

LE FIBRE OTTICHE NELLE TELECOMUNICAZIONI

LUCE:

la luce è energia. Il nostro occhio è atto a ricevere luce e alla quale deve essere attribuito il carattere di **energia**. Un corpo investito da raggi luminosi si riscalda; cioè la luce si trasforma in calore, quindi è energia.

La luce si propaga per onde con una velocità di 300.000 Km/s nel vuoto.

Ogni corpo capace di inviare luce al nostro occhio è una sorgente di energia luminosa.

SORGENTI DI LUCE

A) — DA CORPI LUMINOSI:

1) — ad incandescenza —

Qualsiasi corpo luminoso, per emettere luce deve essere portato all'incandescenza

Il colore della luce emanato è in relazione alla temperatura. Comincia dal rosso cupo, per le temperature più basse (circa 500°C); al bianco, per le temperature più alte.

Esempi: il sole, l'arco voltaico, le lampade ad incandescenza.

2) — a luminescenza —

Sono sorgenti di luce a temperature inferiori ai 400°C.

Esempi: le lucciole e tutti i casi di **fluorescenza** (quando un corpo emette luce fino a quando si trova sotto la causa che lo eccita) e di **fosforescenza** (quando il corpo continua ad emettere luce anche dopo la cessazione della causa che lo eccita).

B) — DA CORPI ILLUMINATI:

sono i corpi che inviano luce ricevuta da una sorgente primaria. I pianeti e la luna, inviano la luce che ricevono dal sole. Ovviamente al cessare del ricevimento della luce dal sole, cessa la loro visibilità.

I corpi illuminati si distinguono in **OPACHI** e **TRASPARENTI**, a secondo se arrestano o si lasciano attraversare dalla luce.

I TRASPARENTI a loro volta, si dividono in : **diafoni** se oltre a lasciar passare la luce, permettono anche di scorgere la forma della sorgente; **traslucidi** se lasciano passare solo la luce (vetro smerigliato, maiolica)

FOTOMETRIA

La fotometria stabilisce le leggi e i criteri di misurazione dell'energia luminosa.

(La candela internazionale corrisponde all'intensità luminosa emessa da un cm² di platino portato alla temperatura di 1770°C).

OTTICA GEOMETRICA

L'ottica geometrica studia i fenomeni e le leggi alle quali va soggetta la luce nella sua propagazione.

RIFLESSIONE:

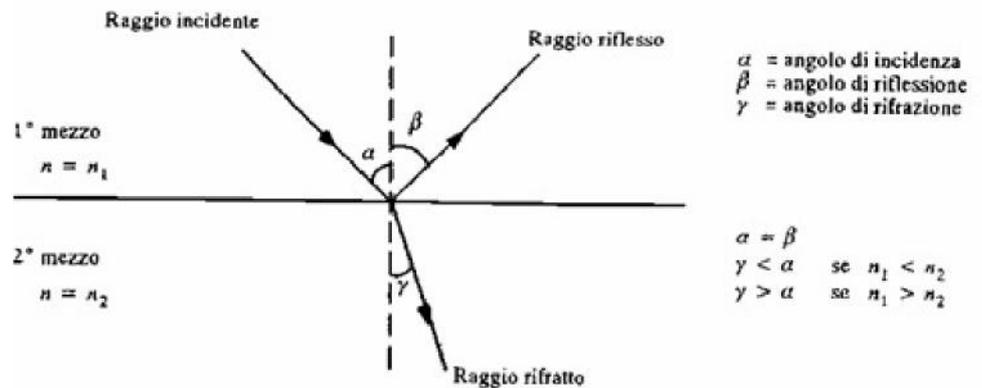
la riflessione della luce consiste in un rinvio subito dai raggi luminosi quando nella loro propagazione incontrano un ostacolo non trasparente.

Quando la luce incontra una superficie speculare, il raggio incidente sarà riflesso con angolo perfettamente uguale (rispetto alla normale del piano di superficie).

Si ha la diffusione della luce quando il raggio incidente incontra una superficie irregolare

RIFRAZIONE:

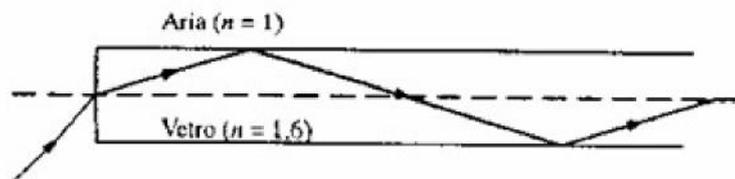
la rifrazione della luce consiste nella deviazione che subiscono i raggi luminosi passando da un mezzo trasparente ad un altro di materia diversa.



