

# **Reti di Calcolatori**

**Il livello fisico**

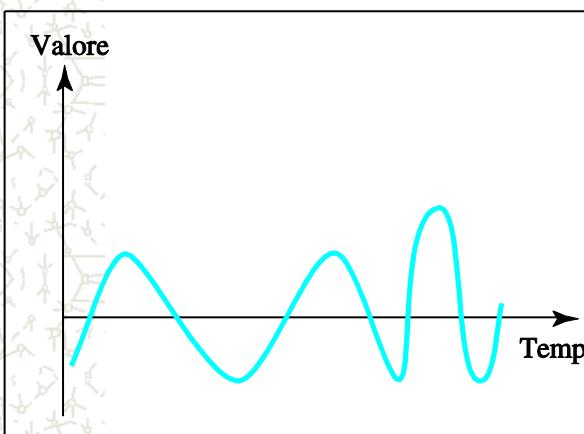
# I Segnali

I segnali sono variazioni di grandezze fisiche che trasportano informazioni.

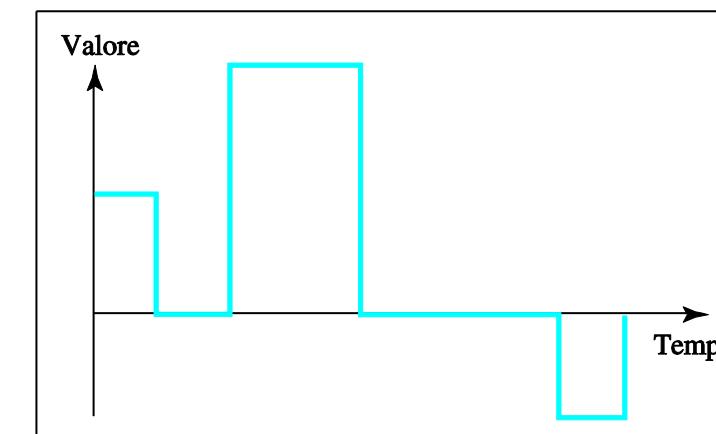
Le telecomunicazioni studiano la trasmissione di informazioni a distanza per mezzo di segnali che possono essere di vario tipo: **acustico, elettrico, luminoso, elettromagnetico, ecc.**

I segnali elettrici trasmessi da una linea possono essere essenzialmente di due tipi:

- **ANALOGICI:** Sono analogici quei segnali che, al variare del tempo, possono assumere tutti i valori compresi fra i valori massimo e minimo consentiti dal canale di comunicazione.
- **DIGITALI:** Con il termine digitale, o numerico, si intende invece un segnale che può assumere solo due valori, o comunque soltanto un numero discreto di valori, come, ad esempio avviene per i dati che sono generati dai computer.



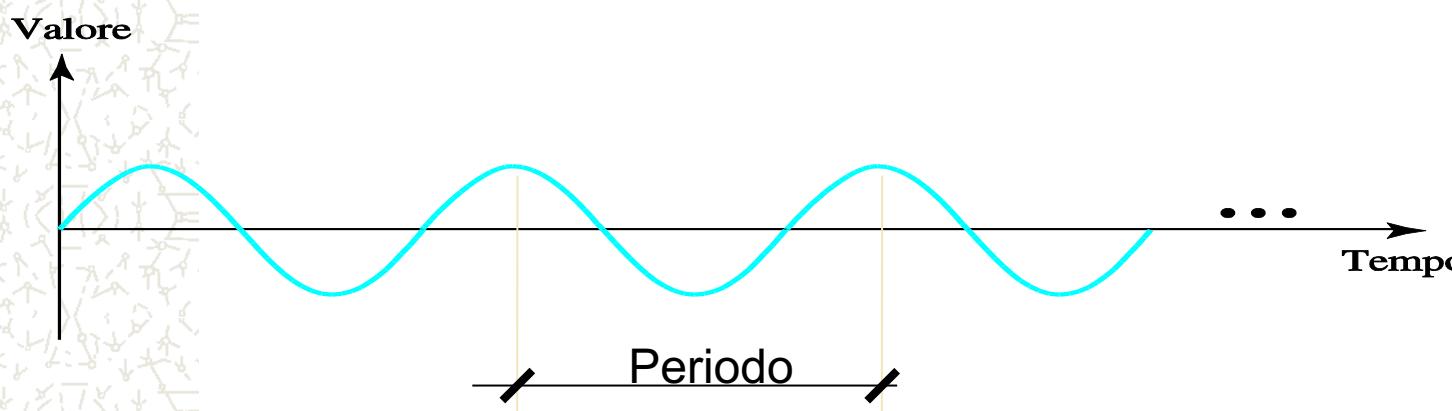
a. Segnale analogico



b. Segnale digitale

# Segnali periodici e aperiodici

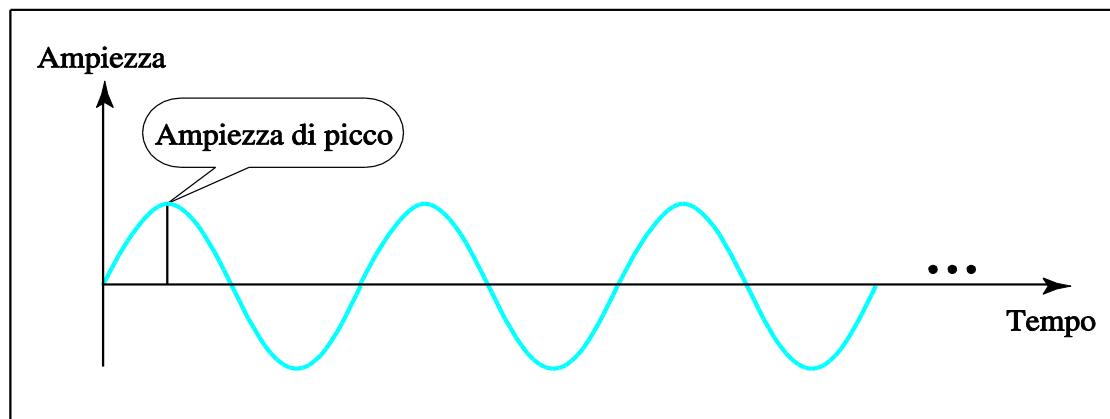
- Segnale periodico
  - Si ripete nel tempo



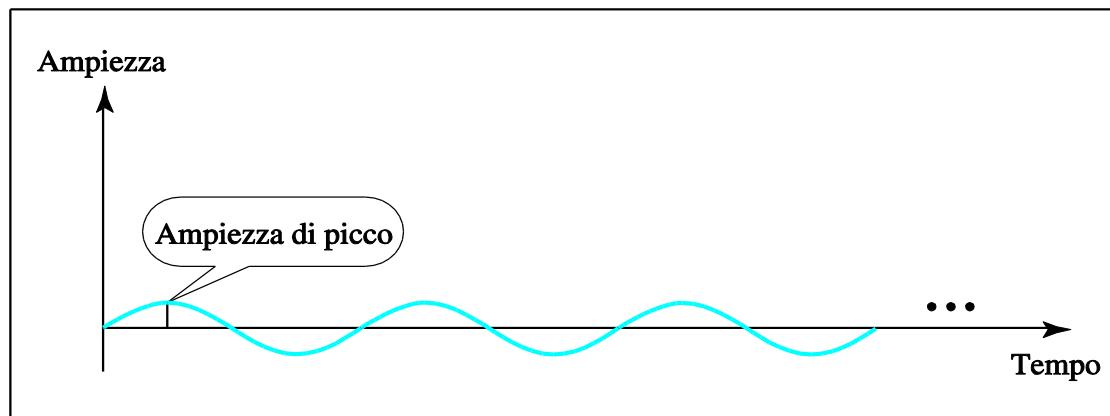
- Periodo
  - Tempo necessario affinché il segnale si ripeta
- Segnale aperiodico
  - Cambia senza una regolarità nel tempo

# Segnali sinusoidali

- Un segnale oscillante viaggia più a lungo della corrente diretta. Dunque nelle telecomunicazioni si utilizza un'onda sinusoidale.
- Ampiezza: valore assoluto dell'intensità massima



a. Segnale con ampiezza di picco grande



b. Segnale con ampiezza di picco piccola

# Segnali sinusoidali: periodo e frequenza

- Periodo e frequenza
  - Periodo: tempo necessario al segnale affinché si ripeta
  - Frequenza: numero di ripetizioni nell'unità di tempo

$$f=1/T$$

$$T=1/f$$

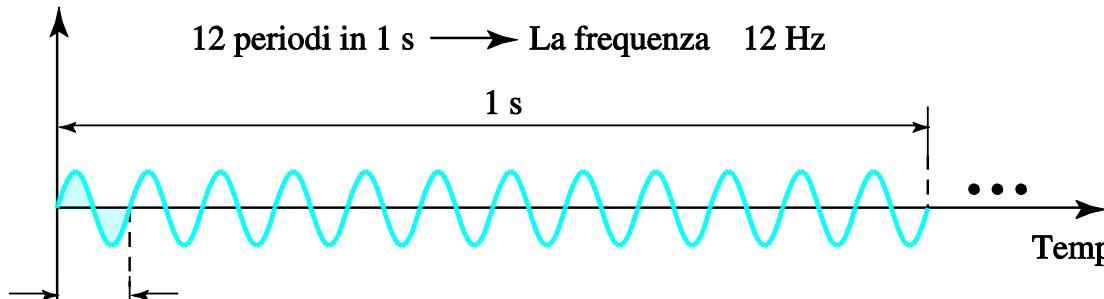
Tempo		Frequenza	
Unità	Equivalenti a	Unità	Equivalenti a
Secondi	1 s	Hertz (Hz)	1 Hz
Millisecondi (ms)	$10^{-3}$ s	Kilohertz (kHz)	$10^3$ Hz
Microsecondi ( $\mu$ s)	$10^{-6}$ s	Megahertz (MHz)	$10^6$ Hz
Nanosecondi (ns)	$10^{-9}$ s	Gigahertz (GHz)	$10^9$ Hz
Picosecondi (ps)	$10^{-12}$ s	Terahertz (THz)	$10^{12}$ Hz

# Segnali sinusoidali: periodo e frequenza

Aampiezza

12 periodi in 1 s → La frequenza 12 Hz

1 s

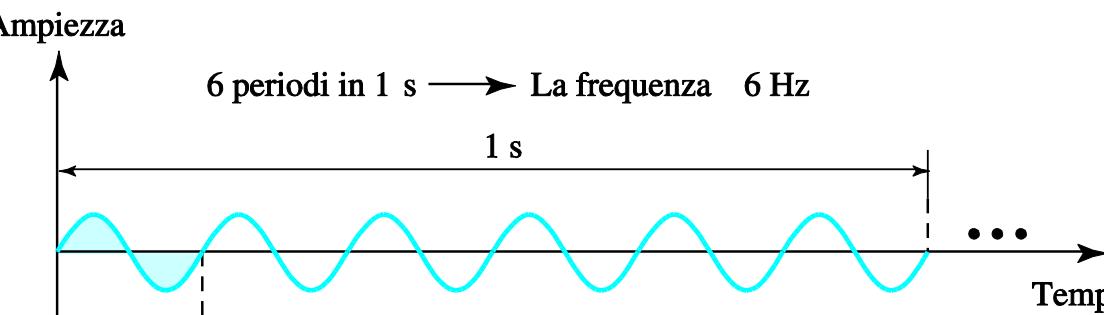


a. Un segnale con una frequenza di 12 Hz

Aampiezza

6 periodi in 1 s → La frequenza 6 Hz

1 s



b. Un segnale con una frequenza di 6 Hz

# Esempio: la corrente elettrica

- Corrente elettrica
  - onda sinusoidale
  - frequenza 50 Hz (60 negli Stati Uniti)
- Periodo

$$T = 1/f = 1/50\text{Hz} = 0.02 \text{ sec} = 0.02 \times 10^3 \text{ ms} = 20 \text{ ms}$$

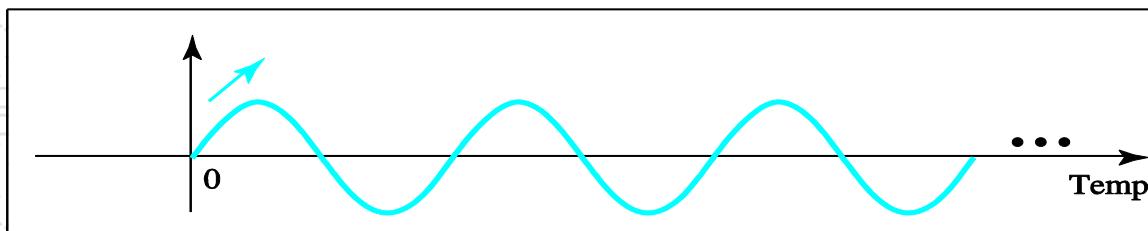
# Segnali sinusoidali: frequenza e velocità

- Frequenza e velocità
  - La frequenza è direttamente legata alla velocità di trasmissione
  - Segnale di 80 Hz è “più veloce” di un segnale di 40 Hz

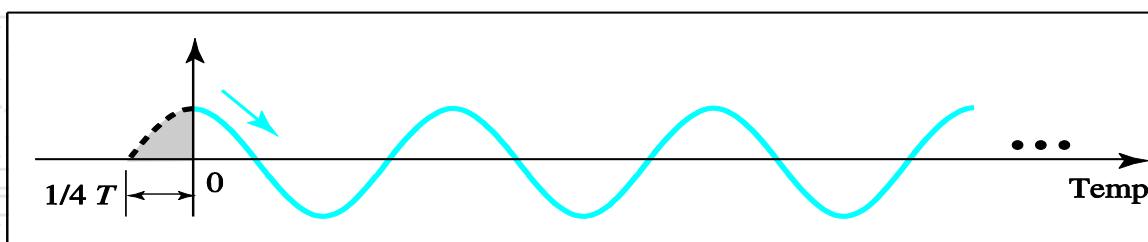
La frequenza è la velocità con cui un segnale cambia rispetto al tempo.  
Cambiamenti frequenti implicano una frequenza alta, cambiamenti lenti  
implicano una frequenza bassa

# Segnali sinusoidali: fase

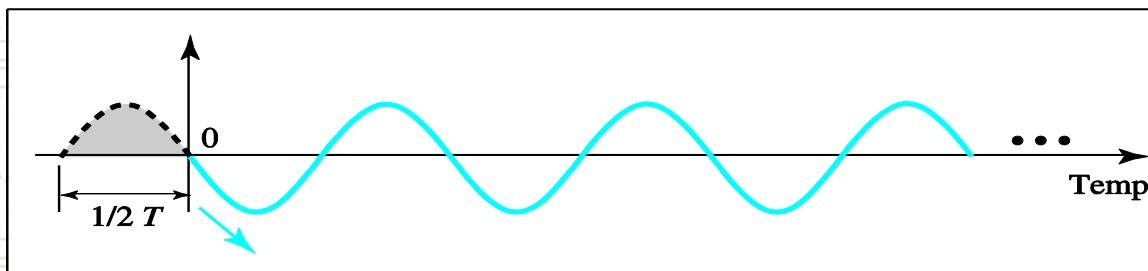
- La fase rappresenta la posizione angolare del segnale rispetto al tempo 0



a. 0 gradi



b. 90 gradi



c. 180 gradi

# Segnali sinusoidali: Lunghezza d'onda

- Lunghezza d'onda:

$$\lambda = c \times T = c/f$$

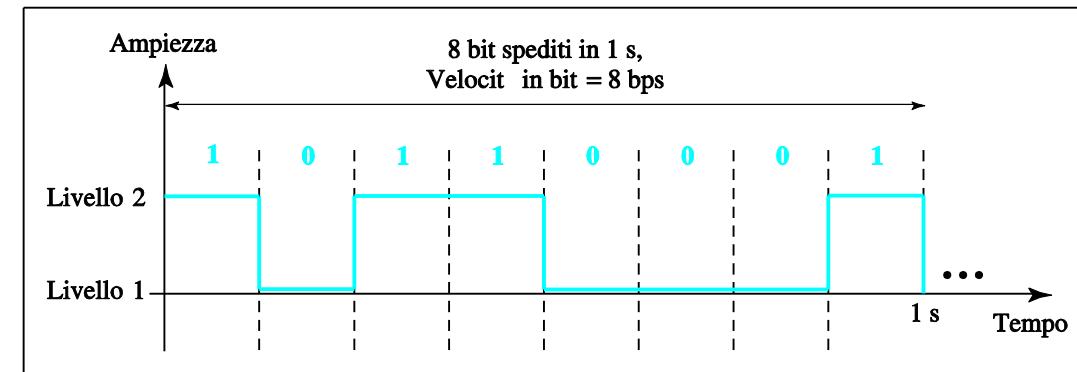
- Mette in relazione il periodo (o frequenza) con la velocità di propagazione  $c$  del segnale sul mezzo
- Quindi è funzione del mezzo (oltre che del segnale)
- Rappresenta la distanza (lo spazio) che un ciclo del segnale occupa sul mezzo trasmittivo

# Segnali digitali

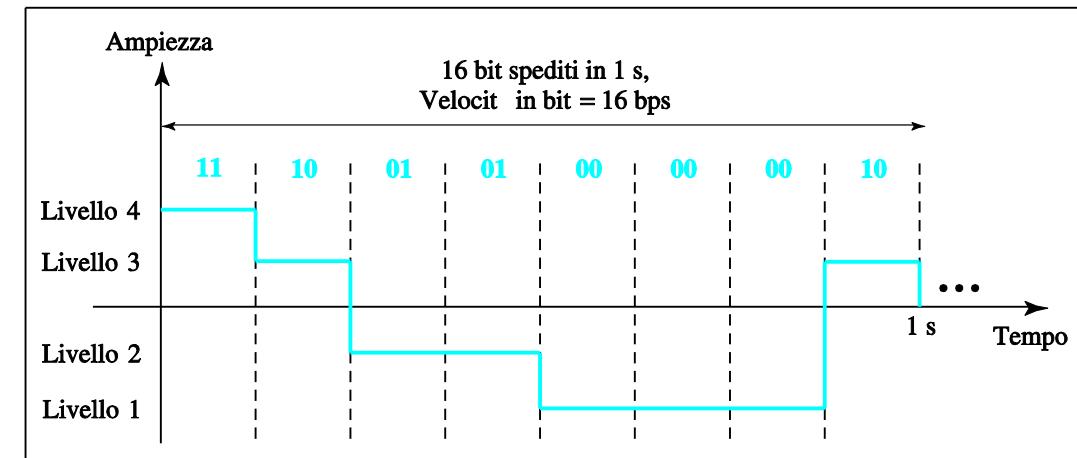
- Segnale digitale
  - Assume valori discreti
    - Es -5V, +5V
    - Es. -6V, -2V, +2V, +6V
- È facile rappresentare un bit con un segnale digitale
  - In generale se il segnale ha L livelli si possono facilmente rappresentare  $\log_2 L$  bit

# Segnali digitali

- Valori discreti si ottengono facendo variare, nel modo quanto più brusco possibile, il valore del segnale da un livello all'altro.
- Schemi ideali di segnale digitale sono ripostati nella figura accanto



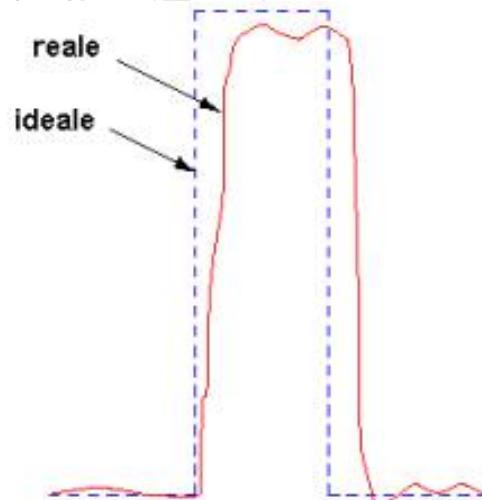
a. Segnale digitale con due livelli



b. Segnale digitale con quattro livelli

# Trasmissione segnali

- Il termine **trasmissione**, nel campo delle telecomunicazioni e dell'informatica, indica il processo e le modalità/tecniche finalizzate all'invio di informazione, tramite impulsi elettrici e **segnali** codificati, su un canale fisico di comunicazione da un mittente ad uno o più destinatari.
- L'aspetto di un segnale reale inviato si discosta parzialmente da quello ideale
  - Quando si invia un segnale, ad esempio elettrico, lungo un canale di comunicazione, esso viene ricevuto diverso dalla sua configurazione di partenza, infatti l'energia elettrica tende a dissiparsi con la distanza. Ciò può comportare un'interpretazione sbagliata o una perdita del segnale.



I principali fenomeni che caratterizzano il deterioramento del segnale in trasmissione sono:

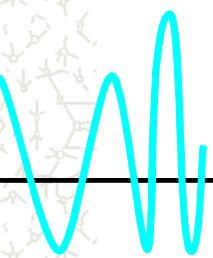
- **Attenuazione**
- **Distorsione**

# Deterioramento del segnale: attenuazione

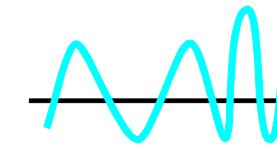
- Attenuazione

- Decibel  $\text{dB} = 10 \log_{10} P_2/P_1$

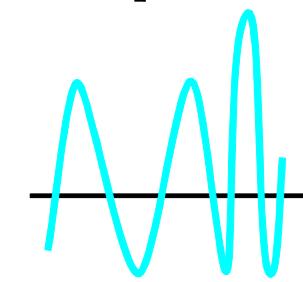
Originale



Attenuato



Amplificato



Punto 1

Mezzo di trasmissione

Punto 2

Amplificatore

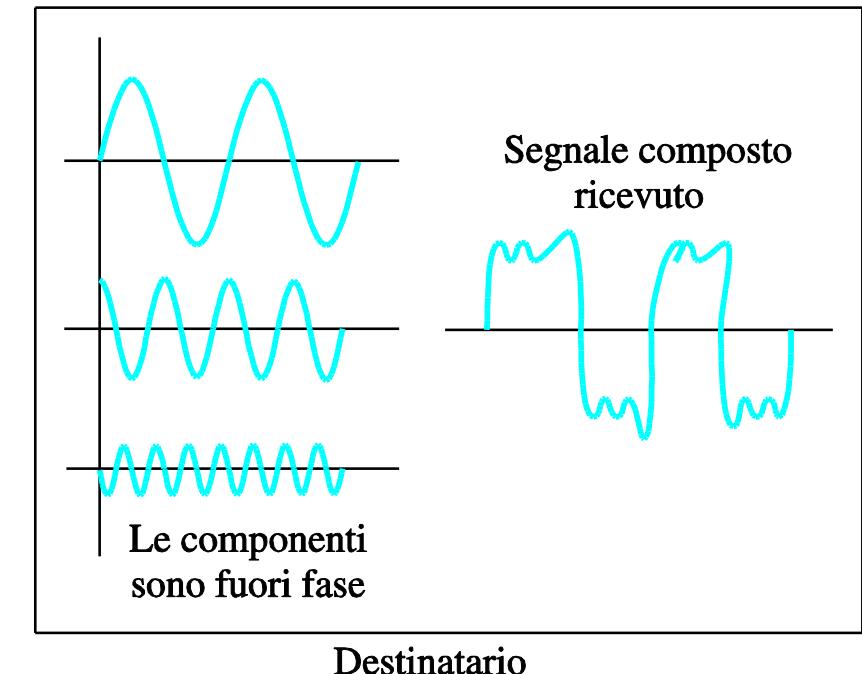
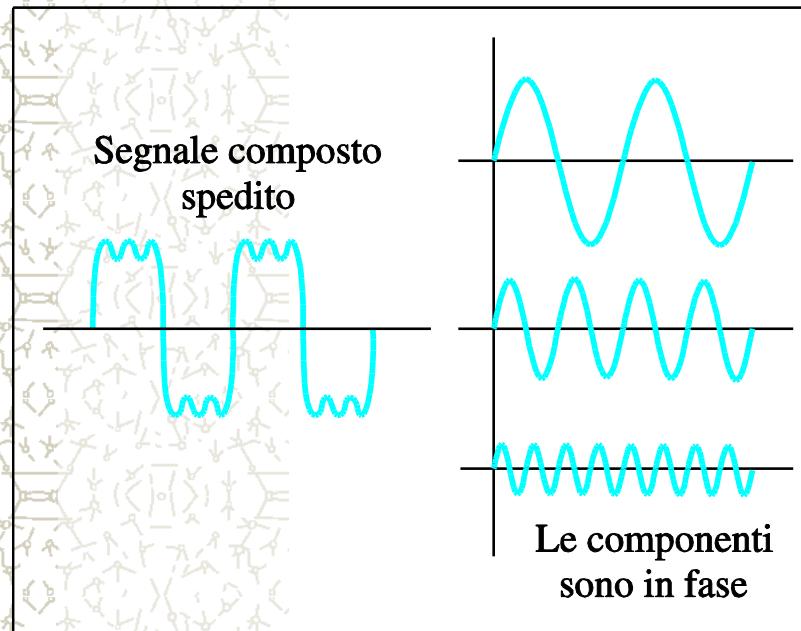
Punto 3

- Es.  $P_2=0.5 P_1$

- Differenza in decibel =  $10 \times (-0.3) = -3 \text{ dB}$

# Deterioramento del segnale: distorsione

- Distorsione
  - Cambiamento della forma del segnale
  - Differenti velocità di propagazione delle singole onde sinusoidali



# Serie di Fourier

All'inizio del XIX secolo Jean-Baptiste Fourier ha dimostrato che: *una funzione periodica  $y(t)$  è sviluppabile in una serie costituita da un termine costante  $A_0$  e da una somma di infinite sinusoidi:*

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega_0 t)$$

*le cui frequenze  $f_n$  sono multiple intere della frequenza fondamentale  $f_0 = \omega_0$  della funzione data:  $f_0 = \frac{1}{T}$        $f_n = n f_0$*

*e di ampiezze  $A_n$  e  $B_n$  (di sin e cos della n-esima armonica) calcolabili secondo le formule:*

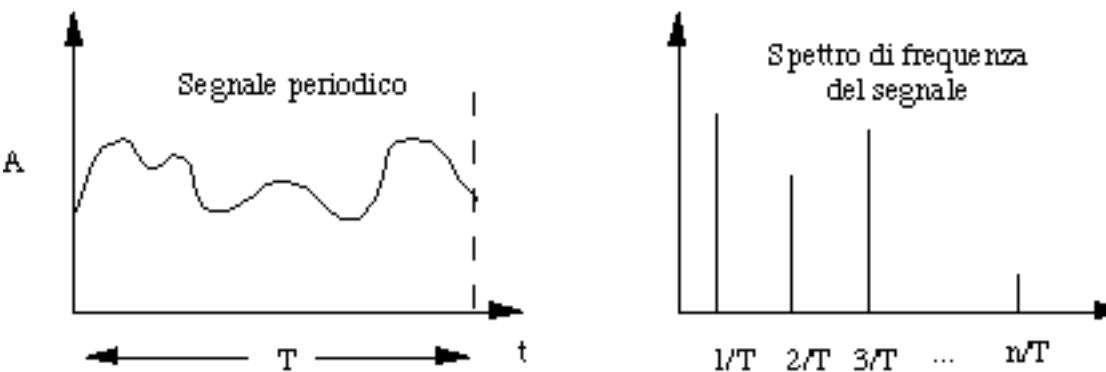
$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

# Serie di Fourier

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.



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.

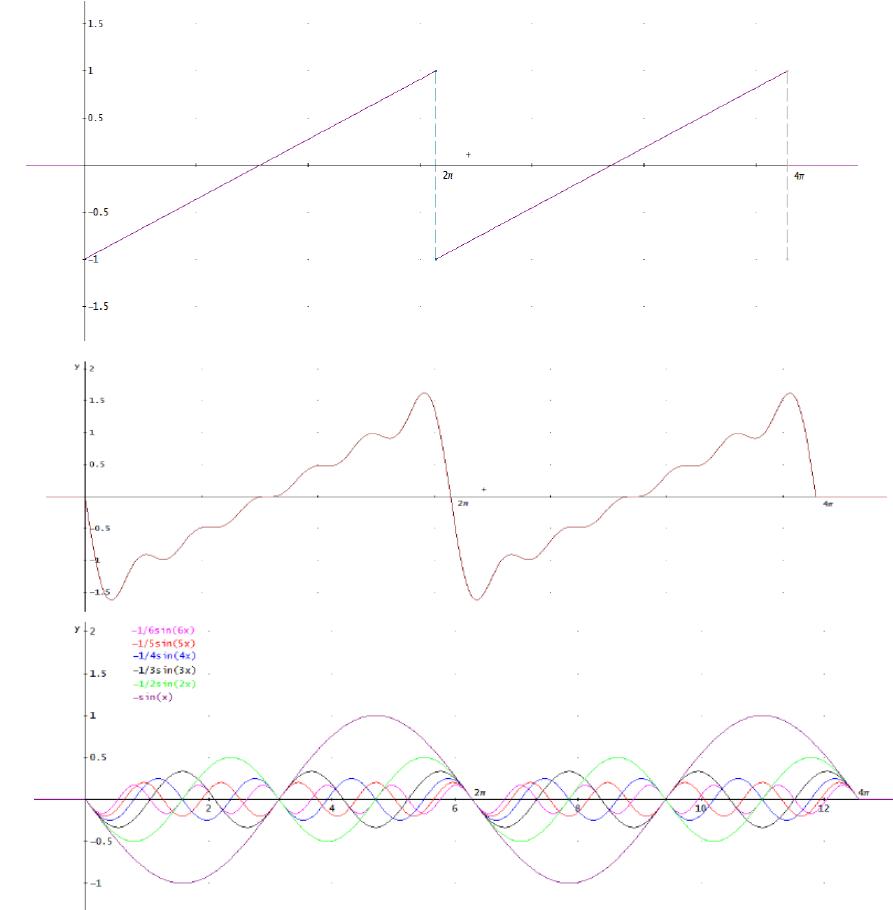
# Sviluppo in serie di Fourier

La classica funzione a  
“dente di sega”

Può essere approssimata  
con una curva del genere

Ottenuta sommando:

- $-1/6 \sin(6x)$
- $-1/5 \sin(5x)$
- $-1/4 \sin(4x)$
- $-1/3 \sin(3x)$
- $-1/2 \sin(2x)$
- $-\sin(x)$

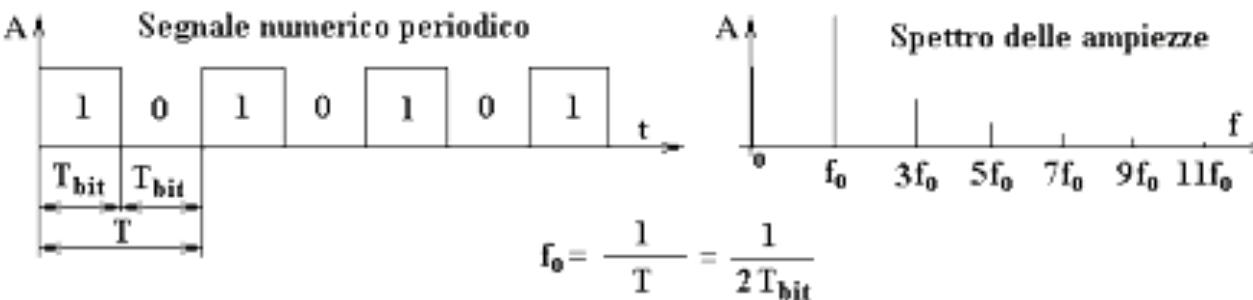


Diversi fattori influenzano le caratteristiche della banda di un segnale:

- 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.

# Lo spettro di un segnale

Un segnale numerico di periodo  $T$  può essere sviluppato in serie di **Fourier** in una somma di infinite sinusoidi di ampiezza variabile.



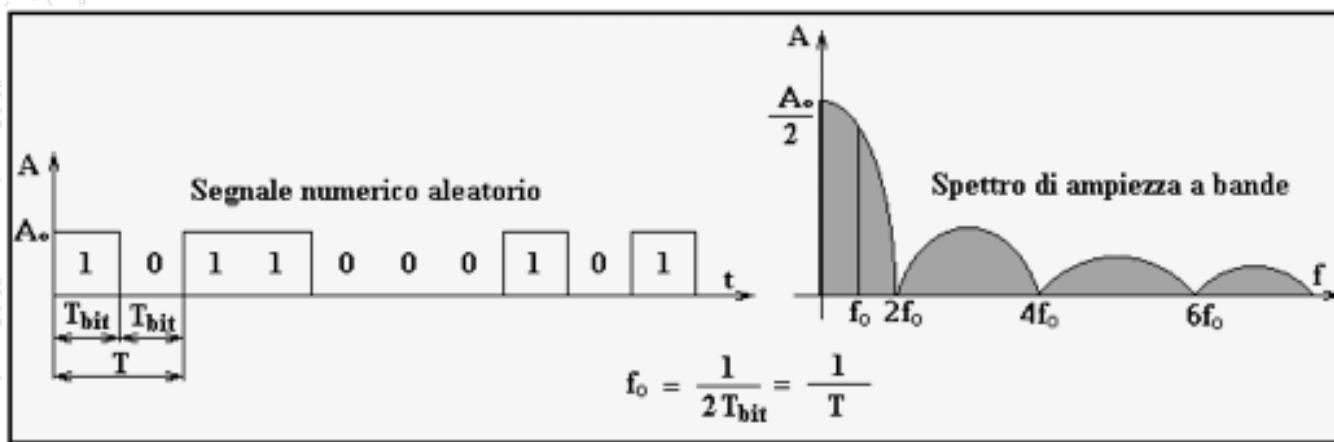
In questo, la frequenza  $f_0$  è uguale a:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot T_{bit}}$$

- I quadrati delle ampiezze sono proporzionali all'energia trasmessa alla frequenza corrispondente.
- Nel mezzo trasmittivo parte dell'energia si perde. Se tutte le componenti fossero attenuate in modo uniforme il segnale risulterebbe ridotto in ampiezza ma avrebbe la stessa forma.
- Ciò non è e il segnale viene distorto

# Lo spettro di un segnale

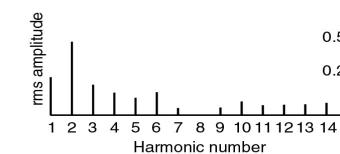
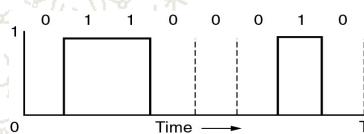
Lo studio dello sviluppo in serie e dell'integrale di **FOURIER**, però, ci dice che lo spettro di un segnale **ALEATORIO**, costituito da impulsi discreti rettangolari, comprende la componente continua e larghezza di banda teoricamente infinita



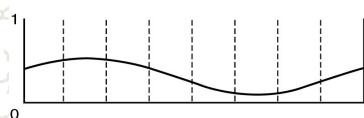
Un segnale numerico aleatorio si sviluppa secondo uno spettro a bande

# Serie di Fourier

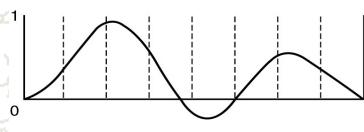
Le componenti di Fourier del segnale o armoniche vengono attenuate in maniera differente dal mezzo trasmittivo:



(a)



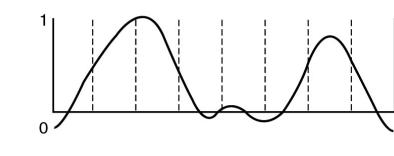
(b)



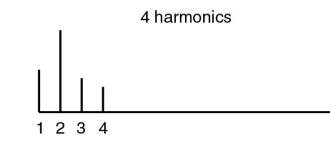
(c)



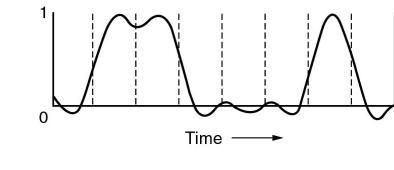
2 harmonics



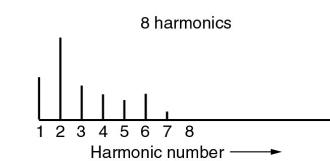
(d)



4 harmonics



(e)

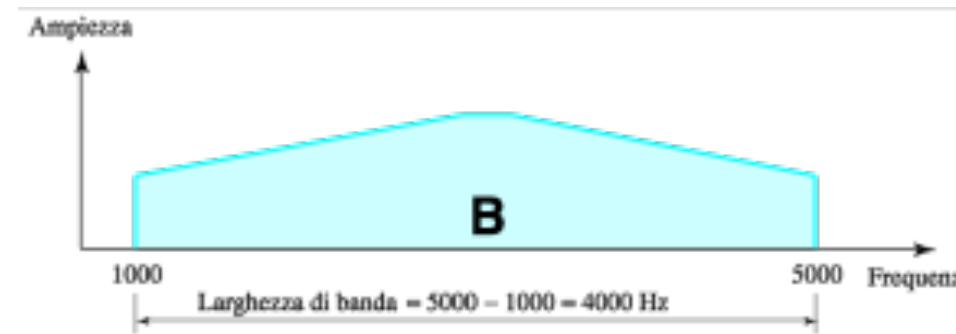


8 harmonics

- I mezzi fisici sono caratterizzati da una **banda passante**: l'intervallo di frequenze che il mezzo fisico è in grado di trasmettere senza alterarle oltre certi limiti.

