

# Reti di Telecomunicazioni



Livello Fisico

---



# Autori

---

Queste slides sono state scritte da

Michele Michelotto

[michele.michelotto@pd.infn.it](mailto:michele.michelotto@pd.infn.it)

che ne detiene i diritti a tutti gli effetti



# Copyright Notice

Queste slides possono essere copiate e distribuite gratuitamente soltanto con il consenso dell'autore e a condizione che nella copia venga specificata la proprietà intellettuale delle stesse e che copia e distribuzione non siano effettuate a fini di lucro.



# Physical Layer

---

Introduzione

Layer: Modello OSI e TCP/IP

**Physical Layer**

Data Link Layer

MAC sublayer



# Livello Fisico



- Limiti fisici dei mezzi trasmissivi
- Mezzi guidati
  - Coassiale, doppino, fibra
- Mezzi non guidati
  - Onde radio, infrarosso, microonde, laser



# Basi teoriche

- Le informazioni digitali vengono trasmesse come **variazione** di proprietà fisiche (tensione, corrente, intensità luminosa, campo e.m.) nel tempo
- Serve una variazione per esprimere una informazione
- La possiamo descrivere matematicamente come una funzione del tempo  $F(t)$
- Ogni funzione con periodo  $T$  si può esprimere come somma di seni e coseni di  $nf$  dove  $f = 1/T$
- La somma viene chiamata serie di Fourier



# Spettro e Bandwidth

- Le componenti di un segnale periodico sono onde sinusoidali con frequenze discrete (cioè rappresentate da numeri interi)
- Se il segnale non è periodico le onde sinusoidali hanno frequenza continue (cioè sono rappresentate da numeri reali)
- Lo **Spettro** è l'insieme delle frequenze che il segnale contiene
- L'intervallo di frequenze si chiama **Larghezza di Banda**



# Serie di Fourier forma complessa

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

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad f = 1/T$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$



# Serie di Fourier forma rettangolare

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

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(t) \sin(nt) dt$$

$$T = [-\pi, \pi]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(t) \cos(nt) dt$$

$$c_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(t) dt$$

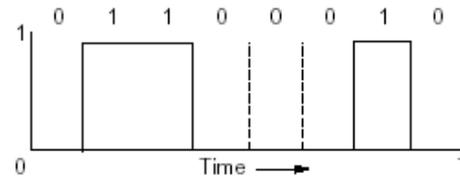
La sequenza di bit **0110010** in funzione del tempo e come somma di armoniche di  $f=1/T$  (supponiamo sia ripetuta nel tempo)

L'armonica fondamentale

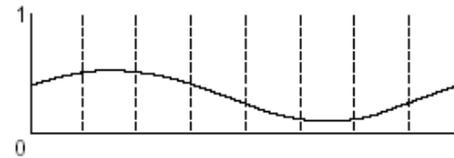
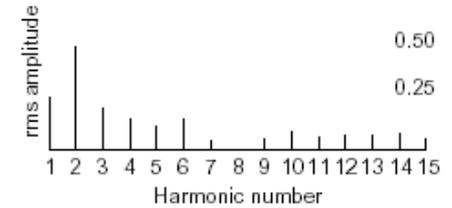
Difficile risalire ai bit originari

Quasi decodificabile

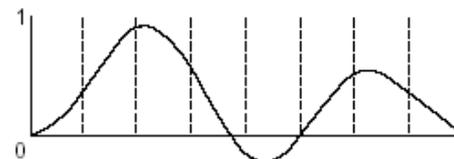
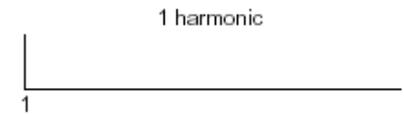
Con 8 armoniche si possono distinguere chiaramente i bit 1 e i bit 0



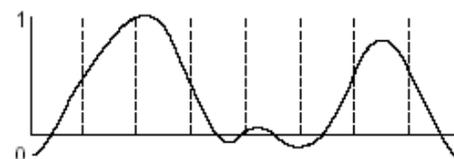
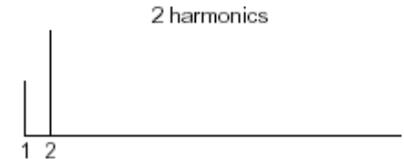
(a)



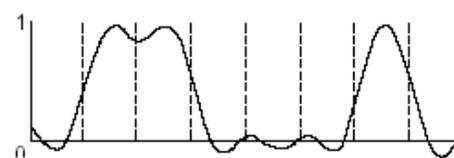
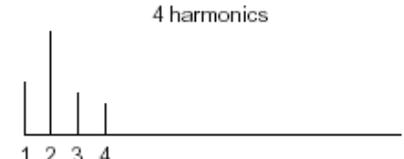
(b)



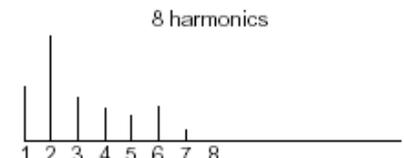
(c)



(d)



(e)





# Frequenza e bit/rate

- Se il mezzo trasmissivo lascia passare frequenze alte posso avere più bit per unità di tempo  $T \rightarrow$  data rate più elevato
- Se il mezzo trasmissivo taglia o degrada le frequenze più elevate rischio di non poter distinguere i ***bit 0*** dai ***bit 1***
- Vedi java applet



# Energie e frequenze

$$\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

- Le ampiezze root mean square dei primi termini sono nel lato destro della figura precedente.
- I loro quadrati sono proporzionali alle energie trasmesse alle corrispondenti frequenze
- Ogni processo trasmissivo di un segnale causa perdita di potenza
- Se tutte le componenti diminuiscono in egual modo l'ampiezza finale diminuisce ma il segnale non viene distorto



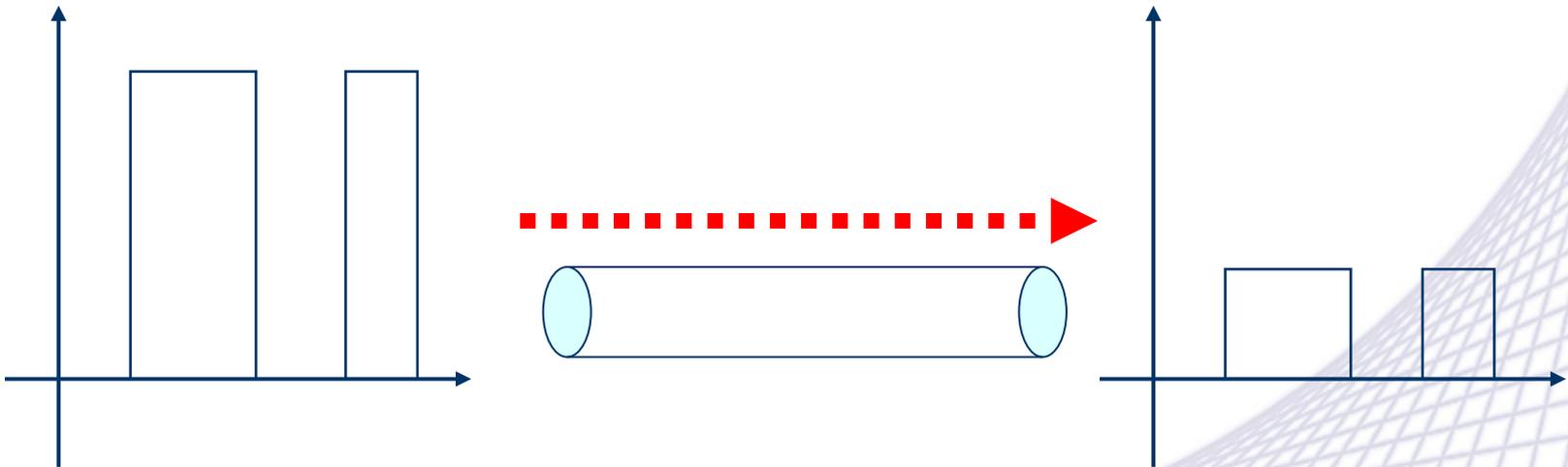
# Bandwidth

- Purtroppo ogni mezzo fisico riduce le diverse componenti di Fourier in modo diverso
- Di solito le componenti sono ridotte molto poco fino ad una certa frequenza  $f_c$  (misurata in Hertz) mentre tutte le frequenze superiori sono molto attenuate
- Il range di frequenza in cui non vengono attenuate si chiaman **bandwidth** (banda passante)
- Il taglio non è immediato. Per convenzione si indica la frequenza in cui la potenza si dimezza.



# Bandwidth

- Un mezzo trasmissivo trasmette il segnale riducendone la potenza
- Se tutte le componenti di Fourier fossero diminuite allo stesso modo avremmo un segnale **attenuato** ma **non distorto**.





# Bandwidth

- La bandwidth è una proprietà del mezzo trasmissivo e dipende dalla costruzione, spessore e lunghezza del mezzo.
- A volte invece vengono introdotti dei filtri per limitare la banda degli utenti
- Un filo telefonico potrebbe avere una banda di 1 MHz ma le compagnie inseriscono un filtro a circa **3100 Hz**.
- Sufficiente per un segnale voce. Migliora l'efficienza globale del sistema, limitando le risorse degli utenti.



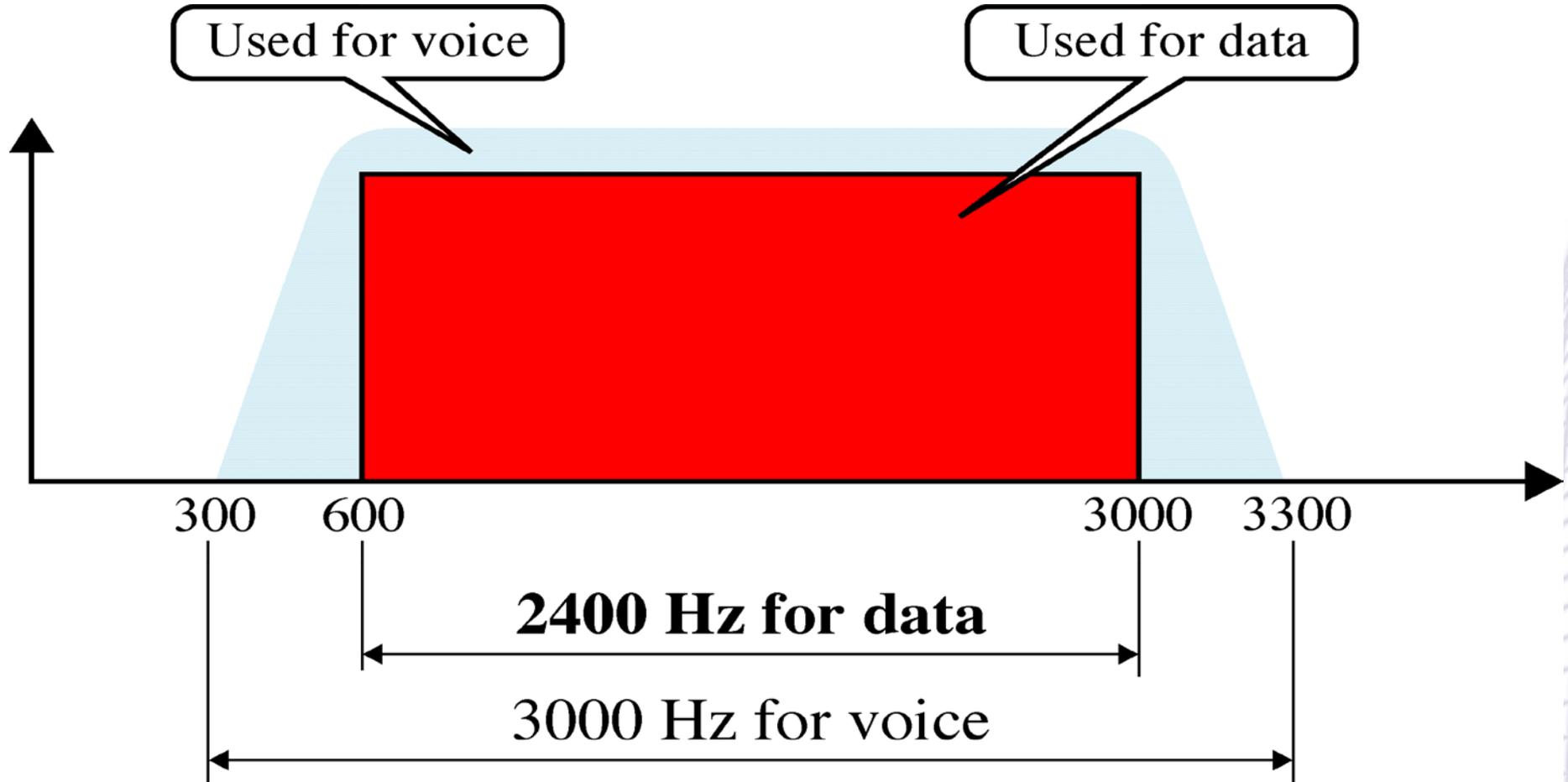
# Banda doppiino telefonico



- Esempio: abbiamo un bit rate  $b$  bits/sec → Il tempo per mandare 8 bit, un bit alla volta:  
 **$8/b$  secondi**
- Prima armonica  $b/8$  Hz
- Prendiamo una linea telefonica con banda “fisica” di 1 MHz ma filtrata dalle Telecom a 3100 Hz
- Frequenza di taglio appena sopra i 3000 Hz  
→ l’armonica più alta  $3000/(b/8) = 24000/b$



# Banda su linea telefonica





# Relazione bit rate - armoniche

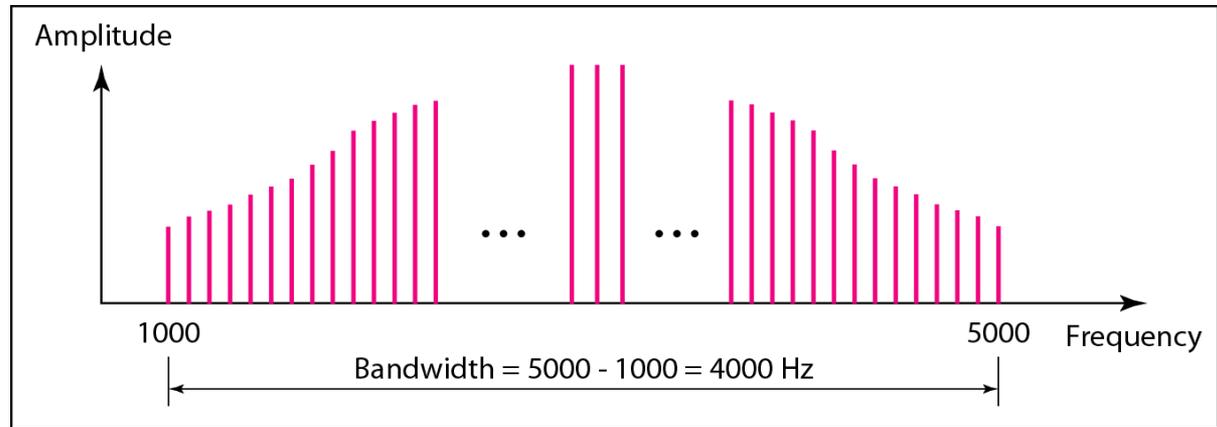


<b>Bps</b>	<b>T (msec)</b>	<b>First harmonic (Hz)</b>	<b># Harmonics sent</b>
300	26.67	37.5	80
600	13.33	75	40
1200	6.67	150	20
2400	3.33	300	10
4800	1.67	600	5
9600	0.83	1200	2
19200	0.42	2400	1
38400	0.21	4800	0

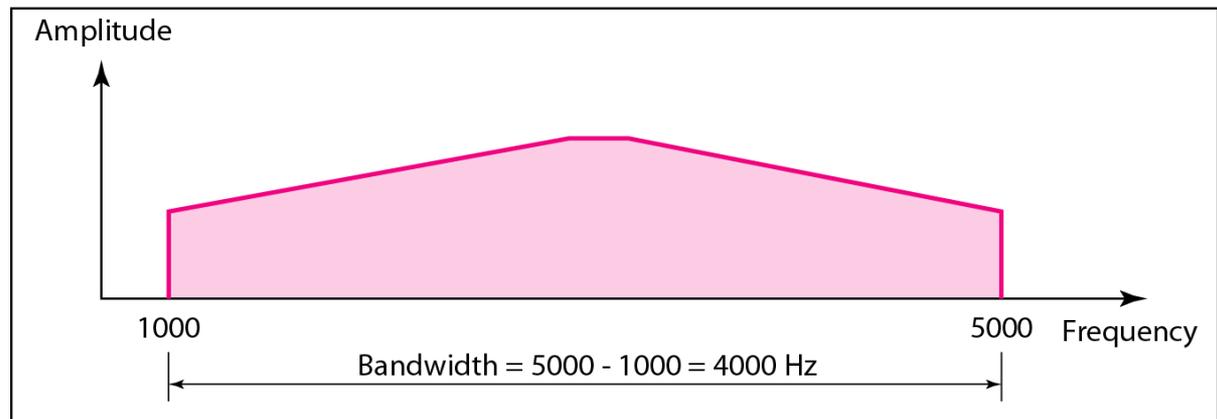


# periodici o aperiodici

- Segnali periodici hanno uno spettro discreto frequenze
- Segnali non periodici hanno uno spettro continuo



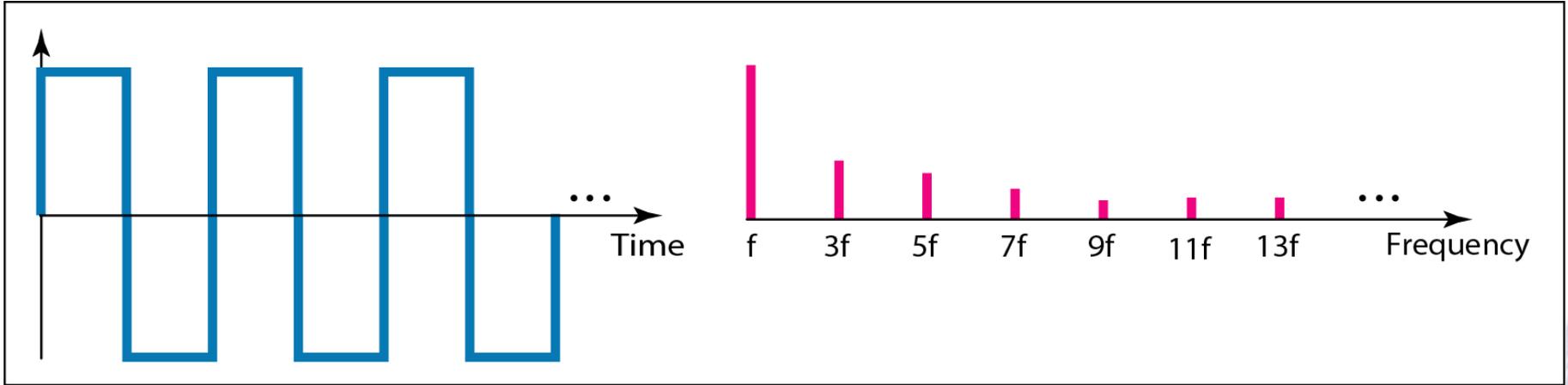
a. Bandwidth of a periodic signal



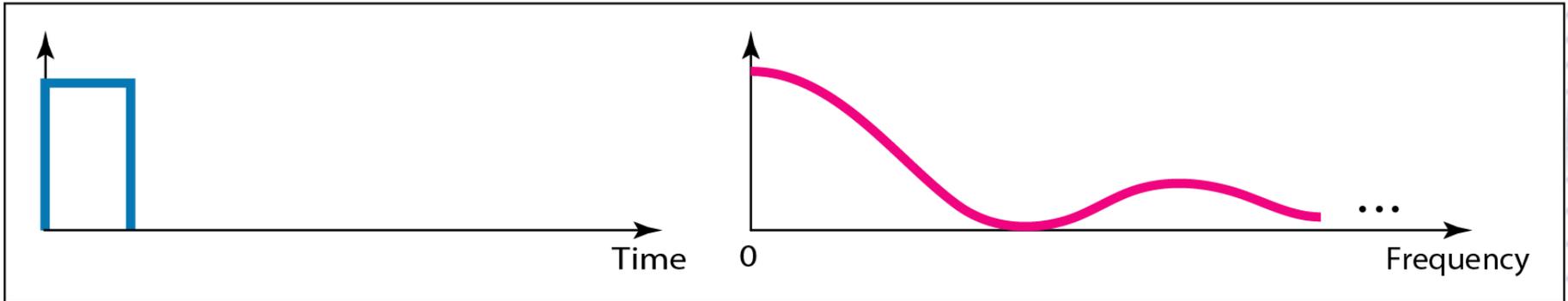
b. Bandwidth of a nonperiodic signal



# Tempo vs frequenza



a. Time and frequency domains of periodic digital signal

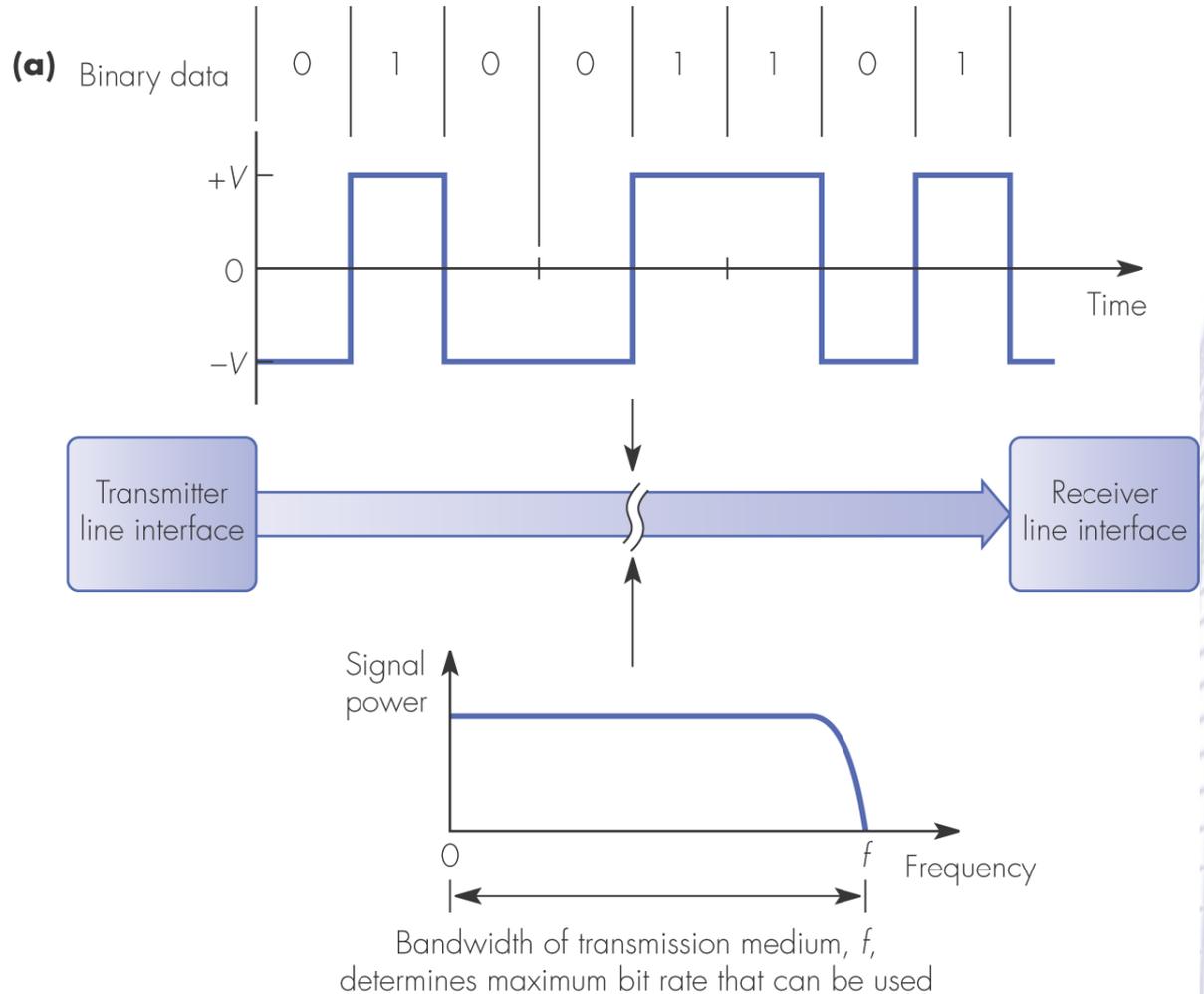


b. Time and frequency domains of nonperiodic digital signal



# Baseband

- Baseband
- Ci sono tutte le frequenze fino alla frequenza di taglio
- Usato per segnali digitali

