

# Appunti di Comunicazioni elettriche

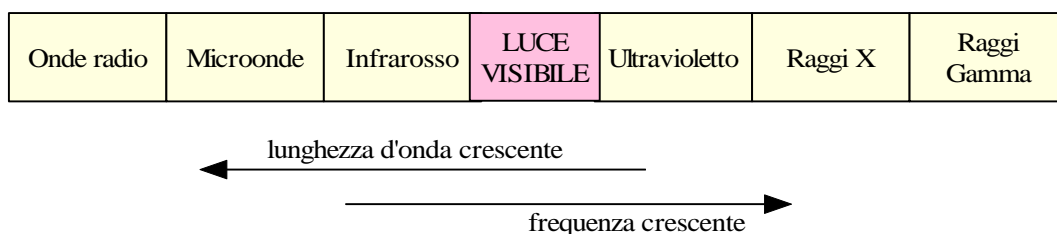
## Trasmissione numerica su fibre ottiche

Introduzione .....	1
Dispersione modale: fibre multimodali e monomodali.....	4
Dispersione cromatica .....	6
Dispersione spaziale .....	6
Attenuazione .....	6
Schema di un sistema di trasmissione numerica in fibra ottica.....	8
<i>Richiami sulla luce coerente</i> .....	8
<i>Richiami storici: laser e maser</i> .....	10

### INTRODUZIONE

In questi paragrafi diamo dei cenni ai sistemi di trasmissione che operano nel campo di frequenze del visibile e dell'infrarosso.

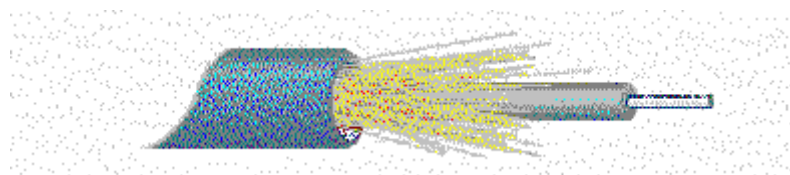
Ricordiamo, a questo proposito, che si definisce **spettro delle radiazioni elettromagnetiche** l'insieme delle radiazioni caratterizzate da tutte le possibili **lunghezze d'onda** (simbolo:  $\lambda$ ). Tale spettro copre un intervallo di lunghezze d'onda molto esteso, approssimativamente da  $10^{-11}$  cm (valore minimo) e  $10^4$  cm (valore massimo). A seconda dei valori delle lunghezze d'onda, si distinguono alcuni **tipi di radiazioni**, indicate nella figura seguente:



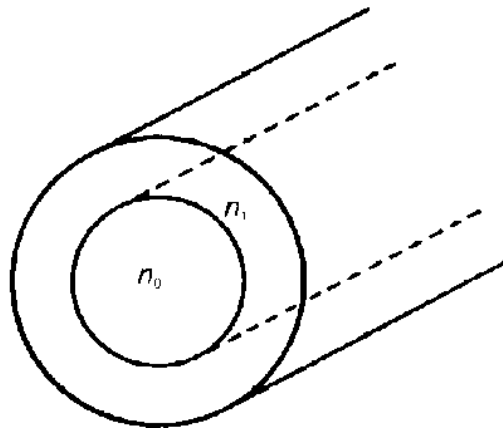
L'**infrarosso** è la regione dello spettro elettromagnetico situata tra la regione della *luce visibile* e quella delle *microonde*, con lunghezza d'onda compresa tra **0.75 $\mu$ m** e **1mm** (le corrispondenti frequenze vanno da 300 GHz a 400 THz).

Nonostante sia possibile usare, su brevi tratte, la trasmissione irradiata, il mezzo di gran lunga più attraente, per l'uso di queste frequenze, è la **fibra ottica**, che lavora a frequenze dell'ordine di **10<sup>14</sup> Hz** (100 THz). Questo valore di frequenza indica che il cavo in fibra ottica utilizza, per trasportare i dati, **segnali luminosi**, eliminando così il problema dell'interferenza elettrica; questo lo rende il mezzo trasmissivo ideale in ambienti che hanno un'elevata interferenza elettrica.

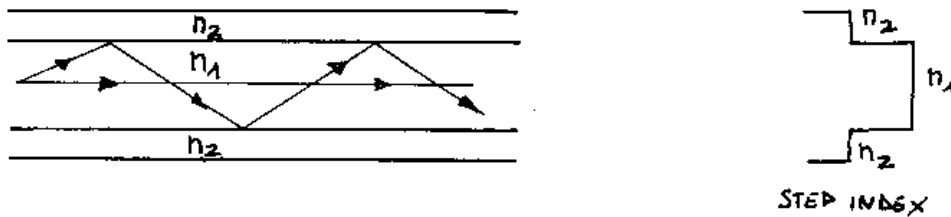
La fibra ottica è una guida d'onda dielettrica. Essa consiste infatti di una parte centrale in vetro circondata da parecchi strati di materiali protettivi:



Nel caso più semplice, possiamo considerare un cilindro centrale, detto **nucleo** (a sezione circolare), di materiale dielettrico con **indice di rifrazione**  $n_0$ , rivestito da un involucro dielettrico, detto **mantello**, coassiale con il nucleo, con indice di rifrazione  $n_1$  minore del precedente:

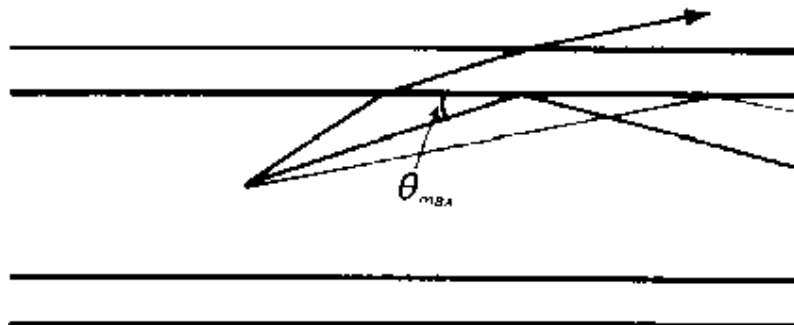


In particolare, quella indicata in figura è una **fibra step-index**, nella quale cioè le variazioni di indice di rifrazione dal nucleo al mantello sono brusche:

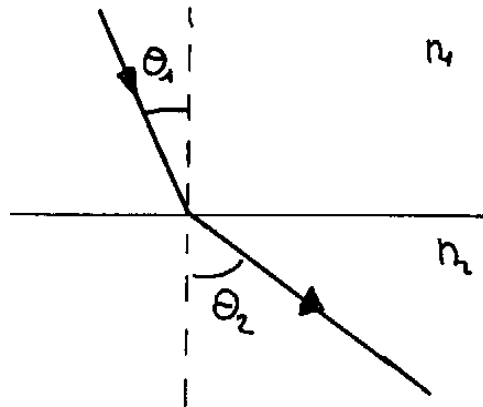


E' possibile dimostrare, usando le equazioni del campo elettromagnetico, che la differenza dei valori di indice di rifrazione, che di solito si esprime mediante la cosiddetta **apertura numerica**, data da  $\Delta = \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$ , è essenziale se si vuole assicurare la propagazione nel nucleo dei **modi guidati**. Per ciascuno di questi modi, esiste una **frequenza critica** (che dipende sia dalla geometria sia dall'apertura numerica  $D$ ) al di sotto della quale il modo non può propagarsi. Fa eccezione, a questa regola, solo il cosiddetto *modo fondamentale*, che è sempre presente.

Una descrizione semplice del meccanismo di propagazione all'interno di una fibra si può ottenere usando i concetti dell'ottica geometrica, come fatto nella figura seguente:



Ogni radiazione luminosa è rappresentata da un raggio, che ne individua la direzione di propagazione. Ogni raggio incide sulla superficie di separazione tra nucleo e mantello, con un **angolo di incidenza**  $\theta$  diverso da raggio a raggio. Sappiamo che, in corrispondenza di discontinuità di indice di rifrazione, ogni raggio subisce, in generale, sia il fenomeno della **riflessione** nello stesso mezzo da cui proviene sia il fenomeno della **rifrazione** nell'altro mezzo:



Se  $\theta_1$  è l'*angolo di incidenza* (relativo ad un mezzo con indice di rifrazione  $n_1$ ) e  $\theta_2$  l'*angolo di rifrazione* (relativo ad un mezzo con indice di rifrazione  $n_2$ ), i due angoli sono legati dalla nota **legge di Snell**, secondo la quale

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Questa legge indica, in pratica, che *la radiazione tende ad incurvarsi, allontanandosi dalle zone meno dense (cioè con indice di rifrazione maggiore)*.

Esiste un particolare **angolo critico**  $\theta_{\max} = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} / n_0$  per l'incidenza: per incidenza con angolo  $\theta = \theta_{\max}$ , la radiazione che emerge dalla discontinuità si propaga lungo la superficie di discontinuità dei due materiali; tutti i raggi che incidono invece con  $\theta$  maggiore di  $\theta_{\max}$ , subiscono il fenomeno della **riflessione totale**, per cui rimangono all'interno del nucleo; i rimanenti raggi, infine, attraversano lo strato di separazione, dopodiché o vengono riflessi nuovamente nel mantello, nel quale subiscono una brusca attenuazione, oppure escono dalla guida.

Quindi, all'interno del nucleo si realizza l'intrappolamento delle radiazioni che incidono con angolo maggiore di quello critico. Tutte le radiazioni che incidono con angolo minore di quello critico, vengono trasmesse nel mantello e si perdono.

Se il materiale del nucleo è tale da dare attenuazione molto bassa (ossia non ci sono perdite per diffusione della radiazione o per effetto Joule), si ha una attenuazione molto più bassa di quella che si avrebbe in un tradizionale cavo coassiale.

Osserviamo una cosa a questo proposito: in generale, sappiamo che le proprietà di un **mezzo trasmissivo** cambiano quando c'è una variazione percentuale sensibile della banda; nel caso delle fibre ottiche, però, *avendo una portante alla frequenza di circa  $10^{14}$  Hz, si può tranquillamente assumere che le variazioni in banda siano piccole, per cui possiamo anche assumere che le proprietà del mezzo siano pressoché costanti.*

Nel momento in cui una **sorgente di radiazioni luminose** viene accoppiata ad una guida, parte della potenza luminosa viene iniettata nel nucleo e si propaga in esso.

Le fibre sono realizzate essenzialmente con biossido di silicio estremamente puro, il cui indice di rifrazione viene aumentato ricorrendo a tecniche di drogaggio (mediante germanio, fosforo o boro).

