



UNIVERSITÀ  
DI PARMA

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

# Il Livello Fisico

RETI DI CALCOLATORI - a.a. 2022/2023

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, codifica di tensione e di onde e.m.

## 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 partenza e decodificare i bit in arrivo.



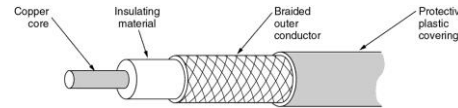
# Mezzi trasmissivi

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

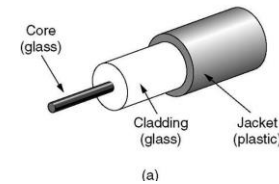
Fibre ottiche (canali Punto-Punto )

## 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.

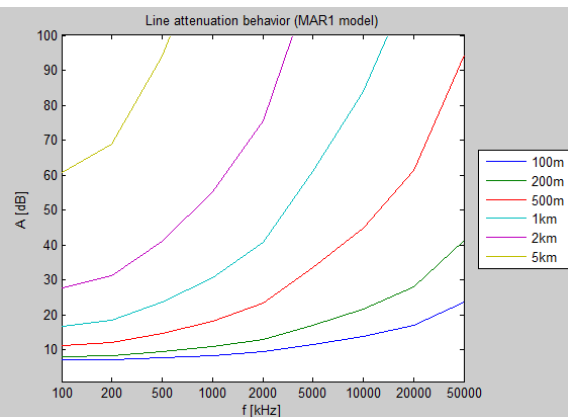
# Banda passante

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.

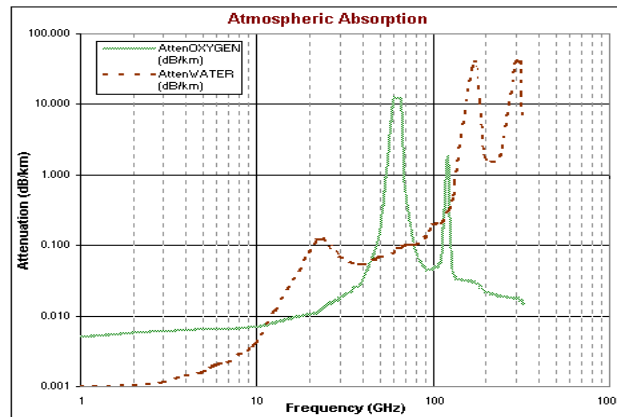
Per ogni mezzo trasmissivo è necessario individuare una banda di frequenze, detta **banda passante**, che verrà utilizzata per la codifica dei dati, in cui l'attenuazione è più contenuta e possibilmente costante.

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

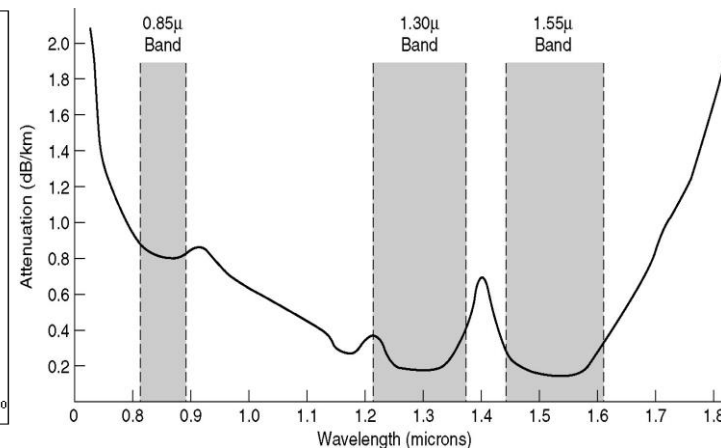
rame



etere



fibra ottica



*Nota: Le onde vengono misurate in base alla loro frequenza  $f$  (Hz) o lunghezza  $\lambda$  (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)  $= 10 \log P_2/P_1$  (P1=trasmittente, P2=ricevente)

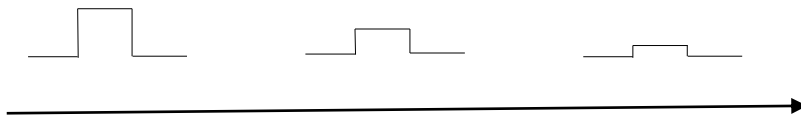
E.g: un **dimezzamento** della potenza del segnale corrisponde a

$10 \log P_2/P_1 = 10 \log 0.5 = -3\text{db}$

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

$10 \log P_2/P_1 = 10 \log 2 = 3\text{db}$

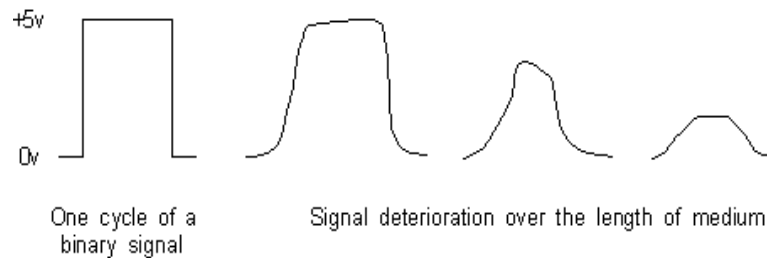
- Nei mezzi guidati è lineare con la distanza (esempio fibra ottica -0,24 db/Km)
- Nei mezzi omnidirezionali (etere) si aggiunge l'attenuazione isotropica



# 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).



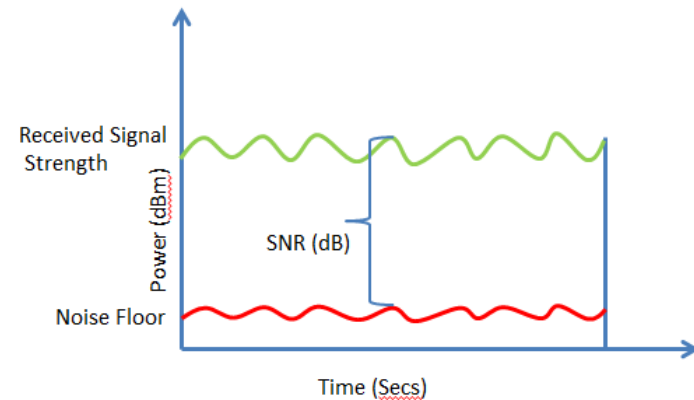
# Deterioramento del segnale rumore e disturbo

**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 ( $10 \log S/N$ )**

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

# Tempi della comunicazione

Il **tempo di consegna** è il tempo necessario per trasferire un dato dal mittente al destinatario ed è determinato dalla somma di diverse latenze introdotte dal mittente, dai nodi di transito, dal mezzo trasmissivo e dal destinatario.

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

I principali componenti che incidono su questi tempi sono:

- ▶ **Tempo di trasmissione:** tempo che impiega una sequenza di bit 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

$$v = c/n \quad c \rightarrow \text{velocità della luce} = 300000 \text{ Km/s} \quad (3 \times 10^8 \text{ m/s})$$

$n$  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  **$3 \times 10^8 \text{ m/s}$**

La velocità di propagazione nei mezzi guidati (**fibra ottica e rame**) è circa  **$2 \times 10^8 \text{ m/s}$**  (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 inoltra) 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:

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

$$\text{A } 100\text{Mb/s} \quad t = 1/100\text{M} = 10^{-8} \text{ s} = 10\text{ns} \quad l = 2 \times 10^8 \times 10^{-8} = 2 \text{ m}$$

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



### 1KByte (8000 bit) :

$$\text{A } 10\text{Mb/s} \quad t = 800\mu\text{s} \quad l = 20 \text{ m} \times 8000 = 16\text{Km}$$

$$\text{A } 1\text{Gb/s} \quad t = 8\mu\text{s} \quad l = 20 \text{ cm} \times 8000 = 160\text{m}$$

## Tempo di propagazione:

$$\text{Cavo in rame di una rete locale (100m)} \quad t = 100 \text{ m} / 2 \times 10^8 \text{ m/s} = 0.5 \mu\text{s}$$

$$\text{Fibra Ottica Roma - NewYork (6.600Km)} \quad t = 6,6 \times 10^6 \text{ m} / 2 \times 10^8 \text{ m/s} = 33 \text{ ms}$$

$$\text{Satellite geostazionario (h=35.800Km x 2)} \quad t = 71,6 \times 10^6 \text{ m} / 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 238 \text{ ms}$$

# Diagramma spazio-tempo

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

Esempio di trasmissione di un dato 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:

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

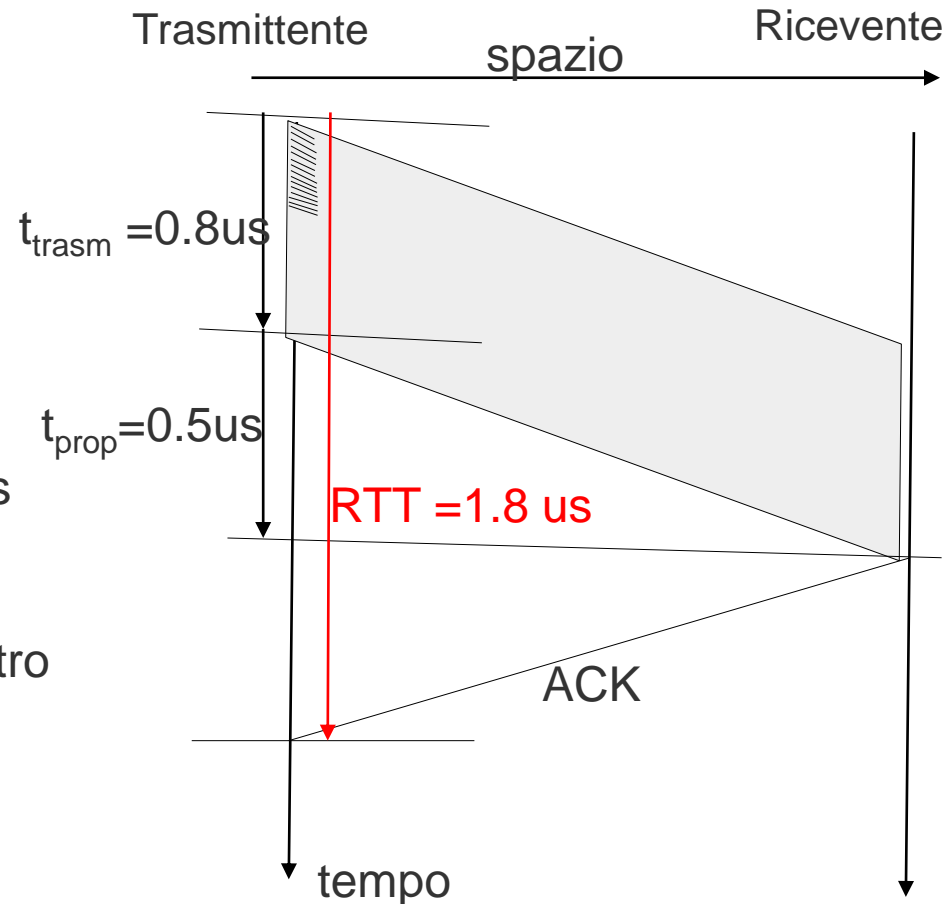
## Tempo di consegna:

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

## Round-Trip Time (RTT):

E' il tempo di consegna + tempo del riscontro

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

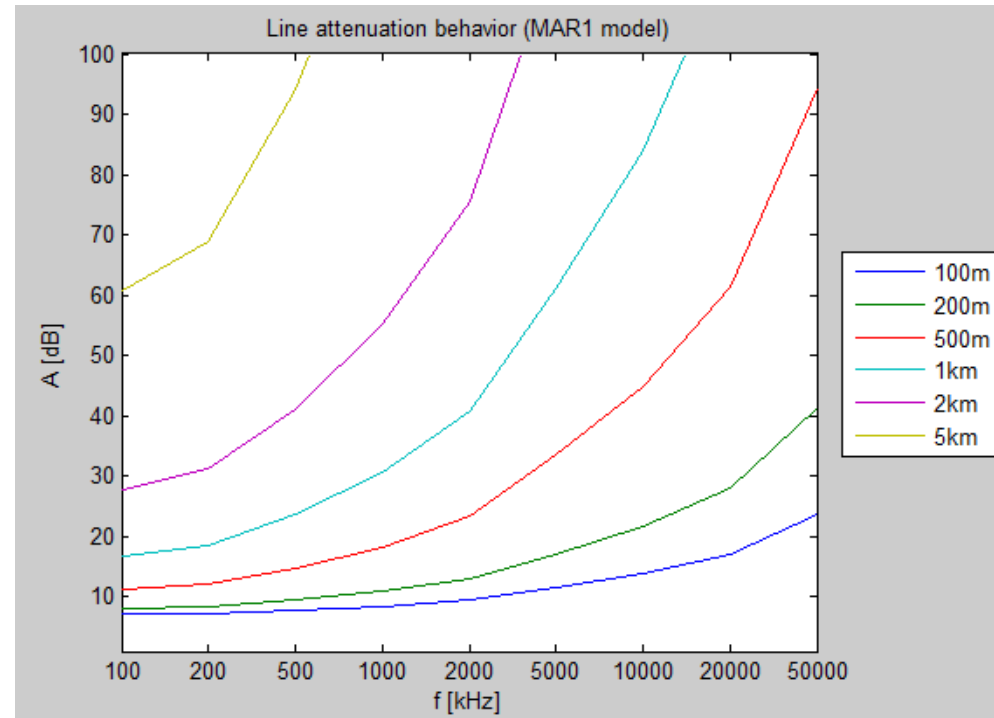


# Cavo in rame

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.

