

Συστήματα Μετάδοσης

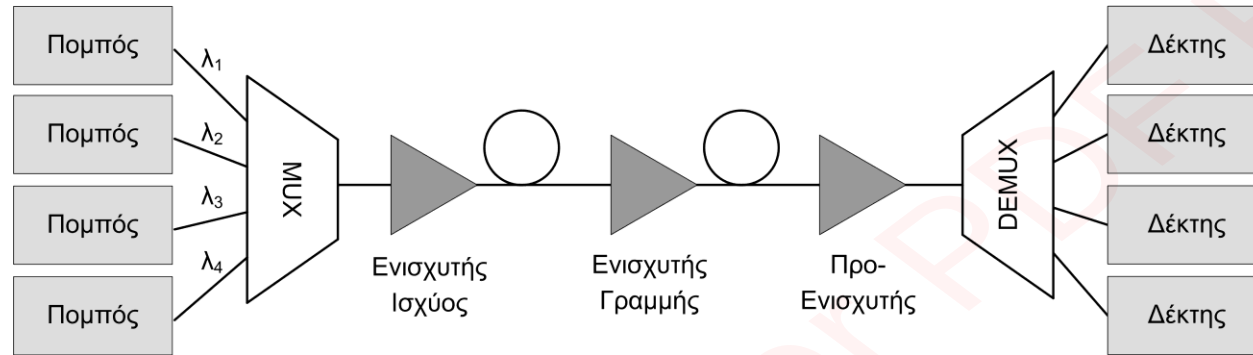
Οπτικά Συστήματα Μετάδοσης



Δομή Ζεύξης και Μετρικά Λειτουργίας



Οπτική Ζεύξη



- ❑ Πομπός: Σύστημα παραγωγής οπικών σημάτων από ηλεκτρικά δεδομένα.
- ❑ Πολυπλέκτης (MUX): Οπτικό στοιχείο πολυπλεξίας μήκους κύματος (συχνότητας).
- ❑ Οπτική ίνα: Μέσο μετάδοσης.
- ❑ Ενισχυτές: Οπτικά στοιχεία αντιστάθμιση απωλειών μετάδοσης.
- ❑ Απολυπλέκτης (DEMUX): Οπτικό στοιχείο αόπολυπλεξίας μήκους κύματος.
- ❑ Δέκτης: Σύστημα αναπαραγωγής των ηλεκτρικών δεδομένων.

Μετρικά Λειτουργίας (I)

Ρυθμός Εμφάνισης Σφαλμάτων

- Ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων καθορίζεται από την ισχύ του «καθαρού» οπτικού σήματος και την ισχύ του θορύβου ο οποίος διαδίδεται στην οπτική ζεύξη μαζί με το σήμα.

$$BER = Q(\gamma), \quad \gamma = \frac{R \cdot (P_1 - P_0)}{\sigma_0 + \sigma_1}, \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy.$$

- Το κατώφλι απόφασης έχει τεθεί σε βελτιστοποιημένη τιμή

$$I_{th} = R \cdot \frac{\sigma_0 \cdot P_1 + \sigma_1 \cdot P_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

- Οι ισχείς του οπτικού σήματος είναι P_0 και P_1 και οι ισχείς του λαμβανόμενου θορύβου είναι σ_0 και σ_1 , όταν το αντίστοιχο bit δεδομένων είναι '0' ή '1'.
- R αντιστοιχεί στην αποκρισμότητα της φωτοδιόδου στο δέκτη.

Μετρικά Λειτουργίας (II)

Power Penalty

- Το power penalty ορίζεται ως η μείωση του σηματοθορυβικού λόγου λόγω κάποιας συγκεκριμένης οπτικής επίδρασης.
- Αν η εν λόγω επίδραση προκαλεί τη λήψη νέων τιμών ισχύος P_0' , P_1' , σ_0' και σ_1' στο δέκτη, τότε το power penalty ορίζεται ως
$$PP = -10 \log \left(\frac{\frac{R \cdot (P_1' - P_0')}{\sigma_1' + \sigma_0'}}{\frac{R \cdot (P_1 - P_0)}{\sigma_0 + \sigma_1}} \right)$$

Ισολόγιο Ισχύος

- Το ισολόγιο ισχύος διασφαλίζει ότι επαρκής ισχύς θα φθάσει στο δέκτη της οπτικής ζεύξης.
- Η συνολικά μεταδιδόμενη ισχύς στον πομπό θα πρέπει να υπερβαίνει την ευαισθησία στο δέκτη, μείον τις απώλειες μετάδοσης, μείον ένα επιπλέον περιθώριο λειτουργίας (system margin) ίσο με 6-8 dB.

