κατά WDM. Μέχρι αυτή τη στιγμή έχουν υλοποιηθεί τα WDM συστήματα με συνολικό ρυθμό μετάδοσης που υπερβαίνει το 1Tbps και σε αποστάσεις οι οποίες προσεγγίζουν μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα.



Εικόνα 6 Πολυπλεξία συχνότητας (μήκους κύματος) σε οπτικά δίκτυα

1.8 Μη Γραμμικά Φαινόμενα

Η ισχύς εισόδου μιας ίνας έχει αυξηθεί σημαντικά στις μέρες μας. Η ανακάλυψη των οπτικών ενισχυτών σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών μηκών κύματος έκανε πιο έντονη την εμφάνιση φαινομένων όπως τα μη γραμμικά φαινόμενα καθώς αυτά εμφανίζονται αποκλειστικά σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Τα μη γραμμικά φαινόμενα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες :

- Διεγερόμενη σκέδαση
- Διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης

Τα επίπεδα ισχύος στα οποία εμφανίζονται τα μη γραμμικά φαινόμενα ονομάζονται «κατώτατα όρια». Δε θα μελετήσουμε τα φαινόμενα αυτά σε βάθος, δεν είναι μέσα στους στόχους της εργασίας, εκτός από το φαινόμενο μείξης τεσσάρων κυμάτων που αποτελεί το πρώτο φαινόμενο που πρέπει να αντιμετωπίσουμε όταν έχουμε να κάνουμε με πολυπλεξία μήκους κύματος.

1.8.1 Διεγερόμενη Σκέδαση Brillouin, SBC

Η διεγερόμενη σκέδαση Brillouin είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ ακουστικών κυμάτων και κυμάτων φωτός μέσα στην οπτική ίνα. Κάποιο ποσοστό του διαδιδόμενου φωτός διαδίδεται ξανά προς τα πίσω, με αποτέλεσμα να «κλέβει» ισχύ

από το εμπρός διαδιδόμενο φως. Έτσι μειώνεται η ισχύς που φτάνει στο δέκτη. Η SBC εμφανίζεται για ισχύ εισόδου 6 – 20 dBm.

1.8.2 Διεγερόμενη Σκέδαση Raman, SRS

Η διεγερόμενη σκέδαση Raman είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των δονήσεων των μορίων της ίνας. Η SRS σκεδάζει φως και προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Η μετάδοση ισχύος προς τα πίσω μπορεί να μηδενιστεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό απομονωτή. Η SRS εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 27 dBm δηλαδή κοντά στο 1 W. Η διεγερόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότατο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μίας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται, όπως προαναφέραμε, αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή (περίπου 1 W). Τέτοια πάντως επίπεδα ισχύος στην είσοδο της οπτικής ίνας θεωρούνται υπερβολικά υψηλά ιδιαίτερα για τις μονότροπες ίνες. Γι αυτό η διεγερόμενη σκέδαση Raman υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν εμφανίζεται σε ένα δίκτυο οπτικών ινών. Σε αντίθεση με τη σκέδαση Raman η σκέδαση Brillouin εμφανίζεται για χαμηλότερη ισχύ εισόδου αλλά η επίδραση της δεν είναι τόσο σημαντική.

Γενικώς καλό είναι η ισχύς εισόδου να μην ξεπερνάει τα 6 dBm για να αποφεύγονται τα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται όταν το διαδιδόμενο σήμα έχει υψηλή ισχύ.

1.8.3 Self phase modulation, SPM (αυτό-διαμόρφωση φάσης)

Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός φωτός στην ίδια του τη φάση. Η ίδια η ισχύς του διαδιδόμενου παλμού μπορεί να μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης της ίνας μέσα στην οποία διαδίδεται ο παλμός με διαφορετικό τρόπο για τα διάφορα μήκη κύματος.

Ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης διαμορφώνει τη φάση του μεταδιδόμενου κύματος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην διεύρυνση το φάσματος του διαδιδόμενου παλμού. Αν είναι αρκετά μεγάλη αυτή η διεύρυνση μπορεί να επικαλυφθούν κανάλια σε συστήματα DWDM.

Η SPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm. Η αυτό-διαμόρφωση φάσης είναι ένα αρκετά σύνηθες φαινόμενο στα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν μονοτροπικές ίνες. Πέρα από την φασματική διεύρυνση του παλμού η αυτό-διαμόρφωση φάσης μπορεί να προκαλέσει και έντονη παραμόρφωση της μορφής του παλμού. Η επίδραση του φαινομένου της αυτό-διαμόρφωσης γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ισχύς. Οπότε κρίνεται αναγκαίο κατά την διάδοση ενός παλμού μέσα από την οπτική ίνα τα επίπεδα ισχύος του να μην ξεπερνάνε αυτά στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτό-διαμόρφωσης φάσης.

1.8.4 Cross phase modulation, XPM (ετερο-διαμόρφωση φάσης)

Η XPM σχετίζεται αρκετά με την SPM. Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στον εαυτό του ενώ η XPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στους παλμούς άλλων καναλιών. Η SPM μπορεί να εμφανιστεί σε μονοκάναλα και πολυκάναλα συστήματα ενώ η XPM εμφανίζεται μόνο σε πολυκάναλα συστήματα. Η XPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm ενώ η επίδρασή της είναι ίδια με την SPM. Συνήθως το φαινόμενο της ετερο-διαμόρφωση φάσης εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες όπου κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος διαδίδονται.

1.8.5 Μείξη Τεσσάρων Κυμάτων

Ένα από τα πιο σοβαρά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η μείξη τεσσάρων κυμάτων. Εμφανίζεται όταν πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα σήματα αυτά «αναμειγνύονται» με αποτέλεσμα να παράγουν νέα κανάλια που μπορούν να «κλέψουν» ισχύ από τα ήδη υπάρχοντα κανάλια και να τα επικαλύψουν. Η εικόνα 2 παριστάνει το παραπάνω φαινόμενο για 3 κανάλια που ισαπέχουν μεταξύ τους λ_1 , λ_2 και λ_3 .

Οι συντελεστές μείξης εμφανίζονται για:

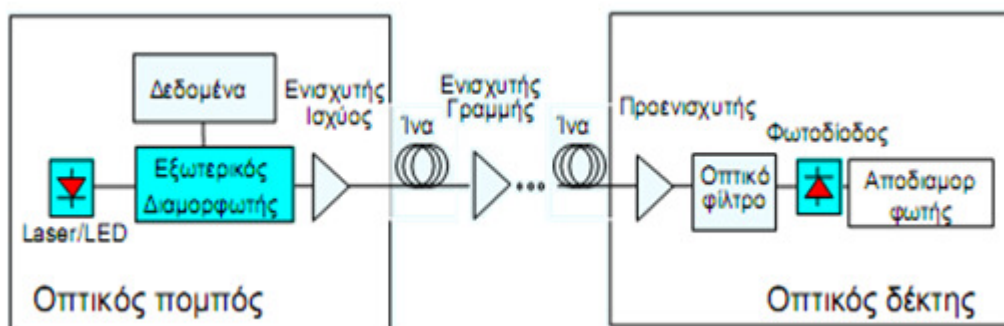
$$\lambda_{xyz} = \lambda_x + \lambda_y - \lambda_z$$

Λόγω του ότι τα κανάλια (μήκη κύματος) ισαπέχουν μεταξύ τους σε αυτό το παράδειγμα, κάποια από τα σήματα που δημιουργούνται επιδρούν στα ήδη υπάρχοντα κανάλια. Το φαινόμενο της μείξης των τεσσάρων κυμάτων εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 0 dBm.

1.9 Οπτικοί Πομποί

Ο πομπός πραγματοποιεί την μετατροπή από ηλεκτρικό σε οπτικό σήμα αποτυπώνοντας τα δεδομένα του ηλεκτρικού σήματος πάνω στον φορέα του φωτός. Αυτή η διεργασία λέγεται διαμόρφωση. Η διαμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε άμεσα, χρησιμοποιώντας μόνο ένα laser και τότε ονομάζεται άμεση διαμόρφωση (αυτή είναι και που μας απασχολεί περισσότερο) είτε χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό διαμορφωτή. Μετά τη διαμόρφωση, το οπτικό σήμα μεταδίδεται κατά μήκος της οπτικής ίνας. Κατά σύμβαση, ο παλμός φωτός παριστάνει το bit 1 και η απουσία φωτός παριστάνει το bit 0. Στην έξοδο της ίνας, το οπτικό σήμα ανιχνεύεται και επεξεργάζεται από το δέκτη. Επιγραμματικά ο ρόλος των οπτικών πομπών είναι:

- Να μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα εισόδου σε αντίστοιχο οπτικό σήμα.
- Να το εκπέμπουν στο εσωτερικό της οπτικής ίνας, δηλαδή στο κανάλι επικοινωνίας.



Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς από τον πομπό στον δέκτη

1.10 Οπτικοί Δέκτες

Ο δέκτης αποτελείται κυρίως από μία φωτοδίοδο που ανιχνεύει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό. Το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να το επεξεργαστεί περαιτέρω αν είναι αναγκαίο. Τέλος, μετά από τη δειγματοληψία που βασίζεται στην ανάκτηση του ρολογιού (clock recovery) και στην απόφαση του στοιχείου αποφάσεως (slicer), ανακτάται το μεταδιδόμενο σήμα. Στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα υπάρχουν διάφορα στοιχεία. Για παράδειγμα, το οπτικό σήμα εξασθενεί κατά μήκος της μετάδοσης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οπτικοί ενισχυτές για την κάλυψη των οπτικών απωλειών πριν την ανίχνευση του σήματος στο δέκτη. Επιπρόσθετα, οπτικά ζωνοπερατά (bandpass) φίλτρα και ηλεκτρικά χαμηλοπερατά (lowpass) φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαλείψουν κατά ένα μεγάλο μέρος τον θόρυβο τόσο στο οπτικό, όσο και στο ηλεκτρικό επίπεδο αντίστοιχα. Βασικό εξάρτημα του δέκτη είναι ο φωτοανιχνευτής με την βοήθεια του οποίου το φως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό παλμό.



Εικόνα 8 Βασικό οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα (Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης, 2011)

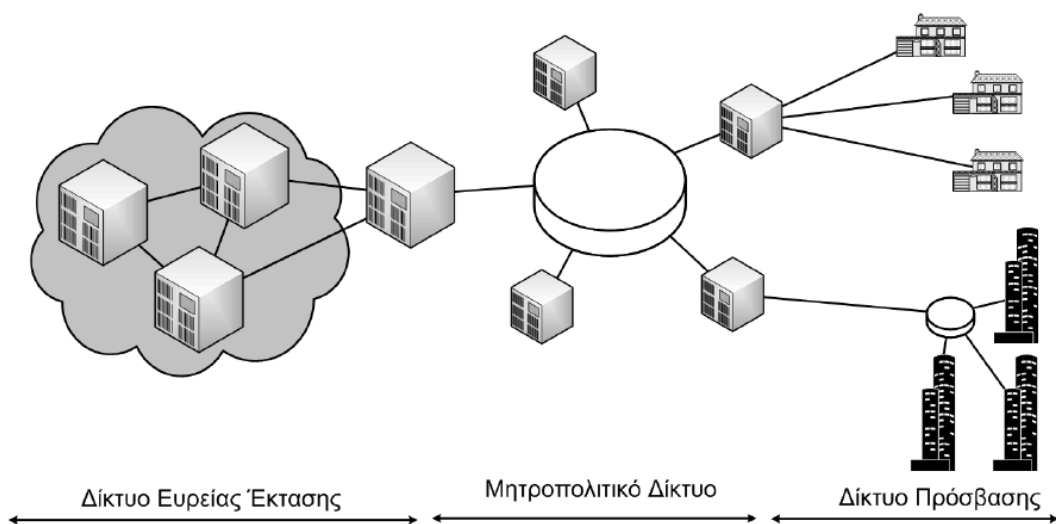
2. ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Εισαγωγή

Στην δεύτερη ενότητα, θέτεται ως στόχος η ανάλυση βασικών εννοιών και την αποσαφήνιση των ορισμών και των παραμέτρων που πλαισιώνουν την τεχνολογία των οπτικών δικτύων.

2.1 Δομή Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων

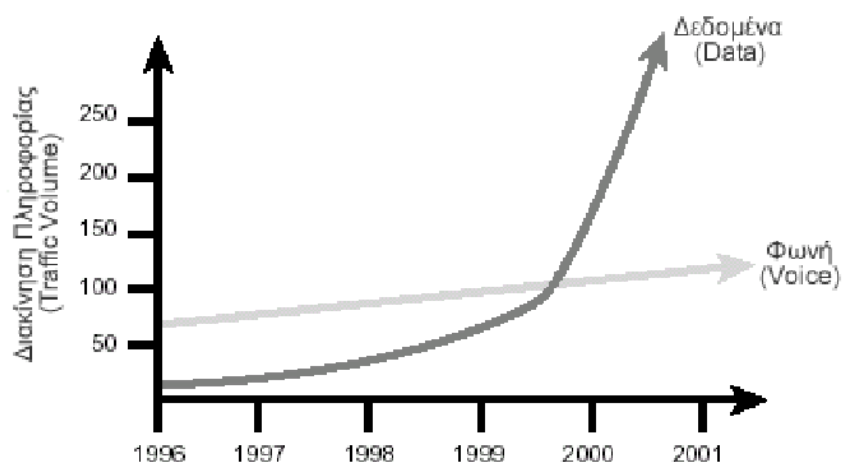
Η ευρέως διαδομένη δομή των δημόσιων τηλεπικοινωνιακών θα μπορούσε να περιγραφεί στο ακόλουθο σχήμα. Αν και τα δίκτυα παρουσιάζουν ποικιλία δομών, μια αναλυτικότερη προσέγγιση είναι δυνατόν να διαχωριστεί σε μητροπολιτικά και ευρείας έκτασης δίκτυα.



Εικόνα 9 Δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων (Κ. Βλάχος, 2009)

Τα ευρείας έκτασης δίκτυα αφορούν τη διασύνδεση γεωγραφικά απομακρυσμένων περιοχών όπως πόλεις και χωριά, και είναι δυνατόν να καλύπτουν μέχρι και υπερωκεάνιες αποστάσεις. Αντίθετα τα μητροπολιτικά δίκτυα συνήθως περιορίζονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή για παράδειγμα στα όρια ενός μεγάλου δήμου. Τα μητροπολιτικά δίκτυα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε δίκτυα διανομής και δίκτυα πρόσβασης. Τα δίκτυα πρόσβασης συγκεντρώνουν σε αντίστοιχους κόμβους την κίνηση που παράγεται από τους χρήστες του δικτύου, ενώ τα δίκτυα διανομής διασύνδεουν τους κόμβους πρόσβασης σε μεγαλύτερους κόμβους διανομής. Η διασύνδεση των μητροπολιτικών δικτύων με τα ευρεία έκτασης δίκτυα γίνεται συνήθως σε κυρίους του δικτύου ευρείας έκτασης.

Περαιτέρω τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν σε δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα. Τα δημόσια δίκτυα αποτελούν την μεγαλύτερη κατηγορία τηλεπικοινωνιακών δικτύων παρέχουν εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη και η διαχείριση τους γίνεται από δικτυακούς παρόχους ή φορείς. Τα παραδοσιακά δημόσια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα παρείχαν απλώς τηλεφωνικές υπηρεσίες, η κατάσταση όμως έχει διαφοροποιηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας αύξησης των απαιτήσεων σε *εύρος ζώνης (bandwidth)*.