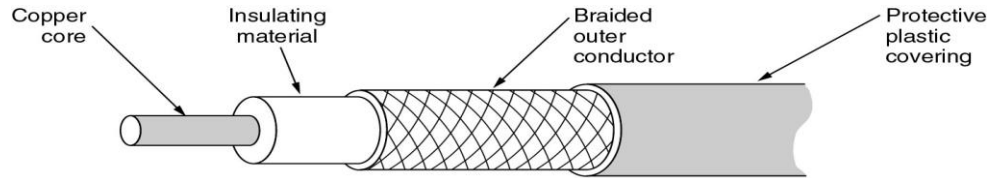
Esistono 2 principali tipi di cavi:

- ▶ Cavo coassiale
- ▶ Doppino



# Cavo Coassiale (Coaxial Cable)

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

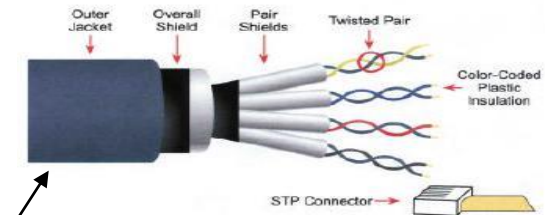


Il cavo coassiale denominato RG58 veniva utilizzato negli anni 80-90 come canale Multi-accesso e Bidirezionale (half duplex) per le reti locali. Attualmente poco utilizzato nell'ambito delle reti di calcolatori.

# 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 600MHz → Max 10Gb/s (10GbaseT)

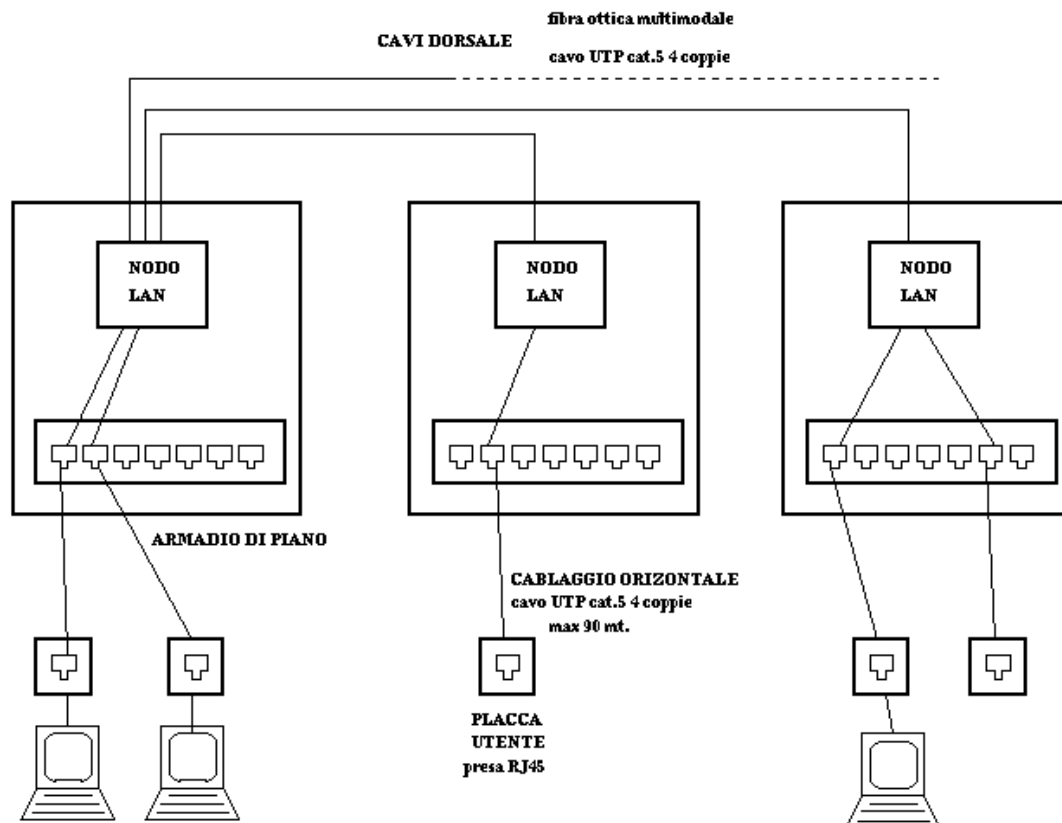


# Cablaggio strutturato

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

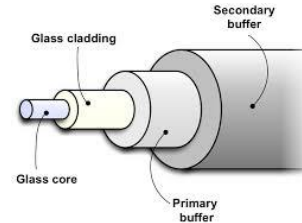
Il cablaggio strutturato vuole essere una soluzione architeturale flessibile per fonia e dati: entrambi i sistemi possono avere una topologia ad albero con cablaggio terminale in doppino telefonico almeno di **categoria 5** (cablaggio orizzontale).

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 =  $10^{-6}\text{m}$ )



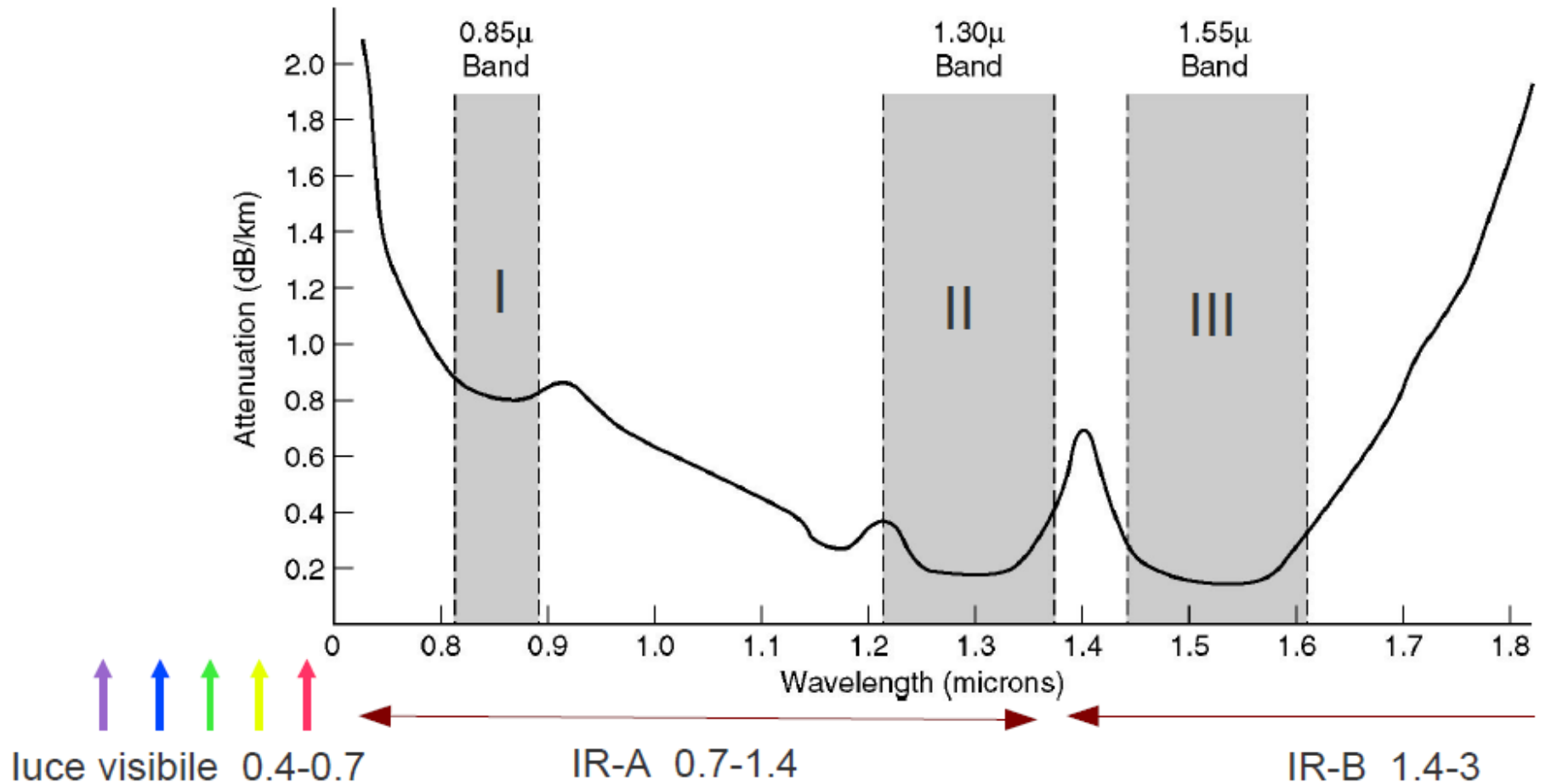
Caratteristiche:

- ▶ 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  $\mu$ s)

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



# Fibre Monomodali e Multimodali

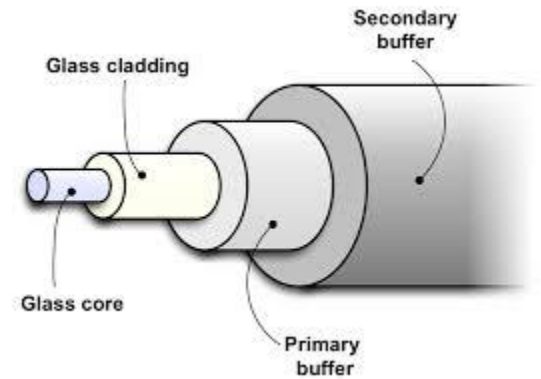
Esistono 2 tipi di fibre:

## Fibre Multimodali

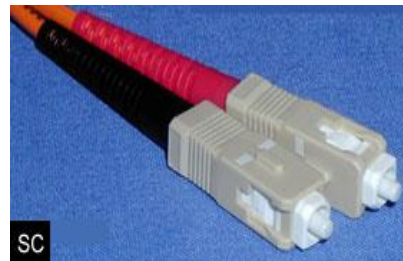
- I raggi colpiscono le pareti con diversi angoli (mode)
- 50/125 (core 50 micron/cladding 125 micron) e 62.5/125
- Luce generata con LED
- Finestra di utilizzo I e II

