

# Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

## Corso di Laboratorio di Telecomunicazioni

Anno Accademico 2006/2007

Esperienze di Laboratorio

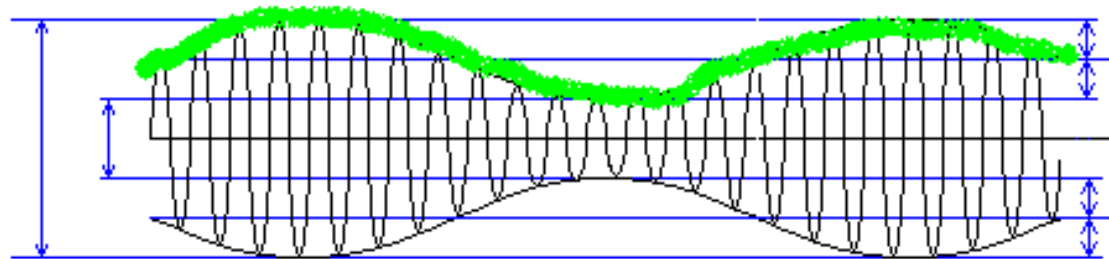
# Struttura del Corso (III)

- **Analisi teorica esperienze laboratorio**
  - 1) **Modulazione AM**
  - 2) Modulazioni digitali in banda base
  - 3) Caratterizzazione di Dispositivi per l'Optoelettronica
  - 4) Caratterizzazione di Fibre Ottiche
  - 5) Caratterizzazione di EDFA
  - 6) Misura di BER in sistemi ottici ottici amplificati multicanale

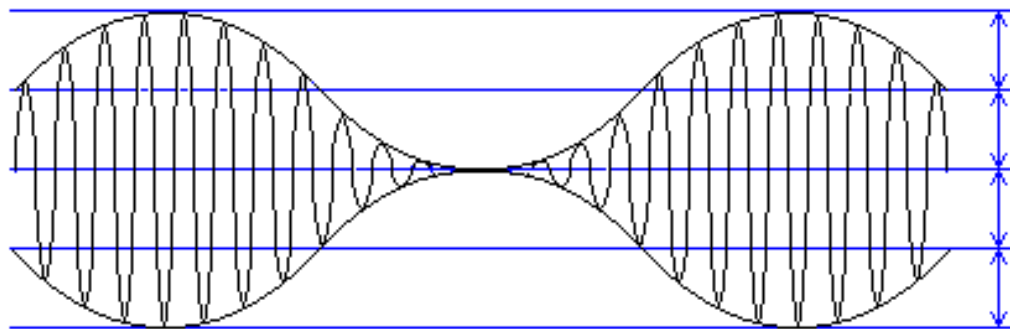
# Misura dell'Indice di Modulazione AM

- Scopo dell'esperienza: misurare l'indice di modulazione  $\mu$  dopo aver generato un segnale modulato in ampiezza
- Il segnale modulante può essere scritto come:  
$$s_m(t) = A_o + A_m \cos(\omega_m t)$$
mentre la portante è nella forma:  
$$s_c(t) = A_c \cos(\omega_c t).$$
- Il segnale modulato AM è quindi del tipo:  
$$s(t) = s_m(t) \cdot s_c(t) = A_o A_c \cos(\omega_c t) + A_m A_c \cos(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_c t)$$
$$= A_o A_c \cdot [1 + A_m / A_o \cdot \cos(\omega_m t)] \cdot \cos(\omega_c t)$$
- L'indice di modulazione vale:  $\mu = A_m / A_o$

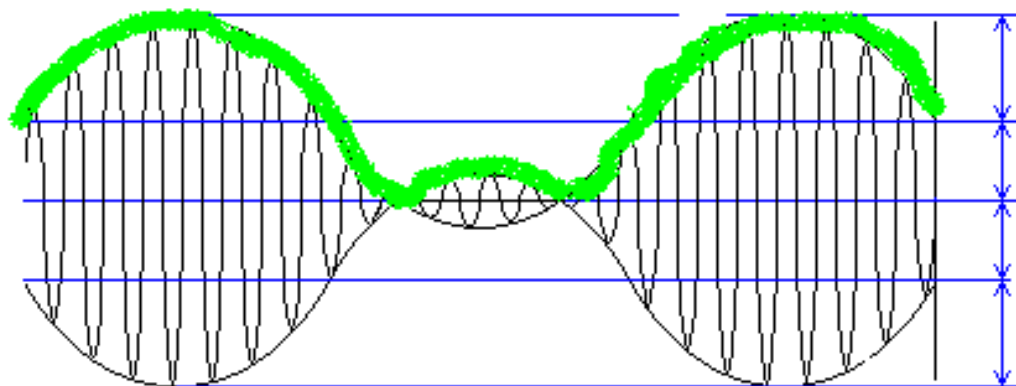
# Segnale AM al variare dell'indice di modulazione



$\mu = 0,5$



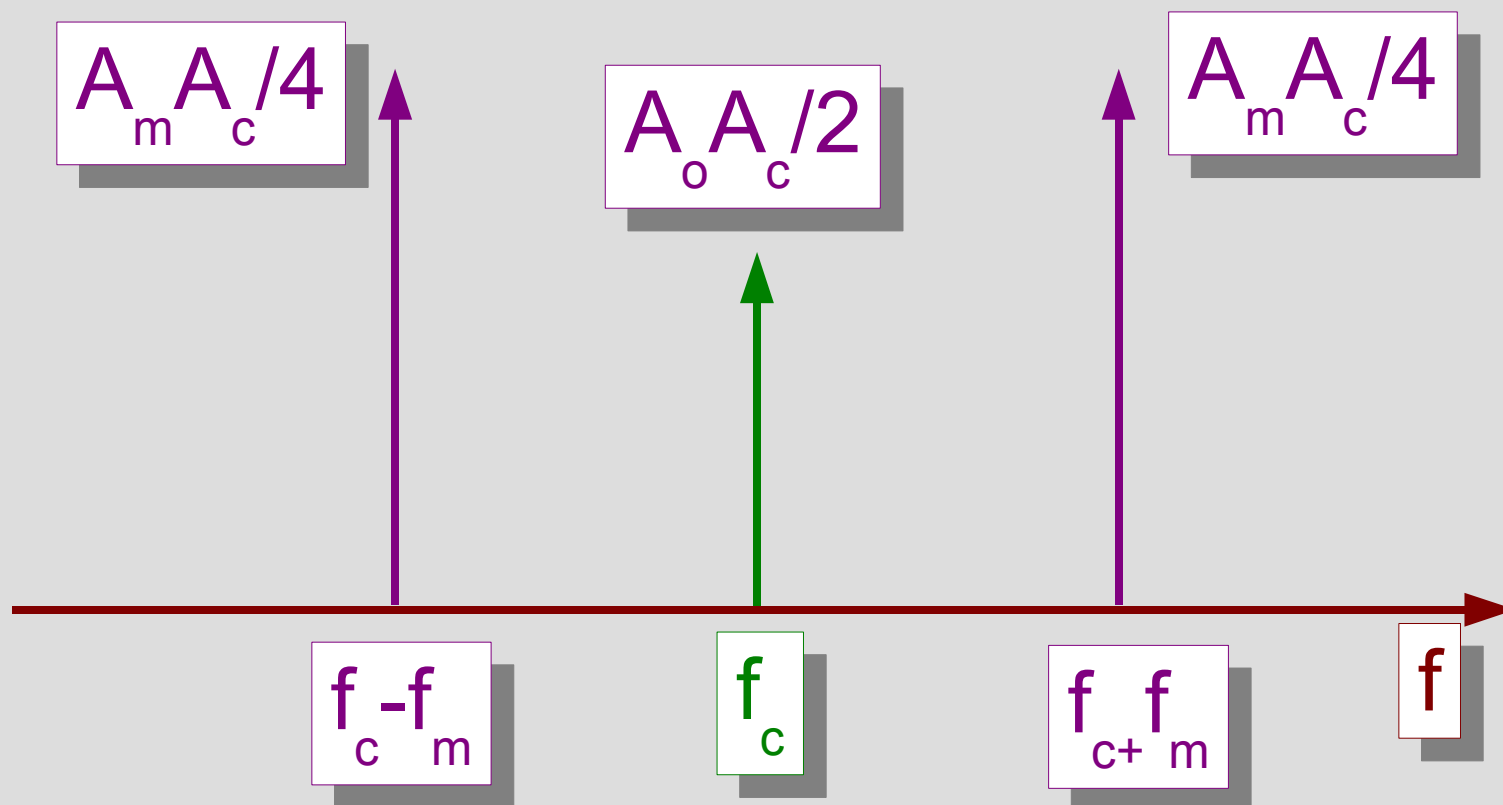
$\mu = 1$



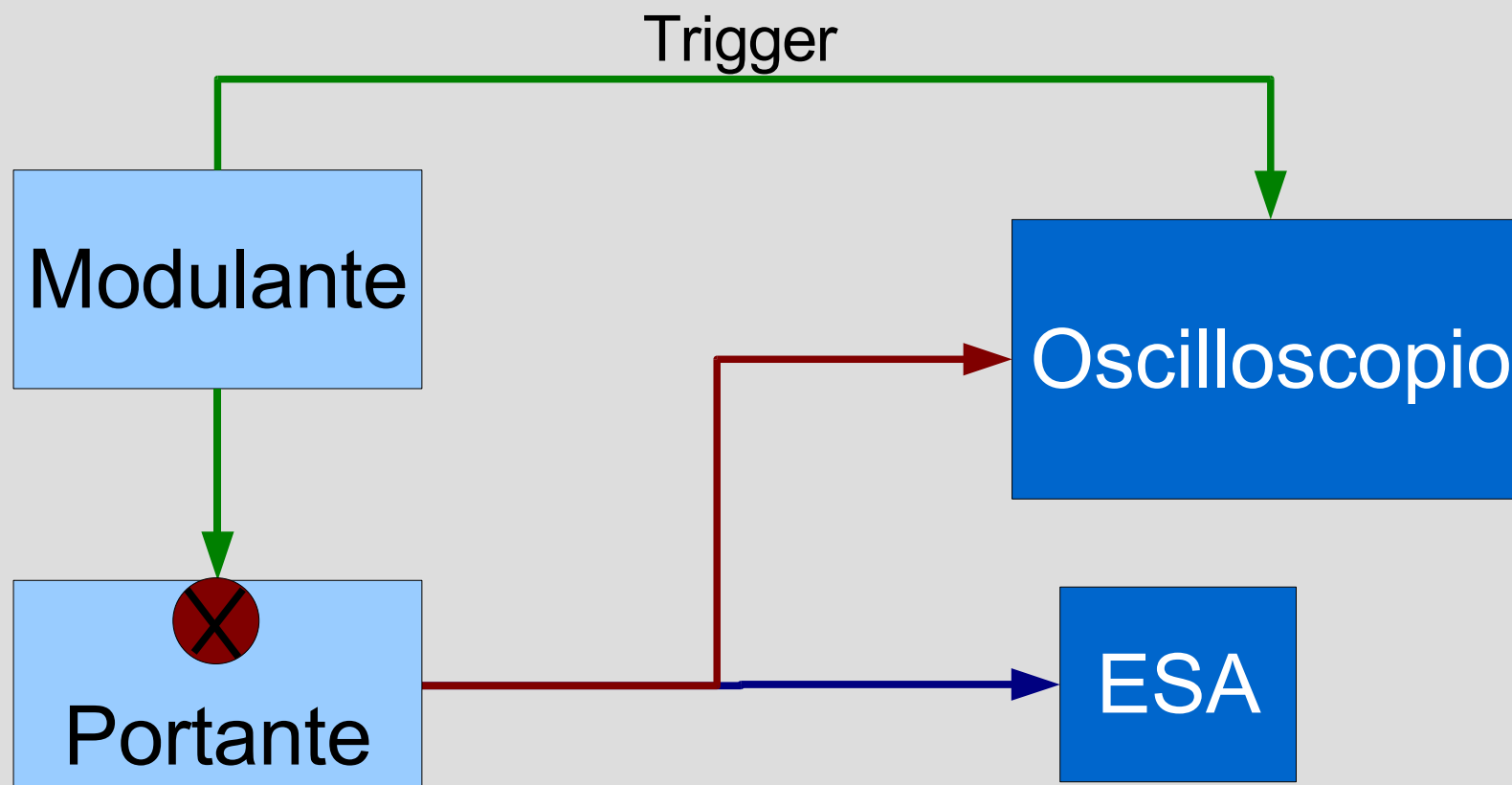
$\mu > 1$

# Spettro AM

- Lo spettro di ampiezza vale quindi:



# Setup dell'esperimento



# Visualizzazione sull'oscilloscopio dei segnali (I)

- Impostare i seguenti valori di modulante: ampiezza picco-picco 100 mV, frequenza 50 kHz ed offset di tensione 0 V
- Impostare i seguenti valori di portante: ampiezza 0 dBm (in potenza), offset 0 V e frequenza 1 MHz.
- Collegare separatamente modulante e portante all'oscilloscopio, verificare i valori impostati e compiere una serie di misure sull'oscilloscopio per ottenere i valori precisi

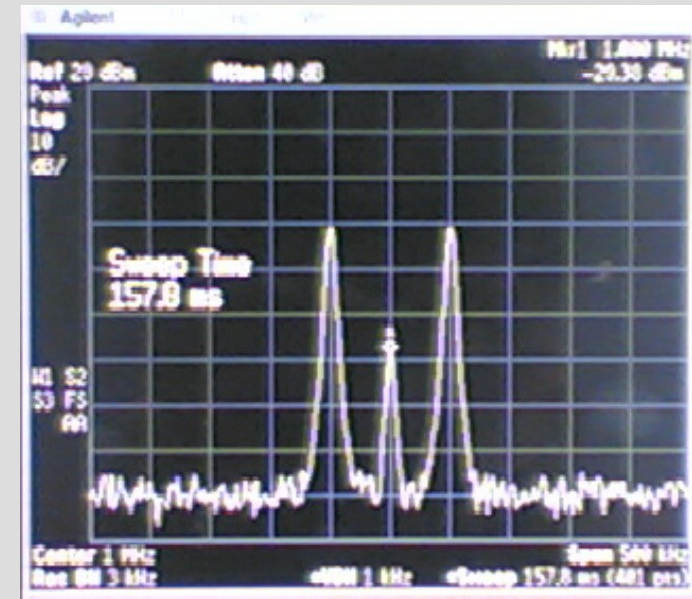
# Visualizzazione sull'oscilloscopio dei segnali (II)

- Utilizzare il mixer del generatore della portante per generare il segnale modulato:
  - collegare l'uscita del generatore di modulante all'ingresso MOD IN del generatore di portante
  - abilitare la modulazione esterna (EXT)
- Utilizzare un trigger esterno proveniente da uno o l'altro dei generatori (uscita SYNC OUT) per visualizzare il segnale modulato
- Notare che anche nel caso migliore si ha comunque un segnale non stabile, nonostante le frequenze di portante e modulante siano in rapporto razionale; perché? Come ovviare al problema?



