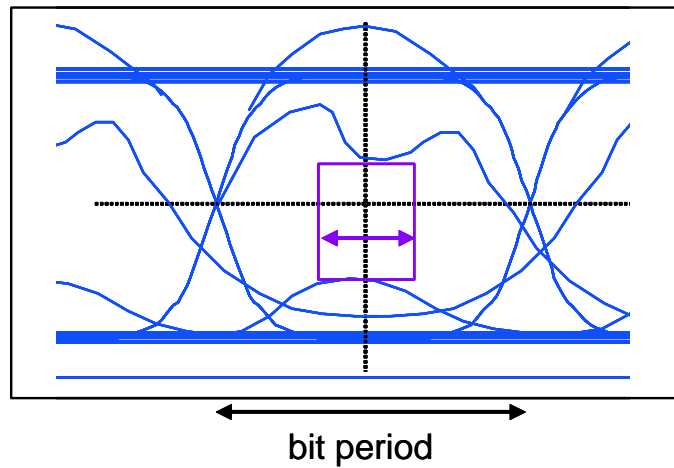




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ
Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών

Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών



Περιεχόμενα

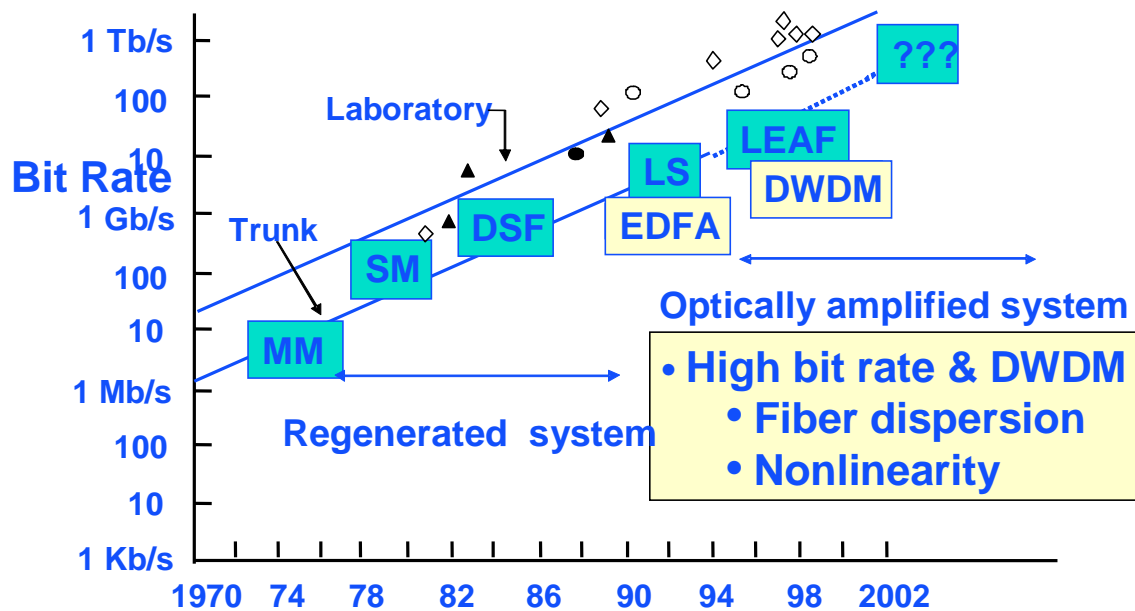
<u>Η Επανάσταση των Φωτονικών Επικοινωνιών</u>	σελίδα 3
Η πορεία των επικοινωνιών	3
Πρόβλεψη Δικτυακής Κίνησης για Μεγάλες Αποστάσεις	4
Συστήματα 3R Αναγέννησης	5
Συστήματα με Ενίσχυση	6
<u>Λόγοι Υποβάθμισης Συστήματος</u>	7
Υποβάθμιση Πομπού	7
Παραμορφώσεις Διάδοσης – Γραμμικές	8
Αντιστάθμιση Διασποράς	9
Διαμόρφωση Φάσματος στον Πομπό	9
Ανάκτηση Δεδομένων στο Δέκτη	10
Το Οπτικό Σύστημα	11
Παραμορφώσεις Διάδοσης – Μη Γραμμικές	13
Αυτοδιαμόρφωση Φάσης	13
Ετεροδιαμόρφωση Φάσης	14
Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων	16
Αστάθεια Διαμόρφωσης	20
Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman	22
Εξαναγκασμένη Σκέδαση Brillouin	25
Υποβάθμιση Οπτικών Ενισχυτών	26
Ενισχυτής Ίνας Ερβίου (EDFA)	26
Θόρυβος και Υποβάθμιση του Οπτικού SNR	25
Ανάπτυξη ASE σε Σύστημα με Ενίσχυση	26
Μη Ομοιόμορφο Φάσμα Κέρδους	27
Παροδικό Κέρδος EDFA	27
Οπτικοί Ενισχυτές Ημιαγωγού (SOA)	29
Ενισχυτές Raman	31
Υποβάθμιση Δέκτη	34
<u>Χαρακτηρισμός Απόδοσης Συστήματος</u>	37
Bit Error Ratio	37
Ανάλυση Διαγράμματος Ματιού	38
Παράγοντας Q	38

BER και Παράγοντας Q		42
Ανάλυση Jitter		43
<u>Πρότυπα Μετάδοσης</u>		
Sonet / SDH	σελίδα	45
ATM		49
<u>Επιλογές Αύξησης του Παρεχόμενου Bandwidth</u>		50
Τεχνικές Πολυπλεξίας		51
Πολυπλεξία με διαίρεση Χρόνου		51
Πολυπλεξία με διαίρεση Μήκους Κύματος		53
Πρακτικές Μελέτες στην Ανάπτυξη WDM Συστημάτων		54
<u>Βιβλιογραφία</u>		58

Εξέλιξη των Φωτονικών Επικοινωνιών

Η πορεία των επικοινωνιών

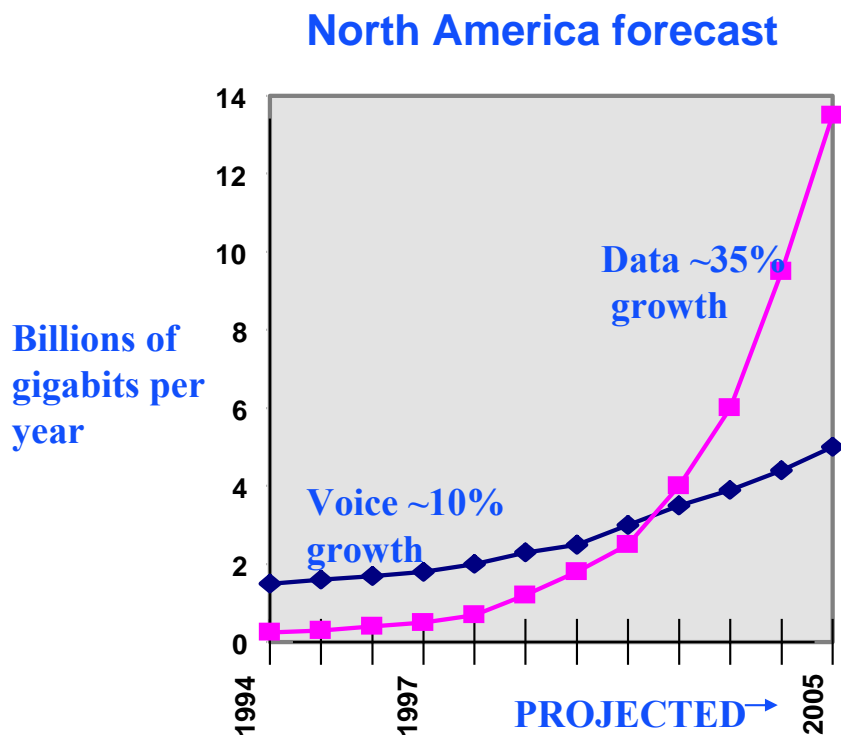
Η ιστορία των οπτικών επικοινωνιών ξεκινάει στα μέσα της δεκαετίας του 60' παρουσιάζοντας μια σειρά από επινοήσεις, οι οποίες οδήγησαν σε μια ασυνήθιστη βελτίωση και αύξηση του διαθέσιμου bandwidth και της απόστασης μετάδοσης. Εργαστηριακά πειράματα παρείχαν και παρέχουν την απαιτούμενη τεχνογνωσία, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματική εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών των οπτικών ινών. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει αυτή την ανάπτυξη των οπτικών επικοινωνιών.



Σχήμα 1: Η ανάπτυξη των οπτικών τηλεπικοινωνιών σε σχέση με το Bit Rate.

Πρόβλεψη Δικτυακής Κίνησης για Μεγάλες Αποστάσεις

Με την ανάπτυξη του τομέα των οπτικών ινών παγκοσμίως, η οπτική τεχνολογία εδραιώθηκε και απέκτησε καίρια θέση στο μέλλον των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Παρόλα αυτά, καθώς οι απαιτήσεις για μεγαλύτερο bandwidth και για νέες εφαρμογές συνεχίζουν να αυξάνονται με αλματώδη ρυθμό, η δυνατότητα των ηλεκτρικών δικτύων να υποστηρίξουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων μέσω των συνδέσεων οπτικών ινών, πλησιάζει τα φυσικά τους όρια. Επί πλέον, η φύση των μεταδόσεων αλλάζει από τις σταθερού ρυθμού υπηρεσίες φωνής σε ανάλογες δεδομένων εκρηκτικής ροής. Η κίνηση που διακομίζεται σε ένα backbone δίκτυο μπορεί να είναι κίνηση κυκλώματος (TDM φωνή and fax), κίνηση πακέτων (IP), ή κίνηση κελιού (ATM και Frame Relay). Άλλωστε, υπάρχει μια αυξανόμενη αναλογία στα δεδομένα με καθυστέρηση όπως η φωνή πάνω σε IP και στα διαμοιραζόμενα βίντεο. Παρακάτω φαίνονται όσα αναφέραμε:

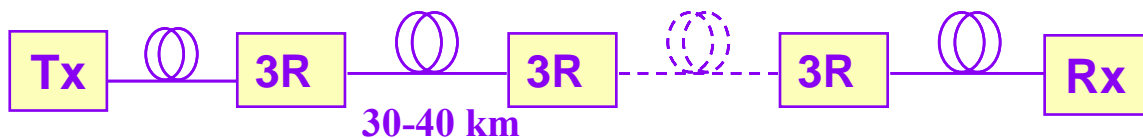


Σχήμα 2: Επανάσταση στην κίνηση μεγάλων αποστάσεων

Αυτή η κατάσταση είναι η κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών, ενώ απ' την άλλη μεριά καθορίζει τα επιθυμητά γνωρίσματα των μελλοντικών οπτικών δικτύων.

Συστήματα 3R Αναγέννησης

Οι αποστάσεις μετάδοσης των πρώτων οπτικών συστημάτων περιορίζονταν από την έλλειψη μιας οικονομικά αποδοτικής μεθόδου ενίσχυσης του οπτικού σήματος. Οι ηλεκτρικοί αναγεννητές χρησιμοποιούνταν σε συστήματα μεγάλων αποστάσεων. Για να ενισχυθεί το σήμα, οι παλμοί φωτός έπρεπε να αποπολυπλεχθούν και να επιστρέψουν στο ηλεκτρικό πεδίο με τη χρήση ενός ηλεκτρο-οπτικού μετατροπέα. Μετά την ενίσχυση, ένας οπτικο-ηλεκτρικός μετατροπέας μετέτρεπε το σήμα σε οπτικούς παλμούς, οι οποίοι μέσω πολυπλεξίας ήταν έτοιμοι για μετάδοση στον επόμενο κόμβο. Αυτή η διαδικασία συχνά αναφέρεται σαν 3-R, απ' τα αρχικά γράμματα των τριών βασικών λειτουργιών που επιτελεί: Αναδιαμόρφωση (**R**eshape), Επανασυγχρονισμός (**R**etime), Επανενίσχυση (**R**eamplify).



Σχήμα 3: Η δομή ενός συστήματος 3R.

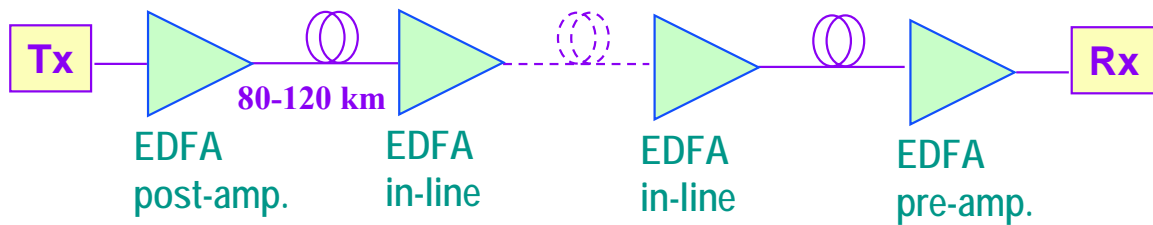
Οι κλειστοί βρόχοι που φαίνονται στο σχήμα αναπαριστούν κάποια αόριστη απόσταση μεταξύ των διαφόρων σημείων της γραμμής μετάδοσης.

Ο σχεδιασμός του πομπού και του δέκτη καθώς και γραμμικές επιδράσεις διάδοσης (εξασθένηση, διασπορά) θέτουν κάποιους περιορισμούς σε αυτή την προσέγγιση, καθώς το πιο σημαντικό της μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος, επειδή χρειάζονται διάσπαρτοι αναγεννητές για να ενισχύσουν σε κάθε μήκος κύματος. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, καθώς στα DWDM δίκτυα οι διαχειριστές προσπαθούσαν να αυξήσουν την χωρητικότητα των υπάρχοντων οπτικών ινών, να προκύψει μεγάλη ανάγκη για μια μέθοδο ενίσχυσης των οπτικών μηκών κύματος χωρίς την μετατροπή στο ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό που χρειαζόταν ήταν ένας οπτικός ενισχυτής.

Συστήματα με Ενίσχυση

Η ανάπτυξη του οπτικού ενισχυτή ήταν ένα σημαντικό γεγονός για τα οπτικά δίκτυα. Η δυνατότητά του να ενισχύει οπτικούς παλμούς χωρίς την ανάγκη για διαχωρισμό και μετατροπή των μηκών κύματος είχε σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους σε συστήματα μεγάλης κλίμακας.

Οι οπτικοί ενισχυτές επεξεργάζονται όλα τα εισερχόμενα μήκη κύματος σαν αναλογικά σήματα, ανεξάρτητα αν προέρχονται από αναλογικές ή ψηφιακές πηγές.



Σχήμα 4: Η δομή ενός συστήματος με ενίσχυση

Σε αυτή την περίπτωση, επειδή το σήμα δεν αναγεννάται, κάθε θόρυβος που εισέρχεται από τον ενισχυτή μεταφέρεται στο υπόλοιπο σύστημα. Αυτό οδηγεί στην υποβάθμιση του SNR.

Η οπτική ενίσχυση οδηγεί σε υψηλότερης ισχύος σήματα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης μεταξύ των υποδιατάξεων ενίσχυσης. Τα οικονομικά οφέλη είναι προφανή. Ένα άλλο αποτέλεσμα της αύξησης ισχύος και απόστασης, είναι η εισαγωγή στο σήμα επιδράσεων μη γραμμικής διάδοσης, που στην περίπτωση της αναγέννησης συσσωρεύονται στο οπτικό κύκλωμα. Αυτές οι επιδράσεις, οι οποίες θα περιγραφούν στη συνέχεια του κειμένου, βασίζονται στο φαινόμενο Kerr και επιδρούν με τη διασπορά με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αναιρούν σε κάποιο βαθμό οι μεν τις δε.

Λόγοι Υποβάθμισης Συστήματος

Υποβάθμιση Πομπού

Τα κύρια χαρακτηριστικά που είναι σημαντικά στο σχεδιασμό πομπών laser πολλών gigabit είναι τα εξής:

- Ο ελάχιστος αποδεκτός λόγος σβέσης για την εφαρμογή του συστήματος
- Οι απαιτήσεις για το διαμορφωμένη μορφή του παλμού
- Η μέγιστη παραμόρφωση του παλμού που μπορεί να είναι αποδεκτή

Ο λόγος σβέσης είναι ο λόγος μεταξύ της αδιαμόρφωτης οπτικής ισχύος και της διαμορφωμένης οπτικής ισχύος. Σε απευθείας διαμορφωμένα lasers ο λόγος αυτός παίρνει τιμές μεταξύ 9 και 14 dB ανάλογα με την εφαρμογή, ενώ τα εξωτερικά διαμορφωμένα lasers με λόγο σβέσης πάνω από 15 dB είναι κοινά με τους LiNbO₃ Mach Zehnder διαμορφωτές. Τα ημιαγωγιμα lasers χρησιμοποιούνται ευρέως, επειδή ικανοποιούν τις προϋποθέσεις για ακριβή μήκη κύματος, στενό εύρος φάσματος και επαρκή ισχύ. Η εξωτερική διαμόρφωση χρησιμοποιείται για να περιορίσει το chirp, το οποίο μπορεί αλλιώς να γίνει ένας περιοριστικός παράγοντας σε υψηλούς ρυθμούς δυφίου.

Η υποβάθμιση των παλμών στον πομπό οδηγεί σε ανακλάσεις μεταξύ του laser και του οδηγού, σε απόκριση του παλμού σε απευθείας διαμορφωμένα lasers λόγω της δυναμικής των ηλεκτρονίων-φωτονίων και για τα εξωτερικά και τα απευθείας διαμορφωμένα lasers, σε υποβάθμιση του χρόνου ανάκαμψης και πτώσης λόγω των περιορισμών του package bandwidth.

Ένα σημαντικό γνώρισμα μιας πηγής είναι το chirp που εισάγεται στο laser. Το chirping στο laser οδηγεί σε παραμόρφωση των παλμών στο δέκτη που είναι ανάλογοι της συνολικής διασποράς στην οπτική ίνα, στο peak-to-peak chirp του μήκους κύματος και στη διάρκεια και θέση του chirp. Αναλυτικές χρονικές μετρήσεις του chirp (TRCMs), έχουν χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσουν απευθείας και εξωτερικά διαμορφωμένα lasers. Μια παράμετρος TRCM είναι το α_{eff} , που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση

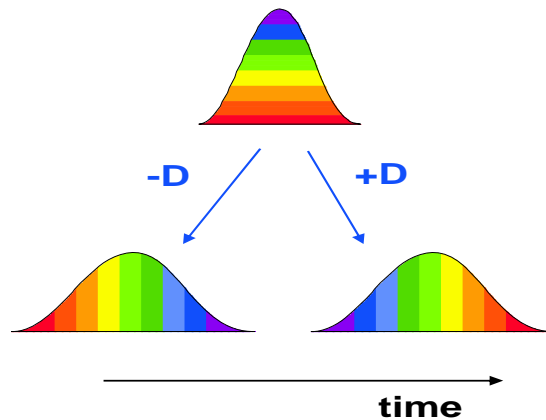
$$\alpha_{eff} = -\frac{\delta\lambda(t)4\pi c}{\lambda_c^2 \{d \ln[I(t)]/dt\}},$$

όπου $I(t)$ είναι η ένταση της κυματομορφής του laser, $\delta\lambda(t)$ είναι οι διακυμάνσεις που εξαρτώνται από το μήκος κύματος, λ_c είναι το μήκος κύματος του laser και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Η παράγωγος $d \ln[I(t)]/dt$ υπολογίζεται στη μέγιστη τιμή της, που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή $\delta\lambda(t)$. Γενικά, αυτές οι παραμορφώσεις στους παλμούς περιορίζουν την απόσταση διάδοσης. Ωστόσο, σε συστήματα με ενίσχυση οι μη γραμμικές επιδράσεις της ίνας και ιδιαιτέρως το SPM, μπορούν να μεταβάλλουν τους παλμούς με τέτοιο τρόπο ώστε να εξαλειφθεί το chirp, με εξάρτηση από την πολικότητα του α_{eff} και του συντελεστή διασποράς. Η παραμόρφωση της πολικότητας (PMD) μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση του συστήματος για συστήματα μεγάλης κλίμακας. Εξ'

αιτίας της φύσης του PMD, είναι δύσκολο να προβλέψουμε αστοχίες του συστήματος. Ωστόσο είναι ξεκάθαρο ότι η αστοχία στο PMD, εξαρτάται από το chirp του laser, με μικρότερο chirp να παράγει μικρότερο penalty. Γι' αυτό πηγές laser με μικρό peak-to-peak chirp ή αρνητικό α_{eff} οδηγούν σε μικρότερα PMD penalties.

Παραμορφώσεις διάδοσης-Γραμμικές

Η χρωματική διασπορά στα οπτικά συστήματα προκαλείται από μια μεταβολή της συνολικής ταχύτητας σε μια ίνα με αλλαγές στην οπτική συχνότητα. Αφού μπορεί να προκαλέσει διαπλάτυνση του παλμού σε ένα οπτικό σήμα, η χρωματική διασπορά μπορεί να βλάψει την απόδοση του συστήματος. Αυτό φαίνεται σχηματικά στο *σχήμα 5*.



Σχήμα 5: Αλλοίωση σχήματος παλμού εξαιτίας της χρωματικής διασποράς.

Ένας μεμονωμένος παλμός για κανένα άλλο λόγο εκτός από τη διαμόρφωσή του, περιέχει ένα φάσμα μηκών κύματος. Όπως διασχίζει την ίνα οι πιο μικρές συνιστώσες μήκους κύματος του παλμού (φαίνονται με το μπλε) ταξιδεύουν γρηγορότερα από τις μεγαλύτερες συνιστώσες μήκους κύματος (φαίνονται με το κόκκινο). Έτσι ο παλμός φαρδαίνει καθώς διασχίζει την ίνα και όταν φθάνει στον παραλήπτη προκαλεί λάθη. Το μέτρο της χρωματικής διασποράς που χρησιμοποιείται από την οπτική κοινότητα είναι D με μονάδες ps/nm/km , που είναι το σύνολο της διαπλάτυνσης σε ps που θα συνέβαινε σε ένα παλμό με εύρος ζώνης 1 nm καθώς διαδίδεται μέσα σε μια ίνα 1 km . Το D δίνεται

$$\text{από } D = \frac{d}{d\lambda} \frac{1}{v_g} = \frac{d^2\beta}{d\lambda d\omega} \approx -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \text{ όπου } \lambda, v_g, \beta, \omega \text{ και } c \text{ είναι το μήκος κύματος, η}$$

συνολική ταχύτητα, η σταθερά διάδοσης, η γωνιακή συχνότητα και η ταχύτητα του φωτός αντίστοιχα. Ένα πιο βολικό μέτρο της χρωματικής διασποράς είναι το β_2 , που συχνά εκφράζεται με τις μονάδες ps^2/km . Διότι σε ένα μήκος κύματος $1,55 \mu\text{m}$, ισχύει $2\pi c/\lambda^2 = 0.781/\text{ps/nm}$, σε αυτό το μήκος κύματος ισχύει $D \approx -\beta_2$ όταν εκφράζονται σε μονάδες ps/nm/km και ps^2/km αντίστοιχα.

Η διασπορά της οπτικής ίνας μπορεί να ποικίλει σημαντικά σε σχέση με το εύρος του EDFA. Σε συμβατική ίνα η κλίση ($dD/d\lambda$) του D είναι $0.08 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$. Αυτό έχει ονομαστεί διασπορά δεύτερης τάξης αν και η τιμή του περιέχει την παράγωγο τρίτης

τάξης του β σε σχέση με το ω : $dD/d\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^3} \left[2\beta_2 - \frac{2\pi c}{\lambda} \beta_3 \right]$. Αυτή η εξάρτηση της

χρωματικής διασποράς από το μήκος κύματος μπορεί να είναι σημαντική σε συστήματα πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος μεγάλων αποστάσεων, διότι διαφορετικά μήκη κύματος μπορεί να χρειάζονται διαφορετική αντιστάθμιση διασποράς.

Το όριο που βάζει η διασπορά στη μέγιστη απόσταση που μπορεί να διαδοθεί ένα σήμα χωρίς αναγέννηση εκφράζεται με το L_D , που είναι η απόσταση διάδοσης στην οποία ένας παλμός έχει διευρυνθεί κατά διάστημα ενός bit. Το εκτιμώμενο όριο διασποράς για ένα σήμα πλάτους $\Delta\lambda$, δίνεται μετά από τον τύπο $L_D = 1/(B \cdot D \cdot \Delta\lambda)$. Για να αυξήσει κάποιος σημαντικά το ρυθμό των bits ή για να αυξήσει την απόσταση των αναγεννητών, πρέπει να γυρίσει σε low-chirp διαμόρφωση του οπτικού σήματος, χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό διαμορφωτή.

Για συμβατική μονότροπη ίνα η μηδενική διασπορά είναι περίπου 1.31 μm . Όμως τα υπερβολικά πλεονεκτήματα των ενισχυτών από έρβιο και η χαμηλή απώλεια της ίνας στα 1.55 μm ουσιαστικά αποκλείουν λειτουργία σε συμβατική ίνα κοντά στα 1.31 μm . Στις καινούριες εγκαταστάσεις είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί ίνα μετατοπισμένης διασποράς (dispersion-shifted fiber (DSF)), που είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε η συμβολή του κυματοδηγού στη χρωματική διασπορά να μετατοπίζει τη μηδενική διασπορά σε κάποιο επιθυμητό μήκος κύματος στο παράθυρο 1.55- μm . Ακόμα και σε αυτές τις καινούριες εγκαταστάσεις μπορεί να χρειάζεται αντιστάθμιση διασποράς. Για παράδειγμα για να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις του four-wave-mixing στα συστήματα WDM, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίνα μη μηδενικής διασποράς αντί για την DSF. Αν και η χρήση αυτού του είδους της ίνας μπορεί να αυξήσει την απόδοση των εντελώς νέων συστημάτων σημαντικά, τα συστήματα πρέπει συχνά να σχεδιάζονται μέσω του υπάρχοντος δικτύου συμβατικών ινών. Η χρήση των ενισχυτών από έρβιο, η μεγιστοποίηση της απόστασης των αναγεννητών και η πραγματοποίηση των WDM είναι ανάγκες που απαιτούν χαμηλή διασπορά και επιτρέπουν στις μη γραμμικές επιδράσεις να παίξουν ρόλο, ένας ρόλος που μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την πρόσθεση διασποράς στο σύστημα.