Χαρακτηριστικά Ζεύξης



Πομπός

- ❑ Ισχύς εξόδου: Διοδικά laser ανάδρασης παρέχουν ισχύ εξόδου ίση με 1-10 mW (0-10 dBm), ενώ η χρήση οπτικού ενισχυτή παρέχει ως και 50 mW (17 dBm).
- ❑ Λόγος σβέσης: Ο λόγος σβέσης r ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος P_1 που αποστέλλεται για bit '1', προς την ισχύ P_0 που αποστέλλεται για bit '0'.

⇒ Ιδανικά συστήματα ο λόγος σβέσης είναι άπειρος, πρακτικά όμως περιορίζεται σε τιμές μεταξύ 10 και 20.

⇒ Power Penalty:

$$PP = -10 \log \left(\frac{P_1' - P_0'}{P_1 - P_0} \right) = -10 \log \left(\frac{P_1' - P_1'/r}{P_1} \right) = -10 \log \left(\frac{P_1'}{P_1} \right) - 10 \log \left(\frac{r-1}{r} \right)$$

- ❑ Είδος διαμόρφωσης (άμεση ή έμμεση): Η άμεση διαμόρφωση, έχει χαμηλότερο κόστος, αλλά παράγει οπτικά σήματα με μικρότερο εύρος ζώνης.

⇒ Το αυξημένο εύρος ζώνης σε συνδυασμό με τη χρωματική διασπορά εισάγει επιπλέον power penalty.

⇒ Επίσης εισάγει power penalty κατά τη διέλευση του οπτικού σήματος σε φίλτρα και πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες.

Δέκτης

- ❑ Ευαισθησία: ορίζεται ως η μέση οπτική ισχύς που είναι αναγκαίο να εισαχθεί στο δέκτη ώστε να επιτευχθεί συγκεκριμένο BER και για συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης.
 - ⇒ Δίοδοι «χιονοστοιβάδας» (Avalanche Photodiodes) απαιτούν μικρότερη ευαισθησία.
 - ⇒ Μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης συνεπάγεται κατά κανόνα μεγαλύτερη ευαισθησία στο δέκτη.
- ❑ Μέγιστη ισχύς εισόδου.

Ενισχυτές (I)

- ❑ Οι συνήθεις ενισχυτές για την C-band είναι οι οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers - EDFAs), ενώ στην L-band είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τόσο EDFAs όσο και ενισχυτές Raman.
- ❑ Οι EDFAs έχουν μεγάλο εύρος ζώνης (35 nm) σε μήκος κύματος λειτουργίας 1.55 μm και παρέχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης ενίσχυσης οπτικών σημάτων πολυπλεγμένων κατά μήκος κύματος σε αντίστοιχες ζεύξεις.
 - ⇒ Μετά τον πομπό χρησιμοποιείται οπτικός ενισχυτής με τη μέγιστη δυνατή ισχύ εξόδου (power amplifier).
 - ⇒ Αμέσως πριν το δέκτη χρησιμοποιείται προενισχυτής (pre-amplifier) για να βελτιώσει την ευαισθησία του δέκτη.
 - ⇒ Κατά μήκος της ζεύξης χρησιμοποιούνται ενισχυτές γραμμής (line amplifiers) για να αντισταθμίσουν τις απώλειες.

Ενισχυτές (II)

Παραμόρφωση Οπτικού Σήματος

□ Θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής: $P_N = 2n_{sp} \cdot hf_c \cdot (G-1) \cdot B_0 = 2P_n \cdot (G-1) \cdot B_0$

⇒ n_{sp} : παράγοντας αυθόρμητης εκπομπής (τιμή 2-5) h : η σταθερά του Planck
 f_c : η συχνότητα του οπτικού σήματος G : το κέρδος του ενισχυτή
 B_0 : το οπτικό εύρος ζώνης του δέκτη

□ Κορεσμός του κέρδους του ενισχυτή (σταθερή μέγιστη ισχύς εξόδου):

$$G = 1 + \frac{P^{sat}}{P_{in}} \ln \frac{G_{max}}{G}$$

⇒ G_{max} : μέγιστο κέρδος ενισχυτή P_{sat} : εσωτερική ισχύς κορεσμού του ενισχυτή

□ Μη-ομοιόμορφο κέρδος: διαφορετικό ισοζύγιο ανά μήκος κύματος.

