

Appunti del corso di Sistemi di elaborazione: Reti I

PROF. G. BONGIOVANNI

| | |
|---|-----------|
| 2) IL LIVELLO UNO (FISICO) | 2 |
| 2.1) Basi teoriche della trasmissione dati | 2 |
| 2.1.1) Analisi di Fourier (analisi armonica) | 3 |
| 2.1.2) Teorema di Nyquist..... | 5 |
| 2.1.3) Teorema di Shannon | 5 |
| 2.2) Mezzi trasmissivi | 6 |
| 2.2.1) Doppino intrecciato..... | 6 |
| 2.2.2) Cavo coassiale..... | 7 |
| 2.2.3) Fibre ottiche | 8 |
| 2.2.4) Trasmissione senza fili..... | 11 |
| 2.3) Il sistema telefonico | 13 |
| 2.3.1) Struttura generale | 14 |
| 2.3.2) Il local loop..... | 16 |
| 2.3.3) ADSL..... | 19 |
| 2.3.4) Trunk e multiplexing..... | 20 |
| 2.3.5) SONET/SDH | 23 |
| 2.3.6) Commutazione | 25 |
| 2.3.7) Dispositivi di commutazione..... | 26 |
| 2.3.8) Servizi per trasmissione dati | 27 |

2) Il livello uno (Fisico)

In questo capitolo verranno illustrati gli aspetti principali del livello fisico, che riguardano:

- la teoria della trasmissione delle informazioni, per capire quali sono i limiti fondamentali imposti da madre natura;
- le caratteristiche dei mezzi trasmissivi più comuni;
- le caratteristiche del sistema telefonico.

2.1) Basi teoriche della trasmissione dati

L'informazione può essere trasmessa a distanza variando opportunamente una qualche caratteristica fisica del mezzo scelto per la trasmissione. Tale variazione si propaga, con una certa velocità, lungo il mezzo di trasmissione e dopo un certo tempo arriva all'altra estremità del mezzo, dove può venir rilevata. Ad esempio, se il mezzo è un cavo metallico, si può variare la tensione applicata ad un'estremità. Tale variazione di tensione verrà successivamente rilevata all'altra estremità.

I mezzi trasmissivi sono sostanzialmente di tre tipi:

- **mezzi elettrici** (cavi): in essi il fenomeno fisico utilizzato è l'energia elettrica;
- **mezzi wireless** (onde radio): il fenomeno fisico è l'onda elettromagnetica, una combinazione di campo elettrico e campo magnetico variabili, che si propaga nello spazio e che induce a distanza una corrente elettrica in un dispositivo ricevente (antenna);
- **mezzi ottici** (LED, laser e fibre ottiche): in essi il fenomeno utilizzato è la luce. Si tratta dei mezzi più recenti, che hanno rivoluzionato il settore.

Rappresentando il valore nel tempo del fenomeno fisico utilizzato come una funzione $f(t)$, si può studiare matematicamente il segnale risultante.

In linea di principio, la trasmissione può avvenire con due modalità differenti: trasmissione di **segnale analogico** e trasmissione di **segnale digitale**.

La differenza fondamentale fra un segnale analogico e uno digitale è che:

- il primo può variare **gradualmente** in un intervallo costituito da un **numero infinito** di possibili valori;
- il secondo può variare solamente passando **bruscamente** da uno all'altro di un **insieme molto piccolo** di valori (da due a qualche decina).

Si tenga presente però che il fenomeno fisico utilizzato non è digitale ma analogico. Un segnale quindi non può passare istantaneamente da un valore ad un altro, ma impiegherà un certo tempo per effettuare la transizione. La conseguenza è che un mezzo fisico farà del suo meglio per trasportare un segnale digitale, ma non riuscirà a farlo arrivare esattamente com'è partito.

Come vedremo in seguito, in certi casi (e con certe tecniche) è utile trasformare un segnale analogico in uno digitale e viceversa.

2.1.1) Analisi di Fourier (analisi armonica)

Premissa: una *funzione sinusoidale*, quale il seno o il coseno, è caratterizzata da alcuni parametri :

- *ampiezza* A (la differenza fra il valore massimo ed il minimo);
- *periodo* T (la quantità T di tempo trascorsa la quale la funzione si ripete);
- *frequenza* : l'inverso del periodo $f = 1/T$, misurata in *cicli al secondo* (Hz).

Fourier (matematico francese dell'800) dimostrò che una funzione periodica $g(t)$, avente un periodo T, può essere espressa come una somma di un numero infinito di funzioni sinusoidali:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

dove $f = 1/T$ è la *frequenza fondamentale* ed a_n e b_n sono le ampiezze dell'ennesima armonica (o termine), che ha una frequenza n volte più grande della frequenza fondamentale. I valori di c , a_n e b_n sono tutti calcolabili come opportuni integrali di $g(t)$ in t.

Dunque, un segnale variabile nel tempo è di fatto *equivalente ad una somma di funzioni sinusoidali* aventi ciascuna una propria ampiezza e frequenza. Si può quindi rappresentare un segnale $g(t)$ di durata T in un modo diverso, e cioè attraverso il suo *spettro di frequenze*, ossia attraverso la sua scomposizione in sinusoidi.

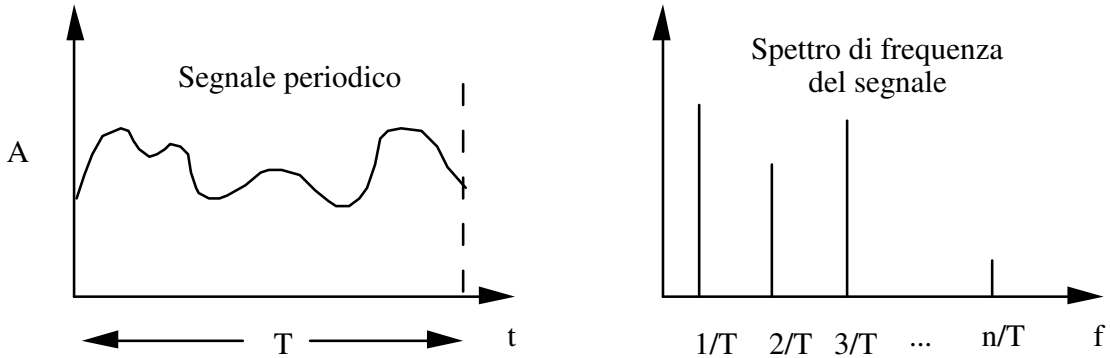


Figura 2-1: Un segnale e il suo spettro di frequenze

Qualunque segnale è dunque caratterizzato da un **intervallo di frequenze** nel quale sono comprese le frequenze delle sinusoidi che lo descrivono. Esso va sotto il nome di **banda di frequenza** (*frequency band*) del segnale.

Diversi fattori influenzano le caratteristiche della banda:

- tanto più è breve la durata T del segnale, tanto più è alto il valore della frequenza fondamentale;
- tanto più velocemente nel tempo varia la $g(t)$, tanto più numerose sono le armoniche necessarie a descriverlo.

Anche i mezzi fisici sono caratterizzati da una banda di frequenze, detta **banda passante**. Essa rappresenta l'intervallo di frequenze che il mezzo fisico è in grado di trasmettere senza alterarle oltre certi limiti.

Le alterazioni principali sono la **attenuazione** e l'**introduzione di ritardo**, che di norma variano al variare delle frequenze trasmesse.

A volte la dimensione della banda passante dipende dalle caratteristiche fisiche del mezzo trasmissivo, a volte deriva dalla presenza di opportuni **filtri** che tagliano le frequenze oltre una certa soglia (detta **frequenza di taglio**, f_c). Ad esempio, nelle linee telefoniche la banda passante è 3 kHz (da 0 Hz a 3.000 Hz), ottenuta con **filtri passa-basso**.

In generale, i mezzi trasmissivi :

- attenuano i segnali in proporzione alla distanza percorsa e alla frequenza del segnale;
- propagano i segnali a velocità proporzionali alle loro frequenze.

Una conseguenza è che, per qualunque mezzo trasmissivo, la banda passante si riduce all'aumentare della lunghezza del mezzo stesso.

Perché un segnale sia ricevuto come è stato trasmesso, è necessario che la banda passante sia uguale o più ampia della banda di frequenza del segnale stesso. Altrimenti, il segnale viene privato di alcune delle sue armoniche (tipicamente quelle di frequenza più elevata) e viene

quindi distorto, cioè alterato. Se un numero sufficiente di armoniche arriva a destinazione, il segnale è comunque utilizzabile.

