



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

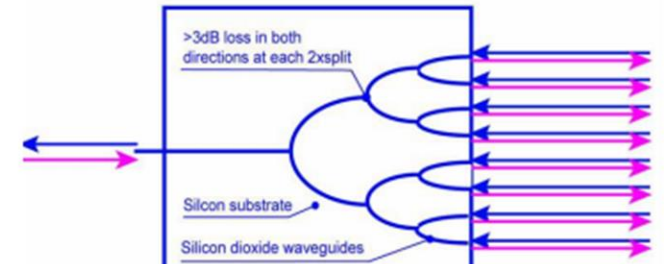
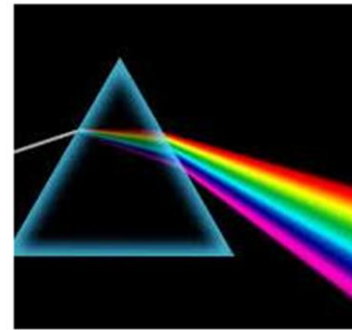
(β' μέρος)

Διδάσκων: Τσορμπατζόγλου Ανδρέας

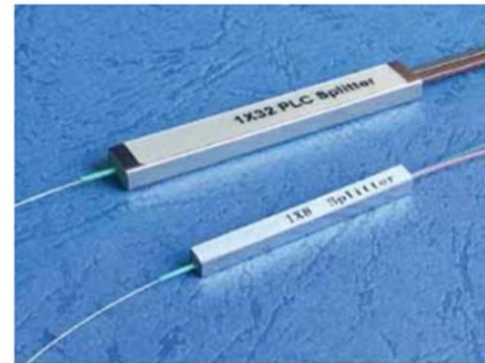
Δομικά οπτικά στοιχεία – Splitters (διαχωριστές)

Οι διαχωριστές μπορούν να διαχωρίσουν ένα σήμα με βάση κάποια φυσική του ιδιότητα, όπως το μήκος κύματος και να το οδηγήσουν σε 2 διαφορετικές κατευθύνσεις.

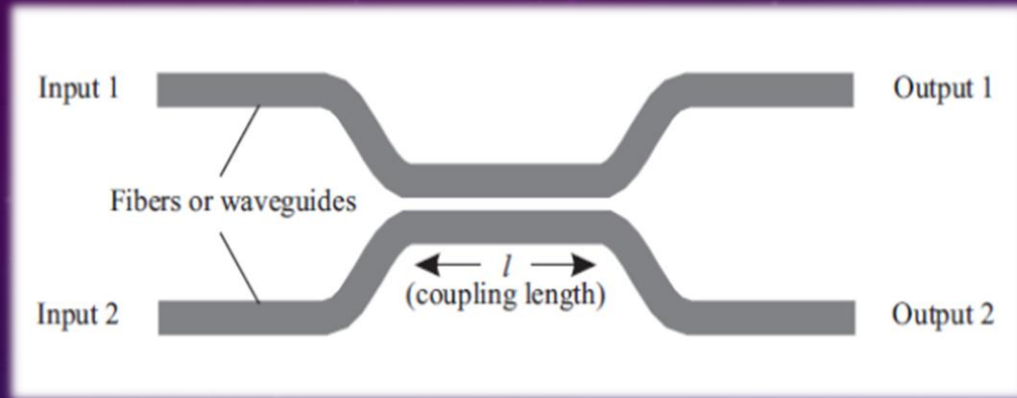
- Στο εμπόριο υπάρχουν μεγάλοι ολοκληρωμένοι splitters που διαχωρίζουν την ισχύ σε $N=2^n$ εξόδους ($2 \leq N \leq 128$)
- Πρόκειται για παθητικό στοιχείο
- Αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό διαχωριστών τύπου Υ
- Σχετικά φθηνό οπτικό στοιχείο.
- Χαρακτηρίζονται από:
 - Πλεονάζουσες απώλειες εισαγωγής ($\leq 2\text{dB}$)
 - Απώλειες λόγω πόλωσης ($\leq 0.5\text{dB}$)
 - Ομοιομορφία ($\leq 2\text{dB}$)
 - Εύρος μηκών κύματος



Schematic drawing for PLC splitter



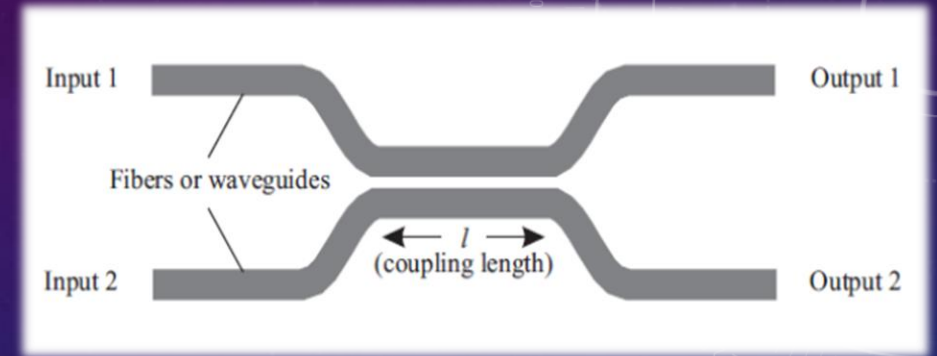
Δομικά οπτικά στοιχεία – Couplers (Συζεύκτες)