# Visualizzazione dei segnali sull'ESA

- Collegare il segnale modulato all'ESA
- Impostare gli opportuni valori span, RWB, VBW e RLV per ottenere uno spettro utilizzabile
- Calcolare l'indice di modulazione nei seguenti 4 casi



$A_o$	10	50	100	100
$A_m$	50	50	50	25
$\mu$	5	1	0,5	0,25

# Osservazioni

- A noi interessa il rapporto  $A_m/A_o$ , e quindi si deve misurare il rapporto tra la riga centrale e quelle laterali, e prendere la media dei due risultati,
- L'ESA dà i valori di potenza, mentre a noi interessano quelli di ampiezza; è quindi necessario effettuare una conversione in lineare, e quindi propagare gli errori.

$$P_s = \frac{A_m^2 \cdot A_c^2}{16}, \quad P_c = \frac{A_o^2 \cdot A_c^2}{4}, \quad \frac{P_s}{P_c} = \frac{1}{4} \frac{A_m^2}{A_o^2} = R_{dB}$$

$$\frac{A_m^2}{A_o^2} = 4 \cdot 10^{\frac{R_{dB}}{10}}, \quad \frac{A_m}{A_o} = \sqrt{4 \cdot 10^{\frac{R_{dB}}{10}}} = 2 \cdot 10^{\frac{R_{dB}}{20}} = \mu$$

# Calcolo errore sull'indice di modulazione

- Applicando la propagazione degli errori, otteniamo che l'errore sull'indice di modulazione lineare si ricava dall'errore sulla misura del rapporto tra la portante e le righe laterali

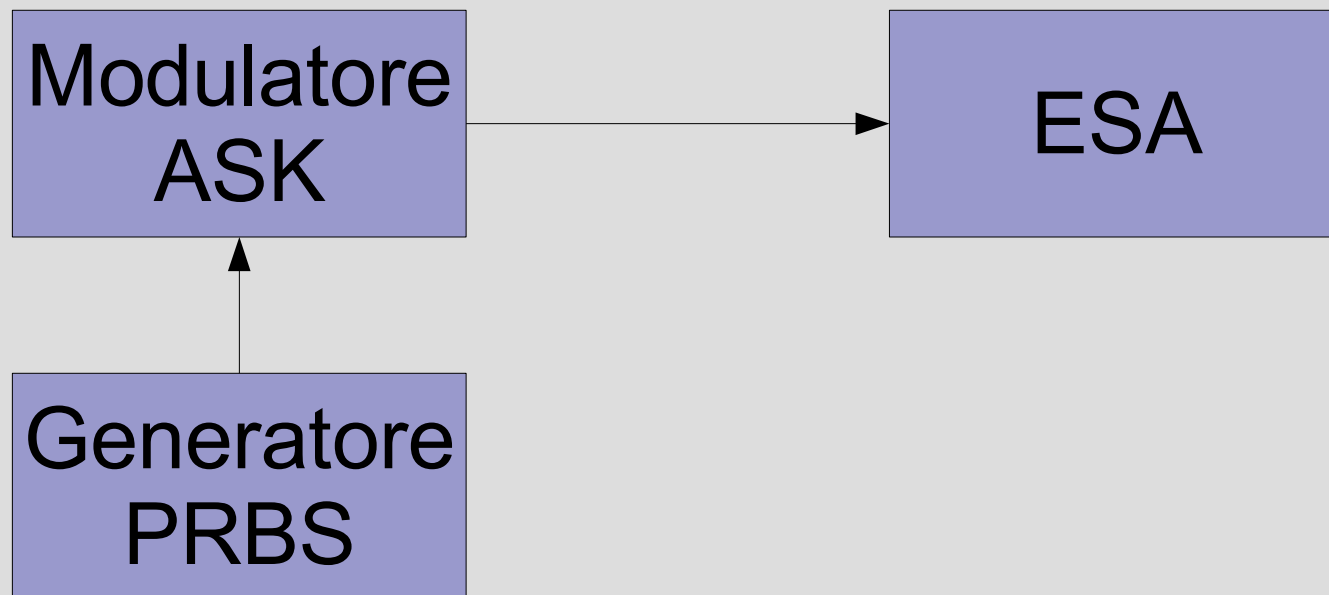
$$\Delta \mu = \frac{d\mu}{dR_{dB}} \Delta R_{dB} = 2 \cdot 10^{\frac{R_{dB}}{20}} \ln(10) \cdot \frac{1}{20} \Delta R_{dB} = \mu \frac{\ln(10)}{20} \Delta R_{dB}$$

# Struttura del Corso (III)

- **Analisi teorica esperienze laboratorio**
  - 1) Modulazione AM
  - 2) **Modulazioni digitali in banda base**
  - 3) Caratterizzazione di Dispositivi per l'Optoelettronica
  - 4) Caratterizzazione di Fibre Ottiche
  - 5) Caratterizzazione di EDFA
  - 6) Misura di BER in sistemi ottici ottici amplificati multicanale

# Modulazioni Digitali in Banda Base

- In questa esperienza si misureranno le caratteristiche spettrali di segnali digitali pseudo-casuali ASK, secondo lo schema qui illustrato.



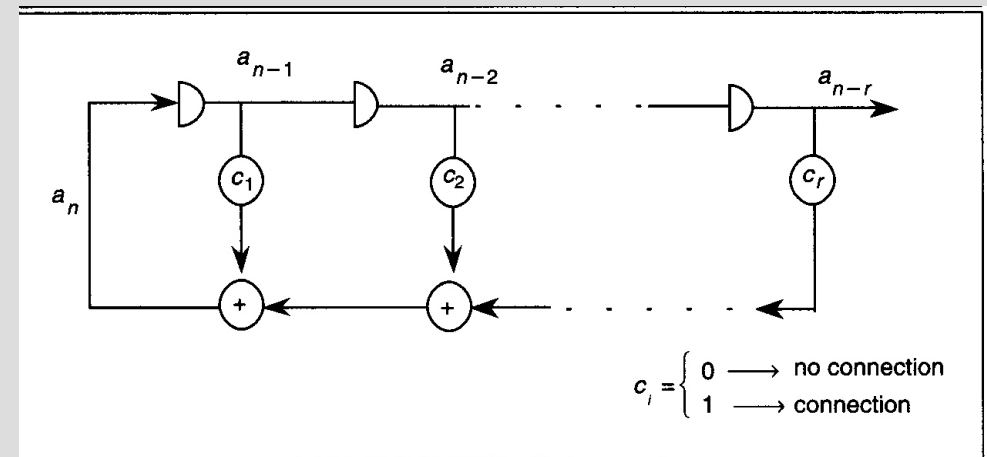
# Il concetto di Segnale PRBS

- Per Sequenza di Bit Pseudo-Casuale (*Pseudo-Random Bit Sequence*, PRBS) si intende una sequenza di bit ben definita ma con caratteristiche spettrali e statistiche che ben riproducono i segnali trasmessi nel traffico reale
- Dal punto di vista spettrale, hanno uno spettro di potenza “quasi-continuo” del tipo  $\text{sinc}^2(x)$
- Dal punto di vista statistico, valgono le seguenti proprietà
  - Le frequenze degli “1” e degli “0” sono  $\frac{1}{2}$
  - Le uscite sono distribuite come nel lancio della moneta: metà delle uscite sono unitarie,  $\frac{1}{4}$  sono doppie,  $\frac{1}{8}$  sono triple. In generale,  $\frac{1}{2^n}$  di tutte le uscite sono di lunghezza  $n$

# Come sono costruiti i segnali PRBS?

- Per generare un segnale PRBS si utilizza uno *shift-register* e un sommatore modulo 2 o XOR ( $0+1=1+0=1$ ,  $0+0=1+1=0$ ).
- A ogni ciclo di clock, il registro sposta tutto il suo contenuto verso destra.
- Ogni termine viene generato dai precedenti  $r$  secondo la relazione

$$a_n = \sum_{i=1}^r c_i D^n$$



# Altre proprietà

- Si può dimostrare che per un dato  $n$  la sequenza PRBS più lunga ha periodo  $P=2^n-1$ .
- Tale sequenza viene chiamata *MLSR* poiché è generata da un *Maximum Length Shift Register*.
- Si noti che una sequenza MLSR è priva della sequenza di  $n$  “0”, che può essere generata solo a partire da un valore iniziale di tutti “0”. Ciò determina un leggero sbilanciamento delle proprietà statistiche.
- Infatti, la probabilità di avere in uscita ad un qualsiasi ciclo di clock uno “0” o un “1” è sbilanciata a favore degli “1” del fattore  $1/P$



# Polinomi Generatori

- Si dicono Polinomi generatori le sequenze del tipo

$$a_n = \sum_{i=1}^r c_i D^n$$

che danno origine a una MLSR

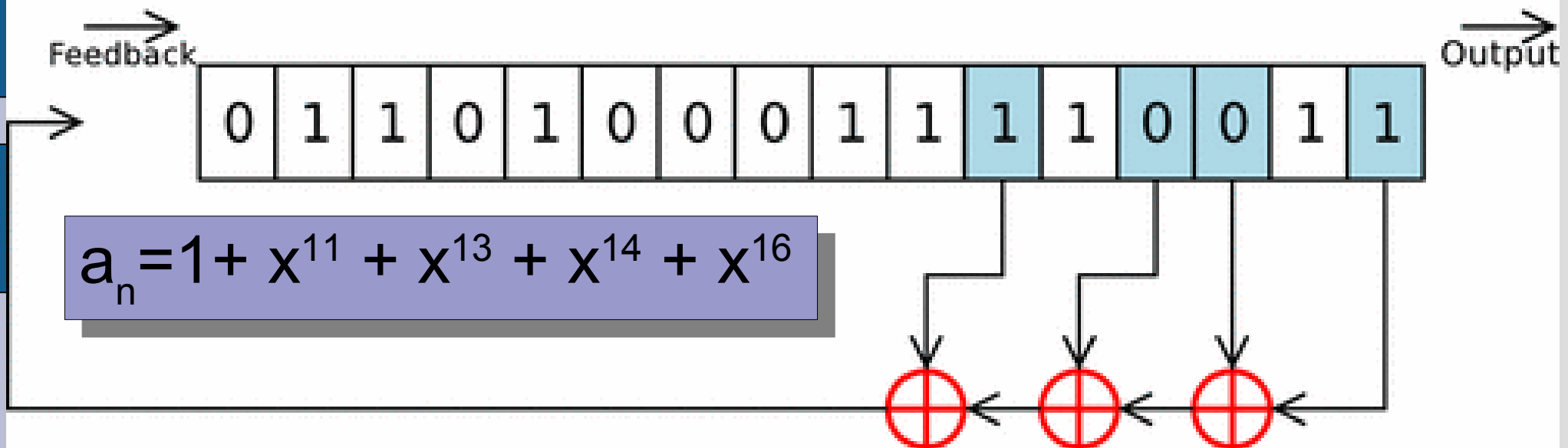
- Si dimostra che per ogni  $r$  il numero di polinomi generatori è

$$N_p(r) = \frac{2^r - 1}{r} \prod_{i=1}^j \frac{P_i - 1}{P_i}$$

con  $P_i$  scomposizione in fattori primi di  $2^r - 1$

- Es.:  $r=4$ ,  $2^r - 1 = 15 = 5 \cdot 3$       $N_p(4) = \frac{15}{4} \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{2}{3} = 2$

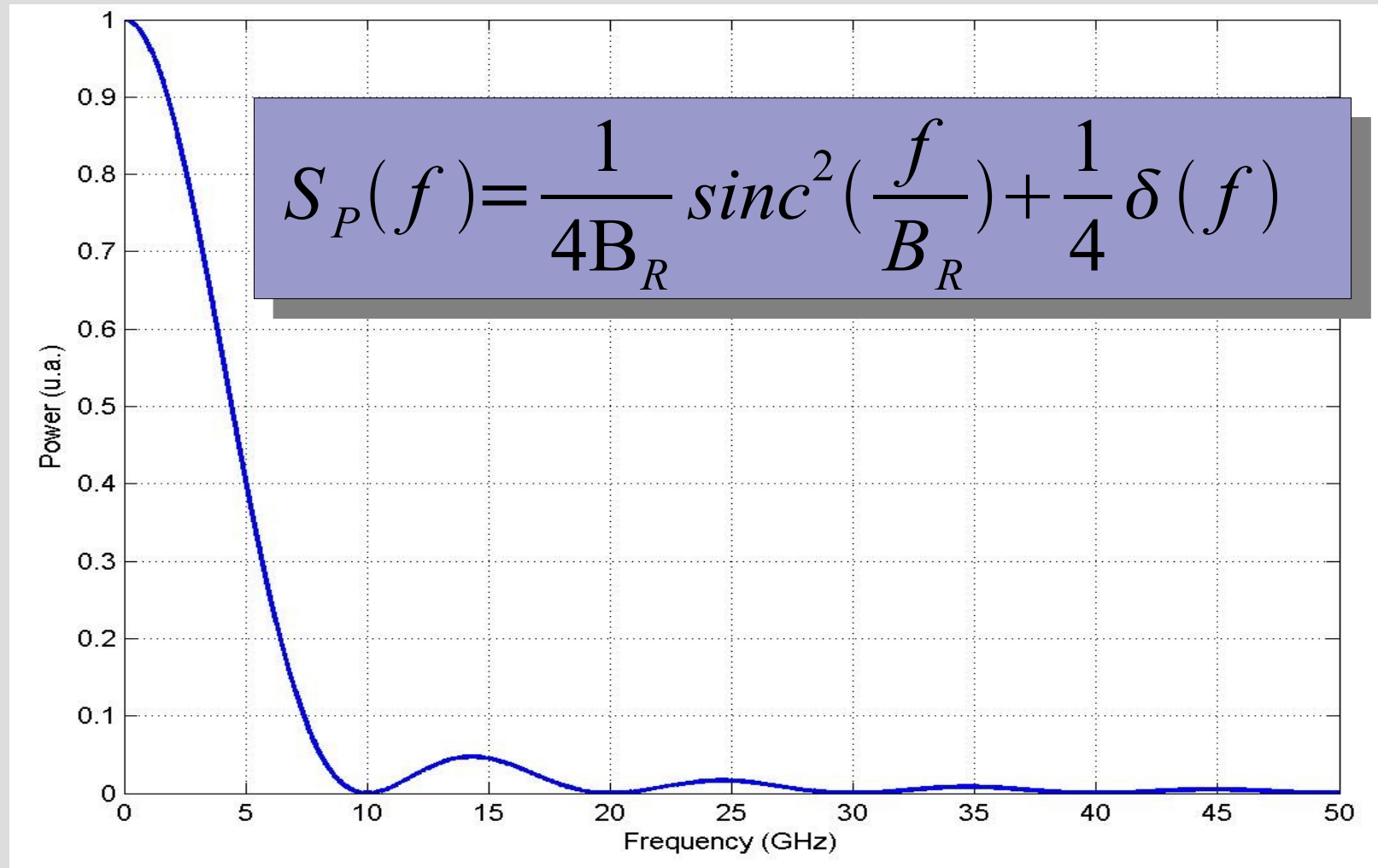
# Esempio di PRBS



Period	Generation Polynomial
$2^7-1$	$1+x^6+x^7$
$2^9-1$	$1+x^5+x^9$
$2^{11}-1$	$1+x^9+x^{11}$
$2^{15}-1$	$1+x^{14}+x^{15}$
$2^{20}-1$	$1+x^3+x^{20}$
$2^{23}-1$	$1+x^{18}+x^{23}$

