



POLITECNICO
MILANO 1863



Fondamenti di Internet e Reti

Antonio Capone, Matteo Cesana,
Ilario Filippini, Guido Maier



POLITECNICO
MILANO 1863



7 – Livello Fisico

**Antonio Capone, Matteo Cesana,
Ilario Filippini, Guido Maier**

L'informazione

- L'informazione è di diversa natura
 - Segnali fisici (analogici)
 - voce
 - immagini
 - misure
 - ...



Segnali

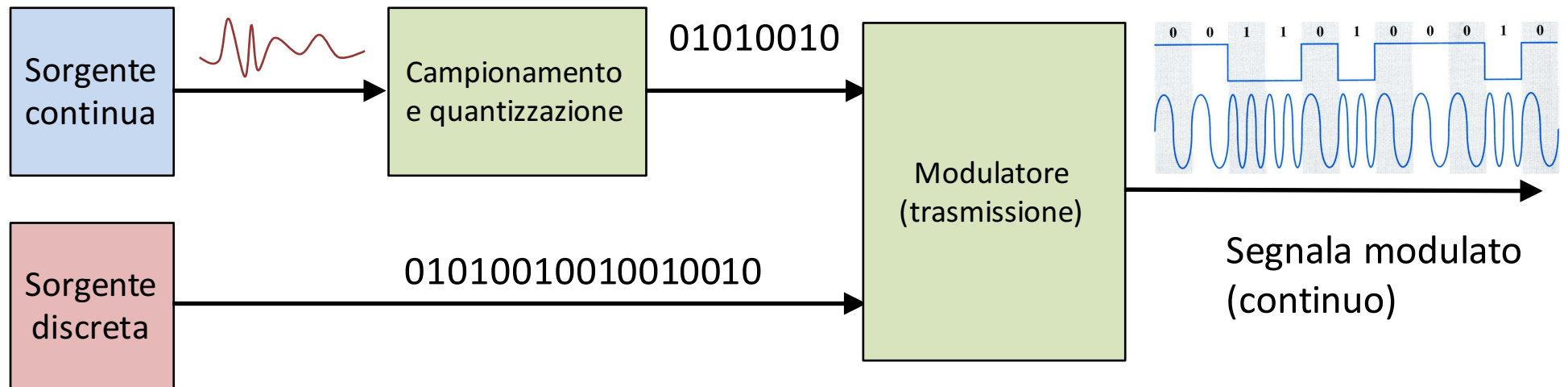
- **Segnali logici (sorgenti numeriche)**
 - Sequenze nativamente numeriche
- **Segnali fisici (sorgenti continue)**
 - Associati a grandezze fisiche e tipicamente continue

Segnali analogici
(continui)

Segnali digitali
(discreti)