Εικόνα 10 Απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (Α. Τζιουμάκης, 2011)

Πλέον τα δημόσια δίκτυα καλούνται να παρέχουν υπηρεσίες όπως τηλεφωνικές γραμμές, μισθωμένες γραμμές αλλά και υποδομές σε δίκτυα εναλλακτικών παροχών όπως πάροχοι Διαδικτύου και κινητής τηλεφωνίας. Αντίθετα τα ιδιωτικά δίκτυα είναι συνήθως ιδιοκτησία διαφόρων οργανισμών και υλοποιούνται για να καλύψουν τις εσωτερικές τηλεπικοινωνιακές ανάγκες τους. Τα ιδιωτικά δίκτυα διαχωρίζονται με

βάση τη γεωγραφική περιοχή που καλύπτουν σε Local Area Networks (με έκταση μερικών χιλιομέτρων) σε Metropolitan Area Networks και σε Wide Area Networks (με έκταση χιλιάδων χιλιομέτρων). Στις δύο τελευταίες κατηγορίες ο οργανισμός μισθώνει συνδέσεις από το δημόσιο δίκτυο για τη δημιουργία του ιδιωτικού δικτύου, οπότε το δίκτυο δεν είναι εξολοκλήρου ιδιόκτητο. (Ε. Νικόλα, 2012)

2.2 Οπτική Τεχνολογία

Η οπτική τεχνολογία καθιστά εφικτή τη διασύνδεση σε όλα τα επίπεδα της τηλεπικοινωνιακής υποδομής παρέχοντας τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης και κοινή υποδομή για μεγάλη γκάμα υπηρεσιών. Η ευρυζωνικότητα που παρέχεται από την οπτική τεχνολογία οφείλεται κυρίως στις οπτικές ίνες. Συνεπώς η οπτική τεχνολογία αποτελεί την προτιμητέα τεχνολογία μετάδοσης σε δίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από μερικά Mbit και για αποστάσεις που υπερβαίνουν το ένα χιλιόμετρο. Παράλληλα οι οπτικές ίνες δεν παρουσιάζουν ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, κατά συνέπεια τα οπτικά δίκτυα δεν επηρεάζονται από την παρουσία άλλων ενσύρματων ή ασύρματων δικτύων. Πέραν των οπτικών ινών στη διάδοση της οπτικής τεχνολογίας συντέλεσε η ανάπτυξη κατάλληλων δομικών στοιχείων όπως οπτικοί πομποί και ενισχυτές αλλά και η εδραίωση της πολυπλεξίας μήκους κύματος, τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

2.3 Οπτικές Ίνες ως Μέσο Δικτύωσης

Η Οπτική ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο τηλεπικοινωνιών και δικτύωσης, διότι είναι ευέλικτη και μπορεί να ομαδοποιείται. Είναι ιδιαίτερα επωφελής για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, επειδή το φως διαδίδεται μέσα από την ίνα με μικρή εξασθένηση συγκριτικά με τη μεγαλύτερη εξασθένηση του σήματος των ηλεκτρικών καλωδίων. Αυτό επιτρέπει να εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις με λίγους παραλήπτες αναμετάδοσης. Επιπλέον, τα φωτεινά σήματα αναλύσεων στην ίνα μπορεί να διαμορφώνονται σε ποσοστά τόσο υψηλά όσο 40 Gb/s κάθε ίνα μπορεί να μεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, το καθένα με διαφορετική πολύπλεξη με επιμερισμό μήκους κύματος του Φώτος (wavelength-division multiplexing). Σε μικρές αποστάσεις, όπως η δικτύωση μέσα σε ένα κτίριο, η ίνα εξοικονομεί χώρο

διότι μια ενιαία ίνα μπορεί να μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα ενιαίο ηλεκτρικό καλώδιο.

2.3.1 Πλεονεκτήματα Χρήσης Τεχνολογίας Οπτικών Ινών

Η υψηλή διεύθυνση της τεχνολογίας των οπτικών ινών στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες δεν είναι τυχαία, αλλά αντίθετα οφείλεται στον μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων της, τα οποία συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα⁵

Χαμηλό κόστος	Η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά, σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους παρόχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παρόχων.
Υψηλό bandwidth	Ξεπερνά κατά εκατοντάδες φορές αυτό ενός κοινού καλωδίου. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, που με τη σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία διαμεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP.
Μικρή εξασθένιση του σήματος	Χάρη στην υψηλή ποιότητα του γυαλιού που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης. Ακόμη και αν υπάρξει εξασθένιση σήματος, αυτό ενισχύεται πολύ εύκολα μέσω των κατάλληλων ενισχυτών.
Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια	Οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης, που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.
Αμιγώς ψηφιακό σήμα	Εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση.
Υψηλή διαθεσιμότητα	Οφείλεται κυρίως στην ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων, που μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς.
Error rate	Ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων σε καλώδια οπτικών ινών είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι είναι ο καλύτερος από τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης κατά 3 τάξεις μεγέθους.
Μικρές διαστάσεις & βάρος	Καθώς ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών, μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγαλύτερο και πιο βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών

2.3.2 Μειονεκτήματα Χρήσης Τεχνολογίας Οπτικών Ινών

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολία σύνδεσης των οπτικών ινών με άλλα εξαρτήματα, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Είναι χαρακτηριστικό ότι και μικρές ακόμη αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση αυτή μπορούν να προξενήσουν μεγάλη απώλεια του φωτεινού σήματος. Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας, που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των οπτικών ινών, αντιμετώπισε με επιτυχία την παραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία. Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωθεί, ιδιαίτερα λόγω του αυξημένου κόστους, που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα.

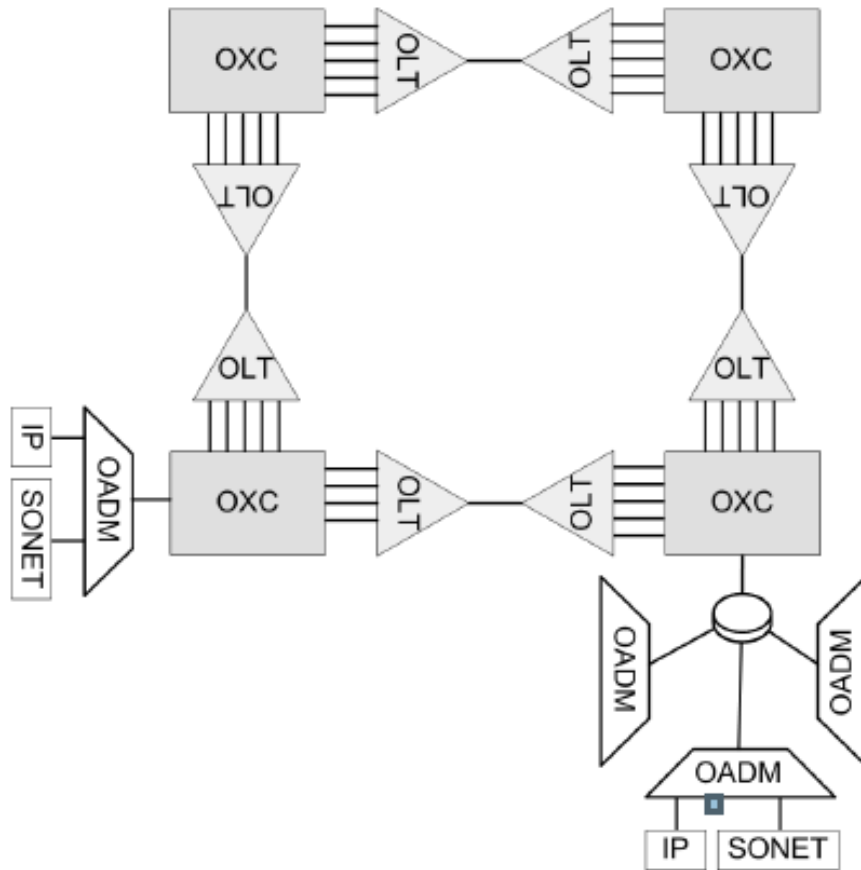
2.4 Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος

Στα πρώτα οπτικά δίκτυα (δίκτυα πρώτης γενιάς) η οπτική τεχνολογία χρησιμοποιούνταν μόνο στην μετάδοση ως μέσο για την παροχή μεγάλου εύρους ζώνης με μικρούς ρυθμούς εμφάνισης σφαλμάτων.

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν ζεύξεις που καλούνται οπτικά μονοπάτια μεταξύ των χρηστών τους, περισσότερα του ενός οπτικά μονοπάτια πολυπλέκονται πάνω από μια οπτική ίνα με την τεχνολογία πολυπλεξίας WDM.

Τα οπτικά μονοπάτια διασυνδέουν τον κόμβο προορισμού με τον κόμβο αποστολής μέσω ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι δρομολογούν και μετάγουν κατάλληλα τα οπτικά μονοπάτια μεταξύ των οπτικών ινών στην είσοδο και έξοδο τους.

Βασικά δομικά στοιχεία τα οποία καθιστούν δυνατή την υλοποίηση οπτικών δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος είναι οι τερματισμοί οπτικής γραμμής (Optical Line Terminals – OLTs) οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης- απομάστευσης (Optical Add/Drop Multiplexers – OADM) και οι οπτικές διασυνδέσεις (Optical Cross Connects – OXC)



Εικόνα 11 Δομικά στοιχεία σε δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (Κ. Βλάχος, 2009)

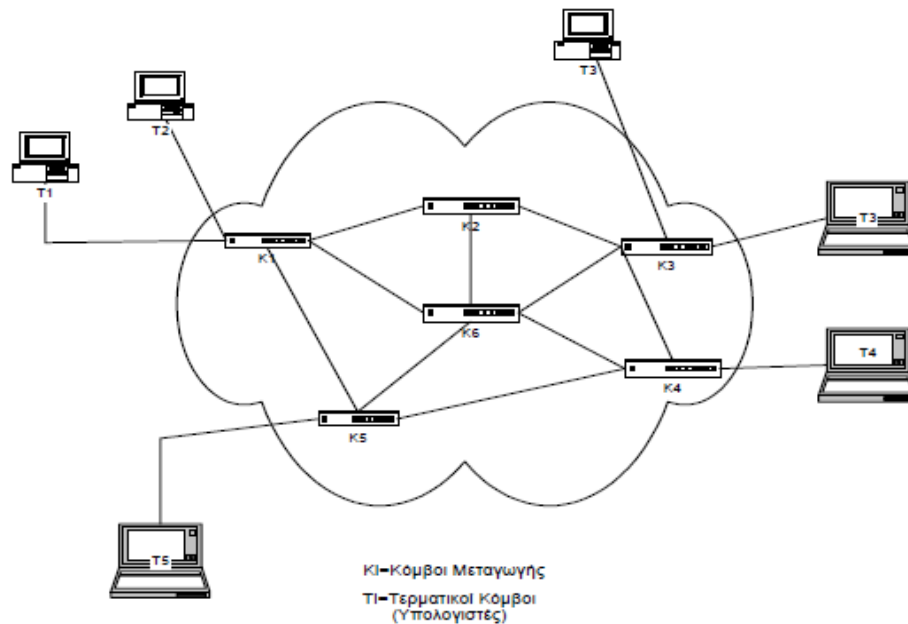
2.5 Δίκτυα Μεταγωγής

Στα δίκτυα μεταγωγής, τα δεδομένα που εισέρχονται στο δίκτυο από κάποια πηγή πληροφορίας (τερματική διάταξη), μεταφέρονται μέσω ενδιάμεσων κόμβων στον προκαθορισμένο δέκτη. Οι κόμβοι διακινούν τα δεδομένα προς τον προορισμό τους αποφασίζοντας ή όχι για την αποτελεσματική διακίνησή τους. Για την αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου, οι κόμβοι συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει εναλλακτικός δρόμος μεταξύ των τερματικών σημείων. Οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων στα δίκτυα μεταγωγής είναι οι εξής:

- Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit switching)
- Μεταγωγή πακέτων (Packet switching)
- Μεταγωγή μηνύματος (Message switching)

2.5.1 Μεταγωγή Κυκλώματος

Στη μεταγωγή κυκλώματος ένα φυσικό κανάλι προσφέρεται στους συνδρομητές αποκλειστικά σε όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας τους και καταργείται μόνο με τον τερματισμό της επικοινωνίας αυτής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος αποτελεί το τηλεφωνικό δίκτυο. (Π. Μουντρουίδου, 2002)

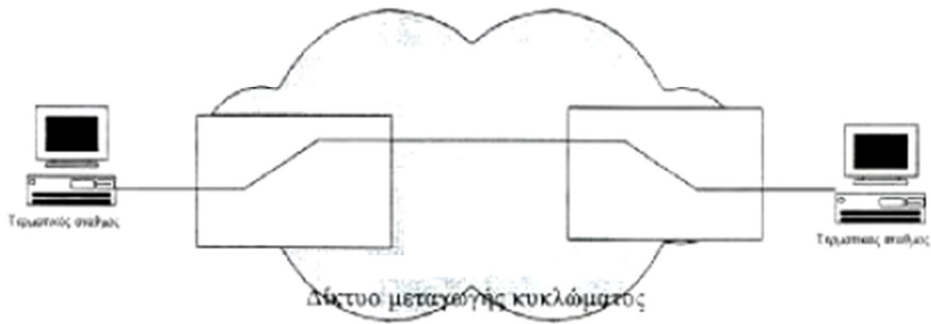


Εικόνα 12 Τηλεφωνικό δίκτυο, επικοινωνία δύο υπολογιστών με χρήση modem

Στη μέθοδο μεταγωγής κυκλώματος βασίζεται η τεχνολογία ATM⁴. Προγενέστερη της ATM (Εικόνα 5) υπήρξε η STM (Εικόνα 6) η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στα τηλεφωνικά δίκτυα όμως δεν κατόρθωσε να καλύψει τα όσα απαιτούν οι σύγχρονες ανάγκες κυρίως όμως να καλύψει το θέμα της στατιστικής πολυπλεξίας.

⁴ Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό της ITU

«το ATM είναι μια τεχνική πολυπλεξίας, στην οποία η ικανότητα μετάδοσης οργανώνεται με μη αφιερωμένες σχισμές (undedicated slots), οι οποίες γεμίζουν με κελιά (cells), ανάλογα με τις στιγμιαίες πραγματικές ανάγκες της κάθε εφαρμογής.»



Εικόνα 13 Δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος (Ε. Νικόλα, 2012)

Η μεταγωγή κυκλώματος είναι η πρώτη μέθοδος μεταφοράς πληροφορίας που υποστήριξαν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Για την επικοινωνία δυο τερματικών, έπρεπε να σχηματιστεί αγωγίμος δρόμος μεταξύ τους μέσω των ενδιάμεσων μεταγωγέων. (Ε. Νικόλα, 2012) (Jon-Olov Vatn, 2006)



Εικόνα 14 Δίκτυο μεταγωγής πακέτου (Ε. Νικόλα, 2012)

Ουσιαστικά, κατά την εγκατάσταση του κυκλώματος οι μεταγωγείς έκλειναν τους απαραίτητους διακόπτες ώστε να ενωθούν τα κατάλληλα κομμάτια της “διαδρομής”. Από την στιγμή που το κύκλωμα αυτό σχηματιζόταν, τα δυο τερματικά μπορούσαν να επικοινωνήσουν χρησιμοποιώντας το εύρος ζώνης του αγωγίμου δρόμου. (Κ. Στούμπου, 2008)

2.5.2 Μεταγωγή Πακέτου

Στη μεταγωγή πακέτων τα δεδομένα που πρόκειται να μεταφερθούν τεμαχίζονται σε πακέτα ομοίου μήκους. Στην τεχνική αυτή δεν υπάρχει εκ των προτέρων σχηματιζόμενο φυσικό κανάλι για τη συγκεκριμένη επικοινωνία των δύο συνδρομητών. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δικτύου αποφασίζουν για τη διαδρομή που θα διανύσει το κάθε πακέτο ώστε να φτάσει στον προορισμό του με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Συνεπώς οι κόμβοι του δικτύου θα πρέπει να έχουν επεξεργαστική ικανότητα για την προώθηση των πακέτων. Δύο διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση των πακέτων:

- τα αυτοδύναμα πακέτα (datagram)
- τα εικονικά κυκλώματα (virtual circuits)

Με τη μέθοδο datagram, κάθε πακέτο αντιμετωπίζεται από τους κόμβους του δικτύου σαν ένα ολοκληρωμένο μήνυμα. Κάθε κόμβος που παραλαμβάνει το πακέτο επιλέγει ποιος θα είναι ο επόμενος έτσι ώστε το δίκτυο να λειτουργεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Για τον λόγο αυτόν οι κόμβοι οφείλουν να διαθέτουν αρκετές πληροφορίες για τη δομή και την κατάσταση του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Τα πακέτα πληροφορίας ενώ έχουν τον ίδιο προορισμό δεν ακολουθούν όλα τον ίδιο δρόμο γι' αυτό υπάρχει πιθανότητα να φτάσουν με διαφορετική σειρά από αυτήν που στάλθηκαν. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη διάταξη που να τα τοποθετεί στην αρχική τους σειρά.