Divisione di un raggio incidente sulla superficie di separazione fra due mezzi.

L'angolo di deviazione varia al variare del mezzo trasparente attraversato e al variare della frequenza della luce.

Angolo limite:



Il tubo di vetro come guida d'onda per i raggi luminosi.

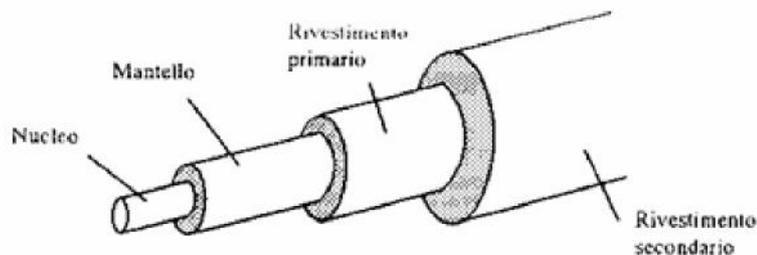
si consideri cosa accade quando un raggio di luce, invece di passare dall'aria ad un mezzo materiale, segue un percorso inverso. Si supponga che il raggio provenga dall'interno di un materiale avente indice di rifrazione superiore a quello dell'aria. Quando l'angolo di incidenza supera un certo valore, che chiameremo **angolo limite**, il raggio non può uscire dal materiale. In effetti, in tali condizioni si manifesta il fenomeno della riflessione totale per cui il raggio rifratto scompare e tutto il raggio incidente viene rinvio all'interno del mezzo trasparente con angolo uguale e opposto a quello di incidenza

LE FIBRE OTTICHE

Caratteristiche fondamentali.

Nella propagazione della luce in un materiale, l'**angolo limite e la riflessione totale**,

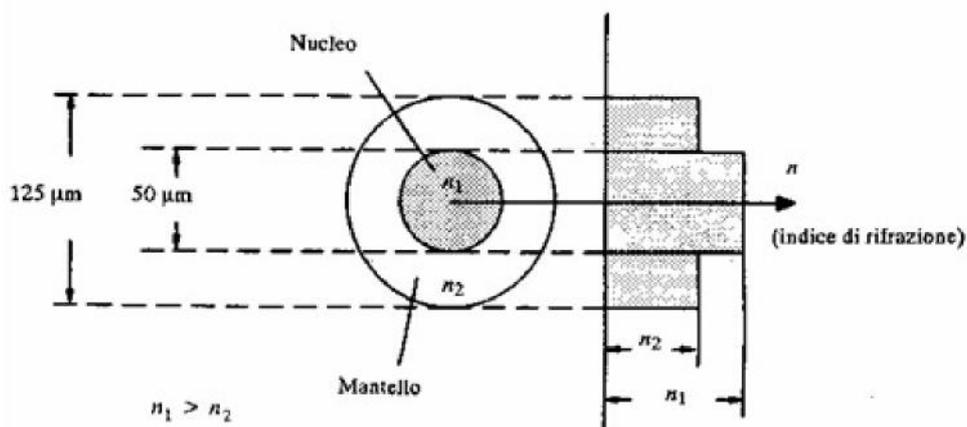
consentono di capire il principio di funzionamento delle fibre ottiche.



Struttura di una fibra ottica per telecomunicazioni.

Possiamo considerare la fibra come un corpo di materiale trasparente rettilineo e a sezione rettangolare. Un raggio luminoso che penetra nella fibra e raggiunge una delle pareti con angolo di incidenza superiore all'angolo limite, subisce una riflessione totale e rimbalza verso la parete opposta e verrà di nuovo riflesso con lo stesso angolo propagandosi così, rimbalzando da una parete all'altra, percorrendo tutta la lunghezza della fibra.

Una variazione dell'angolo limite dovuta a microfratture o presenza di particelle di diversa struttura molecolare sulla superficie esterna della fibra, possono causare fuoriuscita di raggi, con conseguente perdita di energia.



Fibra multimodo con profilo d'indice a gradino.