## 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

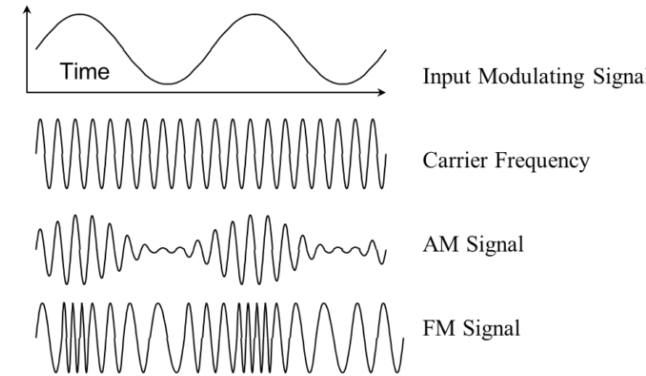
Alcatel-Lucent 

## Optical fibre submarine network

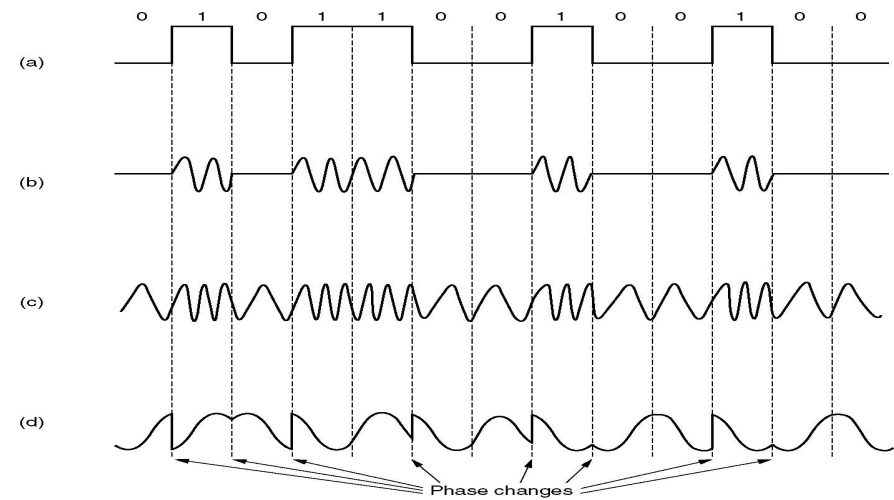


# Onde Elettromagnetiche

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 delle onde (d) 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 -  $\lambda \div 30\text{cm}-1\text{mm}$ ) 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.

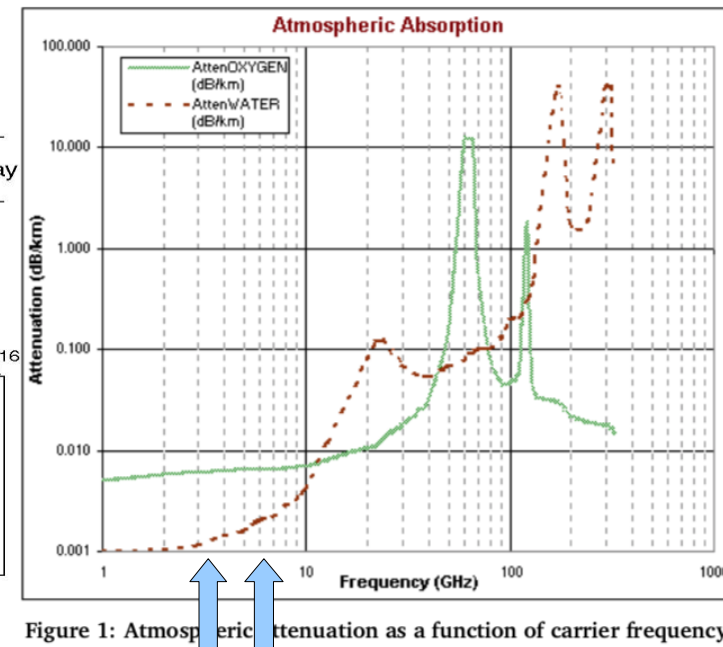
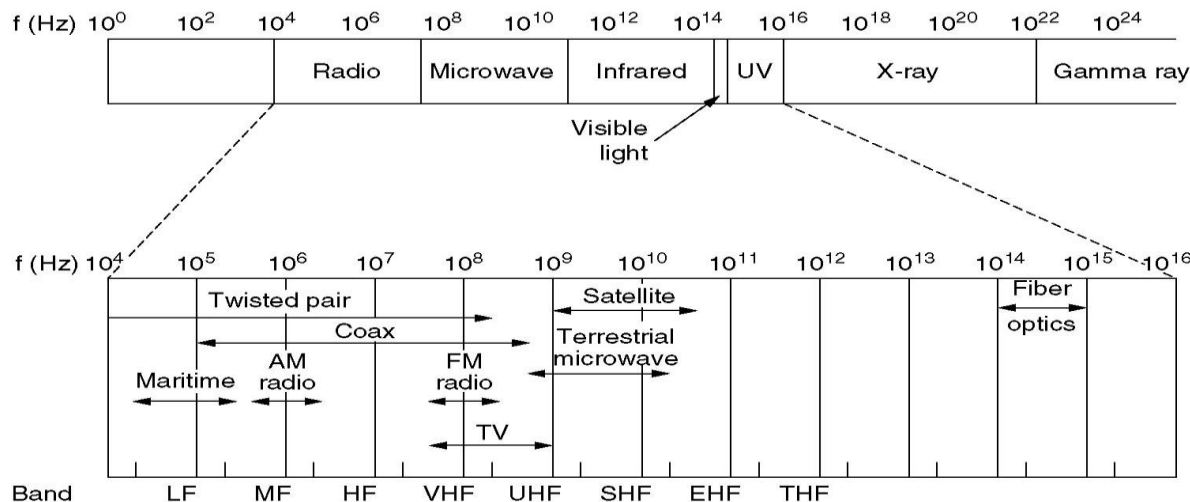


Figure 1: Atmospheric attenuation as a function of carrier frequency.



# 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](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

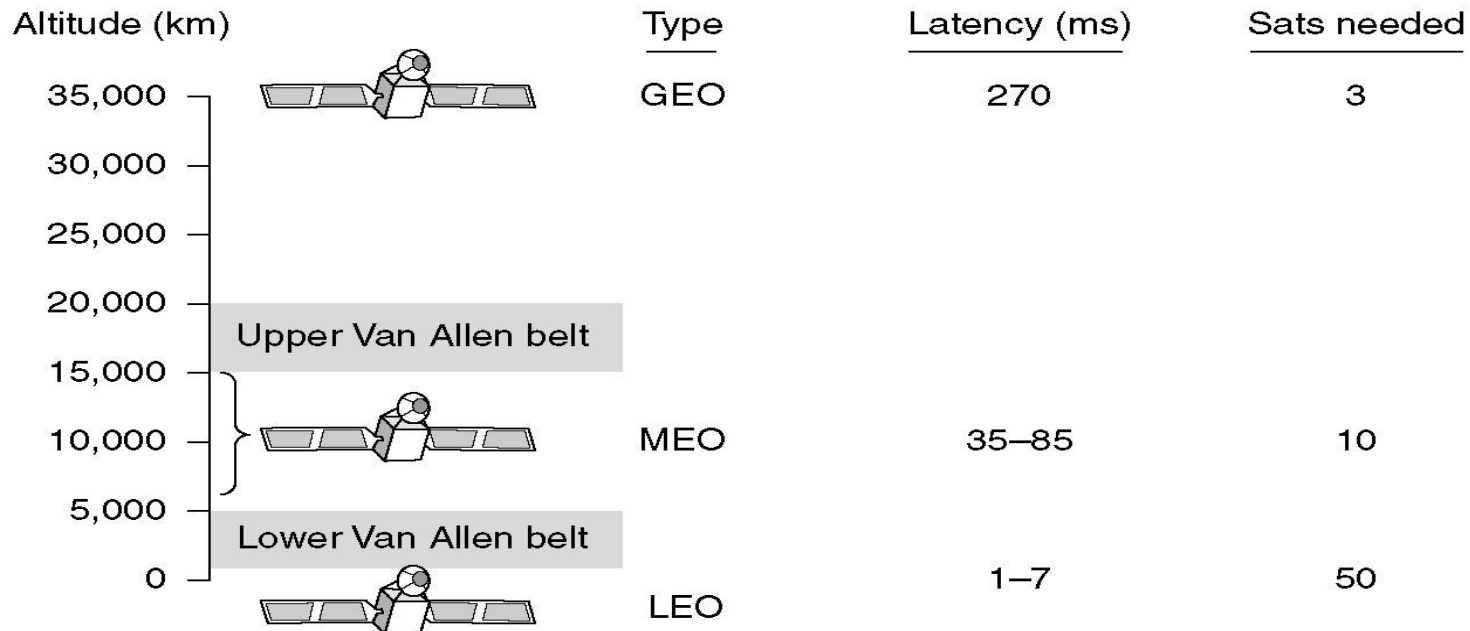
Connessioni omnidirezionali utilizzata all'interno degli edifici per realizzare reti multiaccesso. Si utilizzano microonde lunghe (2-5 GHz) per minimizzare i problemi di attraversamento delle pareti. L'ampiezza del canale può arrivare fino a 50 Mb/s in un raggio di **100-200 mt** (WiFi) o **qualche Km**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

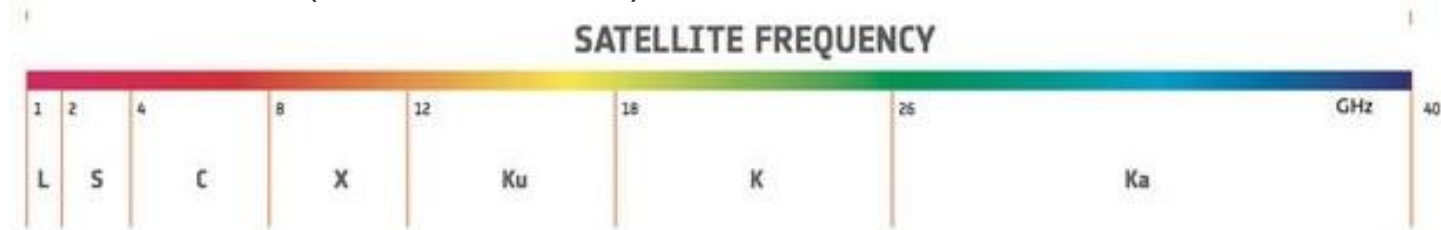
Il periodo dell'orbita di un satellite dipende dalla sua altezza. Ad una altezza di 35800 Km il periodo è di 24 ore per cui il satellite è **geostazionario**. Con soli 3 satelliti geostazionari è possibile realizzare una copertura totale della terra. La latenza (andata e ritorno) è di  $t = \text{distanza}/\text{velocità}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

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



# Frequenze e Progetti Satellitari

Le frequenze usate dai satelliti (tra 1 – 40 GHz) sono suddivise in 7 bande: L, S, C, X, Ku, K e Ka



