

# Tecnologie della trasmissione ottica

## Appunti schematici personali per la preparazione all'esame

### :: Seconda Parte

Su qua c'è praticamente tutto quello che serve sapere per il secondo compito. È fatto in maniera molto schematica serve per dare una traccia di cosa studiare.

Per ovvie ragioni, tempo e difficoltà di importazione grafica, ho omesso le varie tipologie di cavi sottomarini: comunque sono molto semplici, direi che basta ricordarsi le varie strutture e le profondità dove vengono usati.

### » AMPLIFICATORI RAMAN

Non lineare. Dipende dalla  $P_{\text{ottica}}$  in fibra e più ci si propaga più l'effetto aumenta. Ci vuole una pompa con alta potenza. Arriva alta  $P$  (=tanti fotoni) » si sposta la  $\lambda$  generando un nuovo fascio (SRS) ad una  $f$  più bassa di 13,2 THz cioè 100nm.

Quindi funziona ovunque, basta prendere una pompa 13,2THz in + del fascio da amplificare

Se uso pompe a diverse  $\lambda$  amplifico più segnali.

Meglio contropropagante così il segnale resta basso e non ho non linearità

**Vantaggi:** amplificazione distribuita sulla linea » meno non linearità (perché  $P$  non aumenta di botto)

Meno rumore di EDFA (no ASE), al più scattering Raman Spontaneo, ma non è niente rispetto ad ASE. Posso usare Raman in tutte le finestre.

Siccome Raman ha NF molto bassa ma  $G$  molto minori rispetto EDFA » usi insieme (EDFA meno potenti = minore ASE e meno non linearità perché ho poca  $P$  in fibra più un Raman contropropagante)

### » LONG-HAUL

**Sistemi DWDM:** oggi permettono grandi bitrate e lunghe tratte senza rigeneratori. Un tempo un singolo canale ogni 50 km andava convertito in elettrico, rigenerato, riconvertito. Oggi con sistemi WDM si può fare tutto in ottico e con tante  $\lambda$  insieme.

**ASE:** il problema dei lunghi tragitti è che ASE si accumula

**OSNR**( $P_{\text{canale ottico}} / P_{\text{ase}}$  in una banda (in genere 0,1 o 0,2 nm)): per ogni sistema c'è un target OSNR che è l'OSNR tale per cui ho le prestazioni migliori del sistema e riesco ad avere error free (BER  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$ ); inoltre si deve tener conto di futuri lavori sul sistema (aumento bitrate...) e lasciare un margine sufficiente. Se  $L$  aumenta - ho più AO - OSNR finale diminuisce.

Per risolvere il limite della NF degli EDFA (max 3dB) si usa anche l'ampl.Raman controprop.(così eviti l'attenuazione nella span).Ho una  $NF_{\text{equivalente}}$  che è la NF che avrebbe un ampl.ottico posto a fine tratta e che produce lo stesso  $G$  e lo stesso contributo ASE (è un valore ipotetico perché poi tu amplifichi su tutta la tratta e non solo sulla fine).

L'uso di Raman+EDFA consente di usare meno amplificatori e di risparmiare. In più nei sistemi DWDM (dove ho molti canali fitti) ho molte non linearità » Raman consente  $P_{\text{OUT}}$  più basse » - non linearità

**Power Management:** siccome i canali possono variare la loro potenza (causa magari EDFA) il BER cambia tra i canali e nascono non linearità » si usa una *pre-enfasi* (o filtri di equalizzazioni che hanno un'attenuazione pari all'inverso del valore del  $G$  o GFF) in modo da modificare lo

spettro iniziale affinché tutti i canali in uscita abbiano OSNR uniforme. Si usano reticoli che attorno alle  $\lambda$  di 1550 tagliano un po' di potenza.

**DISPERSIONE CROMATICA:** è il limite maggiore per la trasmissione in fibra ottica. Controllando bene la D è possibile ridurre le non linearità, perché le non linearità (tipo XPM o FWM) sono forti quando i canali propagano in fase l'uno con l'altro. La D, invece, fa propagare i bit con velocità diverse e, se controllata, può minimizzare questi problemi.

Ci sono vari modi di compensare D: sottocompensazione, compensazione normale, sovracompensazione. Il migliore è la normale, ma in termini di prestazioni vanno meglio gli altri due perché lasciano i canali un po' distorti » meno non linearità. Inoltre ogni canale WDM ha una  $D \neq$  e se compenso normale compenso al 100% solo i canali centrali, quelli laterali ovviamente saranno compensati o di più o di meno.