Dalla generazione alla trasmissione digitale di informazione

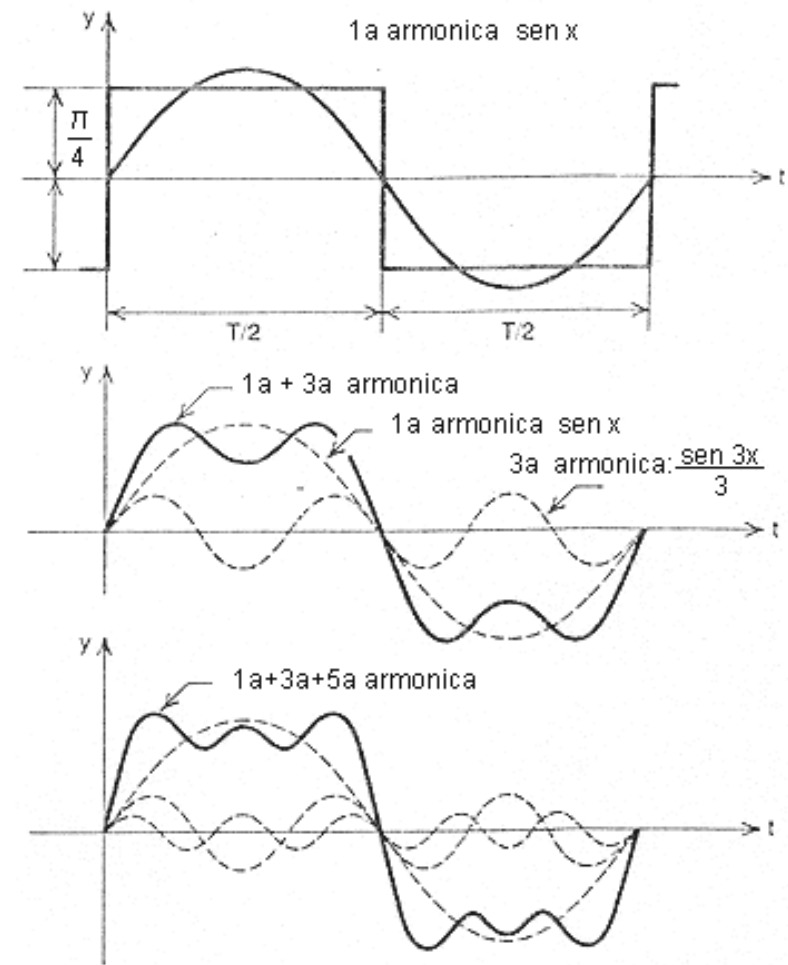


Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- **L'analisi di Fourier consente di studiare qualsiasi segnale scomponendolo in sinusoidi**

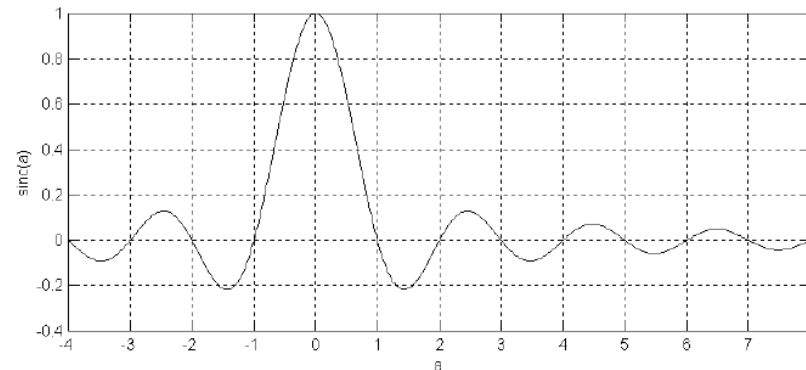
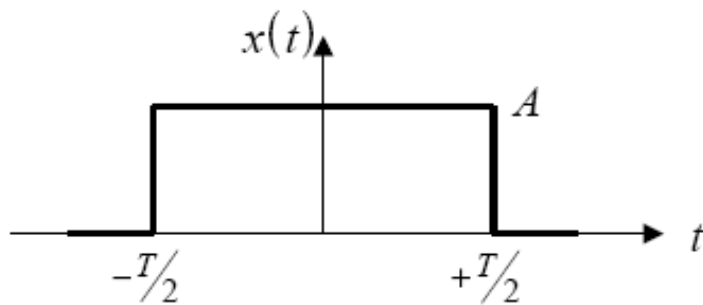
- I segnali periodici di periodo T e frequenza $f=1/T$ possono essere scomposti in un numero discreto di sinusoidi di frequenza multipla di quella del segnale (serie di Fourier)
- Le sinusoidi componenti sono dette armoniche

