

3

I MEZZI TRASMISSIVI

Per realizzare le tipologie di rete precedentemente elencate (LAN, MAN e WAN) è necessario collegare fisicamente gli elaboratori e le apparecchiature di rete mediante opportuni mezzi trasmissivi. La varietà di mezzi trasmissivi oggi disponibili è notevole, e la scelta determina diverse possibili tipologie di impiego (punto-punto, punto-multipunto o broadcast) nonché un'ampia gamma di velocità di trasmissione: da poche centinaia di bit al secondo (b/s) a miliardi di bit al secondo (Gb/s). Il presente capitolo tratterà soltanto i mezzi più utilizzati nella realizzazione di LAN. La tipologia di impiego determina a sua volta quali topologie sono realizzabili. Queste sono di importanza fondamentale per quanto riguarda le tecniche di instradamento dei messaggi, la tolleranza ai guasti e, più in generale, l'organizzazione logica dei protocolli di livello superiore.

3.1 LA TRASMISSIONE DELLE INFORMAZIONI

Come è noto, la trasmissione delle informazioni in forma digitale, cioè la cosiddetta trasmissione dati, richiede innanzitutto la codifica di tali informazioni in termini di bit. Esempi di codifiche sono la tabella ASCII per i caratteri alfanumerici e il PCM (Pulse Code Modulation) per i segnali analogici, che possono rappresentare voce, musica, ecc. I dati digitali così ottenuti vengono poi trasmessi associando ogni bit ad un fenomeno fisico che può essere riprodotto a distanza attraverso il mezzo trasmissivo utilizzato. Si effettua a tal fine un'ulteriore codifica, che in alcuni casi può essere piuttosto complessa, come si vedrà più avanti.

I mezzi trasmissivi utilizzati nelle reti di calcolatori si suddividono attualmente in tre categorie, in base al tipo di fenomeno fisico utilizzato per la trasmissione dei bit:

- mezzi elettrici: sono i mezzi trasmissivi classici del passato, che sfruttano la proprietà dei metalli di condurre l'energia elettrica. Per trasmettere i dati si associano ai bit particolari *valori* di tensione o di corrente, o determinate *variazioni* di tali grandezze.
- onde radio (detti mezzi "wireless"): sono stati introdotti successivamente ai mezzi elettrici, e le applicazioni spaziano dalle reti locali (anche se di diffusione abbastanza ridotta) ai collegamenti via ponte radio o satellite per reti geografiche. In essi, il fenomeno fisico utilizzato è l'onda elettromagnetica, una combinazione di un campo elettrico ed un campo magnetico variabili, che ha la proprietà di propagarsi nello spazio e di riprodurre a distanza una corrente elettrica in un dispositivo ricevente (antenna).
- mezzi ottici: laser e fibre ottiche, in cui il fenomeno fisico utilizzato è la luce. Si tratta dei mezzi trasmissivi più recenti, che hanno rivoluzionato il settore delle telecomunicazioni.

3.1.1 Attenuazione, distorsione, rumore, diafonia

Tutti i fenomeni fisici utilizzati si basano sul trasporto di una qualche forma di energia che codifica l'informazione (che chiameremo *segnale*), a cui il sistema fisico attraversato si oppone, determinando una *attenuazione* dell'energia trasmessa. Tale attenuazione è inoltre diversa a seconda della frequenza, e questo determina la necessità di considerare, per ogni mezzo trasmissivo, la sua *banda passante*, cioè l'insieme delle frequenze che possono essere trasmesse senza attenuazione eccessiva. A seconda delle applicazioni, la banda passante può essere definita semplicemente come valori di frequenza minimo e massimo ai quali l'attenuazione raggiunge valori standard (ad esempio si dimezza la potenza del segnale), oppure tramite tabelle che forniscono i valori di attenuazione a diverse frequenze (è questo il caso dei mezzi elettrici adottati nelle LAN). Il diverso comportamento del mezzo trasmissivo in funzione della frequenza genera anche *distorsione*, cioè l'alterazione dell'andamento nel tempo del segnale (tale andamento nel tempo, rappresentabile graficamente, prende il nome di *forma d'onda*). Ad alterare il segnale concorre anche il *rumore*, cioè la sovrapposizione al segnale di energia proveniente da elementi esterni al sistema trasmissivo (ad esempio disturbi elettromagnetici dovuti a linee di alimentazione elettrica) o interni (ad esempio il rumore generato dai dispositivi elettronici).

di amplificazione). Poiché le caratteristiche del rumore possono essere note soltanto in termini statistici e non esatti, in fase di ricezione non è in generale possibile distinguere tra segnale originale e rumore, ed è necessario adottare tecniche adeguate per prevenire errori di ricezione a causa del rumore. Un tipo particolare di rumore, frequente nei sistemi trasmissivi adottati per le LAN, è rappresentato dalla *diafonia*. L'energia che si somma a quella del segnale sul mezzo trasmissivo in esame proviene dalla trasmissione di un altro segnale su un altro mezzo trasmissivo analogo in prossimità del primo.

Per tutti i fenomeni appena descritti non è importante quantificarne l'effetto in termini assoluti, bensì in termini relativi, cioè determinare quanto viene alterato il segnale trasmesso. Per questo si usa come unità di misura il *decibel* (dB), grandezza che esprime il rapporto, in termini logaritmici, di due grandezze fisiche. Alcuni esempi:

- *attenuazione* di un segnale elettrico: rapporto tra la tensione del segnale in ingresso al mezzo trasmissivo e la sua tensione in uscita

$$\text{attenuazione}_{\text{dB}} = 20 \log \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}}$$

- *rapporto segnale/rumore* (detto anche signal/noise, S/N) in un amplificatore di segnale elettrico: rapporto tra il massimo valore di tensione del segnale ottenibile senza distorsione e il valore della tensione del rumore generato dall'amplificatore stesso

$$S / N_{\text{dB}} = 20 \log \frac{V_S}{V_N}$$

3.1.2 Mb/s e MHz: tecniche di codifica per la trasmissione digitale

Per trasmettere le informazioni codificate in forma digitale è necessario associare ai bit determinati valori del fenomeno fisico scelto. La tecnica più ovvia consiste nell'associare semplicemente due differenti valori per lo zero e per l'uno, ma è possibile adottare tecniche più sofisticate, che garantiscono una corretta sincronizzazione del ricevitore con il trasmettitore e che permettono di ridurre la banda necessaria alla trasmissione e quindi la banda passante richiesta al mezzo trasmissivo. Una caratteristica importante delle tecniche di codifica, infatti, è il numero di variazioni del segnale necessarie per codificare un bit. Questo determina, a partire dalla velocità di trasmissione dei bit, misurata in bit al secondo (bps o b/s), la frequenza con cui varia il segnale, misurata in hertz (Hz, "pulsazioni al secondo"), che deve cadere all'interno della banda passante del mezzo trasmissivo.

È importante notare che tale frequenza rappresenta solamente il valore minimo di banda passante che il mezzo deve offrire, in quanto qualsiasi segnale non sinusoidale (come l'onda quadra generata nella trasmissione di segnali digitali), è composto, oltre che dalla fondamentale, anche da un numero teoricamente infinito di *armoniche*, segnali sinusoidali a frequenza multipla della fondamentale. La distorsione del segnale è tanto minore quante più armoniche sono trasmesse con attenuazione trascurabile.

Nei mezzi trasmissivi utilizzati nelle LAN, comunque, l'attenuazione aumenta con la frequenza in modo abbastanza graduale, e, per ogni standard di codifica, la massima attenuazione consentita è in genere specificata fino a frequenze di poco superiori a quella della fondamentale.

Le codifiche utilizzate nell'ambito delle LAN sono: *NRZ*, *Manchester*, *NRZI*, *MLT-3*. Nelle descrizioni che seguono, verranno indicati con "alto" e "basso" ("high" e "low") due possibili stati del fenomeno fisico usato per la trasmissione.

Codifica NRZ

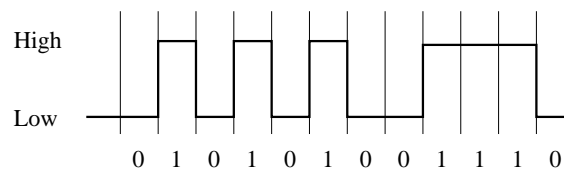


Fig. 3.1 - Codifica NRZ.

La codifica più semplice consiste nell'associare a ciascun bit un valore stabile per la sua intera durata. Tale codifica prende il nome di NRZ (*Non Return to Zero*, figura 3.1), ed è equivalente alla rappresentazione in termini di zeri e uni.

Ai fini della trasmissione, si determinano le principali caratteristiche di una codifica in base ai due casi estremi di massimo e minimo numero di transizioni generate nell'unità di tempo.

Il minimo numero di transizioni nell'unità di tempo determina la possibilità di sincronizzazione del ricevitore. Nel caso della codifica NRZ una sequenza di valori uguali non genera alcuna transizione, e, pertanto, risulta impossibile garantire la corretta sincronizzazione. Questo problema viene aggirato ricodificando e allungando le sequenze di bit da trasmettere in modo da garantire sempre, in funzione della codifica sul mezzo fisico, un certo numero minimo di transizioni. Esempi di tali codifiche sono *4B5B*, *5B6B*, discusse nel paragrafo 3.1.3.

Il massimo numero di transizioni nell'unità di tempo permette di determinare la frequenza *fondamentale* del segnale trasmesso nel caso peggiore (massima richiesta di banda). Trattandosi di un segnale ad onda quadra, la fondamentale è rappresentata dal segnale sinusoidale che la approssima, e a cui è associato il maggior contenuto in termini di potenza.

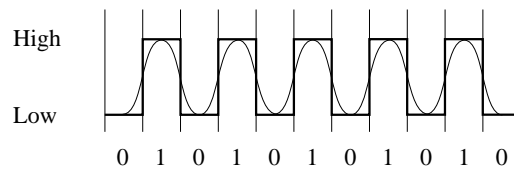


Fig. 3.2 - Frequenza fondamentale nella codifica NRZ.

Come risulta evidente dalla figura 3.2, nella codifica NRZ ogni bit occupa un semiciclo della fondamentale, e pertanto questa ha frequenza pari alla metà della frequenza di bit. Per esempio, una trasmissione a 1 Mb/s presenterà una frequenza fondamentale massima di 500 KHz.

L'utilizzo della codifica NRZ con 5B6B è previsto dallo standard 802.12 per la trasmissione a 100 Mb/s su cavo in rame a due o a quattro coppie e su fibra.

Codifica Manchester

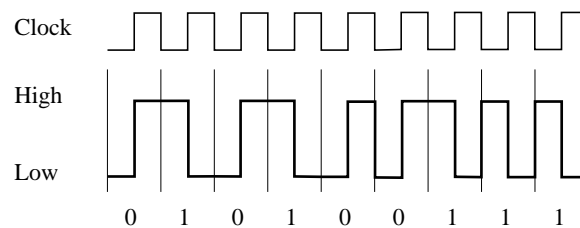


Fig. 3.3 - Codifica Manchester.

Nella codifica Manchester (figura 3.3), il segnale di clock del trasmettitore (1 ciclo = 1 bit) e il segnale di dato vengono combinati per garantire la presenza di almeno una transizione per ogni bit. In pratica, ogni bit è codificato trasmettendo un ciclo del segnale di clock, inalterato quando si trasmette uno zero, invertito quando si trasmette un uno.

Il massimo numero di transizioni viene generato trasmettendo sequenze di valori uguali. In tal caso il segnale inviato è in pratica il clock del trasmettitore, e la fondamentale ha frequenza pari alla frequenza di bit. Per una trasmissione a 10 Mb/s, quindi, la frequenza è di 10 MHz. Al vantaggio di una facile sincronizzazione si contrappone quindi lo svantaggio di una banda richiesta doppia rispetto alla codifica NRZ.

La codifica Manchester è utilizzata nelle reti Ethernet (802.3) a 10 Mb/s e Token Ring (802.5).

Codifica NRZI

La codifica NRZI (*Non Return to Zero Inverted on one*, figura 3.4), prevede una transizione per i bit a uno, a metà del bit, e nessuna transizione per i bit a zero. La transizione per i bit a uno può essere "alto-basso" o "basso-alto", a seconda dello stato del segnale in corrispondenza del bit precedente. Pertanto, si ottiene il massimo numero di transizioni con una sequenza di uni, e anche in questo caso, come già per NRZ, ogni bit occupa un semiciclo della fondamentale (figura 3.5), e quindi la frequenza della fondamentale risulta essere pari alla metà della frequenza di bit. Per esempio, la codifica NRZI è utilizzata per FDDI su fibra ottica, che a livello fisico opera a 125 Mb/s e quindi la frequenza della fondamentale è 62.5 MHz.

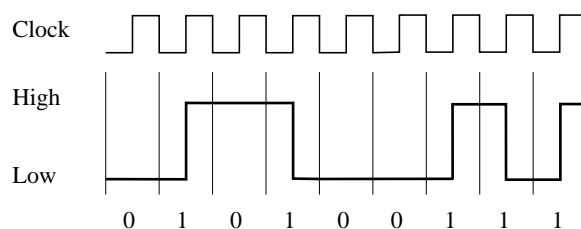


Fig. 3.4 - Codifica NRZI.

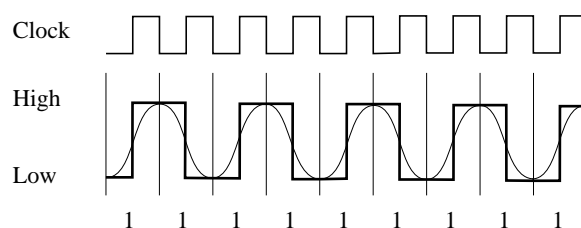


Fig. 3.5 - Frequenza fondamentale nella codifica NRZI.

Per quanto riguarda la sincronizzazione, l'unico vantaggio che la codifica NRZI offre rispetto alla codifica NRZ consiste nel fatto che per garantire la presenza di una transizione è sufficiente garantire la presenza di un uno, e non, come per NRZ, di una sequenza uno-zero o zero-uno. Resta il problema di sincronizzare il ricevitore quando si trasmette una lunga sequenza di zeri. Anche in questo caso si ricorre ad un'ulteriore codifica, 4B5B nel caso di FDDI su fibra ottica.

Codifica MLT-3

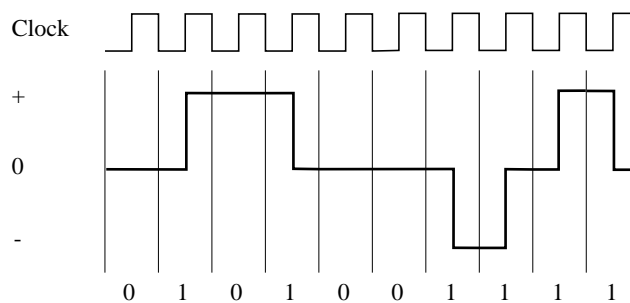


Fig. 3.6 - Codifica MLT-3.