Per avere qualcosa di corretto per tutti (cioè su larga banda) devo controllare l'**RDS** che è inversamente proporz. a D. RDS (relative dispersion slope) = disp.slope/dispersion

**RDS** della fibra deve essere = a quello della DCF che compensa, altrimenti ho uno scostamento della D accumulata tra i vari canali. Più RDS è basso meglio compenso su larga banda.

SOLUZIONE: tratti ad alta D (cioè bassa RDS e niente non linearità) e tratti con DCF che compensano. Si usa solo nei sottomarini perché ho tratte uniformi. D locale alta, ma totale bassa.

**BER** (bit error rate): più è basso meglio è sistema, dipende dal degrado del segnale, da soglia errata, da clock sfasato, da SNR.

## » SISTEMI SOTTOMARINI

TERRA: 0 - 1000 Km; rete configurabile; impianti qualsiasi (anche preesistenti); brevi e semplici riparazioni; ambiente variabile.

MARINI: 0 - 9000 km; rete fissa; impianti nuovi fatti su misura; difficili e lunghe riparazioni; complessi da installare; ambiente stabile; vita di almeno 25 anni

**Ripetuti:** se hanno ampl. (alimentati da terra). Oltre i 400 km

**Non ripetuti:** niente ampl. Al massimo usi pompe ottiche per amplificare (sotto i 400 km)

**Rumore o potenze diverse:** equalizzi (pre-enfasi; filtri di equal.) e se alla fine arrivano ancora canali con diversi OSNR fai pre-enfasi al trasmettitore finché non gli hai tutti uguali.

**Dispersione cromatica.**

**Dispersione di polarizzazione (PMD):** le due componenti ortogonali in fibra si sfasano. Cause intrinseche: geometria fibra; estrinseche: perturbazioni meccaniche e termiche (pieghi, schiacci...)

**Effetti non lineari.**

## RIPETITORI

- Scegliere se pompare a 980nm (con meno corrente hai stessa  $P_{ottica}$  e a 980 raggiungi la NF limite di 3dB) o a 1480 (+ efficiente ed affidabile perché è stato il 1° usato); la NF dev'essere bassa <5.5dB; la curva di guadagno più piatta possibile (se no usi filtri GFF x rendere uniforme il guadagno).

-In futuro si potrebbe usare Raman che è uniforme, minore NF, ma consuma tanto di alimentazione.

-devono durare 25 anni e poter essere modificati da terra (es.poter variare  $P_{out}$ ). Serve una **Supervisione** che monitori temperatura,  $P_{IN}$ ,  $P_{OUT}$ ,  $I_{LASER}$ . Sulla terra dedichi un  $\lambda$  a ciò anche se serve un laser apposito a quella  $\lambda$  e sprechi della banda. Nei sottomarini i laser ci sono solo quelli di pompa, quindi il segnale SPV si trasmette come sovr modulazione sulle  $\lambda$  modulando i laser delle pompe.

- tutto deve essere fatto x durare 25 anni ed essere governabile dal segnale di supervisione.

**Alimentazione:** la corrente (sempre costante) passa nel rame del cavo e alimenta in serie i ripetitori. Quando arriva in fondo ritorna indietro. Ci sono sistemi di protezione in caso di rottura del cavo.

**Isolamento:** si può mettere una sola cassa (isolamento interno) in cui tutto viene protetto da polietilene messo in un contenitore ed è comodo perché basta un solo contenitore per resistere a trazione e pressione però è difficile la dissipazione e garantire l'ermeticità. L'isolamento ESTERNO, tutto il contenitore con dentro tutto viene ricoperto da polietilene (è difficile da fare, +grande, +costoso, +pesante). Rispetto all'altro qui se anche si buca l'acqua non entra dentro perché poi c'è la scatola. Però la cassa esterna non si deve corrodere se no non torna più su. Si usano acciai speciali o elementi in ferro sopra da fare corrodere al loro posto.

**Dissipazione termica:** elettronica scalda, metto alette di rame. In caso di sprofondamento in fanghi o sabbie è un guaio, posso solo minimizzare il calore.

**Presenza di H<sub>2</sub>:** aumenta l'attenuazione, si usano assorbitori chimici (Hydroget).

## » RETE METRO

Basse distanze - supporta protocolli ≠ perché collega rete trasporto con rete accesso - diversi servizi, ≠ bitrate, ≠  $\lambda$

Si basano su anelli di tipo SONET e SDH (dominio elettrico)

### **CARATTERISTICHE.**

- si usa la 2 fin. (1300nm) perché + diffusa e + economica e già cablata in città (il resto va in tutto in 3)

- D-WDM: molti canali (256) tutti fitti nella B di amplificazione degli EDFA ( $\Delta\lambda=0.8/0.4$  nm)

- Coarse WDM: pochi canali (8/16) su tutta la banda ( $\Delta\lambda=20$ nm): costo limitato, nn ho EDFA (ke costano), uso nelle reti metro che hanno tratti brevi e nn attenuo tanto.