Ci sono due teoremi fondamentali che caratterizzano i limiti per la trasmissione delle informazioni.

2.1.2) Teorema di Nyquist

Nyquist (1924) ha dimostrato che un segnale analogico di banda h (da 0 ad h Hz) può essere completamente ricostruito mediante una campionatura effettuata $2h$ volte al secondo. Dunque esso "convoglia" una quantità di informazione rappresentabile con un numero di bit pari a

$$2h \cdot (\text{logaritmo in base 2 del numero di possibili valori del segnale})$$

per ogni secondo.

Una conseguenza di tale teorema è che il massimo *data rate* (detto anche, con un termine non del tutto appropriato, *velocità di trasmissione*) di un canale di comunicazione dotato di una banda passante da 0 Hz ad h Hz (passa-basso di banda h) che trasporta un segnale consistente di V livelli discreti è:

$$\text{massimo data rate (bit/sec.)} = 2h \log_2 V$$

Questo risultato implica che un segnale binario non va oltre i 6 kbps su una linea di banda passante pari a 3 kHz. Come vedremo, i modem veloci sfruttano un segnale con un numero V di livelli piuttosto elevato per riuscire a trasmettere, su una linea funzionante ad x *baud*, più di x bit/sec. (il termine baud indica la velocità di segnalazione di una linea, ossia quante volte al secondo essa è in grado di cambiare valore).

2.1.3) Teorema di Shannon

Il teorema di Nyquist è valido per canali totalmente privi di disturbi (il che purtroppo non è realistico). Per gli altri casi vale il teorema di Shannon (1948), che considera le caratteristiche di un canale rumoroso.

Prima di esporre il teorema è necessario chiarire il concetto di *rapporto segnale/rumore* (*signal to noise ratio, S/N*): esso è il rapporto fra la potenza del segnale e quella del rumore. Si misura in *decibel (dB)*, che crescono come $10 \log_{10} (S/N)$. La tabella seguente riporta alcuni valori esemplificativi.

| Rapporto S/N | Misura in Db |
|--------------|--------------|
| 2 | 3 |
| 10 | 10 |
| 100 | 20 |
| 1.000 | 30 |

Il teorema di Shannon afferma che il massimo data rate di un canale rumoroso, con banda passante di h Hz e rapporto segnale/ rumore pari a S/N , è data da:

$$\text{massimo data rate (bit/sec.)} = h \lg_2 (1 + S/N)$$

Si noti che in questo caso non conta più il numero V di livelli del segnale. Ciò perché, a causa del rumore, aumentarne il numero può renderli indistinguibili.

Ad esempio, su un canale con banda 3kHz e $S/N = 30\text{dB}$ (tipici di una normale linea telefonica) si può arrivare al massimo a 30.000 bps.

In generale:

- più alto è il numero di bit/secondo che si vogliono trasmettere, più ampia diviene la banda passante che serve (T diminuisce);
- a parità di mezzo utilizzato, tanto più è corto il canale di trasmissione tanto più è alto il numero di bit/secondo raggiungibile (attenuazioni e sfasamenti restano accettabili);
- la trasmissione digitale è più critica di quella analogica (genera frequenze più alte), ma può essere più facilmente "rigenerata" lungo il percorso (è sufficiente distinguere fra pochi valori per ripristinare il segnale originario; nella trasmissione analogica ogni amplificazione introduce distorsione, che si somma a quella degli stadi precedenti).

2.2) Mezzi trasmissivi

2.2.1) Doppino intrecciato

È il più anziano e diffuso. Consiste di una coppia di conduttori in rame intrecciati l'uno coll'altro in forma elicoidale. Ciò fa sì che si minimizzino le interferenze fra coppie adiacenti (due fili paralleli costituiscono un'antenna; se sono intrecciati no). È usato, in particolare, per le connessioni terminali del sistema telefonico (da casa alla centrale più vicina).

La larghezza di banda dipende dalla lunghezza, ma comunque si può trasmettere a diversi Mbps su distanze fino a qualche km.

Due tipi di doppino sono importanti nella trasmissione dati:

- **categoria 3**: due fili isolati, leggermente attorcigliati. Quattro coppie contenute in una guaina di plastica. Comune nei cablaggi telefonici interni agli edifici (si possono avere quattro telefoni per stanza);
- **categoria 5** (dal 1988): simile alla categoria 3, ma con un più fitto avvolgimento (più giri per centimetro) e con isolamento in teflon. Migliore qualità del segnale sulle lunghe distanze, adatto a collegamenti in alta velocità in ambito LAN (ad esempio per Ethernet a 100 Mbps, ATM a 34 Mbps).

Entrambi i tipi sono spesso chiamati **UTP (Unshielded Twisted Pair)**, per distinguerli da un altro tipo, detto **STP (Shielded Twisted Pair)** che è schermato e quindi offre migliori prestazioni, ma è molto più ingombrante e, di fatto, non viene usato quasi più.

2.2.2) Cavo coassiale

È un altro comune mezzo di trasmissione; offre un miglior isolamento rispetto al doppino e quindi consente velocità di trasmissione maggiori su distanze superiori.

È costituito da un conduttore centrale in rame circondato da uno strato isolante all'esterno del quale vi è una calza metallica.

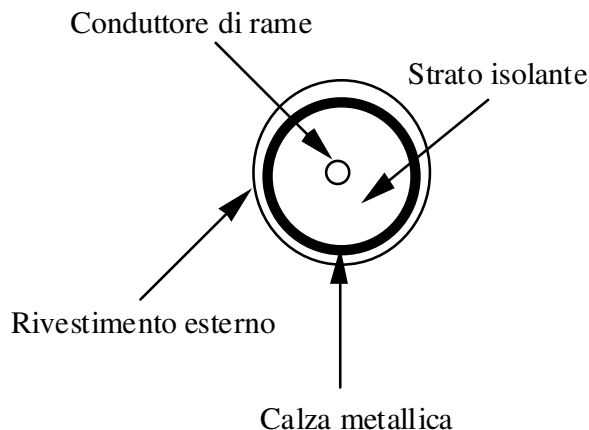


Figura 2-2: Sezione di un cavo coassiale

Era molto usato nel sistema telefonico per le tratte a lunga distanza, ma in tale ambito è ormai sostituito quasi ovunque dalla fibra ottica. Rimane in uso per la TV via cavo e in molte LAN.

Ci sono due tipi di cavo coassiale, per ragioni storiche più che tecniche.

Premessa: il termine **baseband (banda base)** significa che l'intera banda passante è usata per una singola trasmissione, di tipo digitale. Il termine **broadband**, invece, nella telefonia indica qualunque trasmissione più ampia di 4 kHz, mentre nella trasmissione dati si riferisce a un cavo su cui viaggia un segnale analogico che, con opportune tecniche di **multiplazione**, viene usato per effettuare contemporaneamente più trasmissioni distinte, separate in differenti bande di frequenza.

- **Baseband coaxial cable** (50 ohm): il cavo baseband è usato per la trasmissione digitale, e consente velocità da 1 a 2 Gbps fino a circa 1 km. Per distanze superiori si devono interporre amplificatori.
- **Broadband coaxial cable** (75 ohm): è usato per la trasmissione analogica. È il cavo standard della TV. Offre una banda di 300 MHz e può estendersi fino a quasi 100 km. La banda totale è suddivisa in canali di banda più piccola (ad es. 6 MHz per ciascun segnale TV) indipendenti gli uni dagli altri. Mentre un canale porta un segnale TV, un altro può portare una trasmissione dati (ovviamente con apparecchiature di conversione digitale/analogica e viceversa), tipicamente a 3 Mbps.

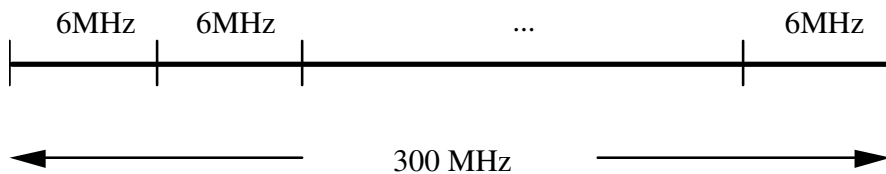


Figura 2-3: Multiplazione di più trasmissioni su un unico canale

Tecnicamente, il cavo broadband è inferiore a baseband per la trasmissione digitale, ma ha il vantaggio di essere già in opera in grandi quantità (TV via cavo). Dunque, attraverso essa, le compagnie pay-TV prevedibilmente entreranno in competizione con quelle telefoniche per l'offerta di servizi trasmissione dati.