Αντιστάθμιση διασποράς

Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές για αντιστάθμιση διασποράς. Αυτές περιλαμβάνουν και τα τρία υποσυστήματα που είναι παρόντα στα ενδοδιαστήματα των οπτικών αναγεννητών: ο πομπός, η ίνα και ο λήπτης.

Διαμόρφωση φάσματος στον πομπό

Οι περισσότερες τεχνικές εκπομπής τροποποιούν συχνά το φάσμα της ροής δεδομένων με την τεχνική 'prechirping'. Η εξάπλωση των bits σε γειτονικές σχισμές μπορεί να επιβραδυνθεί ρυθμίζοντας το φως στο προπορευόμενο τμήμα του bit να είναι το μήκος κύματος του μεγαλύτερο από το μέσο μήκος κύματος και στην ουρά του bit να είναι το μήκος κύματος μικρότερο από το μέσο. Με αυτόν τον τρόπο το φως μεγάλου μήκους κύματος στο προπορευόμενο τμήμα πρέπει να περάσει μέσα από ολόκληρη τη σχισμή

του παλμού πριν αρχίσει να εισβάλλει στην ουρά του παλμού και προκαλέσει λάθη. Το φως στην ουρά θα συμπεριφερθεί όμοια.

Μερικές τεχνικές που έχουν προταθεί είναι:

- Προσθήκη διαμόρφωσης φάσης μέσω της χρήσης ενός ασύμμετρου διαμορφωτή πλάτους Mach-Zehnder. Αυτή η τεχνική έχει επιδείξει αξιοπρεπή αντιστάθμιση διασποράς.
- Διαμορφώνοντας συχνοτικά (FM) το laser παρέχεται chirp στο οπτικό σήμα που μπαίνει σε έναν εξωτερικό διαμορφωτή.
- Εκμετάλλευση της μη γραμμικότητας της ίνας. Στα επίπεδα αξιοπρεπούς ισχύος η αυτοδιαμόρφωση φάσης παράγει μετατόπιση σε μεγαλύτερο μήκος κύματος στην αρχή ενός οπτικού παλμού και μια μετατόπιση σε μικρότερο μήκος κύματος στην ουρά. Αυτή η επίδραση παρέχει αντιστάθμιση προσεγγιστικά ισοδύναμη με αυτή των τεχνικών prechirping που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Μέσω των τεχνικών αντιστάθμισης που βασίζονται στον πομπό, η έναρξη βλαβών λόγω χρωματικής διασποράς μπορεί να καθυστερήσει αλλά όχι να ακυρωθεί. Αυτό γίνεται διότι η διαμόρφωση απαιτεί ένα ελάχιστο εύρος ζώνης για το οπτικό σήμα. Οι τεχνικές prechirping έχουν επεκτείνει το όριο διασποράς κατά παράγοντα 3 και αυτό είναι προφανώς κοντά στα όριά τους.

Ανάκτηση δεδομένων στο δέκτη

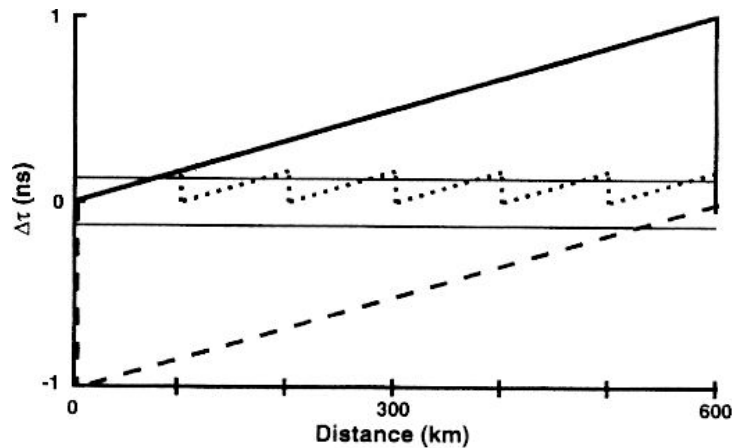
- Σύμφωνος. Ένας σύμφωνος δέκτης αναμειγνύει το εισερχόμενο σήμα με έναν τοπικό ταλαντωτή κι έτσι μετατοπίζεται κάθε φάση και διακύμανση πλάτους του οπτικού μέσου σε ένα οπτικό μέσο με μια ηλεκτρονική συχνότητα. Μετά η γραμμική αντιστάθμιση διασποράς μπορεί να εκτελεστεί στο οπτικό μέσο.
- Άμεση ανίχνευση. Σε αυτό το είδος παραληπτών το οπτικό σήμα συμβάλλει σε μια φωτοδίοδο και μετατρέπεται σε ένα ρεύμα ανάλογο του τετραγώνου του οπτικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτή η διαδικασία ανίχνευσης χάνει πληροφορίες για τη φάση του σήματος στο οποίο έχει γίνει διασπορά έτσι η γραμμική εξίσωση δε μπορεί να αντισταθμίσει μεγάλη διασπορά. Όμως όσο η παραμόρφωση του σήματος που προκλήθηκε από χρωματική διαμόρφωση είναι σταθερή και αναμενόμενη, η μορφή του κύματος μπορεί εύκολα να ανιχνευτεί. Σε μια μέθοδο το κατώφλι του κυκλώματος απόφασης είναι ποικίλο και εξαρτάται από τα προηγούμενα bits. Σε μια άλλη, η απόφαση για ένα δεδομένο bit λαμβάνεται μετά από ανάλυση της αναλογικής μορφής του κύματος για μια ζώνη περιόδων ρολογιού που περιβάλλουν το bit στην ερώτηση.

Σε αντίθεση με τις τεχνικές πομπού ενός bit οι τεχνικές για αντιστάθμιση διασποράς που βασίζονται στον δέκτη μπορούν να αντισταθμίσουν πολλά μήκη διασποράς της ίνας. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαθεσιμότητας πολλών σχισμών bits του σήματος που λαμβάνεται για επεξεργασία. Τα μειονεκτήματα τέτοιων προσεγγίσεων είναι: 1) απαιτήσεις για λογική λειτουργία στο βαθμό bit 2) η πολυπλοκότητα της λογικής αυξάνεται με ρυθμό 2^N όπου N είναι ο αριθμός των bits στα οποία ένας παλμός έχει διευρυνθεί και 3) ο απαιτούμενος λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ανάλογος του N.

Το οπτικό σύστημα.

Σε αντίθεση με την ηλεκτρική επεξεργασία που χρησιμοποιείται στις τεχνικές αντιστάθμισης που βασίζονται στον πομπό και στο λήπτη, αυτές που χρησιμοποιούνται στο μήκος της ίνας χρησιμοποιούν οπτική επεξεργασία. Ποικίλες μέθοδοι αυτού του είδους έχουν παρουσιαστεί.

- Ίνα αρνητικής διασποράς. Αυτή είναι η τεχνική που προτιμάται στο παρόν, γενικά αναφέρεται ως ίνα αντιστάθμισης διασποράς (dispersion-compensating fiber (DCF)). Σε αυτές τις ίνες η κλίση της εξάρτησης του μήκους κύματος από τη διασπορά έχει το ίδιο ίχνος με αυτήν της συμβατικής ίνας (θετικής), έτσι οι ίνες ακυρώνουν εντελώς τη διασπορά μόνο σε ένα μήκος κύματος. Όμως το κακό ταίριασμα της αντιστάθμισης αλλάζει λίγο με το μήκος κύματος κι έτσι δεν υφίσταται αυστηρά εμπόδια. Εκτός αυτού ίνα με αρνητική κλίση της διασποράς της προς την καμπύλη του κύματος έχει παρουσιαστεί και χρησιμοποιηθεί σε πειράματα WDM χωρίς την ανάγκη για αντιστάθμιση διασποράς ξεχωριστού καναλιού.



Σχήμα 6: Διεύρυνση παλμού από ένα σήμα με αρνητική διασπορά στο ξεκίνημα (dashed) ή στο τέλος (solid) μιας απόστασης ή μιας διάδοσης κάθε 100 km (dotted)

Ένα σύμβολο που χρησιμοποιείται συχνά για να δείξει την αξία της αντιστάθμισης ινών (FOM) είναι η απόλυτη τιμή της διασποράς διαιρεμένη με την εξασθένιση η οποία συνήθως εκφράζεται σε μονάδες ps/nm/dB. Η επιπρόσθετη απώλεια που προκύπτει από τη DCF μειώνει το SNR του συστήματος και η μη γραμμικότητα της DCF αυξάνει την παραμόρφωση του σήματος.

- Συμβολόμετρα. Τα συμβολόμετρα αντισταθμίζουν τη διασπορά παρέχοντας μονοπάτια, που εξαρτώνται από το μήκος κύματος, διαφόρων μηκών για διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του σήματος. Το συμβολόμετρο Gires-Tounois (GT) είναι ένα etalon φίλτρο στο οποίο ο πρώτος καθρέφτης είναι μερικώς ανακλαστικός και ο δεύτερος καθρέφτης είναι ανακλαστικός 100%. Έτσι όλο το επικείμενο φως ανακλάται αλλά υπάρχει ένα διαφορεικό σύνολο που εξαρτάται από το μήκος κύματος που καθυστερεί κοντά στην κοιλότητα συντονισμού. Η διάταξη των καθρεφτών μπορεί να κανονιστεί ώστε να ρυθμίζει το συντονισμό στο μήκος κύματος του σήματος και το σήμα στο οποίο έχει γίνει διασπορά ανακτάται μέσω

ενός οπτικού συνδέσμου ή κυκλοφορητή. Η διασπορά ενός GT συμβολόμετρου είναι περιοδική. Έτσι ταιριάζοντας την περιοδικότητα με τη διάταξη του καναλιού σε ένα WDM σύστημα όλα τα κανάλια θα μπορούσαν να αντισταθμιστούν ταυτόχρονα.

Μια άλλη συμβολομετρική συσκευή είναι ένα επίπεδο κύκλωμα διοξειδίου του πυριτίου σε πυρίτιο που περιέχει διαδοχικά συμβολόμετρα Mach-Zehnder. Σε ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder το φως διαιρείται σε 2 γενικά άνισου μήκους μονοπάτια και μετά ανασυνδυάζεται σε αυτήν την περίπτωση από έναν συζεύκτη 2×2. Τα μήκη των μονοπατιών διατάσσονται έτσι ώστε το μπλε φως να ταξιδεύει κυρίως στους μακρύτερους βραχίονες ενώ το κόκκινο να ταξιδεύει περισσότερο στους πιο κοντούς βραχίονες. Η συσκευή εξαρτάται από την πόλωση και υποφέρει από το μειονέκτημα ενός περιορισμένου εύρους ζώνης λειτουργίας και μιας σχετικά περιορισμένης δυνατότητας αντιστάθμισης. Όμως η φάση στον ένα βραχίονα του κάθε συμβολόμετρου είναι θερμικά αρμονική, έτσι η συσκευή θα μπορούσε να είναι ευρέως αρμονική. Επιπρόσθετα η περιοδικότητα της συσκευής των διαδοχικών Mach-Zehnder μπορεί να επιτρέψει σε όλα τα κανάλια σε ένα WDM σύστημα να αντισταθμίζονται ταυτόχρονα.

Η συμβολομετρική συσκευή που επί του παρόντος ελκύει την περισσότερη προσοχή είναι η *chirped fiber Bragg grating*. Ένα πλέγμα καταγράφει το μήκος μιας οπτικής ίνας αλλάζοντας περιοδικά το διαθλαστικό δείκτη της ίνας. Το φως μέσα στην ίνα ανακλάται με ένα μήκος κύματος διπλάσιο της περιόδου του πλέγματος. Σε έναν αντισταθμιστή διασποράς η περίοδος του πλέγματος μειώνεται γραμμικά κατά το μήκος της συσκευής. Επομένως το μπλε φως ανακλάται σε ένα σημείο πιο μέσα στη συσκευή από το κόκκινο φως και έτσι καθυστερείται σε σχέση με το κόκκινο φως. Αυτές οι συσκευές μπορούν να είναι συμπαγείς. Τα πλέγματα προσφέρουν χαμηλή απώλεια στο μη συντονισμένο φως που περνά από μέσα τους έτσι η λειτουργία του πολλαπλού μήκους κύματος μπορεί να ληφθεί βάζοντας διάφορα πλέγματα σε σειρές κατά την ίνα κάθε ένα επικεντρωμένο σε διαφορετικό μήκος κύματος. Όμως τα πλέγματα έχουν το μειονέκτημα ότι το αντισταθμισμένο σήμα έχει μεγάλη πίσω κάμψη και έτσι ένας οπτικός κυκλοφορητής πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει την είσοδο από την έξοδο. Έχουν ακόμα περιορισμένο εύρος ζώνης λειτουργίας και αντίθετα με άλλες συμβολομετρικές συσκευές η διασπορά δεν έχει μια χρήσιμη περιοδικότητα.

- Φασματική αντιστροφή. Το σήμα είναι διεσπαρμένο στο πρώτο μισό του διαστήματος διάδοσης οδηγώντας σε παραμορφωμένους παλμούς με το μπλε φως να οδηγεί το κόκκινο. Σε αυτό το διεσπαρμένο σήμα μετά γίνεται σύζευξη φάσης. Η σύζευξη φάσης αντιστρέφει το οπτικό φάσμα του σήματος έτσι ώστε το κόκκινο φως γίνεται μπλε και το μπλε κόκκινο. Το σχήμα του παλμού παραμένει το ίδιο αλλά τώρα το προπορευόμενο τμήμα είναι κόκκινο και η ουρά μπλε. Τώρα η διασπορά στο δεύτερο μισό του διαστήματος ανασχηματίζει τον παλμό έτσι ώστε αν η διασπορά πριν τη σύζευξη φάσης ταιριάζει με τη διασπορά μετά από αυτήν τότε το αρχικό σχήμα του παλμού θα επιστρέψει στο τέλος του διαστήματος. Η σύζευξη φάσης είναι μια διαδικασία στη οποία ένα διαμορφωμένο σήμα

$$E(x, y, z, t) = E(x, y, z, t)e^{j[\beta(\omega)z - \omega t]}$$

μετατρέπεται σε

$$E'(x, y, z, t) = E^*(x, y, z, t)e^{j[\beta(2\omega' - \omega)z - (2\omega' - \omega)t]}$$

Το φαινόμενο της διασποράς είναι γραμμικό. Συνεπώς μπορεί να ανακτηθεί πλήρως από την αντιστάθμιση διασποράς. Όμως η ποινή εξαιτίας των μη γραμμικών επιδράσεων σε συνδυασμό με τη διασπορά δε μπορεί να ανακτηθεί πλήρως από την αντιστάθμιση διασποράς.

Παραμορφώσεις διάδοσης – Μη γραμμικές

Οι μη γραμμικότητες στις ίνες πυριτίου μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 κατηγορίες: επιδράσεις που εμφανίζονται από τον μη γραμμικό δείκτη διάθλασης και από την προκαλούμενη σκέδαση. Οι επιδράσεις των μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ δυο συνπολωμένων σημάτων σε μια ίνα μπορούν να εκφραστούν από την αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο του ενός σήματος που προκλήθηκε από το άλλο μετά από τη διάδοσή του σε μια απόσταση dz . Η προκαλούμενη σκέδαση ορίζεται ως κέρδος ή απώλεια που εξαρτάται από την ένταση καθώς ο μη γραμμικός δείκτης αυξάνει τη φάση του οπτικού πεδίου που εξαρτάται από την ένταση.

Οι περισσότερες μη γραμμικές επιδράσεις συμβαίνουν νωρίς στο διάστημα της ίνας και εξασθενούν καθώς το σήμα διαδίδεται, επειδή εξαρτώνται από την ισχύ του σήματος. Η μοντελοποίηση αυτής της επίδρασης μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη έτσι στην πράξη χρησιμοποιείται ένα απλό μοντέλο το οποίο θεωρεί ότι η ισχύς είναι σταθερή σε ένα

συγκεκριμένο μήκος L_e . Το μήκος αυτό δίνεται από τον τύπο $L_e = \frac{1 - e^{-al}}{a}$, όπου a είναι

η εξασθένηση της ίνας και L είναι το πραγματικό μήκος. Σε ένα σύνδεσμο μήκους L με ενισχυτές που έχουν απόσταση μεταξύ τους l km, το μήκος αυτό δίνεται προσεγγιστικά

από τον τύπο $L_e = \frac{1 - e^{-al}}{a} \frac{L}{l}$. Η επίδραση της σκέδασης μη γραμμικότητας εξαρτάται

από το $P \cdot L_e$ και έτσι αυξάνει με μια αύξηση στην ισχύ της εισόδου και στο μήκος.

Αυτοδιαμόρφωση φάσης

Η αυτοδιαμόρφωση φάσης (*Self-Phase modulation (SPM)*) συμβαίνει όταν ένα σήμα διαμορφωμένης έντασης ταξιδεύει μέσα σε μια οπτική ίνα. Εξαιτίας του μη γραμμικού

δείκτη διάθλασης ($n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_e}$), η κορυφή ενός παλμού ταξιδεύει πιο σιγά από τη

βάση του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μήκος κύματος να εξαπλώνεται στο προπορευόμενο τμήμα του παλμού και να συμπιέζεται στην ουρά. Έτσι το προπορευόμενο τμήμα του παλμού αποκτά μια «κόκκινη μετατόπιση» και η ουρά αποκτά μια «μπλε μετατόπιση». Το σήμα στη συνέχεια είναι διευρυμένο στο πεδίο της

συχνότητας κατά $\Delta B = \gamma L_e \frac{dP}{dt}$, όπου dP/dt είναι η μετατόπιση συχνότητας που έγινε από

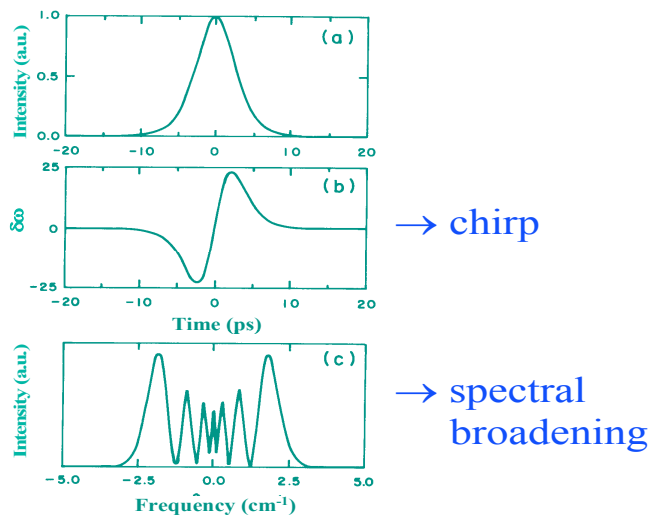
το τμήμα διάδοσης του παλμού. Αυτή η διάδοση μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα penalties εξαιτίας του φίλτρου εύρους ζώνης ή της παραμόρφωσης του παλμού που εμφανίζεται από χρωματική διασπορά. Ο συντελεστής n_2 , για ίνες πυριτίου είναι $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$. Η μη γραμμική συμβολή στο δείκτη διάθλασης έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή φάσης για τη διάδοση του φωτός σε μια ίνα $\Phi_{NL} = \gamma P L_e$, όπου έχουμε ορίσει το

μη γραμμικό συντελεστή $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_e}$. Αυτή η αλλαγή φάσης γίνεται σημαντική όταν η

ισχύς επί το ενεργό μήκος του δικτύου του συστήματος αυξάνεται.

Στο σύστημα «κανονικής» διασποράς όπου η χρωματική διασπορά είναι αρνητική σχετικά με το μειωμένο σύνολο καθυστέρησης με το μήκος κύματος, το προπορευόμενο τμήμα του παλμού που είναι κόκκινα μετατοπισμένο εξαιτίας της μη γραμμικότητας ταξιδεύει πιο γρήγορα και απομακρύνεται από το κέντρο του παλμού. Η ουρά που είναι μπλε μετατοπισμένη ταξιδεύει πιο σιγά και επίσης απομακρύνεται από το κέντρο του παλμού. Έτσι ο παλμός διευρύνεται από το συνδυασμό των επιδράσεων της μη γραμμικότητας και της διασποράς. Στο σύστημα «μη ομαλής» διασποράς, σχετικά με το αυξανόμενο σύνολο καθυστέρησης με το μήκος κύματος και τη θετική χρωματική διασπορά, το κόκκινα μετατοπισμένο προπορευόμενο τμήμα ταξιδεύει πιο σιγά και κινείται προς το κέντρο του παλμού. Όμοια η ουρά του παλμού που είναι μπλε μετατοπισμένη ταξιδεύει πιο γρήγορα και επίσης κινείται προς το κέντρο του παλμού. Έτσι ο παλμός περιορίζεται. Αυτός ο παλμός που περιορίζεται στο σύστημα μη ομαλής διασποράς υποδεικνύει ότι το SPM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αντιστάθμιση διασποράς. Το απόλυτο παράδειγμα αυτού είναι η εκπομπή σολιτονίου. Όμως ακόμα και με συμβατικούς NRZ παλμούς υπάρχει κάποια αντιστάθμιση.

Σε συστήματα με αντιστάθμιση διασποράς αυτή η αντιστάθμιση μεταξύ διασποράς και μη γραμμικότητας οδηγεί στη χρήση ενός συνόλου αντιστάθμισης που είναι λιγότερο από αυτό που θα αναμενόταν σε γραμμικές περιοχές.



Σχήμα 7: Φασματική διεύρυνση ενός παλμού εξαιτίας του SPM.

Μια άλλη προσέγγιση για να μειώσουμε την επίδραση του SPM είναι η φασματική αντιστροφή όπως περιγράφηκε στην παράγραφο Αντιστάθμιση Διασποράς.

Ετεροδιαμόρφωση φάσης

Στην ετεροδιαμόρφωση φάσης (*Cross Phase Modulation (XPM)*), οι διακυμάνσεις έντασης άλλων σημάτων επηρεάζουν τη φάση του σήματός μας. Γενικά τα δυο οπτικά

πεδία μπορούν να διαφέρουν όχι μόνο στα μήκη κύματος αλλά ακόμα στις καταστάσεις πόλωσης. Αρχικά μελετάμε την περίπτωση στην οποία τα δυο οπτικά πεδία σε διαφορετικά μήκη κύματος είναι γραμμικά πολωμένα κατά μήκος μιας από τις αρχικές ακμές μιας ίνας που προστατεύει την πόλωση έτσι ώστε να διατηρούν την πόλωσή τους κατά τη διάρκεια της διάδοσης. Η μετατόπιση συχνότητας που προκλήθηκε από μεταβολές της έντασης σε ένα άλλο κανάλι δίνεται από τον τύπο $\Delta B = 2\gamma L_e \frac{dP}{dt}$, όπου

dP/dt είναι η χρονική παράγωγος της ισχύος στον παλμό που παρεμβαίνει. Αυτό είναι ανάλογο της έκφρασης που δίνεται για το SPM εκτός από έναν παράγοντα του 2, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει στην υπόθεση ότι η επίδραση του XPM είναι μεγαλύτερη από αυτή του SPM. Όμως το γεγονός ότι η άκρη του παλμού που παρεμβαίνει κινείται μέσα στο σήμα εξαιτίας της διασποράς σημαίνει ότι ο χρόνος διαμονής του σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο τμήμα του σήματος παλμού έχει ελαττωθεί έτσι μειώνει την επίδραση του XPM.

Στην περίπτωση της σύζευξης που επηρεάστηκε από το XPM μεταξύ των συνιστωσών πόλωσης του ίδιου οπτικού κύματος, η μη γραμμική μετατόπιση φάσης λαμβάνεται με χρήση μιας σχέσης όμοιας με την παραπάνω εξίσωση, αλλά με έναν παράγοντα 2/3 και όχι 2. Ενδιαφέρον έχει το ότι το XPM μεταξύ των δυο συνιστωσών πόλωσης είναι λιγότερο αποδοτικό από αυτό μεταξύ δυο κυμάτων σε διαφορετικές συχνότητες. Ωστόσο η ποιοτική συμπεριφορά παραμένει η ίδια.

Η αντιστάθμιση διασποράς βελτιώνει αλλά δε μπορεί να εξαλείψει την ποινή του XPM. Το βέλτιστο DC είναι περίπου 50-60%

Όπως στην περίπτωση του SPM, δεν υπάρχει επίδραση της φασματικής διεύρυνσης που να εισάγεται από το XPM αν δεν υπάρχει καμιά χρωματική διασπορά για να μετατρέψει αυτή τη φασματική διεύρυνση σε διεύρυνση παλμού.

Η ετεροδιαμόρφωση φάσης μπορεί να είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας για οπτικά συστήματα πολλαπλών καναλιών. Η μη γραμμική μετατόπιση φάσης για ένα συγκεκριμένο κανάλι δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ αυτού του καναλιού αλλά επίσης από την ισχύ άλλων καναλιών. Η μετατόπιση φάσης για το j th κανάλι

γίνεται $\phi_j^{NL} = \gamma \cdot L_{eff} \cdot \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j}^M P_m \right)$, όπου M είναι ο συνολικός αριθμός καναλιών και

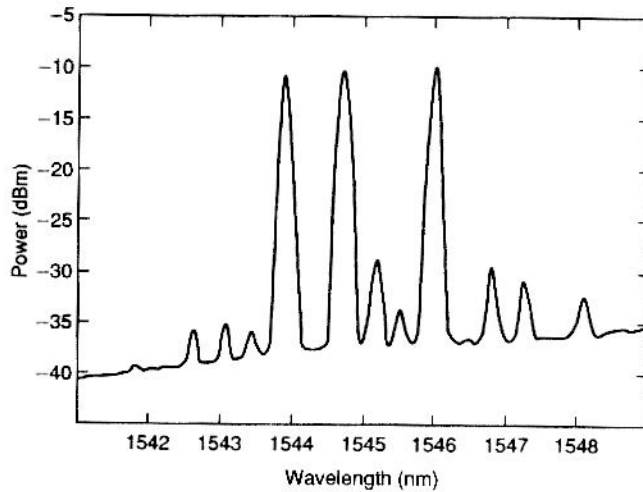
P_j είναι η ισχύς του καναλιού ($j = 1$ to M). Αν υποθέσουμε ίσες τιμές ισχύος των καναλιών, η μετατόπιση φάσης στη χειρότερη περίπτωση στην οποία όλα τα κανάλια ταυτόχρονα μεταφέρουν '1' bits δίνεται από τον τύπο $\phi_j^{NL} = (\gamma / a) \cdot (2M - 1) \cdot P_j$. Για να διατηρηθεί το $\phi_j^{NL} \ll 1$, η ισχύς του καναλιού περιορίζεται κάτω από 1 mW ακόμα και για $M = 10$ αν χρησιμοποιούμε τυπικές τιμές του γ και του a στα 1.55 nm.