Per ovviare a questo inconveniente, le fibre usate per le telecomunicazioni sono costruite a sezione circolare con un **nucleo** interno destinato a guidare il raggio luminoso e un rivestimento (**mantello**) che avvolge il nucleo, costituito di un materiale con indice di rifrazione più basso. La fibra così strutturata viene ricoperta da uno strato acrilico primario di protezione atto a proteggerla dalle abrasioni. Un altro rivestimento secondario in plastica le conferisce la resistenza necessaria a tutte le manipolazioni a cui sarà soggetta la fibra nelle varie operazioni di installazioni.

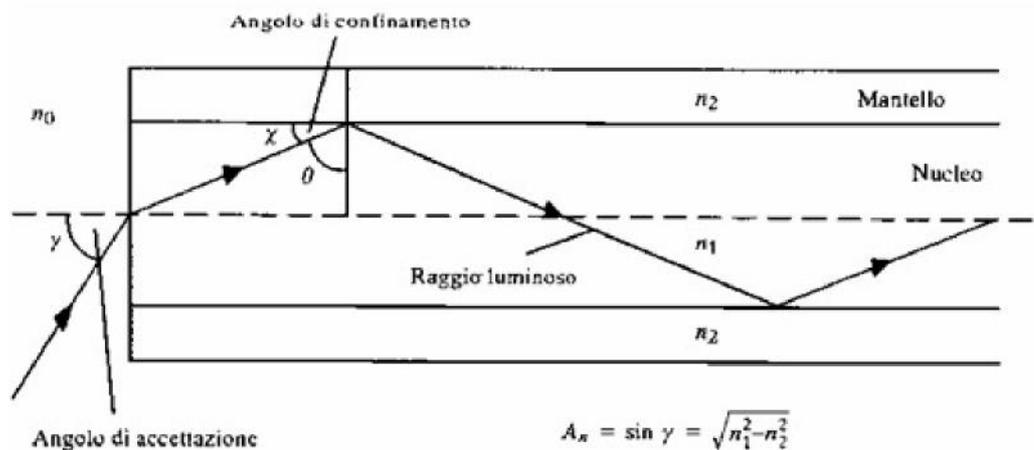
Nelle telecomunicazioni l'insieme nucleo-mantello, hanno diametro di 125 ptm. Le fibre con il nucleo di 50 ptm si definiscono **multimodo con indice di rifrazione a gradino**.

Si definiscono multimodo perché dentro la fibra si possono propagare diversi tipi di raggi luminosi contemporaneamente. L'indice a gradino si riferisce al passaggio di rifrazione tra il

nucleo e il mantello in modo repentino e brusco. Lo scopo principale del mantello, è quello di incanalare il raggio di luce nel nucleo e quindi trasferire l'energia luminosa lungo la fibra.

I raggi luminosi che entrano nella fibra con una direzione angolata rispetto al suo asse longitudinale, saranno propagate in relazione dell'indice di rifrazione tra il nucleo e il mantello. Affinché si crei la condizione della riflessione totale e quindi l'annullamento del raggio rifratto, l'angolo del raggio incidente, deve corrispondere ad un angolo (di accettazione) tale da produrre l'effetto dell'annullamento del raggio rifratto nel nucleo. Eventuali altri raggi di luce che colpiscono la fibra al di fuori dell'angolo di accettazione, non subendo la riflessione totale, vengono dispersi nel mantello. L'angolo di accettazione, nelle fibre per telecomunicazione, è un parametro chiamato "**apertura numerica**" che equivale al seno dell'angolo di accettazione

Più piccola è la differenza tra i due indici di rifrazione, minore risulta l'angolo di accettazione o "l'apertura numerica. quindi risulta più selettivo l'ingresso dei raggi nella fibra.



Confinamento dei raggi luminosi di una fibra multimodo con profilo d'indice a gradino.

Il valore dell'indice di rifrazione del mantello è tipicamente di 1,4572, mentre quello del nucleo può variare, leggermente più alto, di qualche millesimo o centesimo.

VALORI TIPICI DI UNA FIBRA OTTICA

Indice di rifrazione del nucleo	1,466	1,5405
Rapporto tra i due indici	0,994	0,946
Angolo di accettazione	9,2°	30°
Apertura numerica	0,16	0,50

L'apertura numerica e l'angolo di accettazione sono importanti nella scelta del dispositivo per iniettare l'energia luminosa. Il raggio luminoso deve avere le dimensioni geometriche del diametro della fibra.

La miglior sorgente luminosa più adatta a tale scopo, è il laser a diodo semiconduttore, perché emana un raggio largo pochi μm ed è alto una frazione di μm .