⇒ Προέμφαση στον πομπό: αποστολή διαφορετικών ισχύων ανάλογα με το μήκος κύματος του κάθε σήματος.

⇒ Εξισορρόπηση της ισχύος στην έξοδο του ενισχυτή: στην έξοδο του ενισχυτή τοποθετείται φίλτρο με συνάρτηση μεταφοράς αντίστροφη της καμπύλης κέρδους του ενισχυτή.

Ενισχυτές (III)

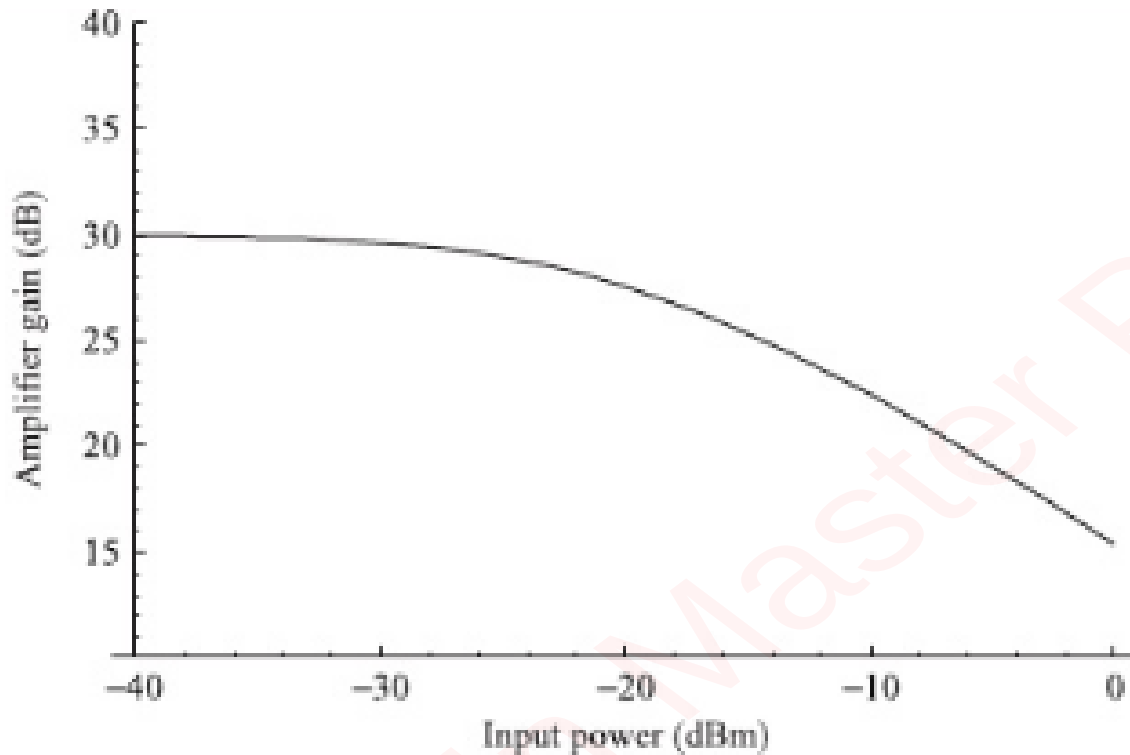
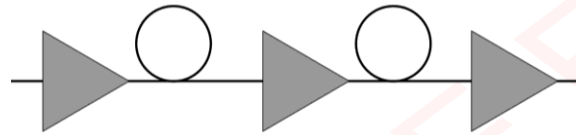


Figure 5.3 Gain saturation in an optical amplifier. Unsaturated gain $G_{\max} = 30$ dB and saturation power $P^{\text{sat}} = 10$ dBm.