# Larghezza di banda di un canale

- Ogni canale trasmittivo di norma consente il passaggio solo di alcune componenti in frequenza del segnale ed escludendone altre
- Si comporta di fatto come un filtro passa-banda
- E' definita pertanto larghezza di banda **B** l'insieme delle frequenze che un canale di telecomunicazioni fa passare.



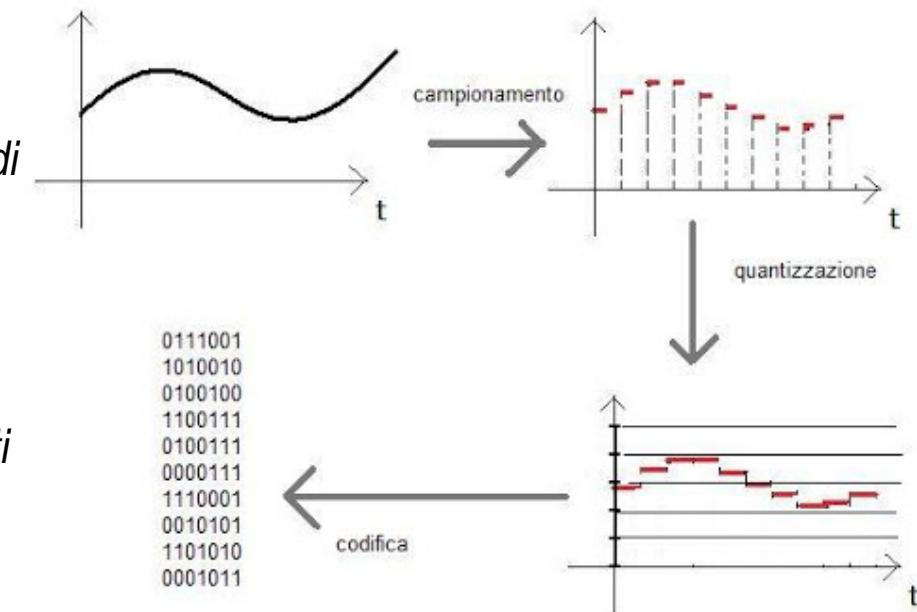
- Perché un segnale sia ricevuto come è stato trasmesso, è necessario che la banda passante sia uguale o più ampia della banda di frequenza del segnale stesso.
- Altrimenti, il segnale viene privato di alcune delle sue armoniche, e viene quindi distorto, cioè alterato. Se un numero sufficiente di armoniche arriva a destinazione, il segnale è comunque utilizzabile.

# I Segnali Campionati e Quantizzati

- Alcuni segnali sono intrinsecamente discreti, ad esempio le quotazioni di borsa, definite ad intervalli di tempo regolari, oppure i numeri derivanti dalle estrazioni del lotto, oppure le misure di temperatura fatte ad intervalli di tempo discreti.
- Sono anche discreti i segnali ottenuti dal campionamento nel tempo di segnali continui, ad esempio, riferendoci al caso dei segnali acustici. In tal caso il segnale discreto si può ottenere dai campioni del segnale continuo prelevati ad intervallo di tempo costante (campionamento uniforme).

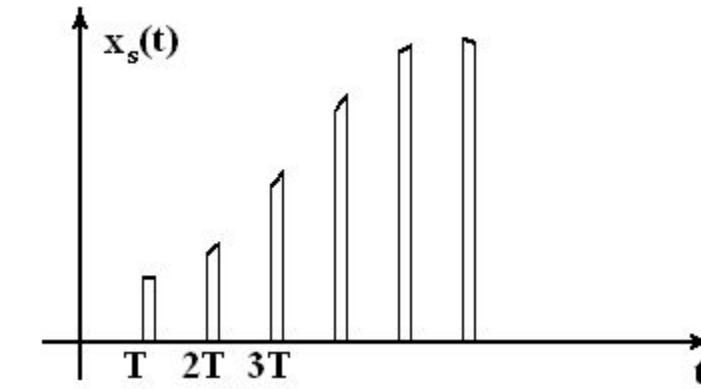
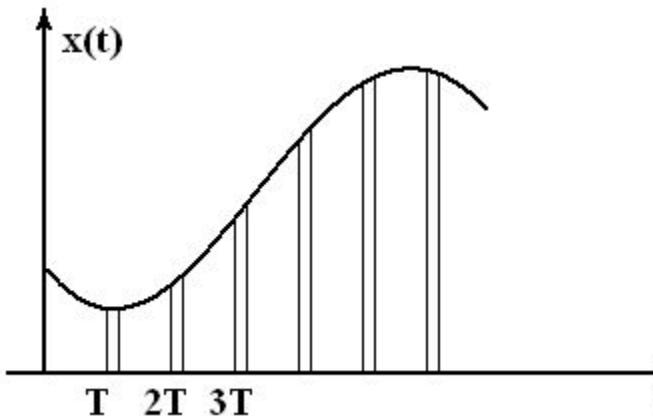
- Un segnale, sia a tempo discreto che a tempo continuo è un numero reale, quindi definito con continuità, eventualmente in un determinato intervallo di valori.

- Se però questi segnali vanno immagazzinati in un computer o elaborati con apparecchiature digitali allora essi vanno discretizzati (quantizzazione). Questa volta è discreto il valore che i segnali possono assumere.



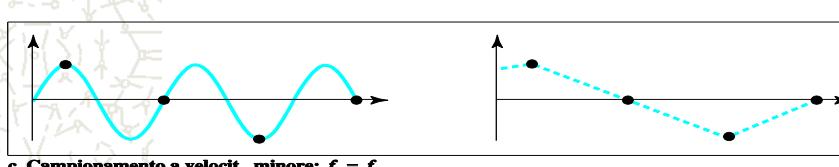
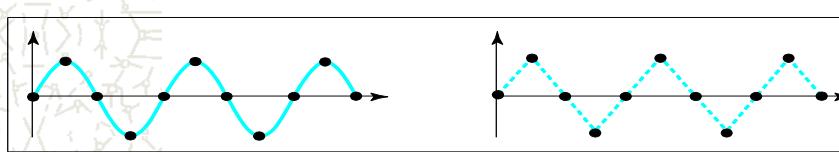
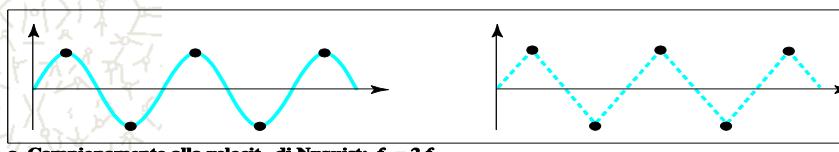
# Il campionamento

- Per convertire un segnale continuo nel tempo in un segnale discreto, ne valutiamo l'ampiezza a intervalli di tempo regolari o **campioni**
- Il problema da affrontare e': con **quale frequenza** si deve campionare il segnale per poterlo **ricostruire** a partire dal segnale campionato?



# Teorema del campionamento

- Nel 1924 H. Nyquist dimostrò che un segnale a larghezza di banda  $B$  può essere ricostruito perfettamente campionando lo stesso al doppio della larghezza di banda, quindi a partire da  $2B$  campioni del segnale stesso.
- IL teorema del campionamento (o teorema di Nyquist) afferma che: **dato un segnale  $x(t)$  a banda limitata  $B$ , si puo' ricostruire completamente il segnale a partire da un campionamento del segnale se la frequenza di campionamento e'  $F \geq 2B$**
- In generale la frequenza di campionamento dovrà essere almeno leggermente superiore a  $2B$ , per disporre di un intervallo utile (banda di guardia) al fine di prevenire che effetti di non idealità dei filtri taglino parti utili del segnale



# Capacità del mezzo

Con l'ausilio di questa relazione riuscì a stabilire che considerando di usare un numero  $V$  di livelli trasmissivi equiprobabili, dato che la quantità di informazione associata è esprimibile come  $Q = \log_2 V$ , allora la massima quantità di informazione trasmessa in un canale non rumoroso, dato un segnale costituito da  $V$  livelli, è di  $2BQ$  cioè:

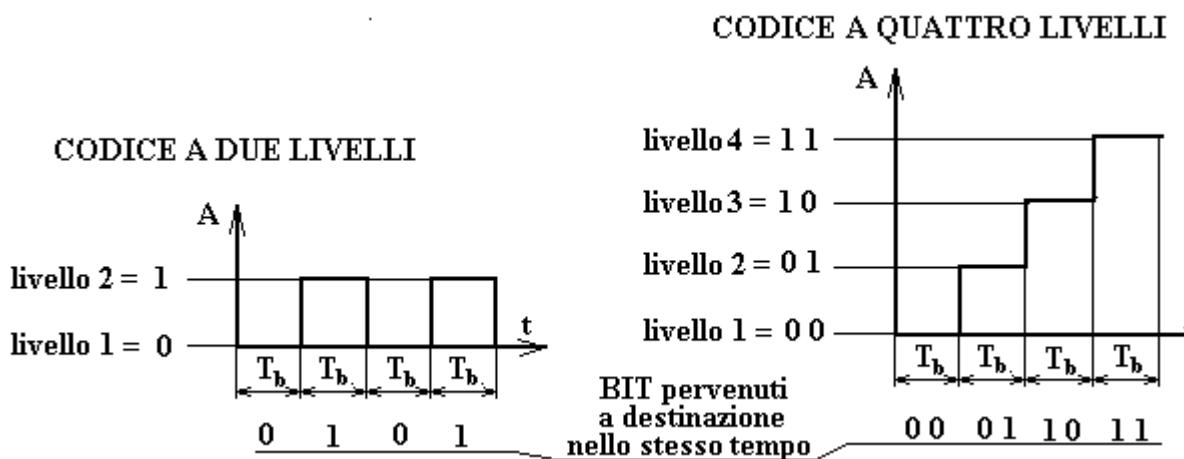
$$I[\text{bit/s}] = 2B \log_2 V$$

Il teorema del campionamento e' sostanzialmente la stessa cosa della legge sulla massima capacita' di un canale privo di rumore:

- se il livello del segnale segnale trasmesso rappresenta una sequenza di simboli, la massima capacita' di trasferimento la otteniamo quando ogni campione identifica un simbolo
- ne segue che al massimo siamo in grado di identificare  $2B$  simboli

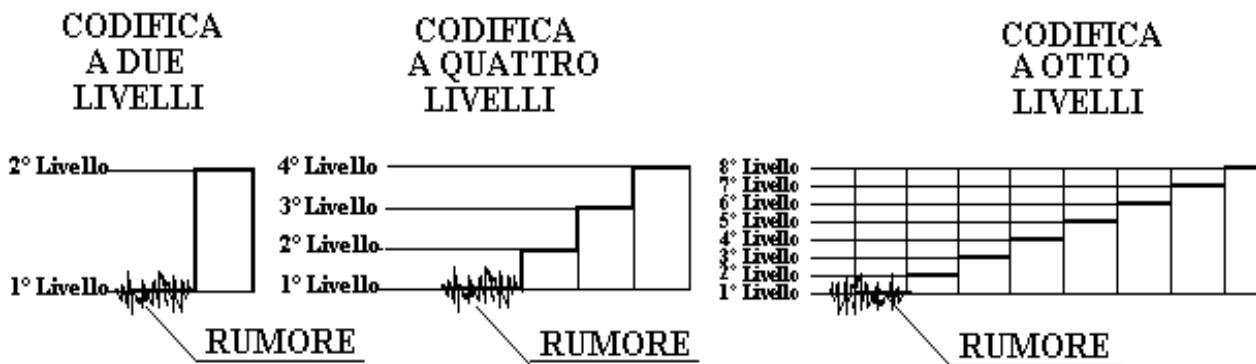
# Capacità del mezzo (continua)

Usando un codice in cui si trasmettono quattro livelli diversi di tensione invece di due, per ogni livello in arrivo l'informazione sarà di due bit e non di uno solo e poiché il tempo di arrivo di un livello di tensione è sempre lo stesso, perché determinato dallo stesso criterio di **NYQUIST**, otterremo che, mentre la velocità di modulazione rimane la stessa, la velocità di trasmissione invece raddoppia.



# Capacità del mezzo (continua)

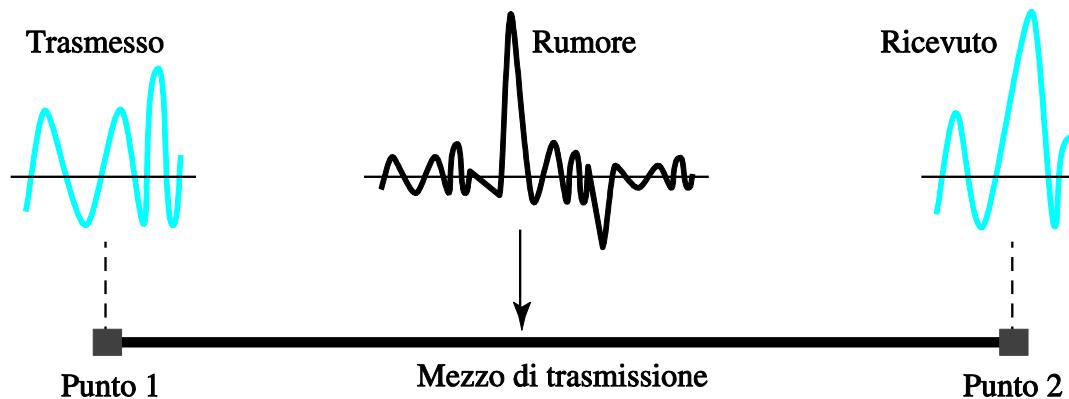
Aumentando il numero dei livelli di tensione, è possibile aumentare la quantità di informazione che va a destinazione nello stesso tempo. Ma aumentare il numero dei livelli, a parità di tensione massima, comporta che il singolo livello diventa sempre più piccolo, finché in ricezione non sia più distinguibile dal rumore, sempre presente, come indicato nel disegno seguente in cui si fa un esempio di codifica a 2, 4 e 8 livelli.



Esiste comunque un limite massimo all'aumento dei livelli definito, analiticamente da una formula determinata da **C. SHANNON**

# Il Rumore

- Il rumore è una forma di energia indesiderata che si somma al segnale utile degradandone il contenuto informativo, ed impedendo così di rilevare, in ricezione, tutto l'insieme delle informazioni trasmesse.



- SNR: Rapporto segnale-rumore
  - $\text{SNR} = (\text{potenza segnale}) / (\text{potenza rumore})$
  - $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \text{SNR}$

$$\begin{aligned}\text{Potenza del segnale} &= 10 \text{ mW} \\ \text{SNR} &= 10000 \mu\text{W} / 1 \mu\text{W} = 10000\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Potenza del rumore} &= 1 \mu\text{W} \\ \text{SNR}_{\text{dB}} &= 10 \log_{10} 10000 = 40\end{aligned}$$

# Il Rumore

- Esistono vari tipi di rumore che interessano il campo dell'Elettronica e delle Telecomunicazioni e che si schematizzano come segue:
  - **Rumore bianco** - *Forma di rumore il cui spettro comprende energia a tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico ed equamente distribuita.*
  - **Rumore di intermodulazione** - *Rumore prodotto dalla non linearità dei dispositivi elettronici e che consiste nella presenza, nel segnale in uscita dal dispositivo, di armoniche indesiderate non presenti nel segnale in ingresso.*
  - **Rumore di modo comune** o *di modo normale* - *Rumore presente in ingresso ad uno strumento di misura insieme al segnale da misurare e non separabile da questo.*
  - **Rumore di quantizzazione** - *Perdita di informazione che ha luogo durante la trasformazione di un segnale analogico in digitale, ad esempio nel P.C.M.*
  - **Rumore termico** - *Rumore dovuto all'agitazione termica degli elettroni presenti in una resistenza. È funzione della temperatura ma è anche un rumore bianco.*

# Capacità del mezzo (continua)

Nel 1948 C. Shannon estese il lavoro di Nyquist a canali soggetti a rumore casuale (termico).

Se indichiamo con  $S$  la potenza del segnale e con  $N$  la potenza del rumore, la massima informazione trasmessa è:

$$I[\text{bit/s}] = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

In questa formula, **C** è detta **CAPACITÀ DI CANALE**, si misura in **BIT AL SECONDO**, ed indica la massima velocità teorica di trasmissione dei bit oltre la quale in ricezione essi vengono confusi con il rumore; quindi, in un canale telefonico banda di circa 3 KHz, il rapporto S/N è di circa 30 dB (cioè  $10 \log_{10} 1000 = 30$  dB), allora la quantità massima di bit trasmessi è di circa 33.000 bps.

# Commenti alla legge di Shannon

- Secondo la relazione vista, sembrerebbe possibile aumentare il **tasso** di trasferimento dati aumentando il **livello** del segnale
- Questo e' vero, ma come gia' osservato l'aumento del livello del segnale comporta l'aumento di effetti come la non linearita' che vanno ad **accrescere** il tasso di errore in ricezione
- Quindi effettivamente la limitazione di banda costituisce un **limite** alla velocita' di trasferimento dei bit
- A parità di mezzo utilizzato, tanto più è corto il canale di trasmissione tanto più è alto il numero di bit/secondo raggiungibile;
- La trasmissione digitale è più critica di quella analogica (genera frequenze più alte), ma può essere più facilmente "rigenerata" lungo il percorso .

# Prestazioni di una rete

- Larghezza di banda
- Throughput
- Latenza (ritardo)
- Prodotto banda-ritardo
- Jitter

# Larghezza di banda

- Larghezza di banda in hertz
  - Si riferisce alla larghezza di banda delle frequenze utilizzate per la trasmissione
    - Linea telefonica tipica: 4 kHz
- Larghezza di banda in bps
  - Velocità alla quale possiamo spedire bit
    - Ethernet tipica: 100 Mbps
- Ovviamente sono direttamente collegate
  - La relazione dipende dal tipo di trasmissione

# Throughput

- Misura quanto velocemente possiamo spedire i dati su una rete
  - Diverso dalla larghezza di banda perché il throughput è una misura effettiva

Una rete con larghezza di banda di 10 Mbps riesce a trasferire in media solo 12000 frame al minuto. Ognuno dei frame contiene in media 1000 bit. Quale è il throughput?

$$\text{Throughput} = (12000 \times 1000) \text{ bit} / 60 \text{ s} = 2 \text{ Mbps}$$

# Latenza (ritardo)

- Misura quanto tempo occorre a trasferire un intero messaggio
  - Tempo misurato dal primo bit spedito all'ultimo bit arrivato
- Latenza
  - Tempo di trasmissione
  - Tempo di propagazione
  - Tempo di attesa
  - Tempo di inoltro

# Latenza

- Tempo di trasmissione
  - Tempo per immettere i dati sul mezzo
    - $T_T = \text{dimensione dati}/\text{larghezza di banda}$
- Tempo di propagazione
  - Tempo necessario al segnale per propagarsi sul mezzo trasmissivo
    - $T_p = \text{distanza}/\text{velocità di propagazione del segnale}$
- Tempo di attesa ed inoltro
  - Attesa nei nodi intermedi
  - Tempo necessario al nodo intermedio per smistare il messaggio

# Latenza

Quali sono i tempi di propagazione e di trasmissione per un messaggio di 2.5 kB (ad es. un email) se la larghezza di banda della rete è di 1 Gbps? Si assuma che la distanza fra mittente e destinatario sia di 12000 Km e che la velocità di propagazione del segnale sia di  $2.4 \times 10^8$  m/s.

$$\text{Tempo di propagazione} = (12000 \times 1000) / (2.4 \times 10^8) = 50\text{ms}$$

$$\text{Tempo di trasmissione} = (2500 \times 8) / 10^9 = 0.02\text{ ms}$$

Quale è la latenza totale se il tempo di attesa è di 10 ms e quello di inoltro di 0.08 ms?

$$\text{Latenza totale} = 50\text{ ms} + 0.02\text{ ms} + 10\text{ ms} + 0.08\text{ ms} = 70\text{ ms}$$

# Prodotto banda-ritardo

- Prodotto larghezza di banda per latenza (ritardo)
  - Ulteriore misura importante

Mittente



Larghezza di banda: 1 bps Ritardo: 5 s  
 $\text{Larghezza di banda} \times \text{ritardo} = 5 \text{ bit}$

Dopo 1 s

1° bit



1° bit

Dopo 2 s

2° bit

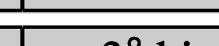


Dopo 3 s

3° bit

2° bit

1° bit



Dopo 4 s

4° bit

3° bit

2° bit

1° bit



Dopo 5 s

5° bit

4° bit

3° bit

2° bit

1° bit



1° bit



1° bit



1° bit



1° bit



1° bit

1 s

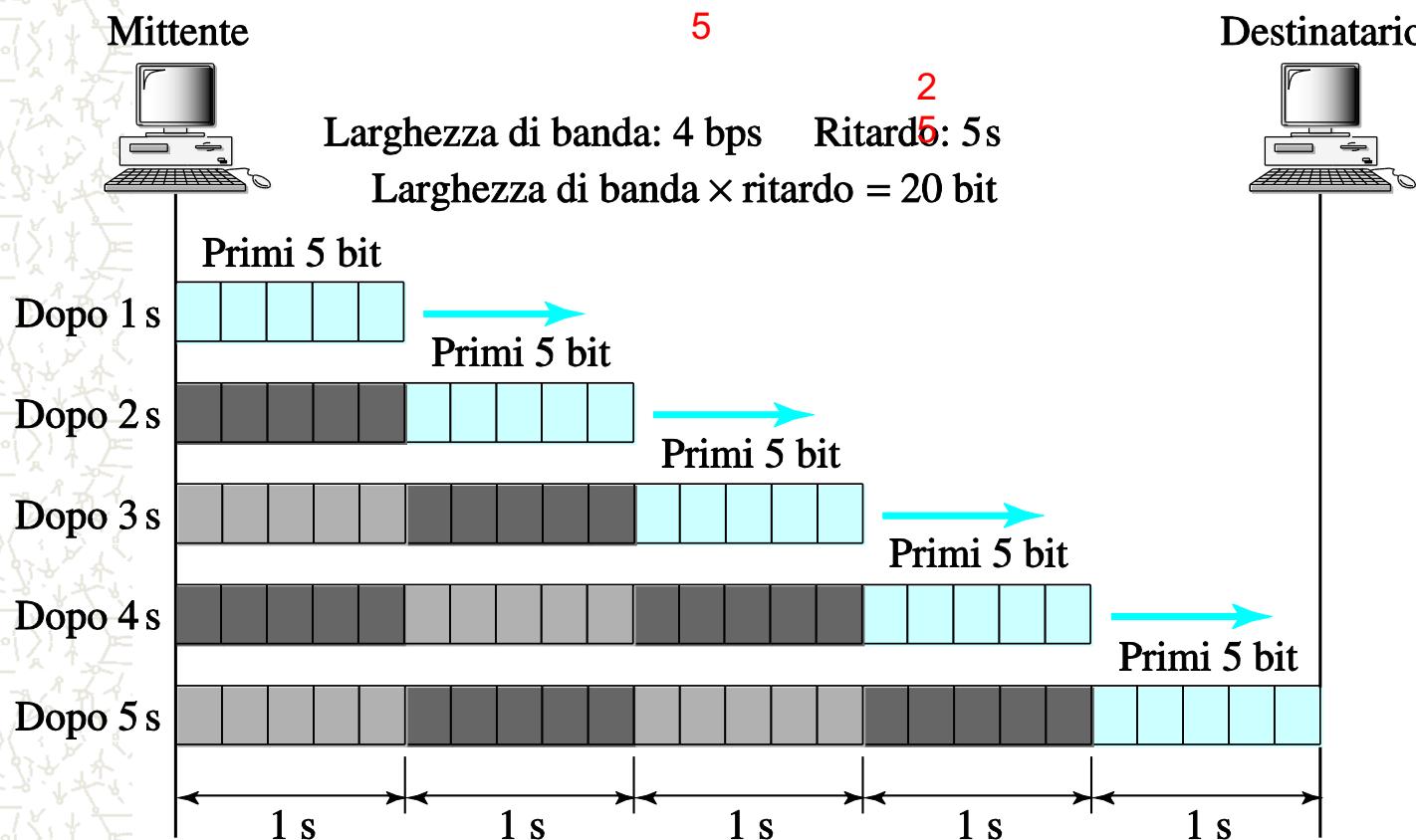
1 s

1 s

1 s

1 s

# Prodotto banda-ritardo



Il prodotto larghezza di banda per ritardo definisce il numero di bit che servono per riempire il canale

# Jitter

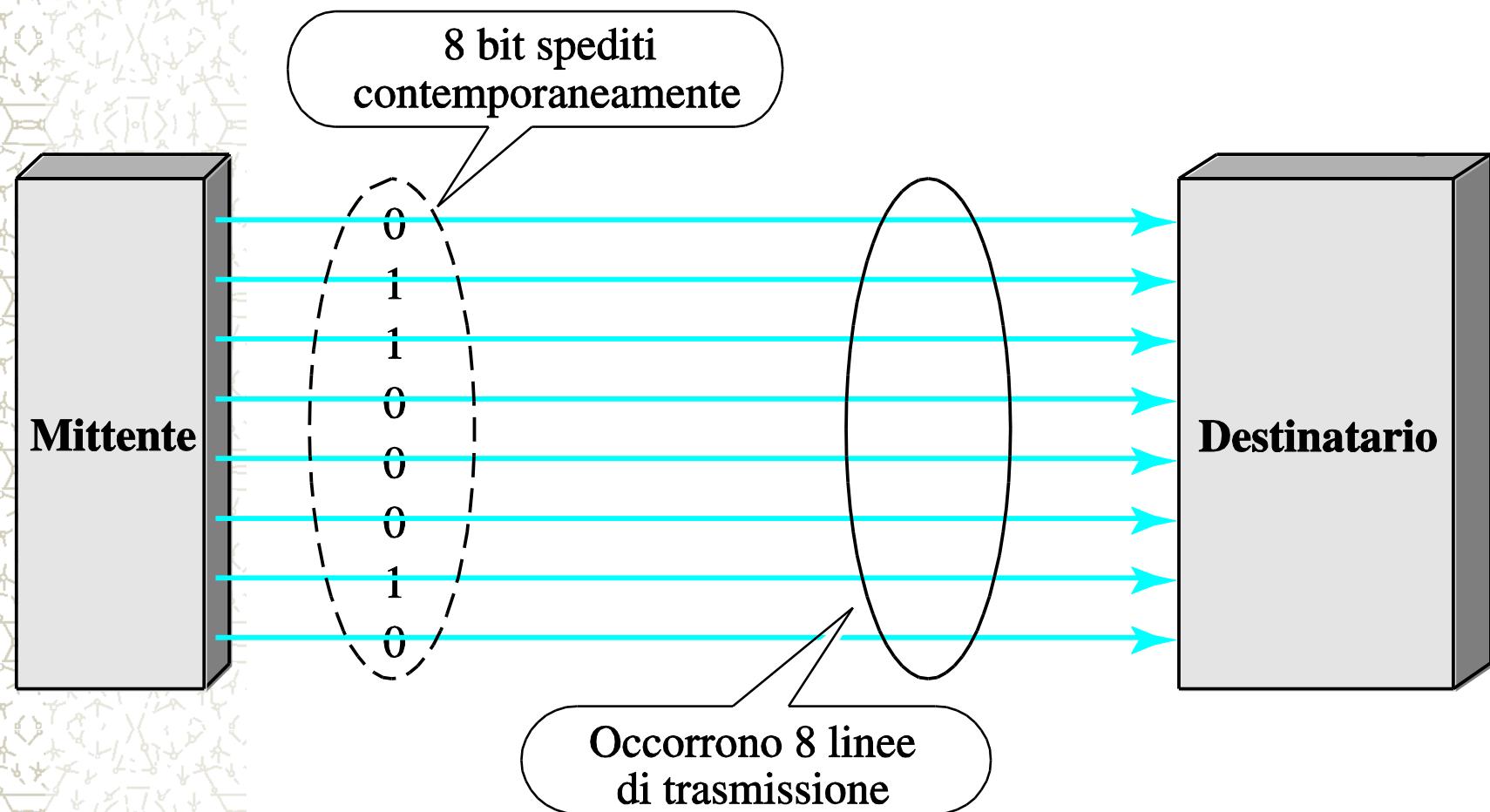
- Jitter
  - Variabilità del ritardo
- Mittente spedisce 4 pacchetti di dati
  - Primo pacchetto: arriva dopo 20 ms
  - Secondo pacchetto: arriva dopo 45 ms
  - Terzo pacchetto: arriva dopo 70 ms
  - Quarto pacchetto: arriva dopo 40 ms

# Trasmissione dei segnali

- La trasmissione dei segnali e' detta **analogica** se il segnale viene trasmesso **senza curarsi del suo significato**
  - in questo caso la trasmissione si limita a **recapitare il segnale**, eventualmente **amplificandolo in intensita'** quando necessario
- la trasmissione digitale tiene conto del **contenuto** dei dati se si deve intervenire per **amplificare il segnale**
  - il segnale non viene semplicemente amplificato, ma viene **interpretato**, si estrae il contenuto informativo e si **rigenera il segnale** tramite apparati detti ripetitori
  - questo puo' essere fatto **a prescindere dal tipo di segnale** (numerico o analogico), che a sua volta **puo' rappresentare** dati analogici o numerici
- vantaggi della trasmissione digitale:
  - **immunita' maggiore** alla alterazione dei dati verso lunghe distanze
  - **omogeneizzazione** della trasmissione per **diverse tipologie** di dato
  - **sicurezza** e riservatezza
- svantaggi della trasmissione digitale
  - costi superiori
  - maggiore complessita' dell'elettronica
  - richiede rinnovo di infrastrutture gia' esistenti

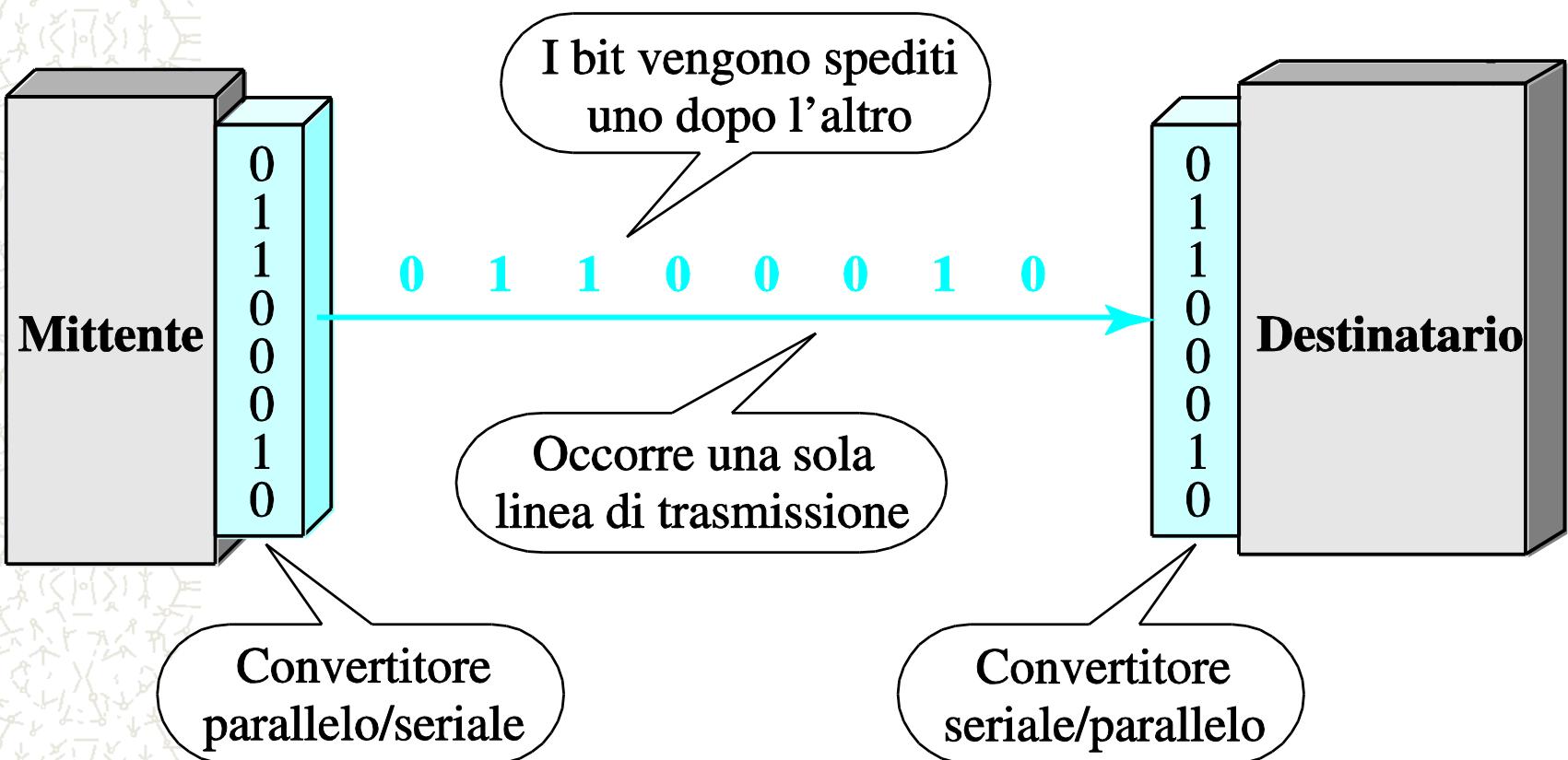
# Trasmissione parallela

- Dati spediti contemporaneamente



# Trasmissione seriale

- Dati spediti uno dopo l'altro



# Trasmissione in banda base e modulata

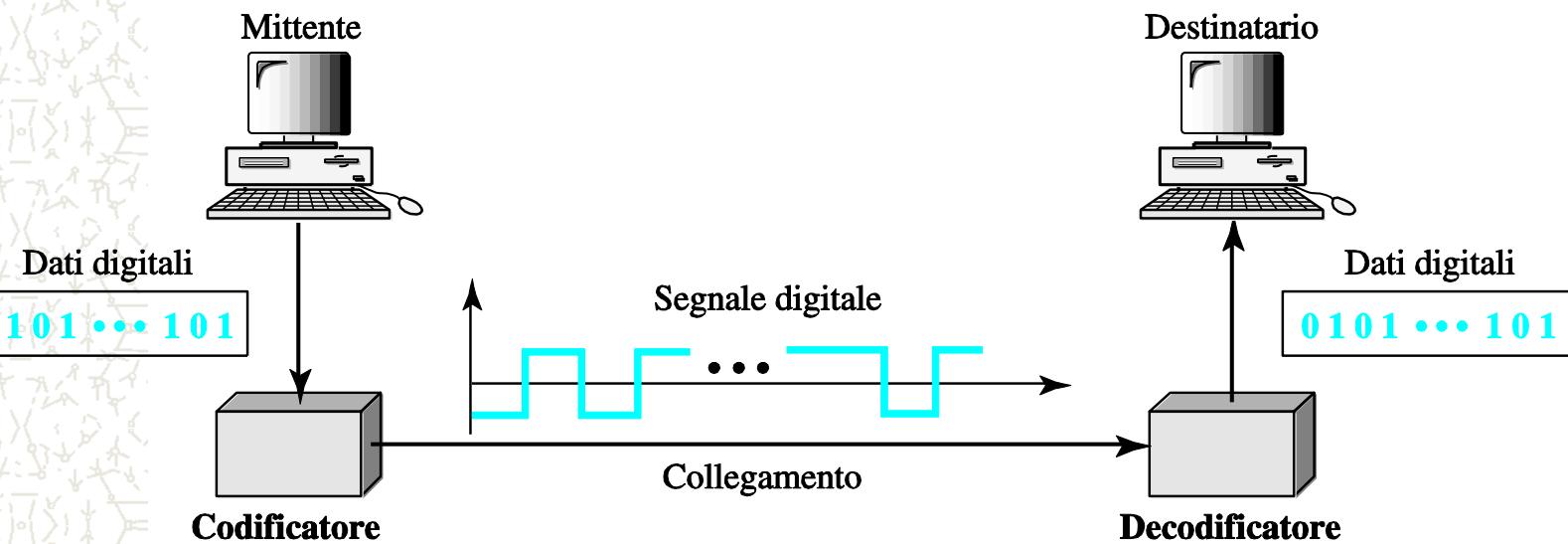
- Una volta generato il segnale da trasmettere, questo puo' essere **immesso direttamente** sul canale; in questo caso si parla di trasmissione in **banda base**: il segnale che trasporta le informazioni ed il segnale sulla linea sono **identici**
- Vi sono diverse circostanze che rendono **opportuno** trasmettere il segnale in modo che occupi una **banda differente** di frequenze; questo tipo di trasmissione si realizza tramite un processo di **modulazione**

