



# Reti

(già "Reti di Calcolatori")

## Cenni al livello fisico

Renato Lo Cigno

<http://disi.unitn.it/locigno/index.php/teaching-duties/computer-networks>

- *Credits*
  - *Part of the material is based on slides provided by the following authors*
    - *Jim Kurose, Keith Ross, “Computer Networking: A Top Down Approach,” 4th edition, Addison-Wesley, July 2007*
    - *Douglas Comer, “Computer Networks and Internets,” 5th edition, Prentice Hall*
    - *Behrouz A. Forouzan, Sophia Chung Fegan, “TCP/IP Protocol Suite,” McGraw-Hill, January 2005*
- La traduzione, se presente, è in generale opera (e responsabilità) del docente



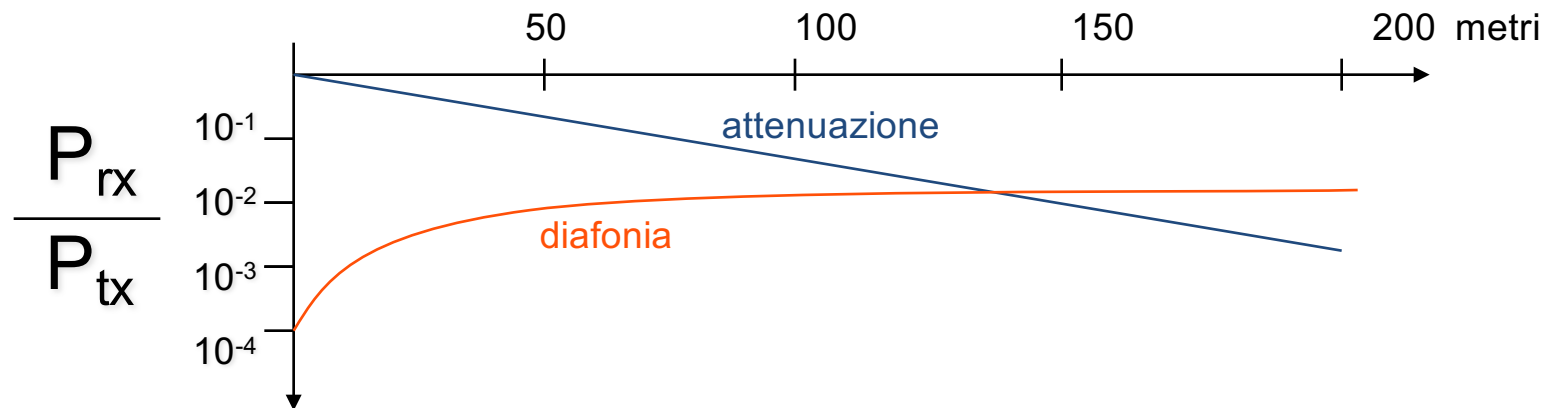
- Elettrici
  - Doppino non schermato o schermato
  - Cavo coassiale
- Ottici
  - Fibra ottica (LED/Laser – fotodiodi per la ricezione)
  - Laser non guidato
- Radio
  - Ponti radio punto-punto
  - Satelliti
  - Reti cellulari
  - sistemi a corto raggio (WLAN, sensori, ...)



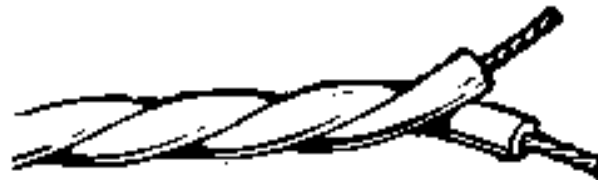
- Il mezzo ottimale è caratterizzato da:
  - Resistenza, capacità parassite e impedenza basse (in altri termini buone caratteristiche di conduzione dei segnali elettrici)
  - Buona resistenza alla trazione
  - Flessibilità
- Le caratteristiche dei mezzi elettrici dipendono da:
  - Geometria
  - Numero di conduttori e distanza reciproca
  - Tipo di isolante
  - Tipo di schermatura

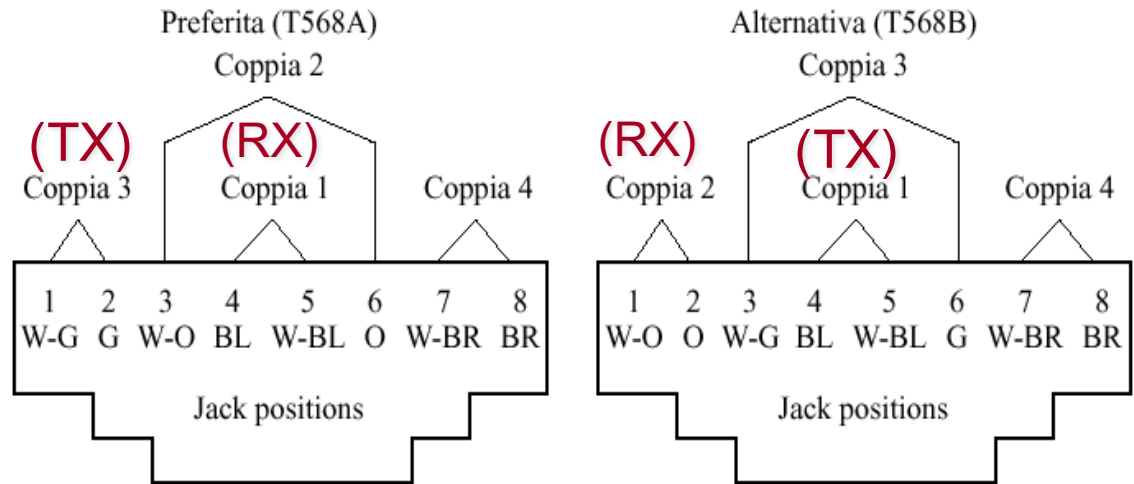
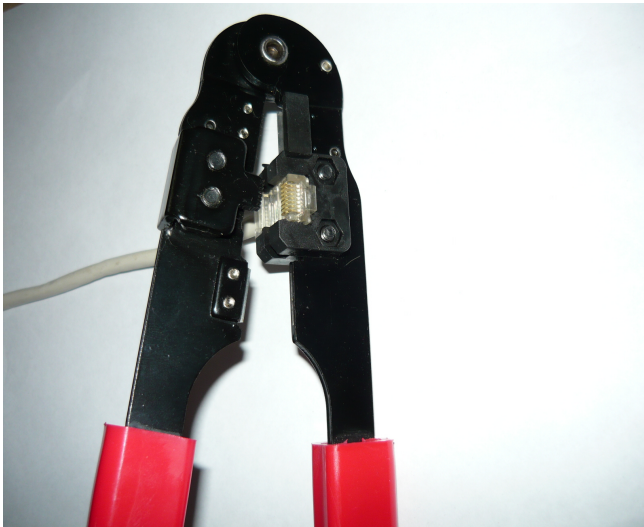
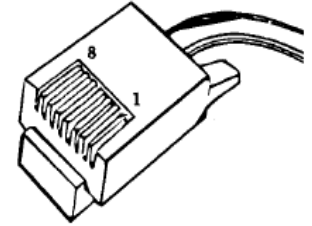
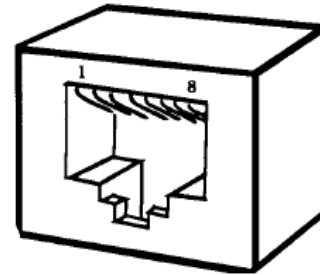
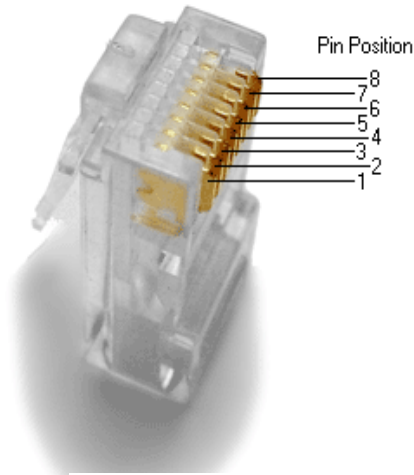
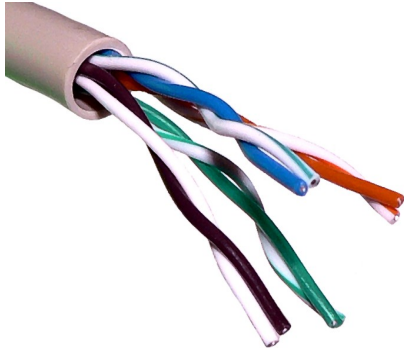
- Impedenza (in funzione della frequenza)
- Velocità di propagazione del segnale (0.5c-0.7c per cavi e 0.6c per fibre ottiche)
- Attenuazione (cresce linearmente, in dB, con la distanza e con la radice quadrata della frequenza)
- Diafonia o Cross-Talk (misura del disturbo indotto da un cavo vicino – cresce con la distanza fino a stabilizzarsi)

Esempio di attenuazione e diafonia su un doppino telefonico



- Detto anche coppia (pair), è il mezzo trasmissivo classico della telefonia
- Due fili di rame ritorti (binati, twisted) per ridurre le interferenze elettromagnetiche usando tecniche trasmissive differenziali
- Il passo di avvolgimento determina anche le caratteristiche di attenuazione in funzione della frequenza
- Costi ridotti e installazione semplice





Vista frontale del connettore RJ45



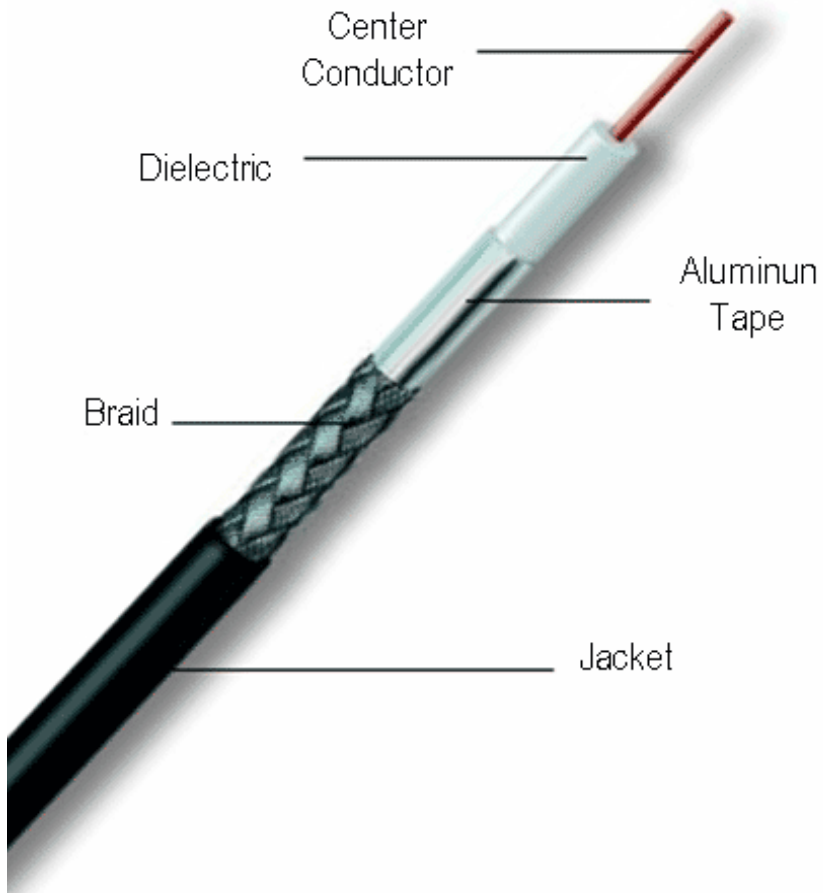
- Doppino UTP senza schermatura (UTP = Unshielded Twisted Pair), usata nelle reti telefoniche e dati
- Diviso in diverse categorie, di qualità crescente