2.2.3) Fibre ottiche

Sono uno dei mezzi più recenti, e stanno rivoluzionando il mondo delle telecomunicazioni. Sono fatte di un sottilissimo cilindro centrale in vetro, (**core**) circondato da uno strato esterno (**cladding**) di vetro avente un diverso indice di rifrazione e da una guaina protettiva. Sono quindi raggruppate insieme in una guaina contenitrice esterna.

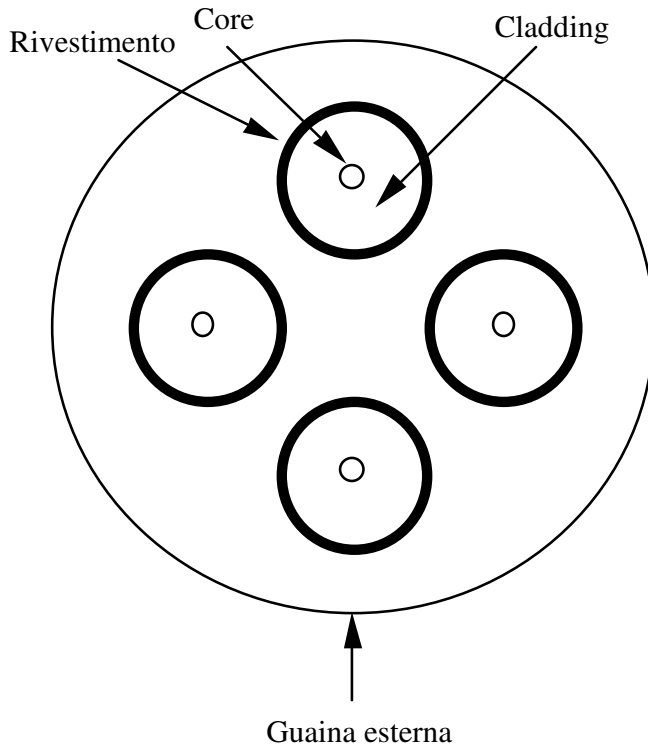


Figura 2-4: Sezione di un cavo contenente fibre ottiche

Le fibre ottiche sfruttano il principio della deviazione che un raggio di luce subisce quando attraversa il confine fra due materiali diversi (core e cladding nel caso delle fibre). La deviazione dipende dagli indici di rifrazione dei due materiali. Oltre un certo angolo, il raggio rimane intrappolato all'interno del materiale.

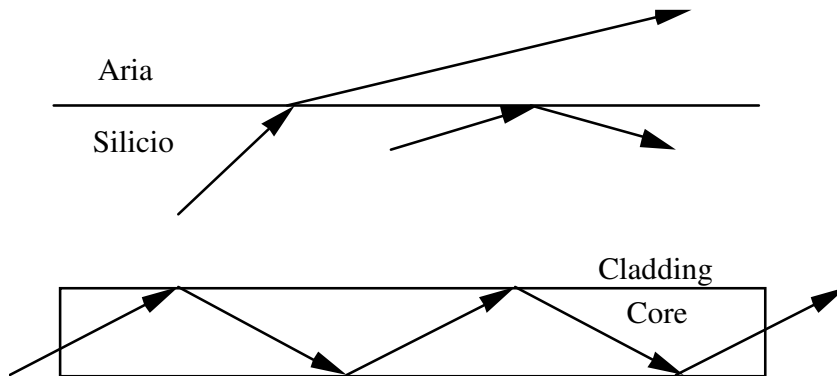


Figura 2-5: Deviazione del raggio luminoso

Le fibre ottiche sono di due tipi :

- **multimodali**: raggi diversi possono colpire la superficie con diversi angoli (detti **mode**), proseguendo quindi con diversi cammini. Il diametro del core è di 50 micron, come quello di un un capello;
- **monomodali**: sono così sottili (il diametro del core è 8-10 micron) che si comportano come una guida d'onda: la luce avanza in modo rettilineo, senza rimbalzare. Sono più costose ma reggono distanze più lunghe (fino a 30 km).

Le fibre ottiche hanno prestazioni strepitose: con le correnti tecnologie è raggiungibile una velocità di trasmissione di 50.000 Gbps (50 Tbps) con un bassissimo tasso d'errore. La pratica attuale di usare velocità dell'ordine dei Gbps dipende dall'incapacità di convertire più velocemente segnali elettrici in luminosi. Infatti, nelle fibre ottiche, il mezzo fisico utilizzato è ovviamente la luce, e un impulso luminoso rappresenta un 1 mentre la sua assenza uno zero.

Le fibre ottiche sono fatte di un vetro speciale, molto trasparente (si vedrebbe il fondo del mare, se esso fosse di questo vetro), per cui offrono una bassissima attenuazione del segnale luminoso. L'attenuazione dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce, per cui si usano comunemente tre particolari bande per la trasmissione (tutte nell'infrarosso vicino), larghe da 25.000 GHz a 30.000 GHz ciascuna (un'enormità).

Un sistema di trasmissione ottica ha tre componenti :

- **sorgente luminosa**: può essere un LED o un laser. Converte un segnale elettrico in impulsi luminosi;
- **mezzo di trasmissione**: è la fibra ottica vera e propria;
- **fotodiodo ricevitore**: converte gli impulsi luminosi in segnali elettrici. Il tipico tempo di risposta di un fotodiodo è 1 nsec., da cui il limite di 1 Gbps.

Ci sono due topologie comuni per le reti basate su fibre ottiche:

- **anello**: mediante la concatenazione di più spezzoni di fibre ottiche si crea un anello. Tutti collegamenti sono punto a punto. L'interfaccia può essere passiva (fa passare l'impulso luminoso nell'anello) o attiva (converte l'impulso in elettricità, lo amplifica e lo riconverte in luce);
- **stella passiva**: l'impulso, inviato da un trasmettitore, arriva in un cilindro di vetro al quale sono attaccate tutte le fibre ottiche; viene poi distribuito alle fibre ottiche uscenti. Si realizza così una rete broadcast.

Vantaggi delle fibre ottiche rispetto al rame:

- leggerezza a parità di banda (due fibre sono più capaci di 1.000 doppini, 100 kg/km contro 8.000 kg/km);
- totale insensibilità a disturbi elettromagnetici;
- difficile l'inserimento di intrusi per spiare il traffico.

Svantaggi delle fibre ottiche rispetto al rame:

- costo delle giunzioni;
- comunicazione unidirezionale (due fibre sono necessarie per una comunicazione two-way).

2.2.4) Trasmissione senza fili

Le onde elettromagnetiche, create dal movimento degli elettroni, viaggiano nello spazio (anche vuoto) alla velocità della luce e possono indurre una corrente in un dispositivo ricevente (antenna) anche molto distante.

Le porzioni dello spettro elettromagnetico utilizzabili per la trasmissione dati includono:

- onde radio;
- microonde;
- raggi infrarossi;
- luce visibile;
- raggi ultravioletti;
- raggi X.

| DENOMINAZIONE | | SIGLA | FREQUENZA | LUNGHEZZA D'ONDA | USO |
|------------------------------|-------------------------------------|-------|---------------|------------------|-----------------|
| FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE | | ELF | 0 - 3kHz | > 100Km | Bande marittime |
| FREQUENZE BASSISSIME | | VLF | 3 - 30kHz | 100 - 10Km | |
| RADIOFREQUENZE | FREQUENZE BASSE (ONDE LUNGHE) | LF | 30 - 300kHz | 10 - 1Km | Radio AM |
| | MEDIE FREQUENZE (ONDE MEDIE) | MF | 300kHz - 3MHz | 1Km - 100m | |
| | ALTE FREQUENZE | HF | 3 - 30MHz | 100 - 10m | Radio FM |
| | FREQUENZE ALTISSIME (ONDE METRICHE) | VHF | 30 - 300MHz | 10 - 1m | TV |
| MICROONDE | ONDE DECIMETRICHE | UHF | 300MHz - 3GHz | 1m - 10cm | Satelliti |
| | ONDE CENTIMETRICHE | SHF | 3 - 30GHz | 10 - 1cm | |
| | ONDE MILLIMETRICHE | EHF | 30 - 300GHz | 1cm - 1mm | |
| INFRAROSSO | | IR | 0,3 - 385THz | 1mm - 780nm | Fibre ottiche |
| LUCE VISIBILE | | | 385 - 750THz | 780 - 400nm | |
| ULTRAVIOLETTO | | UV | 750 - 3000THz | 400 - 100nm | |
| RADIAZIONI IONIZZANTI | | X | > 3000THz | < 100nm | |

Figura 2-6: Lo spettro elettromagnetico

In generale l'allocazione delle frequenze dipende da un'autorità statale. Esistono però alcune bande, dette **ISM (Industrial, Scientific, Medical)** che possono essere utilizzate liberamente per trasmissioni di bassa potenza (e quindi di portata limitata). Esse sono:

- Banda 900 MHz (da 902 a 928 MHz, larghezza 26 MHz), che non è disponibile però in tutto il mondo;
- Banda 2,4 GHz (da 2,4 a 2,4835 GHz, larghezza 83,5 MHz): è usata da moltissime apparecchiature, fra cui forni a microonde, telecomandi, mouse senza fili, ecc. Viene inoltre usata, come vedremo, per alcuni tipi di LAN senza fili;
- Banda 5,7 GHz (da 5,735 a 5,860 GHz, larghezza 125 MHz): per ora relativamente libera, utilizzata anch'essa per le LAN senza fili di concezione più recente.