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)$$



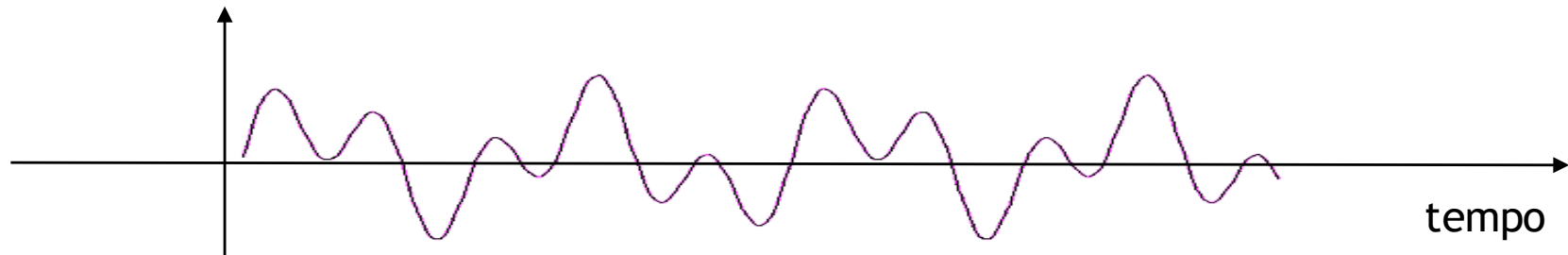
Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- **La trasformata di Fourier generalizza l'analisi delle serie di Fourier al caso di segnali non periodici**
 - La trasformata scompone i segnali non periodici in un insieme continuo di armoniche
 - La funzione che descrive le ampiezze e le fasi delle sinusoidi componenti è lo spettro in frequenza del segnale.