# Proprietà spettrali dei PRBS (I)

- Lo spettro di potenza è tipico di una sequenza casuale di impulsi rettangolari



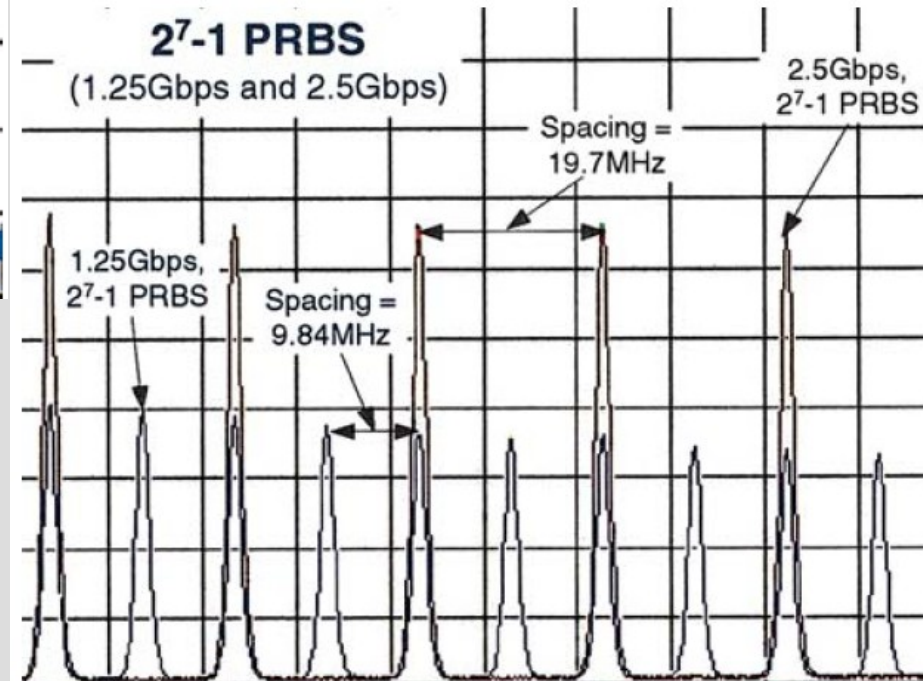
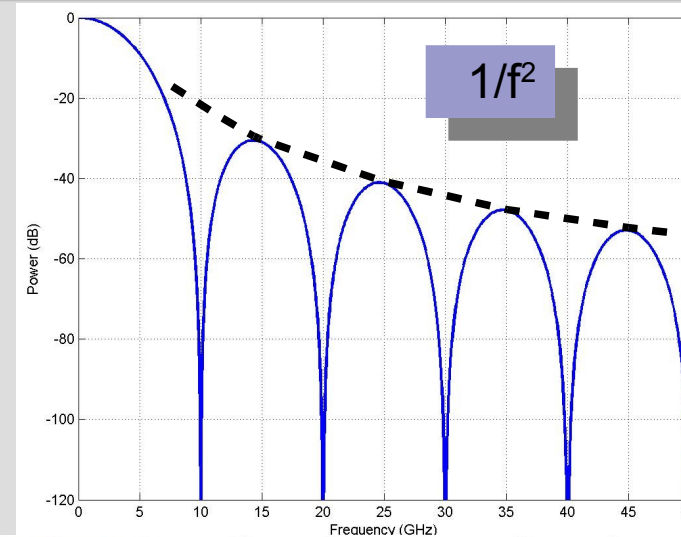
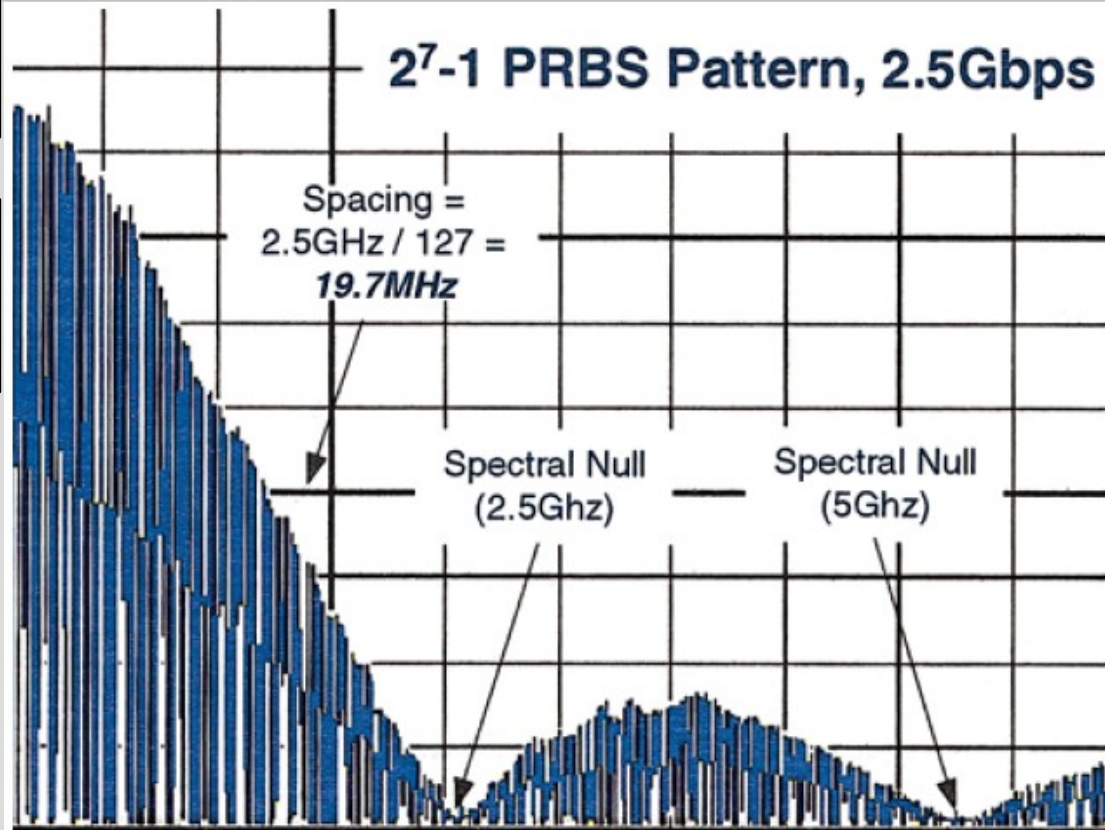
$B_R$  = bit-rate

# Proprietà Spettrali dei PRBS (II)

- La banda è illimitata, ma si assume essere uguale alla distanza tra i due primi zeri, cioè  $2B_R$
- Spettro di potenza con un roll-off del tipo  $1/f^2$
- Lo spettro reale è in realtà uno spettro a righe, la cui spaziatura dipende dal periodo del PRBS
- Dato che il periodo di ripetizione è uguale alla lunghezza della MLSR, la prima riga si trova alla frequenza data da

$$f_0 = \frac{B_R}{P}$$

# Proprietà Spettrali dei PRBS (III)



# Svolgimento dell'Esperienza

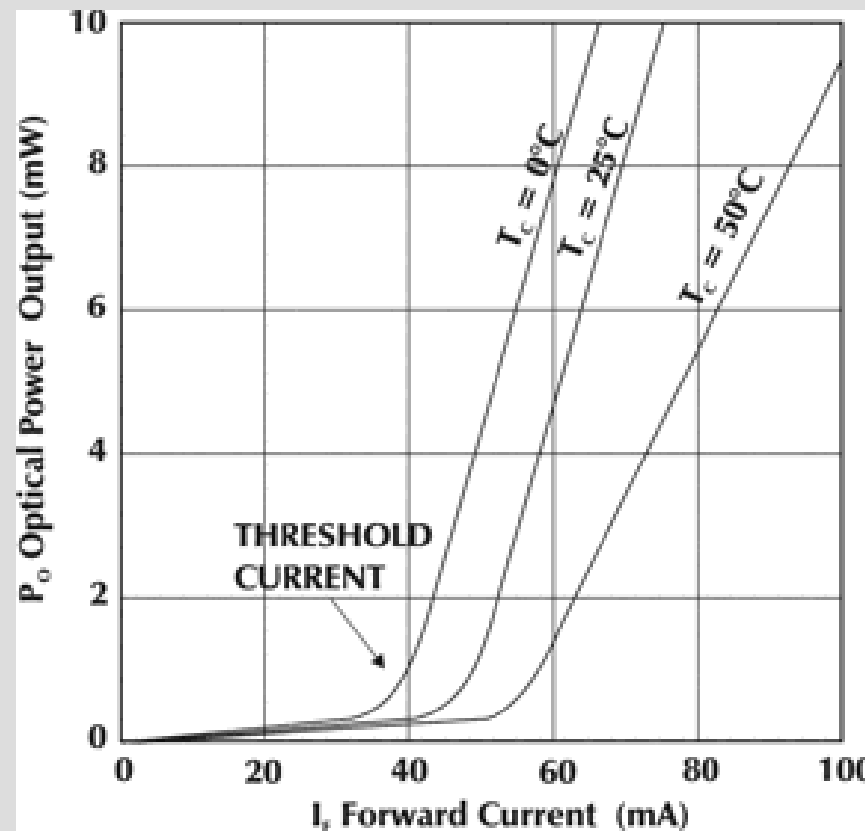
- Connettere il segnale di uscita del PPG all'ESA
- Settare la bit rate a 500 Mb/s, PRBS  $2^{15}-1$
- Misurare la spaziatura tra le righe
- Centrare una riga attorno a 100 MHz, mettere la RBW a 1 kHz e lo span a 20 kHz
- Misurare la potenza della riga in 11 punti spaziati di 1 kHz
- Calcolare la potenza totale dall'istogramma
- Trovare la potenza totale come la somma della potenza di tutte le righe e confrontare la potenza calcolata con quella trasmessa.
- Verificare il roll-off  $1/f^2$  calcolando il coeff. di corre-

# Struttura del Corso (III)

- **Analisi teorica esperienze laboratorio**
  - 1) Modulazione AM
  - 2) Modulazioni digitali in banda base
  - 3) **Caratterizzazione di Dispositivi per l'Optoelettronica**
  - 4) Caratterizzazione di Fibre Ottiche
  - 5) Caratterizzazione di EDFA
  - 6) Misura di BER in sistemi ottici ottici amplificati multicanale

# La caratteristica potenza/corrente nei laser

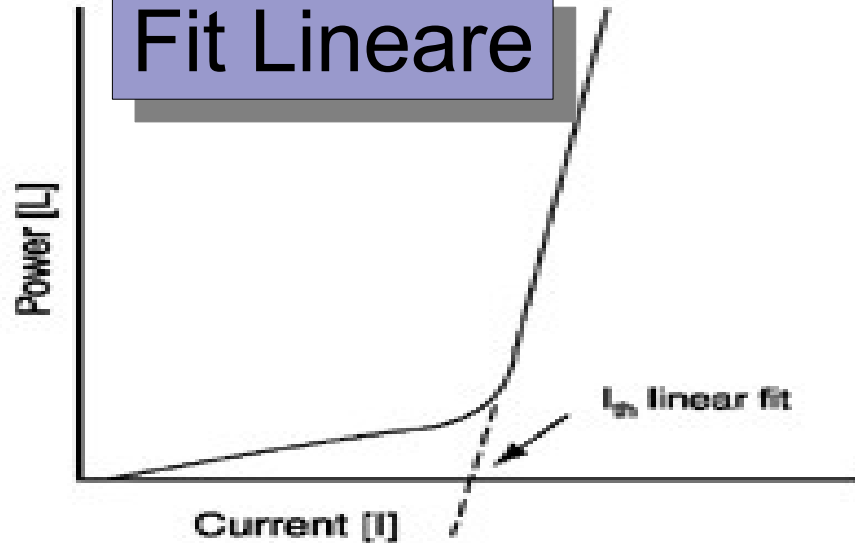
- Nei laser DFB la potenza ottica varia linearmente con la corrente elettrica, al di sopra della soglia
- Inoltre, al variare della temperatura varia la soglia e l'efficienza, cioè la pendenza, della caratteristica





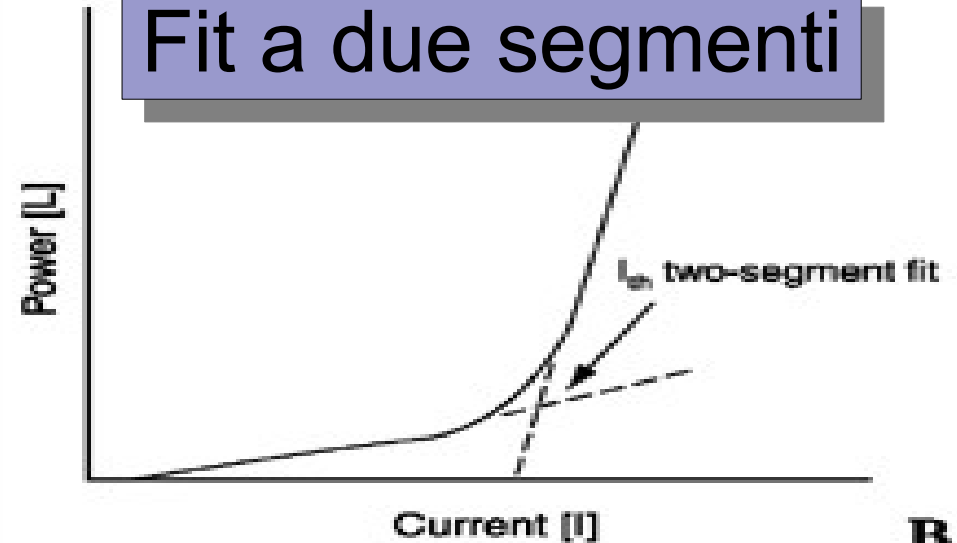
# Metodi per il calcolo della soglia

## Fit Lineare



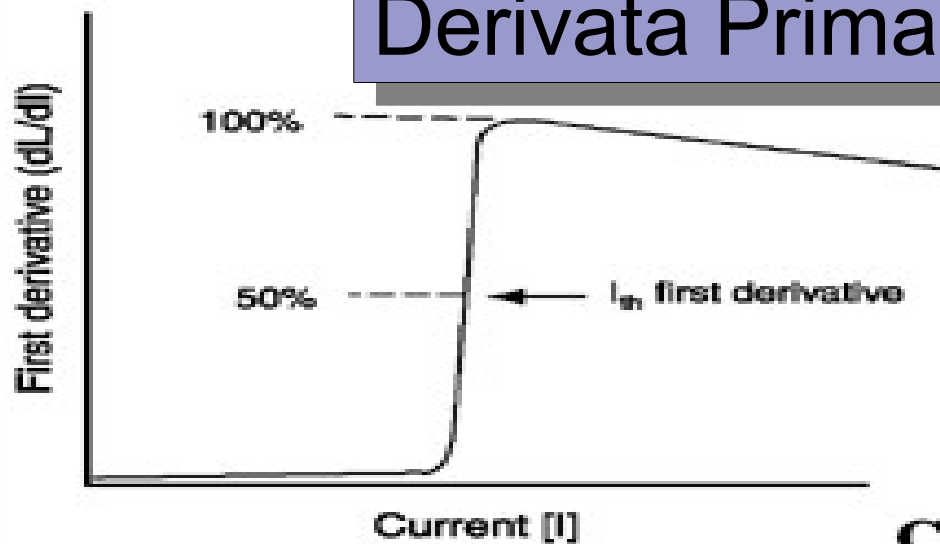
A.

## Fit a due segmenti



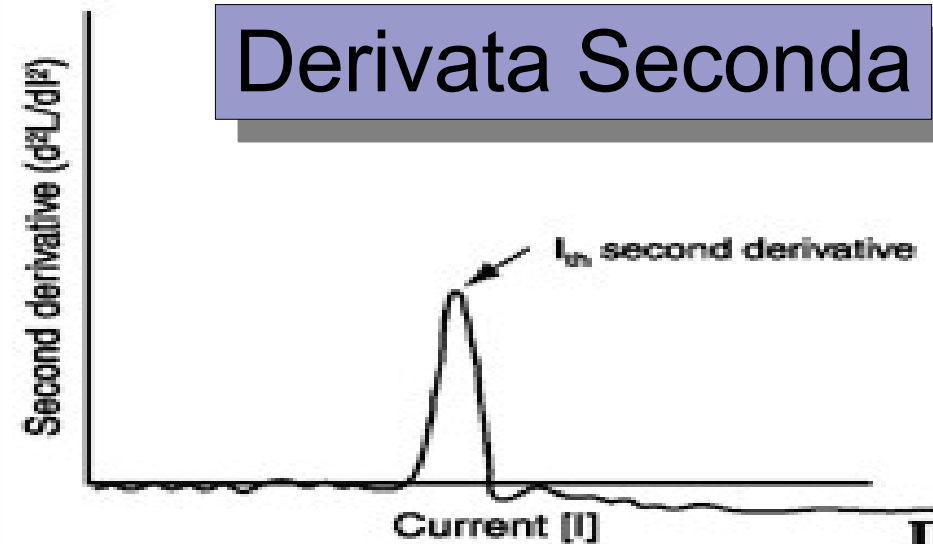
B.

## Derivata Prima



C.

## Derivata Seconda



D.