Inoltre con nuove fibre LWPF riesco a trasmettere anche a 1400 (dove ho OH<sup>-</sup>) e riesco a coprire tutta la banda da 1260 a 1630nm.

- uso Modulazione Diretta: costa meno; moduli la corrente d'alimentazione del diodo laser. Questo crea variazioni di fase e propagandosi (causa D) generano Chirp (impulso s'allarga). Per sistemi >200Km ed a 10 Gb/s devo compensare la D perché inizio ad avere problemi. In 3fin potrei usare DCF (D<0), ma qui uso NDF che ha sempre D<0. Però la NDF varia da laser a laser, i quali variano con la temperatura (perché son quelli economici) quindi non avrei vantaggi ma costi in più perciò anche nella metro si usa DCF.

L<100 km ⇒ no EDFA, no DCF, uso C-WDM, mod.diretta, fibre normali ⇒ bassi costi

L>100 km ⇒ + tratte, EDFA, WDM classico, mod.diretta con chirp, se 2,5 Gb/s non serve compensare, se 10 Gb/s allora si

- poi ci sono anche non linearità come FWM, scattering raman...

### **LIMITI.**

- Rete trasporto potente-rete accesso vuole tanto (velocità, dati...), rete metro con tutte le conversioni ottico/elettriche. Fa da tappo "metro gap"

Soluzione: fare il più possibile in ottico (add/drop OADM invece di ADM, protezione con percorsi alternativi; amplif. ottici)

- cablare città costa (scavi, permessi) + ci vogliono tanti componenti e dispositivi

- problemi geografici + belle arti + a volte creo anelli (causa protezione) lunghi oltre 200km e inizio ad avere dispersione.

### **Futuro.**

Rendere più fitti i canali così in 1280-1630nm ne porto a migliaia; riuscire ad andare anche a 10 Gb/s senza compensare, rendere le reti più economiche, usare raman così amplifico ovunque e costa meno

## » RETE ACCESSO

Ce ne sono di tanti tipi, al momento principalmente quelle telefonica e televisiva via cavo. Oggi con sviluppo "banda larga" serve qualcosa in più.

**Rete telefonica:** connessioni punto-punto tra end-users (case) e central office. Si fanno con doppini lunghi 4/7 km. Tra central office e utente ci sono centrali locali intermedie. Va bene per voce, ma è limitata x servizi larga banda che spremono al max il doppino. Le DSL si riescono ad avere grazie ad ottime tecniche di processing del segnale.

HDSL (2 Mb/s  $\leftrightarrow$ ) - ADSL (6 Mb/s  $\rightarrow$  384 kb/s  $\leftarrow$ ) - VDSL (20 Mb/s  $\rightarrow$  max 200m)

**Rete TV:** coassiali, con molti amplificatori, unidirezionali... non richiede molta affidabilità

**Fibre - Coax (Hfc):** centrale - fibra monomodo (posso fare distanze > e usare/o nn usare pochi amplificatori) - nodo locale - coax - utenti.

Si usa la tecnica SCM (subcarrier multiplexing) in cui il segnale distribuito su molte subportanti viene mixato e usato per modulare il laser. La rete è bidirezionale e l'utente ha un modem per interagire con la rete.

**Fibre:** tutto in ottico fino all'ONU (optical network unit) che è la terminazione ottica (condominiale o in casa) poi uno decide come continuare.

In questo caso ogni utente ha una connessione dedicata mentre con HFC era tutto mux insieme (ed era il limite). Dall'ONU all'end-user si usa coax, oppure doppino (tanto è max 50m e va bene anche per VDSL), o fibra multimodo MMF (economiche, non richiedono interfacce particolari, ideali per LAN) o fibre di plastica (+ semplici e economiche) o fibre monomodo SMF (migliori ma costose per questioni di giunti raffinati).

**Rete ottica passiva (PON):** è tutto ottico compresi mux e op-amp. È trasparente xkè non fa nessuna conversione optoelettronica, indi ampia banda. Rete affidabile con poca manutenzione. Costi elevati xkè devi usare SMF, tutto in WDM, filtri e amplif. tutti ottici.