Ενισχυτές (IV)

Αλυσίδες Ενισχυτών



- Σε μια διαδοχή (αλυσίδα) ενισχυτών γραμμής το κορεσμένο κέρδος του κάθε ενισχυτή θα πρέπει να επαρκεί ώστε να αντισταθμίζει τις απώλειες του τμήματος στο οποίο ανήκει:

$$G = 1 + \frac{P^{sat}}{P_{out} \cdot e^{-al}} \ln \frac{G_{max}}{G}$$

- Λαμβάνοντας υπ' όψιν και το θόρυβο που παράγει κάθε ενισχυτής προκύπτει ότι:

$$P_{out} = P_{out} \cdot e^{-al} \cdot G + 2P_n \cdot (G - 1) \cdot B_0$$

- ✘ Λόγω της ύπαρξης του θορύβου δεν είναι δυνατόν να αντισταθμιστούν πλήρως οι απώλειες, αλλά πάντοτε το γινόμενο απωλειών ίνας επί κέρδος ενισχυτή θα είναι λίγο μικρότερο της μονάδας.

Ενισχυτές (V)

Κατανεμημένη Ενίσχυση

- Ο θόρυβος που εισάγεται λόγω αλυσίδας ενισχυτών μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$P_N = 2P_n \cdot (e^{al} - 1) \cdot B_0 \cdot \frac{L}{l}$$

- Η αλυσίδα ενισχυτών παράγει τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο όταν το μήκος κάθε τμήματος είναι σχεδόν μηδενικό (κατανεμημένη ενίσχυση):

$$P_N = 2P_n \cdot a \cdot B_0 \cdot L$$

- ✘ Ισοδύναμο power penalty λόγω διακριτών ενισχυτών:

$$PP = -10 \log \left(\frac{e^{al} - 1}{a \cdot l} \right) = -10 \log \left(\frac{G - 1}{\ln G} \right)$$

Διαφωνία (Cross-talk)



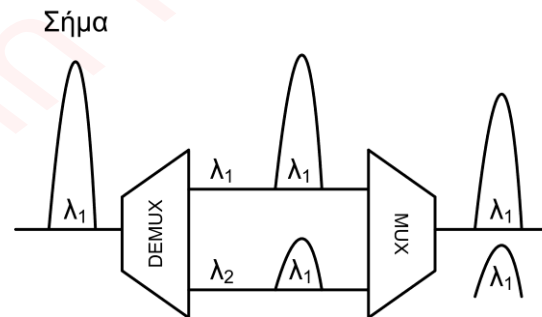
Διαφωνία (I)

□ Διαφωνία: η επίδραση που έχουν όλα τα υπόλοιπα οπτικά σήματα σε ένα συγκεκριμένο οπτικό σήμα.

Ενδοκαναλική Διαφωνία

□ Η φασματική απόσταση του σήματος διαφωνίας από το επηρεαζόμενο σήμα είναι μικρότερη από το ηλεκτρικό εύρος ζώνης του δέκτη.

⇒ Παράδειγμα: διαρροή σήματος σε πολυπλέκτες-αποπολυπλέκτες και οπτικούς διακόπτες



Διαφωνία (II)

Ενδοκαναλική Διαφωνία

⇒ Μαθηματική περιγραφή:

$$E(t) = \sqrt{2P} \cdot d_s(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_s(t)) + \sqrt{2\varepsilon P} \cdot d_x(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_x(t))$$

⇒ ε : ποσοστό διαρροής οπτικής ισχύος

⇒ Οπτική ισχύς στο δέκτη:

$$P(t) = P \cdot d_s(t) + \varepsilon P \cdot d_x(t) + 2\sqrt{\varepsilon} P \cdot d_s(t) \cdot d_x(t) \cdot \cos(\phi_x(t) - \phi_s(t))$$

⇒ Στη χειρότερη περίπτωση διαφωνίας, όταν αμφότερα τα δεδομένα είναι '1' και διαφορά φάσης ισούται με π :

$$P_r(1) = P \cdot (1 - 2\sqrt{\varepsilon}).$$

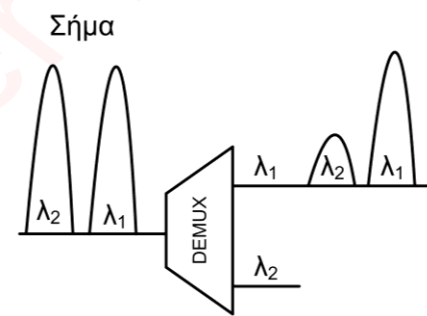
⇒ Power penalty:

$$PP = -10 \log(1 - 2\sqrt{\varepsilon}).$$

Διαφωνία (III)

Διακαναλική Διαφωνία

- Η φασματική απόσταση του σήματος διαφωνίας από το επηρεαζόμενο σήμα είναι μεγαλύτερη από το ηλεκτρικό εύρος ζώνης του δέκτη.
- ⇒ Παράδειγμα: μη ιδανική καταπίεση γειτονικών μηκών κύματος σε πολυπλέκτες-αποπολυπλέκτες και οπτικούς διακόπτες.



