

Panoramica

Ethernet si è evoluta dall' originale tecnologia basata sul rame a 10Mbps, passando da 100Mbps a 1000Mbps fino all'attuale Ethernet 10Gbps basata sulla fibra ottica.

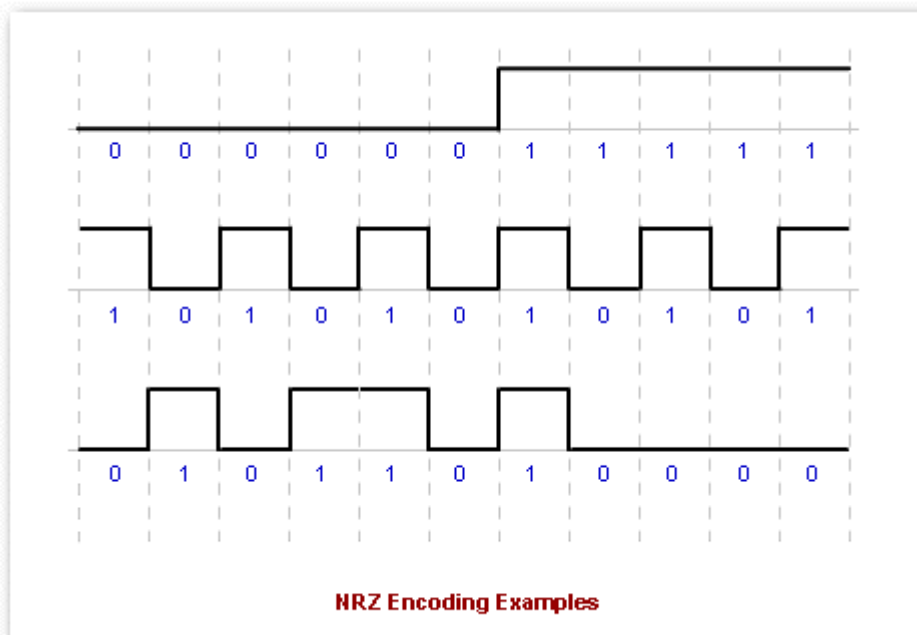
Qualunque sia la tecnologia adottata, la trasmissione dei dati a livello fisico non è certamente qualcosa di banale in quanto devono essere presi in considerazione vari problemi legati alla velocità di trasmissione, alla banda del segnale, al rapporto segnale-rumore, al bilanciamento(rivedere) della componente continua della tensione e alla sincronizzazione.

Per ognuna dei vari tipi di rete Ethernet, sono state sviluppate varie tecniche di codifica del segnale in maniera tale che i dati siano trasmessi attraverso il mezzo garantendo le massime prestazioni.

Questo documento descrive brevemente la tecniche di codifica utilizzate.

Codifica NRZ(Non-Zero-Return)

NRZ è uno dei più semplici metodi di codifica esistenti. Questa tecnica utilizza una tensione di 0 volt per lo 0 logico e una tensione più elevata per l' 1 logico. Di seguito vengono illustrati diversi esempi di tale codifica:



Questa tecnica presenta però il notevole inconveniente di non garantire la presenza di sono transizioni del segnale (livello di tensione) nel caso in cui vengano trasmesse lunghe sequenze di 0 o 1. Ciò rende impossibile per la stazione ricevente controllare se il proprio clock sia adeguatamente sincronizzato con il clock del dispositivo trasmittente e se quindi stia correttamente interpretando il segnale ricevuto.

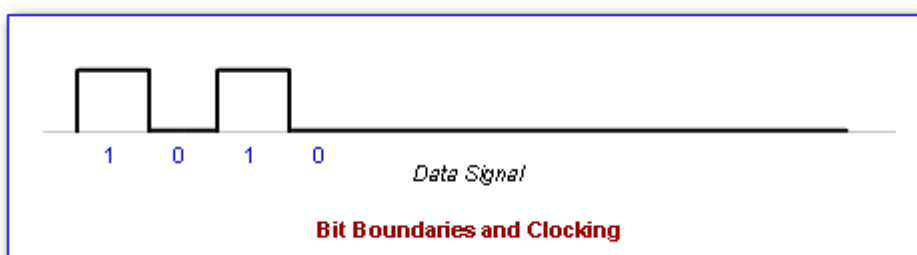
Eventuali sfasamenti dei due clock comporterebbero un'erronea determinazione dell'inizio e della fine di ogni bit ricevuto e dunque, in ultima analisi, del valore del suddetto bit.

Sincronismo (Clocking)

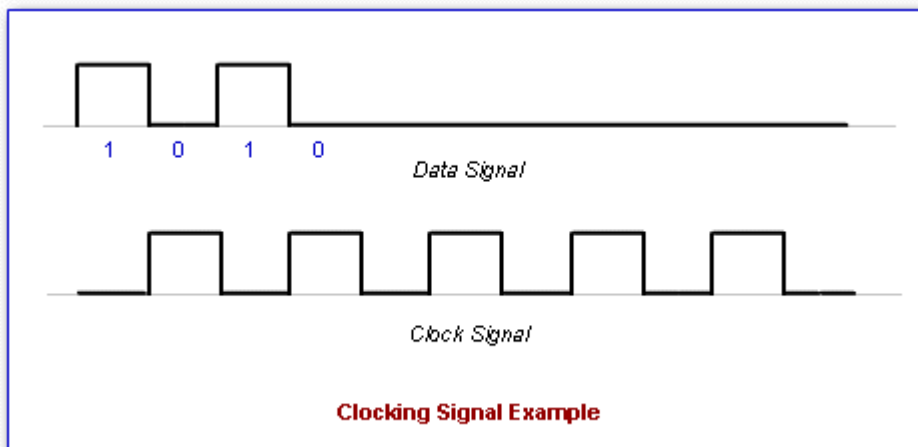
Nell' invio di dati sulla rete è necessario, per quanto detto prima, che vi sia una perfetta sincronizzazione tra mittente e destinatario della comunicazione, al fine di garantire ciò, l'informazione di temporizzazione ovvero il segnale di clock, viene trasmesso insieme ai dati in maniera che il ricevente possa sincronizzarsi con il mittente.

Nei protocolli **sincroni** si utilizza una linea separata per trasmettere il segnale di clock che viaggia insieme con i dati. Per capire l'importanza di tale segnale è sufficiente guardare la seguente figura.

E' immediato riconoscere la sequenza iniziale di 3 bit "101". Per il resto possiamo solo dire che vi è una sequenza di 0, ma tutt'altro discorso è quello di determinarne il numero.



Come si può facilmente constatare non è affatto facile distinguere ad occhio ed in assenza di variazioni del segnale il limite tra un bit e il successivo. Tuttavia se viene riportato anche il segnale di clock tale compito risulta di molto semplificato come appare evidente dalla seguente illustrazione.