## » FEC (forward error correction)

Serve per aumentare capacità (bitrate o numero di canali) mantenendo lo stesso OSNR. Correzione degli errori su principio "ridondanza" cioè codice (n,k) k di informazione + (n-k) di parità.

L'utilizzo del FEC consente di avere un guadagno di codifica detto NEGC (G netto equivalente di codifica).

Il FEC si mette fuori banda perché se o lo spazio sarebbe poco e avrei un codice debole.

**Codice Reed-Solomon:** usa 16 bit in +; ha NEGC  $\approx$  6dB » un rate > del 6,7% »  $Q \approx 11$ dB (x e. free)

Guadagni 6 dB in Q e » in OSNR » posso quadruplicare la lunghezza di collegamento

**Codice R-S concatenato** NEGC  $\approx$  8,5 dB » espansione di banda del 22% »  $Q \approx 9$ dB

**Turbo codice** NEGC  $\approx$  10dB » espansione < del 25% »  $Q \approx 7$  dB

Usa la decodifica soft (che è iterativa e scandisce più volte il segnale in orizzontale e verticale considerando i bit disposti in una matrice).

## » Formule

**Df** =  $-(c/\lambda^2) * d\lambda$

Prima 820 - seconda 1300 (D=0) poi 1550 nm (disp.anomala, min assoluto di attenuazione)

**BER** =  $p(1)p(0/1) + p(0)p(1/0)$

**BER** =  $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\text{SNR}}/\sqrt{2})$  oppure metti  $Q = \sqrt{\text{SNR}}$ . Se vale p(0) e p(1) gaussiane, tx OOK, equa distr. di 1 e 0

**OSNR**= Pcanale ottico/ P<sub>ase</sub> in una banda (in genere 0,1 o 0,2 nm)

Se lunghezza sistema aumenta, ho più AO, OSNR finale diminuisce. OSNR aumenta se +P<sub>out</sub> (ma + nn lin.), -NF (ma NF bassa costa e EDFA max 3dB), -span (ma+AO), meno perdite(=span+corte)

Ogni AO introduce:  $P_{ASE} = 2 \cdot h\nu \cdot \Delta\nu \cdot n_{SP} \cdot (G-1)$  per G elevati NF di ogni AO=  $2n_{SP}$   
h=plank;  $\nu=f_{OTTICA}$ ;  $\Delta\nu$ =banda ottica (nm);  $n_{SP}$ = fattore di emissione spontanea

**OSNR<sub>dB</sub>**= $P_{CH}-P_{ASE}=[P_{OUT}-10\log(N_{CH})]-[L_{SPAN}+NF+10\log(N_{AMPL})+10\log(h\nu \cdot \Delta\nu)]$

BER  $10^{-9}$  dà Q=6=15.56 dB - BER  $10^{-12}$  dà Q=7=16.9 dB

$Q_{dB}=20\log Q \approx OSNR_{dB}+3$  -  $Q = \nu(P_{CH}/P_{ASE}) \cdot \nu(B_o/B_e) = \nu OSNR \cdot \nu(B_o/B_e)$  con  $B_o=2B_e$

**D cromatica:**  $L_D$  =lungh. di dispersione=lungh.max prima ke il bit sia completamente deformato

$L_D=1/(B \cdot D \cdot \Delta\lambda)$  [km] con B=bitrate=1/T<sub>BIT</sub> [Tb/s];  $\Delta\lambda$ =largh.spettrale [nm]

Se uso modulazione esterna  $L_D \approx 10^5/(D \cdot B^2)$  con B in Gb/s però!

### ASE

$P_{ASE} = n_{SP}(G-1)$  dove  $n_{SP}$ (fattore di inversione popolazione)= popolazione su H ( $n_H$ ) / ( $n_H - n_L$ ) tanto più tende ad 1 tanto più l'inversione è venuta bene e tutti gli L son andati su H.

$P_{RX} = P_{TX} + N P_{ASE}$

**NF**= SNR<sub>in</sub> / SNR<sub>out</sub> [dB] è dovuta ad ASE  $NF \approx 2n_{SP}$  (limite teorico è 3dB)

**Saturazione:** in uscita ho P equamente distribuita:  $P_{OUT \text{ a CANALE}} = P_{SATURA} - 10 \log(N_{canali})$

**Guadagno di codifica**  $NEGC_{dB} = 10\log(Q_{OUT}^2) - 10\log(Q_{IN}^2) - 10\log(n/k)$

dove le Q sono quelle prima e dopo l'applicazione del codice

$10\log(h\nu \cdot \Delta\nu) = -58dBm$  (se  $\Delta\nu=0,1$  nm) oppure  $-55dBm$  se  $\Delta\nu=0,2nm$