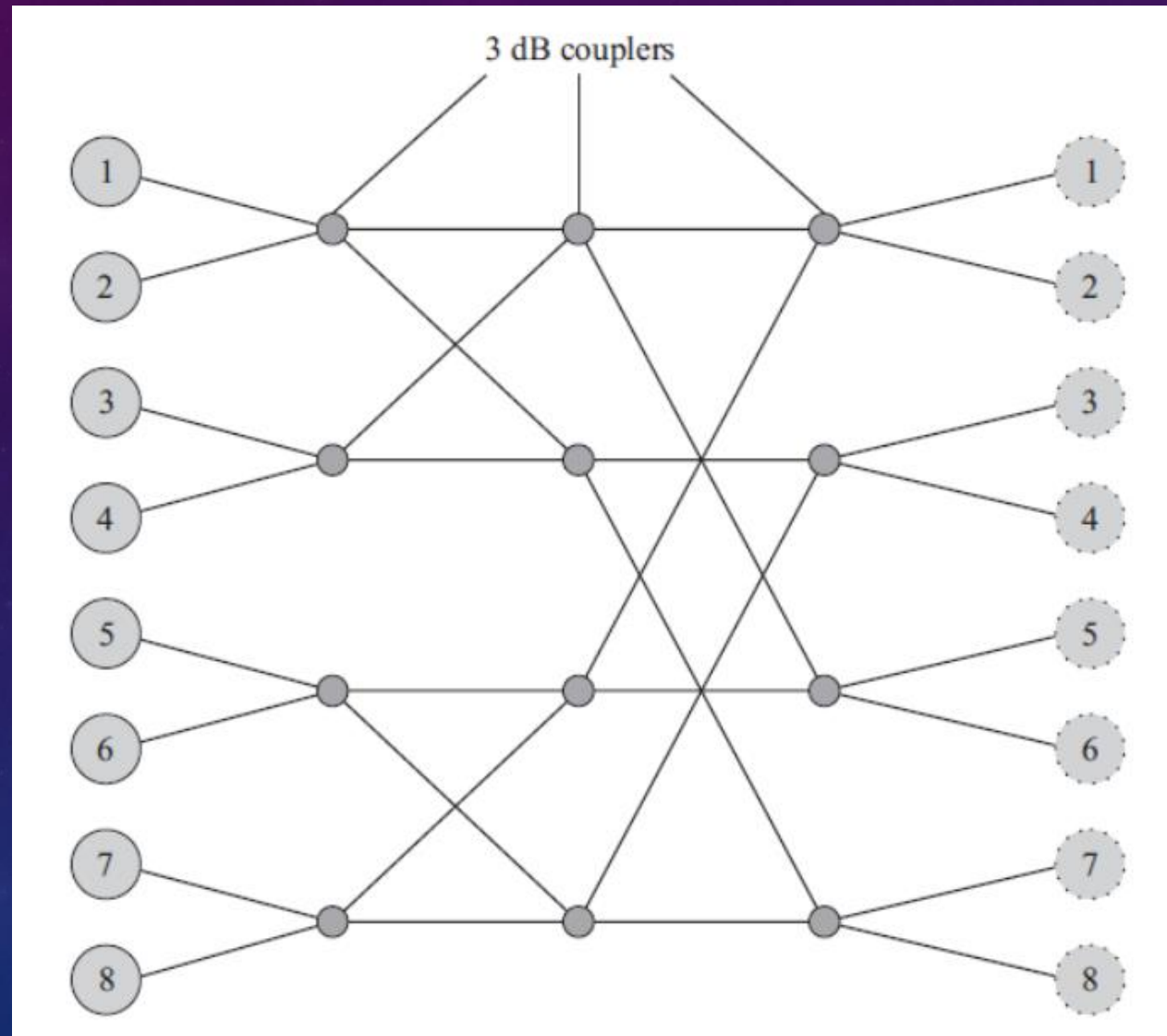
- Ο συζεύκτης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει ένα μέρος της ισχύος από τις θύρες εισόδου στις θύρες εξόδου.
- Οι συζεύκτες μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν εξάρτηση από το μήκος κύματος (Για παράδειγμα μπορούν να συνδυάσουν δύο σήματα, ένα στα 1550nm και ένα στα 1310nm στις δύο θύρες εισόδου).
- Τα σήματα μπορούν να παρουσιαστούν σε μία έξοδο του συζεύκτη μαζί και να εισέρθουν σε μία οπτική ίνα (πολυπλεξία).
- Επίσης χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση “tap” όπου ένα μικρό μέρος της ισχύος που βρίσκεται σε μία θύρα εισόδου οδηγείται στην δεύτερη θύρα εξόδου ενώ το υπόλοιπο παρουσιάζεται στην πρώτη.
- Επειδή ο συζεύκτης δεν είναι ιδανικός μπορεί να έχουμε απώλειες εισαγωγής (insertion loss) και απώλειες πόλωσης (polarization dependent loss).

Δομικά οπτικά στοιχεία – Couplers (Συζεύκτες) - 2

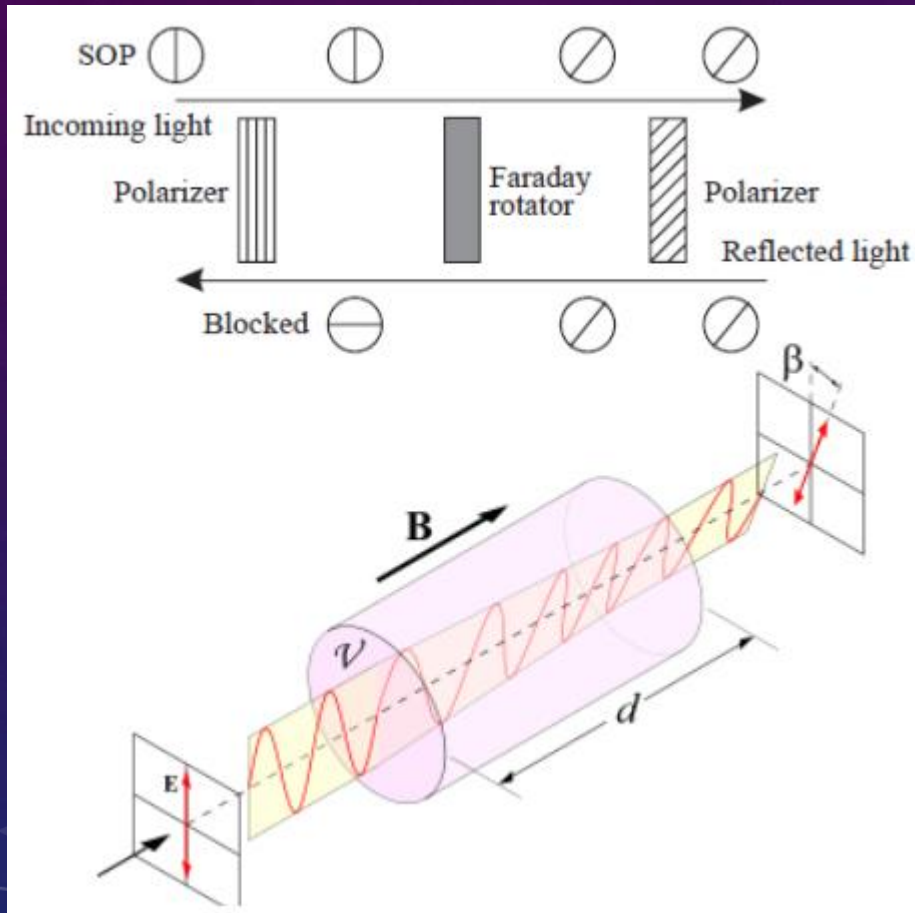
- Κάθε κυματοδηγός (απουσία του άλλου) υποστηρίζει έναν τρόπο διάδοσης με σταθερά διάδοσης β
- Παρουσία του άλλου κυματοδηγού έχουμε σύζευξη (coupling) τρόπων.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος του πεδίου να μεταφέρεται από τον ένα κυματοδηγό στον άλλο.
- Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή σύζευξης κ . Όσο πιο κοντά είναι κυματοδηγοί τόσο μεγαλύτερο είναι το κ και τόσο πιο ισχυρή είναι η σύζευξη. Ανάλογα με το μήκος l μπορεί να μεταφέρεται:
 - όλη η ισχύς από την θύρα εισόδου «1» στη θύρα εξόδου «2»
 - μηδενική ισχύς από την θύρα εισόδου «1» στη θύρα εξόδου «2»
 - μισή ισχύς από την θύρα «1» στη θύρα «2» (η άλλη μισή εμφανίζεται στην «1»)