## DISPERSIONE MODALE: FIBRE MULTIMODALI E MONOMODALI

Abbiamo detto che rimangono intrappolate nel nucleo tutte le radiazioni luminose che incidono con angolo superiore a quello critico  $\theta_{max}$ . E' evidente che la distanza percorsa da ogni radiazione cambia seconda dell'angolo di incidenza. Dato, però, che la velocità di propagazione nel mezzo è costante (dato che è costante l'**indice di rifrazione**), ogni raggio uscirà dal nucleo con un ritardo di propagazione diverso dagli altri, a seconda del numero di riflessioni che esso ha subito.

*Applicando le equazioni di Maxwell sull'elettromagnetismo, si ottiene che il numero dei raggi non è infinito, ma discreto, in quanto esiste un numero discreto di possibili angoli di incidenza. Ogni angolo di incidenza corrisponde ad un **modo** che si propaga nella fibra.*

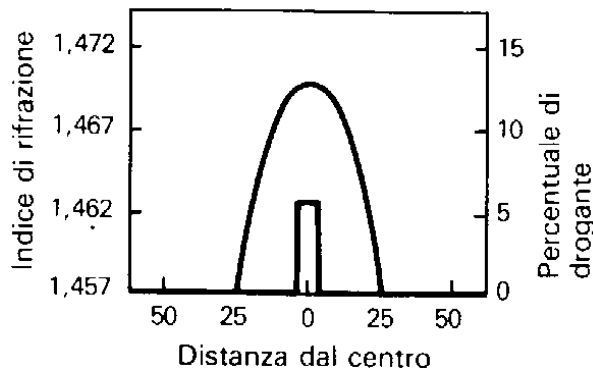
Una importante classificazione delle fibre è allora la seguente:

- si dicono **fibre multimodali** quelle in cui più modi possono propagarsi insieme;
- si dicono invece **fibre monomodali** quelle in cui un solo modo per volta si può propagare.

Consideriamo allora una fibra multimodale: in base a quanto detto prima, ogni modo emerge dalla fibra con un proprio ritardo<sup>1</sup>: il ritardo differenziale con cui i modi emergono dalla fibra è la cosiddetta **dispersione modale**, misurata in *nsec/km*. E' ovvio che la dispersione modale è tanto maggiore quanto più lunga è la fibra.

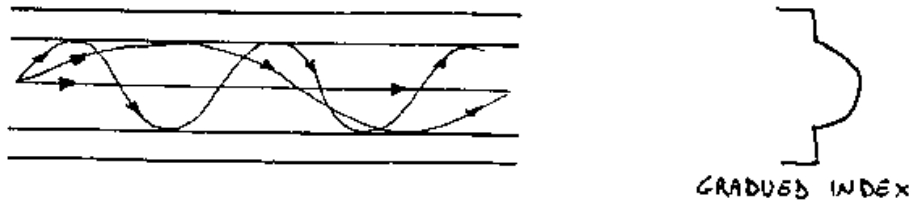
La dispersione modale costituisce chiaramente una limitazione all'impiego delle fibre: infatti, pur avendo un mezzo con bassissima attenuazione, non lo si può usare per trasmettere a velocità molto alta. Quindi, l'elemento limitante della capacità trasmissiva di una fibra ottica non è l'attenuazione, ma appunto la dispersione modale.

Si è cercato allora di minimizzare gli effetti della dispersione modale. Un modo abbastanza efficace di procedere è quello di realizzare un nucleo che, al posto di un indice di rifrazione costante, ne abbia uno decrescente dal centro (dove è massimo) alla periferia, come indicato nella figura seguente:



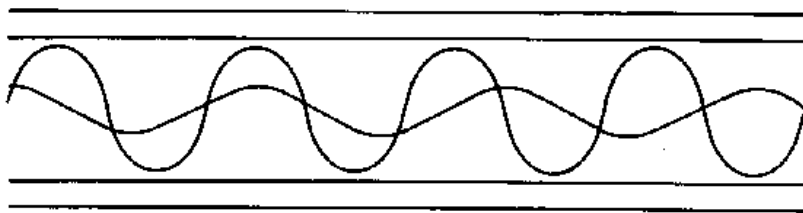
Queste sono le cosiddette **fibre graded index**, nelle quali viene in pratica effettuato un drogaggio a più strati:

<sup>1</sup> In pratica, la dispersione modale corrisponde ad una dispersione dei tempi d'arrivo tra gli impulsi relativi a ciascun modo.



Con questo artificio, si ottengono diversi risultati:

- in primo luogo, le traiettorie dei raggi non sono più delle spezzate, ma si incurvano;
- in secondo luogo, il percorso dei raggi con angolo di incidenza più piccolo si svolge più vicino al centro: ne consegue che questi raggi, pur percorrendo un percorso più breve (come si nota bene nella figura seguente), lo compiono a velocità più bassa<sup>2</sup> dei raggi che seguono i percorsi più lunghi, cioè quelli che portano i raggi stessi ad urtare tra le regioni estreme del nucleo:



Questo fa sì, chiaramente, che la dispersione modale risulti minore.