1	Telefonia analogica
2	Telefonia ISDN
3	Reti locali fino a 10 Mb/s
4	Reti locali fino a 16 Mb/s
5	Reti locali fino a 100 Mb/s
5e	Reti locali fino a 1 Gb/s
6	Reti locali fino a 1 Gb/s (migliore qualità di Cat.5e)
6a	Reti locali fino a 10 Gb/s

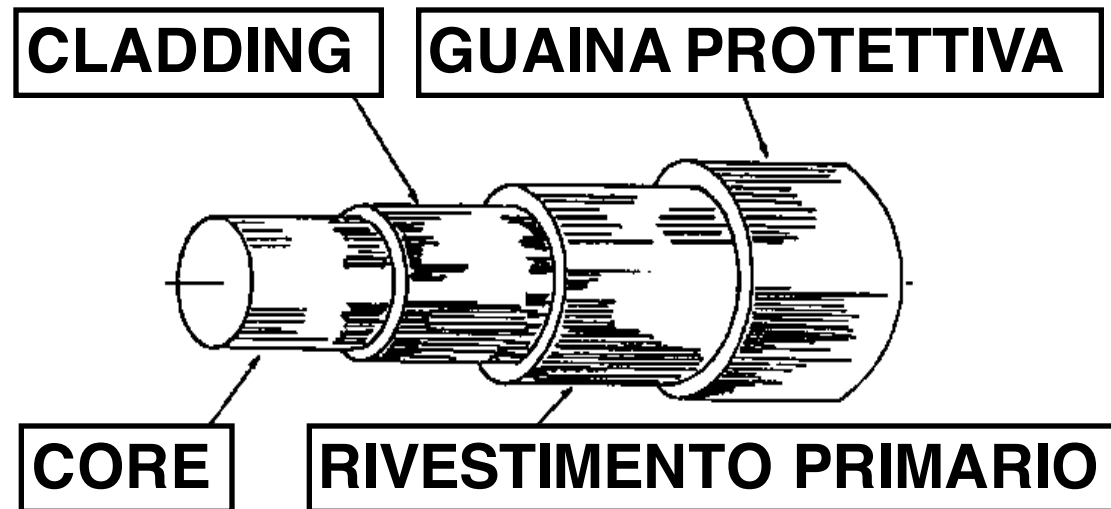


- Sistema trasmissivo composto da un connettore centrale e una o più calze di schermo.
- Maggiore schermatura dai disturbi esterni (gabbia di Faraday), minori interferenze
- Costi elevati, maggiore difficoltà di installazione
- Velocità trasmissive ~ centinaia di Mb/s
- Due tipologie dominanti
  - Cavo oscilloscopio (RG-58)
  - Cavo TV (RG-59)
- Molto usato (per i dati) in USA e in tutte le nazioni dove è diffusa la TV via cavo: si usa lo stesso cavo anche per Internet con un Cable-Modem





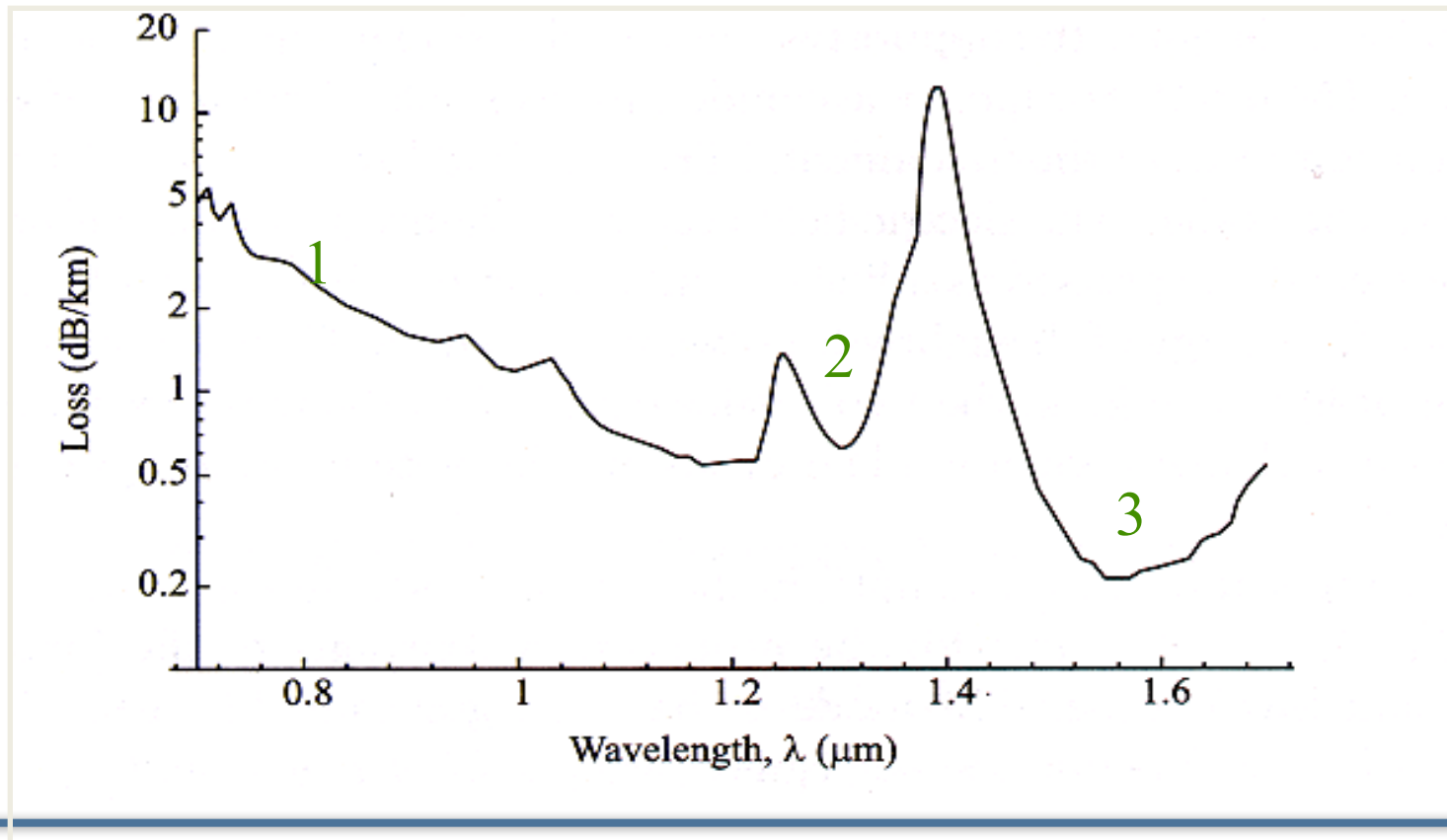
- Minuscolo e flessibile filo di vetro o di materie plastiche trasparenti costituito da due parti (*core* e *cladding*) con indici di rifrazione diversi
- Per la legge di Snell, il raggio luminoso (generato da un LED o da un laser) introdotto nella fibra entro un “angolo di accettazione” rimane confinato nel core

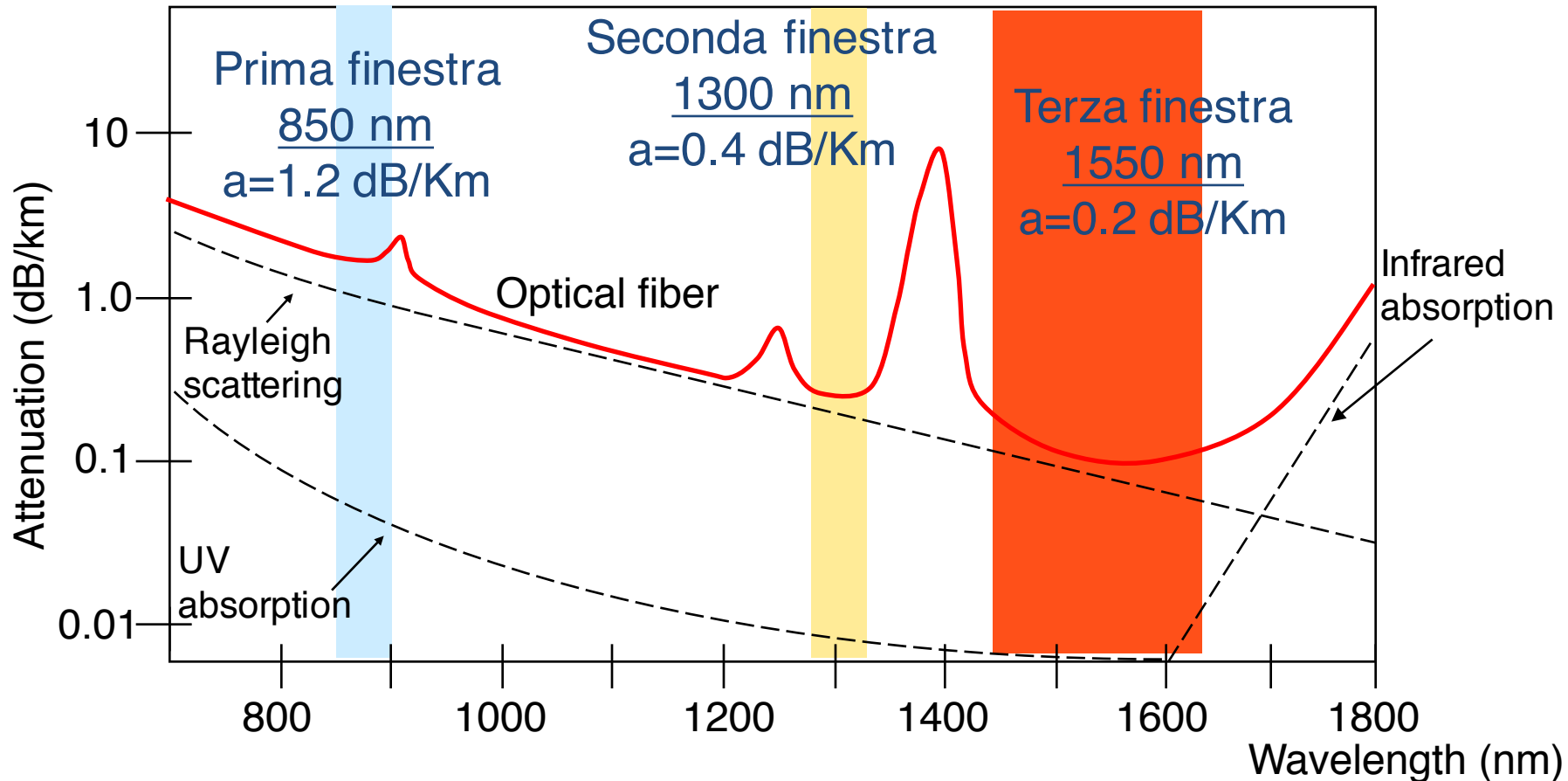




- Vantaggi
  - Totale immunità da disturbi elettromagnetici
  - Alta capacità trasmissiva (fino a decine Terabit/s)
  - Bassa attenuazione ( $\sim 0.1\text{dB/km}$ ), dipendente dalla lunghezza d'onda
  - Dimensioni ridotte e costi contenuti
- Svantaggi
  - Adatte solo a collegamenti punto-punto
  - Difficili da collegare tra loro e con connettori
  - Ridotto raggio di curvatura