# Calcolo della soglia

- Fit lineare: la soglia è data dall'intercetta del fit lineare della caratteristica  $P/I$  sopra soglia con l'asse della corrente
- Fit a due segmenti: la soglia è data dall'incrocio dei fit lineari delle caratteristiche  $P/I$  sopra e sotto soglia
- Fit derivata prima: la soglia è data dal punto al 50% della rampa di salita della derivata della curva  $P/I$
- Fit derivata seconda: la soglia è data dal massimo della derivata seconda della curva  $P/I$
- **Si consiglia il fit a due segmenti**

# Variazione soglia ed efficienza con la temperatura

- La soglia e l'efficienza cambiano con la temperatura.
- La legge di variazione è del tipo

$$I_{th} = I_0 e^{(T/T_0)}$$

- Si tratta di una legge linearizzabile
- Anche l'efficienza, cioè la pendenza della curva, varia con la temperatura

# Variazioni di lunghezza d'onda

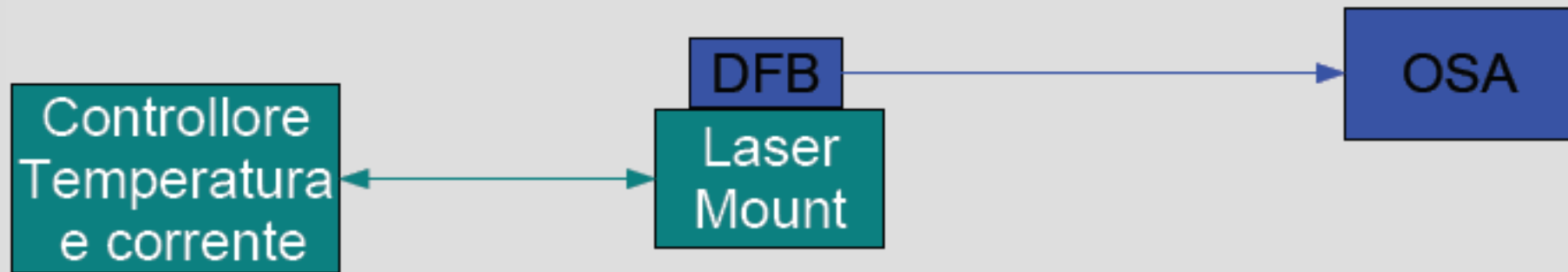
- La lunghezza d'onda di picco varia sia con la temperatura sia con la corrente secondo una legge lineare, a causa della variazione dell'indice di rifrazione della cavità
- Valori approssimativi per i laser DFB a 1550 nm sono circa 0,1 nm/°C per la temperatura, e circa 10 pm/mA, o 1 GHz/mA, per la corrente

# Caratteristiche spettrali

- Acquisizione Spettro Ottico
- Calcolo del Side Mode Suppression Ratio
- Calcolo della spaziatura dei modi laterali
- Risalire alla lunghezza della cavità tramite la formula, assumendo  $n_e=3,4$

$$\Delta f = \frac{c}{2n_e L}$$

# Setup Misura



- Il laser è stabilizzato in temperatura e corrente da un controllore di temperatura
- L'analizzatore di spettro ottico funge sia da power meter che da wavelength meter

# Parametri da misurare

- Caratteristica  $P/I$ , Soglia ed Efficienza a tre temperature, 10, 25 e 50 °C, con i loro errori.
- $I_0$  e  $T_0$  nella relazione che lega la corrente di soglia alla temperatura.
- Variazione della lunghezza d'onda con la temperatura a corrente costante, fit lineare e calcolo pendenza.
- Variazione della lunghezza d'onda con la corrente a temperatura costante, fit lineare e calcolo pendenza.
- Misura di SMSR, spaziatura dei modi al variare della temperatura e verifica dell'eventuale correlazione, calcolo della lunghezza della cavità

# Struttura del Corso (III)

- **Analisi teorica esperienze laboratorio**
  - 1) Modulazione AM
  - 2) Modulazioni digitali in banda base
  - 3) Caratterizzazione di Dispositivi per l'Optoelettronica
  - 4) **Caratterizzazione di Fibre Ottiche**
  - 5) Caratterizzazione di EDFA
  - 6) Misura di BER in sistemi ottici ottici amplificati multicanale



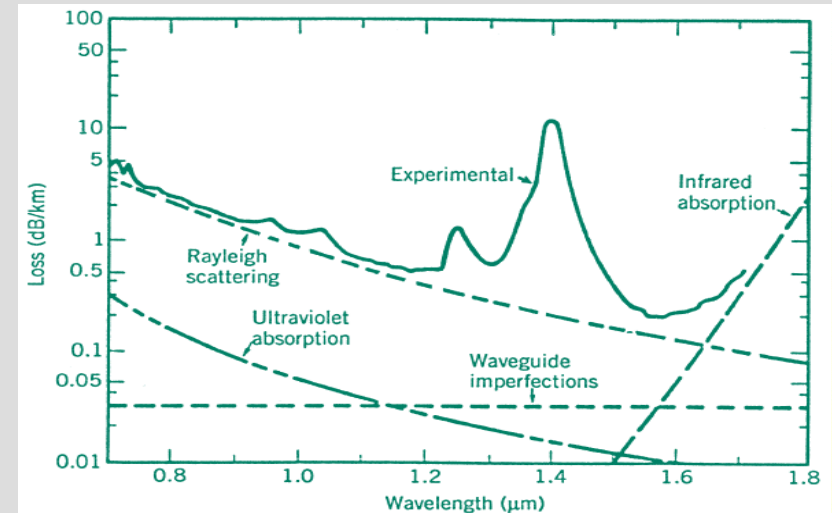
# L'attenuazione della fibra ottica

- Come abbiamo già visto, la fibra attenua un segnale con la distanza secondo una legge di tipo esponenziale

$$P_o = P_i \cdot 10^{-\frac{\alpha}{10} z} \quad \alpha = \frac{1}{L} 10 \log \left( \frac{P_o}{P_i} \right) \text{ [dB/km]}$$

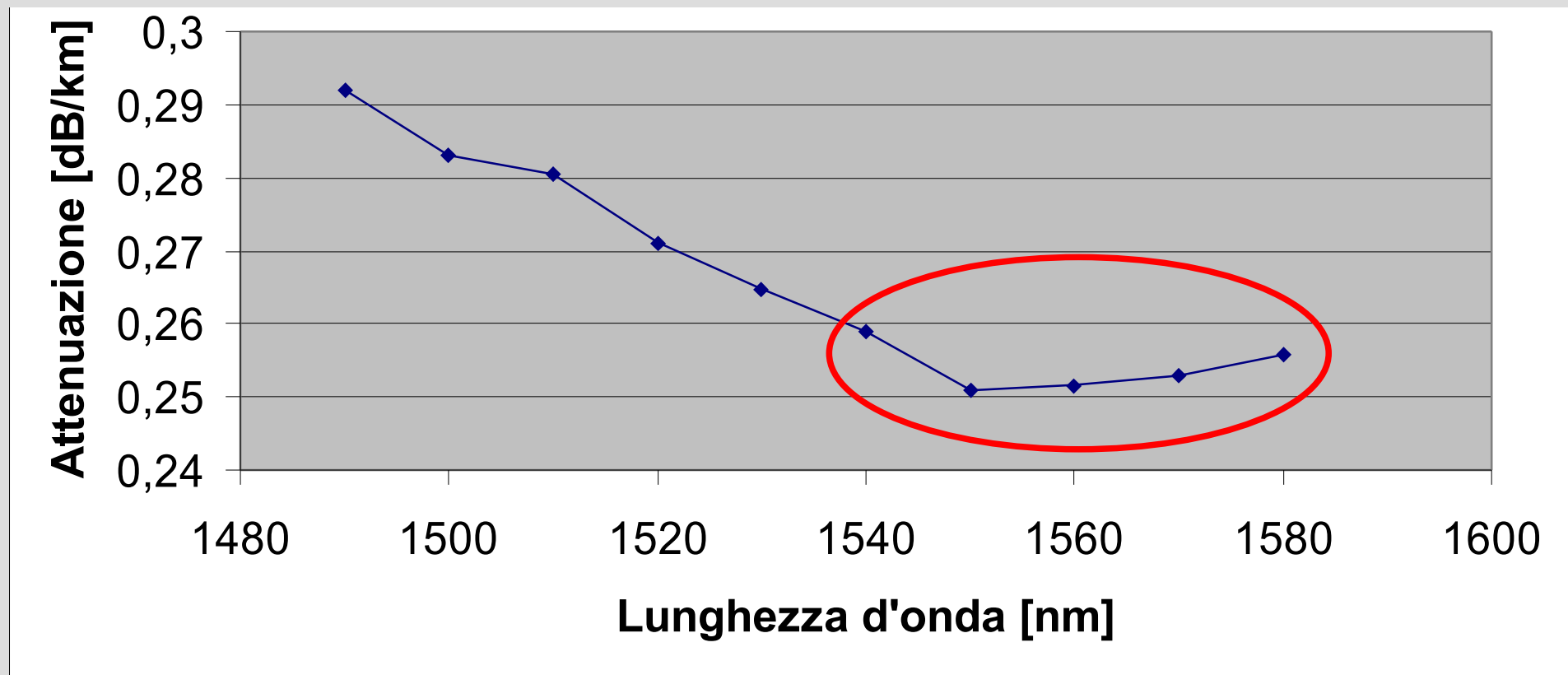
- Inoltre, a parità di distanza, l'attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda secondo una legge linearizzabile

$$\alpha(\lambda) = a + \frac{k}{\lambda^4}$$



# Misura dell'attenuazione della fibra ottica

- Scopo dell'esperienza è misurare l'attenuazione in dB/km al variare della lunghezza d'onda e di ricavare il coefficiente  $k$ , utilizzando un opportuno fit coi minimi quadrati



# Misura Attenuazione

- Registrare la curva di normalizzazione del laser al variare della lunghezza d'onda senza la fibra inserita tramite il power meter.
- Introdurre la fibra sul cammino ottico e procedere analogamente.
- Prendere almeno 9 valori di potenza per ogni lunghezza d'onda
- Graficare i dati di attenuazione in funzione di  $1/\lambda^4$ , trovare la pendenza e l'attenuazione in dB/km in funzione della lunghezza d'onda.
- Prestare attenzione, in fase di analisi dei dati, ad eventuali scostamenti dall'andamento teorico  $1/\lambda^4$

# La Dispersione della fibra ottica

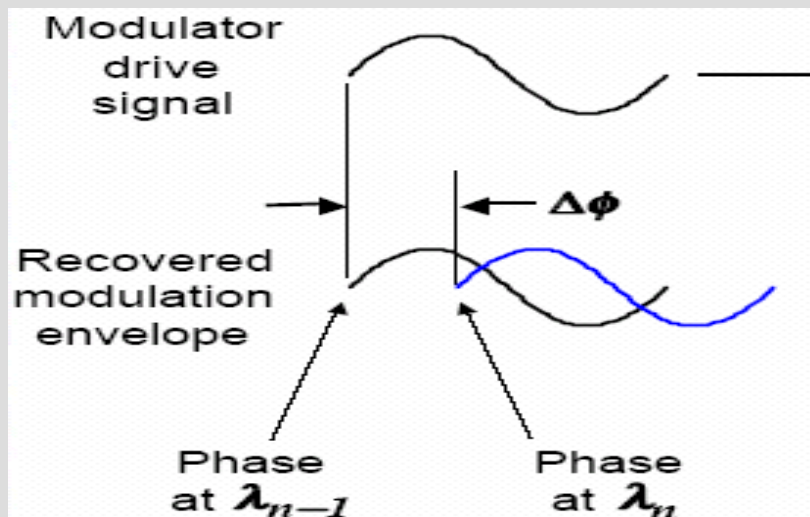
- Come abbiamo visto, la dispersione e la *slope* di una fibra ottica sono legate al ritardo di gruppo

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} \quad S = \frac{\partial D}{\partial \lambda}$$

- Come possiamo misurare il ritardo di gruppo a una certa lunghezza d'onda?
- Basta mettere in relazione uno sfasamento con il ritardo di gruppo; è la base del cosiddetto *Modulation Phase Shift Method*

# Modulation Phase Shift Method

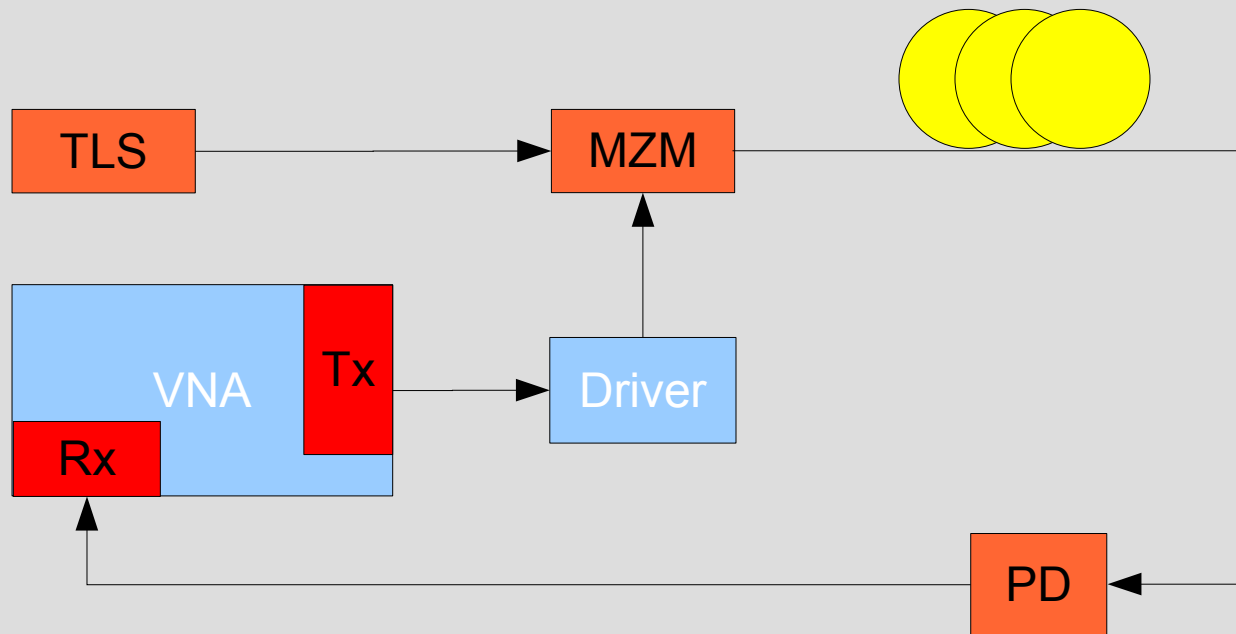
- Il setup consiste in un analizzatore di rete vettoriale (*Vectorial Network Analyzer*, VNA) che pilota con una sinusoide fissa un Mach-Zehnder.
- Il segnale lanciato in fibra viene poi raccolto da un fotodiodo e riconvertito in elettrico
- Il ricevitore del VNA effettua la comparazione di fase tra il segnale lanciato e quello ricevuto



$$\Delta\phi : 2\pi = \Delta\tau : T$$

$$\Rightarrow \Delta\tau = \frac{\Delta\phi}{2\pi f}$$

# Modulation Phase Shift Method: Setup



- Un VNA è uno strumento che è in grado di misurare fase e ampiezza di un segnale ricevuto e confrontarli con quelli trasmessi, al variare della frequenza

# Misura Dispersione (I)

- Impostare la potenza del segnale elettrico di modulazione in modo che il segnale ottico abbia una piccola ampiezza, ricordando che per avere un ER=13 dB occorrono circa 7 V.
- Stimare il ritardo di gruppo atteso sulla base della fibra da misurare e dalla sua lunghezza, e quindi la frequenza da impostare sul VNA per ottenere uno sfasamento massimo di 90° per ogni step di 10 nm, utilizzando le relazioni

$$\Delta \tau_g = \frac{\Delta \phi}{2\pi f} \quad \Delta \tau_g = D \cdot \Delta \lambda \cdot L$$

# Misura Dispersione (II)

- Calcolare il group delay  $\Delta_g$  con il suo errore al variare della lunghezza d'onda e graficarlo.
- Calcolare numericamente la derivata del group delay  $D(\lambda)$  con il suo errore, e il best fit lineare con il metodo dei minimi quadrati.
- Trovare la  $D(1550)$ , la  $S$  e la  $\lambda_0$ .



