

Fibre ottiche

Una fibra ottica è un conduttore ottico costituito da materiale plastico (vetroso) trasparente, percorso da un'informazione luminosa nel campo dell'infrarosso (1.550 nm) ed è perciò completamente immune alle interferenze elettromagnetiche. L'informazione luminosa è generata in trasmissione da un fotodiodo emettitore (LED o LASER, *Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*, fig. 1) e ricostruita sotto forma di segnale elettrico in ricezione mediante un fotodiodo PIN (a tre strati: *Positive- Intrinsic- Negative*) o APD (*Avalanche PhotoDiode*).

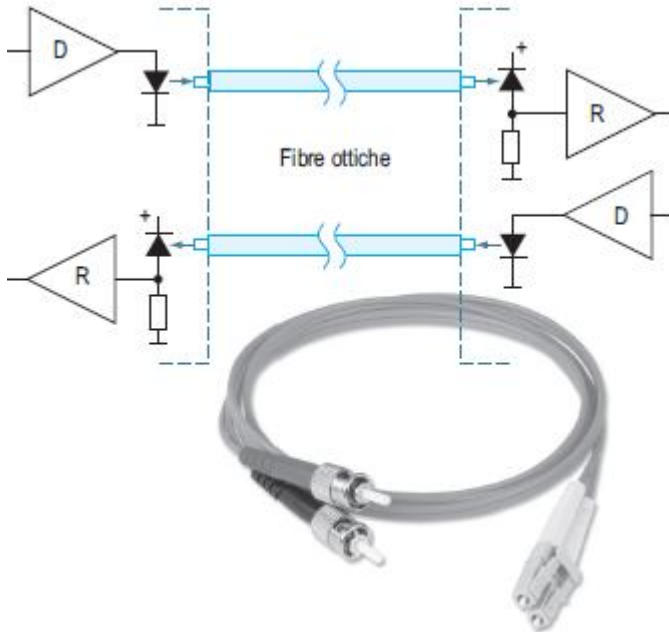


Fig. 1- Connessione in fibra ottica ed esempio di cavo . (copia fig. 7.17 di Fondamenti vol. 3)

Le fibre ottiche sono costituite da due strati concentrici di materiale trasparente a differente indice di rifrazione (fig. 2), un nucleo centrale (core) ed un mantello esterno (cladding) con indice di rifrazione inferiore, sui quali sono sovrapposti uno o più strati di rivestimento esterno per la protezione meccanica.

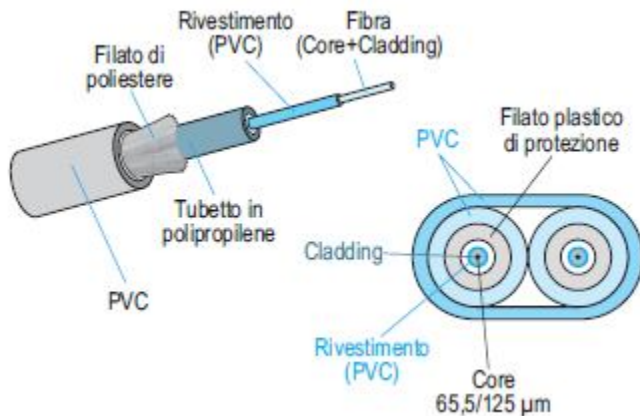


Fig. 2- Struttura di una fibra doppia e singola. (copia fig. 7.18 di Fondamenti vol. 3)

L'indice di rifrazione (n) di un mezzo ottico è il rapporto tra la velocità di propagazione della luce nel vuoto (c) e nel mezzo stesso (u)

$$n = \frac{c}{u}$$

di valore superiore all'unità.