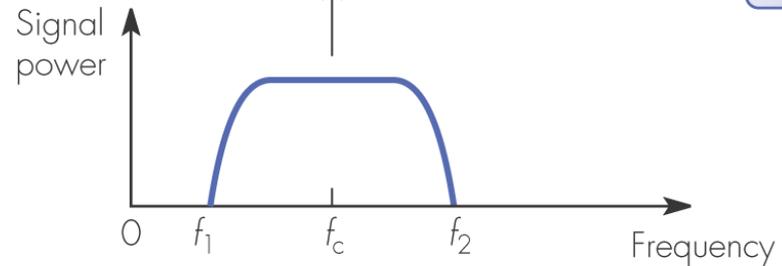
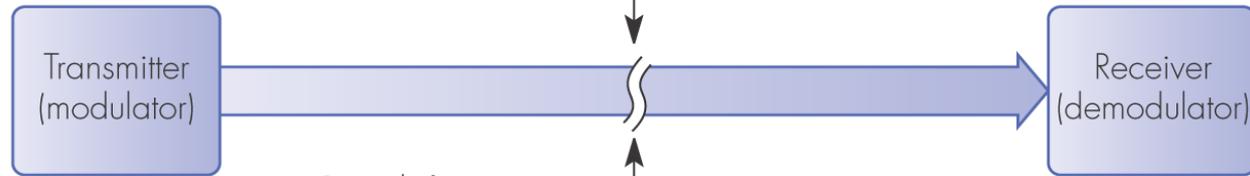
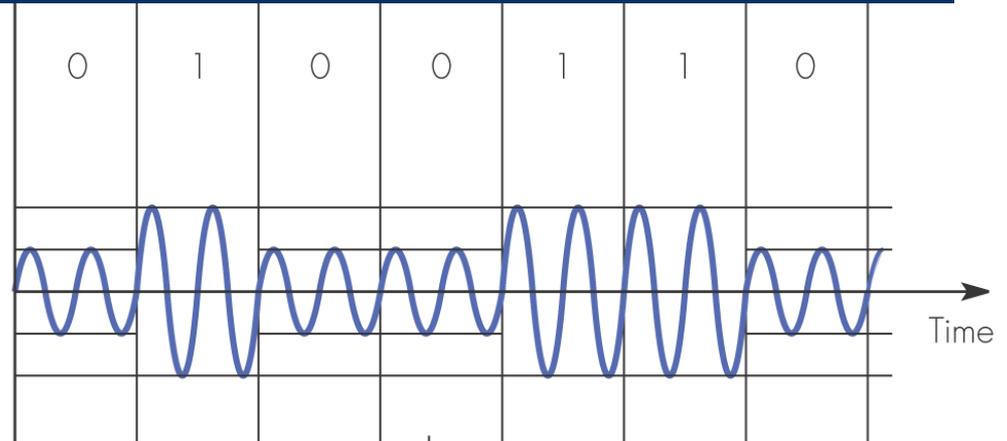




# Broadband

- Broadband
- Ci sono le frequenze attorno alla frequenza portante
- Usato per segnali analogici

(b) Binary data



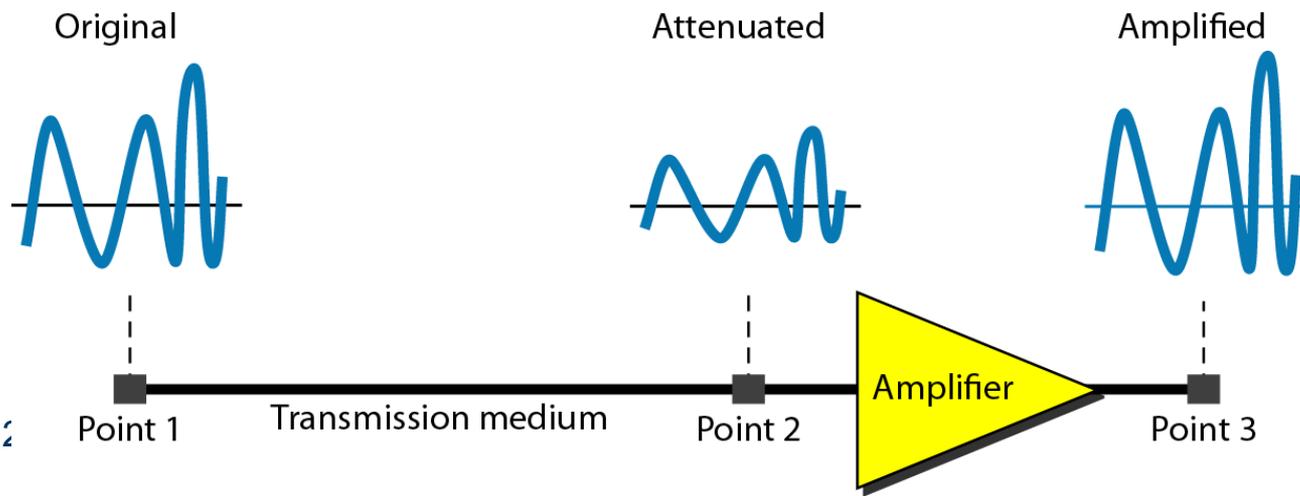
$f_c$  = carrier signal (single-frequency audio tone)  
Bandwidth ( $f_2 - f_1$ ) determines maximum bit rate that can be used



# Deterioramento Segnale



- Il mezzo trasmissivo causa un deterioramento del segnale , a causa di Attenuazione, Distorsione e Rumore
- Attenuazione è una perdita di energia, per esempio per superare la resistenza elettrica del mezzo. Per compensarla si possono usare degli amplificatori
- Si misura in **decibel (dB)** e misura la potenza relativa dei segnali ed è uguale a  $10 \log_{10} P_2/P_1$





# Attenuazione

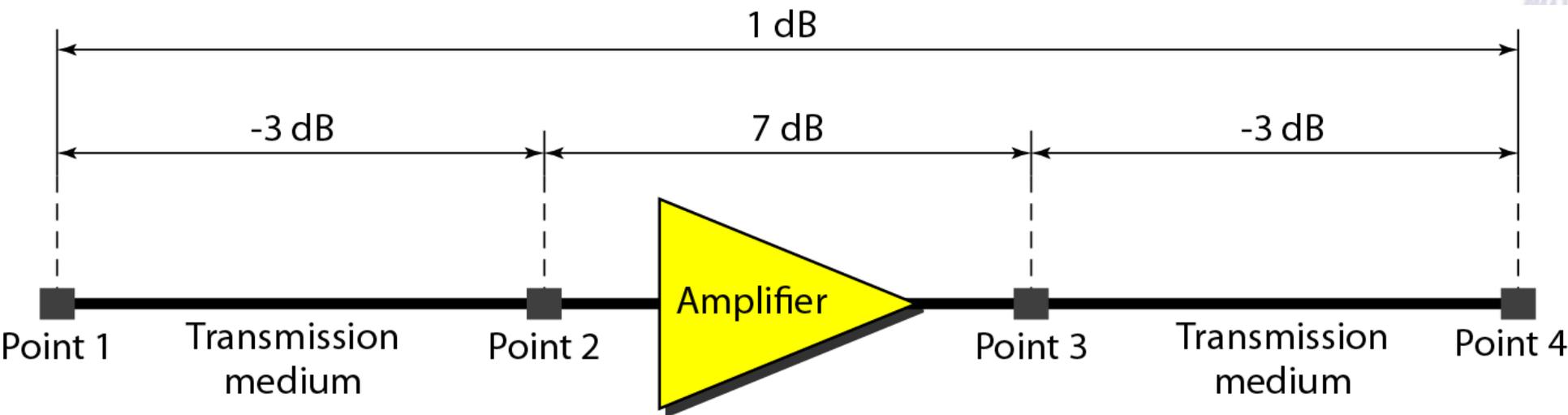
- Es: un rapporto di 10  $\rightarrow$  10 dB, un rapporto di 100  $\rightarrow$  20 dB, rapporto 1000  $\rightarrow$  30 dB, 1000000  $\rightarrow$  60 dB, positivo per amplificazione e negativo per attenuazione
- $10 * \log_{10}(\mathbf{0.5}) \cong 10 * -0.3 = \mathbf{-3 dB}$
- Quindi per indicare un'attenuazione a  $\frac{1}{2}$  si indica la frequenza a  $\mathbf{-3dB}$  e per contro per convenzione si indica la frequenza di taglio la frequenza alla quale il segnale si dimezza
- Usato per le caratteristiche dei filtri, cavi, fibre, antenne e mezzi trasmissivi.

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{0.5 P_1}{P_1} = 10 \log_{10} 0.5 = 10(-0.3) = -3 \text{ dB}$$



# Uso dei dB

- Per le proprietà delle potenze e dei logaritmi i dB si sommano
- Es se ho due canali che attenuano 3dB e un amplificatore di 7dB, questo equivale a amplificazione di 1 dB



$$\text{dB} = -3 + 7 - 3 = +1$$



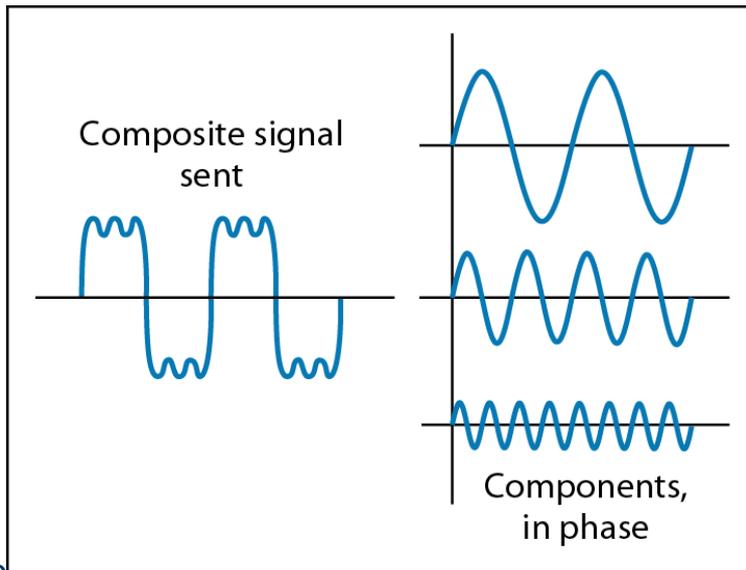
# Potenza dei decibel

Loss in decibels	Fraction of power remaining	Physical analog
0.2	0.954992586	Loss undetectable by the eye
0.5	0.891250938	Light lost reflecting from aluminum
1	0.794328235	
10	0.1	Reflection from a dark surface
20	0.01	One percent of light remains
30	0.001	One part per thousand
40	0.0001	
50	0.00001	
60	0.000001	One part per million
100	$10^{-10}$	One part in 10 billion
200	$10^{-20}$	
300	$10^{-30}$	One atom in a ton of matter
400	$10^{-40}$	
500	$10^{-50}$	
600	$10^{-60}$	Less than one atom in the sun
700	$10^{-70}$	
800	$10^{-80}$	One atom in the visible universe
900	$10^{-90}$	
1000	$10^{-100}$	

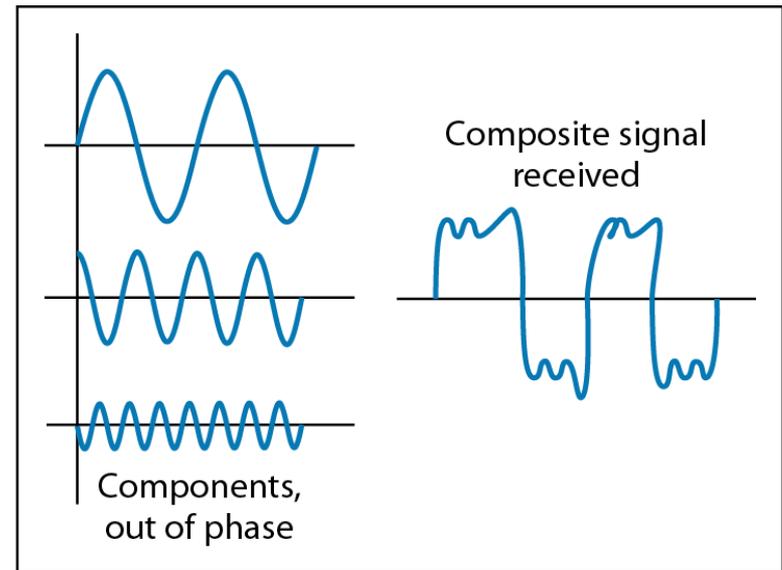


# Distorsione

- Cambia la forma del segnale, tipica di un segnale composto da tante frequenze
- Ogni componente ha una sua velocità di propagazione per cui alcune componenti arrivano a destinazione in tempi diversi



At the sender



At the receiver



# Rumore

- Il rumore si traduce in un segnale addizionale a quello trasmesso, ci sono diverse cause:
  - Rumore termico: causato da movimento casuale degli elettroni nel mezzo trasmissivo
  - Rumore indotto: da motori o interruttori che agiscono come antenne e il mezzo trasmissivo agisce da antenna ricevente
  - Interferenze: da segnali trasmessi nei cavi vicini
  - Rumore ad impulsi: causato da fonti esterni come per esempio un fulmine



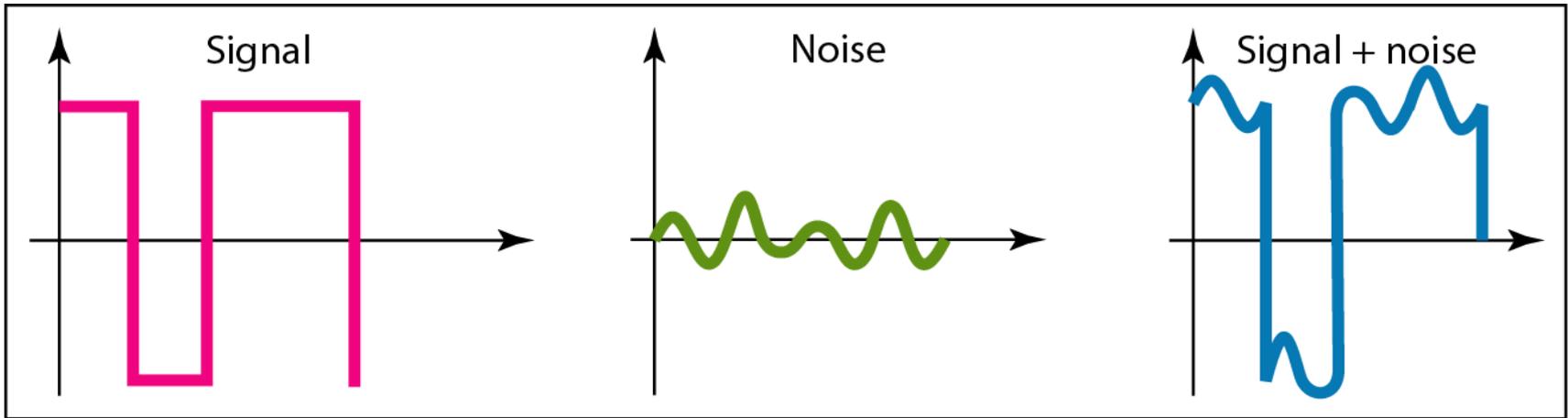
# SNR



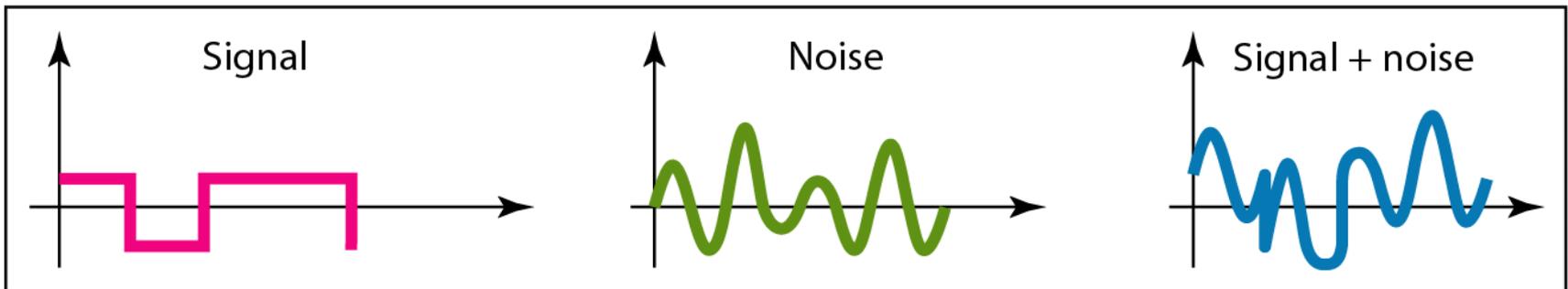
- Il rapporto tra la potenza di segnale e la potenza di rumore si indica come SNR
- Si misura in decibel **anche questo**
- **$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR$**
- Es la potenza di segnale è 10 mW e quella di rumore 1  $\mu$ W. Calcolare SNR e  $SNR_{dB}$
- $SNR = 10000 \mu W / 1 \mu W = 10000$
- $SNR_{dB} = 10 \log_{10} 10000 = 10 * 4 = 40$



# Effetto SNR



a. Large SNR



b. Small SNR



# Limiti alla bandwidth

- Quanti dati possiamo trasmettere nell'unità di tempo (in bit/sec) ?
- Dipende da 3 fattori:
  - Larghezza di banda disponibile in Hertz
  - Numero di livelli di segnale
  - Qualità del canale (rumore)
- Se posso trascurare il rumore posso usare il teorema di Nyquist



# Teorema di Nyquist

**Max data rate =  $2 H \log_2 V$  bits/sec**

$H \rightarrow$  banda passante del canale in Hertz

$V \rightarrow$  numero di livelli discreti utilizzati per rappresentare i dati

- Se abbiamo solo due livelli 0 e 1 è facile discriminare tra i due, se invece ho 64 livelli il ricevitore deve essere molto sofisticato
- Quanti livelli devo usare per trasmettere 265 kbps su un canale con 20 kHz di banda?
  - $265000 = 2 * 20000 * \log_2 L \rightarrow \log_2 L = 6.625 \rightarrow L = 2^{6.625} = 98.7$
  - Se scelgo  $L=128$  ( $2^7$ ) posso arrivare a 280 kbps quindi anche 265 kbps
  - Altrimenti scendo a 64 livelli ( $2^6$ ) ma posso trasmettere solo 240 kbps



# Teorema di Nyquist

***Max data rate =  $2 H \log_2 V$  bits/sec***

$H \rightarrow$  frequenza di taglio del filtro passabasso

$V \rightarrow$  segnale a  $V$  livelli discreti

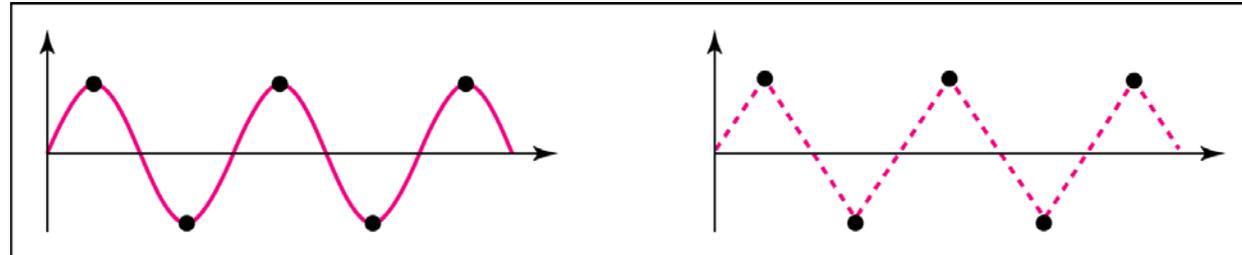
Un segnale arbitrario che passa attraverso un filtro passa basso di banda  $H$  può essere ricostruito con solo  **$2H$**  campionamenti per secondo

- Esempio: un canale a 3 kHz (linea telefonica normale), informazioni binarie ( $V=2$ )  $\rightarrow$  max rate = 6000 bps

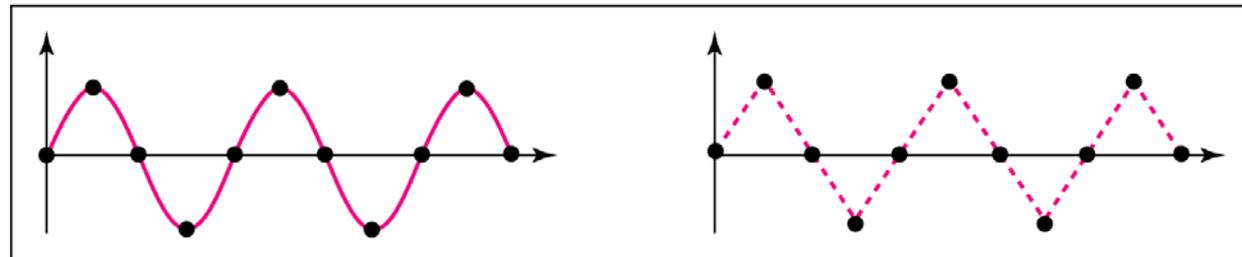


# Freq di campionamento

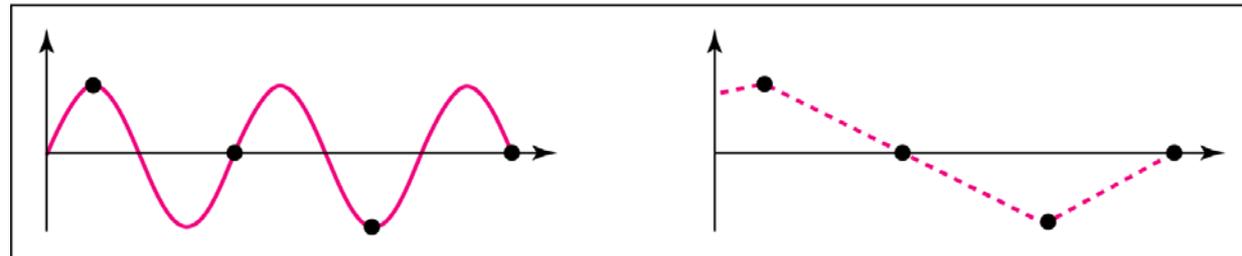
- Il teorema di Nyquist dice che la frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della più alta frequenza contenuta nel segnale
- Se uso frequenze più basse perdo informazioni



a. Nyquist rate sampling:  $f_s = 2f$



b. Oversampling:  $f_s = 4f$



c. Undersampling:  $f_s = f$



# Teorema di Shannon

- ***Max data rate (bps) =  $H \log_2 (1 + SNR)$*** 
  - $H \rightarrow$  frequenza massima che passa nel canale “noisy”
  - $SNR \rightarrow$  rapporto Segnale Rumore (dB)
  - Esempio: un canale largo 3 kHz (da 300 a 3300 Hz) con S/N termico di 3161 (valori tipici di una linea telefonica)  $\rightarrow$   
 **$C = 3000 * \log (3162) \text{ bps} = 3000 * 11.62 = 34.86 \text{ kbps}$**
  - per qualsiasi numero di  $V$  livelli discreti di segnale si vogliono usare.
  - Se vogliamo più capacità (bps) o aumentiamo la banda della linea telefonica ( $H$ ) o miglioriamo il SNR



# Nyquist o Shannon?

- Sono entrambi utili
- Uso Nyquist se posso trascurare il rumore
  - Insomma se il segnale  $\gg$  del rumore
  - Quindi il rumore  $\ll$  inferiore alla distanza tra due livelli contigui
- Altrimenti devo usare Shannon che vale sempre
- In altri termini, il th. Shannon pone un limite ai livelli
  - Pone un limite al numero di livelli che uso per codificare.
  - Quando il rumore è tale da farmi confondere tra i livelli vuole dire che sto usando troppi livelli



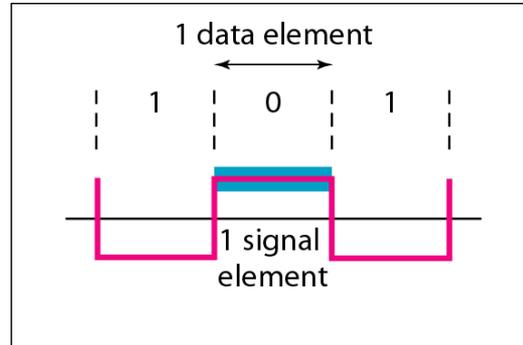
# Codifica di segnali

- I dati che vogliamo trasmettere possono essere sia digitali che analogici
- Anche i segnali che rappresentano i dati possono essere digitali o analogici
- Vedremo come i modem vengono usati per convertire dati digitali in segnali analogici
- Ora vediamo invece come codificare in segnali digitali i dati digitali

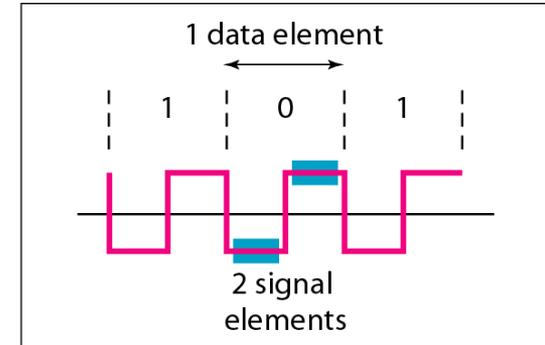


# Line encoding

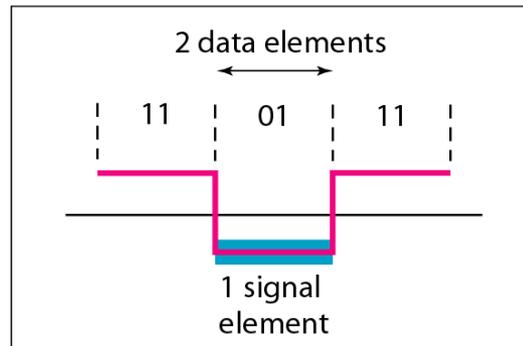
- La conversione di dati digitali in segnali digitali
- L'unità di base dei dati digitali è il bit
- L'unità di base dei segnali la chiamiamo **elemento di segnale**



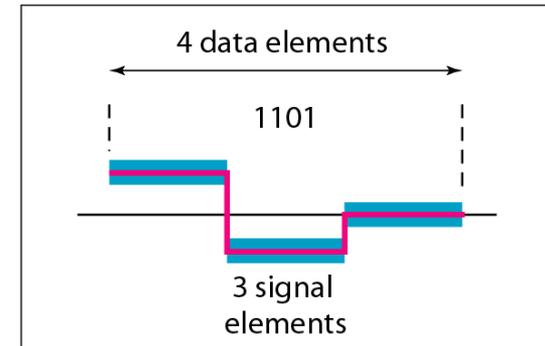
a. One data element per one signal element ( $r = 1$ )



b. One data element per two signal elements ( $r = \frac{1}{2}$ )



c. Two data elements per one signal element ( $r = 2$ )



d. Four data elements per three signal elements ( $r = \frac{4}{3}$ )