A differenza delle codifiche viste finora, la codifica MLT-3 (figura 3.6) opera su tre livelli anziché su due. Nel caso di trasmissione su mezzo elettrico, per esempio, i tre livelli potranno essere rappresentati da una tensione positiva, una tensione negativa, e assenza di tensione (0 volt). Per quanto riguarda la codifica dei bit, invece, funziona in modo simile alla NRZI, in quanto prevede una transizione a metà dei bit a 1 e nessuna transizione per i bit a zero. Le transizioni per i bit a uno si susseguono nell'ordine: $0 \rightarrow +$, $+\rightarrow 0$, $0 \rightarrow -$, $- \rightarrow 0$, ecc.

Anche per la codifica MLT-3 il massimo numero di transizioni è dato da una sequenza di valori a uno. Tuttavia, la particolare codifica su tre valori fa sì che la frequenza della fondamentale sia soltanto un quarto della frequenza di bit (figura 3.7).

La codifica MLT-3 è utilizzata da FDDI TP-PMD e da Ethernet IEEE 802.3 100BaseTX, due standard per trasmissioni a 100 Mb/s su cavi in rame. Per FDDI e Ethernet la velocità di trasmissione sul mezzo trasmissivo è di 125 Mb/s, e quindi la frequenza della fondamentale è di 31.25 MHz. La differenza di 25 Mb/s tra la velocità nominale al livello Data Link (100 Mb/s) e la velocità a livello Fisico (125 Mb/s) è dovuta al fatto che l'assenza di transizioni per sequenze di bit a zero

impone, anche in questo caso, una ricodifica 4B5B delle sequenze da trasmettere. MLT-3 è anche stata proposta dall'ATM Forum per la trasmissione a 155 Mb/s su rame, con codifica 4B5B, per cui la frequenza della fondamentale risulta essere di 48.4375 MHz.

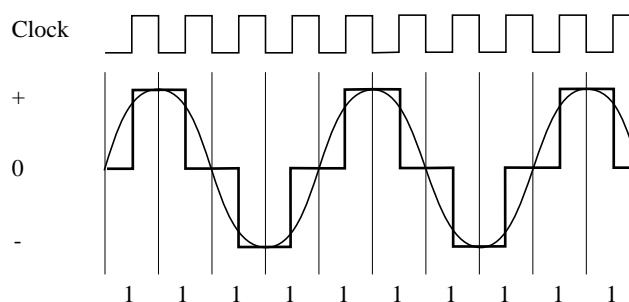


Fig. 3.7 - Frequenza fondamentale nella codifica MLT-3.

La codifica MLT-3 necessita di un rapporto segnale/rumore sul canale trasmissivo maggiore di 3-4 dB rispetto alla codifica NRZ, in quanto quest'ultima utilizza soltanto due livelli. In compenso presenta una minore emissione di radiodisturbi: una codifica MLT-3 a 125 Mb/s presenta limitate emissioni elettromagnetiche a frequenze appena poco superiori a 30 MHz.

Tecniche avanzate di codifica

A causa dell'utilizzo diffuso di doppini privi di schermatura, o schermati ma soltanto globalmente e non coppia per coppia, è sempre più sentito il problema della compatibilità elettromagnetica, problema che si accentua al crescere della velocità trasmissiva.

Una soluzione interessante consiste nell'adottare tecniche di codifica sofisticate che derivano dallo studio matematico del comportamento di particolari segnali sia nel dominio del tempo che della frequenza. Una classe di codifiche di questo tipo prende il nome di codifiche a risposta parziale (*partial response*), in cui in fase di ricezione al simbolo corrente si sovrappongono "code" dei simboli precedentemente trasmessi (interferenza intersimbolica), ma in modo controllato e quindi eliminabile. Esempi di tali codifiche sono le BPR1 e BPR4, a tre livelli, e la QPR4, a sette livelli. Queste codifiche permettono di ridurre le emissioni di radiodisturbi pur richiedendo un limitato aumento del rapporto segnale/rumore (0.5-1 dB) rispetto alla codifica NRZ.

Altre codifiche proposte per consentire elevate velocità trasmissive su doppio non schermato prendono spunto dalle tecniche utilizzate nei modem, basate su modulazioni di fase e di ampiezza e opportuni filtri nel ricevitore.

3.1.3 Codifiche 4B5B, 5B6B, 8B6T

Per tutte le tecniche di codifica viste, ad eccezione della Manchester, esistono sequenze di dati che non generano transizioni. Per garantire la trasmissione di un numero di transizioni sufficiente a consentire la sincronizzazione del ricevitore, è necessario ricodificare i dati da trasmettere, eventualmente allungandone la sequenza. Esistono due standard per fare questo: la codifica 4B5B, che codifica in cinque bit ogni possibile sequenza di quattro bit ed è usata in combinazione con NRZI o MLT-3, e la codifica 5B6B, che trasforma quintetti di bit in sequenze da sei ed è usata nello standard 802.12 unitamente alla codifica NRZ.

Lo schema di impiego della codifica 4B5B per FDDI su fibra ottica è illustrato in figura 3.8.

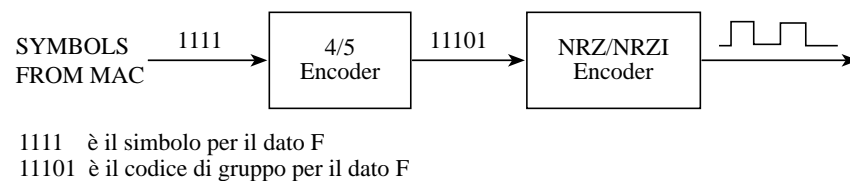


Fig. 3.8 - Esempio di codifica 4B5B.

La codifica e la relativa decodifica avvengono tramite tabelle. In tabella 3.1 è riportata la codifica dei principali simboli MAC in 4B5B.

Come si può osservare, la codifica 4B5B comprende tutti i possibili quartetti in ingresso, più alcuni simboli aggiuntivi per la gestione di un protocollo a livello fisico. L'overhead introdotto è pari ad un bit ogni quattro, cioè il 25%. Una trasmissione a 100 Mb/s al livello MAC, quindi, invierà sul mezzo fisico 125 Mb/s.

Lo schema di codifica 5B6B trasforma quintetti di bit in gruppi da sei ed è più complesso, in quanto opera in due stati possibili (detti "modo 2" e "modo 4"). I due modi differiscono dal numero di uni presenti in ogni gruppo di sei bit, e vengono ciclicamente alternati per bilanciare il numero totale di zeri e di uni trasmessi.

Valore	Simbolo	Assegnazione
00000	Q	stato di linea Quiet
11111	I	stato di linea Idle
00100	H	stato di linea Halt
11000	J	prima parte dello start delimiter
10001	K	seconda parte dello start delimiter
11110	0	quartetto di valore 0
01001	1	quartetto di valore 1
10100	2	quartetto di valore 2
10101	3	quartetto di valore 3
01010	4	quartetto di valore 4
01011	5	quartetto di valore 5
01110	6	quartetto di valore 6
01111	7	quartetto di valore 7
10010	8	quartetto di valore 8
10011	9	quartetto di valore 9
10110	A	quartetto di valore A
10111	B	quartetto di valore B
11010	C	quartetto di valore C
11011	D	quartetto di valore D
11100	E	quartetto di valore E
11101	F	quartetto di valore F
01101	T	simbolo di terminazione
00111	R	zero logico (reset)
11001	S	uno logico (set)

Tab. 3.1 - Codifica dei simboli in 4B5B.

Infine, la codifica 8B6T è utilizzata in Ethernet 802.3 100BaseT4 per convertire ottetti in gruppi di sei simboli ternari. Si tratta di una codifica unica che evita il doppio passaggio 4B5B e poi MLT-3 di FDDI TP-PMD. Lo schema di codifica 8B6T definisce 256 parole di codice basate su simboli ternari ("+", "-", "0"), equivalenti ai 256 valori rappresentabili su 8 bit. La tabella di codifica è costruita in modo tale da garantire un numero di transizioni sufficiente alla sincronizzazione.

3.1.4 Scrambling

Gli schemi di codifica appena discussi hanno come obiettivo garantire, nell'unità di tempo, un numero minimo di transizioni del segnale. Questo determina

una maggior facilità di sincronizzazione del ricevitore, ma dal punto di vista delle emissioni di disturbi elettromagnetici (e quindi, più in generale, delle interferenze elettromagnetiche, EMI - *Electro Magnetic Interference*) aggrava la situazione, in quanto, generando ripetizioni regolari di sequenze di transizioni simili fra loro, concentra l'emissione in determinate frequenze. L'utilizzo diffuso di doppino non schermato, che fonda la sua capacità di contenere il valore delle emissioni soltanto sulla regolarità della geometria e sulla simmetria del trasmettitore, ha spinto alla definizione di una tecnica di codifica aggiuntiva, basata non su tabelle bensì su funzioni logiche (cioè che trasformano dati binari in ingresso in dati binari in uscita). Tale codifica prende il nome di *scrambling*, ed una proposta di scrambler è contenuta nello standard TP-PMD per FDDI su doppino.

TP-PMD (*Twisted Pair - Physical Medium Dependent*) permette di sostituire il doppino alla fibra in modo trasparente per l'interfaccia collegata al transceiver. Quindi riceve il segnale che normalmente verrebbe trasformato in impulsi luminosi, che come già detto è ottenuto con una codifica 4B5B e poi NRZI, lo ricodifica in NRZ, vi applica la funzione di scrambling e lo codifica in MLT-3.

Lo scrambling permette di ottenere sequenze poco regolari delle transizioni del segnale anche a fronte di sequenze ripetitive di dati da trasmettere. La funzione di scrambling deve essere sufficientemente semplice da poter essere realizzata in hardware, e lo schema del TP-PMD prevede che la sequenza di bit da trasmettere venga sommata, in modulo a 2, ad una sequenza pseudocasuale di 2047 bit detta chiave. La funzione di *descrambling*, cioè di decodifica delle sequenze ricevute, è un po' più complicata a causa della necessità di sincronizzare la chiave del ricevitore con la chiave del trasmettitore. L'operazione di sincronizzazione viene effettuata durante la ricezione di sequenze note di bit, appartenenti al protocollo di gestione della linea e presenti quando non vengono inviati dati.

Anche lo standard 802.12 prevede l'utilizzo di scrambling su ognuno dei quattro canali in cui viene suddivisa la trasmissione (assegnati poi a quattro coppie in rame oppure multiplexati su una singola coppia o su una fibra ottica).

3.2 MEZZI TRASMISSIVI ELETTRICI

I mezzi trasmissivi elettrici rappresentano ancora oggi il mezzo più diffuso, e nell'ambito delle reti locali assumono fondamentale importanza soprattutto per la realizzazione di infrastrutture per la trasmissione di segnali all'interno degli edifici, argomento che verrà trattato in dettaglio nel capitolo dedicato ai cablaggi strutturati.

Dovendo trasportare il segnale in forma di energia elettrica, è necessario che le caratteristiche elettriche del mezzo siano tali da rendere massima la trasmissione dell'energia da un estremo all'altro e minima la dissipazione in altre forme (ad esempio calore, irradiazione elettromagnetica), e la forma d'onda resti il più possibile inalterata. Purtroppo, le caratteristiche costruttive necessarie per conseguire tale obiettivo sono in contrasto con altre esigenze quali flessibilità, sicurezza, ininfiammabilità, ecc. Ciononostante, con l'attuale tecnologia è possibile realizzare mezzi trasmissivi elettrici di caratteristiche sufficientemente elevate da permettere la trasmissione dei dati a velocità superiori a 100 Mb/s.

3.2.1 La sezione dei conduttori

La sezione dei conduttori può essere espressa come misura del diametro in millimetri (valori tipici 0.4 - 0.7 mm), ma questa soluzione è poco usata. Molto più diffusa è l'unità di misura detta AWG (American Wire Gauge).

L'AWG è una scala a regressione geometrica con 39 valori compresi nell'intervallo da 0 gauge (0.460 pollici di diametro) a 36 gauge (0.005 pollici di diametro); ogni incremento di un gauge corrisponde ad un rapporto tra i diametri di $(0.460/0.005)^{1/39} \cong 92^{1/39} \cong 1.229322$. Nella tabella 3.2, sono riportati i valori di AWG più utilizzati nei cavi per TD. Avere un basso AWG, e quindi diametro elevato, è un parametro di merito, in quanto diminuisce la resistenza e quindi la potenza dissipata sul cavo. I diametri dei cavi comunemente usati per la trasmissione dati sono compresi tra 26 AWG (doppini per sola telefonia) e 22 AWG (cavo di tipo 1 IBM).

AWG	mm (\varnothing)	mm ²	Kg/Km	Ω /Km
22	0.6438	0.3255	2.894	52.96
23	0.5733	0.2582	1.820	84.21
24	0.5106	0.2047	1.746	87.82
25	0.4547	0.1624	1.414	108.4
26	0.4049	0.1288	1.145	133.9

Tab. 3.2 - Diametri dei cavi in rame comunemente usati nella trasmissione dati.

3.2.2 Materiali isolanti e sicurezza in caso di incendio

I materiali isolanti usati nella costruzione dei cavi possono essere di due tipi: compatti o espansi. La scelta determina notevoli differenze nella costante dielettrica, che per l'isolante di un cavo è tanto migliore quanto più vicina a quella dell'aria. Gli isolanti espansi (che contengono aria) sono migliori di quelli compatti, ma presentano due gravi inconvenienti: sono estremamente infiammabili, in quanto contengono sia il combustibile (plastica) che il comburente (aria), e sono più voluminosi, rendendo maggiori le dimensioni dei cavi. Per queste ragioni ormai per quasi tutti i cavi si usano isolanti compatti, molto più sottili e che presentano, in caso d'incendio, un'emissione di fumi limitata e non tossica. Quest'ultimo aspetto è fondamentale in quanto i cavi per trasmissione dati devono sottostare a normative per la sicurezza in caso di incendio. Esistono principalmente due tipi di cavi che possono essere utilizzati: *non plenum* e *plenum*. I primi sono quelli più usati e, a seconda del materiale costituente la guaina esterna, hanno caratteristiche diverse:

- *flame retardant*: ritardano la propagazione della fiamma;
- *low smoke fume (LSF)*: bassa emissione di fumi in caso d'incendio;
- *zero halogen (OH)*: assenza di emissione di gas tossici.