- Nelle normali fibre di vetro si identificano tre “finestre” di lavoro centrate attorno a lunghezze d’onda di  $0.8 \mu\text{m}$ ,  $1.3 \mu\text{m}$  e  $1.55 \mu\text{m}$
- Con tecniche di doping di possono migliorare le caratteristiche





- Avviene solitamente interrando i cavi sul fondo del mare
- Eccezione sono i cavi trans-oceanici che sono flottanti
- Richiede cavi con amplificatori ottici ridondati ogni 30/50 km
- Oggi i migliori cavi arrivano a 1000km senza ripetitori
- La posa avviene da “navi officina” che assemblano il cavo direttamente sulla nave a partire dalle fibre e dagli altri componenti



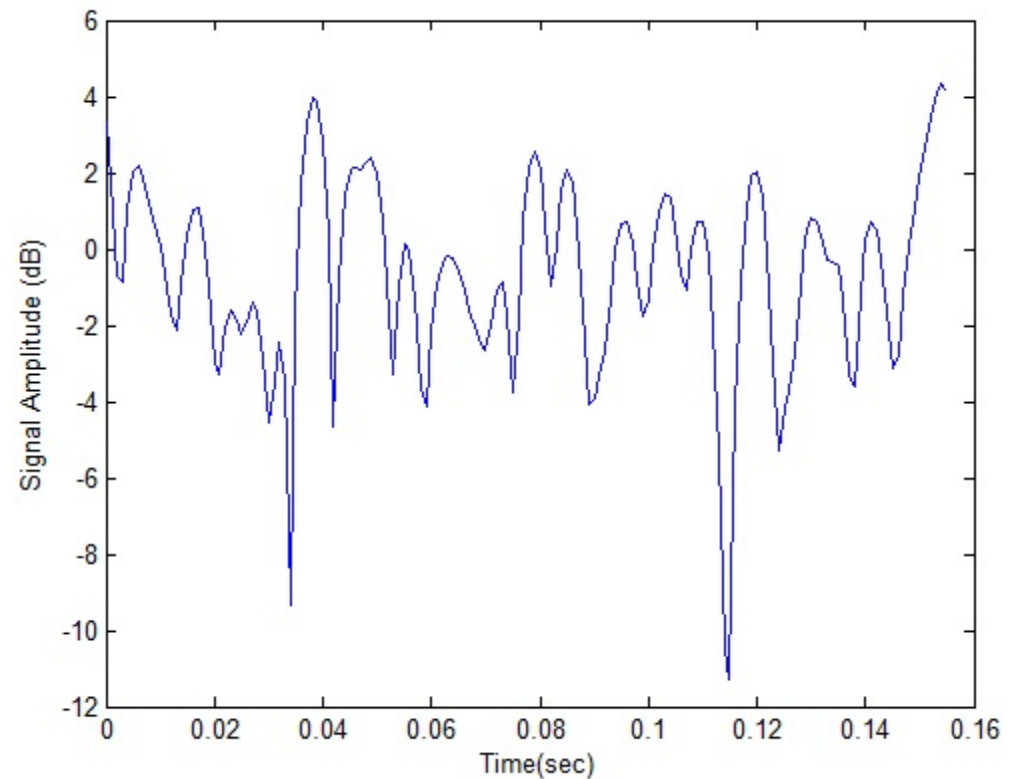


- Propagazione del segnale in presenza di ostacoli naturali:
  - Riflessione per cammini multipli (interferenza da riflessioni multiple dello stesso segnale)
    - Fading (variazione veloce dell'ampiezza del segnale dovuta alla combinazione in fase di "copie" dello stesso segnale)
    - Shadowing (variazione lenta dell'ampiezza del segnale)
- Interferenza da altri segnali (interferenza co-canale)
- Attenuazione
  - quadrato della distanza in condizioni ottime
  - potenze comprese tra 2.5 e 4 in condizioni reali terrestri

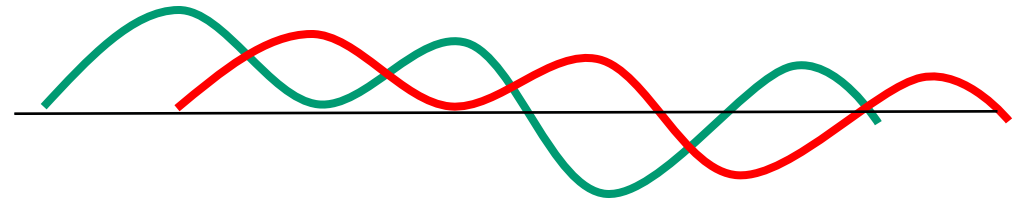
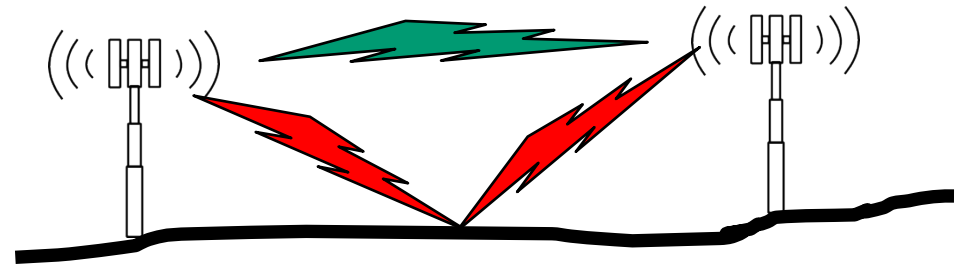




- Attenuazione/guadagno con andamento imprevedibile e molto veloce
- Dovuto essenzialmente al movimento relativo delle antenne che cambiano il “pattern di interferenza” tra cammini multipli



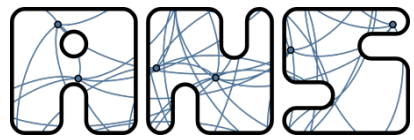
- Il segnale riflesso da superfici (terra, acqua, edifici, ...) arriva all'antenna di ricezione con una fase diversa dalla copia non riflessa
- Una fase diversa può portare a fenomeni di interferenza distruttiva
- Il segnale “scompare”





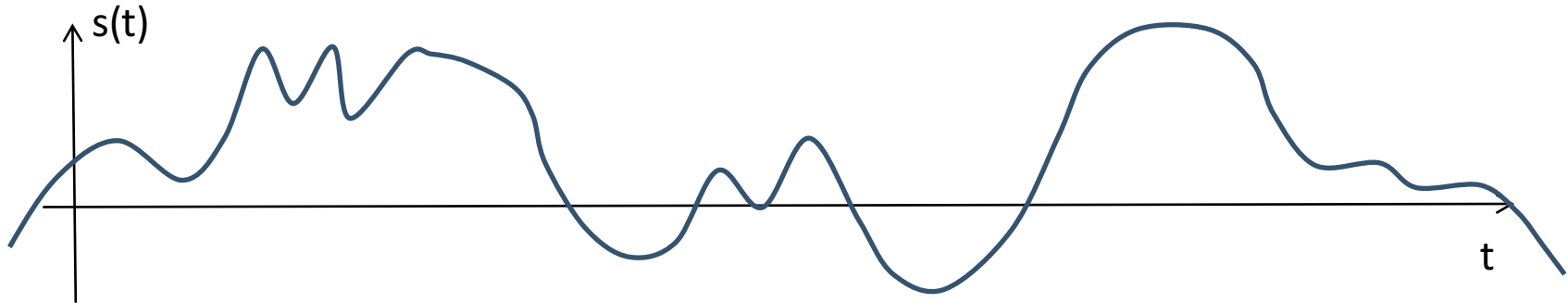
Cenni e indagini sulle risorse fisiche su cui si basano le telecomunicazione con segnali elettromagnetici

# TEMPO, FREQUENZA, BANDA, CAPACITÀ TRASMISSIVA

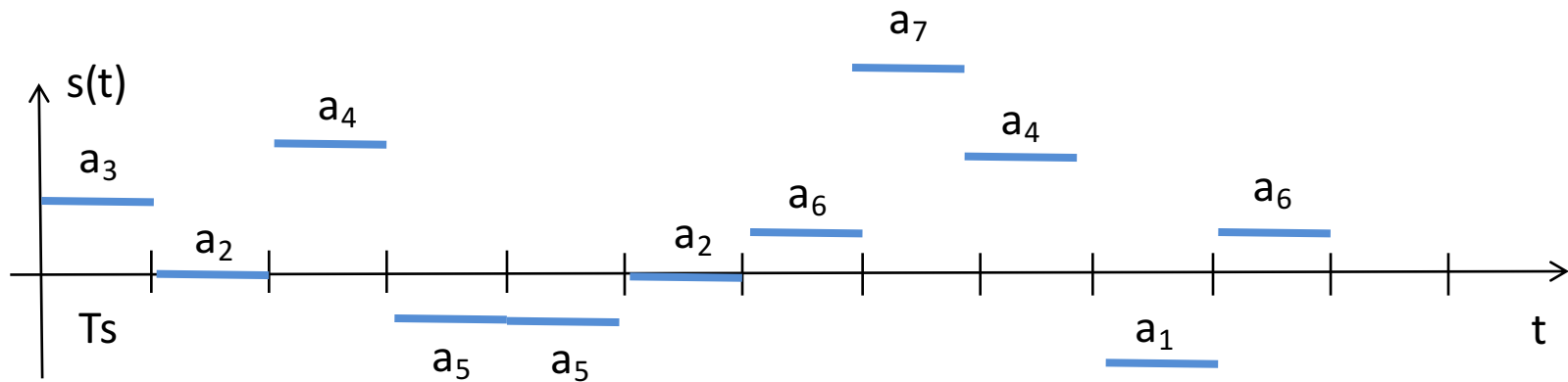


- Il trasferimento dell'informazione è legato alla **variazione** di un parametro fisico (tensione, corrente, intensità di luce, frequenza, fase, ...)
- È intuitivo che un segnale costante non porta alcuna informazione ... e neppure un segnale che varia in modo periodico come una sinusoide pura
- Un segnale è una funzione del tempo  $s(t)$
- Un segnale numerico (digitale) è una funzione del tempo che può assumere solamente valori discreti in un alfabeto  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  e che può cambiare il suo valore solamente in istanti precisi del tempo distanziati da un *tempo di simbolo*  $T_s$