# baud



- La velocità di trasmissione delle informazioni si misura in bit per secondo (**bit/s** o **bps**)
- La velocità di segnale, i segnali che si riescono a trasmettere per secondo, si chiama **baud**.
- La velocità del segnale (e non la velocità dei dati) determina la larghezza di banda necessaria per un segnale digitale.
  - Per avere molti cambiamenti nel segnale per unità di tempo devo utilizzare molte frequenze



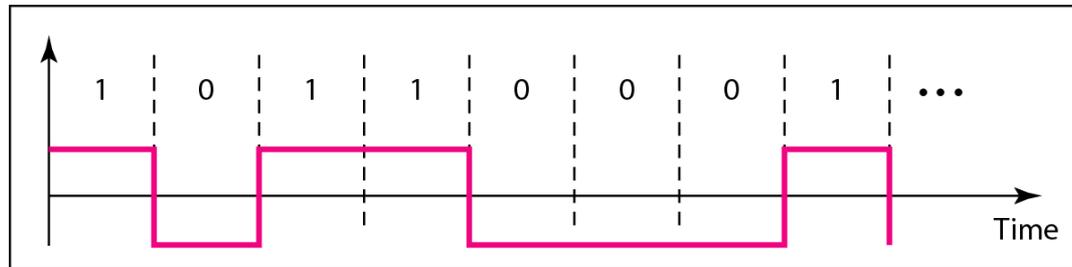
# Requirements

- **Baseline**
  - Nella codifica di un segnale il ricevente calcola in tempo reale la media della potenza del segnale che riceve (la baseline)
  - Il segnale ricevuto viene confrontato con la Baseline per cui se una lunga sequenza di valori uguali sposta la Baseline, posso avere problemi a interpretare il segnale
- **Componenti DC**
  - Segnali digitali con tensione costante per lunghi tempi costringono ad usare frequenze basse dette componenti in continua (DC components) che sono un problema per sistemi che non ne permettono il transito o che usano trasformatori. Quindi vanno usati schemi di codifica senza componenti DC

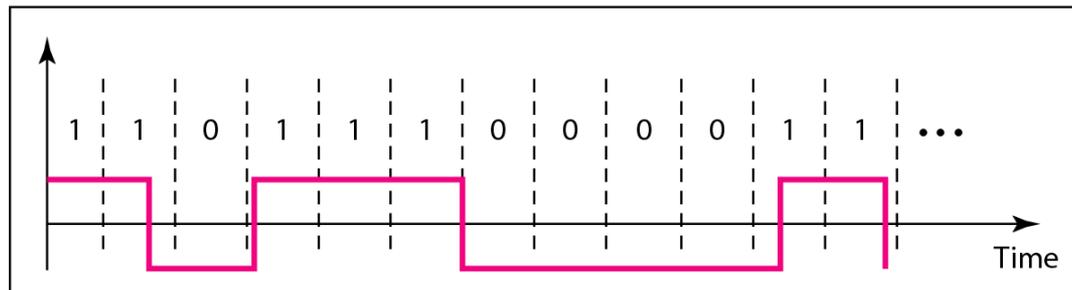


# Auto-sincronizzazione

- Per leggere il segnale ricevuto, il ricevente deve avere lo stesso clock del mittente
- Un segnale auto-sincronizzante contiene informazioni che permettono di sincronizzare il proprio clock con quello del mittente (es transazioni speciali all'inizio della trasmissione)



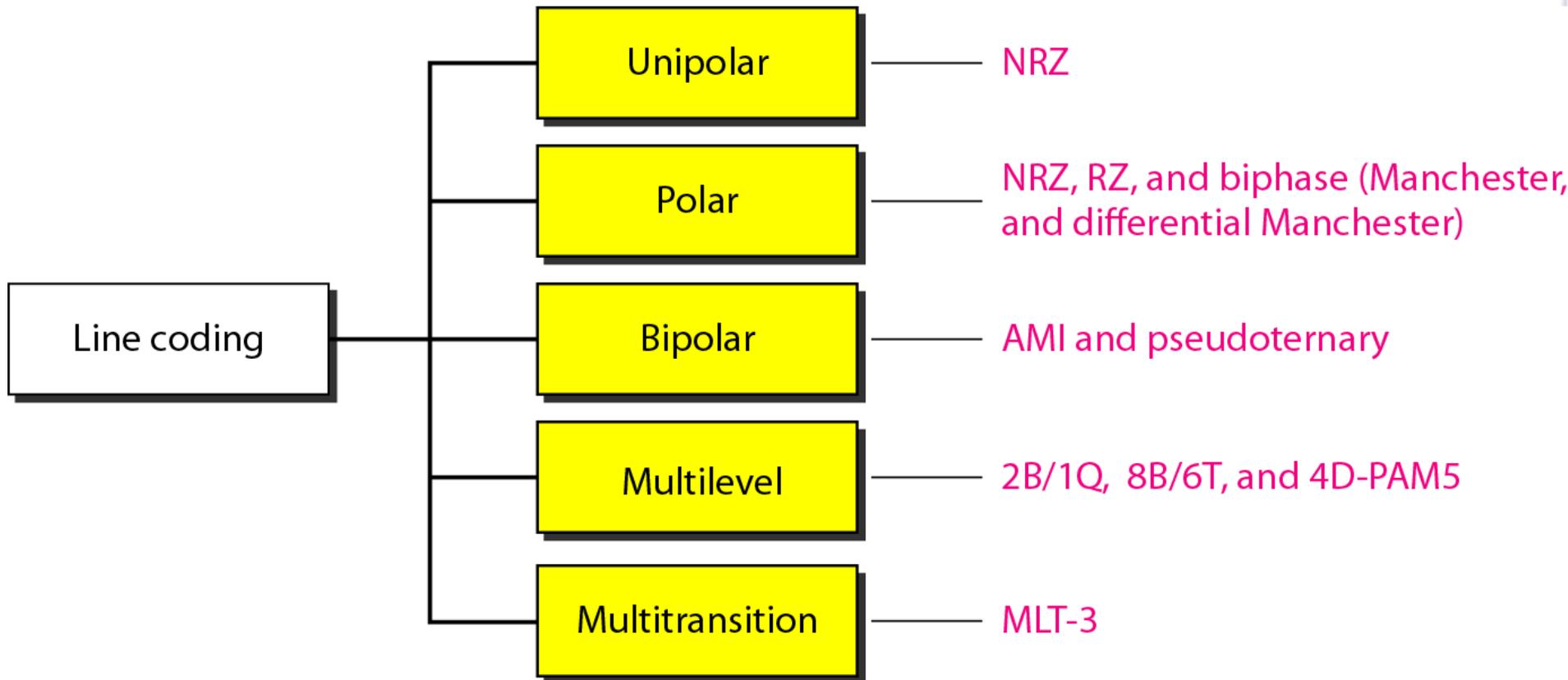
a. Sent



b. Received



# Schemi di line coding

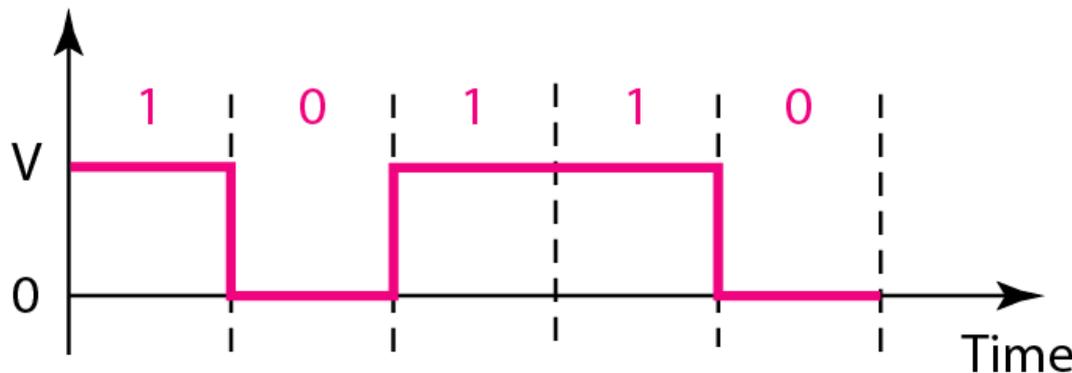




# Schemi unipolari

- I valori di tutti i livelli del segnale hanno sempre lo stesso segno (positivo o negativo)
- **NRZ**: rappresenta 1 con un valore positivo di tensione e 0 con la tensione a 0V
- Significa **Not Return to Zero**, cioè il segnale non torna a zero durante la rappresentazione di un bit
- Molto costoso in termini di potenza trasmessa (il doppio rispetto ad uno schema polare NRZ)

Amplitude



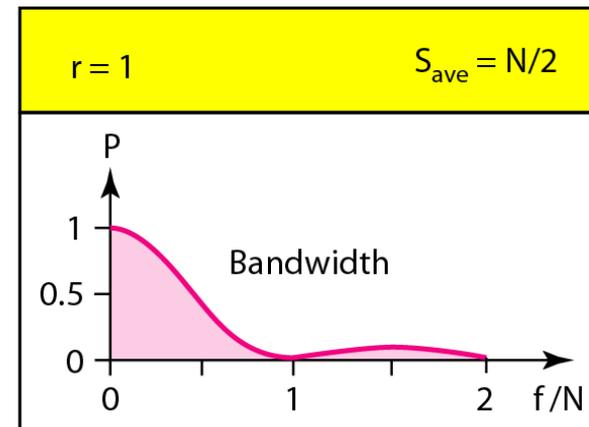
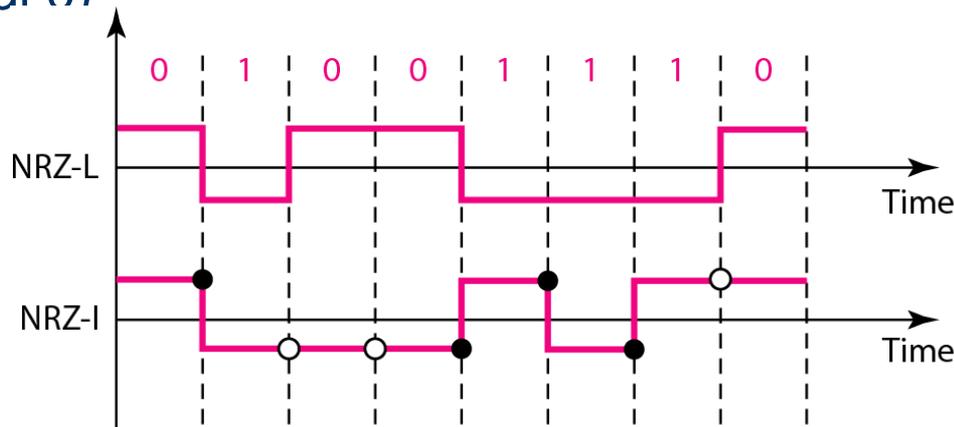
$$\frac{1}{2}V^2 + \frac{1}{2}(0)^2 = \frac{1}{2}V^2$$

Normalized power



# Schemi polari

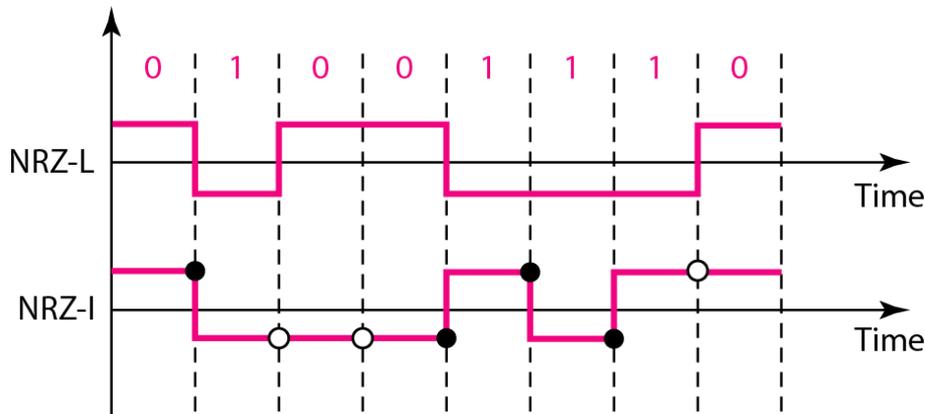
- I valori dei livelli del segnale possono essere negativi o positivi
- **NRZ-L: NRZ-Level** rappresenta 1 con un valore positivo di tensione e 0 con la tensione a opposta
- **NRZ-I: NRZ-Invert** rappresenta 0 con assenza di transizione e 1 con una transizione
- NRZ-L presenta il problema della Baseline per lunghe sequenze di 0 o di 1, NRZ-I solo per lunghe sequenze di 0 (basta evitare lunghe sequenze di 0)



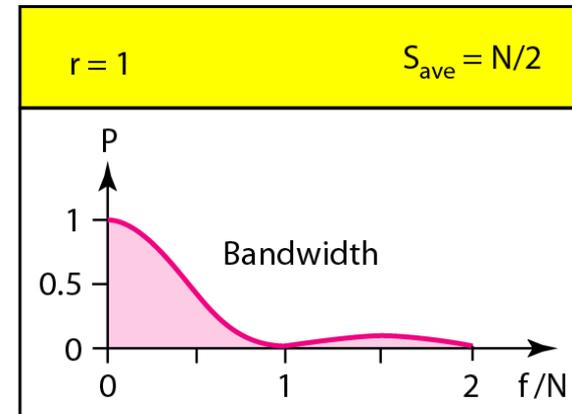


# Schemi polari

- Ci sono anche problemi di sincronizzazione con lunghe sequenze, soprattutto per NRZ-I
- Notare che richiedono entrambe una velocità di segnale di  $N/2$  baud
- Tuttavia la potenza del segnale è concentrata a frequenze basse, quindi ci sono componenti DC con alto livelli di energia



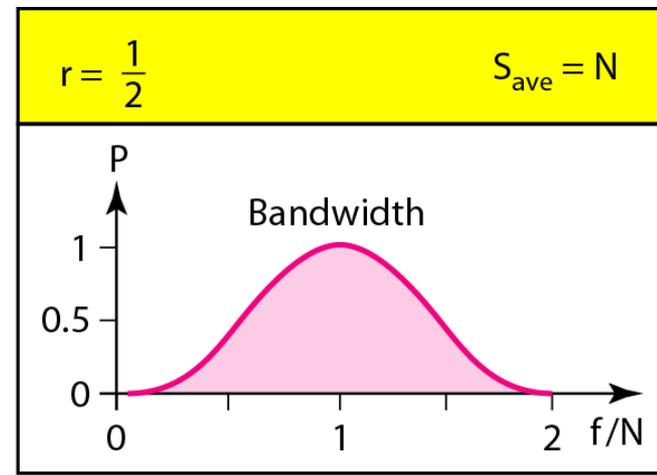
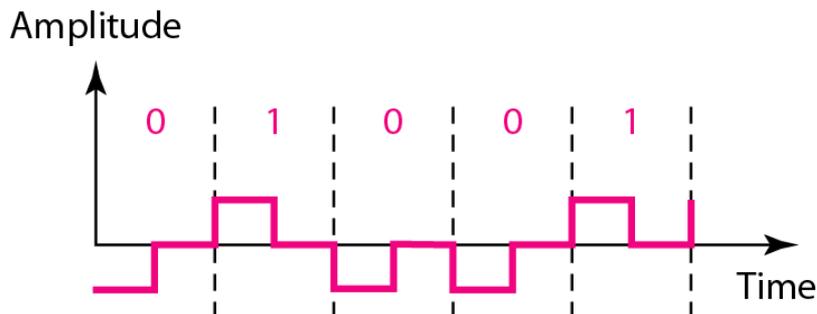
○ No inversion: Next bit is 0    ● Inversion: Next bit is 1





# RZ polare

- Con RZ ho 3 livelli, positivo, negativo e zero. Il segnale cambia rappresentazione ad ogni bit
- 1 è positivo e 0 negativo ma per entrambi a metà c'è una transizione a zero che aiuta la auto sincronizzazione, non ha componenti DC.
- Il principale svantaggio è che richiede due cambiamenti di segnale per bit quindi richiede banda maggiore





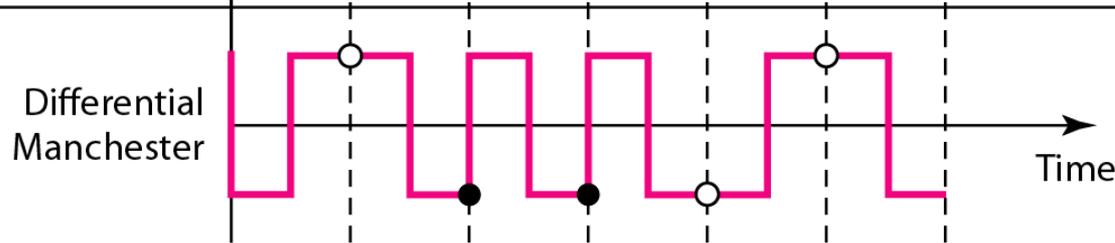
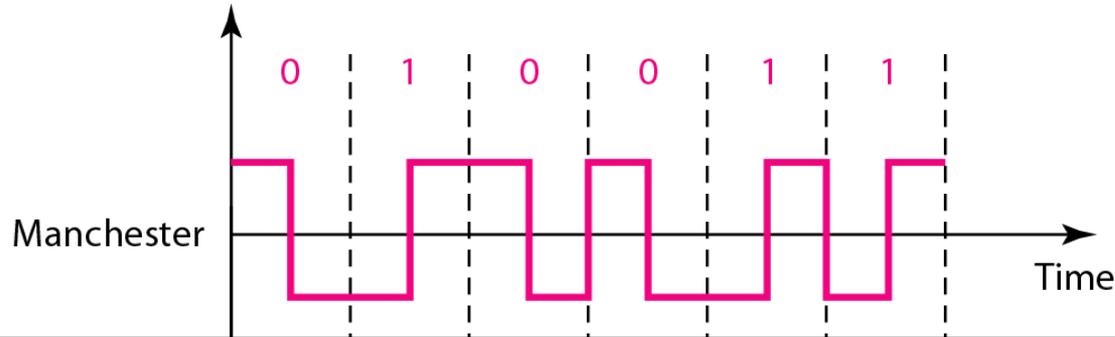
# Codifiche bifase

- Combinando la transizioni ad ogni bit di RZ con NRZ-L si ottiene il Manchester encoding. **0** è una transizione **+-**, **1** è una transizione **-+**
- RZ con NRZ-I produce il Manchester differenziale, assenza di transizione all'inizio dell'intervallo è il bit 0, presenza di transizione è il bit 1
- La transizione al centro dell'intervallo c'è sempre e si usa per autosincronizzazione
- Non c'è il problema delle componenti continue in quanto ogni bit ha sia componenti positive che negative, però richiede velocità di segnale doppia rispetto a NRZ

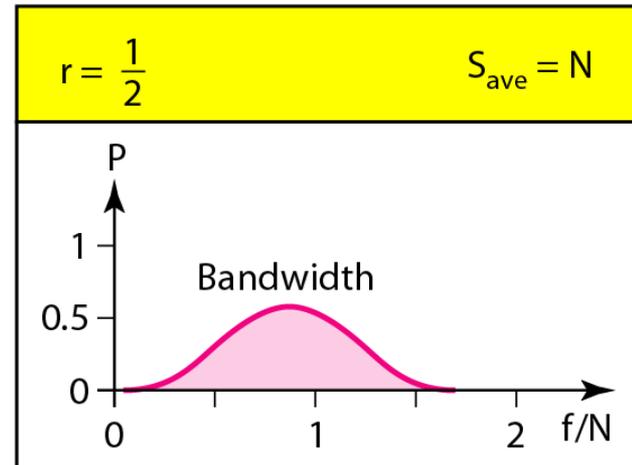


# Manchester

0 is 1 is



○ No inversion: Next bit is 1    ● Inversion: Next bit is 0

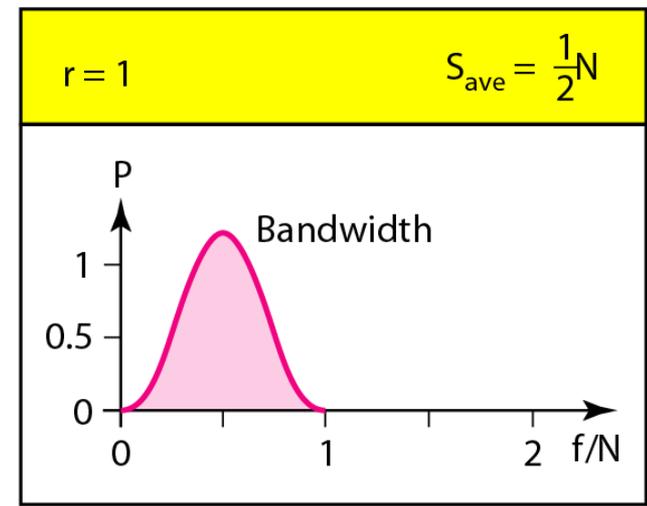
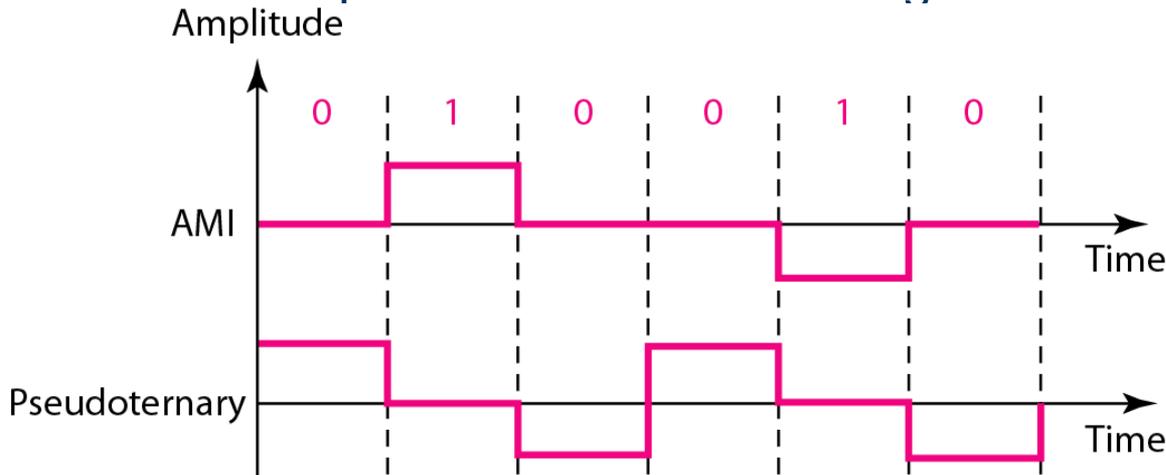




# Codifiche bipolari



- Uso 3 livelli di segnale, + - e 0
- In AMI bit0 è tensione nulla, bit1 tensione positiva o negativa che si alternano
- In Pseudoternaria il contrario
- Hanno la stessa velocità di segnale di NRZ ma non hanno componenti DC, per lunghe sequenze di 0 la tensione è costante ma nulla, per lunghe sequenze di 1 la tensione si alterna tra + e -
- Va bene per comunicazioni a lunghe distanze





# Codifiche multilivello



- Per aumentare la velocità a parità (o diminuire la banda) devo aumentare i bit in media per ogni elemento di segnale
- Una sequenza di  $m$  bit può assumere  $2^m$  valori e una sequenza di  $n$  elementi di segnali  $L^n$  valori
- Se  $2^m = L^n$  ogni sequenza di dati corrisponde ad una sequenza di segnale
- Se  $2^m < L^n$  ho più sequenze di segnale di quelle necessarie e posso utilizzare quelle in più per fornire autosincronizzazione o cambiare la baseline o per rilevare errori di trasmissione
- Se invece  $2^m > L^n$  la codifica non è possibile perché non ho abbastanza valori per rappresentare tutte le sequenze di dati



# Codifiche multilivello

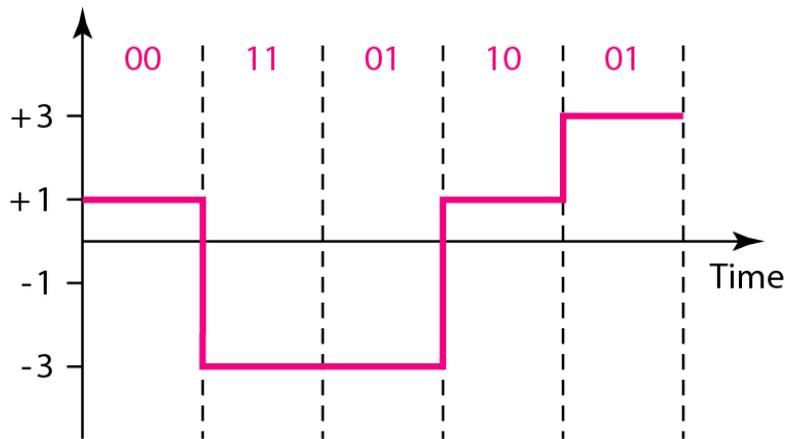
- Di solito si indicano con **mBnL**
  - **m** è la lunghezza della sequenza di dati, **B** indica che sono i dati sono binari, **n** è la lunghezza della sequenza di segnale e **L** vale B per segnali binari ( $L=2$ ), T per segnali Ternari ( $L=3$ ), Q per segnali Quaternari ( $L=4$ )
  - Es **2B1Q** codifico 1 bit con 4 livelli, posso spedire al doppio di NRZ-L ma il ricevente deve essere capace di distinguere tra 4 livelli di tensione  **$2^m=2^2=4^1=L^n$**  per cui non ci sono sequenze inutilizzate (vedremo che questa è usata per DSL)



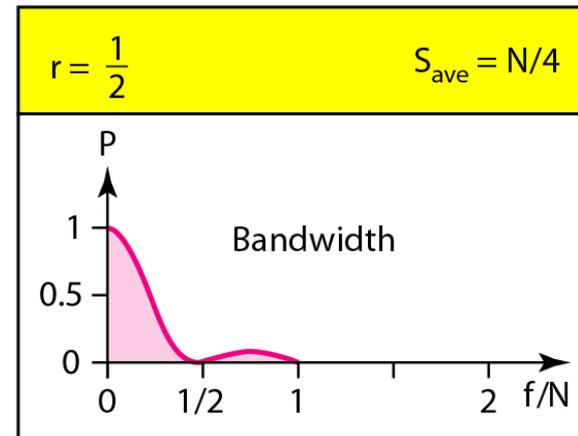
# 2B1Q

Next bits	Previous level: positive	Previous level: negative
	Next level	Next level
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Transition table