# Avvertenze

- Utilizzare la funzione di media sul VNA ed evidenziare le statistiche per ottenere l'errore sulle misure di fase
- Ricordarsi di scrivere i risultati ottenuti con il loro errore, e fare attenzione alla propagazione degli errori attraverso i vari fit

# Struttura del Corso (III)

- **Analisi teorica esperienze laboratorio**
  - 1) Modulazione AM
  - 2) Modulazioni digitali in banda base
  - 3) Caratterizzazione di Dispositivi per l'Optoelettronica
  - 4) Caratterizzazione di Fibre Ottiche
  - 5) **Caratterizzazione di EDFA**
  - 6) Misura di BER in sistemi ottici ottici amplificati multicanale

# I parametri fondamentali di un EDFA

- Caratterizzazione di un EDFA in termini di
  - Saturazione del Guadagno, Gain Saturation
  - Rapporto Segnale/Rumore ottico, OSNR
  - Figura di rumore, Noise Figure
  - Profilo di guadagno al variare della lunghezza d'onda e della potenza in ingresso

# La Saturazione di Guadagno (I)

- Il guadagno totale va secondo una legge del tipo

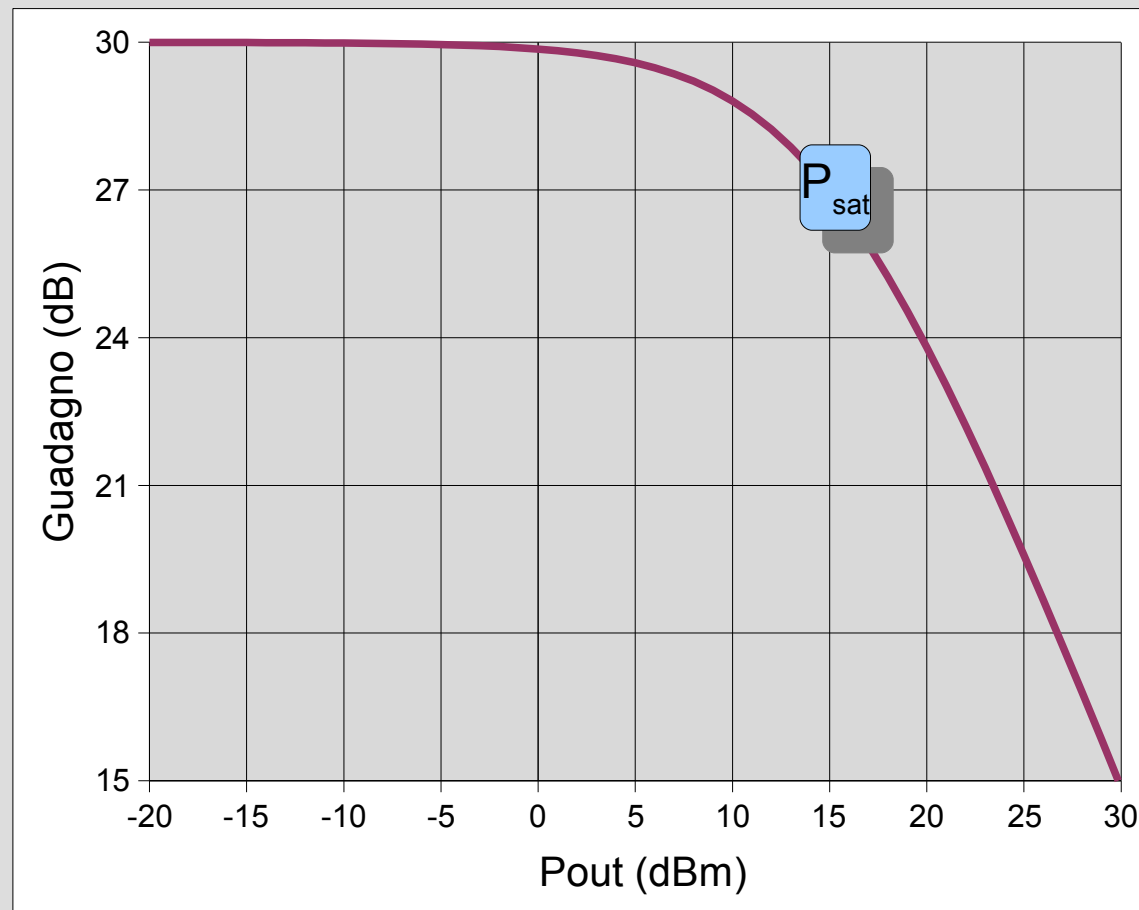
$$P = \frac{P_{sat}^i}{G-1} \cdot \ln\left(\frac{G_0}{G}\right)$$

- La  $P_{sat}^i$  è la potenza di saturazione intrinseca, legata cioè al materiale e al drogaggio.
- Per ottenere la Potenza di saturazione effettiva, definita come la potenza per la quale il guadagno perde 3 dB, bisogna inserire  $G=G_0/2$  nella formula.
- Si ottiene che:

$$P_{sat} = \frac{2\ln(2)}{G_0} P_{sat}^i$$

# La Saturazione di Guadagno (II)

- La Potenza di Saturazione d'uscita è quella per la quale il guadagno perde 3 dB

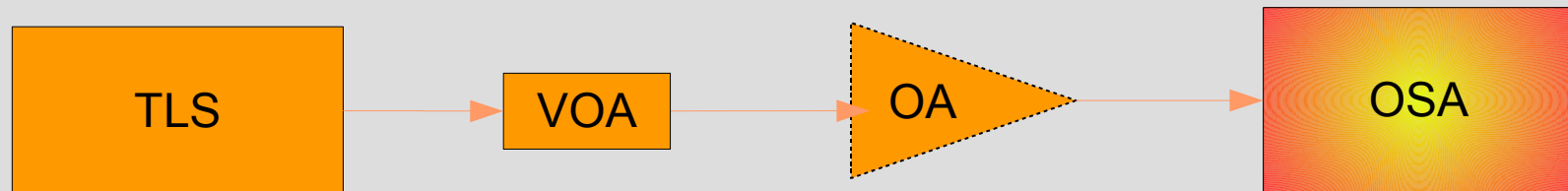


# La Saturazione di Guadagno (III)

- Meccanismi particolari come lo *Spectral Hole Burning* rendono il guadagno dipendente dalla lunghezza d'onda e dalla presenza o meno di altri segnali e dalla loro intensità.
- Questi meccanismi rendono necessaria una caratterizzazione della gain saturation a diverse lunghezze d'onda e in differenti condizioni operative

# La Misura della Gain Saturation in condizioni di canale singolo

- Il setup di misura è il seguente



- Sull'OSA si misura la potenza di picco a due differenti lunghezze d'onda (attorno a 1532 e a 1550 nm) **senza** l'OA e al variare della potenza del TLS (normalizzazione).
- Si aggiunge l'OA e si procede variando la potenza in ingresso all'OA.
- Si registra la potenza d'uscita alle due lunghezze d'onda

# Gain Saturation: analisi dei dati (I)

- La formula che lega  $P$  a  $P_{sat}^i$  è non-lineare, ma è comunque linearizzabile utilizzando due approssimazioni

$$-G \gg 1$$

$$-\ln x \sim \frac{x-1}{x}, \quad x > 1/2$$

$$P = \frac{P_{sat}^i}{G-1} \cdot \ln \left( \frac{G_0}{G} \right)$$

- Sulla base di queste approssimazioni, otteniamo la seguente legge di variazione approssimata

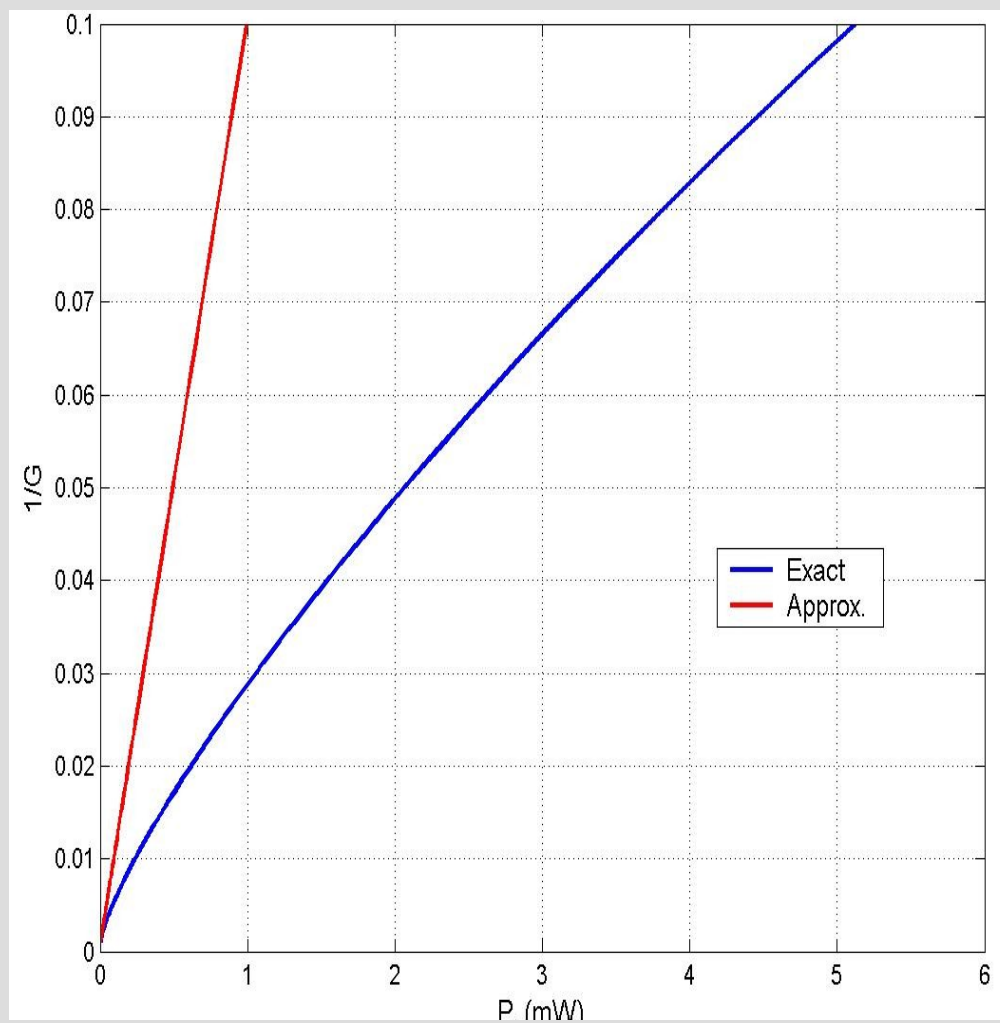
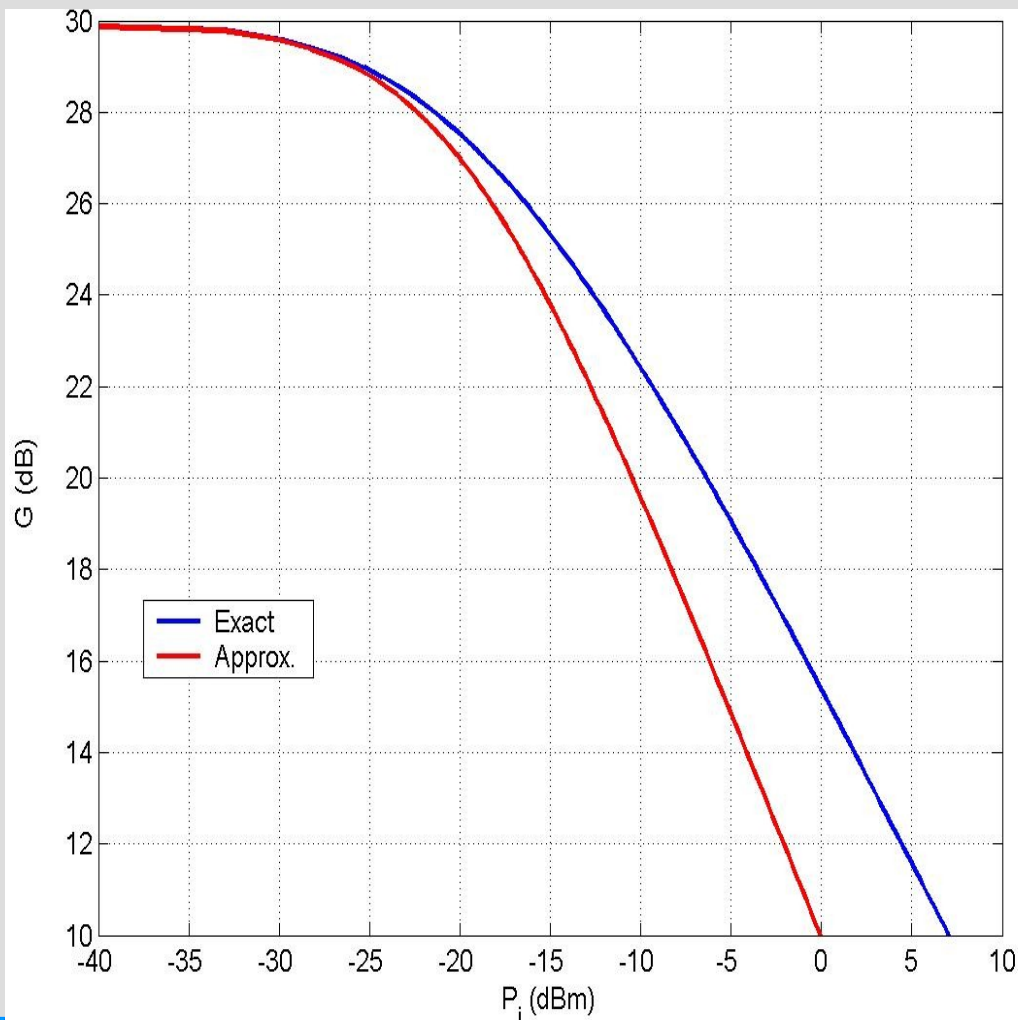
$$\frac{1}{G} \approx \frac{P}{P_{sat}^i} + \frac{1}{G_0}$$

- Si ricavano quindi i due parametri  $P_{sat}^i$  e  $G_0$  sulla base della retta dei minimi quadrati



# Gain Saturation: analisi dei dati (II)

- Confronto tra funzione esatta e approssimata
- Confronto tra funzione inversa esatta e approx.