Il segnale di clock ci aiuta a “delimitare” i singoli bit. La risposta cercata è 8.

Il protocollo Ethernet è **asincrono** pertanto non c'è una linea separata che trasporta il segnale di clock. Quando si trasmette un frame, gli 1 e gli 0 del preambolo iniziale servono per sincronizzare inizialmente i clock del mittente e del destinatario in maniera che i dati che seguono vengano letti correttamente. Un frame però può contenere fino a 1500 bytes e pertanto è facile che i clock si sfasino durante il trasferimento. Il preambolo dunque non è sufficiente a garantire la sincronizzazione che viene mantenuta invece attraverso la scelta di opportune codifiche. Ovviamente esistono molte ragioni che concorrono a determinare la scelta della codifica oltre l'esigenza di garantire la sincronizzazione tra mittente e destinatario, come verrà ampiamente illustrato nel seguito.

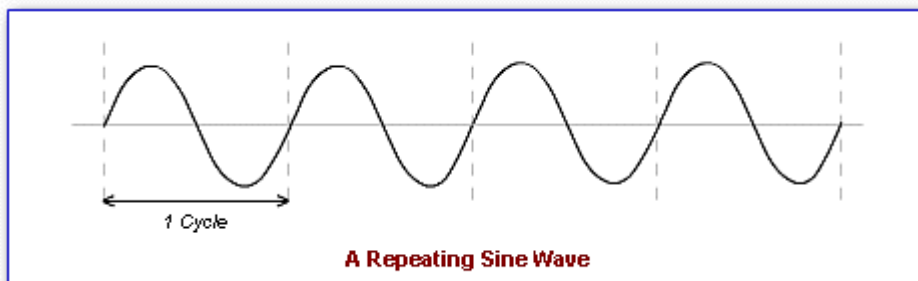
Bit Rate e Frequenza

Il tasso al quale i bit sono trasmessi lungo il canale di comunicazione è misurato in bit al secondo ed è indicato con il termine di **bit-rate**. Ad esempio 100Mbps significa che vengono trasmessi 100 milioni di bit al secondo lungo il canale. Ogni versione di Ethernet è caratterizzata dal massimo numero di bit che possono essere trasmessi in un secondo. L'Ethernet di vecchia generazione può trasferire dati ad un tasso massimo di 10Mbps, Fast Ethernet arriva fino a 100Mbps, la Gigabit Ethernet a 1000Mbps e la 10 Gigabit Ethernet a 10Gbps.

Ciò è legato alla massima frequenza che il mezzo può trasmettere senza che il segnale venga alterato in maniera da renderlo irriconoscibile.

Per esempio un cavo UTP di categoria 3, utilizzato nelle reti 10BASE-T, può trasmettere segnali fino alla frequenza di 16MHz, mentre un cavo UTP di categoria 5, utilizzato nella 10BASE-TX può arrivare fino a frequenze di 100MHz.

La frequenza di un segnale è collegata al suo periodo di oscillazione.

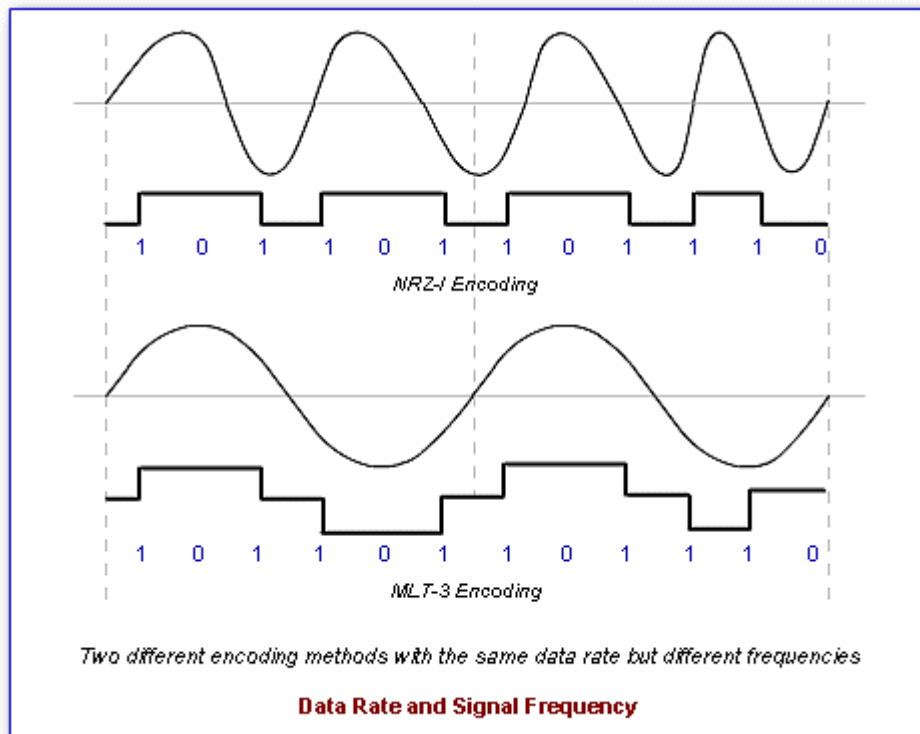


La frequenza di un segnale è misurata in Hertz ovvero in oscillazioni al secondo. Una frequenza di 100MHz corrisponde dunque a 100 milioni di oscillazioni al secondo.

Sulla base delle considerazioni appena esposte verrebbe naturale pensare che il bit-rate corrisponda alla frequenza del segnale ovvero che un bit-rate di 100Mbps equivalga ad una frequenza di 100MHz...

In realtà questi due valori sono per le reti Ethernet molto diversi e di rado si verifica una simile corrispondenza.

La relazione tra questi due parametri dipende dal tipo di codifica. Nella figura seguente ad esempio sono mostrati due differenti metodi di codifica del segnale. In entrambi i casi il bit-rate è lo stesso mentre la frequenza del primo segnale è doppia rispetto a quella del secondo.



In Ethernet 10BASE-T il tipo di codifica utilizzato fa sì che effettivamente vi sia una corrispondenza tra le due quantità, mentre nello standard Fast Ethernet 100BASE-TX lo schema di codifica utilizzato permette di trasmettere con un bit-rate di 100Mbps con una frequenza massima di soli 32MHz.

Codifica nella 10BASE-X Ethernet

Nelle prime implementazioni, Ethernet trasferisce i dati a 10Mbps. Il protocollo utilizzato è **asincrono** e, per quanto detto, ciò significa che il clock è ricavato dal segnale. La codifica NRZ non può dunque essere utilizzata a causa della difficoltà di dedurre l'informazione di temporizzazione nel caso di lunghe sequenze di 1 o 0 come abbiamo visto prima.