Στη μέθοδο εικονικού κυκλώματος (virtual circuit), πριν αρχίσει η αποστολή των πακέτων αποκαθίσταται μία σταθερή νοητή σύνδεση μεταξύ των δύο συνδρομητών από όπου στη συνέχεια θα περάσουν όλα τα πακέτα του μηνύματος. Δηλαδή ο δρόμος που θα ακολουθήσουν τα πακέτα καθορίζεται μια φορά στην αρχή και παραμένει ο ίδιος μέχρι να διακοπεί η επικοινωνία των δύο συνδρομητών. Η εξασφάλιση της ύπαρξης ελεύθερου δρόμου γίνεται με την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των δύο συνδρομητών που πρόκειται να επικοινωνήσουν. Στην τεχνική αυτή οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν απαιτείται να έχουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου, γιατί δεν αποφασίζουν για τη δρομολόγηση των μηνυμάτων αλλά απλά τα διακινούν στον προορισμό τους.

2.5.3 Μεταγωγή Μηνύματος

Στη μεταγωγή μηνύματος τα δεδομένα αποστέλλονται με τη μορφή μηνύματος που μεταδίδεται ολόκληρο ανεξάρτητα από το μέγεθός του. Το δίκτυο προωθεί το μήνυμα από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Κάθε κόμβος αποφασίζει ποιος θα είναι ο επόμενος που θα παραλάβει το μήνυμα, δηλαδή οι κόμβοι αποφασίζουν για τη δρομολόγηση του μηνύματος. Για τον λόγο αυτόν θα πρέπει στους κόμβους να υπάρχει αρκετή πληροφορία για τη δομή και την κατάσταση του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Παρά τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής, στην πράξη η μεταγωγή μηνύματος έχει αντικατασταθεί από τη μεταγωγή πακέτων.

2.5.4 Σύγκριση Δικτύων Μεταγωγής

Κάνοντας σύγκριση των τριών μεθόδων μεταγωγής προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μεταγωγή κυκλώματος είναι ιδανική μέθοδος για μετάδοση συνεχών σημάτων μεγάλης διάρκειας, π.χ. για μετάδοση φωνής (τηλεφωνικό δίκτυο) και εικόνας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται καμιά επεξεργασία των σημάτων από τη στιγμή που εγκαθίσταται το κύκλωμα (φυσικό κανάλι). Τέτοιες επεξεργασίες καθυστερούν τη μετάδοση, πράγμα που δεν είναι επιθυμητό για μεγάλα και συνεχή μηνύματα.
- Η μεταγωγή κυκλώματος δεν είναι αποδοτική για μετάδοση μηνυμάτων μικρής διάρκειας και σποραδικής φύσεως. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος που απαιτείται για να συνδεθούν οι χρήστες για κάθε σύντομη μετάδοση θα ήταν σημαντική επιβάρυνση, ενώ η διατήρηση της σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων θα σήμαινε σπατάλη ενός μεγάλου ποσοστού της χωρητικότητας της γραμμής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ενδείκνυται η μεταγωγή πακέτων.
- Η τεχνική εικονικού κυκλώματος συνδυάζει χαρακτηριστικά και των δύο προαναφερθέντων τύπων μεταγωγών.

- Όσον αφορά την αξιοπιστία του συστήματος η τεχνική datagram είναι πολύ καλύτερη γιατί σε περίπτωση βλάβης (π.χ. καταστροφής ενός κόμβου) το μήνυμα θα φτάσει στον προορισμό του μέσω άλλων εναλλακτικών δρόμων. Αντίθετα στη μεταγωγή κυκλώματος, καταστροφή του διαθέσιμου καναλιού θα έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια του μηνύματος. Στη μεταγωγή εικονικού κυκλώματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα απώλειας του μηνύματος ή ανάγκη επαναμετάδοσής του, αφού σε περίπτωση που χαλάσει κάποιος κόμβος όλα τα μηνύματα που διέρχονται από τον κόμβο αυτόν θα χαθούν.

2.6 Δίκτυα Πρόσβασης Φωνής και Δεδομένων

Τα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης στο κανάλι διάδοσης έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα δίκτυα μεταγωγής που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχουν ενδιάμεσοι κόμβοι μεταγωγής μεταξύ πομπού και δέκτη.
- Το μέσο επικοινωνίας είναι κοινό για όλους τους συνδρομητές.
- Σε μια συγκεκριμένη περιοχή του μέσου επικοινωνίας μόνο ένας συνδρομητής μπορεί κάθε στιγμή να εκπέμπει.
- Το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να λαμβάνεται από όλους τους συνδρομητές αρκεί να έχουν την κατάλληλη συσκευή πρόσβασης.

Μπορεί να υπάρχουν πολλοί πομποί που μοιράζονται χρονικά το ίδιο μέσο μετάδοσης. Οι πιο γνωστοί τύποι τέτοιων δικτύων είναι:

- Τα επίγεια ραδιοδίκτυα.
- Τα δορυφορικά δίκτυα.
- Τα τοπικά δίκτυα (LAN)

Οι δύο πρώτοι τύποι δικτύων αποτελούν αντικείμενο των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών. Στα δίκτυα αυτά κάθε σταθμός πρέπει να διαθέτει κεραίες εκπομπής και λήψεως και να βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια των υπολοίπων. Τα τοπικά δίκτυα LAN είναι εντελώς διαφορετικά από τους άλλους τύπους δικτύων αλλά

και εδώ το βασικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη κοινού μέσου επικοινωνίας για όλους τους συνδρομητές, το οποίο είναι ένα καλώδιο ή μία οπτική ίνα.

Το IP πρωτόκολλο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας ανοιχτών συστημάτων. Το σύνολο των διαδικτυακών εφαρμογών προϋποθέτουν την ύπαρξη του TCP/IP πρωτοκόλλου για την λειτουργία τους. Ως εκ τούτου και το σύνολο των φορέων που διαθέτουν κάποια δικτυακή υποδομή στηρίζονται στην οικογένεια πρωτοκόλλων TCP/IP για την υλοποίηση των υπηρεσιών που παρέχουν. Στο πλαίσιο αυτό η ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου TCP/IP και από το ευρύτερο Δίκτυο παρέχει το μέγιστο βαθμό διαλειτουργικότητας μεταξύ των επιμέρους Φορέων, διευκολύνοντας κατά πολύ την επικοινωνία.

Η μετάδοση φωνής πάνω από IP δίκτυα (VoIP) αποτελεί μία από τις ελκυστικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των δικτύων επικοινωνιών καθώς επιτρέπει την ολοκλήρωση σε ένα ενιαίο IP δίκτυο τόσο των δεδομένων όσο και της φωνής. Οι λόγοι που επέτρεψαν και οδηγούν την παραπάνω εξέλιξη είναι οι εξής:

- Οι σημερινές τεχνικές μεταγωγής της φωνής (PSTN) στηρίζονται στην PCM τεχνική δειγματοληψίας και κωδικοποίησης φωνής με αποτέλεσμα τη χρήση αφιερωμένου καναλιού 64Kbps για κάθε τηλεφωνική συνομιλία. Λόγω της μικρής ικανότητας για αναπροσαρμογή του παρόντος τηλεφωνικού δικτύου αλλά και της μεγάλης εξάπλωσης του, δεν είναι δυνατή η συνολική μεταβολή του παραπάνω χαρακτηριστικού ή τουλάχιστον μπορεί να επιτευχθεί με ασύμφορους όμως οικονομικούς όρους. Η σύγχρονη δυνατότητα κωδικοποίησης με χρήση DSPs και συμπίεση κάτω από τα 10Kbps επιτρέπει τη μετάδοση της φωνής με ενθυλάκωση αυτής σε κλασικά IP πακέτα.
- Τα δίκτυα δεδομένων διαθέτουν ένα συνεχώς αυξανόμενο εύρος ζώνης (bandwidth), ενώ από την άλλη πλευρά η εξέλιξη των CODECs και των τεχνικών συμπίεσης φωνής μειώνει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη μετάδοση της φωνής, με αποτέλεσμα την εξάλειψη των προβλημάτων που αρχικά παρουσιάστηκαν στην ποιότητα μετάδοσης της φωνής.
- Η χρήση κοινού ενεργού εξοπλισμού αλλά και τηλεπικοινωνιακών γραμμών για την υλοποίηση και των δύο δικτύων (φωνής και δεδομένων) συνεπάγεται

μικρότερο κόστος υλοποίησης, συντήρησης και εκπαίδευσης προσωπικού, ενώ από την άλλη μεριά επιτυγχάνεται η καλύτερη διαχείριση και παρακολούθηση του συνολικού δικτύου.

2.7 Οπτική Μεταγωγή Πακέτου

Αν και η εξέλιξη των οπτικών δικτύων είναι αδιαμφισβήτητη υπάρχουν θέματα τα οποία εξακολουθούν να ερευνώνται με τελικό σκοπό την πλήρη αξιοποίηση της παρεχόμενης ευρυζωνικότητας. Σημαντικό θέμα αποτελεί το γεγονός ότι τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν οπτικά μονοπάτια, συνεπώς είναι κατά βάση δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Βασικό μειονέκτημα της μεταγωγής κυκλώματος αποτελεί η αδυναμία αποδοτικής μετάδοσης εκρηκτικής κίνησης, δηλαδή κίνηση η οποία δεν παρουσιάζει σταθερό ρυθμό. Η εκρηκτική κίνηση οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας, ενώ δεν αξιοποιεί πλήρως το παρεχόμενο εύρος ζώνης σε περιόδους που η παραγόμενη κίνηση κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα.

Η έρευνα πάνω στην οπτική μεταγωγή πακέτων αποσκοπεί στην δημιουργία οπτικών κόμβων μεταγωγής πακέτου που λειτουργούν σε πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης από τους αντίστοιχους ηλεκτρονικούς. Οι οπτικοί κόμβοι μεταγωγής πακέτου αναμένεται ότι θα διαβάζουν την επικεφαλίδα του οπτικού πακέτου και θα το μετάγουν στην κατάλληλη θύρα εξόδου, ενώ επιπλέον θα πολυπλέκουν στατιστικά τα οπτικά πακέτα.

2.8 Διαχείριση Οπτικού Δικτύου

Μία από τις πιο σημαντικές και δύσκολες διαδικασίες όσο αφορά τα οπτικά δίκτυα, είναι η διαχείριση τους. Αυτό συμβαίνει για πάρα πολλούς λόγους.

Αν και η διαχείριση των οπτικών δικτύων είναι ένα θέμα τεράστιο για να καλυφθεί διεξοδικά, θα προσπαθήσουμε να μιλήσουμε λίγο για τις πιο σημαντικές του προεκτάσεις.

Πρώτα απ' όλα πρέπει να γνωρίζουμε ότι ένα οπτικό δίκτυο υλοποιείται στην κορυφή μίας υπάρχουσας SONET αρχιτεκτονικής, η οποία παρέχει δικά της σχήματα προστασίας και απόδοσης.

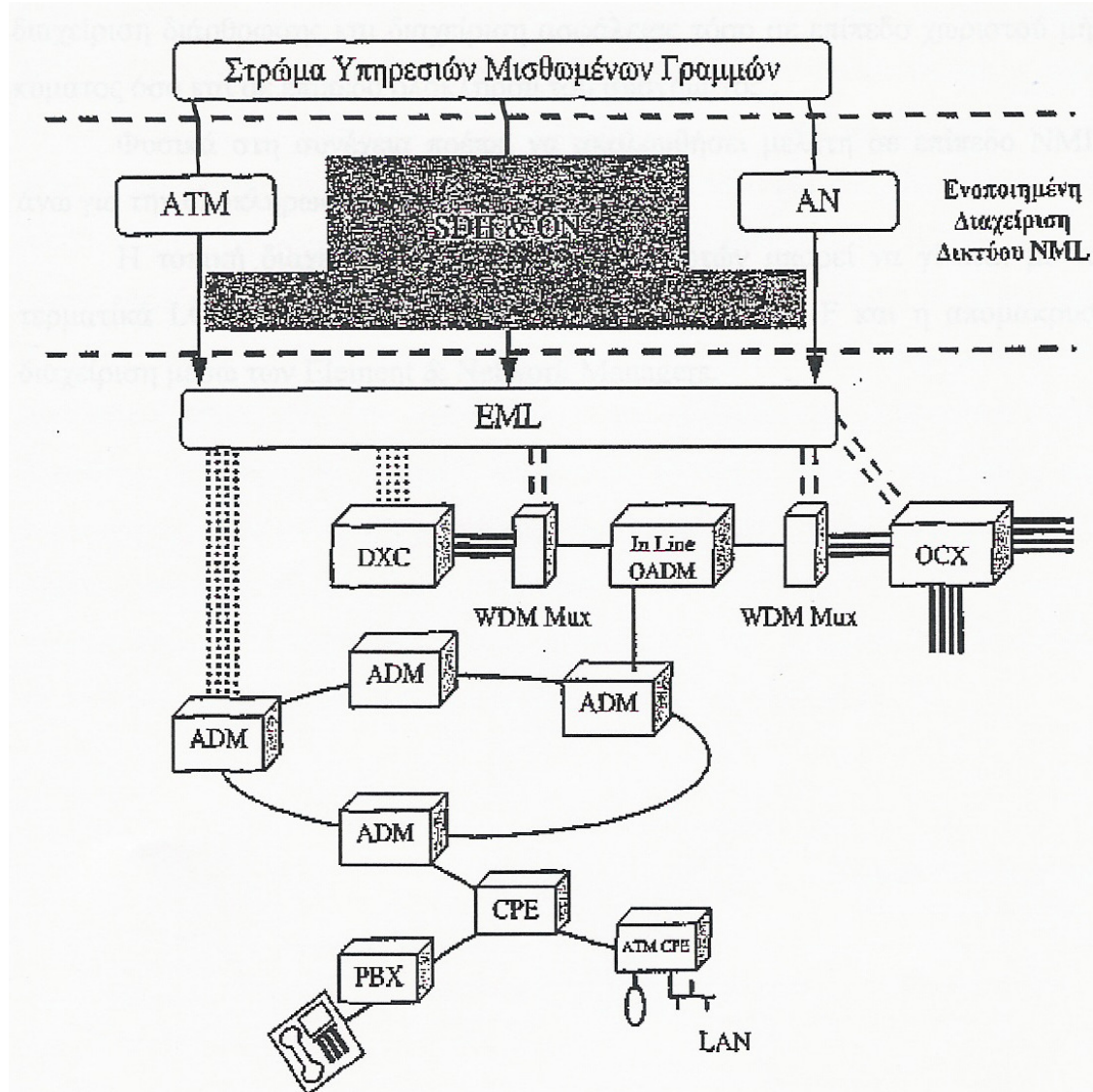
Χωρίς ένα «έξυπνο» σύστημα διαχείρισης του δικτύου, γίνεται εξαιρετικά δύσκολη η αποφυγή των συγκρούσεων μεταξύ του ηλεκτρικού και του οπτικού στρώματος του δικτύου.