- Segnale analogico



- Segnale numerico





- Dato un alfabeto  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$
- È sempre possibile mappare i simboli su delle sequenze di bit lunghe  $m = \sup[\log_2 n]$
- Quindi la capacità di un canale trasmissivo si misura sempre in bit/s per comodità
- bit = Binary Information unit è l'unità di misura standard dell'informazione, fa parte del sistema metrico internazionale (SI)
- A volte nella teoria dell'informazione, l'informazione si misura in nat (Natural Information unit) usando il logaritmo naturale (base e) al posto del logaritmo binario



- La frequenza si misura in Hz (Hertz) = 1/s
  - è la misura di quanto velocemente varia un segnale, in particolare una sinusoide
- Nei segnali EM la frequenza  $f$  di una sinusoide e lunghezza d'onda  $\lambda$  della stessa sono legate dalla velocità della luce nel mezzo trasmissivo
$$\lambda = f / (I_r * C)$$
  - $I_r$  = Indice di rifrazione del mezzo trasmissivo, 1 per il vuoto/aria
  - $C = 299\,792\,458 \text{ m/s} = \sim 3 * 10^8 \text{ m/s} = 300\,000 \text{ km/s}$



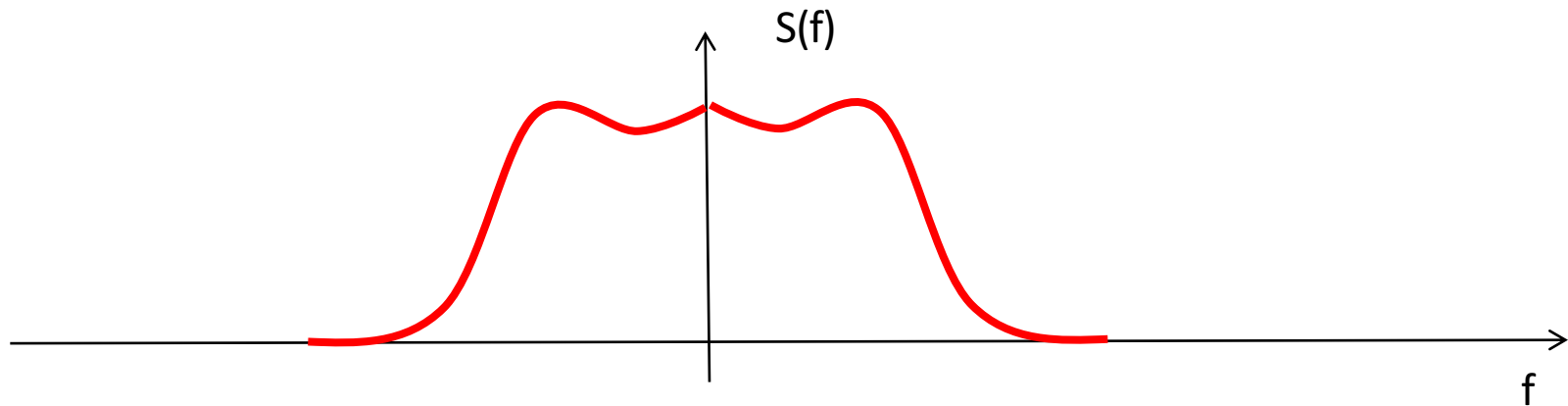
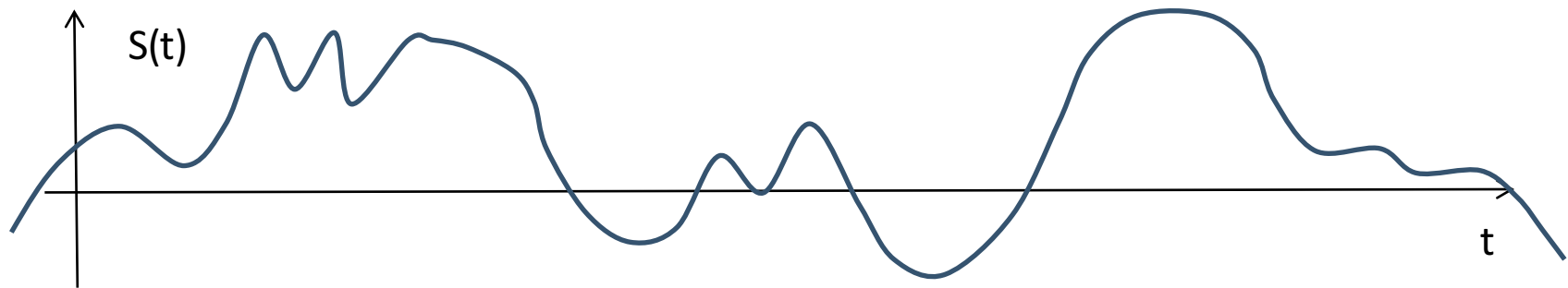
- Un segnale si può rappresentare come funzione del tempo oppure come funzione della frequenza ... resta lo stesso segnale!
- La rappresentazione nei due domini (tempo e frequenza) è legata da una trasformazione, la trasformata di Fourier  $\mathcal{F}$ 
  - $\mathcal{F}$  è il limite dello sviluppo in serie di Fourier di una funzione (visto ad analisi???) ... non ci interessa 😊
- Ma ci interessa sapere che

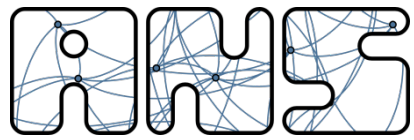
$$S(f) = \mathcal{F} [s(t)] \quad ; \quad s(t) = \mathcal{F}^{-1} [S(f)]$$

- Cioè  $\mathcal{F}$  è invertibile e la rappresentazione di un segnale e la sua manipolazione (processing) si può fare indifferentemente nell'uno o nell'altro dominio



- $s(t)$  ed  $S(f)$  sono legati dalla trasformazione di Fourier



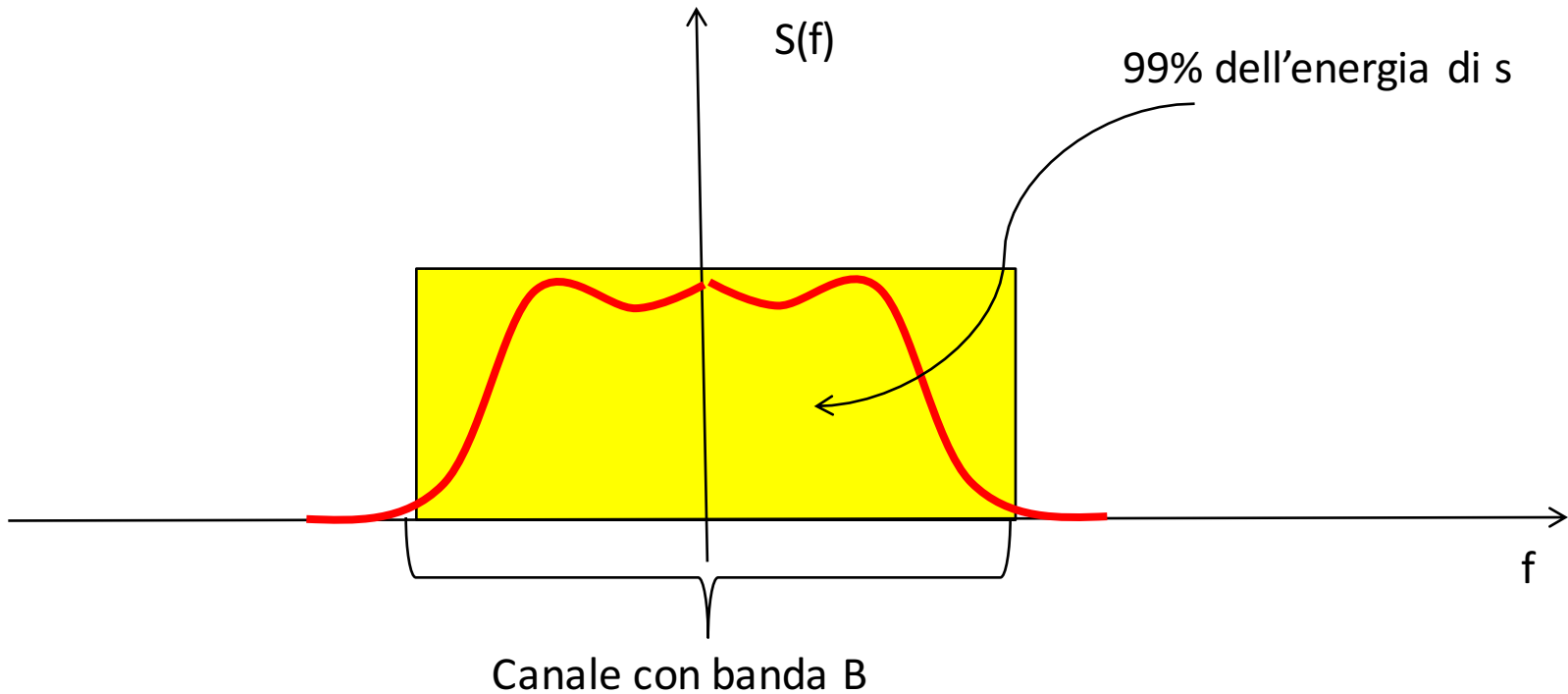


- Lo spettro di un segnale reale è sempre simmetrico rispetto all'origine
- L'energia di un segnale è data sia dall'integrale del suo valore al quadrato nel tempo che dall'integrale del suo spettro

$$E = \int s_2(t) dt = \int S_2(f) df$$

- Si chiama “banda” B di un segnale l'intervallo di frequenze (asse f) tale per cui  $S(f)B$  include una data frazione (0.9, 0.95, 0.99, etc) dell'energia del segnale

- La banda di un canale è legata alla banda dei segnali di cui consente la trasmissione





