



UNIVERSITÀ
DI PARMA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE ED INFORMATICHE
Corso di Laurea in Informatica

Il Livello Fisico

RETI DI CALCOLATORI - a.a. 2023/2024

Roberto Alfieri

Il livello Fisico: sommario

PARTE I

- ▶ Scopo dello strato Fisico
- ▶ Il canale di comunicazione
- ▶ I mezzi Trasmissivi
 - Trasmissioni su rame, il Doppino, il cablaggio strutturato
 - Trasmissioni su Fibra Ottica
 - Trasmissioni via Etere
- ▶ Le codifiche dei bit: banda base e banda passante

PARTE II

- ▶ Il sistema Telefonico, FDM, TDM, DSL, la telefonia mobile

RIFERIMENTI

- ▶ *Reti di Calcolatori*, A. Tanenbaum, ed. Pearson
- ▶ *Reti di calcolatori e Internet*, Forouzan , Ed. McGraw-Hill

Scopo del livello Fisico

Il **livello fisico** si occupa del trasferimento dei bit tra nodi che si affacciano allo stesso canale fisico (punto-punto o multi-accesso).



Il trasferimento avviene utilizzando un **mezzo trasmissivo** su cui i bit vengono **codificati** trasformandoli in una forma di energia (tipicamente segnali elettromagnetici come luce, tensione, onde e.m.). I nodi sono dotati di un **adattatore** che ha il compito di codificare i bit in energia e decodificare i bit in arrivo.



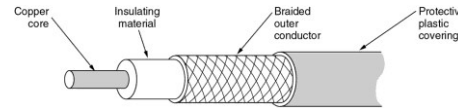
Mezzi trasmissivi

Esistono 3 categorie principali di mezzi fisici per la realizzazione di un canale:

1) Elettrico

Cavi coassiali di rame (MultiAccesso)

Doppini telefonici (Punto-Punto)



2) Ottico

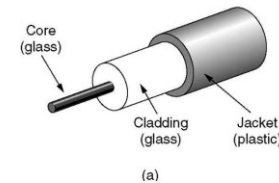
Fibre ottiche (canali Punto-Punto)

3) Wireless

Onde radio omnidirezionali (MultiAccesso)

Ponti radio (Punto-Punto)

Satelliti (punto-punto o MultiAccesso)



La scelta del mezzo dipende dalle caratteristiche del canale quali:

- l'attenuazione
- la sensibilità ai disturbi esterni
- la velocità di trasmissione
- il ritardo di propagazione (latenza)
- il costo e la maneggevolezza nell'impiego.

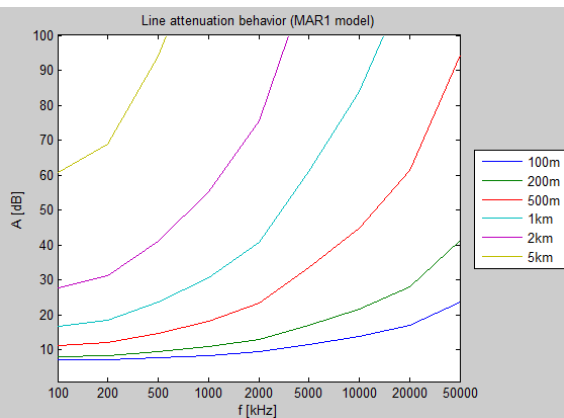
Banda passante

Per codificare un segnale sul mezzo trasmissivo si utilizza un intervallo di frequenze contenute in una banda che ha una determinata larghezza H , espressa in Hertz. Generalmente l'attenuazione dipende dalle frequenze utilizzate dal segnale inviato.

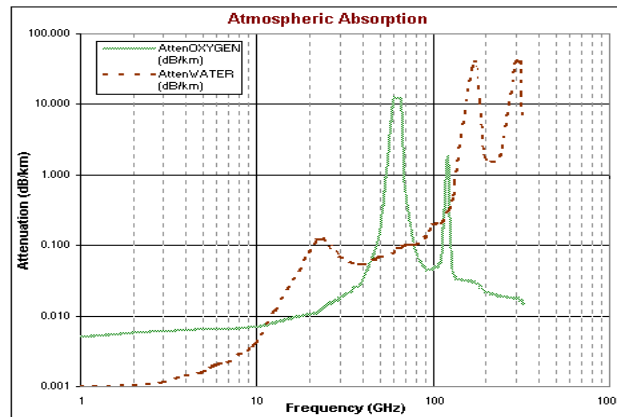
Per ogni mezzo trasmissivo è necessario individuare una banda di frequenze, detta **banda passante**, che verrà utilizzata per la codifica dei dati, in cui l'attenuazione è più contenuta e possibilmente costante.

La **banda passante** è determinata dalle caratteristiche fisiche del mezzo, ma può essere limitata in modo artificioso mediante opportuni “filtri passa banda”

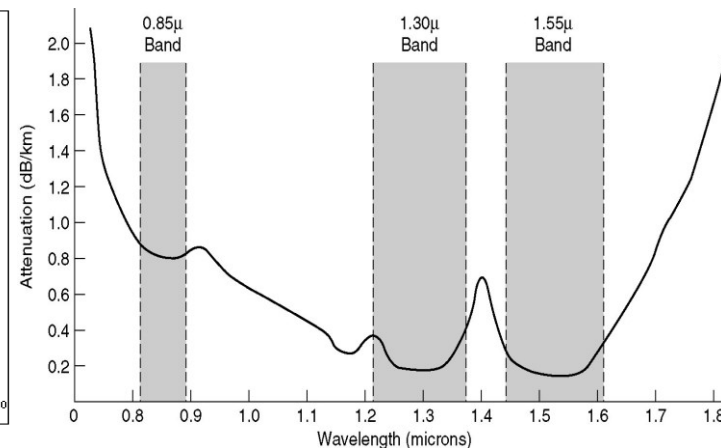
rame



etere



fibra ottica



Nota: Le onde vengono misurate in base alla loro frequenza f (Hz) o lunghezza λ (metri).

Le 2 grandezze sono legate dalla velocità di propagazione (v): $v = \lambda \cdot f$

Al esempio per gli infrarossi usati nelle fibre ottiche: $\lambda = 1\mu\text{m}$ $f = v/\lambda = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s} / 1 \mu\text{m} = 200\text{THz}$

Deterioramento del segnale

Attenuazione

Diminuzione del segnale sulla lunghezza del mezzo
Determina la massima distanza raggiungibile

Dovuto ad una perdita di energia

Si misura in Decibel (db) $= 10 \log_{10} P2/P1$ (P1=trasmittente, P2=ricevente)

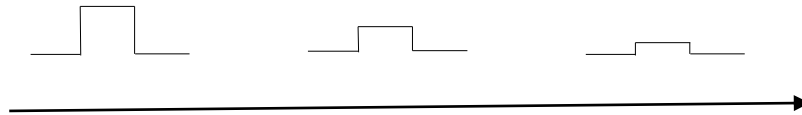
E.g: un **dimezzamento** della potenza del segnale corrisponde a

$$10 \log_{10} P2/P1 = 10 \log_{10} 0.5 = \mathbf{-3db}$$

E.g: Un **raddoppio** della potenza, dovuto ad amplificazione, corrisponde a

$$10 \log_{10} P2/P1 = 10 \log_{10} 2 = \mathbf{3db}$$

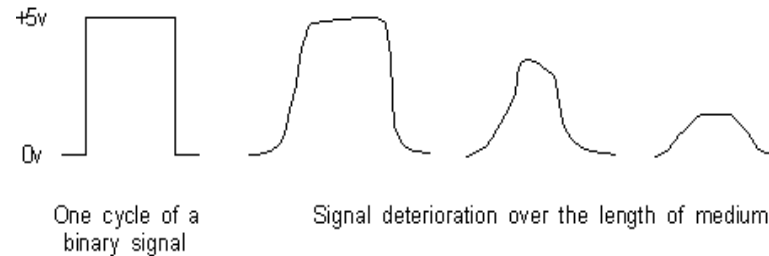
- Nei mezzi guidati è lineare con la distanza (esempio fibra ottica -0,24 db/Km)
- Nei mezzi omnidirezionali (etere) si aggiunge l'attenuazione isotropica



Deterioramento del segnale

Distorsione

Se la banda di frequenze utilizzata non ha valori costanti di attenuazione si aggiunge il fenomeno della distorsione del segnale, dovuto alla maggiore attenuazione di alcune frequenze (tipicamente le frequenze più alte).



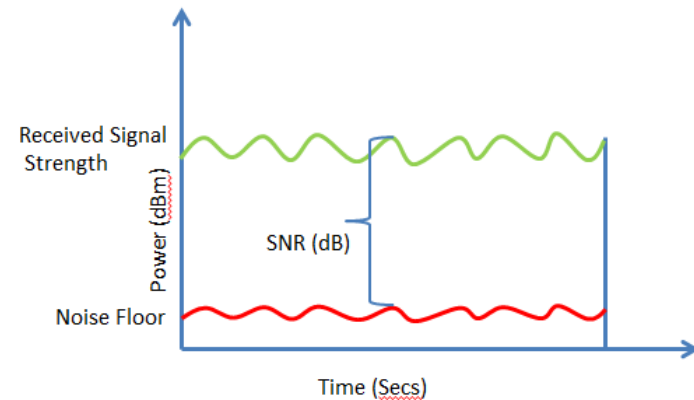
Deterioramento del segnale rumore e disturbo

Rumore: al Segnale (con potenza S) si sovrappone Rumore termico (con potenza N), sempre presente, dovuto al movimento delle molecole del mezzo.