- ⇒ Μαθηματική περιγραφή:

$$E(t) = \sqrt{2P} \cdot d_s(t) \cdot \cos(2\pi f_{c1}t + \phi_s(t)) + \sqrt{2\varepsilon P} \cdot d_x(t) \cdot \cos(2\pi f_{c2}t + \phi_x(t))$$

- ⇒ Η αντίστοιχη οπτική ισχύς είναι:

$$P(t) = P \cdot d_s(t) + \varepsilon P \cdot d_x(t) + 2\sqrt{\varepsilon P} \cdot d_s(t) \cdot d_x(t) \cdot \cos(2\pi \Delta f_c t + \phi_x(t) - \phi_s(t))$$

Διαφωνία (IV)

Διακαναλική Διαφωνία

- Η φασματική απόσταση Δf_c υπερβαίνει το εύρος ζώνης του δέκτη, συνεπώς λαμβάνεται ισχύς:

$$P(t) = P \cdot d_s(t) + \varepsilon P \cdot d_x(t)$$

- Η ελάχιστη ισχύς που λαμβάνεται δεδομένου ότι στάλθηκε '1' και η μέγιστη ισχύς που λαμβάνεται δεδομένου ότι στάλθηκε '0' είναι

$$P_r(1) = P$$

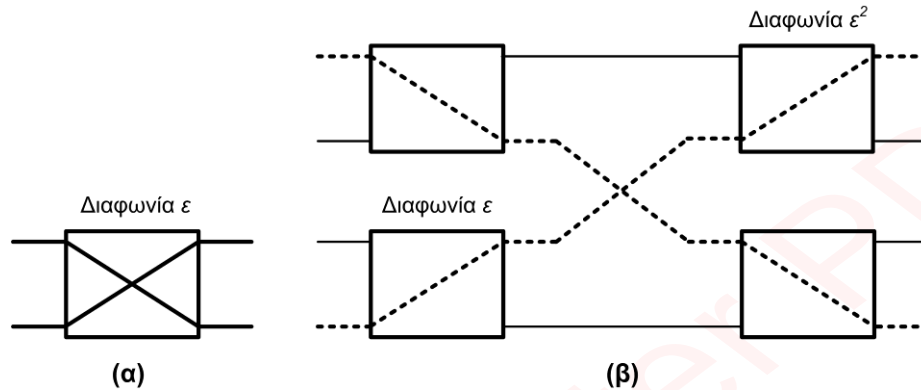
$$P_r(0) = \varepsilon P$$

- ⇒ Power penalty:

$$PP = -10 \log(1 - \varepsilon)$$

- ⇒ Η διακαναλική διαφωνία έχει μικρότερη επίδραση στο power penalty από την ενδοκαναλική.

Διαφωνία (V)



Μείωση Διαφωνίας

- ❑ Μείωση της διαφωνίας κάθε στοιχείου ξεχωριστά: κάθε στοιχείο που αποτελεί πηγή διαφωνίας σχεδιάζεται έτσι ώστε να προκαλεί την ελάχιστη δυνατή διαφωνία.
- ❑ Μείωση της διαφωνίας με χρήση επιπλέον στοιχείων: χρησιμοποιούνται επιπλέον στοιχεία ώστε το επίπεδο διαφωνίας του συστήματος να περιοριστεί.

Διασπορά



Διασπορά (I)

- Διασπορά: η διαφορετική ταχύτητα διάδοσης στις φασματικές συνιστώσες του οπτικού σήματος έχει ως αποτέλεσμα αυτές να φτάνουν στο δέκτη σε διαφορετική χρονική στιγμή.
- ✗ Η διασπορά προκαλεί χρονική διαπλάτυνση των οπτικών παλμών με αποτέλεσμα τη διασυμβολική παρεμβολή (inter-symbol interference).