I cavi di tipo plenum, invece, hanno la proprietà di resistere ad alte temperature, poiché sia il materiale isolante sia la guaina esterna sono in teflon, non propagano l'incendio e non bruciano, ma nel caso peggiore si carbonizzano emettendo gas tossici. Questi tipi di cavi trovano applicazione per ora solo negli Stati Uniti per installazioni in controsoffittatura, quando questa viene utilizzata come condotta di ritorno dell'aria condizionata.

3.2.3 Tecniche di trasmissione

I circuiti elettronici funzionano generalmente controllando correnti o tensioni rispetto ad un unico conduttore di ritorno (per le correnti) o di riferimento (per le tensioni). Le prime tecniche di trasmissione dei segnali digitali erano basate sul medesimo principio: si portava il riferimento di tensione da trasmettitore a ricevitore tramite un conduttore, e il segnale (o i segnali) su un altro conduttore (o su più d'uno). Questa tecnica di trasmissione è detta *sbilanciata* ("longitudinal mode", in inglese). Poiché il conduttore che trasporta il segnale si comporta da antenna nei confronti dei campi elettromagnetici in cui è immerso (disturbi

provenienti da altri conduttori, da impianti elettrici, da trasmissioni radio e TV, ecc.), e la corrente indotta nel conduttore si somma a quella del segnale, rendendone difficile o impossibile la decodifica, per tale tipo di trasmissione si impiega spesso il cavo coassiale. Il foglio o la calza metallica che avvolge il cavo coassiale svolge la triplice funzione di conduttore per il ritorno della corrente del segnale, riferimento di tensione e gabbia di Faraday, cioè schermatura, per il conduttore interno (figura 3.9).

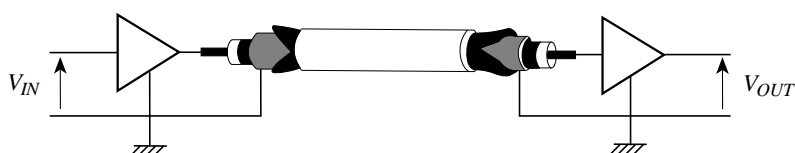


Fig. 3.9 - Trasmissione sbilanciata su cavo coassiale.

Un problema di questo tipo di trasmissione è dovuto al fatto che anche lo schermo si comporta da antenna, e le correnti indotte in esso da parte dei disturbi elettromagnetici, nonché disturbi provenienti dalla messa a terra delle apparecchiature, possono provocare differenze nelle tensioni di riferimento di ricevitore e trasmettitore. Siccome il valore del segnale è misurato relativamente a tali tensioni, ne risulta un'alterazione dei valori ricevuti che può portare ad errori nella trasmissione dei dati.

La tecnica alternativa alla trasmissione sbilanciata è la trasmissione *bilanciata* ("differential mode" in inglese). Essa consiste nell'utilizzare due conduttori perfettamente simmetrici (detti "coppia"), sui quali viene inviato lo stesso segnale elettrico, ma in opposizione di fase (figura 3.10).

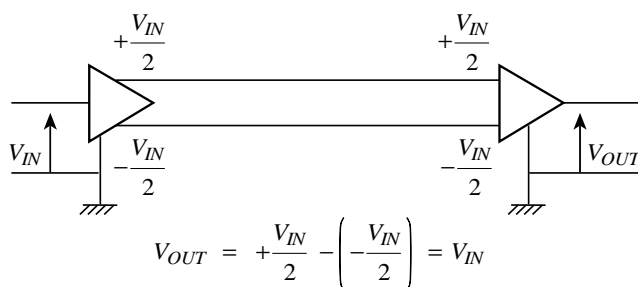


Fig. 3.10 - Trasmissione bilanciata.

Il vantaggio rispetto alla trasmissione sbilanciata consiste nell'assenza della tensione di riferimento che deve essere identica per ricevitore e trasmettitore. Nella trasmissione bilanciata, infatti, il segnale è ricostruito per differenza delle tensioni presenti sui due conduttori della coppia. Presupposto fondamentale per la trasmissione bilanciata è che i due conduttori siano perfettamente simmetrici rispetto a qualsiasi punto dello spazio, in modo da annullare sia l'emissione che la sensibilità ai disturbi elettromagnetici. La perfetta simmetria potrebbe essere raggiunta soltanto se i due conduttori coincidessero, cosa irrealizzabile per il limite minimo nelle dimensioni fisiche e per la necessità di interporre fra essi del materiale isolante, ma può essere approssimata ritorcendo i due conduttori. Si realizza così il "doppino ritorto" (*twisted pair, TP*). La trasmissione bilanciata su TP riduce le emissioni di disturbi elettromagnetici in quanto le correnti che attraversano i due conduttori sono di uguale intensità e verso opposto, e generano campi magnetici opposti che tendono ad annullarsi (figura 3.11).

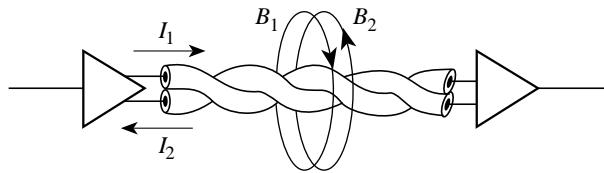


Fig. 3.11 - Trasmissione bilanciata su doppino: riduzione dell'emissione di disturbi.

Mentre la ridotta emissione di disturbi è dovuta alla simmetria nella trasmissione, l'immunità ai disturbi esterni è dovuta all'amplificazione differenziale del segnale nel ricevitore. Grazie alla simmetria del sistema l'onda elettromagnetica illustrata in figura 3.12 induce la medesima tensione di disturbo (V_D) in entrambi i conduttori, e tale termine scompare nella differenza che genera il segnale di uscita.

Soltanto recentemente la tecnologia ha permesso l'applicazione di questo principio a sistemi per trasmissione dati ad alta velocità. Le difficoltà consistono nel produrre doppini a geometria altamente regolare, in cui gli effetti del rumore risultano altamente simmetrici nei due fili, e nel realizzare amplificatori differenziali ad elevata reiezione del modo comune (cioè che misurino la differenza dei segnali con un residuo molto basso di segnale comune), in grado di funzionare a centinaia di MHz.

Da quanto visto è evidente la necessità non soltanto di produrre cavi a geometria estremamente regolare, ma anche e soprattutto garantire che tale geometria sia mantenuta anche dopo la posa del cavo stesso. Questo è invece più

difficile, in quanto le operazioni di posa, specialmente se effettuate per trazione o in canaline strette e tortuose, tendono ad alterare anche notevolmente la geometria del cavo e di conseguenza a peggiorarne le prestazioni. Una geometria regolare non soltanto permette di sfruttare al massimo i vantaggi della trasmissione bilanciata nel caso di doppini, ma rende anche costanti i parametri elettrici del cavo per la sua intera lunghezza, riducendo le variazioni di impedenza e le conseguenti riflessioni di segnale. Proprio per questo i cavi di più recente concezione sfruttano tecniche costruttive sofisticate per garantire geometrie inalterate a cavo posato.

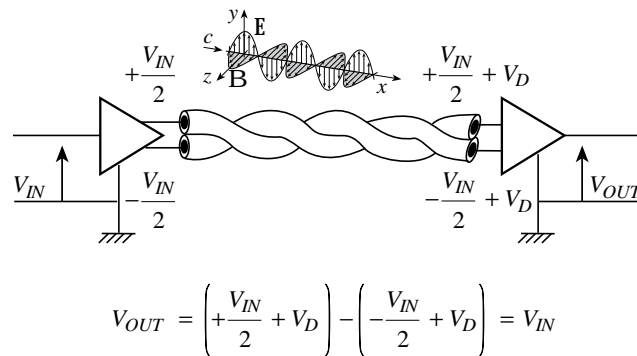


Fig. 3.12 - Trasmissione bilanciata su doppino: immunità ai disturbi.

3.2.4 Schermatura

È in continua crescita l'attenzione al problema dei disturbi elettromagnetici (EMI), dei quali le reti locali sono al contempo vittime e sorgenti. Con la presenza di schermi e con una corretta messa a terra si possono ridurre drasticamente la sensibilità e l'emissione di disturbi elettromagnetici, e possono migliorare anche notevolmente le caratteristiche elettriche di un cavo. Esistono numerosi tipi di schermo, tra i quali i più utilizzati nelle LAN sono:

- "foglio" (*foil*): si tratta normalmente di un foglio di alluminio o di mylar alluminato, molto sottile (da 0.05 mm a 0.2 mm) che avvolge il cavo immediatamente sotto alla guaina di protezione esterna. Poiché l'alluminio presenta elevata resistenza elettrica rispetto al rame, e, a spessori così ridotti, una notevole fragilità, lungo il foglio scorre un filo di rame nudo, detto *drain*, che garantisce continuità elettrica anche in caso di eventuali crepe; tale filo è utilizzato per il collegamento di terra;

- "calza" (*braid*): si tratta di una trecciola di fili di rame che avvolgono il cavo in due direzioni opposte. Presenta una conducibilità molto migliore del foglio di alluminio, ma la copertura non è completa, in quanto in corrispondenza degli intrecci rimangono inevitabilmente dei fori nello schermo. Inoltre, l'ossidazione dei fili di rame e la loro deformazione in fase di posa del cavo possono alterare l'efficacia della schermatura.

I migliori risultati si ottengono dalla combinazione di più schermi diversi, come foglio più calza, foglio più calza più foglio, e così via. Tuttavia questo può creare problemi in fase di installazione, soprattutto su certi tipi di connettori non studiati per schermature così complesse, quali gli RJ45 previsti per il cablaggio strutturato degli edifici, di cui si parlerà più avanti.

Nel caso di cavi con più coppie di conduttori, la schermatura può essere applicata all'intero cavo o a tutte le coppie di conduttori singolarmente, riducendo così la diafonia tra le coppie vicine.

L'efficacia della schermatura di un cavo è misurata tramite un parametro detto *impedenza di trasferimento*. Essa è definita come rapporto tra la caduta di tensione che si genera all'interno dello schermo di un cavo e la corrente che vi scorre in superficie indotta dal disturbo elettromagnetico (figura 3.13). L'impedenza di trasferimento, normalmente indicata con Z_r , si misura in $m\Omega/m$, ed è tanto più bassa quanto più lo schermo è efficace.

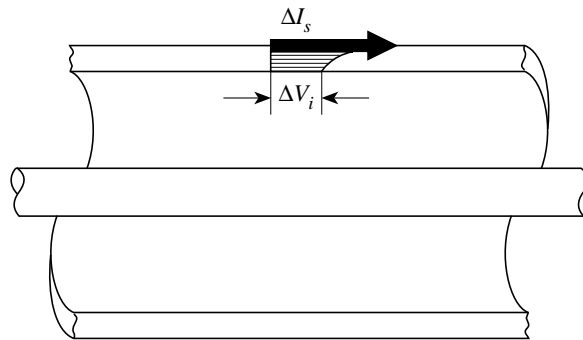


Fig. 3.13 - Impedenza di trasferimento

Va infine ricordato che la presenza di uno schermo può migliorare l'attenuazione dei disturbi esterni e la diafonia, ma soltanto se l'installazione è fatta in modo adeguato. È molto facile ottenere un peggioramento delle prestazioni rispetto a un cavo non schermato, a causa della difficoltà di soddisfare contemporaneamente le

esigenze di messa a terra per la sicurezza elettrica, schermatura contro i disturbi, collegamento delle masse, tensione a 0V di riferimento comune alle varie apparecchiature ed evitare i loop di massa. La tecnica di trasmissione bilanciata, separando i conduttori del segnale dai conduttori per schermatura e messa a terra, riduce la complessità del problema.

Oggi la maggior parte dei cavi (doppini) posati non sono schermati, fondamentalmente per ragioni di costo e di semplicità di installazione. In futuro è prevedibile che si faccia un maggior uso di schermi, sia per aumentare le prestazioni sia per ridurre i disturbi elettromagnetici generati dal cavo stesso.

3.2.5 Caratteristiche elettriche

I parametri meccanici finora descritti (materiali impiegati, schermature, geometrie) determinano i parametri elettrici del cavo stesso. La relazione tra di essi, tuttavia, non è esprimibile con formule semplici (e a volte neanche con formule complesse), soprattutto alle alte frequenze, dove, oltre ai fenomeni puramente elettrici, è necessario considerare anche i fenomeni elettromagnetici. Oggetto di questo paragrafo è la descrizione dei principali parametri elettrici.

L'*impedenza* è il parametro elettrico più importante per un cavo usato ad alte frequenze. L'impedenza, normalmente indicata con il simbolo Z , è espressa in ohm (Ω) ed è la somma di due componenti ($Z = R + jI$) in quanto sintetizza in un solo valore resistenze, capacità ed induttanze presenti sul cavo. Ciò che interessa analizzare non è tanto il valore nominale di impedenza ad una data frequenza, ma il variare di tale valore al variare della frequenza. Più l'impedenza è stabile al variare della frequenza, migliore è il cavo, e la presenza di schermi normalmente migliora tale aspetto. Oggi si certifica l'impedenza dei cavi nell'intervallo da 100 KHz a 350 MHz.

L'importanza dell'impedenza è dovuta al fatto che per la trasmissione di segnali a frequenze elevate l'impedenza di uscita del trasmettitore, l'impedenza di ingresso del ricevitore e l'impedenza caratteristica del cavo devono essere uguali (si parla di sistemi "adattati in impedenza"). Le variazioni di impedenza lungo il cavo, che nel caso di doppini possono essere provocate da alterazioni nella regolarità della geometria, provocano riflessioni del segnale, con conseguenti attenuazioni e interferenze. In passato si sono usati cavi per TD con impedenze comprese tra i 50 e i 150 Ω , oggi la maggior parte dei cavi ha una impedenza di 100 Ω .

La propagazione dei segnali elettrici non avviene istantaneamente, e per i segnali ad alta frequenza questo fenomeno diventa rilevante in quanto il trasmettitore può terminare di trasmettere l'informazione prima che il ricevitore abbia iniziato a riceverla. I parametri di funzionamento di alcuni protocolli di livello MAC per le LAN (ad esempio CSMA/CD, il protocollo della rete Ethernet 802.3) sono stati calcolati proprio sulla base di questo fenomeno.

Si definisce *velocità di propagazione* v_p la percentuale della velocità della luce nel vuoto (circa $3 \cdot 10^8$ m/s) alla quale si propaga un segnale elettrico sul cavo. Per i cavi in rame v_p varia tra il 55% e il 75%. Questo implica una velocità di propagazione dell'informazione di circa 200.000 Km/s. Anche se sembra una velocità elevata, va considerato che ad una velocità di trasmissione di 10 Mb/s, al termine del tempo dedicato alla trasmissione di un bit, il bit stesso ha percorso soltanto 20 m.