## Reti satellitari :

### Posizionamento Terrestre (GPS)

funziona con 24 Satelliti MEO (Medium Earth Orbit) e usa frequenze in banda L

### Telefonia Mobile

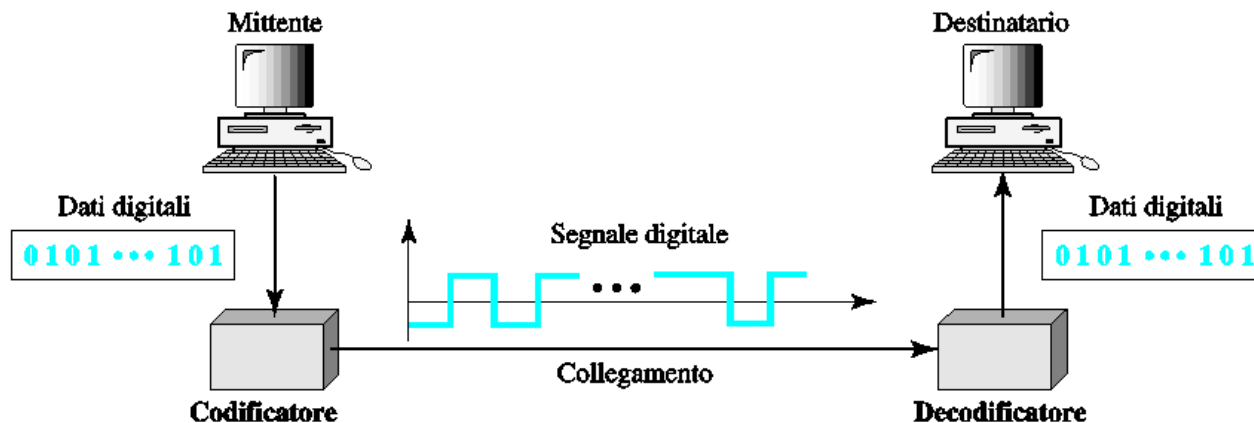
- ▶ [Iridium](#) e [Globalstar](#) ( LEO) . Frequenze in banda K
- ▶ [Inmarsat](#) (Geostazionario)

### Reti Dati

- ▶ [Tooway](#) : servizio internet disponibile in tutta Europa, basato su 2 satelliti geostazionari con freq in banda Ka. Providers: [tooway](#) [MagellanoSAT](#) [OpenSKY](#)

# 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)

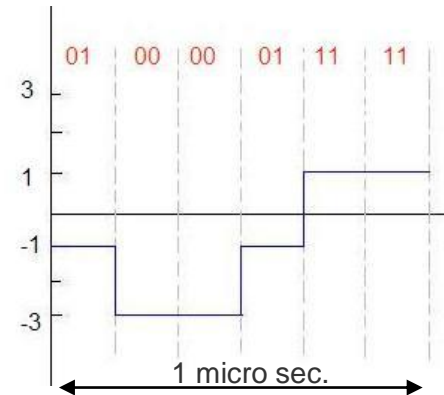
Il numero di simboli trasmessi in un secondo è detto **Baud-rate**.

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

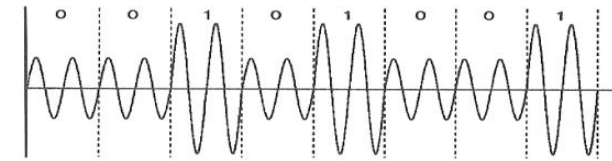
*Baud-rate=6 Mbaud/s - Bit-rate=12 Mbit/s*

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**



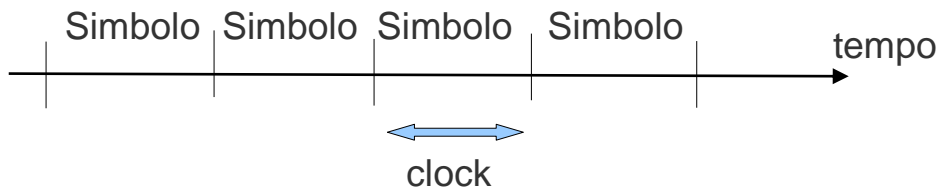
Modulazione in banda base



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:

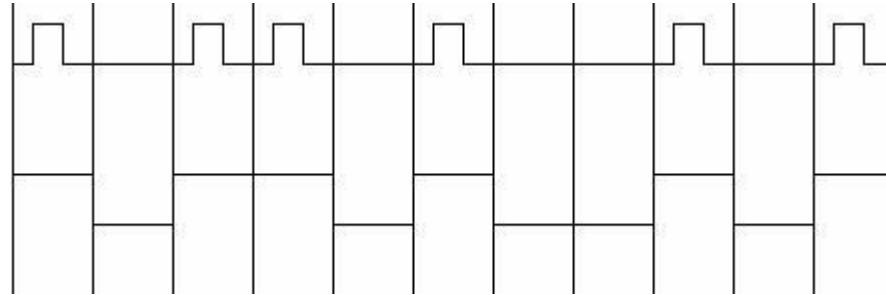
- Non sono previsti bit di sincronismo. Il segnale di Clock viene inviato parallelamente al canale dei dati, oppure il flusso non viene mai interrotto per non perdere il sincronismo.
- Generalmente questo è possibile solo per connessioni a breve distanza e alta velocità.

# 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

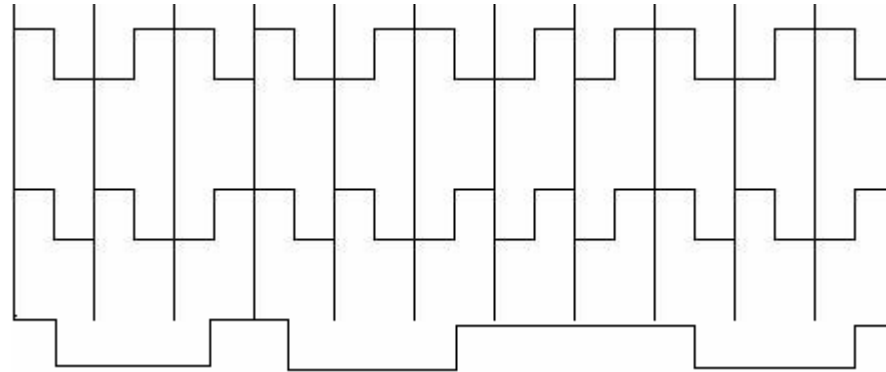
Sequenza binaria

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 a blocchi

La codifica a blocchi viene solitamente chiamata mB/nB: trasforma una parola sorgente di m bit in una parola codice di n bit ( $n > m$ )  
Introduce una maggiore ridondanza per diminuire il tasso di errori.

La codifica a blocchi **4B5B** viene utilizzata per **FastEthernet**:  
sequenze di 4 bit sono codificate in sequenze di 5 bit, con un bit aggiuntivo che ha il compito di garantire almeno una transizione per blocco.

Le sequenze generate vengono inviate con la codifica NRZ-I.

- Occorre una larghezza di banda maggiorata del 25%
- E' utilizzata da 100baseTX con 125Baud/s, ovvero 100bps.

4B	5B
0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101

# Codifiche di linea multi-livello

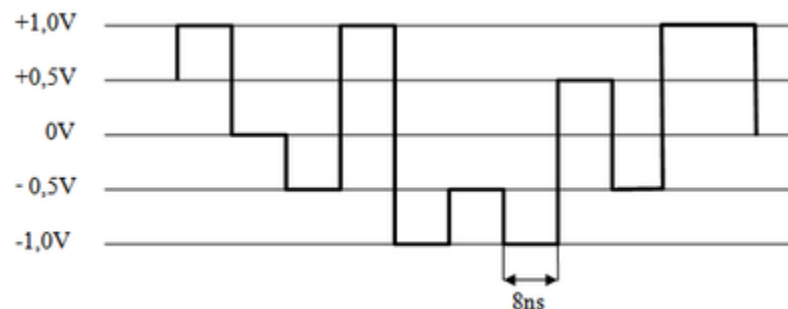
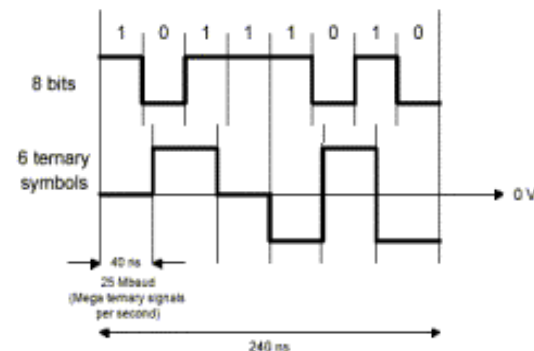
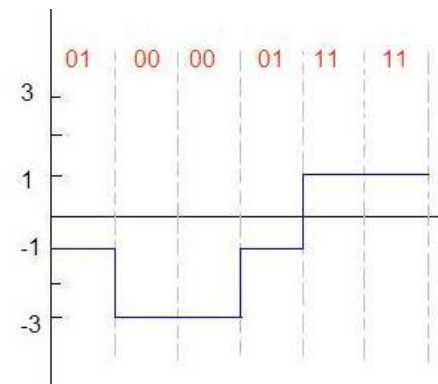
Se il canale ha un buon rapporto Segnale/Rumore, è possibile aumentare la velocità dei dati utilizzando schemi multi-livello. Alcuni esempi in uso:

**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

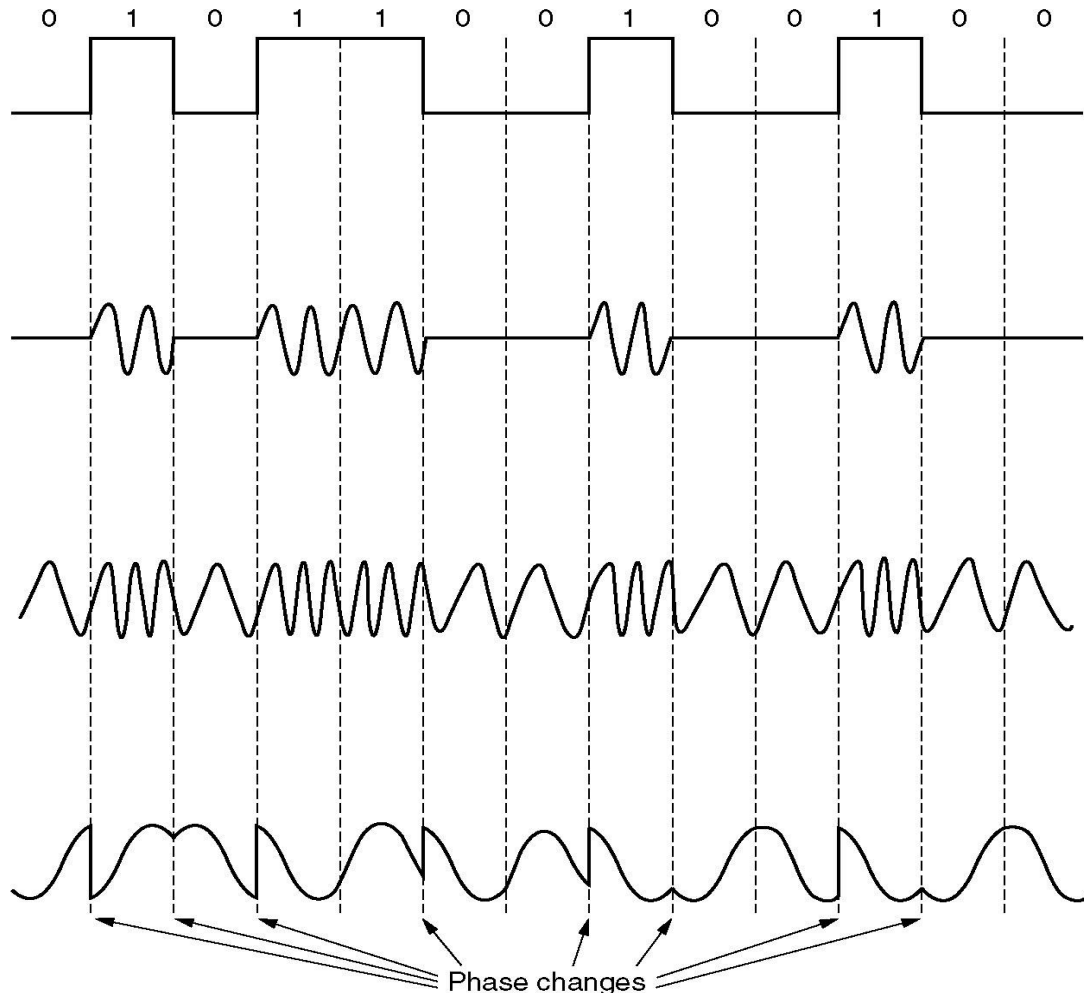
**PAM5:** utilizza 5 livelli di tensione  
(0V serve per rilevare errori)

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.