Se un raggio luminoso che attraversa uno dei mezzi incide sulla superficie di separazione con il secondo mezzo, formando un angolo di valore limitato rispetto alla normale, in parte riflette e in parte rifrange (fig. 3), con gli angoli di incidenza e di rifrazione legati tra loro dalla cosiddetta "legge di Snell"

$$n_1 \cdot \sin \varphi_1 = n_2 \cdot \sin \varphi_2$$

$$\text{con } \varphi_2 > \varphi_1 \text{ se } n_2 < n_1$$

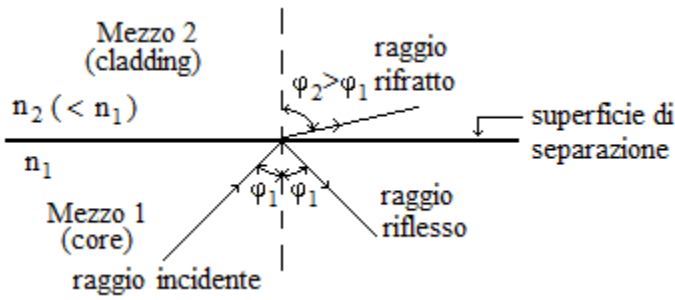


Fig. 3- Rifrazione e riflessione.

Aumentando l'angolo di incidenza φ_1 fino ad ottenere esattamente $\sin \varphi_1 = \frac{n_2}{n_1}$, si ha $\sin \varphi_2 = 1$ ($\varphi_2 = 90^\circ$). Perciò

con valori di φ_1 maggiori dell'angolo limite $\varphi_L = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ si ha riflessione totale (fig. 4).

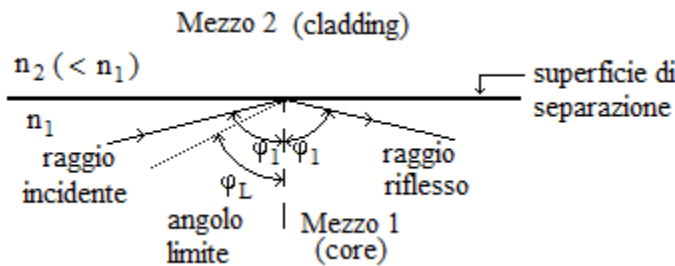


Fig. 4- Riflessione totale.

Se, all'interno del core, l'onda luminosa mantiene sempre un angolo di incidenza superiore all'angolo limite, il differente indice di rifrazione fa sì che la luce rifletta ogni volta che incontra la superficie di separazione tra core e cladding, mantenendo integra la sua energia lungo il percorso (fig. 5).

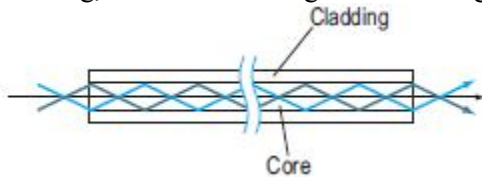


Fig. 5- Riflessione all'interno della fibra. (copia fig. 7.19 di Fondamenti vol. 3)

Occorre perciò che i raggi luminosi mantengano un angolo abbastanza limitato rispetto all'asse della fibra. Per questo motivo la stesura di una fibra non deve avere raggi di curvatura ridotti.

L'impulso luminoso che attraversa la fibra perde comunque energia lungo il percorso, per disomogeneità e impurità nel materiale, fornita dal costruttore come attenuazione in dB/km. Ulteriori contributi all'attenuazione si hanno in corrispondenza delle giunzioni intermedie e delle intestazioni elettro-ottiche terminali, per allineamenti non perfetti (fig. 6).

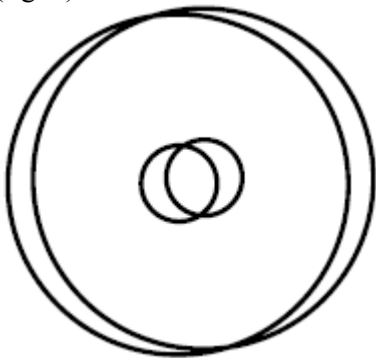


Fig. 6- Giunzione con allineamento non corretto.