Είδη Διασποράς

- Πολυρυθμική διασπορά (πολλαπλοί παλμοί στο δέκτη): εμφανίζεται μόνο σε πολυρυθμικές ίνες (multi-mode), στις οποίες το οπτικό σήμα έχει τη δυνατότητα να διαδοθεί από διαφορετικά μονοπάτια.
- Χρωματική διασπορά (χρονική διαπλάτυνση παλμών): οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα, με αποτέλεσμα οι φασματικές συνιστώσες του οπτικού σήματος να διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες.
- Διασπορά τρόπων πόλωσης (χρονική διαπλάτυνση παλμών): οφείλεται στο γεγονός ότι οι οπτικές ίνες δεν έχουν απολύτως κυκλικούς πυρήνες, με αποτέλεσμα η κάθε συνιστώσα πόλωσης του οπτικού σήματος να ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα.

Διασπορά (II)

Χρωματική Διασπορά

- Non-Return-to-Zero: $|D| \cdot L \cdot B \cdot \Delta\lambda < \varepsilon$.
 - ⇒ L : μήκος ζεύξης B : ρυθμός μετάδοσης $\Delta\lambda$: εύρος ζώνης του συστήματος
 - ⇒ $\varepsilon=0.306$ για power penalty 1 dB και $\varepsilon=0.491$ για power penalty 2 dB
 - ⇒ D : χρωματική διασπορά της ίνας (17 ps/nm.km@1550 nm)
- Ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το φασματικό εύρος του οπτικού σήματος:
 - ⇒ Είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται οπτικές πηγές με το ελάχιστο δυνατό φασματικό εύρος (π.χ. DFB laser).
 - ⇒ Καλύτερη επιλογή διαμόρφωσης στον πομπό αποτελεί η χρήση εξωτερικών οπτικών διαμορφωτών και όχι η άμεση διαμόρφωση.

Διασπορά (III)

Χρωματική Διασπορά

Return-to-Zero:

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{\beta_2 L}{T_0}\right)^2} = \sqrt{2} \cdot T_{rms}$$

Μετάδοση χωρίς power penalty: $T_{rms} < 1/B \Rightarrow B \cdot T_L < \sqrt{2}$

⇒ L : μήκος ζεύξης B : ρυθμός μετάδοσης T_0 : αρχικό χρονικό εύρος παλμού

⇒ β_2 : παράμετρος χρωματικής διασποράς

✓ Η χρονική διαπλάτυνση ελαχιστοποιείται όταν $T_0 = \sqrt{\beta_2 L}$

⇒ Προκύπτει όριο διασποράς $B\lambda \sqrt{\frac{|D|L}{2\pi c}} < 1.$

⇒ Π.χ. για $D=17$ ps/nm.km και $\lambda=1.55$ μm η μετάδοση δεδομένων στα 10 Gbps είναι δυνατή για μήκη έως 460 km.

Διασπορά (IV)

Αντιστάθμιση Χρωματικής Διασποράς

❑ Χρήση ειδικών ινών (Dispersion Compensating Fibers – DCFs):

⇒ Παρουσιάζουν αρνητικές τιμές διασποράς D στο μήκος κύματος λειτουργίας του δικτύου.

⇒ Αν μια τυπική ίνα μετάδοσης εισάγει συνολική διασπορά $D_{SMF} \cdot L_{SMF}$

αρκεί η εισαγωγή ενός τμήματος DCF με συνολική διασπορά $D_{DCF} \cdot L_{DCF}$ ώστε η συνολική διασπορά της ζεύξης να μηδενιστεί.

❑ Χρήση οπτικών φίλτρων με κατάλληλη συνάρτηση μεταφοράς:

⇒ Η χρωματική διασπορά σε οπτικές ίνες είναι δυνατόν να περιγραφεί από τη συνάρτηση

μεταφοράς της ίνας $H(\omega) = e^{-\frac{\beta_2 L}{2} \cdot (\omega - \omega_c)^2}$

⇒ Ένα φίλτρο με αντίστροφη συνάρτηση μεταφοράς (π.χ. chirped Fiber-Bragg-Grating) επιτυγχάνει πλήρη απαλοιφή της διασποράς που εισάγει η ίνα.