Il rapporto segnale/rumore (Signal Noise Ratio - SNR) si misura in db ($10 \log_{10} S/N$)

Esempio ADSL:

- ▶ $< 5\text{db}$: la linea non si sincronizza ($S/N < 3$)
- ▶ $5\text{-}10\text{ db}$: linea scadente
- ▶ $10\text{-}15\text{ db}$: linea mediocre
- ▶ $15\text{-}22\text{ db}$: linea buona
- ▶ $23\text{-}38\text{ db}$: linea ottima
- ▶ $29\text{-}35\text{ db}$: linea eccellente



Disturbo: proveniente da elementi esterni

- ▶ Diafonia (crosstalk): quando il disturbo proviene da canali adiacenti

Velocità massima di trasmissione di un canale

La **Banda Passante** incide sulla velocità massima con cui possiamo spedire bit sul canale (**ampiezza di banda digitale B**, espressa in bit/sec)

La relazione tra Banda Passante analogica **H** e l'ampiezza di banda digitale **B** su di un canale ideale (privo di rumore) è stabilita da **Nyquist**:

$$B = 2H \log_2 V \text{ b/s}$$

V è il numero di simboli del segnale. Ad esempio, se usiamo la fibra ottica con una sorgente luminosa possiamo inviare due simboli: luce oppure buio (V=2)

Questa legge teorica ci porterebbe ad aumentare il numero di simboli per ottenere velocità virtualmente illimitate.

In presenza di rumore abbiamo però un tasso massimo fissato dal rapporto Segnale/Rumore e definito dal teorema di **Shannon**:

$$B = H \log_2 (1+S/N) \quad \text{indipendente dal numero di simboli del segnale}$$

E.g: in un canale con H=3KHz e un rapporto S/N di 30db (cioè 1000) abbiamo

$$B = 3K \log_2 (1001) = 30 \text{ Kb/s}$$

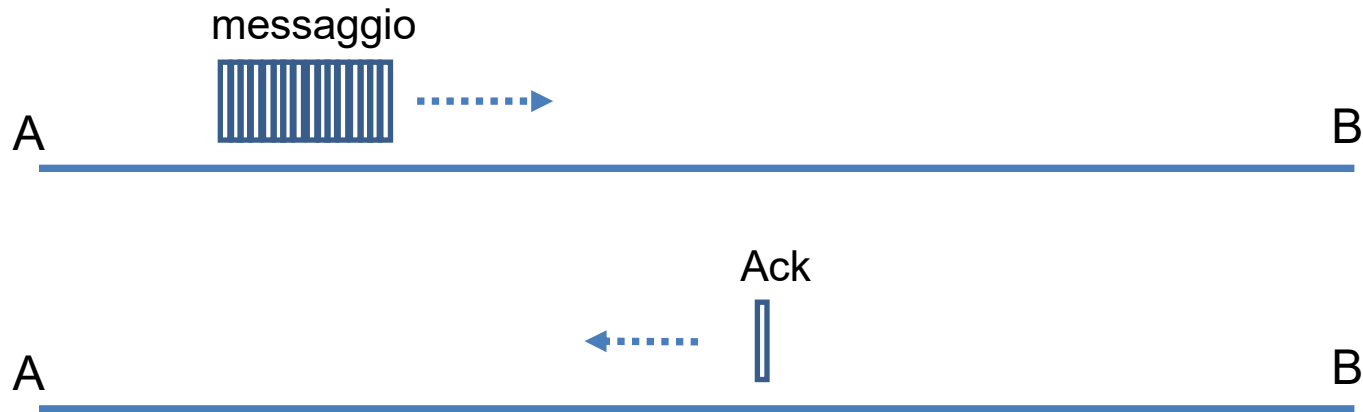
Uso di entrambi i teoremi: applichiamo Shannon per stabilire l'ampiezza di banda digitale **B**, quindi Nyquist per determinare il numero di simboli ottimale $V = 2^{(BitRate/2H)}$

Esempio precedente: $B = 2H \log_2 (V) = 30K \text{ bps}$ $V = 2^{(30K/6K)} = 2^5 = 32$

Tempo di consegna e RTT

Il **tempo di consegna** è il tempo necessario per trasferire **un messaggio** (sequenza di bit) dal mittente al destinatario.

Il **Round Trip Time (RTT)** è il tempo tra l'invio di un messaggio e la ricezione di un riscontro (ACK).



Questi tempi sono determinati dalla somma di diverse latenze introdotte dal mittente, da eventuali nodi di transito, dal mezzo trasmissivo e dal destinatario.

Tempi della comunicazione

I principali componenti che incidono su questi tempi sono:

- ▶ **Tempo di trasmissione:** tempo che impiega un messaggio ad uscire dall'interfaccia di rete. Dipende dal numero di bit e dalla velocità di trasmissione (b/s)

$$t = \text{numero di bit} / \text{velocità di trasmissione}$$

- ▶ **Tempo di propagazione:** tempo che impiega un bit a percorrere il mezzo

$t = l / v$ dove $l \rightarrow$ lunghezza del mezzo , $v \rightarrow$ velocità di propagazione nel mezzo

$v = c/n$ $c \rightarrow$ velocità della luce = 300000 Km/s (3×10^8 m/s)

n è l'indice di rifrazione del mezzo es: aria $n = 1,0003$, acqua $n = 1,33$, Fibra Ottica $n = 1,5$

La velocità di propagazione nell'**aria** è circa **3×10^8 m/s**

La velocità di propagazione nei mezzi guidati (**fibra ottica e rame**) è circa **2×10^8 m/s** (valore approssimato da utilizzare negli esercizi)



Tempi della comunicazione

Tempo di preparazione del mittente: tempo necessario al mittente per la preparazione del dato da spedire (ad esempio tempi di codifica e compressione).

- ▶ **Tempo di riempimento del pacchetto (real time streaming):** se abbiamo un flusso continuo di dati (esempio applicazioni multimediali real-time) i primi bit inseriti in un pacchetto devono attendere il completamento del pacchetto prima di essere inviati.

Tempo di attraversamento dei nodi di transito

- ▶ **Tempo di elaborazione** (o inoltro) è introdotto dal nodo di transito ed è dovuto al processamento software e/o hardware dei dati. Dipende dalle caratteristiche del nodo.
- ▶ **Tempo di attesa.** Se un nodo di transito utilizza delle code di trasmissione si introduce un tempo di attesa necessario per lo smaltimento della coda.
 - ▶ Il tempo dipende dal carico della rete ed è trascurabile se la rete è scarica.

Tempo di elaborazione del destinatario (esempio tempi per la decodifica e decompressione)

Misuriamo il bit sul mezzo trasmissivo

Lunghezza e tempo di trasmissione del bit (Ethernet su rame)

1 bit:

A 10Mb/s	$t = 1/10M = 10^{-7} \text{ s} = 100\text{ns}$	$l = 2 \times 10^8 \times 10^{-7} = 20 \text{ m}$
A 100Mb/s	$t = 1/100M = 10^{-8} \text{ s} = 10\text{ns}$	$l = 2 \times 10^8 \times 10^{-8} = 2 \text{ m}$
A 1Gb/s	$t = 1/1000M = 10^{-9} \text{ s} = 1\text{ns}$	$l = 2 \times 10^8 \times 10^{-9} = 20 \text{ cm}$



1KByte (8000 bit) :

A 10Mb/s	$t = 800\mu\text{s}$	$l = 20 \text{ m} \times 8000 = 16\text{Km}$
A 1Gb/s	$t = 8\mu\text{s}$	$l = 20 \text{ cm} \times 8000 = 160\text{m}$

Tempo di propagazione:

Cavo in rame di una rete locale (100m)	$t = 100 \text{ m} / 2 \times 10^8 \text{ m/s} = 0.5 \mu\text{s}$
Fibra Ottica Roma - NewYork (6.600Km)	$t = 6,6 \times 10^6 \text{ m} / 2 \times 10^8 \text{ m/s} = 33 \text{ ms}$
Satellite geostazionario ($h=35.800\text{Km} \times 2$)	$t = 71,6 \times 10^6 \text{ m} / 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 238 \text{ ms}$



Diagramma spazio-tempo

Il diagramma spazio-tempo ci consente di rappresentare graficamente i tempi coinvolti nella spedizione.

Esempio di trasmissione di un messaggio da 100 Byte a 1 Gb/s su cavo di rame di 100m. Consideriamo solo i tempi di trasmissione e di propagazione, e trascuriamo il tempo di trasmissione del riscontro (ACK).