Man mano che si sale di frequenza si hanno comportamenti diversi :

- le onde radio, di frequenza più bassa, passano attraverso gli edifici, percorrono lunghe distanze e vengono riflesse dalla ionosfera;
- a frequenze più elevate (lunghezza d'onda dell'ordine dei mm o meno) sono estremamente direzionali e vengono fermate dagli ostacoli (anche dalle gocce di pioggia!);
- in tutti i casi sono soggette a interferenze elettromagnetiche;
- la trasmissione è inerentemente di tipo broadcast.

Anche in questo ambito la velocità di trasmissione è funzione dell'ampiezza della banda utilizzata. Si trasmettono informazioni modulando l'ampiezza, la frequenza e/o la fase dell'onda.

In genere la trasmissione dati senza fili avviene utilizzando una banda di frequenza ristretta al minimo necessario in funzione del data rate desiderato. In certi casi però si utilizza un'altra tecnica trasmissiva, detta a **spettro distribuito (spread spectrum)**, nella quale si utilizza una banda ben superiore a quella minima necessaria. Ad esempio, le trasmissioni nelle bande ISM sono quasi sempre a spettro distribuito, anche perché in alcune nazioni esistono direttive delle autorità per le telecomunicazioni che impongono per ISM tale modalità trasmissiva. Esistono due varianti di trasmissione a spettro distribuito:

1. **Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)**, nella quale il trasmettitore e ricevitore saltano da una frequenza all'altra centinaia di volte al secondo;
2. **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**, nella quale ogni bit di dati viene codificato mediante una sequenza di valori, detti **chip**, che vengono quindi trasmessi. Dato che per ogni bit devono essere trasmessi numerosi valori (uno per ogni chip in cui il bit viene codificato) la banda trasmissiva necessaria risulta ovviamente più ampia.

Le trasmissioni a spettro distribuito offrono numerosi vantaggi, a fronte di una più gravosa richiesta di banda trasmissiva.

Per quanto riguarda FHSS:

- Buona immunità ai disturbi elettromagnetici (essi colpiscono una banda ristretta, quindi solo per il tempo in cui la trasmissione usa quella stessa banda);
- Buona immunità al problema della riflessione dei segnali (i segnali riflessi arrivano più tardi, e se il ricevitore ha cambiato banda vengono ignorati);
- Buona possibilità di condividere la banda trasmissiva (usando sequenze diverse di salto tra le frequenze per diversi trasmettitori);
- Difficile intercettare la trasmissione (si deve conoscere la sequenza di salti tra le frequenze).

Per quanto riguarda DSSS:

- Ottima immunità ai disturbi elettromagnetici (essi colpiscono una banda ristretta, ma la trasmissione dati utilizza una banda molto ampia);
- Buona immunità al problema degli errori in generale (grazie alle proprietà di autocorrelazione e ridondanza dei codici utilizzati);
- Elevate velocità trasmissive, superiori (a parità di banda utilizzata) a quelle consentite da FHSS.

2.3) Il sistema telefonico

Il sistema telefonico riveste un ruolo centrale per le comunicazioni a distanza fra computer, per vari motivi:

- sarebbe proibitivo in termini di costi connettere, con appositi cavi, apparecchiature distanti centinaia di km o più;
- è illegale, praticamente in tutti i paesi, stendere cavi sul suolo pubblico.

Purtroppo il sistema telefonico, o *rete pubblica telefonica commutata*, è nato e si è evoluto in funzione delle esigenze della fonia, anche se recentemente sta diventando sempre più adatto al traffico dati, grazie ai nuovi mezzi trasmissivi quali le fibre ottiche.

A titolo di esempio, si consideri la seguente tabella:

| | Data rate | Tasso di errore |
|---------------------|-------------------|--------------------------|
| Cavo fra 2 computer | $10^7 - 10^8$ bps | 1 su $10^{12} - 10^{13}$ |
| Linea telefonica | $10^4 - 10^5$ bps | 1 su 10^5 |

Ossia, vi sono 11 ordini di grandezza di differenza: la stessa differenza che c'è tra il costo del Progetto Apollo e quello di un biglietto dell'autobus.

2.3.1) Struttura generale

Agli albori della telefonia (il brevetto di Alexander Graham Bell è del 1876) i telefoni si vendevano a coppie, e gli acquirenti si preoccupavano di stendere il cavo (uno solo, con ritorno via terra) per collegarli. Le città divennero ben presto un groviglio di cavi, e quindi nacquero le società telefoniche (la prima fu la Bell) che aprirono **uffici di commutazione** nei quali un operatore smistava le chiamate fra i vari apparecchi. Questi non erano più collegati direttamente fra loro ma erano tutti connessi a un ufficio di commutazione.

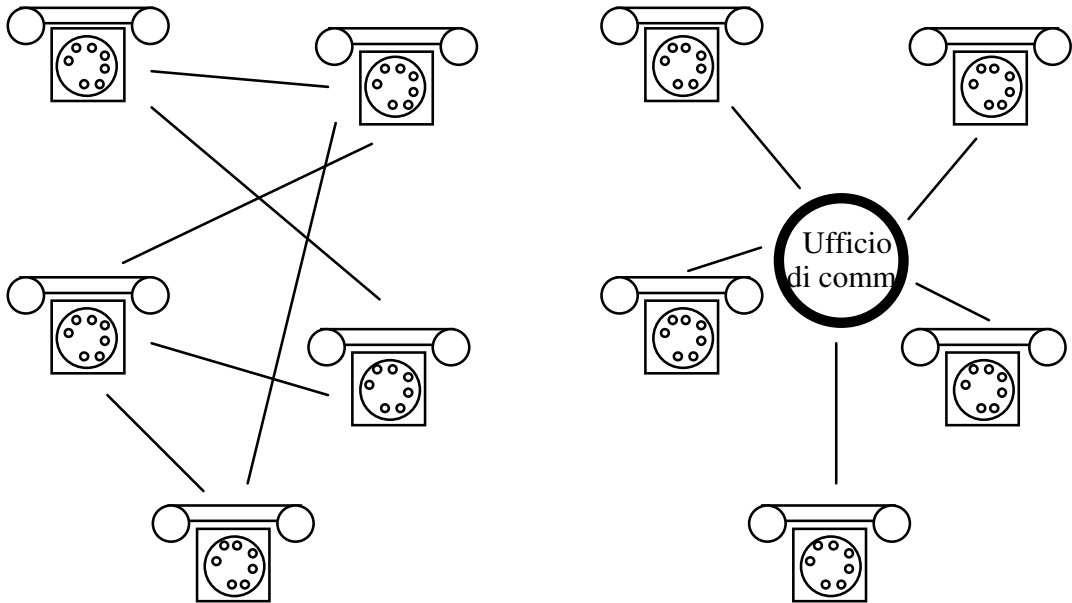


Figura 2-7: Nascita del sistema telefonico

Poiché gli uffici di commutazione nascevano come funghi, si ripropose lo stesso problema per il loro collegamento. Quindi vennero creati gli uffici di commutazione di secondo livello, e poi di terzo; alla fine la gerarchia si arrestò su cinque livelli (1890).

Tale tipo di struttura gerarchica è anche oggi alla base dei sistemi telefonici in tutto il mondo, con variazioni legate essenzialmente alle dimensioni dei vari sistemi. Attualmente ogni sistema telefonico è organizzato in una **gerarchia multilivello** con elevata ridondanza.