# Divisione delle risorse: tempo - frequenza

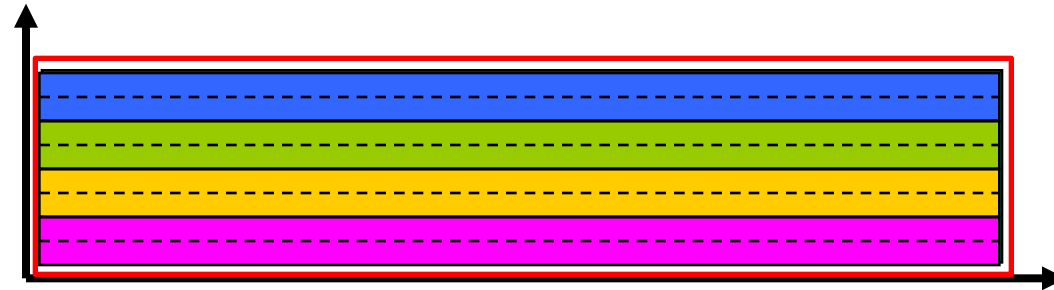
FDM

Esempio:

4 utenti



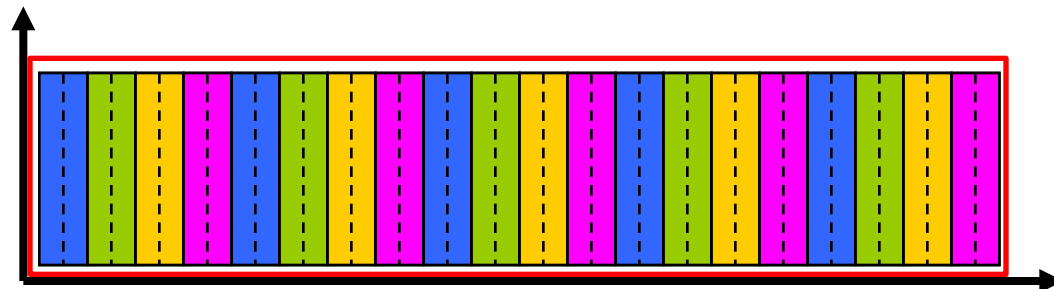
frequenza



tempo

TDM

frequenza



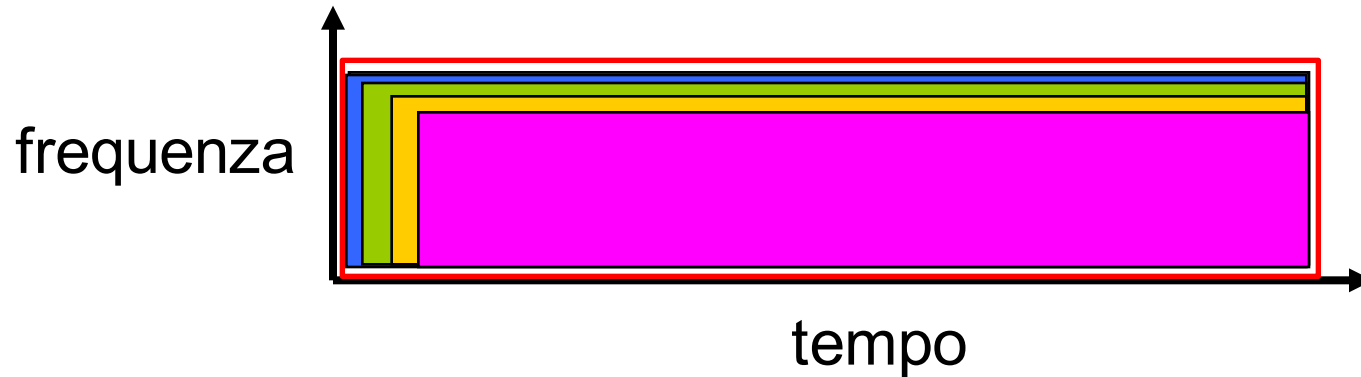
tempo



CDM

Esempio:

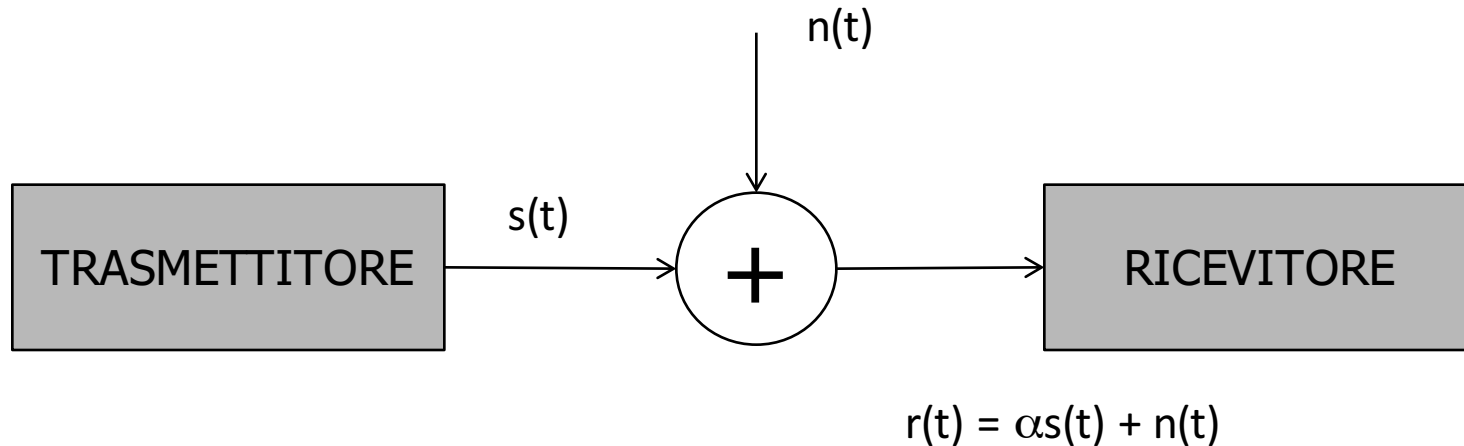
4 utenti



Le risorse sono assegnate “apparentemente” tutte e tutti gli utenti, che non interferiscono tra loro grazie a codici ortogonali.

Di fatto la capacità totale resta invariata, cambia solo il modo di rendere indipendenti (ortogonali) i segnali dei diversi utenti

- $C = B \log_2(1+S/N)$
- Identifica un “upper bound” alla capacità di un canale (non una rete) trasmissivo sotto le ipotesi AWGN
  - **Additive White Gaussian Noise Channel**
- Il canale attenua e aggiunge rumore e nient’altro





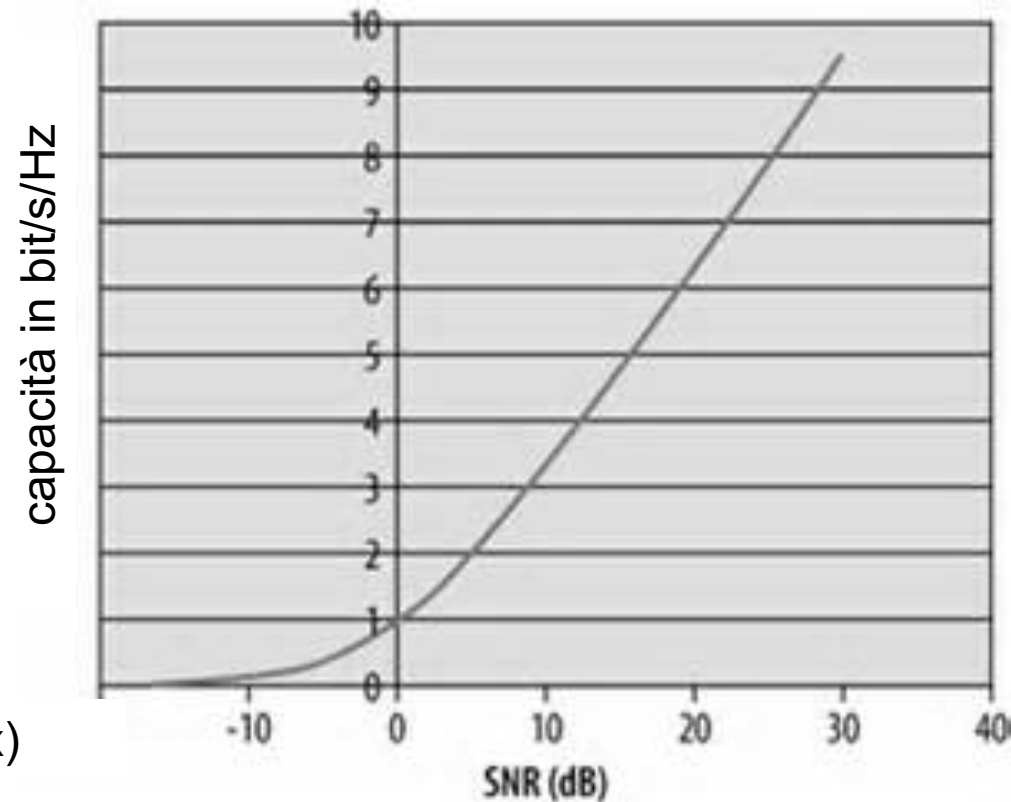
- $C = B \log_2(1+S/N)$
- B = banda del canale in Hz
- S = Energia del segnale per ciascun bit trasmesso (in J)
- N = Energia del rumore aggiunto dal canale (in J)
- C = Capacità del canale in bit/s
  
- Per trasmettere più veloce si può
  - aumentare la banda del canale
  - aumentare l'energia del segnale
  - diminuire il rumore e l'interferenza



# Il teorema di Shannon

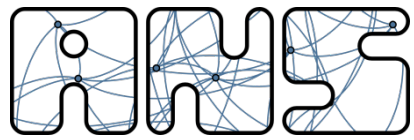
La capacità del canale aumenta  
all'aumentare di S/N indipendentemente  
dalla banda del canale