Εκτός από την μεσολάβηση μεταξύ του οπτικού και του SONET επιπέδου, η διαχείριση του δικτύου πρέπει να είναι σε θέση να εμποδίζει τις συγκρούσεις, ή στην χειρότερη περίπτωση να δίνει την δυνατότητα στον παροχέα να αναγνωρίζει τις συγκρούσεις.

Επιπλέον, τα συστήματα διαχείρισης του δικτύου, πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθούν την απόδοση των σημάτων σε κάθε μήκος κύματος. Έτσι παρέχουν την δυνατότητα στον παροχέα να επιλύει προβλήματα που αφορούν το δίκτυο, απομονώνοντας προβληματικά μήκη κύματος καθώς και την περιοχή του προβλήματος. Μάλιστα, όσο ο αριθμός των μηκών κύματος σε κάθε οπτική ίνα αυξάνεται, αυξάνεται και η σημασία μιας αποδοτικής μεθόδου παρακολούθησης τους.

Το σύστημα ενοποιημένης διαχείρισης οπτικού δικτύου καλύπτει και την διαχείριση των ATM, SDH, WDM και των δικτύων πρόσβασης AN.

Ειδικά για το όλο οπτικό δίκτυο και την αρχιτεκτονική του μπορούμε να δούμε περισσότερες λεπτομέρειες στην σύσταση G.872(02/98) της ITU-T.



Εικόνα 15 Γενικό σύστημα διαχείρισης

Δεδομένου πάντως ότι το όλο οπτικό δίκτυο αποτελεί ένα επιπλέον στρώμα στο ήδη υφιστάμενο σύγχρονο στρώμα θα κάνουμε χρήση μέχρι ενός σημείου της υφισταμένης στον Ο.Τ.Ε. υποδομής διαχείρισης για EML και NML:

Για τα συστήματα της INTRACOM τα MV36/38

Για τα συστήματα της SIEMENS το TNMS

Για τα συστήματα της ANCO(ALCATEL) το 1353SH

Όλα τα παραπάνω συστήματα μπορούν να προσφέρουν τις βασικές λειτουργίες διαχείρισης όπως είναι η διαχείριση βλαβών, διαχείριση επίδοσης, διαχείρισης διάρθρωσης και διαχείρισης ασφάλειας τόσο σε επίπεδο χωριστού μήκους κύματος όσο και σε επίπεδο ολοκλήρου του συστήματος. Φυσικά στη συνέχεια πρέπει να

ακολουθήσει μελέτη σε επίπεδο NML και άνω για την ολοκλήρωση των τριών τεχνολογιών.

Η τοπική διαχείριση των συστημάτων αυτών μπορεί να γίνεται με τοπικά τερματικά LCT (Local Craft Terminal) μέσω διεπαφής F και η απομακρυσμένη διαχείριση μέσω των Element & Network Managers.

3. ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Εισαγωγή

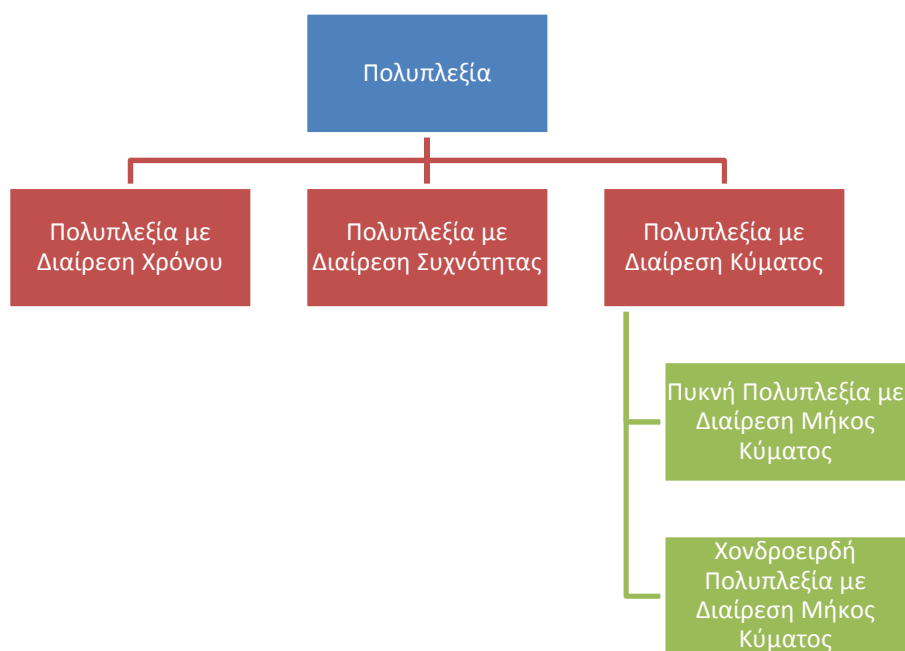
Αντικείμενο μελέτης του τρίτου κεφαλαίου θα αποτελέσει η παρουσίαση της τεχνολογίας πολυπλεξίας μήκους κύματος. Με την πολυπλεξία μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) γίνεται πλήρης αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών ινών.

Η διαρκής αύξηση της κυκλοφορίας στα σύγχρονα δίκτυα απαιτούσε λύσεις που θα εξασφάλιζαν μεγαλύτερη ταχύτητα και εύρος ζώνης. Η εμφάνιση των οπτικών ινών έδωσε αρχικά μία λύση, αλλά πολύ σύντομα οι χρησιμοποιούμενες real-time εφαρμογές δημιούργησαν την ανάγκη για κάποια καλύτερη λύση. Και αυτό γιατί η εγκατάσταση νέων οπτικών ινών ήταν πολύ ακριβή. Επίσης ήταν πολύ δύσκολο να αντικατασταθεί όλος ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός με οπτικό. Υπήρχαν δύο λύσεις για την αύξηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας:

- Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, το οποίο όμως αποτελεί μια πολυέξοδη λύση λόγω του απαιτούμενου εξοπλισμού. Επιπλέον, η τεχνολογία για τη μετάδοση ενός σήματος με ταχύτητα πάνω από 40 Gbps χωρίς λάθη είναι ακόμη σε πειραματική φάση
- Η αύξηση των σημάτων που διέρχονται μέσα από την οπτική ίνα. Πολλά μήκη κύματος, το καθένα από τα οποία μεταφέρει δεδομένα με ταχύτητα από 10 ως 40 Gbps, μπορούν να αυξήσουν το εύρος ζώνης κατά έναν παράγοντα ανάλογο με τον αριθμό των μηκών κύματος.

Η δεύτερη λύση οδήγησε στην **Πολυπλεξία Διαίρεσης του Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM)**. Με την τεχνολογία αυτή, πολλά μήκη

κύματος συνδέονται (couple) στην ίδια οπτική ίνα, δίνοντας έτσι εύρος ζώνης ίσο με το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης του κάθε μήκους κύματος. Η εκπομπή γίνεται από lasers και στη συνέχεια τα σήματα πολυπλέκονται πάνω σε μία μόνο οπτική ίνα. Μετά τη διέλευσή τους από την ίνα, τα σήματα πρέπει να διαχωριστούν και πάλι και το καθένα από αυτά να αντιστοιχιστεί σε ένα μόνο μήκος κύματος, Αυτό γίνεται με τη χρήση ρυθμιζόμενων οπτικών φίλτρων (tunable optical filters).



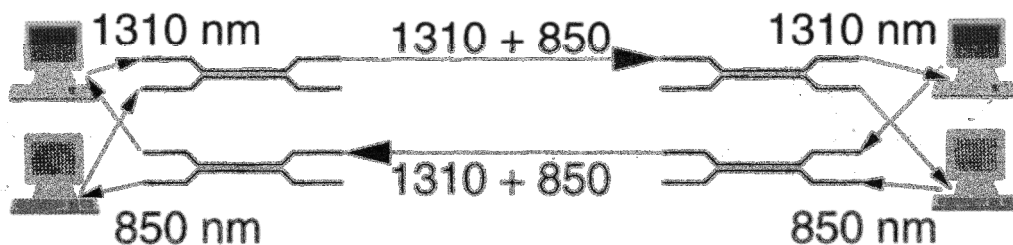
Εικόνα 1 Από τα τρία είδη πολυπλεξίας, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην πολυπλεξία με διαίρεση μήκος κύματος (Α. Αναγνωστάκη, 2011)

3.1 Εξελικτική Πορεία

Η πολυπλεξία μήκος κύματος εμφανίστηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1980. Τα πρώτα WDM οπτικά δίκτυα παρείχαν συνδέσεις σημείου προς σημείου⁵, είτε στατικές είτε χειρωνακτικά ρυθμιζόμενες. Ονομάστηκαν WDM 1^{ης} γενιάς και αποτελούντο από δύο μήκη κύματος με μεγάλη φασματική απόσταση

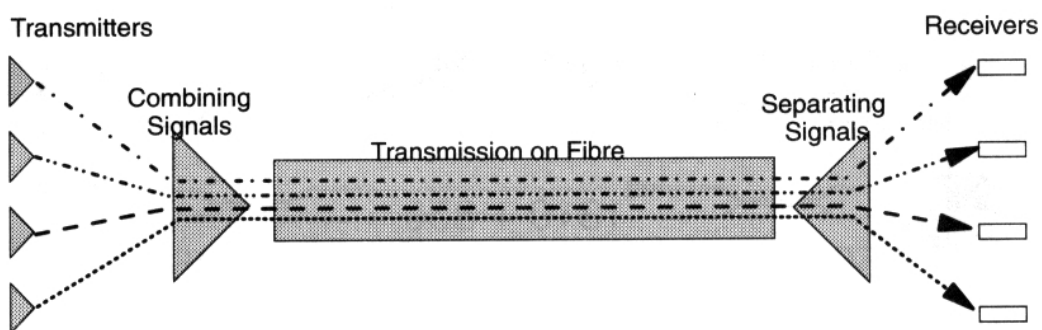
⁵ Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως όταν απαιτείται πολύ μεγάλη ταχύτητα στη μεταφορά των δεδομένων. Η απόσταση μεταξύ πομπού και αποδέκτη μπορεί να είναι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα και συνήθως χρησιμοποιούνται λιγότεροι από 10 οπτικοί ενισχυτές. Ο συνδυασμός της τοπολογίας αυτής με έναν OADM επιτρέπει τη συνεχή προσθήκη και αφαίρεση καναλιών.

(1310,1350nm). Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 εμφανίστηκε το WDM 2^{ης} γενιάς. Διέθετε από δύο έως οκτώ κανάλια στο φασματικό παράθυρο των 1550 nm και η φασματική της απόσταση ήταν μεγαλύτερη των 400GHz. Τα σημερινά συστήματα DWDM διαθέτουν 16 έως 40 κανάλια στο φασματικό παράθυρο των 1550 nm και καλύπτουν μεγάλη φασματική απόσταση 100 έως 200 GHz. Παράλληλα κάνουν χρήση σχημάτων αυτόματης εξίσωσης ισχύος μεταξύ των καναλιών. Στην τεχνολογία DWDM τα μήκη κύματος που συνδυάζονται πάνω στην οπτική ίνα είναι πάνω από 40, ενώ μπορούν να φτάσουν τα 128. Το κάθε μήκος κύματος μπορεί να εκπέμπει δεδομένα σε ταχύτητα 2,5 Gbps. Το ένα μήκος κύματος για τη WDM είναι 1310 nm ενώ το άλλο είναι 1550 nm ή 850 και 1310 nm. (Α. Αναγνωστάκη, 2011)



Εικόνα 2 Απλή WDM πολυπλεξία

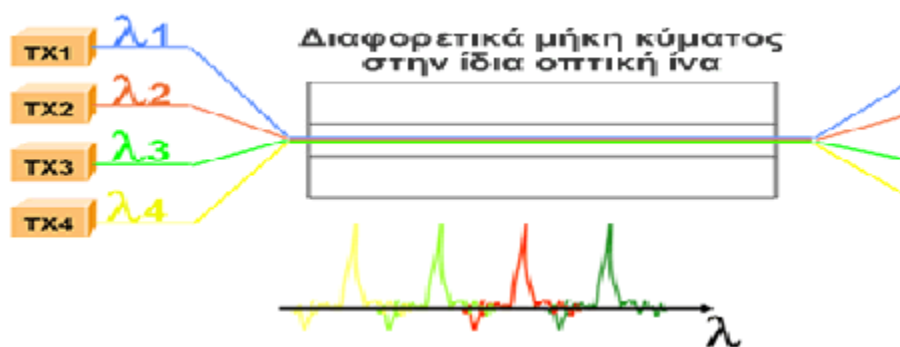
Η διαφορά μεταξύ WDM και DWDM βρίσκεται στο ότι στη DWDM τα κανάλια βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους. Η WDM και η DWDM μπορούν να συνυπάρξουν στο ίδιο σύστημα. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός WDM δικτύου είναι οικονομικές και εύκολες στην κατασκευή, καθότι τα εξαρτήματά τους λειτουργούν με ηλεκτρονική ταχύτητα.



Εικόνα 3 DWDM πολυπλεξία

3.2 Φιλοσοφία Πολυπλεξίας Μήκος Κύματος

Η τεχνολογία συνίσταται στην πολυπλεξία οπτικών σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και την μετάδοσή τους μέσα από μια μόνο οπτική ίνα. Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίχτηκε η νέα τεχνολογία ήταν η εξής: σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα. Είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας ή αλλιώς διαφορετικού μήκους κύματος μιας και μιλάμε για οπτικά σήματα, που το καθένα να μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα.



Εικόνα 4 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκος κύματος (Α. Αναγνωστάκη, 2011)

Έτσι, σε ένα σύστημα WDM, ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται υπό τη μορφή διακριτών μηκών κύματος ή καναλιών μέσω της οπτικής ίνας και αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Όπως και με τη μέθοδο TDM, που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία SONET/SDH, η ολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα της χωρητικότητας των εισερχόμενων σημάτων, με τη διαφορά ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του, αποκλειστικό, εύρος ζώνης.

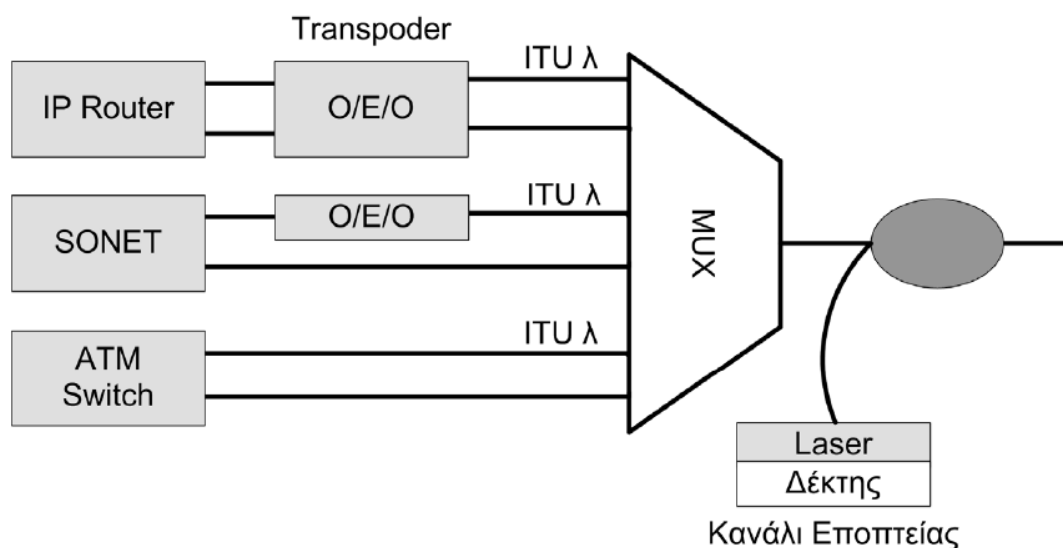
Το προφανέστερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM εντοπίζεται στη δυνατότητά της να παρέχει τεράστια αύξηση (πρακτικά απεριόριστη) της χωρητικότητας μετάδοσης.