Στα ενισχυμένα συστήματα δυο πράγματα συμβαίνουν που χαλάνε τις επιδράσεις της μη γραμμικότητας: Το αποδοτικό μήκος L_e πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των διαστημάτων ενισχυτή καθώς ο ενισχυτής αλλάζει την ένδειξη της ισχύος μετά από κάθε διάστημα, ενώ γενικά υψηλότερες τιμές ισχύος εξόδου είναι πιθανές. Η συνολική επίδραση του XPM είναι το άθροισμα του XPM εξαιτίας του κάθε καναλιού και διαστήματος και εξαρτάται από τον αριθμό των καναλιών και των αριθμό των διαστημάτων.

Μίξη τεσσάρων φωτονίων

Η μίξη τεσσάρων φωτονίων (*Four-Photon mixing (FPM)*) είναι μια μη γραμμικότητα τρίτης τάξης, η οποία είναι ανάλογη της παραμόρφωσης ενδοδιαμόρφωσης στα ηλεκτρικά συστήματα. Η FPM έχει ακόμα προέλευση στην τρίτης τάξης μη γραμμική ηλεκτρική επιδεκτικότητα που δηλώνεται $\chi^{(3)}$. Αν 3 οπτικά πεδία με συχνότητες γραμμής μεταφοράς ω_i , ω_j και ω_k συνδιαδίδονται μέσα στην ίνα ταυτόχρονα, το $\chi^{(3)}$ παράγει ένα τέταρτο πεδίο του οποίου η συχνότητα ω_{ijk} σχετίζεται με τις άλλες συχνότητες με τη σχέση $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$, η οποία μπορεί να είναι πολύ δύσκολη σε συστήματα επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών από τη στιγμή που μπορούν σχεδόν να ταιριάζουν τις φάσεις τους όταν τα μήκη κύματος των καναλιών πλησιάζουν το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς. Έτσι 3 κύματα που συνδιαδίδονται αυξάνουν με το FPM σε εννιά καινούρια οπτικά κύματα. Σε ένα σύστημα WDM αυτό συμβαίνει για κάθε επιλογή τριών κυμάτων καναλιών με $k \neq i, j$. Έτσι ακόμα και αν ένα σύστημα έχει μόνο 10 κανάλια εκατοντάδες καινούριες συνιστώσες παράγονται από το FPM. Για N κανάλια ο αριθμός των αναμειγνυόμενων προϊόντων που παράγονται είναι $M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2)$. Στα

συστήματα WDM με κανάλια με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους όλοι οι όροι που παράγονται από το FPM στο εύρος ζώνης του συστήματος πέφτουν στις συχνότητες των καναλιών αυξάνοντας τις παρεμβολές. Η επίδραση του FPM απεικονίζεται στο σχήμα 8.



Σχήμα 8: Οπτικό φάσμα ισχύος μετρημένο στην έξοδο ίνας μετατοπισμένης διασποράς ($D = -0.2$ ps/nm-km στο κεντρικό κανάλι) μήκους 25-km όταν τρία 3-mW κανάλια ξεκινούν.

Υποθέτοντας ότι τα σήματα εισόδου δεν έχουν εξαντληθεί από την παραγωγή προϊόντων μίξης, η κορυφή της ισχύος του προϊόντος μίξης δίνεται από τον τύπο:

$$P_{ijk} = \left(\frac{D_{ijk}}{3} \cdot \gamma \cdot L_e \right)^2 \cdot P_i \cdot P_j \cdot P_k \cdot e^{-\alpha L} \cdot \eta$$

όπου $D_{ijk} = 3$ για δυο τόνων προϊόντα και 6 για τριών τόνων προϊόντα, γ είναι η μη γραμμική συνιστώσα, L_e είναι το αποδοτικό μήκος της ίνας και P_i, P_j και P_k είναι οι κορυφές ισχύος των εισόδων των καναλιών. Η αποδοτικότητα η δίνεται από τον τύπο

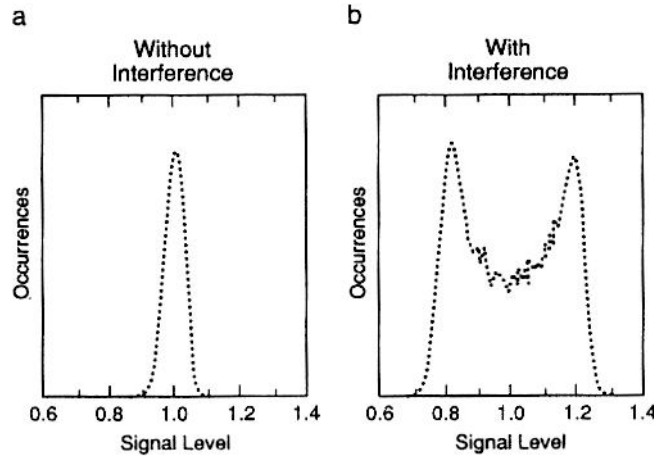
$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right).$$

Η ποσότητα $\Delta\beta$ είναι η διαφορά των σταθερών διάδοσης των διαφόρων κυμάτων εξαιτίας της διασποράς και δίνεται από τον τύπο

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk} = \frac{2\pi\lambda^2}{c} (f_i - f_k)(f_j - f_k) \left[D(\lambda) - \frac{\lambda^2}{c} \left(\frac{f_i + f_j}{2} - f \right) \frac{dD}{d\lambda} \right]$$

όπου η διασπορά D και η κλίση της είναι υπολογισμένες στο γενικό μήκος κύματος λ και $f = c/\lambda$.

Η εκτίμηση της απόδοσης της υποβάθμισης εξαιτίας του FPM στα WDM συστήματα είναι αρκετά πολύπλοκη. Αν και για την απλή περίπτωση ένα μονό προϊόν μίξης που παράχθηκε σε μια συχνότητα καναλιού η εξασθένηση φαίνεται πεντακάθαρα σαν ποινή ισχύος (σχήμα 9), όταν διάφορα προϊόντα μίξης παράγονται στην ίδια συχνότητα, η συνολική παρεμβολή εξαρτάται σημαντικά στις σχετικές φάσεις των προϊόντων μίξης. Το σύνολο των προϊόντων μίξης που παράχθηκαν στην ίδια συχνότητα μπορούν να θεωρηθούν Gaussian θόρυβος με ισχύ ίση με το άθροισμα των τιμών ισχύος των μονών προϊόντων μίξης. Η επίδραση του FPM στην απόδοση ενός ενισχυμένου WDM συστήματος μπορεί σε αυτήν την περίπτωση να φανεί σαν οπτική SNR υποβάθμιση.

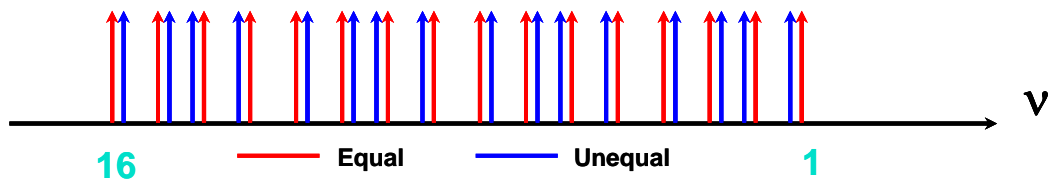


Σχήμα 9: Ιστογράμματα δειγματοληψίας (α)χωρίς και (β) με τα έξω κανάλια παρόντα για την περίπτωση $D = -0.2$ ps/nm-km.

Η μίξη τεσσάρων φωτονίων είναι η κύρια επίδραση για τα WDM συστήματα, και συνεπώς έχει λάβει σημαντική προσοχή ενώ διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για να την εμποδίσουν. Χρησιμοποιώντας ορθογώνια πολωμένα σήματα μπορεί να εμποδιστεί το FPM, εξαιτίας της δυνατής εξάρτησής του από την πόλωση. Όμως η διασπορά κατάστασης πόλωσης αλλάζει τις σχετικές πολώσεις και εισάγει αργά μεταβλητή εξασθένηση. Ακόμα και το αξιοπρεπές PMD βοηθά στο να γίνουν οι αρχικές καταστάσεις της πόλωσης των καναλιών σε ένα μακρύ WDM σύστημα άσχετες. Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των καναλιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει

την αποδοτικότητα της παραγωγής των προϊόντων αναμειξεων, αλλά η βελτίωση έρχεται σε βάρος του οπτικού εύρους ζώνης και όταν χρησιμοποιείται το DSF πρέπει να δοθεί σημασία για την αποφυγή τοποθέτησης καναλιών στο λ_0 ή σε ισαπέχοντα από το λ_0 σε οποιαδήποτε απόσταση ίνας. Με την ίνα μη μηδενικής διασποράς η προσέγγιση $\eta \propto 1/\Delta f^4$ διατηρείται. Έτσι διπλασιάζοντας το εύρος ζώνης εμποδίζεται το FPM από 12 dB και επιτρέπεται μια αύξηση στην ισχύ ανά κανάλι των db. Δυο ακόμα σχήματα που επιτρέπουν να υπάρξει δυνατό εμπόδιο στην εξασθένηση του FPM περιγράφονται στη συνέχεια. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν τη χρήση συμβατικών πομπών και απαιτούν να μην υπάρχουν επιπρόσθετες συσκευές στη γραμμή εκπομπής.

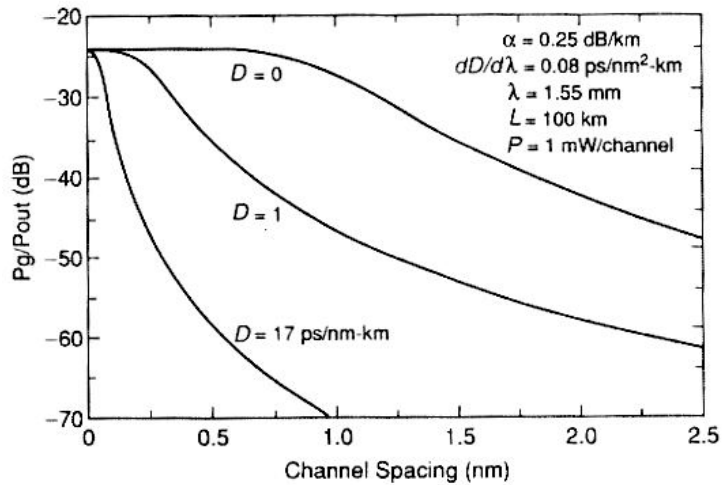
Η FPM υποβάθμιση εμφανίζεται κυρίως από τη συναφή παρεμβολή μεταξύ των κυμάτων μίξης και του σήματος στον ανιχνευτή. Αν τα κανάλια είναι κανονισμένα έτσι ώστε κανένα από τα προϊόντα μίξης να μην συναντιέται με οποιοδήποτε από τα κανάλια, αυτή η συναφής παρεμβολή μπορεί να αποφευχθεί. Από τη στιγμή που τα τυπικά WDM συστήματα χρησιμοποιούν αποστάσεις καναλιών γενναιόδωρα σε σύγκριση με το εύρος ζώνης των σημάτων, υπάρχει μια ευκαιρία να χρησιμοποιήσουν αυτό το 'σπαταλημένο εύρος ζώνης' για να τοποθετήσουν προϊόντα μίξης μακριά από τα κανάλια. Η διαφορά στις αποστάσεις συχνοτήτων και συνεπώς το εκτόπισμα του προϊόντος μίξης από το κανάλι πρέπει να είναι το λιγότερο ο βαθμός bit για την αποφυγή παρεμβολής. Η απαίτηση ώστε κανένα προϊόν μίξης να μη συναντήσει οποιοδήποτε κανάλι φάνηκε να είναι ισοδύναμη με την απαίτηση ότι η διαφορά μεταξύ οποιονδήποτε δυο συχνοτήτων καναλιών είναι μοναδική. Για ένα σύστημα του οποίου οι αποστάσεις έχουν χωριστεί ίσα ένα προϊόν μίξης με μια ισχύ 20 dB χαμηλότερη από αυτή που το σήμα είναι αρκετό για να παράγει ένα 20% και έτσι παράγει μια ποινή 1-dB. Με άνισο χωρισμό αποστάσεων η μόνη επίδραση του FPM είναι ελάττωση της ισχύος του καναλιού. Σε αυτήν την περίπτωση για να παραχθεί ποινή 1-dB, το κύμα μίξης πρέπει να έχει ισχύ ίση με το 20% της ισχύος του καναλιού. Έτσι η ισχύς του πρέπει να είναι 7 dB μικρότερη από την ισχύ του καναλιού και 13 dB μεγαλύτερη από την περίπτωση του ίσου χωρισμού αποστάσεων έτσι επιτρέπεται μια αύξηση στην εκπεμπόμενη ισχύ περίπου 6.5 dB για την ίδια ποινή. Η χρήση του άνισου χωρισμού αποστάσεων μπορεί να απαιτεί μια επέκταση εύρους ζώνης (συνήθως μικρότερη από ένα παράγοντα του 2 για συστήματα μέχρι των 10 καναλιών), ενώ προτείνει επιπρόσθετες απαιτήσεις στη σταθεροποίηση συχνότητας των πηγών laser.



Σχήμα 10: Άνισος χωρισμός αποστάσεων καναλιών σε ένα WDM σύστημα.

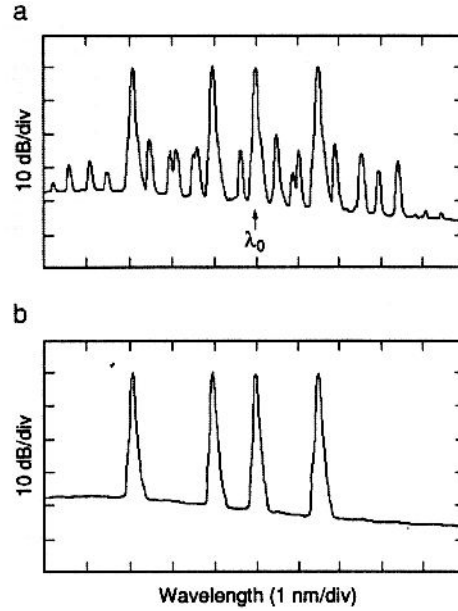
Καθώς το άνισο χωρίσμα αποστάσεων βελτιώνει τις επιδράσεις των προϊόντων μίξης στην απόδοση του WDM συστήματος, είναι ακόμα πιθανό να προστατέψει την παραγωγή από αυτά τα προϊόντα σε πρώτη φάση αποφεύγοντας το ταίριασμα φάσης. Σε ένα θεμελιώδες επίπεδο μια FPM διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί σα μια διαδικασία σκέδασης στην οποία 2 φωτόνια με ενέργειες $\hbar\omega_1$ και $\hbar\omega_2$ δημιουργούν 2 νέα φωτόνια

με ενέργειες $\hbar\omega_3$ και $\hbar\omega_4$. Το ταίριασμα φάσης μπορεί να αποφευχθεί από τη χρωματική διασπορά που εισάγει διαφορετικές καθυστερήσεις σε κάθε μήκος κύματος. Το σχήμα 11 απεικονίζει την επίδραση της χρωματικής διασποράς της ίνας στην εξασθένιση μίξης.



Σχήμα 11: Ο λόγος της ισχύος του παραγόμενου προϊόντος μίξης προς την ισχύ του εκπεμπόμενου καναλιού vs χωρισμός αποστάσεων καναλιών για δυο κανάλια με ίση ισχύ. Οι καμπύλες που φαίνονται είναι για τρεις διαφορετικές τιμές της χρωματικής διασποράς.

Η καμπύλη δείχνει το λόγο της παραγόμενης ισχύος προς την εκπεμπόμενη ισχύ για ένα 2 τόνων προϊόν σε συνάρτηση του χωρίσματος αποστάσεων του καναλιού για τρεις διαφορετικές τιμές της χρωματικής διασποράς. Όπως φαίνεται αρκετά μικρές τιμές διασποράς (1-2 ps/nm-km) μπορούν να έχουν δραματική επίδραση. Με $D=1$ ps/nm-km και 1-nm χώρισμα αποστάσεων καναλιού, το FPM εμποδίζεται από 20 dB. Έτσι η ισχύς του καναλιού μπορεί να αυξηθεί στα 10 dB. Ένα παράδειγμα για ένα σύστημα τεσσάρων καναλιών φαίνεται στο σχήμα 12. Στην έξοδο των 25 km του DSF με λ_0 μέσα στο εύρος ζώνης των καναλιών, τα προϊόντα μίξης είναι ξεκάθαρα αισθητά. Με 50 km ίνας μη μηδενικής διασποράς δεν υπάρχει μαρτυρία για προϊόντα μίξης.



Σχήμα 12: Τέσσερα WDM κανάλια, κάθε ένα με μέση ισχύ 3 dBm, διαδίδονται μέσω (a) 25 km DSF με λ_0 μέσα στο εύρος ζώνης των καναλιών, και (b) 50 km ίνας μη μηδενικής διασποράς ($D= 2.5$ ps/nm-km). Τα κανάλια είναι διαχωρισμένα άνισα για τον έλεγχο της παρουσίας των προϊόντων μίξης.

Η διαχείριση της διασποράς και ο άνισος χωρισμός αποστάσεων είναι τέλεια συμβατά και μπορούν να συνδυαστούν για τη λήψη ενός FPM εμποδίου μίξης δυνατότερο από αυτό που προκύπτει από τις δυο τεχνικές ξεχωριστά.

Αστάθεια Διαμόρφωσης

Η αστάθεια διαμόρφωσης (*Modulation instability (MI)*) μπορεί να θεωρηθεί στο πεδίο ορισμού του χρόνου ως καταστροφή παλμού ή σχηματισμός σολιτονίου. Στο πεδίο ορισμού της συχνότητας η MI μπορεί να περιγραφεί με όρους παραμετρικού κέρδους ή FPM ταίριασμα φάσης από την παραγωγή του SPM εκθετικού κέρδους για να προϊόντα μίξης. Θεωρώντας ίνες με λιγότερες απώλειες θα μελετήσουμε την περίπτωση ενός δυνατού σήματος εισόδου (σήμα άντλησης) και ενός ή περισσότερων αδύναμων σημάτων τα οποία καλούνται σήματα Stokes αν τα μήκη κύματός τους είναι μεγαλύτερα από το μήκος κύματος άντλησης, ή anti-Stokes σήματα για μήκη κύματος μικρότερα από το μήκος κύματος άντλησης. Ακόμα και αν μόνο ένα δυνατό σήμα εισέρχεται στην ίνα συνοδεύεται τυπικά από ενισχυμένο αυθόρμητο θόρυβο εκπομπής που δρα σαν 'πηγή' Stokes και anti-Stokes ισχύος. Η γενική έκφραση για τιμές ισχύος Stokes και anti-Stokes που παράγονται μέσα στις ίνες είναι

$$\frac{P_a(L)}{P_s(0)} = (\gamma P_p L)^2 \frac{\sinh^2(g_{MI} L / 2)}{(g_{MI} L / 2)^2}$$

όπου $P_s(0)$ είναι η εισερχόμενη Stokes ισχύς στην είσοδο της ίνας, $P_a(L)$ είναι η παραγόμενη anti-Stokes ισχύς στην έξοδο της ίνας θεωρώντας ότι δεν εισέρχεται

καθόλου anti-Stokes φως, P_p είναι η κορυφή ισχύος του σήματος άντλησης εισόδου και g_{MI} είναι η συνιστώσα του κέρδους που δίνεται από τον τύπο $g_{MI} = 2[-(\Delta\beta/2)^2 - \Delta\beta\gamma P_p]^{1/2}$ όπου Δf είναι η διαφορά συχνότητας μεταξύ συχνότητας αντλίας και συχνοτήτων Stokes. Αν το $\Delta\beta$ είναι θετικό η συνιστώσα του κέρδους είναι μια φανταστική ποσότητα και λαμβάνει χώρα το συνηθισμένο FPM όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Αν το $\Delta\beta$ είναι αρνητικό και το P είναι αρκετά μεγάλο, το g_{MI} θα είναι πραγματικό και θα συμβεί η ενίσχυση των Stokes και των anti Stokes κυμάτων. Η συνιστώσα του κέρδους θα είναι

$$g_{MI} = 2 \left[- \left(\frac{\pi\lambda^2}{c} D\Delta f \right)^2 + \frac{2\pi\lambda^2}{c} D\Delta f^2 \gamma P_p \right]^{1/2}$$

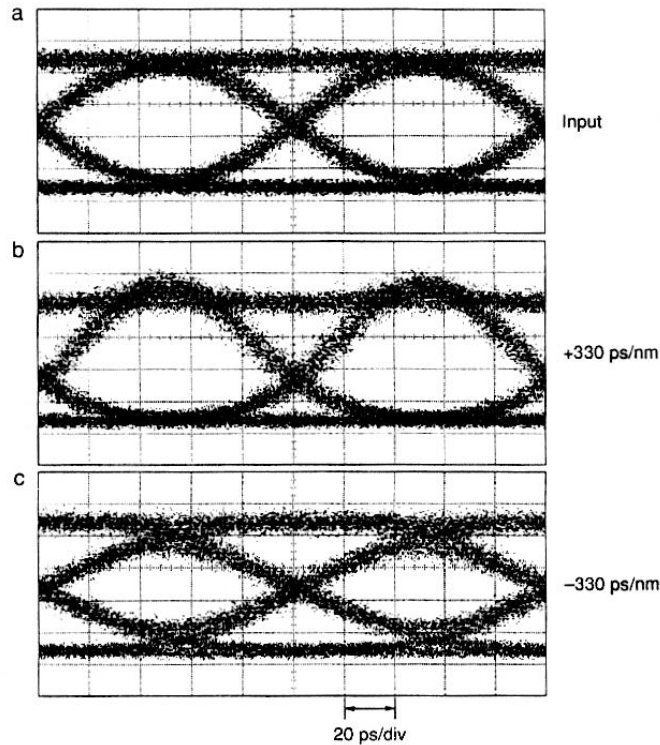
και είναι πραγματική για θετικό D στο εύρος συχνότητας $0 < \Delta f < \left(\frac{2c\gamma P_p}{\pi\lambda^2 D} \right)^{1/2}$. Το

μέγιστο κέρδος $g_{max} = 2\gamma P_p$ συμβαίνει στο διαχωρισμό συχνότητας αντλίας/Stokes στον οποίο

$$\Delta\beta = -2\gamma P_p : \Delta f_{max} = \left(\frac{c\gamma P_p}{\pi\lambda^2 D} \right)^{1/2}.$$

Αν λάβουμε υπόψη μας την απώλεια της ίνας που καταλήγει σε ελάττωση ισχύος κατά μήκος της ίνας, ο συντελεστής κέρδους g_{MI} θα ελαττωθεί, όπως και το Δf_{max} . Τα αποτελέσματα του ΜΙ σε αυτή την περίπτωση μπορούν να παρατηρηθούν μέσα από προσομοιώσεις.

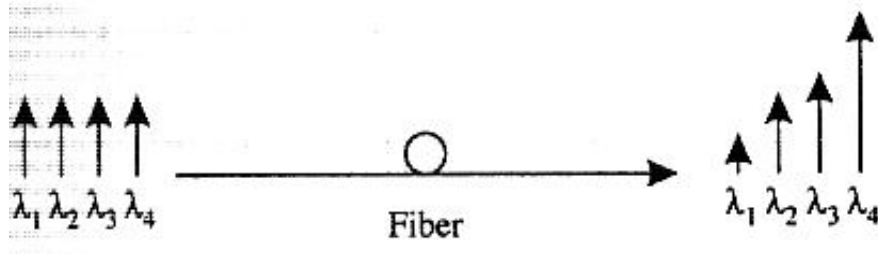
Η διαμόρφωση αστάθειας μπορεί να είναι ωφέλιμη στα συστήματα εκπομπής εξαιτίας του σχηματισμού του παλμού που παρέχει. Σε μονής απόστασης συστήματα η θετική διασπορά εξασφαλίζει στο σύστημα ανώτερη απόδοση. Το SPM αντισταθμίζει τις επιδράσεις της διασποράς σε $+D$ ίνες και παρέχει το απαιτούμενο ταίριασμα φάσης για να λάβει χώρα η επίδραση. Η ποινή για αυτή τη διαδικασία είναι η παραγωγή θορύβου μέσα στο εύρος ζώνης του παραλήπτη.



Σχήμα 13: διαγράμματα ματιού: (α) back to back; (β) διαμέσου 145 km ‘θετικής’ μη μηδενικής διασποράς ίνας; και (γ) διαμέσου 145 km ‘αρνητικής’ μη μηδενικής διασποράς ‘ίνας’. Η μέση ισχύς εισόδου ήταν +14.5 dBm.

Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman

Η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (SRS) είναι μια μη γραμμική παραμετρική αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των μοριακών ταλαντώσεων. Το φως που διοχετεύεται σε μια οπτική ίνα διασκορπίζεται μερικώς και μετατοπίζεται στη συχνότητα. Η SRS προκαλεί ισχύ για να μεταπηδήσει από κανάλια χαμηλών μηκών κύματος σε κανάλια υψηλότερων μηκών κύματος. Αυτή η σύζευξη ενέργειας είναι ένα θεμελιώδες επακόλουθο, όπως επίσης είναι και η βάση της οπτικής ενίσχυση και των lasers. Η ενέργεια ενός φωτονίου σε ένα μήκος κύματος λ δίνεται από τη σχέση hc/λ όπου h είναι η σταθερά του Planck (6.63×10^{-34} J s). Η μεταφορά ενέργειας από ένα σήμα με χαμηλό μήκος κύματος σε ένα σήμα υψηλότερου μήκους κύματος αντιστοιχεί σε εκπομπή φωτονίων χαμηλής ενέργειας από φωτόνια υψηλής ενέργειας.



Σχήμα 14: Το φαινόμενο SRS. Ενέργεια από κανάλια χαμηλών μηκών κύματος μεταφέρεται σε κανάλια με μεγαλύτερα μήκη κύματος.