Tempo di Trasmissione:

$$t_{\text{trasm}} = 800\text{b} / 1\text{Gb/s} = 0.8 \mu\text{s}$$

Tempo di Propagazione:

$$t_{\text{prop}} = 100 / 2 \times 10^8 \text{ s} = 0.5 \mu\text{s}$$

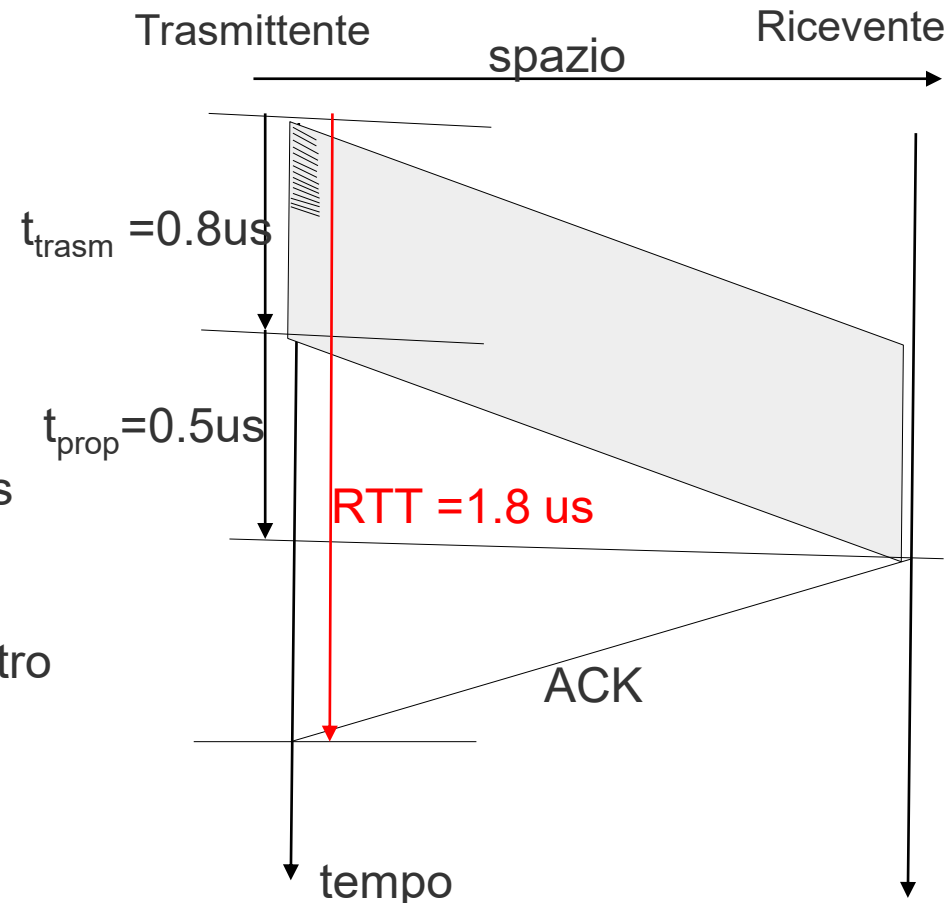
Tempo di consegna:

$$t_{\text{consegna}} = t_{\text{trasm}} + t_{\text{prop}} = 0.8 + 0.5 \mu\text{s} = 1.3 \mu\text{s}$$

Round-Trip Time (RTT):

E' il tempo di consegna + tempo del riscontro

$$\text{RTT} = t_{\text{consegna}} + t_{\text{prop}} = 1.8 \mu\text{s}$$

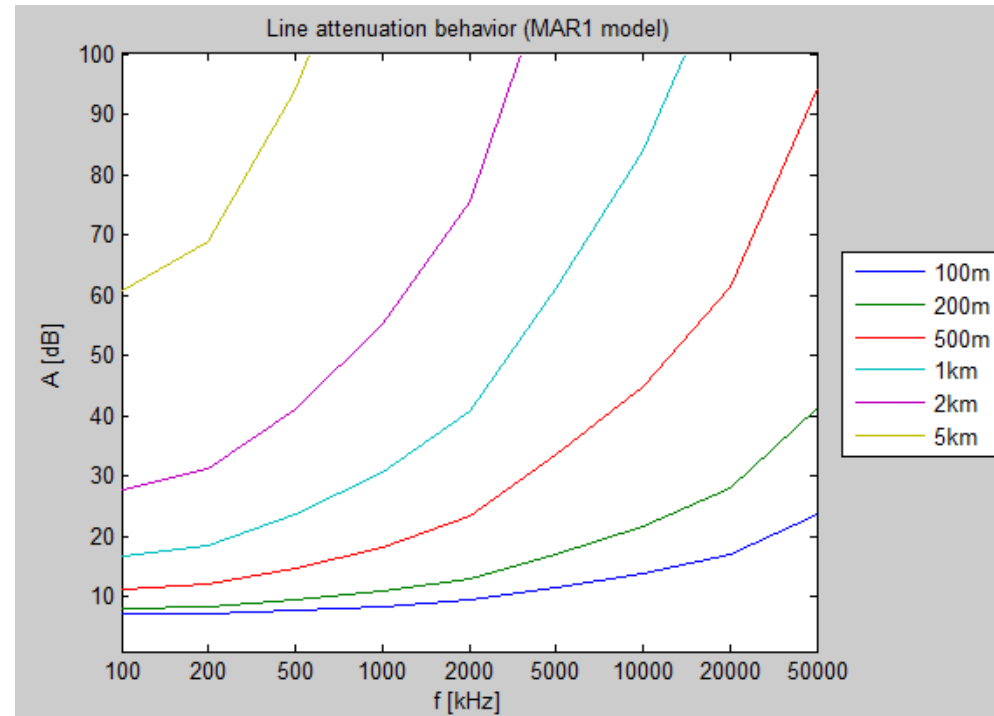


Cavo in rame

E' un mezzo trasmissivo a basso costo, ma l'attenuazione del segnale cresce rapidamente con la frequenza e con la distanza. Per questo motivo è largamente utilizzato nelle reti locali.

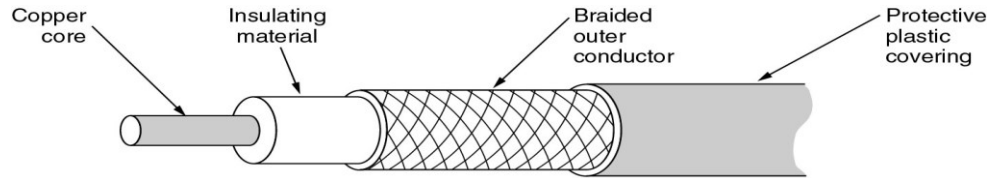
Esistono 2 principali tipi di cavi:

- ▶ Cavo coassiale
- ▶ Doppino



Cavo Coassiale (Coaxial Cable)

Due cavi di rame concentrici e separati da un materiale isolante. La parte esterna è realizzata con una calza di conduttori sottili.

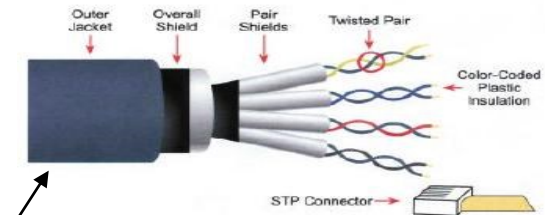


Il cavo coassiale denominato RG58 veniva utilizzato negli anni 80-90 come canale Multi-accesso e Bidirezionale (half duplex) per le reti locali. Attualmente poco utilizzato nell'ambito delle reti di calcolatori.

Doppino (Twisted Pair)

Coppia di fili di rame avvolti non schermati (UTP - Unshielded Twisted Pair).

Viene realizzato con diversi standard qualitativi a seconda del tipo di utilizzo:



Categoria 1: per telefonia analogica (in disuso)

Categoria 2: Telefonia digitale a bassa velocità (in disuso)

Categoria 3: Banda 16MHz. Utilizzato per Telefonia digitale (attualmente in uso)

Categoria 4: Banda 20MHz (scarsamente utilizzato)

Categoria 5: Banda 100MHz

Categoria 6: Banda a 250MHz

Categoria 6a: Banda a 500MHz

attualmente in uso per le reti locali con cavi composti da 4 coppie e connettori RJ45

Categoria 7: Banda a 600MHz - STP - (Shielded Twisted Pair), 4 coppie schermate singolarmente

Attenuazione: Max 100-200 metri

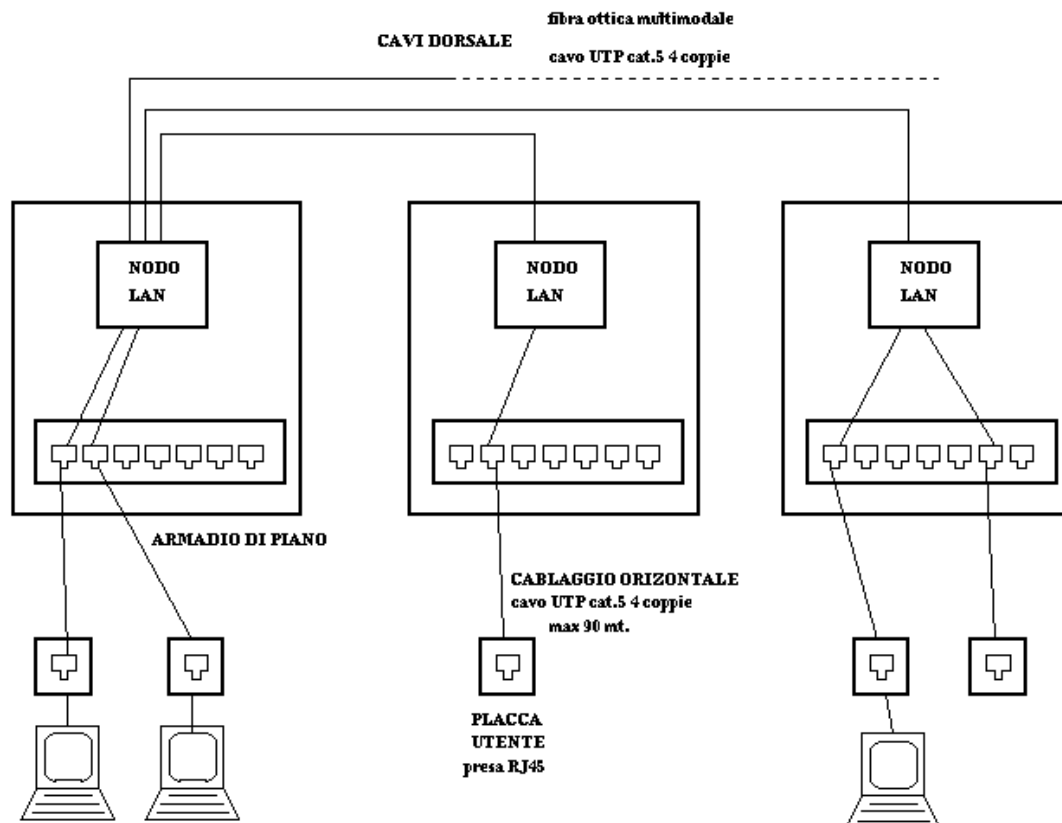
Caratteristiche: Banda passante fino a 500MHz → Max 10Gb/s (10GbaseT)

Cablaggio strutturato

La distribuzione capillare in edificio del cablaggio per la telefonia e per i dati fa oramai parte dell'infrastruttura di un edificio.