Oltre che attenuato, l'impulso ottico giunge deformato al termine del percorso (fig. 7), per differenze nei ritardi delle singole microcomponenti ottiche di cui si compone, limitando di fatto la frequenza massima di ripetizione e quindi la banda.



Fig. 7- Deformazione dell'impulso.

L'allungamento dell'impulso ottico introduce una interferenza di intersimbolo (ISI) nel segnale ricevuto, la cui entità aumenta con la distanza (fig. 8), con possibili errori nei dati ricostruiti (BER).

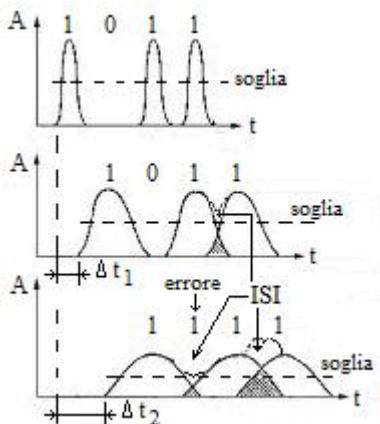


Fig. 8- Interferenza di intersimbolo.

Un valore tipico di BER per le fibre è 10^{-9} .

Un primo contributo alla deformazione (dispersione modale, fig. 9) è dovuto alle diverse possibilità di percorso offerte alle componenti dell'impulso all'interno della fibra, di lunghezza differente, e quindi con ricomposizione sfasata dei singoli contributi al termine.

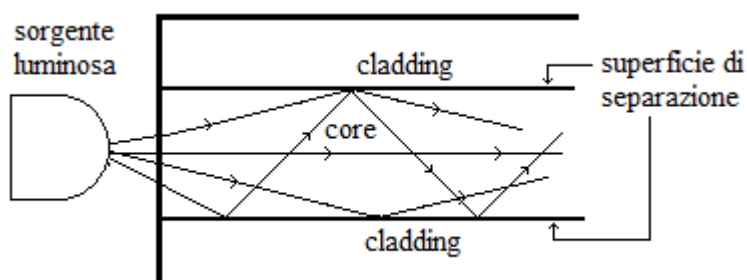


Fig. 9- Dispersione modale.

Se il core ha diametro interno $50 \div 100 \mu\text{m}$ esistono più percorsi possibili per la propagazione della luce e si parla di fibre multimodali, le cui dimensioni tipiche core/fibra (in μm) sono $50/125$ e $62,5/125$, mentre se il diametro del core è più ridotto ($8 \div 10 \mu\text{m}$) i percorsi possibili si riducono e si hanno le fibre monomodali (core/fibra tipico = $10/125$), caratterizzate da una minore dispersione e una minore attenuazione (circa $0,2 \text{ dB/km}$).

Un secondo contributo alla deformazione (dispersione cromatica) è dovuta alla qualità della sorgente luminosa che, se non perfettamente monocromatica (LED, fig. 10), presenta diverse componenti di colore, ciascuna con velocità di propagazione differente, e quindi ancora con ricomposizione sfasata al termine.

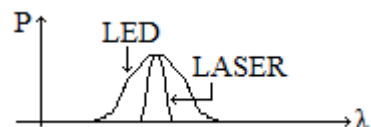


Fig. 10- Spettro di potenza di LED e LASER.

Con una sorgente LASER, la dispersione cromatica è praticamente inesistente.

Nelle dorsali delle reti estese (WAN, *Wide Area Network*) ad alta velocità, per aumentare ulteriormente il data rate, si utilizza la tecnica a moltiplicazione di lunghezza d'onda, inviando sulla stessa fibra più canali dati ciascuno con una propria lunghezza d'onda.

La distanza massima di una tratta in fibra dipende dal tipo di fibra e dalla lunghezza d'onda utilizzata e può andare dalle centinaia di metri (multimodali, $\lambda = 850 \text{ nm}$) fino a decine di km (monomodali, $\lambda = 1.550 \text{ nm}$).