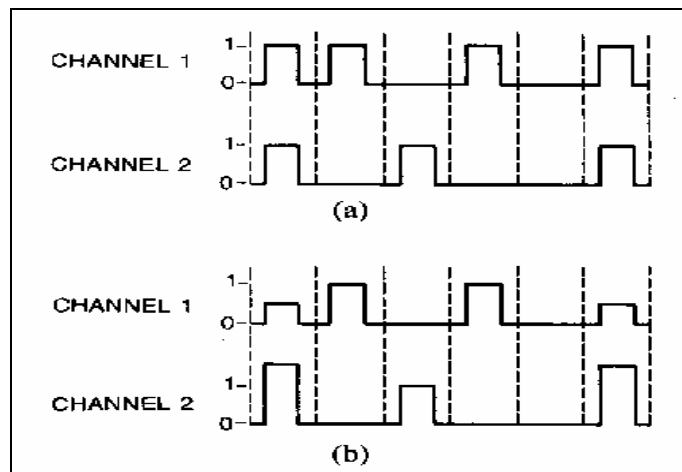
Το penalty του SRS ελαττώνεται όταν εμφανίζεται χρωματική διασπορά, λόγω του γεγονότος ότι τα σήματα σε διαφορετικά κανάλια ταξιδεύουν σε διαφορετικές ταχύτητες. Τυπικά η χρωματική διασπορά μειώνει το SRS κατά ένα παράγοντα 2. Λόγω του SRS, σε ένα σύστημα WDM, τα σήματα σε μεγάλα μήκη κύματος ενισχύονται από σήματα μικρότερου μήκους κύματος κι αυτό οδηγεί σε υποβάθμιση του δεύτερου.. Το κατώφλι ισχύος για το SRS, το οποίο ορίζεται σαν η προσπίπτουσα ισχύς στην οποία η μισή ισχύς χάνεται στο SRS στην έξοδο οπτικής ίνας μήκους L , δίνεται από τη σχέση

$$P_{th} \approx \frac{16 \cdot A_{eff}}{g_R \cdot L_{eff}}$$

όπου g_R είναι η μέγιστη τιμή του κέρδους Raman, A_{eff} είναι το πραγματικό

mode cross section, , και L_{eff} το πραγματικό μήκος αλληλεπίδρασης.

Σε συστήματα με αναγέννηση το SRS, προκαλεί ένα penalty ισχύος στα κανάλια με μικρό μήκος κύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 21



Σχήμα 15: Bit patterns σε ένα σύστημα WDM δύο καναλιών στην (a) είσοδο της ίνας και (b) στην έξοδο της ίνας με αλληλεπίδραση SRS μεταξύ των καναλιών ($\lambda_1 < \lambda_2$).

Στα WDM συστήματα η υποβάθμιση έχει τη μορφή της ελάττωσης του SNR στα χαμηλού μήκους κύματος κανάλια. Σε συστήματα με διάφορα κανάλια, η πιθανότητα σήματα να μεταδίδονται ταυτόχρονα σε όλα τα κανάλια είναι πολύ χαμηλή. Η αμελητέα ισχύς που χάνεται στο συντομότερο μήκος κύματος είναι στην πραγματικότητα μια

τυχαία μεταβλητή απ' τη στιγμή που εξαρτάται απ' τα δυφία που μεταδίδονται στα άλλα κανάλια. Στο όριο των απείρως πολλών καναλιών με σταθερή συνολική ισχύ και bandwidth, η συνάρτηση αποσυμφόρησης συγκλίνει σε μια συνάρτηση δέλτα και το φαινόμενο SRS γίνεται ολοκληρωτικά ντετερμινιστικό. Σε αυτό το όριο, η αποσυμφόρηση μπορεί κατ' αρχήν να εξισορροπηθεί ακριβώς με τη χρήση ενός φίλτρου μετά από κάθε εν σειρά ενισχυτή το οποίο προκαλεί μια εξασθένηση. Αυτή η μετά τον ενισχυτή απώλεια που εξαρτάται από το μήκος κύματος δεν εισάγει SNR υποβάθμιση. Επί πλέον, δεν χρειάζονται καινούργια στοιχεία αν υπάρχουν ήδη οπτικά φίλτρα στους EDFAs για να εξισορροπήσουν τη μορφή του κέρδους. Είναι επαρκές να αλλάξει λίγο ο σχεδιασμός του φίλτρου για να συμπεριλάβει την SRS κλίση του κέρδους. Με ένα πεπερασμένο αριθμό καναλιών, μόνο η μέση απώλεια μπορεί να καταπιεστεί από τα φίλτρα. With a finite number of channels, only the average depletion can be suppressed by the filters.

Εξαναγκασμένη Σκέδαση Brillouin

Στην περίπτωση του SBS, τα phonons που εμπλέκονται στην αλληλεπίδραση διασποράς είναι ακουστικά phonons και η αλληλεπίδραση συμβαίνει σε μια πολύ λεπτή γραμμή πλάτους $\Delta f_B = 20\text{MHz}$ στα $1.55\mu\text{m}$. Ακόμα το κύμα Stokes και το κύμα άντλησης διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Γι' αυτό το λόγο το SBS δεν προκαλεί καμία αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών μηκών κύματος εφόσον ο χωρισμός σε μη επικαλυπτόμενα παράθυρα του μήκους κύματος (wavelength spacing) είναι πολύ μεγαλύτερος από 20MHz, που είναι τυπικά η αιτία. Το SBS μπορεί όμως να δημιουργήσει σημαντική παραμόρφωση μέσα σε ένα μόνο κανάλι. Το SBS παράγει κέρδος στην κατεύθυνση που είναι αντίθετη αυτής στην οποία διαδίδεται το σήμα, με άλλα λόγια πίσω προς την κατεύθυνση της πηγής. Γι' αυτό το λόγο μειώνει το μεταφερόμενο σήμα και παράγει ένα ενδεχομένως δυνατό σήμα πίσω προς την κατεύθυνση του μεταβιβαστή (πηγή) το οποίο πρέπει να προστατευτεί από έναν απομονωτή (isolator). Ο SBS συντελεστής κέρδους g_B είναι περίπου $4 \cdot 10^{-11} \text{m/W}$ ανεξάρτητος από το μήκος κύματος.

Για ένα μήκος L , με ισχύ άντλησης P_P με εγχυσή σε $z = 0$, και ισχύ Stokes P_S , με έγχυση σε $z = L$,

$$P_S(0) = P_S(L) \exp\left(-\alpha L + \frac{g_B P_P L_e}{2A_e}\right)$$

Το κατώφλι SBS ορίζεται σαν η ισχύς εισόδου στην οποία η ισχύς σκέδασης μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η ισχύς εισόδου. Η ισχύς κατωφλίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_B^{th} = \frac{42 A_e}{g_B L_e} \left(1 + \frac{\Delta \nu_s}{\Delta \nu_B}\right)$$

όπου $\Delta \nu_s$ είναι το linewidth της πηγής και $\Delta \nu_B$ το Brillouin linewidth. Αυτή η σχέση δείχνει ότι η ισχύς κατωφλίου αυξάνεται πέρα απ' το Brillouin linewidth. Ομοίως το κατώφλι αυξάνεται αν η ταχύτητα του ήχου στο γυαλί είναι ανομοιομορφη, οδηγώντας σε διαπλάτυνση του bandwidth της διεργασίας Brillouin στην οπτική ίνα και σε μείωση της μέγιστης τιμής του συντελεστή κέρδους g_B .

Από την άποψη του συστήματος, είναι απαραίτητο κανένα οπτικό σήμα στην οπτική ίνα να μην υπερβαίνει το κατώφλι SBS. Στα συστήματα WDM τα σήματα πρέπει να μένουν το καθένα ξεχωριστά κάτω απ' αυτό το κατώφλι απ' τη στιγμή που δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των καναλιών. Οι πηγές που διαμορφώνονται σε υψηλούς ρυθμούς bit έχουν τυπικά bandwidths μεγαλύτερα από το φυσικό Brillouin linewidth και γι' αυτό το λόγο μειωμένο κέρδος Brillouin. Ωστόσο, για μερικές εφαρμογές το κατώφλι πρέπει να αυξηθεί κι άλλο επειδή μπορεί να απαιτούνται υψηλότερες ισχύεις.

Έστω αν τα SRS και SBS και είναι αρκετά όμοια απ' τη φύση τους, διαφορετικές σχέσεις διασποράς για τα ακουστικά και τα οπτικά φωνόνια οδηγούν σε κάποιες διαφορές μεταξύ τους. Μια σημαντική διαφορά είναι ότι το SBS σε απλές μονότροπες ίνες λαμβάνει χώρα μόνο στην αντίθετη φορά, ενώ το SRS στην προς τα εμπρός. Το SBS παρέχει στενή ζώνη κέρδους, με linewidth της τάξης των 20 MHz και δεν ενώνει κανάλια σε επίπεδο WDM, ενώ το SRS έχει bandwidth κέρδους της τάξης των 12 THz ή 100 nm στα 1.5 μm. Έτσι, το SRS μπορεί να ενώσει κανάλια WDM. Γενικά, το SRS είναι επίδραση που εξασθενίζει πιο πολύ από το SBS. Το κατώφλι SRS threshold είναι της τάξης του 1 W, το οποίο είναι περίπου τρεις τάξεις μεγαλύτερες από το κατώφλι SBS, το οποίο είναι τυπικά της τάξης mW για ένα μη διαμορφωμένο κύμα..

Υποβάθμιση Οπτικών ενισχυτών

Υπάρχουν τρεις τύποι οπτικών ενισχυτών που χρησιμοποιούνται: Ο ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA), ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού (SOA) και ο ενισχυτής Raman.

Ενισχυτής Ίνας Ερβίου (EDFA)

Ο EDFA έφερε επανάσταση στις οπτικές επικοινωνίες επειδή είναι αμιγώς οπτικός, συμβατός με ίνες, παρέχει μεγάλο bandwidth (20~70 nm), υψηλό κέρδος (20~40 dB), υψηλή ισχύ εξόδου (>200mW), αναισθησία στο bit rate, ρύθμιση της ισχύος και του μήκους κύματος, χαμηλά επίπεδα θορύβου (NF<5dB) και χαμηλή διαστρέβλωση.

Θόρυβος και υποβάθμιση του οπτικού SNR

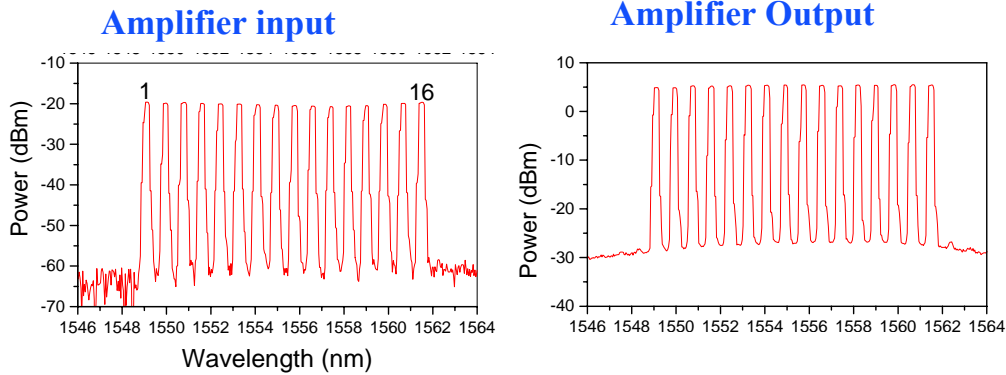
Η ενίσχυση του EDFA συνοδεύεται από ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (ASE). Αυτό το ASE προσθέτει θόρυβο που υποβαθμίζει τα ενισχυμένα σήματα. Το noise figure ενός

EDFA δίνεται από τη σχέση $NF \cong 2n_{sp} \frac{(G-1)}{G} + \frac{1}{G} \approx 2n_{sp}$ όπου n_{sp} , είναι ο παράγοντας

αυθόρμητης εκπομπής που υποδηλώνει τις σχετικές ισχύεις της αυθόρμητης και διεγερόμενης εκπομπής και μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση

$n_{sp} = \frac{P_{ASE}}{h\nu_s \cdot \Delta\nu \cdot (G-1)}$. Το P_{ASE} είναι η ισχύς ASE σε μία πόλωση σε bandwidth $\Delta\nu$ και

$h\nu_s$ είναι η ενέργεια του φωτονίου. Το αποτέλεσμα της ενίσχυσης στο οπτικό SNR φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



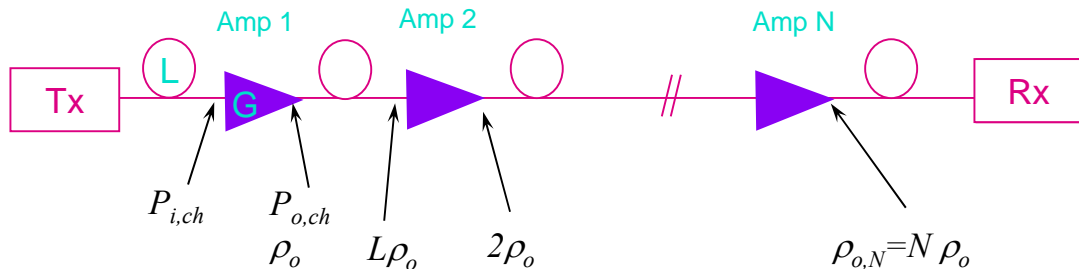
Σχήμα 16: Το αποτέλεσμα της ενίσχυσης στο οπτικό SNR

Ακόμα και για ιδανικούς ενισχυτές, όπου ο παράγοντας αντιστροφής πληθυσμού είναι 1 το noise figure είναι 3dB. Για τους EDFA, το NF είναι περίπου 4-7 dB. Με τις απώλειες κουπλάρια στην αρχή λόγω του κακού ταιριάσματος μεταξύ της ίνας ερβίου (τυπικά 2 – 4 μm διάμετρος) και των ινών μετάδοσης (τυπικά 8 – 10 μm), το NF είναι χειρότερο.

→ Ανάπτυξη ASE σε Σύστημα με Ενίσχυση

Θεωρούμε ένα σύνδεσμο που διαρθρώνεται σε ίσα τμήματα όπου το κέρδος αντισταθμίζει την απώλεια, $L=1/G$, όπως φαίνεται στο σχήμα 17. Η φασματική πυκνότητα του ASE είναι $\rho_o = h\nu(GF-1) \cong h\nu GF$. Το συνολικό noise figure N

ενισχυτών συνδεδεμένων σε σειρά είναι $F_{sys} = \frac{SNR_0}{SNR_1} \frac{SNR_1}{SNR_2} \frac{SNR_2}{SNR_3} \dots \frac{SNR_{N-1}}{SNR_N}$.



Σχήμα 17: Ένας σύνδεσμος με ίσα τμήματα όπου το κέρδος αντισταθμίζει τις απώλειες

Το μήκος κύματος άντλησης καθορίζει τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή σε σχέση με το θόρυβο ASE, την ισχύ και την αποδοτικότητα. Οι εμπορικοί EDFA's γενικά έχουν διόδους άντλησης στα 1480 nm εξαιτίας της μεγάλης τους αξιοπιστίας. Αυτοί οι ενισχυτές επιδεικνύουν υψηλές τιμές ισχύος εξόδου. Ωστόσο απαιτούν μεγάλης ισχύος aaser άντλησης για να επιτύχουν χαμηλά noise figures. Απ' την άλλη μεριά οι EDFA's με μήκος κύματος άντλησης στα 980 nm χαρακτηρίζονται από λίγο ASE και χαμηλό θόρυβο επειδή παράγουν μεγαλύτερο επίπεδο αντιστροφής, αλλά η αξιοπιστία τους είναι επαρκής μόνο για γήινες εφαρμογές και όχι υποθαλάσσιες.

Μη ομοιόμορφο φάσμα κέρδους

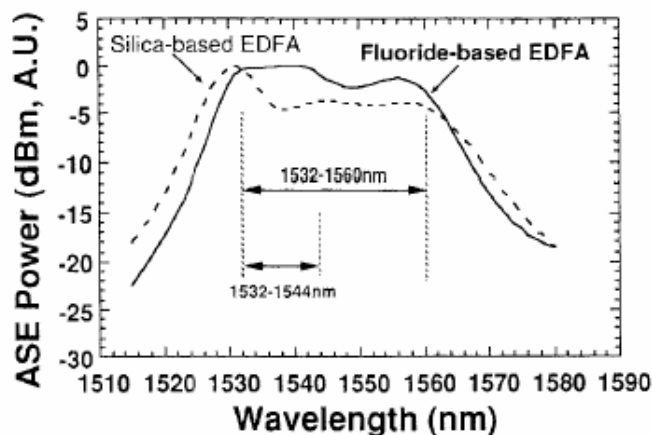
Το bandwidth κέρδους του EDFA κυμαίνεται μεταξύ 1525 – 1565 nm. Το φάσμα κέρδους δεν είναι επίπεδο και η μορφή του αλλάζει με το επίπεδο. Οι πληθυσμοί σε διαφορετικά επίπεδα είναι διαφορετικοί έχοντας σαν αποτέλεσμα την εξάρτηση του κέρδους απ' το μήκος κύματος. Η μορφή του κέρδους είναι σημαντική ειδικά σε συστήματα WDM, όπου κάθε κανάλι λαμβάνει διαφορετική ενίσχυση. Αυτό το φαινόμενο ενδυναμώνεται όταν πολλοί EDFA's βρίσκονται σε αλληλουχία και αυτό το μη ομοιόμορφο κέρδος αυξάνεται. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί εξομάλυνση του κέρδους:

- Προενίσχυση του εισερχόμενου σήματος με ρύθμιση των ισχύων των διαφόρων καναλιών του πομπού έτσι ώστε το φάσμα ισχύος του καναλιού να είναι συμπληρωματικό του κέρδους ή του φάσματος SNR της αλυσίδας ενίσχυσης. Με αυτό τον τρόπο κάποιος μπορεί να εξισώνει είτε την εξερχόμενη ισχύ ή το SNR στην έξοδο της αλυσίδας ενίσχυσης.

- Χρησιμοποιώντας οπτικά φίλτρα μέσα στην αλυσίδα για να διορθώσει την καμπύλη κέρδους.

Οι παραπάνω μέθοδοι εξισώνουν το κέρδος των EDFA's με παθητικό τρόπο. Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει ότι η ακριβής μορφή του φάσματος κέρδους είναι γνωστή και δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις δυναμικές αλλαγές στο δίκτυο όπως οι απώλειες στις ίνες η δρομολόγηση η αναδιαμόρφωση κτλ.

- Χρησιμοποιώντας EDFA έκχυσης φθορίου. Αυτοί οι ενισχυτές είναι ρεαλιστικά επίπεδοι όπως φαίνεται στο *σχήμα 18*. Απ' την άλλη αυτοί οι είναι πιο θορυβώδεις, ευαίσθητοι και δύσκολο να συγκολληθούν με τυπικές ίνες, ενώ μπορούν να αντληθούν μόνο στα 1480 nm λόγω του ESA στα 980 nm.

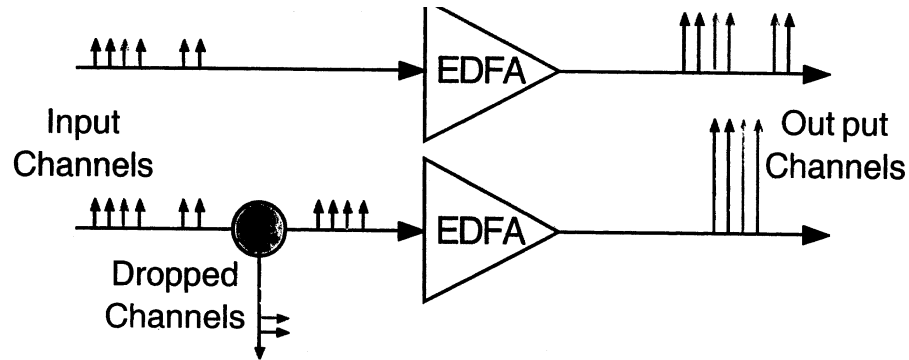


Σχήμα 18: EDFA φθορίου σε σύγκριση με συνηθισμένο silica

Παροδικό Κέρδος EDFA

Το κέρδος ενός EDFA εξαρτάται από το βαθμό που κορένεται. Δεδομένου ότι ο χρόνος ανάκαμψης αυτού του ενισχυτή είναι της τάξης των ms μπορούν να λάβουν χώρα παροδικά φαινόμενα κέρδους, οδηγώντας σε διακύμανση του κέρδους. Το

παροδικό penalty εξαρτάται από το ρυθμό δεδομένων, τον αριθμό των EDFAs και τον αριθμό των καναλιών. Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν σε περιπτώσεις όπως το άνοιγμα ενός καναλιού, επαναδρομολόγησης αναδιαμόρφωσης του δικτύου και αστοχία κάποιου συνδέσμου. Στο Σχήμα 19 φαίνεται ένα παράδειγμα:.



Σχήμα 19: Παροδικά φαινόμενα σε EDFA. Αυξομειώσεις στο σήμα εισόδου οδηγούν σε αυξομειώσεις στο κέρδος.

Ο χρόνος αυτών των φαινομένων ελαττώνεται σε μs για μεγάλο αριθμό από αλληλουχία EDFAs. Με τη χρήση οπτικού εξασθενητή αποκατάστασης ή με τη χρήση ενός καναλιού ελέγχου με adding/dropping όταν ένα κανάλι είναι dropped/added αυτά τα παροδικά φαινόμενα μπορούν να μειωθούν σημαντικότερα.

Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier (SOA))

Η προέλευση του θορύβου στον SOA είναι επίσης αυθόρμητη εκπομπή. Όμως οι SOAs είναι πιο θορυβώδεις από τα EDFAs διότι η αποδοτικότητα σύζευξης είναι χαμηλότερη. Αλλιώς έχουν τους ίδιους θεωρητικούς περιορισμούς. Ο θόρυβος ενός SOA δίνεται από τον τύπο $F_n = 2n_{sp} \frac{K_z}{\eta_{in}}$. Ο SOA μπορεί να λειτουργήσει στον κόρο ή εκτός αυτού.

Κάνοντας τον SOA κορεσμένο με ένα σήμα επηρεάζουμε το συνολικό φάσμα κέρδους. Έτσι όλα τα μήκη κύματος θα διαμορφωθούν σε περιορισμένο βαθμό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ετεροδιαμόρφωση κέρδους (cross gain modulation). Πιθανές λύσεις για αυτό το πρόβλημα είναι:

- Χαμηλή ισχύς εισόδου (γραμμικό σύστημα). Ο SOA εκτός κόρου.
- Εφεδρικό κανάλι, SOAs στον κόρο.
- Clamped κέρδος SOA. Το μέσον κέρδους μοιράζεται μεταξύ του SOA και ενός laser που εκπέμπει σε διαφορετικό μήκος κύματος..

Gain Clamped SOA

Θετικά:

Γραμμικό κέρδος (σημαντικό για τις αναλογικές επικοινωνίες), όχι XGM (αποδεδειγμένο) -> WDM εφαρμογές.

Αρνητικά:

Το σταθερό κέρδος κάνει δύσκολο το ταίριασμα με το απαιτούμενο κέρδος.

Περιορισμένο από τα δυναμικά του laser, πχ. ελεύθερη ταλάντωση του DBR laser, ~10 Gbs.

Οπτικοί ενισχυτές: SOA vs. EDFA

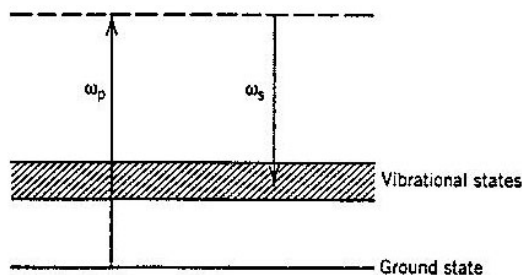
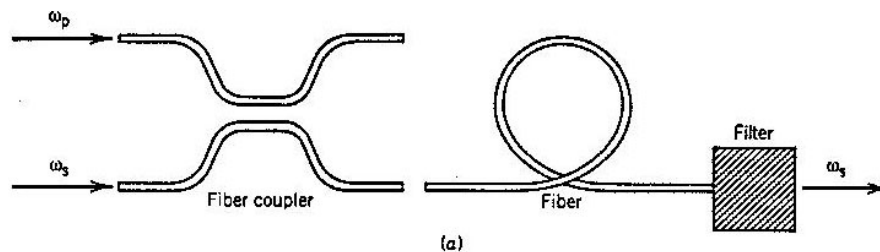
	<u>SOA</u>	<u>EDFA</u>
Κέρδος (dB)	>30	>40
Μήκος κύματος (nm)	1280-1650	1530-1560
Εύρος ζώνης (3dB) (nm)	60	30-60
Psat. (dBm)	15	20
Sat. Power max (dBm)	18	22
Πόλωση (dB)	<0.5	0
Θόρυβος (dB)	~8-9	4-5
Ισχύς Αντλησης	<400 mA	25 dBm
Σταθερά χρόνου μέγεθος	0.2 ns compact	10 ms rack module
Switchable	ναι	όχι
Παράγοντας Κόστους	ανταγωνιστικός	μέσος
	Δυναμική Γρήγορου Κέρδους (~ ns) →Οι συνηθισμένοι Conventional SOAs πασχίζουν από την παραμόρφωση του παλμού, το μεταξύ των καναλιών και το κέρδος που εξαρτάται από το pattern	Δυναμική Χαμηλού Κέρδους (~ ms) →Προβλήματα με αυξομειώσεις του κέρδους όταν κανάλια γίνονται add/drop

Οι gain-clamped SOAs μειώνουν αυτές τις επιδράσεις επειδή το κέρδος δεν διακυμαίνεται.

Οι SOAs έχουν χρησιμοποιηθεί σαν ενισχυτές σε συνδέσμους μεγάλων αποστάσεων με μέτρια αποτελέσματα.. Οι SOAs δεν είναι ακόμα κατάλληλοι για συστήματα μεγάλης διαδρομής αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρής απόστασης WDM. Ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για λόγους διαφορετικούς από την ενίσχυση εκμεταλλευόμενος το πλεονέκτημα της μη γραμμικότητας που υπάρχει στον ημιαγωγό. Τέτοιες χρήσεις είναι και η οπτική αποπολυπλεξία (optical demultiplexing), η ανάκτηση ρολογιού (clock recovery) και οι διακόπτες (switching).