3.3 Δομικά Στοιχεία

Τα WDM δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν οπτικές συνδέσεις από άκρο σε άκρο (οπτικά μονοπάτια) μέσω στοιχείων όπως οι τερματισμοί οπτικής γραμμής (optical line terminals –OLTs), οι οπτικές πολυπλέκτες προσθήκης/ απομάστευσης (optical add/drop multiplexer-OADMs) και οι οπτικές διασυνδέσεις (optical cross connects – OXCs). Τα οπτικά μονοπάτια παρέχουν μια ιδεατή τοπολογία πάνω στη φυσική τοπολογία που δημιουργείται από τους OADMs και OXCs, η οποία είναι δυνατόν να μεταβάλλεται δυναμικά ώστε να ανταποκριθεί στις ανάγκες του δικτύου.

3.3.1 Οπτικοί Τερματισμοί – OLTs

Χρησιμοποιούνται στα άκρα της από σημείο σε σημείο οπτικής σύνδεσης για την πολυπλεξία και αποπολυπλεξία μηκών κύματος . Τερματίζουν οπτικό κανάλι εποπτείας της λειτουργίας της οπτικής ζεύξης



Εικόνα 5 Οπτικός τερματισμός – Optical Line Terminal (OLT)

Τα δομικά στοιχεία του οπτικού τερματισμού είναι τα Transponders και οι WDM πολυπλέκτες. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά τους καταγράφονται ως εξής :

Transponders

- Μετατρέπουν το σήμα το οποίο έρχεται από του χρήστες του οπτικού δικτύου σε μορφή συμβατή με τη λειτουργία του δικτύου (ομοίως και στην αντίστροφη κατεύθυνση)
- Η πιο συνηθισμένη διεπαφή είναι η SDH κοντινής απόστασης (<2 km), ενώ υπάρχουν διεπαφές για ρυθμούς μετάδοσης 10 Gbps σε μικρότερες αποστάσεις
- Ενδέχεται να πλαισιώνουν την εισερχόμενη πληροφορία με πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση του δικτύου, ή να προσθέτει πληροφορία για ForwardError-Correction (FEC)

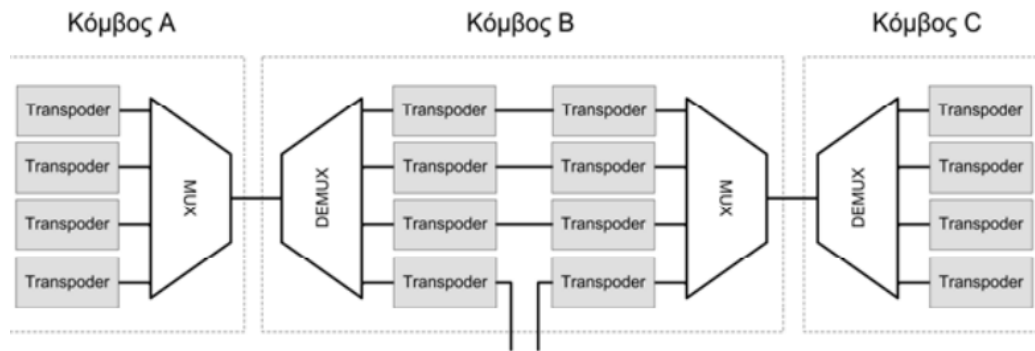
Πολυπλέκτες μήκους κύματος

- Πολυπλέκουν τα οπτικά σήματα πριν την τους εισαγωγή στην οπτική ίνα
- Υλοποιούνται με τεχνολογίες οπτικών φίλτρων όπως φίλτρα διηλεκτρικών επιστρώσεων, φράγματα περίθλασης Bragg σε ίνα, και φράγματα περίθλασης σε κυματοδηγούς

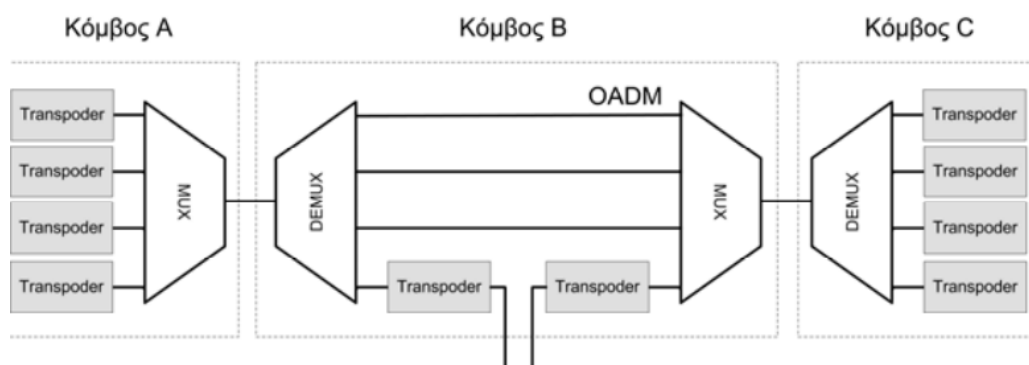
3.3.2 Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθήκης – Απομάστευσης – OADMs

Τα χαρακτηριστικά των οπτικών πολυπλεκτών προσθήκης καταγράφονται ως εξής :

- Αριθμός μηκών κύματος που υποστηρίζονται.
- Ποσοστό μηκών κύματος που είναι δυνατόν να προστεθούν και απομαστευθούν.
- Περιορισμοί όσον αφορά στις δυνατότητες προσθήκης και απομάστευσης συγκεκριμένων μηκών κύματος
- Ευκολία στην πρόσθεση και απομάστευση μηκών κύματος.
- Επεκτασιμότητα αναφορικά με τον αριθμό των υποστηριζόμενων μηκών κύματος.
- Επίδραση των λειτουργιών προσθήκης και απομάστευσης στο φυσικό επίπεδο (π.χ. απώλειες και παραμόρφωση).
- Δυναμική αρχιτεκτονική με δυνατότητες απομακρυσμένης διαχείρισης.



Εικόνα 6 Ζεύξη χωρίς OADM. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται υπερβολικός αριθμός transponders



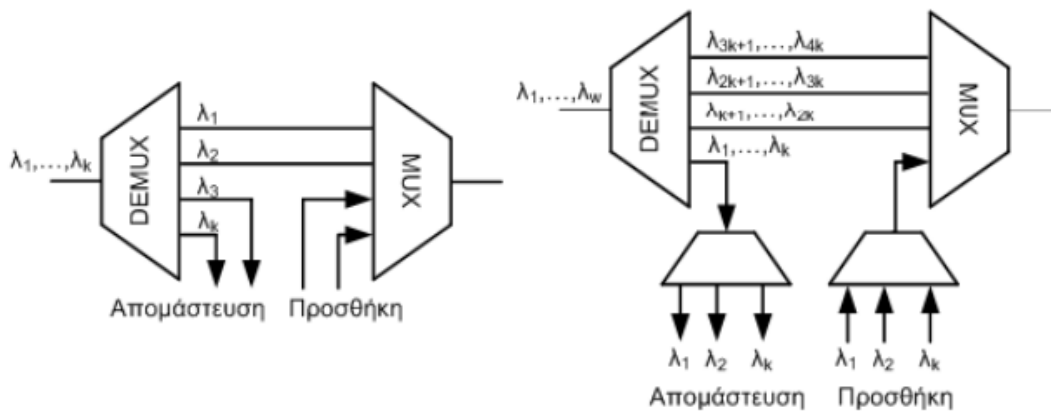
Εικόνα 7 Ζεύξη με OADM

Οι στατικοί OADMs προσθέτουν/απομαστεύουν μήκη κύματος στο οπτικό δίκτυο με βάση σχεδιασμό που έχει γίνει εκ των προτέρων. Όσον αφορά την αρχιτεκτονική τους τα OADMs διακρίνονται σε παράλληλης αρχιτεκτονικής σπονδυλωτής αρχιτεκτονικής, σειριακής αρχιτεκτονικής και απομάστευσης ζώνης.

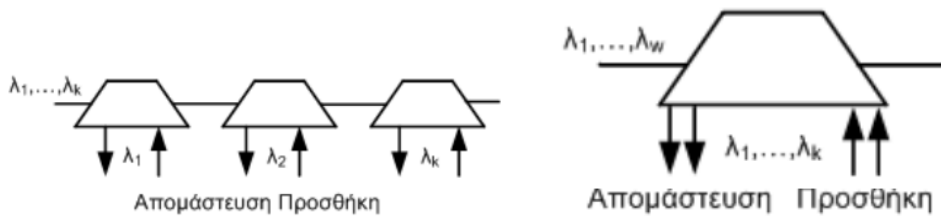
Παράλληλη (parallel) αρχιτεκτονική OADM

- Όλα τα εισερχόμενα μήκη κύματος αποπολυπλέκονται και μερικά τερματίζονται
- Τα τερματιζόμενα μήκη κύματος είναι δυνατόν να επιλέγονται αυθαίρετα
- Οι απώλειες του πολυπλέκτη είναι σταθερές
- Οι απώλειες είναι αυξημένες λόγω της αποπολυπλεξίας του συνόλου των μηκών κύματος

- Εισάγεται παραμόρφωση στα οπτικά σήματα λόγω διαδοχικής πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας



Εικόνα 8 Παράλληλη και σπονδυλωτή αρχιτεκτονική OADMs



Εικόνα 9 Σειριακή αρχιτεκτονική και αρχιτεκτονικής απομάστευσης

Σπονδυλωτή (modular) αρχιτεκτονική OADM

- Αποπολυπλεξία και πολυπλεξία γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο τα εισερχόμενα μήκη κύματος χωρίζονται σε ζώνες (wavebands), ενώ στο δεύτερο στάδιο οι ζώνες χωρίζονται στα ξεχωριστά μήκη κύματος
- Μείωση της επίδρασης της πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας στην παραμόρφωση και την εξασθένηση του οπτικού σήματος
- Η σπονδυλωτή παράλληλη αρχιτεκτονική αποτελεί τη μοναδική λύση για μεγάλο αριθμό μηκών κύματος

Σειριακή (serial) αρχιτεκτονική OADM

- Αποτελείται από πολλά στάδια προσθήκης/ απομάστευσης, κάθε ένα από τα οποία προσθέτει ή απομαστεύει ένα μοναδικό μήκος κύματος
- Δεν υπάρχουν παραμορφώσεις (τα μήκη κύματος αποπολυπλέκονται μόνο στο δέκτη)
- Η εισαγωγή ενός επιπλέον σταδίου στη σειριακή αρχιτεκτονική προκαλεί διακοπή λειτουργίας των υπολοίπων
- Το κόστος αυξάνει με τον αριθμό σταδίων

Αρχιτεκτονική απομάστευσης ζώνης (band-drop)

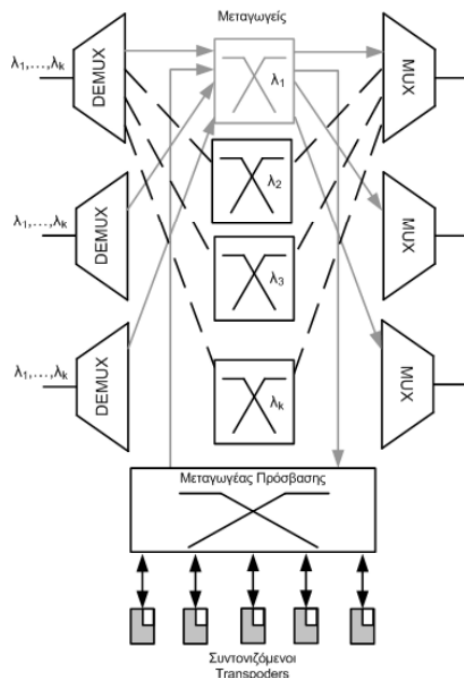
- Σε κάθε στάδιο απομαστεύεται ή προστίθεται μόνο μία ζώνη, ενώ η επιλογή ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος μέσα στην εν λόγω ζώνη γίνεται σε δεύτερο στάδιο αποπολυπλεξίας (συμβιβασμός μεταξύ σειριακής και παράλληλης αρχιτεκτονικής)
- Καθιστά ιδιαιτέρως δύσκολο τον προγραμματισμό των μηκών κύματος στο δίκτυο
- Κάθε μήκος κύματος υφίσταται μη-προβλέψιμη εξασθένηση και παραμόρφωση

3.3.3 Οπτικές Διασυνδέσεις – OXCs

Σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό από μήκη κύματος και με πολύπλοκες τοπολογίες οι OADMs αντικαθίστανται από OXCs

- Παροχή οπτικών μονοπατιών με αυτοματοποιημένο τρόπο
- Προστασία των οπτικών δικτύων από βλάβες στον εξοπλισμό και τις οπτικές ίνες
- Εποπτεία της ποιότητας σήματος των διακινούμενων μηκών κύματος
- Πολυπλεξία και συγκέντρωση κίνησης που κυμαίνεται από οπτικούς ρυθμούς μετάδοσης ως και πολύ χαμηλότερους

- Μετατροπή μήκους κύματος για την πλήρη αντιστοίχιση των διαθέσιμων μηκών κύματος σε οπτικά μονοπάτια



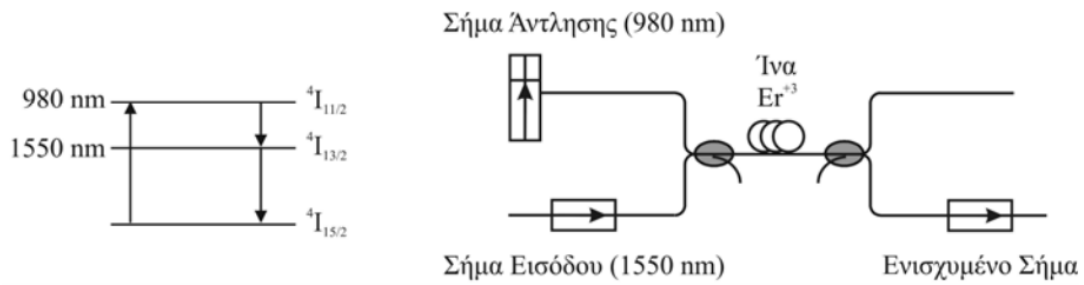
- Κεντρικός μεταγωγέας
- Ένας μεταγωγέας για κάθε μήκος κύματος του δικτύου
- Ένας μεταγωγέας για πρόσβαση σε τοπικούς χρήστες
- Συγκρότημα θυρών
- OLTs για τη διασύνδεση της OXC με της οπτικές ίνες εισόδου και εξόδου

Εικόνα 10 Αρχιτεκτονική αμιγώς οπτικής OXC

3.3.4 Οπτικοί Ενισχυτές

Οι οπτικοί ενισχυτές εκτελούν τις εξής λειτουργίες

- Άντληση (διέγερση) των ιόντων ερβίου από οπτική ακτινοβολία στα 980 nm
- Εξαναγκασμένη αποδιέγερση των ιόντων ερβίου από το σήμα στη C-Band (1530- 1565 nm), οπότε εκπέμπονται φωτόνια ιδίων χαρακτηριστικών με αυτά του σήματος
- Επέκταση της περιοχής μηκών κύματος λειτουργίας πέραν της C-Band με χρήση προσμίξεων υπερβίου (L-Band 1565-1625 nm) και θουλίου (S-Band 1460-1530 nm)