# Il rapporto segnale/rumore ottico

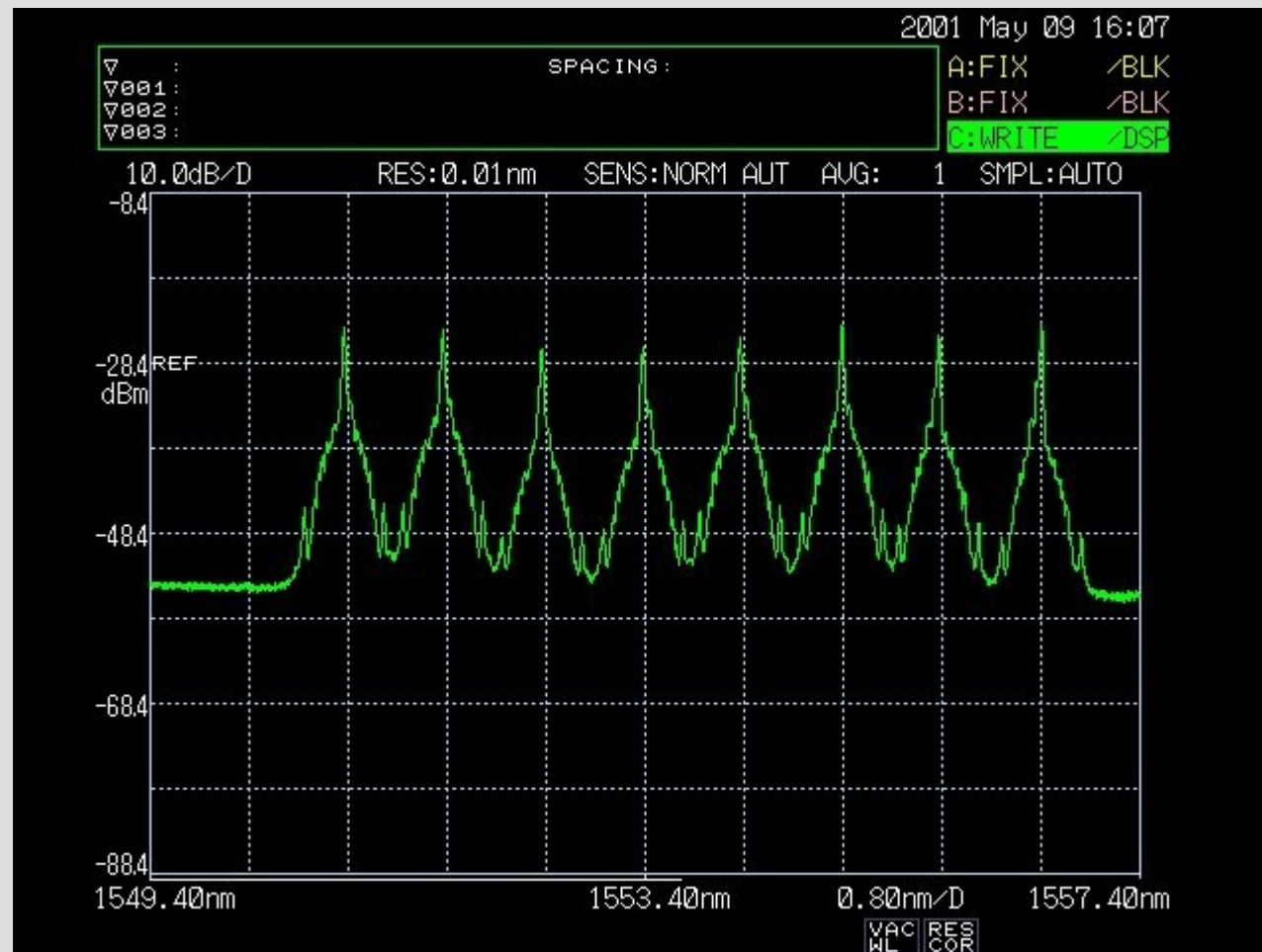
- La misura del rapporto segnale/rumore ottico (*Optical Signal-to-Noise Ratio*, OSNR) è un altro parametro fondamentale nella caratterizzazione sistemistica di un amplificatore

$$OSNR = 10 \cdot \log \frac{S}{N}$$

- Non va mai dimenticato che l'OSNR è definito su una banda di rumore, tipicamente 0,1 nm, che va **sempre** riportata!

# La misura dell'OSNR (I)

- In uno spettro del genere (8 canali a 40 Gb/s spaziali di 100 GHz) come faccio a misurare l'OSNR?

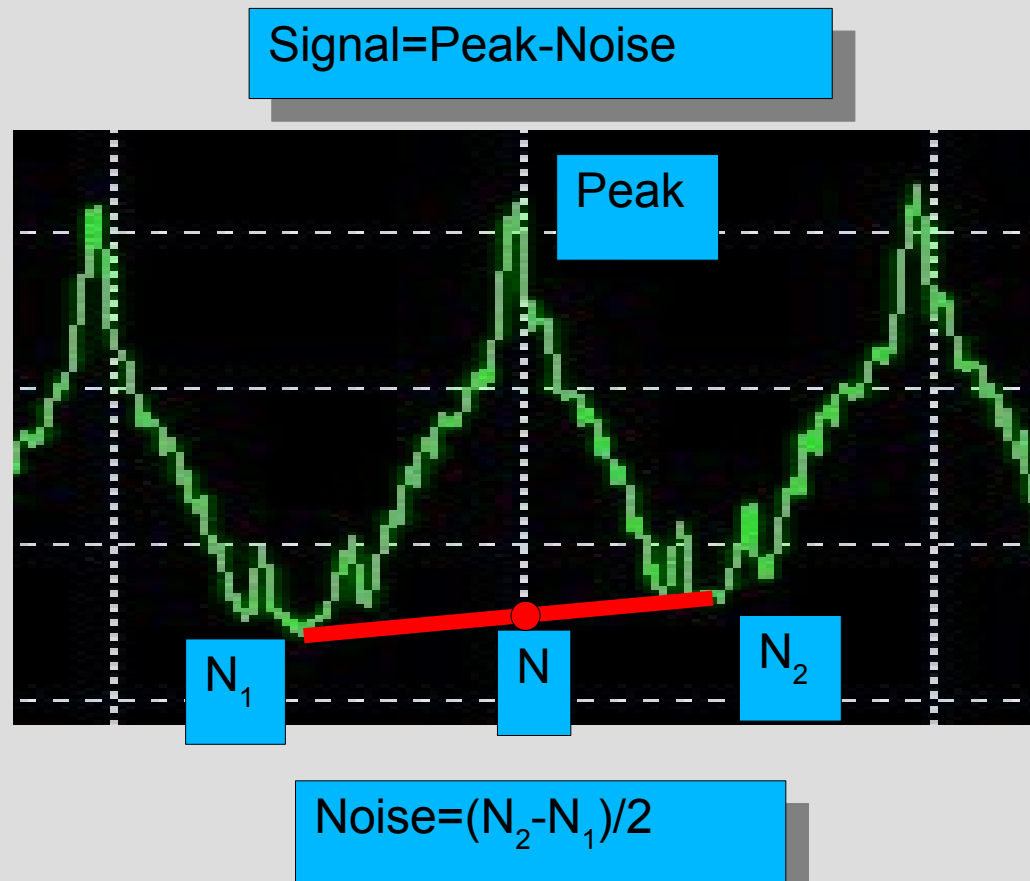


# La misura dell'OSNR (I)

- 1) Misuro il segnale, lo spengo e misuro il rumore sottostante, ma la gain competition mi altera i risultati. Il metodo è poi impraticabile in caso di canale singolo.
- 2) Misuro il segnale, lo lascio acceso e interpolo il fondo di rumore sotto il canale a partire dalla misura dell'OSNR ai lati del canale stesso.
- 3) Misuro il segnale, lo spengo per un tempo sufficientemente breve per evitare che mi si spenga il rumore e misuro il rumore.

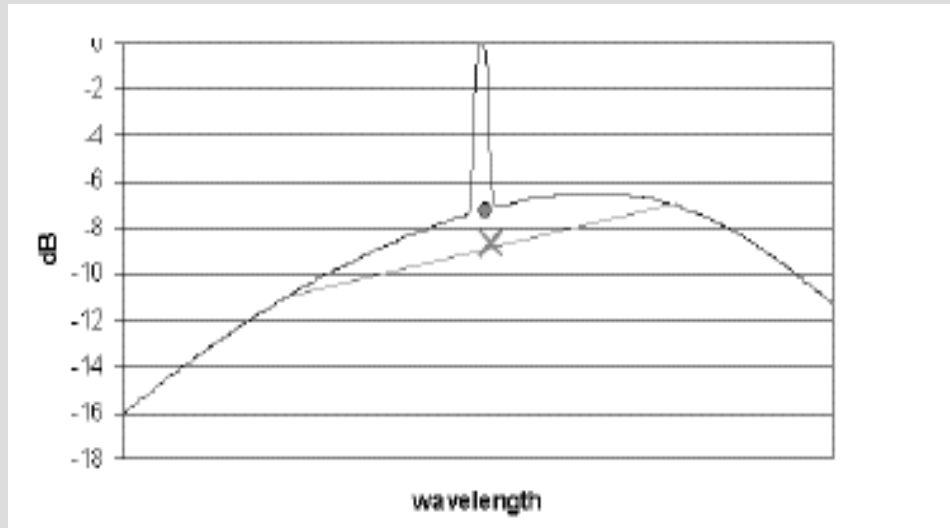
# La misura dell'OSNR col metodo ISS

- Il metodo dell'interpolazione (*Interpolated Source Subtraction*, ISS) è relativamente semplice e sufficientemente accurato nella maggior parte dei casi

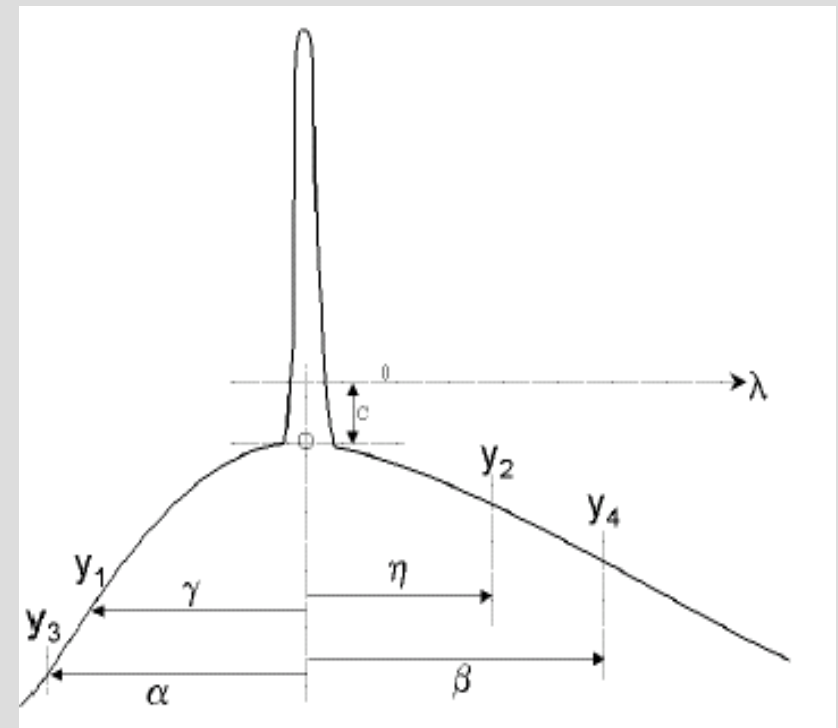


# Limiti del metodo ISS (I)

- Cosa succede se la curva di guadagno dell'amplificatore in esame non è lineare?



- Si deve usare un'interpolazione quadratica

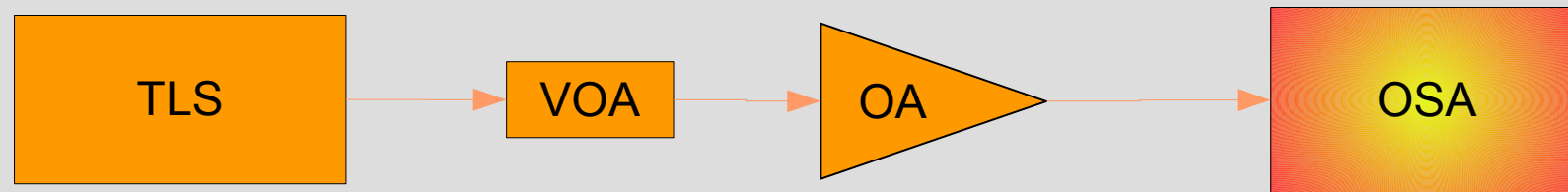


# Limiti del metodo ISS (II)

- Per segnali ad elevata bit rate, in piccola parte il 10 Gb/s ma soprattutto il 40 Gb/s, la banda del segnale è maggiore della RBW di 0,1 nm che comunemente si usa.
- Bisogna quindi misurare la potenza di picco su una banda sufficientemente grande da includere tutto il segnale e poi riportare la misura sulla banda convenzionale di 0,1 nm
- In sistemi a spaziatura strettissima (per es. 25 GHz per un 10 Gb/s) questo va tenuto in considerazione, soprattutto qualora si vogliano implementare programmi di misura automatizzati

# La misura dell'OSNR al variare della lunghezza d'onda

- Il setup di misura è il seguente



- Si lavora alle due lunghezze d'onda fisse già considerate, dove si è già misurata la potenza in ingresso
- Sull'OSA si misura per ogni lunghezza d'onda la potenza di picco e il rumore ai lati del picco.
- Utilizzando le formule precedenti si trova l'OSNR, valutando l'eventuale impatto del rumore del TLS
- Si ripete la misura al variare della potenza in ingresso



# La Figura di Rumore di un EDFA

- La figura di rumore (*Noise Figure*, NF) è il rapporto tra l'OSNR all'ingresso e quello all'uscita

$$NF = \frac{OSNR_{inp}}{OSNR_{out}}$$

- Ma

$$OSNR = \frac{S}{NF \cdot h \nu \cdot RBW}$$

- Considerando che  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  j·s, che in banda C  $\nu = 193$  Thz, e che  $RBW = 0,1$  nm, e passando ai dB/dBm otteniamo

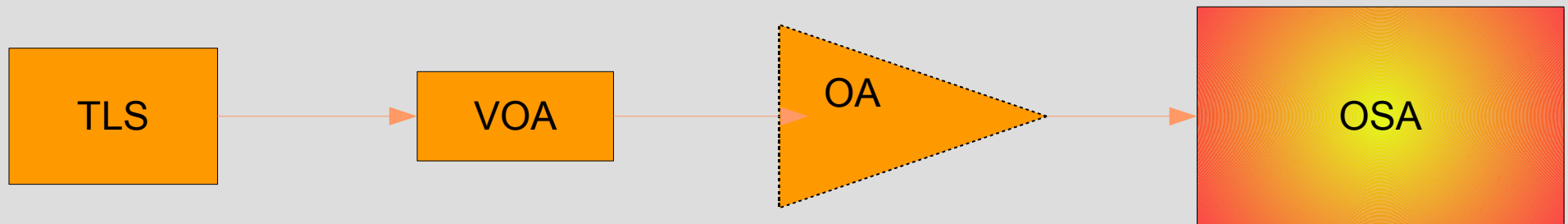
$$NF_{dB} = 58_{su 0,1 \text{ nm}} + P_{i(dBm)} - OSNR_{out(dB)}$$

# La Misura della NF di un EDFA

- Utilizzando i dati relativi alla misura dell'OSNR, ricavare la NF dell'EDFA in uso per le due lunghezze d'onda fisse considerate al variare della potenza in ingresso.
- Considerare se vi può essere una relazione lineare tra NF e OSNR calcolando il coefficiente di correlazione

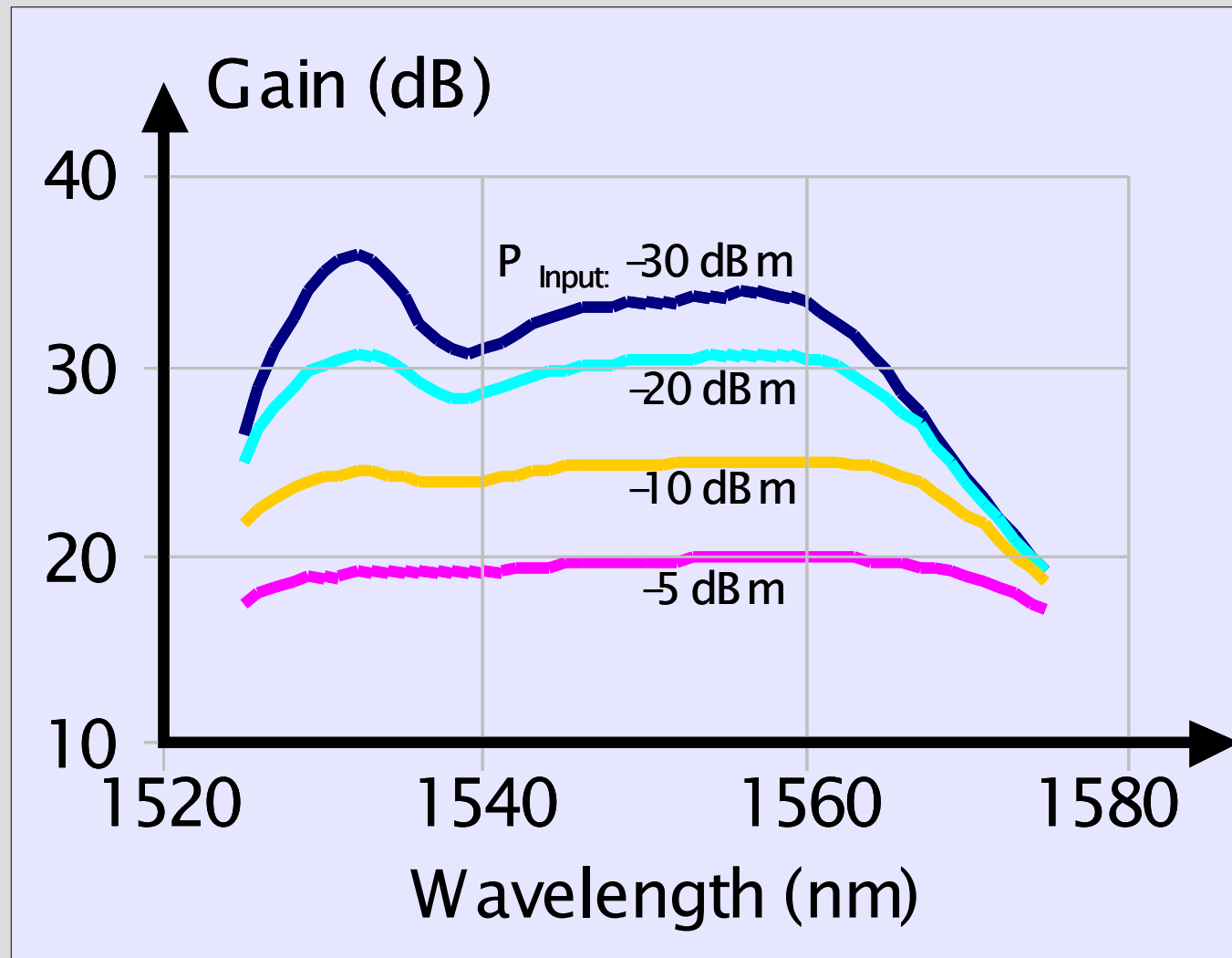
# Il Profilo di Guadagno (I)

- Come sappiamo, il guadagno di un EDFA dipende dalla lunghezza d'onda, e dalla potenza in ingresso.
- Utilizzando un TLS, un VOA e un OSA è facile caratterizzare questo parametro.