Idealmente un canale senza  
rumore ha capacità infinita



$$\text{dB} = 10 \log_{10}(x)$$

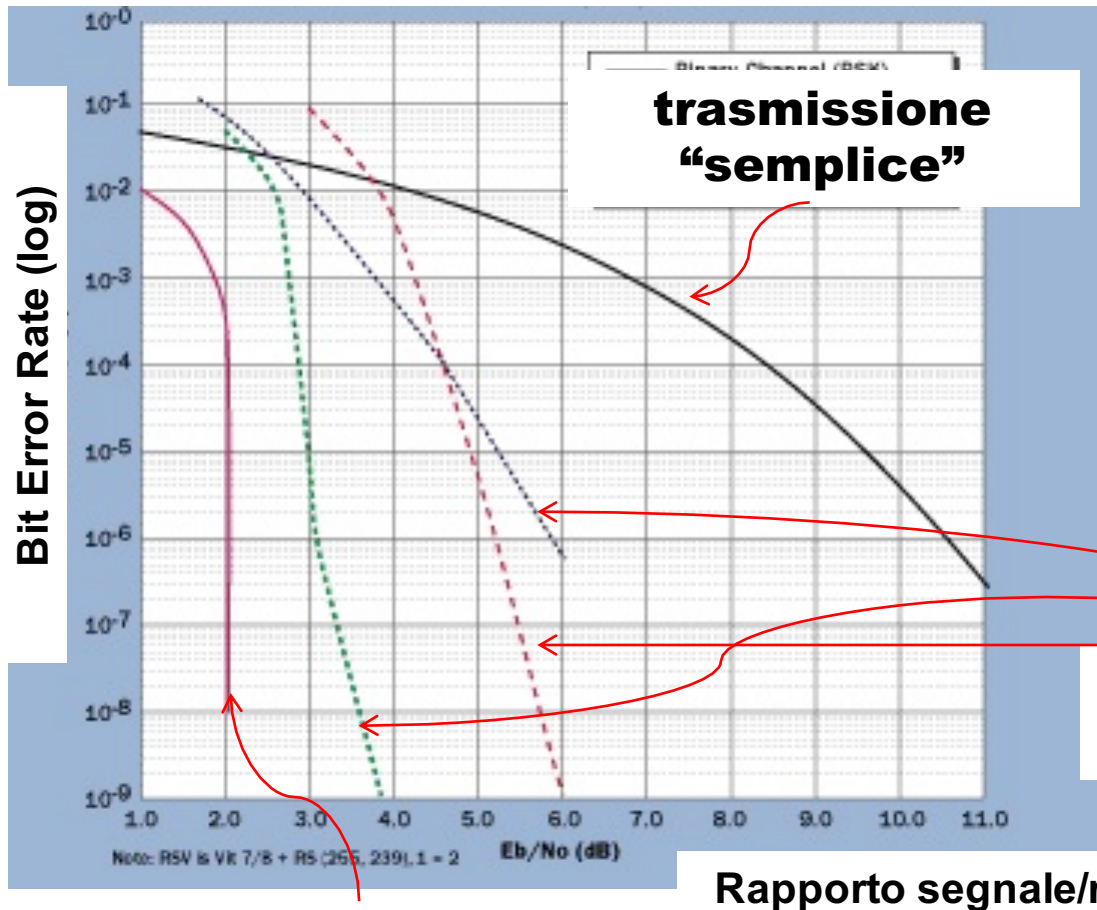




Shannon dice la capacità non come raggiungerla!

In un canale reale abbiamo errori sui bit

I codici a correzione possono aumentare enormemente la "capacità utile" di un canale



trasmissione  
"semplice"

varie tecniche di  
codifica

limite di Shannon

Rapporto segnale/rumore (dB)



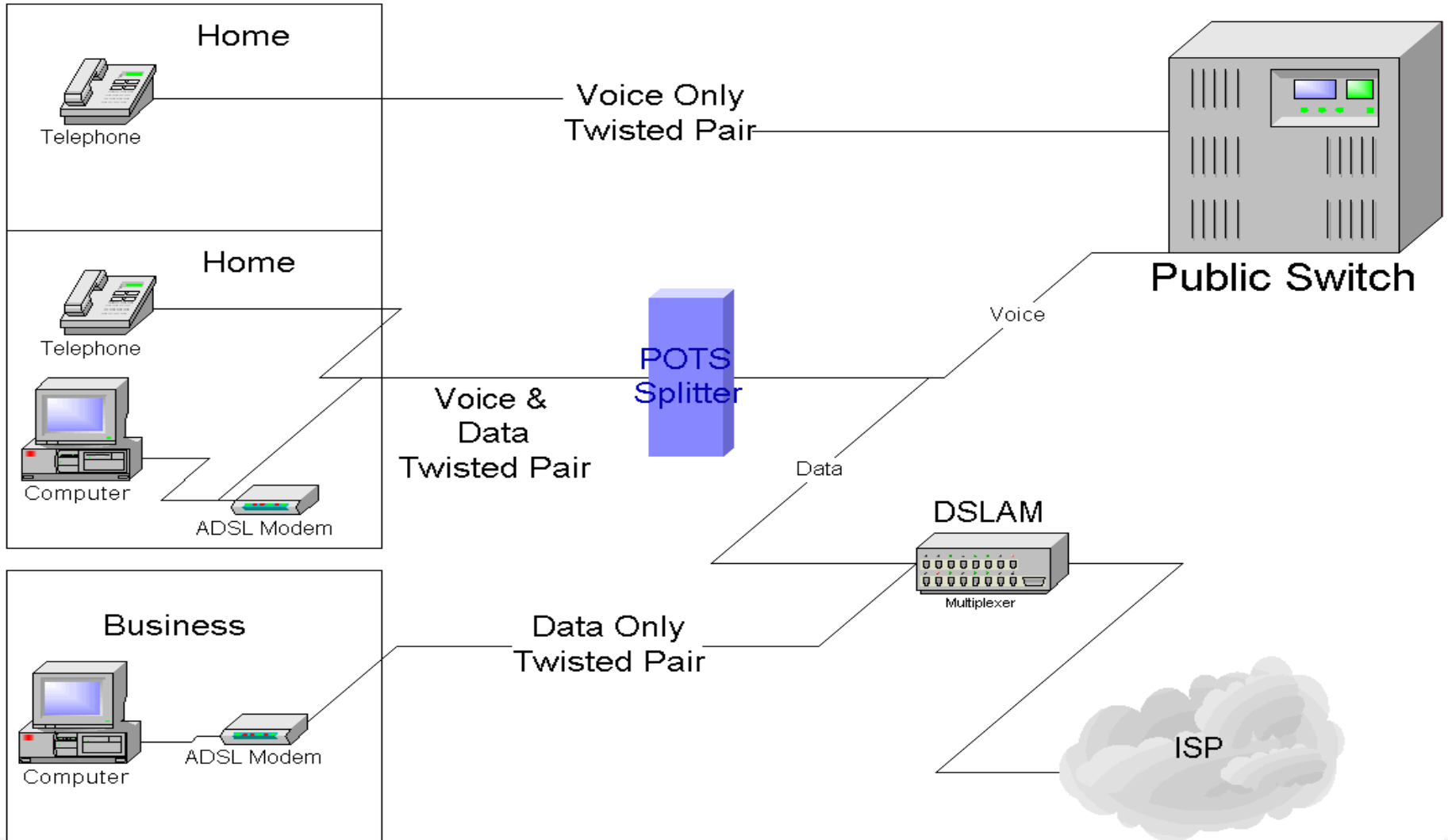
- La rete di **accesso** comprende:
  - Apparati e mezzi trasmissivi che collegano l'utente con il nodo di accesso (es. centrale telefonica urbana) del gestore di servizi di TLC
- La rete di **trasporto** (backbone) comprende:
  - apparati e mezzi trasmissivi appartenenti ad uno o più gestori di servizi di TLC e destinati al transito di fonia e dati tra due nodi di accesso



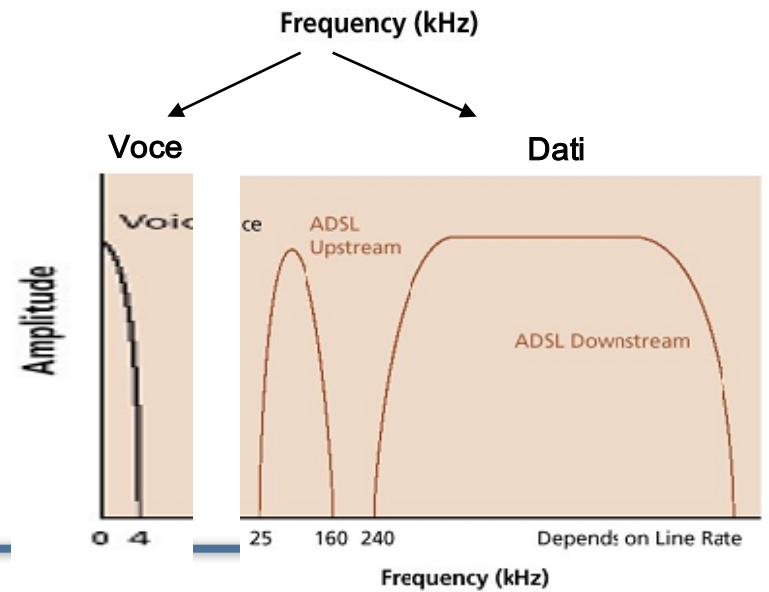
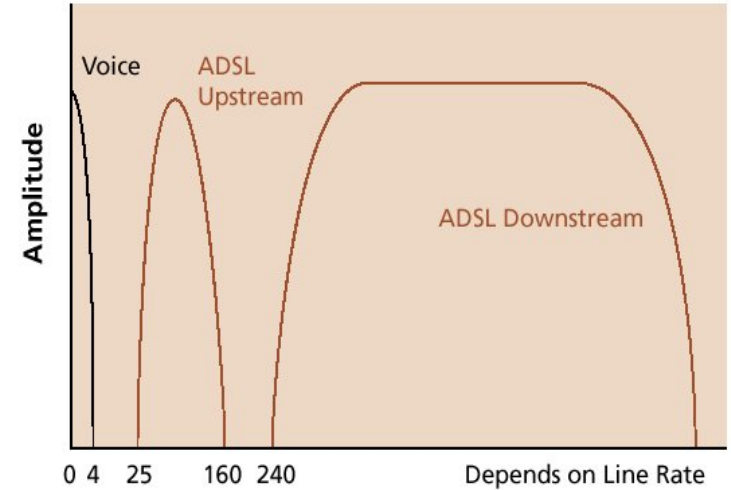
- Per arrivare all'utenza residenziale (“ultimo miglio”), l'ultima tratta di rete viene detta rete d'accesso (“local loop” in inglese)
- Tecnologie nelle reti di accesso:
  - Plain Old Telephone Service (POTS)
  - Integrated Services Digital Network (ISDN)
  - Asymmetric Digital Subscriber Loop (ADSL)
  - cable-modem su reti con tecnologia Cable-TV (CATV)
  - reti via radio (wireless); esempio: Wi-MAX
  - reti via radio cellulare (GPRS, UMTS, LTE)
  - reti di accesso ottiche

- *DSL* (Digital Subscriber Line) è una famiglia di tecnologie (chiamate anche *xDSL*)
  - fornisce servizio dati ad alta velocità sulla rete di accesso
- La più diffusa è *ADSL* (Asymmetric DSL)
  - Velocità maggiore in *downstream* che in *upstream*
- Velocità massime teoriche *ADSL* (velocità reale dipende da distanza utente-centrale):