Εικόνα 11 Οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου

Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού και Raman

- Ενισχυτές ημιαγωγού
- Είναι διοδικά laser από υλικό InGaAsP χωρίς ανάδραση (καθρέπτες)
- Η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων προκαλείται από επανασύνδεση ηλεκτρονίων και οπών
- Λειτουργία στις S-, L-, και C-Band με κατάλληλη επιλογή της μοριακής αναλογίας In, Ga, As, P

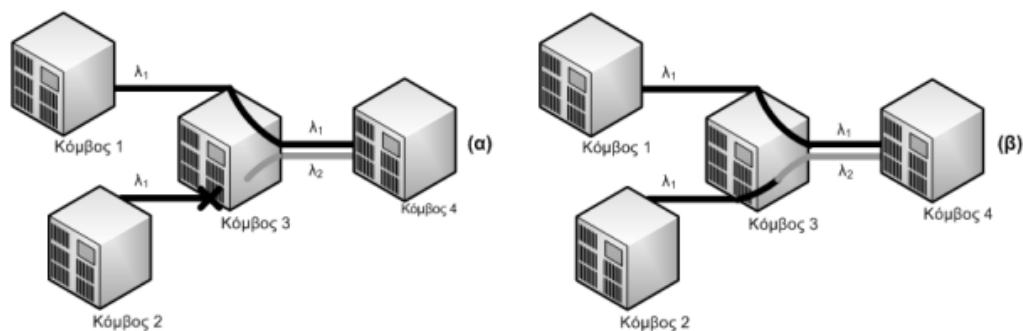
Ενισχυτές Raman

- Περιορισμένη εφαρμογή σε WDM συστήματα λόγω φαινομένων παραμόρφωσης
- Βασίζονται στο φαινόμενο της μεταφοράς ισχύος από ένα ισχυρό σήμα άντλησης σε μεγάλη συχνότητα (άρα μεγάλη ενέργεια ανά φωτόνιο) σε ένα ασθενέστερο σήμα με μικρότερη συχνότητα
- Η σύζευξη των δύο σημάτων γίνεται μέσω των ταλαντώσεων πλέγματος στην ίνα
- Λειτουργία στην C-Band και την S-Band

3.3.5 Μετατροπείς Μήκους Κύματος

Η μετατροπή μήκους κύματος είναι αναγκαία για

- Την κωδικοποίηση δεδομένων σε μήκη κύματος συμβατά με αυτά που
- χρησιμοποιούνται στο δίκτυο (π.χ. Transponders)
- Τη διασύνδεση WDM δικτύων τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος
- κύματος
- Την ευέλικτη αξιοποίηση των διαθέσιμων μηκών κύματος και συνεπώς τη
- μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου



Εικόνα 12 Δίκτυα WDM χωρίς και με μετατροπή μήκους κύματος

3.4 Πλεονεκτήματα

Διαφάνεια (Transparency)

Δεδομένου ότι η WDM αποτελεί μια αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο, είναι δυνατή η διαφανής υποστήριξη τόσο της TDM τεχνολογίας όσο και δεδομένων τυποποιήσεων όπως ATM, Gigabit Ethernet, ESCON και Fibre Channel, επιτυγχάνοντας τη διασύνδεση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του κοινού φυσικού μέσου.

Κλιμάκωση Μεγέθους (Scalability)

Επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της οπτικής ίνας, ειδικότερα σε επίπεδο, μητροπολιτικών και επιχειρησιακών δικτύων.

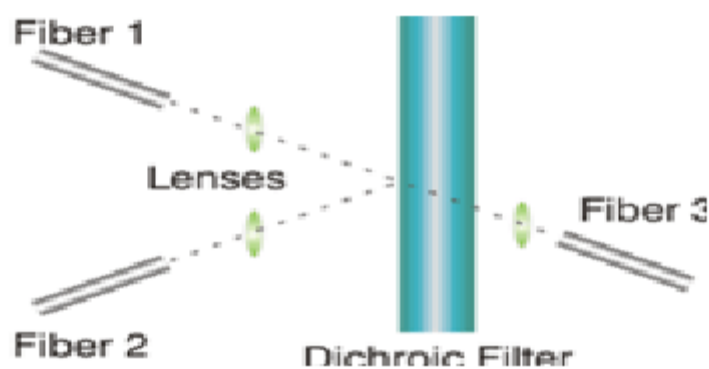
Δυναμική Παροχή Εύρους Ζώνης (Dynamic Provisioning)

Η ταχύτατη, απλή και με δυναμικό τρόπο παροχή των δικτυακών συνδέσεων, δίνουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων για ικανοποίηση αναγκών των χρηστών μέσα σε διάστημα ολίγων ημερών παρά μηνών.

3.5 Εφαρμογές WDM

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει bulk optics WDM. Κατασκευασμένο από ξεχωριστούς φακούς και φίλτρα, ένα διχρωματικό φίλτρο βρίσκεται στο κέντρο του WDM. Τα διχρωματικά φίλτρα, βασίζονται σε ιντερφερομετρικές τεχνικές, αντανακλούν το φως, το οποίο δεν μεταδίδουν.

Κοιτάζοντας το σχήμα θεωρούμε ότι η ίνα No 1 μεταφέρει δύο μήκη κύματος, 850nm και 1310nm. Επίσης υποθέτουμε ότι το διχρωματικό φίλτρο περνάει μήκη κύματος μεγαλύτερα από τα 1100nm, τα οποία είναι γνωστά ως long-wave pass (LWP) φίλτρα. Καθώς το φως βγαίνει από την ίνα No 1 περνάει πρώτα μέσα από τους φακούς, οι οποίοι εστιάζουν το φως σε ένα σημείο. Καθώς το φως χτυπά στο φίλτρο, το φως με μήκος κύματος 1310nm περνάει μέσα από το φίλτρο και συλλέγεται από την ίνα No 3. Το φως με μήκος κύματος τα 850nm αντανακλάται από το φίλτρο και συλλέγεται από την ίνα No 2. Έτσι οι πληροφορίες και στα δύο αποτελεσματικά ταξινομημένα μήκη κύματος μπορούν να αποκωδικοποιηθούν ανεξάρτητα. Το διχρωματικό φίλτρο μπορεί να προσφέρει μια πολλή καλή αναλογία απομόνωσης στο τρόπο μετάδοσης, αλλά έχει «φτωχή» απομόνωση στον τρόπο ανάκλασης. Συνήθως αυτοί οι τύποι WDM χαρακτηρίζουν και short-wave pass (SWP) και LWP φίλτρα και συνδυασμός αυτών των φίλτρων επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση των συστημάτων.



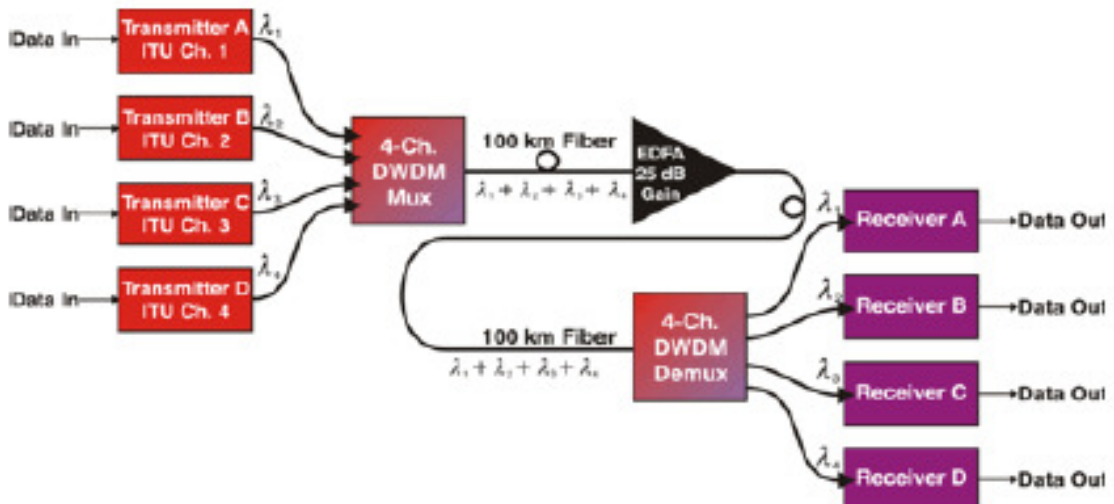
Εικόνα 13 Bulk optic WDM

3.6 Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (DWDM)

Η Πυκνή Πολυπλεξία Διαχωρισμού Μήκους Κύματος (DWDM) είναι μια τεχνολογία οπτικών δικτύων η οποία χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η χωρητικότητα του μέσου μεταφοράς των δεδομένων (οπτικές ίνες).

Το Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) ανατρέπει την τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων αυξάνοντας την χωρητικότητα μιας εμπεδωμένης (εγκατεστημένης) ίνας. Αυτή η αύξηση σημαίνει ότι τα εισερχόμενα οπτικά σήματα είναι προσδιορισμένα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος μέσα σε μια καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων, έπειτα πολυπλέκεται μέσα στην ίνα. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει σε πολλαπλά κανάλια εικόνας, ήχου και δεδομένων να μεταδοθούν μέσω μιας ίνας, ενώ διατηρείται η απόδοση του συστήματος και η αύξηση των συστημάτων μεταφοράς. Αυτή η τεχνολογία ανταποκρίνεται στην αυξανόμενη ζήτηση για αποδοτική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων δουλεύοντας με διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης, όπως SONET/SDH, ενώ αυξάνεται το εύρος ζώνης. (N. Πλέρος, 2004)

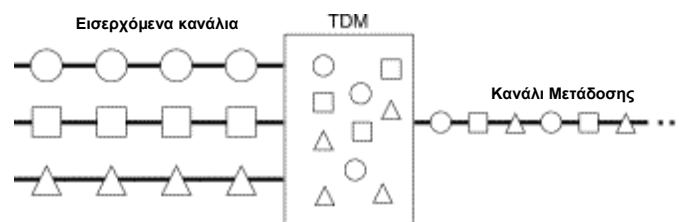
Τα στοιχεία του ενισχυτή οπτικών ινών ενός DWDM συστήματος παρέχουν μια αποδοτική οικονομικά μέθοδο η οποία αντιλαμβάνεται και ενισχύει οπτικά σήματα χωρίς να τα μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα. Επιπρόσθετα, το DWDM ενισχύει ευρεία κλίμακα από μήκη κύματος στην περιοχή των 1550nm. Για παράδειγμα, με ένα DWDM σύστημα πολυπλεξίας 16 μηκών κύματος σε μια ενιαία οπτική ίνα, τα φέροντα μπορούν να μειώσουν τον αριθμό των ενισχυτών κατά 16 σε κάθε περιοχή αναγέννησης. Χρησιμοποιώντας λιγότερους αναγεννητές στα μεγάλης απόστασης δίκτυα έχει σαν αποτέλεσμα λιγότερες διακοπές και ενισχυμένη αποδοτικότητα



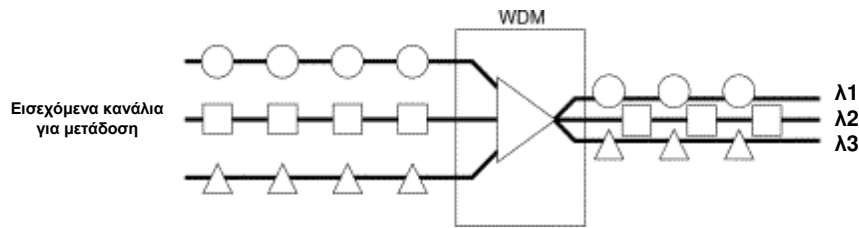
Εικόνα 14 Εφαρμογή DWDM συστήματος

Η DWDM λειτουργεί με εντελώς διαφορετικό τρόπο σε σχέση με την Πολυπλεξία Διαχωρισμού Χρόνου (TDM – Time Division multiplexing).

Η TDM χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος το οποίο διαχωρίζει σε διακριτές χρονοθυρίδες (time slots) ίσου μεγέθους τις οποίες χρησιμοποιεί για να μεταδώσει τα εισερχόμενα σήματα χρησιμοποιώντας κυκλική δειγματοληψία (round – robin).



Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, αν και δίκαια ως προς το τρόπο που μεταχειρίζεται τα προς μετάδοση σήματα, αυτή η μέθοδος πολυπλεξίας είναι αναποτελεσματική διότι η χρονοθυρίδες παραμένουν δεσμευμένες για τα συγκεκριμένα κανάλια ακόμα και αν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση. Η WDM αντίθετα διαμορφώνει τα εισερχόμενα οπτικά σήματα σε συγκεκριμένες συχνότητες φωτός (μήκη κύματος, ή λάμδα) μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.



Αυτός ο τρόπος μετάδοσης είναι όμοιος με τον τρόπο μετάδοσης ραδιοφωνικού σήματος με διαμόρφωση συχνότητας (FM), όπου κάθε κανάλι έχει τη δική του συχνότητα και μπορούμε λάβουμε το περιεχόμενό του συντονίζοντας το δέκτη στη συχνότητα αυτή. Αντί για τη λέξη «λάμδα» πολλές φορές χρησιμοποιείται η λέξη «χρώμα» για να περιγράψει τα διακριτά κανάλια ενός WDM διαμορφωμένου σήματος, αφού διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός αντιστοιχούν σε διαφορετικά χρώματα.

Σε ένα WDM σύστημα, κάθε ένα από τα μήκη κύματος προωθείται στην ίνα, και τα σήματα αποπολυπλέκονται στο λαμβάνον άκρο. Όπως στο TDM, η προκύπτουσα χωρητικότητα είναι ένα σύνολο των εισερχόμενων σημάτων, αλλά το WDM μεταφέρει κάθε εισερχόμενο σήμα ανεξάρτητα από τα άλλα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του αφιερωμένο εύρος ζώνης και όλα τα σήματα φθάνουν συγχρόνως αντί να διαχωρίζονται και να μεταφέρονται σε χρονοθυρίδες.

Η διαφορά μεταξύ του WDM και του DWDM είναι απλώς διαφορά μεγέθους. Το DWDM τοποθετεί τα μήκη κύματος πιο κοντά μεταξύ τους από το WDM, και επομένως έχει μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα. Τα όρια αυτού του διαστήματος δεν είναι ακριβώς γνωστά, και πιθανώς δεν έχουν επιτευχθεί, αν και από το μέσο του έτους 2000 είναι διαθέσιμα συστήματα με μια ικανότητα μεταφοράς 128 λάμδα σε μια ίνα.

Το DWDM έχει και διάφορα άλλα ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Αυτά περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ενίσχυσης όλων των μηκών κύματος αμέσως χωρίς να μεσολαβήσει η μετατροπή τους σε ηλεκτρικά σήματα, και τη δυνατότητα μεταφοράς σημάτων διαφορετικών ταχυτήτων και είδους διαφανώς πάνω από μία ίνα (ανεξαρτησία στο είδος πρωτοκόλλου και στο ρυθμό μετάδοσης).