# Il Profilo di Guadagno (II)

- Otteniamo un risultato di questo genere



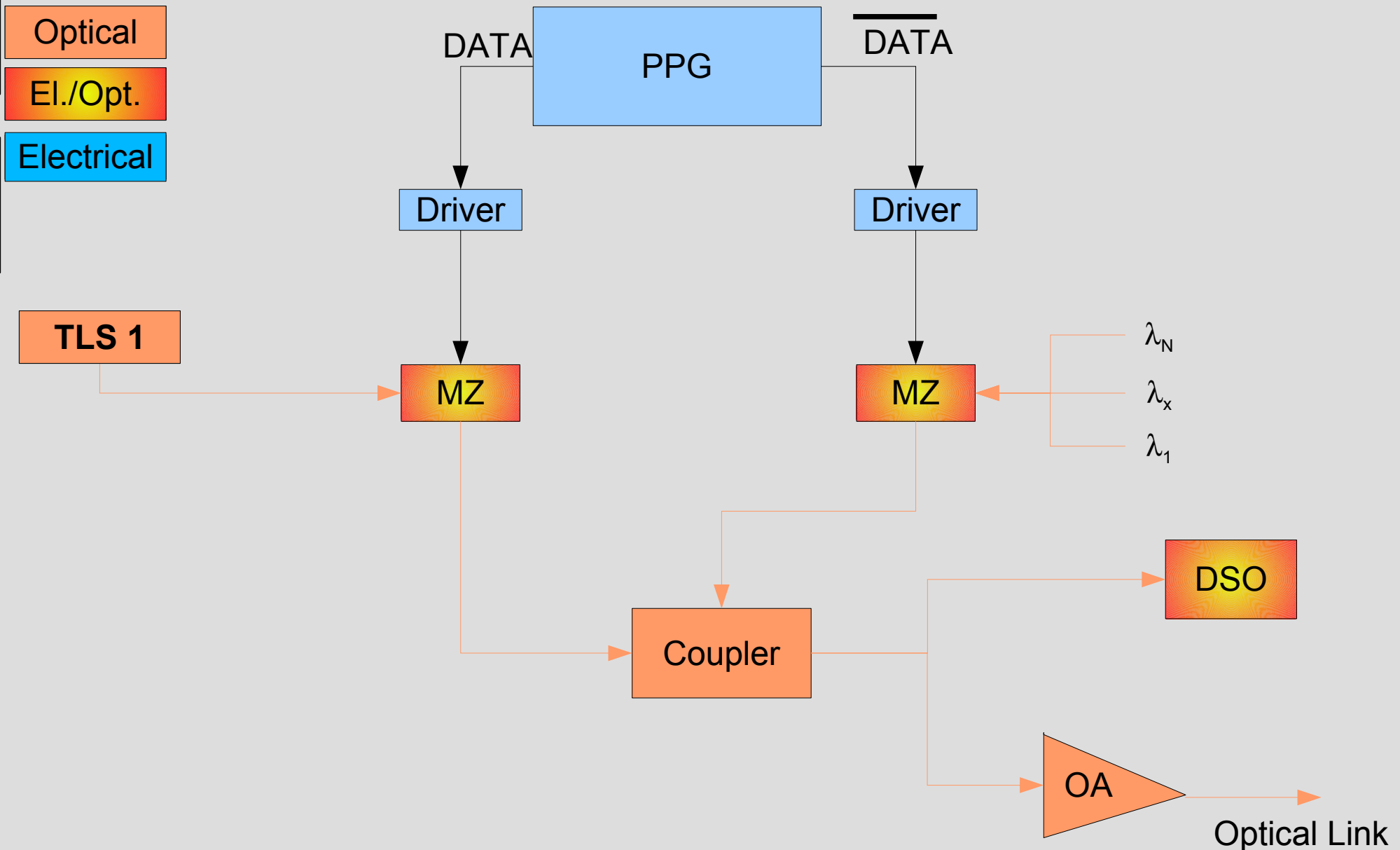
# Struttura del Corso (III)

- **Analisi teorica esperienze laboratorio**
  - 1) Modulazione AM
  - 2) Modulazioni digitali in banda base
  - 3) Caratterizzazione di Dispositivi per l'Optoelettronica
  - 4) Caratterizzazione di Fibre Ottiche
  - 5) Caratterizzazione di EDFA
  - 6) **Misura di BER in sistemi ottici ottici amplificati multicanale**

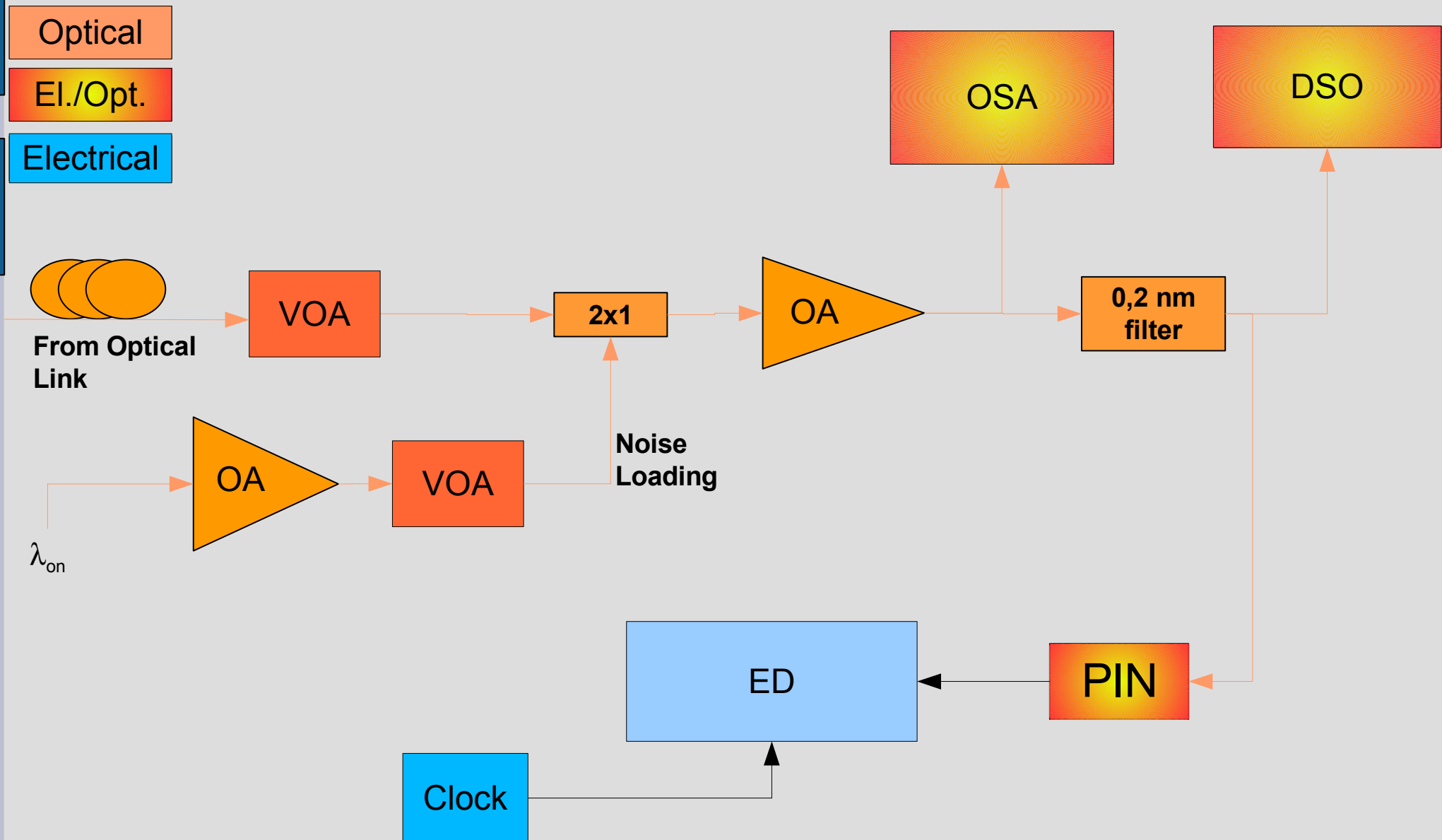
# Misura di BER in sistemi ottici amplificati

- Il Tasso di errore sul bit (*Bit Error Rate*, BER) è il parametro fondamentale su cui si misurano le prestazioni di un sistema di telecomunicazioni.
- In un sistema ottico amplificato con ricevitore PIN, il BER dipende dall'OSNR, in presenza di soli effetti lineari.
- Scopo di questa esperienza sono
  - Misura del BER in un sistema a 10 Gb/s in configurazione *back-to-back*
  - Valutazioni di penalty di trasmissione

# Configurazione del Trasmettitore



# Configurazione del Ricevitore





# BER vs. OSNR (I)

- In un sistema amplificato, la relazione che esprime il BER in funzione dell'OSNR è

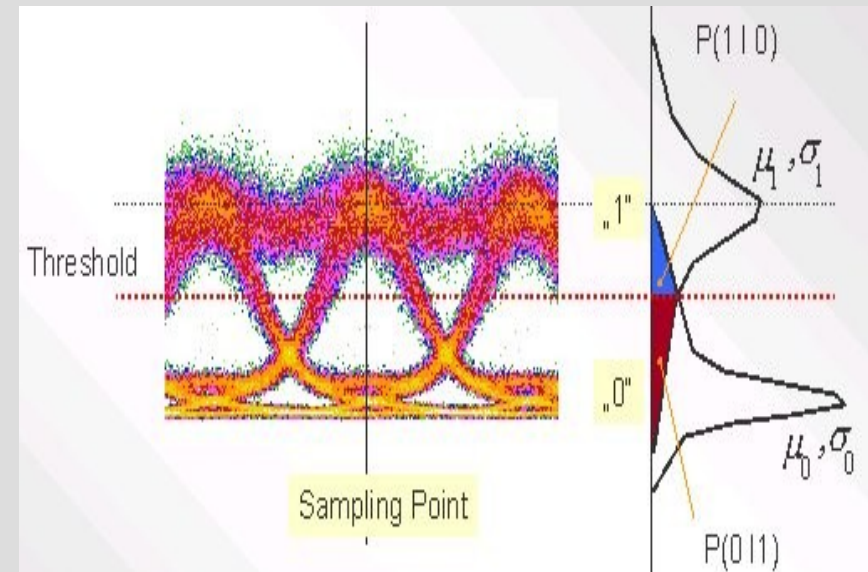
$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{2 \cdot OSNR \cdot M}{\sqrt{4 \cdot OSNR + 1 + 1}}$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot Q}}$$

dove  $M = \sqrt{\frac{B_o}{B_e}}$

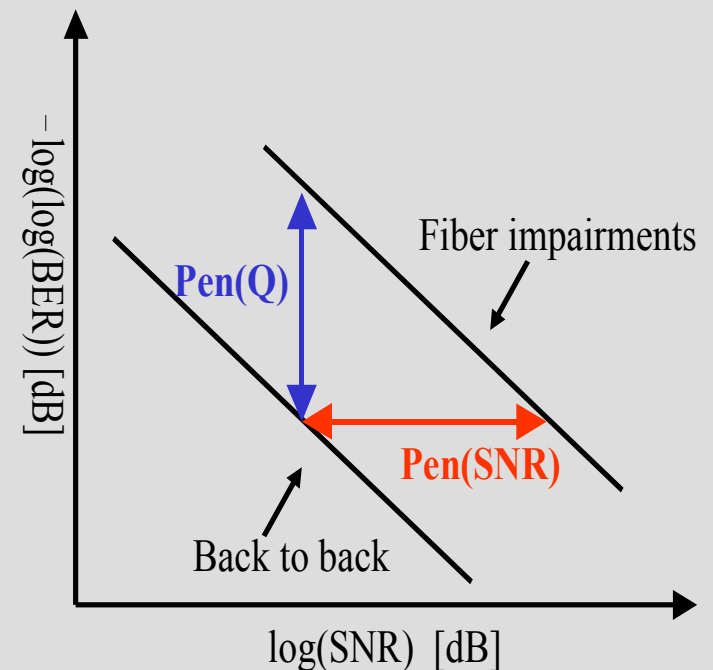
$B_o$ : banda ottica del filtro

$B_e$ : banda elettrica del filtro



# OSNR e Q-Penalty

- La relazione precedente vale in caso di occhio perfettamente aperto (condizione di *back-to-back*)
- Gli *impairments* hardware o di trasmissione peggiorano le prestazioni rispetto al caso teorico
- OSNR-Penalty: di quanto devo incrementare l'OSNR per ottenere lo stesso Q/BER del back-to-back
- Q-Penalty: quanto Q perdo passando dal back-to-back al sistema reale



# Straight-Line Ber Plot (I)

- Calcolare le penalty può essere molto complicato, ma se le curve di BER sono delle rette la semplificazione è notevole
- Si sfrutta il fatto che

$$Q \approx \sqrt{OSNR}; \quad BER \approx e^{\frac{-Q^2}{2}} = e^{\frac{-OSNR}{2}}$$