Pertanto nella 10BASE-5, 10BASE-2 e 10BASE-T è utilizzato un altro schema di codifica denominato Manchester che garantisce una migliore sincronizzazione tra mittente e destinatario.

Nelle varie implementazioni ciò che varia è il mezzo attraverso il quale è trasmesso il segnale. In 10BASE-5 si tratta di un cavo coassiale "spesso", nella 10BASE-2 di un cavo coassiale "sottile" mentre in Ethernet 10BASE-T il segnale è trasmesso lungo un cavo UTP di categoria 3 anche se attualmente vengono utilizzati cavi di categoria 5 o 5e.

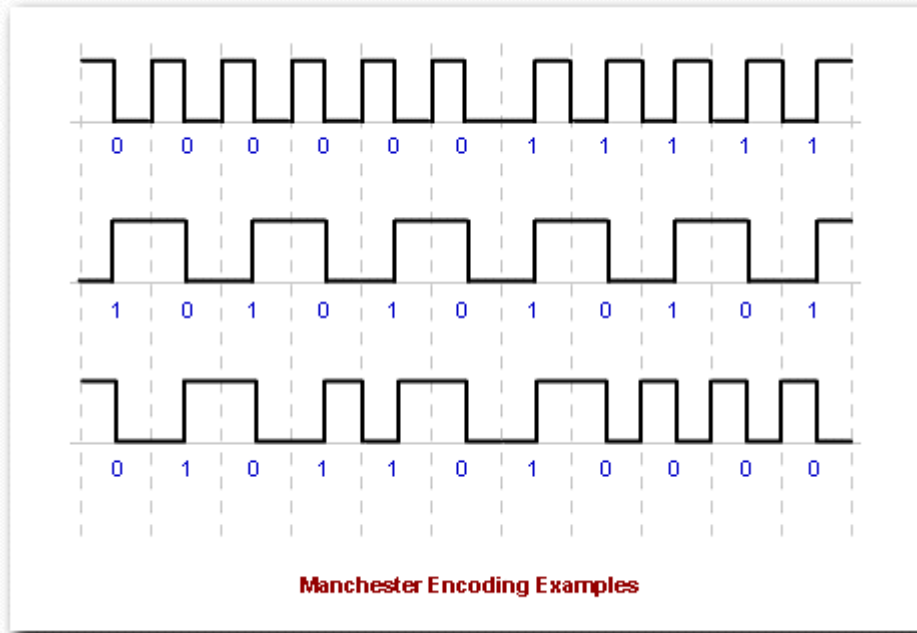
Codifica Manchester

Lo codifica Manchester è il metodo di codifica utilizzato più comunemente nelle prime versioni di Ethernet.

Il segnale viene codificato nel seguente modo:

- Per inviare uno '0' logico, si incrementa la tensione da 0 a +V in corrispondenza della metà del bit-time
- Per inviare uno '0' logico, si decrementa la tensione da +V a 0 in corrispondenza della metà del bit-time

La figura seguente mostra un'applicazione concreta di tale schema di codifica:



Osservando la figura si vede che le transizioni alto-basso rappresentano uno '0' logico, mentre quelle basso-alto un '1' logico.

Vantaggi

Questa tecnica di codifica del segnale garantisce che, indipendentemente dal tipo di sequenza di bit da trasmettere, vi siano un numero elevato di transizioni del livello di tensione a metà del bit-time. Tali variazioni consentono di determinare l'inizio e la fine di ogni bit, poiché ogni transizione può essere utilizzata per sincronizzare il clock del ricevente.

Ciò rende, in ultima analisi, questo schema di codifica "auto-sincronizzante" e rappresenta la ragione per la quale è preferito a quello NRZ.

Riassumendo...

- Non è richiesta una linea separata per il clock
- Le lunghe sequenze di '0' e '1' non causano sfasamenti tra il clock del mittente e quello del destinatario

Svantaggi

Se viene trasmessa una sequenza di 0 e 1 alternati la frequenza del segnale è di 5MHz. Quanto invece vengono trasmesse sequenze di 0 o sequenze di 1 la frequenza raddoppia come si vede dalla figura precedente. Dunque mentre la frequenza media del segnale è pari a 5MHz, nel caso peggiore questa si porta a 10MHz.

Riassumendo...

- La modulazione di frequenza richiede una banda del segnale doppia rispetto alla modulazione di ampiezza NRZ
- E' necessario un hardware di decodifica più complesso

Codifica nella Fast Ethernet a 100Mbps

Abbiamo visto che in origine Ethernet utilizzava lo schema di codifica Manchester in cui l'informazione di sincronizzazione poteva essere estratta da ogni singolo bit.

Come mostrato prima, la frequenza del segnale può raddoppiare passando dai 5MHz ai 10MHz per via delle ulteriori transizioni del livello di tensione presenti quando si trasmettono bit identici.

Se tale algoritmo di codifica dovesse essere utilizzato anche nella Fast Ethernet a 100Mbps, la frequenza di alcune delle componenti armoniche del segnale potrebbe raggiungere i 375MHz.

Considerato che un cavo UTP di categoria 5 ha una banda passante di 100MHz, ne risulta che tale schema di codifica non può essere utilizzato in questo caso.

Per rispettare il vincolo rappresentato dalla banda passante del mezzo trasmissivo sono adottate due schemi alternativi di codifica: MLT-3 per la 100BASE-TX e NRZ-I per la 100BASE-FX.

Vantaggi

Entrambe le tecniche di codifica citate riducono la banda passante del segnale entro i limiti fissati dalla banda del cavo ovvero 100MHz.

Svantaggi

Purtroppo entrambe le tecniche utilizzate non garantiscono la perfetta sincronizzazione, in quanto non vi sono transizioni del livello di tensione, come nel caso del metodo NRZ, quando vengono trasmesse sequenze di 0.

Per impedire che ciò possa accadere è necessario effettuare un'ulteriore codifica. I dati vengono prima codificati utilizzando un metodo chiamato 4B/5B. Quindi il risultato di tale codifica viene a sua volta codificato secondo uno dei due metodi sopra citati.

Questa "doppia codifica" assicura che non vi siano problemi per quanto concerne la presenza di transizioni del livello di tensione e allo stesso tempo garantisce una frequenza del segnale compatibile con la banda passante del mezzo (dunque sotto i 100MHz).

Più precisamente, il primo schema di codifica (4B/5B) si assicura che vi siano transizioni, mentre il secondo (che può essere MLT-3 o NRZ-I) mantiene la frequenza del segnale risultante entro limiti accettabili.