Δομικά οπτικά στοιχεία – Couplers (Συζεύκτες) -3



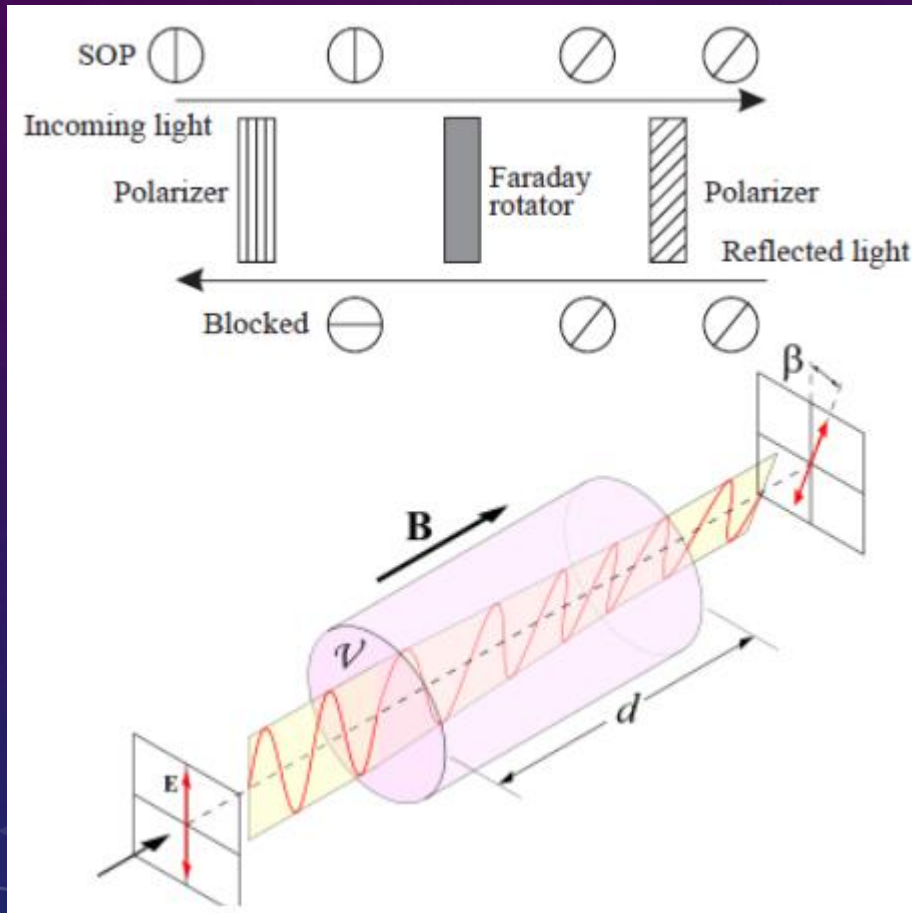
Δομικά οπτικά στοιχεία – Απομονωτές (isolators) - 1



Οι απομονωτές επιτρέπουν τη διέλευση φωτός μόνο στη μία κατεύθυνση και βασίζονται στους στροφείς Faraday.

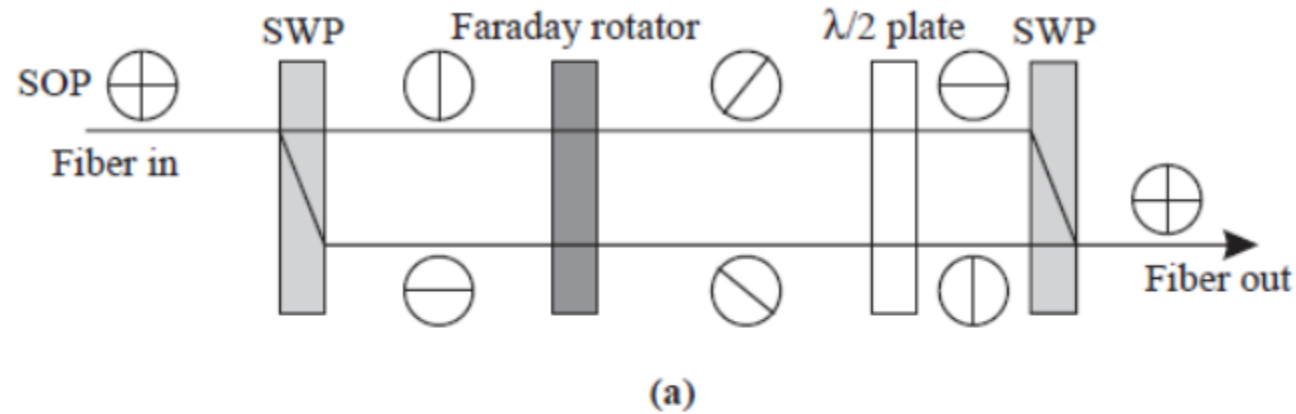
- Οι στροφείς Faraday περιστρέφουν τον επίπεδο πόλωσης του φωτός κατά μία γωνία θ . Η γωνία θ όμως είναι ανεξάρτητη από το αν το φως εισέρχεται στη διάταξη από αριστερά προς δεξιά ή από δεξιά προς τα αριστερά.
- Με αυτό τον τρόπο το φως που εισέρχεται στην δεξιά θύρα του απομονωτή περνάει από τον πρώτο ελεγκτή πόλωσης.
- Στη συνέχεια στρέφεται κατά $\pi/4$ και περνάει από τον δεύτερο ελεγκτή πόλωσης.