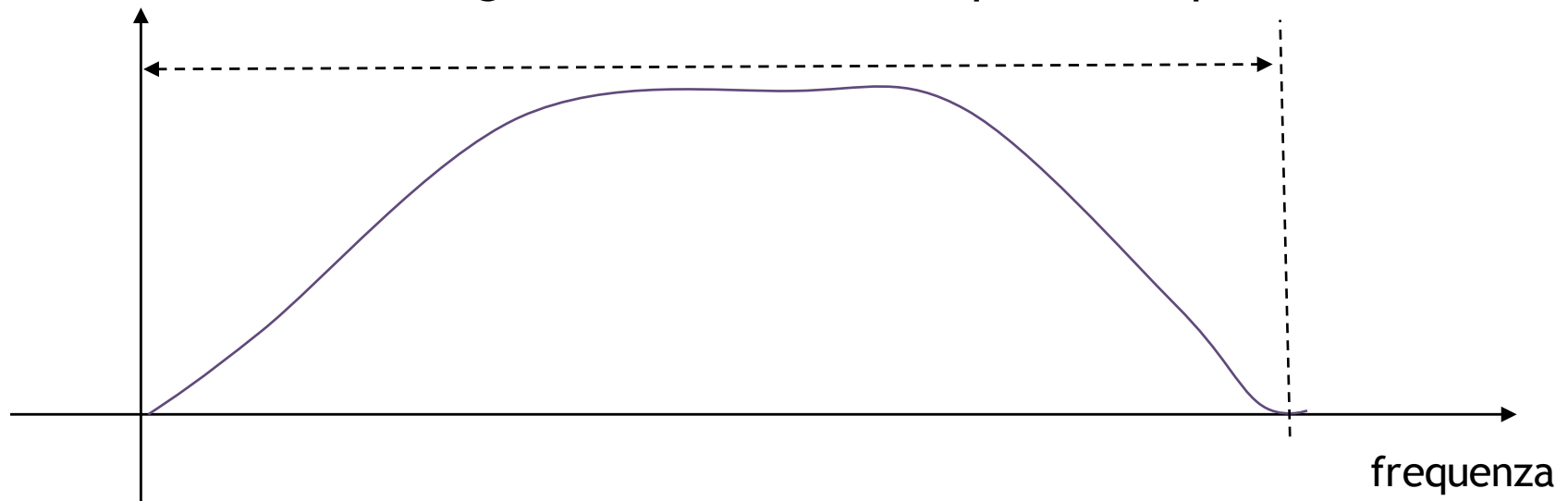


Banda di un segnale

- E' il contenuto in frequenze sinusoidali di un segnale

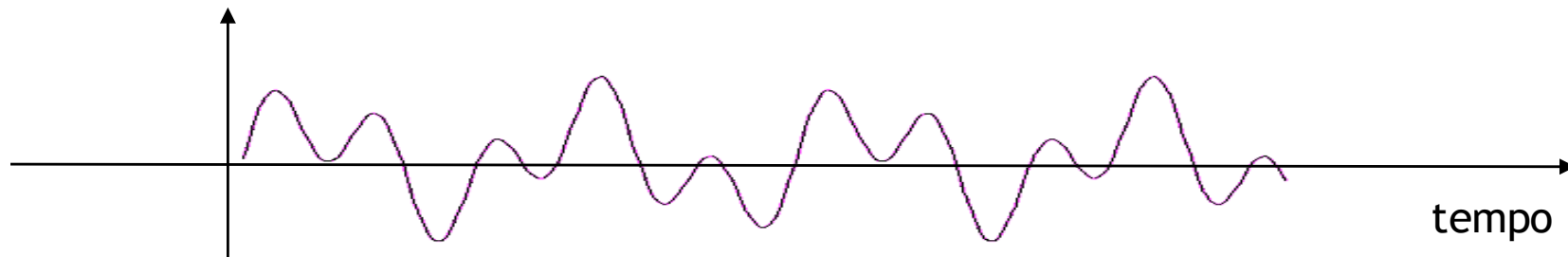


banda del segnale = massimo campo di frequenze usato

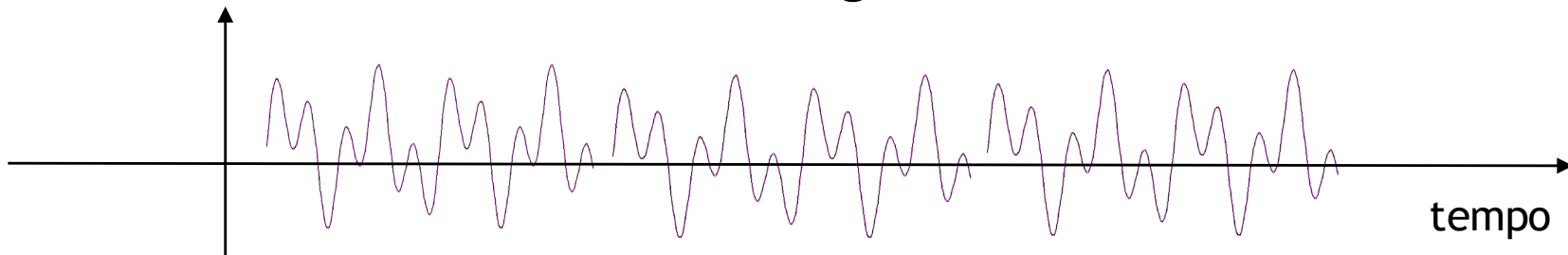


Effetto temporale della banda

banda stretta



banda larga



banda equivale a “dettaglio” Δt

$$\Delta t \approx \frac{1}{2B}$$



Segnali e Bande

Banda di alcuni segnali

Segnale telefonico	300-3400 Hz
Voce	300-8000 Hz
Musica	100-20.000 Hz
TV (PAL)	0-5.000.000 Hz (5 MHz)
Cinema	0-500 MHz