Codifica 4B/5B

Questo schema di codifica sostituisce gruppi di 4bit con gruppi di 5bit scelti in maniera tale che vi sia almeno una transizione ogni 5bit.

Le corrispondenze utilizzate sono mostrate di seguito:

	0	1	2	3	4	5	6	7
4-bit Nibble	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
5-bit Code	11110	01001	10100	10101	01010	01011	01110	01111

	8	9	10	11	12	13	14	15
4-bit Nibble	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
5-bit Code	10010	10011	10110	10111	11010	11011	11100	11101

Diciamo che si voglia codificare la sequenza 01110100010000. I bit devono essere prima raggruppati in gruppi di 4-bit (nibble). Quindi ognuno di tali *nibble* deve essere sostituito dal corrispondente gruppo di 5-bit secondo la codifica mostrata nella tabella precedente.

Il risultato è il seguente:

Data stream:	0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0
4 bit nibbles:	0111 0100 0010 0000
5-bit stream:	01111 01010 10100 11110

La sequenza di bit risultante viene quindi trasmessa secondo uno degli schemi MLT-3 o NRZ-I a seconda che il mezzo trasmissivo sia i doppioli di rame (100BASE-TX) o la fibra ottica (100BASE-FX).

Codifica MLT-3

Utilizzato nelle reti Fast Ethernet 100BASE-TX, è simile alla codifica Manchester in quanto ogni '1' logico è rappresentato da una transizione del livello di tensione. Tuttavia mentre nella codifica Manchester il segnale varia tra due livelli di tensione (0 o +V), un segnale codificato secondo lo schema MLT-3 può assumere 3 valori di tensione (-V o 0 o +V).

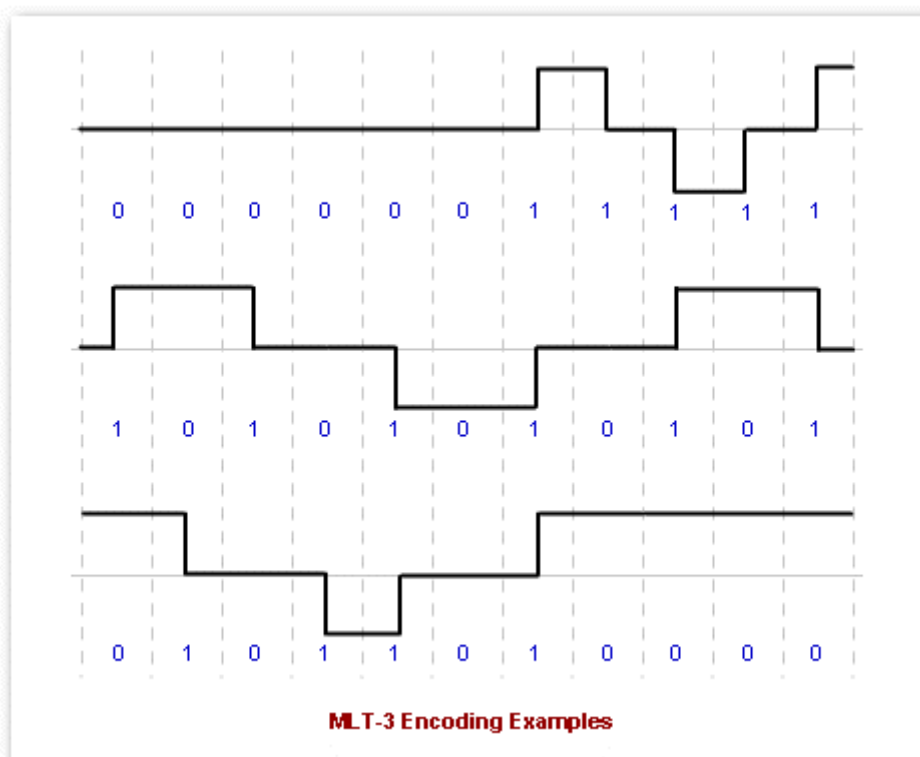
L'algoritmo applicato è il seguente:

- Per trasmettere un '1' logico, cambia il valore della tensione al livello di tensione successivo
- Per trasmettere uno '0' logico, mantieni il valore della tensione allo stesso livello

Ad esempio, supponiamo che il livello di tensione attuale sia +V e che si desideri trasmettere un '1' logico. Ricordando che lo schema di variazione è $-V \rightarrow 0 \rightarrow +V \rightarrow 0 \rightarrow -V \rightarrow 0 \rightarrow +V$ etc...deduciamo che poiché la tensione vale +V il livello successivo è rappresentato dallo 0 ($+V \rightarrow 0$).

Per inviare un altro '1' logico la tensione deve essere abbassata a -V.

In pratica se si devono trasmettere tutti 1 la tensione sale e scende, poi risale nuovamente e ridiscende e così via...passando da un livello a quello immediatamente superiore o inferiore.



Il primo esempio della figura mostra che se si deve trasmettere una sequenza di 0 il livello di tensione non varia (come avevamo già accennato prima).

Per dimostrare che quando lo schema 4B/5B viene applicato prima della codifica MLT-3, assicura la presenza di transizioni anche in presenza di sequenze di 0, vediamo come viene codificata la sequenza 00000000:

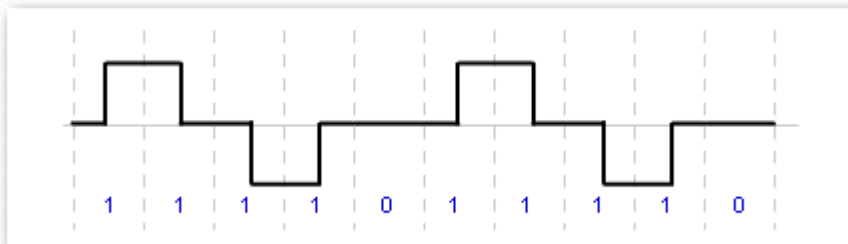
Data stream:	0 0 0 0 0 0 0 0
4 bit nibbles:	0000 0000
4B/5B Stream:	11110 11110
MLT-3 Stream:	+0-00 +0-00

I segni + e - corrispondono nell'ultima riga a +V(volt) e -V(volt) e gli 0 al livello base 0(volt).

I livelli di tensione corrispondenti dei primi 5 bit sono:

(valore iniziale della tensione) $0 \rightarrow +V$ (primo 1) = +
 $+V \rightarrow 0$ (secondo 1) = 0
 $0 \rightarrow -V$ (terzo 1) = -
 $-V \rightarrow 0$ (quarto 1) = 0
 $0 \rightarrow 0$ (quinto 0... assenza di transizione) = 0

Il segnale risultante è mostrato di seguito:



Da quanto detto è possibile vedere che la sequenza iniziale di 0 viene convertita in una sequenza di 1 e di 0 in maniera che la tensione vari continuamente da un bit all'altro, garantendo così la sincronizzazione del dispositivo di ricezione con quello di trasmissione (le schede di rete dei due DTE/DCE).