Assuming positive original level

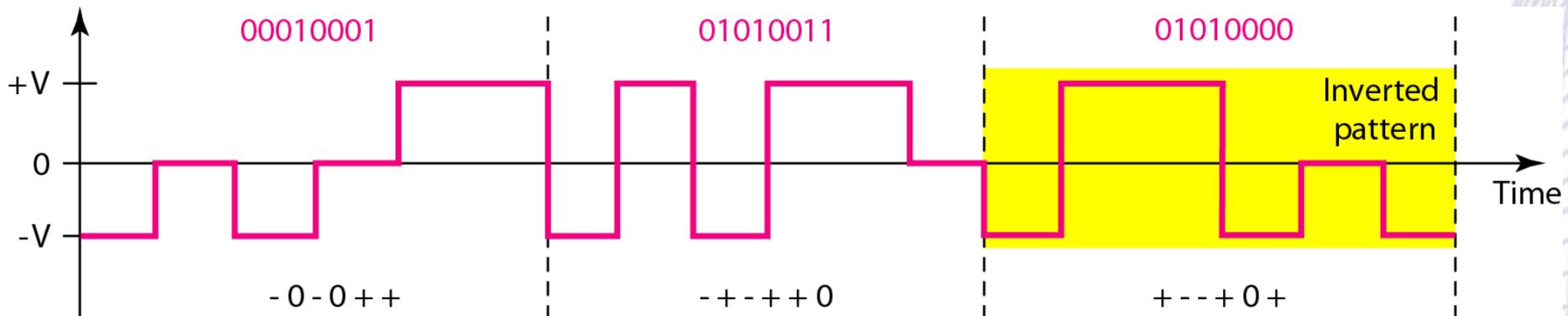




# 8B6T



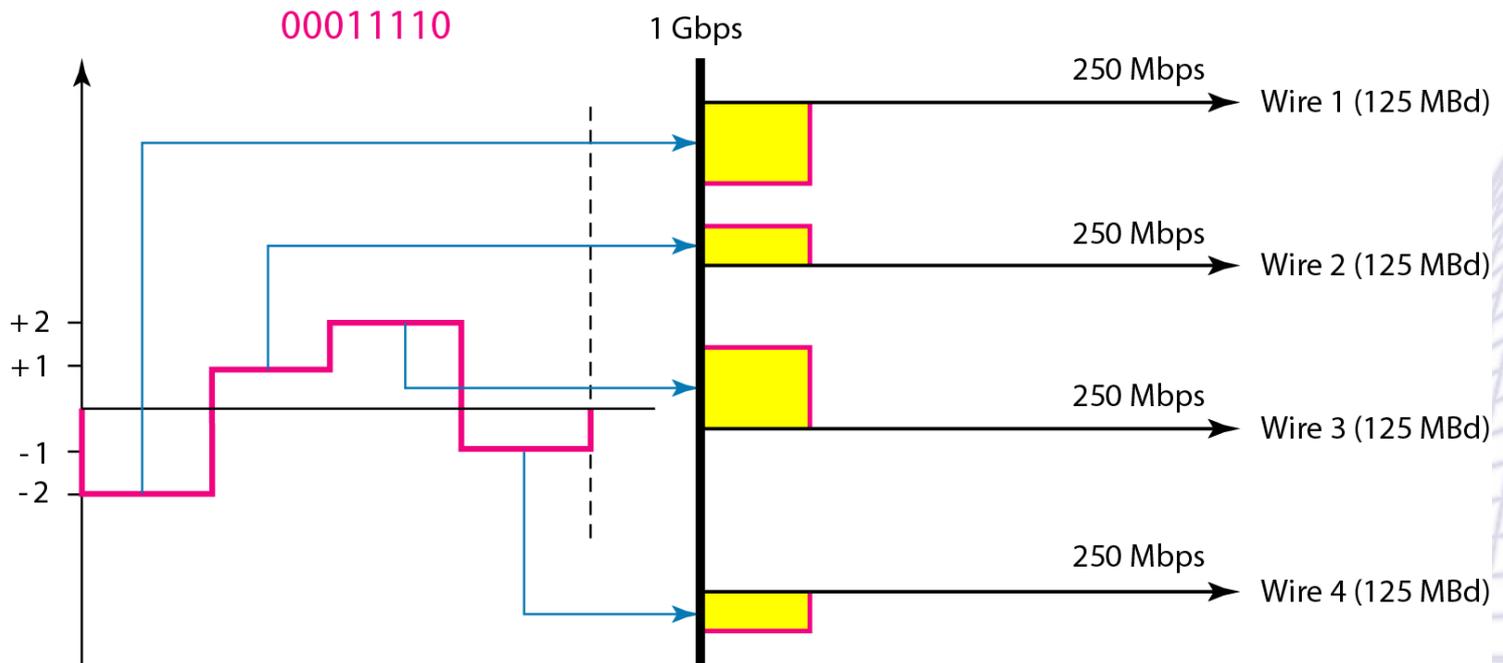
- Sequenze di 8 bit sono codificate con 6 elementi di un segnale ternario.  $2^8 = 256 < 3^6 = 478$
- Quindi ci sono 222 sequenze inutilizzate usabili per sincronizzazione, rilevamento errori e abbattimento di componente DC





# 4D-PAM5

- 4 Dimensional – Five level Pulse Amplitude Modulation
- Segnale su 4 fili in contemporanea, 5 livelli di tensione (-2V, -1V, 0, 1V, 2V) ma la tensione 0 serve solo per rilevare errori. Quindi ho 4 livelli per i dati
- Molto simile a 8B4Q che però usa un unico cavo

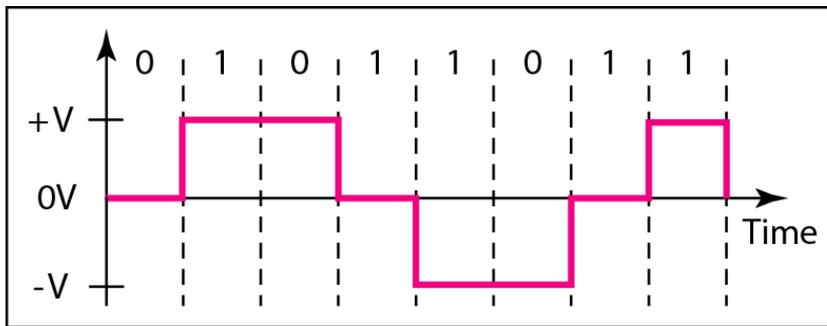




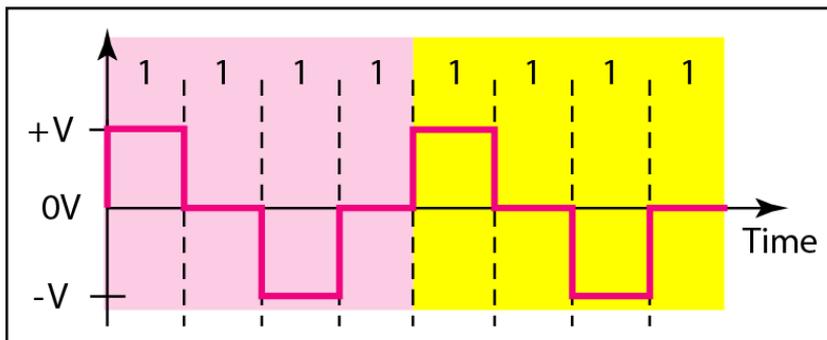
# Trasm. Multilinea MLT-3



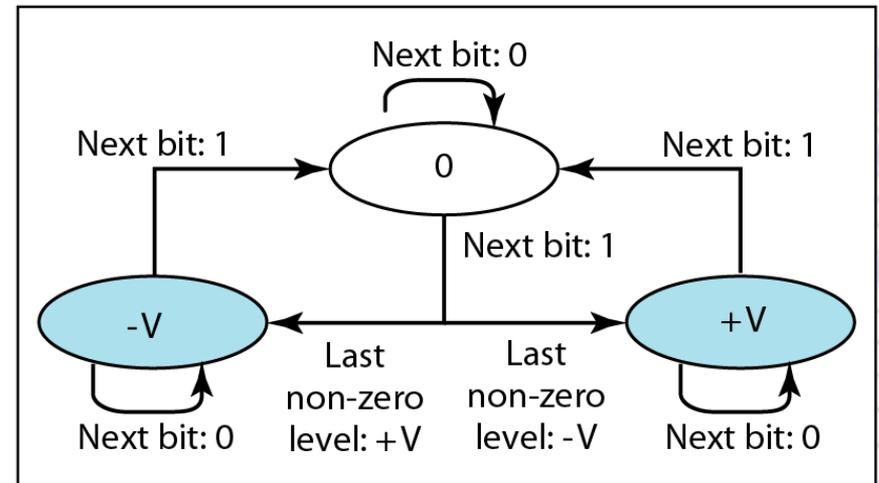
- Con segnali a più livelli si possono usare schemi di codifiche differenziali molto complesse



a. Typical case



b. Worse case



c. Transition states



# Riepilogo

<i>Category</i>	<i>Scheme</i>	<i>Bandwidth (average)</i>	<i>Characteristics</i>
Unipolar	NRZ	$B = N/2$	Costly, no self-synchronization if long 0s or 1s, DC
Unipolar	NRZ-L	$B = N/2$	No self-synchronization if long 0s or 1s, DC
	NRZ-I	$B = N/2$	No self-synchronization for long 0s, DC
	Biphase	$B = N$	Self-synchronization, no DC, high bandwidth
Bipolar	AMI	$B = N/2$	No self-synchronization for long 0s, DC
Multilevel	2B1Q	$B = N/4$	No self-synchronization for long same double bits
	8B6T	$B = 3N/4$	Self-synchronization, no DC
	4D-PAM5	$B = N/8$	Self-synchronization, no DC
Multiline	MLT-3	$B = N/3$	No self-synchronization for long 0s



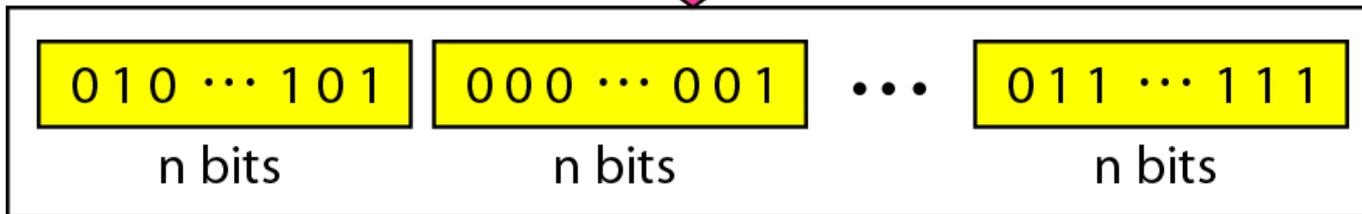
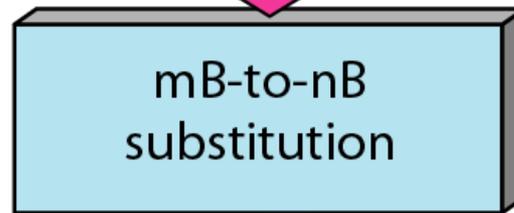
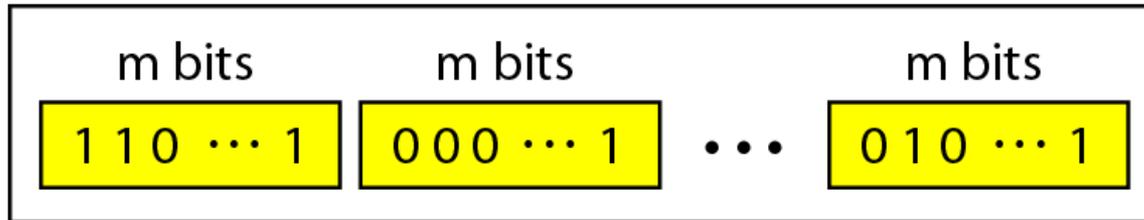
# Codifiche a blocchi

- Per ottenere ridondanza da sfruttare per sincronizzazione dei clock o per error detection
- Si usano sequenze di **m bit** di parole **sorgente** in sequenze di **n bit** di parole **codice** con  **$n > m$**
- Si indica con  **$mB/nB$**  (notare la barra)
- 3 fasi, divisione, sostituzione, riassemblaggio
  - Nella fase di sostituzione avviene la codifica
- Es con 4B/5B sostituisco sequenze di 4 bit con codice di 5 bit che vengono riassemblate in una nuova sequenza



# Codifica a blocchi

Division of a stream into m-bit groups

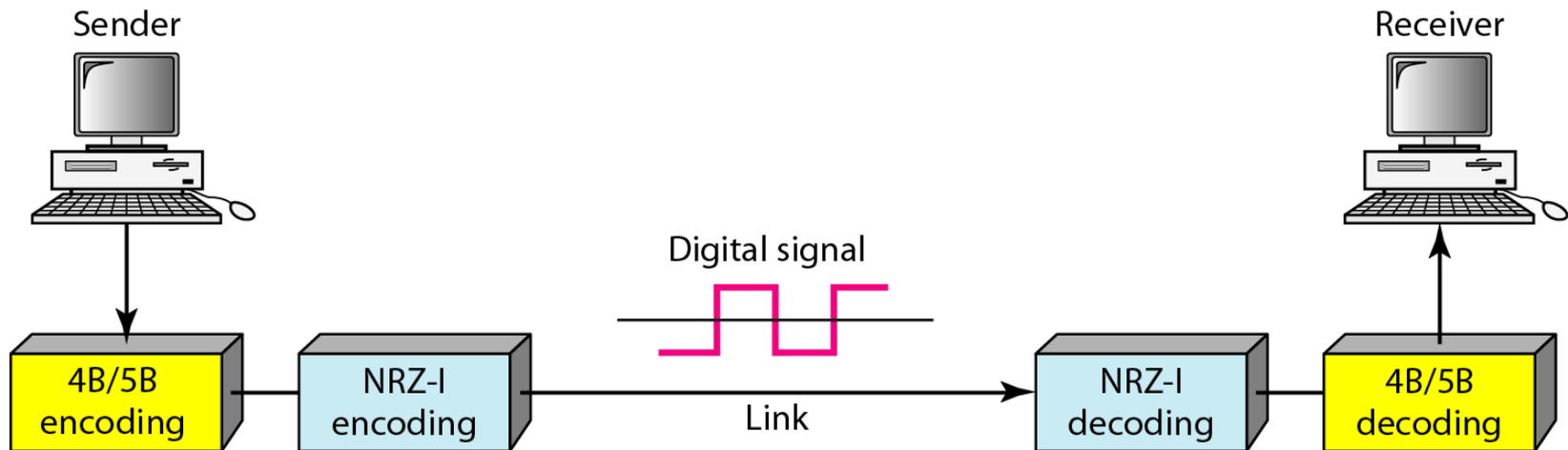


Combining n-bit groups into a stream



# 4B/5B

- 4B/5B è stata pensata per lavorare con NRZ-I che è efficiente quanto a velocità ma ha problemi di sincronizzazione, per esempio con lunghe sequenze di zeri
- Combinando le due, prima codifico in modo da evitare le sequenze di zeri, eliminando tutte le parole codice che potrebbero dare più di 3 zeri consecutivi





# Tabella 4B/5B

- Nessun codice inizia con 00
- Nessun codice finisce con 000
- Mi rimangono codici da usare per sequenze di controllo
- Se ricevo una sequenza che non è tra queste vuol dire che c'è stato un errore di trasmissione

<i>Data Sequence</i>	<i>Encoded Sequence</i>	<i>Control Sequence</i>	<i>Encoded Sequence</i>
0000	11110	Q (Quiet)	00000
0001	01001	I (Idle)	11111
0010	10100	H (Halt)	00100
0011	10101	J (Start delimiter)	11000
0100	01010	K (Start delimiter)	10001
0101	01011	T (End delimiter)	01101
0110	01110	S (Set)	11001
0111	01111	R (Reset)	00111
1000	10010		
1001	10011		
1010	10110		
1011	10111		
1100	11010		
1101	11011		
1110	11100		
1111	11101		

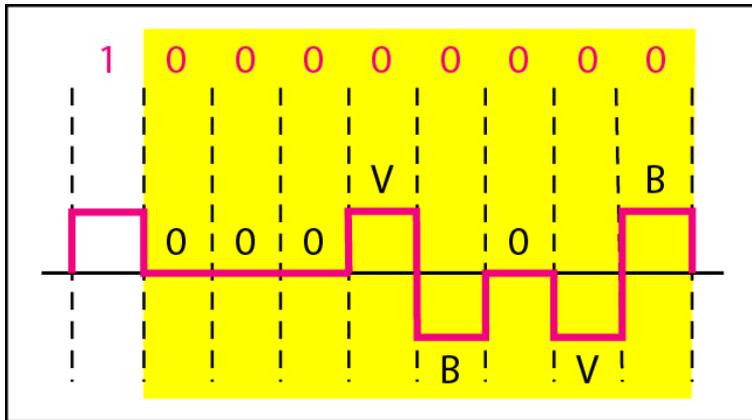


# Scrambling

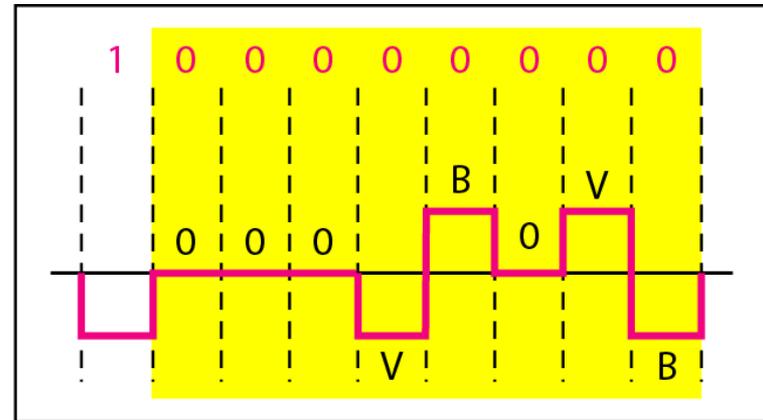
- Per migliorare la sincronizzazione in caso di lunghe sequenze di zeri si usa lo **scrambling**
- Per esempio la codifica bipolare ha buone caratteristiche per trasmissioni a lunghe distanze ma può avere lunghe sequenze di zeri. In questi casi genero delle violazioni alle regole di AMI ottenendo una mescolanza di bit
- Es B8ZS (bipolar with 8-Zero Substitution) sostituisco segnali con 8 zeri consecutivi con 000VB0VB dove V è una violazione di AMI mentre B è un segnale bipolare valido
- In AMI i voltaggi diversi da zero devono seguirsi cambiando di polarità, quindi una violazione è un segnale non nullo seguito da un segnale con la stessa polarità del segnale non nullo, invece un segnale valido è un voltaggio non nullo con polarità opposta al precedente



# B8SZ



a. Previous level is positive.



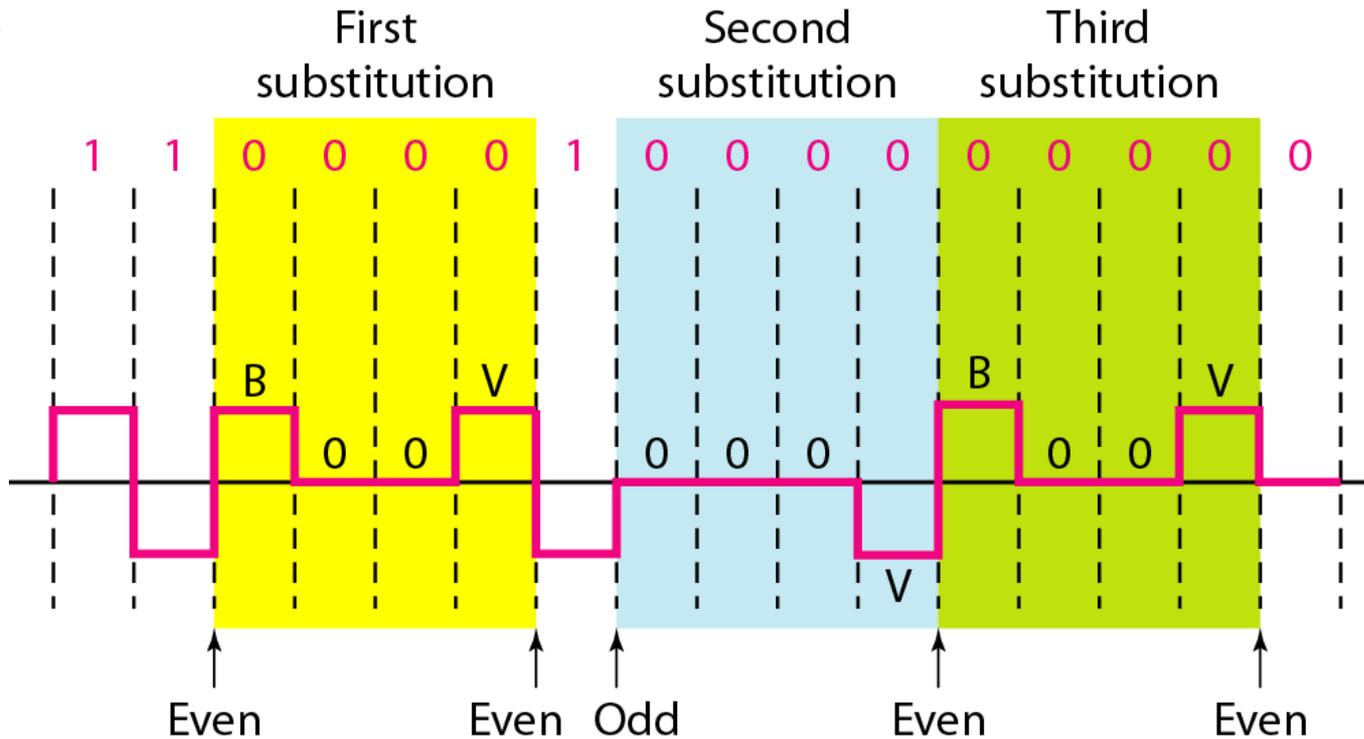
b. Previous level is negative.

- Se il livello precedente è positivo ho una codifica se è negativo ho la codifica opposta perché devo creare una violazione alla regola



# HDB3

- HDB3 High Density Bipolar 3-Zero è simile a B8SZ ma opera su sequenze di 4 bit per cui trasforma 0000 in B00V
- Mentre B8SZ è usata in Nord America, HDB3 viene usata in Europa





# BW del Tape

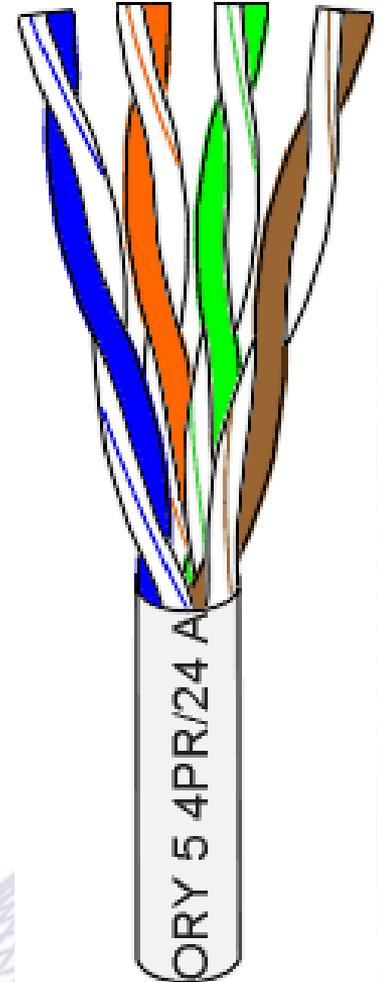
- Es. Nastro LTO3 400 GB
- Una scatola 60x60x60 cm tiene 1000 nastri  
→ 3200 Terabits
- Una scatola trasmessa per corriere arriva in 24 ore →  $3200 \text{ Tbps} / 86400 \text{ secondi} = 800 \text{ Gbps}$
- Costo euro: 2500 di cassette + 500 di spedizione
- Pessimo delay
  - Vogliamo millisecondi non ore!