# Codifica dei dati numerici

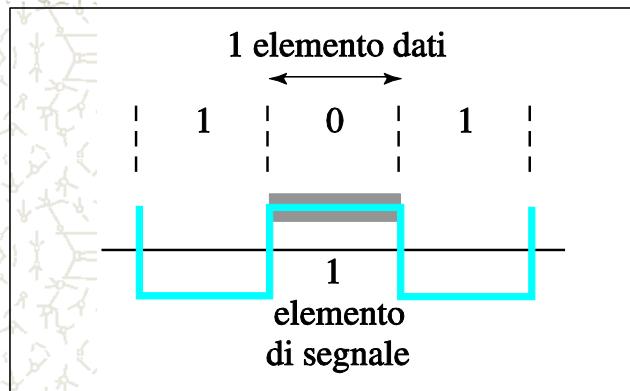
- La rappresentazione di dati numerici con segnali numerici e' normalmente fatta tramite **sequenze di impulsi discreti** di tensione di una certa durata temporale.
- Il dato binario e' **codificato** in modo da far corrispondere al **valore di un bit** un determinato **livello del segnale**
- Il ricevitore deve sapere **quando inizia e finisce il bit**, leggere il valore del segnale **al momento giusto**, determinare il **valore del bit** in base alla codifica utilizzata
- La migliore valutazione si ottiene **campionando il segnale al tempo corrispondente a meta' bit**

# Codifica di linea

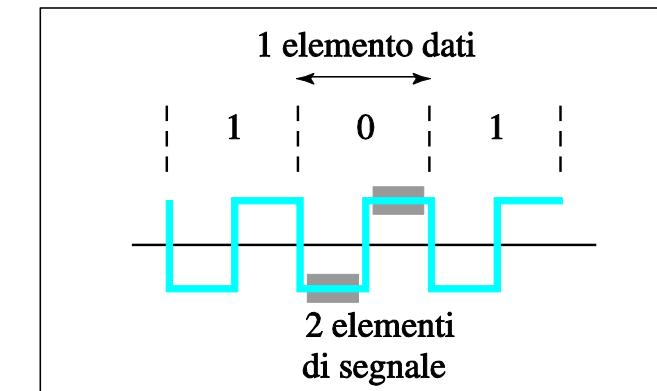
- Codifica di linea
  - Regole per associare i valori dei bit agli elementi del segnale
- Elemento dei dati
  - Bit, valore 0 e 1
- Elemento del segnale
  - È il più piccolo elemento del segnale che possiamo utilizzare
- Rapporto r
  - $r =$  numero di bit rappresentati da un elemento del segnale



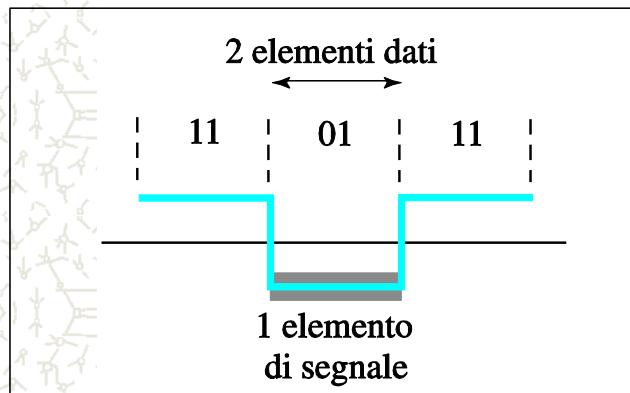
# Elementi dati e elementi segnale



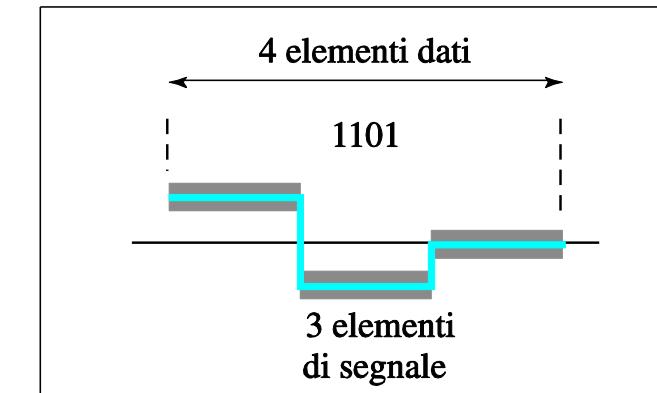
a. Un elemento dati viene codificato da un elemento di segnale ( $r = 1$ )



b. Un elemento dati viene codificato da due elementi di segnale ( $r = \frac{1}{2}$ )



c. Due elementi dati vengono codificati da un elemento di segnale ( $r = 2$ )



d. Quattro elementi dati vengono codificati da tre elementi di segnale ( $r = \frac{4}{3}$ )

# Velocità

- Velocità dei dati: N
  - Numero di bit che si possono spedire in 1 s
  - Unità di misura: bps (bit per secondo)
- Velocità del segnale: S
  - Numero di elementi di segnale che si possono spedire in 1 s
  - Unità di misura: baud

$$S = c \times N \times 1/r \text{ baud}$$

c è un fattore che dipende dal caso (medio, pessimo, migliore)

# Caratteristiche delle codifiche

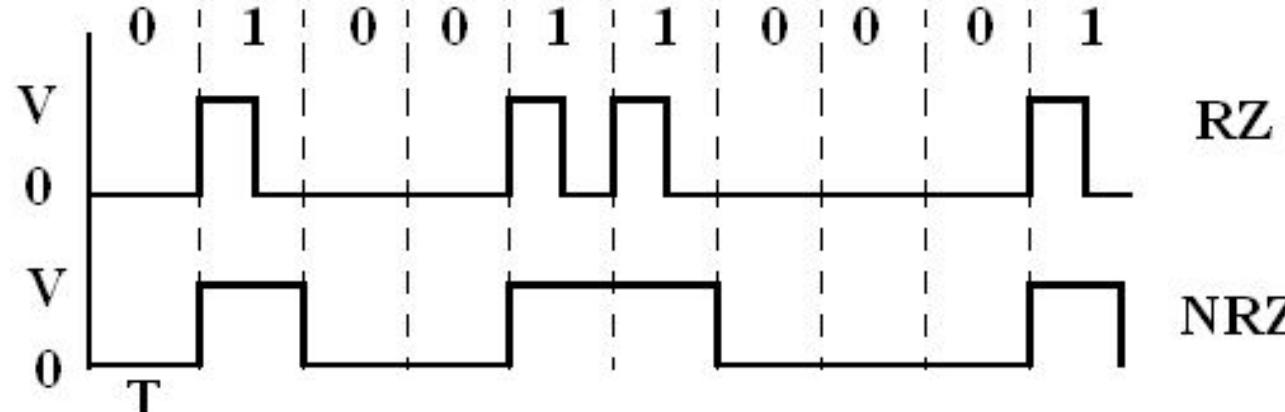
- Sono possibili diverse scelte di codifica, con caratteristiche differenti che possono migliorare le prestazioni della trasmissione
- Le caratteristiche determinanti sono:
  - spettro del segnale:
    - componenti ad **alta frequenza** richiedono una **banda maggiore**
    - l'assenza di **componente continua** e' preferibile
    - spettro concentrato nel **centro della banda**

# Caratteristiche delle codifiche

- Altre caratteristiche determinanti sono:
  - **sincronizzazione temporale**: il ricevitore deve essere sincronizzato con il trasmettitore per identificare i bit; alcune codifiche facilitano questa funzione
  - **rilevazione di errore**: funzione caratteristica dei livelli superiori, ma puo' essere utile anche a livello fisico
  - solidita' del segnale rispetto ad **interferenza** o **rumore**
  - costo e complessita' di realizzazione

# Codifica unipolare RZ ed NRZ

- La codifica unipolare RZ (Return to Zero) prevede la trasmissione di un segnale di lunghezza  $T$  per ogni bit. Il segnale è nullo in corrispondenza del bit 0, mentre è un impulso di tensione di durata  $T/2$  per il bit 1
- La codifica unipolare NRZ (Non Return to Zero) differisce dalla RZ perché il livello di tensione per il bit 1 rimane alto per tutta la durata del bit

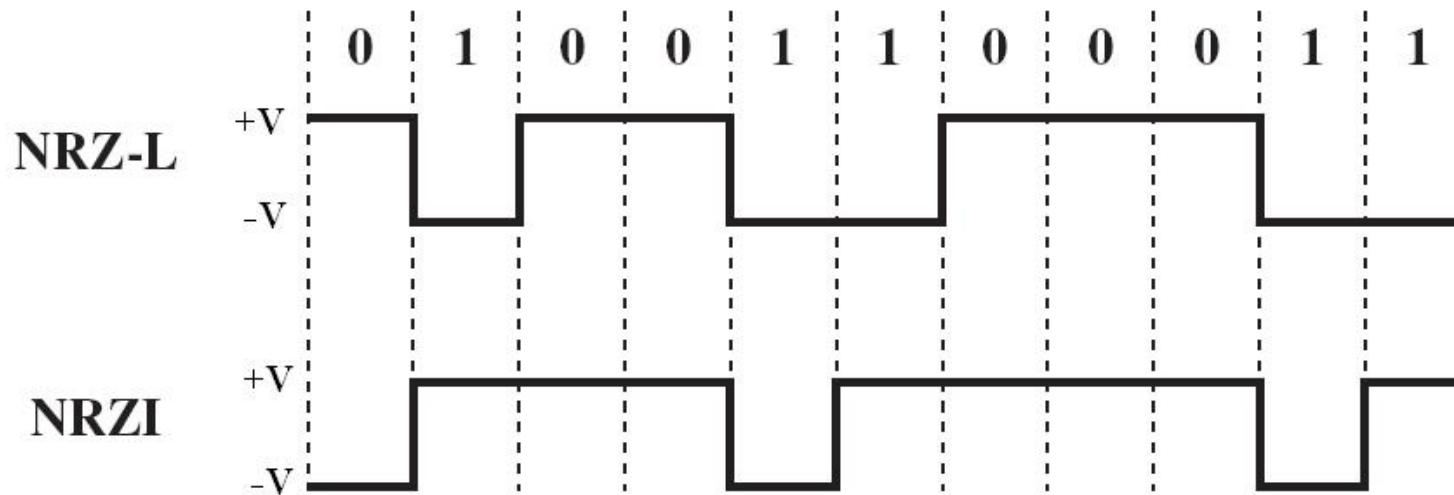


# Caratteristiche della codifica NRZ

- La codifica NRZ ha i pregi:
  - facile da progettare e realizzare
  - utilizzo **efficiente** della larghezza di banda (la potenza e' concentrata tra 0 ed  $R/2$ , dove  $R$  e' la capacita' trasmissiva in bit/s (transmission rate))
- Difetti:
  - esiste una **componente continua**
  - lunghe **sequenze** di bit di uguale valore producono un segnale **continuo senza transizioni**: il ricevitore puo' perdere la sincronia

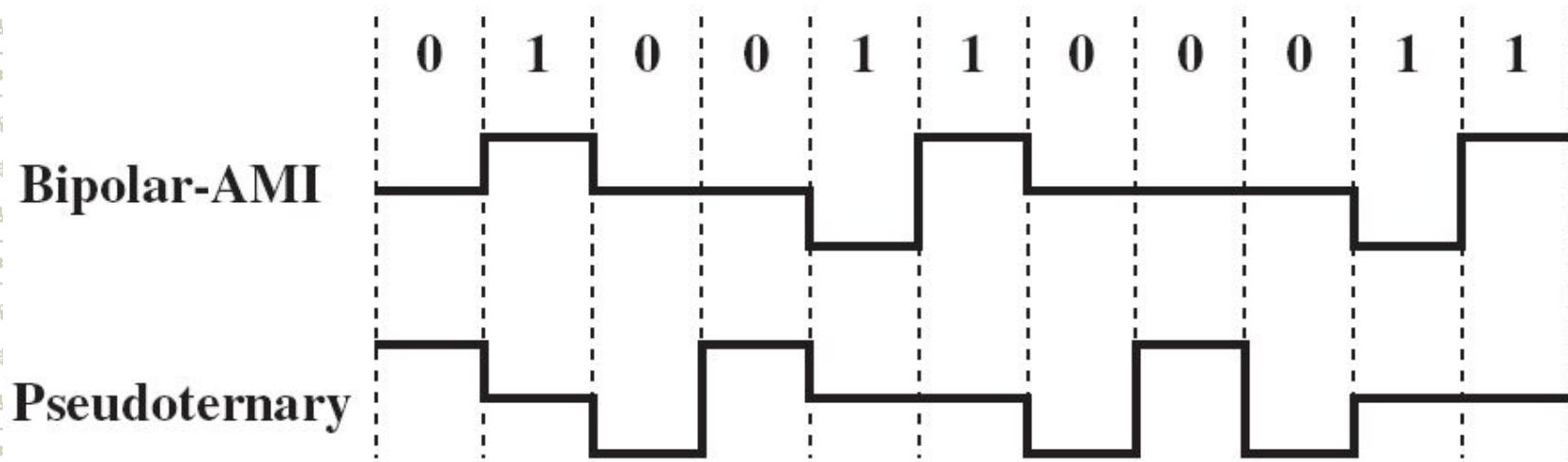
# Codifica NRZ-L ed NRZI

- Per migliorare le caratteristiche si fa utilizzo di una codifica (NRZ-L: Non Return to Zero Level) che prevede un segnale a **+V** per il bit 0, ed a **-V** per il bit 1 o viceversa
  - questo **riduce** l'impatto della componente continua, ma **non la annulla**
- Altra tecnica: codifica **differenziale** (NRZI: NRZ Invert on ones): il segnale cambia in occasione di un bit 1



# Codifica multilivello binario

- Le codifiche a multilivello binario utilizzano **tre livelli**: lo zero indica il bit 0, mentre il bit 1 e' identificato con segnali a **+V** e **-V** alternati (**AMI** bipolare: Alternate Mark Inversion)
- La codifica pseudoternaria e' la stessa, con 1 e 0 invertiti

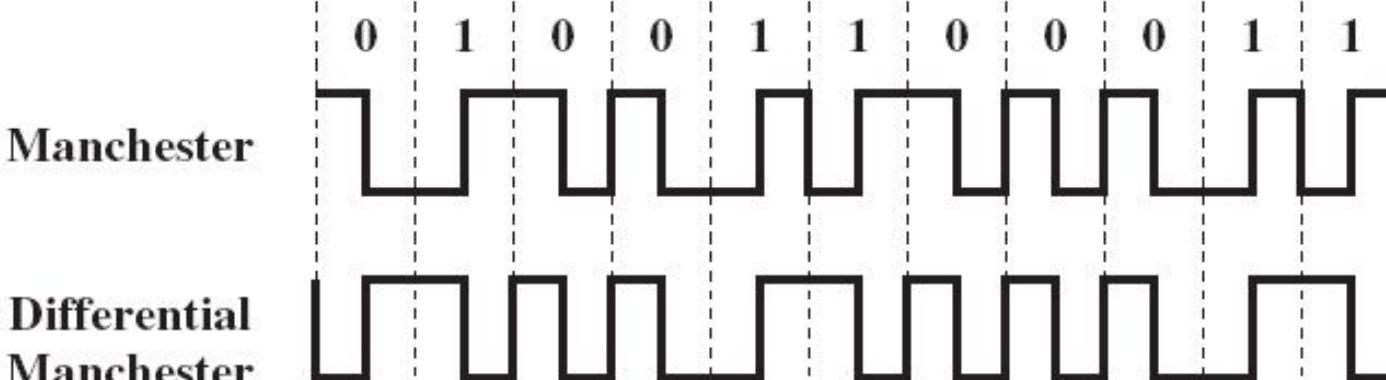


# Caratteristiche della codifica AMI

- La codifica AMI ha i seguenti vantaggi rispetto alla NRZ:
  - risolve il problema della **sequenza di bit 1**, che presentano sempre una transizione utilizzabile in ricezione per sincronizzare (ma **resta** il problema per **sequenze di 0**)
  - La componente continua e' **di fatto azzerata**
  - utilizza a parita' di transmission rate una larghezza di banda **inferiore**
  - errori **isolati** possono essere evidenziati come **violazione** del codice
- Vi sono anche svantaggi:
  - utilizza 3 livelli, quindi ogni simbolo potrebbe trasportare **piu' informazione** ( $\log_2(3) = 1.58$ )
  - a parita' di bit rate richiede circa **3 dB in piu'** rispetto alla NRZ
- Utilizzata in diversi casi su linee **punto-punto** (ISDN)

# Codifica Manchester

- La codifica Manchester utilizza due livelli di tensione; il bit 1 e' rappresentato da un segnale  $-V$  per mezzo periodo,  $+V$  per il seguente mezzo periodo; il bit 0 e' rappresentato in modo opposto ( $+V$  per il primo mezzo periodo,  $-V$  per il restante mezzo periodo)
- La codifica Manchester differenziale utilizza lo stesso tipo di rappresentazione, ma rappresenta il bit 1 come variazione rispetto alla codifica del bit precedente



# Caratteristiche della codifica Manchester

- Vantaggi:

- sincronizzazione: ogni bit ha una transizione in mezzo, che puo' essere utilizzata per la sincronizzazione dal ricevitore
- totale assenza di componente continua
- rivelazione di errore (in assenza della transizione prevista)

- Svantaggi:

- richiede un segnale a frequenza doppia rispetto al bit rate: 1 bit richiede 2 baud, quindi richiede una banda doppia
- L'utilizzo piu' diffuso della codifica Manchester e' negli standard 802.3 (ethernet) e 802.5 (token ring) sia su coassiale che su doppino

# Codifica B8ZS

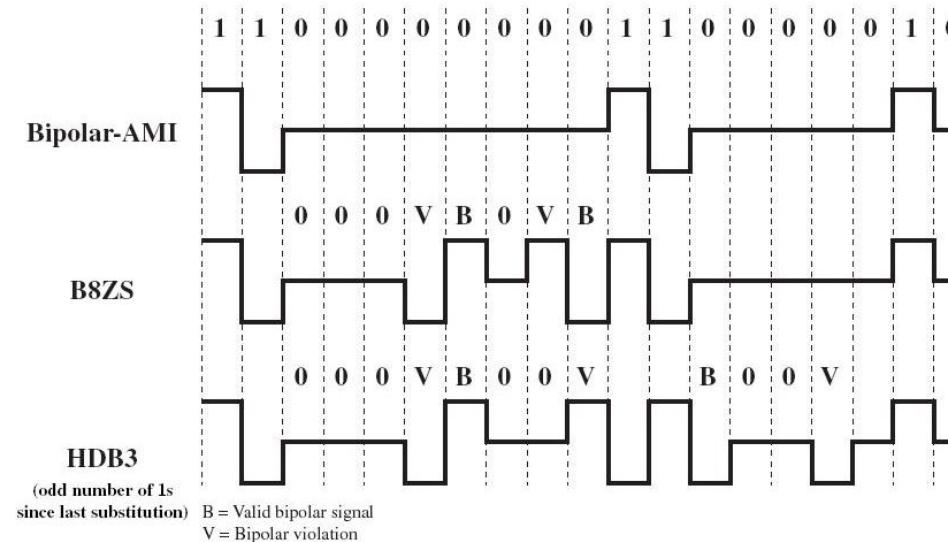
- Una modifica della AMI per risolvere il problema della sequenza di zeri e' la **B8ZS** (Bipolar with 8 Zeros Substitution):
  - ogni sequenza di 8 zeri viene codificata come
    - 000-0-+ se l'ultimo impulso e' stato positivo
    - 000-+0+- se l'ultimo impulso e' stato negativo
  - in questo modo scompaiono **lunghe sequenze di zeri**, e la sequenza e' identificata da **due violazioni** del codice AMI
- Utilizzata nel Nord America

# Codifica HDB3

- Stessa logica per la HDB3 (**High Density Bipolar 3 zeros**):
  - ogni sequenza di 4 zeri viene codificata come
    - se la polarita' dell'ultimo impulso e' stata negativa:
      - **000-** se c'e' stato numero dispari di 1 dall'ultima sostituzione
      - **+00+** se c'e' stato un numero pari di 1 dall'ultima sostituzione
    - se la polarita' dell'ultimo impulso e' stata positiva:
      - **000+** per un numero dispari di 1 dall'ultima sostituzione
      - **-00-** per un numero pari di 1 dall'ultima sostituzione
  - anche in questo caso **scompaiono lunghe sequenze di zeri**, e la sequenza e' identificata da violazioni opportune del codice AMI
- Utilizzata in Europa e Giappone

# Caratteristiche di B8ZS ed HDB3

- Le due codifiche hanno sempre **componente continua nulla** (le violazioni sono alternate)
- Hanno un efficiente **utilizzo della banda**, con la potenza concentrata a metà' della banda
- come con AMI, e' possibile **riconoscere gli errori singoli**
- Generalmente utilizzate nella trasmissione dati ad **elevata distanza**



# Spettro delle codifiche numeriche in banda base

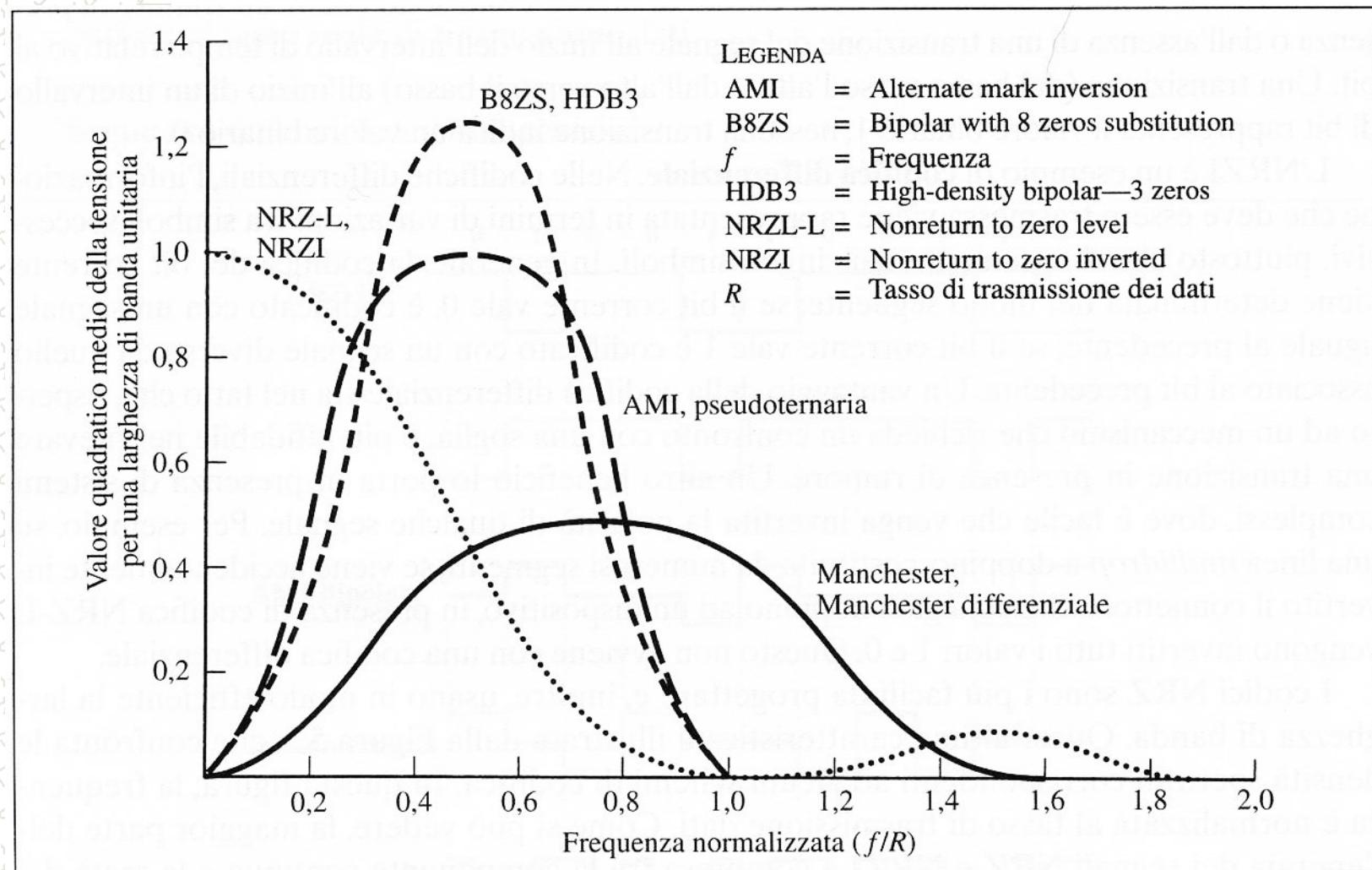


Figura 5.3 Densità spettrale dei vari schemi di codifica di un segnale

# Modulazione

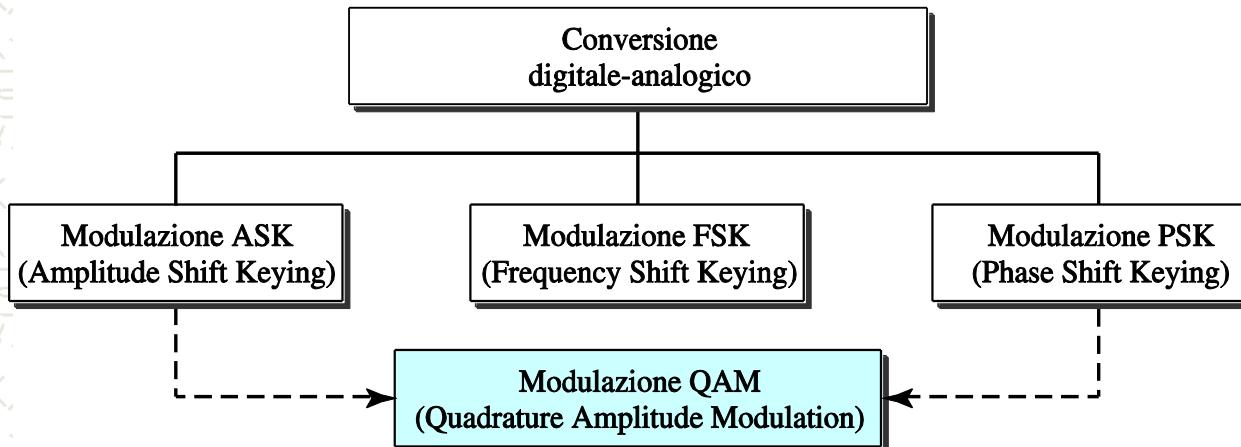
- La modulazione e' un processo con il quale il **segnale da trasmettere** (segnale **modulante**) viene utilizzato per modificare **nel tempo** le caratteristiche di un **segnale ausiliario sinusoidale (portante)**
- Questa operazione ha la caratteristica di generare un segnale che ha una **occupazione di banda dell'ordine di grandezza** di quella del **segnale modulante**, centrata pero' intorno alla **frequenza** del segnale portante
- Utilizzando una portante ad **alta frequenza** si puo' quindi **spostare** la banda necessaria alla trasmissione delle informazioni in un intervallo **piu' opportuno** per la trasmissione stessa

# Vantaggi della modulazione

- Spesso per la trasmissione sono preferibili determinati intervalli di frequenza
  - ad esempio, la trasmissione via **ponte radio** (a vista) richiede una antenna; la dimensione della antenna deve essere dello stesso ordine di grandezza della **lunghezza d'onda**; per trasmissioni a 1 KHz  $l = 300$  Km, per trasmissioni a 1 GHz  $l = 30$  cm
  - per trasmettere i segnali radio si puo' sfruttare la **riflessione multipla dalla ionosfera**, che riflette bene frequenze di 5-30 MHz
- Un altro vantaggio e' legato alla possibilita' di trasmettere **piu' comunicazioni differenti** e contemporanee sullo **stesso mezzo**, trasferendo le bande relative alle diverse comunicazioni in **zone differenti** della banda utile per la trasmissione (multiplexing a divisione di frequenza)

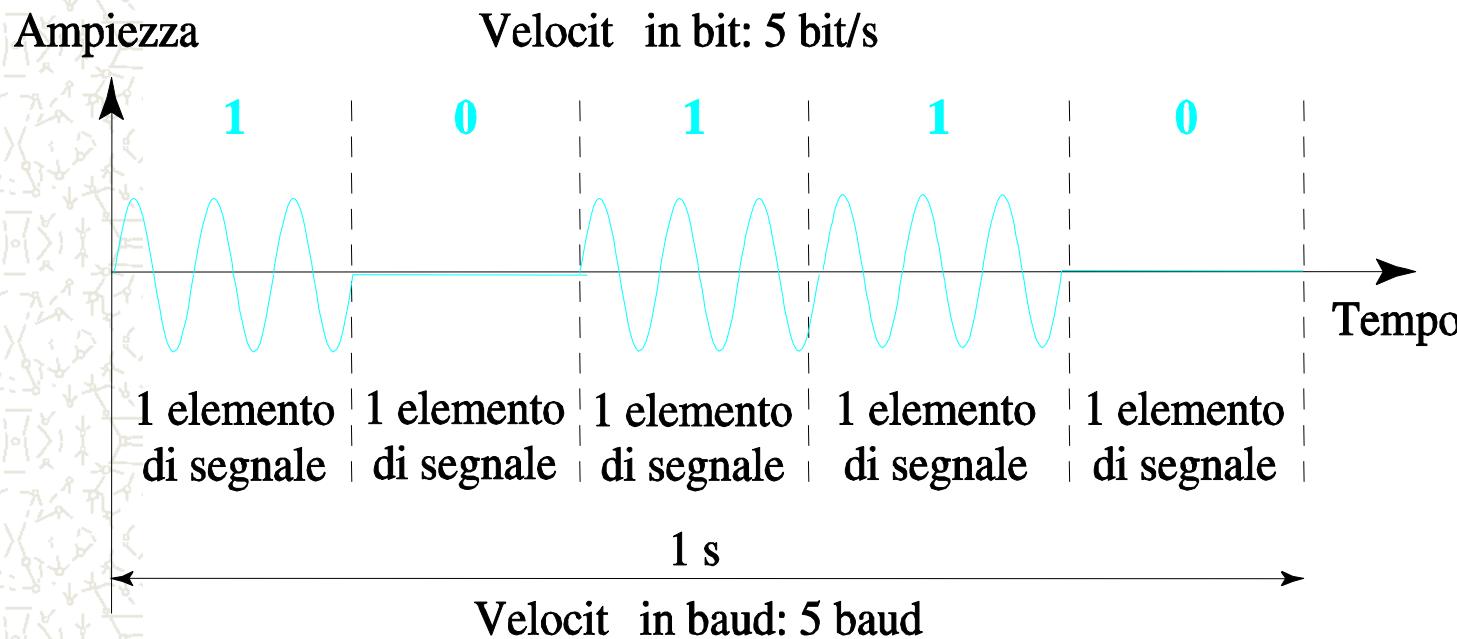
# Tecniche di modulazione

- Il segnale modulante viene utilizzato per modulare le caratteristiche della portante:
  - ampiezza: il segnale viene utilizzato per **modificare** il valore della **ampiezza** della portante (modulazione di ampiezza)
  - frequenza: il segnale modulante modifica istante per istante la **frequenza** della portante (modulazione di frequenza)
  - fase: il segnale modulante cambia la **fase** della portante (modulazione di fase)



# Tecniche di modulazione: ASK

- Partendo da un segnale numerico (ad esempio un segnale NRZ) si puo' modulare **in ampiezza** una portante sinusoidale moltiplicando la sua ampiezza per il segnale numerico (**ASK**: Amplitude Shift Keying)



# Tecniche di modulazione: FSK

- Il segnale numerico puo' essere utilizzato per modulare **in frequenza** una portante sinusoidale, modificando la sua frequenza **in funzione** del segnale modulante (**FSK**: Frequency Shift Keying), cioe' facendo corrispondere due frequenze ai due valori del bit
- Requisito importante nella FSK è la continuità di fase negli istanti di transizione da una frequenza all'altra.

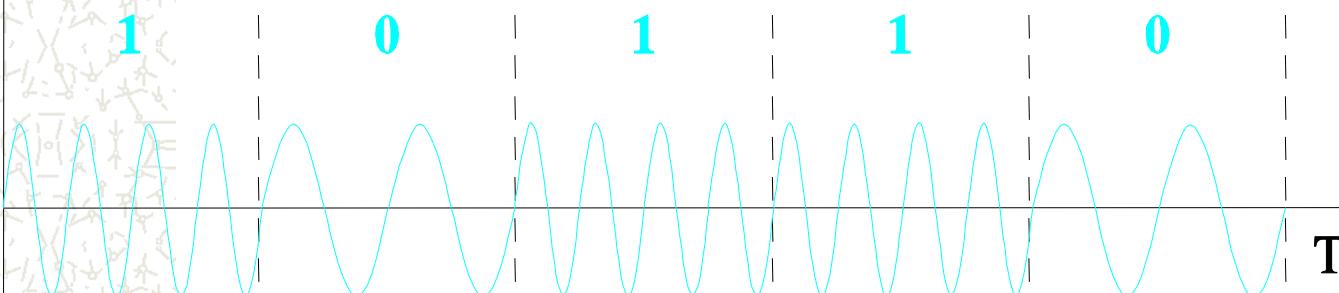
Aampiezza

Velocit in bit: 5 bit/s

livello 1  $\Rightarrow$  frequenza  $f_z$

livello 0  $\Rightarrow$  frequenza  $f_a$

Tempo



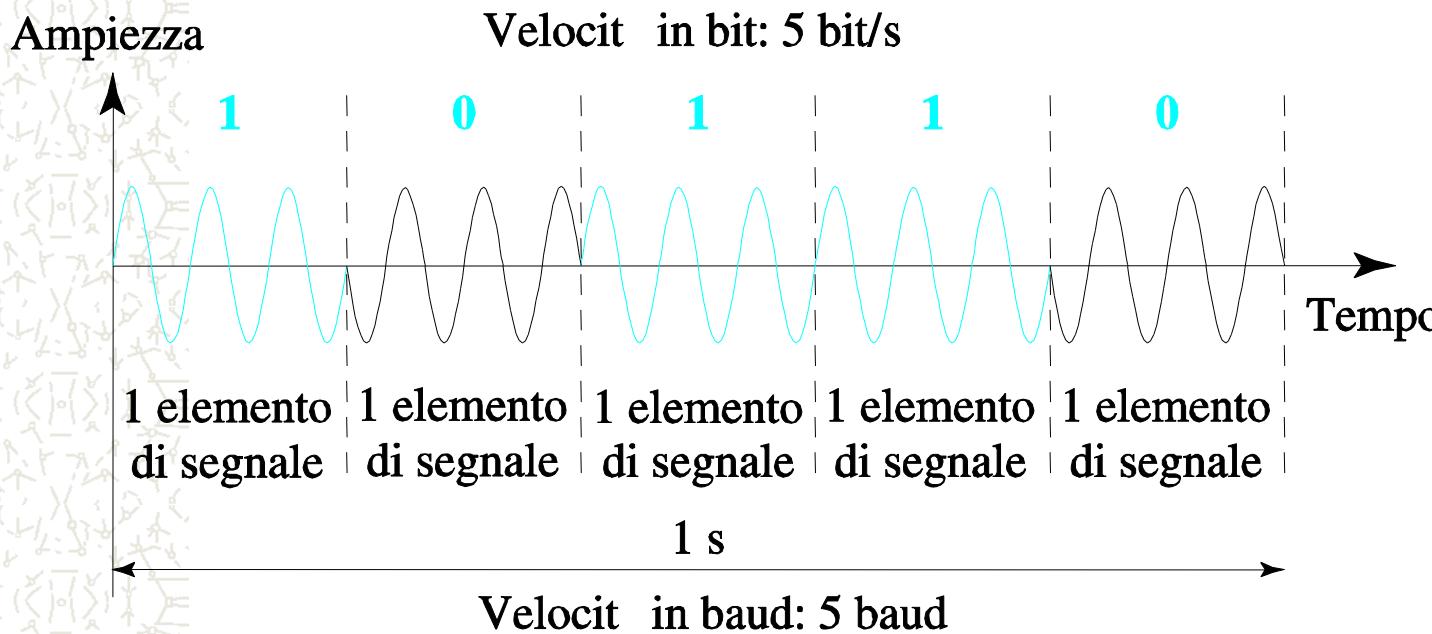
1 elemento  
di segnale    1 elemento  
di segnale    1 elemento  
di segnale    1 elemento  
di segnale    1 elemento  
di segnale

1 s

Velocit in baud: 5 baud

# Tecniche di modulazione: PSK

- Il segnale numerico puo' modulare **in fase** una portante sinusoidale associano un certo valore di fase ad un certo valore di bit (**PSK**: Phase Shift Keying). Nell'esempio in figura al bit 1 si associa un **cambio** di fase, al bit 0 nessun cambio di fase
- La variazione sistematica e' realizzata sulla fase del segnale



# Modulazioni Polifase

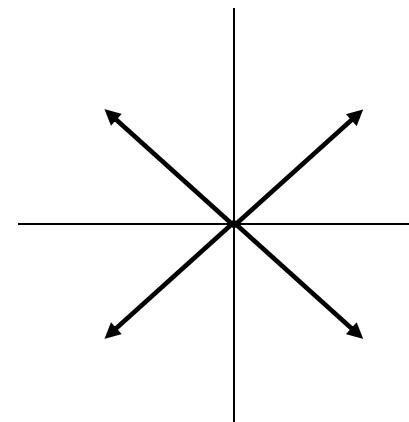
- Nella modulazione PSK bifase (BPSK) vista prima si ha una sola portante e quindi i due valori numerici uno e zero sono fatti corrispondere a due fasi diverse della stessa frequenza:  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .
- Possiamo fare certamente meglio utilizzando modulazioni polifase:
  - Si ottiene una migliore **efficienza del canale** modulando in modo che ogni simbolo trasporti piu' bit
  - La modulazione polifase si realizza effettuando una codifica preliminare dei bit provenienti dal terminale, raggruppandoli in parole di  $n$  bit e facendo corrispondere a ciascuna delle  $2^n$  parole possibili una determinata fase della frequenza portante.