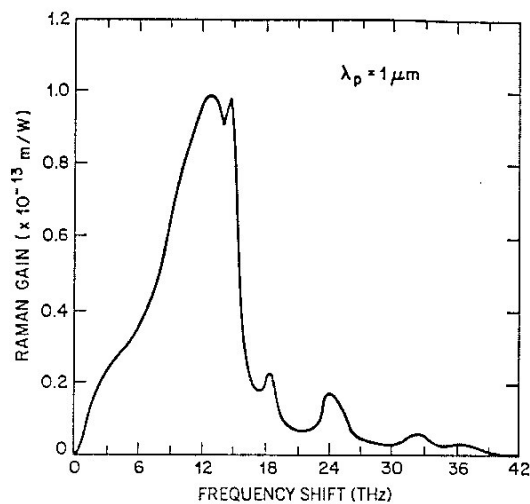
Ενισχυτές Raman

Η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (Stimulated Raman Scattering) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του οπτικού σήματος. Η SRS διαφέρει από την εξαναγκασμένη εκπομπή σε μια θεμελιώδη άποψη. Αν και στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής ένα φωτόνιο που προσπίπτει προκαλεί εκπομπή ενός άλλου πανομοιότυπου φωτονίου χωρίς να χάνει την ενέργειά του, στην περίπτωση της SRS το φωτόνιο άντλησης που προσπίπτει ελευθερώνει την ενέργειά του για να δημιουργήσει ένα άλλο φωτόνιο μειωμένης ενέργειας σε χαμηλότερη συχνότητα (ανελαστική σκέδαση). Η ενέργεια που μένει απορροφάται από το φορέα στη μορφή μοριακής ταλάντωσης. Έτσι οι ενισχυτές ίνας Raman πρέπει να αντληθούν οπτικά για να δώσουν κέρδος, σε αντίθεση με τους SOA's οι οποίοι μπορούν να αντληθούν ηλεκτρικά. Μια σημαντική διαφορά από την περίπτωση του SOA είναι ότι ο πληθυσμός αντιστροφής δεν είναι απαραίτητος για τους ενισχυτές ίνας Raman. Στην πραγματικότητα οι SRS είναι ένα μη συντονισμένο μη γραμμικό φαινόμενο που δεν απαιτεί μεταφορά πληθυσμού ανάμεσα στα ενεργειακά επίπεδα. Το *σχήμα 20* δείχνει σχηματικά έναν ενισχυτή ίνας Raman και ένα σχήμα επιπέδου ενέργειας. Η αντλία και το σήμα που εκπέμπονται σε συχνότητες ω_p και ω_s εισέρχονται στην ίνα μέσω ενός WDM συνδέσμου ιών. Η ενέργεια μεταφέρεται από την εκπομπή άντλησης στην εκπομπή σήματος μέσω του SRS καθώς οι δυο εκπομπές συνδιαδίδονται κατά μήκος της ίνας. Οι εκπομπές του μέσου άντλησης και του σήματος μπορούν ακόμα να εισέλθουν με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιδιαδίδονται μέσα στην ίνα.



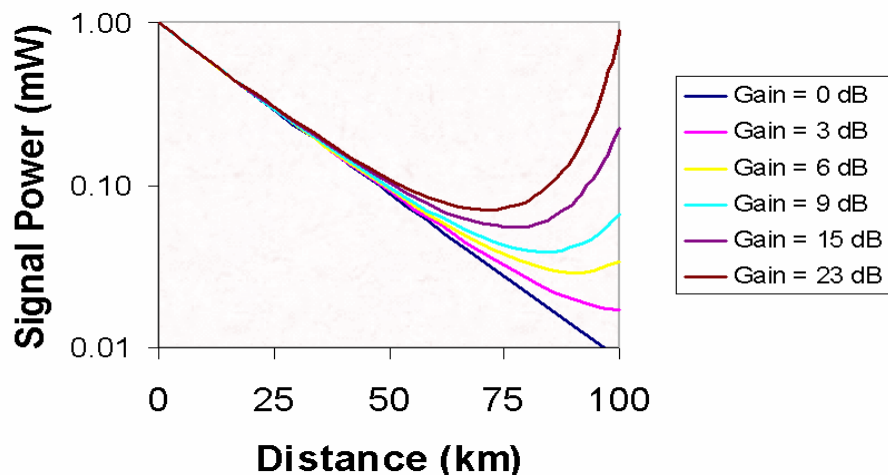
Σχήμα 20: (a) Ενισχυτής ίνας Raman (b)σχήμα ενεργειακού επιπέδου που συνδέεται με SRS

Η διαφορά συχνότητας $\Omega_R = \omega_p - \omega_s$, γνωστή ως μετατόπιση Stokes, όπως επίσης και η εξάπλωση στο Ω_R που μπορεί να ανεχτεί το να συμβεί το SRS, διατάσσονται από τα επίπεδα ενέργειας ταλάντωσης των μορίων. Ευτυχώς τα επίπεδα ενέργειας ταλάντωσης των μορίων πυριτίου συνενώνονται για να σχηματίσουν μια ζώνη εξαιτίας της άμορφης φύσης του γυαλιού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η συχνότητα του σήματος ω_s να μπορεί να διαφέρει από την ω_p κατά έναν ευρύ πεδίο (μέχρι και 20 THz) και ακόμα να δέχεται σημαντική ενίσχυση με SRS. Το φάσμα κέρδους Raman των ινών πυριτίου φαίνεται στο σχήμα 21. Όσον αφορά στην ισχύ της άντλησης P_p , το κέρδος μπορεί να γραφτεί $g(\omega) = g_R(\omega)(P_p / \alpha_p)$, όπου α_p είναι το εμβαδό διατομής του μέσου άντλησης στην ίνα.



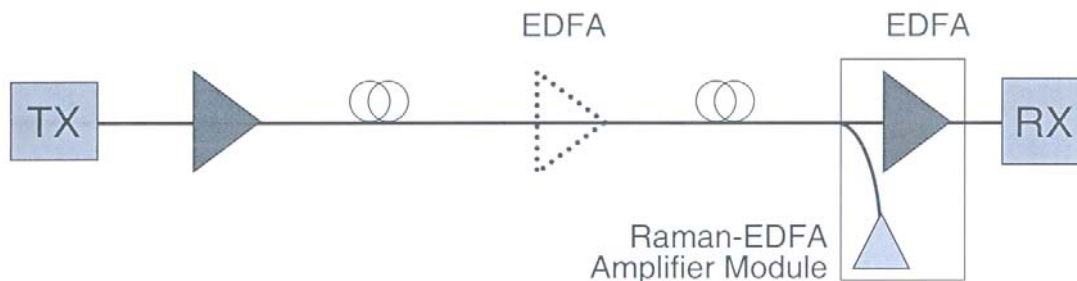
Σχήμα 21: Μετρημένο φάσμα κέρδους Raman για πυρίτιο.
Το κέρδος Raman κλιμακώνεται αντίστροφα με το μήκος κύματος της αντλίας λ_p .

Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών ίνας Raman τους κάνει ελκυστικούς για εφαρμογές επικοινωνίας με οπτικές ίνες. Όμως απαιτείται μια σχετικά μεγάλη ισχύς άντλησης για να επιτευχθεί ένας μεγάλος παράγοντας ενίσχυσης. Το σχήμα 22 δείχνει τη διακύμανση του συντελεστή του κέρδους σε συνάρτηση της ισχύος άντλησης.



Σχήμα 22: Εξέλιξη ισχύος σήματος vs. κέρδους Raman

Μια τάση στην οπτική ενίσχυση σήμερα είναι ο συνδυασμός EDFA και Raman ενισχυτών. Η Raman διαδικασία είναι ισοδύναμη με την πρόσθεση ενός ακόμη EDFA στο κέντρο μιας συγκεκριμένης απόστασης όπως φαίνεται στο σχήμα 23.

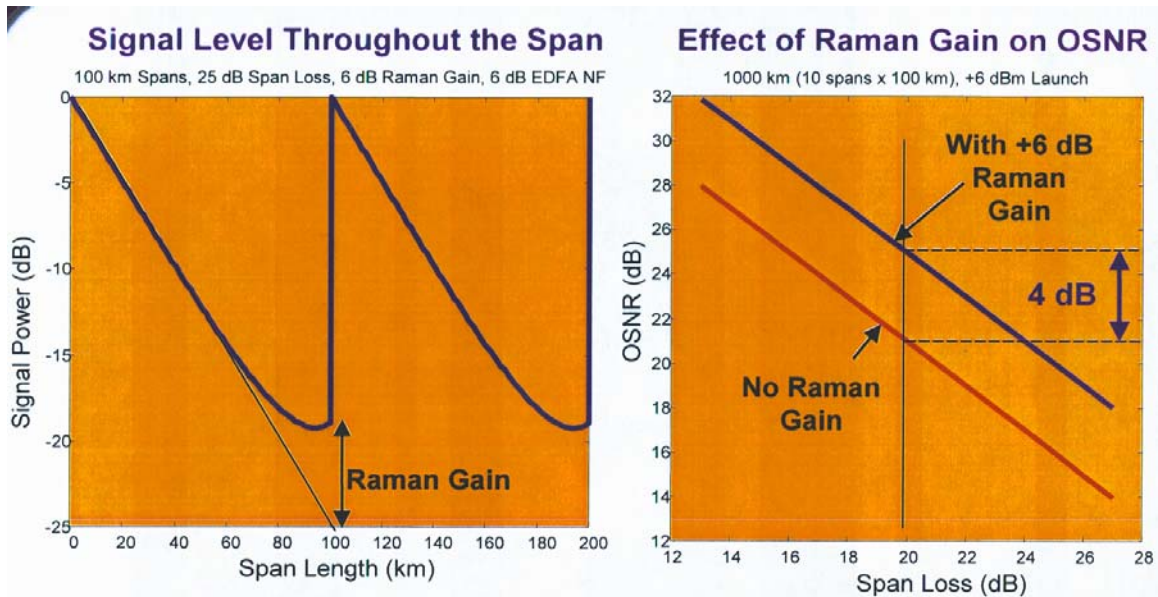


Σχήμα 23: Η διαδικασία Raman είναι ισοδύναμη με την πρόσθεση ενός ακόμη EDFA στο κέντρο μιας απόστασης

Ένα ενδεχόμενο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η βελτίωση του συνολικού θορύβου. Ο θόρυβος είναι μειωμένος γιατί:

- Απαιτείται λιγότερο κέρδος σε κάθε EDFA
- Το διαδιδόμενο κέρδος χρησιμοποιεί την απώλεια της ίνας για να εξασθενήσει το θόρυβο.
- Ο χαμηλότερος θόρυβος αυξάνει την απόδοση του συστήματος.

Με λιγότερο θόρυβο υπάρχει λιγότερη συσσώρευση ASE θορύβου έτσι το απαιτούμενο SNR μπορεί να διατηρηθεί με λιγότερη ισχύ. Σαν αποτέλεσμα της λιγότερης ισχύος εκπομπής, η μη γραμμικότητα μπορεί να μειωθεί. Για βέλτιστη απόδοση η διαφορά συχνότητας μεταξύ των εκπομπών του μέσου άντλησης και του σήματος θα πρέπει να ανταποκρίνεται στην κορυφή του Raman φάσματος κέρδους στο σχήμα 23 (συμβαίνει περίπου στα 13 THz). Τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού EDFA και ενίσχυσης Raman φαίνονται στο σχήμα 24.

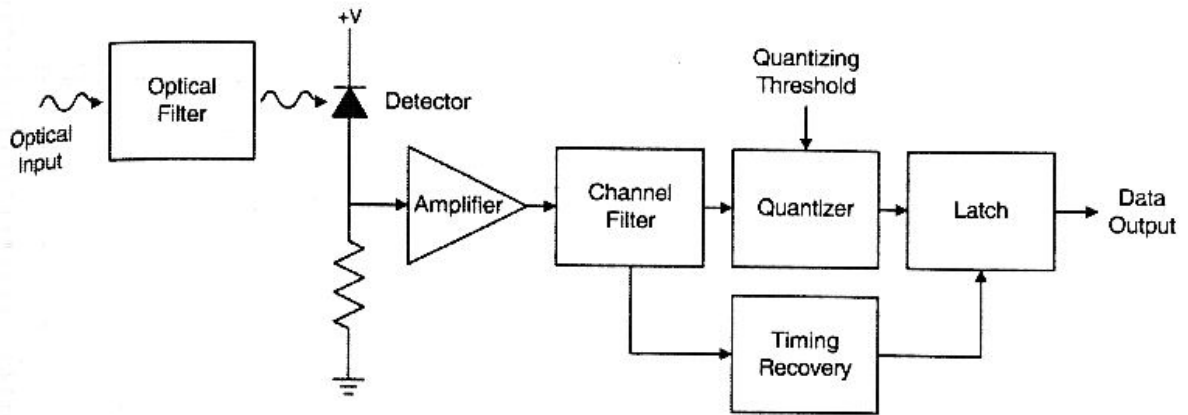


Σχήμα 24: Πλεονεκτήματα των ενισχυτών Raman

Ακόμα και μέτριες παρατάξεις Raman ενίσχυσης μπορούν να καταλήξουν σε σημαντική βελτίωση της απόστασης. Μια άλλη εφαρμογή των ενισχυτών Raman μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει τον κυματισμό και την κλίση του EDFA. Οι ισοδύναμες τιμές ισχύος της αντλίας Raman αποδίδουν ένα σχετικά επίπεδο προφίλ κέρδους. Όμως χρησιμοποιώντας άνισες τιμές ισχύος αντλίας Raman το συνολικό φάσμα κέρδους του συνδυασμού Raman-EDFA συστήματος μπορεί να είναι επιπεδοποιημένο σε περισσότερα μήκη κύματος.

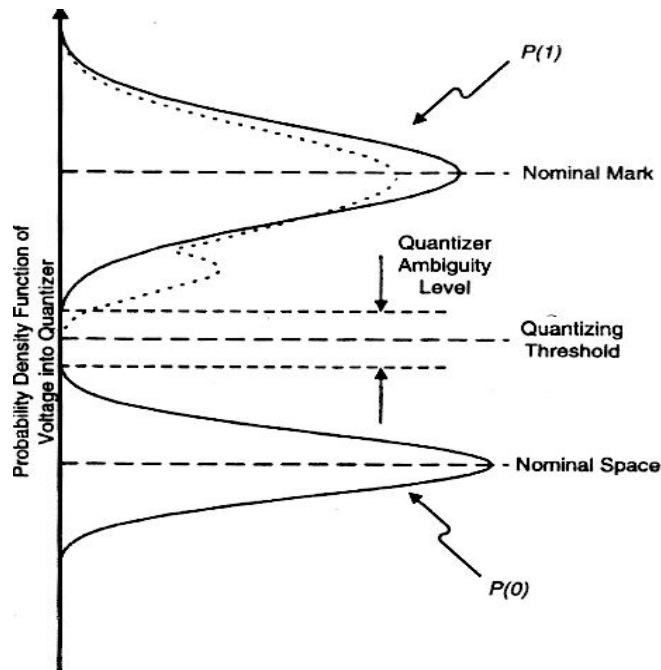
Υποβάθμιση Δέκτη

Ο παραλήπτης στα ψηφιακά συστήματα πρέπει να ανιχνεύει και να μετατρέπει την οπτική ψηφιακή πληροφορία σε ηλεκτρική πληροφορία με ελάχιστη επιρροή στο περιεχόμενο των δεδομένων που μεταφέρονται. Αυτό κάνει έναν παραλήπτη ικανό να παράγει το ελάχιστο BER ενώ ανέχεται το θόρυβο την τυπική παραμόρφωση σε ένα οπτικά ενισχυμένο NRZ ψηφιακό σήμα. Το σχήμα 25 δείχνει την τοπολογία ενός βασικού ψηφιακού παραλήπτη για οπτικά ενισχυμένα συστήματα.



Σχήμα 25: Παραλήπτης για οπτικά ενισχυμένα συστήματα

Η προέλευση των λαθών σε έναν παραλήπτη είναι αποκλίσεις από το ιδανικό πλάτος και τη συνάρτηση μεταφοράς φάσης στο συνδυασμό ενισχυτή-φίλτρου του καναλιού. Αυτά παράγουν μια κατανομή πλατών άσων και μηδενικών που είναι ορατή σαν πολλαπλά ίχνη σε ένα διάγραμμα ματιού. Οι διανομές $P(1)$ και $P(0)$ φαίνονται στο σχήμα 26. Το εύρος τους προκαλείται από παραμόρφωση σήματος, από τις επιδράσεις εκπομπής και από θόρυβο και ISI διανομές από τον παραλήπτη ανιχνευτή, τον ενισχυτή και το φίλτρο καναλιού.



Σχήμα 26: Συναρτήσεις πυκνότητας της πιθανότητας δυναμικού για δεδομένα που δεν επιστρέφουν στο '0'

Για βέλτιστη απόδοση BER, το κβαντικό κατώφλι V_{quant} πρέπει να οριστεί ώστε να ισχύει $\int_{-\infty}^{V_{quant}} P(1) = \int_{V_{quant}}^{\infty} P(0)$, καταλήγοντας σε έναν ελάχιστο συνολικό βαθμό

λαθών. Η ικανότητα ενός πραγματικού κβαντοποιητή να ξεκαθαρίσει το ακριβές κατώφλι είναι περιορισμένη από θόρυβο και διαφορετικές πολώσεις μέσα στον ίδιο τον κβαντικοποιητή. Αυτό το επίπεδο κατωφλίου καλείται επίπεδο αμφιβολίας του κβαντοποιητή και είναι ένα μέτρο της απόδοσής του. Για ένα τυπικό 2.5 Gb/s κβαντοποιητή ποικίλει μεταξύ 5 – 10 mV.

Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται στα οπτικά ενισχυμένα συστήματα πρέπει να εξομαλύνουν το θόρυβο και την παραμόρφωση που εμφανίζονται όταν οπτικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται σαν ενισχυτές γραμμής εκπομπής. Για ένα δεδομένο μήκος συστήματος το SNR_0 είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού των ενισχυτών και του κέρδους των ενισχυτών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο σχεδιαστής του συστήματος να μπορεί να ανταλλάσσει τον αριθμό των ενισχυτών με το κέρδος του καθενός για να μπορεί να παράγει ένα δεδομένο SNR_0 . Για την ελαχιστοποίηση του κόστους το μήκος των αποστάσεων αυξάνεται και ο αριθμός των ενισχυτών μειώνεται μέχρι να επιτευχθεί το ελάχιστο SNR_0 στο τέλος του συστήματος. Η απόδοση θορύβου στο σύστημα κυριαρχείται έτσι από τον οπτικό θόρυβο που παράγεται στην αλυσίδα οπτικών ενισχυτών και όχι από το θόρυβο στον παραλήπτη. Αυτός είναι ο λόγος για μια θεμελιώδη μετατόπιση στους στόχους σχεδιασμού του παραλήπτη για τα ενισχυμένα ενάντια στα μη ενισχυμένα συστήματα.

Οι υποβιβασμοί που εισήχθησαν από τον πομπό και το δέκτη σε ένα οπτικό σύστημα συγκεντρώνονται όπως ακολουθεί:

Υποβάθμιση πομπού/δέκτη

- Διασυμβολική παρεμβολή:
 - ✓ Μη ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο (μικρός χρόνος ανόδου/πτώσης)
- Jitter
- Παραμόρφωση όπως:
 - ✓ Μη ιδανικό σχήμα φίλτρου
 - ✓ Συχνότητα απόκρισης κυματισμού πομπού/δέκτη
 - ✓ Πεπερασμένος συντελεστής σβέσης
- Θόρυβος όπως:
 - ✓ TX RIN
 - ✓ Θόρυβος δέκτη
 - ✓ Παρεμβολή

Χαρακτηρισμός απόδοσης συστήματος

Το βασικό μέτρο απόδοσης για ένα σύστημα οπτικών ινών είναι η ακρίβεια με τη οποία μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες από ένα σημείο στο άλλο. Η ποιότητα της φυσικής μεταφοράς μπορεί να αλλοιωθεί από την ενδοσυμβολική παρεμβολή που προκαλείται από τη χρωματική παραμόρφωση κατά μήκος της ίνας. Επιπρόσθετα οι παραμορφώσεις κυματικής μορφής από laser μπορούν να προκαλέσουν τον παραλήπτη να ερμηνεύσει λανθασμένα αν κάποιο μεταφερόμενο bit είναι 0 ή 1. Οι δοκιμές φυσικού επιπέδου μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις σημαντικές περιοχές:

- Bit-Error-Ratio δοκιμή
- Ανάλυση διαγράμματος ματιού
- Ανάλυση jitter

Bit Error Ratio

Το θεμελιώδες μέτρο απόδοσης για ένα σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας είναι με πόση ακρίβεια μπορεί ο παραλήπτης να αποφασίσει τη λογική κατάσταση του κάθε μεταφερόμενου bit. Αυτό καλείται *Bit Error Ratio (BER)*, και ορίζεται ως

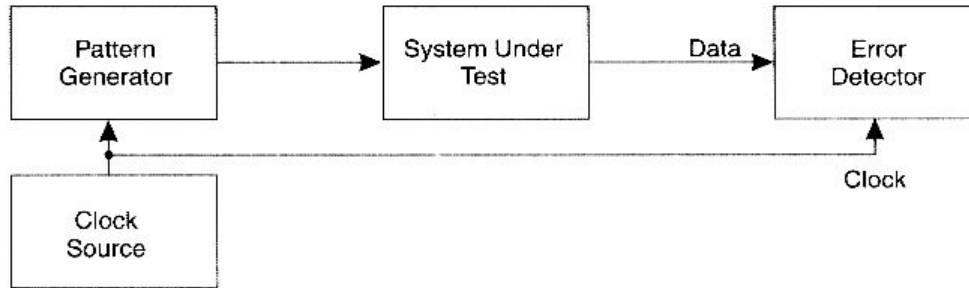
$$BER = \frac{E(t)}{N(t)},$$

όπου *BER* είναι το Bit Error Ratio, $E(t)$ είναι ο αριθμός των bits που λαμβάνονται λάθος σε χρόνο t , και $N(t)$ είναι ο συνολικός αριθμός bits που μεταφέρονται σε χρόνο t .

Το BER είναι μια στατιστική παράμετρος. Η μετρημένη τιμή εξαρτάται από τον χρόνο t , στον οποίο τα δεδομένα συλλέγονται και από τη διαδικασία που προκαλεί τα λάθη. Για λάθη αρχικά εξαιτίας του Gaussian θορύβου σχετικά σταθερά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν ο χρόνος είναι αρκετός να ληφθούν λάθη της τάξης του 50 και του 100. Αν τα λάθη συμβαίνουν σε ξεσπάσματα που προκαλούνται από μη τυχαίες επιδράσεις όπως είναι η παρεμβολή καναλιού ή η εξωτερική παρεμβολή αυτό το απλό μέτρο του BER δε μπορεί να αναπαραστήσει επαρκώς την απόδοση του συστήματος.

Μια τυπική τιμή του BER στο παρελθόν ήταν 10^{-9} , αν και για τις παράλληλες τηλεπικοινωνίες δεδομένων αυτή η τιμή είναι περίπου 10^{-15} . Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος είναι πολύ μακρύς για να εκτιμήσει ένα μοντέρνο σύστημα. Για παράδειγμα αν ένα σύστημα 10 Gbps έχει BER της τάξης του 10^{-9} , μετά για 10 λάθη κάποιος θα πρέπει να περιμένει για 1 sec, ενώ για ένα BER της τάξης του 10^{-12} και 10 λάθη κάποιος θα πρέπει να περιμένει για 20 λεπτά. Τελικά για ένα BER της τάξης του 10^{-15} και 10 λάθη κάποιος θα πρέπει να περιμένει για 14 μέρες!!

Η διαδικασία της μέτρησης με το BER περιλαμβάνει την εισχώρηση ενός γνωστού δείγματος δοκιμής στη σειριακή γραμμή. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι γνωστός ως bit-error-ratio tester, ή BERT, και περιγράφεται στο επόμενο σχήμα 27.



Σχήμα 27: Βασικός ανιχνευτής εύρους σφαλμάτων .

Ο BERT αποτελείται από δυο τομείς: έναν δημιουργό δείγματος και έναν ανιχνευτή λάθους. Ο δημιουργός δείγματος δημιουργεί το δείγμα δοκιμής μαζί με ένα ξεχωριστό σήμα ρολογιού στον επιλεγμένο βαθμό δεδομένων. Αυτό το δείγμα εισχωρεί μέσα στο σύστημα κάτω από δοκιμή και λαμβάνεται στην είσοδο δεδομένων του ανιχνευτή λαθών. Ο ανιχνευτής λαθών περιλαμβάνει τον δικό του δημιουργό δείγματος που παράγει ένα ακριβές αντίγραφο του γνωστού δείγματος δοκιμής και μια συσκευή σύγκρισης που ελέγχει κάθε bit που λαμβάνεται με το δείγμα που παράχθηκε εσωτερικά. Κάθε φορά που το bit που λαμβάνεται διαφέρει από το γνωστό bit που μεταφέρεται τότε καταγράφεται ένα λάθος. Ο απαιτούμενος βαθμός και το ταίριασμα φάσης μεταξύ του δημιουργού δείγματος και του ανιχνευτή λαθών μπορεί να εγγυηθεί χρησιμοποιώντας το ρολόι του δημιουργού σαν τη πηγή ρολογιού για τον ανιχνευτή λαθών. Αλλιώς αν οι δυο μονάδες δεν είναι σε κοντινή φυσική εγγύτητα, για παράδειγμα σε αντίθετες άκρες ενός συνδέσμου μεταφοράς, το ρολόι του ανιχνευτή λαθών πρέπει να ανακτηθεί κατευθείαν από τα δεδομένα. Η διαδικασία συγχρονισμού φάσης κάνει χρήση του γεγονότος ότι όταν τα δυο δείγματα δεν είναι συγχρονισμένα η πιθανότητα να ληφθεί ένα bit που να ταιριάζει με το αναμενόμενο bit είναι καθαρή τύχη και ο λόγος λάθους είναι προσεγγιστικά. Έτσι οποτεδήποτε το μέτρο υπερβαίνει ένα από πριν ορισμένο κατώφλι τυπικά ίσο με 0.2, ο ανιχνευτής λαθών επιχειρεί να επανασυγχρονίσει τα δεδομένα ξεκινώντας βηματικά τη σχέση της φάσης μεταξύ των δυο δειγμάτων μέχρι να επιτευχθεί ένα ελάχιστο BER.