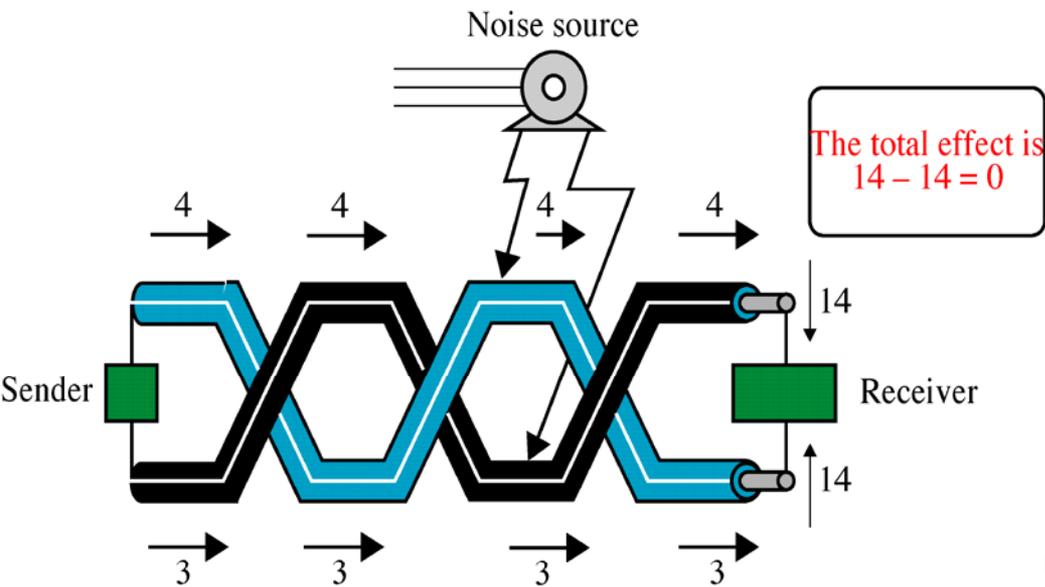
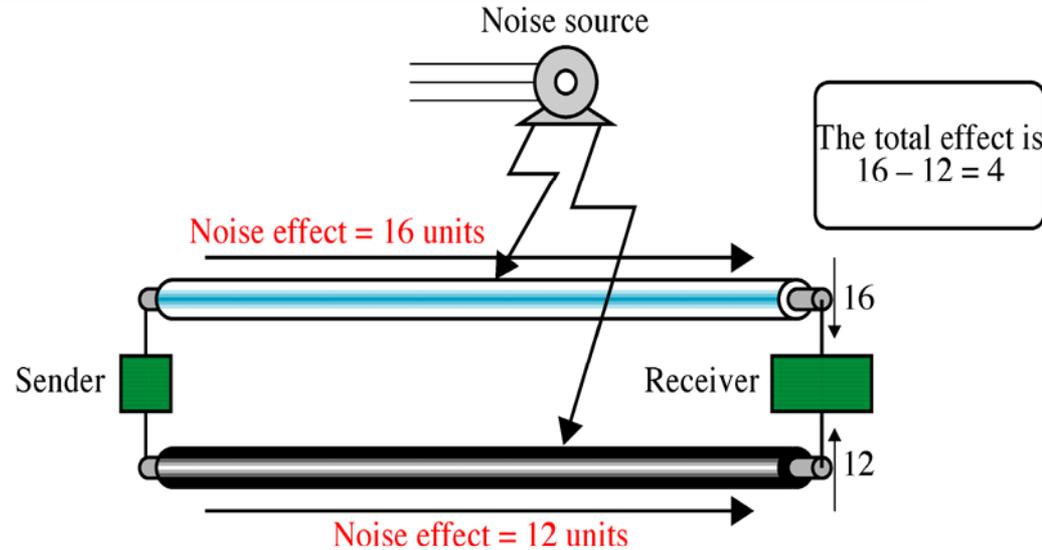
# Twisted pair

- Due fili di **rame** isolati, spessi 1mm ritorti in forma elicoidale al fine di eliminare interferenze e.m. da coppie vicine.
- Molto usato per le linee telefoniche
- Bande fino a diversi Mbps (dipende dalla distanza e dallo spessore del rame).
- Molto diffuso quello non schermato UTP (Unshielded Twisted Pair)
- Schermato STP (Shielded) non molto diffuso



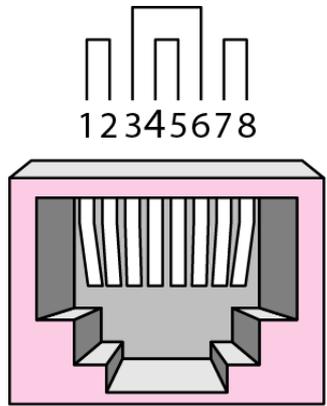


# Rumore

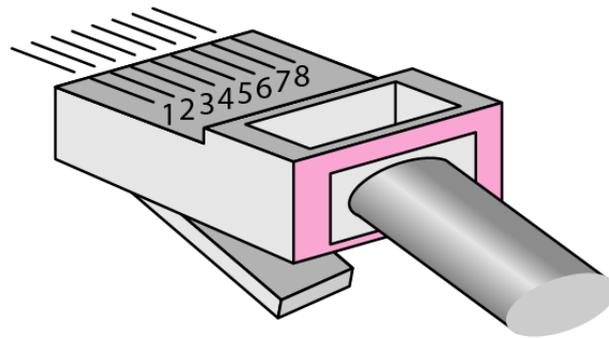




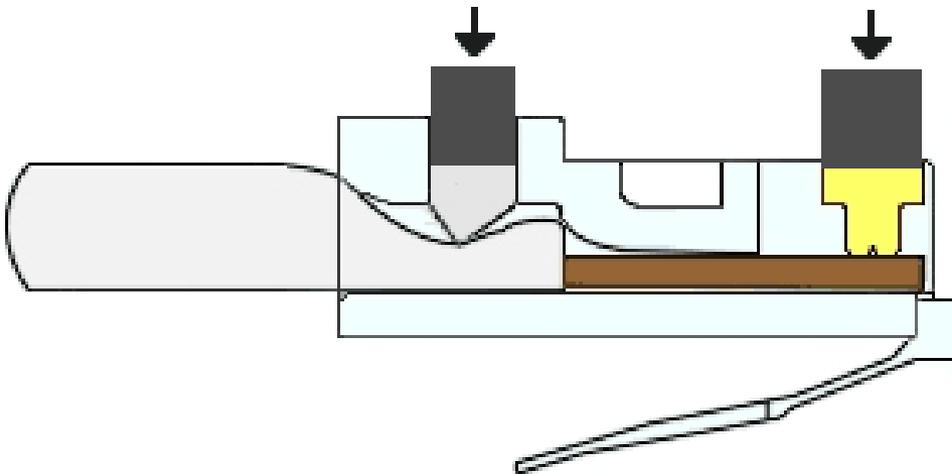
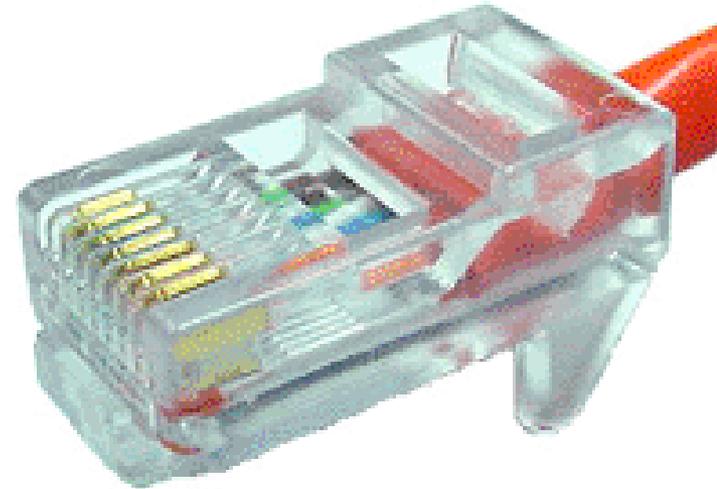
# Connettori RJ45



RJ-45 Female



RJ-45 Male





# Cat 3



- Negli anni sono stati prodotti e standardizzati (EIA/TIA) diversi tipi.
- **Category 3.**
- Una coppia fili isolati, non troppo ritorti. Quattro coppie in ogni cavo
- Molto usato per la cablatura dei telefoni da un patch panel centrale ai vari uffici, usato per Ethernet a 10 Mbps
- Impedenza: 100 ohms + or - 15% @ 1Mhz
- Attenuazione 7.8 dB @ 1Mhz - 17dB @ 4Mhz - 30 dB @ 10Mhz  
- 40 dB @ 16Mhz



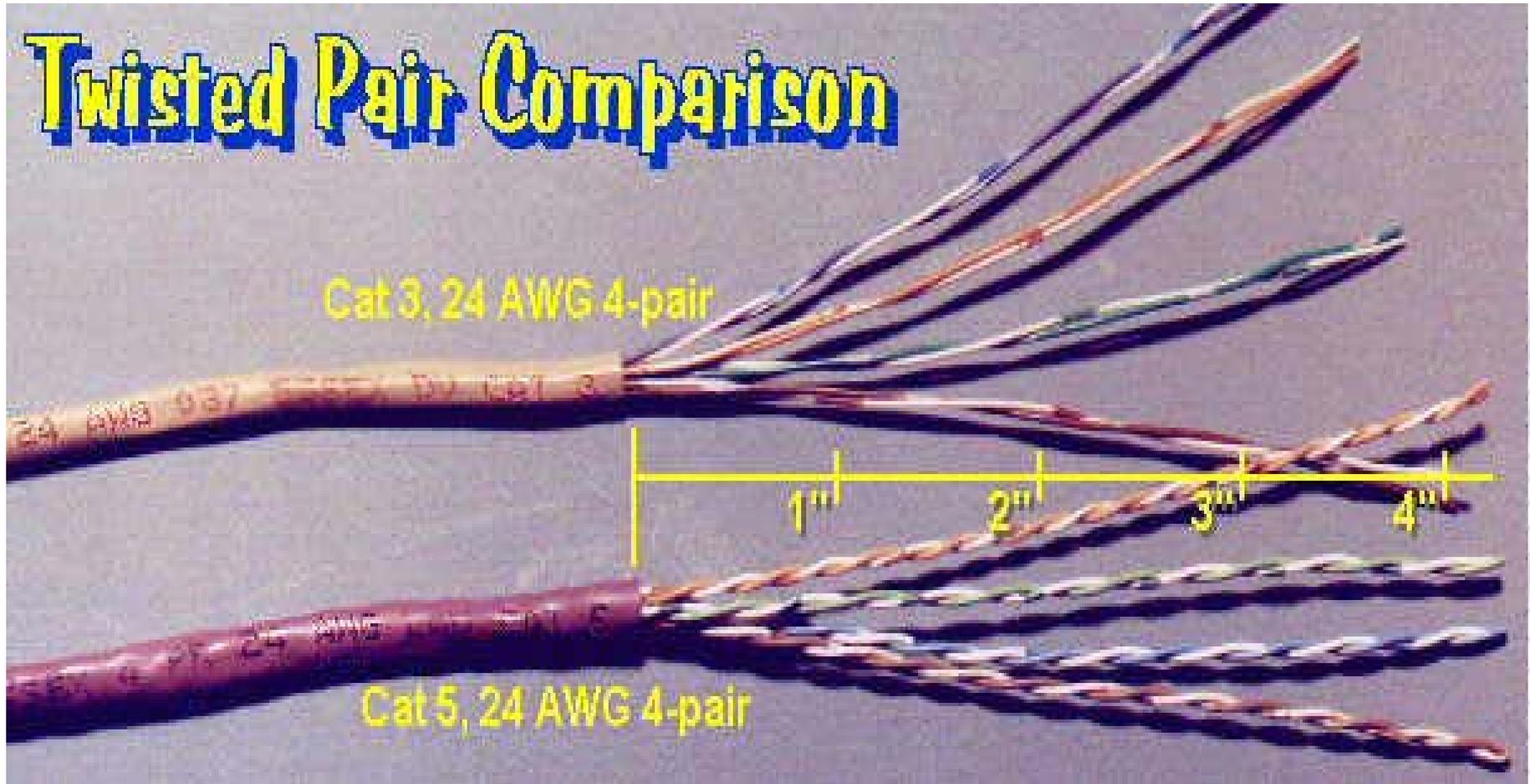
# Cat 5 - UTP

- **Category 5** Dal 1988, simile a Cat 3 ma i fili sono più ritorti e schermati in Teflon → minore diafonia (crosstalk) e miglior segnale.
- Usato per Ethernet fino a 100 Mbps e 1 Gbps
- Impedenza: 150 ohms + or - 10% @ 1Mhz
- Attenuazione -3.2 dB@1Mhz - 6.7dB@4Mhz -10.6dB@13.6 MHz - 40 dB @ 16Mhz





# Confronto cat3 cat5





# Confronto categorie



- Le categorie sono state definite dalla TIA/EIA ma cat 1, 2, 4 e 5 ora non sono più riconosciute da TIA/EIA
- **Cat 1:** Usato in passato per cablaggio di linee telefoniche, ISDN, campanelli
- **Cat 2:** Usato in passato in link Token Ring a 4 Mbps
- **Cat 3:** Definito come standard TIA/EIA-586-B, usato in reti dati fino a 16 MHz, molto popolare nelle reti Ethernet a 10 Mbit/s, viene usato anche per telefoni
- **Cat 4:** Usato per frequenze fino a 20 MHz, usato spesso per reti token ring 16 Mbit/s



# Confronto categorie

- **Cat 5:** fino a 100 MHz, spesso usato in reti Ethernet a 100 Mbit/s. Potrebbe dare problemi in reti 1000BASE-T
- **Cat 5e:** Definito in TIA/EIA-586-B. Performance fino a 100 MHz, spesso usato per reti Ethernet 100 Mbit/s e gigabit.
- **Cat 6:** Definito in TIA/EIA-586-B. Prestazioni fino a 250 MHz, più del doppio di cat 5 o cat 5e
- **Cat 6a:** Specifiche future per applicazioni a 10 Gbps
- **Cat 7:** Nome informale per cablaggio ISO/IEC 11081 di classe F. Specifica quattro coppie schermate individualmente (STP) dentro uno schermo globale. Progettato per trasmissioni a frequenze fino a to 600 MHz.

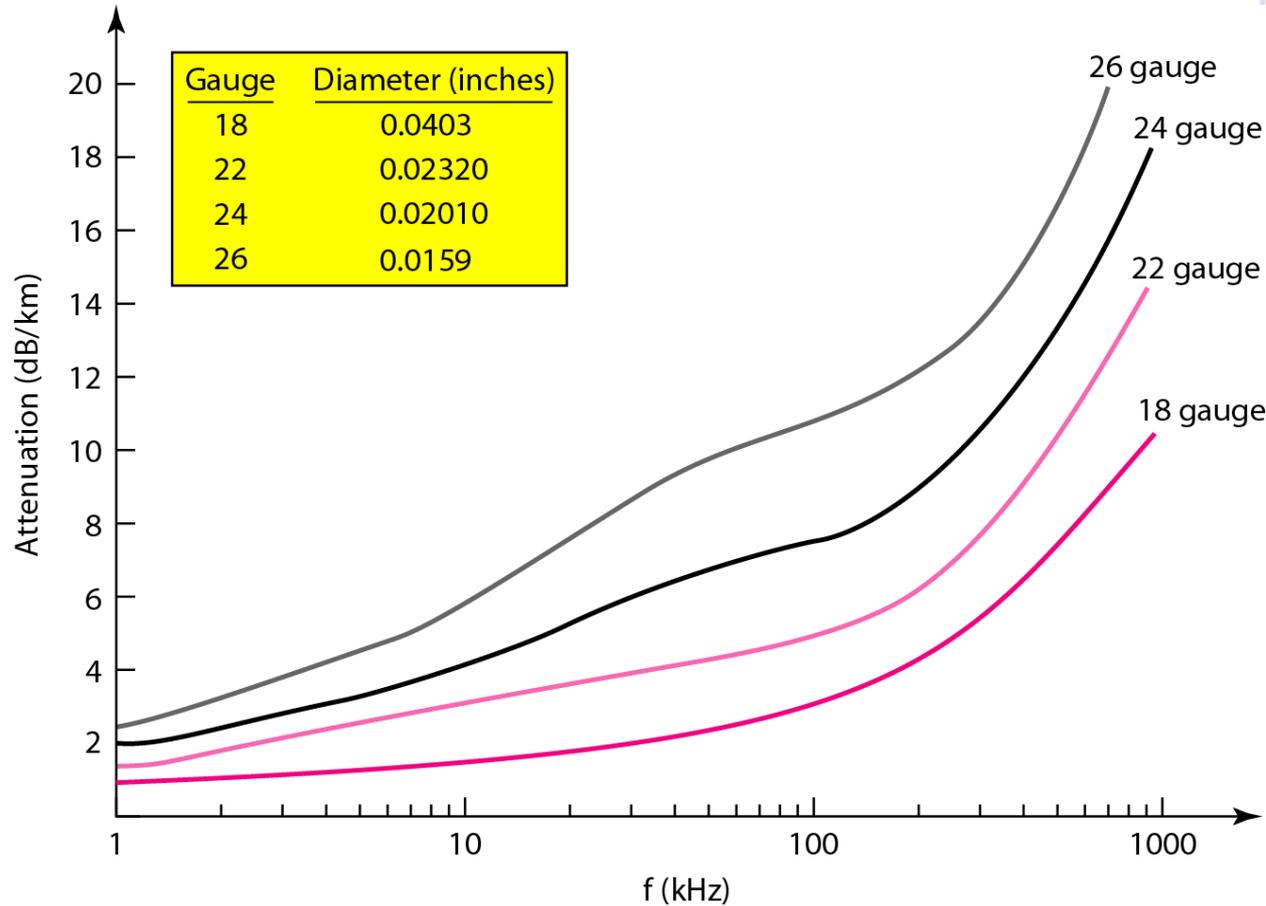


<b>Parameter</b>	<b>Category 5 and Class D</b> with additional requirements TSB95 and FDAM 2	<b>Category 5E</b> (‘568-A-5)	<b>Category 6 Class E</b> (Performance at 250 MHz shown in parentheses)	<b>Proposed Category 7 Class F</b> (Performance at 600 MHz shown in parentheses)
<b>Specified frequency range</b>	1-100 MHz	1-100 MHz	1-250 MHz	1-600 MHz
<b>Attenuation</b>	24 dB	24 dB	21.7 dB (36 dB)	20.8 dB (54.1 dB)
<b>NEXT</b>	27.1 dB	30.1 dB	39.9 dB (33.1 dB)	62.1 dB (51 dB)
<b>Power-sum NEXT</b>	N/A*	27.1 dB	37.1 dB (30.2 dB)	59.1 dB (48 dB)
<b>ACR</b>	3.1 dB	6.1 dB	18.2 dB (-2.9 dB)	41.3 dB (-3.1 dB)**
<b>Power-sum ACR</b>	N/A	3.1 dB	15.4 dB (-5.8 dB)	38.3 dB (-6.1 dB)**
<b>ELFEXT</b>	17 dB (new requirement)	17.4 dB	23.2 dB (15.3 dB)	ffs***
<b>Power-sum ELFEXT</b>	14.4 dB (new requirement)	14.4 dB	20.2 dB (12.3 dB)	ffs***
<b>Return loss</b>	8 dB* (new requirement)	10 dB	12 dB (8 dB)	14.1 dB (8.7 dB)
<b>Propagation delay</b>	548 nsec	548 nsec	548 nsec (546 nsec)	504 nsec (501 nsec)
<b>Delay skew</b>	50 nsec	50 nsec	50 nsec	20 nsec



# Prestazioni e diametro

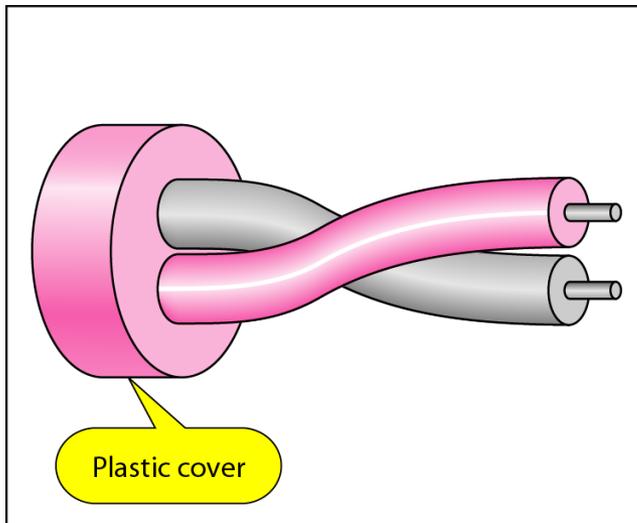
- Le prestazioni in termini di attenuazione migliorano con il diametro del cavo
- 18=0.1024 cm
- 22=0.0589 cm
- 24=0.0511 cm
- 26=0.0404 cm



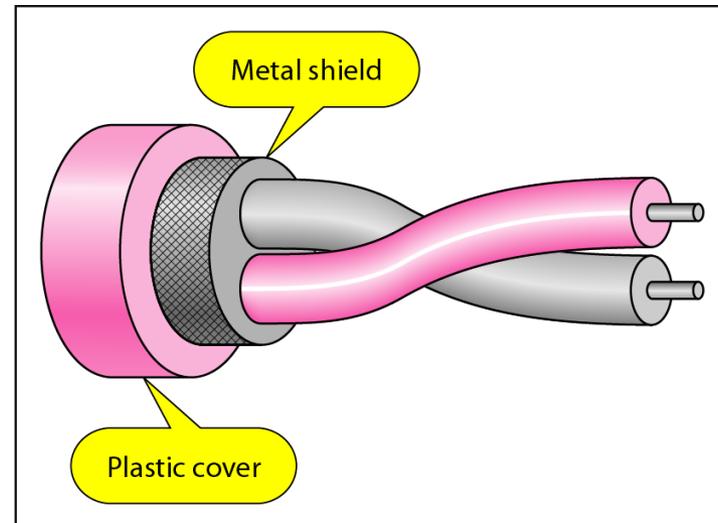


# UTP vs STP

- UTP: Unshielded Twisted Pair è più comune
- STP: Shielded Twisted Pair o FTP: Foiled Twisted Pair ha maggior immunità a interferenze



a. UTP

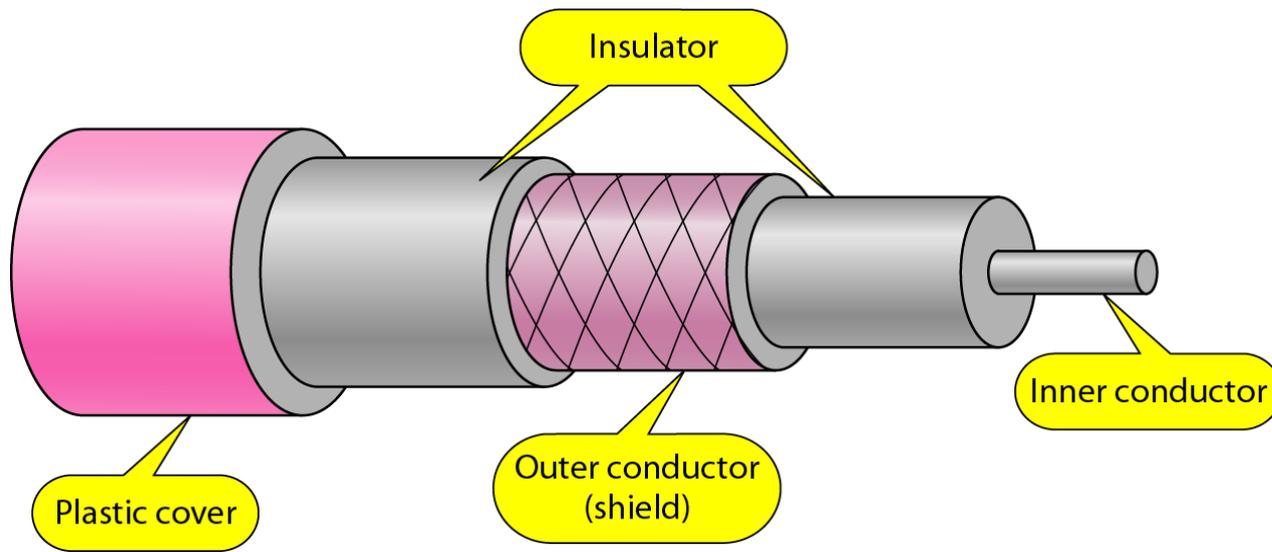


b. STP



# Cavo Coassiale - Coax

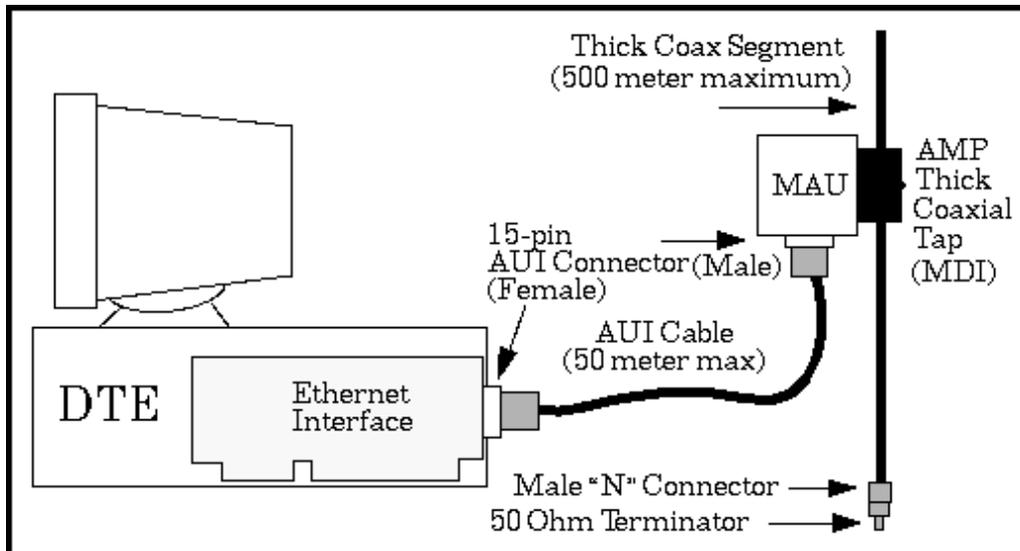
- Meglio schermato del doppino quindi raggiunge maggiori distanze e/o maggiori velocità
- Cavo di rame rigido come nucleo circondato materiale isolante circondato a sua volta da un conduttore a maglia intrecciata coperto da plastica
- Fino a 1km si raggiungono 1-2 Gbps. Distanze maggiori con amplificatori o con minori velocità
- Usato in passato in telefonia, viene sostituito da fibre
- Impedenza 50 ohm, 75 ohm per broadband (tv via cavo)