- Si prende il  $\log_{10}$  di ambo i membri e si ottiene

$$\log(BER) = -\frac{\log(e)}{2} \cdot OSNR_{lin}$$

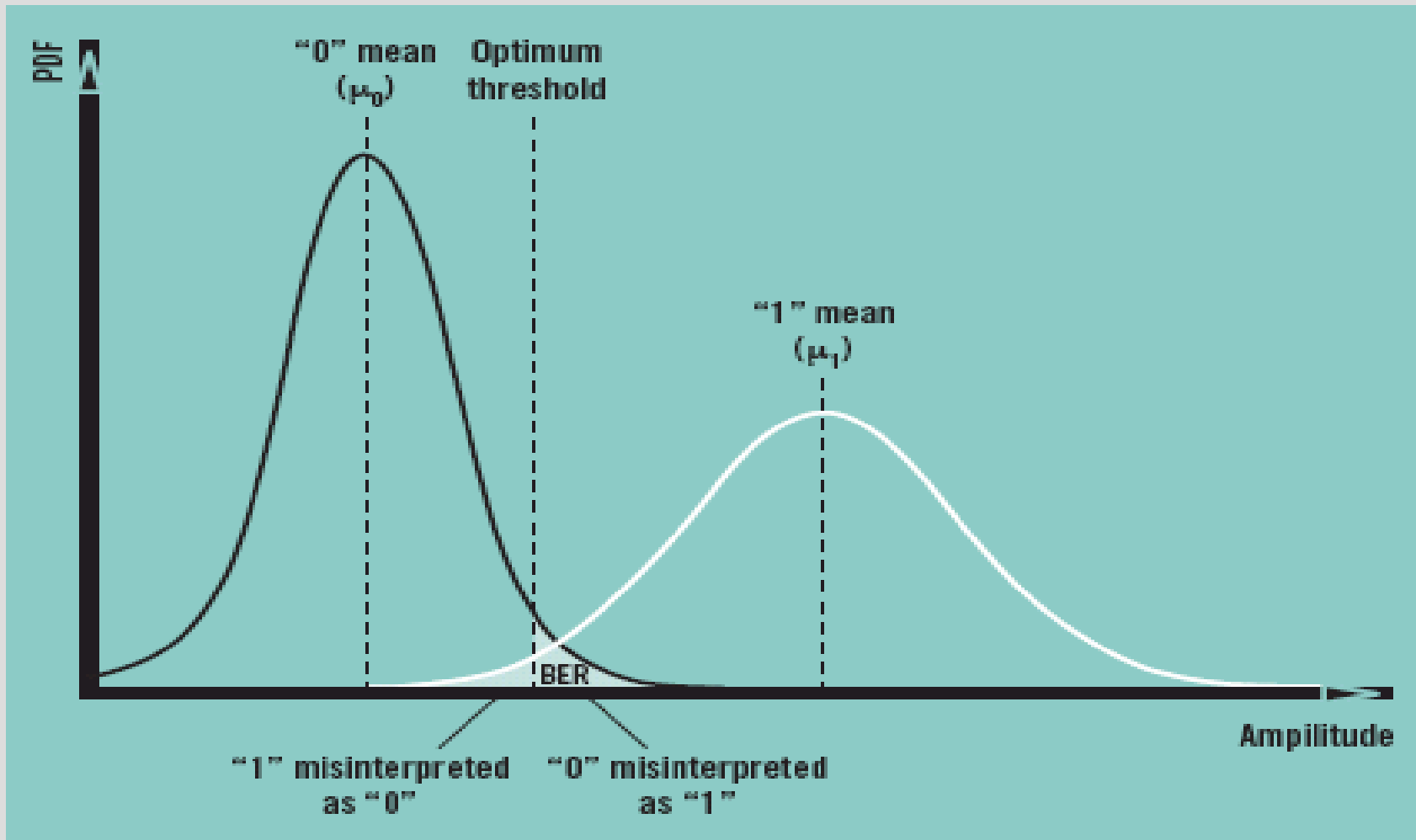
- Quindi il log del BER è lineare in OSNR, quando l'OSNR è espresso in lineare

# Straight-Line Ber Plot (II)

- Se invece si vuole esprimere l'OSNR in dB, si deve prendere il doppio logaritmo del BER
- Si ottiene

$$-\log[-\log(BER)] = \frac{OSNR_{dB}}{10} + cost.$$

# La misura del BER (I)

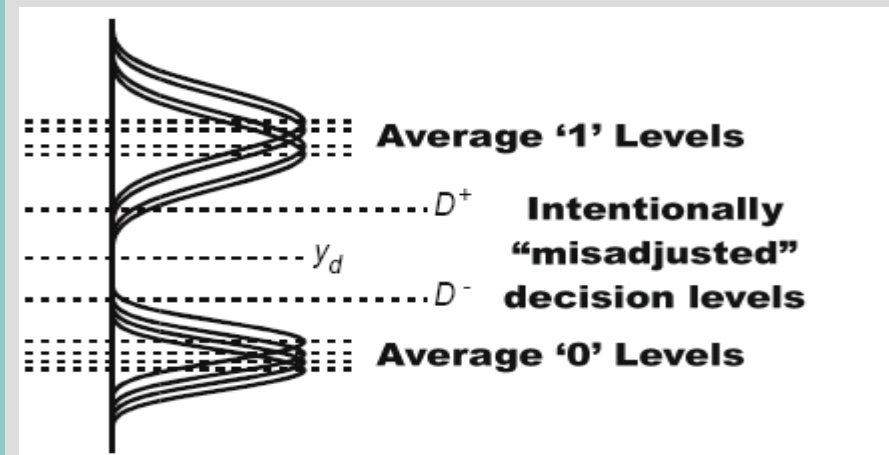
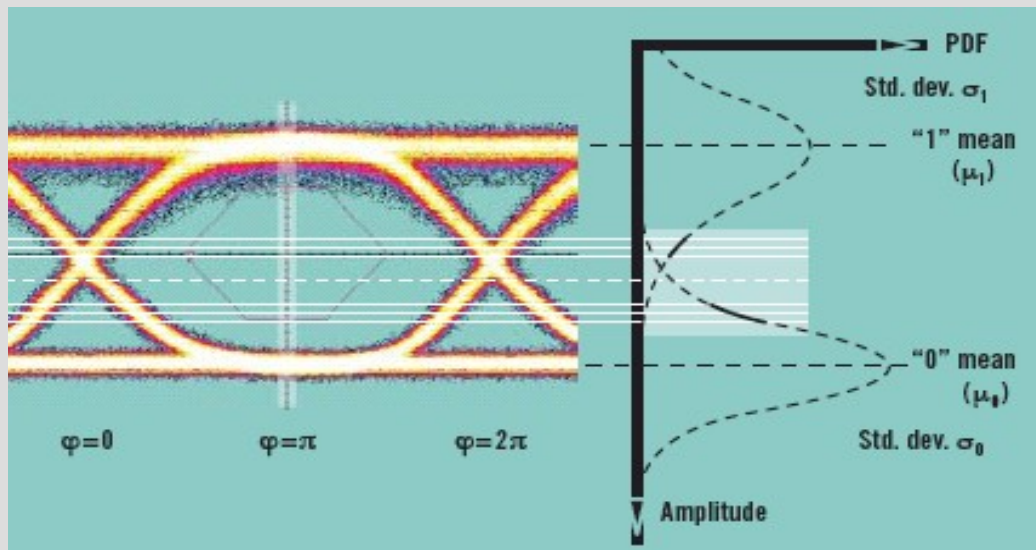


# La misura del BER (II)

- Determinare la soglia ottima e l'istante ottimo di campionamento operando sui comandi opportuni dell'Error Detector.
- In assenza di fenomeni di trasmissione, l'istante di campionamento è approssimativamente costante, mentre la soglia ottima dipende dall'OSNR: tanto più questo è basso tanto più la soglia ottima si avvicina al valor medio.
- Quanto devo aspettare per avere una corretta misura del BER? Una buona regola prevede di utilizzare almeno 10 errori: con 100 errori la confidenza è del 95%, ma per un  $\text{BER}=10^{-12}$  a 10 Gb/s devo aspettare 3 ore!!!

# La Misura di Q (I)

- Per misurare BER molto bassi senza aspettare ere geologiche si utilizza la misura di Q
- Si tratta di variare la soglia e registrare il BER corrispondente
- Questo permette di ricostruire le code delle gaussiane d'errore



# La Misura di Q (II)

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

- Per la soglia sugli “1” abbiamo

$$BER^1 = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - D^+}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right)$$

$$4 \cdot BER = \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - D^+}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right)$$

$$D^+ = \mu_1 - \sqrt{2} \cdot \sigma_1 \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(4 \cdot BER)$$

dove con  $\operatorname{erfc}^{-1}(x)$  s'intende la funzione inversa di  $\operatorname{erfc}(x)$

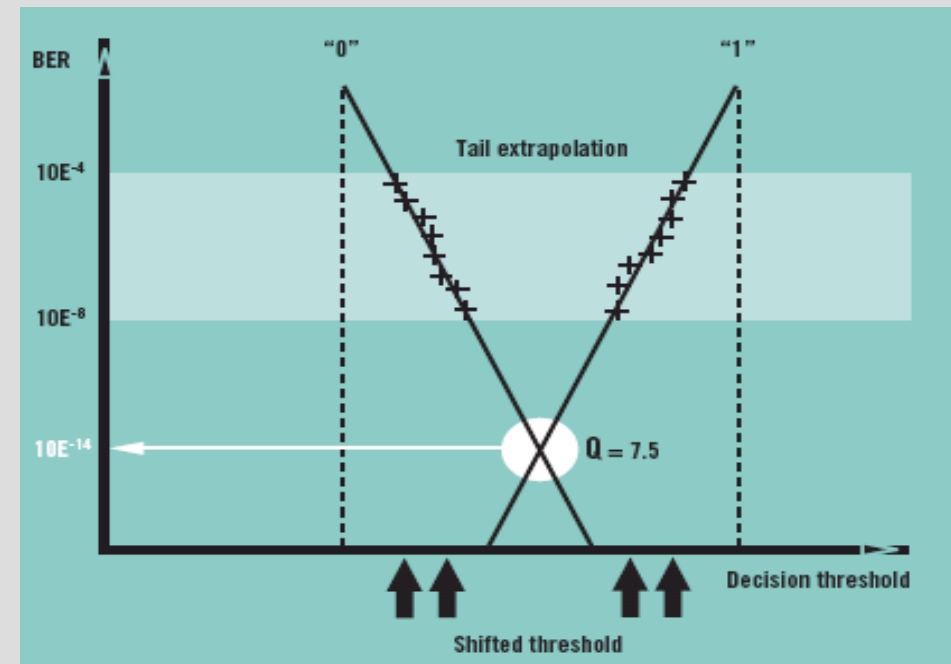


# La Misura di Q (III)

- Analogamente, per la soglia sugli "0" abbiamo  

$$D^- = \mu_0 + \sqrt{2} \cdot \sigma_0 \cdot \text{erfc}^{-1}(4 \cdot \text{BER})$$
- Quindi, la soglia di decisione dipende linearmente da  $f(\text{BER})$ , con intercetta  $\mu_i$  e pendenza  $\sqrt{2} \cdot \sigma_i$
- Interpolando i dati con un fit lineare possiamo calcolare, ad es. con uno script Matlab, il Q e la soglia ottima

$$D_{\text{opt}} = \frac{\mu_1 \cdot \sigma_0 + \mu_0 \cdot \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_0}$$



# La Misura di Q (IV)

- Nel caso non fosse disponibile una routine matematica per il calcolo di  $erfc^{-1}(x)$ , si procede così:

$$BER^1 = \frac{1}{4} erfc \left( \frac{\mu_1 - D^+}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right)$$

$$\log(4 \cdot BER) = \log \left[ erfc \left( \frac{\mu_1 - D^+}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right) \right]$$

$$D^+ = \mu_1 - \sigma_1 \cdot f[\log(4 \cdot BER)] \quad \text{dove } f(x) = \sqrt{2} [\log(erfc(x))]^{-1}$$

- Una buona approssimazione per  $erfc^{-1}(x)$ , valida per  $x > 3$ , è

$$erfc(x) \approx \frac{x^2}{4,6} + \ln x + 0,4$$

# La Misura di $Q$ (V)

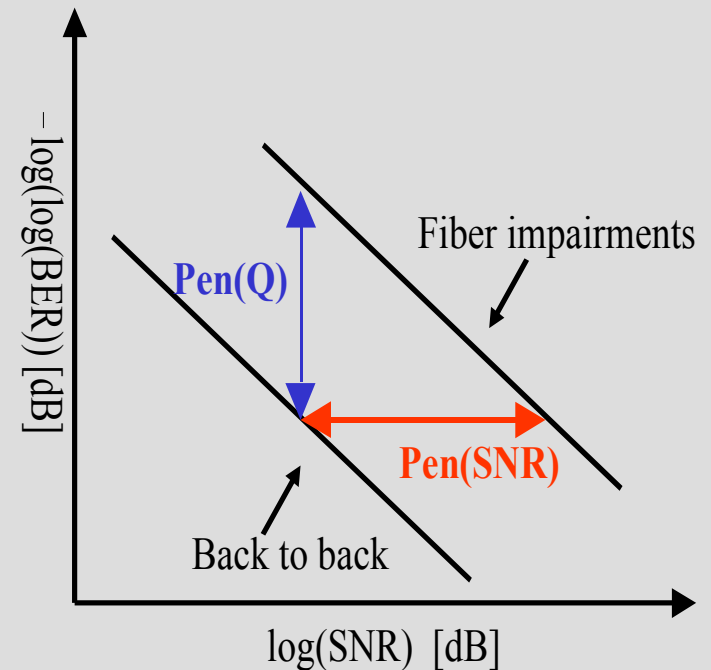
- Si noti che calcolato il  $Q$  e la soglia ottima, su questi valori vanno calcolati le opportune incertezze, utilizzando la propagazione degli errori
- Non si dimentichi di riportare la banda su cui si misura l'OSNR!!!!
- I docenti sono a completa disposizione per eventuali chiarimenti su come effettuare un opportuno *processing* dei dati su quest'ultima parte

# Misure da effettuare (I)

- Caratterizzazione back-to-back: Misure di Q/BER al variare dell'OSNR
- Misure di penalty ancora da definire, ma che potrebbero essere
  - Penalty di Dispersione
  - Penalty di Crosstalk
  - Penalty di SMP
  - Penalty di Filtraggio
  - ...

# Misure da effettuare (II)

- Le penalty vanno valutate **analiticamente**, fittando con una retta dei minimi quadrati il BER in funzione dell'OSNR, sia in *back-to-back* che in trasmissione, e misurando la distanza in Q e in OSNR a un livello di BER di  $10^{-9}$ .
- Come detto, le curve di BER sono rette se si tracciano come
  - $-\log(\text{BER})$  vs  $\text{OSNR}_{\text{lin}}$
  - $-\log[\log(\text{BER})]$  vs.  $\text{OSNR}_{\text{dB}}$



# Misure in Back-to-Back: Operazioni da compiere (I)

- Condizioni generali
  - Bit Rate: 10 Gb/s
  - PRBS= $2^{23}-1$
  - Numero minimo di errori da contare: 10.
- Mettersi a un OSNR che dia  $BER=10^{-4}$ .
- Premere il pulsante autosest sul ricevitore del BER e minimizzare il BER agendo sulla soglia e sull'istante di campionamento.
- Misurare BER.
- Aumentare OSNR di ca. 1 dB.
- Procedere come nei punti precedenti sino a un BER di  $10^{-8}$  compreso.

# Misure in Back-to-Back: Operazioni da compiere (II)

- Per  $\text{BER} < 10^{-8}$  la soglia ottima non è facilmente determinabile.
- Anticipare il tempo di campionamento fino ad avere un BER più alto (ca.  $10^{-6}$ ), e minimizzare la soglia.
- Ripetere la stessa procedura ritardando il tempo di campionamento.
- La soglia è la media dei due valori.

# Misure in Back-to-Back: Operazioni da compiere (III)

- Per  $\text{BER} < 10^{-11}$  il tempo di attesa diventa troppo lungo. Utilizzare il metodo di Bergano.
- Porsi all'OSNR più alto possibile.
- Spostare la soglia verso gli "1" in modo che BER ca.  $10^{-6}$ .
- Misurare coppie soglia BER fino a un BER di circa  $10^{-10}$ .
- Procedere analogamente spostando la soglia verso gli "0".
- Ripetere la stessa procedura per altri due valori di OSNR intermedi tra il più alto possibile e quello per cui  $\text{BER} = 10^{-11}$ .



# Misure con fibra:

## Operazioni da compiere (III)

- Ripetere le misure fatte in precedenza inserendo la fibra per gli stessi valori di OSNR con un valore di potenza di lancio di 0 dBm

# Guida generale all'esperienze

- La relazione dovrà contenere:
  - Una breve descrizione della teoria alla base della misura.
  - Una descrizione del setup sperimentale.
  - Una descrizione accurata dell'esperimento, includente:
    - tutte le motivazioni che conducono alle necessarie scelte procedurali;
    - tutte le strategie messe in atto per ridurre gli errori sperimentali associati alla misura.
  - I dati grezzi sotto forma tabellare e/o grafica.
  - Gli errori associati a tutta la strumentazione coinvolta, che verranno forniti di volta in volta in laboratorio.
  - L'analisi dei dati.
  - La presentazione dei risultati finali.