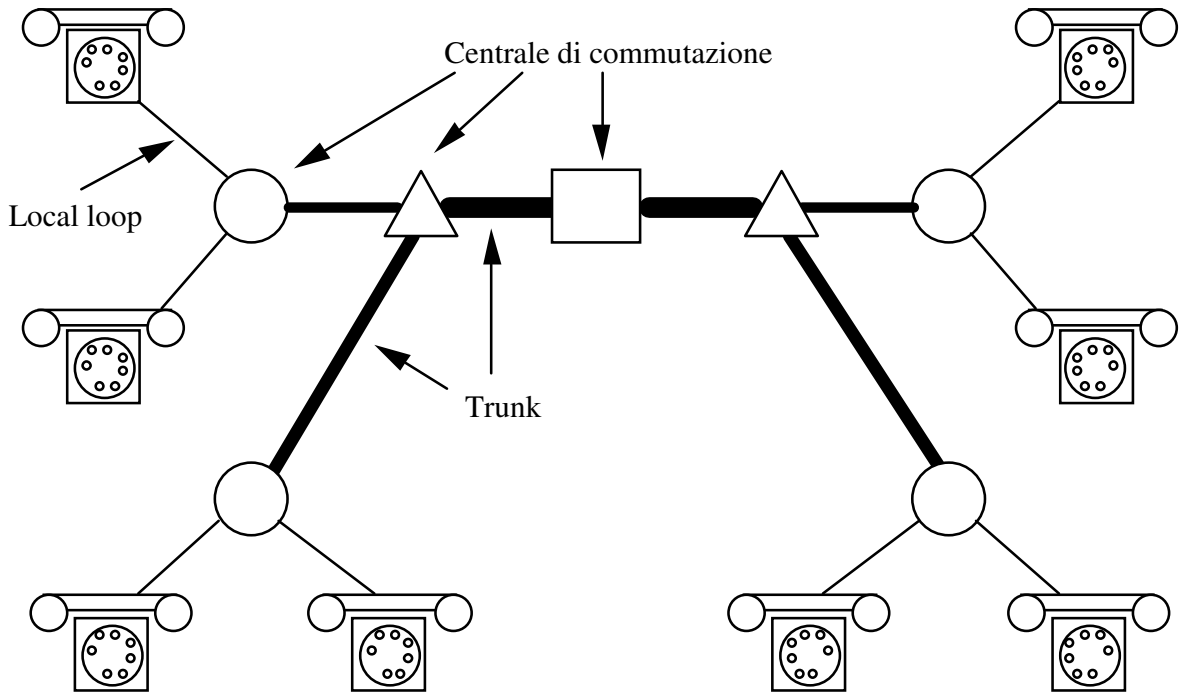


Figura 2-8: Struttura gerarchica del sistema telefonico

Al posto degli operatori vi sono delle **centrali di commutazione**, una volta elettromeccaniche ed oggi quasi tutte digitali.

Il **local loop**, cioè il collegamento dal telefono alla più vicina centrale di commutazione, è ancora oggi basato su doppino telefonico e può avere una lunghezza da 1 a 10 km. Trasporta un segnale analogico dotato di una banda molto modesta (3 kHz).

Per le altre connessioni (**trunk**) si usano molti altri mezzi:

- cavi coassiali;
- microonde;
- fibre ottiche, ormai molto diffuse.

Ormai quasi ovunque le centrali di commutazioni sono digitali e le linee che le collegano trasportano segnali digitali. I vantaggi principali sono i seguenti:

- è più facile ricostruire periodicamente il segnale senza introdurre errori (solo pochi valori);
- è più facile mescolare voce, dati, video e altri tipi di traffico;
- sono possibili data rate più alti usando le linee esistenti.

2.3.2) Il local loop

Ricordiamo che il local loop trasporta un segnale analogico con una larghezza di banda di 3 kHz (0-3 kHz). Dunque, per trasmettere dati digitali, essi devono essere trasformati in analogici da un'apparecchio detto *modem*. Quindi vengono ritrasformati in digitali nella centralina di commutazione da un apparecchio detto *codec*, (cosa che succede anche alle conversazioni telefoniche), e quindi subiscono le conversioni inverse sul local loop di destinazione.

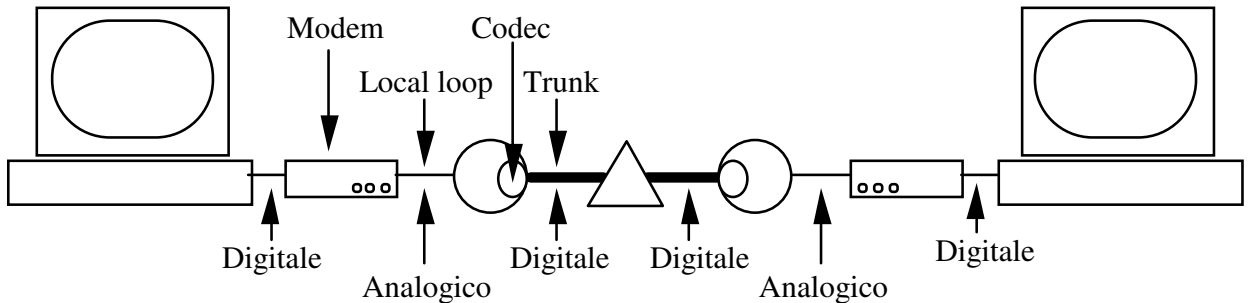


Figura 2-9: Trasmissione dati sul local loop

Ovviamente ciò non è l'ideale, ma bisogna accontentarsi.

Ricordiamo che:

- le linee di trasmissione inducono attenuazione e distorsione (ed in più, specialmente sul local loop, sono soggette a disturbi);
- la trasmissione digitale genera onde quadre, che hanno un'ampio spettro di frequenze.

Quindi, se si trasmette un segnale digitale sul local loop, a causa della banda ridotta si deve usare una bassissima velocità di trasmissione. Per evitare questo inconveniente, si usa un segnale sinusoidale (quindi analogico) nella banda fra 1 e 2 kHz, detto *portante*, che viene opportunamente modulato (variando nel tempo le sue caratteristiche) per trasmettere le informazioni.

Le principali tecniche di modulazione sono le seguenti:

- **modulazione di ampiezza**: si varia l'ampiezza;
- **modulazione di frequenza**: si varia la frequenza;
- **modulazione di fase**: si varia la fase (cioè il "ritardo" rispetto al segnale originale).

Il modem accetta in ingresso un segnale digitale e produce in uscita una portante analogica opportunamente modulata. Ora, poiché la banda passante (e quindi la velocità di

segnalazione) è limitata a 3 kHz, sappiamo che non si possono trasmettere più di 6 Kbps (per il teorema di Nyquist) se il segnale è a due valori. Per raggiungere velocità superiori si deve riuscire ad aumentare il numero dei possibili valori trasmessi. Ciò si ottiene usando in modo combinato le tecniche di modulazione sopra viste, con una tecnica che va sotto il nome di **Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**.

Ad esempio, modulando opportunamente sia ampiezza che fase si possono rappresentare 16 valori diversi, quindi si possono ottenere 4 bit per baud. Dunque, su una linea a 2.400 baud (tipici del local loop), si può trasmettere alla velocità di 9.600 bps.

I diagrammi che definiscono i punti corrispondenti a valori validi di modulazione del segnale da trasmettere si chiamano **constellation pattern**. I diagrammi sono a coordinate polari ampiezza-fase, ed in essi quali la distanza dall'origine rappresenta il valore di intensità della sinusoide, mentre l'angolo rispetto alla semiretta positiva dell'asse orizzontale rappresenta il valore della fase della sinusoide. Il caso sopra citato è definito nello standard **V.32**, emesso da ITU, il cui constellation pattern è visualizzato nella figura sottostante. E' un esempio di standard per il livello fisico.

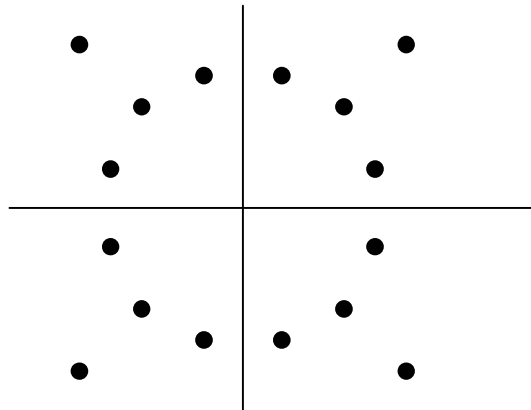


Figura 2-10: Constellation pattern per V.32

Un altro constellation pattern è definito nello standard **V.32 bis**, per velocità di 14.400 bps su linea a 2.400 baud. Esso utilizza 64 punti per trasmettere 6 bit per baud.