Τα οπτικά σήματα αποσβένονται καθώς ταξιδεύουν μέσω της ίνας και πρέπει να αναπαραχθούν περιοδικά στα δίκτυα κορμού. Στα οπτικά δίκτυα SONET/SDH που χρησιμοποιούνταν ευρέως πριν από την εισαγωγή του DWDM, κάθε ξεχωριστή ίνα

που μεταφέρει ένα μοναδικό οπτικό σήμα - τυπικά στα 2.5 Gbps - απαιτεί έναν χωριστό αναγεννητή ηλεκτρικού σήματος κάθε 60 έως 100 χλμ

Η τεχνολογία που επιτρέπει την άμεση ενίσχυση ενός σήματος WDDM, είναι οι οπτικοί ενισχυτές. Οι οπτικοί ενισχυτές λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη ζώνη του φάσματος συχνοτήτων και βελτιστοποιούνται για τη λειτουργία με τις υπάρχουσες ίνες, που καθιστά δυνατή την ενίσχυση των κυμάτων φωτός και με αυτόν τον τρόπο την αύξηση της διαδρομής τους χωρίς να είναι αναγκαία η μετατροπή τους ξανά σε ηλεκτρική μορφή.

Ένας μοναδικός οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει όλα τα κανάλια σε μια ίνα DWDM χωρίς να αποπολυπλέξει και να επεξεργαστεί το καθένα ξεχωριστά, με ένα κόστος που πλησιάζει αυτό ενός αναγεννητή. Ο οπτικός ενισχυτής ενισχύει μόνο τα σήματα - δεν τα αναδιαμορφώνει, επαναχρονίζει και δεν τα αναμεταδίδει όπως ένας αναγεννητής - έτσι τα σήματα μπορεί ακόμα να χρειάζονται περιοδική αναγέννηση. Όμως ανάλογα με το σχεδιασμό του δικτύου, τα σήματα μπορούν τώρα να διαβιβαστούν από 600 μέχρι χιλιάδες χιλιόμετρα χωρίς αναγέννηση. Οι οικονομίες κλίμακας που προκύπτουν από την μη ανάγκη για χρήση αναγεννητών είναι παραπάνω από προφανείς.

Έχουν γίνει επιδείξεις με ενισχυτές οπτικών-ινών εξαιρετικά ευρείας ζώνης που μπορούν να ενισχύσουν σήματα που μεταφέρουν πάνω από 100 κανάλια (ή μήκη κύματος) του φωτός. Ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί έναν τέτοιο ενισχυτή θα μπορούσε εύκολα να χειριστεί ένα terabit πληροφορίας. Με αυτό το ρυθμό μετάδοσης, θα ήταν δυνατό να διαβιβαστούν τα σήματα των τηλεοπτικών καναλιών όλου του κόσμου ταυτόχρονα, ή περίπου μισό εκατομμύριο κινηματογραφικές ταινίες συγχρόνως.

Η σημασία του DWDM είναι τεράστια στο να δίνει την δυνατότητα στους παρόχους να παρέχουν όλο και περισσότερο εύρος ζώνης στους χρήστες. Το DWDM είναι κρίσιμο συστατικό των οπτικών δικτύων μιας και επιτρέπει μετάδοση video, πολυμέσων, δεδομένων και φωνής πάνω στην οπτική ίνα.

Φυσικά η έκρηξη στην ανάγκη των χρηστών για εύρος ζώνης, συνοδεύεται απαραίτητα κι από την αλλαγή των δικτύων των παρόχων. Μία έρευνα που διενεργήθηκε το 1995, έδειξε ότι 70-80% των δικτύων αποτελούνταν από ίνες. Σήμερα πολλοί πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου πλησιάζουν το 100%, σε πολλά σημεία του δικτύου τους.

Εδώ παρουσιάζεται κι ένα ακόμα πρόβλημα, αυτό της υλοποίησης πολλών διαφορετικών τεχνολογιών πάνω σ' ένα δίκτυο. Οι ανάγκες των χρηστών καθιστούν

απαραίτητο στους πάροχους να έχουν διάφορες οικονομικές τεχνολογίες εξαπλωμένες σ' όλο τους το δίκτυο.

Η χρήση του DWDM επιτρέπει στους παροχους υπηρεσιών να προσφέρουν e-mail, video και πολυμέσα που να μεταφέρονται σαν δεδομένα Internet Protocol (IP), με ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM), καθώς και φωνή που να μεταφέρεται πάνω σε SONET/SDH. Παρόλο που αυτά τα formats (IP, ATM και SONET/SDH) προσφέρουν μοναδικές δυνατότητες διαχείρισης του εύρους ζώνης, μπορούν και οι τρεις να μεταφερθούν πάνω στο οπτικό στρώμα, χρησιμοποιώντας DWDM. Έτσι οι πάροχοι, έχουν την ευελιξία μέσω ενός δικτύου να απαντούν στις απαιτήσεις των χρηστών. (Α. Τζιουμάκης, 2011)

Αρχίζοντας με την τεχνολογία DWDM, οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου μπορούν να εγκαταστήσουν μια επεκτάσιμη υποδομή που τους επιτρέπει να προσθέσουν νέα συστήματα TDM για σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες επέκτασης. Το DWDM δίνει επίσης την ευελιξία να αυξηθεί η χωρητικότητα σε οποιοδήποτε μέρος του δικτύου, κάτι που δεν προσφέρει καμία άλλη τεχνολογία. Έτσι οι πάροχοι μπορούν να αναγνωρίσουν συγκεκριμένες προβληματικές περιοχές που έχουν υπερφορτωθεί λόγω υψηλών αναγκών σε εύρος ζώνης.

Οι πάροχοι που ψάχνουν νέους και δημιουργικούς τρόπους κέρδους, ενώ παράλληλα να εξυπηρετούν και τις διαφορετικές ανάγκες των χρηστών τους, μπορούν επίσης να ωφεληθούν από την υποδομή του DWDM. Αυτό συμβαίνει γιατί μπορούν να διαχωρίσουν το δίκτυο τους, διατηρώντας διαφορετικά μήκη κύματος για διαφορετικούς χρήστες. Θα μπορούσαν για παράδειγμα να νοικιάσουν κάποια μήκη κύματος (αντί για ολόκληρη ίνα) σε πελάτες με υψηλές ανάγκες.

Η τεχνολογία DWDM είναι σχεδιασμένη για να δίνει την δυνατότητα στους πάροχους να ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών τους για εύρος ζώνης. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι είναι επεκτάσιμη, την καθιστούν ως τον καλύτερο τρόπο σχεδιασμού ενός δικτύου. Μάλιστα, οι συνεχείς εξελίξεις κι επεκτάσεις του δικτύου, ρίχνουν σημαντικά το αρχικό κόστος ενώ αναπτύσσουν και την υποδομή που θα τους υποστηρίξει μακροχρόνια. (Ν. Πλέρος, 2004)

Πολλοί αναλυτές έκριναν ότι το DWDM είναι η τέλεια επιλογή για δίκτυα με συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες εύρους ζώνης. Όμως για να ισχύει αυτό πρέπει να ισχύει μία συνθήκη: Το σύστημα DWDM πρέπει να έχει την δυνατότητα κλιμάκωσης. Για παράδειγμα, μπορεί ένα σύστημα με interface OC-48 και 8-16

κανάλια ανά ίνα να φαίνεται υπερβολικό σήμερα, αλλά μπορεί σε δύο χρόνια να κρίνεται απαραίτητο.

3.7 Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (CWDM)

Η ανάπτυξη του CWDM (coarse wavelength-division multiplexing), είναι μια μορφή πολυπλεξίας διαίρεσης μήκος κύματος η οποία εμφανίζει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των φερόντων μήκων κύματος (γύρω στα 20nm) σε σχέση με την DWDM. Με μια χωρητικότητα μεγαλύτερη από του WDM και μικρότερη από του DWDM, η CWDM επιτρέπει ένα μέτριο αριθμό καναλιών, συνήθως οχτώ ή λιγότερα, να συσσωρευτούν στην περιοχή των 1550nm της οπτικής ίνας, η οποία καλείται C-Band. Προκειμένου να μειωθεί εξαιρετικά το κόστος, τα CWDM χρησιμοποιούν αναξιόπιστα laser με μια ανοχή της τάξης των ± 3 nm. Αν και τα συστήματα DWDM χρησιμοποιούν απόσταση καναλιών όσο πιο κοντά στα 0.4nm, η CWDM χρησιμοποιεί μια απόσταση των 20nm. Το wide spacing εξυπηρετεί τα μήκη κύματος των μη ψυχωμένων laser που ολισθαίνουν καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλάζει. Το αναξιόπιστο laser μεταβάλλεται περίπου ± 0.06 nm/°C. Η CWDM μετάδοση μπορεί να συμβεί σε ένα από τα οχτώ μήκη κύματος: συνήθως 1470nm, 1490nm, 1510nm, 1530nm, 1550nm, 1570nm, 1590nm, 1610nm.

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά των διαφόρων μορφών πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος

	Coarse WDM	Wide WDM	Dense WDM
Απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων	Από 1,6nm – 2,5nm [200GHz]	1310nm	Μικρή, 200GHz
Αριθμός παραθύρων	O,E,S,C & L	O & C	C & L
Κόστος ανά κανάλι	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό
Αριθμός καναλιών	17-18	2	Μεγάλος Αριθμός
Εφαρμογές	Short-Haul, Metro	Passive Optical Networks	Long – Haul

Πηγή : (Α. Αναγνωστάκη, 2011)

Η CWDM τεχνολογία αντιπροσωπεύει μια τέλεια 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 ακριβέστερος ορισμός του CWDM είναι "μια μορφή διαίρεσης και πολυπλεξίας μήκους κύματος που έχει ευρύτερα διαστήματα μεταξύ των μηκών κύματος από αυτά που χρησιμοποιούνται στο DWDM. 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). Οι διαφορές μεταξύ CWDM και DWDM είναι στα εξής συστατικά:

- Οπτικό laser (πομπός)
- Οπτικός δέκτης
- Οπτικά φίλτρα πολύπλεξης και απόπλεξης
- Οπτικοί ενισχυτές μακρινής επέκτασης

Τυπικά το οπτικό laser που χρησιμοποιείται για μετάδοση ενός σήματος και ο αντίστοιχος δέκτης που χρησιμοποιείται για να λάβει το σήμα στο ίδιο μήκος κύματος που αυτό μεταδόθηκε, συνενώνονται σε ένα ενιαίο πομποδέκτη. Η πραγματική ποσότητα πληροφορίας που μεταδίδεται σε ένα μήκος κύματος αποφασίζεται από το bit rate του laser.

Τα DWDM lasers, έχουν τυπικό bit rate μέχρι και 10Gbits/sec, ενώ τα CWDM lasers φτάνουν τα 2,5Gbits/sec. Η τιμή ενός DWDM πομποδέκτη είναι τυπικά 4 με 5 φορές μεγαλύτερη από ενός αντίστοιχου CWDM πομποδέκτη.

Ακόμα, οι DWDM πομποδέκτες τείνουν να αυξάνουν τα λειτουργικά τους έξοδα, μιας και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια, και αποβάλλουν περισσότερη θερμότητα από τους CWDM. (Π. Μουντρουιδου, 2002)

Το τελευταίο κύριο συστατικό είναι ο add/drop πολυπλέκτης (OADM), που χρησιμοποιείται για να προσθέτει και να αφαιρεί μήκη κύματος σε ένα WDM δίκτυο. Για να μεταφέρει δεδομένα τα OADM, δέχεται ως είσοδο πολλά δεδομένα, μετατρέπει το κάθε κανάλι δεδομένων σε διαφορετικό μήκος κύματος, και το προσθέτει στο δίκτυο WDM. Όταν λαμβάνει δεδομένα, το OADM κάνει ακριβώς την

αντίστροφη λειτουργία για να αποπλέξει τα μήκη κύματος στα αρχικά κανάλια δεδομένων.

Το κόστος ενός OADM σε DWDM είναι τυπικά 2 με 3 φορές μεγαλύτερο από το κόστος ενός μεγαλύτερου εύρους OADM σε CWDM. Αυτό συμβαίνει επειδή το περιβάλλον DWDM έχει ένα σημαντικά μικρότερο διάστημα μεταξύ μηκών κύματος (πχ 100GHz) από αυτό που χρησιμοποιείται στα συστήματα CWDM (2500 GHz). Πλησιέστερα μήκη κύματος, προκαλούν μεγαλύτερη θερμότητα. Έτσι η κατασκευή αυτών των μονάδων είναι ακριβότερη και πιο πολύπλοκη.

3.8 WDM και ATM

Την τελευταία δεκαετία αποτέλεσε κοινή αίσθηση στις τηλεπικοινωνιακές εταιρείες είναι ότι η ενοποίηση των δικτύων δεδομένων και φωνής θα είναι η πιο βιώσιμη και οικονομική λύση για τα ερχόμενα χρόνια, τόσο από πλευράς κόστους απόσβεσης όσο και από πλευράς κόστους συντήρησης. Έννοιες όπως CTI (Computer & Telephony Integration) απέκτησαν μεγάλη σημασία για την τηλεπικοινωνιακή υποδομή επιχειρήσεων και οργανισμών. Παράλληλα αυξήθηκαν καθώς ήταν αναμενόμενο οι ανάγκες της ανθρωπότητας σε διαθέσιμο εύρος ζώνης, και πλέον μιλάμε για ταχύτητες ζεύξεων της τάξης των Gigabit / sec.

Το ζήτημα που κυριάρχησε ήταν η προσπάθεια εύρεσης του βέλτιστου τρόπου συγχώνευσης δύο φαινομενικά διαφορετικών «κόσμων», φωνής και δεδομένων.

Σημαντικός αρωγός στην έρευνα για το ATM αποτέλεσε η ανάδραση από την αγορά (market feedback) δεδομένου ότι η ετήσια αύξηση σε ζήτηση υπηρεσιών φωνής είναι κατά μέσο όρο περίπου 2% - 5%. Η αντίστοιχη αύξηση ζήτησης σε υπηρεσίες δεδομένων είναι αυτή τη στιγμή περίπου 20% - 33%.

Το ATM είναι μια δικτυακή τεχνολογία μετάδοσης που εξυπηρετήσει ποικίλες εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις εξυπηρέτησης από το δίκτυο είτε σε πραγματικό χρόνο όπως τον ήχο και την εικόνα είτε σε μη πραγματικό όπως τα υπολογιστικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό που διαβιβάζει μονάδες δεδομένων σταθερού μεγέθους, τα κελιά. Η απόδοση του δικτύου ATM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την χαρακτηριστικά των μεταγωγέων πακέτων.

Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό της ITU⁶

«το ATM είναι μια τεχνική πολυπλεξίας, στην οποία η ικανότητα μετάδοσης οργανώνεται με μη αφιερωμένες σχισμές (undedicated slots), οι οποίες γεμίζουν με κελιά (cells), ανάλογα με τις στιγμιαίες πραγματικές ανάγκες της κάθε εφαρμογής.»

Το ATM (Asynchronous Transfer Mode) είναι μια δικτυακή τεχνολογία μετάδοσης που υποστηρίζει την μεταφορά ετερογενούς κίνησης πραγματικού χρόνου, όπως ήχου και εικόνας, και μη πραγματικού χρόνου, όπως υπολογιστικών δεδομένων, με τη βοήθεια ενός μηχανισμού που διαβιβάζει μονάδες δεδομένων σταθερού μεγέθους, γνωστές ως κελιά (cells).⁷ Ο τρόπος μεταφοράς (Transfer Mode) δηλώνει ότι αυτή η τεχνολογία αφορά συγκεκριμένο τρόπο μεταφοράς και μεταγωγής στο δίκτυο. Ο όρος «ασύγχρονο» (asynchronous) αναφέρεται στο γεγονός ότι τα πακέτα μεταφέρονται χρησιμοποιώντας ασύγχρονες τεχνικές και τα δύο τερματικά σημεία δε χρειάζεται να έχουν συγχρονισμένα ρολόγια. Το ATM είναι μια περίπλοκη τεχνολογία, ίσως και την περιπλοκότερη στη βιομηχανία δικτύων μέχρι τώρα.