Altro importante parametro elettrico è l'*attenuazione*, che per i mezzi elettrici è definita come rapporto, in dB, della tensione del segnale in ingresso al cavo e la tensione misurabile all'altra estremità. L'attenuazione così misurata cresce linearmente con la lunghezza del cavo e con la radice quadrata della frequenza.

La *diafonia*, in inglese *cross-talk*, è invece la misura in dB di quanto un cavo disturba un altro cavo vicino. Spesso viene data come attenuazione di diafonia e quindi come parametro di merito (quanto è attenuato il segnale indotto da un cavo nel cavo vicino). In linea di principio esistono due modi diversi per misurare la diafonia: se la misura del segnale indotto nel cavo vicino è effettuata dalla stessa parte del trasmettitore si parla di paradiafonia o NEXT (*Near End Cross-Talk*, figura 3.14), se è effettuata all'estremo opposto si parla di telediafonia o FEXT (*Far End Cross-Talk*, figura 3.15).

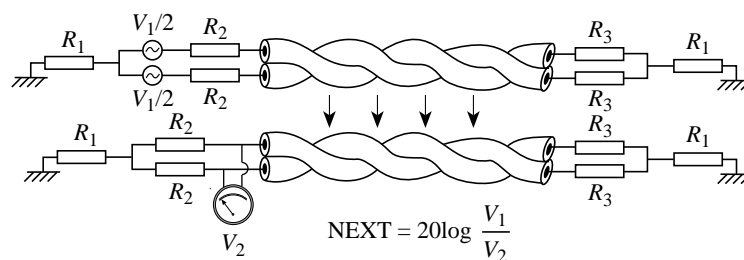


Fig. 3.14 - Schema di misura della paradiafonia (NEXT).

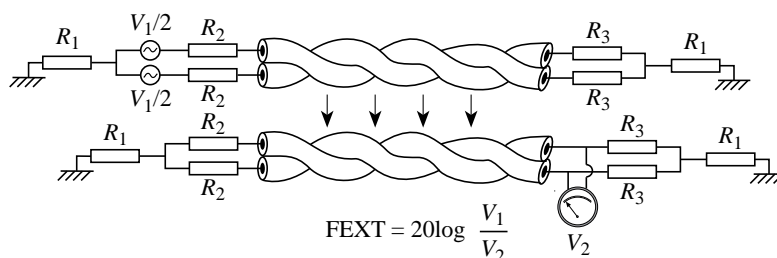


Fig. 3.15 - Schema di misura della telediafonia (FEXT).

In pratica, si misura quasi sempre soltanto la paradiafonia (NEXT), indicandola con il nome generico di diafonia. Infatti nella trasmissione su due coppie, una in trasmissione ed una in ricezione, il valore della telediafonia non interessa, in quanto all'estremità considerata dalla misura non si trova un ricevitore bensì il trasmettitore dell'altra coppia. Inoltre, per la misura del NEXT, è sufficiente un unico strumento comprendente generatore di segnale e misuratore di tensione collegato ad una sola estremità del cavo. La semplicità e rapidità delle operazioni di misura dei parametri elettrici dei cavi installati è di fondamentale importanza, ad installazione terminata, nella certificazione della qualità dei sistemi di cablaggio.

Le misure di telediafonia e paradiafonia sono inevitabilmente affette dall'attenuazione introdotta dal cavo. È interessante notare che per quanto riguarda il NEXT, le parti di cavo più lontane dal generatore di segnale portano un contributo via via inferiore; infatti il segnale iniettato è attenuato, e il segnale indotto nella coppia vicina deve ancora essere attenuato altrettanto prima di giungere allo strumento di misura. Ne segue che, a partire da una certa distanza, i contributi diventano trascurabili. Sperimentalmente si osserva che il NEXT cresce molto al crescere della lunghezza del cavo per i primi metri, poi si stabilizza ad un valore massimo pressoché indipendente dalla lunghezza.

La diafonia è un parametro particolarmente importante nei doppini, in quanto più coppie scorrono affiancate all'interno della stessa guaina.

Ai fini di una corretta ricezione non interessano tanto l'attenuazione assoluta del cavo o il suo valore di diafonia, quanto la combinazione di questi due parametri. Infatti, se si considera trascurabile il rumore indotto dall'esterno, è tale combinazione che determina il rapporto segnale/rumore in ingresso al ricevitore, e quindi l'integrità del segnale. Esiste un parametro che rappresenta le due grandezze in modo combinato: l'ACR (*Attenuation to Cross-talk Ratio*), che esprime il rapporto tra il segnale attenuato presente su una coppia ed il segnale indotto dalla coppia

vicina. Esso varia in funzione della frequenza e della lunghezza del cavo. La figura 3.16 illustra il caratteristico andamento della diafonia e dell'attenuazione, ad una certa frequenza, al variare della lunghezza di un cavo. Siccome attenuazione e diafonia sono espresse in dB, cioè in termini logaritmici, il loro rapporto è ottenibile come differenza tra tali valori, e quindi nella figura l'ACR è la distanza tra le curve. Quando questa distanza è troppo ridotta non è più possibile trasmettere sul cavo in modo affidabile in quanto il segnale è troppo debole rispetto al rumore e quindi possono verificarsi troppi errori di trasmissione.

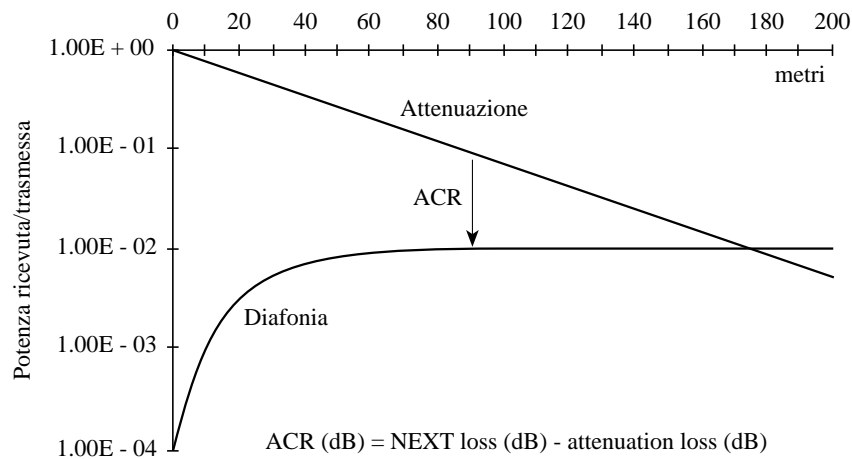


Fig. 3.16 - ACR, attenuazione e diafonia..

Le irregolarità nella geometria del cavo generano variazioni nell'impedenza caratteristica. Quando un segnale elettrico, propagandosi lungo il cavo, incontra tali discontinuità viene totalmente o parzialmente riflesso, riducendo l'energia del segnale trasmesso. La perdita per riflessione di un cavo è definita dal parametro *structural return loss*, o semplicemente *return loss*, ed è misurata in dB. Inoltre, nel caso dei doppini le irregolarità nella geometria comportano pressoché sempre delle asimmetrie nelle coppie, e parte dei disturbi elettromagnetici che dovrebbero interessare in egual misura i due conduttori (rumore "longitudinale") generano una componente differenziale, che non può essere eliminata dal ricevitore. Esistono due parametri che definiscono tale caratteristica delle linee bilanciate: il *longitudinal to differential conversion loss* (anche *balance*, bilanciamento), misurato dalla parte del trasmettitore, e il *longitudinal conversion transfer loss*, misurato dalla parte del ricevitore. Il primo determina quanto disturbo elettromagnetico irradierà il cavo, il secondo quanto rumore arriverà al ricevitore.

3.2.6 I compromessi nella realizzazione dei mezzi trasmissivi elettrici

Un mezzo trasmissivo elettrico *ideale*, che trasporti tutta l'energia del segnale trasmesso senza attenuazione né distorsione, non esiste.

Un mezzo trasmissivo elettrico *ottimale* è caratterizzato da bassa resistenza, bassa capacità e bassa induttanza, cioè è un mezzo poco dispersivo e poco dissipativo. In tale mezzo quasi tutta la potenza inviata sul canale dal trasmettitore arriva al ricevitore ed il segnale non viene distorto. Un tale cavo dovrebbe avere elevata dimensione del conduttore interno, buona spaziatura tra i conduttori, bassa costante dielettrica dell'isolante (al limite quella dell'aria) e schermatura individuale delle coppie e globale del cavo. Ne risulterebbe un cavo ingombrante, pesante, difficile da posare e facilmente incendiabile; invece le esigenze pratiche per un'agevole installazione indicano la flessibilità, la resistenza alla trazione e il rispetto delle varie normative di sicurezza. Perciò la scelta cade sempre su un compromesso subottimale.

3.2.7 Il cavo coassiale

Il cavo coassiale (figura 3.17) ha avuto per lungo tempo notevole diffusione nelle reti locali; per esempio è stato utilizzato in due diverse versioni dello standard 802.3 (Ethernet) e per il collegamento di terminali IBM. Ora è caduto in disuso nelle LAN, eliminato dallo standard ISO/IEC 11801 per i cablaggi strutturati e sostituito dalle fibre ottiche nella fascia ad alte prestazioni e dai doppini in quella a medie prestazioni, mentre continua ad essere utilizzato nelle reti geografiche.



Fig. 3.17 - Cavo coassiale.

Un cavo coassiale è formato da un conduttore centrale e da uno o più schermi (calze, fogli); per la trasmissione di segnali ad alta frequenza il trasmettitore, il cavo e il ricevitore devono costituire un sistema adattato in impedenza. La coassialità dei conduttori e la schermatura che il conduttore esterno offre nei confronti di quello interno rendono il cavo coassiale più immune ai disturbi elettromagnetici rispetto ai doppini non schermati; tuttavia, come già visto nel paragrafo 3.2.3, ogni eventuale corrente di disturbo che scorre lungo lo schermo

determina un'alterazione del valore della tensione di riferimento che può provocare errori nella ricezione del segnale.

Il cavo coassiale è stato soppiantato dal doppino per diverse ragioni. Tra queste:

- maggior costo, sia dei materiali (soprattutto i connettori), sia per la maggior difficoltà di installazione;
- maggior ingombro: un cavo per Ethernet 10Base2 trasporta un singolo segnale ed occupa circa lo stesso spazio di un cavo TP a quattro coppie, che può trasportare quattro segnali;
- minor flessibilità: il cavo coassiale è adatto soltanto ad alcuni servizi, quali LAN o televisione via cavo, mentre per numerosi altri, quali telefoni, citofoni, apriporta, controllo accessi, ecc., è previsto soltanto l'utilizzo del doppino. Questo aspetto, forse il più importante, verrà approfondito nel capitolo dedicato ai cablaggi strutturati.

Come esempio vediamo il cavo *thick Ethernet* (RG213) in figura 3.18, caratterizzato da ottimi parametri elettrici (si osservi la schermatura a quattro strati), ma costoso, difficile da porre in opera e con notevoli problemi legati ai raggi minimi di curvatura ammessi.



Fig. 3.18 - Cavo Thick Ethernet.

L'unico tipo di cavo coassiale che trova ancora una qualche utilizzazione è il *thin Ethernet* (figura 3.19), per lo standard IEEE 802.3 10Base2. Spesso al suo posto è anche utilizzato il più comune RG58, che anziché avere un doppio schermo (foglio più calza) dispone di uno schermo singolo (calza).



Fig. 3.19 - Cavo Thin Ethernet.

La fase di transizione dall'uso del cavo coassiale all'uso del doppino è stata lenta e graduale, e in molte realtà è tuttora in corso. Di conseguenza, molti servizi prevedono ancora il cavo coassiale, e anche per quelli per i quali sono già stati emanati nuovi standard per il doppino, resta il problema del recupero delle apparecchiature già in possesso dell'utenza e perfettamente funzionanti nel momento in cui devono essere installate su una infrastruttura di cablaggio che non prevede il cavo coassiale. La conversione da doppino (su cui si usa la trasmissione bilanciata) a coassiale (su cui si usa la trasmissione sbilanciata) e viceversa può essere ottenuta con i cosiddetti *balun* (*BALanced to UNbalanced*). I balun possono essere passivi, cioè realizzati con piccoli trasformatori (figura 3.20), oppure attivi, realizzati con dispositivi elettronici che richiedono alimentazione elettrica e che spesso determinano caratteristiche migliori rispetto ai balun passivi. I balun possono essere montati direttamente all'interno di appositi connettori.

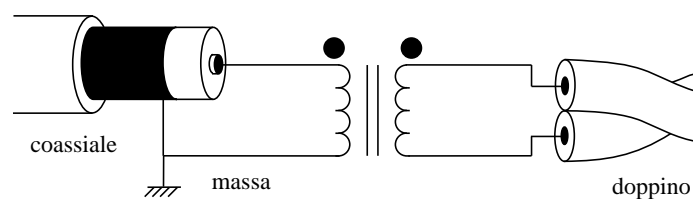


Fig. 3.20 - Balun.

3.2.8 Il doppino

Il doppino è il mezzo trasmissivo classico della telefonia e consiste in due fili di rame ricoperti da una guaina isolante e ritorti (o "binati" o "twisted") detti comunemente "coppia" (*pair*, in inglese, da cui *twisted pair* o *TP*). Il tipo di doppino più usato attualmente ha un diametro di 24 AWG e un'impedenza di 100 Ω (figura 3.21).

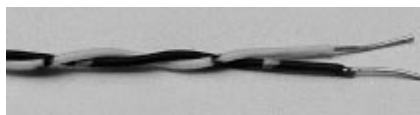


Fig. 3.21 - Doppino di rame.

La binatura serve a ridurre i disturbi elettromagnetici come spiegato nel

paragrafo 3.2.3. Normalmente si utilizzano cavi con più coppie (4, 25, 50 e oltre) ed è allora necessario adottare passi di binatura differenziati da coppia a coppia per ridurre la diafonia tra le coppie. Infatti, se i passi di binatura fossero uguali, ogni conduttore di una coppia si troverebbe sistematicamente affiancato, ad ogni spira, con uno dei due conduttori dell'altra coppia, e quindi verrebbe a cadere l'ipotesi di perfetta simmetria della trasmissione bilanciata. I campi elettromagnetici generati dalle due coppie interferirebbero reciprocamente con un considerevole peggioramento della diafonia.

I doppini sono nati come mezzo trasmissivo a banda molto ridotta (la banda fonica usata nella telefonia è inferiore a 4 KHz), ma negli ultimi anni hanno raggiunto prestazioni una volta raggiungibili soltanto con i cavi coassiali. I miglioramenti sono stati ottenuti realizzando nuovi materiali isolanti, curando la geometria delle coppie (anche tramite l'adozione di particolari guaine esterne), mettendo a punto sofisticati algoritmi di differenziazione dei passi di binatura e aumentando la sezione dei conduttori. Attualmente i doppini possono competere nelle medie velocità (10 - 100 Mb/s) e sulle brevi distanze (inferiori a 100 m) con le fibre ottiche.