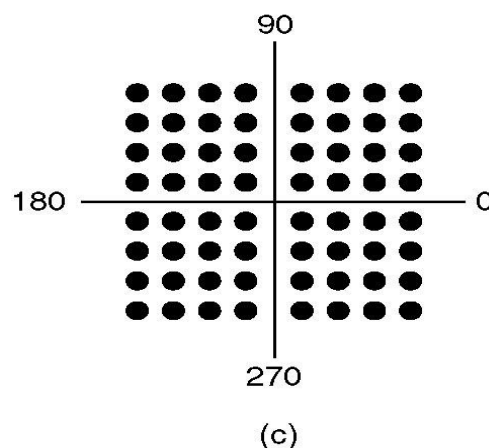
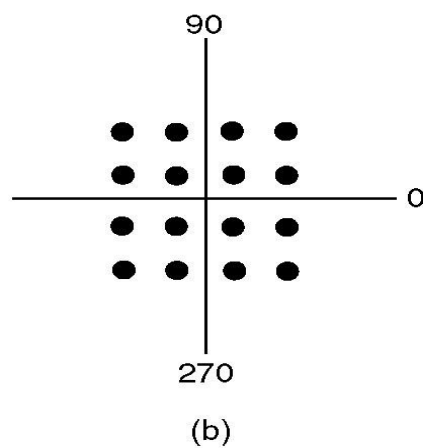
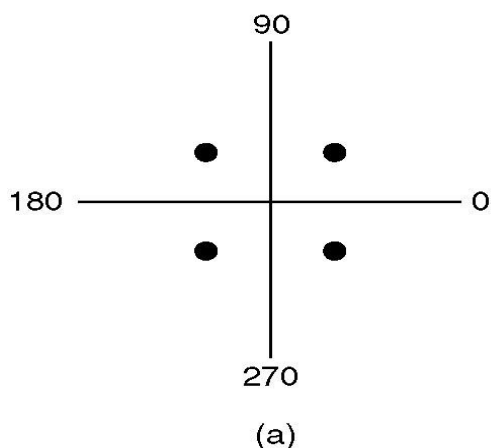
Ogni simbolo è determinato da una coppia fase-ampiezza e viene rappresentato da un punto nel diagramma delle fasi. L'insieme dei punti formano una "costellazione".

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

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

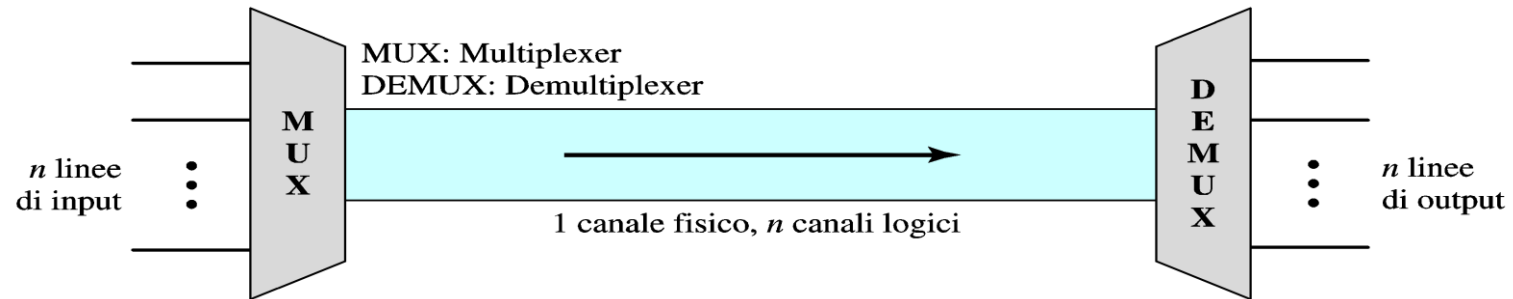
(b) QAM16: modulazione di ampiezza e fase a 16 stati (4 bit per ogni baud)

(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.

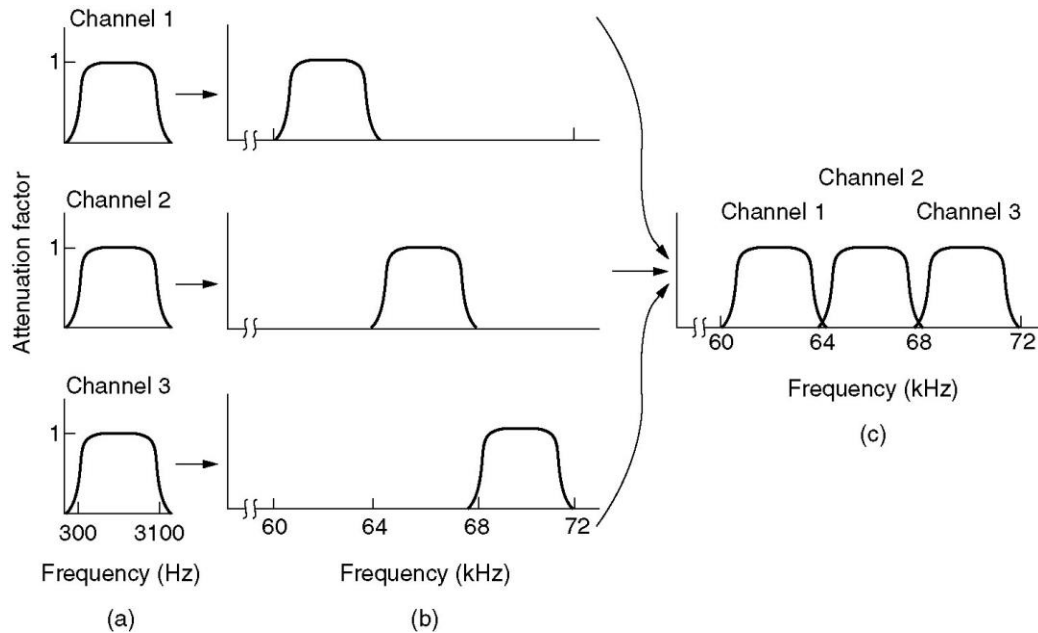


Esistono diverse tecniche di per implementare il multiplexing. Le principali sono:

- A divisione di frequenza **FDM** o di lunghezza d'onda (analogico)
- A divisione di tempo, **TDM** (digitale)



# 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.

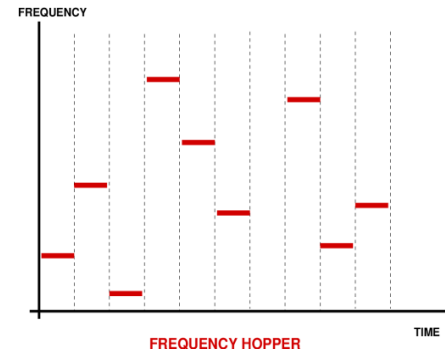
Un esempio tipico sono le trasmissioni radiofoniche AM; lo spettro di frequenze utilizzato è di circa 1 MHz (da 500 a 1500 KHz). Ogni stazione radio opera all'interno di una banda di circa 10KHz, con una separazione tra i canali abbastanza grande per evitare interferenze.

# Diffusione dello spettro (Spread Spectrum)

Lo spettro delle frequenze assegnate viene suddiviso in più portanti per evitare interferenze e intercettazioni, o per distribuire la trasmissione in base al profilo dell'attenuazione.

## FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

Utilizza 79 canali e cambia frequenza centinaia di volte al secondo. Resistente alle interferenze radio. Usato in 802.11 e Bluetooth.

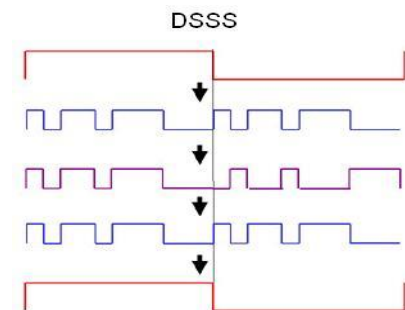


## CDMA (Code Division Multiple Access)

Il segnale viene processato in un circuito logico XOR insieme a un segnale impulsivo (codice) codificato a frequenza più alta. Il segnale trasmesso consumerà così una maggiore larghezza di banda, consentendo però la ricezione di segnali deboli.

Molti segnali del genere possono occupare lo stesso canale simultaneamente, utilizzando diversi codici

La tecnica CDMA denominata **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)** è usata per la telefonia mobile e in WiFi 802.11b e 802.11g, mentre la tecnica **W-CDMA** usata nei sistemi cellulari 3G (UMTS).



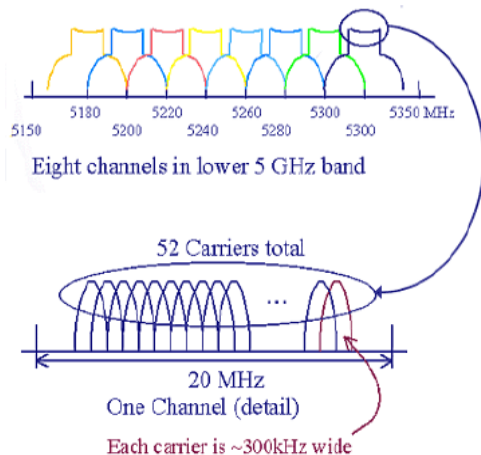
# OFDM

**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.

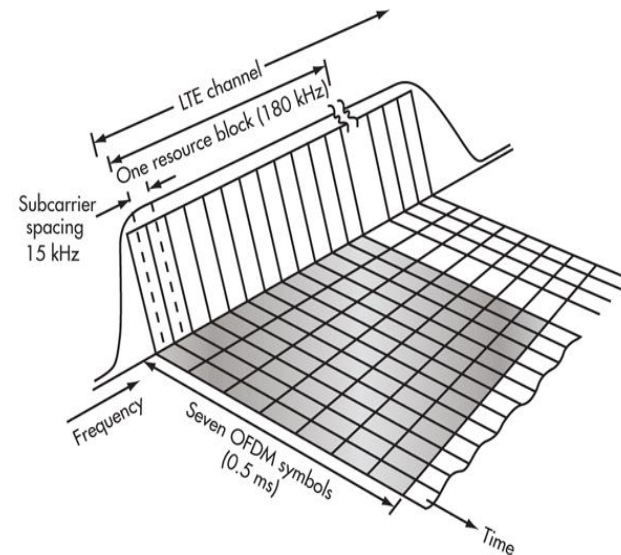
N portanti adiacenti compongono un canale che viene utilizzato per una singola trasmissione in cui i dati vengono inviati in parallelo.

Le singole sottoportanti (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, WiMAX e nei sistemi cellulari LTE.



## OFDM in WiFi



## OFDM in LTE





UNIVERSITÀ  
DI PARMA

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

# Il sistema telefonico

RETI DI CALCOLATORI - a.a. 2022/2023

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, codifica di tensione e di onde e.m.

## 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

# Il sistema telefonico

Il sistema telefonico (PSTN - Public Switched Telephone Network) è una rete specializzata per la trasmissione di uno specifico tipo di dato: la voce analogica.

Perché ci interessa:

- ▶ E' un modello di confronto per la rete di trasmissione dati.
- ▶ E' una infrastruttura di rete capillare consolidata da più di 100 anni di attività.
- ▶ In alcuni casi è utilizzata come canale di comunicazione per trasmissione dati.