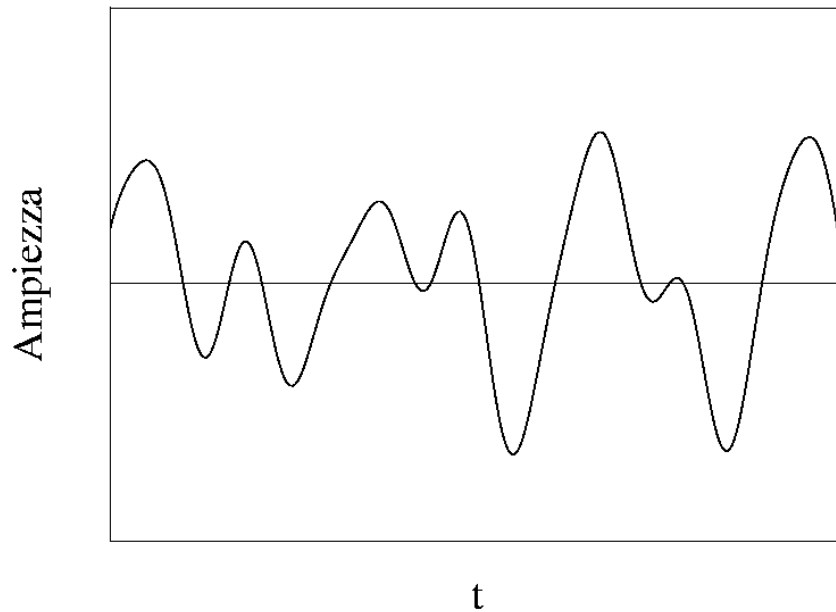
Il campionamento

Teorema di *Nyquist*

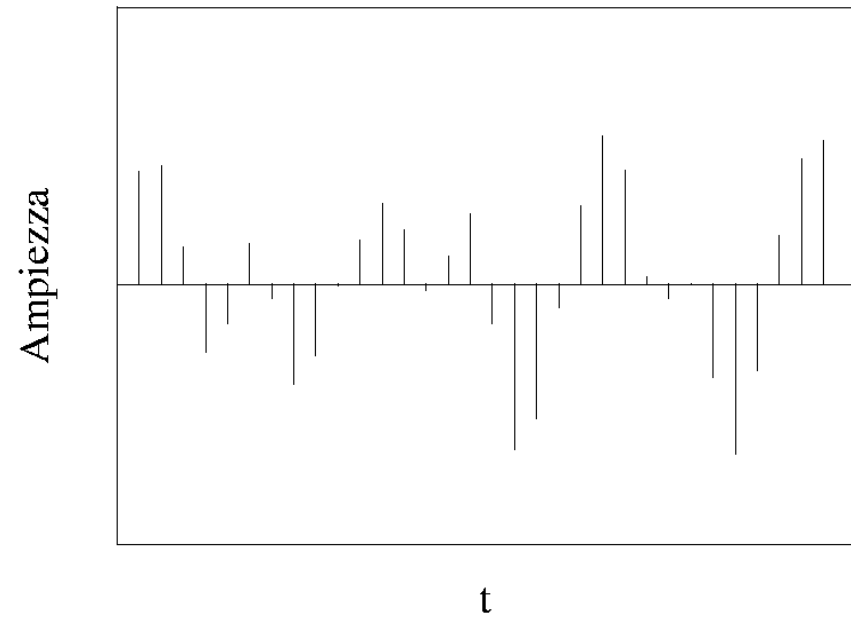
Una funzione del tempo è completamente determinata dai suoi campioni presi a distanza T tale che $T \leq 1/2B$, dove B è la banda, o anche, usando la frequenza di campionamento $f_c = 1/T$:

$$f_c \geq 2B = f_N \quad \text{frequenza di Nyquist}$$

segnale



segnale campionato



Il campionamento

$$f_c \geq 2B = f_N \quad \text{frequenza di Nyquist}$$

- In pratica i campioni presi alla frequenza di *Nyquist* rappresentano il **contenuto informativo del segnale**
- Campioni più frequenti non sono indipendenti (l'eccesso è inutile)
- Campioni meno frequenti “perdono informazione” (il segnale non è più ricostruibile esattamente)
- la “**Banda**” rappresenta il **contenuto informativo**