Le caratteristiche che hanno tuttavia inciso maggiormente sulla diffusione del doppino sono la compatibilità con la telefonia e la facilità di posa in opera (la connettorizzazione a perforazione di isolante è semplice, veloce ed economica, anche se alle alte velocità rappresenta un elemento critico, in quanto è il punto in cui le coppie devono essere per forza sbindate).

Esistono varie versioni di doppino:

- STP (*Shielded Twisted Pair*), versione con uno schermo per ogni coppia più uno schermo globale;
- *Screened*, FTP (*Foiled Twisted Pair*) o S-UTP (figura 3.22), versione con un unico schermo (normalmente in foglio di alluminio) per tutto il cavo;
- UTP (*Unshielded Twisted Pair*) (figura 3.23) versione non schermata.

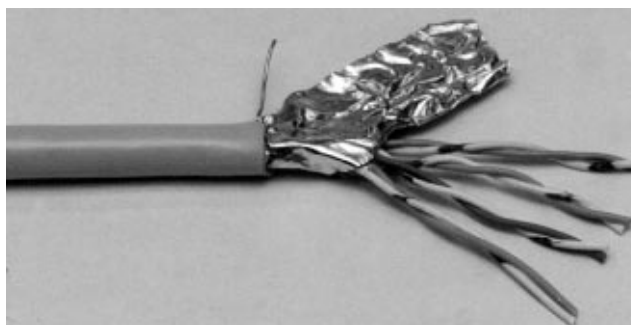


Fig. 3.22 - Doppino FTP.

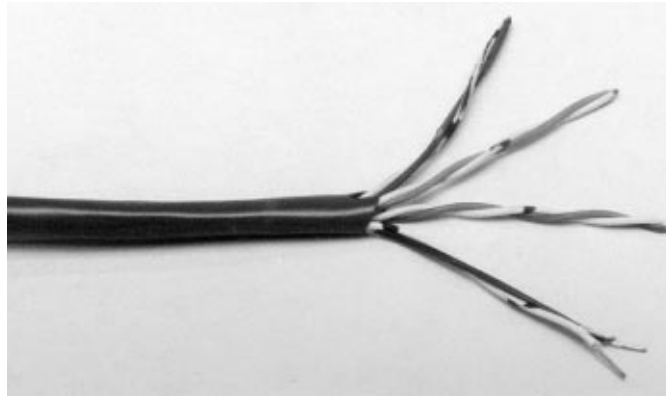


Fig. 3.23 - Cavo UTP.

Gli schermi possono essere dei tipi precedentemente descritti (a foglio, a calza o entrambi).

Il tipo più semplice di doppino è un UTP con binatura minima di 6 giri/metro, impedenza di $100\ \Omega$ (+/- 15%) da 1 a 16 MHz e attenuazione massima, per una tratta lunga 100 m, di 10 dB tra 5 e 10 MHz. Il doppino più diffuso, soprattutto per collegare le prese utente, è UTP a quattro coppie da 24 AWG.

Alcuni costruttori hanno sempre adottato doppini schermati (STP); in particolare, IBM ha sviluppato una serie di cavi ad altissime prestazioni, ma di elevato ingombro e per questo difficili da posare. In figura 3.24 è illustrato il cavo IBM "tipo 1" pensato appositamente per la rete locale IBM Token Ring. Si tratta di un STP a $150\ \Omega$ dotato unicamente di due coppie singolarmente schermate.



Fig. 3.24 - Cavo "tipo 1" IBM.

Esso non è idoneo a collegare utenze di tipo telefonico in quanto ha un numero di coppie insufficiente, un valore di impedenza errata e un costo eccessivo per un servizio a così basse prestazioni. Quando si vogliono soddisfare tali utenze occorre

installare il cavo IBM "tipo 2" che contiene un cavo "tipo 1" più quattro coppie a 100 Ω per la telefonia. Attualmente IBM produce un nuovo sistema di cablaggio chiamato ACS (*Advanced Connectivity System*) che fa uso di cavi FTP o UTP di categoria 5 (si veda il paragrafo 3.2.9) a 100 Ω , 24 AWG.

Nella tabella 3.3 sono riportate le caratteristiche di un cavo FTP (Belden 1456A), di un UTP (AT&T 2061), del "tipo 1" e del "tipo 2" IBM. Si notino, oltre alle variazioni di attenuazione e diafonia, anche la dimensione e il peso.

Caratteristica	Belden 1456A	AT&T 2061	IBM Tipo1	IBM Tipo2
AWG	24	24	22	22
Z	100 Ω	100 Ω	150 Ω	150 Ω
Velocità di propagazione	66 %	non dichiarata	81 %	81 %
C	52.5 nF/Km	52 nF/Km	29 nF/Km	29 nF/Km
F (esterno)	5.6 mm	4.3 mm	9.5 mm	11 mm
Peso	39 Kg/Km	27 Kg/Km	91 Kg/Km	138 Kg/Km
Attenuazione (100m)	6.6 dB a 10 MHz	6.5 dB a 10 MHz	2.2 dB a 4 MHz	2.2 dB a 4 MHz
Attenuazione (100m)	8.3 dB a 16 MHz	8.1 dB a 16 MHz	4.5 dB a 16 MHz	4.5 dB a 16 MHz
Cross-talk (100m)	42 dB a 10 MHz	47 dB a 10 MHz	58 dB a 5 MHz	58 dB a 5 MHz
Cross-talk (100m)	40 dB a 16 MHz	44 dB a 16 MHz	40 dB a 20 MHz	40 dB a 20 MHz

Tab. 3.3 - Caratteristiche di cavi TP.

3.2.9 Classificazione dei doppini

I parametri elettrici di qualsiasi cavo variano al variare della frequenza. Occorre pertanto chiedersi, per una data applicazione, a quale frequenza sia opportuno analizzare i parametri per decidere se un cavo sia adeguato all'applicazione stessa. Questo dipende dalla codifica fatta a livello fisico (si veda il paragrafo

3.1.2), e dovendo valutare l'utilizzabilità di un cavo, bisogna analizzarne le caratteristiche elettriche in corrispondenza della frequenza fondamentale di trasmissione utilizzata dallo standard di rete locale scelto. Viceversa, dovendo realizzare un'infrastruttura di trasmissione di segnali, e quindi installare cavi adatti a più applicazioni, sarebbe necessario considerare un elevato numero di valori dei parametri elettrici, a tutte le frequenze interessate dalle possibili applicazioni. Per evitare questa operazione si è ricorso ad una classificazione dei cavi di uso più comune, cioè dei doppini. Tale classificazione prevede cinque *categorie*, in base alle applicazioni per le quali i cavi sono idonei. La categoria 1 è quella dei cavi peggiori, la 5 quella dei cavi migliori. Ogni categoria è inoltre idonea a fornire tutti i servizi offerti dalle categorie inferiori.

- La categoria 1 (*Telecommunication*) comprende i cavi adatti unicamente a telefonia analogica.
- La categoria 2 (*Low Speed Data*) comprende i cavi per telefonia analogica e digitale (ISDN) e trasmissione dati a bassa velocità (per esempio linee seriali).
- La categoria 3 (*High Speed Data*) è la prima categoria di cavi adatti a realizzare reti locali fino a 10 Mb/s, in particolare per soddisfare gli standard 10BaseT di 802.3 e Token-Ring a 4Mb/s.
- La categoria 4 (*Low Loss, High Performance Data*) comprende i cavi per LAN Token-Ring fino a 16 Mb/s.
- La categoria 5 (*Low Loss, Extended Frequency, High Performance Data*) comprende i migliori cavi disponibili, per applicazioni fino a 100 Mb/s, su distanze di 100 metri.

Ogni categoria è definita da un insieme di parametri elettrici, alcuni dei quali, fortemente dipendenti dalla frequenza, come attenuazione e diafonia, sono espressi in termini di punti di una curva per diversi valori di frequenza. Proprio le curve di attenuazione e la diafonia variano moltissimo al variare della categoria. In particolare, al crescere della categoria e a parità di frequenza, la curva di attenuazione diminuisce sempre più la sua pendenza tendendo a divenire orizzontale, mentre la curva di diafonia si abbassa. La tabella 3.4 riporta le caratteristiche principali, compresa l'attenuazione, per le tre categorie di interesse per le LAN; la tabella 3.5 riporta i dati relativi alla diafonia (NEXT). Relativamente a quest'ultima, occorre notare che, a causa della progressione non lineare in funzione della distanza, dovuta alla misura effettuata dal lato del trasmettitore, i valori rimangono pressoché invariati quando sono riferiti a distanze maggiori o uguali a 100 metri.

Caratteristiche del cavo			Categoria del cavo		
Caratteristiche elettriche @ 20 °C	Unità di misura	MHz	3	4	5
Impedenza	Ω	1-16 1-20 1-100	100 +/- 15%	100 +/- 15%	100 +/- 15%
Mutua capacità di ogni coppia	nf/100 m	0.1	6.57	5.59	5.59
Velocità di propagazione			0.6 c	0.6 c	0.6 c
Massimo valore di resistenza	Ω /100 m		9.4	9.4	9.4
Attenuazione massima ammessa	dB/100 m	0.064	0.92	0.75	0.72
		0.256	1.31	1.11	1.05
		0.512	1.84	1.51	1.48
		0.772	2.23	1.87	1.81
		1	2.56	2.13	2.07
		4	5.59	4.27	4.27
		8	8.55	6.25	5.92
		10	9.86	7.23	6.57
		16	13.15	8.88	8.22
		20	-	10.2	9.21
		25	-	-	10.52
		31.25	-	-	11.84
		62.5	-	-	17.11
		100	-	-	22.04

Tab. 3.4 - Caratteristiche dei cavi di categoria 3, 4, 5.

I cavi di categoria 5 rappresentano oggi lo stato dell'arte nel campo del cablaggio delle LAN. Dalle tabelle 3.4 e 3.5 si nota che, fino alla frequenza di 100 MHz, il valore di ACR non scende quasi mai sotto i 10 dB (nel caso peggiore $32 - 22.04 = 9.96$ dB). Tutti gli standard di rete a velocità di 100 Mb/s o maggiori con trasmissione su due coppie prevedono l'uso di cavi di categoria 5. Tuttavia, poiché gli standard per i cablaggi strutturati impongono la posa di doppini a 4 coppie per ogni presa, alcuni recenti standard per LAN a 100 Mb/s prevedono l'utilizzo di tutte e quattro le coppie, suddividendo su di esse la trasmissione dei dati. Questo riduce la banda necessaria, e consente di operare su cavi di categoria 3.

Caratteristiche del cavo			Categoria del cavo		
Caratteristiche elettriche @ 20 °C	Unità di misura	MHz	3	4	5
Near End Crosstalk (NEXT), minimo valore ammesso	dB @ 100 m	0.150	54	68	74
		0.772	43	58	64
		1	41	56	62
		4	32	47	53
		8	28	42	48
		10	26	41	47
		16	23	38	44
		20	-	36	42
		25	-	-	41
		31.25	-	-	40
		62.5	-	-	35
		100	-	-	32

Tab. 3.5 - Diafonia dei cavi di categoria 3, 4, 5.

3.2.10 Doppini di nuova generazione

Sul mercato sono attualmente presenti molti cavi omologati in categoria 5 e alcune ditte hanno già prodotto cavi con prestazioni notevolmente superiori.

La Belden, ad esempio, ha sviluppato e realizzato un cavo UTP innovativo chiamato *DataTwist 350* che migliora principalmente le caratteristiche di attenuazione, diafonia tra le coppie e regolarità dell'impedenza rispetto ad un normale cavo di categoria 5. La novità introdotta consiste nel ricavare i due fili costituenti una coppia da un'unica estrusione di materiale isolante, per cui si ottiene una concentricità quasi perfetta tra il conduttore centrale e l'isolante. Inoltre gli isolanti dei due conduttori rimangono saldati e si evita quindi la presenza irregolare di aria che altererebbe le caratteristiche elettriche e la geometria. Questa particolare tecnica costruttiva permette di mantenere pressoché inalterate le caratteristiche elettriche del cavo anche ad installazione avvenuta. Come conseguenza, le caratteristiche elettriche, rispetto alla categoria 5, risultano così migliorate:

- l'impedenza è quasi costante lungo tutto il cavo, il valore è mantenuto in una tolleranza del 15 % rispetto al valore nominale nelle frequenze tra 1 e 100 MHz, ed in una tolleranza del 20 % nelle frequenze tra 100 e 350 MHz;

- l'attenuazione a 100 MHz, su una lunghezza di 100 m, è inferiore di circa 2 dB;
- la diafonia tra le coppie (NEXT) è migliorata di circa 4 dB;
- il valore di ACR a 100 MHz è migliorato di circa 6 dB.

Un altro esempio è dato dalla Montrose che ha realizzato un cavo FTP innovativo chiamato *Languard 200*, in cui sono stati curati particolarmente gli aspetti della schermatura globale e dell'assemblaggio del cavo, in modo da ottenere delle ottime caratteristiche elettriche e ridurre l'emissione di radio frequenze. Lo schermo è costituito da un foglio di alluminio dello spessore di 0.15 mm e da una calza di rame dello spessore di 0.1 mm. Le caratteristiche costruttive di questo cavo migliorano i valori di impedenza, attenuazione e soprattutto di diafonia tra le coppie, rispetto ad un normale cavo di categoria 5:

- l'impedenza è quasi costante lungo tutto il cavo, il valore è mantenuto in una tolleranza del 12 % rispetto al valore nominale nelle frequenze tra 1 e 100 MHz ed in una tolleranza del 15 % nelle frequenze tra 100 e 200 MHz;
- l'attenuazione a 100 MHz, su una lunghezza di 100 m, è inferiore di circa 1 dB;
- la diafonia tra le coppie (NEXT) è migliorata di circa 11 dB;
- il valore di ACR a 100 MHz è migliorato di circa 12 dB.

3.3 LE FIBRE OTTICHE

L'idea di utilizzare la luce come mezzo di comunicazione risale a circa 200 anni fa. Nel 1790 Claude Chappe costruì un telegrafo ottico composto da torri equipaggiate con braccia mobili. Tuttavia, per trovare qualche applicazione pratica bisogna giungere al 1953 quando Kapany mise a punto fibre ottiche di vetro con le quali, qualche anno dopo, insieme ad Hopkins, realizzò i primi endoscopi a fibra ottica.