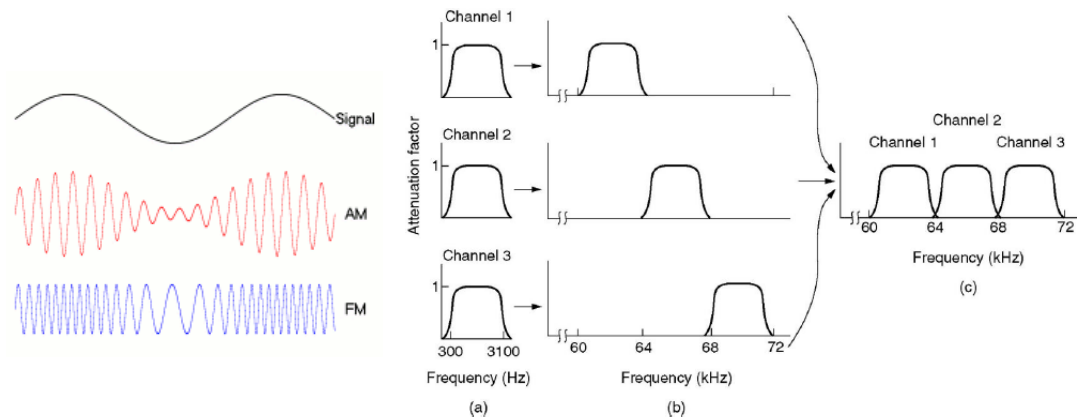
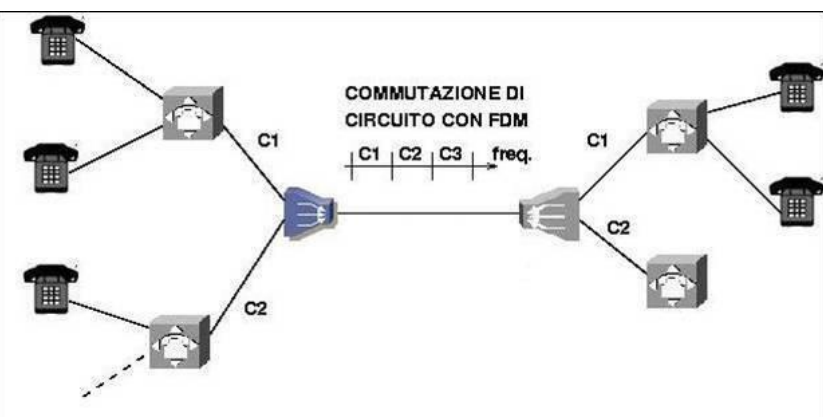
# Il sistema telefonico analogico

Le prime reti telefoniche (**fino agli anni 60**) erano analogiche.

Ogni telefonata richiede una banda analogica di 4KHz tra l'utente e la centralina telefonica su un doppino telefonico in rame detto Ultimo Miglio (o Local Loop)

Nelle dorsali interne delle Telecom per poter trasportare più circuiti telefonici sullo stesso canale si poteva utilizzare la tecnica di moltiplicazione FDM (Frequency Division Multiplexing):

La banda di frequenze analogiche del mezzo trasmissivo veniva suddivisa in canali di almeno 4 KHz e ciascun canale poteva ospitare una telefonata modulando una frequenza portante all'ingresso, per poi demodularla uscita.

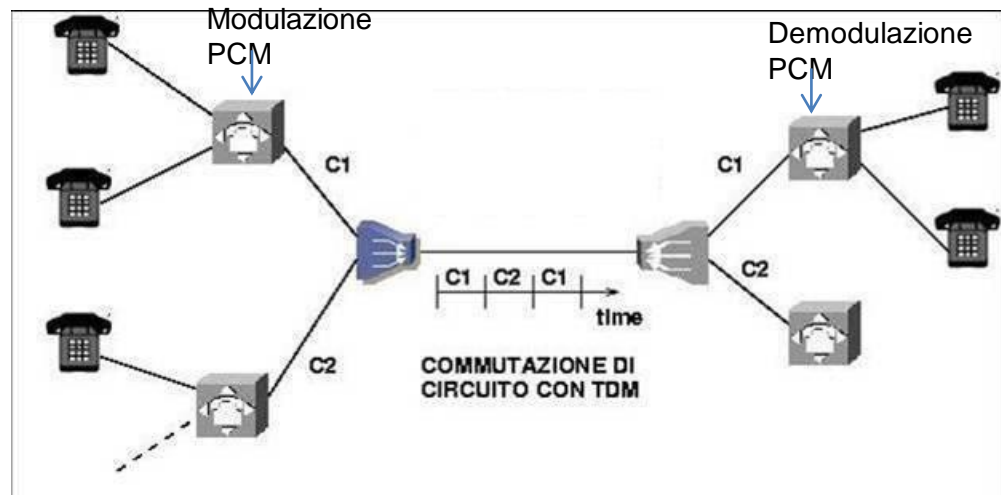
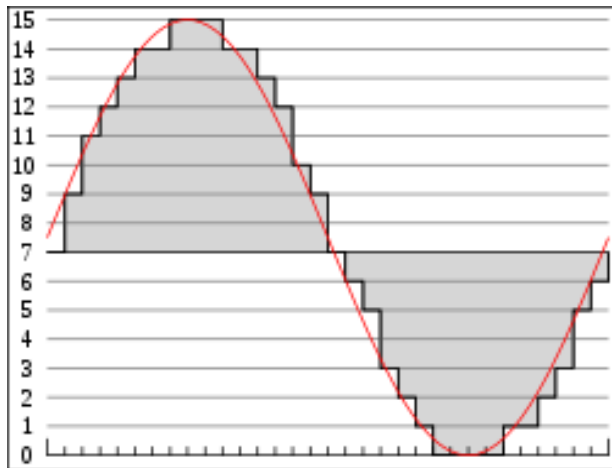


# Il sistema telefonico digitale: PCM

A partire dagli anni 60 le comunicazioni audio vengono gestite in modo digitale dalle compagnie telefoniche. La conversione in digitale è standardizzata con la tecnica di campionamento PCM (**Pulse Code Modulation**) eseguita nelle tratte della rete con un Codec che converte il segnale in forma digitale e lo riconverte in analogico in prossimità della destinazione.

Un canale analogico di 4 KHz richiede 8000 camp/sec ovvero uno ogni  $125\mu\text{S}$   
Ogni campionamento avviene generalmente su 8 bit di dati (o 7 dati + bit parità)  
Si ottiene così un flusso di **64Kbit/sec** (o 56Kbit/sec).

In questo caso la multiplazione delle portanti avviene in Time Division Multiplexing, ovvero suddividendo il tempo del canale in slot che si ripetono ciclicamente.



# Portanti TDM per canali PCM

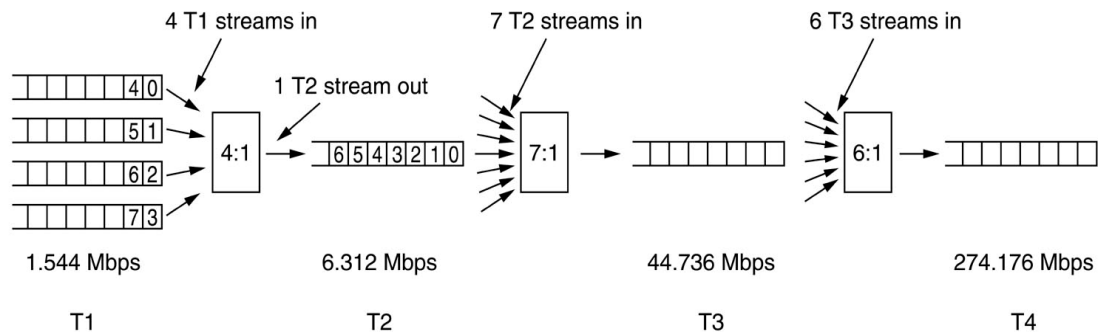
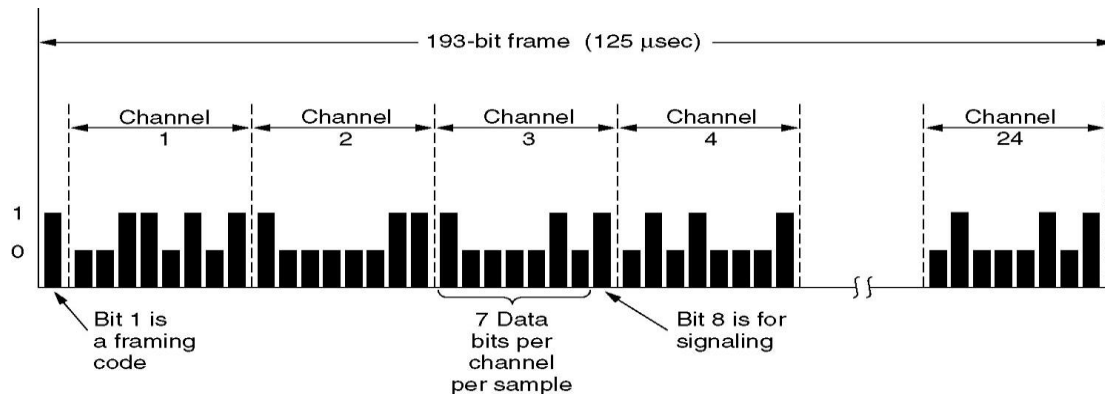
In Nord America e Giappone i canali PCM sono raggruppate con tecniche di multiplexing TDM su portanti in rame di tipo T (T1, T2, T3 e T4 ...):

T1 può portare 24 canali telefonici PCM da 64Kb/s (1.5Mb/s)

T2 trasporta 4 canali T1 (6.3Mb/s)

T3 trasporta 7 canali T2 (44.7 Mb/s)

T4 trasporta 6 canali T3 (274 Mb/s)



Le altre nazioni usano le portanti di tipo E (definite da CCITT) con una gerarchia a 32 (portante E1 a 2.048Mb/s) , 128, 512, 2048 e 8192 canali.

# Digitalizzazione dell'ultimo miglio

## Modem, ISDN e xDSL

La digitalizzazione non coinvolgeva l'utente che continuava a lavorare in analogico. Volendo utilizzare il sistema telefonico per la trasmissione dati era quindi necessario modulare i bit con segnali analogici assimilabili alla voce umana, inviarli nel sistema telefonico e demodularli in digitale al lato ricevente. Entrambe queste operazioni venivano eseguite da un apparato denominato Modem, il quale avendo a disposizione un canale di 4KHz poteva trasmettere fino a **56 Kbit/s** (teorema del campionamento di Shannon).

Con la tecnologia **ISDN** (anni 80/90) è stato possibile propagare il segnale digitale anche sull'ultimo miglio, portando in casa dell'utente un canale digitale da **64Kb/s**.

Negli anni 2000 per aumentare la velocità è stata introdotta la tecnologia **xDSL** che sfrutta la maggiore banda di frequenze dei cavi in **categoria 3**.

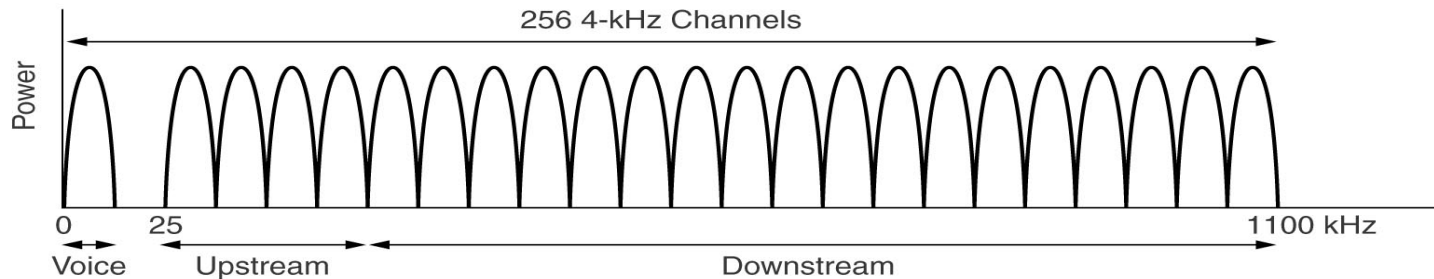
- Il segnale domestico non viene filtrato a 4 KHz ma a **1.1MHz**
- La banda viene suddivisa in 256 canali da **4.3KHz** ( $1.1 \text{ MHz} / 256 \text{ canali}$ ) con tecnica OFDM.
- All'interno di ogni canale si usa la modulazione QAM con un rate di 4K baud.
- La qualità della linea viene costantemente monitorata per aggiustare la velocità di trasmissione, utilizzando costellazioni con più o meno punti.
- Massimo numero di bit per baud è 15 (32768-QAM)
- Massima velocità di un canale **60 Kb/s** ( $4K \text{ baud} * 15 \text{ bit per baud}$ )
- Massima velocità aggregata è quindi **~ 15 Mb/s** ( $60 \text{ Kb/s} * 256 \text{ canali}$ )

# ADSL

**ADSL (Asymmetric DSL)** è un utilizzo specifico di xDSL, pensato per l'home computing, in cui il download è prevalente.