Con un'intera transizione $-V \rightarrow 0 \rightarrow +V \rightarrow 0$ dunque è possibile trasmettere 4 bit in un periodo (vedi figura *Data Rate and Signal Frequency*) e dunque **è possibile ridurre la frequenza di trasmissione ad $\frac{1}{4}$ del Bit-Rate, dunque un Bit-Rate pari 100Mbps corrisponde teoricamente ad una frequenza max (e dunque ad una banda) di soli 25MHz.**

Nei cablaggi 100BASE-T tuttavia a causa dell'ulteriore codifica 4B/5B applicata la segnale un bit-rate di 100Mbps teorico corrisponde a un bit-rate effettivo di 125Mbps (vengono trasmessi 5 bit ogni 4).

Un quarto di 125Mbps (bit-rate del segnale codificato 4B/5B) corrisponde ad una banda di 32.5MHz.

Codifica NRZ-I(Non Zero Return Inverted)

Metodo di codifica utilizzato nelle reti 100BASE-FX. L'algoritmo è il seguente:

- Per trasmettere un '1' logico è necessario invertire la tensione rispetto a quella precedente a metà bit-time
- Per trasmettere un '0' logico la tensione rimane invariata

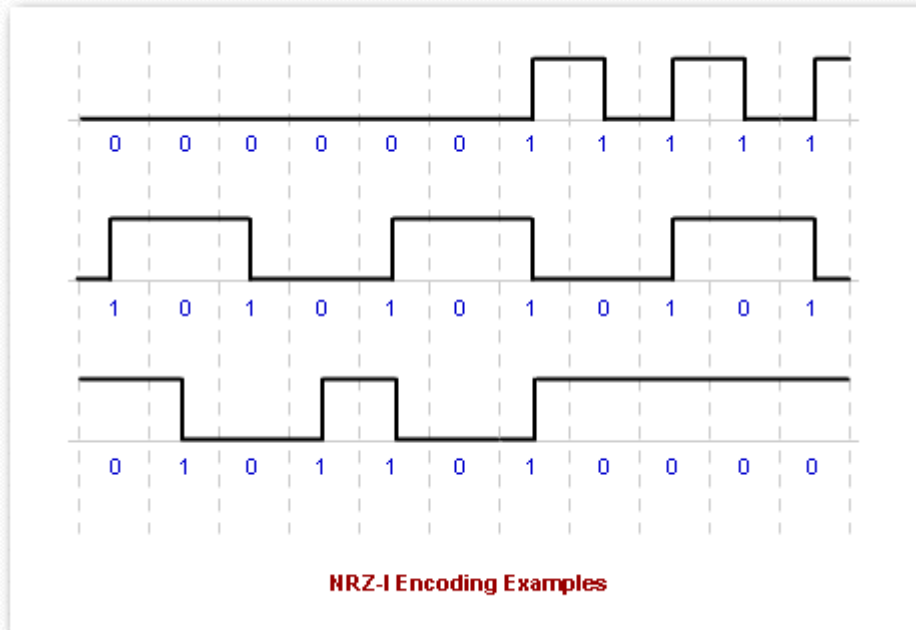
Se la tensione attuale è di 0V e voglio trasmettere 1, il nuovo livello di tensione sarà +V (la transizione di tipo basso-alto)

Se la tensione attuale è di +V e voglio trasmettere 1, il nuovo livello di tensione sarà 0V (la transizione di tipo alto-basso)

La trasmissione di uno 0 invece lascia la tensione al valore precedente.

Come nel MLT-3 l'effettivo segnale prodotto è diverso a seconda del valore iniziale della tensione.

Di seguito sono riportati esempi dell'applicazione di tale metodo a differenti sequenze di 1 e 0



Questo metodo non è utilizzato nelle connessioni 100BASE-TX perché i cavi UTP di categoria 5 hanno una banda insufficiente (la banda richiesta è la metà del bit-rate).

Nella fibra invece la banda non è limitata dall'interferenza elettromagnetica e pertanto è possibile utilizzare questo schema di codifica.

Codifica nella Gigabit Ethernet

Anche qui per garantire il rispetto delle specifiche richieste in termini di banda del mezzo, rapporto segnale-rumore, variazioni del livello di tensione sufficientemente frequenti da permettere la sincronizzazione e la regolazione della continua, portano ad utilizzare due tecniche di codifica al posto di una sola.

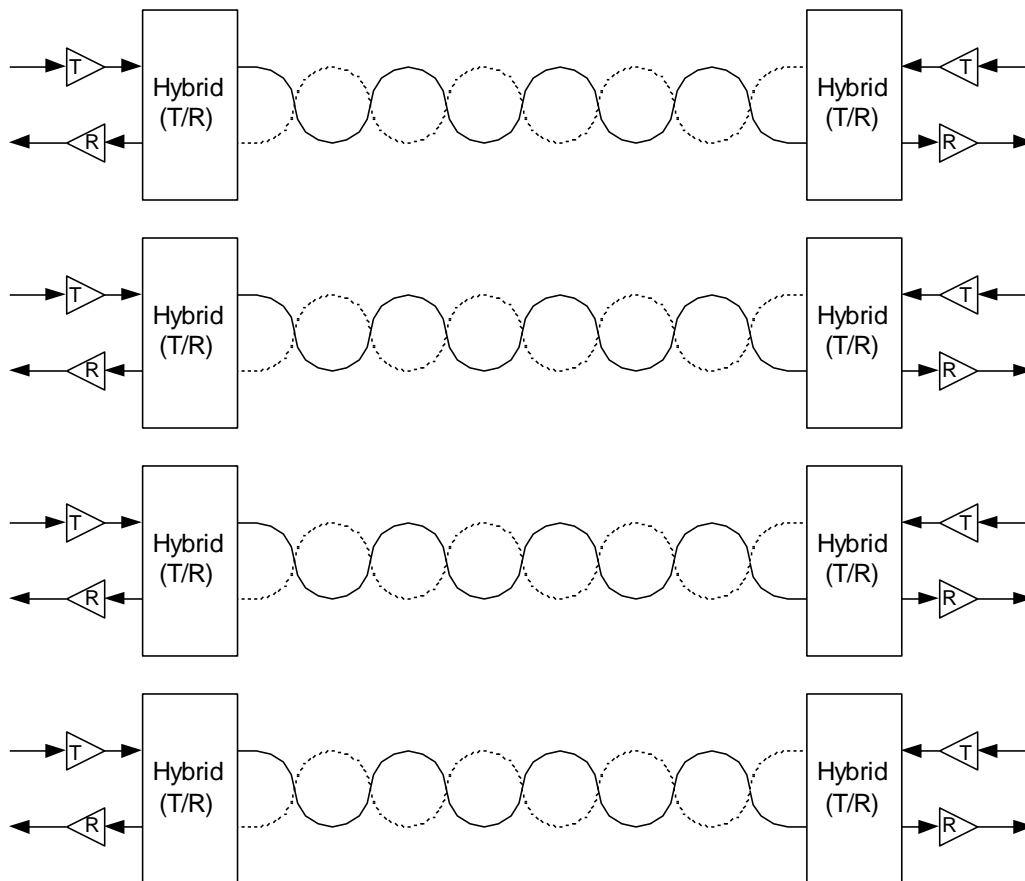
Nella Gigabit su rame (1000BASE-T) si ricorre alle codifiche 8B1Q4 e 4D-PAM5