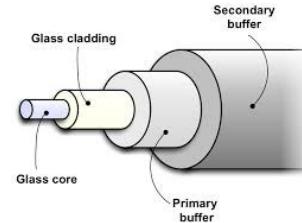
Il cablaggio strutturato vuole essere una soluzione architeturale flessibile per fonia e dati: entrambi i sistemi possono avere una topologia ad albero con cablaggio terminale in doppino telefonico almeno di **categoria 5** (cablaggio orizzontale).

Si usa fibra ottica multimodale per connettere gli armadi di piano (cablaggio verticale)



Fibra Ottica

Fibre di vetro che trasportano impulsi di luce su fibre flessibili del diametro di qualche decina di micron (1 micron = 10^{-6}m)



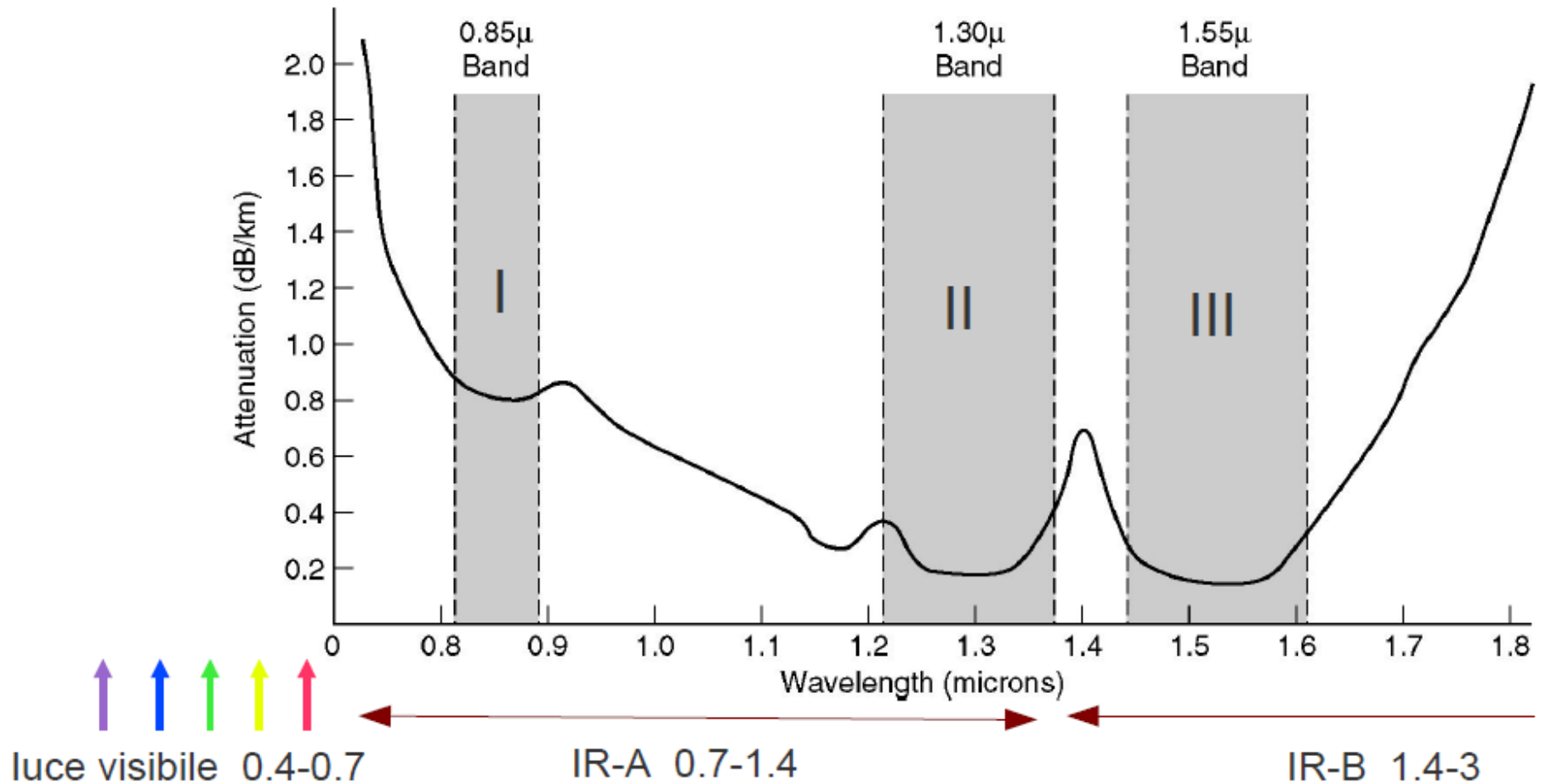
Caratteristiche:

- ▶ 3 componenti: sorgente luminosa, mezzo di trasmissione, rilevatore.
- ▶ Modulazione
 - OOK (On Off Keying) : un impulso di luce indica il valore 1, l'assenza indica il valore 0.
 - SCM (SubCarrier Modulation): modulazione di una portante (AM, FM, ..)
- ▶ Ottimo rapporto Segnale/Rumore (60 – 65 dB).
- ▶ Elevata banda trasmissiva (25000-30000 GHz, fino a 50 Tbps !)
- ▶ Bassa attenuazione
 - 1 - 3 dB/Km per F.O. multimodali
 - 0.4 - 0.2 dB/Km per F.O. monomodali (ovvero meno del 5% per Km)
- ▶ E' immune da disturbi e.m.
- ▶ Sicurezza (difficile inserirsi in una comunicazione)
- ▶ Minor dimensione e peso rispetto al rame
- ▶ Maggior costo di installazione, connettorizzazione e dei dispositivi attivi.

Trasmissione Ottica

Bande (I II e III) comprese tra 250THz e 300 THz (InfraRosso, 0.8-1.6 μ s)

Ricerche in corso per contenere la dispersione cromatica (attenuazione cambia con la lunghezza d'onda)



Fibre Monomodali e Multimodali

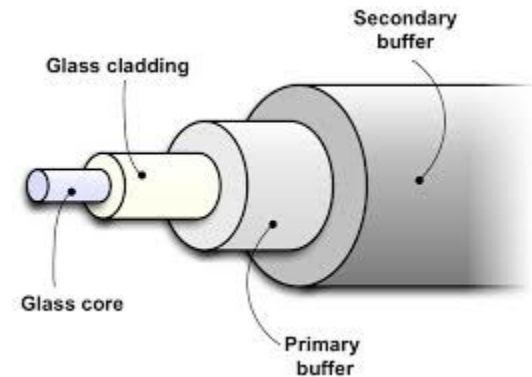
Esistono 2 tipi di fibre:

Fibre Multimodali

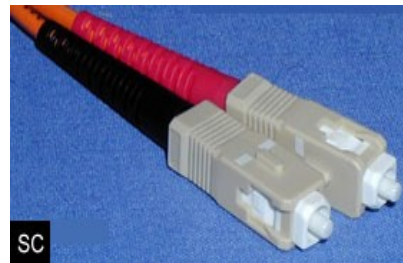
- I raggi colpiscono le pareti con diversi angoli (mode)
- 50/125 (core 50 micron/cladding 125 micron) e 62.5/125
- Luce generata con LED
- Finestra di utilizzo I e II

Fibre Monomodali

- Percorso rettilineo , senza rimbalzi
- 10/125 (core 10 micron/cladding 125 micron)
- Luce generata con un fascio Laser
- Finestra di utilizzo II e III
- Maggiore costo, Minore attenuazione (possono trasmettere dati a 50Gbps per 100Km).