# Thick Coax

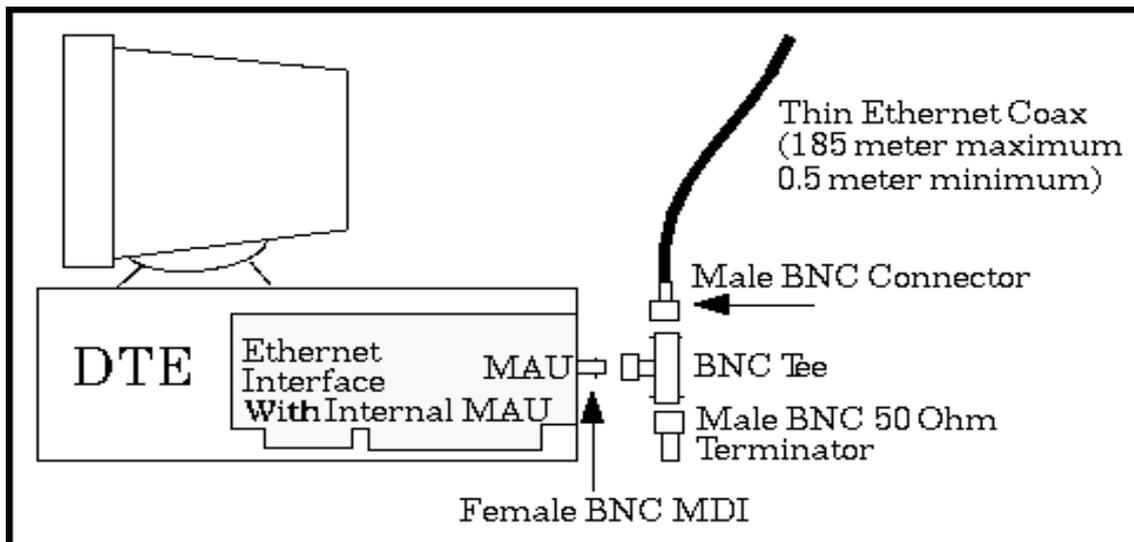
- Primo mezzo pensato per Ethernet (10Base5) negli anni '80
- 1 cm di diametro isolato con PVC (giallo) o Teflon (arancio-marrone)
- In disuso da anni, si trova solo in vecchie installazioni come backbone
- Cavo RG-11 (impedenza a 50 Ohm)





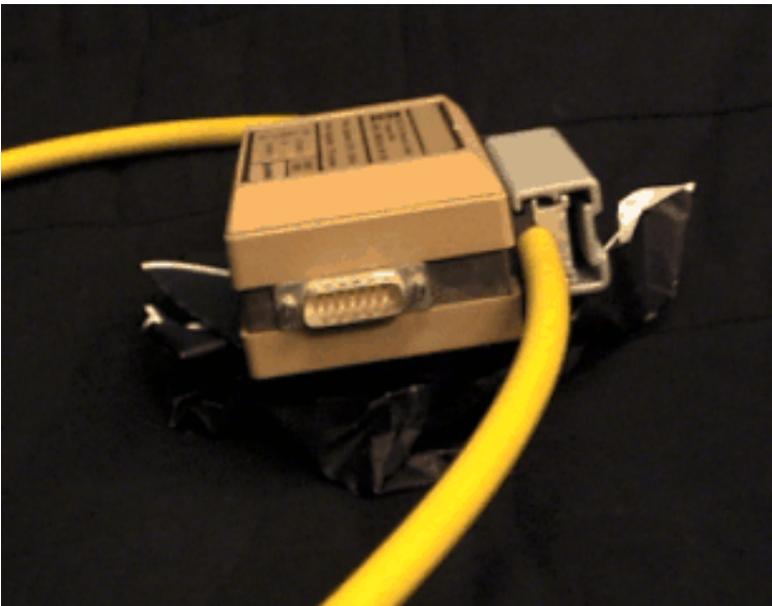
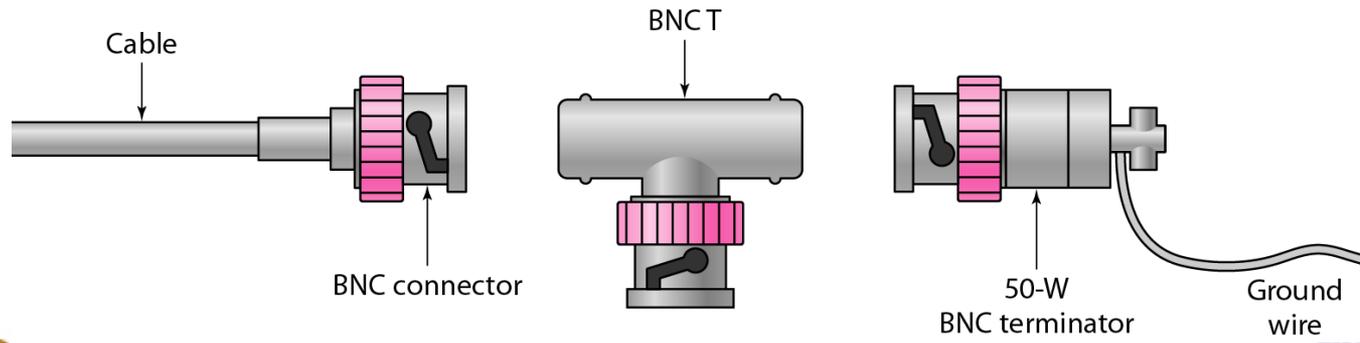
# Thin Coax

- Per attaccare il coax direttamente al computer
- 0.5 cm di diametro, spesso di colore nero, molto flessibile.
- Specifiche RG58 (impedenza 50 Ohm)





# Coassiale



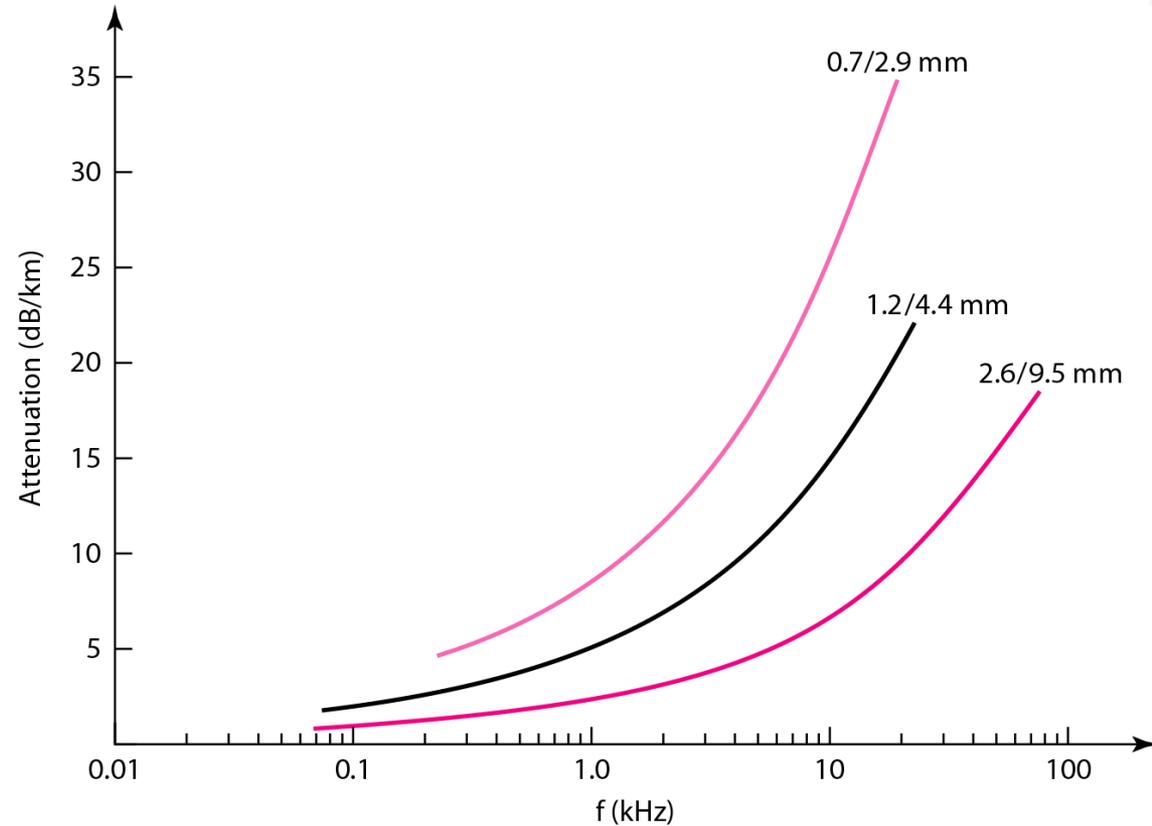
Michele N





# Prestazioni coax

- Il coax ha larghezza di banda superiore all'UTP
- L'attenuazione sale molto più rapidamente





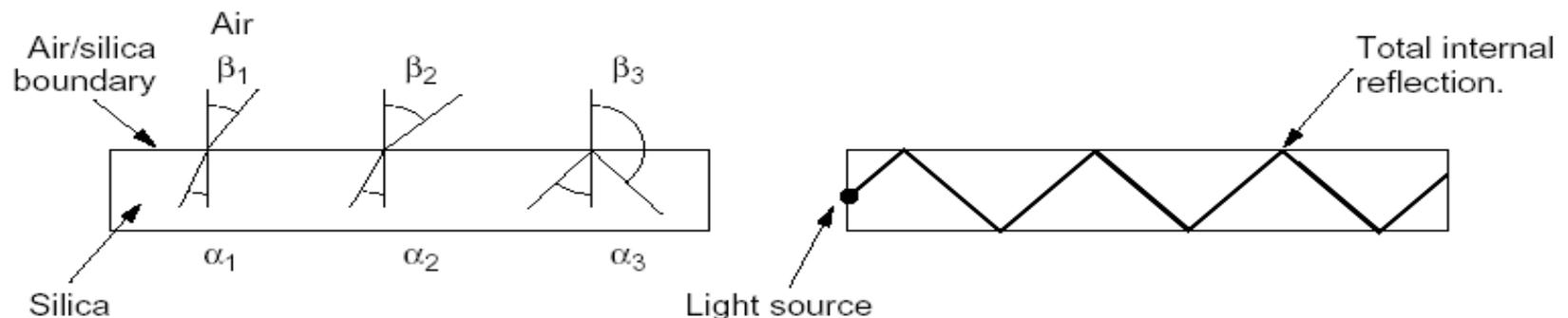
# Fibre ottiche

- Le fibre offrono bande virtualmente illimitate (ma non a costo zero) oltre 50000 Gbps
- Limiti pratici attorno ai 10 Gbps per problemi di conversione tra segnali elettrici e ottici
- Tre elementi:
  - Sorgente di luce (laser o LED), un impulso di luce indica bit 1 e l'assenza di luce bit 0
  - Mezzo trasmissivo: una finissima fibra di vetro.
  - Un rivelatore all'altro lato genera un impulso elettrico quando la luce lo colpisce.



# Fibre ottiche

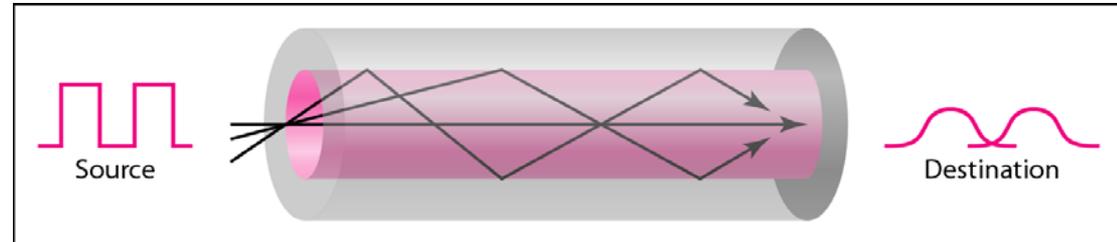
- Ogni raggio di luce che incide con un angolo maggiore dell'angolo critico rimane intrappolato, rimbalzando all'interno della fibra
- Molti raggi rimbalzano a diversi angoli, si dice che ogni raggio ha un **modo** diverso → fibra multimodale (**multimode fiber**)
- Se il diametro della fibra scende a poche lunghezze d'onda, la fibra si comporta come una guida d'onda, la luce si propaga in linea retta → fibra monomodale (**single mode fiber**)



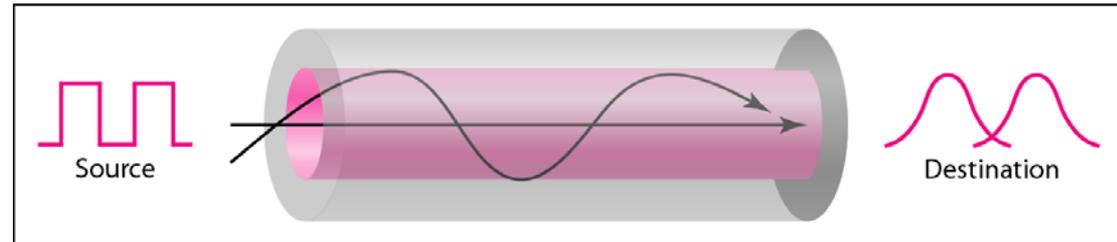


# Multimode

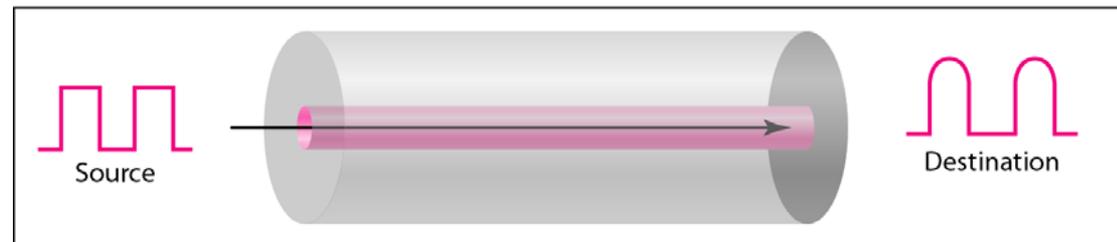
- In alto una fibra in cui l'indice di rifrazione cambia repentinamente
- Questo contribuisce alla distorsione del segnale nel cavo ottico
- In mezzo una fibra con indice graduale, più denso al centro che all'esterno. Si osserva una minore distorsione
- Ancora meglio in basso una fibra single mode



a. Multimode, step index



b. Multimode, graded index

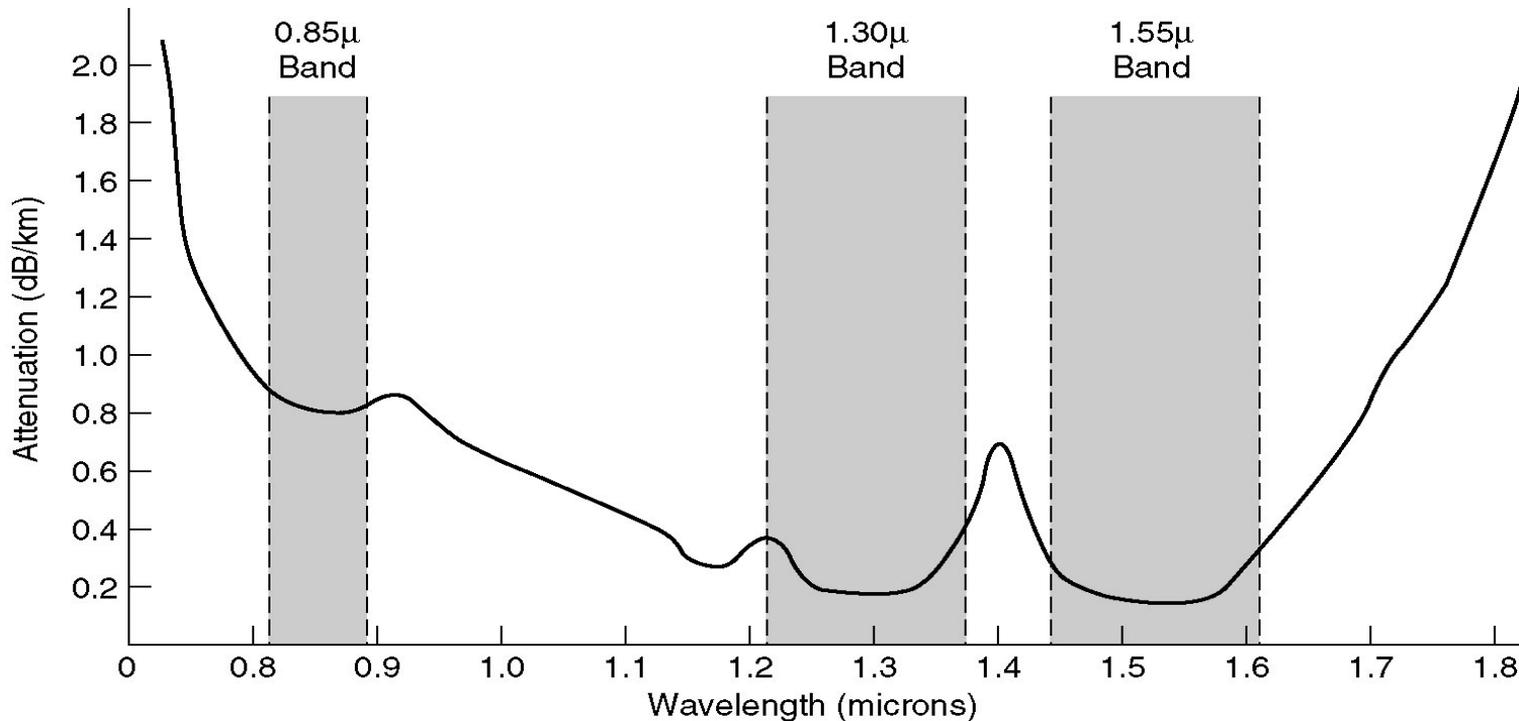


c. Single mode



# Finestre ottiche

- Si usano frequenze dell'infrarosso ( cfr: luce visibile tra 0.4 e 0.7  $\mu\text{m}$   $\rightarrow$  400 – 700 nm)





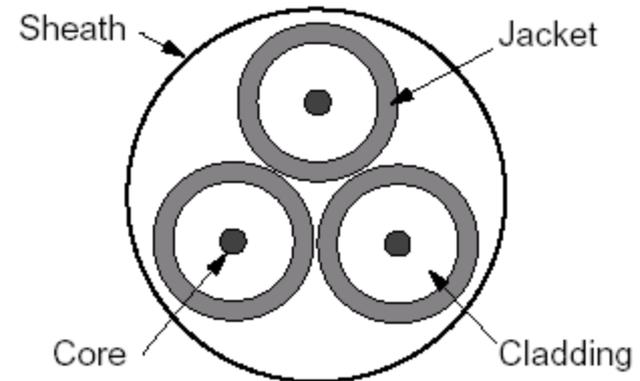
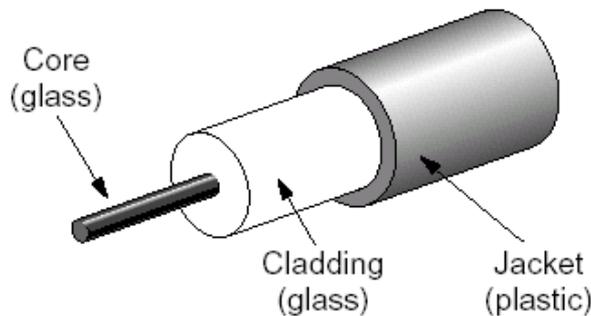
# Le tre bande

- Sono larghe 25000 – 30000 GHz e sono nell'infrarosso (luce visibile tra 0.4 e 0.7 micron)
- Banda a **1330 nm** e **1550 nm** con attenuazione di meno del 5% al km
- Banda a **850 nm** ha maggiore attenuazione ma permette di utilizzare laser ed elettronica con lo stesso materiale (GaAs, Arseniuro di Gallio)



# Cavi per fibre ottiche

- Simili al coax ma senza la maglia
- Core di 50 (o 62.5) micron per le multimode (un capello umano)
- Core di 7-10 micron per le monomodali
- Cladding con basso indice di rifrazione, poi plastica protettiva





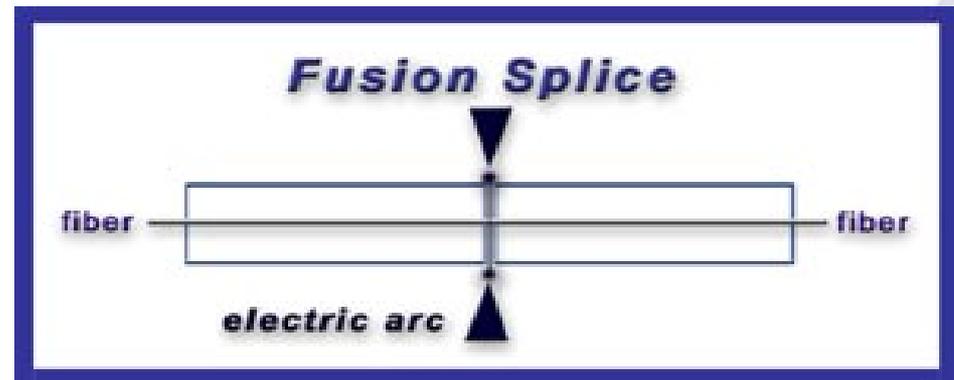
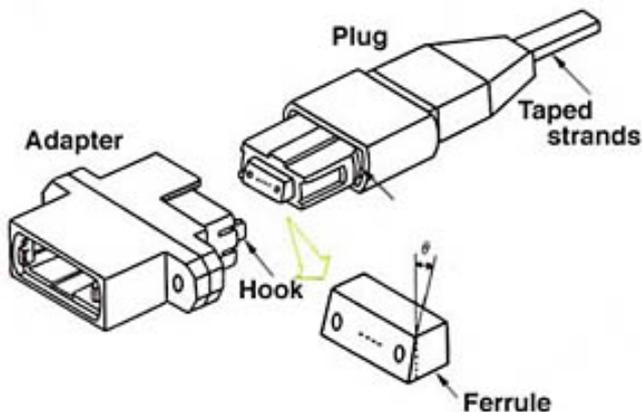
# Tipi di fibre

tipo	Spessore cavo in $\mu\text{m}$	Spessore rivestimento $\mu\text{m}$	Modalità di trasmissione
50/125	50.0	125	Multimode, grade index
62.5/125	62.5	125	Multimode, grade index
100/125	100.0	125	Multimode, grade index
7/125	7.0	125	Single mode



# Interconnessioni ottiche

- Terminate nei connettori che vengono inseriti nelle prese (socket) → Facile riconfigurare il sistema ma perdita di 10-20% della luce
- Giunzioni meccaniche. Fibre tagliate accuratamente e avvicinate con slitte e bloccate. Si possono fare piccoli aggiustamenti misurando l'attenuazione per massimizzare il segnale → 5 minuti di lavorazione perdita di meno di 10% del segnale
- Le due fibre vengono fuse insieme, con perdita minima ma comunque non nulla.