Ένα μέτρο υποβάθμισης που επιβλήθηκε στο σήμα είναι το penalty ισχύος. Το penalty ισχύος είναι ίσο με την αύξηση στην ισχύ που χρειάζεται για να επιτευχθεί το ίδιο BER με αυτό χωρίς την υποβάθμιση. Για παράδειγμα αν μια επίδραση εισάγει μια ποινή ισχύος 1-mW το BER θα υποβιβαστεί. Με σκοπό την αποκατάσταση του BER, η εκπεμπόμενη ισχύς πρέπει να αυξηθεί 1 mW. Το penalty ισχύος εξαρτάται από το BER σε συστήματα που επηρεάζονται από μη γραμμικές επιδράσεις.

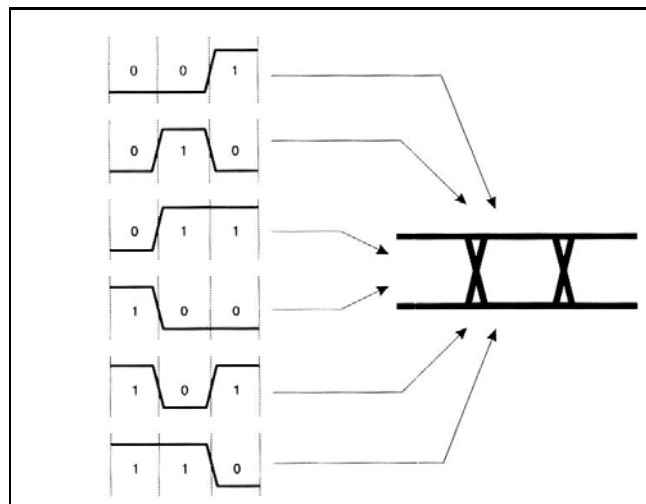
Ανάλυση Διαγράμματος Ματιού

Ο έλεγχος BER είναι χρήσιμος για να προσδιορίσουμε την ποιότητα ενός μέσου μετάδοσης, αλλά είναι λιγότερο κατάλληλος για να εντοπίσουμε σφάλματα και λάθη που εμφανίζονται. Γι' αυτό το λόγο, είναι χρήσιμο να εξετάζουμε κάθε στιγμή σε ένα

παλμογράφο, τη διαμόρφωση της κυματομορφής. Οι παλμογράφοι χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για να απεικονίσουν επαναλαμβανόμενες κυματομορφές. Αυτές είναι γνωστές σαν μοναδικής-τιμής απεικονίσεις επειδή κάθε σημείο στον άξονα του χρόνου έχει μόνο μία αντίστοιχη τιμή τάσης. Αυτές οι απεικονίσεις μπορούν να παρουσιάσουν μόνο λίγους απ' τους πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς one-zero. Ένα διάγραμμα ματιού υπερβαίνει τους παραπάνω περιορισμούς υπερθέτοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των '1' και '0' στην οθόνη του παλμογράφου.

Τα διαγράμματα ματιού είναι γνωστά και ως αναπαραστάσεις πολλαπλών τιμών διότι σε κάθε σημείο στον άξονα του χρόνου αντιστοιχούν πολλαπλές τιμές τάσης.

Η ιδέα ενός διαγράμματος ματιού φαίνεται στο *σχήμα 28*. Ο παλμογράφος σκανδαλίζεται στην πρώτη μετάβαση του ρολογιού αφότου το κύκλωμα σκανδαλισμού είναι "οπλισμένο" (armed). Κατά το trigger, ο παλμογράφος «πιάνει» την κυματομορφή των δεδομένων που βρίσκονται στην είσοδο του και την αποτυπώνει στην οθόνη. Ο παλμογράφος είναι κατάλληλα σεταρισμένος ώστε η κυματομορφή να παραμένει στην οθόνη και οι επακόλουθες κυματομορφές να συνεχίζουν να προστίθενται στην ίδια παράσταση. Μετά από ένα μικρό νεκρό διάστημα το κύκλωμα σκανδαλισμού οπλίζει ξανά και ο σκανδαλισμός επιτυγχάνεται στην επόμενη μετάβαση του ρολογιού. Το μορφότυπο που προκύπτει σε αυτή τη χρονική στιγμή θα είναι πιθανότατα διαφορετικό από το προηγούμενο, οπότε η παράσταση που προκύπτει θα είναι ένας συνδυασμός των δύο μορφοτύπων. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται ώσπου τελικά, μετά από πολλά trigger events, όλοι οι διαφορετικοί συνδυασμοί των '1' και '0' υπερτίθενται στην οθόνη.



Σχήμα 28: Η ιδέα του διαγράμματος ματιού

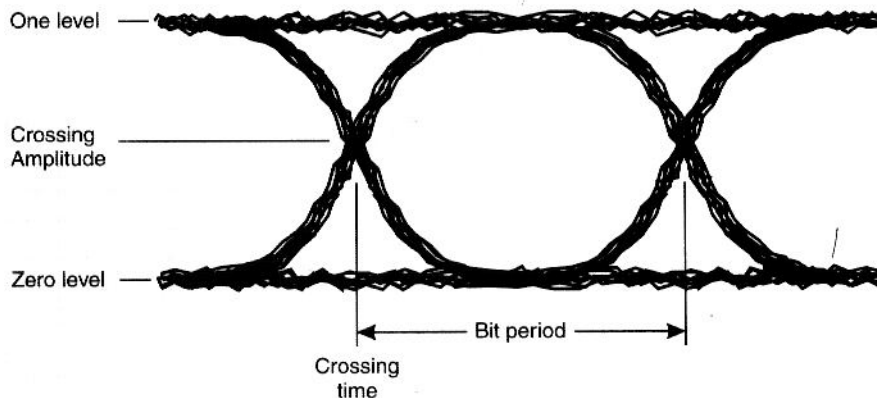
Οι παράμετροι του ματιού είναι παρόμοιες με τις παραμέτρους του παλμού για μονότιμες κυματομορφές.

Οι περισσότερες παράμετροι του ματιού προκύπτουν από τέσσερις θεμελιώδεις ιδιότητες του ματιού:

- Επίπεδο του ένα. Είναι ένα μέτρο της μέσης τιμής της λογικής στάθμης του ένα. Υπολογίζεται κατασκευάζοντας ένα κατακόρυφο ιστόγραμμα σε μία στενή περιοχή γύρω από το κέντρο του ματιού που περιέχει μόνο τη στάθμη του ενός των δεδομένων. Συχνά

χρησιμοποιούμε ένα 40-60 παράθυρο: το ιστόγραμμα ξεκινάει στο 40% χρονικό σημείο του ματιού και σταματάει στο 60%. Η στάθμη του ενός ορίζεται ως η μέση τιμή αυτού του ιστογράμματος και η απόκλιση είναι η RMS τιμή του θορύβου. Μία λιγότερο προτιμώμενη προσέγγιση είναι να θεωρήσουμε το ιστόγραμμα κατά μήκος όλου του πλάτους του ματιού. Εξαιτίας της συμβολής των ανερχόμενων και κατερχόμενων παρυφών, η μέση τιμή που υπολογίζεται κατά αυτόν τον τρόπο είναι προφανώς μικρότερη από ότι αν χρησιμοποιούσαμε ένα 40-60 παράθυρο. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το επίπεδο του ενός πρέπει να οριστεί ως η κορυφή (peak) του ιστογράμματος και όχι ως η μέση τιμή του. Το πρόβλημα είναι ότι η τιμή κορυφής δε σταθεροποιείται απαραίτητα καθώς συλλέγονται επιπρόσθετα δεδομένα. Παρόλα αυτά έχει το πλεονέκτημα του να είναι λιγότερο ευαίσθητη σε οποιεσδήποτε παρεκκλίσεις που συμβαίνουν στο κέντρο του ματιού.

- Επίπεδο του μηδενός (zero level). Το επίπεδο του μηδενός είναι η μέση τιμή της λογικής στάθμης του '0'. Οι τεχνικές μέτρησης είναι ταυτόσημες με αυτές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της στάθμης του ένα.
- Διάσχιση του ματιού (eye crossing). Η διάσχιση του ματιού αποτελείται από δύο τμήματα: το χρόνο διάσχισης και το πλάτος διάσχισης. Κατά συνθήκη, η αρχή της περιόδου του bit ορίζεται ως το χρονικό σημείο όπου οι ανερχόμενες και κατερχόμενες παρυφές του ματιού τέμνονται. Για την εύρεση αυτού του σημείου, κατασκευάζεται ένα οριζόντιο ιστόγραμμα χρησιμοποιώντας δεδομένα μόνο από τις ανερχόμενες και κατερχόμενες παρυφές (σχήμα 2.12). Η μέση τιμή αυτού του ιστογράμματος είναι ο χρόνος διάσχισης και η απόκλιση είναι το jitter. Για την εύρεση του πλάτους διάσχισης, ένα κατακόρυφο ιστόγραμμα κατασκευάζεται στο ίδιο παράθυρο.



Σχήμα 29: Θεμελιώδεις παράμετροι διαγράμματος ματιού

Έχοντας ως αναφορά αυτές τις τρεις ιδιότητες (one level, zero level, eye crossing) μπορούν να οριστούν πιο πολύπλοκες παράμετροι του ματιού.

- Χρόνος ανόδου/χρόνος καθόδου (rise time/fall time). Παραδοσιακά, ο χρόνος ανόδου ορίζεται ως ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που η ανερχόμενη παρυφή φτάνει το 10% της τελικής τιμής του πλάτους, ως τη στιγμή που φτάνει το 90% της τελικής τιμής του πλάτους. Ο χρόνος καθόδου ορίζεται ομοίως για την κατερχόμενη παρυφή. Παρόλα αυτά για οπτικά σήματα αυτά τα σημεία συχνά επισκιάζονται από το θόρυβο και από το jitter στις στάθμες του ενός και του μηδενός και για αυτό το λόγο

χρησιμοποιούμε συνήθως τα κατώφλια του 20% και 80%. Για τη μετατροπή από τον 20-80 στον 10-90 χρόνο ανόδου, θεωρώντας μία απόκριση φίλτρου Bessel-Thompson τέταρτης τάξης, χρησιμοποιούμε την προσεγγιστική σχέση:

$$T_{10-90} = 1.25 \times T_{20-80}$$

Η μέτρηση του χρόνου ανόδου ξεκινάει προσδιορίζοντας τα επίπεδα του ενός και του μηδενός για το μάτι. Από τη στιγμή που αυτά τα επίπεδα είναι γνωστά, οι χρονικές περιοχές των 20% και 80% σημείων μπορούν να ευρεθούν κατασκευάζοντας στενά οριζόντια ιστογράμματα γύρω από αυτές τις τιμές. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται και για τον προσδιορισμό του χρόνου καθόδου.

- Υπερπήδηση (overshoot). Το επίπεδο της υπερπήδησης σε ένα απευθείας διαμορφωμένο laser συχνά ποικίλλει κατά ένα παράγοντα μεγαλύτερο της τάξης του τρία για διαφορετικούς συνδυασμούς '1' και '0'.

Λόγος σβέσης (Extinction Ratio). Μία πολύ σημαντική μέτρηση, η οποία γίνεται μέσω του διαγράμματος του ματιού είναι η μέτρηση του λόγου σβέσης. Ο λόγος σβέσης, όταν χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απόδοσης ενός οπτικού πομπού σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών, ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ενέργειας (ή ισχύος) που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του λογικού επιπέδου '1' προς τη μέση ενέργεια του λογικού επιπέδου '0'. Για μία γραφική περιγραφή του λόγου σβέσης, χρησιμοποιείται κοινώς το διάγραμμα του ματιού

7Από το διάγραμμα του ματιού ο λόγος σβέσης μπορεί να οριστεί ως γραμμικός λόγος, σε

dB ή ως ένα ποσοστό:

$$Extinction_ratio = \frac{1' _ power _ level}{0' _ power _ level}$$

$$Extinction_ratio _ (dB) = 10 \log \frac{1' _ power _ level}{0' _ power _ level}$$

$$Extinction_ratio \% = \frac{0' _ power _ level}{1' _ power _ level} \times 100$$

Έτσι αν η ισχύς του λογικού επιπέδου '1' ήταν 1000 μW και η ισχύς του λογικού επιπέδου '0' ήταν 50 μW, ο λόγος σβέσης θα ήταν 20 ή 13 dB ή 5% αντίστοιχα, ανάλογα με τον ορισμό που προτιμάμε.

Παράγοντας Q

Ο παράγοντας Q είναι ένα μέτρο της ποιότητας του μεταδιδόμενου σήματος σε σχέση με την αναλογία σήματος-θορύβου (SNR). Για να εκτιμήσουμε τον παράγοντα Q πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες υποβάθμισης του σήματος που μπορούν να οδηγήσουν τελικά σε λάθη στα δυφία (θόρυβος, χρωματική διασπορά, και μη γραμμικά φαινόμενα ή φαινόμενα πόλωσης). Όσο υψηλότερος είναι ο παράγοντας Q τόσο καλύτερο είναι το SNR και κατ' επέκταση και η πιθανότητα σφαλμάτων.

Ο παράγοντας Q αναπαριστά την ποιότητα του SNR στο διάγραμμα ματιού ενός ψηφιακού σήματος. Το καλύτερο σημείο απόφασης για την τιμή ενός δυφίου αντιστοιχεί στη δειγματοληψία με το όσο το δυνατόν μεγαλύτερο άνοιγμα του ματιού. Καθώς το άνοιγμα του ματιού γίνεται πιο μεγάλο, η διαφορά στην τιμή μεταξύ του λογικού '0' και του λογικού '1' μεγαλώνει και σαν αποτέλεσμα ο παράγοντας Q και το BER επίσης μεγαλώνουν. Ο παράγοντας προσεγγίζεται μαθηματικά λύνοντας την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial BER(V_{th})}{\partial V_{th}} = 0$$

όπου

$$BER(V_{th}) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{|i_1 - V_{th}|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - i_0|}{\sigma_0} \right) \right)$$

Απ' την παραπάνω παίρνουμε την σχέση που προσδιορίζει τον παράγοντα Q ενός σήματος:

$$Q = \frac{[i_1 - i_0]}{[\sigma_1 + \sigma_0]}$$

όπου i_1 και i_0 είναι οι αριθμητικές τιμές του λογικού '0' και του λογικού '1' αντίστοιχα, ενώ σ_1 και σ_0 είναι οι τιμές των αντίστοιχων αποκλίσεων. Αυτή η ισότητα επεξηγεί τη σχέση μεταξύ του παράγοντα Q και του ανοίγματος του ματιού όπως επίσης και του SNR. Γι' αυτούς τους ορισμούς υποθέσαμε μια Γκαουσιανή κατανομή για το θόρυβο, όπως επίσης και ίση πιθανότητα για μετάδοση του λογικού '1' και του λογικού '0' [$P(1) = P(0) = 1/2$].

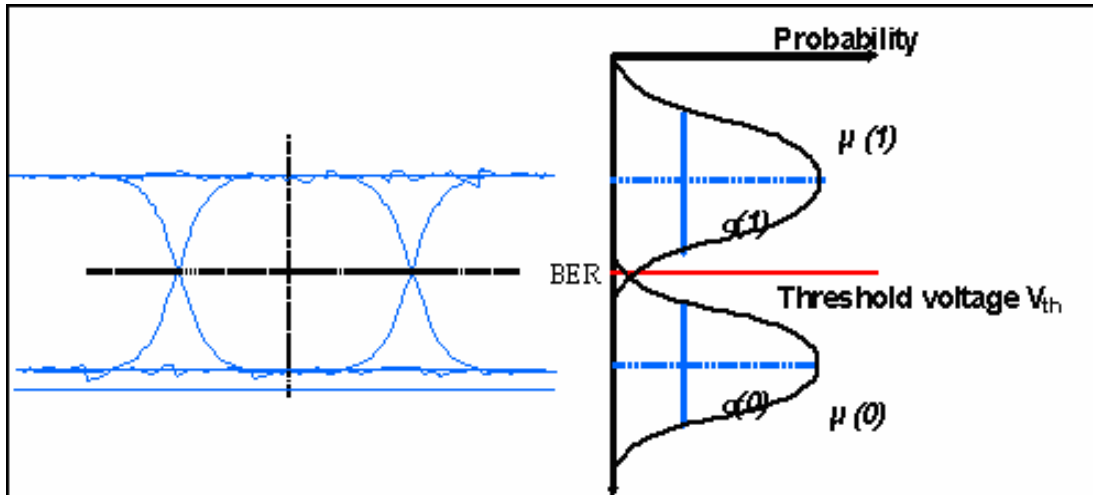
BER και Παράγοντας Q

Στον δέκτη το πλάτος του σήματος συγκρίνεται με ένα συγκεκριμένο κατώφλι για να καθοριστεί αν το δυφίο είναι '1' ή '0'. Σαν αποτέλεσμα το BER είναι ίδιο με την πιθανότητα ενός λάθους και δίνεται απ' την παρακάτω σχέση:

$$BER = n_0 p(0 | 1) + n_1 p(1 | 0)$$

όπου n_1 και n_0 είναι ο αριθμός των '1' και '0' αντίστοιχα στην συχνότητα δυφίου με $n_1 = 1 - n_0$ όπου $p(0|1)$ είναι η υποθετική πιθανότητα να παρουσιαστεί ένας '1' (ενώ στην πραγματικότητα είναι '0') και $p(1|0)$ είναι η πιθανότητα να παρουσιαστεί ένα '0' αντί για '1'. Για PRBS's αυτό είναι $n_1 = n_0 = 1/2$. Η συνάρτηση πιθανότητας πυκνότητας σφαλμάτων

στα επίπεδα '1' και '0' φαίνεται στο σχήμα 30. Το πλάτος των καμπύλων αναπαριστά θόρυβο που έχει προστεθεί στο σήμα. Λιγότερος θόρυβος έχει σαν αποτέλεσμα πιο στενό γράφο με μικρότερη επικάλυψη. Η επικαλυπτόμενη περιοχή δείχνει το BER.



Σχήμα 30: Κατανομή θορύβου και καθορισμός BER

Σαν επακόλουθο, το BER δημιουργείται απ' τις ουρές των PDF θορύβου στα επίπεδα '1' και '0'.

Στο ιδανικό κατώφλι τάσης έχουμε το ελάχιστο BER το οποίο είναι μια πολύ καλή στρογγυλοποίηση ίση με $erfc(Q)$:

$$BER_{optimum} = \frac{e^{-\left(\frac{Q^2}{2}\right)}}{Q \sqrt{2\pi}}$$

Ανάλυση Jitter

Το jitter είναι σφάλματα στο συγχρονισμό των παλμών τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικώς σαν διαμόρφωση φάσης σε ένα μεταδιδόμενο σήμα, όπως η κυματομορφή του ρολογιού

$$V(t) = A \sin[2\pi f_c + J(t)]$$

$$\phi(t) = 2\pi f_c + J(t)$$

όπου $V(t)$ είναι το στιγμιαίο πλάτος το οποίο περιέχει διαμόρφωση, $\phi(t)$ είναι η συσσωρευτική φάση, f_c είναι η συχνότητα του ρολογιού, και $J(t)$ είναι η συχνότητα του jitter. Για απλοποίηση εδώ παρουσιάζεται μόνο η θεμελιώδης συχνότητα του σήματος ρολογιού.

Το jitter προκαλεί σφάλματα με το να εμποδίζει το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού στον δέκτη, να αναδειγματίσει το ψηφιακό σήμα στο ιδανικό σημείο του χρόνου. Για να προσδιοριστεί τότε ακριβώς ένα δυφίο είναι μηδέν ή ένα, το σήμα πρέπει να δειγματοληφθεί στο ακριβές σημείο του χρόνου, όπου το κατακόρυφο άνοιγμα του ματιού είναι μέγιστο. Αυτό το καθοριστικό σημείο καθορίζεται απ' το ανακτημένο σήμα ρολογιού. Αν το jitter στα δεδομένα προκαλεί μετατόπιση αυτού του σημείου απ' την ιδανική θέση, τότε το BER αυξάνεται.

Αφού τα συστήματα μετάδοσης συχνά έχουν έναν αριθμό από αναγεννητές μεταξύ των άκρων, είναι χρήσιμο να μελετήσουμε πως το αυξάνεται το jitter σε συνάρτηση των αναγεννητών του συστήματος. Το τυχαίο jitter που δημιουργείται εσωτερικά σε έναν αναγεννητή αποσυντονίζεται από το τυχαίο jitter που δημιουργείται σε όλους τους άλλους αναγεννητές του συστήματος. Γι' αυτό το λόγο οι συμβολές του jitter από όλους τους αναγεννητές συσσωρεύονται ασύμφωνα ή προστίθενται 'in power' και το συνολικό αποτέλεσμα είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του αριθμού των αναγεννητών. Το συστηματικό jitter που δημιουργείται σε ένα ιδιαίτερο τύπο αναγεννητή, συνήθως συσχετίζεται ολοκληρωτικά με άλλους αναγεννητές του ίδιου σχεδιασμού. Γι' αυτό το λόγο οι συμβολές του jitter προστίθενται 'in voltage' και συσσωρεύονται συμφασικά αναλογικά με τον αριθμό των αναγεννητών. Το συστηματικό jitter συνήθως επιδρά σε πραγματικά συστήματα με πολλαπλούς αναγεννητές.

Τα πρότυπα SDH και SONET καθορίζουν τις απαιτήσεις jitter στις οπτικές αλληλεπιδράσεις που είναι απαραίτητες για να ελεγχθεί η συσσώρευση jitter μέσα στο σύστημα μετάδοσης. Οι προδιαγραφές μετάδοσης κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Ανοχή Jitter. Αυτή είναι μία μετρική του πόσο καλά μπορεί ο δέκτης να δεχθεί ένα σήμα με jitter. Καθορίζεται σαν το πλάτος του εφαρμοζόμενου ημιτονοειδούς jitter που εφαρμόζεται σε μία είσοδο και προκαλεί υποβάθμιση στην απόδοση. Αυτό καθορίζεται μετρώντας το BER παρουσία του σήματος με ημιτονοειδούς jitter. Για τηλεπικοινωνιακές συσκευές, η ανοχή σε jitter καθορίζεται χρησιμοποιώντας πρότυπα ανοχής jitter, τα οποία είναι τυπικά διαφορετικά για κάθε ρυθμό μετάδοσης. Κάθε πρότυπο καθορίζει την περιοχή στην οποία η συσκευή πρέπει να λειτουργεί.
- Μεταφορά Jitter. Αυτή είναι μία μετρική της ποσότητας jitter που μεταδίδεται από την είσοδο στην έξοδο ενός αναγεννητή. Είναι ο λόγος του πλάτους του ημιτονοειδούς jitter προς το εφαρμοσμένο ημιτονοειδές jitter. Οι προδιαγραφές της μεταφοράς jitter βοηθούν στο να διασφαλιστεί ότι αν εγκατασταθεί μια φορά σε ένα σύστημα, η συσκευή δεν θα προκαλέσει μια μη αποδεκτή αύξηση στο jitter ή σε οποιοδήποτε τμήμα του φάσματος. Οι προδιαγραφές SONET/SDH καθορίζουν επιτρεπτές λειτουργίες μεταφοράς jitter για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης και τύπους αναγεννητών. Οι προϋποθέσεις μεταφοράς jitter σε κυκλώματα ανάκτησης ρολογιού επιτρέπουν μια μικρή ποσότητα jitter δοσμένης μιας συνάρτησης αποκοπής, πέρα απ' την οποία το jitter πρέπει να εξαλειφθεί.
- Δημιουργία Jitter. Η δημιουργία jitter είναι μία μετρική του jitter στην έξοδο μιας συσκευής απουσία jitter στην είσοδο. Η δημιουργία jitter είναι στην ουσία μια ολοκληρωμένη μετρική φάσης θορύβου και για τα SONET/SDH είναι προκαθορισμένη να μην υπερβαίνει 0.01 UI RMS όταν μετριέται χρησιμοποιώντας ένα υπεραυτό φίλτρο με 12 kHz συχνότητα αποκοπής. Μια σχετική μετρική είναι το 12 kHz εξόδου, που είναι ένα κριτήριο του jitter σε ένα κόμβο δικτύου ή σε ένα port

εξόδου. Αν και παρόμοιο με τη δημιουργία jitter, το jitter εξόδου στα ports του δικτύου καθορίζεται σε σχέση με τα peak-to-peak UI δύο διαφορετικών bandwidth. Οι πιο σημαντικές τεχνικές για τη μέτρηση του jitter είναι ο παλμογράφος, ο ανιχνευτής φάσης ή όργανα που μπορούν να ανακτήσουν τη διαμόρφωση φάσης του σήματος.

Πρότυπα Μετάδοσης

Sonet / SDH

Το SONET (*Synchronous Optical Network*) είναι το καθιερωμένο πρότυπο μετάδοσης και πολυπλεξίας για μεταδόσεις υψηλών ταχυτήτων σημάτων στη Βόρεια Αμερική. Ένα σχετικό πρότυπο το SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), υιοθετήθηκε στην Ευρώπη και την Ιαπωνία και για τις περισσότερες υποθαλάσσιες συνδέσεις. Τα πρότυπα SONET/SDH έλυσαν πολλά προβλήματα που σχετίζονταν με το προηγούμενο PDH (standards Plesiochronous Digital Hierarchy).