Aree notevolmente più ampie sono emesse da altre sorgenti di luce come i diodi emettitori di luce (LED).

Modi di propagazione della luce nelle fibre ottiche.

Quando le dimensioni geometriche del nucleo sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda dell'energia guidata in una fibra ottica, il campo elettromagnetico può propagarsi solo secondo un certo numero ben definito di configurazioni possibili, che vengono definiti "modi di propagazione".

Ovviamente il numero di modi che possono propagarsi in una fibra, sarà tanto più grande quando maggiore saranno l'apertura numerica (il cono di accettazione dei raggi) e il "diametro del nucleo".

Una fibra da un nucleo del diametro di 50 μm , da una "apertura numerica" di 0,20 e da una lunghezza d'onda di 850 nm, risulterebbero possibili oltre 600 modi di propagazione.

In relazione all'ottica geometrica, il raggio angolato ha una maggiorazione del percorso rispetto al raggio assiale. Per valutare che cosa comporti questo aumento, apparentemente modesto, nel caso delle telecomunicazioni, si consideri l'ipotesi di un impulso istantaneo composto di due raggi luminosi iniettati in una fibra della lunghezza di 1 Km contemporaneamente ma con angolazioni diverse.

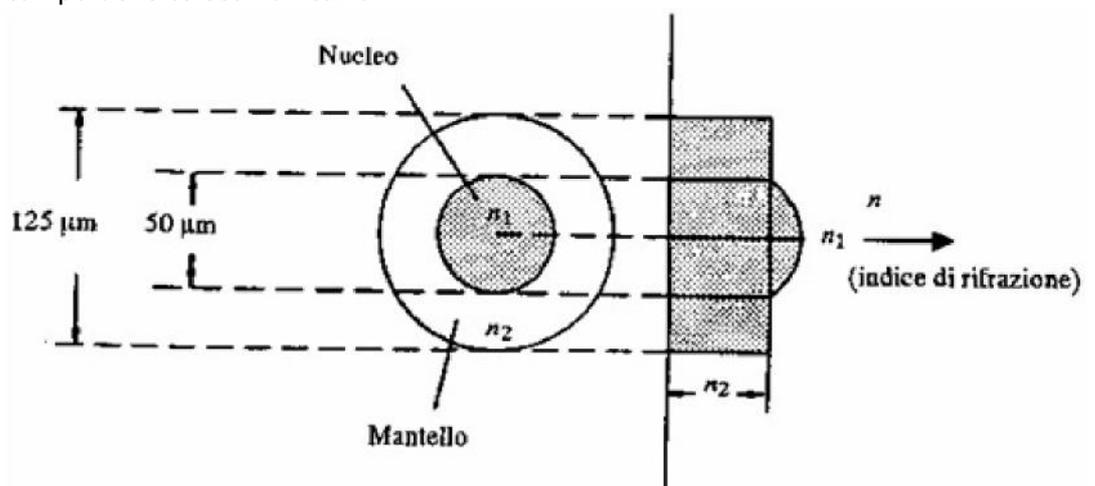
Se il primo raggio entra seguendo esattamente la direzione dell'asse della fibra ed il secondo raggio entra secondo l'angolo di accettazione, si può facilmente calcolare che il primo arriverà in anticipo di 29,5 ns rispetto al secondo. Durante la trasmissione, l'impulso iniziale acquisisce una durata finita, pari a 29,5 ns.

Un eventuale impulso successivo, per non confondersi all'arrivo con il precedente, dovrà attendere il tempo equivalente al suddetto ritardo prima di essere trasmesso.

Il fenomeno appena descritto è chiamato "dispersione modale" e la velocità di trasmissione teoricamente infinita, passerà a circa 34 Mbit/s.

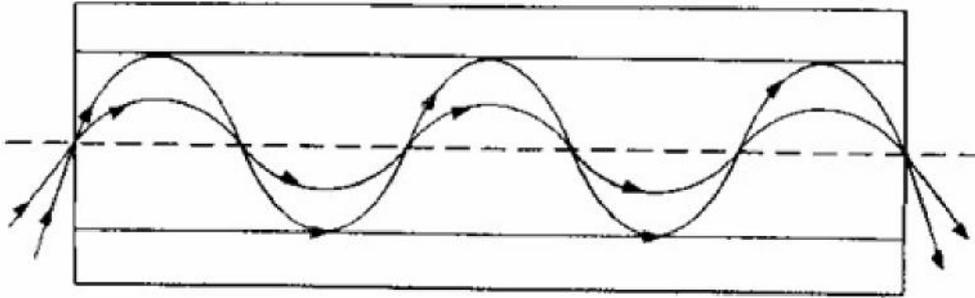
Nella realtà gli impulsi rigorosamente istantanei non esistono, ma ciò nonostante l'effetto descritto permane in tutta la sua rilevanza.