Le fibre ottiche più in uso per la trasmissione dati in ambito industriale sono sintetiche, per applicazioni fino a 100 m (fig. 11).

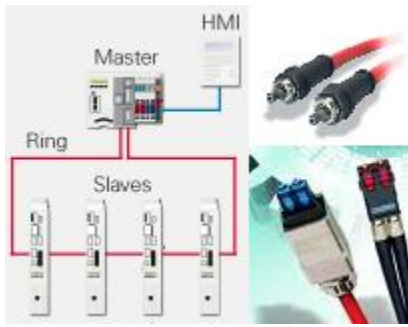


Fig. 11- Anello in fibra per azionamenti elettrici.

Esercizi svolti

Esercizio 1

In una fibra ottica, gli indici di rifrazione del core e del mantello sono rispettivamente $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,3$. Determinare il valore dell'angolo limite.

Soluzione

Dalla

$$n_1 \cdot \sin \varphi_1 = n_2 \cdot \sin \varphi_2$$

per ottenere la riflessione totale

$\varphi_2 = 90^\circ$ ($\sin \varphi_2 = 1$), deve essere

$$\sin \varphi_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\varphi_L = \arcsen \frac{n_2}{n_1} = \arcsen \frac{1,3}{1,5} = 60^\circ$$

Esercizio 2

Un collegamento in fibra è costituito da 5 tratte da 2 km ciascuna, con attenuazione 0,4 dB/km. Considerando 0,5 dB la perdita di inserzione di ognuno dei connettori terminali, 0,2 dB la perdita di ciascuna giunzione e -6 dBm la sensibilità del ricevitore, determinare la potenza ottica da iniettare a monte in modo da riservare un margine di sistema $M = 3 \text{ dB}$.

Soluzione

$$Att = 0,4 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \cdot 2 \text{ km} \cdot 5 + 0,5 \frac{\text{dB}}{\text{conn.}} \cdot 2 \text{ conn.} + 0,2 \frac{\text{dB}}{\text{giun.}} \cdot 4 \text{ giun.} = 5,8 \text{ dB}$$

$$P_t = P_r + Att + M = -6 \text{ dBm} + 5,8 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 2,8 \text{ dBm}$$

$$P_t = 10^{\frac{2,8}{10}} = 1,9 \text{ mW}$$

Esercizio 3

Un collegamento da 40 km in fibra, realizzato con 4 spezzoni da 10 km con attenuazione 0,2 dB/km, è sostenuto a monte con un diodo LASER da 10 dBm. Sapendo che l'attenuazione di inserzione a monte vale 5 dB, le perdite dei connettori e delle giunzioni incidono ciascuna per 0,2 dB, l'attenuazione del fotorivelatore ottico (PIN) è di 6 dB, e che la sua responsività è di $1 \mu\text{A}/\mu\text{W}$, valutare se sono garantiti almeno 80 μA in uscita.

Soluzione

$$Att = 5 \text{ dB} + 0,2 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \cdot 40 \text{ km} + (0,2 \cdot 5) \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 20 \text{ dB}$$

$$P_r = P_t - Att = 10 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} = -10 \text{ dBm} = 100 \mu\text{W}$$

$$I = 1 \frac{\mu\text{A}}{\mu\text{W}} \cdot 100 \mu\text{W} = 100 \mu\text{A} > 80 \mu\text{A}$$

Esercizio 4

Un collegamento da 40 km in fibra è realizzato con 10 spezzoni da 4 km ciascuno, con attenuazione 0,5 dB/km. Sapendo che il sistema è sostenuto a monte con un diodo LASER da 5 dBm e che le attenuazioni dei connettori e delle giunzioni incidono ciascuna per 0,3 dB, valutare se sono garantiti almeno 100 μW di potenza ottica al convertitore ottico-elettrico posto al termine della fibra. In caso contrario, indicare se risulta adeguato interporre un rigeneratore di pari caratteristiche ($P_{r\min} = 100 \mu\text{W}$, $P_t = 5 \text{ dBm}$) a 24 km dalla sorgente.