Nella Gigabit su fibra (1000BASE-X) si ricorre alle codifiche 8B10B e NRZ

Codifica 8B1Q4/4D-PAM5 nella 1000BASE-T

La Gigabit Ethernet 1000BASE-T è progettata in maniera da poter operare in modalità full-duplex alla velocità di 1000Mbps. Per ottenere simili prestazioni è necessario utilizzare tutte e quattro le coppie di cavi (invece delle solite 2) simultaneamente sia per trasmettere che per ricevere.

Ogni coppia di cavi può essere utilizzata sia per trasmettere che per ricevere allo stesso tempo se necessario. Ciò significa che vi sono delle collisioni permanenti sul cavo.



Per raggiungere i 1000Mbps, ogni coppia deve essere in grado di trasmettere ad un bit-rate di 250Mbps (essendo 4 le coppie di doppini che compongono un cavo UTP di categoria 5 o 5E).

La banda del segnale trasmesso deve però essere opportunamente ridotta in maniera da rientrare in quella del cavo. Anche qui dunque come già accennato viene utilizzata una doppia codifica.

La codifica 8B1Q4 converte ogni byte (8 bit) in 4 simboli quinari ($8B = 8\text{Bit}$ $Q4 = 4\text{simboli quinari}$).

Se indichiamo ognuno dei simboli *quinari* (in quanto possono assumere 5 valori diversi) con una cifra es. -2, -1, 0, +1, +2, possiamo concludere che un gruppo di 8 bit viene "tradotto" in una sequenza di 4 simboli del tipo: +2, -1, 0, +1.

Ognuno di tali simboli viene trasmesso attraverso il cavo con una tensione particolare (-1V, -0.5V, 0V, 0.5V, 1V).

Questa codifica prende il nome di 4D-PAM5, in quanto **4 simboli** vengono trasferiti simultaneamente (uno per ogni doppino) utilizzando **5 livelli di tensione possibili per ogni simbolo**.

Poiché ogni simbolo rappresenta 2 bit, 250Mbps corrispondono ad una frequenza di clock di 125Mhz.

Codifiche 8B10B/NRZ nella 1000BASE-X

Viene utilizzata una coppia di fibre, una per la trasmissione e l'altra per la ricezione, quindi la modalità è full-duplex e non vi sono collisioni.

Esistono due tecnologie in fibra ottica che operano a 1000Mbps : 1000BASE-SX e 1000BASE-LX.

Nella connessione 1000BASE-SX, dove S sta per short wavelength (lunghezza d'onda corta), gli impulsi di luce sono trasmessi su una fibra multimodale.

Nella 1000BASE-LX, ove L sta per long wavelength (lunghezza d'onda lunga), gli impulsi di luce sono trasmessi su una fibra monomodale.

Lo schema di codifica 4B5B/NRZ-I utilizzato nella Fast Ethernet mal si adattava alla fibra ottica per via dell'assenza di un bilanciamento della continua. Trasmettere lunghe sequenze di 0 e di 1 su fibra infatti può provocare il surriscaldamento del laser incrementando la probabilità di errori di trasmissione.

La duplice codifica utilizzata permette anche in questo caso di soddisfare questo e gli altri requisiti richiesti.

La codifica 8B10B è simile a quella 4B5B, solo che in questo caso i bit vengono presi in gruppi di 8 e sostituiti con un gruppo di 10 bit scelto opportunamente tra le combinazioni disponibili. Per garantire un data-rate di 1Gbps è necessario dunque disporre di una connessione a 1.25Gbps effettivi per via dei bit aggiunti.

La codifica permette di ottenere il bilanciamento della continua e di garantire la sincronizzazione. Ciò è ottenuto facendo sì che il numero di 0 sia pari al numero di 1 trasmessi.

Esempio di codifica 8B/10B

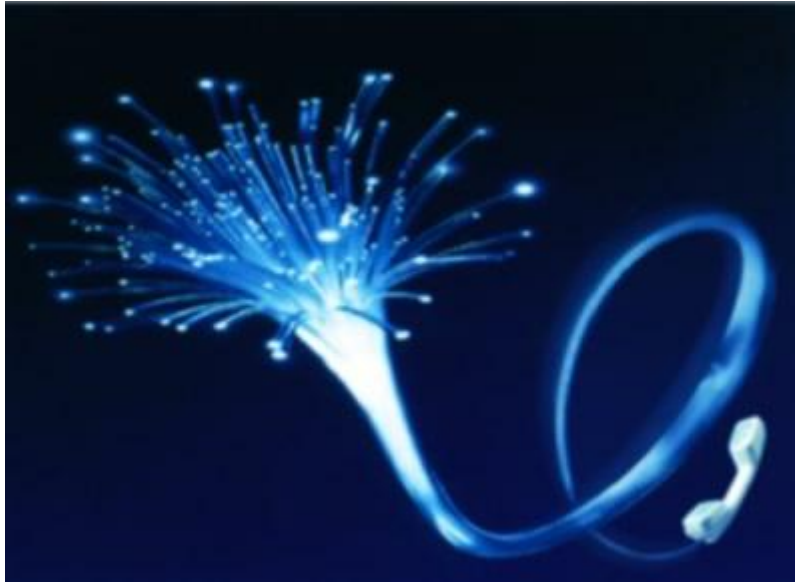
Hex Value	Sequenza binaria	Codici utilizzati quando il numero di 1 precedenti è basso	Codici utilizzati quando il numero di 1 precedenti è alto
00	00000000	1001110100	0110001011
01	00000001	0111010100	1000101011
02	00000010	1011010100	0100101011
03	00000011	1100011011	1100010100
04	00000100	1101010100	0010101011
05	00000101	1010011011	1010010100
06	00000110	0110011011	0110010100
07	00000111	1110001011	0001110100
08	00001000	1110010100	0001101011
09	00001001	1001011011	1001010100
0A	00001010	0101011011	0101010100
0B	00001011	1101001011	1101000100
0C	00001100	0011011011	0011010100
0D	00001101	1011001011	1011000100
0E	00001110	0111001011	0111000100
0F	00001111	0101110100	1010001011

Grazie allo schema di codifica appena visto è possibile utilizzare come secondo algoritmo di codifica del segnale il metodo NRZ che da solo non sarebbe soddisfacente in quanto non garantisce di per sé un bilancio della continua e la sincronizzazione.