Ovviamente per gli inconvenienti descritti, il tipo di fibra fino a qui esposto, non è adatto all'uso nel campo delle telecomunicazioni.



Per questo motivo è stato sviluppato un altro tipo di fibra multimodo chiamato "a profilo graduale". In questo tipo di fibra l'indice di rifrazione varia lungo il diametro del nucleo. Da un valore massimo al centro ad un valore minimo al confine tra nucleo e mantello (all'interno del mantello l'indice rimane costante).

Con questa particolare disposizione costruttiva i raggi subiscono all'interno del nucleo



Percorso dei raggi all'interno di una fibra multimoda con profilo d'indice graduale.

una serie di microriflessioni e quindi seguono un percorso curvilineo, all'incirca sinusoidale

Si riducono così le differenze tra i tempi di percorrenza dei diversi raggi guidati all'interno della fibra, perché si vengono a compensare sia la differenza del percorso che la differenza di velocità. Le fibre a profili d'indice graduale presentano un effetto di dispersione modale di gran lunga inferiore rispetto a quello delle fibre a profilo a gradino.

Il problema della dispersione modale, che come abbiamo visto, è cruciale nelle fibre ottiche per telecomunicazioni, può essere risolto alla radice se si riducono al minimo (e possibilmente a uno solo) i modi trasmessi lungo la fibra. Si può pensare di ottenere questo risultato riducendo il diametro del nucleo, diminuendo l'apertura numerica e aumentando allo stesso tempo la lunghezza d'onda di lavoro.

Le condizioni limite per ottenere queste fibre, chiamate "fibre monomodo" possono essere determinate partendo dalla considerazione che ogni modo di propagazione è caratterizzato da un valore di lunghezza d'onda, al di sopra del quale esso non è più in grado di essere guidato. Questo valore viene detto "lunghezza d'onda di taglio".

A tale fenomeno sfugge uno solo dei modi possibili, che proprio per questo viene detto "modo fondamentale" il quale si propaga con qualsiasi lunghezza d'onda. Quindi è essenziale studiare le modalità di passaggio da una configurazione multimoda a una in cui esiste solo il modo fondamentale.

Perdita di potenza in una fibra ottica.

Nelle fibre ottiche la trasmissione della luce non può avvenire con una efficienza del 100%, in quanto molti fattori di diversa natura concorrono a provocare una progressiva diminuzione dell'ampiezza del segnale trasmesso lungo la fibra.

Data la massima importanza di usare la diffusione della fibra ottica come canale di comunicazione a distanza, l'efficienza viene spinta ai massimi valori compatibili con la

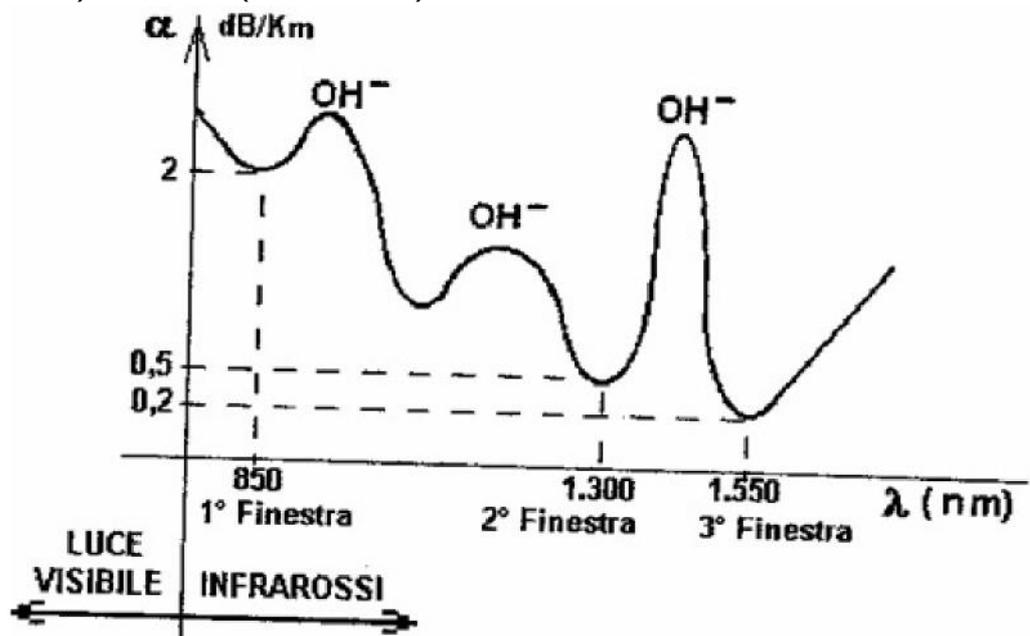
tecnologia esistente.