# QPSK

QPSK: Quadrature PSK (4 fasi)

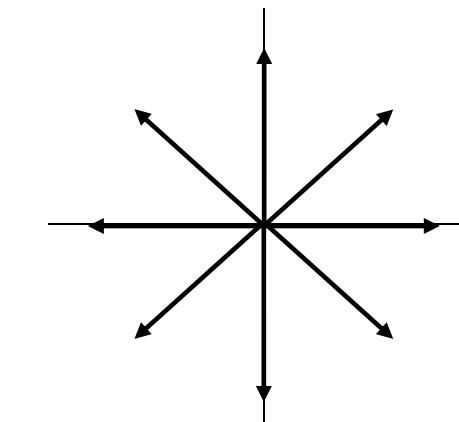
2 bit = 2400 bit/s

00	45
10	135
11	225
01	315



3 bit = 4800 bit/s

001	0
000	45
010	90
011	135
111	180
110	225
100	270
101	315

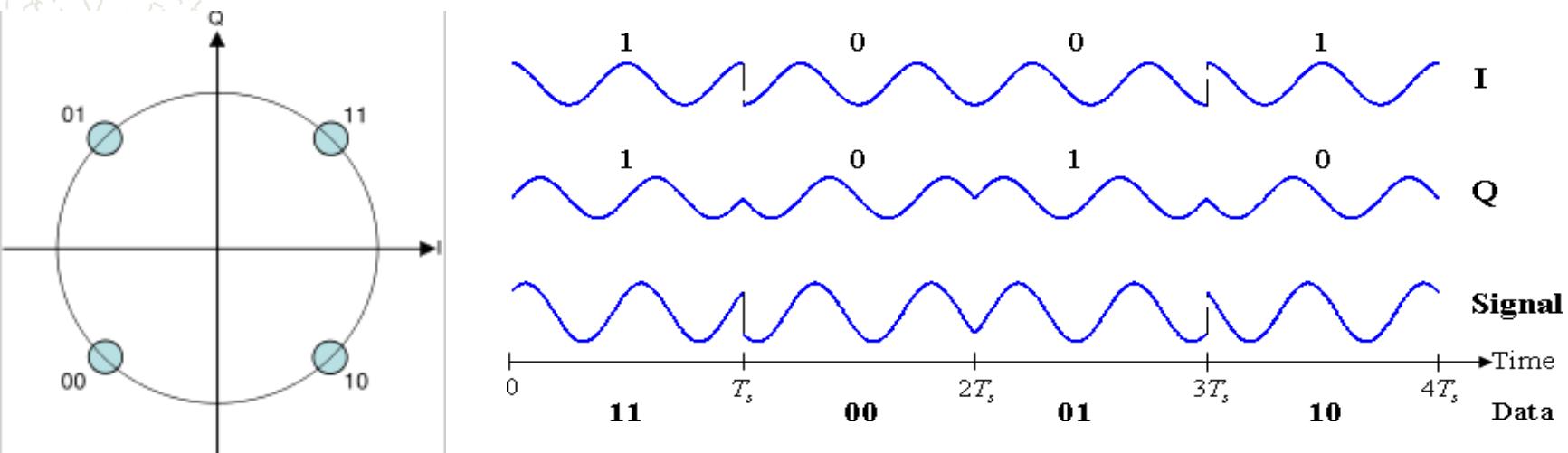


Nella modulazione **QPSK** (Quadrature PSK) si utilizzano quattro angoli di fase per trasmettere due bit per simbolo; ad esempio:

Non si può aumentare indefinitamente il numero di bit per campione perché entrano in gioco fattori di distorsione o rotazione del segnale, detto anche *phase jitter*.

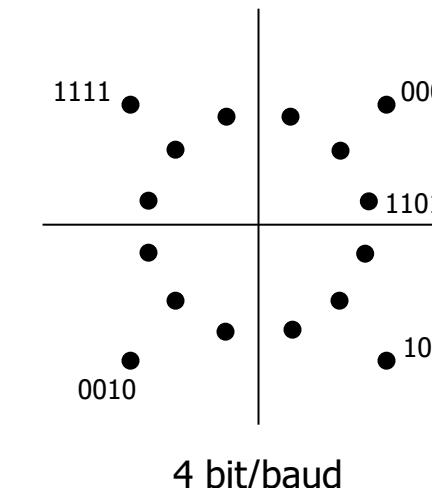
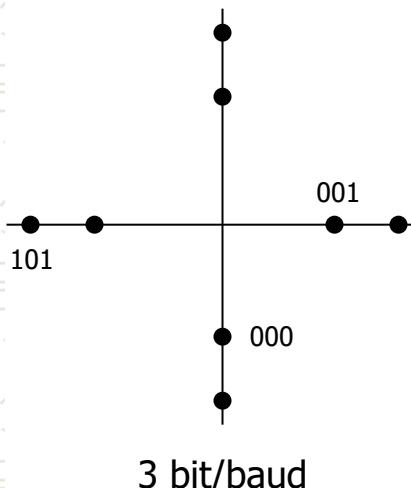
# Differential-QPSK

- Invece di associare ad ogni coppia di bit una coppia di valori di fase assoluti
  - es. 11 corrisponde a  $[+45^\circ, +45^\circ]$
- si modula la fase in funzione delle variazioni dei bit '00', '01', '11', '10' con  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ 
  - es. da 00 a 01 si varia la fase di  $90^\circ$



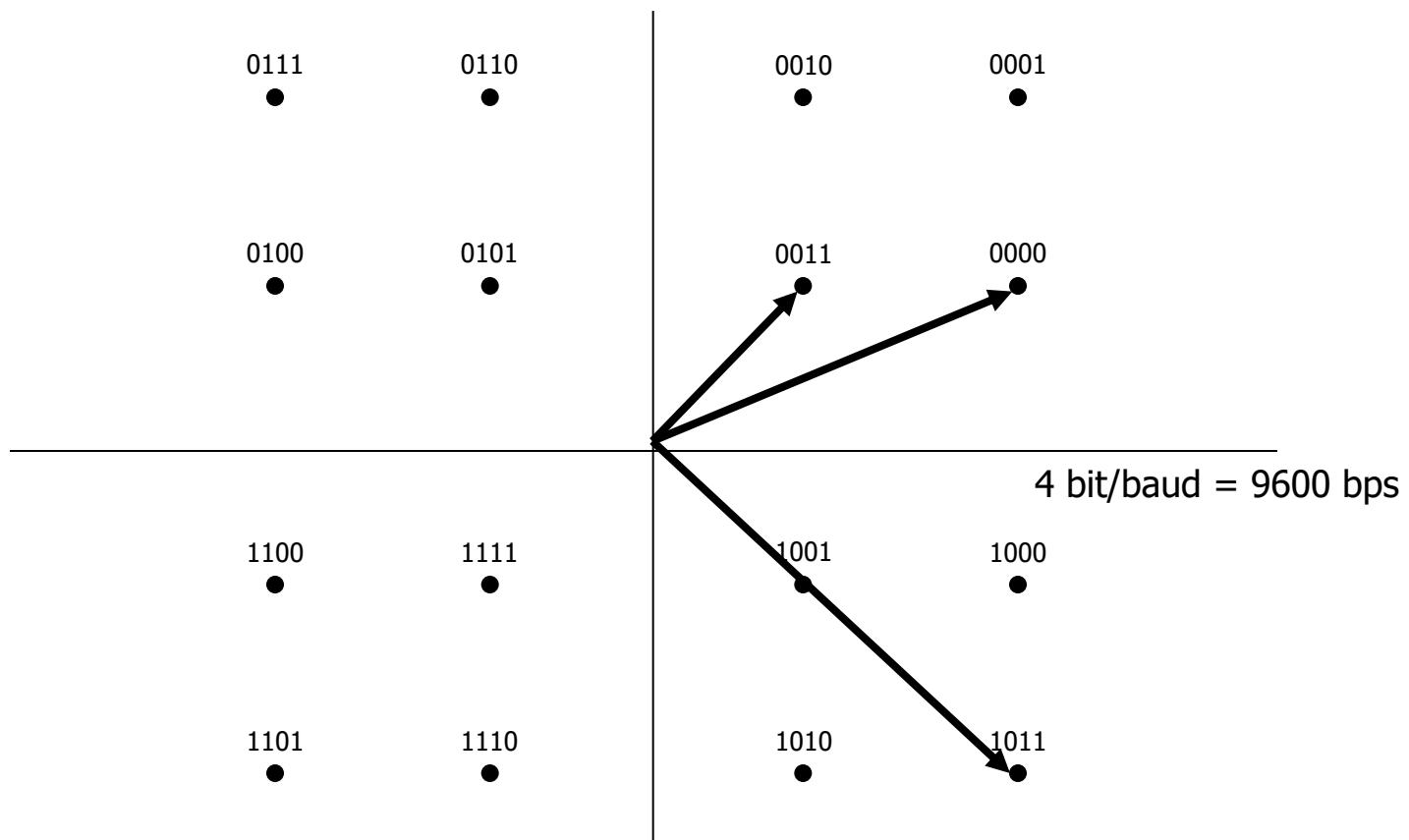
# Quadrature Amplitude Modulation

- Per aumentare la velocità di trasmissione, mantenendo costante la velocità di modulazione, invece di trasmettere solo due valori angolari,  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , si trasmette un maggior numero di angoli diversi fra loro, e per consentire una più facile demodulazione in ricezione, si fa variare anche l'ampiezza del segnale modulato dando luogo così alla modulazione QAM.
- Le più moderne modulazioni numeriche, quelle quindi che determinano grandi velocità di trasmissione, sono quindi modulazioni di fase e di ampiezza. Quindi la codifica dei bit non viene solo affidata alla variazione di **fase**, ma anche a quella di **ampiezza**.



Schemi di costellazione

# Esempio di costellazione QAM

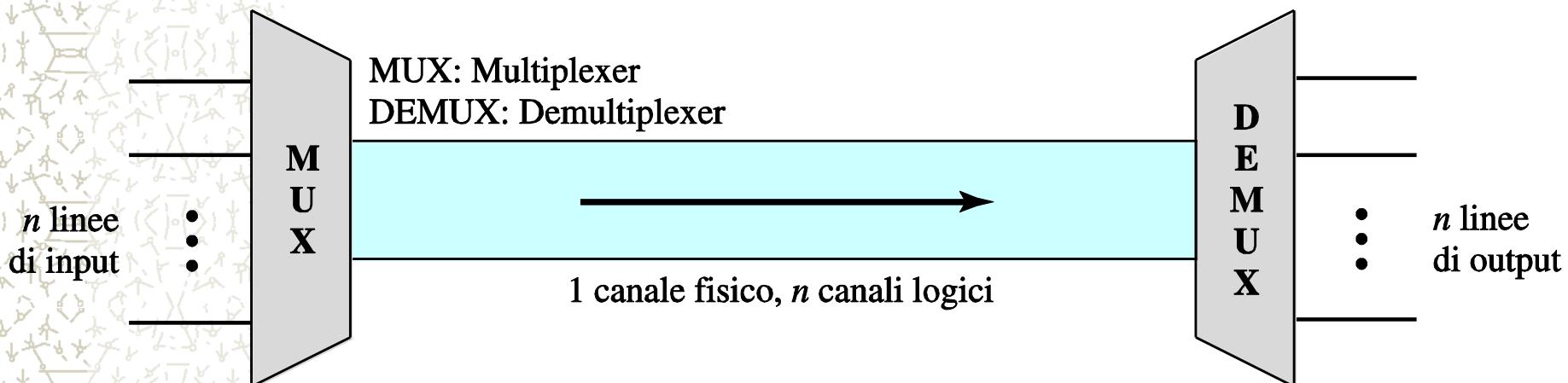


# Multiplexing

- Supponiamo di avere un canale a 10 Mbps
  - Dobbiamo spedire dati a 3 Mbps
- Se dedichiamo il canale ad un singola comunicazione
  - “sprechiamo” 7 Mbps
- Sul canale a 10 Mbps possono essere trasportate insieme 3 comunicazioni a 3 Mbps
- Multiplexing
  - Permette di spedire insieme dati di varie comunicazioni, su un solo canale

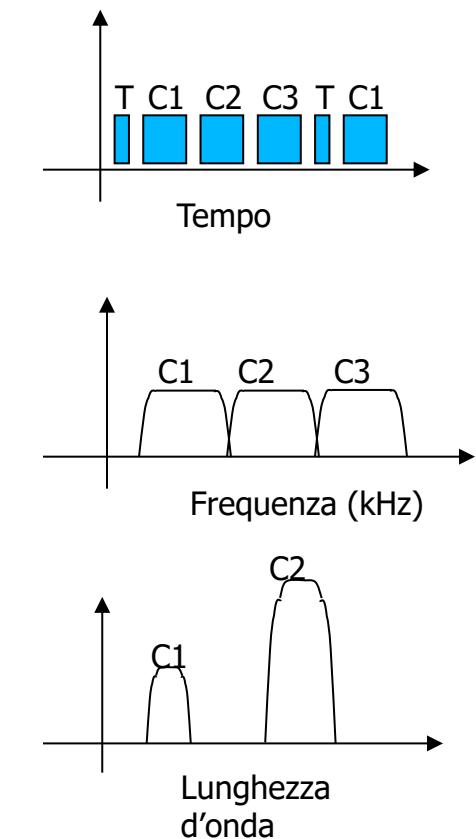
# Multiplexer e demultiplexer

- 1 canale fisico, n canali logici
- Spedizione
  - Occorre aggregare i dati dei canali logici
- Ricezione
  - Occorre ridividerli fra i vari canali logici



# Tecniche di Multiplazione

- A *divisione di tempo (TDM)*
  - modalità deterministica (banda dedicata e ritardo fisso)
  - modalità statistica (banda e delay variabili e migliore sfruttamento del mezzo)
- A *divisione di spazio (SDM)*
  - Dati inviati su media fisicamente separati
- A *divisione di frequenza (FDM e WDM)*
  - Usa differenti frequenze o lunghezze d'onda per differenziare i dati trasmessi
- Per *codifica (CDM)*
  - La differenziazione dei dati trasportati è ottenuta utilizzando diversi tipi di codifica



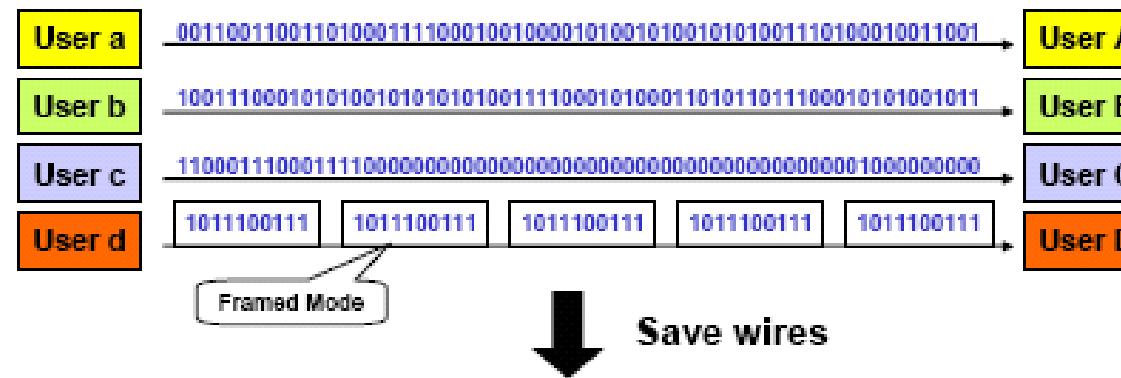
# SDM vs TDM

SDM: Una connessione fisica per trasmissione

TDM: La stessa connessione utilizzata per 4 trasmissioni distinte

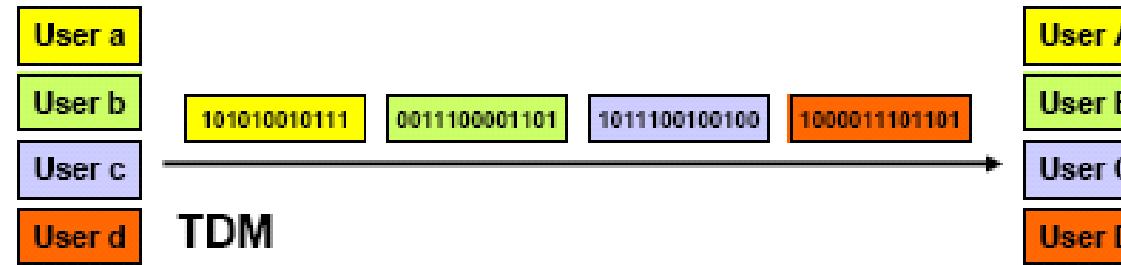
- Richiede tramatura dei flussi e uso di Multiplexer e demultiplexer
- Meno efficiente ma ottimizza l'uso dei mezzi trasmissivi

## SDM



Save wires

## TDM



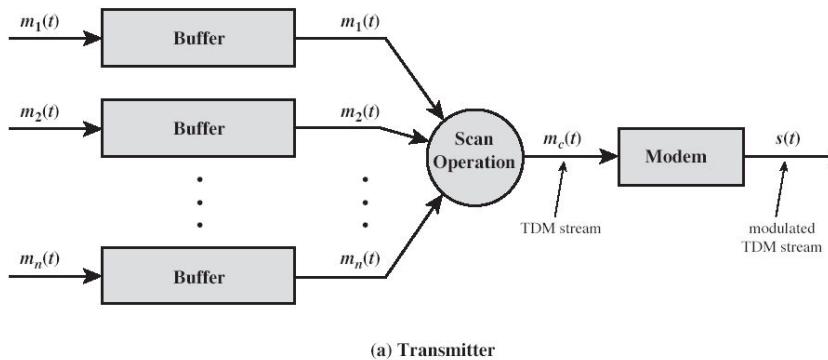
# TDM (Time Division Multiplexing)

- Il multiplexing a divisione di tempo e' utilizzato quando si dispone di un **canale digitale** capace di un **elevato** tasso di trasmissione dati in cui poter trasmettere **contemporaneamente** un insieme di comunicazioni a tasso **inferiore**
- Si **mischiano** i dati delle diverse comunicazioni, **inframezzando i bit** delle diverse trasmissioni
- Di fatto si **divide la disponibilita'** del canale in **periodi temporali**, e si dedicano **a turno** i diversi periodi a diversi flussi trasmittivi
- Ogni canale logico occupa tutto il mezzo per un certo intervallo di tempo

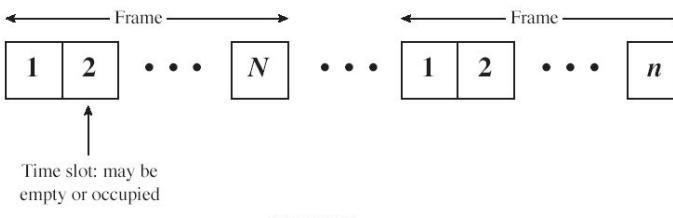
# Slot e frame

- Ogni intervallo temporale si chiama **slot** e puo' contenere **uno o piu'** bit relativi ad un flusso indipendente
- Il flusso dei dati e' organizzato in trame (**frame**)
- Una trama e' l'insieme di **slot temporali** che contiene **almeno un bit** per **ciascuna** trasmissione
- Anche in questo caso il flusso relativo ad una singola trasmissione e' detto **canale**

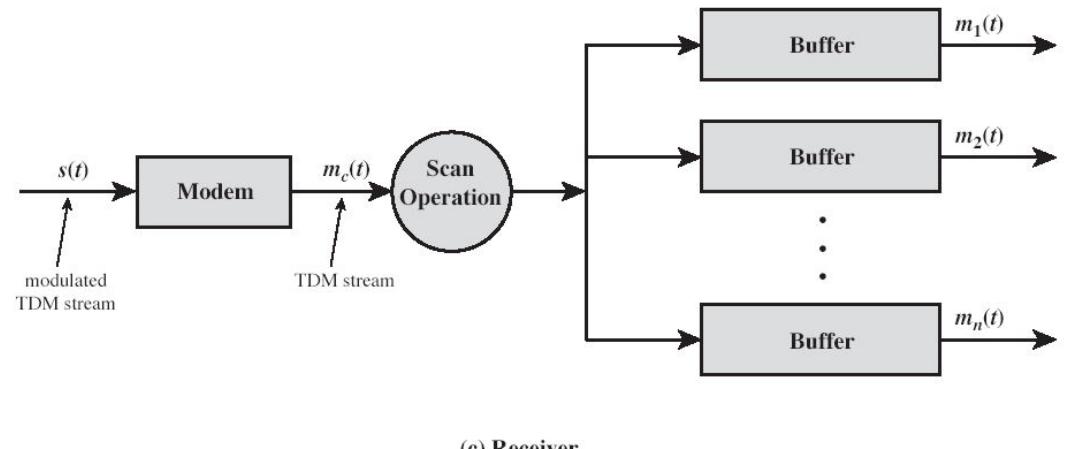
# Schema del TDM



(a) Transmitter



(b) TDM Frames



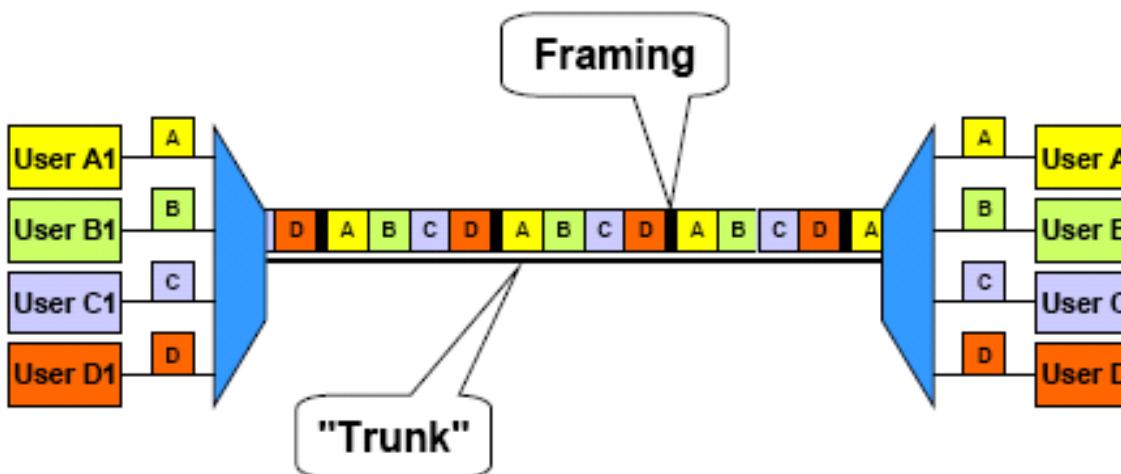
(c) Receiver

# TDM deterministico e statistico

- Esistono essenzialmente due metodi di moltiplicazione
  - Deterministico: ogni canale di comunicazione è identificato dalla sua posizione in termini di slot temporali all'interno della trama. Questa correlazione fissa fra il canale di comunicazione e il relativo timeslot è il principale svantaggio del TDM deterministico: se il canale non è usato comunque occupa il timeslot inviando un pattern idle
  - Statistico: non esiste correlazione fra canale di comunicazione e relativo timeslot. La capacità del mezzo è distribuita statisticamente fra gli utenti che ne concorrono all'uso. E' necessario uno schema separato di tramatura e indirizzamento per garantire le associazioni dinamiche: se un canale non è usato gli altri canali possono disporre della sua capacità trasmissiva.

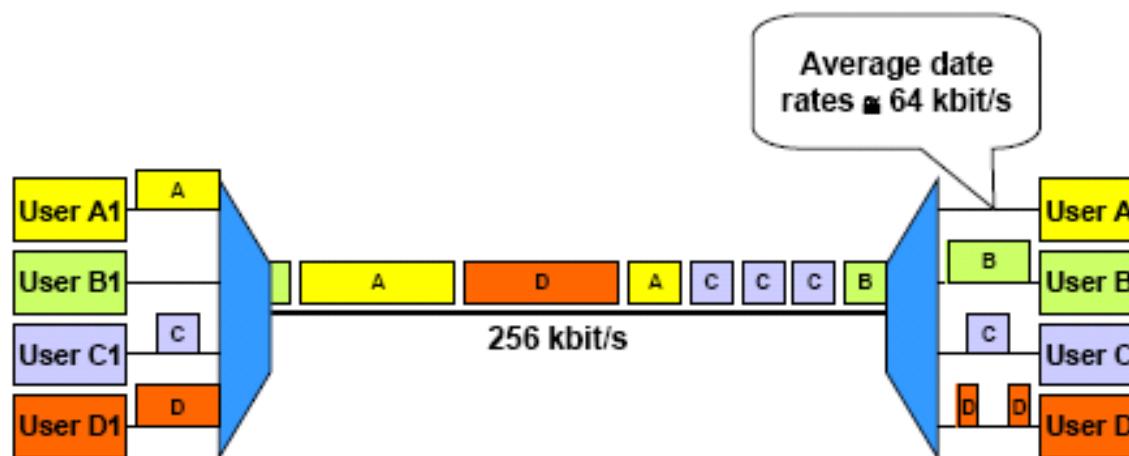
# TDM deterministico

- Le trame hanno la stessa taglia - Ordinamento garantito
- Non sono necessari schemi di indirizzamento né di bufferizzazione
- Richiede Sincronismo
- Cattiva utilizzazione del mezzo trasmissivo

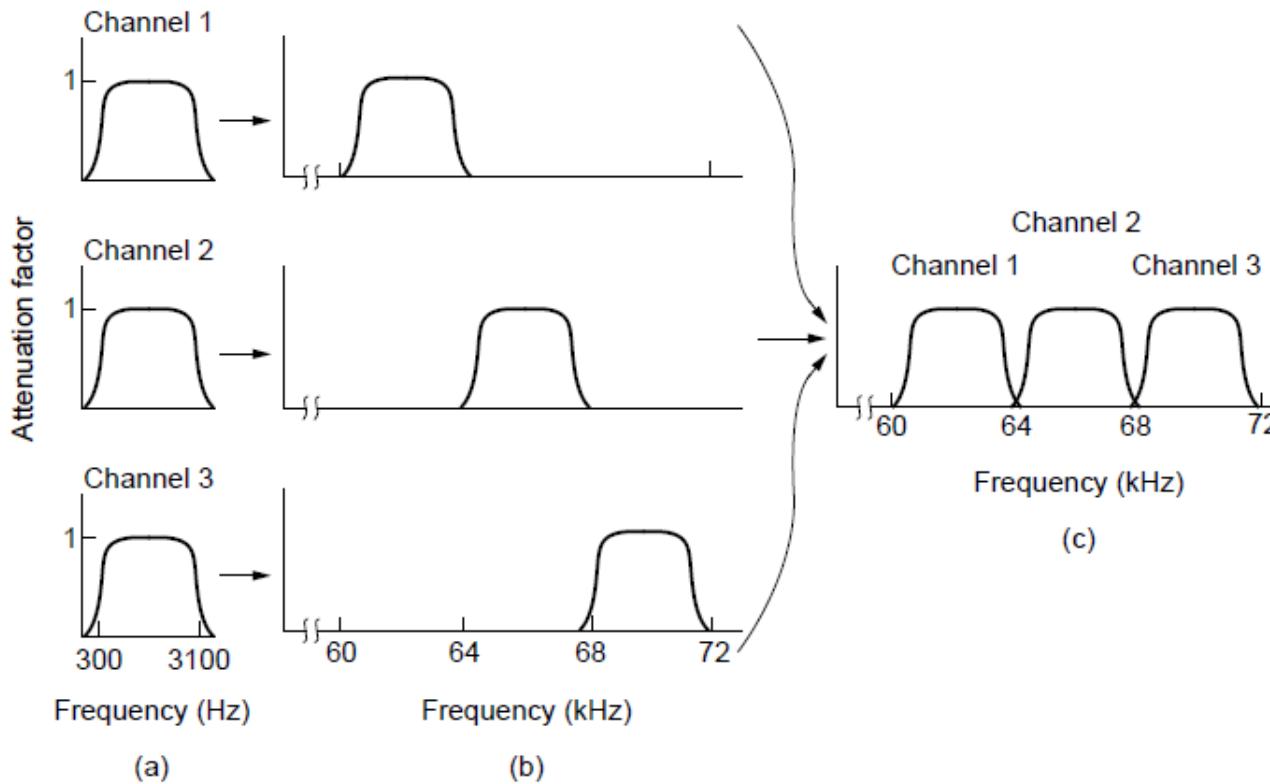


# TDM statistico – Multiplazione Statistica

- Trame di taglia differente
- Necessita di uno schema di indirizzamento e di bufferizzazione
- Dipendente dal protocollo
- Ottimo utilizzo del mezzo trasmissivo



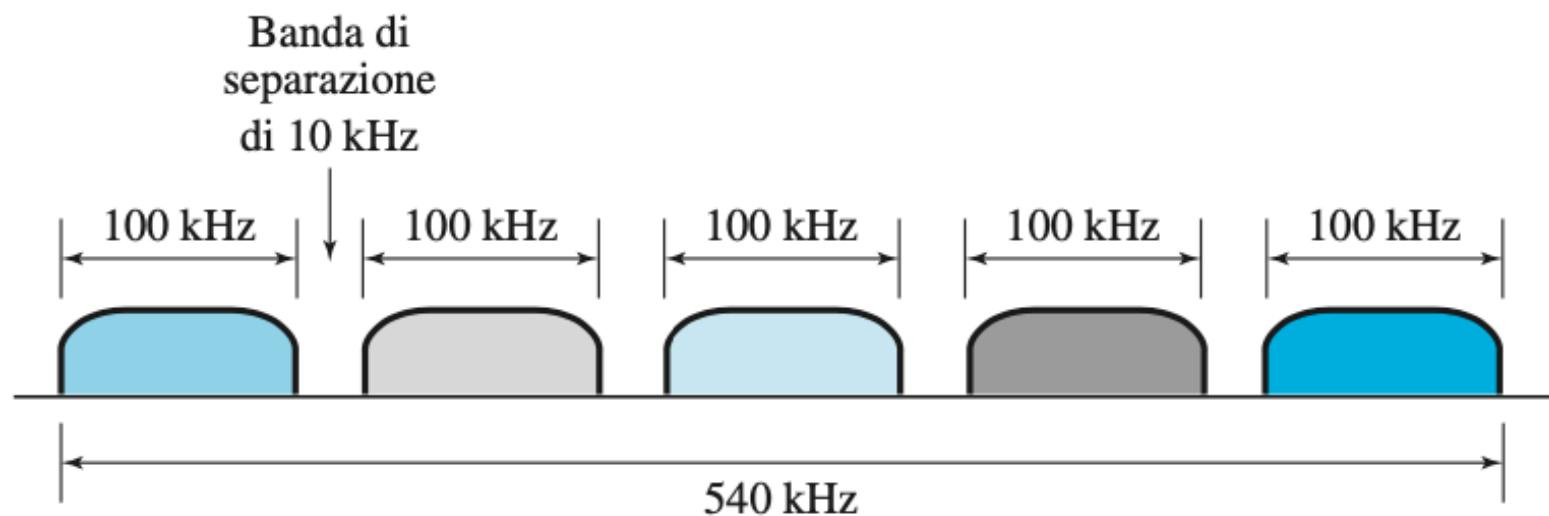
# Frequency Division Multiplexing



- Usa la trasmissione in banda passante, dividendo lo spettro in bande di frequenza separate, una per canale
- Nessuna coppia di canali può condividere la stessa porzione di spettro

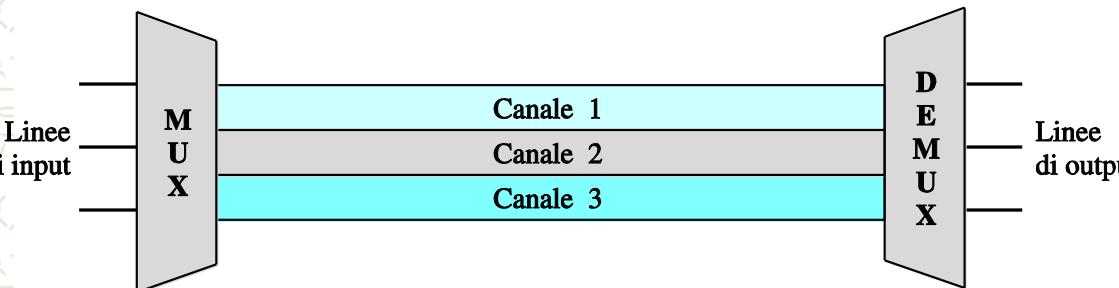
# Frequency Division Multiplexing

- Tipicamente, per ovviare a fenomeni di interferenza si tende a dislocare i range di frequenze assegnati ai diversi canali in modo da riservare uno spazio (bande di separazione o di guardia) fra gli stessi

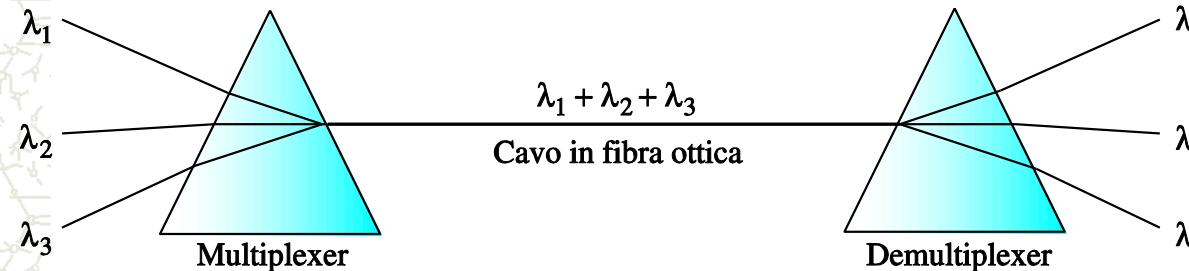


# Multiplexing FDM e WDM

- Segnali dei singoli canali logici
  - Per FDM modulati su frequenze portanti diverse  $f_1, f_2, f_3, \dots$



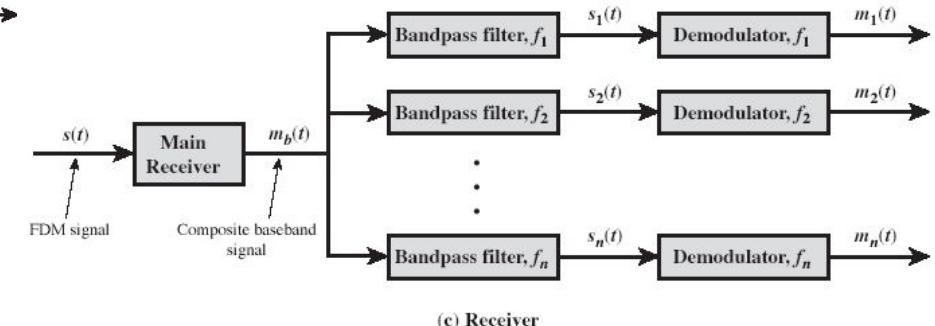
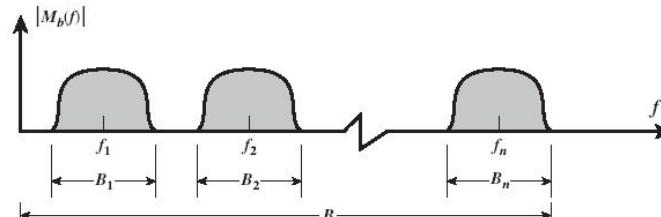
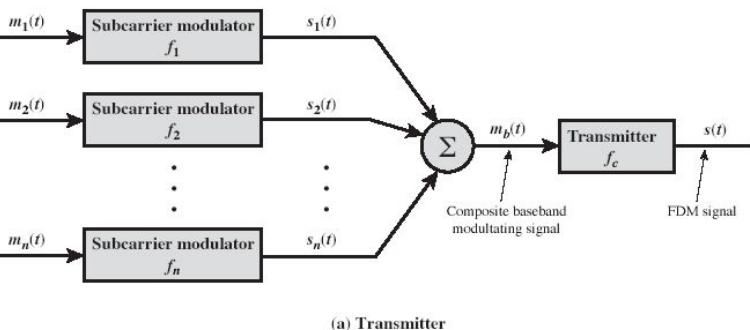
- Per WDM modulati su diverse lunghezze d'onda  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$  su un portante ottico



- Frequenze o lunghezze d'onda diverse non interferiscono

# Frequency Division Multiplexing

- L'effetto della **modulazione** su un segnale sinusiodale a frequenza  $f$  si traduce nella generazione di un segnale il cui spettro ha la **stessa** forma dello spettro del segnale modulante ma **traslato** attorno alla frequenza  $f$  della portante
- In presenza di una serie di segnali ciascuno con banda **B**, e di un mezzo che ha una capacità di banda limitata dai valori  $f_1$  e  $f_2$  ( $f_2-f_1 \gg B$ ), possiamo utilizzare ciascun segnale per modulare segnali sinusoidali alle frequenze  $f_1+B$ ,  $f_1+2B$ ,  $f_1+3B$ , etc.
- I segnali modulati occuperanno **porzioni distinte** entro la banda trasmisiva del mezzo, e potranno essere trasmessi **contemporaneamente** senza interferire.
- In ricezione, opportune operazioni di demodulazione e filtraggio permetteranno di **separare** i diversi traffici.