I connettori piu' utilizzati sono LC, SC e ST:



International Undersea Fiber Systems

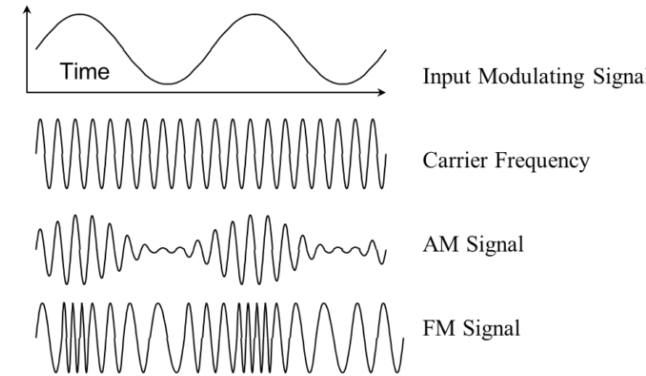
Alcatel-Lucent 

Optical fibre submarine network

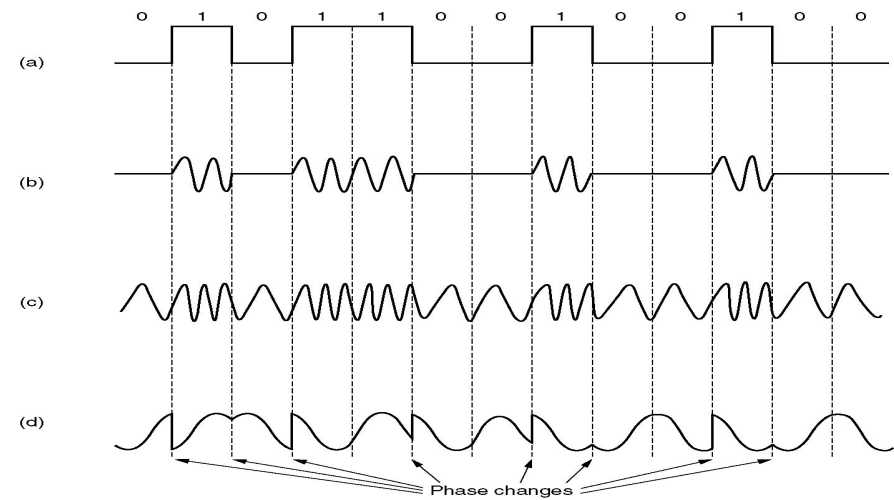


Onde Elettromagnetiche

Le onde e.m. possono essere utilizzate per trasmettere informazioni senza l'utilizzo di un mezzo fisico guidato. La trasmissione dei dati avviene modulando una frequenza portante (carrier), come avviene per le trasmissioni radio AM o FM (Modulazione di Ampiezza o di Frequenza)



Per trasmissione dati (a) viene modulata l'ampiezza (b), la frequenza (c) o la fase (d) delle onde di una portante, ma codificando valori discreti.



The Electromagnetic Spectrum

Onde Radio (10^4 - 10^9 Hz) : sono facili da generare, possono viaggiare per lunghe distanze e attraversano facilmente gli edifici. Il limite è la ridotta ampiezza di banda. Le Onde Radio (LF, MF e HF) seguono il terreno, VHF e UHF viaggiano in linea retta e rimbalzano contro gli ostacoli.

Microonde (10^9 - 10^{11} Hz - $\lambda \div 30\text{cm}$ - 1mm) Viaggiano in linea retta e faticano ad attraversare gli edifici.

Infrarossi (10^{11} - $4 \cdot 10^{14}$ Hz - $\lambda \div 1\mu\text{m}$) : Non attraversa gli ostacoli solidi. Sono utilizzati per periferiche a breve distanza (telecomandi) e per gli impulsi nelle fibre ottiche (near infrared).

Luce visibile ($4 \cdot 10^{14}$ - $8 \cdot 10^{14}$ Hz $\lambda \div 0.5\mu\text{m}$)

La luce Ultravioletta, i raggi X e i raggi Gamma ($> 8 \cdot 10^{14}$ Hz): funzionerebbero anche meglio, ma sono difficili da generare, da modulare, non si propagano bene attraverso i muri e sono dannose.

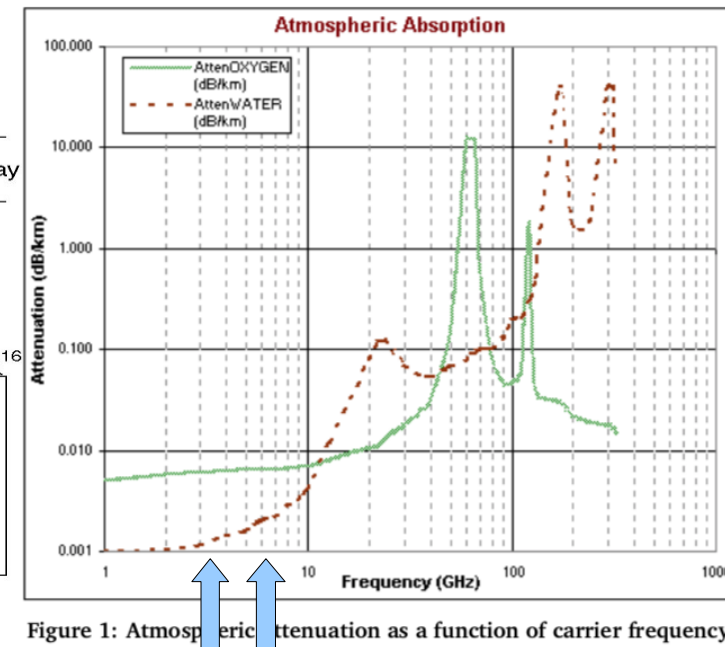
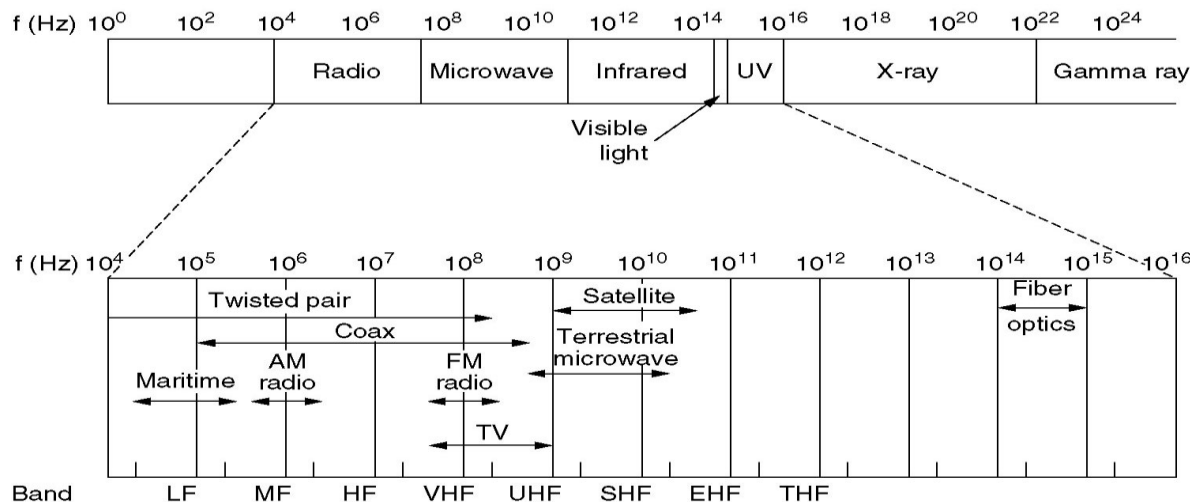


Figure 1: Atmospheric attenuation as a function of carrier frequency.

Utilizzo dello spettro e.m.

Al crescere della frequenza aumenta l'ampiezza del canale, ma peggiora l'interazione con l'ambiente.

A tutte le frequenze le onde sono soggette a disturbi (motori ed altri dispositivi elettrici) e ad interferenze con altre trasmissioni dati via etere. Per questo motivo i governi regolano e limitano l'utilizzo delle trasmissioni via radio mediante opportune licenze.

Molti governi hanno mantenuto libere alcune bande di frequenza, note come bande **ISM** (Industriale Scientifica Medica), che possono essere utilizzate da chiunque, senza licenza, a patto di rispettare **limiti di potenza** per limitarne le interferenze.

Principali apparati che utilizzano le Bande ISM:

- Telefoni CordLess, Forni a Microonde, Radiocomandi per cancelli automatici, LAN Wireless e Bluetooth.

Le bande ISM definite a livello mondiale sono:

902-928 MHz – 2.4-2.4835 Ghz – 5.725-5.875 GHz

http://it.wikipedia.org/wiki/Banda_ISM

Principali utilizzi per Trasmissione Dati

Ponti Radio

Connessioni punto-punto **terrestri** (decine di Km) e **satellitari** (migliaia di Km). I ponti radio utilizzano per le trasmissioni frequenze nel campo dei GHz (Microonde da 2.5 GHz a 23GHz) e quindi lunghezze d'onda dell'ordine del centimetro, per cui le antenne impiegate sono necessariamente del tipo parabolico. Viene utilizzata una larghezza di banda che può arrivare fino a qualche GHz.