Διασπορά (V)

Διασπορά Τρόπων Πόλωσης

- Η διασπορά τρόπων πόλωσης χαρακτηρίζεται από τη μέση διαφορική χρονική καθυστέρηση (διαφορική καθυστέρηση ομάδας) μεταξύ δύο καταστάσεων πόλωσης :

$$\langle \Delta \tau \rangle = D_{PMD} \cdot \sqrt{L}$$

⇒ Η παράμετρος D_{PMD} (ps/km^{1/2}) λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0.1 έως 2 ps/km^{1/2}.

- Συνήθως απαιτείται για power penalty ίσο με 0.5 dB

$$B \cdot \langle \Delta \tau \rangle = B \cdot D_{PMD} \cdot \sqrt{L} < 0.1$$

- Αντιστάθμιση διασποράς τρόπων πόλωσης:

⇒ Σε ηλεκτρονικό επίπεδο η αντιστάθμιση γίνεται με εξισορροπητές (equalizers) , στους οποίους μία τράπεζα χρονικών καθυστερήσεων (delay bank) και κατάλληλα βάρη (weights) υλοποιούν ένα προσαρμοσμένο φίλτρο αντιστάθμισης.

⇒ Σε οπτικό επίπεδο, το οπτικό σήμα αναλύεται σε δύο κάθετες καταστάσεις πόλωσης («γρήγορη» και «αργή») και στην «γρήγορη» κατάσταση εισάγεται χρονική καθυστέρηση ίση με τη διαφορική καθυστέρηση ομάδας.

Μη-γραμμικά φαινόμενα



Φαινόμενο Raman (I)

□ Η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman προκαλεί τη μεταφορά ισχύος από ένα οπτικό σήμα υψηλής συχνότητας (σήμα άντλησης) σε ένα οπτικό σήμα χαμηλότερης συχνότητας (σήμα Stokes) μέσω των ταλαντώσεων πλέγματος της ίνας.

⇒ Η μεταφορά ισχύος είναι δυνατή όταν τα σήματα έχουν φασματική απόσταση μεταξύ 13 και 150 THz:

$$g(\Delta\lambda) = \begin{cases} g_R \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_c}, & 0 \leq \Delta\lambda \leq \Delta\lambda_c \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases}$$

⇒ g_R : σταθερά κέρδους κορυφής Raman (6×10^{-14} m/W).

⇒ $\Delta\lambda_c$: φασματικό εύρος Raman (125 nm).

⇒ Πολυκυματικό σύστημα: το ποσοστό ισχύος που μεταφέρεται από κάθε κανάλι i στο κανάλι με το μικρότερο κύματος ($i=0$) είναι

$$P_R(i) = g_R \frac{i\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_c} \frac{PL_e}{2A_e}$$

⇒ $\Delta\lambda_s$: φασματική απόσταση καναλιών.

⇒ A_e και L_e ισοούνται με $50 \mu\text{m}^2$ και 20 km , αντίστοιχα.

Φαινόμενο Raman (II)

⇒ Συνολικό ποσοστό ισχύος:
$$P_R = \sum_{i=1}^{N-1} P_R(i) = g_R \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_c} \frac{PL_e}{2A_e} \frac{N(N-1)}{2}$$

⇒ Power penalty λόγω Raman:
$$PP = -10\log(1 - P_R)$$

✓ Αντιμετώπιση φαινομένου Raman:

- ⇒ Επιλογή της απόστασης των καναλιών $\Delta\lambda_s$ ώστε να είναι αρκούντως μικρή.
- ⇒ Διατήρηση της ισχύος μετάδοσης σε επίπεδα μικρότερα από αυτή που καθορίζεται από το μέγιστο ανεκτό power penalty.

Φαινόμενο Brillouin (I)

□ Το φαινόμενο Brillouin είναι παρόμοιο με το Raman, με τη διαφορά ότι τα σήματα άντλησης και Stokes θα πρέπει να βρίσκονται σε μικρή φασματική απόσταση.

⇒ Το φαινόμενο περιγράφεται από την ισχύ κατωφλίου P_{th} που καθορίζει το επίπεδο οπτικής ισχύος πάνω από το οποίο αρχίζει να γίνεται σημαντική η επίδραση του φαινομένου:

$$P_{th} \approx \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g_B \cdot L_e} \cdot \left(1 + \frac{\Delta f_{source}}{\Delta f_B} \right)$$

⇒ g_B : σταθερά κέρδους κορυφής Brillouin (4×10^{-11} m/W).