Δομικά οπτικά στοιχεία – Απομονωτές (isolators) - 2

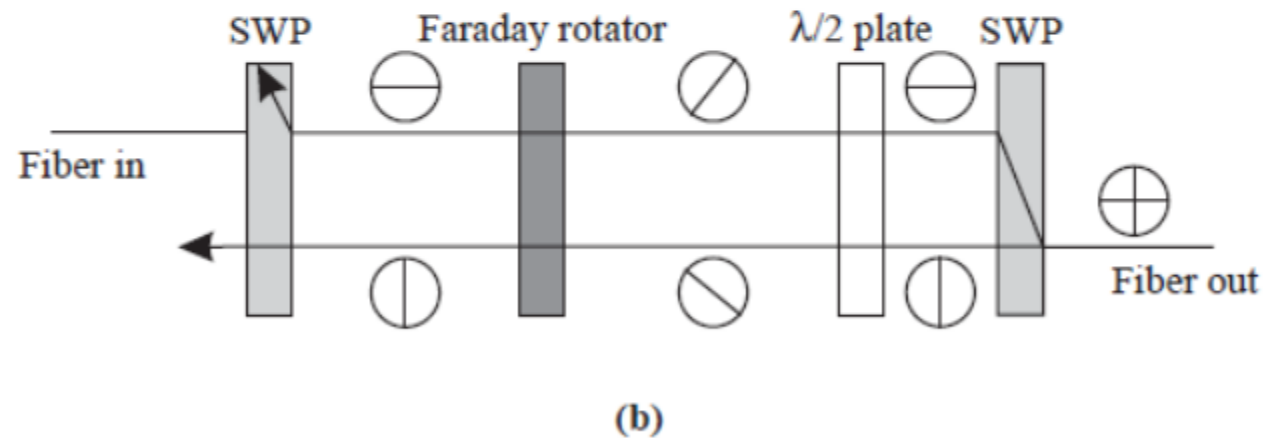


- Το φως που ανακλάται από την έξοδο περνάει πάλι από τον δεύτερο ελεγκτή και στη συνέχεια ξαναπερνάει από τον στροφέα Faraday.
- Η πόλωση του έχει τώρα γυρίσει σε γωνία $\pi/2$ και επομένως δεν μπορεί να περάσει από τον πρώτο ελεγκτή πόλωσης.
- Υπάρχει τρόπος να σχεδιαστεί ο απομονωτής ώστε να λειτουργεί με αυθαίρετη πόλωση εισόδου.

Δομικά οπτικά στοιχεία – Απομονωτές (isolators) - 3



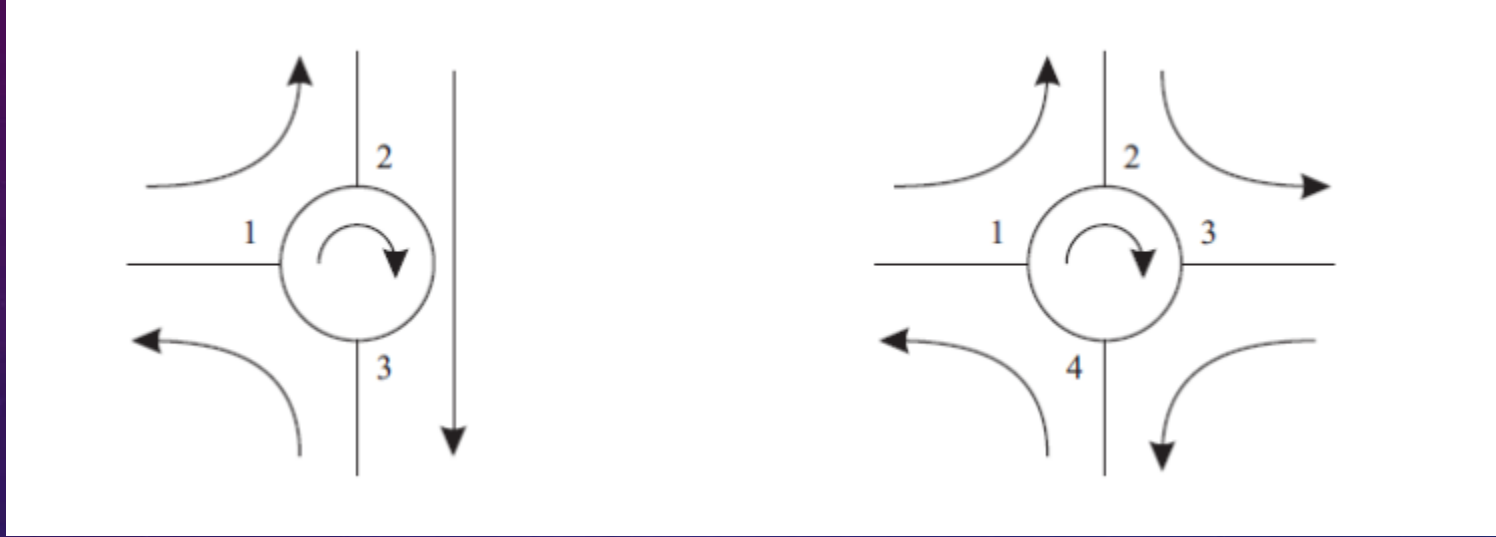
Διάδοση από
τα αριστερά
στα δεξιά



Διάδοση από
τα δεξιά στα
αριστερά.

SWP=Spatial walk off polarizer. Χωρίζει το φως σε δύο ορθογώνιες γραμμικές πολώσεις.

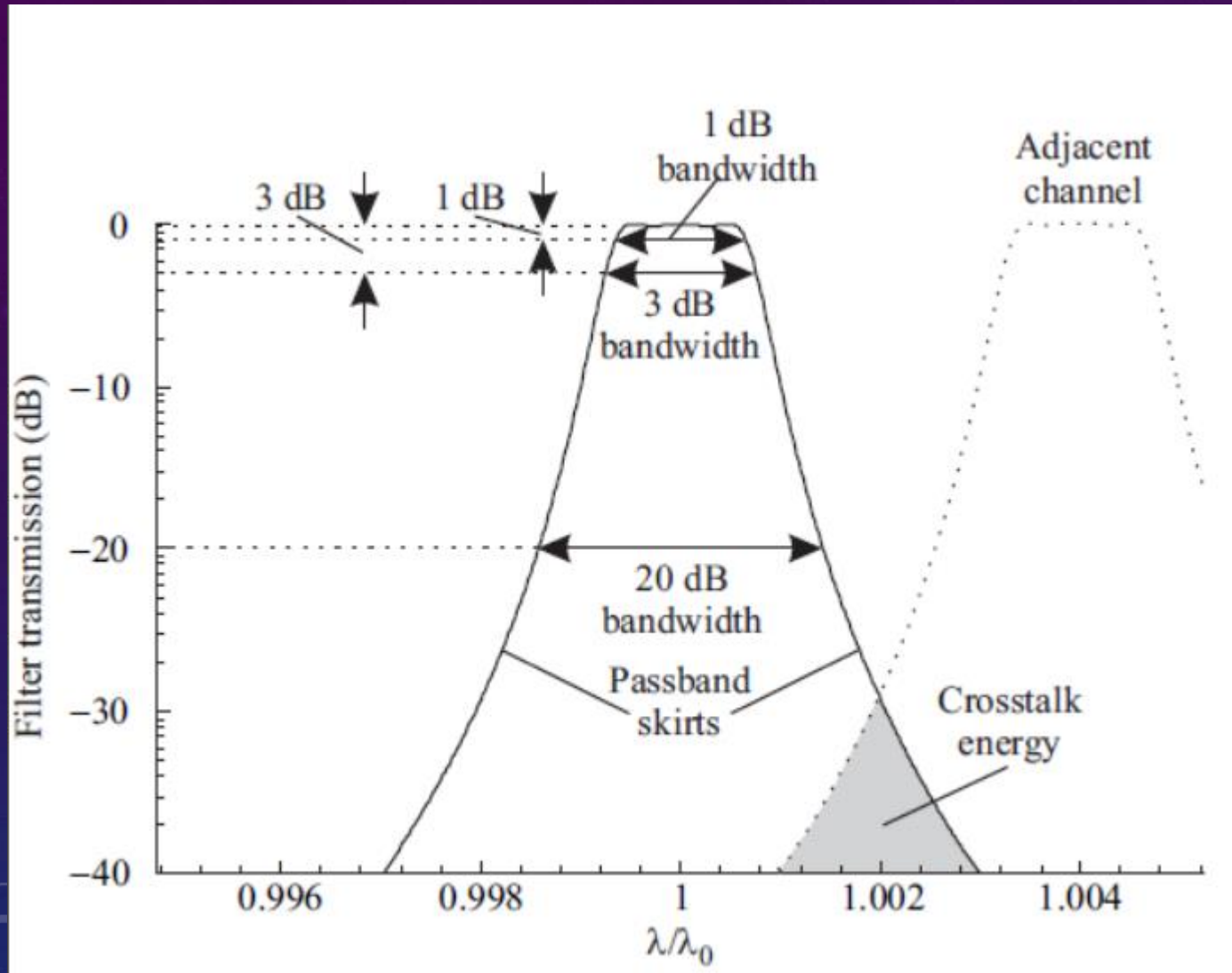
Δομικά οπτικά στοιχεία – Κυκλοφορητές (Circulators)