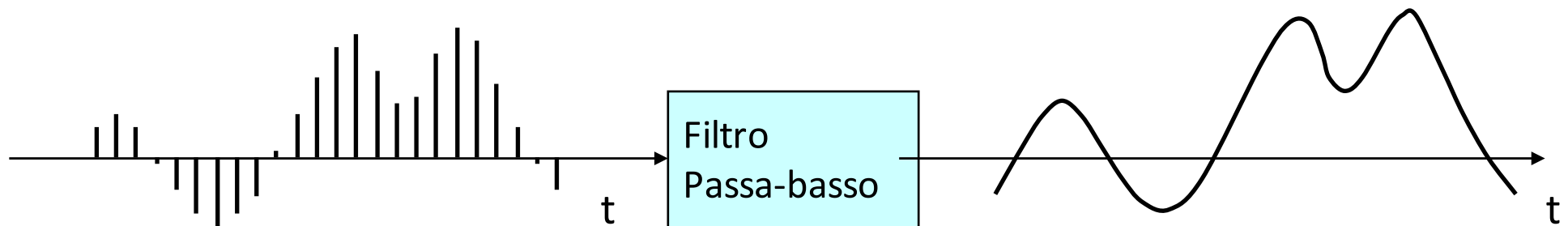
Il campionamento

Segnale	Banda	frequenza di campionamento
Segnale telefonico	300-4000 Hz	8000 Hz
Voce	300-8000 HZ	16000 HZ
Musica	100-20.000 Hz	40 KHz
TV (PAL)	0-5.000.000 Hz (5 MHz)	10 MHz
Cinema	0-500 MHz	1 GHz



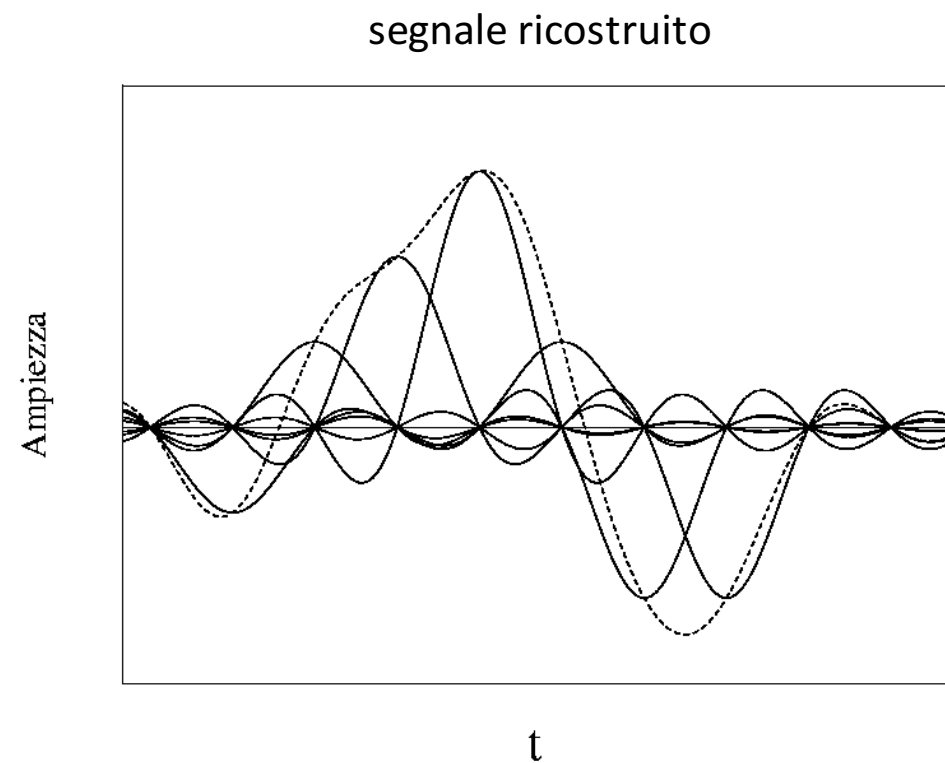
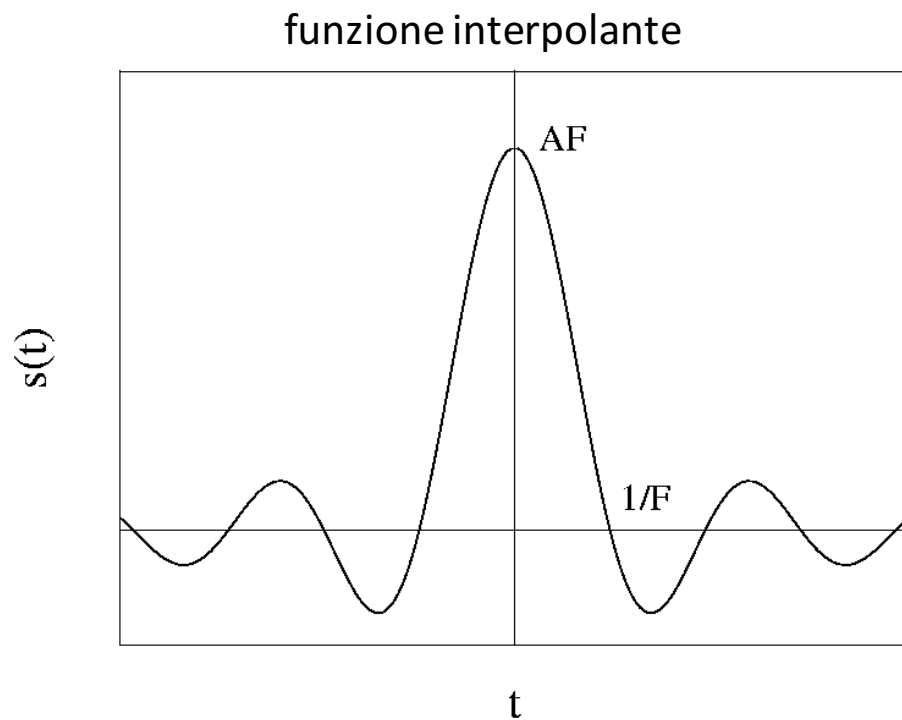
Teorema del campionamento