Infine, il **V.34** viaggia a 28.800 bps, quindi trasmette 12 bit per baud. Si deve notare che con questi due standard possono sorgere problemi se la linea telefonica è più rumorosa del normale (teorema di Shannon).

Un'ulteriore modo per aumentare le prestazioni è ricorrere a meccanismi di **compressione dei dati** prima di trasmetterli. In tal modo, a parità di velocità, si inviano più informazioni.

Due standard importanti per la compressione dei dati sono :

V.42 bis, emesso da ITU;

MNP 5, standard de facto (Microcom Network Protocol).

Infine, per consentire una trasmissione contemporanea nei due sensi (**full-duplex**), ci sono due tecniche :

- suddividere la banda in due sottobande, una per ogni direzione; così però si dimezza la velocità. Questa tecnica è tipica degli standard per le velocità più basse, ad esempio V.21 per 300 bps;
- cancellazione dell'eco: ogni modem sfrutta l'intera banda e cancella in ricezione gli effetti della propria trasmissione.

Altri esempi di protocollo per il livello fisico sono quelli che stabiliscono le caratteristiche dell'interfaccia fra elaboratori (**DTE, Data Terminal Equipment**) e modem (**DCE, Data Circuit-terminating Equipment**), in termini:

- meccanici;
- elettrici;
- funzionali;
- procedurali.

Ad esempio, lo standard **RS-232-C** ed il molto simile **V.24** del CCITT caratterizzano:

- specifiche meccaniche: connettore a 25 pin con tutte le dimensioni specificate;
- specifiche elettriche:
 - valore 1 corrisponde a un segnale minore di -3 Volt;
 - valore 0 corrisponde a un segnale maggiore di +4 Volt;
 - data rate fino a 20 Kbps, lunghezza fino a 20 metri;
- specifiche funzionali: quali circuiti (trasmit, receive, clear to send, ecc.) sono collegati a quali pin;
- specifiche procedurali: costituiscono il protocollo nel vero senso della parola, cioè le coppie azione/reazione fra DTE e DCE.

Vi sono molte attività di sperimentazione e tentativi di standardizzazione per superare il collo di bottiglia del local loop.

Tutte però richiedono :

- eliminazione del filtro a 3 kHz;
- local loop non troppo lunghi e con doppino di buona qualità (quindi, non tutti gli utenti potranno usufruirne).

Le principali proposte sono le seguenti:

- **cable modem** (velocità di 30 Mbps): si connette l'elaboratore al cavo coassiale fornito da un gestore di Cable TV. Il problema principale è che il cavo viene condiviso da molti utenti.
- **ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)**: velocità in ingresso fino a 15 Mbps, in uscita fino a 1,5 Mbps. Fornisce in casa un attacco ad alta velocità verso il sistema telefonico, ottenuto eliminando i filtri e usando più di un doppino. La banda non è condivisa con altri utenti.

2.3.3) ADSL

L'ADSL è attualmente la più diffusa tecnologia impiegata per fornire all'utenza domestica un accesso veloce ad Internet.

Esso si basa sul principio di sfruttare l'intera banda trasmissiva offerta dal local loop (che può essere più o meno ampia a seconda delle specifiche situazioni). La banda trasmissiva disponibile viene divisa in due parti:

- la banda da zero a 4kHz viene riservata alla telefonia tradizionale;
- la banda superiore viene riservata alla trasmissione dati.

In tal modo è possibile, su un unico doppino telefonico, offrire sia il servizio telefonico sia il servizio di trasmissione dati.

La trasmissione dati è gestita con tecniche simili a quelle viste per i modem. L'aumento di prestazioni deriva dal fatto che la banda disponibile, piuttosto ampia (tipicamente circa 1.1 MHz), viene divisa in numerose sottobande, ciascuna di 4kHz di ampiezza, che vengono utilizzate contemporaneamente. In ognuna delle sottobande si applica una opportuna QAM, la cui scelta dipende dal valore del rapporto segnale rumore presente di momento in momento in quella banda. Questa tecnica è conosciuta col nome di **DMT (Discrete Multitone)**.

Alcune delle sottobande vengono usate per l'invio di dati (**bande Upstream**), le altre per la ricezione dati (**bande Downstream**). Il numero della bande Downstream è di norma ben superiore al numero delle bande Upstream.

Il flusso totale dei bit che devono essere trasferiti viene ripartito e veicolato in parallelo su tutte le sottobande disponibili (Upstream o Downstream a seconda del verso della trasmissione).

La figura seguente illustra un esempio di standard per l'ADSL.

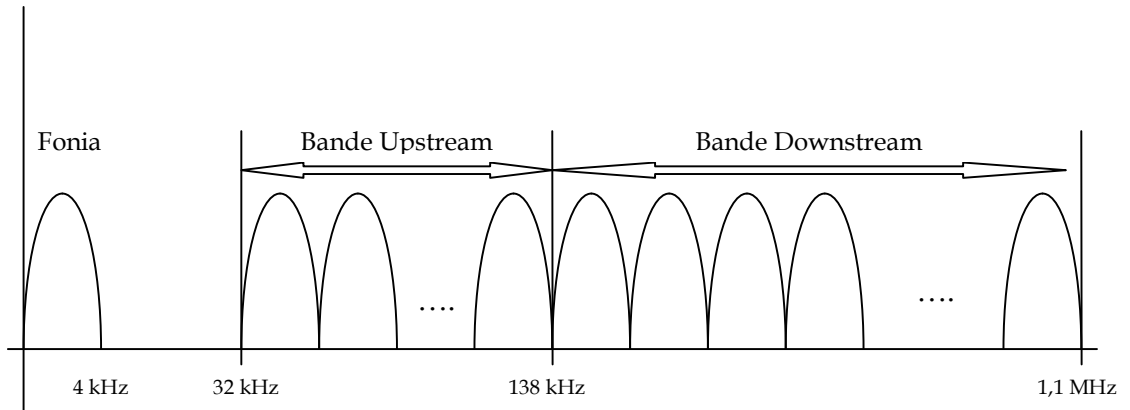


Figura 2-11: Ripartizione delle bande nell'ADSL

Valori tipici sono, ad esempio i seguenti:

- sottobande di 4 kHz ciascuna, nella banda da 32 kHz a circa 1,1 MHz, di cui:
- al più 25 bande Upstream nella banda 32 - 138 kHz;
- al più 249 bande Downstream nella banda da 138 kHz in su;
- QAM a 15 bit per campione entro ogni banda;
- 4000 campioni inviati al secondo.

Da ciò risultano i seguenti data rate massimi:

- Upstream: $25 * 15 * 4000$ bps = 1.500.000 bps (1,5 Mbps);
- Downstream: $249 * 15 * 4000$ bps = 14.900.000 bps (14,9 Mbps).

Due standard per l'ADSL sono stati approvati dall'ITU-T nel 1999:

- G.992.1, detto anche G-dmt: Downstream fino a 8 Mbps, Upstream fino a 640 kbps.
- G.992.2, detto anche G-lite: Downstream fino a 1,5 Mbps, Upstream fino a 512 kbps.

2.3.4) Trunk e multiplexing

Come abbiamo già visto, i *trunk* (cioè le connessioni fra una centrale e l'altra) sono realizzati con mezzi trasmissivi quali cavi coassiali, fibre ottiche, che offrono una banda passante molto ampia ed un bassissimo tasso d'errore.

Su essi devono poter essere convogliate contemporaneamente molte conversazioni indipendenti (e/o molte trasmissioni di dati).

C'è quindi la necessità di mettere in piedi un meccanismo di **multiplazione (multiplexing)**. Ci sono due schemi principali:

- **Frequency Division Multiplexing (FDM)**;
- **Time Division Multiplexing (TDM)**.

Frequency division multiplexing

Lo spettro di frequenza disponibile è suddiviso in varie bande più piccole, e ogni utente ha l'esclusivo uso di una di esse.

Ad esempio, più canali telefonici (ciascuno avente la banda di 3 kHz) vengono multiplati allocando a ciascuno di essi una banda di 4 kHz, per avere un margine di 500 Hz di sicurezza su ciascun lato della banda. Ogni canale telefonico viene innalzato in frequenza fino ad occupare la banda assegnatagli.