Οι κυκλοφορητές επιτρέπουν την διάδοση του σήματος προς μία μονάχα διεύθυνση.

- Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε τις ανακλάσεις.
- Βασίζονται σε απομονωτές (isolators).

Δομικά οπτικά στοιχεία – Οπτικά φίλτρα



Τα οπτικά φίλτρα επιτρέπουν τη διέλευση ή εξασθένιση συγκεκριμένων μηκών κύματος για τον έλεγχο των σημάτων που διέρχονται μέσα από μια οπτική ίνα.

Απαιτήσεις:

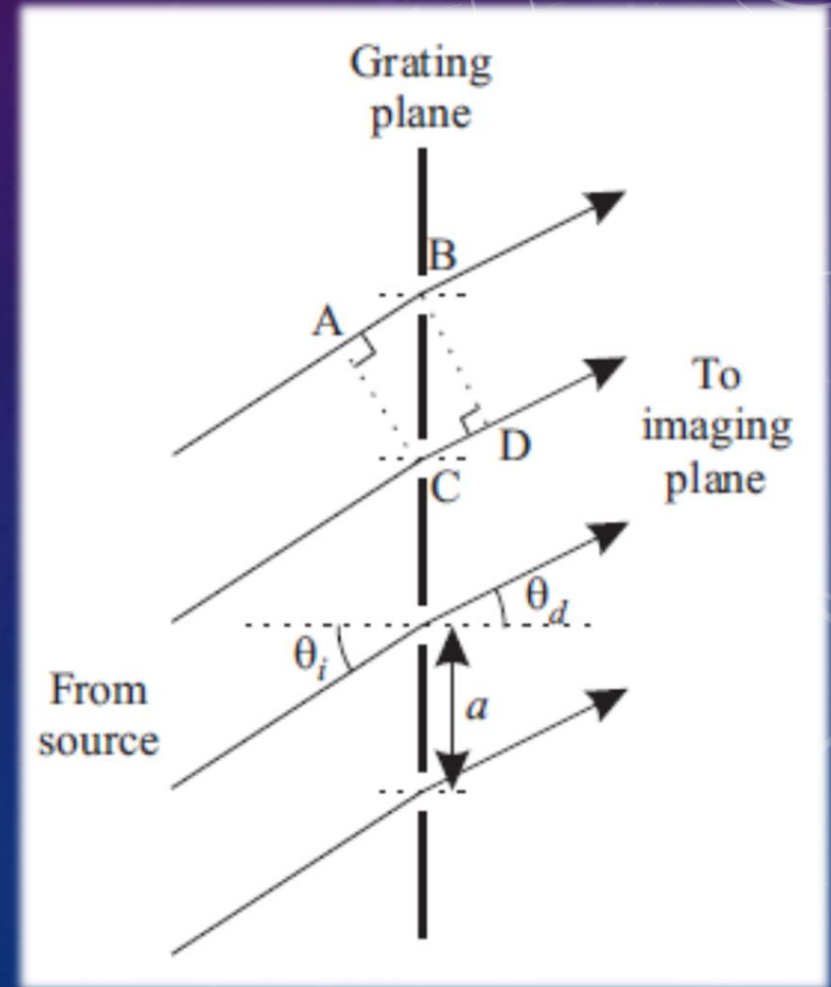
- Μικρές απώλειες εισαγωγής
- Ανεξαρτησία από πόλωση
- Ανεξαρτησία από θερμοκρασία
- Ομαλή (flat) απόκριση γύρω από την κεντρική συχνότητα
- Μικρό επίπεδο διαφωνίας (crosstalk)
- Κόστος

Τεχνολογίες Φίλτρων: Φράγματα - 1

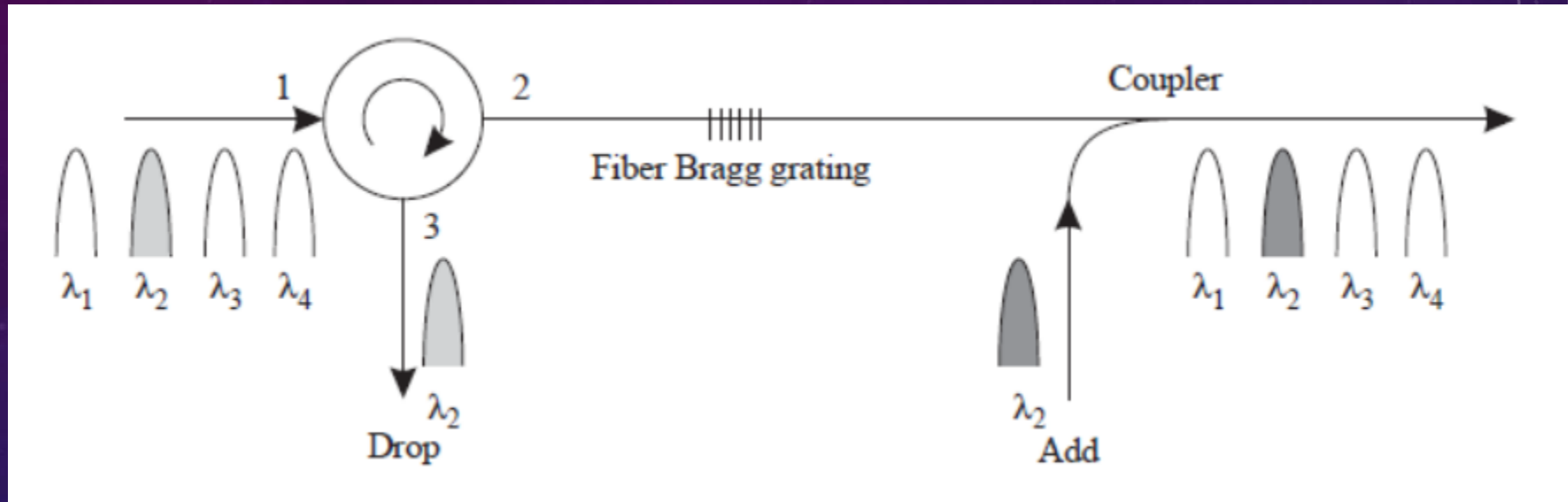
Με τον όρο φράγμα εννοούμε οποιαδήποτε δομή επιτρέπει την υπέρθεση κυμάτων που έχουν προκύψει από το ίδιο αρχικό κύμα, λόγω του φαινομένου της περίθλασης, με κάποια διαφορά φάσης. Τα φράγματα χρησιμοποιούνται για τη διάκριση των μηκών κύματος (σαν πρίσματα).