- Ogni segnale analogico di banda B può essere ricostruito interamente in base ai suoi campioni presi a frequenza $2B$
- La ricostruzione avviene con un filtro che taglia le frequenze oltre $2B$



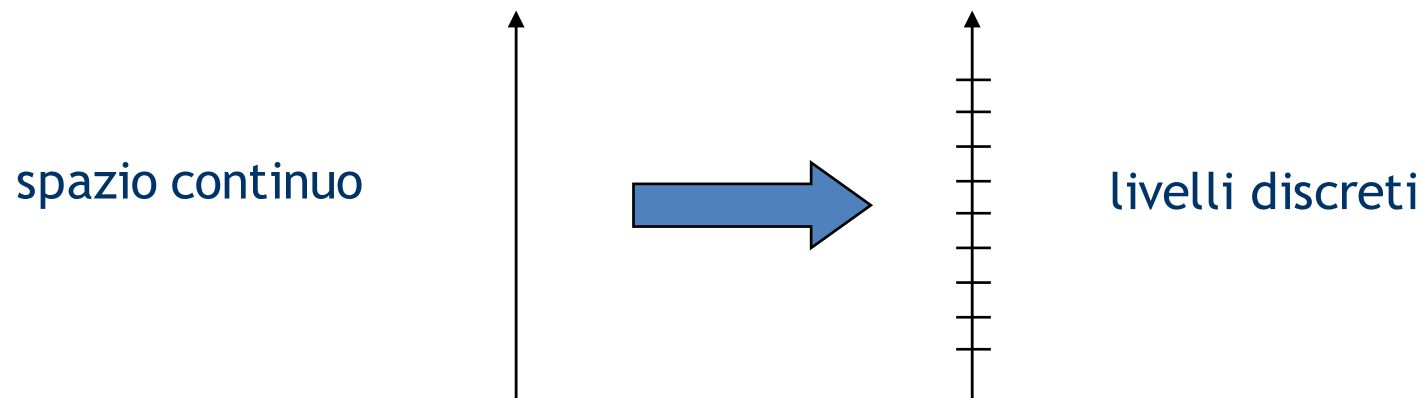
Ricostruzione

- La ricostruzione esatta avviene tramite semplice filtraggio
- (interpolazione con particolari funzioni di banda B)