Quindi, *scegliendo il drogaggio della fibra in modo opportuno, si possono minimizzare gli effetti della dispersione modale.*

Il problema della dispersione modale non si pone, invece, nelle **fibre monomodali**<sup>3</sup>, dove tutti i modi sono evanescenti tranne uno. Affinché un solo modo possa propagarsi, è necessario però ridurre il diametro del nucleo a meno di 10mm, il che ha un grosso svantaggio: quanto minore è il diametro del nucleo, tanto più difficile è l'iniezione, nel nucleo stesso, della potenza ottica. Si pone cioè il problema dell'**efficienza di iniezione**, intesa come rapporto tra la potenza effettivamente convogliata nel nucleo e quella totale prodotta: dato che non tutta la potenza prodotta viene inviata nel nucleo, ma una sua quota parte si perde nel mantello, questa efficienza non può che essere minore di 1 (ovviamente >0).

Un altro problema molto sentito nelle fibre monomodali è quello della cosiddetta **giuntatura**: dovendo porre in cascata due fibre ottiche, è evidentemente necessario allineare nel modo migliore possibile i due nuclei, in modo da perdere la minore potenza ottica possibile nel passaggio da una fibra all'altra ed è evidente che l'allineamento è tanto più importante quanto più piccolo è il diametro dei nuclei.

<sup>2</sup> Ricordiamo che la velocità di propagazione dei raggi è inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'indice di rifrazione, per cui tale velocità sarà più bassa dove l'indice di rifrazione è maggiore, cioè appunto al centro del nucleo, mentre sarà via via minore man mano che ci si allontana dal nucleo stesso.

<sup>3</sup> Le fibre monomodali sono, attualmente, le uniche considerate nelle applicazioni

## DISPERSIONE CROMATICA

Oltre alla dispersione modale, esaminata nel paragrafo precedente, bisogna tener conto della cosiddetta **dispersione cromatica**, dovuta al fatto che la velocità di propagazione della radiazione varia al variare della frequenza: infatti, la velocità di propagazione dipende dall'indice di rifrazione, il quale varia con la frequenza, provocando una non-linearità della *caratteristica di fase*<sup>4</sup> della fibra e quindi una variabilità con la frequenza della velocità di gruppo. Questo significa che le componenti spettrali di un segnale si propagano nella fibra con velocità diverse, il che comporta, evidentemente, che la loro ricomposizione in ricezione fornisca un segnale diverso da quello trasmesso.

## DISPERSIONE SPAZIALE

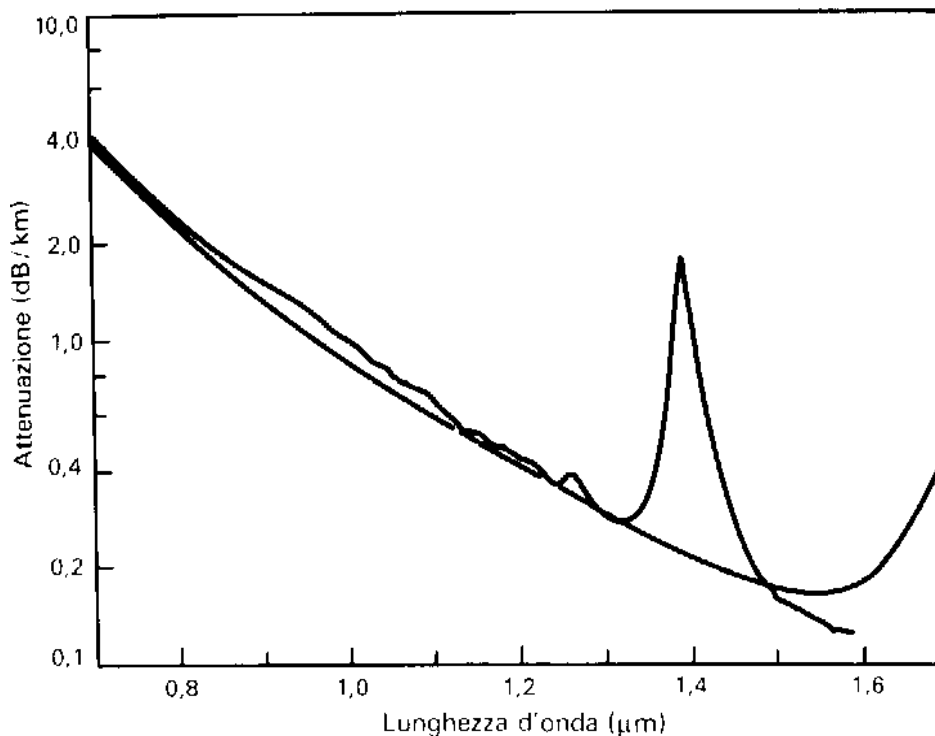
L'ultimo tipo di dispersione da considerare è dovuto al fatto che la superficie di discontinuità tra nucleo e mantello non potrà mai essere perfettamente cilindrica, ma presenterà delle discontinuità.

Ad ogni modo, esistono procedimenti tali da annullare questi termini di dispersioni. Eliminando, allora, queste limitazioni, si giunge ad una fibra ottica con banda sostanzialmente illimitata.

## ATTENUAZIONE

Preoccupiamoci adesso dell'attenuazione nelle fibre ottiche.