Reti Locali

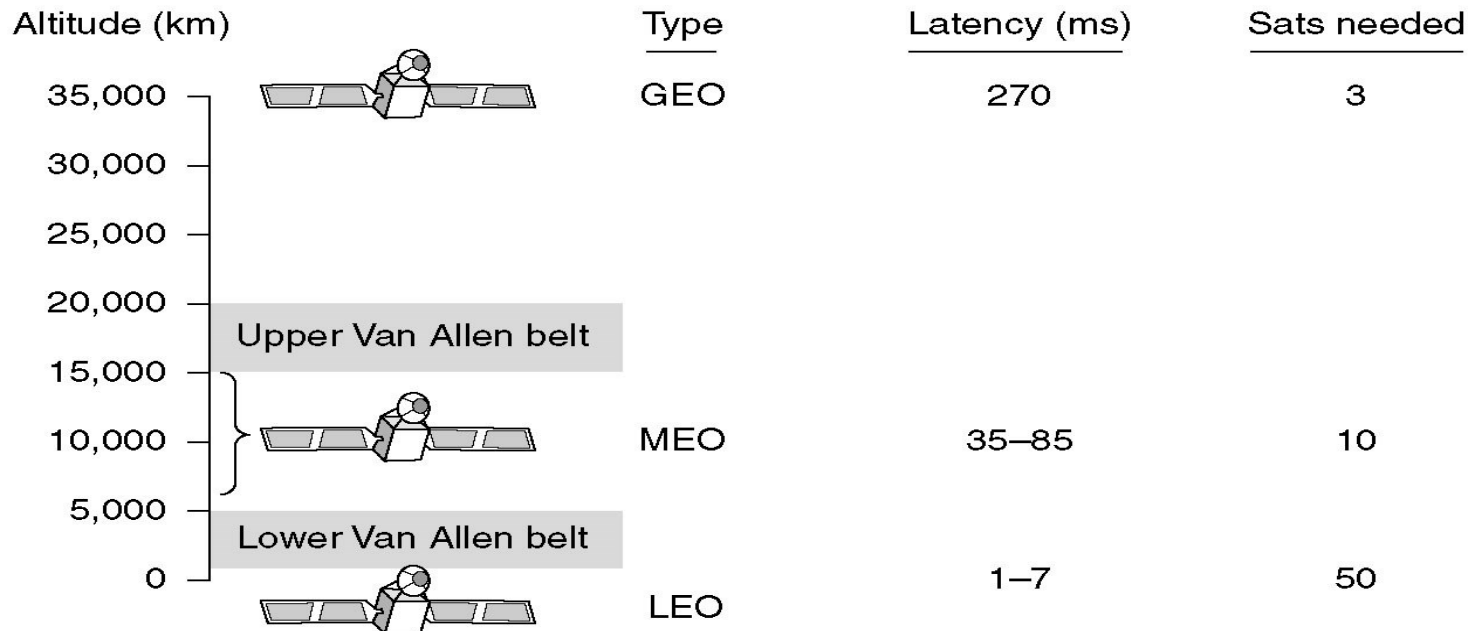
Connessioni omnidirezionali utilizzata all'interno degli edifici per realizzare reti multiaccesso. Si utilizzano microonde lunghe (2-5 GHz) per minimizzare i problemi di attraversamento delle pareti. L'ampiezza del canale può arrivare fino a 50 Mb/s in un raggio di **100-200 mt** (WiFi) o **qualche Km** (WiMax).

Comunicazioni Satellitari

Nel 1962 il satellite **TELSTAR** realizzò per la prima volta una trasmissione satellitare (segnale televisivo tra US e Francia). Il satellite aveva un'orbita di 2 ore e 37 minuti, con una copertura di 20 minuti per passaggio.

Il periodo dell'orbita di un satellite dipende dalla sua altezza. Ad una altezza di 35800 Km il periodo è di 24 ore per cui il satellite è **geostazionario**. Con soli 3 satelliti geostazionari è possibile realizzare una copertura totale della terra. La latenza (andata e ritorno) è di $t = \text{distanza}/\text{velocità} = 71600 \text{ Km}/3 \times 10^8 = 270 \text{ mS}$

Il tempo di latenza può essere ridotto utilizzando orbite più basse, richiedendo però un elevato numero di satelliti per una copertura globale.



Progetti Satellitari

Reti satellitari :

TV analogica e digitale

- ▶ Diversi satelliti GEO

Posizionamento Terrestre (GPS)

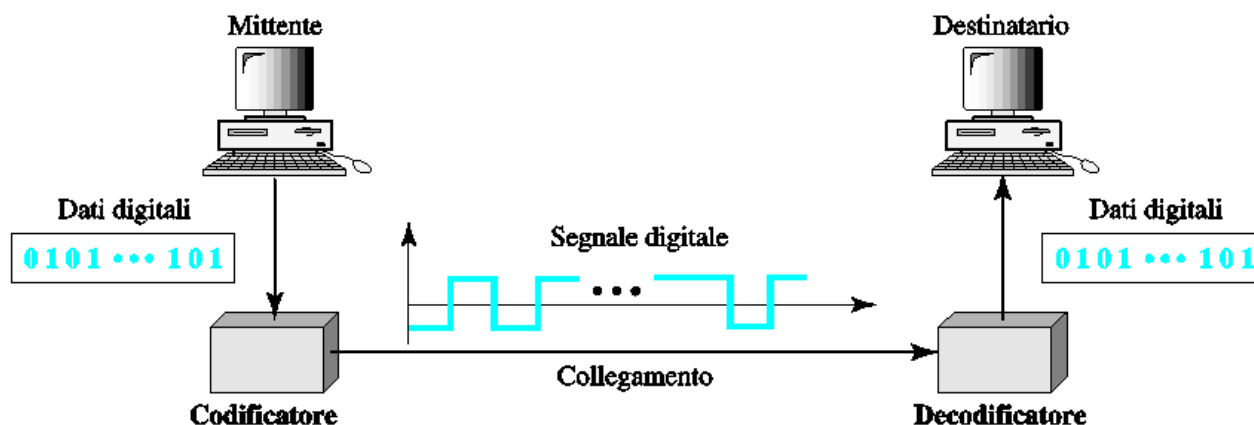
- ▶ 24 Satelliti MEO

Voce e Dati

- ▶ [Iridium](#) : 72 satelliti LEO, voce in tutto il pianeta
- ▶ [Globalstar](#) : 52 satelliti LEO, voce e dati in 120 paesi
- ▶ [Starlink](#) : 240 satelliti LEO nel 2020
- ▶ [Inmarsat](#) : 3 satelliti GEO , 50Mb/s
- ▶ [Tooway](#) : 2 satelliti GEO (Solo Europa) 22Mb/s

Modulazione digitale

La modulazione digitale è il processo di conversione dei dati digitali in segnali digitali che possono essere voltaggi, intensità di luce, o segnali elettromagnetici, secondo le caratteristiche della linea di comunicazione usata per il collegamento.



Il processo che assegna un segnale digitale a una sequenza di uno o più bit è detto codifica.

Codifiche dei bit

Principali tecniche di trasmissione:

Trasmissione in banda base

- Segnale modulato lasciando inalterata la frequenza

Trasmissione in banda passante

- Modulazione di una frequenza Portante

Il trasferimento dei bit avviene codificando sul canale due o più stati (simboli)

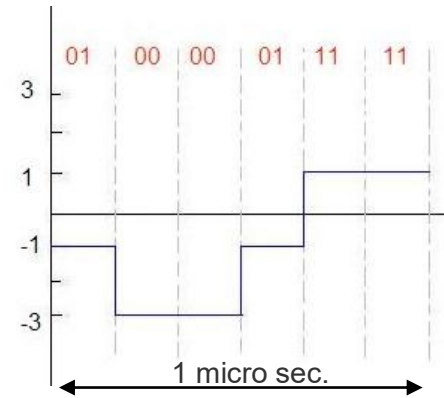
Il numero di simboli trasmessi in un secondo è detto **Baud-rate**.

Nell'esempio di figura (codifica con 4 simboli -3,-1,1,3)

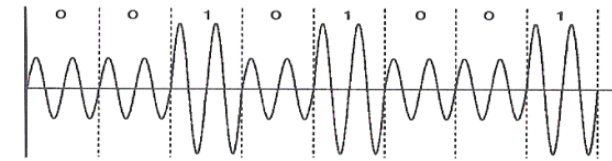
Baud-rate=6 Mbaud/s - Bit-rate=12 Mbit/s

Le onde quadre si deformano rapidamente al crescere della distanza (distorsione), per cui le trasmissioni in Banda base sono adatte prevalentemente per Reti Locali.

Per lunghe distanze si utilizza la modulazione di un'onda sinusoidale, detta **portante**



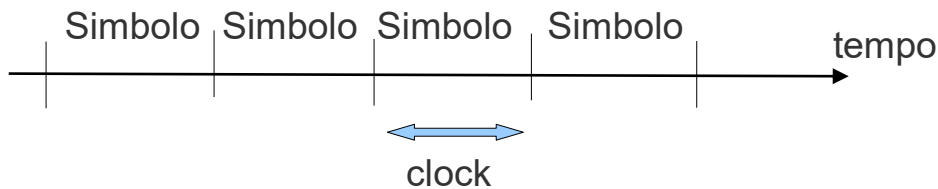
Modulazione in banda base



Modulazione (ampiezza) in banda passante

La trasmissione dei dati

La comunicazione nelle reti è generalmente seriale: si utilizza un solo canale (o eventualmente due per realizzare una connessione duplex con due canali simplex). I simboli vengono codificati all'interno di intervalli di tempo costante (**Clock**) che rappresentano il sincronismo condiviso tra trasmettitore e ricevitore.



Modalità Asincrona:

- ogni gruppo di bit è inviato in modo asincrono (è possibile l'assenza di segnale tra un gruppo e il successivo); ogni gruppo è preceduto da una sequenza di bit aggiuntivi che consentono al destinatario di ricostruire il sincronismo.

Questa è la modalità utilizzata nelle reti calcolatori.

Modalità Sincrona:

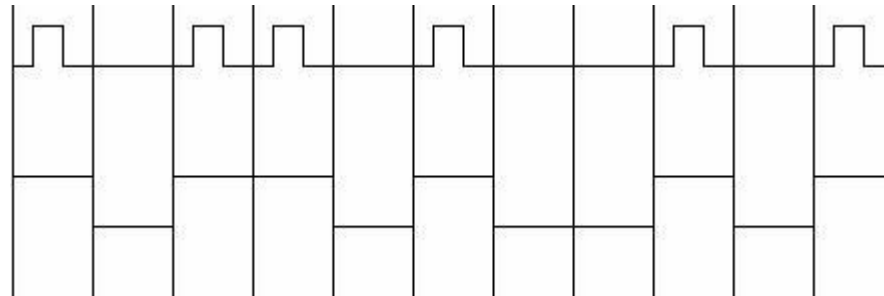
- Non sono previsti bit di sincronismo. Il segnale di Clock viene inviato parallelamente al canale dei dati, oppure il flusso non viene mai interrotto per non perdere il sincronismo.
- Generalmente questo è possibile solo per connessioni a breve distanza e alta velocità.