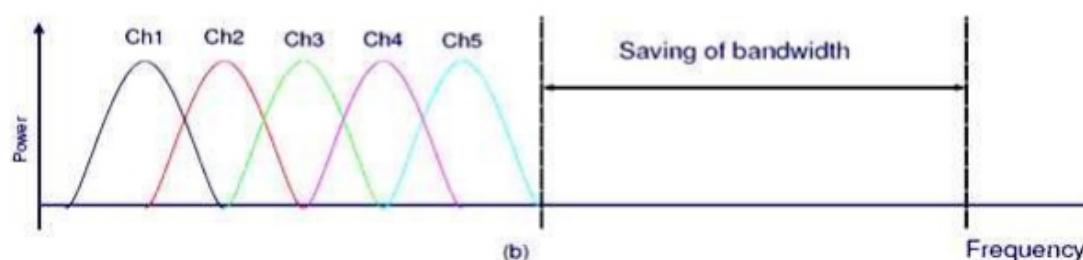
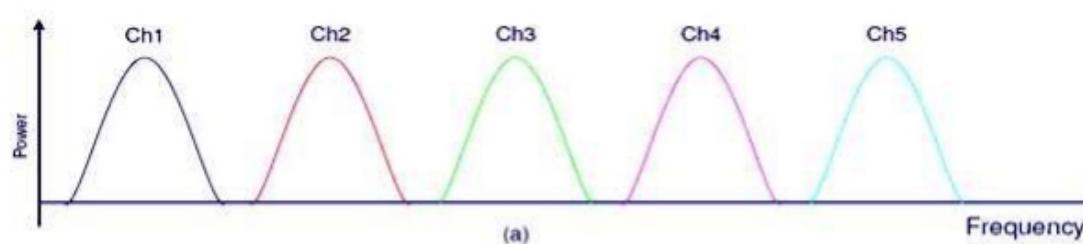


# Multi-Carrier Modulation

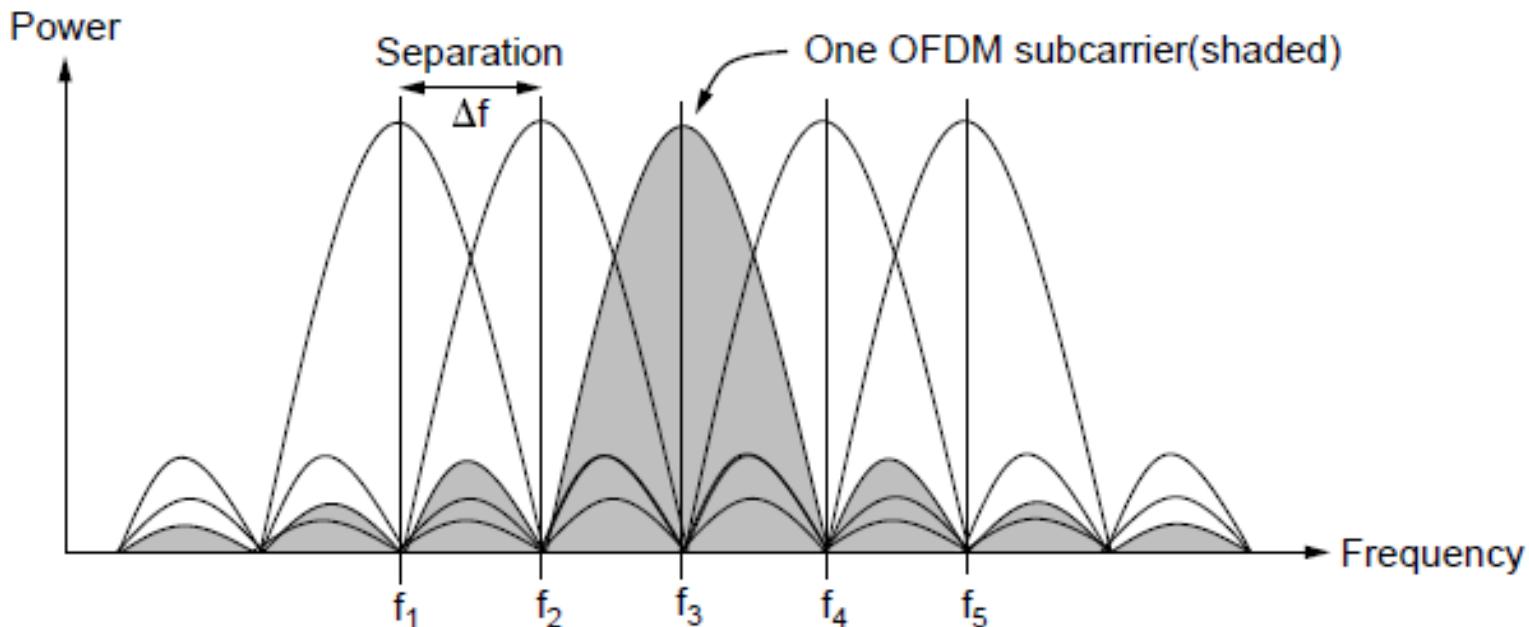
- Nella trasmissione parallela di dati, la banda di frequenza disponibile è generalmente suddivisa in molti canali
- Allo scopo di eliminare l'interferenza intercanale, gli spettri dei sottocanali non devono sovrapporsi: questo però non consente un utilizzo efficiente della banda disponibile
- La sovrapposizione spettrale può essere permessa a patto di sfruttare relazioni di ortogonalità tra i canali
- Nella modulazione multi-portante (MCM) il flusso di dati è diviso in più sottoflussi (substream), ognuno dei quali ha un bit rate molto più basso e ogni substream è usato per modulare una diversa portante (carrier).
- Utilizzando portanti ortogonali (OFDM) non si ha l'interferenza intercanale.

# Ortogonal Frequency Division Multiplexing

- Nelle tecniche di modulazione multiportante:
  - la trasmissione delle informazioni non avviene più attraverso un unico flusso supportato da una sola portante, bensì suddividendo il flusso dati ad elevata rate in appositi sottoflussi tutti paralleli tra loro (in numero pari a M), detti anche sottocanali, ciascuno dei quali con una propria specifica sottoportante.
- La velocità di trasmissione dei dati di un singolo sottocanale risulta inferiore, rispetto al caso monoportante, e la banda necessaria è minore rispetto alla banda di coerenza del canale.



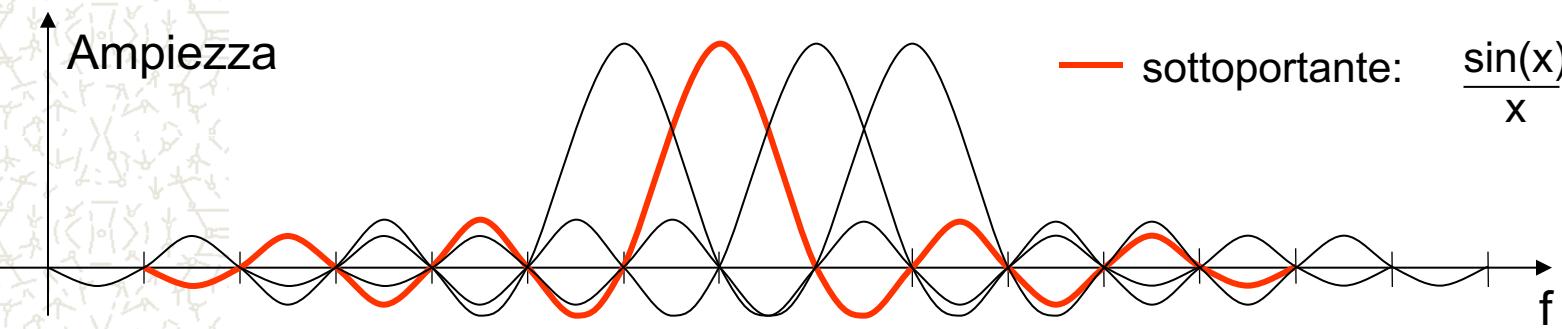
# Ortogonal Frequency Division Multiplexing



- modulazione a multi-portante, che utilizza un numero elevato di sottoportanti tra loro ortogonali.
- Ciascuna portante è modulata con una modulazione di tipo convenzionale (ad esempio una QAM) con un basso symbol rate.
- Gli algoritmi OFDM sono generati usando la trasformata di Fourier veloce.

# Ortogonal Frequency Division Multiplexing

- E' possibile trasmettere su più canali in parallelo usando sottoportanti ortogonali caratterizzate da un rate inferiore
- Si sovrappongono multiple frequenze nello stesso range
- Il Massimo di una sottoportante ha luogo a una frequenza dove tutte le altre sottoportanti assumono un valore nullo



# Code Division Multiplexing (1)

- La moltiplicazione è realizzata moltiplicando in trasmissione l'informazione binaria generata da una sorgente per un'opportuna parola di codice detta chip
- La sequenza in uscita dal moltiplicatore sarà successivamente modulata e infine trasmessa sul canale
- In ricezione il segnale ricevuto dal ricevitore sarà costituito dalla somma vettoriale (comprensiva di modulo e fase) di tutti i segnali trasmessi dalle singole sorgenti di informazione, con in più un eventuale termine dovuto al rumore termico.

# Code Division Multiplexing (1)

- Se i chip delle sorgenti sono ortogonali tra loro, l'estrazione dell'informazione associata a ciascuna sorgente potrà essere fatta in maniera complementare alla trasmissione moltiplicando il segnale ricevuto con il particolare codice associato alla sorgente che si vuole estrarre e integrando successivamente il segnale ottenuto in un intervallo di tempo pari alla durata del bit di informazione.
- Ciò permette di ottenere un segnale che è dato dalla somma di un segnale di ampiezza dominante, (o utile, associato alla sorgente da estrarre), e di un segnale di ampiezza minore, costituito da una combinazione fra rumore termico e quelli associati alle altre sorgenti.

# Code Division Multiplexing (2)

- Il codificatore CDM è costituito principalmente da due parti, la prima che divide la sequenza di bit generata da un codificatore (opzionale) in  $k$  repliche, e la seconda parte che moltiplica ogni replica generata per un termine  $d[k]$ , chiamato CHIPPING CODE di lunghezza  $k$ .
- Ogni bit del chipping code (ad es +1 o -1) viene moltiplicato con le repliche della sequenza iniziale in modo da generare un codice in base alla sequenza di partenza. In ricezione, quindi, il segnale potrà essere decodificato soltanto da chi avrà il codice di canalizzazione esatto.

$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

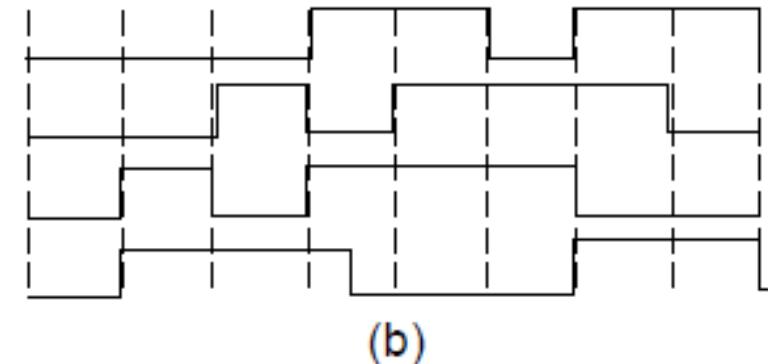
$$B = (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$$

$$C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$D = (-1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1)$$

(a)

Chip sequences for four stations



Signals the sequences represent

# Code Division Multiplexing (3)

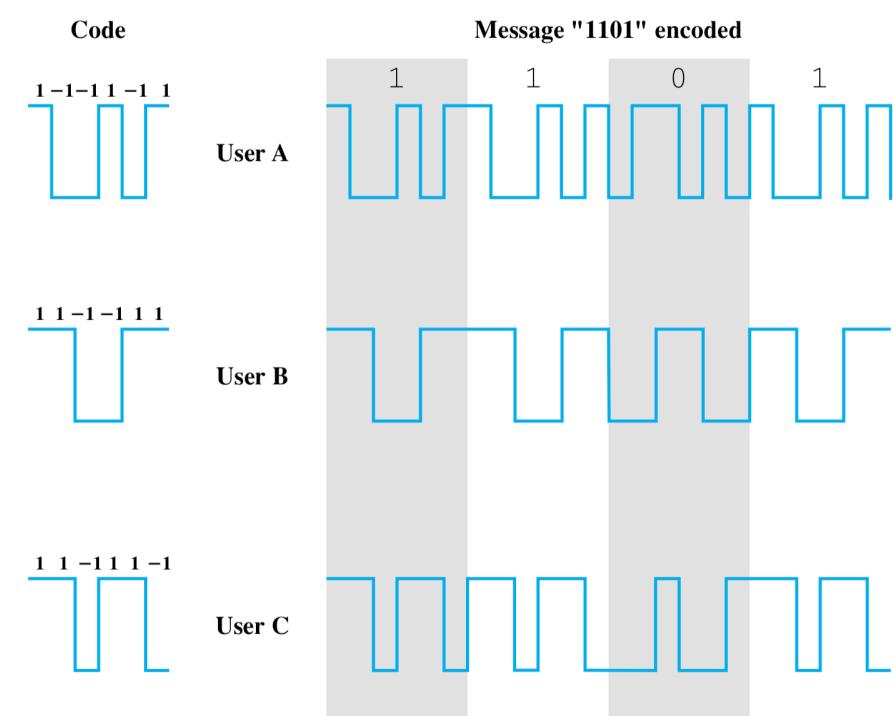
- $D$  = rate del segnale
- Dividiamo ogni bit in  $k$  *chips*
  - I Chips sono pattern fissi specificati dall'utente
- Chipping data rate del Nuovo canale =  $kD$
- Se  $k=6$  e rappresentiamo I chipping codes come sequenze di 1 e -1
  - Per un bit ‘1’ bit, A invia il pattern codificato
    - $\langle c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 \rangle$
  - Per un bit ‘0’ bit, A invia il suo complemento
    - $\langle -c_1, -c_2, -c_3, -c_4, -c_5, -c_6 \rangle$
- Il ricevitore conosce il codice dell'inviaente e può decodificare con:

$$S_u(d) = d_1 \times c_1 + d_2 \times c_2 + d_3 \times c_3 + d_4 \times c_4 + d_5 \times c_5 + d_6 \times c_6$$

- $\langle d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6 \rangle$  = chip pattern ricevuto
- $\langle c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 \rangle$  = codice di chipping dell'inviaente

# Code Division Multiplexing (2)

- Chipping code User A =  $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$ 
  - Per inviare
    - un bit 1 =  $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$
    - un bit 0 =  $\langle -1, 1, 1, -1, 1, -1 \rangle$  (complemento)
- Chipping code User B =  $\langle 1, 1, -1, -1, 1, 1 \rangle$ 
  - Per inviare
    - un bit 1 =  $\langle 1, 1, -1, -1, 1, 1 \rangle$
- Chipping code User C =  $\langle 1, 1, -1, 1, 1, -1 \rangle$ 
  - Per inviare
    - un bit 1 =  $\langle 1, 1, -1, 1, 1, -1 \rangle$



# Code Division Multiplexing (2)

- Se A invia un bit 1 allora  $d$  vale  $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$  e il calcolo precedente  $S_u(d)$  con usando il chipping code di A diventa:

$$1 * 1 + (-1) * (-1) + (-1) * (-1) + 1 * 1 + (-1) * (-1) + 1 * 1 = 6$$

- Se A invia un bit 0 che corrisponde a  $d = \langle -1, 1, 1, -1, 1, -1 \rangle$ , otteniamo, sempre utilizzando il chipping code di A:

$$(-1) * 1 + 1 * (-1) + 1 * (-1) + (-1) * 1 + 1 * (-1) + (-1) * 1 = -6$$

- Nota che  $-6 \leq S_u(d) \leq 6$
- I soli valori di  $d$  che risultano nei valori estremi 6 e -6 sono riconducibili al codice usato per A.
  - se SA produce +6, abbiamo ricevuto un bit 1 da A
  - se SA produce -6, abbiamo ricevuto un bit 0 da A
  - Altrimenti qualche altro canale sta inviando informazioni oppure c'è un errore.

- Se B invia un bit 1 allora  $d = \langle 1, 1, -1, -1, 1, 1 \rangle$ . Usando il chipping code di A si ottiene:

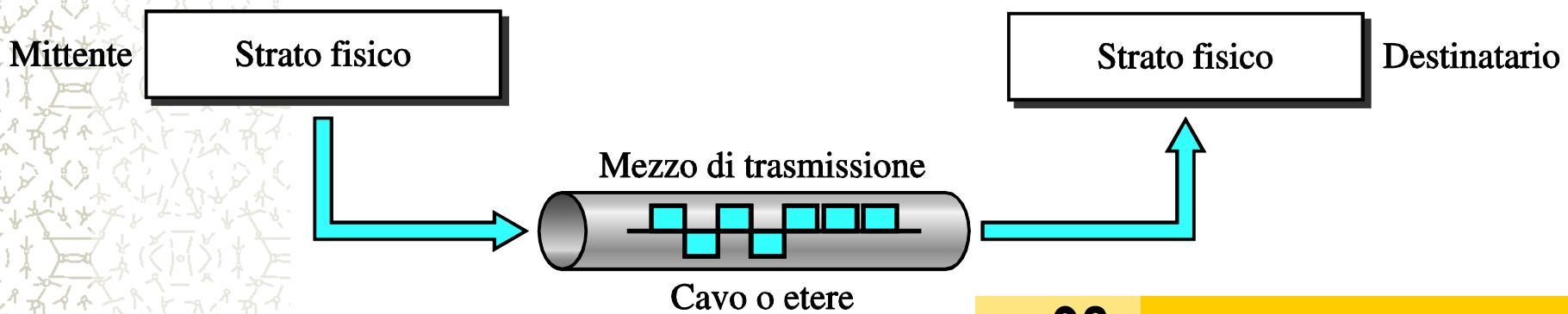
$$1 * 1 + 1 * (-1) + (-1) * (-1) + (-1) * 1 + 1 * (-1) + 1 * 1 = 0$$

- Il segnale inviato da B non viene percepito da A.
- Se B invia un bit 0, analogamente avremo un valore 0 se usiamo il codice di A
- I codici di A e B sono **ortogonali**, quindi hanno la seguente proprietà:

$$S_A(d_B) = S_B(d_A) = 0$$

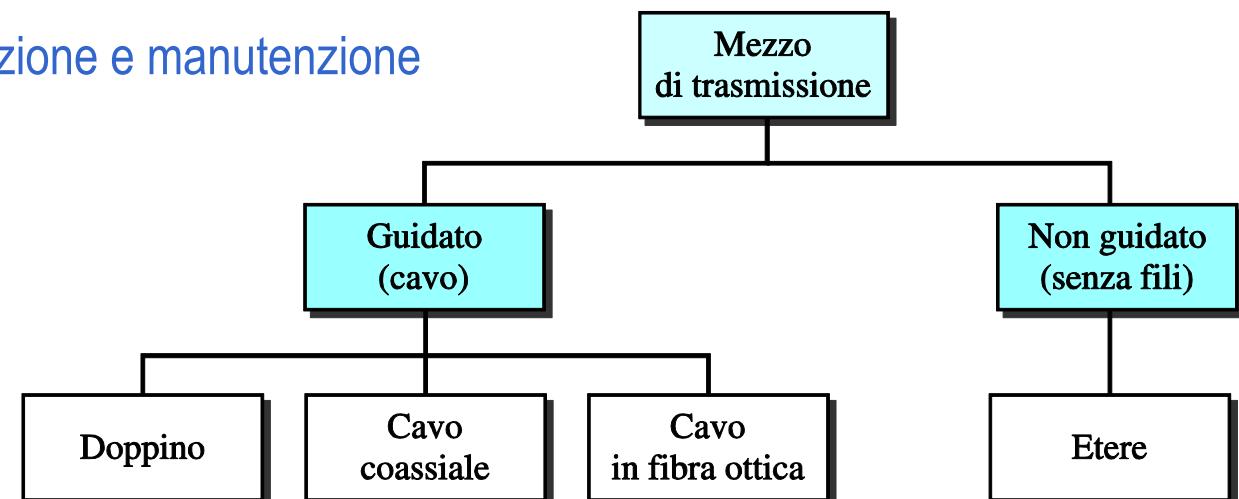
# Mezzi trasmissivi

- Mezzo trasmissivo
  - qualsiasi elemento capace di trasportare informazione da una sorgente ad una destinazione
- Informazione
  - Rappresentata dai segnali
- Mezzi trasmissivi
  - Cavi
  - Etere (trasmissione senza fili)



# I mezzi trasmissivi

- E' possibile classificare i mezzi trasmissivi in due categorie
  - Mezzi guidati: elettrici, ottici
  - Mezzi non guidati: onde radio, laser via etere, suono, raggi X
- Ogni mezzo è tipicamente caratterizzato da:
  - Larghezza di banda
  - Delay
  - Costo
  - Facilità di installazione e manutenzione



# I mezzi trasmissivi elettrici

- I mezzi trasmissivi elettrici rappresentano ancora oggi il mezzo più diffuso, e nell'ambito delle reti locali assumono fondamentale importanza soprattutto per la realizzazione di infrastrutture per la trasmissione di segnali all'interno degli edifici.
- Dovendo trasportare il segnale in forma di energia elettrica, è necessario che le caratteristiche elettriche del mezzo siano tali da rendere massima la trasmissione dell'energia da un estremo all'altro e minima la dissipazione in altre forme (ad esempio calore, irradiazione elettromagnetica).
- Con l'attuale tecnologia è possibile realizzare mezzi trasmissivi elettrici di caratteristiche sufficientemente elevate da permettere la trasmissione dei dati a velocità superiori a 1000 Mb/s.

# Compromessi di realizzazione

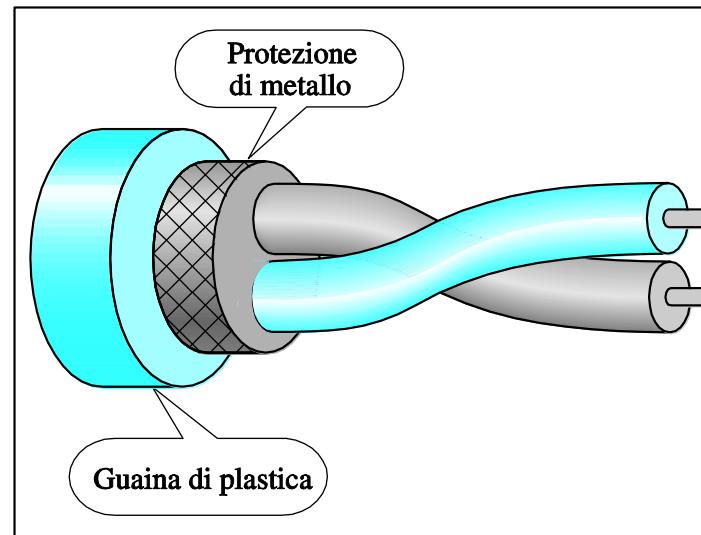
- Un mezzo trasmittivo elettrico ***ideale***, che trasporti tutta l'energia del segnale trasmesso senza attenuazione né distorsione, **non esiste**.
- Un mezzo trasmittivo elettrico ***ottimale*** è caratterizzato da bassa resistenza, bassa capacità e bassa induttanza, cioè è un mezzo poco dispersivo e poco dissipativo.
- In tale mezzo **quasi tutta la potenza** inviata sul canale dal trasmettitore **arriva al ricevitore** ed il segnale non viene distorto.

# Interferenza e schermatura

- È in continua crescita l'attenzione al problema dei disturbi elettromagnetici (EMI), dei quali le reti locali sono al contempo vittime e sorgenti.
- Con la presenza di sistemi di schermatura e con una corretta messa a terra si possono ridurre drasticamente:
  - la sensibilità
  - l'emissione di disturbi elettromagnetici,
- Questo ci consente di migliorare anche notevolmente le caratteristiche elettriche di un cavo.

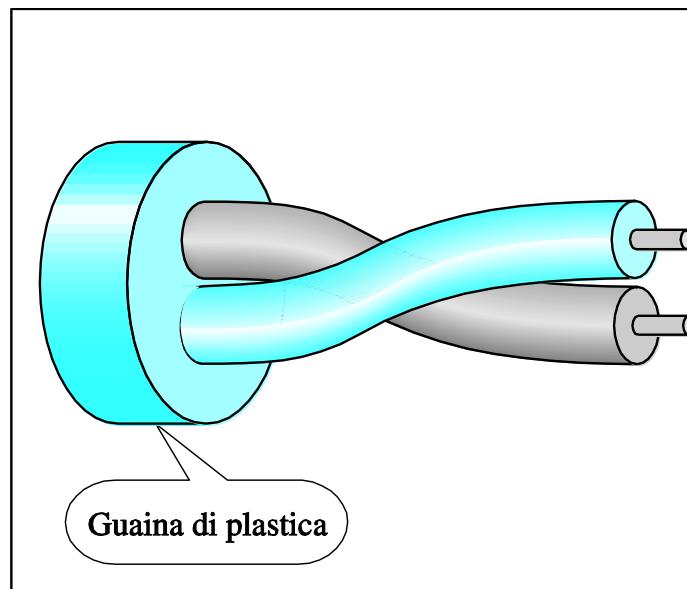
# Sistemi di schermatura

- "**foglio**" (*foil*): si tratta di un foglio di alluminio molto sottile (da 0.05 mm a 0.2 mm) che avvolge il cavo immediatamente sotto alla guaina di protezione esterna.
  - Poiché l'alluminio presenta elevata resistenza elettrica rispetto al rame, e, a spessori così ridotti, una notevole fragilità, lungo il foglio scorre un filo di rame nudo, detto *drain*, che garantisce continuità elettrica anche in caso di eventuali crepe; tale filo è utilizzato per il collegamento di terra;
- "**calza**" (*braid*): treccia di fili di rame che avvolgono il cavo in due direzioni opposte.
  - Presenta una conducibilità molto migliore del foglio di alluminio, ma la copertura non è completa, in quanto in corrispondenza degli intrecci rimangono inevitabilmente dei fori nello schermo.
- I migliori risultati si ottengono dalla combinazione di più schermi diversi



# Il doppino

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

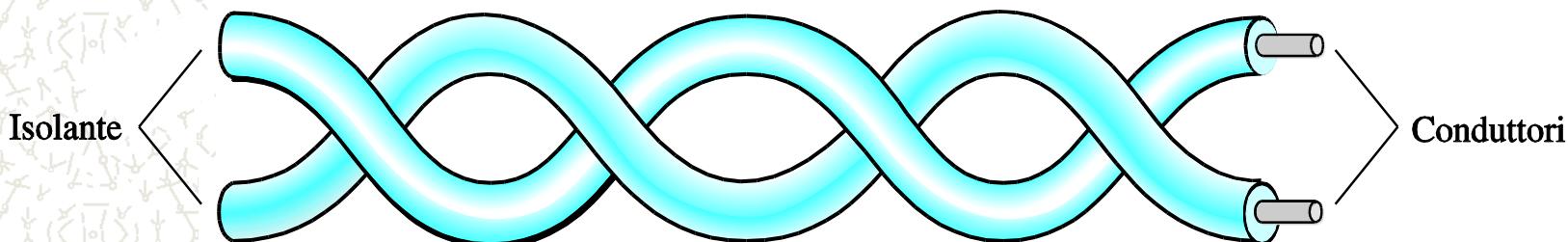


# Il doppino

- I doppini sono nati come mezzo trasmissivo a banda molto ridotta (la banda fonica usata nella telefonia è inferiore a 4 KHz), ma negli ultimi anni hanno raggiunto prestazioni una volta raggiungibili soltanto con i cavi coassiali.
- I miglioramenti sono stati ottenuti realizzando nuovi materiali isolanti, curando la geometria delle coppie (anche tramite l'adozione di particolari guaine esterne), mettendo a punto sofisticati algoritmi di differenziazione dei passi di binatura e aumentando la sezione dei conduttori.
- Attualmente i doppini possono competere nelle medie velocità (10 - 1000 Mb/s) e sulle brevi distanze (inferiori a 100 m) con le fibre ottiche.

# Il doppino: binatura

- La binatura serve a ridurre i disturbi elettromagnetici



- Infatti, se i passi di binatura fossero uguali, ogni conduttore di una coppia si troverebbe sistematicamente affiancato, ad ogni spira, con uno dei due conduttori dell'altra coppia, e quindi verrebbe a cadere l'ipotesi di perfetta simmetria della trasmissione bilanciata.
- I campi elettromagnetici generati dalle due coppie interferirebbero reciprocamente con un considerevole peggioramento della **diafonia**.

# Il doppino: diafonia

- La diafonia e' un fenomeno di **accoppiamento elettrico** tra mezzi trasmissivi vicini **non isolati** adeguatamente
- Il segnale trasmesso su un cavo genera per **induttanza** un segnale corrispondente nel cavo vicino, che si **sovrappone** al segnale trasmesso in quest'ultimo
- Si puo' verificare anche nella trasmissione con mezzi **non guidati**, quando un segnale emesso da una antenna si **disperde** durante la propagazione nell'aria; la parte dispersa puo' guingere in prossimita' di **un'altra antenna**

# Il doppino: punti di forza

Le caratteristiche che hanno tuttavia inciso maggiormente sulla diffusione del doppino sono:

- la compatibilità con la telefonia
- la facilità di posa in opera
  - la connettorizzazione a perforazione di isolante è semplice, veloce ed economica, anche se alle alte velocità rappresenta un elemento critico, in quanto è il punto in cui le coppie devono essere per forza sbinate

# Il doppino: tipi di doppino

- I doppini di uso più comune prevedono la coesistenza nello stesso cavo di **multiple coppie** di conduttori binati, tipicamente **4 coppie**.
- Esistono varie versioni di doppino:
  - **STP** (*Shielded Twisted Pair*), versione con uno schermo per ogni coppia più uno schermo globale;
  - **FTP** (*Foiled Twisted Pair*), versione con un unico schermo (normalmente in foglio di alluminio) per tutto il cavo;
  - **UTP** (*Unshielded Twisted Pair*) versione non schermata.

# Classificazione dei doppini

- I parametri elettrici operativi di qualsiasi cavo variano con il variare della frequenza di trasmissione
- Occorre chiedersi, per una data applicazione, a quale frequenza sia opportuno operare per decidere se un cavo sia adeguato all'applicazione stessa.
- E' stata creata una classificazione che prevede 7 categorie, in base alle applicazioni per le quali i cavi sono idonei.
  - La categoria 1 è quella dei cavi peggiori, la 7 quella dei migliori.
  - Ogni categoria è idonea a fornire tutti i servizi offerti da quelle inferiori.

# Classificazione dei doppini

- La **categoria 1 (Telecommunication)** comprende i cavi adatti unicamente a telefonia analogica.
- La **categoria 2 (Low Speed Data)** comprende i cavi per telefonia analogica e digitale (ISDN) e trasmissione dati a bassa velocità (per esempio linee seriali).
- La **categoria 3 (High Speed Data)** è la prima categoria di cavi adatti a realizzare reti locali fino a 10 Mb/s, in particolare per soddisfare gli standard 10BaseT di 802.3 e Token-Ring a 4Mb/s.
- La **categoria 4 (Low Loss, High Performance Data)** comprende i cavi per LAN Token-Ring fino a 16 Mb/s.
- La **categoria 5 (Low Loss, Extended Frequency, High Performance Data)** comprende cavi per applicazioni fino a 100 Mb/s, su distanze di 100 metri.
- La **categoria 6 (Low Loss, High Frequency, High Performance Data)** comprende i migliori cavi disponibili, per applicazioni fino a 1000 Mb/s, su distanze di 100 metri.
- La **categoria 7 (ISO/IEC 11801 Class F)**, nome informale. Lo standard specifica 4 STP all'interno di un unico cavo, per velocità fino a 10Gb/s

# Classificazione dei doppini

- I cavi di categoria 6 rappresentano oggi lo stato dell'arte nel campo del cablaggio delle LAN.
- Tutti gli standard di rete a velocità di 100 Mb/s maggiori con trasmissione su due coppie prevedono l'uso di cavi di categoria 5 o superiore.
- Oggi sono diffusi cablaggi secondo la categoria 6, ed è stata standardizzata anche la categoria 7 per applicazioni ad altissime velocità.

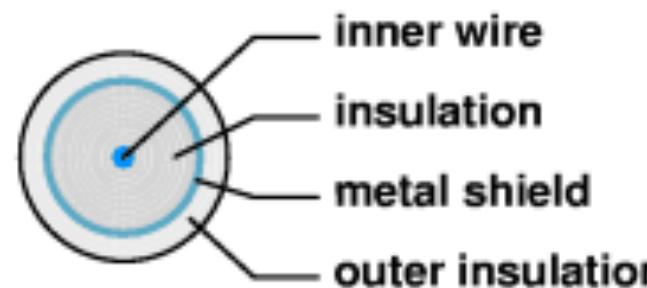
# Il cavo coassiale

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

# Il cavo coassiale

[continua]

- **Cavo coassiale a banda base:** Consiste in un filo di rame rigido circondato da una garza metallica che funge da schermo:

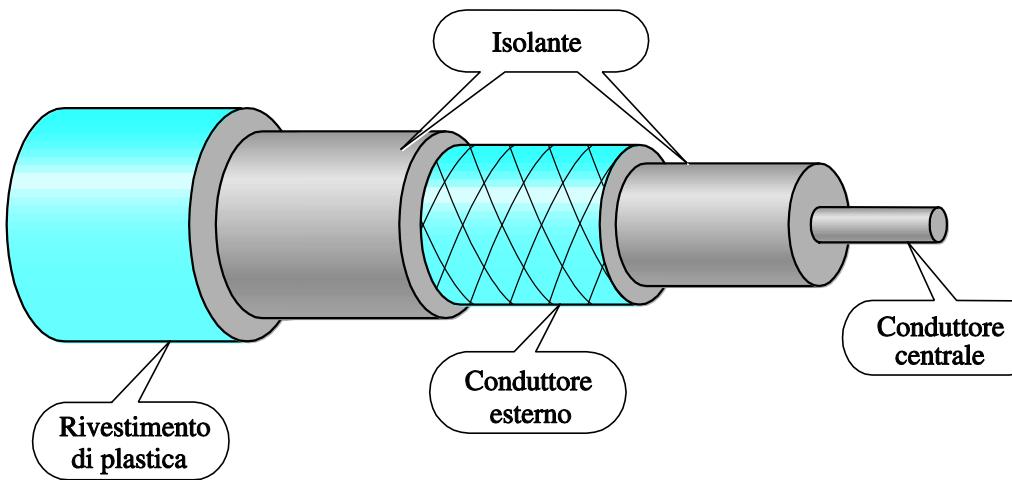


- L'impedenza tipica dei cavi coassiali (**coax**) è di  $50\Omega$ .
- La larghezza di banda dipende dalla lunghezza del cavo: per lunghezze di 1 km sono possibili velocità che variano da 1 a 2 Gbps. Si possono avere anche cavi più lunghi, ma occorre ridurre la velocità di trasmissione e frammezzare ai tratti di cavo degli amplificatori di segnale.

# Il cavo coassiale

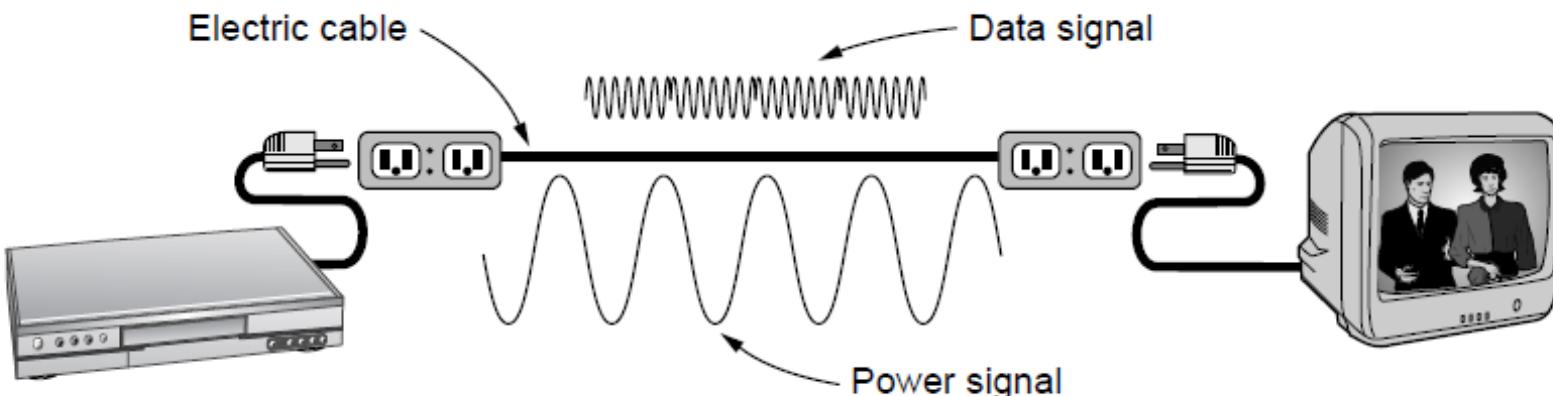
[continua]

- **Cavo coassiale a larga banda:** Consiste in un cavo identico a quello in banda base, ma con un sistema di trasmissione diverso.
- Su coassiale in banda larga, la trasmissione avviene in analogico, cioè in maniera del tutto simile alla trasmissione televisiva.