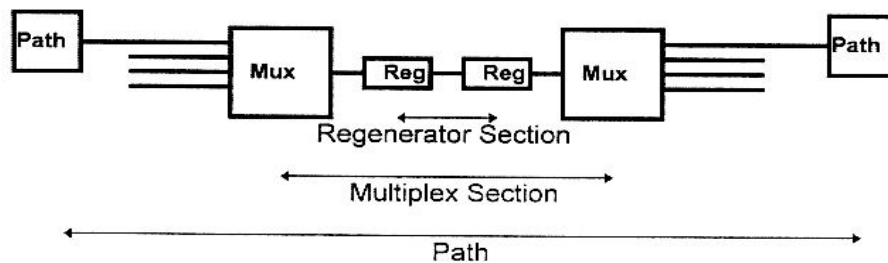
Τα SONET και SDH είναι δίκτυα κυκλώματος και διαχειρίζονται σαν σταθερά αμετάβλητα δίκτυα κυκλώματος. Οι απαιτήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν τα SONET και SDH είναι:

- Ευρυζωνικά Σήματα Διεθνούς Προτύπου. Τα πρότυπα ψηφιακής μετάδοσης που προηγήθηκαν του SDH προέκυψαν απ' την ανάγκη για πολυπλεξία σημάτων φωνής με διαίρεση χρόνου και γι' αυτό βασίστηκαν σε μια μονάδα bandwidth των 64 kb/s. Κανένας άλλος ρυθμός δεν είχε ιδιαίτερη σημασία απ' την άποψη της υπηρεσίας. Σαν αποτέλεσμα, δεν υπήρχε κανένα ευρυζωνικό σήμα διεθνούς προτύπου και αυτό θα γινόταν ένα σημαντικό οικονομικό εμπόδιο στη διαθεσιμότητα οικονομικών ευρυζωνικών υπηρεσιών.
- Βαθμωτή Χωρητικότητα Συστήματος. Ένα σύνολο από πρότυπα ήταν αναγκαία που θα μπορούσαν να κλιμακωθούν με την τεχνολογία, έτσι ώστε να μη χρειαζόταν να επαναφέρουμε ομάδες προτύπων για κάθε αλλαγή.
- Χαμηλότερο κόστος πρόσβασης σε συνθετικά σήματος. Στα προηγούμενα πρότυπα το σήμα έπρεπε να αποπολυπλεχθεί πλήρως για να προσδιοριστεί η ωφέλιμη πληροφορία. Στα SONET/SDH υπήρχε η πρόκληση να δημιουργηθεί ένα σύστημα στο οποίο κάθε ψηφιολέξη θα μπορούσε να προσδιοριστεί και να διαχειριστεί εύκολα. Η εξάλειψη της back-to-back πολυπλεξίας και η δημιουργία ενός add-drop πολυπλέκτη (ADM) μπορούσε να προσφέρει σημαντικό όφελος στα έξοδα των διαχειριστών δικτύων.
- Αρχιτεκτονικές Επιβιώσιμων Δικτύων. Καθώς η χωρητικότητα των συστημάτων συνέχιζε να μεγαλώνει με βελτιώσεις στην οπτο-ηλεκτρονική τεχνολογία, η καταγιστική επίδραση του εξοπλισμού ή τα σφάλματα στις συνδέσεις αυξάνονταν αντίστοιχα. Οι νέες αρχιτεκτονικές ήταν αναγκαίο να είναι αποδοτικές σε σφάλματα και σε οικονομικές επιδράσεις. Μία απ' τις σημαντικές παροχές του SDH είναι η εισαγωγή των αρχιτεκτονικών δακτυλίων με «αυτοίαση».

- Τυποποιημένες Αυτόματες Λειτουργίες. Οι διαχειριστές υπηρεσιών είναι αναγκαίο να αυτοματοποιούν τις λειτουργίες τους στο μέγιστο βαθμό, έτσι ώστε να βελτιώνουν και τα έξοδά τους και τις ποιότητες των υπηρεσιών που παρέχουν.

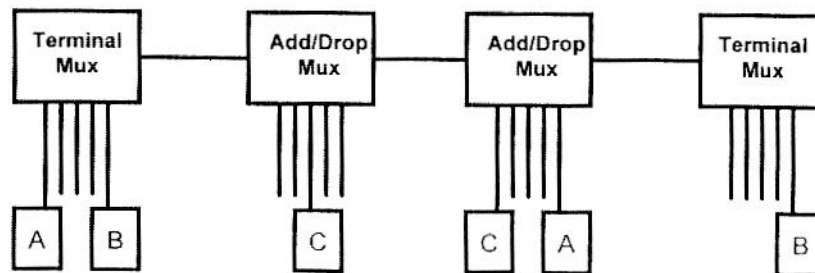
Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες αρχιτεκτονικών δικτύου για δίκτυα SONET:

1. Σύνδεσμοι Point-to-Point. Αυτή είναι η πιο απλή αρχιτεκτονική δικτυακής μετάδοσης. Η υλοποίηση που δημιουργεί και τερματίζει το SONET path-level σήμα αναφέρεται σαν υλοποίηση τερματισμού μονοπατιού. Η προστασία της διάταξης από αστοχίες επιτυγχάνεται με τον πλεονασμό ηλεκτρονικού εξοπλισμού και οπτικών ινών. Τα πιο συστήματα χρησιμοποιούν πλήρως διπλότυπα ηλεκτρονικά και ποικίλες διαδρομές για την λειτουργία και την προστασία των καλωδιώσεων.



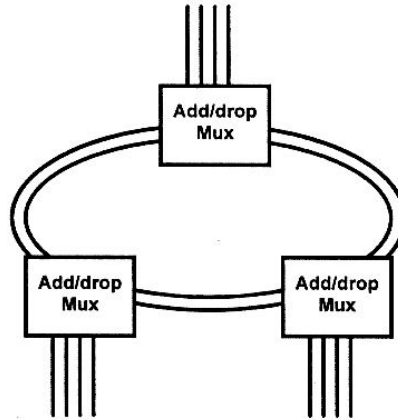
Σχήμα 31: Σύνθεση point-to-point SONET συνδέσμων μετάδοσης

2. Αλυσίδες, η αλυσίδα διαμοιράζεται το bandwidth για να ανταποκριθεί στις επικοινωνιακές ανάγκες του συνόλου των απαιτήσεων κίνησης. Add-drop πολυπλέκτες (ADMs) χρησιμοποιούνται σε ενδιάμεσα σημεία κατά μήκος της αλυσίδας. Καθώς αλλάζει η μορφή της κίνησης, οι τερματικοί και οι add-drop πολυπλέκτες μπορούν να ανασχηματιστούν για να διεκπεραιώσουν τις καινούργιες ανάγκες. Οι αλυσίδες με ADMs παρέχουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα και χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τα point-to-point συστήματα μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων.



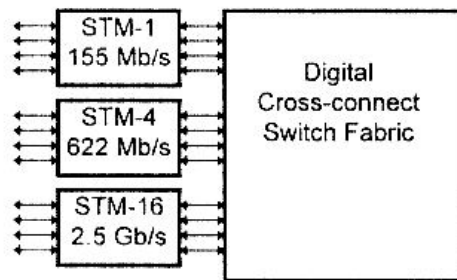
Σχήμα 32: Πολυπλέκτες αλυσίδες με τερματικούς πολυπλέκτες και add-drop πολυπλέκτες..

3. Αυτοϊασόμενοι δακτύλιοι. Αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει την ίδια προσαρμοστικότητα με τις SONET αλυσίδες, λόγω της ικανότητάς τους να διεκπεραιώνουν ένα μείγμα από μορφές κίνησης ανάμεσα σε όλη την διασυνδεδεμένη διάταξη. Επίσης παρέχουν την επιβιωσιμότητα των υπηρεσιών των συστημάτων οπτικής δρομολόγησης. Όταν κοπεί ένα καλώδιο, ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός είναι υπεύθυνος να αλλάξει τη δρομολόγηση της κίνησης για να παρακάμψει το κόψιμο. Στην περίπτωση αστοχίας ενός κόμβου, η κίνηση αναδιαρθρώνεται για να αποφευχθεί ο κόμβος που έχει πρόβλημα. Η κίνηση σε αυτό τον κόμβο διακόπτεται, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι συνεχίζουν να λειτουργούν με την κοινή τους κίνηση.



Σχήμα 33: Αυτοϊασόμενος δακτύλιος SONET

4. Δίκτυα Διακοπών. Αυτά αποτελούνται από ένα πλέγμα από διακόπτες που διασυνδέονται σε αυθαίρετο σχηματισμό. Οι διακόπτες SONET αναφέρονται σαν ψηφιακοί cross-connect διακόπτες (DCSs). Οι DCSs μπορούν να παρέχουν διασύνδεση σε μεγάλο αριθμό δικτύων δακτυλίου. Είναι οι πιο προσαρμοζόμενες και υψηλής χωρητικότητας διατάξεις.



Σχήμα 34: Θεμελιώδες διάγραμμα ενός ψηφιακού cross-connect διακόπτη

Το βασικό σήμα του SDH έχει ένα ρυθμό των 155.52 Mb/s και ονομάζεται μέτρο ασύγχρονης μετάδοσης, επίπεδο 1 (STM-1). Υψηλότερου ρυθμού σήματα είναι ακριβή πολλαπλάσια αυτού του ρυθμού και αυξάνονται κατά παράγοντες του 4. Το SDH και το SONET είναι ιεραρχικά συμβατά το ένα με το άλλο, με το δεύτερο να ξεκινάει σε ρυθμό ακριβώς το ένα τρίτο του βασικού σήματος του SDH. Για να φτιάξουμε συστήματα

μετάδοσης συμβατά με τις υπάρχουσες ιεραρχίες σημάτων, καθορίζεται ένας αριθμός χαρτογραφήσεων. Σήματα υψηλότερου ρυθμού στην ιεραρχία μπορούν να είναι είτε πολλαπλάσια σημάτων χαμηλότερου ρυθμού, είτε μπορούν να αποτελέσουν ένα νέο υψηλής χωρητικότητας κανάλι Ένα σήμα το οποίο δεν αποτελείται από πολλαπλά σήματα αναφέρεται με τον όρο “concatenated”, και υποδηλώνεται με ένα C μετά το νούμερο της ιεραρχίας, π.χ. STM-4C. Το ωφέλιμο τμήμα αυτού του σήματος υποδηλώνει ότι αυτό το σήμα δεν μπορεί να αποπολυπλεχθεί σε χαμηλότερης ταχύτητας ροές. Τα πιο κοινά παραδείγματα σήματα είναι υψηλής ταχύτητας ροές πακέτων από IP routers ή ATM διακόπτες, που πρέπει να χαρτογραφηθούν στο ωφέλιμο τμήμα για μετάδοση στο SDH. Αυτή η ιδιαιτερότητα επιτρέπει τη μελλοντική μετάδοση υψηλής χωρητικότητας σημάτων καθώς πλησιάζει η στιγμή που αυτό θα είναι αναγκαίο.

Το TDM είναι περιοδικό με περίοδο 125 μ s. Αυτό αντιστοιχεί στην περίοδο ενός δείγματος φωνής απ’ την τηλεφωνία. Μία οχτάδα βοηθάει στο να μεταδοθεί ένα ψηφιακό σήμα 8 δυφίων, για ένα κανάλι φωνής κι αυτά τα δείγματα πρέπει να παίρνονται κάθε 125 μ s για να αναπαράγονται πιστά οι συχνότητες στο 3-kHz αναλογικό bandwidth του σήματος φωνής. Αυτό αντιστοιχεί σε ρυθμό 64 kb/s.

Το SDH σήμα σε μια γραμμή μετάδοσης υψηλής ταχύτητας είναι μια ακολουθία από οχτάδες που σχηματίζουν ένα δείγμα το οποίο επαναλαμβάνεται κάθε 125 μ s. Γι’ αυτό το λόγο ένα δείγμα είναι μια συγκεκριμένη ακολουθία από 810 οχτάδες. Η πλειονότητα των οχτάδων διακομίζει subscriber πληροφορία..

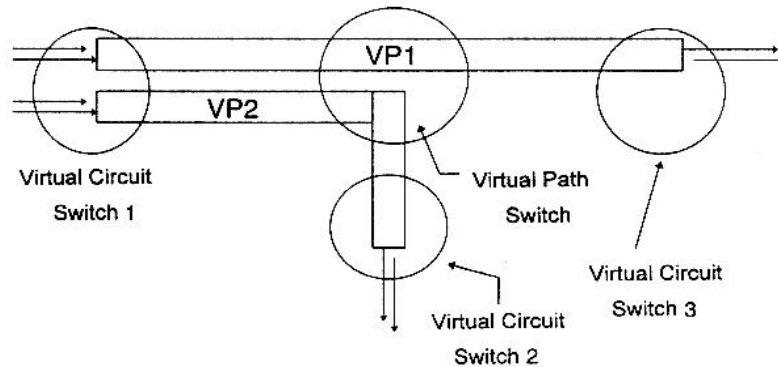
ATM

Το ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) είναι ένα δικτυακό πρωτόκολλο που η δομή του είναι cell-based με κελιά σύντομου και προκαθορισμένου μήκους. Τα δίκτυα κελιών σχεδιάστηκαν για να υποστηρίξουν ταυτόχρονα, συνεχόμενες υψηλού ρυθμού ροές και εκρηκτική κίνηση πακέτων. Τα δίκτυα κελιών είναι ένας ιδιαίτερος τύπος προσανατολισμένης σύνδεσης δικτύου με πρωτόκολλο τόσο απλό, που μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα στο υλικό για να προωθήσει πολύ γρήγορη λειτουργία. Το ATM ενστερνίστηκε απ' την κοινότητα προσωπικής δικτύωσης δεδομένων σαν ένας τρόπος να αναβαθμιστεί η επίδοση του LAN, με το να υποστηρίζει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και τελικά να ενοποιηθεί με δημόσια δίκτυα ευρείας περιοχής.

Το ATM απέκτησε ευρεία υποστήριξη γιατί κάλυψε τις εξής ανάγκες:

- Αποδοτική και βαθμωτή υποστήριξη για κίνηση δεδομένων. Το ίντερνετ δημιουργήθηκε για να αλληλοσυνδέσει ετερογενείς υπολογιστές. Ακόμα το ίντερνετ δεν καθορίζει φυσικά ή link-level πρωτόκολλα. Η διαδικτύωση επετεύχθη με την εισαγωγή σχετικά πολύπλοκων δικτυακών εξοπλισμών μεταξύ τμημάτων LAN. Καθώς οι ανάγκες σε δεδομένα από ξεχωριστούς υπολογιστές μεγάλωνε, ήταν προβλεπόμενο ότι τα διαμοιραζόμενα LAN θα υπερφορτώνονταν. Μία προσέγγιση η οποία ήταν απλή και η οποία υποστήριζε περισσότερο παραλληλισμό και η οποία θα μπορούσε να λειτουργεί σε υψηλούς ρυθμούς ήταν ιδιαίτερα ελκυστική.
- Εξασφάλιση bandwidth για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Δεν υπήρχε μια ικανοποιητική μέθοδος στη βιομηχανία δικτύωσης δεδομένων να υποστηρίξει εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως επικοινωνίες βίντεο ή πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων βίντεο.
- Ενοποίηση των δυνατοτήτων για δεδομένα και πραγματικού χρόνου εφαρμογές. Θα ήταν ελκυστικό για ένα δίκτυο να λειτουργεί το ίδιο άνετα με σήματα δεδομένων που μεταβάλλονται στο χρόνο από εκρηκτικές συνεχόμενες ροές σε εκρηκτική κίνηση και σε χαμηλό ρυθμό αλλά σε μικρής καθυστέρησης επικοινωνίες φωνής.
- Ευέλικτη και πιο δραστική διαχείριση δικτύων. Με τις δικτυακές ανάγκες των υπολογιστών να αυξάνονται αλματωδώς, γινόταν πολύ δύσκολο να καταστρωθούν και να διαχειριστούν δίκτυα δεδομένων. Οι συνθήκες ήταν ώριμες για μια τεχνική που θα μπορούσε να παρέχει ταυτόχρονα bandwidth που ήταν αναγκαίο σε ένα δίκτυο και προφύλαξη από ενέργειες ενός ή πολλών χρηστών που θα μπορούσε να υποβαθμίσει την απόδοση όλου του δικτύου.

Δεδομένου ότι το SONET χρησιμοποιείται σαν θεμελιώδης υποδομή μετάδοσης, το ATM χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για υπηρεσίες μεταγωγής και σαν υποδομή μετάδοσης. Η βασική δικτυακή αρχιτεκτονική στο ATM αποτελείται από ένα πλέγμα διακοπών. Το ιδεατό ATM κύκλωμα μεταγάγει υπηρεσίες υποστήριξης στους τελικούς χρήστες, δεδομένου ότι οι ιδεατοί διακόπτες μονοπατιού του ATM είναι ανάλογοι των SDH-SONET DCSs. Τα ιδεατά μονοπάτια και οι ιδεατοί διακόπτες μπορούν να θεωρηθούν σαν δύο επίπεδα ιεραρχίας μετάδοσης. Ένα ιδεατό μονοπάτι μπορεί να περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό από ιδεατά κυκλώματα. Μερικές δικτυακές υλοποιήσεις μπορούν να αναγνωρίσουν και να ενεργήσουν μόνο σε ιδεατή πληροφορία μονοπατιού, δεδομένου ότι άλλες μπορούν να αναγνωρίσουν ταυτόχρονα ιδεατό κύκλωμα και πληροφορία ιδεατού μονοπατιού. Το *σχήμα 35* παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ ιδεατού μονοπατιού και διακοπών ιδεατού κυκλώματος.



Σχήμα 35: ATM ιδεατό μονοπάτι και ιδεατή μεταγωγή κυκλώματος

Η βασική μονάδα μετάδοσης πληροφορίας του ATM λέγεται κελί. Τα κελιά ATM είναι πακέτα προκαθορισμένου μήκους 53 οχτάδων. Οι 5 πρώτες οχτάδες είναι οι επικεφαλίδες, που περιέχει πληροφορία για τον προορισμό του κελιού. Οι υπόλοιπες οχτάδες είναι η ωφέλιμη πληροφορία. Τα κελιά ATM διακομίζονται σε συστήματα SONET και SDH και τοποθετούνται στα πεδία πληροφοριών του SDH

Το SDH και το ATM έχουν μια πολύπλοκη σχέση. Το ATM αναπτύχθηκε σαν πρότυπο μεταγωγής υπηρεσιών, ένας παγκόσμιος διακομιστής που θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις ανάγκες του παρόντος και του μέλλοντος. Σχεδιάστηκε για να παρέχεται πάνω απ' το επίπεδο μετάδοσης ενός SDH

Το SDH έχει γίνει παγκοσμίως αποδεκτό σαν το πρότυπο για τα μελλοντικά οπτικά συστήματα μετάδοσης. Παρόλο που η μετάδοση με πολλαπλά μήκη κύματος οδεύει στο να γίνει εμπορική, αυτή υλοποιείται με βάση τα πρότυπα του SDH και δεν αντιμετωπίζεται σαν τεχνολογία αντικατάστασης του SDH. Απ' την άλλη το πρότυπο ATM, φαίνεται να έχει κυρίαρχη θέση στα ιδιωτικά δίκτυα και αργότερα να εξαπλωθεί και στα δημόσια, μεγάλα. Και με τα δύο πρότυπα SDH και ATM έχουμε ένα σύνολο που μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες της μελλοντικής δικτύωσης, γιατί είναι και τα δύο ευέλικτα και αποδεκτά παγκοσμίως.

Επιλογές Αύξησης του Παρεχόμενου Bandwidth

Λόγω της δραματικής αύξησης της ανάγκης για χωρητικότητα και οι περιορισμοί στο κόστος οι παροχείς έχουν δύο επιλογές: Να εγκαταστήσουν νέες οπτικές ίνες ή να αυξήσουν το εφικτό bandwidth των ήδη υπαρχουσών.

Η τοποθέτηση νέων οπτικών ινών είναι ο παραδοσιακός τρόπος που χρησιμοποιείται από τους παροχείς για να εξαπλώσουν τα δίκτυά τους. Ωστόσο αυτή η επιλογή έχει σημαντικό κόστος. Κοστίζει \$70,000 το μίλι κι απ' τα οποία τα περισσότερα είναι κόστη κατασκευαστικά και αδειών παρά το ίδιο το κόστος των οπτικών ινών.

Η αύξηση της χωρητικότητας στις υπάρχουσες ίνες μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Αύξηση του ρυθμού bits των υπαρχόντων συστημάτων Κάνοντας χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου ο ρυθμός μετάδοσης bits αυξάνεται σημαντικά κι αυτό φαίνεται απ' το γεγονός ότι πρόσφατα αποτελέσματα έχουν δείξει μετάβαση από τα 2.5 Gbps

(OC-48) στα 10 Gbps (OC-192), στα 40 Gbps (OC-768) κι ακόμα μεγαλύτερα στο εργαστήριο. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα όμως που το επιτυγχάνουν αυτό είναι πολύπλοκα και ακριβά. Εναλλακτικά υπάρχουν σημαντικές τεχνικές που ελαττώνουν τη χρησιμότητα αυτής της προσέγγισης. Η μετάδοση για παράδειγμα στα OC-192 μέσω μονότροπης ίνας (SM), είναι 16 φορές πιο ευαίσθητη στη χρωματική διασπορά απ' μετάδοση στα OC-48. Η υψηλότερη ισχύς μετάδοσης που απαιτείται σε υψηλότερους ρυθμούς bits, δημιουργεί επίσης μη γραμμικές επιδράσεις. Επίσης η διασπορά στο επίπεδο πόλωσης, περιορίζει την απόσταση διάδοσης του οπτικού σήματος χωρίς να υποστεί υποβάθμιση.

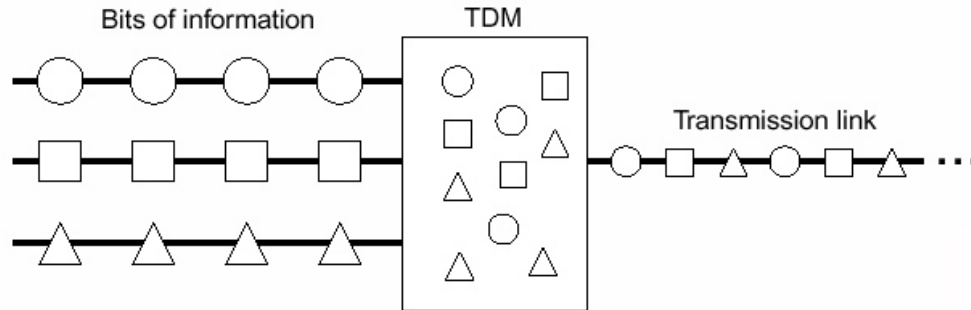
- Αύξηση του αριθμού των μηκών κύματος σε μια οπτική ίνα
Χρησιμοποιώντας πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος, πολλά μήκη κύματος μπορούν να πολυπλεχθούν και να διαδοθούν ταυτόχρονα μέσα από την ίδια οπτική ίνα αυξάνοντας έτσι σημαντικά τη χωρητικότητα και χωρίς την τοποθέτηση νέων οπτικών ινών. Η αύξηση της χωρητικότητας μπορεί να είναι της τάξης παράγοντα 16 ή 32. Συστήματα των 128 και 160 μηκών κύματος βρίσκονται ήδη σε λειτουργία στις μέρες μας αλλά στο μέλλον ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί πολύ περισσότερο καθώς τα όρια αυτής της τεχνολογίας δεν έχουν διερευνηθεί ακόμα.

Τεχνικές Πολυπλεξίας

Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου

Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) επινοήθηκε σαν τρόπος μεγιστοποίησης της κίνησης δεδομένων φωνής που μπορεί να διακομιστεί σε ένα μέσο. Σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο πριν επινοηθεί η πολυπλεξία, κάθε τηλεφωνική κλήση απαιτούσε το δικό της φυσικό σύνδεσμο. Αυτή αποδείχθηκε μια ακριβή και μη αυξομειώσιμη λύση. Με τη χρήση της πολυπλεξίας μπορούν να λάβουν χώρα περισσότερες από μία τηλεφωνικές κλήσεις σε ένα μόνο σύνδεσμο.

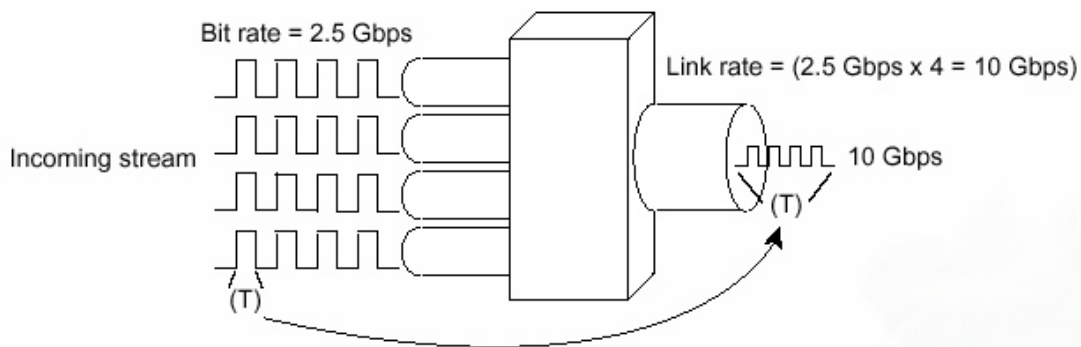
Στην τεχνική TDM, πολλές συνεχόμενες ροές δεδομένων χαμηλής ταχύτητας πολυπλέκονται σε μία συνεχόμενη ροή υψηλής ταχύτητας. Ο χρόνος διαιρείται σε σχισμές χρόνου (time-slots) σταθερού μεγέθους. Κάθε ροή δεδομένων χρησιμοποιεί διαφορετική σχισμή χρόνου. Η τεχνική TDM αυξάνει την χωρητικότητα του συνδέσμου μετάδοσης διαμοιράζοντας το χρόνο σε μικρότερα διαστήματα, έτσι ώστε τα bits από πολλαπλές εισόδους να μπορούν να μεταδοθούν στο μέσο μετάδοσης αποδοτικά, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των bits που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο. Η αρχή της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου φαίνεται στο σχήμα 36.



Σχήμα 36: Τεχνική TDM

Με την τεχνική TDM, οι είσοδοι του συστήματος εξυπηρετούνται με τη μορφή αιτήσεων. Παρόλο που φαίνεται «τίμια», αυτή η μέθοδος οδηγεί σε μη ανεπάρκεια, επειδή κάθε χρονική σχισμή είναι κατειλημμένη ακόμα κι όταν δε μεταφέρονται δεδομένα. Αυτό το πρόβλημα μετριάζεται απ' την στατιστική πολυπλεξία που χρησιμοποιείται στην ασύγχρονη μετάδοση (ATM). Παρόλο που η ATM παρέχει καλύτερη αξιοποίηση του bandwidth, υπάρχουν πρακτικά όρια στην ταχύτητα η οποία μπορεί να επιτευχθεί λόγω των ηλεκτρονικών που απαιτούνται για τον καταμερισμό και την επανασυνάθροιση (SAR) των ATM cells που διακομίζουν τα πακέτα δεδομένων.