Codifica sulla 10Gigabit Ethernet

Per quanto concerne gli ultimi sviluppi di questa tecnologia, esistono diverse implementazioni tutte basate su fibra ottica e con duplice codifica. Alcune implementazioni utilizzano la codifica 8B10B oltre uno schema 64B/66B che riduce il numero di bit aggiunti rispetto a quelli da trasmettere.

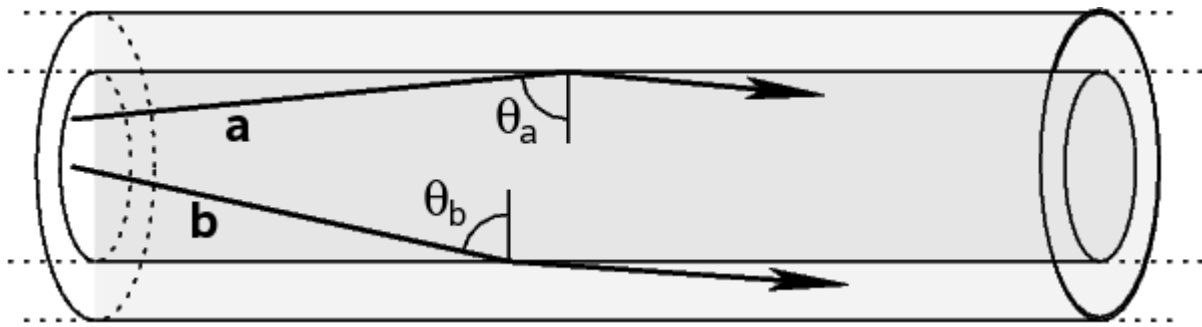
Cenni sulla fibra ottica



Uno studio rigoroso della fisica delle fibre ottiche richiede concetti di ottica quantistica.

Usando un paragone di ottica classica, nelle fibre ottiche avviene un fenomeno di riflessione totale interna, per cui la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del *core* e del *cladding* intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente, in pratica finché la fibra non compie curve troppo brusche.

In figura sono rappresentati due raggi luminosi, cioè due treni di radiazione elettromagnetica, che incidono sull'interfaccia tra *core* e *cladding* all'interno della fibra ottica. Il fascio **a** incide con un angolo θ_a superiore all'angolo critico di riflessione totale e rimane intrappolato nel nucleo; il fascio **b** incide con un angolo θ_b inferiore all'angolo critico e viene rifratto nel *cladding* e quindi perso. È importante ricordare che in ottica si indica l'angolo tra la radiazione e la normale alla superficie, cioè $90^\circ - \alpha$ dove α è l'angolo, più intuitivo ma più scomodo da utilizzare, tra la radiazione e la superficie.



All'interno di una fibra ottica il segnale può propagarsi in modo rettilineo oppure essere riflesso un numero molto elevato di volte.

Il modo di propagazione rettilineo si dice di **ordine zero**.

Le fibre **monomodali** consentono la propagazione di luce secondo un **solo modo**, quelle **multimodali** consentono la propagazione di **più modi**, e hanno un diametro del core maggiore.

Le fibre multimodali permettono l'uso di dispositivi più economici, ma subiscono il fenomeno della dispersione intermodale, per cui i diversi modi(ogni modo è associato a frequenze diverse) si propagano a velocità leggermente diverse e questo limita la distanza massima a cui il segnale può essere ricevuto correttamente.

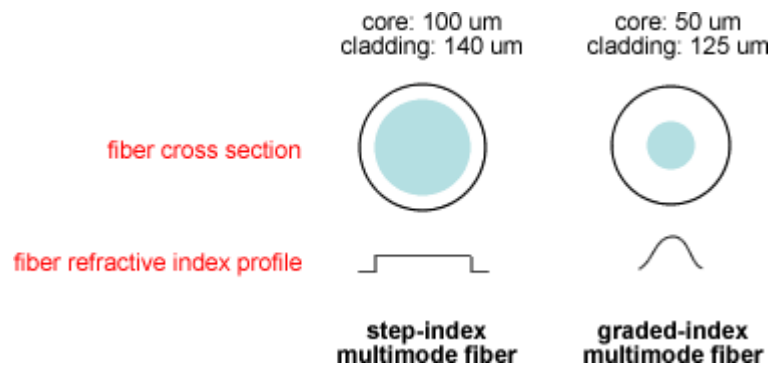
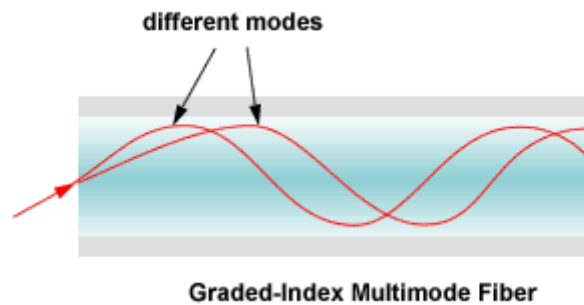
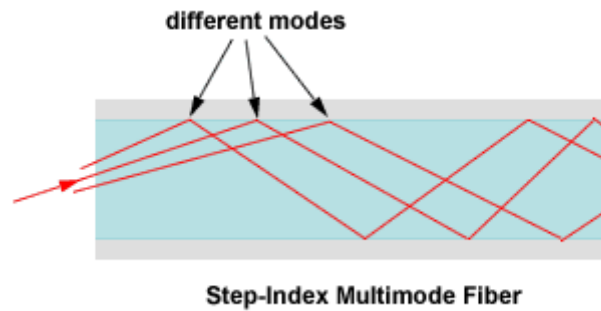
Le fibre monomodali di contro hanno un prezzo molto più elevato rispetto alle multimodali, ma riescono a coprire distanze e a raggiungere velocità nettamente superiori.

Le fibre **Multimodali** possono essere divise ulteriormente in fibre **step index** e **graded index**

- Nelle fibre **step index** l'indice di rifrazione è costante lungo tutta la sezione del *core* e cambia improvvisamente allorquando si incontra il cladding.
- Nelle fibre **graded index** l'indice di rifrazione cambia gradualmente dal core al cladding, permettendo l'uso di luce multicromatica.