- La larghezza di banda in questo caso è di 300 Mhz, con lunghezze anche di 100 km.

# Trasmissione Power Line



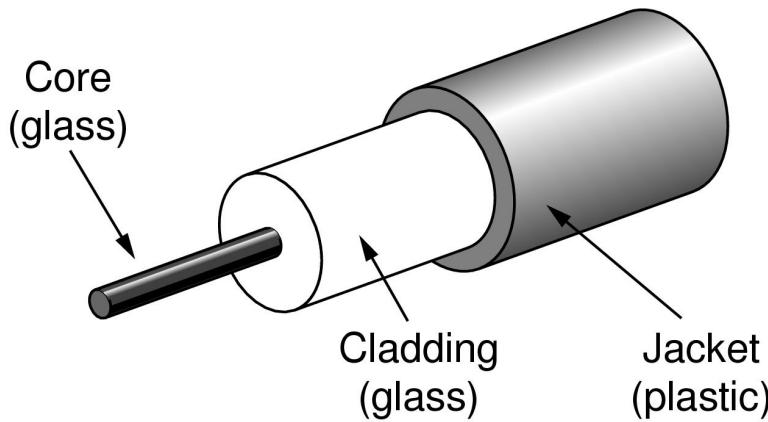
- La trasmissione power line (o a onde convogliate) è una tecnologia per la trasmissione dati che utilizza la rete di alimentazione elettrica come mezzo trasmittivo.
- Si realizza sovrapponendo al trasporto di corrente elettrica, continua o alternata a bassa frequenza (50 Hz in Europa e gran parte dell'Asia e dell'Africa, 60 Hz in altre regioni del mondo), un segnale a frequenza più elevata che è modulato dall'informazione da trasmettere.
- La separazione dei due tipi di correnti si effettua grazie al filtraggio e separazione degli intervalli di frequenze utilizzate.

# Fibre ottiche

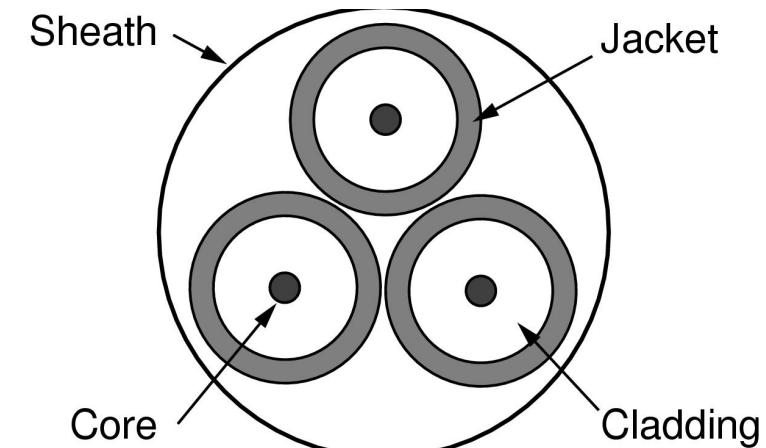
Consistono in un cavo composto da un anima trasparente di silicio avvolto in un rivestimento di vetro con indice di rifrazione diverso.

Tutta la parte in vetro è ricoperta da una guaina di plastica nera.

Le fibre sono normalmente raggruppate insieme intorno ad un filo di metallo che facilita la posa del cavo.



(a)



(b)

# Fibre ottiche

- Caratteristiche principali:
  - + banda (alcune decine di THz)
  - + immunità ai disturbi
  - + leggerezza e flessibilità
  - + meno pericolosa dei mezzi metallici
  - + meno costosa dei mezzi metallici
  - + sicurezza e protezione da intrusioni
  - difficoltà di connettorizzazione e interfacciamento
  - dispersioni
  - effetti non lineari

# Fibre Ottiche

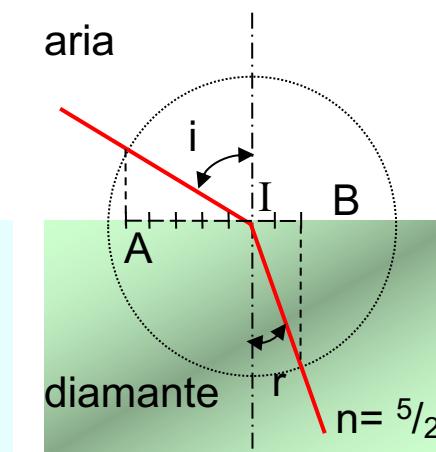
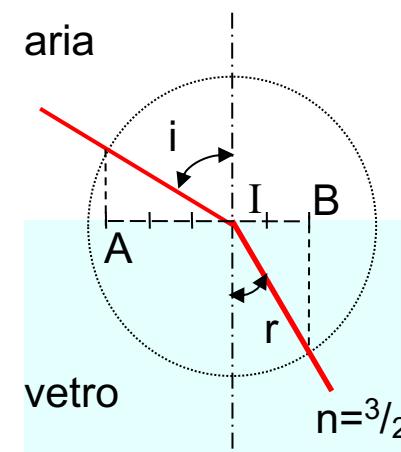
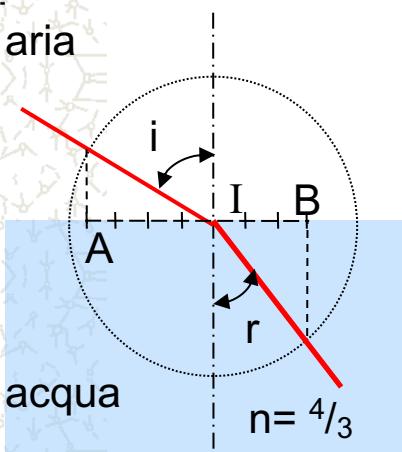
[continua]

- Dalla soluzione delle equazioni di Maxwell si ricava che l'energia si propaga nella fibra in un numero discreto di configurazioni.
- Queste configurazioni sono chiamate modi e ogni singolo modo ha sue caratteristiche di propagazione.
- La larghezza di banda in questo caso è di oltre 30.000 GHz.
- L'attuale limite di trasmissione è dovuto semplicemente al fatto che un sistema a fibra ottica necessita di due conversioni: la prima da elettrico a luce, e la seconda luce ad elettrico.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \\ \nabla^2 A_x - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} = -\mu \rho v_x \\ \nabla^2 A_y - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} = -\mu \rho v_y \\ \nabla^2 A_z - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial t^2} = -\mu \rho v_z \end{cases}$$

# Rifrazione: la legge di Snell

Si definisce rifrazione “il fenomeno per cui un raggio luminoso (non perpendicolare alla superficie di contatto) passando da un mezzo trasparente ad un altro, anch’esso trasparente, di diversa densità, cambia direzione nel punto in cui attraversa la superficie di separazione dei due mezzi”.



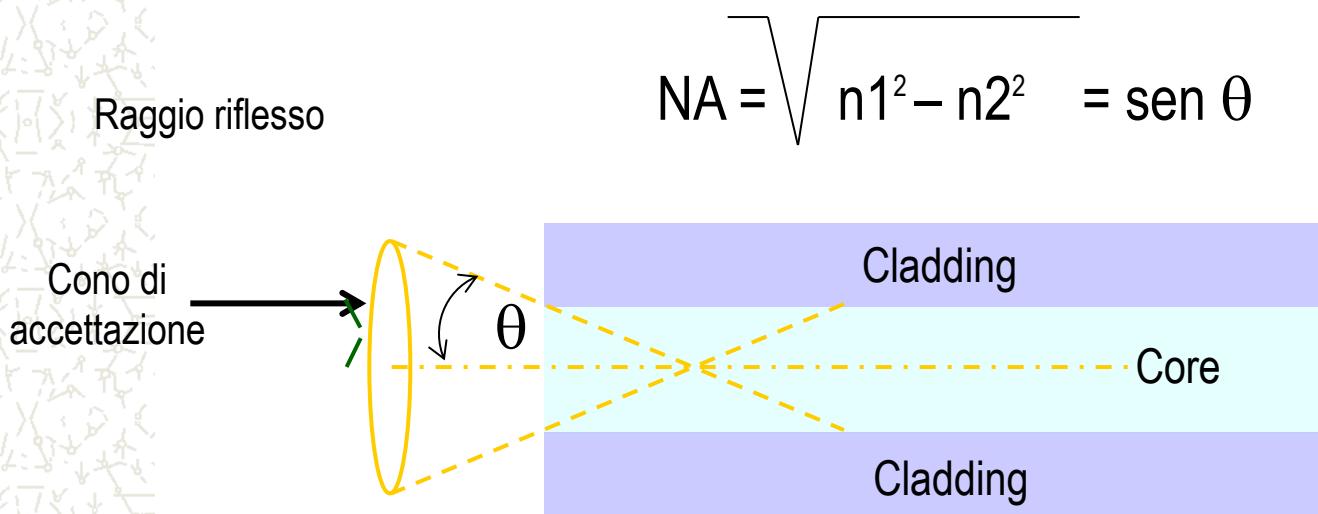
$$n = \frac{IA}{IB} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Indice di rifrazione del secondo mezzo (attraversato dal raggio luminoso) rispetto al primo; il rapporto è costante al variare dell’angolo “ $i$ ” del raggio incidente.

Gli angoli dei raggi incidenti e rifratti sono misurati rispetto alla perpendicolare della superficie di contatto dei due mezzi

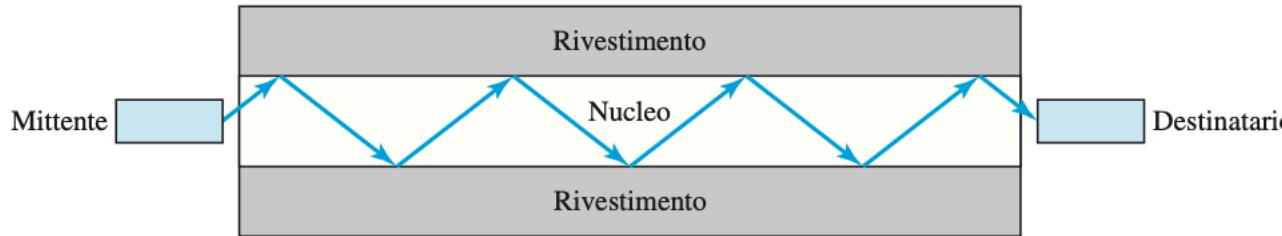
# Apertura numerica

- Secondo la legge di Snell per valori dell'angolo di incidenza superiori a un certo valore critico, si ha riflessione totale (effetto **non desiderato**)
- L'apertura numerica (NA) indica la quantità di luce che è possibile lanciare all'interno della fibra senza che questa venga riflessa
- E' quindi caratterizzata da un angolo limite che varia in funzione degli indici di rifrazione del core e del cladding
- Maggiore sarà l'angolo di accettazione, più alta sarà l'apertura numerica della fibra, cioè la quantità di luce che si riesce ad introdurre



# Fibra ottica: propagazione della luce

- Un raggio di luce (**modo**) generato da un emettitore (diodo led, laser) si muove attraverso il core in linea retta fino a che raggiunge il bordo e quindi il cladding.
- In tale punto c'è un cambiamento improvviso di densità che fa cambiare l'angolo di propagazione del raggio, che procede così in avanti nel core e così via...



- Il tempo di propagazione varia da modo a modo con l'angolo di incidenza.
  - Il modo assiale ha il ritardo minore in quanto compie il tragitto più breve
  - il modo con un angolo di ingresso prossimo all'angolo di accettazione ha il ritardo maggiore in quanto compie un percorso più lungo, a causa del numero maggiore di riflessioni che subisce
- Questo fenomeno provoca una distorsione (**dispersione modale**) in quanto l'energia associata ai diversi modi giunge all'uscita in tempi diversi facendo sì che la forma dell'impulso in uscita risulta allargata rispetto a quella di ingresso.

# Modi di propagazione

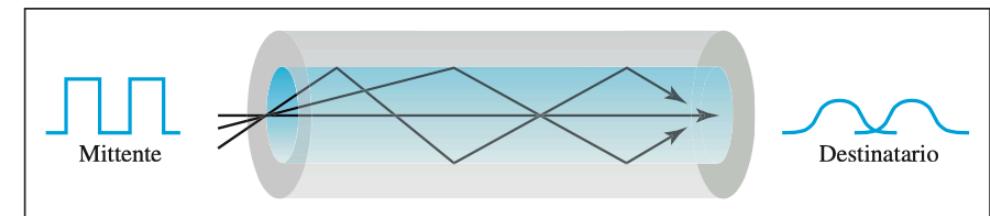
All'interno di una fibra la luce può propagarsi in accordo a diversi modi (fasci di fotoni) simultanei o non simultanei in dipendenza dal tipo di fibra utilizzata:

- **Fibre ottiche multimodali:** propagazione secondo diversi modi e percorsi simultanei

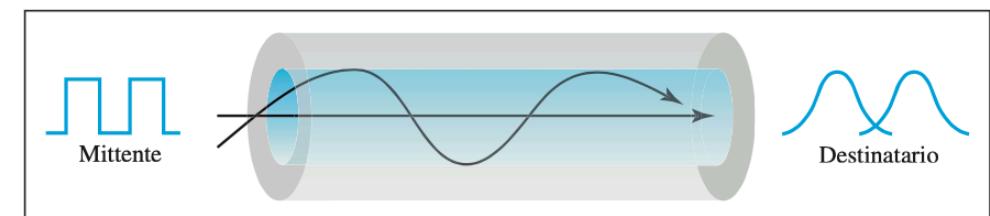
- **step-index** (o a indice di variazione a gradino/scatto)
- **graded-index** (o a indice di variazione graduale)

- **Fibre ottiche monomodali:** propagazione in un unico modo

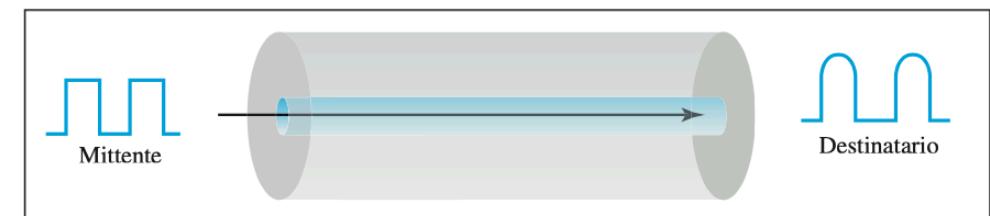
- La fibra si comporta come una guida d'onda
- Maggiori distanze coperte
- Nessuna dispersione modale



a. Multimodo, indice a scatto



b. Multimodo, indice graduale



c. Modo singolo

# Geometria fibre ottiche

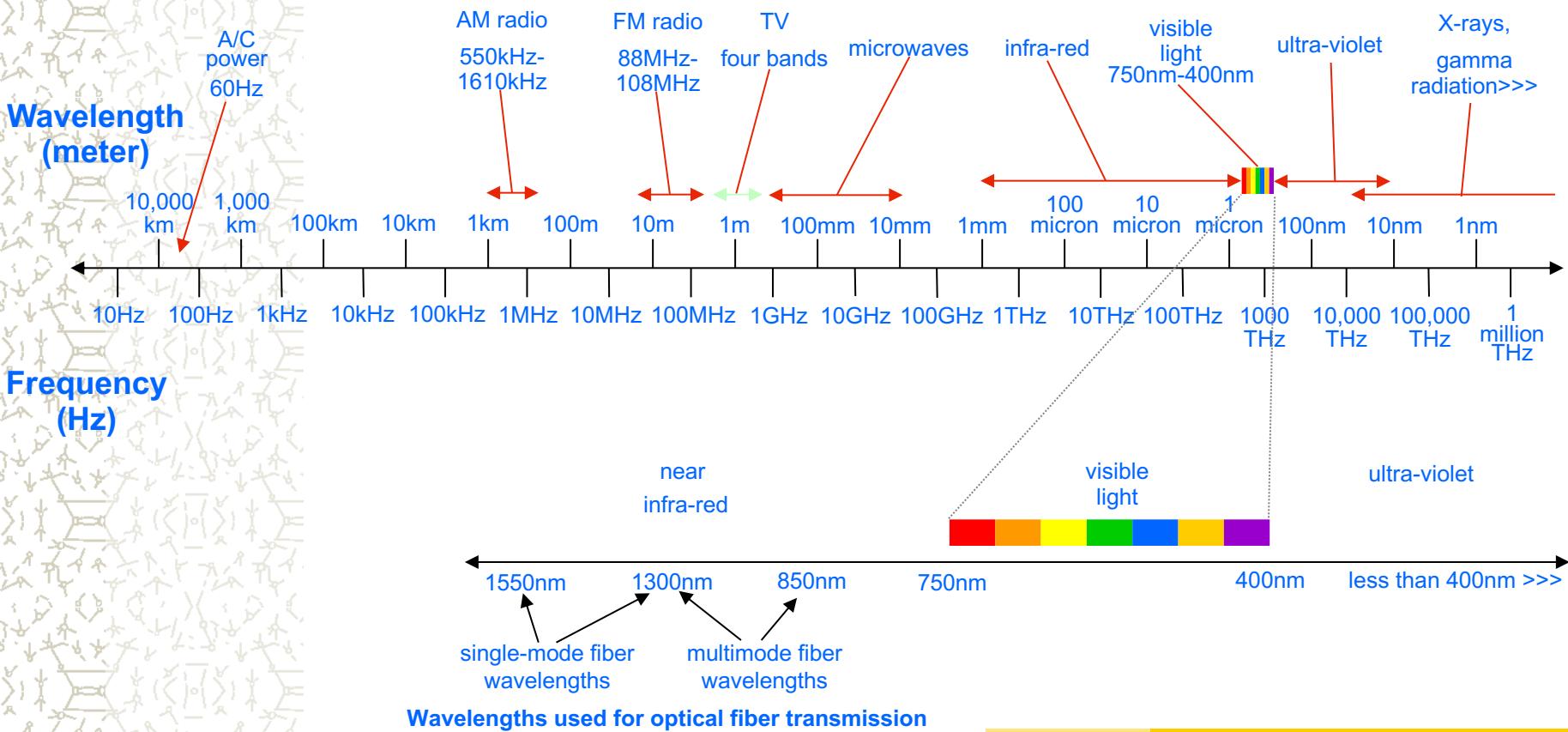
Si riportano nel seguito le principali caratteristiche dei più comuni tipi di fibra ottica in termini di dimensioni del cavo interno (core) e del rivestimento (cladding)

Tipo	Spessore cavo ( $\mu\text{m}$ )	Spessore rivestimento ( $\mu\text{m}$ )	Modalità di trasmissione
50/125	50.0	125	Multimodo, indice graduale
62.5/125	62.5	125	Multimodo, indice graduale
100/125	100.0	125	Multimodo, indice graduale
7/125	7.0	125	Modo singolo

# Lo spettro elettromagnetico

# Lunghezze d' onda

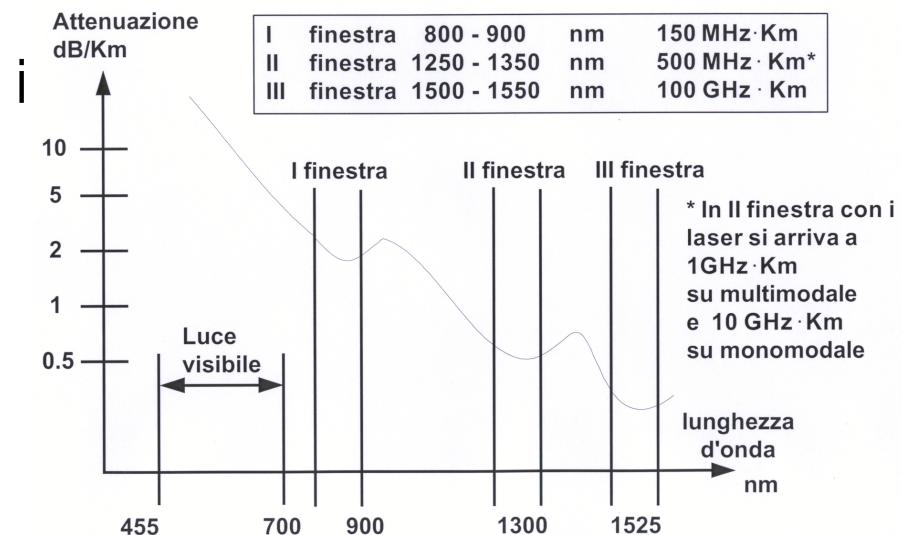
- Mezzo per definire la luce
- Misurata in nanometri
- 1 nanometer =  $10^{-9}$  m



# Finestra operativa

<i>Window</i>	<i>Operation</i>
<b>800 - 900 nm</b>	<b>850 nm</b>
<b>1250 - 1350 nm</b>	<b>1300 / 1310 nm</b>
<b>1500 - 1600 nm</b>	<b>1550 nm</b>

E' il range di lunghezze d' onda i cui la fibra funziona meglio  
Centrata intorno alla lunghezza d' onda di funzionamento tipica

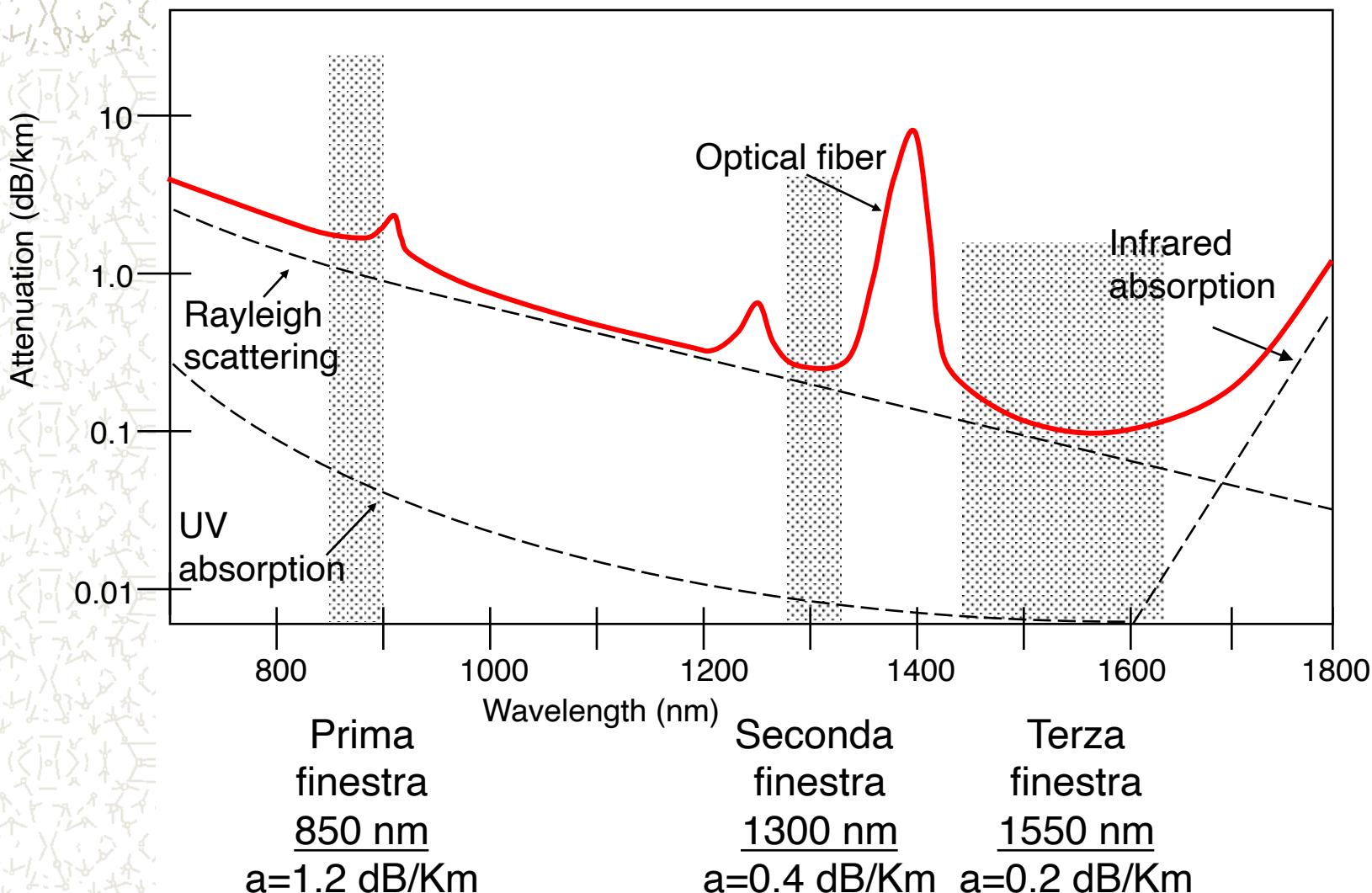


# Attenuazione

- Parte dell'energia luminosa che si propaga lungo la fibra viene assorbita dal materiale o si diffonde in esso, costituendo quindi una perdita ai fini del segnale trasmesso.
- Il rapporto tra la potenza ottica trasmessa e quella ricevuta, dopo aver percorso una lunghezza di fibra di riferimento, definisce l'attenuazione della fibra stessa, in funzione della lunghezza d'onda e del tipo di fibra

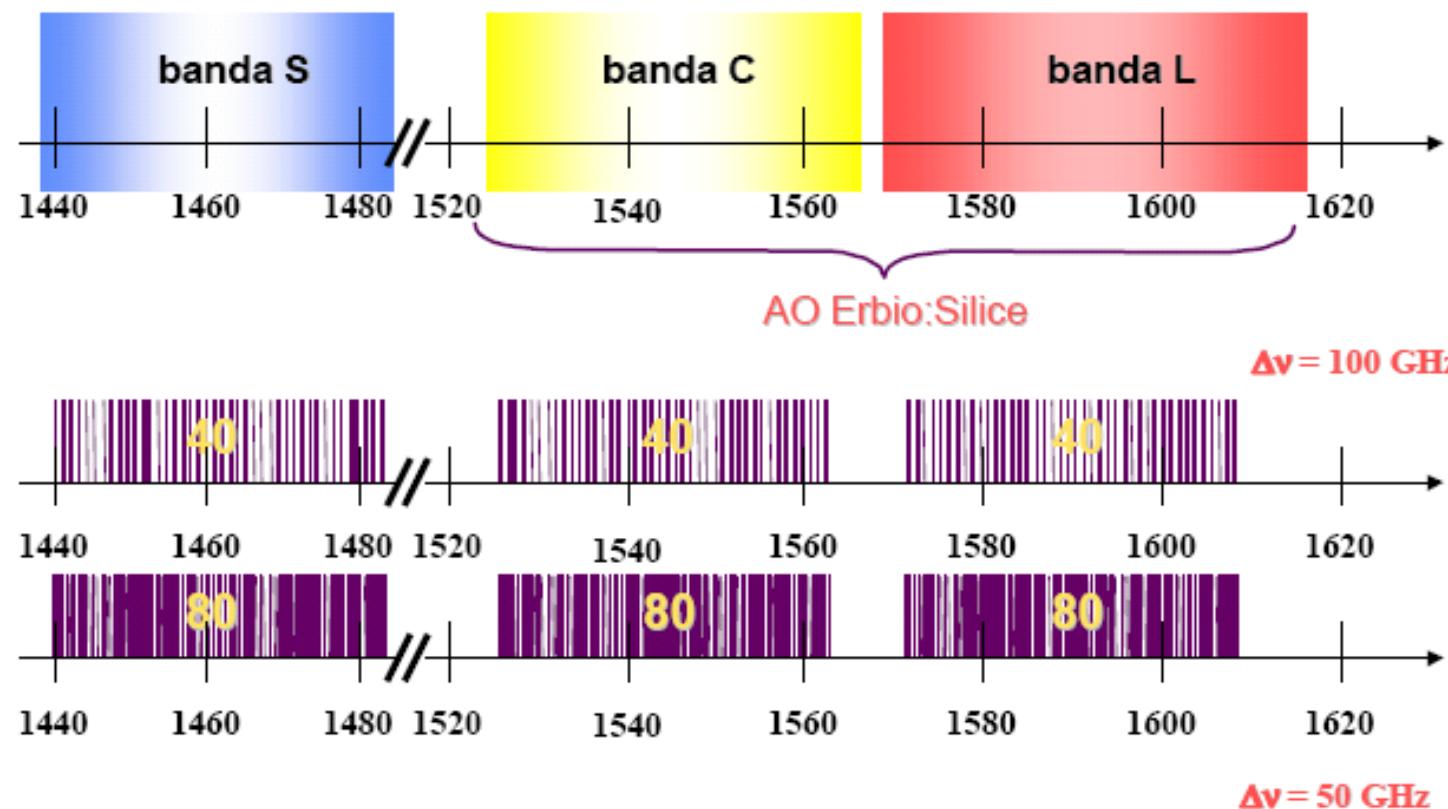
**Minore è l'attenuazione maggiore la distanza utile per la trasmissione**

# Attenuazione delle fibre



# Bande trasmissive

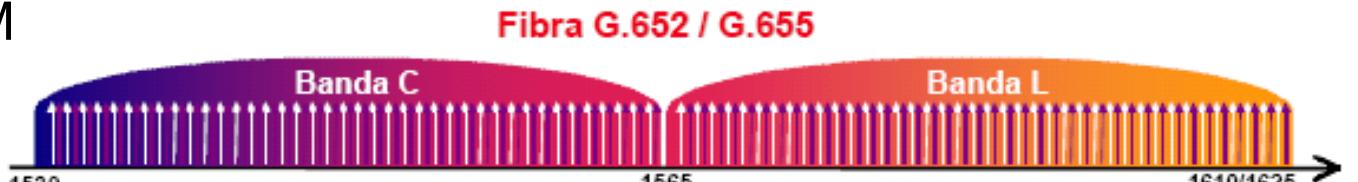
- Le fibre ottiche sono utilizzate per scopi di telecomunicazioni per distanze superiori a qualche chilometro e velocità di trasmissione superiori ai 100 Mbit/s nelle bande attorno a:
  - 1300 nm (II finestra)
  - 1550 nm (III finestra, minimo assoluto dell'attenuazione)
- La banda trasmissiva nelle due finestre è circa 25000 GHz



# Tipi di fibre

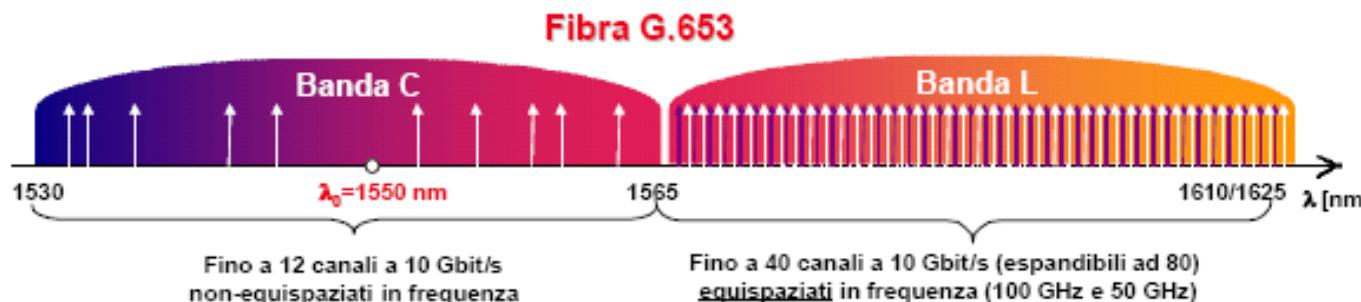
Le fibre più utilizzate sono

- Fibra standard ITU-T **G.652** (ottimizzata per l'uso in II finestra)
- Fibra standard ITU-T **G.653** (Dispersion Shifted, ottimizzata per l'uso in III finestra)
- Fibra a dispersione non nulla ITU-T **G.655** (ottimizzata per DWDM in III finestra)
- Nel caso di fibra G.652, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dalla dispersione cromatica e di polarizzazione
- Nel caso di fibra G.653, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dal FWM



Fino a 40 canali (espandibili ad 80) a 10 Gbit/s  
equispaziati in frequenza (100 GHz e 50 GHz)

Fino a 40 canali (espandibili ad 80) a 10 Gbit/s  
equispaziati in frequenza (100 GHz e 50 GHz)



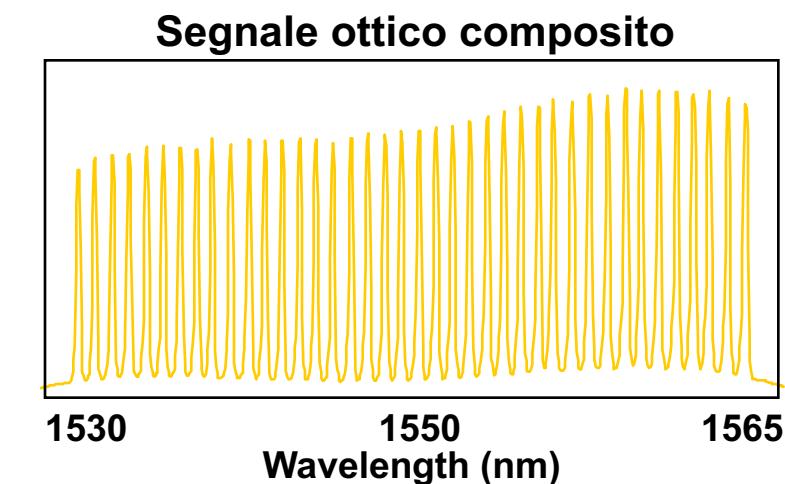
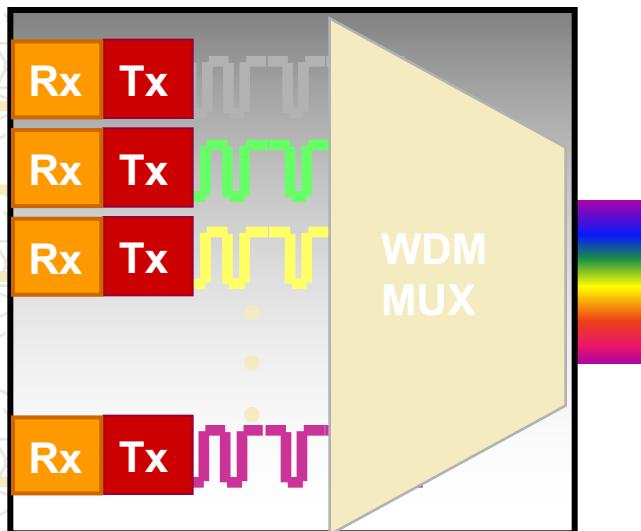
Fino a 12 canali a 10 Gbit/s  
non-equispaziati in frequenza

Fino a 40 canali a 10 Gbit/s (espandibili ad 80)  
equispaziati in frequenza (100 GHz e 50 GHz)

# Wavelength Division Multiplexing

- Consente di veicolare più lunghezze d'onda  $\lambda$  (oggi fino a **320**) all'interno del medesimo portante fisico, ciascuna con capacità trasmittiva fino a **40 Gbps** (OC768), dipendentemente dalla qualità della fibra e degli apparati di trasmissione

I segnali sono multiplexati nel dominio delle lunghezze d'onda

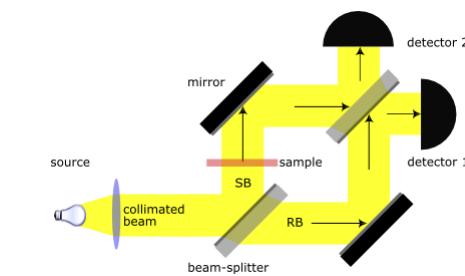
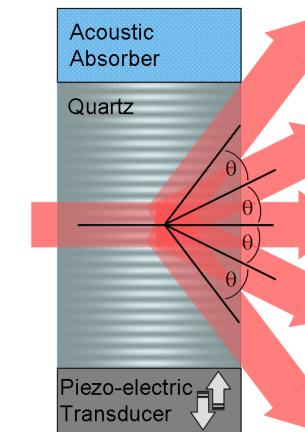
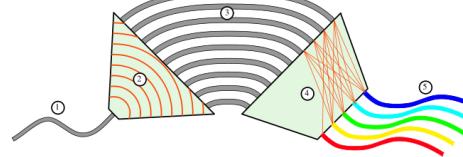
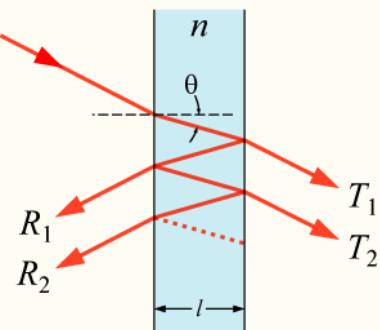


# Multiplazione WDM

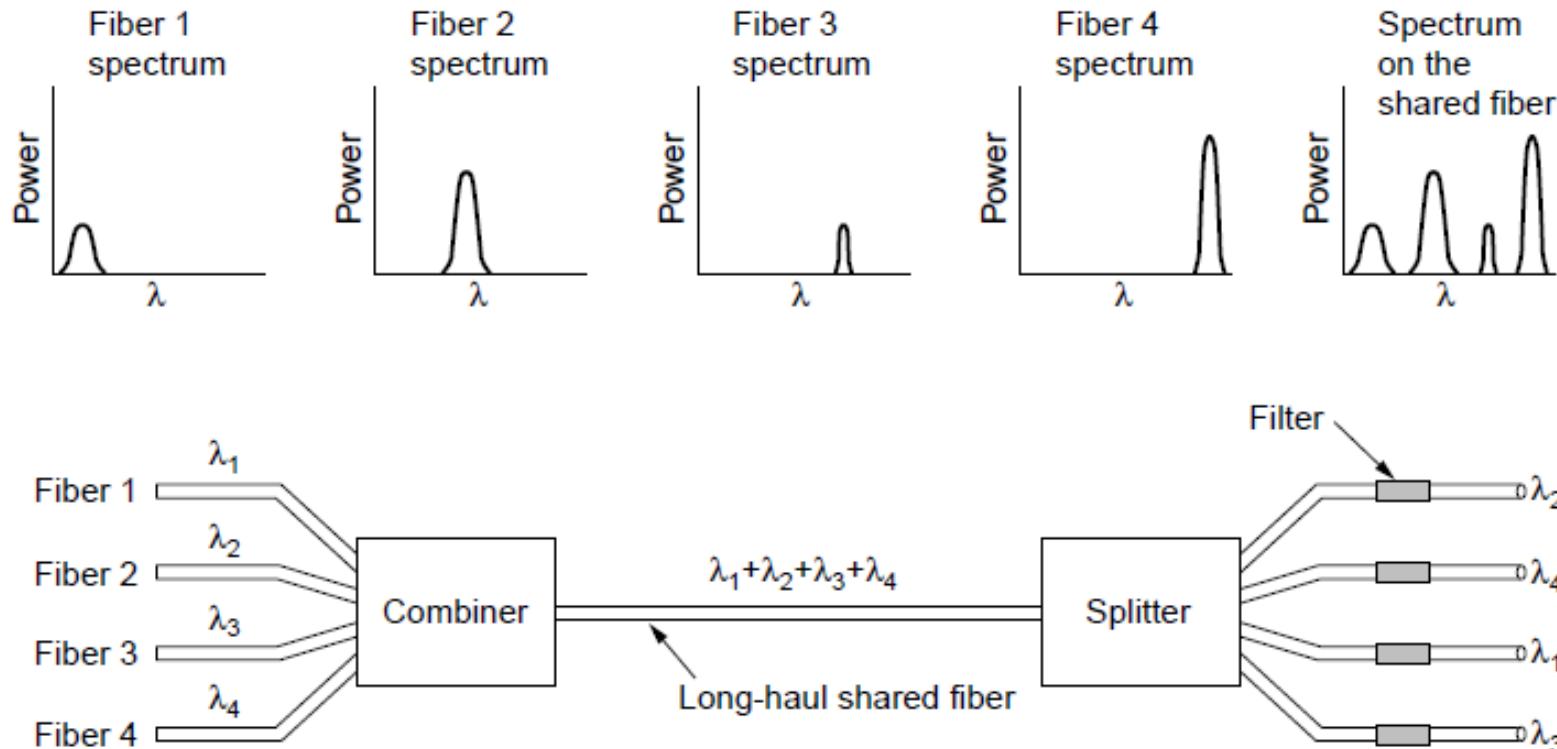
- Le tecniche WDM sono più naturali nel dominio fotonico.
- La divisione della banda disponibile in canali è comunque necessaria in quanto il canale ottico, anche se attraversa solo punti di commutazione operanti nel dominio fotonico, è attestato nel dominio elettronico.
- Nel caso di puro WDM, è possibile offrire agli utenti canali trasparenti end-to-end, chiamati *lightpath*. Se le distanze coperte sono grandi, può essere necessario **R**igenerare i segnali, operazione cui è sovente associata una **R**isincronizzazione e una **R**isagomatura (si parla di **3R**) nel caso di segnali numerici.
- Possiamo avere lightpath *trasparenti* (tutto ottici) o *opachi* (che ammettono 3R, 2R, o 1R, in ottica o in elettronica).