Τα πρότυπα που έχουν υιοθετηθεί απ' τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών για οπτική μετάδοση TDM δεδομένων είναι το SONET (Synchronous Optical Network) και το SDH (Synchronous Digital Hierarchy). Αυτά τα πρότυπα καθορίζουν παραμέτρους αλληλεπίδρασης, ρυθμούς, μεθόδους πολυπλεξίας και διαχείριση για σύγχρονο TDM σε οπτικό επίπεδο. Τα SONET/SDH παίρνουν n ροές bit, τις πολυπλέκουν και με οπτική διαμόρφωση σήματος το στέλνουν χρησιμοποιώντας ένα μέσο μετάδοσης φωτός μέσω οπτικής ίνας με bit rate ίσο με (εισερχόμενο bit rate)* n . Γι' αυτό το λόγο η κίνηση που φτάνει στον πολυπλέκτη SONET από 4 σημεία στα 2.5 Gbps θα εξέλθει σαν απλή διάδοση στα 4*2,5 Gbps ή 10 Gbps. Αυτή η αρχή φαίνεται στο σχήμα 37, που δείχνει μια αύξηση στο bit rate κατά ένα παράγοντα 4 σε χρονική σχισμή T.



Σχήμα 37: SONET TDM

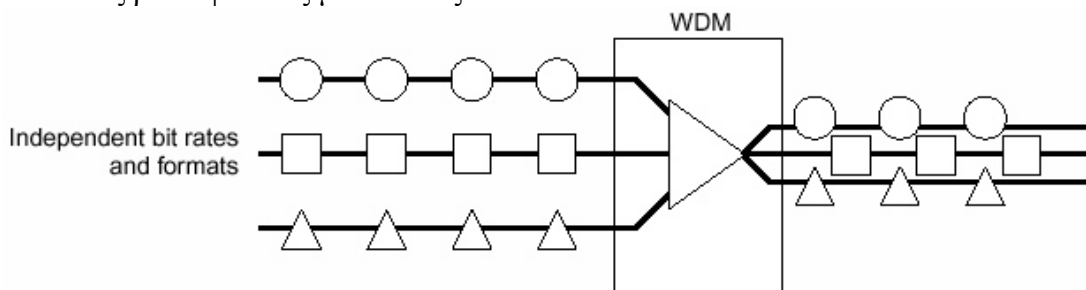
Τα SONET/SDH έχουν κάποιες αδυναμίες. Όπως και με κάθε TDM οι έννοιες της προτεραιότητας και της συμφόρησης δεν υφίστανται. Επίσης η ιεραρχία πολυπλεξίας είναι ακλόνητη. Όταν είναι αναγκαία περισσότερη χωρητικότητα, το πήδημα σε επόμενη πολυπλεξία είναι απαραίτητη με πιθανότητα να οδηγήσει σε ανάγκη για περισσότερη

χωρητικότητα απ' όση είναι αναγκαία. Για παράδειγμα, το επόμενο αυξητικό βήμα απ' τα 10 Gbps (STS-192) TDM είναι τα 40 Gbps (STS-768). Επίσης. Απ' τη στιγμή που η ιεραρχία είναι βελτιστοποιημένη για μετάδοση φωνής, υπάρχουν δομικές αναποτελεσματικότητες όταν διακομίζεται κίνηση δεδομένων με πλαίσια SONET.

Οι οπτικές ίνες, που υπόσχονται φαινομενικά απεριόριστο bandwidth δεν μπορούν να αποδώσουν τα αναμενόμενα και το κόστος, η πολυπλοκότητα και οι περιορισμοί κλιμάκωσης της υποδομής του SONET καθίστανται όλο και πιο προβληματικές.

Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος

Η τεχνική της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) αυξάνει την διακομιζόμενη χωρητικότητα του φυσικού μέσου (οπτική ίνα), κάνοντας χρήση μιας εντελώς διαφορετικής μεθόδου απ' αυτήν στην περίπτωση της πολυπλεξίας χρόνου. Η WDM αναθέτει στα εισερχόμενα οπτικά σήματα συγκεκριμένες συχνότητες φωτός (μήκη κύματος ή λ s) εντός μιας προκαθορισμένης ζώνης συχνότητας. Αυτή η πολυπλεξία μοιάζει με την τεχνική διαίρεσης πολυπλεξίας συχνότητας που χρησιμοποιείται για χρόνια στις ραδιοφωνικές μεταδόσεις.



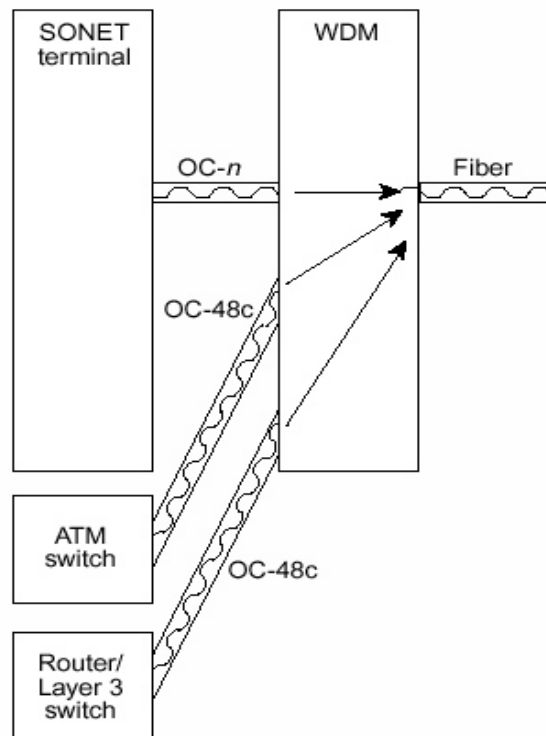
Σχήμα 38: Αύξηση χωρητικότητας με WDM

Σε κάθε WDM σύστημα, κάθε μήκος κύματος διοχετεύεται στην οπτική ίνα και τα σήματα αποπολυπλέκονται στον τελικό δέκτη. Όπως και στα TDM, η συνακόλουθη χωρητικότητα είναι ένα άθροισμα των σημάτων εισόδου, αλλά η WDM τεχνική αντιμετωπίζει κάθε εισερχόμενο σήμα ανεξάρτητα απ' όλα τα άλλα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του bandwidth. Όλα τα σήματα καταφθάνουν την ίδια χρονική στιγμή προκειμένου να αποσυνθετηθούν και να διαβιβαστούν σε χρονικές σχισμές. Τα όρια της WDM τεχνολογίας δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί επειδή δεν είναι ακόμα πλήρως γνωστά. Το 2000 ήταν διαθέσιμα συστήματα με χωρητικότητα 128 λ σε μία οπτική ίνα. Κι απ' τις δύο όψεις και την τεχνική και την οικονομική, η δυνατότητα να παρέχει ενδεχομένως απεριόριστη χωρητικότητα μετάδοσης είναι το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της WDM τεχνολογίας. Η σημερινή επένδυση στο χώρο αυτό μπορεί όχι μόνο να διατηρηθεί αλλά και να βελτιστοποιηθεί με ένα παράγοντα τουλάχιστον 32. Καθώς αλλάζουν οι απαιτήσεις και οι ανάγκες, μπορεί να προστεθεί περισσότερη χωρητικότητα είτε με απλές αναβαθμίσεις του εξοπλισμού, είτε αυξάνοντας τον αριθμό των λ στην οπτική ίνα χωρίς αυτές οι αναβαθμίσεις να είναι και αναγκαστικά ακριβές.

Εκτός απ' το bandwidth, τα πιο επιβλητικά τεχνικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας WDM μπορούν να ανακεφαλαιωθούν όπως φαίνεται παρακάτω:

- Transparency — Επειδή η WDM είναι μια αρχιτεκτονική φυσικού επιπέδου μπορεί να υποστηρίξει με διάφανο τρόπο formats TDM και δεδομένων όπως ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, και οπτικό κανάλι με ανοιχτή αλληλεπίδραση με ένα κοινό φυσικό επίπεδο.
- Δυνατότητα Κλιμάκωσης — Η WDM τεχνολογία μπορεί να λειτουργήσει σε μοχλός σε μητροπολιτικά δίκτυα για την υλοποίηση point-to-point συνδέσεων την αναβάθμιση των δακτυλίων SONET/SDH και την προαγωγή της ανάγκης για αυξημένη χωρητικότητα.
- Δυναμική Παροχή — Γρήγορη, απλή και δυναμική παροχή συνδέσεων, δίνει στους παροχείς τη δυνατότητα να παρέχουν υπηρεσίες υψηλού bandwidth σε μέρες παρά σε μήνες.

Χρησιμοποιώντας τεχνολογία WDM σαν διακομιστή για TDM, οι υπάρχουσες SONET επενδύσεις σε εφόδια και εξοπλισμό μπορούν να διατηρηθούν. Συχνά νέες εφαρμογές μπορούν να εξαλείψουν επίπεδα εξοπλισμού. Για παράδειγμα ο εξοπλισμός πολυπλεξίας μπορεί να αποφευχθεί εντελώς με διασύνδεση κατευθείαν στον WDM εξοπλισμό από ATM και packet switches, όπου οι OC-48 διασυνδέσεις είναι κοινές.



Σχήμα 39: Απευθείας διασυνδέσεις SONET από switch σε WDM

Πρακτικές Μελέτες Στην Ανάπτυξη WDM Δικτύων

Αναπτύσσοντας ένα WDM δίκτυο υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα πράγματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Είναι η WDM τεχνολογία συμβατή με την υπάρχουσα κατάσταση;
Μερικοί τύποι παλαιών ινών δεν ταιριάζουν για χρήση σε WDM (π.χ. DSF ίνες), ενώ κάποιοι καινούργιοι τύποι, όπως οι NZ-DSF είναι ιδανικές για WDM χρήση. Οι κοινές SM ίνες οι οποίες είναι η πλειοψηφία των εγκατεστημένων ινών, μπορούν να υποστηρίξουν την WDM στα μητροπολιτικά δίκτυα. Αν πρέπει να εδραιωθούν νέες ίνες θα πρέπει να επιλεγθούν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτρέπουν την μελλοντική ανάπτυξη των δικτύων, καθώς τα συστήματα WDM διευρύνονται σε νέα σημεία αναφοράς σχετικά με τα μήκη κύματος και τα bit rates.
- What is my migration and provisioning strategy;
Επειδή η WDM είναι επιδεκτική στο να υποστηρίζει μεγάλη αύξηση στο bandwidth είναι ελκυστική για μακροπρόθεσμη έρευνα και επένδυση. Ταυτόχρονα οι τοπολογίες από σημείο σε σημείο και οι δακτύλιοι, μπορούν να αποτελέσουν τις θεμελιώδεις τοπολογίες για μελλοντική ανάπτυξη σε δίκτυα πλέγματος. Η προοπτικές επίσης πρέπει να είναι ευέλικτες σχετικά με τους κόμβους όπως οι OADMs για να ικανοποιούνται οι εκάστοτε απαιτήσεις και ανάγκες των πελατών-χρηστών.
- Ποια εργαλεία διαχείρισης δικτύου μπορώ να χρησιμοποιήσω;
Θα χρειαστεί ένα πλήρες εργαλείο διαχείρισης δικτύου για προετοιμασία, επίβλεψη της απόδοσης, διαπίστωσης σφαλμάτων και απομόνωσης και αποκατάστασης. Ένα τέτοιο εργαλείο θα πρέπει να ικανοποιεί όλα τα πρότυπα (π.χ. το SNMP) και να μπορεί να συνυπάρξει με το υπάρχον λειτουργικό σύστημα.
- Ποια είναι η στρατηγική μου για προστασία και αποκατάσταση;
Ο σχεδιασμός μιας στρατηγικής προστασίας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που πρέπει να λάβει υπόψη αρκετές μεταβλητές. Υπάρχουν αρκετές σοβαρές αστοχίες (σφάλματα εξοπλισμού, όπως lasers και φωτοανιχνευτές και σπασίματα στις ίνες), όπως και κάποιες λιγότερο σοβαρές όπως η υποβάθμιση του σήματος (μη αποδεκτό BER). Οι πρώτες πρέπει να διευθετηθούν μέσω της αφθονίας σε εξοπλισμό. Οι δεύτερες πρέπει να διευθετηθούν απ' το σύστημα μέσω έξυπνης παρακολούθησης σε επίπεδο μήκους κύματος και διαχείρισης. Οι στρατηγικές προστασίας και επιβίωσης εξαρτώνται απ' το είδος της συντήρησης, του συστήματος και των αρχιτεκτονικών των δικτύων. Σε πολλά δίκτυα επίσης εξαρτώνται απ' το πρωτόκολλο μετάδοσης.
- Ποιοι είναι οι προϋπολογισμοί μου για οπτική ισχύ;
Γενικά υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια οπτικής ισχύος. Ο πιο οφθαλμοφανής είναι το ίδιο το μήκος της οπτικής ίνας, που φαίνεται να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για μεγάλων αποστάσεων μεταδόσεις. Στα μητροπολιτικά δίκτυα, ο αριθμός των κόμβων πρόσβασης όπως οι OADMs, είναι γενικά ο πιο σημαντικός λόγος απώλειας στο οπτικό σήμα.
Το κλειδί για υπολογισμό της οπτικής ισχύος και των απωλειών αυτής είναι να υπάρχει μια ακριβέστατη μέτρηση στις ίνες κάνοντας χρήση ενός οπτικού μετρητή ακτινοβολίας στο πεδίο του χρόνου (OTDR). Με τη χρήση ενός OTDR, μπορούμε να έχουμε πληροφορίες για το μήκος της ίνας, της αυξομείωσης ισχύος σε dB σε όλο το σύνδεσμο, όπως και σε τμήματα αυτού τοποθεσίες συνδετήρων, ενώσεων και αστοχιών στο μέσο μετάδοσης.

- Διαλειτουργικότητα

Επειδή στην DWDM χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα μήκη κύματος για μετάδοση, τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι τα ίδια στο τέλος κάθε σύνδεσης. Γι' αυτό το λόγο το ITU τυποποίησε ένα πλέγμα με διαστήματα των 100 GHz. Ωστόσο οι παροχείς μπορούν να χρησιμοποιούν μεγαλύτερα που μερικές φορές είναι της τάξης των 200 GHz ή πιο στενά. Επίσης διαφορετικοί παροχείς που χρησιμοποιούν το ίδιο πλέγμα μπορούν να μη χρησιμοποιούν το ίδιο πλαίσιο αριθμών λάμδα. Έτσι είναι σημαντικό να είναι ενημερωμένοι για τα ενδεχόμενα προβλήματα διαλειτουργικότητας που παρουσιάζονται από διαφορετικές ευθυγραμμίσεις πλέγματος.

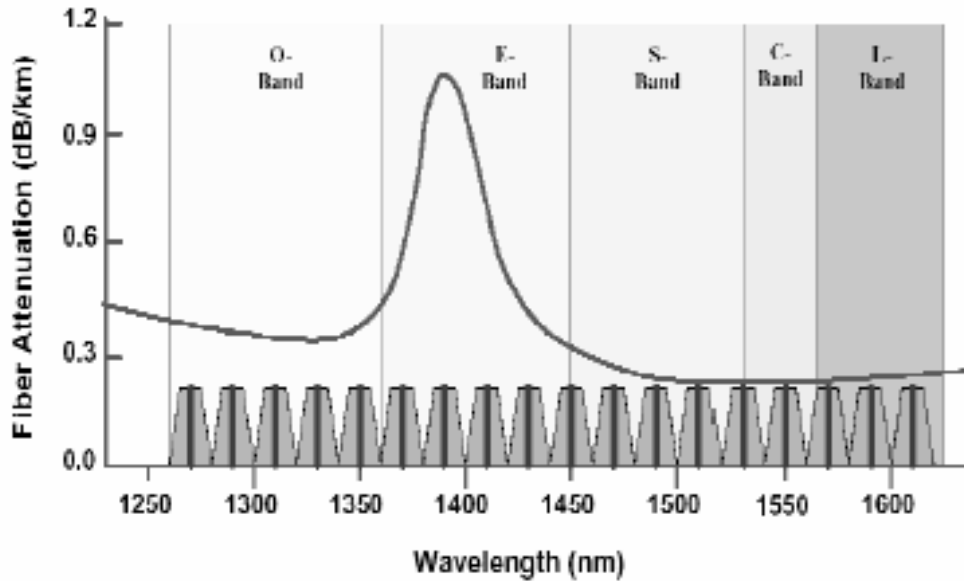
Κατά το σχεδιασμό ενός νέου WDM συστήματος ή κατά την αναβάθμιση ενός ήδη υπάρχοντος, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη θέματα που αφορούν την εξοικονόμηση χρήματος σε σχέση με την χωρητικότητα και τη δυνατότητα κλιμάκωσης. Το καλύτερο δείγμα WDM τεχνολογίας είναι η DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Η διαφορά μεταξύ WDM και DWDM είναι βασικά ότι στην DWDM τα διαμερισμένα μήκη κύματος βρίσκονται πιο κοντά απ' ό,τι στην WDM και γι' αυτό έχει συνολικά μεγαλύτερη χωρητικότητα. Τα όρια αυτού του διαμερισμού δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ακριβή στοιχεία και υψηλή απόδοση. Τα βασικά στοιχεία στη DWDM τεχνολογία κατατάσσονται ανάλογα με τη θέση τους στο σύστημα ως εξής:

- Στο μέρος του πομπού, lasers με συγκεκριμένα, σταθερά μήκη κύματος.
- Στο σύνδεσμο, οπτική ίνα που παρουσιάζει λίγες απώλειες και υψηλή απόδοση μετάδοσης στο φάσμα του κατάλληλου μήκους κύματος.
- Στη μεριά του δέκτη, φωτοανιχνευτές και οπτικοί αποπολυπλέκτες που χρησιμοποιούν λεπτά φίλτρα ή διαθλαστικά στοιχεία..
- Οπτικοί add/drop πολυπλέκτες και οπτικά cross-connect στοιχεία .

Όσον αφορά την ανάθεση μήκους κύματος για την περίπτωση WDM, ο σχεδιαστής πρέπει να αποφασίσει μεταξύ της σύννηθες WDM (CWDM) και της «πυκνής» WDM (DWDM). Η τεχνική CWDM χρησιμοποιεί 18 μήκη κύματος από 1270 nm μέχρι 1610 nm με bandwidth καναλιού τα 13 nm. Η CWDM επιτρέπει τη χρήση φθηνών στοιχείων, όπως μη θερμαντικά AWG και lasers χωρίς ψύξη λόγω του μεγάλου διαστήματος των καναλιών (20 nm): Κοινώς δεν υπάρχει ανάγκη για σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στις πηγές laser και στα οπτικά φίλτρα. Απ' την άλλη, η DWDM επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα στο φάσμα και με εμπορικά διαθέσιμους οπτικούς ενισχυτές μπορεί να παρέχει εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, που την καθιστά καλύτερη επιλογή για το μέλλον.

Η CWDM τράβηξε αρκετά την προσοχή τελευταία, λόγω των οικονομικών οφελών που έχει σαν οπτική λύση πρόσβασης. Ωστόσο υπάρχουν κάποια θέματα που πρέπει να αναφέρουμε: Κατ' αρχήν, μέχρι να χρησιμοποιηθούν οι All-Wave™ ίνες, η μεγάλη απορρόφηση στο νερό προκαλεί δυσκολίες όταν χρησιμοποιούνται κανάλια στη ζώνη E (σχήμα 40). Επίσης, λόγω της μεγάλης εξασθένησης στις ίνες, της πιθανής απώλειας στοιχείων και της μη ιδανικής ενίσχυσης, ο προϋπολογισμός του κόστους αποτελεί ένα σημαντικό θέμα. Έχει προταθεί να χρησιμοποιούνται solid-state οπτικοί ενισχυτές ή

γραμμικοί οπτικοί ενισχυτές για να ενισχύονται οι CWDM σύνδεσμοι, αλλά η υποβάθμιση του SNR είναι πολύ χειρότερη απ' ό,τι στην περίπτωση των οπτικών ενισχυτών ίνας.



Σχήμα 40: Προδιαγραφές CWDM

Ένας τρόπος αναβάθμισης του πιθανού δικτύου είναι να χρησιμοποιηθεί CWDM πρώτα για λόγους κόστους. Αν απαιτούνται περισσότερα μήκη κύματος μια βελτίωση είναι να εισάγουμε DWDM κανάλια στη ζώνη C χωρίς να διαταραχθεί η υπάρχουσα μετάδοση. Η τελική κρίση εξαρτάται από σχετικά κόστη. Γενικώς η 10 G transparent δικτύωση έχει χρηματικό όφελος σε σχέση με την αδιαφανή δικτύωση από 40 G και πάνω. Τα 40 G συστήματα είναι πιο λειτουργικά για υψηλής χωρητικότητας εφαρμογές και μικρές αποστάσεις.

Σα συμπέρασμα αν και τα 40 Gb/s ίσως έχουν κάποια εφαρμογή σε μικρότερα τοπικά δίκτυα, τα 10 Gb/s είναι ακόμα η τεχνολογική επιλογή για την πλειοψηφία των μεγάλων εφαρμογών.

Βιβλιογραφία

Αντιστάθμιση Χρωματικής Διασποράς

- S. J. Spammer, "An Overview of Possible Dispersion Compensation Techniques for 40 Gb/s"
- Katsushi Iwashita and Noboru Takachio, "Chromatic Dispersion Compensation in Coherent Optical Communications", Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, No. 3, March 1990.
- Hidenori Taga, Shu Yamamoto, Norboru Edagawa, Yoshihiro Yoshida, Shigeyuki Akiba and Hiroharu Wakabayashi, "Performance Evaluation of the Different Types of Fiber-Chromatic-Dispersion Equalization for IM-DD Ultralong-Distance Optical Communication Systems with Er-Doped Fiber Amplifiers" Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, No. 9, September 1994.

Fiber Bragg Gratings

- C. R. Giles, "Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings", Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, August 1997.

Ετεροδιαμόρφωση Φάσης

- Rongqing Hui, Kenneth .R. Demarest and Christopher T. Allen, "**Cross-Phase Modulation in Multispan WDM Optical Fiber Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 6, June 1999.
- D. Marcuse, A. R. Chraplyvy and R.W. Tkach, "**Dependence of Cross-Phase Modulation on Channel Number in Fiber WDM Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, No. 5, May 1994.
- D. Marcuse, A. R. Chraplyvy and R.W. Tkach, "Effect of Fiber Nonlinearity on Long-Distance Transmission", Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, No. 1, January 1991.

Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων

- R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, Fabrizio Forghieri, A. H. Gnauck and R. M. Derosier "**Four-Photon Mixing and High-Speed WDM Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 5, May 1995.
- Ekaterina A. Golovchenko, Neal .S. Bergano and Carl R. Davidson, "**Four-Wave Mixing in Multispan Dispersion-Managed Transmission Links**", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 10, October 1998.
- Kyo Inoue, "Experimental Study on Channel Crosstalk Due to Fiber Four-Wave Mixing Around the Zero-Dispersion Wavelength", Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, No. 6, June 1994.
- Kyo Inoue, "Arrangement of Orthogonal Polarized Signals for Suppressing Fiber Four-Wave Mixing in Optical Multichannel Transmission Systems", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 6, June 1991.
- Kyo Inoue and Hiromu Toba, "Fiber Four-Wave Mixing in Multi-Amplifier Systems with Nonuniform Chromatic Dispersion", Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 1, January 1995.

Αστάθεια Διαμόρφωσης

- Weiping Huang and Jin Hong, "**A Coupled-Mode Analysis of Modulation Instability in Optical Fibers**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 2, February 1992.

Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman

- Katherine X. Liu and Elsa Garmire, "**Understanding the Formation of the SRS Stokes Spectrum in Fused Silica Fibers**", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 27, No. 4, April 1991.
- Seiji Norimatsu and Toshiaki Yamamoto, "**Waveform Distortion Due to Stimulated Raman Scattering in Wide-Band WDM Transmission Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, No. 2, February 2001.
- David Wood, "Constraints on the Bit Rates in Direct Detection Optical Communication Systems Using Linear or Soliton Pulses", Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, No. 7, July 1990.

Ενίσχυση Raman

- Noboru Takachio and Hiro Suzuki, "**Application of Raman-Distributed Amplification to WDM Transmission Systems Using 1.55 μm Dispersion-Shifted Fiber**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, No. 1, January 2001.
- Yasuhiro Aoki, "Properties of Fiber Raman Amplifiers and their Applicability to Digital Optical Communication Systems", Journal of Lightwave Technology, Vol. 6, No. 7, July 1988.

Εξαναγκασμένη Σκέδαση Brillouin

- Daniel A. Fishman and Jonathan A. Nagel, "**Degradations Due to Stimulated Brillouin Scattering in Multigigabit Intensity-Modulated Fiber-Optic Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, No. 11, November 1993.
- E. Lichtman, R. G. Waarts and A. A. Friesem, "**Stimulated Brillouin Scattering Excited by a modulated Pump Wave in Single-Mode Fibers**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 7, No. 1, January 1999.
- A. Djupsjöbacka, G. Jacobsen and B. Tromborg, "Dynamic Stimulated Brillouin Scattering Analysis", Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 3, March 2000.
- M. Oscar van Deventer and André J. Boot, "Polarization Properties of Stimulated Brillouin Scattering in Single-Mode Fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, No. 4, April 1994.

Πολυπλεξία Με Διαίρεση Μήκους Κύματος

- Neal S. Bergano and C. R. Davidson, "**Wavelength Division Multiplexing in Long-Haul Transmission Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, No. 6, June 1996.
- Jun-ichi Kani, Masahiko Jinno, Tadashi Sakamoto, Shigeki Aisawa, Masaki Fukui, Kuninori Hattori and Kimio Oguchi, "**Interwavelength-Band Nonlinear Interactions and Their Suppression in Multiwavelength-Band WDM Transmission Systems**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 11, November 1999.

- Hadrien Louchet, and Klaus Petermann, “**Analytical Model for the Performance Evaluation of DWDM Transmission Systems**”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 9, September 2003
- Mary R. Phillips and Daniel M. Ott, “Crosstalk Due to Optical Fiber Nonlinearities in WDM CATV Lightwave Systems”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 10, October 1999.
- M. Murakami, T. Matsuda, H. Maeda and T. Imai, “Long-Haul WDM Transmission Using Higher Order Fiber Dispersion Management”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 9, September 2000.