Schemi di codifica di linea: RZ e NRZ

Sequenza binaria

1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1

Return to Zero (RZ)



Non Return to Zero (NRZ)

NRZ non richiede circuiti complicati: i dati sono passati direttamente in uscita. E' robusto agli errori ma lunghe stringhe di zeri o uni potrebbero causare perdita di sincronismo.

RZ è più soggetto ad errori, ma non perde il sincronismo perché lo stato cambia ad ogni bit.

RZ e NRZ sono utilizzate nella PCM (trasmissione telefonica digitale).

Schemi di codifica di linea: NRZ-I e Manchester

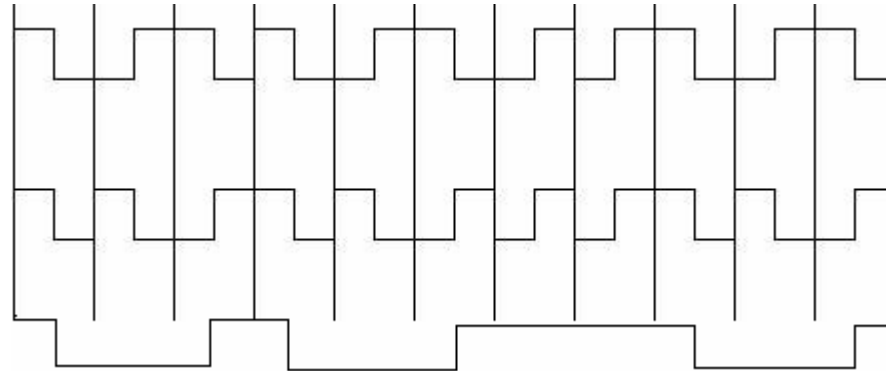
Sequenza binaria

1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1

Manchester

Manchester differenziale

NRZ-I



NRZ-I cambia il simbolo di codifica in corrispondenza del bit 1, altrimenti rimane invariato.

La codifica **Manchester**, codificando i bit con le transizioni, è invece ideale per la gestione del sincronismo e per questo è utilizzata nel protocollo **Ethernet 10baseT**. Da notare che la codifica Manchester invia segnali ad una frequenza doppia.

Manchester differenziale combina la codifica Manchester (transizioni) e con NRZ-I (1 cambia il simbolo di codifica, 0 lo mantiene invariato).

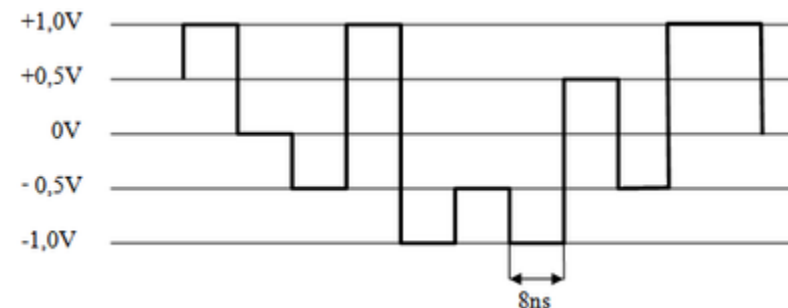
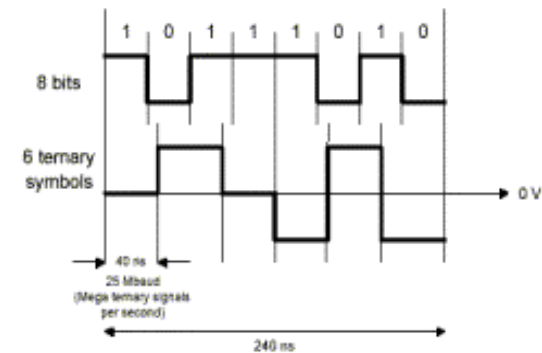
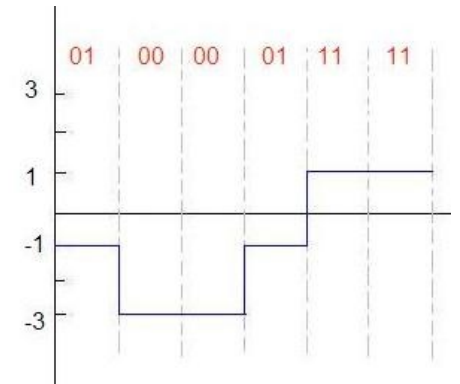
Codifiche di linea multi-livello

Se il canale ha un buon rapporto Segnale/Rumore, è possibile aumentare la velocità dei dati utilizzando schemi multi-livello. Alcuni esempi in uso:

2B1Q: utilizza 4 livelli di tensione per codificare 2 bit.
E' utilizzato da ISDN e alcune varianti di HDSL.

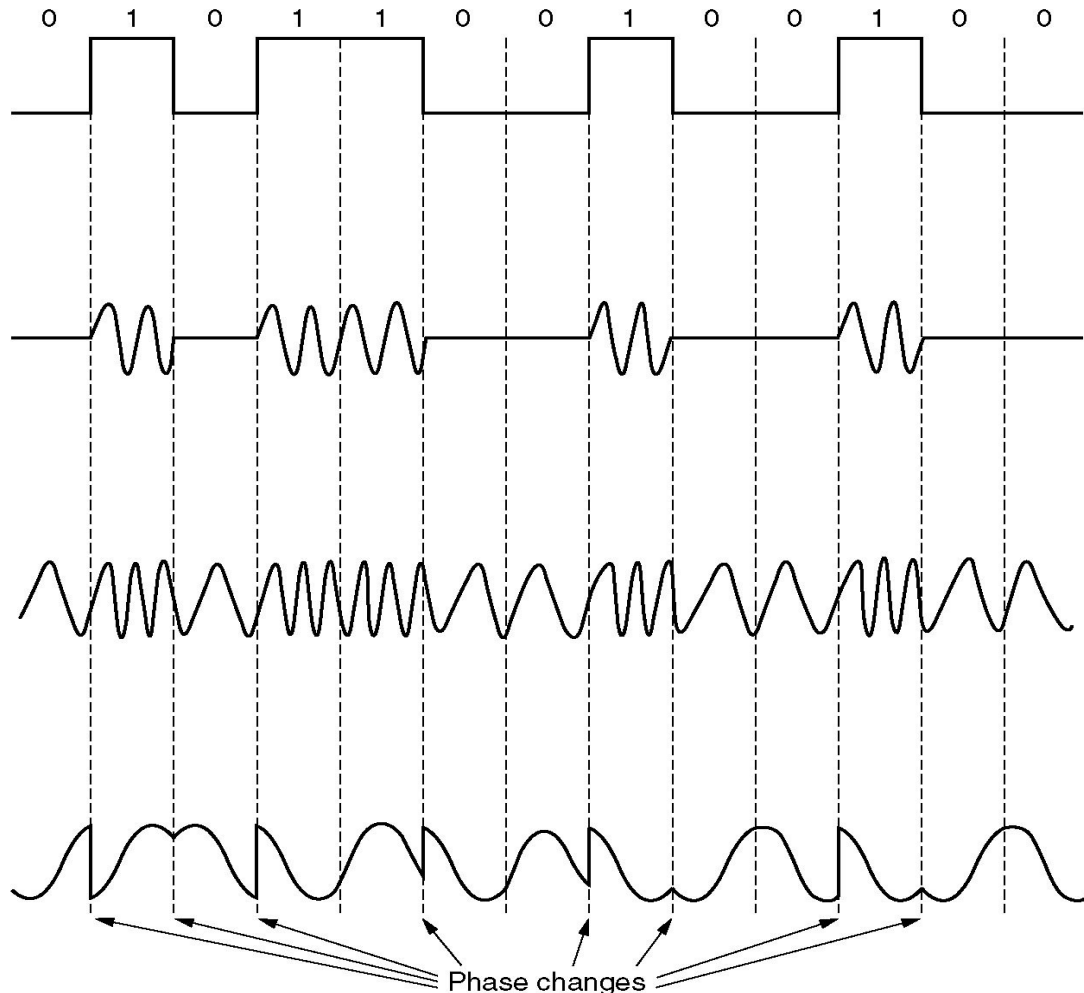
8B6T: sequenze di 8 bit sono codificate con
sequenze di 6 simboli a 3 stati.
Utilizzato in 100baseT4

PAM5: utilizza 5 livelli di tensione
(0V serve per rilevare errori)
GigaBit Ethernet 1000baseT utilizza le 4 coppie
del cavo UTP cat.5 e invia 125Mbaud (250Mbps)
su ogni coppia



Modulazione di una frequenza portante

La codifica delle onde elettromagnetiche avviene **modulando** l'ampiezza, la frequenza o la fase (o una combinazione di questi metodi) di un'onda portante.



NRZ

[Modulazione di Ampiezza](#)

Esempio di utilizzo: fibre ottiche

[Modulazione di Frequenza](#)

[Modulazione di fase](#)

Diagrammi a costellazione

La modulazione combinata di ampiezza e fase è detta QAM (Quadrature Amplitude Modulation) . E' la più efficiente e più usata.