- Σε ένα φράγμα σχισμών, κάθε σχισμή δρα ως μία δευτερεύουσα πηγή και τα κύματα που γεννιούνται μπορεί να συμβάλουν καταστροφικά ή προσθετικά.
- Μπορεί κανείς να δείξει ότι αν $a(\sin\theta_i - \sin\theta_d) = m\lambda$ τότε τα δευτερεύοντα κύματα συμβάλλουν προσθετικά (με διαφορά φάσης πολλαπλάσια του 2π).
- Το m είναι ένας ακέραιος που ονομάζεται η τάξη του φράγματος. Για $m > 0$ βλέπουμε πως η γωνία θ_d εξαρτάται από το μήκος κύματος.

Φράγμα σχισμών



Τεχνολογίες Φίλτρων: Φράγματα - 2



- Μπορούμε να γράψουμε φράγματα Bragg σε οπτικές ίνες.
- Τα φίλτρα αυτά έχουν χαμηλές απώλειες (0.1dB) χαμηλή διαφωνία (-40dB), καλή θερμική σταθερότητα (με ειδικές τεχνικές πετυχαίνουμε $0.07 \times 10^{-2} \text{ nm/}^\circ\text{C}$).
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για add/drop multiplexers όπως δείχνει και η παραπάνω εικόνα.

Υπολογισμός του BER (Bit Error Rate) - 1

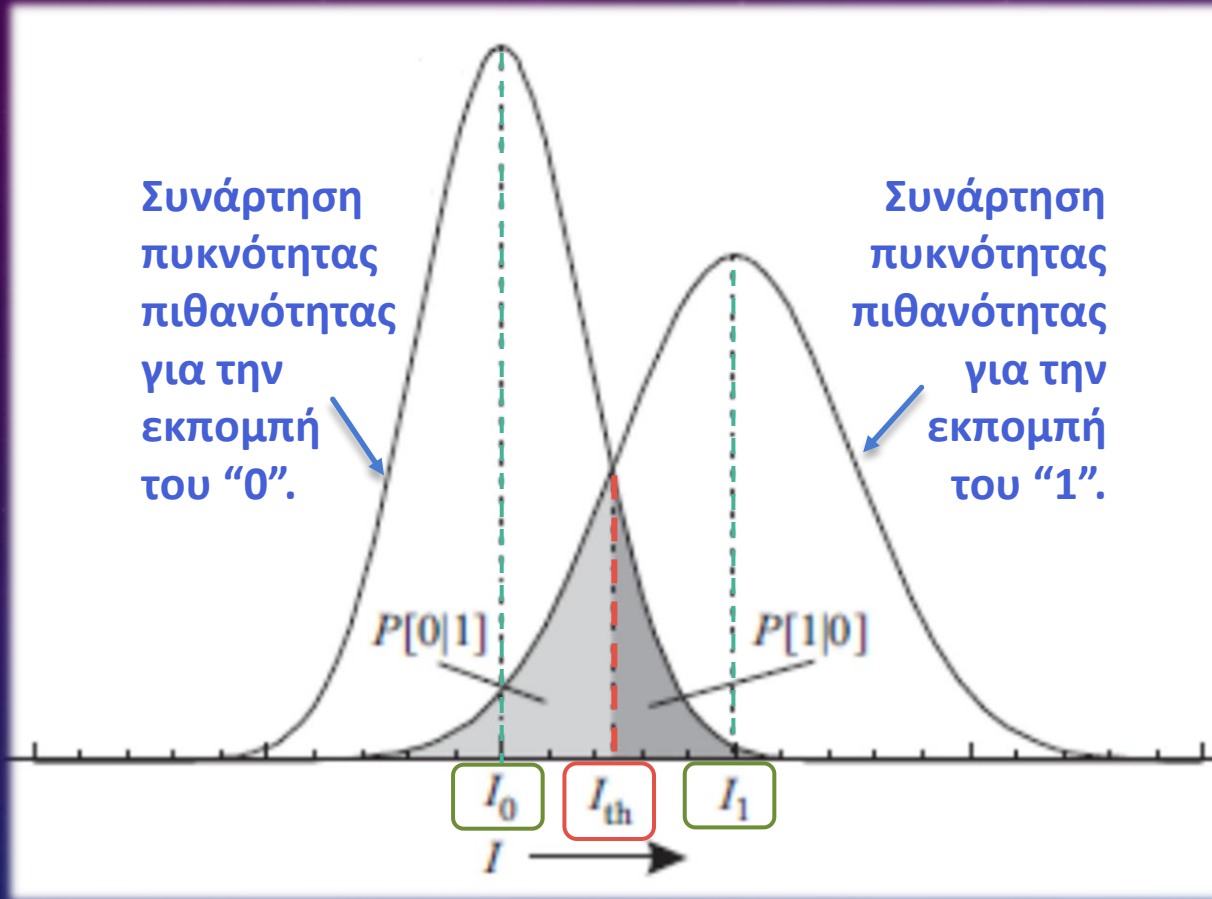
Το ποσοστό σφάλματος bit **BER** μιας μετάδοσης είναι το ποσοστό των bit που έχουν σφάλματα ως αποτέλεσμα θορύβου, παρεμβολών ή άλλων προβλημάτων. Ο ρυθμός σφάλματος bit μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ποιότητας ενός σήματος και της σχετικής επιτυχίας της παράδοσης πακέτων.