# Multiplazione WDM

- I multiplatori/demultiplatori ottici sono componenti passivi in grado di multiplare/demultiplare i segnali colorati caratterizzati da diverse lunghezze d'onda
- Possono essere realizzati con le seguenti modalità
  - Filtri di Fabry Perot
  - Reticoli: di Bragg, in fibra, in schiere di fibra ottica (AWG)
  - Filtri acusto-ottici
  - Interferometri Mach-Zehnder



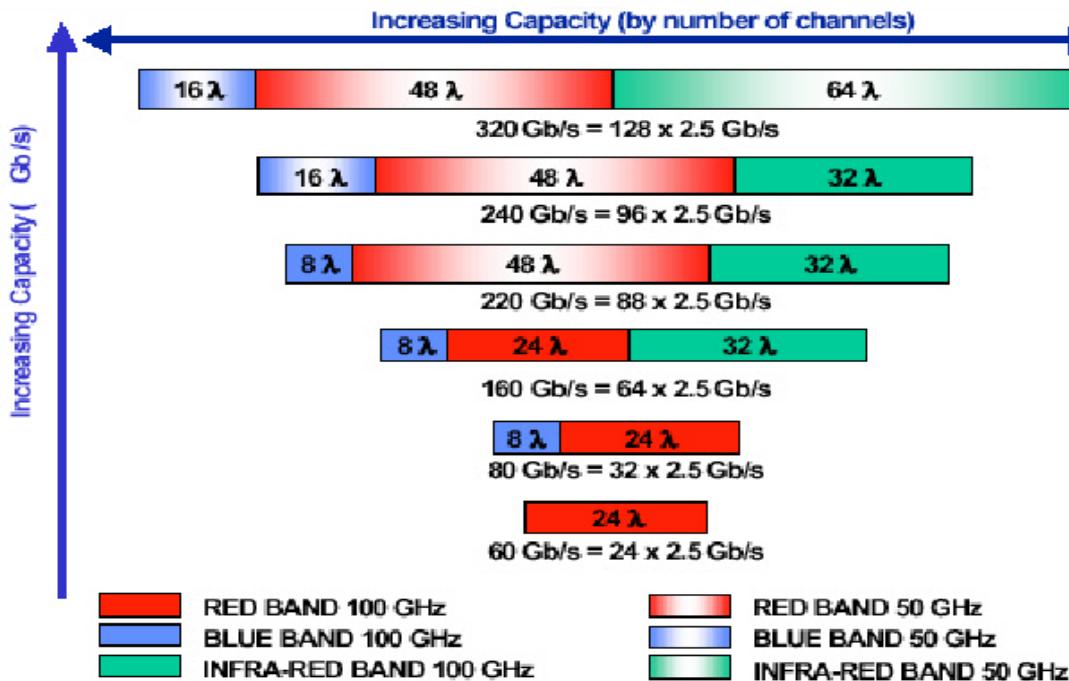
# Wavelength Division Multiplexing



Wavelength division multiplexing

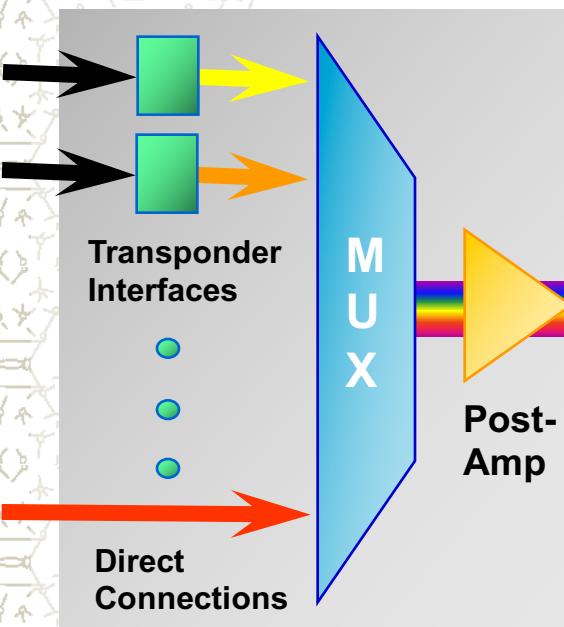
# WDM - separazione fra bande

- BLUE BAND: regione 1529-1536nm
  - (8 canali 100Ghz spaced/16 canali 50Ghz spaced multiplexabili)
- RED BAND: regione 1542-1561nm
  - (24 canali 100Ghz spaced/48 canali 50Ghz spaced multiplexabili)
- INFRARED BAND: regione 1575-1602nm
  - (32 canali 100Ghz spaced/64 canali 50Ghz spaced multiplexabili)

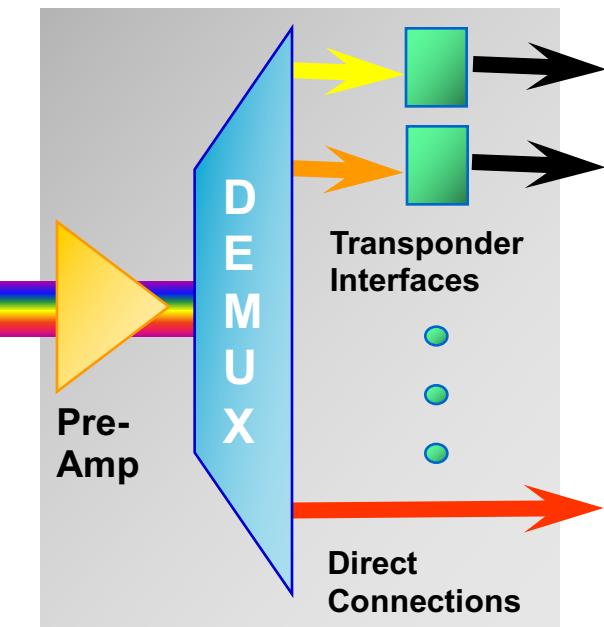


# Le componenti dell'architettura WDM

Terminazione A



Terminazione B



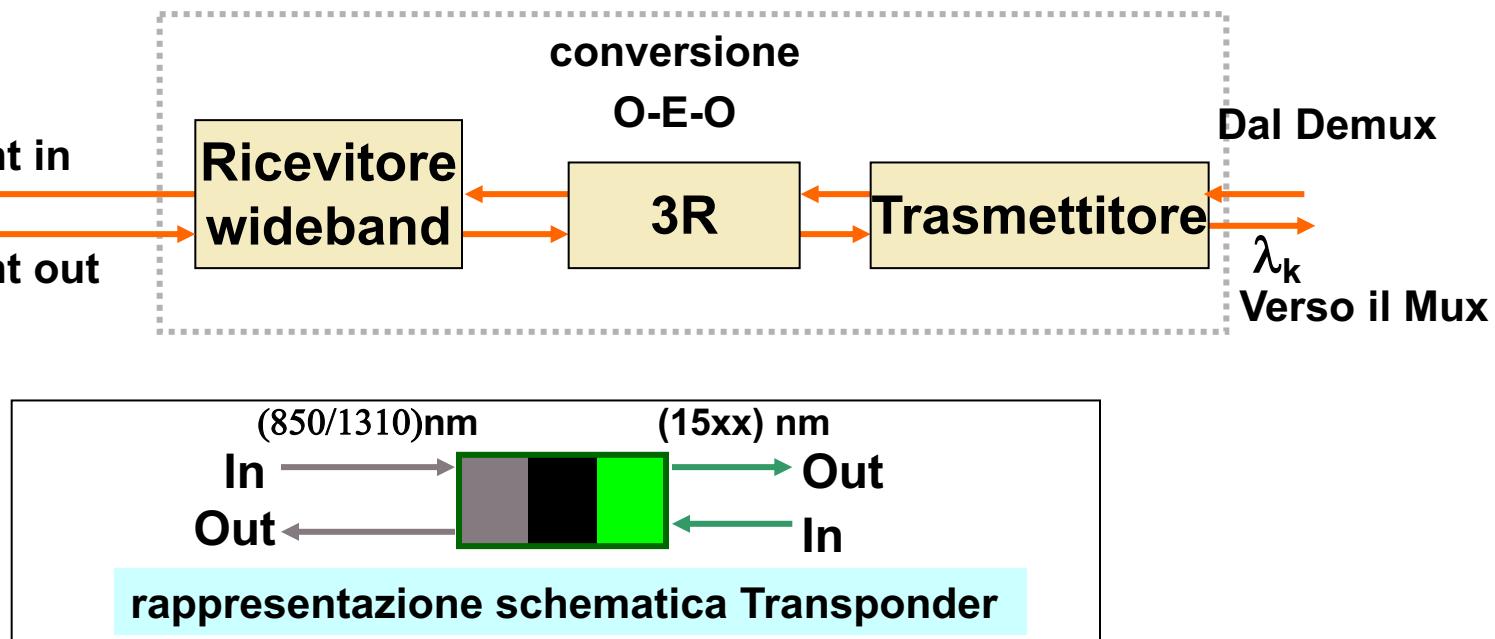
Componenti di base

- Amplificatori ottici
- Multiplexers ottici
- Sorgenti ottiche stabili



# Il Transponder

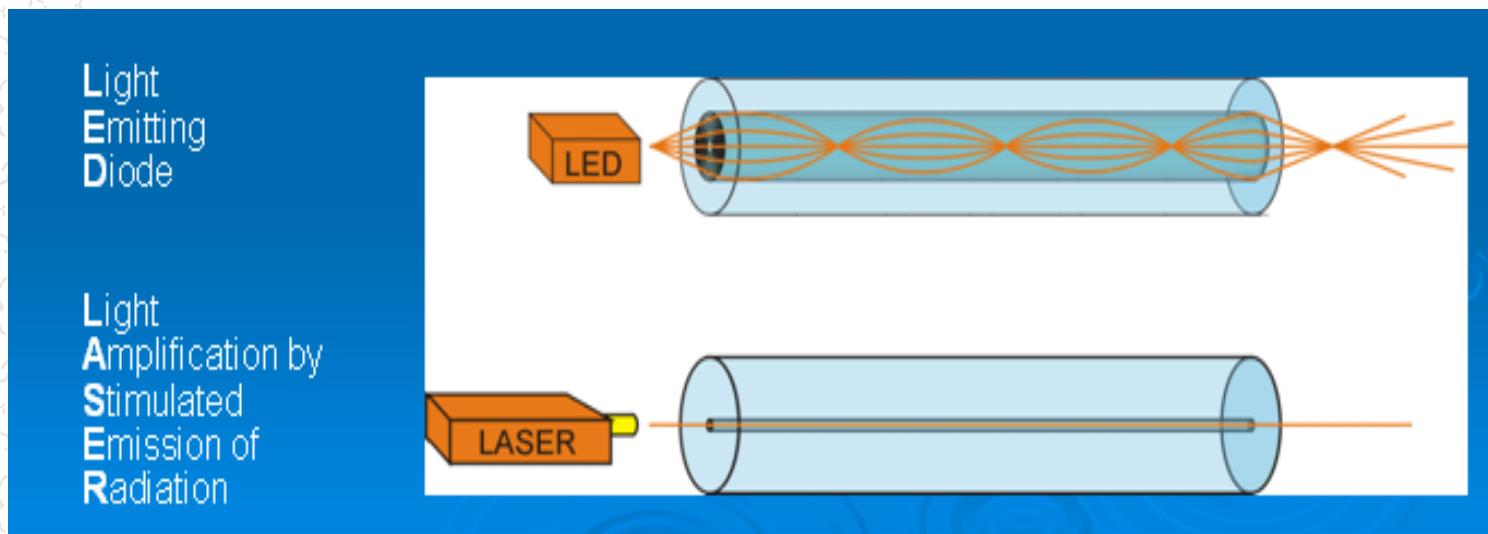
- Effettua una traslazione del segnale ottico utente convertendolo in una frequenza compatibile con la griglia di funzionamento del sistema DWDM



I transponder disponibili commercialmente sono “fully tunable”, ovvero i laser possono essere sintonizzati via software su qualsiasi delle 80 lunghezza d’onda disponibili nella griglia di funzionamento.

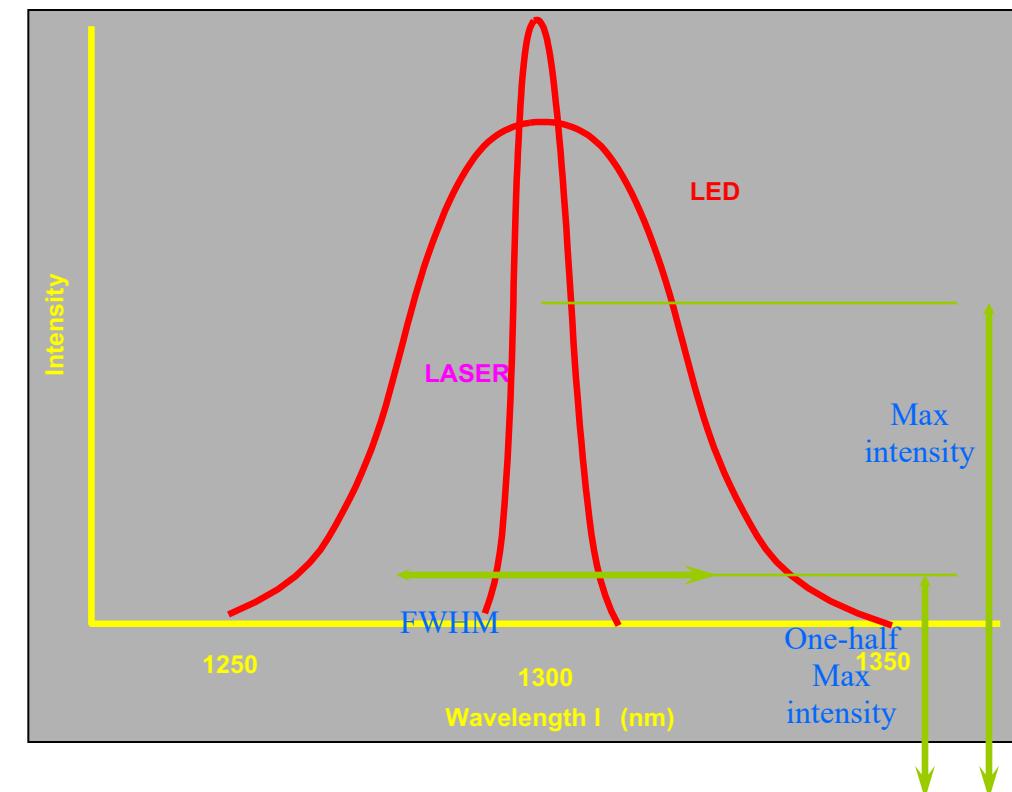
# Trasmissione sulla fibra

- La trasmissione attraverso la fibra ottica può essere effettuata con due diverse modalità
  - Con LED Light Emission Diode sulle fibre Multimodali
  - Con Laser (classe 2) sulle fibre Monomodali
  - Con i VCSEL, (vertical cavity - surface emitting lasers) laser a semiconduttore che , hanno un sistema ottico non particolarmente complesso che permette l'emissione del fascio laser perpendicolarmente alle superfici di crescita dei semiconduttori, con ridotta difficoltà costruttiva, dimensioni inferiori necessità di potenze di alimentazione inferiori .
- Le due diverse modalità di trasmissione hanno costi molto diversi e possono essere utilizzate per applicazioni specifiche anche a seconda della finestra di utilizzo



# LED e LASER

- La potenza totale emessa da un trasmettitore è distribuita su un range di lunghezze d'onda diffuse intorno al centro d'onda. Questo range è la larghezza di spettro, misurato in nanometri.
- La larghezza di spettro varia da stretta (alcuni nanometri) a larga (da decine a centinaia di nanometri) dipendente dal tipo di sorgente utilizzata (Laser o LED). Larghe ampiezze di spettro portano a incrementare la dispersione .



# Differenze fra LED, VCSEL e LASER

Una differenza importante nell'impiego di LED, VCSEL e LASER risiede anche nella maniera in cui queste sorgenti lanciano impulsi di luce nelle fibre.

Un LED realizza una condizione di lancio detta “**Overfilled Launch**” (illumina completamente il nucleo di una fibra multimodale, con molti modi copre l'intero diametro di una MMF).

I VCSEL sono più focalizzati dei LED nell'immettere potenza ottica nella fibra. Il diametro del fascio luminoso del LASER impiegato per gli apparati 1000BaseLX è ancor più ridotto.

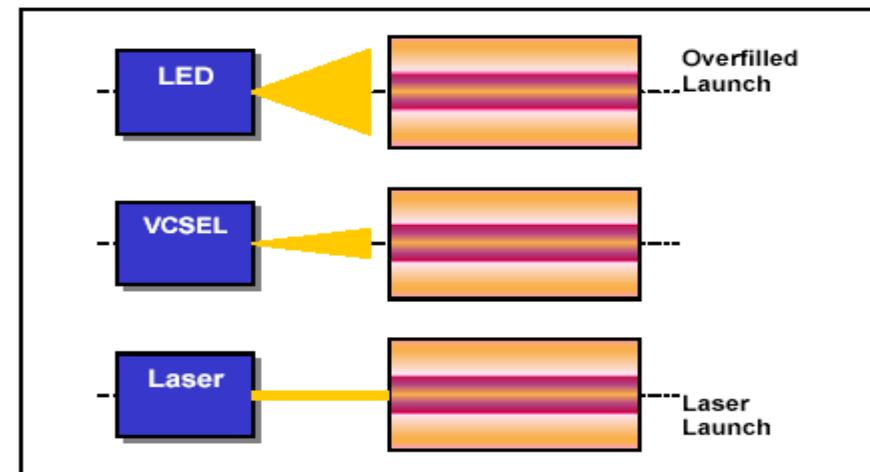
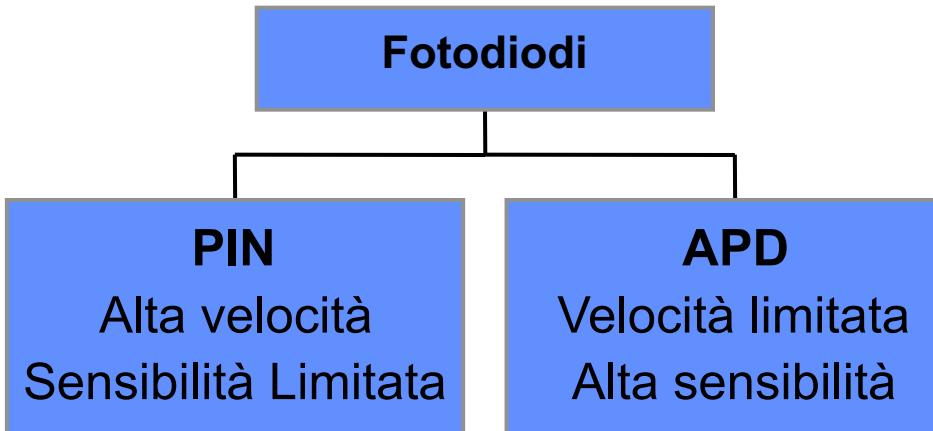


Figura 1:  
Differenti tipologie di lancio



# I ricevitori

- Trasformano segnale luminoso in segnale elettrico
- Sono dei fotodiodi con funzionamento opposto rispetto ai LED
- Sono dispositivi che hanno una finestra di ricezione ampia (lo stesso fotorilevatore è in grado di convertire segnali luminosi a diverse lunghezze d'onda)
  - Positive-Intrinsic-Negative (PIN) diode, corrente proporzionale alla potenza luminosa
  - Avalanche PhotoDiode (APD), extra-guadagno di corrente ma piu' rumore



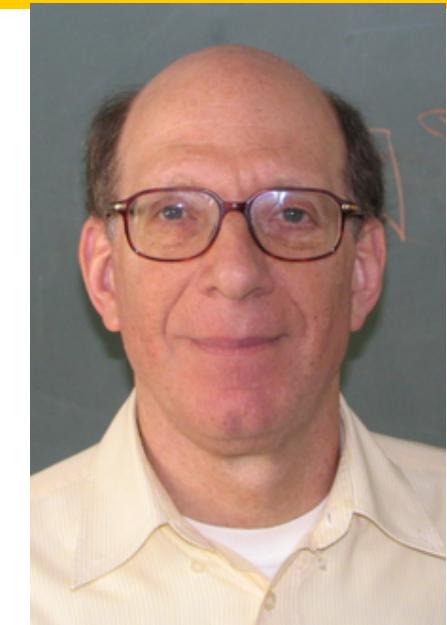
# I paradosso di Tanembaum

- “Never underestimate the bandwidth of a station wagon full of tapes hurtling down the highway”.

Andrew S. Tanenbaum *Computer Networks*, 4th ed., p. 91

Consideriamo una singola fibra ottica:

- Allo stato dell'arte è possibile trasportare **320 λ** in una singola banda dello spettro (e.g. C-Band)
- Ogni  $\lambda$  può trasportare una capacità di **100 Gbit/s**
- La capacità totale è:  **$320 * 100 * 10^9 / 8 = 4000 \text{ GByte/sec}$**



Consideriamo ora un camioncino tipico da 10 tonnellate di carico:

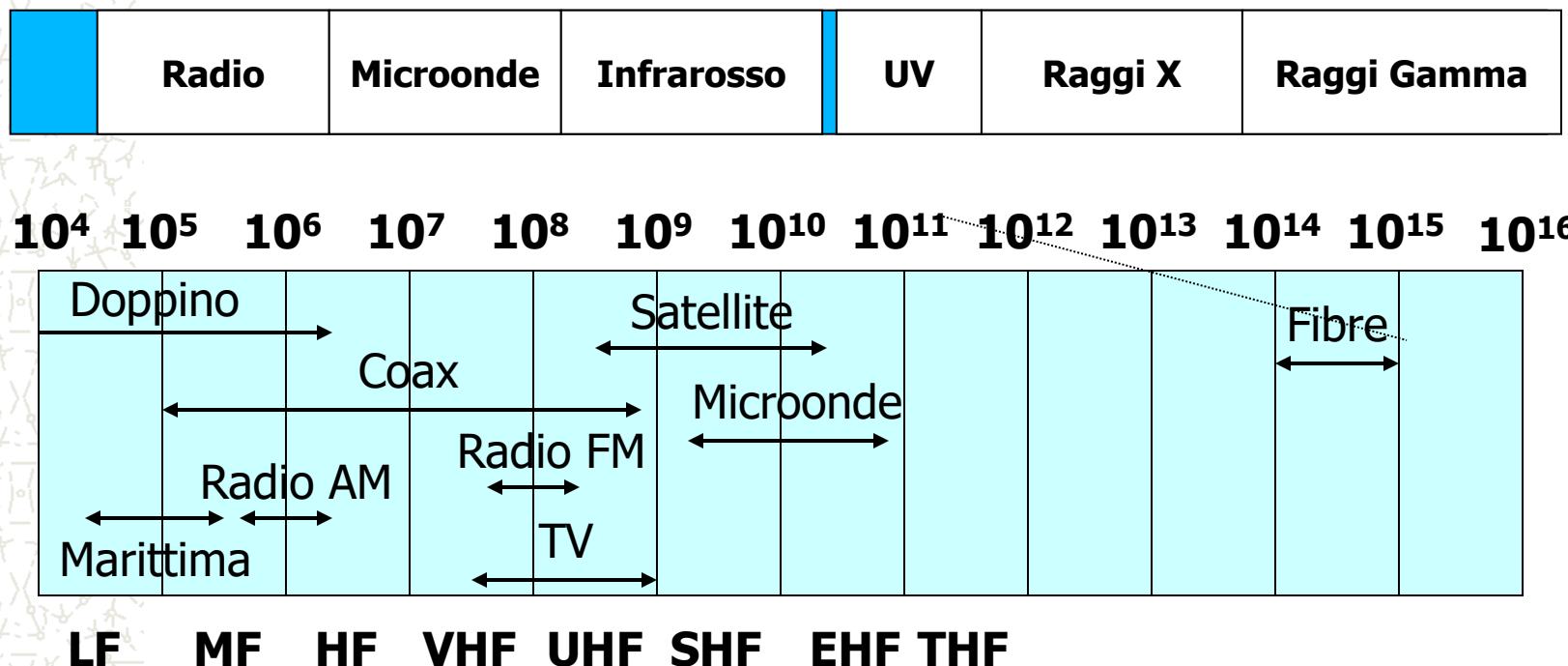
- Un singolo nastro che può immagazzinare **80 Gbyte**, pesa circa **100 g (0.1 Kg)**
- Il camioncino può trasportare  **$(10000 / 0.1) * 80 \text{ Gbyte} = 8 \text{ Pbyte}$**
- **$\text{camiom} / \text{fibra} = 8 \text{ PByte} / 4000 \text{ GByte/sec} = 2000 \text{ s} \approx 0.55 \text{ h}$**
- LA fibra **vince** per distanze più lunghe di quelle reggiungibili in 0.55 ore, cioè circa **50 km** (senza considerare il tempo necessario per gestire 100000 tapes)

# Trasmissione Wireless

- Lo Spettro Elettromagnetico
- Trasmissione Radio
- Trasmissione Microwave
- Trasmissione Infrarossi e Onde millimetriche
- Trasmissione Lightwave

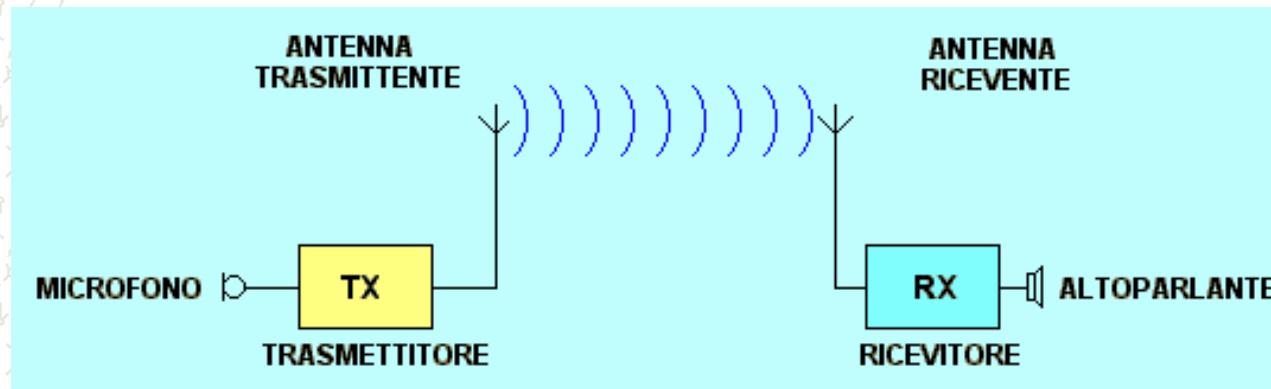
# Mezzi di trasmissione Wireless

**L'aria:** L'aria è un buon mezzo di trasmissione, in particolare le onde radio sono facili da generare, possono viaggiare per lunghe distanze e penetrano facilmente negli edifici. Inoltre sono omnidirezionali, quindi il trasmettitore e il ricevitore non devono essere allineati.

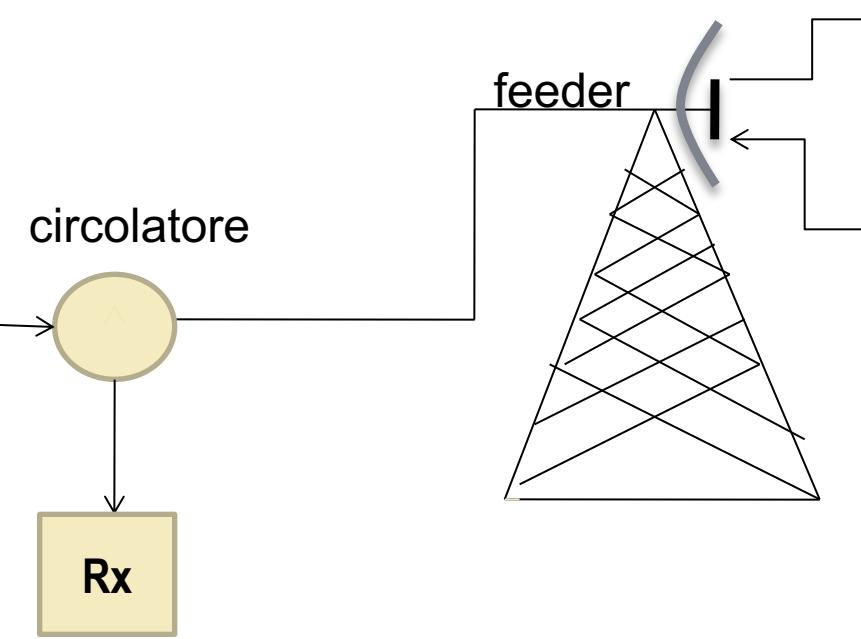


# Schema sistema tlc via etere

- Ogni trasmissione radio via etere, utilizza due stazioni ( trasmittente e ricevente) separate dall'etere come schematicamente indicato in figura.