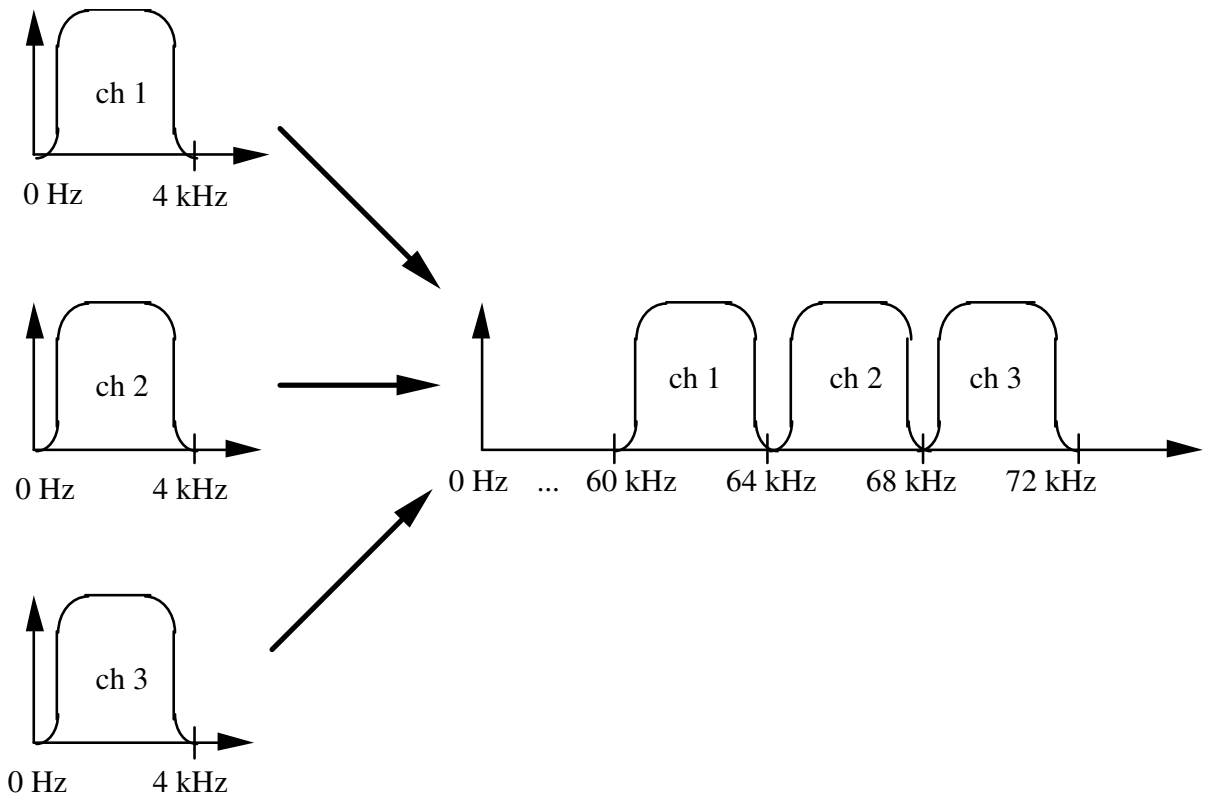


Figura 2-12: FDM

Uno standard CCITT prevede il multiplexing di 12 canali da 4 kHz nella banda 60-108 kHz. Ciò costituisce un **group**. Molte società telefoniche offrono un servizio di trasmissione dati, a velocità tra i 48 e i 56 Kbps, basato su un gruppo.

Cinque group (60 canali) formano un *supergroup*, cinque supergroup (300 canali) formano un *mastergroup*. Sono definiti gli standard fino a 230.000 canali.

Una variante di FDM per le fibre ottiche è il *Wavelength Division Multiplexing (WDM)*. Si lavora in base alle lunghezze d'onda, inversamente proporzionali alle frequenze. Concettualmente è analogo a FDM. Dal punto di vista realizzativo si varia la lunghezza d'onda del raggio luminoso. Ciò si fa con dei sintonizzatori ottici, basati sugli *interferometri Farby-Perot o Mach-Zehnder*.

Time division multiplexing

FDM è adatto alla gestione di segnali analogici e richiede circuiteria analogica. Di conseguenza è poco adatto alla gestione di dati digitali quali quelli prodotti dai computer.

TDM invece è ideale per la gestione di dati in forma digitale. L'idea è semplice: i bit provenienti da diverse connessioni vengono prelevati a turno da ciascuna di esse ed inviati su un'unica connessione ad alta velocità :

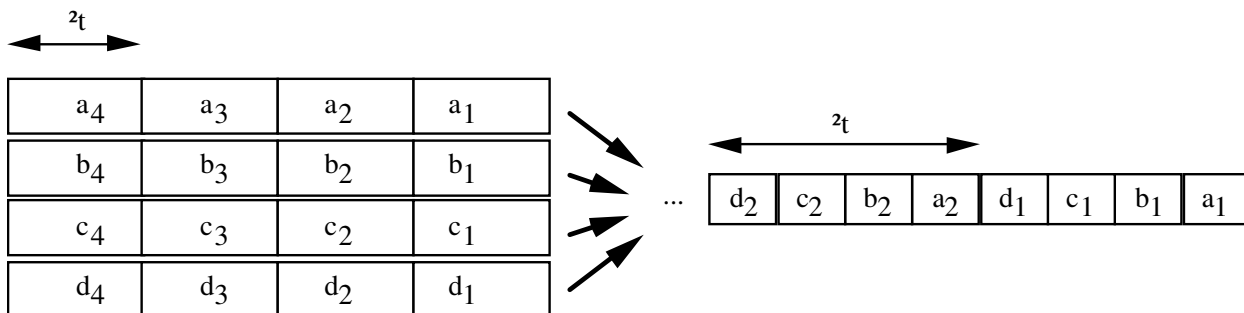


Figura 2-13: TDM

Poiché i local loop trasportano un segnale analogico, esso deve essere trasformato in digitale prima di essere combinato in TDM con gli altri. Questa operazione, come abbiamo già visto, viene fatta in centrale da un codec (coder-decoder). Esso effettua 8.000 campionamenti al secondo del segnale analogico (1 campione ogni 125 microsecondi: ciò è sufficiente, secondo il teorema di Nyquist, per un segnale caratterizzato da una banda di 4 kHz) e produce altrettanti valori a 7 bit (in USA) o 8 bit (in Europa).

Questa tecnica si chiama *PCM (Pulse Code Modulation)*, e forma il cuore di tutti i sistemi telefonici moderni. La conseguenza è che il ritmo di funzionamento di tutti i sistemi telefonici è basato su un intervallo di tempo fondamentale di 125 microsecondi.

Si noti che il segnale vocale digitalizzato richiede $8 * 8.000$ bps e cioè 64 Kpbs.

Non esiste uno standard internazionale per il TDM:

- in America ed in Giappone si è diffuso il **T1 Carrier**, costituito da 24 canali; ogni canale trasferisce 7 bit di dati (per la voce) e 1 bit di controllo ogni 125 microsecondi, per cui si hanno 56.000 bps di dati e 8.000 bps di controllo. Un **frame T1** consiste di 192 bit (più uno di framing) ogni 125 microsecondi, per cui T1 trasmette alla velocità di $193 * 8.000$ bps ossia di 1.544 Mbps;
- in Europa è invece diffuso **E1 Carrier** (conforme a raccomandazione CCITT), costituito da 32 canali con valori ad 8 bit (cioè $32 * 8 * 8.000$ bps ossia 2.048 Mbps), di cui 30 per i dati e 2 per il controllo.

Ovviamente TDM può essere riapplicato, per cui si hanno le seguenti gerarchie (dette **plesiocrone**, dal greco **πλεσιος** che significa vicino: non è detto che il clock di due flussi nominalmente uguali sia perfettamente identico).

| Carrier | Caratteristiche | Velocità |
|---------|-----------------|--------------|
| T2 | 4 canali T1 | 6.312 Mbps |
| T3 | 7 canali T2 | 44.736 Mbps |
| T4 | 6 canali T3 | 274.176 Mbps |
| E2 | 4 canali E1 | 8.848 Mbps |
| E3 | 4 canali E2 | 34.304 Mbps |
| E4 | 4 canali E3 | 139.264 Mbps |
| E5 | 4 canali E4 | 565.148 Mbps |

Tutto ciò comporta la necessità di costose apparecchiature di conversione ai confini fra un sistema e l'altro.