Il rallentamento dello sviluppo e dell'impiego delle fibre ottiche era dovuto all'elevata attenuazione, che nel 1965 raggiungeva ancora i 1000 dB/Km. Soltanto nel 1967 è stato possibile affermare che le fibre ottiche hanno la potenzialità di rivoluzionare le comunicazioni sostituendo il cavo metallico. Infatti in quegli anni fu individuata la causa delle elevate attenuazioni nella non sufficiente purezza del materiale utilizzato. Nel 1970 si assistette ad una svolta storica: i ricercatori della Corning Glass Works riuscirono a perfezionare una fibra ottica con attenuazione di "soli" 20 dB/Km alla lunghezza d'onda di 633 nm (nanometri, 10^{-9} m).

I progressi sono poi stati rapidi: nel 1972 una fibra graded index raggiungeva

un'attenuazione di 4 dB/Km e ai nostri giorni valori di 0.2 dB/Km a 1550 nm sono raggiunti dalle fibre monomodali. Anche la tecnologia dei trasmettitori e dei ricevitori per fibra ottica ha compiuto grandi passi in avanti in termini di potenza, sensibilità e durata dei dispositivi.

Per quanto concerne lo sfruttamento delle fibre ottiche, i primi cavi sono diventati operativi tra il 1973 e il 1976. La fine degli anni ottanta ha segnato la maturità delle fibre ottiche, e a partire dall'inizio degli anni novanta esse sono state impiegate anche per le reti locali.

3.3.1 Fisica delle fibre ottiche

Il vetro, se stirato a dimensioni micrometriche, perde la sua caratteristica di fragilità e diventa un filo flessibile e robusto. Una fibra ottica si presenta come un sottile filo di materiale vetroso costituito da due parti (figura 3.25): la più interna prende il nome di nucleo (*core*), e l'esterna di mantello (*cladding*). Il core ed il cladding hanno indici di rifrazione diversi, ed il primo è più denso del secondo. La differenza negli indici di rifrazione determina la possibilità di mantenere la luce totalmente confinata all'interno del core.

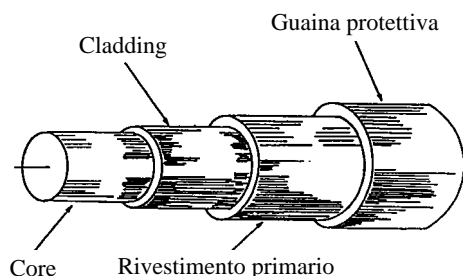


Fig. 3.25 - Fibra ottica.

Il grande successo delle fibre ottiche è dovuto a diversi fattori tra cui:

- totale immunità da disturbi elettromagnetici, non impiegando materiali conduttori, e trasportando particelle (fotoni) elettricamente neutri;
- alta capacità trasmissiva: sono operative fibre ottiche a 2 Gb/s;
- bassa attenuazione: alcuni decimi di dB/Km;
- dimensioni ridottissime e costi contenuti.

Per contro, le fibre ottiche sono unicamente adatte a collegamenti punto-punto, non essendo possibile prelevare o inserire il segnale in un punto intermedio, cosa invece possibile con mezzi trasmissivi elettrici.

La dimensione standard del diametro delle fibre è di 125 μm , e con il rivestimento esterno si giunge a diametri di circa 0.25 mm.

Le guaine protettive possono essere di due tipi, *tight* e *loose*, l'una aderente e solidale con la fibra, l'altra lasca, praticamente un tubicino di plastica in cui è inserita la fibra. Inoltre, le fibre possono essere raggruppate come nelle cosiddette *slotted core*, caratterizzate dalla presenza di un elemento centrale in vetroresina cui è collegata una struttura a scanalature sulla quale vengono poggiati gruppi di fibre (di solito quattro). Per una descrizione più accurata dei cavi in fibra ottica si veda il paragrafo 3.3.2.

Le proprietà e i modi di propagazione dell'energia luminosa in una fibra ottica possono essere studiati mediante la teoria delle guide d'onda. Un'analisi semplificata, ma precisa sino a quando le dimensioni della fibra sono molto maggiori di quelle della lunghezza d'onda, può essere effettuata applicando le leggi dell'ottica geometrica. La legge di Snell (figura 3.26), in particolare, studia la riflessione e la rifrazione di un raggio luminoso incidente sulla superficie di separazione di due materiali. Essa dimostra che per valori dell'angolo di incidenza superiori a $\alpha_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$, detto angolo critico, si ha riflessione totale. Nelle fibre ottiche valori tipici per gli indici di rifrazione sono $n_2=1.475$ per il cladding e $n_1=1.5$ per il core. Pertanto, $\alpha_c \cong 79.5$ gradi.

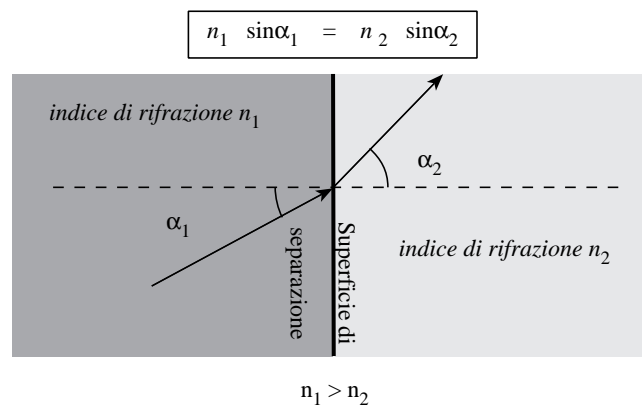


Fig. 3.26 - Legge di Snell.

Perché fra il core e il cladding avvenga la riflessione totale dei raggi luminosi è necessario che essi siano introdotti ad una estremità ottica entro un certo angolo di accettazione della fibra. Tanto maggiore sarà l'angolo di accettazione tanto più alta sarà la cosiddetta apertura numerica (NA) della fibra, cioè la quantità di luce che si riesce ad introdurre (figura 3.27). Con i valori dell'esempio precedente risulta $NA = 0.18$.

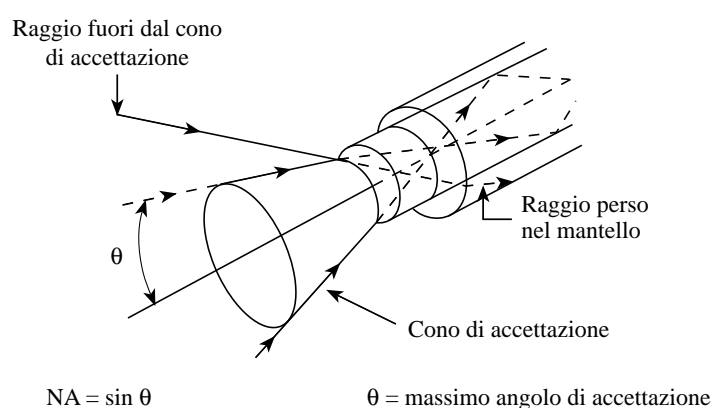


Fig. 3.27 - Cono di accettazione.

Esistono però anche altri aspetti che regolano la propagazione della luce nella fibra ottica e che rendono necessario prendere in considerazione anche altri fattori, specificati meglio nelle equazioni di Maxwell. Dalla soluzione di queste equazioni si ricava che l'energia si propaga nella fibra in un numero discreto di configurazioni. Queste configurazioni sono chiamate *modi* e ogni singolo modo ha sue caratteristiche di propagazione.

Le fibre ottiche che ammettono più modi di propagazione vengono dette multimodali. La fibra ottica multimodale più diffusa è la 62.5/125: il primo numero indica il diametro del core in μm (micron, 10^{-6}m), il secondo quello del cladding.

Nelle fibre ottiche multimodali i raggi che si propagano secondo i diversi modi percorrono cammini di lunghezza diversa, cui corrispondono tempi di propagazione diversi. Questo fenomeno si chiama dispersione modale e pone un limite inferiore alla durata minima di un impulso luminoso, limitando quindi la velocità di trasmissione. Infatti, se alimentiamo la fibra ottica con un impulso luminoso molto breve (di durata T_1) notiamo che al suo arrivo all'estremità opposta (figura 3.28) l'impulso si presenta deformato (di durata T_2).

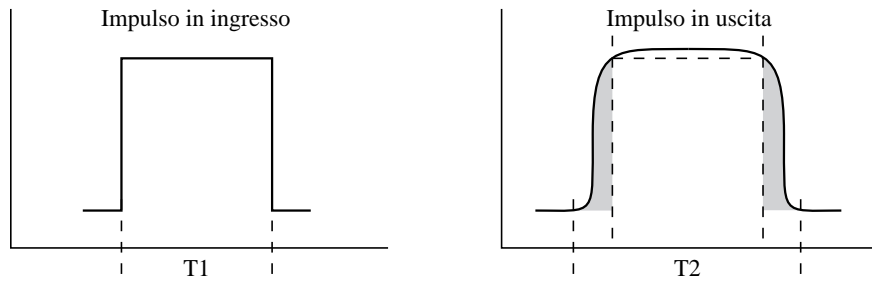


Fig. 3.28 - Dispersione modale.

Le fibre multimodali si dividono, a seconda del profilo radiale dell'indice di rifrazione, in fibre *step-index* (figura 3.29) e fibre *graded-index* (figura 3.30).

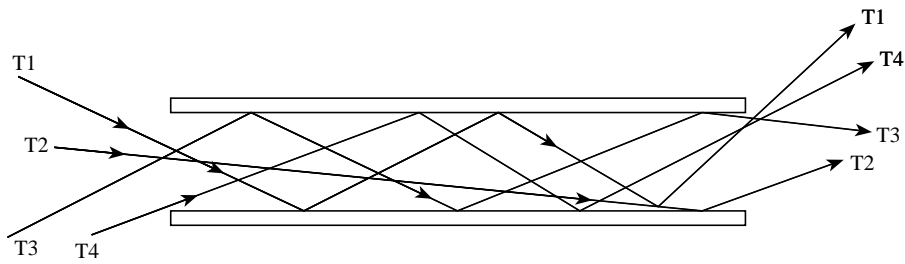


Fig. 3.29 - Fibra step-index.

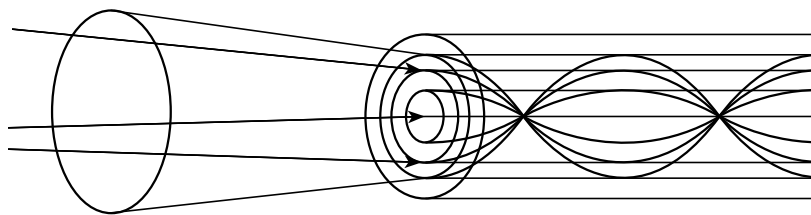


Fig. 3.30 - Fibra graded-index.

Le fibre step-index sono caratterizzate da un indice di rifrazione costante fra il centro e la periferia del core. L'indice di rifrazione decresce bruscamente con un gradino (step) entrando nel cladding.

Nelle fibre ottiche a profilo d'indice graduale o *graded-index*, il profilo d'indice di rifrazione varia gradualmente lungo il diametro della fibra, passando da un valore massimo al centro del core e decrescendo gradualmente sino ad assumere un valore minimo al confine fra core e cladding.

Il fenomeno della dispersione modale è molto più accentuato nelle fibre *step-index* rispetto alle fibre *graded-index*. Infatti nelle prime i raggi luminosi hanno un andamento tipicamente a zig-zag e compiono percorsi di lunghezza anche molto diversa a velocità costante. Nelle fibre *graded-index*, invece, si sfrutta il fenomeno per cui la velocità di propagazione della luce è inversamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo. Tarando opportunamente il profilo radiale dell'indice di rifrazione per diminuire la velocità dei raggi che hanno cammino più breve (quelli centrali), si può ridurre la dispersione modale.

Valori tipici di banda passante delle fibre multimodali sono $22 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$ per le fibre *step-index* e $1 \text{ GHz} \cdot \text{Km}$ per quelle *graded-index*.

La soluzione definitiva al problema della dispersione modale è quella di ridurre fortemente (fino a $8\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$) la dimensione del core, per consentire la propagazione dei raggi di un solo modo (figura 3.31).

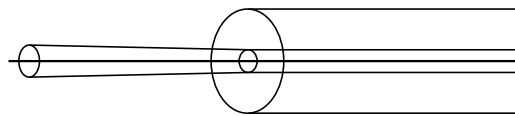


Fig. 3.31 - Fibra monomodale.

Si ottengono così fibre con cono di accettazione molto ridotto, dette *monomodali*, nelle quali la fibra ottica si comporta come una guida d'onda ammettendo una sola modalità propagativa. Bisogna però tenere in considerazione la dispersione cromatica, dovuta alla presenza di raggi a diversa lunghezza d'onda (e quindi di diversi colori, trattandosi di luce); per questo, mentre sulle fibre multimodali si può trasmettere mediante normali LED (ad ampio spettro di emissione), in quelle monomodali occorre utilizzare dei laser, più sofisticati e costosi, ma più precisi (con emissione di luce monocromatica e coerente). Evitando le dispersioni multimodale e cromatica si può trasmettere a velocità superiori e su distanze più lunghe.

Le fibre ottiche sono difficili da giuntare e da connetterizzare a causa delle loro esigue dimensioni che impongono precisioni notevoli. Tale difficoltà aumenta al diminuire delle dimensioni e quindi è più sentita nelle fibre ottiche monomodali (figura 3.32).

In particolare è più difficile connettere le fibre che giuntarle, per cui molto spesso la connettorizzazione viene effettuata esclusivamente in laboratorio, mentre in campo ci si limita ad effettuare giunte con apposite macchine giuntatrici.

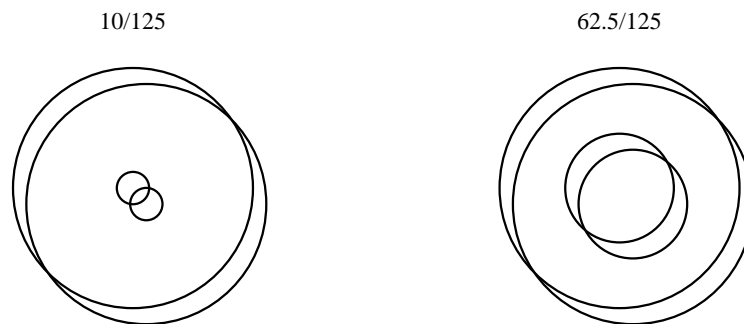


Fig. 3.32 - Interconnessione di due fibre ottiche.