L'onda ottica, propagandosi nella fibra, subisce una attenuazione dovuta a molteplici cause. La figura seguente ne mostra l'andamento in funzione della lunghezza d'onda<sup>5</sup>, per una fibra di silice di alta qualità:



<sup>4</sup> Per "caratteristica di fase" intendiamo l'andamento della fase con la frequenza

<sup>5</sup> Ricordiamo che la lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza secondo la relazione  $\lambda=c/f$

Nella regione in cui la fibra viene usata, se si eliminano assorbimenti particolari dovuti ad impurità (come per esempio il picco<sup>6</sup> che si nota per  $\lambda \approx 1.4 \mu\text{m}$ ), si trova che *la causa dominante di attenuazione è la diffusione di energia in conseguenza delle microvariazioni di indice di rifrazione dovute alle irregolarità nella struttura del materiale* (irregolarità che vengono tra l'altro accresciute dalla presenza di drogante).

E' importante osservare che l'attenuazione dovuta alla diffusione è proporzionale a  $1/\lambda^4$ . Accrescendo ulteriormente la lunghezza d'onda, l'attenuazione incomincia a salire a causa di assorbimenti dovuti a risonanze molecolari.

L'intervallo di utilizzazione della fibra è generalmente suddiviso in tre regioni, dette finestre, centrate approssimativamente a **0.85 $\mu\text{m}$ , 1.4 $\mu\text{m}$  e 1.55 $\mu\text{m}$** :

- la **prima finestra** ha avuto le prime applicazioni, data la possibilità di reperire più facilmente sorgenti e rivelatori: infatti, l'energia del fotone corrispondente ad una lunghezza d'onda di  $0.8 \mu\text{m}$  è sufficiente a ionizzare atomi di silicio, per cui potevano funzionare fotodiodi e LED al silicio;
- la **seconda finestra** si trova nell'interno della lunghezza d'onda per cui la dispersione di annulla;
- la **terza finestra** è quella con attenuazione minima, che, nel caso monomodale illustrato in figura, ha un valore dell'ordine di **0.2 dB/km**.

La seconda e soprattutto la terza finestra sono le più promettenti per quanto riguarda l'attenuazione. E' però importante osservare che, *aumentando la lunghezza d'onda ai valori corrispondenti a tali due finestre, non si possono più usare dispositivi al silicio*: in particolare, per poter emettere in terza finestra è necessario utilizzare semiconduttori di tipo ternario.

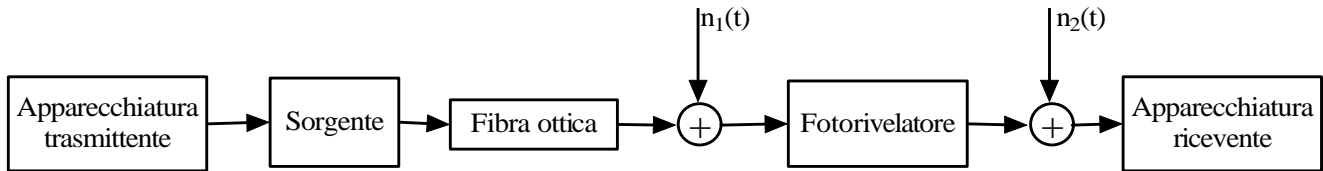
Valori dell'ordine di 0.2 dB/km non sono in alcun modo ottenibili su mezzi trasmissivi metallici come i cavi coassiali, a parità di dimensioni trasversali: si può affermare che il rapporto attenuazione/dimensione trasversale è, nella fibra, 450 volte più piccolo che in un cavo coassiale adoperato per una capacità trasmissiva di 140 Mbit/sec. Naturalmente, la situazione diventa ancora più favorevole alla fibra aumentando la velocità. E' questa una delle ragioni che rendono le fibre ottiche tanto interessanti per il futuro, unitamente al fatto che l'attenuazione si può considerare pressoché costante in bande di frequenza estremamente ampie: tanto per avere una idea, sempre con riferimento alla figura di prima, consideriamo il valore dell'attenuazione in corrispondenza di  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ; spostandoci di 1nm (cioè 3 ordini di grandezza in meno rispetto al  $\mu\text{m}$ ) di lunghezza d'onda, l'attenuazione è praticamente ancora la stessa, ma una variazione di lunghezza d'onda di 1nm rispetto a  $1.55 \mu\text{m}$  equivale ad una variazione di frequenza di 125 GHz attorno ad una frequenza di  $2 \cdot 10^{14}$  Hz, per cui possiamo ritenere che l'attenuazione sia la stessa in un intervallo di frequenza, attorno a  $2 \cdot 10^{14}$  Hz, ampio circa 250 GHz.

Diciamo inoltre che, *proprio grazie ai valori estremamente bassi dell'attenuazione, è possibile realizzare, con le fibre ottiche, collegamenti su lunga distanza senza apparecchiature rigenerative intermedie*. D'altra parte, a fronte di attenuazioni così piccole, diventano rilevanti le attenuazioni dovute alle giunzioni, cui abbiamo accennato prima. Tra l'altro, tali giunzioni costituiscono anche delle discontinuità che possono innescare ulteriori modi anche nelle fibre monomodo, causando così perdite di potenza.

<sup>6</sup> Questo picco, a lunghezza d'onda di circa  $1.4 \mu\text{m}$ , risulta dovuto all'ossidrile OH, cioè si tratta del picco di assorbimento dovuto all'acqua: questo significa che è necessario proteggere la fibra dall'umidità.