2.3.5) SONET/SDH

Per superare tali difficoltà, a metà degli anni '80 è stata introdotta dal CCITT la **gerarchia SDH (Synchronous Digital Hierarchy)**, unificata a livello mondiale. In USA si chiama **SONET (Synchronous Optical NETWORK)** ed ha una velocità (51.84 Mbps) non presente in SDH.

I suoi scopi principali sono:

- interoperabilità dei vari **Carrier** (le aziende telefoniche);
- unificazione dei sistemi in esercizio in USA, Europa e Giappone;
- capacità di trasportare frame T1 e superiori ed E1 e superiori.

ATM ha la velocità di 155 Mbps perché si pensa di trasportare le celle ATM su **OC-3**, l'analogo su fibra ottica di STS-3 o STM-1.

Il livello fisico di SONET è diviso in quattro sottolivelli:

- sottolivello **Photonic**: specifica caratteristiche della fibra e della luce da usare;
- sottolivello **Section**: si occupa del multiplexing/demultiplexing di flussi multipli; ha a che fare, ad esempio, sul come e quanti flussi combinare;
- sottolivello **Line**: si occupa di gestire un collegamento punto a punto in fibra ottica: genera un frame da una parte e lo elabora dall'altra;
- sottolivello **Path**: si occupa degli aspetti end to end della comunicazione.

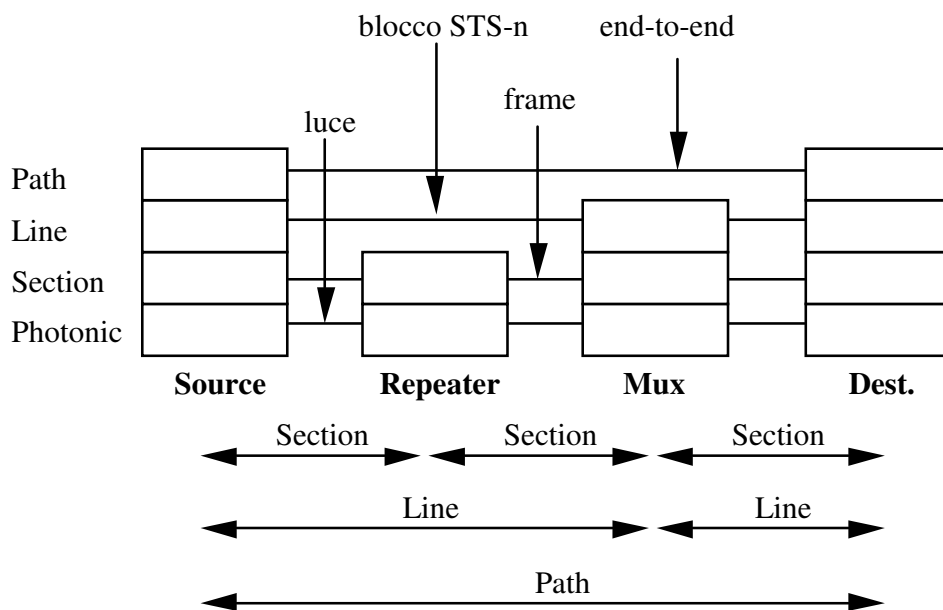


Figura 2-15: Livelli di SONET

2.3.6) Commutazione

Il sistema telefonico è **commutato**, cioè le linee in ingresso alla centrale telefonica vengono commutate, ossia vengono connesse di volta in volta a differenti linee in uscita sulla base delle richieste di connessione degli utenti.

Ci sono due tipi principali di commutazione:

- **Commutazione di circuito (circuit switching)**: Quando si effettua una telefonata, il sistema stabilisce una connessione fisica dedicata fra il chiamante ed il chiamato. Il traffico quindi fluisce su questa connessione. Naturalmente, la connessione in realtà è costituita in vari

modi, prima sul local loop e poi come successione di canali a 64K ricavati all'interno di flussi T1, o T3, o STS-M. In questo caso c'è un certo tempo che passa per il **connection setup** (anche alcuni secondi), dopo di che il segnale viaggia senza ulteriori ritardi. E' difficile che si presentino situazioni di congestione.

- **Commutazione di pacchetto (packet switching)**: Non si stabilisce alcuna connessione fisica fra sorgente e destinazione. I dati da inviare sono spezzettati in pacchetti, che vengono inviati indipendentemente gli uni dagli altri, possono percorrere strade diverse e vengono riordinati solo a destinazione. Fra i vantaggi: non si riserva banda in anticipo (che verrebbe poi sprecata in assenza di traffico) e non c'è il ritardo per il connection setup. Uno svantaggio risiede nel fatto che la congestione può insorgere in ogni momento.

Attualmente i sistemi telefonici, ottimizzati per la fonia, sono circuit-switched. Viceversa, le reti di elaborazione sono comunemente packet-switched, pur offrendo in generale anche servizi di tipo connesso.

2.3.7) Dispositivi di commutazione

Il tipo più semplice è il **crossbar**, dotato di n ingressi, n uscite ed n^2 punti di incrocio, realizzati ciascuno con un dispositivo a semiconduttori detto **switch** che ha due ingressi i_1 ed i_2 e due uscite u_1 ed u_2 . Il dispositivo può avere due stati:

- i_1 è connesso a u_1 e i_2 è connesso a u_2 ;
- i_1 è connesso a u_2 e i_2 è connesso a u_1 .

Un singolo switch commuta in pochi microsecondi e stabilisce una connessione elettrica diretta fra un ingresso ed una uscita. A seconda di come vengono pilotati gli switch, un crossbar è in grado di instradare contemporaneamente ogni linea in ingresso su una opportuna linea in uscita.

Uno svantaggio è che ci vogliono n^2 switch, ossia un numero considerevole. Per superare questo problema sono stati introdotti gli **switch multilivello (multistage switch)**, basati sul principio di utilizzare molti crossbar di piccole dimensioni (ad es. 2×2), organizzati in gruppi su più livelli successivi. Una possibilità è la **rete di Banyan**.

Tali dispositivi richiedono un numero minore di switch ($O(n \lg_2 n)$ nel caso della rete Banyan), ma purtroppo presentano lo svantaggio di essere esposti a conflitti nell'instradamento delle informazioni. Tali conflitti richiedono meccanismi di buffering, che aumentano il costo del dispositivo.

2.3.8) Servizi per trasmissione dati

Per varie ragioni, fra cui gli elevati costi di cablaggio e l'esistenza di leggi nazionali che regolamentano il settore delle telecomunicazioni, è attualmente impossibile per una organizzazione realizzare una rete geografica provvedendo in proprio alla stesura materiale dei cavi, ove questi debbano passare su suolo pubblico. Ci si deve invece rivolgere ad una società telefonica (in futuro anche ad altri, quali ad esempio Cable TV) per la realizzazione della subnet di comunicazione.

Esistono in proposito diverse possibilità, fra le quali:

- **affitto di linee dedicate**: si possono stipulare contratti per l'affitto di linee telefoniche dedicate (cioè perennemente attive e di esclusivo uso del cliente) che poi costituiscono i collegamenti fra i nodi della subnet. Tali linee possono avere velocità varie (tipicamente comprese fra 2.400 bps e 2 Mbps). L'azienda telefonica implementa tali linee riservando al cliente un circuito permanente di opportuna velocità, e (se necessario) stendendo cavi di alta qualità dalle centrali più vicine alle sedi utente, per superare i limiti già visti che affliggono il local loop. Questa soluzione è molto costosa: una linea a 2 Mbps costa diverse decine di milioni l'anno. L'utente, ricevute le linee dedicate, configura la rete geografica utilizzando l'architettura e le attrezzature di rete di suo gradimento.
- **affitto di servizi trasmissione dati**: una possibilità economicamente più vantaggiosa è quella di ricorrere ai servizi di trasmissione dati offerti (ormai da vari anni) da tutte le società telefoniche. L'idea è di realizzare le connessioni fra i nodi della propria subnet non più attraverso il ricorso a linee dedicate, ma "simulandole" attraverso l'affitto di tali servizi di trasmissione dati. I più importanti, per i quali esistono degli standard, sono:
 - **Frame Relay**;
 - **ISDN (Integrated Services Digital Network)**;
 - **SMDS (Switched Multimegabit Data Service)**;
 - **ATM (Asynchronous Transfer Mode)**.