# LED o Laser

- Le sorgenti possono essere diodi o laser a semiconduttori
- I ricevitori sono fotodiodi con tempi di risposta di circa 1ns → data rate di circa 1 Gbps

Item	LED	Semiconductor laser
Data rate	Low	High
Fiber type	Multimode	Multimode or single mode
Distance	Short	Long
Lifetime	Long life	Short life
Temperature sensitivity	Minor	Substantial
Cost	Low cost	Expensive

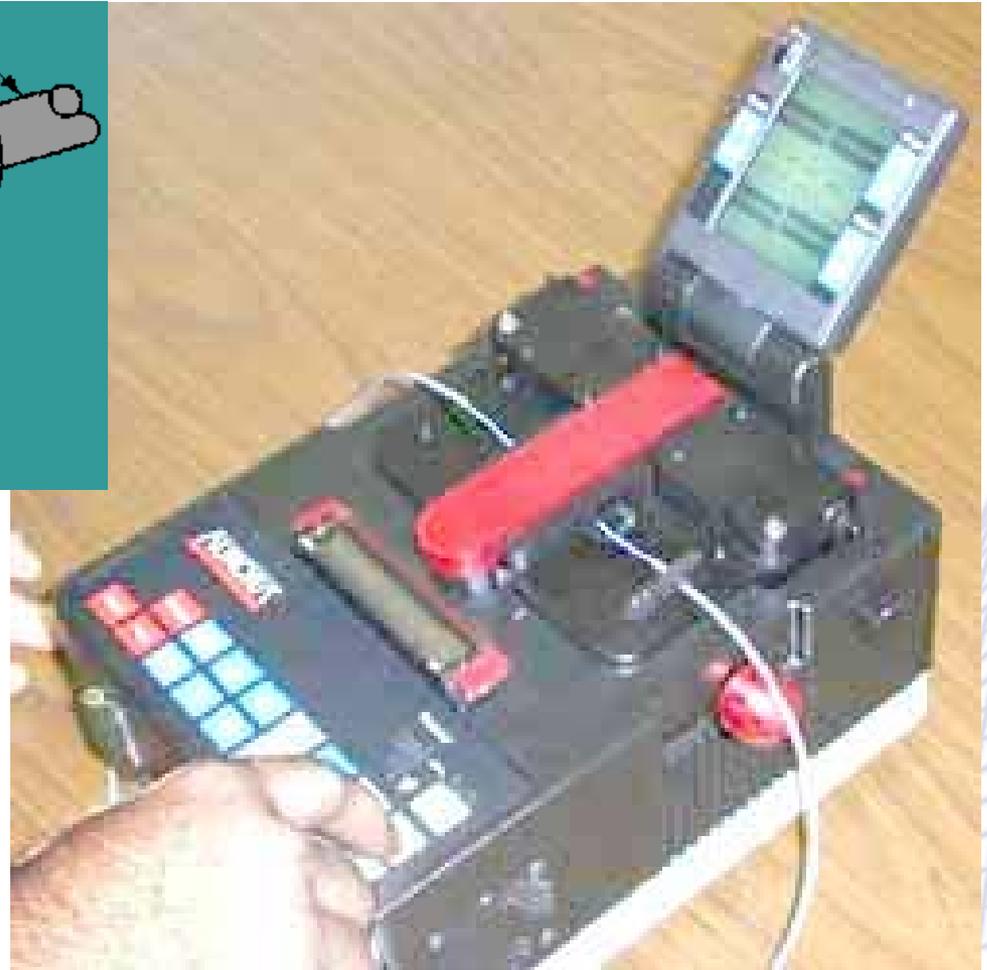
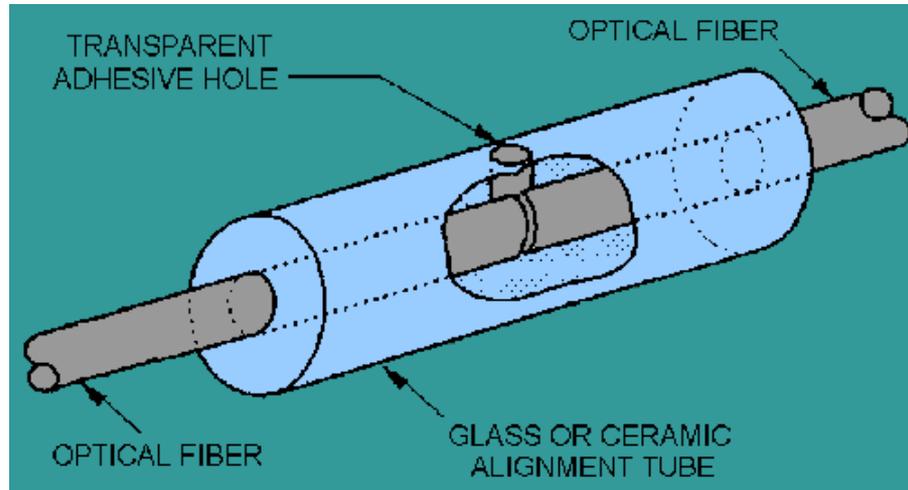


# Confronto fibra - rame

- La Fibra gestisce bandwidth maggiori
- Bassa attenuazione → minor uso di repeater
- Niente disturbi da interferenze e.m., sbalzi di potenza
- Sottile: Occupa meno posto nei condotti dei cavi che sono spesso pieni
- Leggera, 1000 cavi di un 1 km pesano 8000 kg, due fibre della stessa capacità solo 100 kg
- Non perdono luce → difficili da spiare
- Richiedono competenze maggiori (posa, terminazione, troubleshooting)
- Il rame ha costi minori della fibra ma soprattutto le interfacce in rame constano meno di quelle ottiche



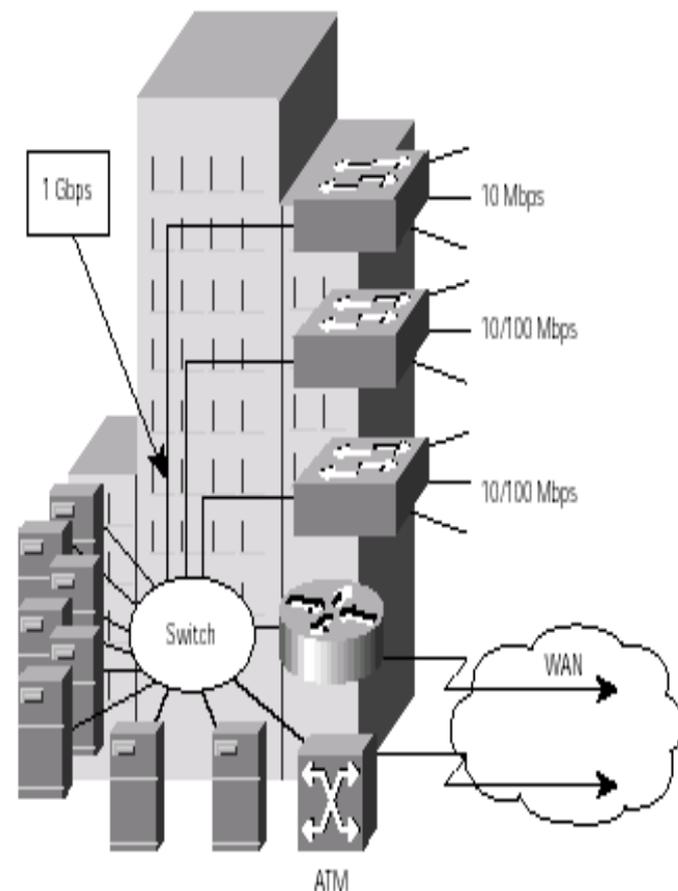
# Mechanical Splice





# Regole pratiche

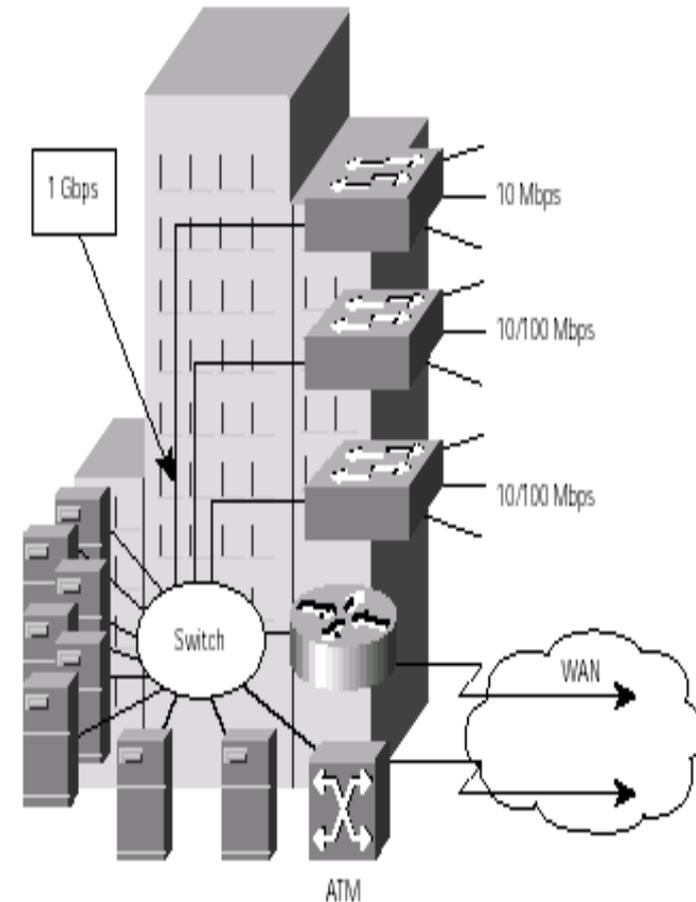
- Usate rame UTP Cat5E o migliore per il cablaggio orizzontale (dall'armadio di rete alle stanze)
- Il costo del cavo incide poco sul costo totale
  - stendere cavo 60 Euro
  - cavo, presa, patch panel, installazione, certificazione cat 5 altri 60 Euro
- Mettete cavi in sovrannumero, si possono usare anche per telefonia, ISDN, segnali video





# Regole pratiche

- Usate fibra multimodale per connettere gli armadi di rete fino a 500 metri (cablaggio verticale)
- Usa fibra monomodale per connettere edifici distanti
- Mettete cavi con due-quattro volte il numero di fibre necessarie. Il costo maggiore viene da posa e intestazione





# Attenuazione fibre

- L'attenuazione dipende dalla trasparenza del vetro
  - Il vetro delle finestre è trasparente?
    - Non troppo altrimenti ci andiamo a sbattere
  - Il vetro dei binocoli o degli obiettivi delle fotocamere è più trasparente
  - Il vetro delle fibre è così trasparente (poche impurità per miliardo di atomi) che dopo 100 km riesce a passare ancora 1% della luce.



# Storia delle fibre

- Nel 1965 si capì che per comunicare su fibre ottiche si dovesse scendere sotto i 20dB/km
- 1970 Corning produce una fibra single mode a 16dB/km a 633 nm
- 1972 4dB/km su fibra multimode graded index
- 1972 diodi laser pulsati a 1Gbps
- 1973 vita media di un diodo laser 1000 ore
- 1976 0.47 dB/km a 1200 nm
- 1977 vita media di un diodo laser 1 milione di ore (100 anni)
- 1978 0.2 dB/km a 1550 nm



# Storia delle fibre

- 1981 140 Mbps in singlemode a 1300nm su 47km
- 1988 TAT-8 primo cavo transatlantico in fibra
- 1990 2.4 Gbps su 4 lambda con 6 amplificatori a erbio e 459 km di fibra
- 1991 5 Gbps su 9000 km di fibra, usato poi per TAT-12 (1996)
- 1995 10 Gbps su ognuna delle 16 lambda su 1000km di fibra con compensazione di dispersione
- 2001 10.92 Tbps su 117 km
- 2003 capacità totale transatlantica 2700Gbps



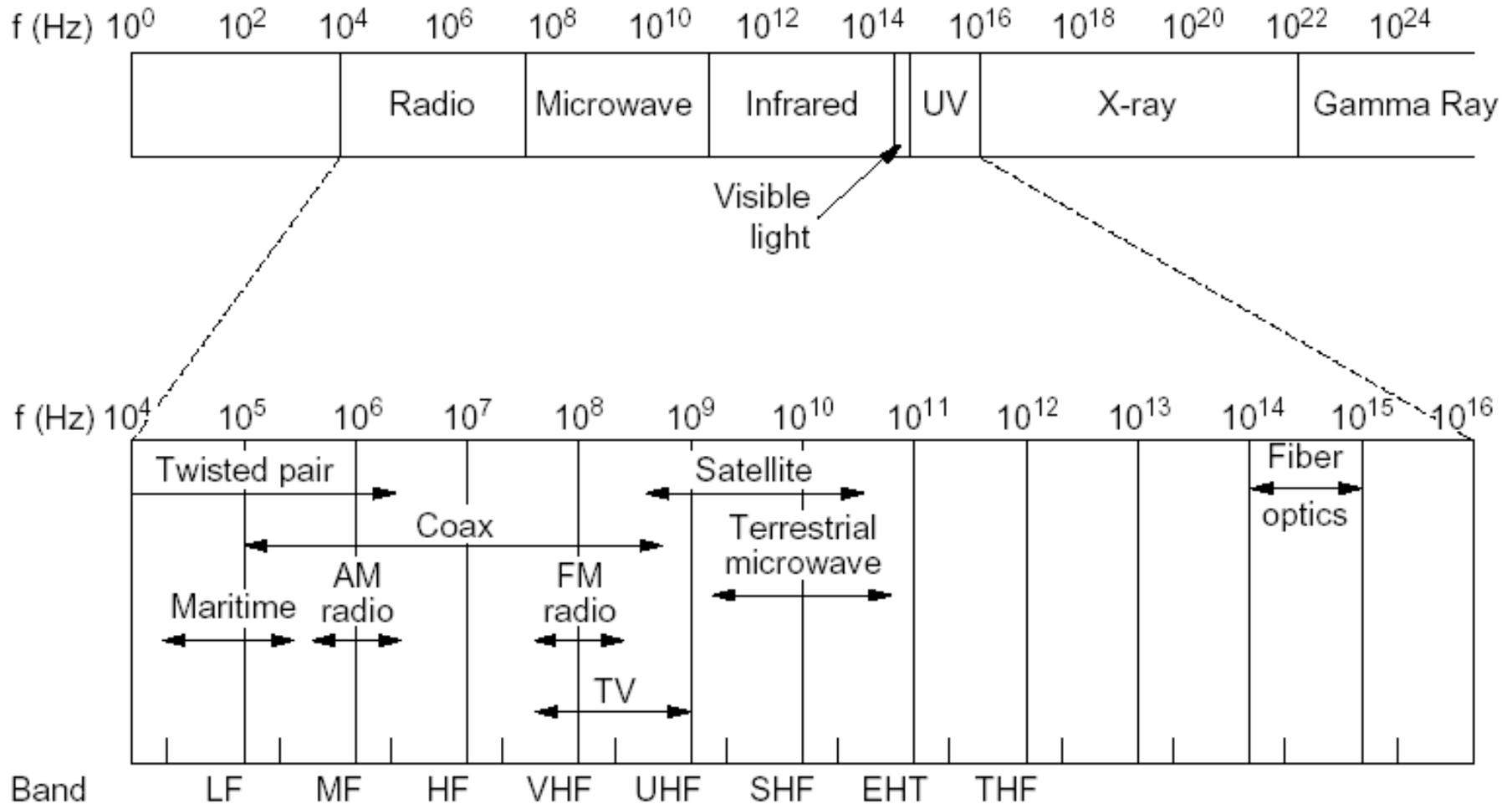
# Wireless



- Utile per raggiungere dispositivi che non possono essere cablati o per dispositivi mobili
- Il doppino è economico. L'aria è gratis
- Nel vuoto le onde e.m. si propagano alla velocità della luce  $c=3 \times 10^8$  m/s  $\rightarrow$  30 cm in un nanosecondo
- La lunghezza d'onda si indica con  $\lambda$
- $\lambda f=c$  per cui per es: 100 MHz  $\rightarrow$  3m
  - 1000 MHz  $\rightarrow$  0.3 m      0.1 m  $\rightarrow$  3000 MHz
  - Cfr lunghezza antenne dei cellulari



# Spettro e.m.





# Bande disponibili

- La quantità di informazioni che un'onda elettromagnetica trasporta sono legate alla larghezza della bandwidth
- Un cavo coassiale porta (fino a) 8 bit/Hz ad alte frequenze. Per cui per es: 750 Mhz → diversi Gbps



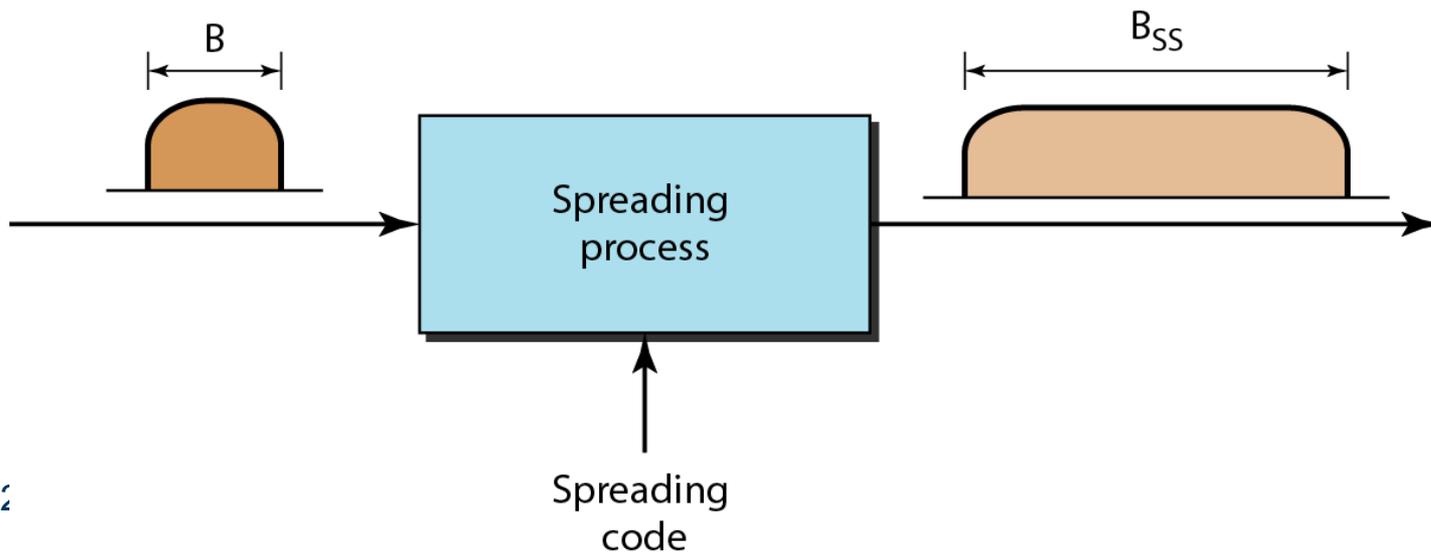
# Bande disponibili

- $\lambda f = c$ 
  - Per cui  $f = c/\lambda$  e differenziando:  $\Delta f = c\Delta\lambda/\lambda^2$
- Es: la seconda banda delle fibre ottiche a  $1.3 \mu\text{m}$ 
  - $\lambda = 1.3 \times 10^{-6}$ ,
  - $\Delta\lambda = 0.17 \times 10^{-6}$
  - per cui  $\Delta f = 30 \text{ THz}$ .
  - A  $8 \text{ bit/Hz}$  otteniamo  $240 \text{ Tbps}$  !
- Spesso  $\Delta f/f \ll 1$  per migliorare la ricezione (watts/Hz) ma in alcuni casi si usa la banda per esteso



# Diffusione dello spettro

- Tecniche di diffusione dello spettro (**Spread Spectrum**)
  - Nelle reti wireless ci sono cose più importanti di un uso efficace della larghezza di banda (su cui si concentrano le tecniche di multiplexing, TDM, FDM, WDM)
  - Più importante evitare interferenze o intercettazioni
  - Si usa quindi ridondanza, la larghezza di banda **B** viene espansa alla larghezza **B<sub>SS</sub>** molto maggiore





# Frequency hopping

- FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum:
  - Il trasmettitore cambia di frequenza centinaia di volte al secondo.
  - Difficile da intercettare e ottima resistenza a multipath fading
    - Interferenze tra onde dirette e riflesse quando sono alla stessa frequenza
    - Se la frequenza cambia tra l'arrivo del segnale e del segnale riflesso non c'è problema
  - Usato dai militari ma anche da 802.11 e Bluetooth



# Hedy Lamarr



- Frequency Hopping inventata da Hedy Lamarr, la prima diva del cinema ad apparire nuda in un film
- Il suo primo marito faceva armi per i nazisti, lei scappò a Hollywood e a tempo perso aiutava gli alleati con le sue invenzioni
- La Marina USA non le credette e il suo schema venne usato solo diversi anni dopo

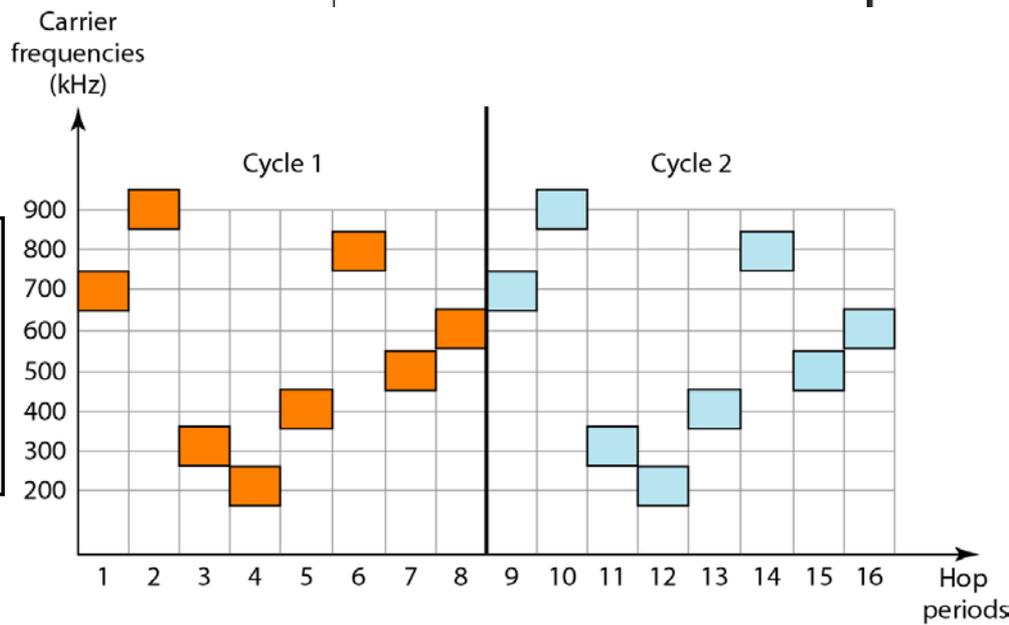
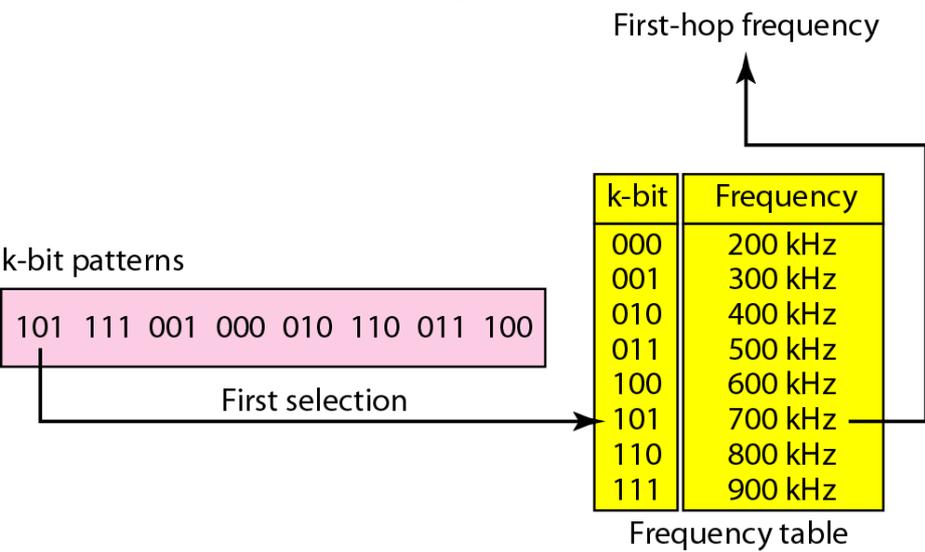
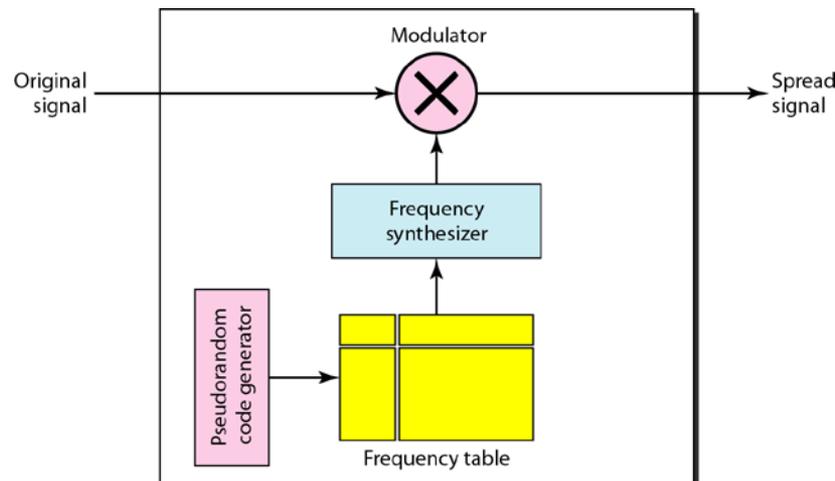




# Esempio FHSS

- Esempio irrealistico con sole 8 frequenze

- Generatore pseudocasuale a 3bit, banda originale di 100 kHz
- Il primo numero è 5 quindi modulo a  $200+500$  kHz..
- Basta tenere nascosta la sequenza pseudocasuale





# Direct Sequence

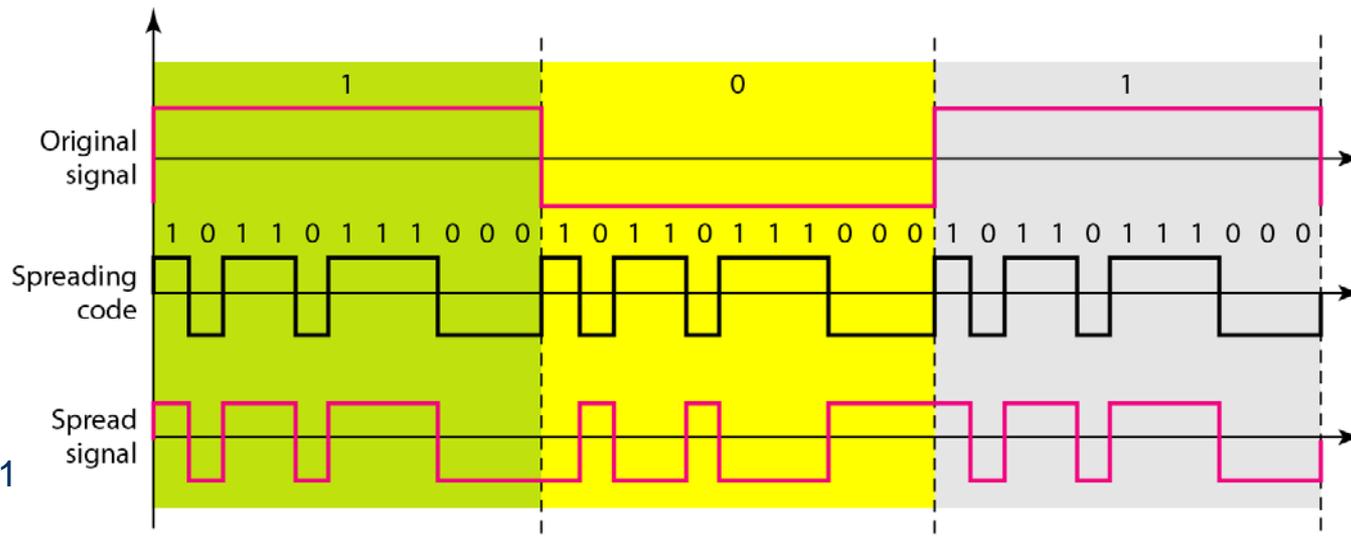


- DSSS:
  - Direct Sequence Spread Spectrum. Il trasmettitore disperde il segnale su di banda molto ampia di frequenze.
  - Usato in telefonia cellulare per le ottime prestazioni di efficienza spettrale, immunità al rumore
  - Usato anche in wireless LAN



# Esempio DSSS

- Ogni bit di dati viene sostituito da una parola di codice di  $n$  bit (chiamato **chip**)
- Esempio con il codice delle WLAN (**seq. di Barker**) con  $n=11$  in cui usiamo come codice di diffusione 10110110000
- Il segnale modulato ha una velocità 11 volte superiore, quindi richiede 11 volte la banda del segnale originale