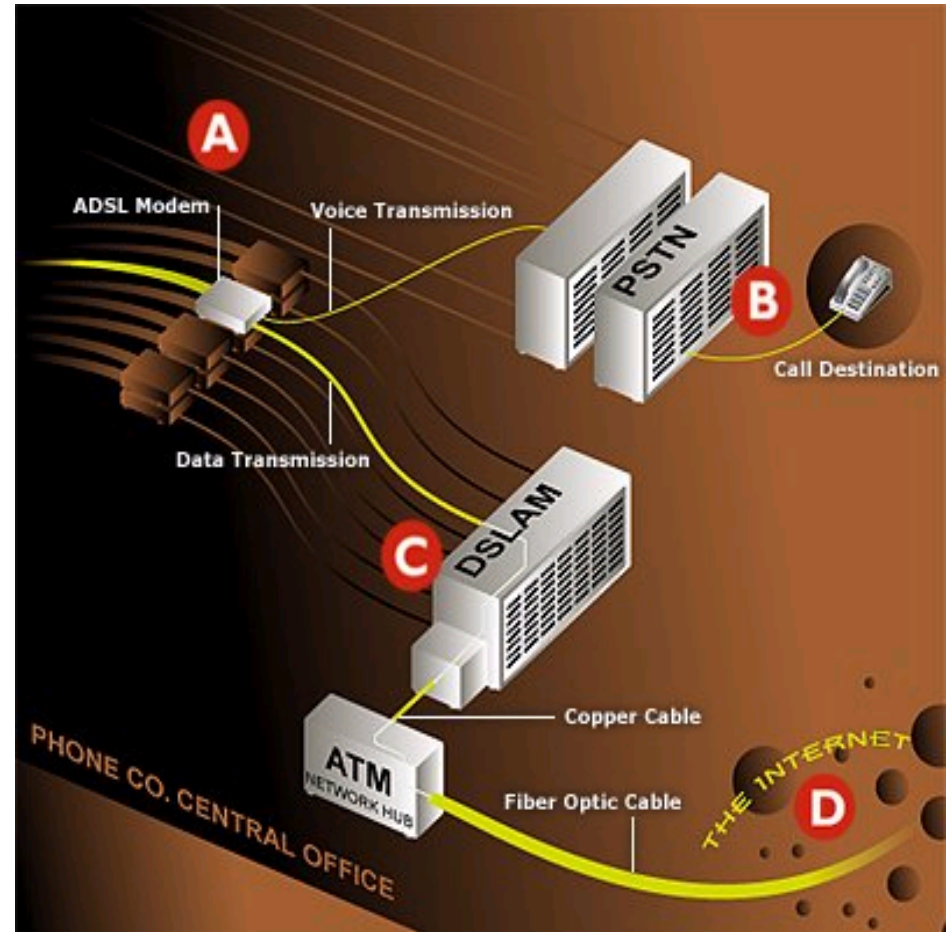
	<b>ADSL</b>	<b>ADSL2</b>	<b>ADSL 2+</b>
Downstream	6 Mb/s	8 Mb/s	24 Mb/s
Upstream	1,5 Mb/s	3.5 Mb/s	3.5 Mb/s



- Filtro Splitter
  - ha il compito di separare il segnale vocale dai dati
- Modem
  - (de)modulare il segnale alle frequenze opportune (es. per ADSL dai 25 KHz in upstream ai 240 KHz in downstream)



- Filtro/modem POTS: funzione duale del filtro splitter dell'utente, separa flussi voce e dati
- DSLAM (DSL Access Multiplexer): riceve flussi dati diversi e li convoglia su un unico canale





# Codifiche di linea e (cenni) alle tecniche di mo-demodulazione



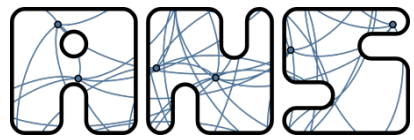


- Le tecniche per mappare l'informazione su "portanti" fisici si dividono in
  - **Codifiche**
  - **Modulazioni**
- I due termini sono in parte sovrapposti e di fatto si può vedere la codifica di linea o di canale come una modulazione
- Modulazione e Multiplazione ... non vanno confuse!!

- Codifica di sorgente
  - Tecnica per rappresentare una informazione analogica (video, voce, ...) su simboli numerici
  - Es. immagine rappresentata come un insieme di pixel
    - Video b/n a bassa qualità  $\rightarrow$  1 pixel = 8 bit di luminosità
    - Video a colori di alta qualità  $\rightarrow$  1 pixel = 5 parole di 16 bit per 5 colori diversi Rosso, Giallo, Verde, Blu, Magenta o Indaco
  - Es. Codifica della voce PCM  $\rightarrow$  1 campione con 8 bit di ampiezza ogni 0.125 ms = 64 kbit/s
  - Es. Rappresentazione delle lettere (o degli ideogrammi) su byte (UTF8), 2 byte (UTF16), 4 byte (UTF32), 7 bit (ASCII)

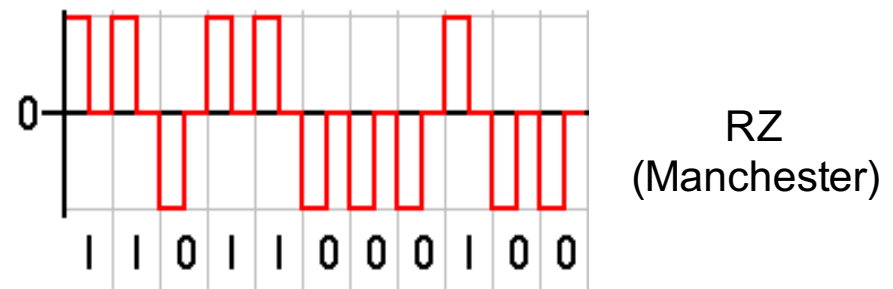
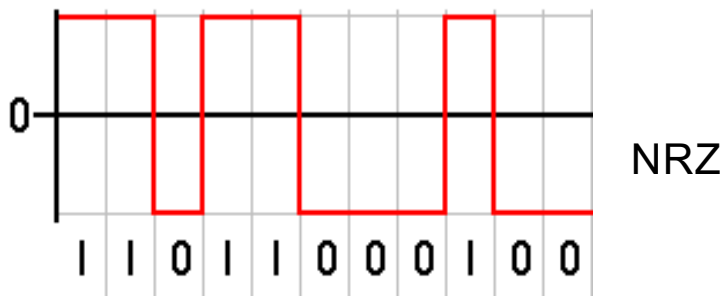


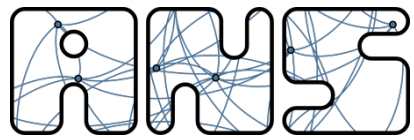
- Tecniche per la mappatura delle informazioni *numeriche* su segnali *campionati e quantizzati* per la trasmissione su mezzi elettrici, radio e ottici
- Si chiamano anche *modulazioni in banda base*, in genere si parla di *codifiche di linea* quando si usa come grandezza variabile l'ampiezza
- Tre tipi di codifiche, che dipendono dal riferimento di tensione del segnale:
  - Unipolari
  - Polari
  - Bipolari



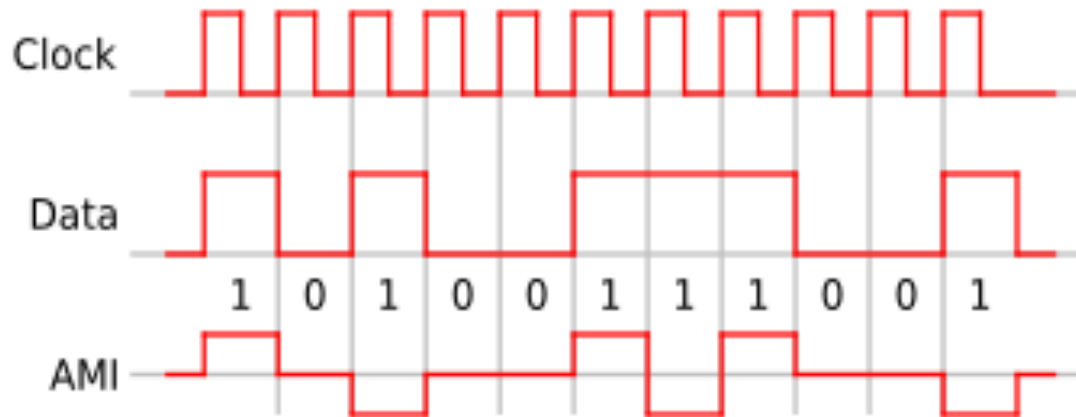
- Molto semplici e “primitive”
- Usano un livello di tensione per “0” e uno per “1”
- Solitamente, si usa tensione nulla per “0” e tensione positiva per “1”
- Problemi:
  - In mezzi elettrici, segnale con componente continua non nulla che può essere filtrata da alcuni sistemi (posso usare tensioni simmetriche per ovviare il problema)
  - Perdita di sincronismo se trasmetto lunghe sequenze dello stesso simbolo
  - In mezzi ottici, lunghe sequenze di “1” (luce) possono portare al sovraccarico del LED di trasmissione

- Usano due livelli di tensione con polarità diverse (si riduce quasi del tutto la componente continua)
- Tre sottotipi:
  - NRZ (Non-Return-to-Zero, non c'è transizione su tensione nulla nel passaggio tra due bit consecutivi)
  - RZ (Return-to-Zero, transizione su tensione nulla tra due bit consecutivi)
  - Bifase (es. Manchester: ogni bit rappresentato da due livelli di tensione di polarità inversa)
- Le codifiche bifase sono migliori per il recupero del sincronismo, ma RZ e bifase richiedono velocità di linea doppie rispetto al bit rate





- Si usa tensione nulla per rappresentare lo “0” e due polarità opposte per l’ “1”, usate in alternativa
- Permettono l’uso di simboli ternari (-1, 0, +1), come nella codifica 8B6T (8 bit codificati con 6 simboli ternari)
- Chiamate anche AMI (Alternate Mark Inversion)





- Si tratta di codifiche in cui simboli di  $n$  bit sono rappresentati da simboli di  $m$  bit, con  $n < m$  (es. 4B5B, 8B10B, 64B66B...)
- Molto popolari perché:
  - Richiedono meno banda di codifiche polari
  - Permettono il controllo sulla scelta delle parole di codice, limitando quelle con troppi 0 e 1 consecutivi
  - Limita la componente continua
  - Fornisce caratteri speciali per delimitazione pacchetti, trasmissione in idle o padding



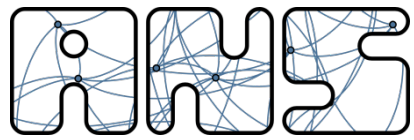
- Si aggiunge ridondanza all'informazione numerica per poter identificare e correggere gli errori
- Abbiamo visto i banali codici a parità "incrociati" parlando del livello trasporto
- **Codici a blocco** (Hamming, Reed-Solomon, ...)
  - Lavorano su un blocco di bit o di simboli di n-bit  
(N,K,M) → N simboli totali, K simboli di informazione, M simboli di controllo:  $N = K+M$
  - Sono in genere codici algebrici, cioè i simboli di controllo sono una funzione algebrica dei bit di informazione
  - Es. Codici lineari a matrici come quelli di Hamming, i bit codificati C di ottengono moltiplicando il vettore dei bit di dati D per una matrice generatrice G  $C = D G$
  - L'operazione inversa consente di decodificare i bit correggendo  $(M-1)/2$  errori