Con ADSL abbiamo:

- Canale 0 (0 – 4.3 KHz) per la fonia
- Canali 1-5 (4.3 - 25 KHz) non utilizzati per evitare interferenze fonia/dati
- Canali 6-30 (24) per upload. Max:  $24 \times 60 \text{ Kb/s} = 1.4 \text{ Mb/s}$  (effettivi 0.5 Mb/s)
- Canali 31-255 (224) per download. Max:  $224 \times 60 \text{ Kb/s} = 13.4 \text{ Mb/s}$  (effettivi 8 Mb/s)





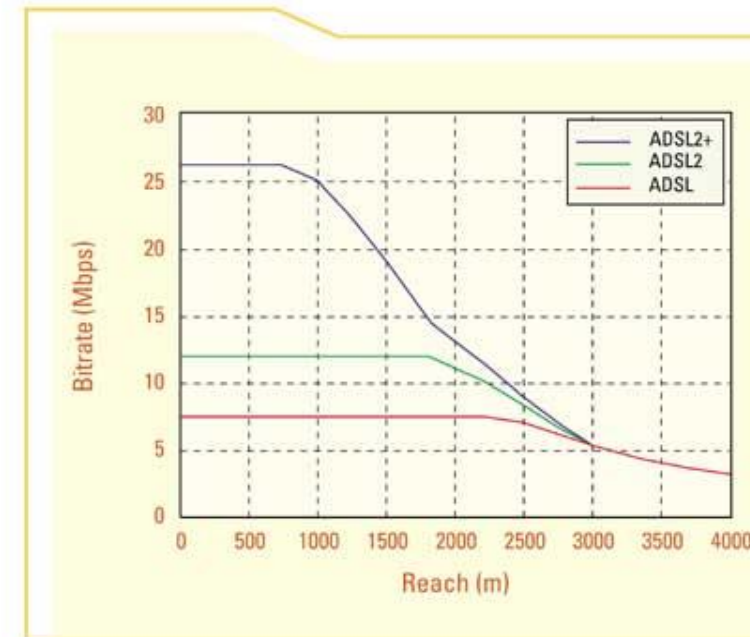
# ADSL, ADSL2 e ADSL2+

**ADSL2** migliora le prestazioni (effettivi ~ 12 Mb/s) attraverso una diversa codifica con una maggiore efficienza.

**ADSL2+** è un nuovo standard che utilizza una banda doppia, di 2.2MHz. In questo caso la massima velocità è di ~ 26 Mb/s per brevi distanze

## Tecnologia adattiva

In realtà solo chi abita in prossimità della centrale telefonica riesce ad arrivare ai 60Kb/s per canale perché il segnale decade rapidamente con la distanza. Dato che l'intera banda non ha una curva costante di segnale/rumore e attenuazione, ogni canale viene monitorato e modulato in modo indipendente. Secondo le potenzialità di ogni canale il sistema decide il tipo di QAM da utilizzare. Quando i bit utilizzabili scendono sotto una soglia minima il canale viene escluso.



# FttX

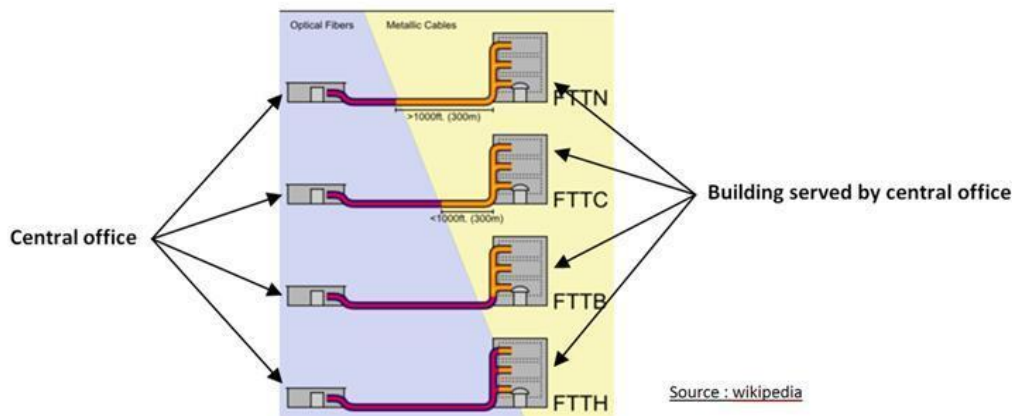
L'ultimo miglio in rame limita le prestazioni di ADSL.

Le compagnie telefoniche stanno sostituendo il rame con fibre ottiche che arrivano in prossimità dell'abitazione o in casa.

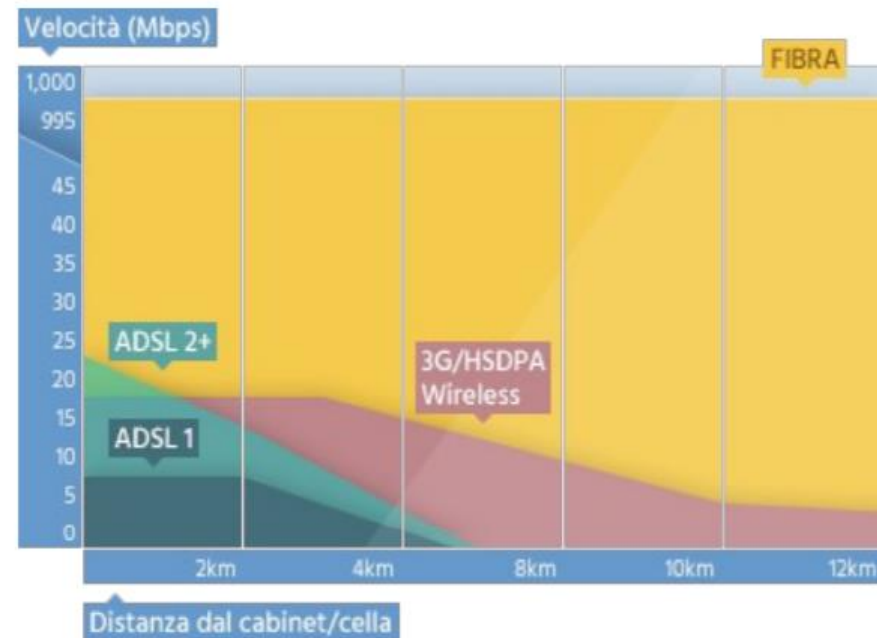
FttC (Fiber to the Cabinet, ovvero l'armadio in strada) può arrivare ad una banda di 35Mhz e una velocità di 300 Mb/s

FttH (Fiber to the Home) arriva a 1 Gb/s

Queste tecnologie vengono genericamente riferite come FttX.



*A schematic illustrating how FTTx architectures vary — with regard to the distance between the optical fiber and the end-user.*



<https://fibra.click/architetture/>

# Il sistema telefonico mobile

Esistono diverse generazioni di telefoni cellulari, con diverse tecnologie:

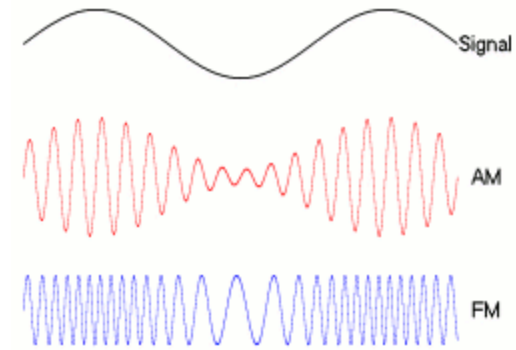
- 1G: Standard analogici TACS (Europa) e AMPS (America)
- 2G: D-AMPS e GSM . Voce digitale
- 2.5G: GPRS e E-GPRS (EDGE). Trasmissione digitale a commutazione di pacchetto
- 3G: Standard UMTS, CDMA e HSDPA. Voce e dati digitali
- 4G: Standard LTE
- 5G: (2020)

# 1G: AMPS e TACS

## Voce analogica

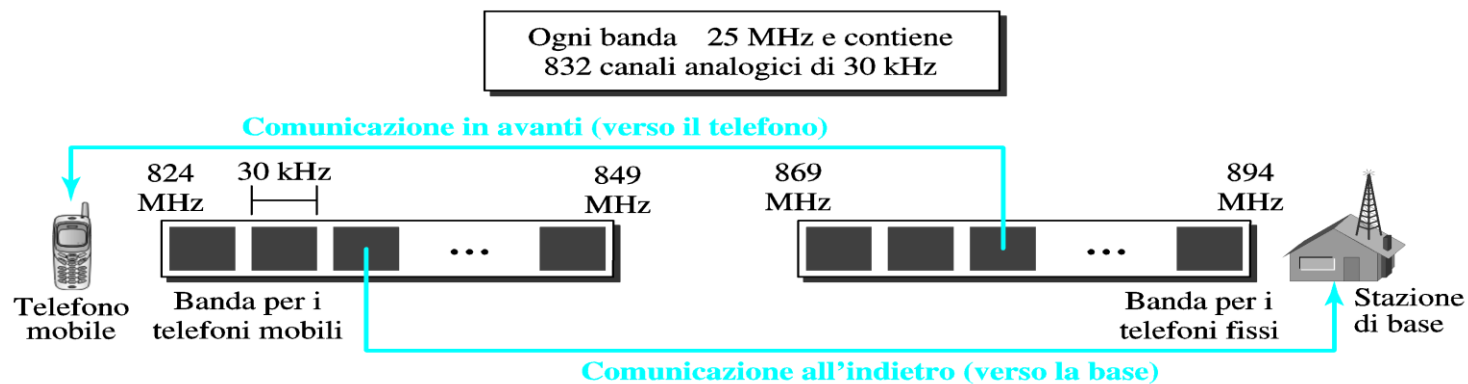
Tecnologia nata nel 1982 denominata AMPS negli USA e TACS in EU

I segnali vocali analogici (3KHz) vengono modulati in frequenza e inseriti in canali di 30KHz gestiti con il metodo FDMA.



AMPS utilizza 832 canali full duplex, ciascuno dei quali composto da 2 canali simplex:

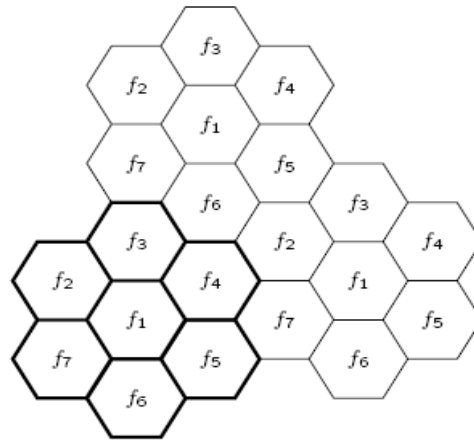
- 832 canali da 30KHz per trasmissione tra 824/849 Mhz (banda totale 25MHz)
- 832 canali da 30KHz per ricezione tra 869/894 Mhz (banda totale 25MHz)



# 1G: AMPS e TACS

## Le celle

Ogni area geografica è divisa in celle di 10-20 Km di diametro.  
Le celle sono organizzate in nuclei di 7 e hanno frequenze diverse.  
In questo modo due 2 celle con le stesse frequenze sono distanziate da 2 celle diverse.  
Questo significa che ogni cella ha mediamente un settimo degli 832 canali disponibili.