Η κεντρική ιδέα πίσω από το ATM είναι αντί να αναγνωρίζει το σύστημα τον αριθμό της σύνδεσης από τη θέση του πακέτου σε ένα bucket, απλά να φέρει το πακέτο τον αριθμό της σύνδεσης μαζί με τα δεδομένα, και ταυτόχρονα να κρατά τον συνολικό αριθμό των bytes σε ένα πακέτο μικροτσίπ ώστε αν χαθεί κάποιο πακέτο λόγω συμφόρησης, να έχει ελάχιστη επιρροή στην ροή των δεδομένων και ίσως να μπορεί να ανακτηθεί με ειδικούς αλγορίθμους επαναληπτικότητας (redundancy).

Το ATM είναι ένα από την οικογένεια των τηλεπικοινωνιακών προτύπων που εισήγαγαν την έννοια

- της αναπήδησης πακέτου,
- της αναμετάδοσης πλαισίου (frame relay)
- και τελευταία της υπηρεσίας δεδομένων υψηλών ταχυτήτων με μεταγωγή (Switched Multimegabit Data Service - SMDS).

⁶ πρώην CCITT

⁷ Πολλοί ευρωπαϊκοί τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί έχουν επιλέξει το ATM σαν πλατφόρμα για την παροχή φτηνού ISDN ευρείας ζώνης (B-ISDN : BroadBand ISDN), ανάμεσά τους και ο ΟΤΕ.

Το όλο σχήμα φέρει από μεταγωγή πακέτου, οπότε και ονομάστηκε «**Γρήγορη μεταγωγή πακέτου με μικρά σταθερού μεγέθους πακέτα**». Το δε μέγεθος αυτό (53 bytes) προήλθε από την επιθυμία των εταιρειών να κρατήσουν σταθερή τη ποιότητα των φωνητικών επικοινωνιών όπως στα δίκτυα STM (Synchronous Transfer Mode), γιατί σε συνδέσεις που ο χρόνος μεταφοράς πακέτου πρέπει να είναι μικρός (όπως στη κλασική τηλεφωνία), η πιθανότητα να χαθούν πακέτα αυξάνεται, αλλά αφού το μέγεθος του πακέτου είναι πολύ μικρό, αυτό δεν συνεπάγεται αισθητή απώλεια στη φυσική ροή της ομιλίας.

Έτσι στο ATM σε κάθε σύνδεση ανατίθεται ένα «**εικονικό αναγνωριστικό κυκλώματος**» (VCI - Virtual Circuit Identifier), το οποίο περιέχεται σε κάθε πακέτο και αναγνωρίζει με μοναδικό τρόπο τα δύο άκρα της σύνδεσης.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του ATM είναι ότι είναι μια εύκολα αναβαθμιζόμενη τεχνολογία. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι αρχικές προδιαγραφές του μιλούν για βασική χαμηλή ταχύτητα 1,544 Mbps που μπορεί να φτάσει τα 10 Gbps και πάνω (σχεδόν 4 τάξεις μεγέθους).

Παράλληλα με αυτό, το ATM έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ίδια ευκολία τόσο σε κοντινές αποστάσεις (π.χ. ένα γραφείο ή ένα κτίριο) όσο και σε μακρινές (διεθνείς και υπερηπειρωτικές συνδέσεις). Αυτό υπονοεί ότι μεγάλο μέρος της δουλειάς υποδομής που απαιτείται σήμερα για να συνεργάζονται

Η τεχνολογία ATM είναι συνδεσμική (connection-oriented). Αυτό σημαίνει ότι πριν αρχίσει η μετάδοση πληροφοριών, πρέπει να επιτευχθεί η σύνδεση μεταξύ των δύο σημείων του δικτύου. Η σύνδεση μεταξύ δύο σημείων στο δίκτυο προς το παρόν είναι μόνιμη νοητή (permanent virtual circuit– PVC).

Οι WDM και ATM τεχνολογίες μπορούν να ενοποιηθούν. Οι νέες τεχνολογίες καλούνται να παρέχουν καλύτερες ποιοτικά υπηρεσίες ούτως ώστε ,και πέραν των άλλων να ανταποκριθούν στις αυστηρές απαιτήσεις της φωνής, του βίντεο και άλλα και με τον τεράστιο όγκο των δεδομένων στο δίκτυό τους. Τα καλά νέα είναι ότι η λύση των προβλημάτων αυτών είναι διαθέσιμη τουλάχιστον εδώ και μια δεκαετία, ενώ παράλληλα έχει δώσει ώθηση και στις νέες τεχνολογίες. Ο συνδυασμός της πυκνής Wave Division Multiplexing (DWDM) και Asynchronous Transfer Mode (ATM) λύνει το εύρος ζώνης και την ποιότητα των υπηρεσιών με οικονομικό, άμεσο και αποτελεσματικό τρόπο.

Η DWDM κάνει τη βέλτιστη χρήση των διευκολύνσεων, επιτρέποντας στις οπτικές ίνες που συνδέονται να μεταφέρουν πολλά κανάλια ταυτόχρονα, παρέχοντας

δυνατότητες μετάδοσης 4-16 φορές αρχικά(σήμερα ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες) μεγαλύτερες από αυτές της παραδοσιακής πολυπλεξίας (TDM και FDM). Η χρήση του DWDM επέτρεψε στους παρόχους να μεταφέρουν IP, ATM και SONET πάνω από το οπτικό στρώμα. Αυτή η ενωτική δυνατότητα επιτρέπει στον μεταφορέα την ευελιξία να ανταποκριθεί στις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις πάνω στα δίκτυα. Με DWDM, υπάρχει ανάγκη για λιγότερα στοιχεία του δικτύου και λιγότερους χώρους εγκατάστασης, βελτιώνοντας έτσι την αξιοπιστία και την ασφάλεια του δικτύου. Η DWDM επιτρέπει παράκαμψη της στιβάδας του SONET, η οποία αυξάνει απόδοση και αξιοπιστία μειώνοντας παράλληλα και το κόστος. Παρ' όλα αυτά η δοκιμή – έλεγχος αλλά και η αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων του DWDM δικτύων απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Αν και σήμερα χρησιμοποιείται συνεχώς η ενοποίηση IP πάνω σε WDM ,η αρχικά σκέψη για ATM over WDM κρίνεται απαραίτητη. (Κ. Βλάχος, 2009)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση της σχετικά καινούργιας τεχνολογίας των καλωδίων από οπτικές ίνες την δεκαετία του 1980 είχε ως αποτέλεσμα μια επανάσταση στον τηλεπικοινωνιακό κλάδο. Έκτοτε το κόστος μειώθηκε και η ποιότητα των δικτύων αυξήθηκε, προκαλώντας πολύ μεγάλη πρόοδο στην τεχνολογία η οποία είναι απαραίτητη για τα οπτικά δίκτυα. Ωστόσο, τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας αρχίζουν να γίνονται φανερά μόλις τώρα.

Η εξέλιξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών είναι πάρα πολύ μεγάλη στον σχεδόν έναν αιώνα της ύπαρξής τους. Τα δίκτυα που παλαιότερα προσέφεραν βασικές τηλεφωνικές υπηρεσίες, έχουν πλέον τη δυνατότητα μετάδοσης το ισοδύναμο μερικών χιλιάδων εγκυκλοπαιδειών ανά δευτερόλεπτο.

Τρία είναι τα βασικά στάδια στα οποία εξελίχτηκαν τα ψηφιακά δίκτυα ως αποτέλεσμα της προόδου τους: α)τα ασύγχρονα, β)τα σύγχρονα και γ)τα οπτικά.

Σε τυχόν προσπάθεια ταξινόμησης των δικτύων κορμού ευρυζωνικών δικτύων θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι τα δίκτυα N-ISDN κατατάσσονται στην πρώτη γενιά, τα B-ISDN στη δεύτερη, ενώ το οπτικό δίκτυο στην τρίτη γενιά. Παρόλο που τα εν λόγω δίκτυα ερευνούνται από τη δεκαετία του 80, άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε πραγματικές ινοοπτικές ζεύξεις και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα στις αρχές της δεκαετίας του 90. Η πρόοδος που παρατηρήθηκε στις επιδόσεις των συστημάτων WDM (μια τεχνολογία οπτικών δικτύων η οποία χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η χωρητικότητα του μέσου μεταφοράς των δεδομένων) ήταν ραγδαία, αν και, ως υλοποιήσιμη λύση, η τεχνολογία WDM έκανε την εμφάνισή της πριν λιγότερο από 10 χρόνια.

Καθώς το οπτικό δίκτυο εξελίσσεται στον υπέρτατο στόχο των υπηρεσιών «end-to-end», η συνεχιζόμενη πρόοδος και εξέλιξη στην οπτική τεχνολογία υπόσχεται διαρκείς αλλαγές.

Εντυπωσιακός είναι ο αντίκτυπος των νέων οπτικών επιπέδων στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Αυτός μπορεί να «μετρηθεί» σε δύο τομείς: α) στον οικονομικό αντίκτυπο, και β) στην ικανότητα των παροχών προσφοράς νέων υπηρεσιών.

Η οπτική τεχνολογία θα προκαλέσει αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στους παροχούς μετάδοσης πάνω από 40 φορές περισσότερων δεδομένων πάνω στις ίδιες ίνες. Αυτό τελικά θα έχει ως συνέπεια

χαμηλότερες τιμές και κατ' επέκταση το εύρος ζώνης θα είναι οικονομικά πιο προσιτό.

Επιπλέον, θα υπάρχει πρόσβαση των καταναλωτών σε νέες υψηλού-εύρους-ζώνης υπηρεσίες, που καθίστανται δυνατές εξαιτίας της αυξημένης χωρητικότητας των οπτικών ινών. Υπηρεσίες που σήμερα έχουν πολύ μεγάλο κόστος, όπως video conferencing, ηλεκτρονικό εμπόριο και μετάδοση φωνής θα είναι πλέον πολύ προσιτές καθώς θα είναι τεχνολογικά και οικονομικά εφικτές.

Κατά συνέπεια, η ποιότητα ζωής μας θα αυξηθεί λόγω της οπτικής τεχνολογίας, καθώς θα υπάρχουν στην διάθεση μας περισσότερες ανέσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Jon-Olov Vatn J** IP telephony: mobility and security [Ηλεκτρονικό] // <http://web.it.kth.se/~vatn/research/phd-thesis-vatn-with-cover.pdf>. - 2006.
2. **Α. Αναγνωστάκη Α** Τα Βασικά Δομικά Στοιχεία Ανάπτυξης της Τεχνικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Κήκος Κύματος στις Οπτικές Επικοινωνίες [Βιβλίο]. - Λάρισα : Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, 2011.
3. **Α. Τζιουμάκης Α** Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος - Εφαρμογές σε Μητροπολιτικά Δίκτυα [Βιβλίο]. - Πειραιάς : Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, 2011.
4. **Ε. Νικόλα Ε** Ανάλυση Σηματοδοσίας Μεταγωγής και Δρομολόγησης σε Περιβάλλον Ανοικτής Πρόσβασης [Βιβλίο]. - Αθήνα : Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καλαμάτας , 2012.
5. **Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης Ι** Ανάλυση της Τεχνολογίας των Οπτικών Ίνων & των Δικτύων Οπτικών Ίνων [Βιβλίο]. - Κρήτη : Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2011.
6. **Κ. Βλάχος Κ** Οπτικά Δίκτυα [Βιβλίο]. - Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πάτρας, 2009. - Τόμ. <http://www.ceid.upatras.gr/faculty/kvlachos/courses/documents/ots/Kefalaio1,2.pdf>.
7. **Κ. Στούμπου Κ** Ανάπτυξη χρονοπρογραμματιστή ROLM για ενσωματωμένους μεταγωγείς ATM [Βιβλίο]. - Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
8. **Ν. Πλέρος Ν** Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων [Βιβλίο]. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.

9. **Π. Μουντρουίδου Π** Σχεδίαση Χρονοπρογραμματιστή Πακέτων για Δίκτυα ATM Υψηλής Ταχύτητας [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.], 2002.
10. **Χ. Λασκαρίδης, Χ.** Συμβολή στην μελέτη δικτύων Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς, ATM μεταγωγείς: αρχιτεκτονικές και προοπτικές. Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2002.
11. **Π. Τουμάσης,** *Wireless Networking & Mobile Computing*. 2008.
12. **Ι. Α. Πικραμμένος,** *Αρχιτεκτονικές και Πρωτόκολλα Δικτύων Πρόσβασης για Ανοικτή Παροχή Υπηρεσιών - Διδακτορική Εργασία - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών - Τομέας Ηλεκτροεπιστήμης - Αθήνα - 2000*

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Σχηματική τομή οπτικής ίνας, προβολή διάθλασης φωτός.....	20
Εικόνα 2 Η μορφή ενός παλμού που διέρχεται δια μιας πολυτροπικής ίνας έχει ευρεία χωρική κατανομή και κάθε «σημείο» του διανύει τη δική του διαδρομή. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία υποδοχής, τόσο μεγαλύτερο είναι και το πλήθος των διαφορετικών διαδρομών. Μια τέτοια ίνα καλείται πολυτροπική. Το αριθμητικό άνοιγμα NA καθορίζει και το εύρος ζώνης της ίνας. Το φαινόμενο της διασποράς μπορεί να αλλοιώσει έναν παλμό κατά την έξοδό του από την ίνα.....	20
Εικόνα 3 Γεωμετρία οπτικών ινών	22
Εικόνα 4 Χρωματική διασπορά για μια ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	28
Εικόνα 5 Διεύρυνση παλμού λόγω PMD.....	29
Εικόνα 6 Πολυπλεξία συχνότητας (μήκους κύματος) σε οπτικά δίκτυα.....	31
Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς από τον πομπό στον δέκτη	34
Εικόνα 8 Βασικό οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα (Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης, 2011).....	35
Εικόνα 9 Δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων (Κ. Βλάχος, 2009)	37
Εικόνα 10 Απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (Α. Τζιουμάκης, 2011)	38
Εικόνα 11 Δομικά στοιχεία σε δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (Κ. Βλάχος, 2009)	42
Εικόνα 12 Τηλεφωνικό δίκτυο, επικοινωνία δύο υπολογιστών με χρήση modem	43
Εικόνα 13 Δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος (Ε. Νικόλα, 2012)	44
Εικόνα 14 Δίκτυο μεταγωγής πακέτου (Ε. Νικόλα, 2012).....	44
Εικόνα 15 Γενικό σύστημα διαχείρισης	51

Εικόνα 16 Από τα τρία είδη πολυπλεξίας, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην πολυπλεξία με διαίρεση μήκος κύματος (Α. Αναγνωστάκη, 2011)	54
Εικόνα 17 Απλή WDM πολυπλεξία	55
Εικόνα 18 DWDM πολυπλεξία	55
Εικόνα 19 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκος κύματος (Α. Αναγνωστάκη, 2011)	56
Εικόνα 20 Οπτικός τερματισμός – Optical Line Terminal (OLT).....	57
Εικόνα 21 Ζεύξη χωρίς OADM. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται υπερβολικός αριθμός transponders	59
Εικόνα 22 Ζεύξη με OADM	59
Εικόνα 23 Παράλληλη και σπονδυλωτή αρχιτεκτονική OADMs	60
Εικόνα 24 Σειριακή αρχιτεκτονική και αρχιτεκτονικής απομάστευσης.....	60
Εικόνα 25 Αρχιτεκτονική αμιγώς οπτικής OXC	62
Εικόνα 26 Οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου.....	63
Εικόνα 27 Δίκτυα WDM χωρίς και με μετατροπή μήκους κύματος.....	64
Εικόνα 28 Bulk optic WDM	65
Εικόνα 29 Εφαρμογή DWDM συστήματος.....	67