Nelle fibre graded index l'indice di rifrazione variabile fa sì che il fascio luminoso venga riportato verso il centro. In pratica non avviene riflessione totale all'interfaccia con il cladding.

Sebbene anche in queste fibre, i vari modi seguano percorsi diversi, accade che l'indice di rifrazione fa sì che vi sia una sorta di compensazione, in quanto i modi che seguono i percorsi più lunghi(più a zig-zag) viaggiano anche ad una velocità maggiore(la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica dipende infatti proprio dall'indice di rifrazione).



Dispersione

La dispersione limita la banda di trasmissione. Esistono due tipi di dispersione

- **Dispersione modale:** fenomeno dovuto al fatto che il raggio luminoso non viaggia all'interno della fibra secondo un cammino prefissato, ma secondo un numero finito di modi (derivanti dalla [legge di Snell](#)). Vi saranno modi attraverso i quali il raggio arriva più velocemente a destinazione, altri che invece lo fanno arrivare più tardi (il primo caso limite è il modo che percorre la fibra ottica completamente dritto; il secondo caso limite è il raggio che entra nella fibra con angolo uguale all'angolo limite di accettazione, e deve quindi eseguire un numero molto alto di riflessioni. Ovviamente, un percorso del tutto dritto è più veloce di un percorso a zig-zag). A causa di questo, la forma del segnale originario viene dilatata nel tempo, e se la frequenza è troppo alta può arrivare a confondersi con l'impulso seguente (interferenza intersimbolica), impedendo dunque di leggere il segnale originario. Per ovviare a questo inconveniente, si possono utilizzare fibre multimodali 'graded index' (nelle quali l'indice di rifrazione varia con continuità del centro del core fino al cladding) o fibre monomodali.

- **Dispersione cromatica:** fenomeno dovuto al fatto che la luce pura che viene trasmessa si compone in realtà di fasci di luce di colore diverso, con lunghezza d'onda e velocità di attraversamento diverse. Si ha lo stesso problema visto sopra: può capitare che il fascio luminoso di colore rosso (il più lento) si confonda con il fascio luminoso di colore violetto (il più veloce) dell'impulso seguente, rendendo impossibile la decodifica del segnale originario. Per risolvere questo problema si utilizza led monocromatici per trasmettere la luce.

Idealmente, le fibre ottiche sono un mezzo di trasmissione perfetto. Infatti, oltre a non risentire in nessun modo di disturbi elettromagnetici o di diafonia, se strutturate adeguatamente per garantire la riflessione totale del segnale d'ingresso teoricamente permettono di trasferire completamente la potenza in ingresso nell'uscita.

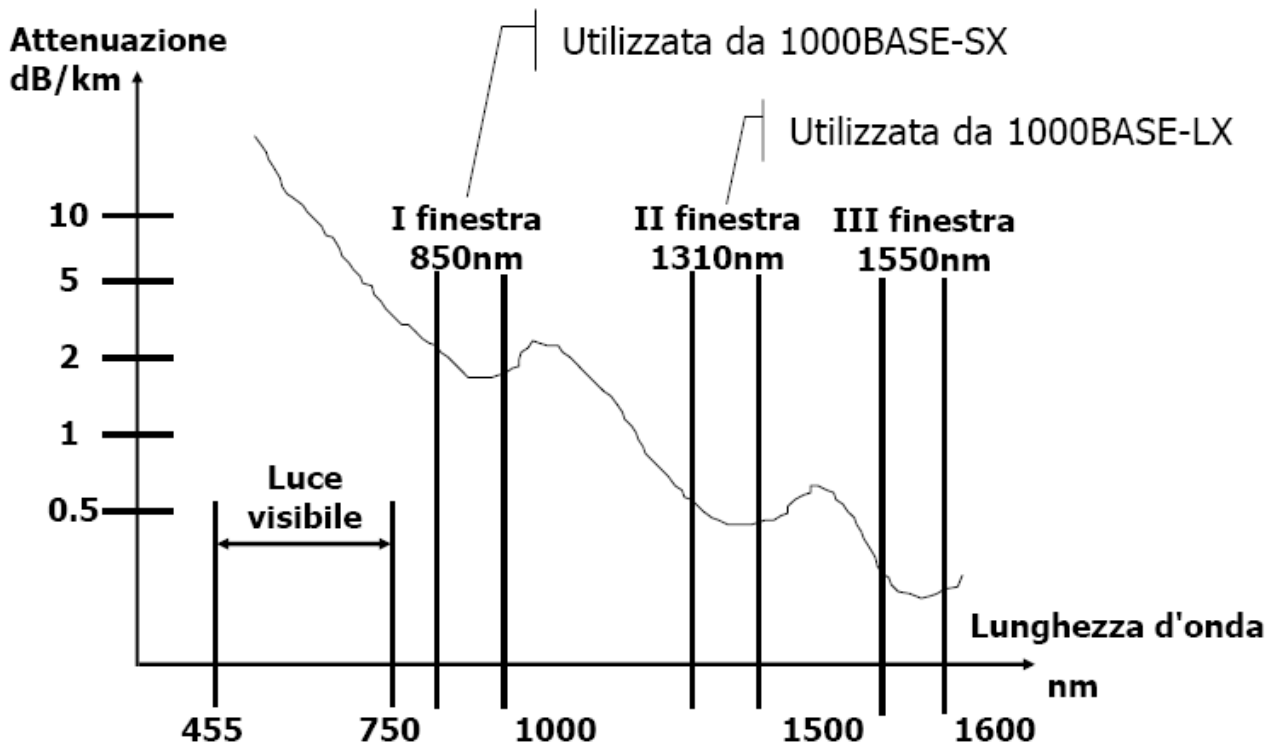
In pratica, però, intervengono dei fenomeni fisici che causano delle perdite di potenza lungo la fibra; tali perdite, solitamente valutate statisticamente in dB/km, sono dovute a :

- proprietà intrinseche del mezzo;
- presenza di impurità all'interno del materiale;
- specifiche delle guide dielettriche aperte.

Attenuazione

L'attenuazione del segnale, la componente dovuta alle perdite di assorbimento, dipende dalla frequenza, pertanto si cerca di lavorare in bande di frequenza in cui il mezzo presenti un'attenuazione accettabile(per km) e soprattutto costante per le varie frequenze.

In caso contrario vi sarebbero componenti a frequenza diversa del segnale che subirebbero un'attenuazione diversa e ciò porterebbe a distorcere il segnale.



Oltre alle perdite dovute al mezzo, esistono altre tipologie di perdita in una guida dielettrica. Queste non sono dovute al tipo di luce utilizzata ma sono legate alle deformazioni e alle discontinuità presenti nella guida;