- **Codici Convolutionali**

- Lavorano sul flusso continuo di bit
- La codifica avviene con una operazione algebrica (in genere EX-OR) su un certo numero  $m$  di bit già codificati più quello da codificare
- $m$  si chiama memoria o ‘constraint length’
- Sono caratterizzati da un rate di codifica:
  - $1/2 \rightarrow$  un bit di controllo ogni bit di dati
  - $2/3 \rightarrow$  un bit di controllo ogni 2 bit di dati
  - $3/4 \rightarrow$  un bit di controllo ogni 3 bit di dati
  - ...
- La capacità di correzione dipende dal rate, dalla memoria  $m$  e dalla “profondità” di decodifica
- Decodifica con algoritmo di Viterbi o “turbo” (computazionalmente molto complesse entrambe)



- È l'operazione di mappatura dei bit su simboli analogici da trasmettere sul mezzo fisico
- Le codifiche di linea rappresentano delle semplici modulazioni in **banda base**
- La trasmissione in banda base si usa principalmente nei collegamenti cablati punto-punto a bassa velocità
- Ponti radio e tutti i sistemi moderni su cavo usano invece modulazioni in **banda traslata**
- L'uso di tecniche in banda traslata consente la moltiplicazione in frequenza di diversi canali
- In fibra ottica si usa normalmente una semplice modulazione on/off, ma si può fare moltiplicazione di lunghezza d'onda (WDM)



- Ampiezza: l'informazione è codificata sull'ampiezza del segnale "portante"
- Frequenza: l'informazione è codificata sulla frequenza del segnale "portante"
- Frequenza: l'informazione è codificata sulla fase del segnale "portante"
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation): l'informazione è codificata sia sulla fase che sull'ampiezza del segnale "portante"
- Si chiama "**portante**" il segnale sinusoidale la cui frequenza è al centro della banda del segnale



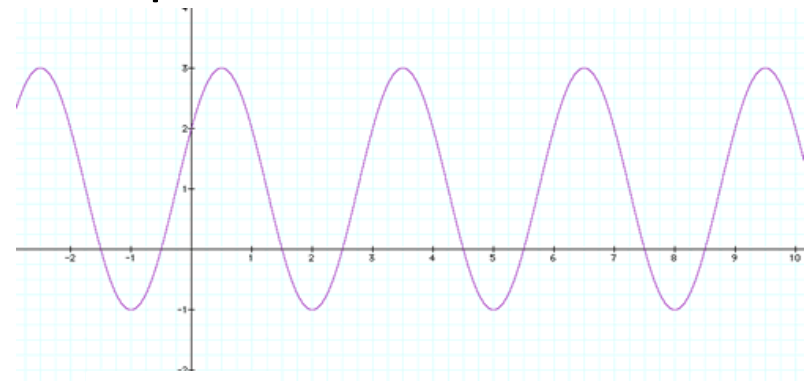
- Una sequenza di simboli  $x_i$  nel tempo è un “segnale”  $s(t)$  trasmissivo

$$s(t) = \sum_i x_i (t-iT)$$

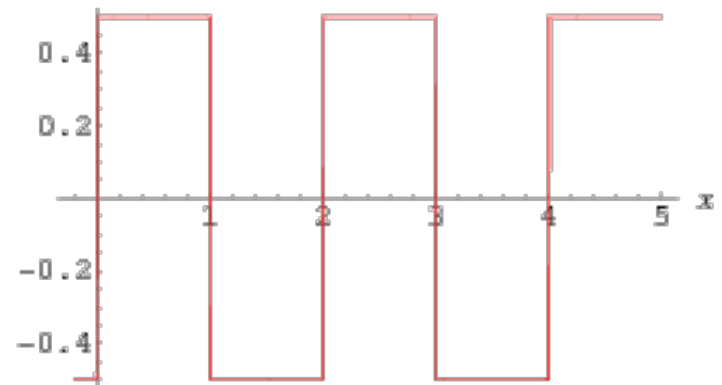
- $T$  è l’intervallo di segnalazione
- $x_i$  è l’ $i$ -esimo simbolo che può “trasportare” uno o più bit
  - Ad esempio moltiplicando l’ampiezza di un simbolo base per una costante
    - $0 \rightarrow +k$  ;  $1 \rightarrow -k$
    - $00 \rightarrow -3k$ ;  $10 \rightarrow -k$ ;  $11 \rightarrow k$ ;  $01 \rightarrow 3k$

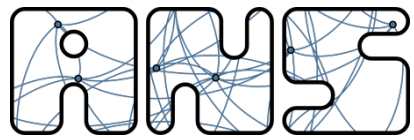
- Le comunicazioni moderne usano solamente segnali elettromagnetici
- Definiamo “segnale” una funzione del tempo

- $a \sin(2\pi f t + f) + k$ .  
Segnale sinusoidale  
puro a frequenza  $f$  con fase  $f$ ,  
ampiezza  $a$ , più una costante  $k$

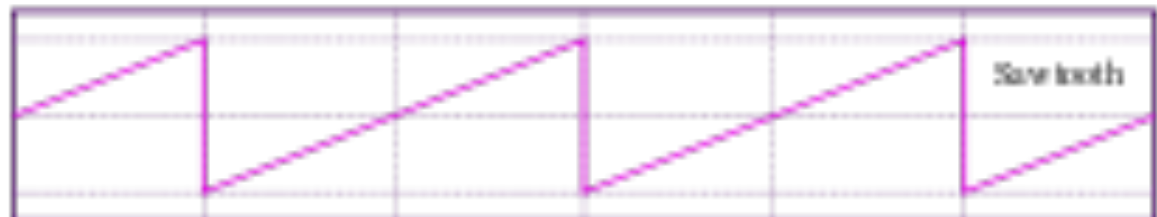
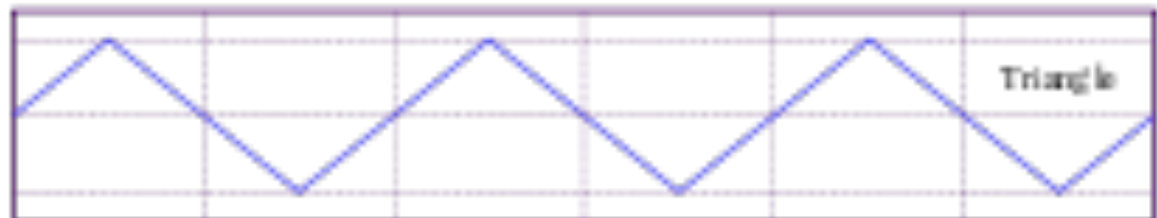
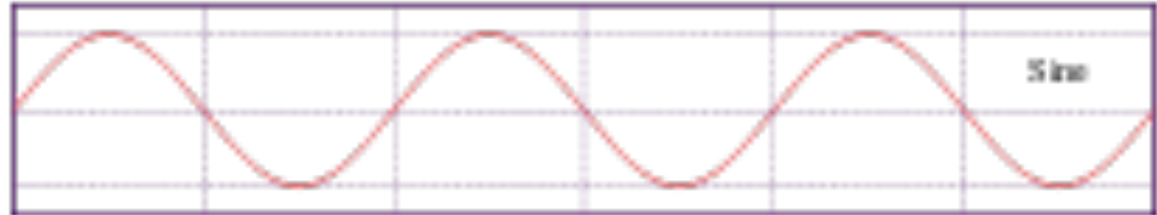


- $a_i \text{sqw}_T(t - iT)$ ;  $a_i = +0.5, -0.5$ .  
Segnale a “onda quadra” di durata  $T$   
ed ampiezza unitaria (positiva o  
negativa) in funzione del valore di  $a_i$



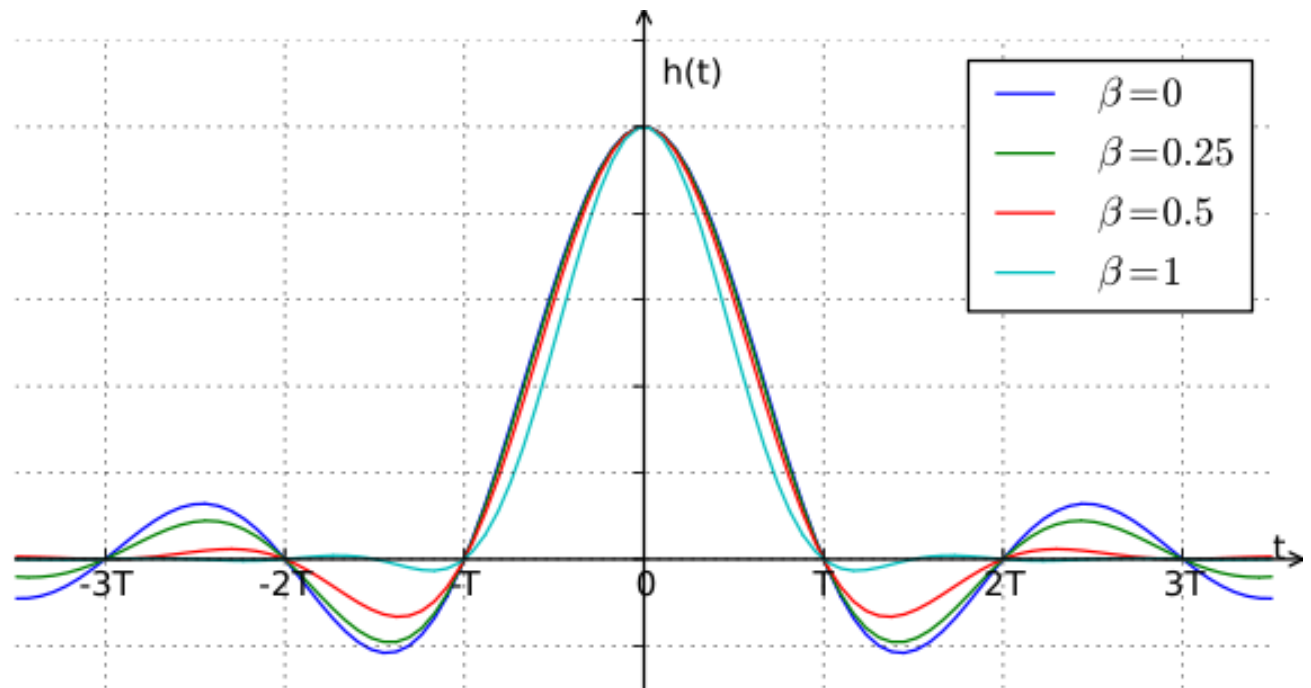


Il segnale base che viene ripetuto a intervalli regolari 'T' viene chiamata "forma d'onda" e determina molte caratteristiche fisiche del segnale





- La durata della forma d'onda può essere maggiore di  $T$
- Deve rispettare caratteristiche definite (teoremi di Nyquist)
- Esempio di impulsi a “coseno rialzato” (fig. tratta da wikipedia)





- Esempi di forme d'onda usati in diverse applicazioni sia di comunicazione che di prova/verifica dei sistemi
- Impulsi “gaussiani” sono usati nelle comunicazioni cellulari
- Impulsi di tipo ‘sinc’  $\rightarrow \sin(x)/x$  derivano dal filtraggio a banda molto stretta di altri segnali