La difficoltà di effettuare giunzioni e connettorizzazioni implica costi rilevanti, poiché è richiesto personale qualificato con strumentazione adeguata. Tali costi sono particolarmente alti per le fibre monomodali che richiedono precisioni estremamente elevate. Per questa ragione nelle reti locali si privilegia l'adozione di fibre multimodali più semplici da posare in opera. D'altra parte, le ridotte distanze da coprire rendono meno rilevanti i vantaggi delle fibre monomodali rispetto alle multimodali. L'alto costo di connettorizzazione limita inoltre l'impiego delle fibre ottiche alla realizzazione di dorsali di rete, mentre per collegare il singolo posto di lavoro il doppino di rame ha un miglior rapporto prestazione/prezzo. Per superare tali limiti sono allo studio fibre plastiche con diametro di 1 mm, che dovrebbero avere un basso costo di connettorizzazione e risultare competitive con i cavi in rame per il cablaggio dei posti di lavoro.

Un altro parametro delle fibre ottiche estremamente importante è l'attenuazione. Essa può essere espressa in funzione della lunghezza d'onda, ottenendo un grafico simile a quello di figura 3.33. Vi si individuano tre minimi di attenuazione in corrispondenza di tre intervalli di lunghezza d'onda, detti finestre. Le finestre corrispondono a tre tipi di utilizzazioni diverse: per la prima si usano solo LED comuni, per la seconda LED comuni e laser, per la terza solo laser.

Le lunghezze d'onda che interessano le comunicazioni ottiche sono quelle comprese tra i 750 nm ed i 1600 nm, cioè nel vicino infrarosso, in quanto le radiazioni visibili all'occhio umano vanno dai 455 nm (violetto) ai 750 nm (rosso).

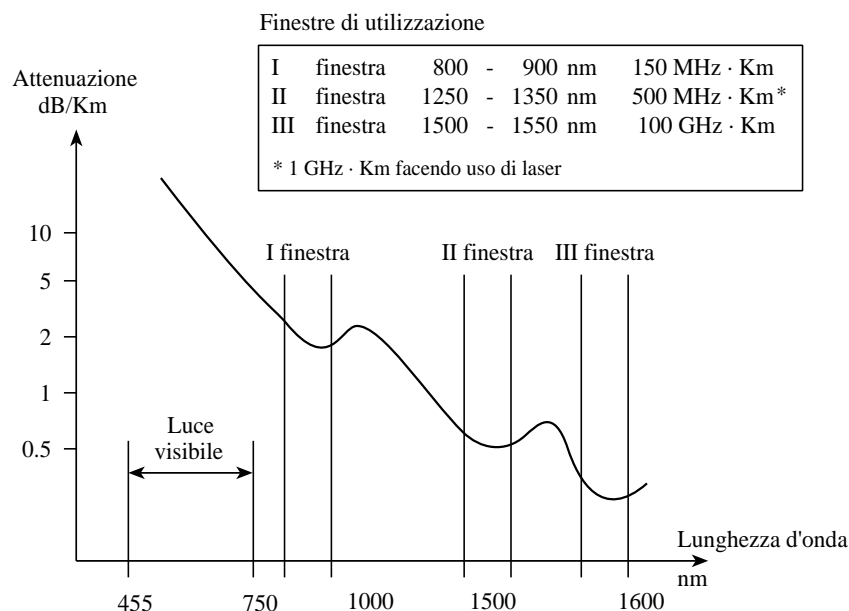


Fig. 3.33 - Finestre di utilizzo.

La prima finestra è collocata intorno agli 850 nm ed è stata la prima ad essere usata per la realizzazione di sistemi di trasmissione su fibra ottica. Essa è presente solo nella fibra multimodale.

La seconda finestra è posta a 1300 nm ed essendo caratterizzata da una attenuazione inferiore, è quella attualmente utilizzata per esigenze di bande passanti medie o alte. Essa è presente sia nella fibra multimodale sia in quella monomodale. La banda passante varia in funzione del tipo di fibra e del tipo di emettitore/ricevitore utilizzato, e può essere di:

- 500 MHz · Km, se si usano i LED su fibra multimodale;
- 1 GHz · Km, se si usano i laser su fibra multimodale;
- da decine a centinaia di GHz · Km su fibra monomodale, a seconda del laser utilizzato.

La terza finestra si colloca a 1550 nm, dove l'attenuazione è ancora inferiore e rappresenta una promessa per l'immediato futuro. Essa è presente solo nella fibra monomodale.

Le attenuazioni delle fibre ottiche variano in funzione del tipo di fibra e della finestra in cui lavorano:

- le fibre multimodali (50/125, 62.5/125), se lavorano in prima finestra hanno attenuazioni inferiori a 3.5 dB/Km, se lavorano in seconda finestra hanno attenuazioni inferiori a 1 dB/Km;
- le fibre monomodali, se lavorano in seconda finestra hanno attenuazioni inferiori a 0.5 dB/Km, se lavorano in terza finestra hanno attenuazioni inferiori a 0.2 dB/Km.

L'attenuazione introdotta da connettori e giunzioni deve essere paragonabile a quella molto bassa delle fibre ottiche: da 0.4 a 4 dB/Km. Un connettore installato correttamente introduce una attenuazione compresa tra 0.3 dB e 0.7 dB. Valori simili valgono per una giunzione (da 0.1 a 0.3 dB).

Le apparecchiature hanno un *optical power budget*, valore che indica l'attenuazione massima ammessa tra due apparati attivi, compreso tra 10 e 22 dB. Consentono normalmente di percorrere distanze di 1-2 Km con fibre multimodali e di 40-100 Km con fibre monomodali. Questo significa che nelle reti di telecomunicazioni le fibre ottiche devono avere ripetitori ogni 40-100 Km invece dei 2 Km tipici per i vecchi cavi coassiali in rame.

Come esempio di cavo in fibra ottica la figura 3.34 mostra in sezione il cavo bifibra AT&T 1861A.

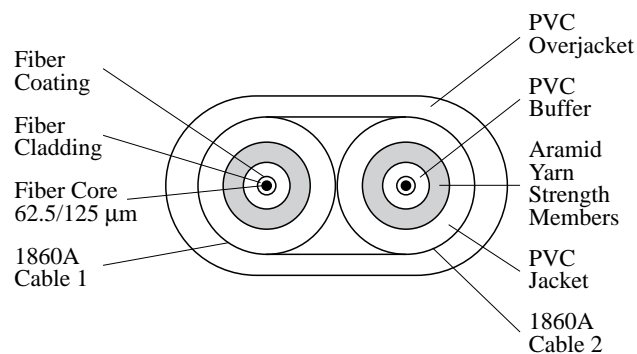


Fig. 3.34 - Cavo bifibra.

3.3.2 Caratteristiche costruttive dei cavi in fibra ottica

I cavi in fibra ottica vengono realizzati con tecniche diverse che variano in base al numero di fibre presenti ed al luogo in cui devono essere installati.

A seconda della metodologia costruttiva si identificano le tre principali famiglie di cavi in fibra ottica di seguito descritte.

I cavi di tipo *tight* sono usati principalmente per installazioni in luoghi interni; essi hanno le guaine protettive aderenti alla fibra e possono essere direttamente terminati con diversi tipi di connettori: ST, FC-PC, ecc. Si suddividono ulteriormente in due famiglie:

- i cavi *multimonofibra* (figura 3.35), indicati anche con i nomi *breakout* o *heavy duty*, sono particolarmente robusti in quanto il rivestimento sulla singola fibra può arrivare fino a 2 ÷ 3 mm di diametro;

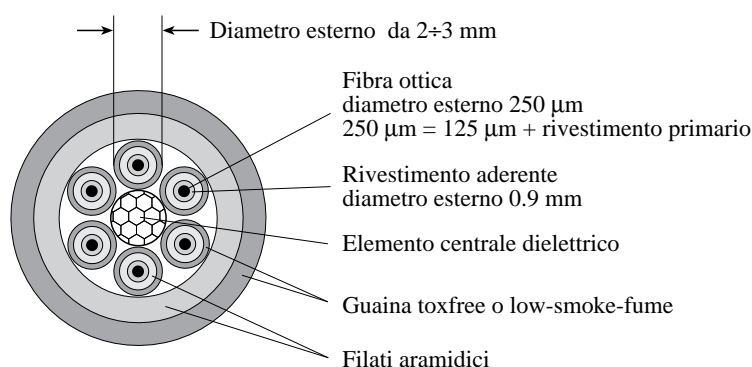
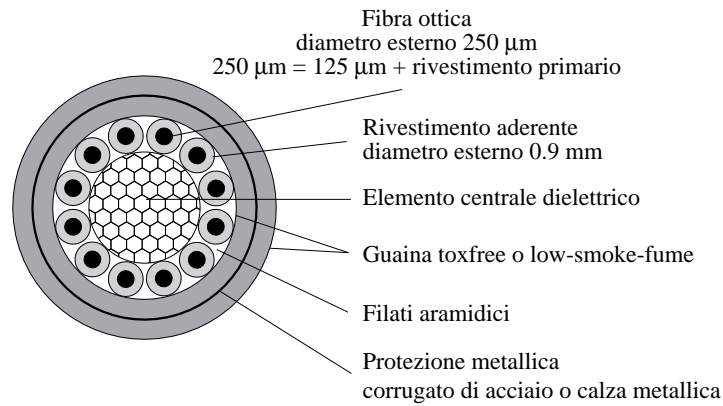
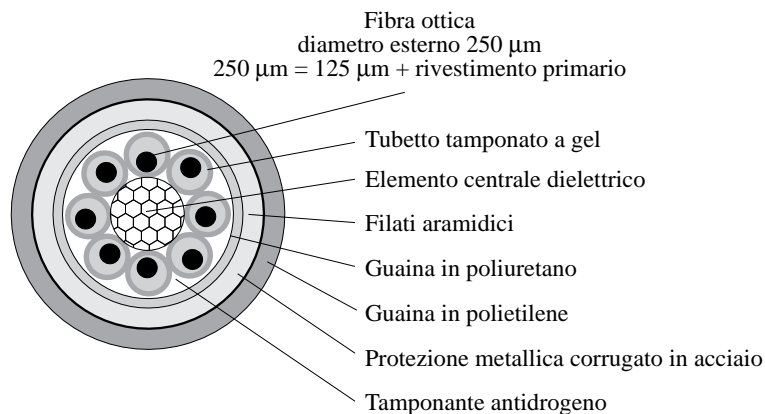


Fig. 3.35 - Cavo multimonofibra.

- i cavi *multifibra* (figura 3.36), indicati anche con i nomi: *light duty* o *trunk*, sono meno robusti dei precedenti poiché il rivestimento della singola fibra porta il diametro globale a 0.9 mm, ma sono più adatti come cavi di dorsale poiché la ridotta dimensione di ogni singola fibra permette una maggiore densità di fibre ottiche.

**Fig. 3.36** - Cavo multifibra.

I cavi di tipo *loose* (figura 3.37) sono usati principalmente per installazioni in luoghi esterni; essi sono costituiti da un certo numero di tubetti, cordati attorno ad elemento centrale, entro cui vengono riposte le fibre nude (diametro 250 μm). Questi cavi non possono essere direttamente intestati sui connettori, ma devono essere giuntati, tramite tecniche di splicing o fusione, a cavetti monofibra di tipo tight. I cavi loose non sono molto facili da posare in modo verticale, perché la fibra all'interno della guaina si può disporre in modo anomalo. Inoltre, poiché la fibra ottica è molto sensibile all'umidità, si usano gel protettivi per tamponare il cavo.

**Fig. 3.37** - Cavo di tipo loose.

I cavi di tipo "slotted core" (figura 3.38) sono usati principalmente per installazioni in luoghi esterni; essi sono costituiti da un elemento centrale scanalato entro le cui cavità vengono riposte le fibre nude. Anche questi cavi non possono essere direttamente intestati sui connettori, ma devono essere giuntati, tramite tecniche di splicing o fusione, a cavetti monofibra di tipo tight.

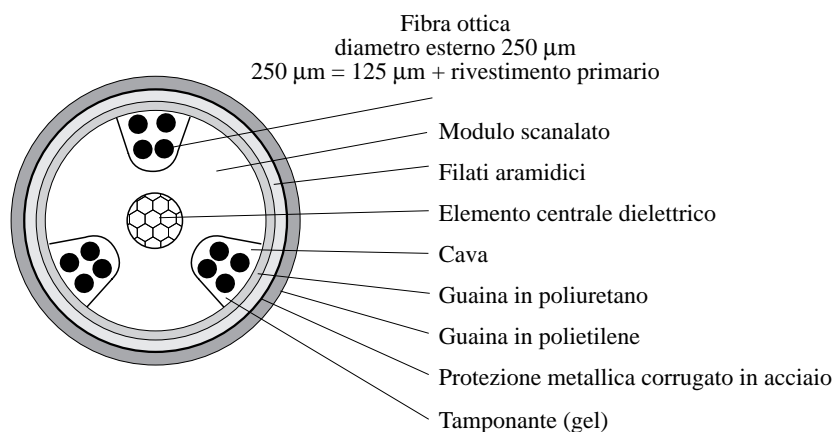


Fig. 3.38 - Cavo di tipo slotted core.

Il cavo è normalmente protetto da una corazzatura di acciaio corrugato termosaldata che può migliorare la robustezza meccanica e la resistenza all'acqua, e serve anche come protezione antiroditore.

3.4 MODALITA' DI UTILIZZO DEI CANALI TRASMISSIVI

I mezzi trasmissivi sino ad ora considerati possono essere impiegati in modo sia monodirezionale sia bidirezionale. La fibra ottica, per la sua struttura fisica, è un mezzo monodirezionale; il doppino viene normalmente impiegato come mezzo monodirezionale (anche se in telefonia lo si usa in modalità bidirezionale), mentre il cavo coassiale è normalmente utilizzato in modalità bidirezionale.

Nel caso di fibre ottiche e doppini, il collegamento tra due sistemi A e B è di tipo *punto-punto*, realizzato quindi con una coppia di fibre ottiche o con una coppia di doppini: uno per trasmettere da A verso B e l'altro per trasmettere da B verso A (figura 3.39).

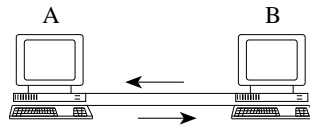


Fig. 3.39 - Canale punto-punto.

Questo canale trasmissivo prende anche il nome di canale punto-punto *full-duplex*, in quanto ammette contemporaneamente la trasmissione da A verso B e da B verso A.

Mentre le fibre ottiche permettono di realizzare solo canali trasmissivi punto-punto, con i doppini si possono realizzare sia canali punto-punto, sia canali punto-multipunto.

I canali *punto-multipunto* (detti anche *multidrop*, figura 3.40) sono dei canali half-duplex, in cui in un dato istante una sola stazione trasmette. Mentre A trasmette a B, B non può trasmettere e viceversa. Su tali canali si collegano un sistema master e più sistemi slave. Il sistema master decide chi deve trasmettere sul canale e i sistemi slave possono trasmettere solo su richiesta (*poll*) del sistema master. I canali punto-multipunto, ora in disuso, sono stati usati nel passato per interconnettere gruppi di terminali ad un elaboratore centrale.