## SCHEMA DI UN SISTEMA DI TRASMISSIONE NUMERICA IN FIBRA OTTICA

La bassissima attenuazione della fibra ottica consente, negli attuali sistemi commerciali di tipo numerico binario, l'adozione di una struttura molto semplice, detta a **rivelazione diretta incoerente**, del tipo indicato in figura:



In questa struttura, i componenti ottici fondamentali sono la **sorgente ottica** ed il **fotorivelatore**.

Le sorgenti ottiche usate sono essenzialmente di due tipi: *diodi LED* (dove LED sta per Light Emitting Diode) e *diodi laser*. Entrambi questi dispositivi funzionano generalmente secondo una modulazione del tipo OOK (On Off Keying, ossia "o tutto o niente"): questo significa che trasmettono una certa **potenza ottica  $P_T$**  quando deve essere trasmesso un 1 e niente (o quasi niente, per questioni tecnologiche) quando deve essere trasmesso uno 0. Sia nei LED sia nei LASER, l'intensità (cioè la potenza) della luce emessa viene controllata semplicemente mediante la corrente di eccitazione.

I **diodi LED**, eventualmente ad alta intensità, sono di più semplice impiego e di costo ridotto. Tuttavia, essi hanno diverse limitazioni, dovute all'incoerenza della luce emessa, alla notevole larghezza di riga (50 ÷ 100 nm) ed alla limitazione di banda dovuta all'eccessivo tempo di spegnimento.

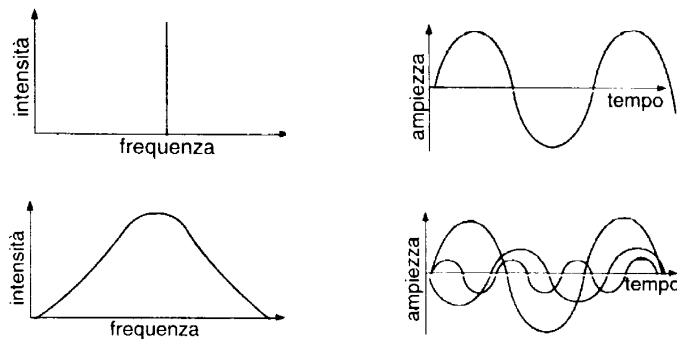
I **diodi laser (LD)**, invece, hanno, oltre alla *coerenza spaziale* e alla radiazione direzionale (il che permette di iniettare più potenza nella fibra, aumentando così l'efficienza di iniezione), una purezza spettrale migliore (circa uguale a 2nm).

### ***Richiami sulla luce coerente***

Il *diodo laser* è un dispositivo che permette di ottenere fasci molto intensi di luce che, a differenza della luce ordinaria (per esempio quella del Sole o quella di una candela) presentano 2 caratteristiche fondamentali: si tratta di luce **monocromatica**, cioè tutta di una stessa lunghezza d'onda, e **coerente**, ossia i fotoni (o le onde) risultano tutti in fase nello stesso istante (la luce ordinaria è invece un insieme di lunghezze d'onda diverse, ossia non è monocromatica, e, inoltre, i vari fotoni interferiscono tra di loro e viaggiano in direzioni diverse; in altre parole, si disperdono nello spazio e non si mantengono in fase tra di loro, rendendo quindi la luce *incoerente*). Vediamo di capire bene cosa si intende per *luce coerente*.

I pacchetti d'onda che compongono un fascio luminoso (stiamo adottando la descrizione ondulatoria della luce) hanno in genere una fase diversa, il che significa che i picchi e i ventri non coincidono:

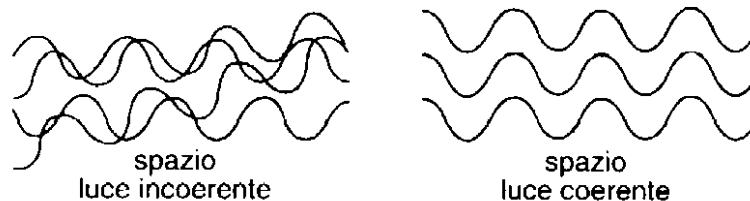




Un fascio di luce è **coerente** (da un punto di vista spaziale) quando i vari pacchetti d'onda mantengono costanti nel tempo le relative differenze di fase. Si parla poi di **coerenza temporale** quando le fasi sono uguali (cioè quindi quando le differenze di fasi sono costantemente pari a 0).

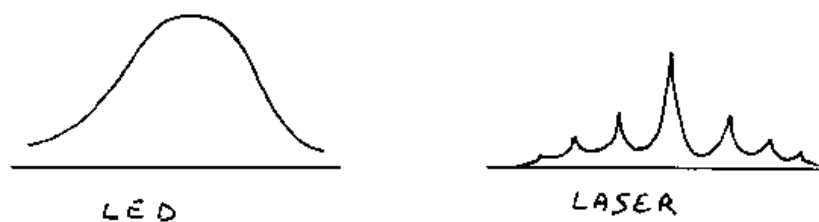
In una normale **sorgente luminosa**, gli atomi emettono i vari pacchetti d'onda in modo non correlato e con lunghezze d'onda diverse: ne risulta che, tra una parte e l'altra della sorgente, le differenze di fase cambiano continuamente e casualmente.