Soluzione

Senza amplificatore intermedio

$$Att = 0,5 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \cdot 40 \text{ km} + (0,3 \cdot 11) \text{ dB} = 23,3 \text{ dB}$$

$$P_r = P_t - Att = 5 \text{ dBm} - 23,3 \text{ dB} = -18,3 \text{ dBm} = 15 \mu\text{W} < 100 \mu\text{W}$$

Il rigeneratore intermedio serve (fig. 12).

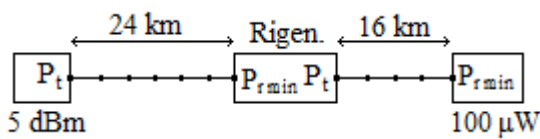


Fig. 12- Collegamento in fibra con rigeneratore a 24 km.

Con il rigeneratore posto a 24 km

$$Att = 0,5 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \cdot 24 \text{ km} + (0,3 \cdot 7) \text{ dB} = 14,1 \text{ dB}$$

$$P_r = P_t - Att = 5 \text{ dBm} - 14,1 \text{ dB} = -9,1 \text{ dBm} = 123 \mu\text{W} > 100 \mu\text{W}$$

La potenza in ricezione è adeguata.

Esercizi da svolgere

Es. 1

In una fibra ottica, gli indici di rifrazione del core e del mantello sono rispettivamente $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,4$. Determinare il valore dell'angolo limite. Ripetere il calcolo per la fibra con $n_1 = 1,48$, $n_2 = 1,46$.

[Ris.: 69°; 80,6°]

Es. 2

Un collegamento in fibra è costituito da 6 tratte da 2 km ciascuna, con attenuazione 0,5 dB/km. Considerando 0,7 dB la perdita di inserzione di ognuno dei connettori terminali, 0,3 dB la perdita di ciascuna giunzione e -6 dBm la sensibilità del ricevitore, determinare la potenza ottica da iniettare a monte in modo da riservare un margine di sistema $M = 3 \text{ dB}$.

[Ris.: $P_t = 5,9 \text{ dBm} = 3,89 \text{ mW}$]

Es. 3

Un collegamento da 20 km in fibra, realizzato con 5 spezzoni da 4 km con attenuazione 0,3 dB/km, è sostenuto a monte con un diodo LASER da 6 dBm. Sapendo che l'attenuazione di inserzione a monte vale 3 dB, le perdite dei connettori e delle giunzioni incidono ciascuna per 0,3 dB, l'attenuazione del fotorivelatore ottico (PIN) è di 3 dB, e che la sua responsività è di $1 \mu\text{A}/\mu\text{W}$, valutare se sono garantiti almeno 80 μA in uscita.

[Ris.: $Att = 13,2 \text{ dB}$; $P_r = -7,2 \text{ dBm}$; $I = 190 \mu\text{A} > 80 \mu\text{A}$]

Es. 4

Un collegamento da 32 km in fibra è realizzato con 8 spezzoni da 4 km ciascuno, con attenuazione 0,6 dB/km. Sapendo che il sistema è sostenuto a monte con un diodo LASER da 4 dBm e che le attenuazioni dei connettori e delle giunzioni incidono ciascuna per 0,4 dB, valutare se sono garantiti almeno 100 μW di potenza ottica al convertitore ottico-elettrico posto al termine della fibra. In caso contrario, indicare se risulta adeguato interporre un rigeneratore di pari caratteristiche ($P_{r\min} = 100 \mu\text{W}$, $P_t = 4 \text{ dBm}$) a 16 km dalla sorgente.

[Ris.: $A_{tt} = 22,8 \text{ dB}$; $P_r = -18,8 \text{ dBm} < 100 \mu\text{W}$; il rigeneratore a 16 km serve ed è adeguato, $A_{tt} = 11,6 \text{ dB}$; $P_r = -7,6 \text{ dBm}$]