# 2G: D-AMPS

## Voce digitale

**D-AMPS.** Progettato per coesistere con AMPS e utilizza gli stessi canali:

- 832 canali da 30KHz per trasmissione tra 824/849 Mhz (banda totale 25MHz)
- 832 canali da 30KHz per ricezione tra 869/894 Mhz (banda totale 25MHz)

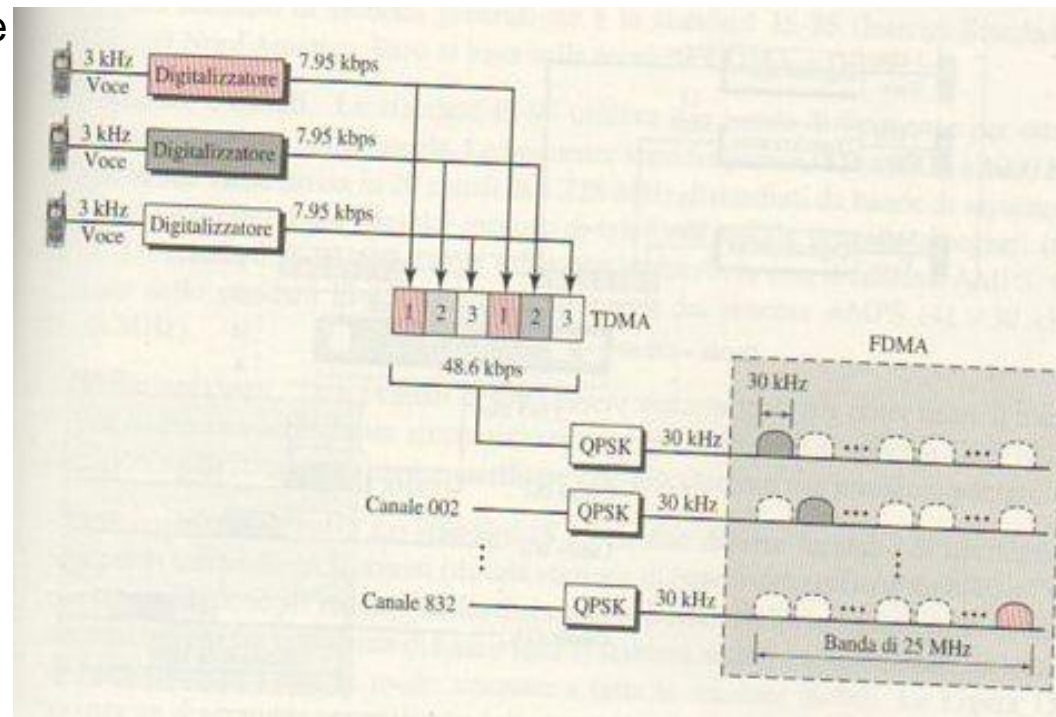
più nuove frequenze a 1.9GHz. Utilizzato negli USA

I canali analogici da 3KHz vengono digitalizzati con PCM (56 Kbps) e compressi a 8 Kbps

Ogni coppia di frequenze da 30KHz viene condivisa da 3 utenti contemporaneamente in divisione di tempo (TDM).

Sulla coppia di frequenze vengono inviati 25 frame al secondo (40ms) e ogni frame è diviso in 6 slot temporali in cui vengono alternati in TDM i 3 flussi digitali che vengono modulati con QPSK (modulazione di fase).

D-AMPS utilizza quindi multiplexing TDM entro un multiplexing FDM.

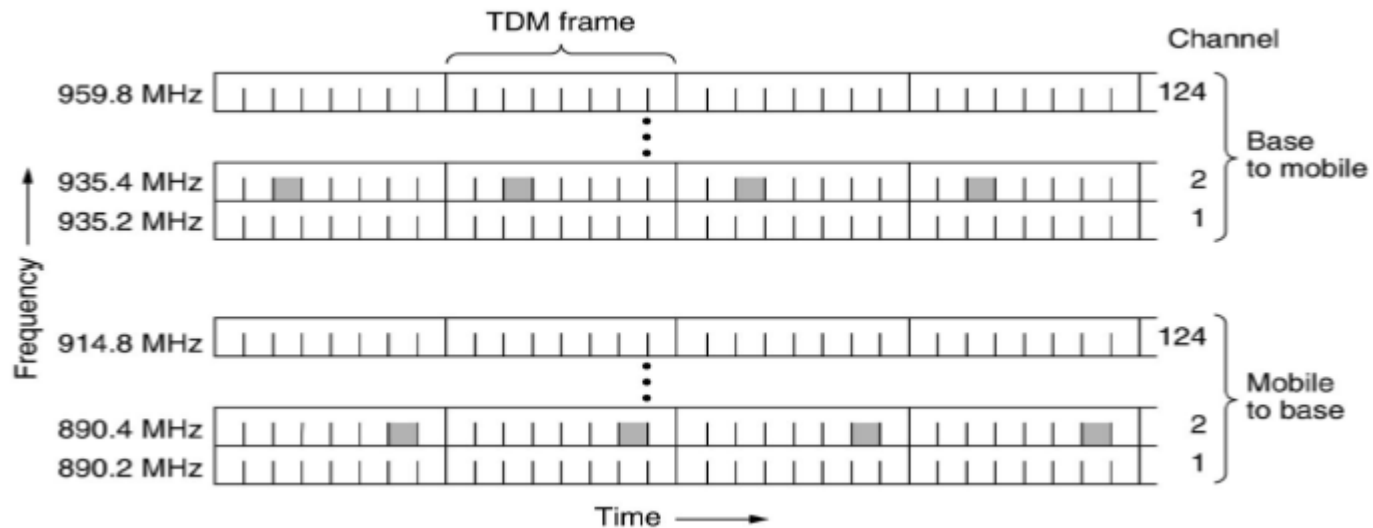


# 2G: GSM

## Voce digitale

**GSM.** Utilizzato nel resto del mondo. Come D-AMPS utilizza FDM+TDM

- - FDM: 124 canali simplex di 200KHz
- - TDM: su ogni canale si susseguono Frame di 4.6 msec, suddivisi in 8 slot temporali ciascuno di 148 bit per 8 connessioni separate.



# 2.5G: GPRS e EDGE

## Trasmissione digitale a commutazione di pacchetto

**GPRS** 2.5G in attesa di 3G.

Velocità teorica 171Kbps (reale 30-80 Kbps)

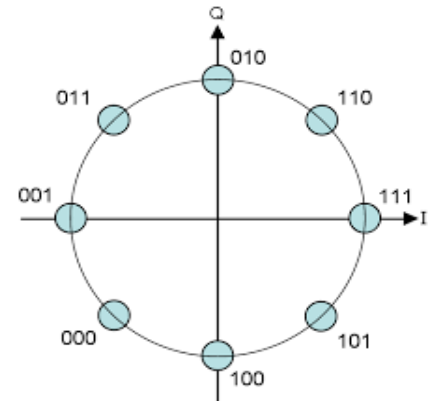
E' una sovrastruttura sopra D-AMPS e GSM per trasportare pacchetti IP raggruppando più slot.

Enhanced GPRS (EDGE)

Velocità incrementata introducendo una nuova modulazione, la 8-PSK (modulazione di fase a 8 simboli).

Prestazioni:

**EDGE (E)** fino a 473,6 Kbps teorici





# 3G: UMTS e HSDPA

## Voce e dati digitali

Successore di terza generazione (3G) del GSM di cui utilizza l'infrastruttura, ma la tecnologia di trasmissione e' W-CDMA

CDMA (Code Division Multiple Access) e' una tecnica a diffusione dello spettro (Spread Spectrum) che permette di raggiungere velocità di trasmissione per utente superiori rispetto alla tecnica di accesso mista TDMA/FDMA utilizzata nella rete GSM/GPRS.

I protocolli HSPA come HSDPA e HSPA+ sono stati introdotti nello standard UMTS per migliorarne le prestazioni attraverso l'utilizzo di un numero maggiore di simboli di codifica.

### Prestazioni

**UMTS (3G):** fino a 384 Kb/s in download, 128 Kb/s in upload, latenza 150 ms.

**HSDPA (H) :** fino a 14 Mb/s in download, 5,7 Mb/s in upload, latenza 100 ms.

**HSPA+ (H+):** fino a 43 Mb/s download, 11 Mb/s upload, latenza 50 ms.

# 4G: LTE

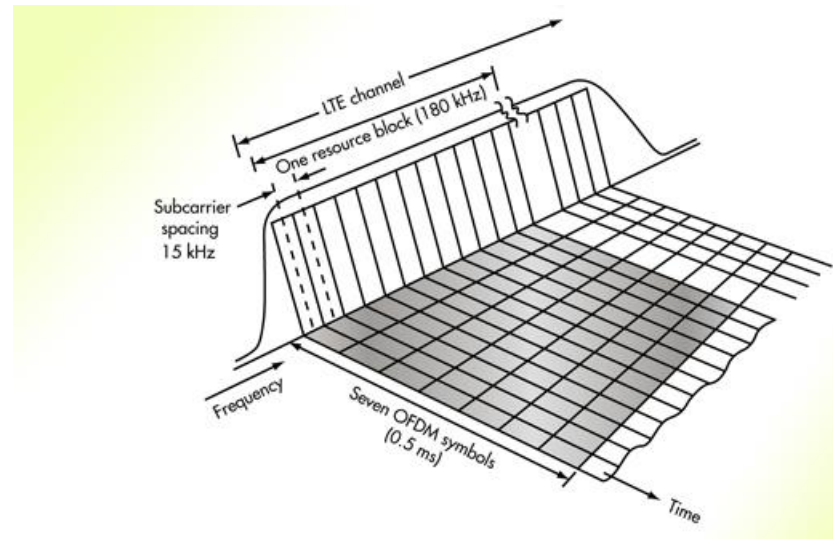
LTE (Long Term Evolution) è la nuova generazione per i sistemi di accesso mobile a banda larga.

Nel 2010 ITU ha autorizzato l'utilizzo della denominazione 4G per le tecnologie LTE

- Utilizzo della **modulazione OFDM** (QPSK, 16QAM, 64QAM) per il downlink e Single-Carrier FDMA per l'uplink (al posto del W-CDMA dell'UMTS);
- utilizzo di un minimo di 1,25 MHz ed un massimo di 20 MHz per ciascun utente

Prestazioni:

**LTE (4G)** fino a 326,4 Mb/s in download  
e fino a 86,4 Mb/s in upload.  
RTT < 10 ms



# 5G

3 bande di frequenza:

- 700 MHz Elevata copertura
- 3.7 GHz Banda intermedia
- 26 Ghz (11 millimetri, onde millimetriche)
  - Alta velocità (10-20 Gbps picco) e bassa latenza (1 - 4 ms),
  - Solo nei grandi centri urbani, Piccole celle, visibilità ottica, potenza limitata

Adaptive beam switching: possibilità di saltare da una banda all'altra

Tre tipi di servizi:

**mMTC:** per un elevato numero di dispositivi dispiegati in una certa area geografica, con requisiti stringenti in termini di elevata durata della batteria ed elevata copertura, ma generalmente non sono richiesti requisiti stringenti in termini di banda e latenza.

**uRLLC:** prevede requisiti stringenti in termini di latenza, affidabilità, disponibilità, robustezza, resilienza e sicurezza.

**eMBB:** la caratteristica principale è quella di fornire accessi ultra broadband sul mobile. In questo caso si richiede un'elevata velocità di picco per utente

<https://www.agendadigitale.eu/infrastrutture/5g-ecco-le-tecnologie-pilastro-tutto-cio-che-ce-da-sapere>