In un laser, invece, il meccanismo della emissione stimolata fa sì che gli atomi emettano tutti in sincronia ed alla stessa lunghezza d'onda, per cui le differenze di fase sono mantenute costanti:



Il **laser** è costituito da un meccanismo di generazione di luce all'interno di una **cavità risonante**, chiusa agli estremi da due **specchi semiriflettenti**. La radiazione rimbalza su tali specchi, acquistando potenza ad ogni passaggio. Quando la potenza è sufficientemente elevata, la radiazione emerge, dando appunto luogo al **fascio laser**.

Dato che, per avere una certa **efficienza di generazione** della luce, il laser deve essere lungo parecchie lunghezze d'onda, ne consegue che le frequenze di risonanza sono abbastanza vicine tra loro. Effettuando infatti una analisi spettrale dell'emissione di un LD, si ottiene una concentrazione di potenza su bande di frequenza molto strette ma molto ravvicinate tra loro, come indicato nella figura seguente:



Se si volesse ripulire la radiazione, si possono realizzare, sulla superficie degli specchi, delle rugosità: così facendo, infatti, le risonanze che non servono vengono fatte interferire in modo distruttivo. Questi particolari laser vengono detti a **DFB** (che sta per *Laser a Feedback Distruttivo*) e con essi si riescono ad ottenere bande di 10 MHz e quindi bande relative molto piccole.

La velocità di trasmissione nelle fibre ottiche è limitata proprio dalla capacità delle sorgenti, soprattutto i LED, di pilotare con transizioni molto rapide e brusche.

### ***Richiami storici: laser e maser***

Lo sviluppo del **laser** (1960) fu reso possibile dalla precedente realizzazione del cosiddetto **maser** (1954), il cui nome è l'acronimo di *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ossia amplificazione di microonde mediante emissione stimolata della radiazione. Il maser lavora dunque nella regione delle microonde anziché in quella delle radiazioni luminose (per questo i maser si utilizzano in genere nei radiotelescopi per amplificare segnali molto deboli come quelli stellari oppure nelle antenne per ricevere i segnali dai satelliti).

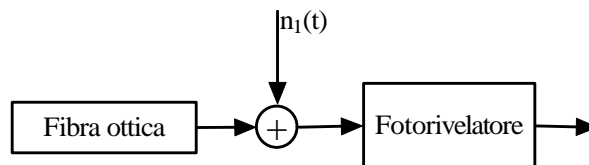
Tornando allo schema generale visto prima, l'eventuale potenza ottica generata dalla sorgente viene iniettata nella **fibra** e si propaga lungo essa, giungendo, inevitabilmente attenuata, al terminale ricevente. Qui è necessario disporre di un dispositivo che sia in grado di rivelare la potenza ottica in arrivo e di trasformarla in un segnale elettrico ad essa proporzionale: questo dispositivo sarà dunque un **fotorivelatore**, cioè essenzialmente un diodo opportunamente polarizzato, la cui corrente è direttamente proporzionale alla potenza ottica incidente.

All'uscita del fotorivelatore abbiamo dunque un segnale elettrico che può essere trattato con il normale *sistema di ricezione numerico*, cioè la classica cascata **filtro-campionatore-decisore** (racchiusi, nella figura di prima, sotto la denominazione "*apparecchiatura ricevente*"): questo sistema ha il compito di decidere, in base al segnale in ingresso, se il simbolo che è stato trasmesso è un 1 oppure uno 0.

Possiamo subito osservare che il fotorivelatore svolge una funzione analoga a quella del demodulatore nei sistemi a microonde, con due differenze fondamentali: la prima è, ovviamente, nella frequenza di lavoro (frequenza ottica nei sistemi a fibra e frequenza minore nei sistemi a microonde); la seconda, che più ci interessa, è che, *mentre il demodulatore fornisce una risposta proporzionale all'ampiezza del campo elettrico in ingresso, il fotorivelatore fornisce in uscita una risposta proporzionale alla potenza del campo incidente*.

Riguardo ancora lo schema generale del sistema, è evidente che esso manca di una cosa fondamentale, ossia il rumore. Dobbiamo allora capire che tipo di rumore è presente in un apparato del genere e dove esso è presente.

Il primo contributo di rumore è senz'altro il **rumore termico**  $n_1(t)$  generato dal mezzo trasmissivo. Dobbiamo dunque aggiungere il solito rumore additivo a valle della fibra:



Tuttavia, questo è un rumore termico sovrapposto ad una *portante ottica* (cioè ad una portante sinusoidale a frequenza ottica, dell'ordine di  $10^{14}$  Hz), per cui richiede delle precisazioni: la fibra, ricoperta dal suo strato protettivo, è costituita da materiale a temperatura ambiente  $T_0$ , per cui la temperatura equivalente di rumore alla sua uscita si può assumere pari a  $T_0$ . Tuttavia, per un sistema che lavora a frequenze dell'ordine di  $10^{14}$  Hz, non possiamo più utilizzare, per la densità spettrale di potenza del rumore termico, l'espressione  $kT_0$  sempre usata in precedenza: il motivo è che, alle frequenze ottiche, nello stimare la suddetta densità spettrale

bisogna necessariamente tenere conto dei fenomeni quantistici. Allora, l'espressione corretta della densità spettrale di potenza del rumore termico è la seguente:

$$h_n(f) = \frac{hf}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

dove  $h$  è la *costante di Planck*. Da questa espressione si giunge all'espressione classica  $h_n=kT$  solo se il termine esponenziale a denominatore è molto piccolo, ossia se  $hf \ll kT$ , ossia quindi se  $f < 10^{12}$  Hz. Per frequenze dell'ordine di  $10^{14}$  Hz, invece, quella espressione non può essere semplificata. Tuttavia, facendo qualche semplice calcolo, si trova quanto segue: a temperatura ambiente  $T=T_0$ , mentre la densità spettrale di potenza di rumore termico di bassa frequenza  $kT$  fornisce una potenza di rumore termico per Hz di -174 dBm, alle frequenze ottiche tale valore scende a **-233dBm**. Questo è un valore sicuramente trascurabile ai fini del dimensionamento di un sistema di trasmissione, per cui possiamo affermare che, in un sistema su fibra ottica, è lecito trascurare il rumore termico in uscita dalla fibra stessa.

Quindi, fino all'uscita del fotorivelatore non abbiamo alcuna sorgente di rumore. D'altra parte, il fotorivelatore può essere schematizzato come un **generatore di corrente**; il segnale di interesse (cioè la parte "desiderata" del processo all'uscita del rivelatore) corrisponde al valore medio della corrente in uscita dal rivelatore stesso e si può dimostrare che tale valore medio è proporzionale alla potenza media  $P_R$  in ingresso al rivelatore:

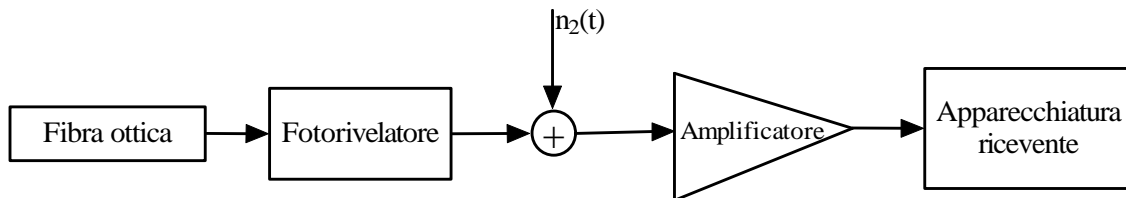
$$I = \rho P_R$$

Sovrapposto a questo segnale, c'è un **disturbo**, che rappresenta le fluttuazioni attorno al valor medio  $I$ . A cosa corrisponde questo disturbo? Ci sono varie cause di rumore da portare in conto:

- in primo luogo, un termine di **rumore quantico** dovuto all'efficienza quantica  $\eta$ , ossia al fatto che non tutti i fotoni in uscita dalla fibra riescono a ionizzare gli atomi del diodo che costituisce il fotorivelatore: avendo deciso di schematizzare il fotorivelatore come generatore di corrente, ci conviene modellare anche il rumore quantico come un generatore di corrente  $i_q$ , con densità spettrale (da calcolare) che indichiamo con  $h_{nq}$ ;
- in secondo luogo, dovremmo anche considerare la **corrente di buio** (ossia il fatto che il fotorivelatore, non essendo ideale, produce in uscita una debole corrente anche quando non c'è alcuna radiazione incidente su di esso), ma, in una analisi di prima approssimazione è lecito trascurare questo contributo;
- in terzo luogo, dobbiamo tener conto che, per polarizzare inversamente il diodo fotorivelatore, abbiamo bisogno di un circuito di polarizzazione, che inevitabilmente conterrà una resistenza<sup>7</sup>, cioè quindi un generatore di **rumore termico**: se  $R$  è il valore di questa resistenza, potremo modellarne il contributo di rumore termico mediante un generatore di corrente in con densità spettrale  $4kT_0/R$ ;
- infine, dobbiamo tener conto che la corrente elettrica generata dal fotorivelatore, a seguito della incidenza della potenza ottica, è comunque di livello molto basso, per cui deve essere necessariamente **amplificata** prima di arrivare all'apparecchiatura ricevente; dobbiamo perciò predisporre un amplificatore a valle del fotorivelatore, come indicato nella prossima figura: tale amplificatore presenta una propria resistenza interna e quindi una rumorosità (sempre rumore

<sup>7</sup> Questa resistenza non va assolutamente realizzata in granuli di carbonio, ma con tecnologia tale da non far comparire il flicker noise (cioè il rumore a bassa frequenza): all'uscita del rivelatore, infatti, ciò che interessa sono le basse frequenze.

termico<sup>8</sup>) che possiamo riportare in ingresso, adoperando il noto concetto di **fattore di rumore**; d'altra parte, possiamo inglobare questo rumore (che è quello generato dalla parte resistiva dell'impedenza di ingresso dell'amplificatore) in quello prodotto dalla resistenza di polarizzazione, considerando una densità spettrale pari a  $h_{nt} = 4kFT_0 / R$ .



*Schema semplificato (completo) della parte ricevente di un sistema di trasmissione numerica su fibra ottica: il termine additivo  $n_2(t)$  ingloba tutte le sorgenti di rumore presenti nel sistema*

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**  
e-mail: [sandry@iol.it](mailto:sandry@iol.it)  
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>  
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>

---

<sup>8</sup> Il rumore termico generato dall'amplificatore va questa volta considerato, per il semplice motivo che il segnale, in questo punto della catena, non è più a frequenze ottiche, per cui ha una propria rilevanza