# Sistema di antenna



- **Elemento irradiante o ricevente:** è l'antenna vera e propria che realizza la trasduzione
- **Feeder di antenna:** è il mezzo trasmisivo utilizzato per collegare il trasmettitore o il ricevitore con l'antenna
- **Dispositivi di diramazione o circolatore:** è utilizzato quando si vuole impiegare l'antenna sia per trasmettere che per ricevere; consente di separare la trasmissione dalla ricezione

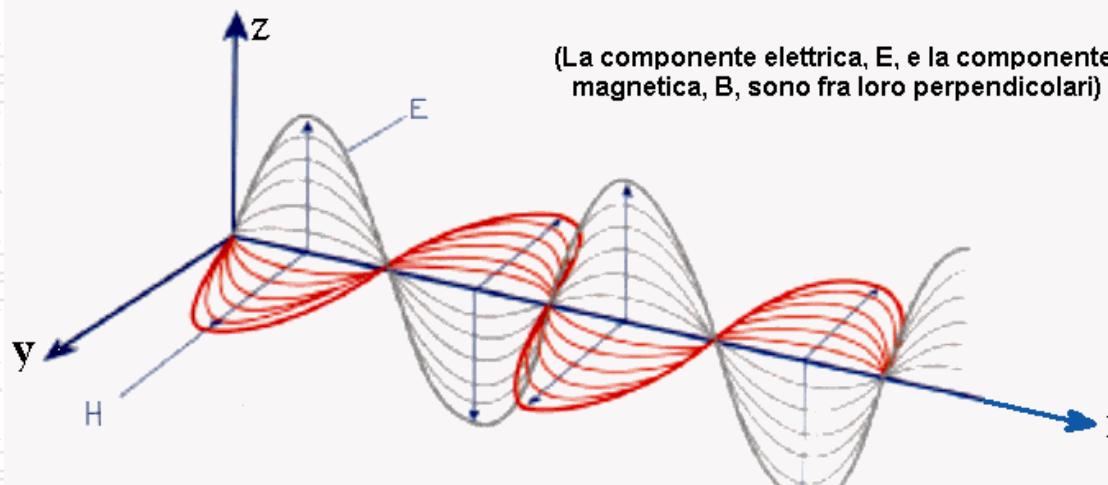
# Le onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche, ipotizzate teoricamente da James Clerk Maxwell nel 1864, sperimentate in laboratorio da Hertz e utilizzate nella Radio da Marconi nel 1895, sono costituite da oscillazioni, del campo elettrico e del campo magnetico, che si propagano nel vuoto alla velocità di circa:

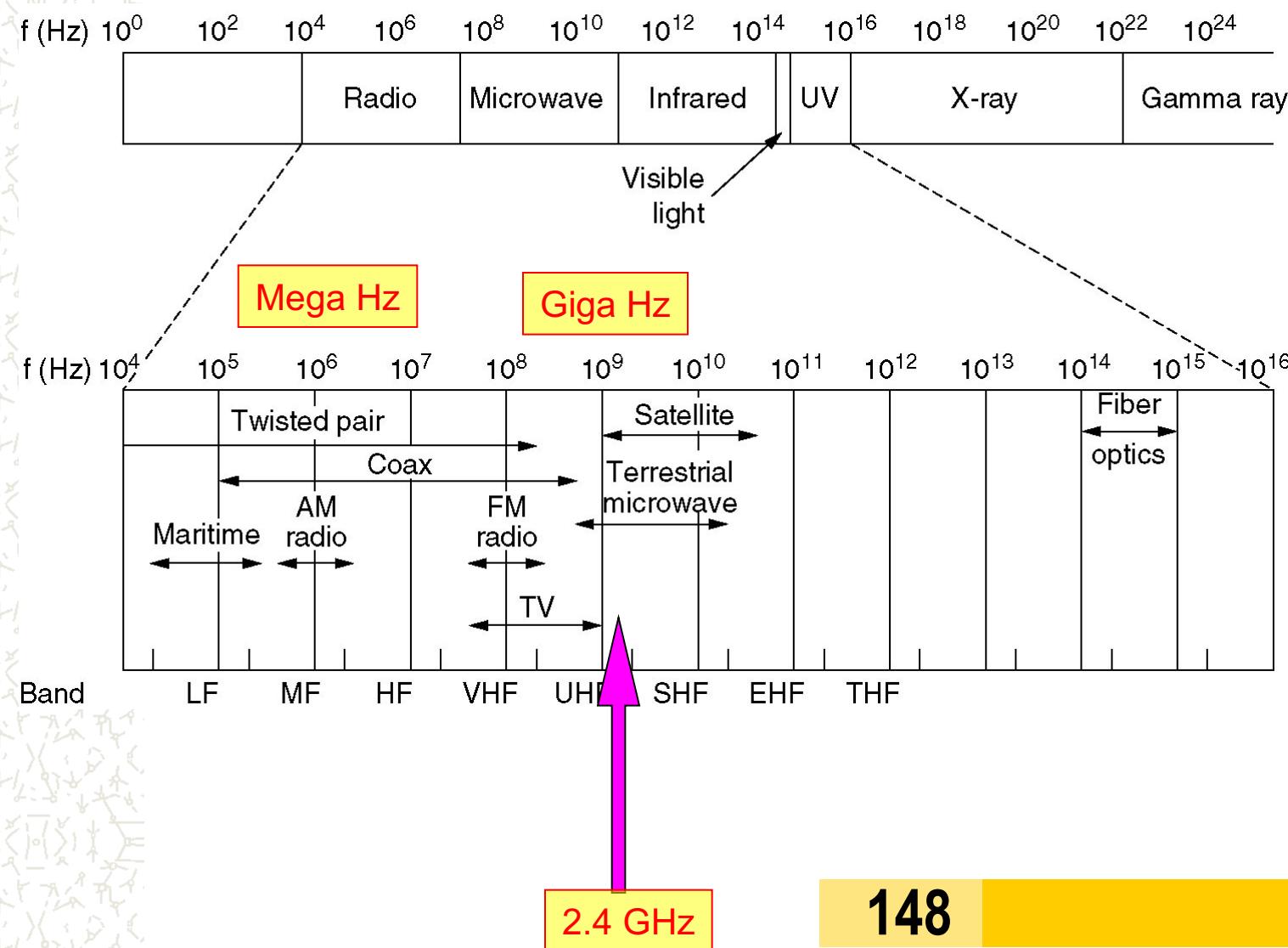
$$c = 300.000 \text{ Km/sec}$$

secondo il disegno seguente

Rappresentazione schematica di un campo elettromagnetico che si propaga lungo la direzione "x"



# Lo Spettro Elettromagnetico



# Lo Spettro Elettromagnetico

- A frequenze  $f$  basse si possono veicolare pochi bit/Hz, ma a frequenze più alte si può arrivare fino a 40 bit/Hz

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- Differenziando rispetto alla lunghezza d'onda lambda, si ha

$$\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \quad \Delta f = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda^2}$$

- Per la fibra in seconda finestra

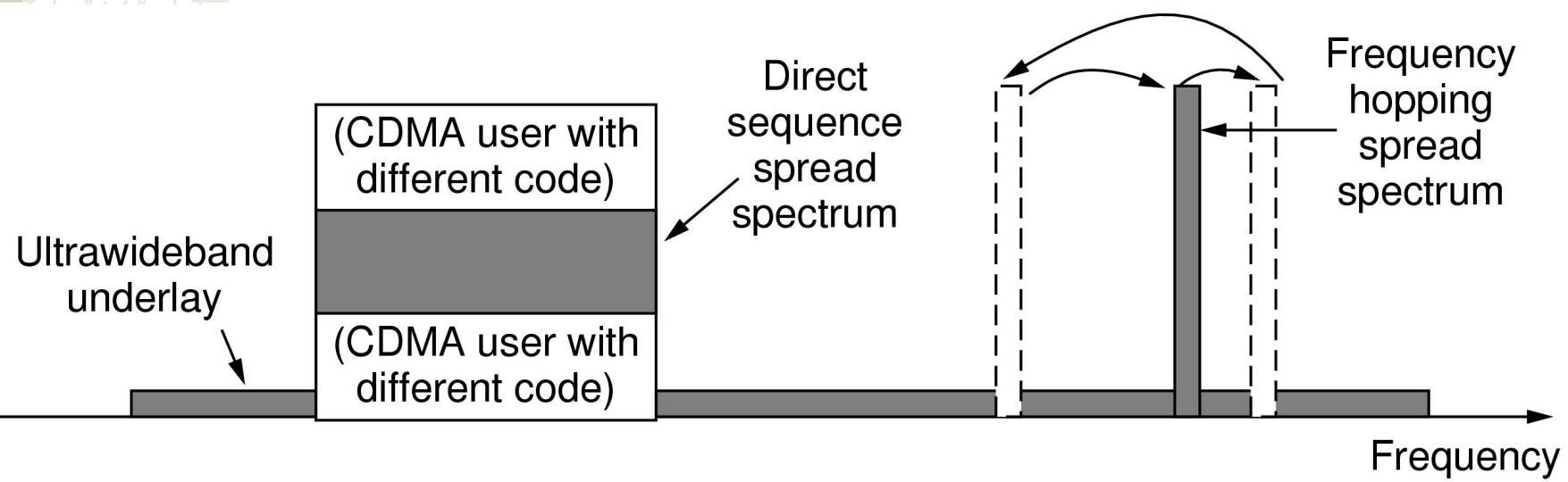
$$\lambda = 1,3 \cdot 10^{-6} \quad \Delta \lambda = 1,7 \cdot 10^{-7} \quad \diamond f \cong 30 \text{ THz}$$

# Assegnazione frequenze

- Le frequenze sono una risorsa
- Enti nazionali / internazionali provvedono ad assegnare le frequenze
  - ITU
  - FCC
- In Italia è competenza del ministero PP TT
- La polizia postale è preposta al controllo del rispetto delle bande assegnate

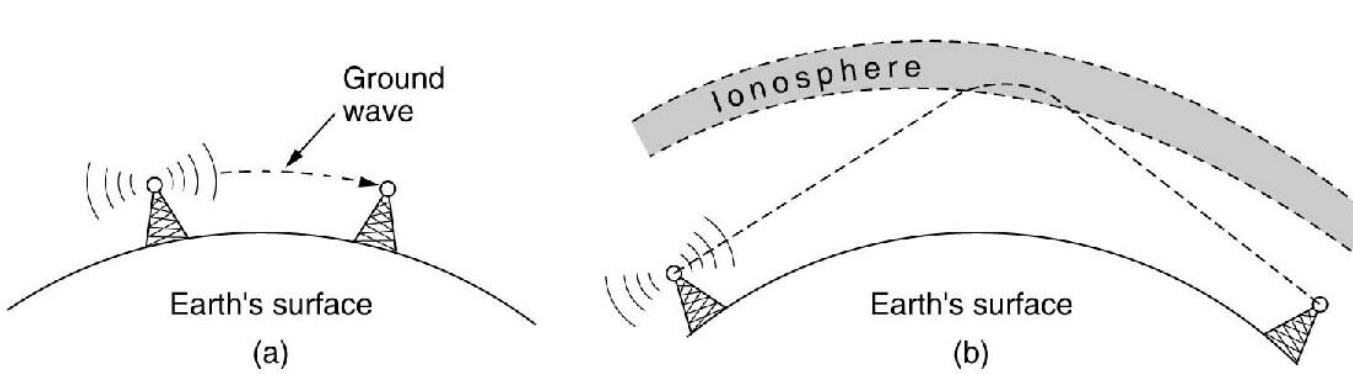
# Tipologie di trasmissione radio

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
  - tecnologia di trasmissione a "frequenza diretta" a banda larga, nella quale ogni bit viene trasmesso come una sequenza ridondante di valori (chip).
  - Indicato per la trasmissione e la ricezione di segnali deboli. Consente l'interoperabilità delle reti wireless attuali
- Spettro diffuso (*Spread Spectrum*)
  - Il trasmettitore opera continuo "salti" di frequenza (*frequency hopping*)
  - Origine militare, difficile da individuare e disturbare



# Radiodiffusione

- La radiodiffusione viene utilizzata generalmente per la trasmissione **analogica** di segnali radio-televisivi in modalità **broadcast**
- Utilizza due tecniche trasmissive differenti in funzione della regione di frequenze:
  - nella regione **fino al MHz** (VLF, LF ed MF) il segnale si propaga **seguendo la curvatura terrestre** ed attraversa bene gli **ostacoli**: una stazione trasmittente può essere ricevuta fino a **1000 Km** di distanza; oltre l'attenuazione (proporzionale all'inverso del quadrato della distanza) diviene eccessiva
  - nella regione **dal MHz al GHz** (HF, VHF e UHF) il segnale viene **assorbito** dalla **superficie della terra**, ma viene **riflesso** molto bene dalla **ionosfera**; i segnali vengono quindi inviati verso il cielo raggiungono la stazione ricevente dopo la riflessione



# Trasmissione via ponte radio

- La banda di frequenza delle **microonde** (1-40 GHz) ha le caratteristiche di poter utilizzare antenne paraboliche di dimensioni maneggevoli (fino a **qualche metro** di diametro) per poter **collimare** e **dare direzione** all'emissione
- Si puo' quindi realizzare una comunicazione **punto-punto** tra sorgente e destinazione con **allineamento ottico** delle antenne: la trasmissione e' rettilinea, ed e' indispensabile la **visibilita'** tra le antenne delle stazioni comunicanti
- Questa tecnica di trasmissione va in competizione con le linee in **coassiale** e via **fibra ottica**
  - per le **lunghe distanze**, quando l'alternativa con mezzo guidato risulta troppo **costosa** o **impossibile** per motivi morfologici
  - per le **brevi distanze** (ad esempio per connettere due palazzi vicini di una stessa compagnia) come **alternativa** alla stesura di una fibra qualora si dovesse attraversare suolo pubblico o di altra propriet'a, per evitare le complicazioni connesse alle autorizzazioni
- Utilizzando **diverse stazioni ripetitrici** si riescono a coprire distanze elevate (svariate centinaia di Km); una singola tratta puo' coprire in condizioni favorevoli fino a qualche centinaia di Km

# Ponti radio (cont.)

- Data la dipendenza dell'attenuazione dalla distanza, per le tratte lunghe si utilizzano generalmente due bande di frequenza: **2-6 GHz** e **10-14 GHz**
- Le connessioni a breve distanza possono utilizzare le frequenze **piu' alte** (fino a 40 GHz) per le quali si hanno i vantaggi:
  - antenne **piu' piccole**
  - fascio **piu' collimato** (quindi minore necessita' di potenza)
  - minori problemi di **interferenza** per lo scarso utilizzo di trasmissioni in quella regione di frequenza

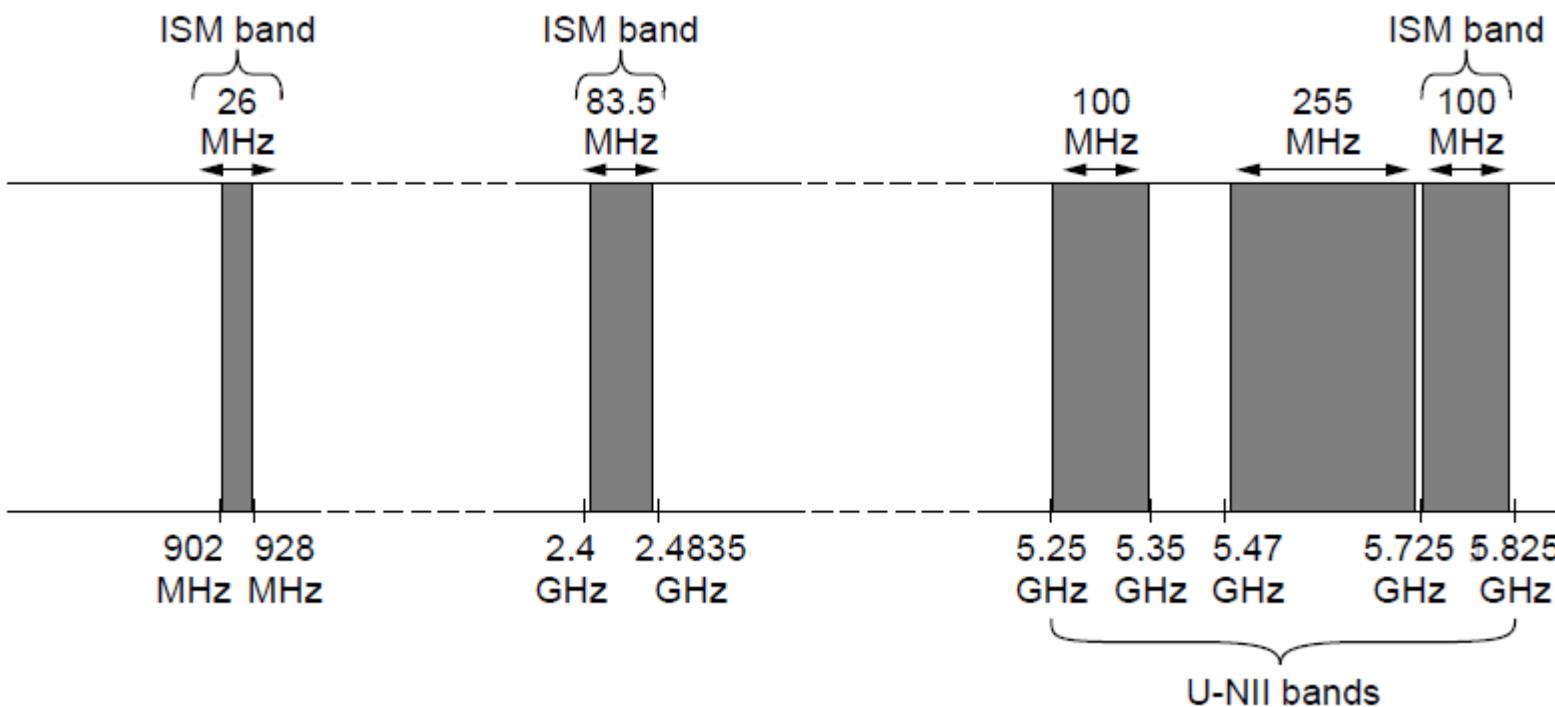
# Utilizzo dei ponti radio

- Generalmente utilizzati per trasmissioni **analogiche** (fonia, televisione) o **digitali** (per reti **private** o utilizzate dalle **compagnie telefoniche** fornitrice di servizi)
- Le diverse bande di frequenza sono suddivise in **canali** di diversa larghezza (non uniformi nei diversi paesi), con canali tra i **7 MHz** (a 2 GHz) ed i **220 MHz** (a 18 GHz), e tassi trasmissivi che vanno dai **12 ai 274 Mbps** (in funzione della banda disponibile e del livello di modulazione utilizzato, solitamente **QAM-x**)

# Trasmissione Radio – microonde

- Le microonde sono radioonde ad alta frequenza.
- Sono in grado di attraversare gli ostacoli e si propagano in tutte le direzioni ma le distanze di trasmissione sono regolamentate
  - bisogna usare potenze di trasmissione relativamente basse
- Sono poco costose e non richiedono diritti di passaggio;
- non consentono comunicazioni full duplex su un'unica frequenza:
  - si possono però usare due frequenze distinte per la trasmissione e la ricezione.
- Sopra i 100 Mhz ( $\lambda < 3 \text{ m}$ ) le onde tendono a propagarsi in linea retta
- Usando antenne direzionali ad alto guadagno (paraboliche) si migliora il rapporto S/N. È però necessario l'allineamento
- Curvatura della terra → Necessità di ripetitori per tratte lunghe
- Multipath da rifrazione in atmosfera (dipendente da tempo e frequenza)
- Oltre 8 GHz si ha assorbimento da parte dell'acqua

# Le bande non licenziate



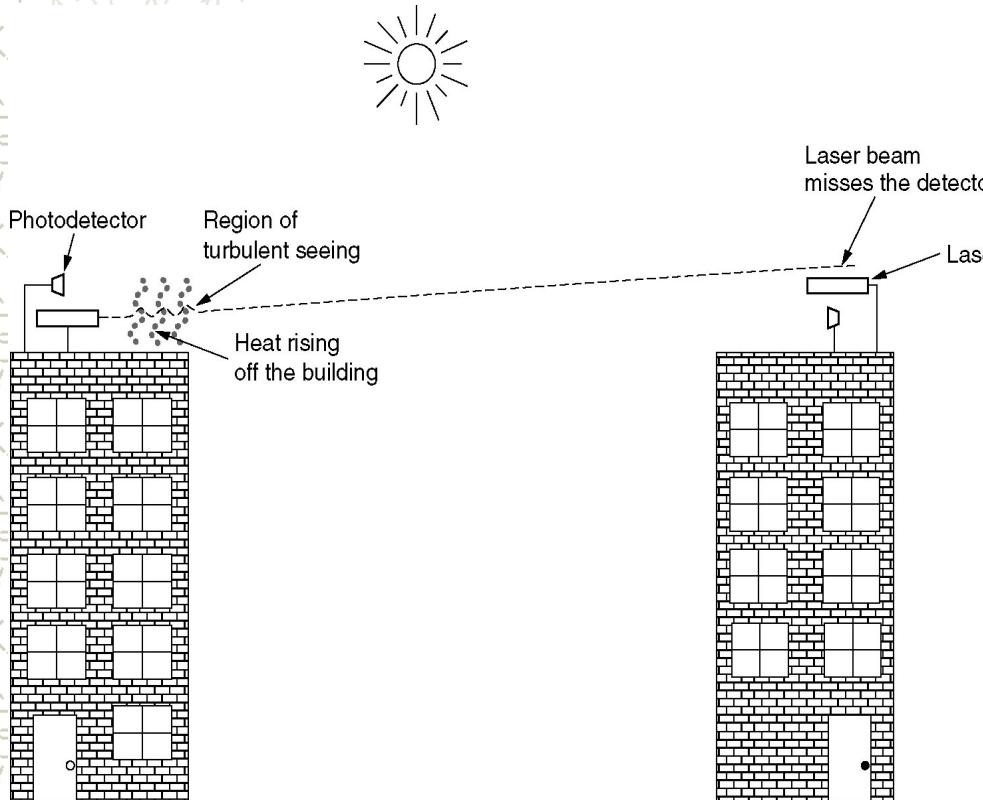
Bande ISM assegnate ad utilizzo industriale-scientifico-medico, non richiedono licenza.

# Trasmissione a infrarossi

- I raggi infrarossi sono onde di lunghezza millimetrica; sono relativamente direzionabili e non passano attraverso i solidi (questo è uno svantaggio ma anche un vantaggio perché non interferiscono con sistemi vicini).
- Esistono due tecnologie: a infrarossi diretti e a diffusione.
  - Nella modalità a infrarossi diretti trasmettitore e ricevitore devono essere perfettamente allineati per potersi illuminare reciprocamente con un fascio di luce (i raggi infrarossi sono una forma di luce); la trasmissione è punto a punto.
  - Nella modalità a diffusione la radiazione luminosa emessa da una stazione viene diffusa in tutte le direzioni e rimbalza su soffitto e pavimenti, venendo riflessa verso tutte le altre stazioni; la trasmissione è di tipo broadcast.
- Utili per comunicazioni a piccola distanza (telecomandi)
- Più sicure delle onde radio, non richiedono licenza
- Proposte per LAN interne con infrastruttura fissa (beacon)
- Non utilizzabili in esterno per la presenza di emissioni solari
- IRDA (115 Kbps) IRDA 2 (4 Mbps)

# Lightwave Transmission

- Più costosa di quella a infrarossi (IR), richiede maggior potenza e disperde più calore.
- La luce è direzionata in un fascio molto stretto e usata a distanze maggiori degli IR
- Come per gli IR, i raggi non possono attraversare gli ostacoli; se usati all'esterno bisogna ricordare che non possono attraversare pioggia o nebbia



- Grande larghezza di banda,
- Non richiede licenza
- Necessita di grande precisione nel puntamento,
- Attenuazione da precipitazioni atmosferiche
- Disturbi da turbolenze nell'aria dovuti a convezione

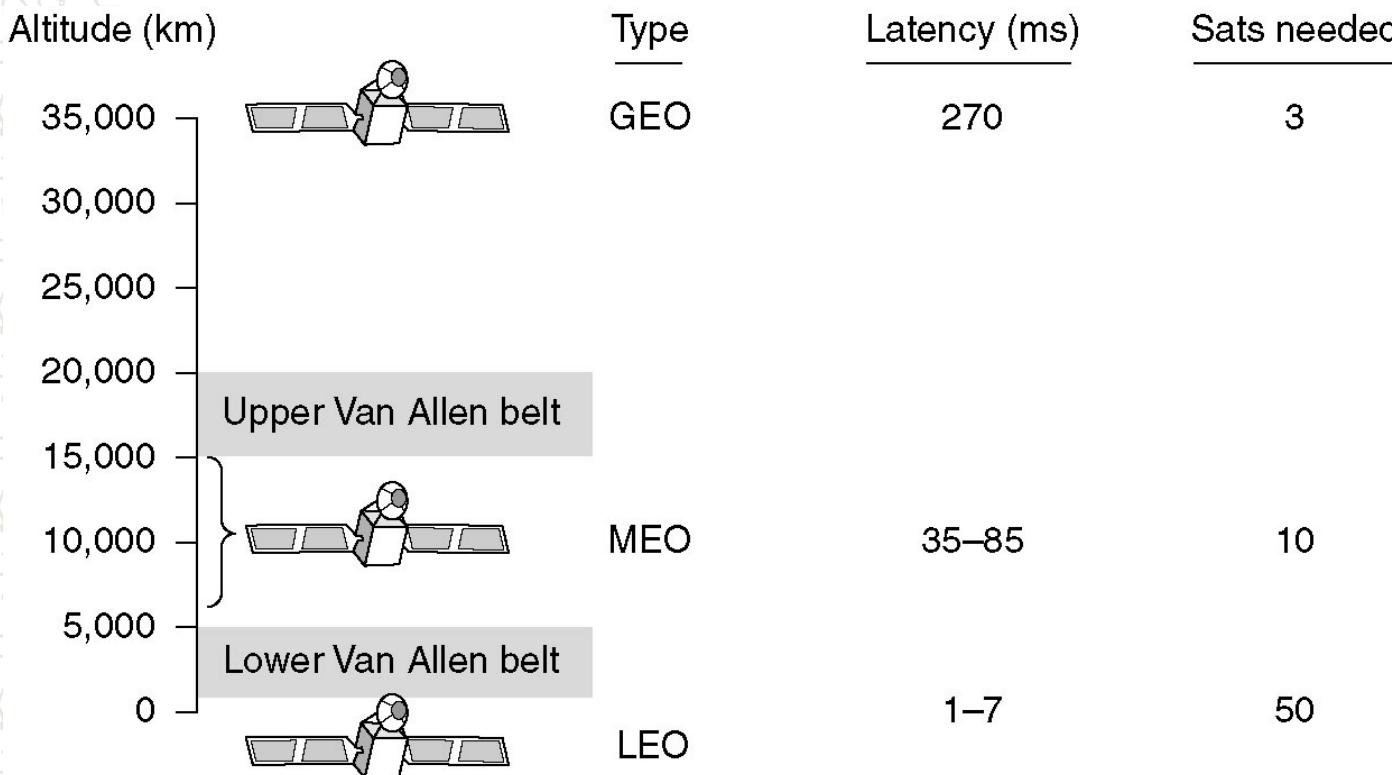
# Trasmissioni satellitari

- Il satellite si comporta come una **stazione ripetitrice** del segnale di un ponte radio
- Il segnale viene inviato dalla stazione terrestre al satellite (**uplink**), che lo rimanda a terra verso la stazione o le stazioni riceventi (**downlink**), generalmente utilizzando **frequenze differenti**
- Un satellite opera su **piu' bande di frequenza**, con la tecnologia **FDM**; i singoli canali si chiamano **transponder** (canali tra **15 e 500 MHz** di banda)
- Sui canali il satellite puo' fare **TDM** per gestire diverse comunicazioni
- Le bande utilizzate sono quelle tra 1 e 10 GHz
  - sopra l'attenuazione atmosferica e' troppo grande
  - sotto ci sono interferenze ed assorbimento dalla ionosfera
- Il **sovraffollamento** delle frequenze spinge attualmente verso l'utilizzo di bande a frequenza superiore, nonostante che i problemi di attenuazione atmosferica divengano sempre piu' importanti

# Satelliti

- GEO (Geostationary Earth Orbit): satelliti a 36000 Km di quota in orbita equatoriale, che appaiono in posizione fissa nel cielo
  - questi satelliti sono adatti alla trasmissione dati in quanto il puntamento delle antenne e' fisso
  - per motivi di interferenza i satelliti vengono distanziati di due gradi, quindi si possono avere al massimo 180 satelliti
  - la trasmissione dati deve tenere conto del ritardo di propagazione del segnale, che e' pari a 0.25 secondi (inefficienti i protocolli con controllo degli errori e ritrasmissione dei pacchetti)
- MEO (Medium Earth Orbit): satelliti a 18000 Km di quota, con 6 ore di periodo dell'orbita
  - inadatti per la trasmissione dati
  - esempio: i satelliti del GPS (Global Positioning System)
- LEO (Low Earth Orbit): tra 750 e 1500 Km di quota
  - molto veloci nel transito, ma vicini, quindi si ha poco ritardo e si richiede poca potenza in trasmissione
  - esempi: Iridium (per fonia, fax, dati, navigazione), Globalstar.

# Satelliti per la Comunicazione



Le caratteristiche operative includono l'altitudine a partire a terra, il round-trip delay time e il numero di satelliti necessari a una copertura globale.

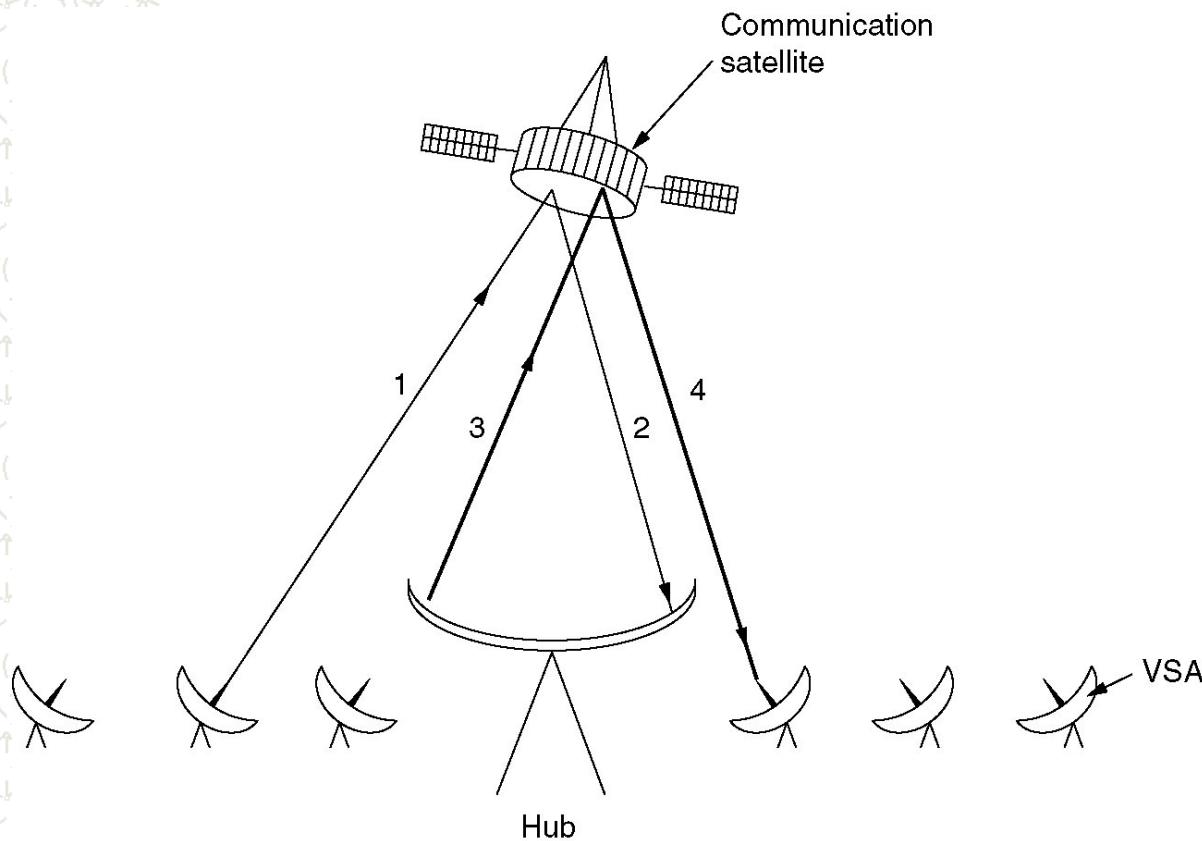
# Satelliti per la Comunicazione

Le principali bande satellitari.

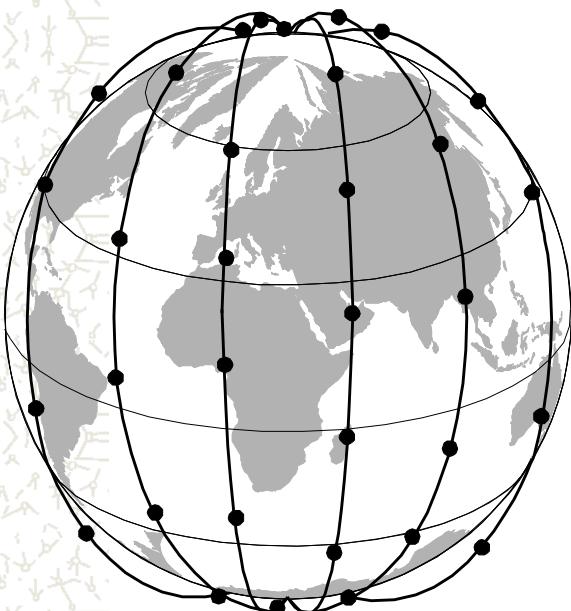
<b>Band</b>	<b>Downlink</b>	<b>Uplink</b>	<b>Bandwidth</b>	<b>Problems</b>
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	Low bandwidth; crowded
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	Low bandwidth; crowded
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	Terrestrial interference
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Rain
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	Rain, equipment cost

# Satelliti per la Comunicazione

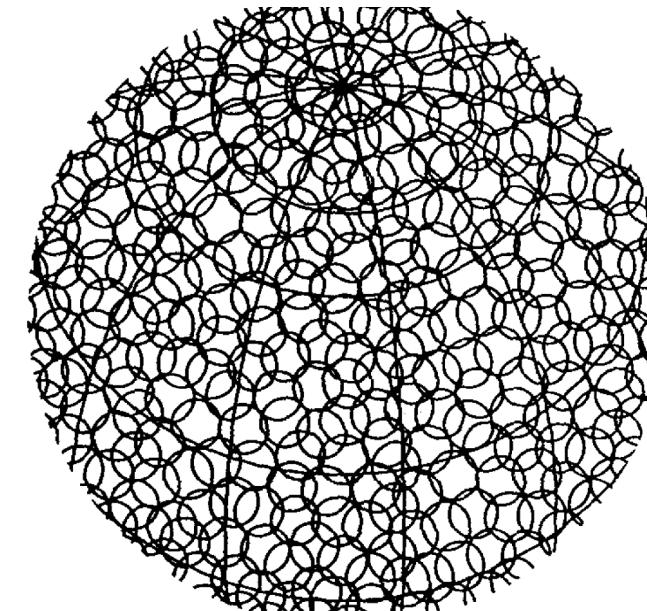
VSAT (apertura molto limitata 1m 1W) attraverso un “hub”.



# Satelliti Low-Earth Orbit Iridium



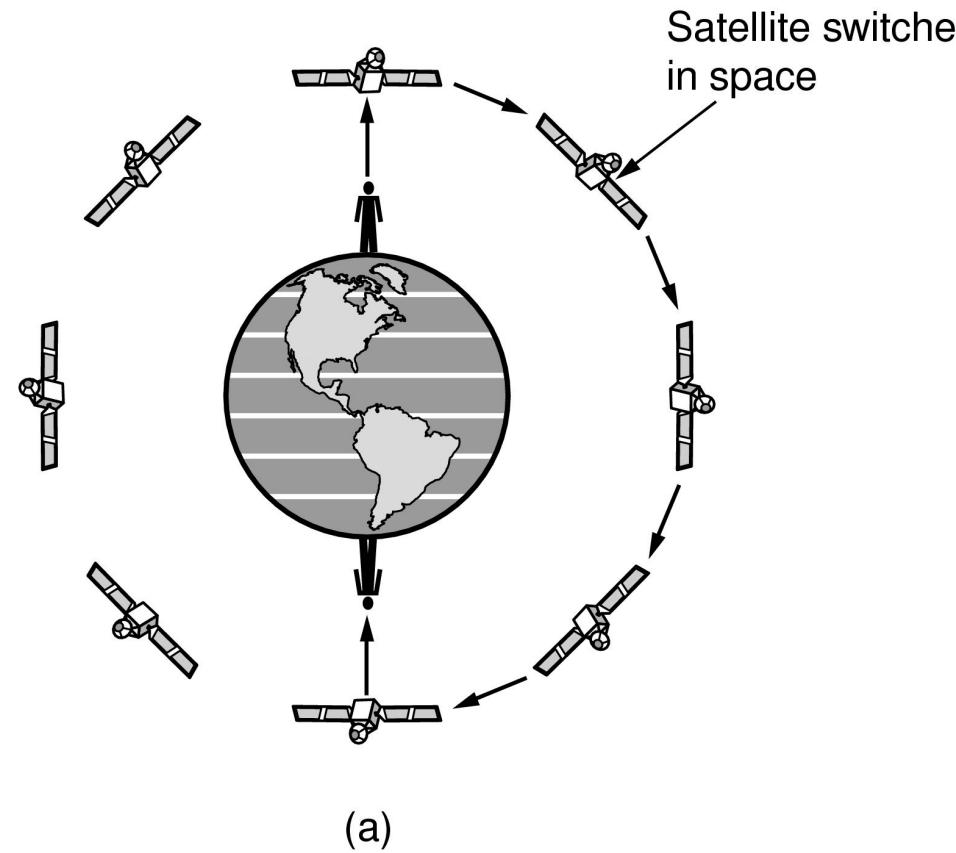
(a)



(b)

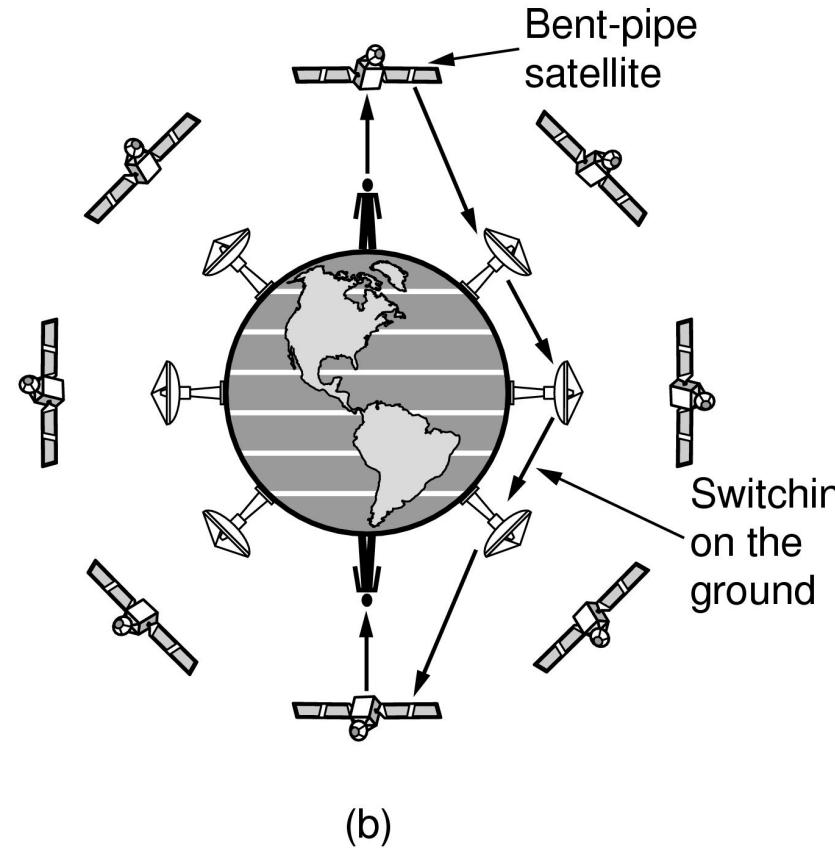
- (a) I 77 sateliti Iridium formano 6 collane intorno alla terra
- (b) Ogni satellite ha 4 vicini
- (c) 1628 celle mobili coprono la superficie terrestre

# Satelliti Low-Earth



Relaying in space.

# Satelliti Low-Earth



Relaying on the ground

# Satellite contro Fibra

Fibra - distanza:  $\approx 3200$  Km  $\rightarrow$  Latenza: 10ms

Satellite - distanza:  $\approx 71000$  Km  $\rightarrow$  Latenza: 236ms

**Assumendo che**

Velocità fibra:  $\approx 97\% c$

Propagazione onde:  $\approx c (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})$