- Παρουσία θορύβου ή προβλημάτων διασποράς, ο δέκτης μπορεί να κάνει σφάλμα.
- Θεωρούμε πως ο θόρυβος είναι Gaussian, δηλαδή ακολουθεί κατανομή που δίνεται

από την πυκνότητα πιθανότητας:
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

- $P[i | j]$ = πιθανότητα ο **δέκτης** να αποκωδικοποιήσει i ενώ ο **πομπός** έχει στείλει j .
- Η πιθανότητα σφάλματος (δηλαδή το BER) είναι $BER = P[1]P[0 | 1] + P[0]P[1 | 0]$.
- Στην περίπτωση ισοπίθανων bit έχουμε $P[0] = P[1] = \frac{1}{2}$, επομένως $BER = \frac{1}{2} (P[0 | 1] + P[1 | 0])$.

Υπολογισμός του BER (Bit Error Rate) - 2



- ❑ Πως αποφασίζει ένας δέκτης αν το bit αντιστοιχεί στο "0" ή στο "1";
- ✓ Συγκρίνει το ρεύμα που λαμβάνεται I με μία τιμή κατωφλίου I_{th} .
- ✓ Αν $I \geq I_{th}$, τότε θεωρεί ότι μεταδόθηκε "1".
- ✓ Αν $I < I_{th}$ τότε θεωρεί ότι μεταδόθηκε "0".

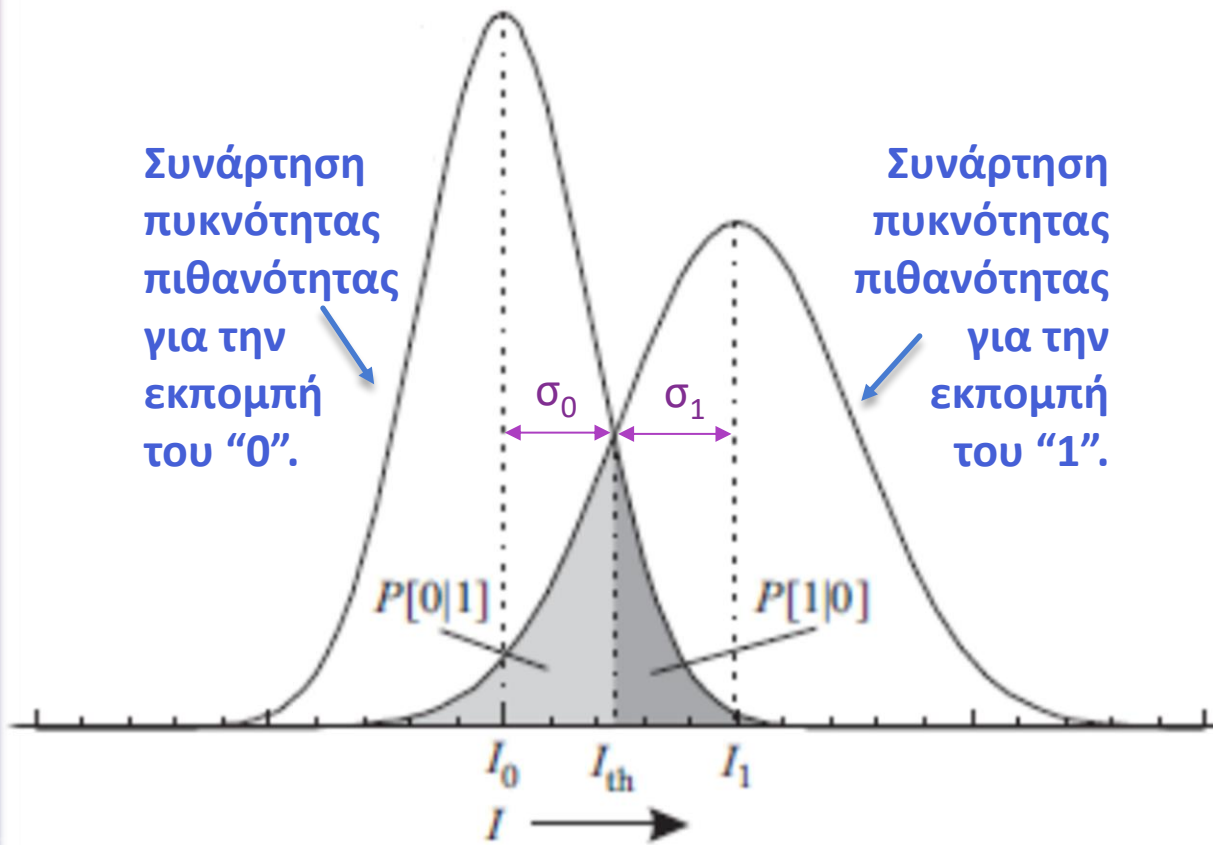
Υπενθύμιση

Το φως μετατρέπεται σε ρεύμα από μια φωτοδίοδο. Για αυτόν τον λόγο μιλάμε για ρεύμα και όχι για φως. Όλη η ανάλυση όμως θα μπορούσε να γίνει για την ένταση του φωτός της οπτικής ίνας

I_0 : Η ένταση του ρεύματος που αντιστοιχεί στην κατάσταση "0".

I_1 : Η ένταση του ρεύματος που αντιστοιχεί στην κατάσταση "1".

Υπολογισμός του BER (Bit Error Rate) - 3



$P[0|1]$ = πιθανότητα ο δέκτης να αποκωδικοποιήσει 0 ενώ ο πομπός έχει στείλει 1.

$P[1|0]$ = πιθανότητα ο δέκτης να αποκωδικοποιήσει 1 ενώ ο πομπός έχει στείλει 0.

$$P[0|1] = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{th}} dx e^{-(x-I_1)^2/(2\sigma_1^2)} = Q\left(\frac{I_1 - I_{th}}{\sigma_1}\right)$$

$$P[1|0] = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{I_{th}}^{+\infty} dx e^{-(x-I_0)^2/(2\sigma_0^2)} = Q\left(\frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0}\right)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} dy e^{-y^2/2}$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2} (P[0|1] + P[1|0])$$

Βέλτιστο κατώφλι (I_{opt})

- Η βέλτιστη επιλογή I_{opt} για την ένταση κατωφλίου I_{th} θεωρείται αυτή για την οποία το BER γίνεται ελάχιστο.
- Για να βρούμε το I_{opt} , υπολογίζουμε την παράγωγο του BER ως προς το I_{th} και την εξισώνουμε με μηδέν. Μετά λύνουμε ως προς I_{th} .

$$P[0|1] = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{th}} dx e^{-(x-I_1)^2/(2\sigma_1^2)} = Q\left(\frac{I_1 - I_{th}}{\sigma_1}\right)$$

$$P[1|0] = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{I_{th}}^{+\infty} dx e^{-(x-I_0)^2/(2\sigma_0^2)} = Q\left(\frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0}\right)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} dy e^{-y^2/2}$$

$$BER = \frac{1}{2} (P[0|1] + P[1|0])$$

$$\frac{dBER}{dI_{th}} = 0$$

$$I_{opt} = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

$$BER_{opt} = Q\left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}\right)$$

Ευαισθησία του δέκτη

Ορίζουμε ως **ευαισθησία** του δέκτη τη μέση ισχύς ανά bit που πρέπει να λάβει ώστε να πετύχει πιθανότητα σφάλματος BER_t .