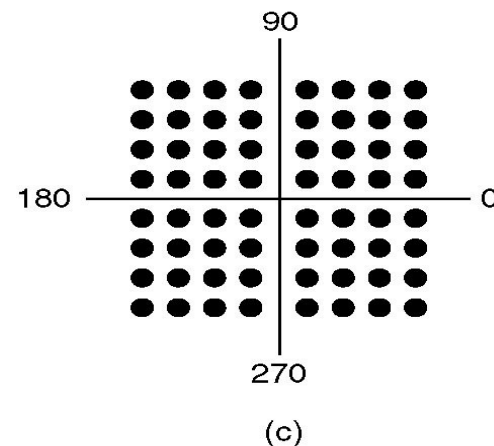
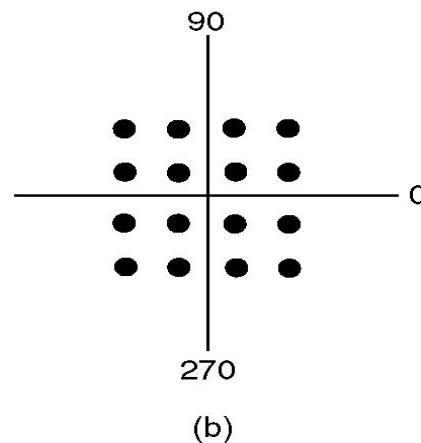
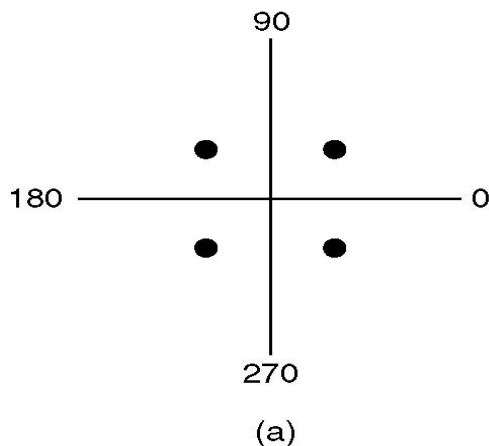
Ogni simbolo è determinato da una coppia fase-ampiezza e viene rappresentato da un punto nel diagramma delle fasi. L'insieme dei punti formano una “costellazione”.

L'esempio sottostante riporta le costellazioni utilizzate nelle reti WiMAX:

(a) QPSK: modulazione di fase a 4 stati. (2 bit per ogni baud)

(b) QAM16: modulazione di ampiezza e fase a 16 stati (4 bit per ogni baud)

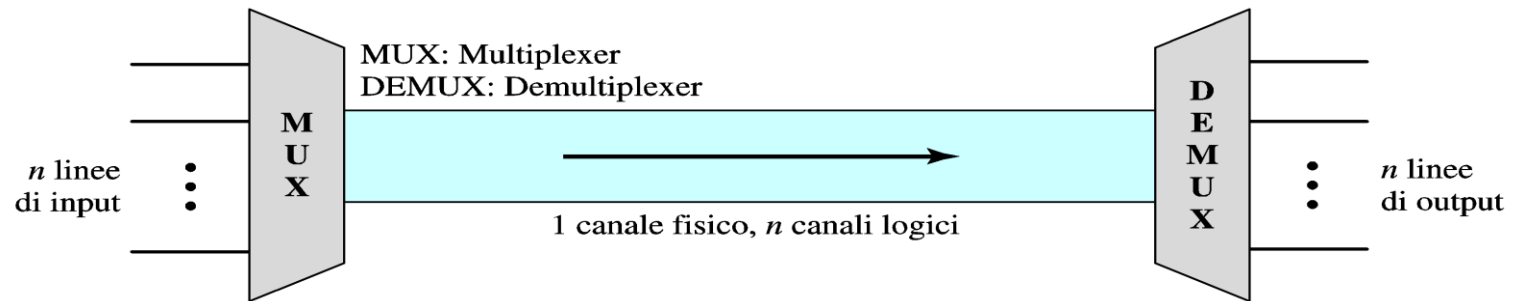
(c) QAM64: modulazione di ampiezza e fase a 64 stati (6 bit per ogni baud)



Multiplexing

Quando la larghezza di banda del canale trasmissivo è maggiore della larghezza di banda effettivamente necessaria, il canale può essere condiviso da più trasmissioni simultanee.

Il Multiplexing è la tecnica che permette la trasmissione simultanea di più segnali in un singolo canale.



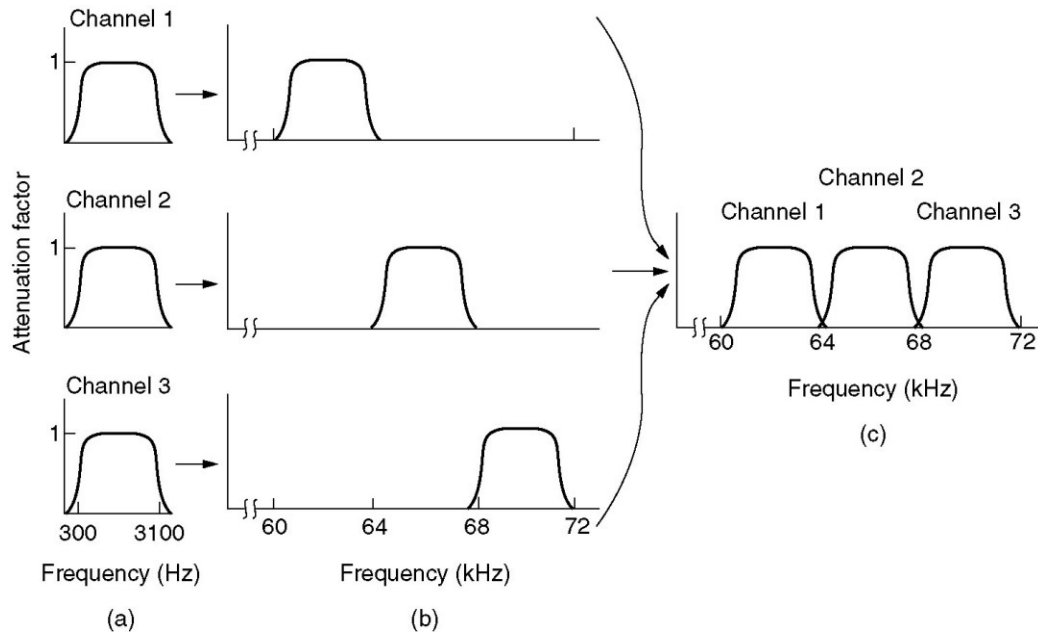
Esistono diverse tecniche di per implementare il multiplexing.

Le principali sono:

- A divisione di frequenza **FDM**
- A divisione di tempo, **TDM**



Frequency Division Multiplexing



- (a) The original bandwidths.
- (b) The bandwidths raised in frequency.
- (c) The multiplexed channel.

Divide lo spettro in bande di frequenza. Ogni canale viene codificato modulando le frequenze all'interno di una banda.

Un esempio tipico sono le trasmissioni radiofoniche AM; lo spettro di frequenze utilizzato è di circa 1 MHz (da 500 a 1500 KHz). Ogni stazione radio opera all'interno di una banda di circa 10KHz, con una separazione tra i canali abbastanza grande per evitare interferenze.

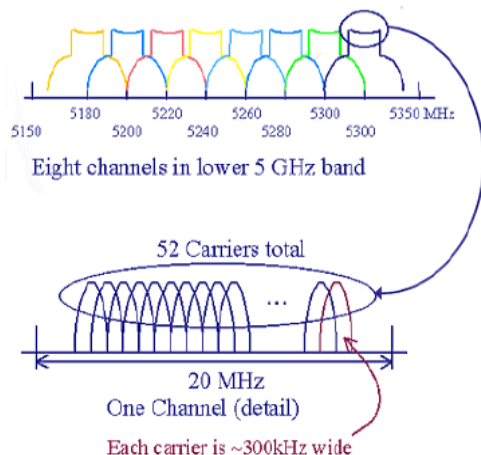
OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) è una tecnica FDM in cui le frequenze portanti tra loro ortogonali: le fasi di portanti adiacenti sono calcolate in modo da non interferire.

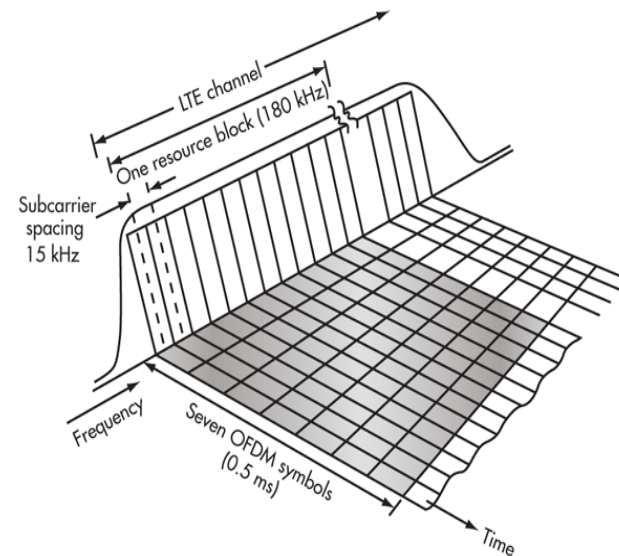
N portanti adiacenti compongono un canale che può essere utilizzato per una singola trasmissione in cui i dati vengono inviati in parallelo.

Le singole sotto-portanti (subcarrier) possono utilizzare codifiche diverse in base al profilo dell'attenuazione.

E' utilizzata nelle principali tecnologie per trasmissione dati quali ADSL, WiFi 802.11g e 802.11n e nei sistemi cellulari LTE.



OFDM in WiFi



OFDM in LTE

Time Division Multiplexing (TDM)

Il TDM è tipico delle trasmissioni digitali. Il tempo viene diviso in frame di dimensione stabilita. Ogni frame ospita un numero definito di canali. I dati di una linea di input vengono inseriti nel canale assegnato.