⇒ Δf_{source} : εύρος ζώνης του σήματος άντλησης.

⇒ Δf_B : εύρος ζώνης φαινομένου Brillouin (20 MHz).

⇒ A_e και L_e ισούνται με $50 \mu\text{m}^2$ και 20 km, αντίστοιχα.

⇒ b : κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2 ανάλογα με την πόλωση των σημάτων άντλησης και Stokes.

Φαινόμενο Brillouin (II)

⇒ Αντιμετώπιση φαινομένου Brillouin:

- ⇒ Μετάδοση ισχύος ανά κανάλι η οποία είναι μικρότερη από το κατώφλι ισχύος.
- ⇒ Χρήση οπτικών πηγών με μεγάλο φασματικό εύρος.
- ⇒ Αποστολή δεδομένων με διαμόρφωση φάσης και όχι με διαμόρφωση πλάτους, οπότε και διαπλατύνεται το φασματικό εύρος του οπτικού σήματος.

Αυτοδιαμόρφωση και ετεροδιαμόρφωση φάσης

- Τα φαινόμενα της αυτοδιαμόρφωσης και ετεροδιαμόρφωσης φάσης οφείλονται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης της οπτικής ίνας από την διαδιδόμενη οπτική ισχύ.
- ⇒ Η ισχύς του οπτικού σήματος προκαλεί μεταβολές στη φάση του και αυξάνει το εύρος ζώνης του.
- ⇒ Η αύξηση του εύρους ζώνης σε συνδυασμό με τη χρωματική διασπορά προκαλεί σημαντική διαπλάτυνση στους οπτικούς παλμούς:

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{1 + \sqrt{2} \frac{L_e}{L_{NL}} \frac{L}{L_D} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \left(\frac{L_e}{L_{NL}}\right)^2\right) \left(\frac{L}{L_D}\right)^2}$$

⇒ L_{NL} : μη γραμμικό μήκος $\frac{\lambda A_e}{2\pi \bar{n}_2 P}$ L_D : μήκος διασποράς $\frac{T_0^2}{|\beta_2|}$

⇒ Μετάδοση χωρίς power penalty $T_{rms} < 1/B \Rightarrow B \cdot T_L < \sqrt{2}$

Μίξη τεσσάρων φωτονίων (I)

- Στο φαινόμενο της μίξης τεσσάρων φωτονίων τρία σήματα με συχνότητες ω_i , ω_j και ω_k προκαλούν τη δημιουργία ενός νέων σημάτων σε συχνότητες

$$\omega_{ijk} = \omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$$

- ⇒ Η ισχύς του κάθε σήματος που παράγεται λόγω της μίξης τεσσάρων φωτονίων είναι:

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \left(\omega_{ijk} d_{ijk} \frac{\bar{n}}{3cA_e} \right)^2 P_i P_j P_k L_e^2$$

- ⇒ d_{ijk} : παράγοντας εκφυλισμού (τιμή 3 ή 6).
- ⇒ \bar{n} : μη γραμμικός δείκτης διάθλασης ($3 \times 10^{-8} \text{ } \mu\text{m}^2/\text{W}$).
- ⇒ η_{ijk} : είναι η απόδοση του φαινομένου.

Μίξη τεσσάρων φωτονίων (II)

- ⇒ Η απόδοση η_{ijk} εξαρτάται από τις απώλειες a της ίνας και από τη χρωματική διασπορά $\Delta\beta$ (χάνεται η συμφωνία φάσης που είναι απαραίτητη για την παραγωγή του νέου μήκους κύματος):

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-aL} \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{\left(1 - e^{-aL}\right)^2} \right)$$

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk}$$

- ✘ Τα επιπλέον μήκη κύματος που παράγονται στη μίξη τεσσάρων φωτονίων προσομοιάζουν ενδοκαναλική διαφωνία.
- ✓ Αντιμετώπιση της επίδρασης της μίξης τεσσάρων φωτονίων:
 - ⇒ Χρήση καναλιών με διαφορετική φασματική απόσταση ώστε η νέα συχνότητα ω_{ijk} να μη συμπίπτει με κάποια ήδη υπάρχουσα.
 - ⇒ Αύξησης της φασματικής απόστασης των καναλιών ώστε η απόδοση της μίξης να μειωθεί.
 - ⇒ Μείωση της ισχύος που μεταδίδεται ανά κανάλι.