Πρέπει να συσχετίσω την ισχύ που εκπέμπεται για κάθε bit με το BER_t .

- Πόση ισχύς χρειάζεται ώστε να πετύχουμε μία ορισμένη πιθανότητα σφάλματος BER_t ;
- Έστω ότι $BER_t = Q(\gamma)$. Π.χ. για $BER_t = 10^{-12}$ έχουμε $\gamma \cong 7$ και για $BER_t = 10^{-9}$ έχουμε $\gamma \cong 6$.
- Αν R είναι ένα μέγεθος που ονομάζεται αποκρισιμότητα και θεωρήσουμε πως $P_0 = 0$ (δηλαδή η ισχύς που λαμβάνεται όταν μεταδίδουμε "0" είναι ίση με 0), τότε:
 - $I_0 = RP_0 = 0$
 - $I_1 = RP_1$
 - $\gamma = (I_1 - I_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) = I_1 / (\sigma_1 + \sigma_0)$.
 - Η μέση ισχύς είναι $P_{avg} = P_1 / 2$.
 - $P_{avg} = (\sigma_0 + \sigma_1)\gamma / (2R)$.

**ευαισθησία
του δέκτη**

$$BER_{opt} = Q\left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}\right)$$

$$\text{Έστω } \gamma = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Κώδικες Διόρθωσης και Ανίχνευσης Σφαλμάτων - 1

Πώς ανιχνεύουμε τα σφάλματα;

Με την χρήση **πλεονασμού** (επιπλέον bit). Στις τεχνικές πλεονασμού, προσθέτουμε επιπλέον πληροφορία που είναι γνωστή εκ των προτέρων στα δεδομένα που μεταδίδονται. Αυτή η πρόσθετη πληροφορία χρησιμοποιείται στον παραλήπτη για να ανιχνεύσει ή ακόμα και να διορθώσει τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη μετάδοση.

- Ένα πρότυπο ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων που χρησιμοποιεί πλεονασμό είναι το Forward Error Correction (FEC): διόρθωση σφαλμάτων στο δέκτη.
- Στην περίπτωση του SONET (Synchronous Optical Network) και του SDH (Synchronous Digital Hierarchy) αλλά και άλλων δικτύων επικοινωνιών χρησιμοποιώ το RS-FEC που χρησιμοποιεί κώδικες Reed-Solomon για τη δημιουργία επιπλέον πληροφορίας (redundant bits).

Κώδικες Διόρθωσης και Ανίχνευσης Σφαλμάτων - 2

Αντί για διόρθωση των σφαλμάτων μπορώ να χρησιμοποιήσω την τεχνική Automatic Repeat reQuest (ARQ) όπου ο παραλήπτης ζητάει την εκ νέου αποστολή των δεδομένων:

- **Μετάδοση δεδομένων:** Ο αποστολέας στέλνει τα δεδομένα στον παραλήπτη.
- **Ανίχνευση σφαλμάτων:** Ο παραλήπτης ελέγχει τα δεδομένα για την ανίχνευση ενδεχόμενων σφαλμάτων, χρησιμοποιώντας ελέγχους σφαλμάτων όπως τον κωδικό ανίχνευσης σφαλμάτων (CRC).
- **Αναφορά σφάλματος:** Αν εντοπιστεί κάποιο σφάλμα, ο παραλήπτης στέλνει ένα μήνυμα επιστροφής στον αποστολέα για να τον ενημερώσει ότι υπάρχει σφάλμα στη μετάδοση.
- **Επανάληψη (Retransmission):** Ο αποστολέας επαναλαμβάνει την αποστολή των δεδομένων που προκάλεσαν το σφάλμα.

Η ARQ χρησιμοποιείται σε πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοκόλλων TCP (Transmission Control Protocol) στο διαδίκτυο.

Forward Error Correction - FEC

- Το FEC χρησιμοποιείται για μείωση του BER, κάτι που είναι σημαντικό για τα οπτικά συστήματα που πρέπει να λειτουργούν με πιθανότητες σφάλματος 10^{-12} .
- Το FEC συνήθως δεν χρειάζεται σε απλά συστήματα ή σε συστήματα WDM με μεγάλη φασματική απόσταση.
- Ωστόσο σε συστήματα WDM με μικρή φασματική απόσταση η χρήση FEC είναι επιτακτική πολλές φορές επειδή δεν μπορούμε να αυξήσουμε την ισχύ εκπομπής για να μειώσουμε το BER (φαινόμενο μη γραμμικότητας).
- Υπόβαθρο του BER (BER floor): Πολλές φορές, η ελάχιστη τιμή του BER περιορίζεται από θορύβους όπως η διαφωνία (disparity) μεταξύ πραγματικού και κωδικοποιημένου bit.
- Το SNR της διαφωνίας δεν εξαρτάται από την ισχύ των καναλιών και επομένως δεν μπορεί να μειωθεί εύκολα.

Power penalty (Ποινή ισχύος)

- Το power penalty (PP) είναι **η επιπλέον ισχύς εκπομπής** που πρέπει να εκπέμπουμε λαμβάνοντας υπόψη κάθε παράγοντα ενός συστήματος οπτικών επικοινωνιών ώστε να πετύχουμε μία τιμή στόχο για το BER.
- Το power penalty το χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίσουμε την σημασία κάθε παράγοντα που σχετίζεται με το σύστημα οπτικών επικοινωνιών, όπως για παράδειγμα η απόσταση μεταξύ δυο σημείων επικοινωνίας, η ποιότητα της οπτικής ίνας και άλλα.
- Εναλλακτικά μπορούμε να ορίσουμε το power penalty ως την επιβάρυνση που φέρνει ο εκάστοτε παράγοντας στο όρισμα γ που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό του BER.
- Έστω δηλαδή ότι απουσία ενός τυχαίου παράγοντα έχουμε ισχύ λήψης P_1, P_0 για τα bit "1" και "0" αντίστοιχα και ισχύ θορύβου σ_1 και σ_0 .
- Επίσης, παρουσία του παράγοντα έχουμε ισχύ λήψης P'_1, P'_0 για τα bit "1" και "0" αντίστοιχα και ισχύ θορύβου σ'_1 και σ'_0 .
- Αν $\gamma = R(P_1 - P_0)/(\sigma_1 + \sigma_0)$ και $\gamma' = R(P'_1 - P'_0)/(\sigma'_1 + \sigma'_0)$, τότε $PP = -10\log_{10}(\gamma'/\gamma)$.