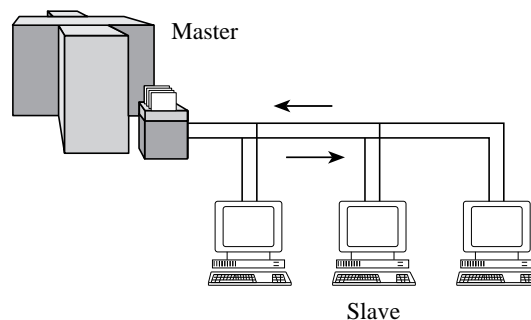


Fig. 3.40 - Canale punto-multipunto.

Con il cavo coassiale si possono realizzare sia canali punto-punto sia canali punto-multipunto, ma l'applicazione principale del cavo coassiale è la realizzazione di canali *broadcast* (figura 3.41) a cui sono collegati molti sistemi e in cui, quando un sistema trasmette, tutti gli altri ricevono. La trasmissione ad una determinata stazione avviene perciò sulla base di un indirizzo che deve essere incluso nel pacchetto di dati, e che la stazione destinataria riconosce.

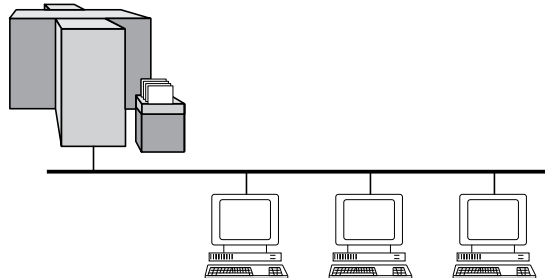


Fig. 3.41 - Canale broadcast.

3.5 TOPOLOGIE

Le topologie usate nelle reti di calcolatori sono molte e vanno dall'anello, alla stella, al bus, alla maglia completa o incompleta. Per le reti locali si adottano topologie semplici e regolari quali il bus, la stella o l'anello, mentre per le reti geografiche si adottano topologie parzialmente magliate. Le ragioni di scelte differenziate sono da ricercarsi nel diverso costo dei mezzi trasmissivi, basso nelle LAN e alto nelle WAN.

Topologie più o meno regolari implicano differenti problematiche di instradamento dei messaggi. Queste possono essere molto semplici, o addirittura non esistere, nelle topologie quali il bus o l'anello monodirezionale, ed essere anche molto complesse in reti magliate con topologie irregolari e canali a velocità differenziate.

3.5.1 La stella

La stella è una topologia interessante perché permette di precablare in modo strutturato gli edifici come spiegato nel capitolo 4. La topologia stellare (figura 3.42a) implica la presenza di un centro stella che può divenire un punto critico per l'affidabilità della rete, ma d'altro canto semplifica moltissimo la gestione e la manutenzione della rete stessa permettendo l'esclusione di sistemi malfunzionanti.

Molto spesso la stella è in realtà una stella gerarchica (a più livelli, come illustrato in figura 3.42b) e quindi, più propriamente, un albero.

Nelle stelle e negli alberi le problematiche di instradamento sono semplici poiché esiste un solo cammino che collega due sistemi.

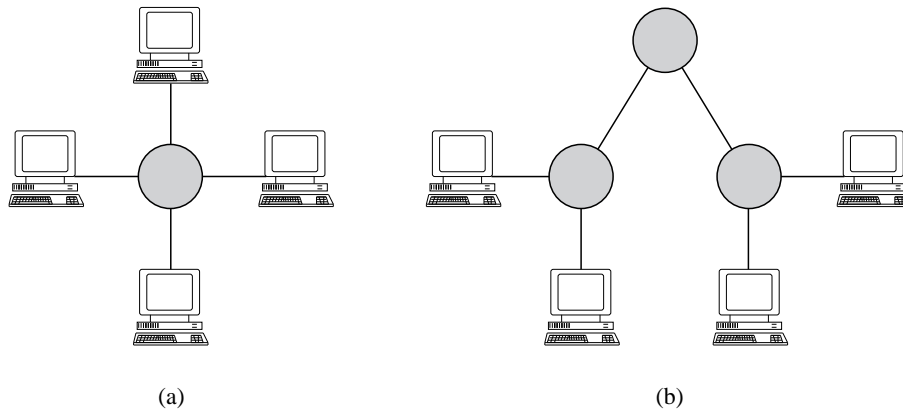


Fig. 3.42 - Topologie a stella.

La stella si realizza impiegando due mezzi trasmissivi punto-punto (normalmente doppino o fibra ottica) per interconnettere ogni sistema al centro stella (uno dal centro stella verso il sistema e l'altro in direzione opposta).

3.5.2 L'anello

La topologia ad anello prevede di collegare ogni sistema al sistema successivo con un mezzo trasmissivo punto-punto e di collegare l'ultimo sistema al primo (figura 3.43). Ne risulta un anello unidirezionale in cui ogni sistema ha anche una funzionalità di ripetizione dei messaggi degli altri sistemi. Infatti, quando un sistema deve trasmettere, esso inserisce il messaggio sull'anello trasmettendolo al sistema a valle. Tutti gli altri sistemi ripetono il messaggio sino a quando questo torna al sistema mittente che lo toglie dall'anello. Il sistema destinatario, oltre a ripetere il messaggio, lo riceve e può modificare un bit nella coda del messaggio per confermare l'avvenuta corretta ricezione al mittente. Questa caratteristica di "conferma dell'avvenuta ricezione" è peculiare solo delle reti ad anello.

La topologia ad anello unidirezionale è molto attrattiva da un punto di vista di organizzazione logica della rete, ma molto meno per quanto concerne il cablaggio fisico della rete stessa. Infatti, se una rete viene cablata ad anello, la sua affidabilità ne risulta gravemente compromessa: un sistema guasto o spento interrompe l'operatività dell'intera rete stessa. Per tale motivo per le reti ad anello si adottano cablaggi che consentano di escludere dalla rete sistemi o mezzi trasmissivi mal funzionanti.

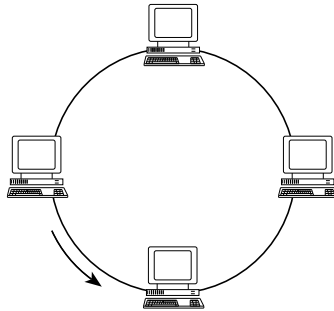


Fig. 3.43 - Topologia ad anello.

Si possono adottare due diverse soluzioni:

- scegliere un cablaggio a stella ripiegando l'anello sui centri stella (figura 3.44) ai quali affidare il compito di escludere i sistemi mal funzionanti tramite circuiti di "bypass" garantendo così l'affidabilità della rete;

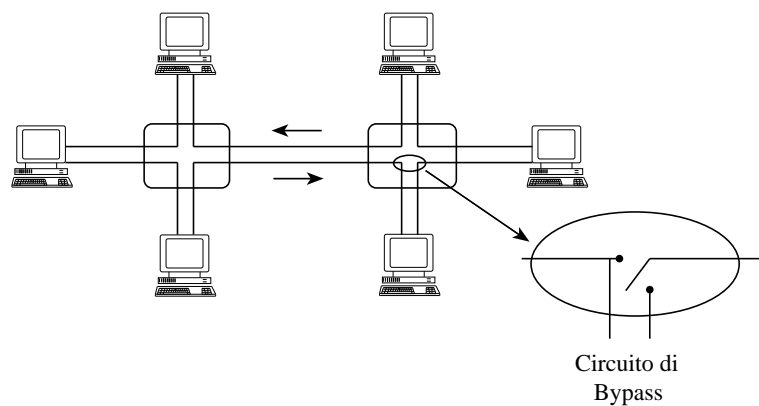


Fig. 3.44 - Rete ad anello cablata a stella.

- usare un cablaggio a doppio anello controrotante (figura 3.45), in cui si mantiene il cablaggio ad anello, ma si inserisce un secondo anello con funzionalità di backup in caso di guasto di un sistema. In questo secondo approccio il guasto contemporaneo di più sistemi porta al partizionamento dell'anello.

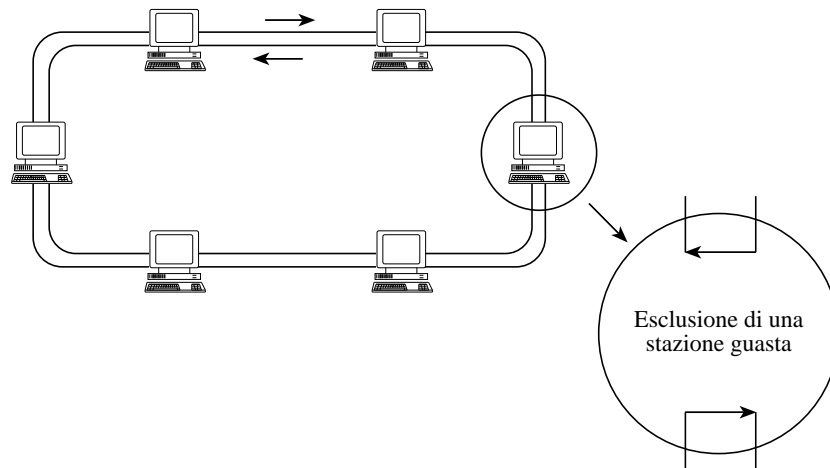


Fig. 3.45 - Rete ad anello cablata a doppio anello controrotante.

La seconda soluzione è tipicamente impiegata sulle dorsali, mentre la prima è più diffusa nell'interconnessione dei sistemi di utente.

3.5.3 Il bus

La topologia a bus (figura 3.46) richiede un mezzo trasmissivo intrinsecamente bidirezionale, cioè che ammetta la propagazione del segnale in entrambe le direzioni. Il bus è un mezzo trasmissivo broadcast in cui quando un sistema trasmette tutti gli altri ricevono simultaneamente. I sistemi collegati al bus non devono occuparsi di effettuare ripetizione o instradamento: tutti i sistemi sono raggiungibili direttamente. I bus si realizzano tipicamente con cavi coassiali.



Fig. 3.46 - Topologia a bus.

Poiché il bus è un mezzo trasmissivo broadcast, esso è stato molto usato nelle LAN (in particolare in Ethernet) che, come spiegato nel capitolo 5, sono per loro natura broadcast. Inoltre, l'assenza di un elemento centrale, quale quello delle reti

a stella, garantisce una elevata affidabilità intrinseca.

La topologia a bus mal si adatta al cablaggio strutturato che, come vedremo nel capitolo 4, impiega principalmente doppini e fibre ottiche con una topologia a stella gerarchica.

3.5.4 Le maglie

La topologia magliata prevede di interconnettere i sistemi con canali trasmissivi punto-punto bidirezionali, formando uno o più anelli. Se è prevista la connessione di ogni sistema con tutti gli altri si parla di maglia completa, in caso diverso di maglia incompleta.

La maglia completa (figura 3.47a) richiede un numero di canali trasmissivi che cresce in modo quadratico al crescere del numero dei sistemi. Per questo trova applicazione solo in reti molto piccole dove l'affidabilità sia un fattore determinante.

La maglia incompleta (figura 3.47b) trova invece la sua naturale applicazione nelle reti geografiche dove il fattore costo spingerebbe a configurare la rete ad albero per minimizzare il numero di canali trasmissivi. Essendo questi, su base geografica, meno affidabili di quelli su base locale, è necessario aggiungere alcuni canali ridondanti, magliando appunto la rete per aumentarne l'affidabilità.

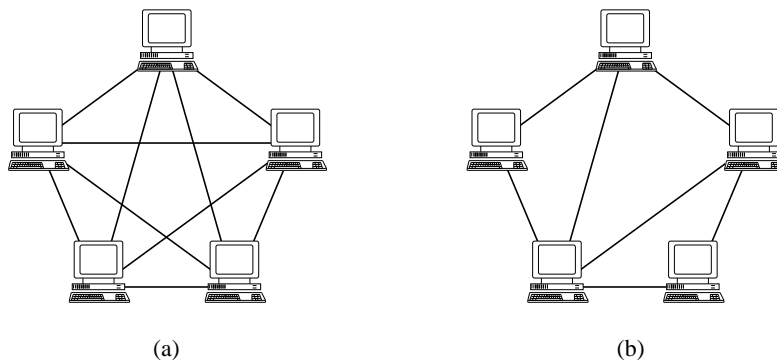


Fig. 3.47 - Topologie magliate.

Le topologie a maglia incompleta pongono problemi di instradamento e di bilanciamento del traffico sulle linee, essendo possibili in generale più cammini tra una coppia di sistemi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BICC, "Cables for Structured Wiring Systems and Local Area Networks", Manuale BICC Cables Limited, Warrington (UK).
- [2] Ceat Service, "Materiale illustrativo sui cavi", Ceat Service, Torino (Italia).
- [3] Belden, "Networking Cables", Materiale illustrativo Belden Richmond (USA).
- [4] Montorose, "Materiale illustrativo sui cavi", The Wire Group International, USA.
- [5] EIA/TIA-568, "Commercial Building Telecommunication Wiring Standard", luglio 1991.
- [6] EIA/TIA/TSB-36, "Technical Systems Bulletin Additional Cable Specification for Unshielded Twisted Pair Cables"; novembre 1991.
- [7] EIA/TIA/TSB-40, "Additional Transmission Specifications for Unshielded Twisted-Pair Connecting Hardware", agosto 1992.
- [8] ISO/IEC DIS 11801, "Information technology - Generic cabling for customer premises cabling", gennaio 1994.
- [9] Optical Cable Corp. "Videocassetta su Fibre Ottiche", Roanoke, VA (USA).
- [10] Videocassetta SSGRR, "Il Collaudo in opera dei cavi in fibra ottica", L'Aquila (Italia), gennaio 1989.
- [11] Digital, "Guida alle reti Locali", 1982.
- [12] IBM Centro di competenza Telecomunicazioni, "Reti Locali IBM: Sistema di cablaggio IBM", Codice documento GA13-1536-01, Roma (Italia), settembre 1989.
- [13] AT&T Network System, "Systimax Premise Distribution System: Component Guide", Codice documento No. 555-400-603, dicembre 1990.
- [14] J.E. McNamara, "Local Area Networks: an Introduction to the Technology".
- [15] J.E. McNamara, "Technical Aspects of Data Communication", Digital Press, Bedford, MA (USA), 1988.
- [16] U. Black, "Computer Networks: Protocols, Standard and Interfaces", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (USA), 1987.
- [17] Landee, Davis, Albrecht, Giacoletto, "Electronics designers' handbook", McGraw-Hill, New York (USA), 1977.