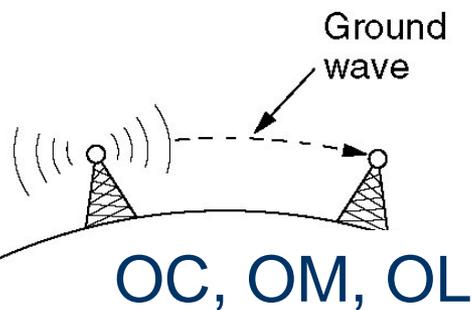
# Uso in campo civile

- Frequenze radio, tv
- Link punto a punto via microonde (economico rispetto alle fibre in aree urbane e bandwidth basse)
- Cellulare microonde (Es. Modem GSM, GPRS, 3G)
- Satellite (Low Earth Orbit, downlink)
- Short range via infrarosso o microonde (BlueTooth, 802.11)
- Laser (per connettere due edifici fino pochi km)

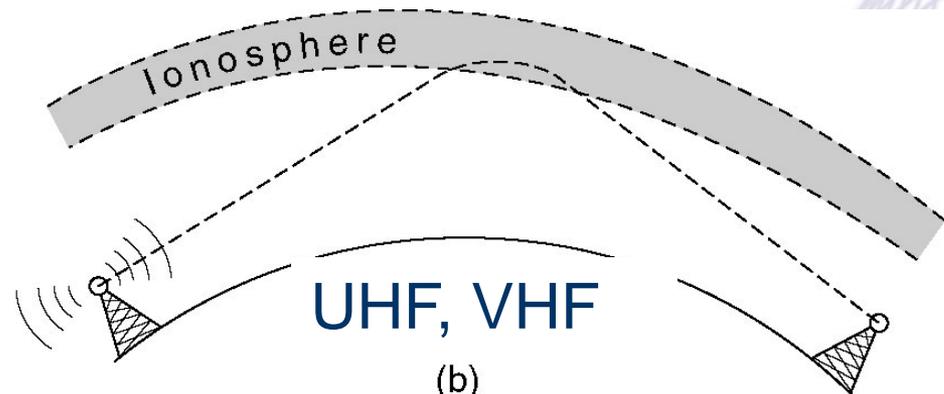


# Onde radio

- Viaggiano a lunghe distanze, penetrano gli edifici, sono omnidirezionali
- A basse frequenze passano gli ostacoli facilmente ma la potenza cala come  $1/r^2$  in aria
- Ad alte frequenze viaggiano in linea retta e rimbalzano sugli ostacoli. Sono assorbite dalla pioggia
- A tutte le frequenze sono soggette a interferenza da motori elettrici e altri dispositivi elettrici



(a)

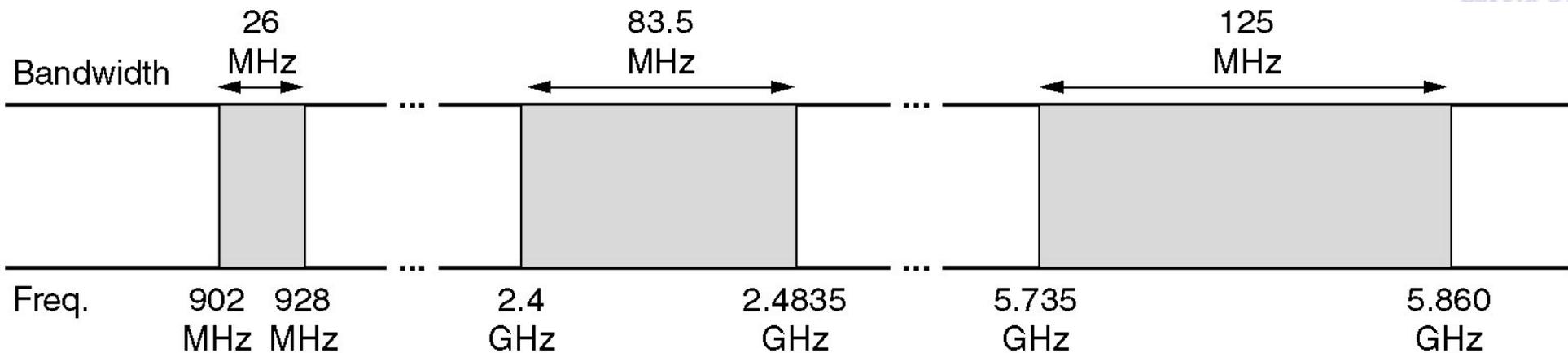


(b)



# Microwave

- Sopra i 100 MHz le onde viaggiano in linea retta e possono essere focalizzate bene. Quindi posso usare antenne paraboliche ma devo allineare molto bene source e destination
- Usate per decenni prima delle fibre in telefonia sulle lunghe distanze
- Curvatura della terra: Torri altissime 100m → 80 km
- Attorno ai 4 GHz problemi di assorbimento dalla pioggia
- Queste sono anche le frequenze dei telefoni cellulari (900 MHz, 1800 MHz) e dei WiFi (2.4 GHz che interferisce con radar e forni a microonde e 5 GHz)





# Infrarossi

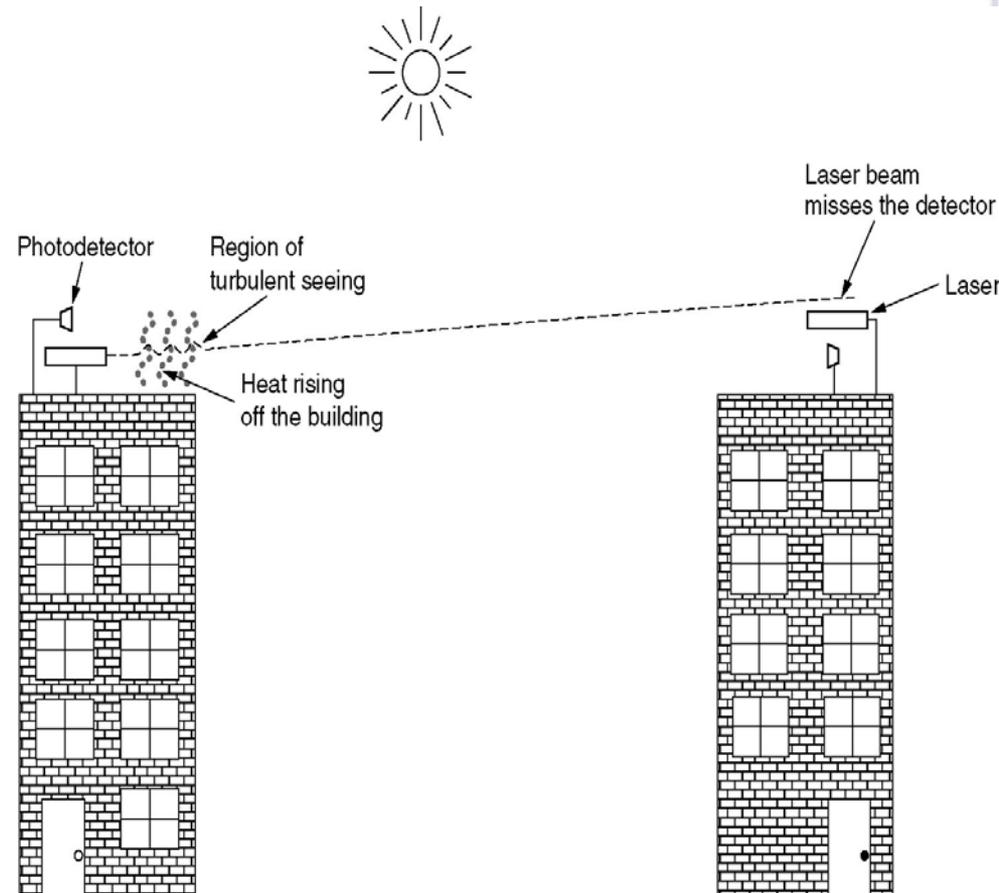
- Onde infrarosse e millimetriche: sono usate per comunicazioni a corta distanza
- Telecomandi delle TV, VCR, stereo, antifurti, cancelli
- Non passano oggetti solidi, svantaggio ma almeno non interferisce con le stanze vicine
- Non regolamentate: usate per connettere portatili, stampanti, palmari, telefonini



# Trasmissioni Luminose



- Usate per secoli (segnali di fumo o fuochi notturni)
- Ora sono usate con laser per connettere edifici che si vedono tra di loro
- Al contrario delle microonde non richiedono licenze
- Grande precisione di puntamento (fasci di 1mm a 500 metri di distanza)
- Problemi con pioggia e nebbia fitta





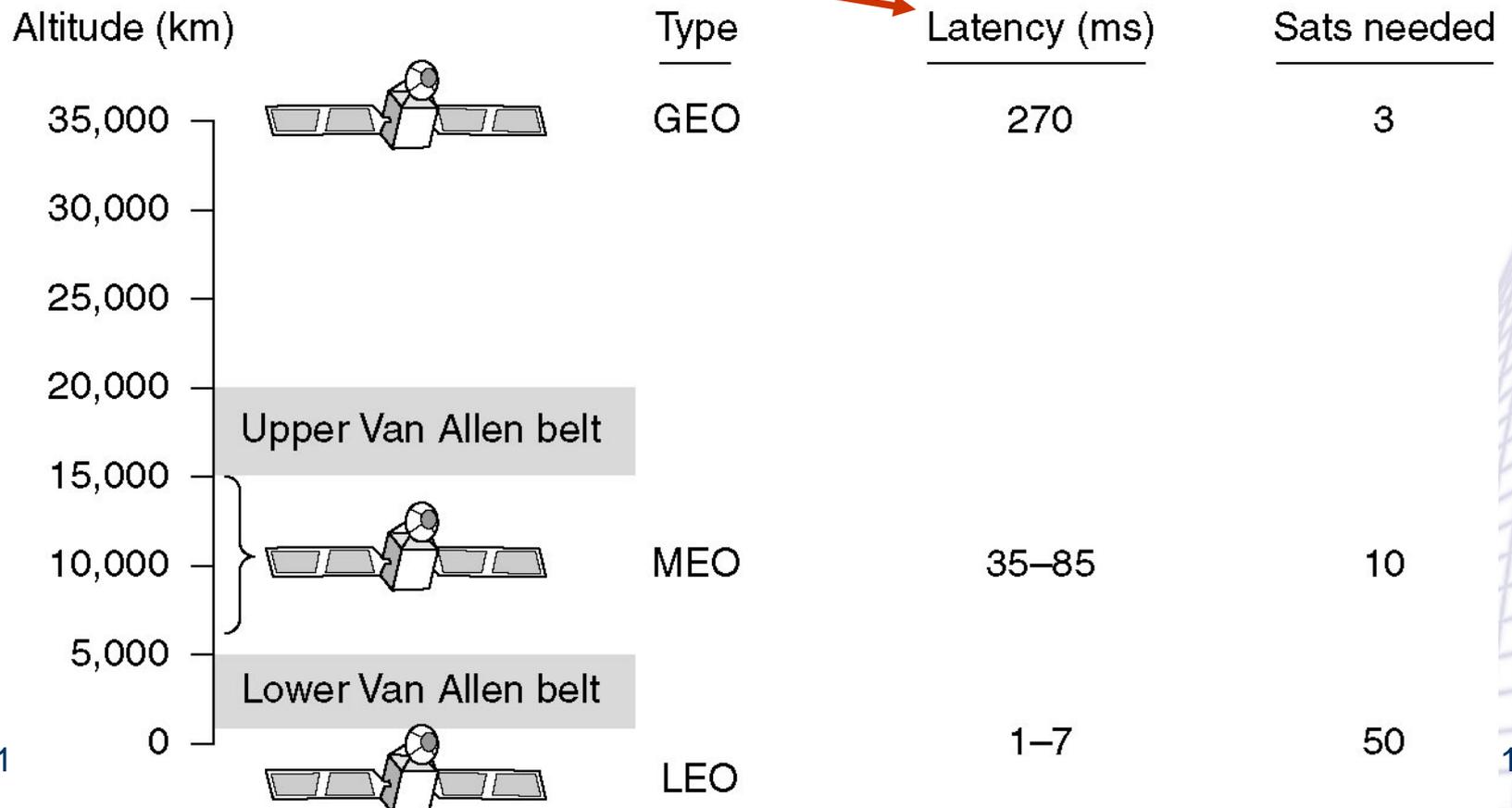
# Satelliti

- Sono grandi ripetitori per microonde nel cielo
- Contengono diversi **transponder** che ascoltano una porzione dello spettro, la amplificano e la ritrasmettono ad un'altra frequenza (per evitare interferenze)
- Legge di Newton: Periodo orbitale  $T = \alpha R^{3/2}$ :
  - la costante  $\alpha$  vale circa 0.01 e  $R$  misurata in km
  - Altezza maggiore  $\rightarrow$  periodo maggiore.
  - A bassa quota  $\rightarrow$  periodo di 90 minuti, satelliti che sfrecciano
  - A 35786 km  $\rightarrow$  periodo di 24 ore. Se orbitano l'equatore sono geostazionari
  - Ad alta quota 384000 km quasi un mese come si vede osservando la luna  $0.01 * (384000+6378)^{3/2} = 2439090 \text{ s} = 1 \text{ mese}$



# Tipi di satelliti

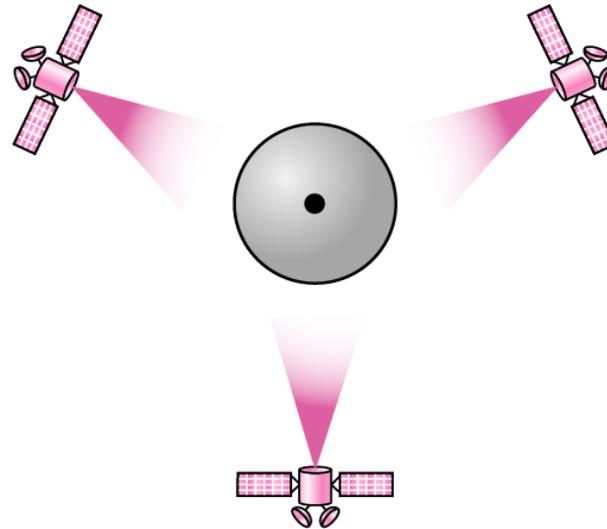
- Latenza in ms rtt
- Numero di satelliti per copertura globale





# Satelliti geostazionari

- Sono a 35800 Km. Non occorre seguirli come quelli che vanno più lenti o più veloci della velocità di rotazione terrestre quindi sono perfetti per le telecomunicazioni.
- Un satellite geostazionario vede solo un terzo del pianeta, ne servono quindi almeno 3 a 120 gradi uno dall'altro per una copertura globale
- Distanza massima 2 gradi quindi se ne possono mettere al massimo 180.





# Satelliti geostazionari

- Bande tipiche per satelliti geostazionari

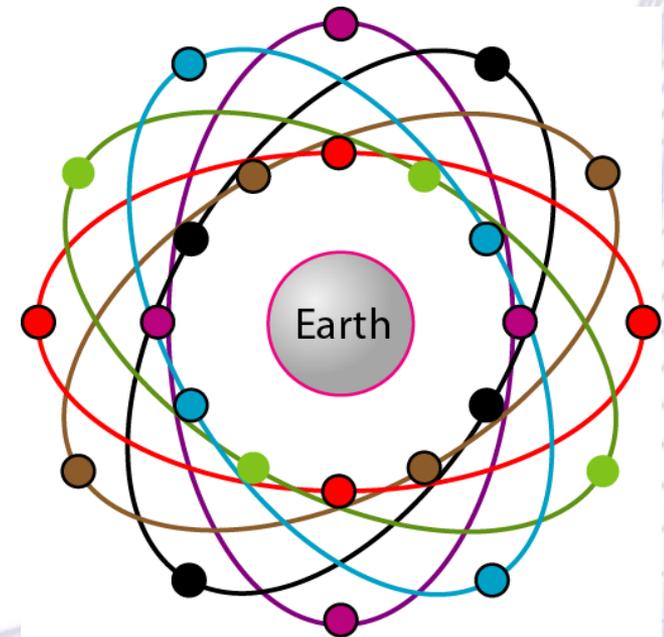
Band	Downlink	Uplink	Bandwidth	Problems
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	Low bandwidth; crowded
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	Low bandwidth; crowded
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	Terrestrial interference
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Rain
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	Rain, equipment cost



# Satelliti MEO



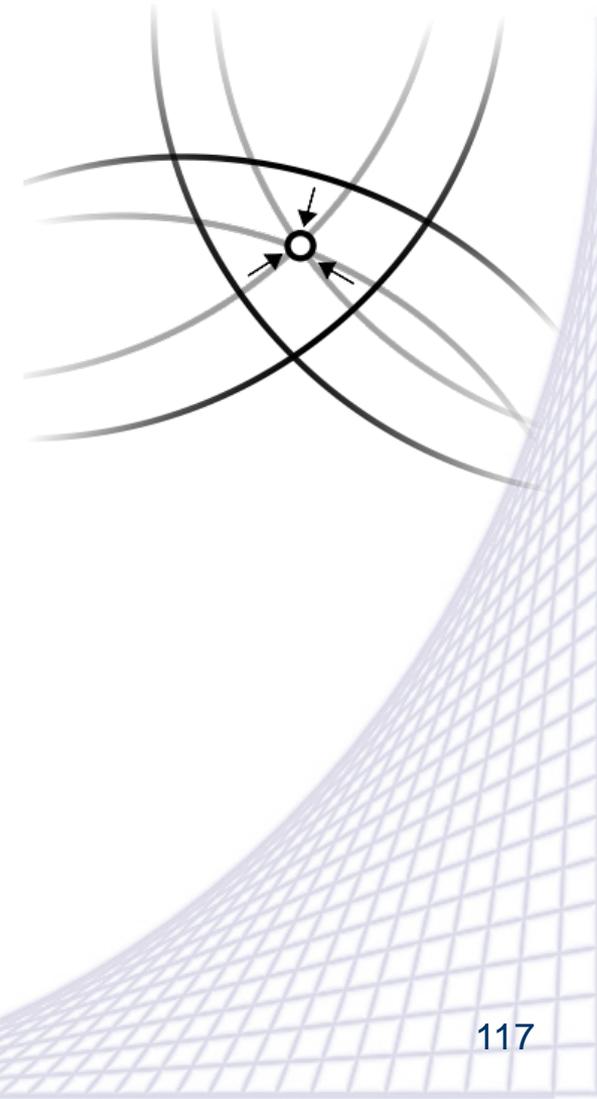
- MEO: Tra le due fasce di Van Allen Periodo di 6 – 8 ore
- sono usati per il sistema GPS in origine con una rete di 24 satelliti su 6 orbite a 20200 km di altitudine, per cui un ricevitore GPS vedeva 4 satelliti almeno per qualche ora al giorno
- Da settembre 2007 sono 31 satelliti che offrono migliore precisione





# Triangolazione GPS

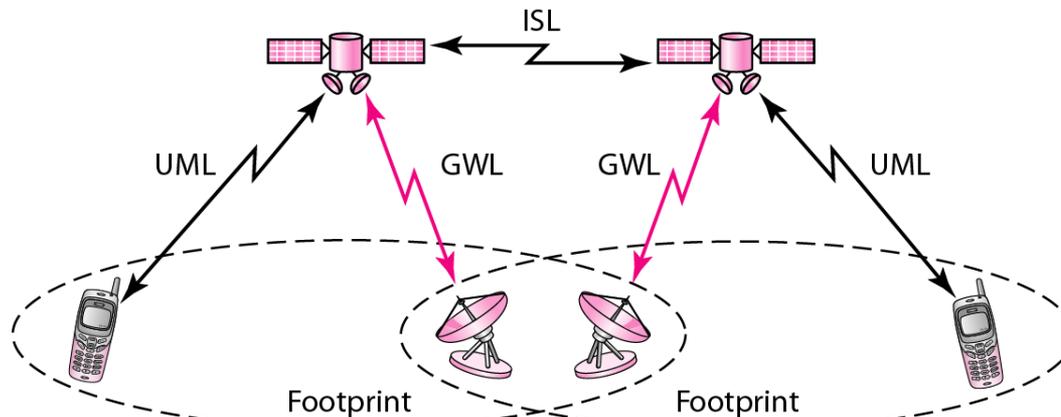
- Misurando le distanze dalle posizioni attese dei satelliti (con misure di rtt) ed effettuando una triangolazione si ottiene la posizione
- I satelliti sono sincronizzati tra di loro con orologi atomici, i ricevitori invece no, ma la sfasamento di un ricevitore è lo stesso per tutti i satelliti
- Ogni satellite trasmette a **50 bit/s**, un frame di **1500 bit in 30 secondi** (primi 6 secondi il clock del satellite, 12 secondi l'orbita precisa che viene aggiornata ogni 2 ore, infine negli ultimi 12 secondi 1/25 dell'almanac (informazioni relative al satellite e al suo stato rispetto al tempo UTC))





# satelliti LEO

- Volano tra 500 e 2000 km con periodi di 90 – 120 minuti (25000 km/h)
- Simili alle reti per telefonia cellulare con celle di 8000 km di diametro
- Rtt molto basso: 20ms, ottimo per la voce





# Iridium



- Iridium: molti satelliti (erano 77 all'inizio nel 1990 nel progetto Motorola, ora sono 66) a 750 km in orbita polare
- 6 orbite con 11 satelliti ciascuna, ogni satellite ha  $32^\circ$  di latitudine di separazione
- Ogni satellite ha 48 celle (1648 in tutto) e 3840 canali (253440).
- Usano relay tra satelliti quindi non servono stazioni terrestri
- Il servizio dati e voce tra stazioni mobili funziona a 2.4 e 4.8 kbps nelle bande tra 1.616 e 1.626 GHz, tra satelliti nelle frequenze tra 23.18 e 23.38 GHz



# Globalstar e Teledesic



- Globalstar:

- Rete LEO con 48 satelliti in 6 orbite polari e 8 satelliti per orbita a 1400 km di altitudine
- Simile ad Iridium, usa però anche stazioni a terra che possono creare segnali più potenti

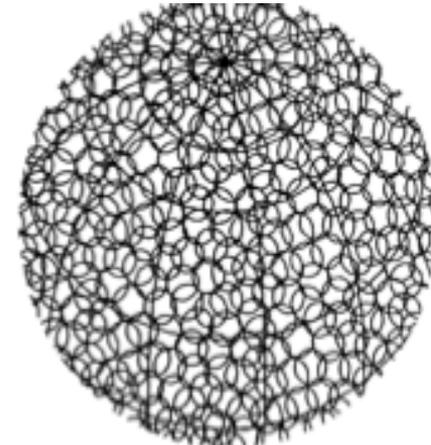
- Teledesic

- Collegamenti satellitari con capacità simile alle fibre (alta bw, bassa latenza ed error rate)
- 288 satelliti in 12 orbite polari a 1350 km
- Ogni terminale riceve tutti i pacchetti destinati alla sua cella ma legge solo i suoi. Usa frequenze superiori a 20 GHz e permette bw di 155 Mbps in uplink e 1.2 Gbps in down link

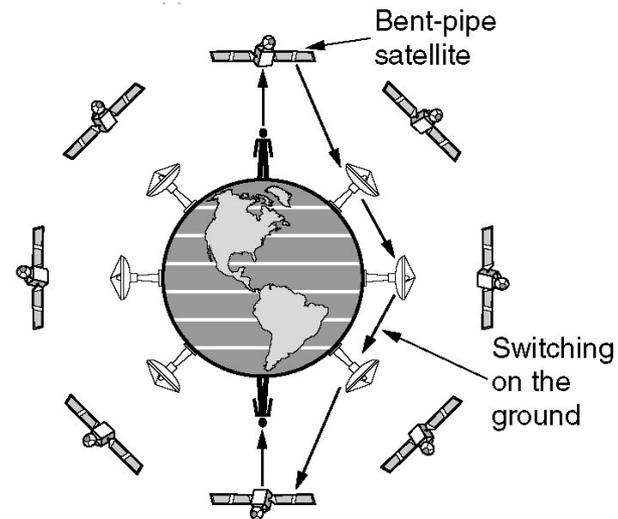
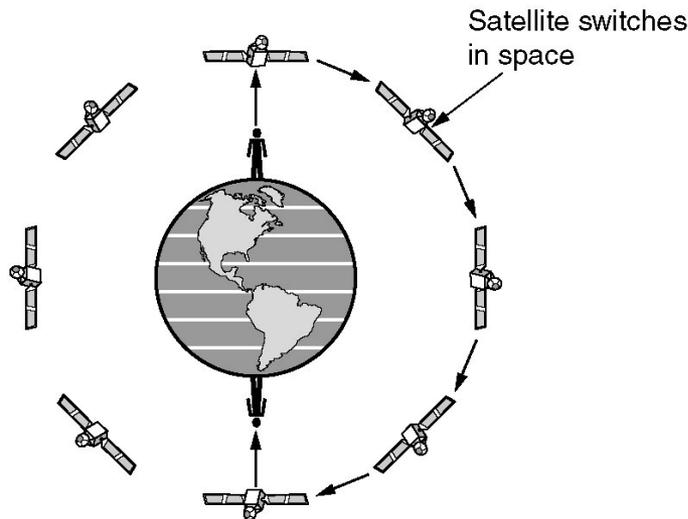


# Iridium e Globalstar

Iridium usa 6 collari da 11 satelliti e copre la terra con 1628 celle



(b)





# Satellite vs Fibra



Una ventina di anni fa il futuro sembrava nei satelliti, ora dopo la liberalizzazione la fibra offre la banda richiesta ma il satellite vince ancora in alcune situazioni:

- Difficile portare fibre ovunque ma chiunque metta un'antenna sul tetto vede il satellite
- Comunicazioni mobili, auto, camion, barche
- Broadcasting. Trasmissione di dati o notizie ad una vasta gamma di riceventi
- Luoghi difficilmente raggiungibili, deserti, montagne, foreste
- Dove non si riesce ad avere i permessi per stendere le fibre
- Es. Comunicazioni militari dove importa la velocità di realizzazione, uplink della telemetria dai circuiti della formula 1