Da essa dipende la distanza limite oltre la quale, per evitare che in ricezione l'informazione utile si confonda con il rumore degli apparati, è necessario introdurre apparati di rigenerazione di segnale.

Poiché le perdite di propagazione dipendono fortemente dalla lunghezza d'onda della luce trasmessa, risulta essenziale individuare le regioni spettrali dove si ha la minima perdita di potenza. Tali regioni spettrali si chiamano finestre.

Le regioni che rispondono a queste caratteristiche si trovano nel campo dei raggi infrarossi dove la lunghezza d'onda va da 800 nm a oltre 1600 nm.

Le finestre che presentano meno attenuazioni sono a 850 nm (prima finestra), a 1300 nm (seconda finestra) e 1550 nm (terza finestra).



La perdita di potenza subita dal segnale ottico nell'attraversare la fibra è normalmente espressa dalla formula di uso comune nel campo delle telecomunicazioni:

$$10 \log (P_e/P_u)$$

Dove P_e è la potenza del segnale in entrata e P_u è la potenza del segnale in uscita. Come si può notare, è l'espressione del decibel (dB).

Come esempio numerico, si consideri che una potenza uscente 1000 volte più bassa di quella entrante, corrisponde ad una perdita di segnale di 30 dB. Il decadimento della potenza ottica lungo la fibra ha un andamento esponenziale, la perdita espressa in dB risulta proporzionale alla lunghezza della fibra. L'attenuazione del raggio ottico nella fibra si esprime in dB/km.

Perdite per assorbimento

Sono le perdite dovute ai vari tipi di materiale con cui sono costruite le fibre e al materiale drogante per variare l'indice di rifrazione (germanio, boro o fosforo), in quanto il suo inserimento altera inevitabilmente la regolarità della struttura cristallina.

Perdite per diffusione

Le irregolarità fisiche della fibra (formazione di bollicine, variazioni di composizione del

materiale, andamento irregolare della superficie di separazione tra nucleo e mantello, variazione di densità dovute ad elevate temperature) provocano una diffusione della luce con conseguente perdita di energia ottica. Un'altra causa è dovuta alla curvatura della fibra quando questa supera i limiti. Il raggio di curvatura della fibra deve essere sempre superiore al diametro del nucleo. I valori del raggio critico variano normalmente tra 10 e 15 mm

A seguito di una accurata tecnologia per la costruzione delle fibre ottiche per telecomunicazione, si sono raggiunti i seguenti valori di attenuazione: per una fibra di silice monomodo 0,34 dB/km a $\lambda = 1300$ nm (seconda finestra) e 0,20 dB/km a $\lambda = 1550$ nm (terza finestra).

Da calcoli eseguiti, si trova che nei due casi l'1% della luce entrata, corrispondente alla quantità di energia sufficiente ad attivare sistemi di ricezione, è ancora presente dopo rispettivamente 60 km e 100 km. Ovviamente a queste distanze si possono interporre sistemi di amplificazione (la trasmissione con cavo coassiale ne richiederebbe a decine).

Perdite per interconnessione

Accanto alle perdite distribuite nella fibra, ne esistono altre che si localizzano in particolari punti

La grande maggioranza delle perdite localizzate è dovuta alla necessità di costruire le tipologie di rete richieste unendo varie tratte per mezzo di giunzioni e di connettori.

Questo processo di interconnessione è una delle fasi più delicate nella realizzazione dei collegamenti ottici, proprio per la sua alta probabilità di introdurre molteplici fattori di perdita. Perdite per differenza geometrica della fibra.

Perdita per indice di rifrazione diverso nelle fibre.

Perdite per separazione assiale tra le fibre interconnesse.

Perdite per disallineamento angolare tra fibre interconnesse.

Perdite per disallineamento trasversale delle fibre di interconnessione.