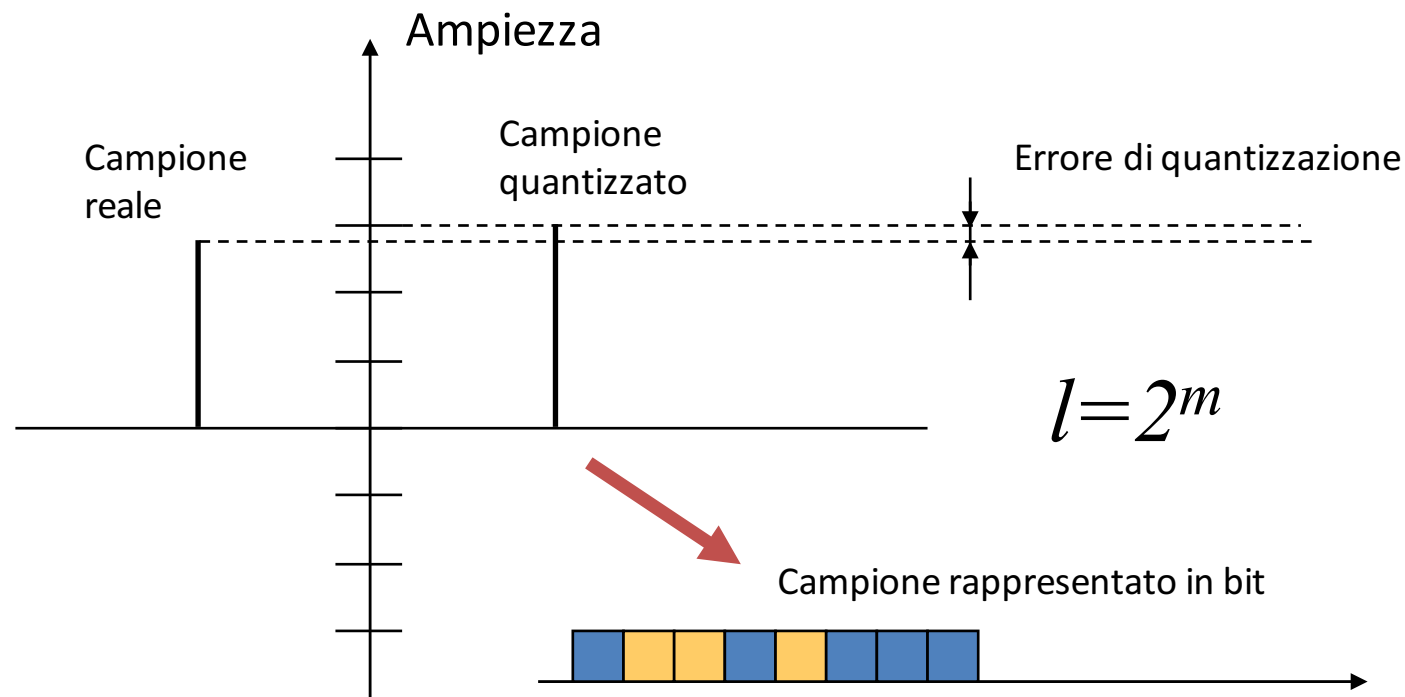
Quantizzazione

- E' l'operazione con cui una grandezza continua è trasformata in discreta
- Nella trasformazione si commette un errore di approssimazione (quantizzazione)
- Più livelli, meno errore di quantizzazione



Quantizzazione

- Rappresentazione con un numero razionale
(numero di bit m finito \rightarrow numero di livelli l finito)



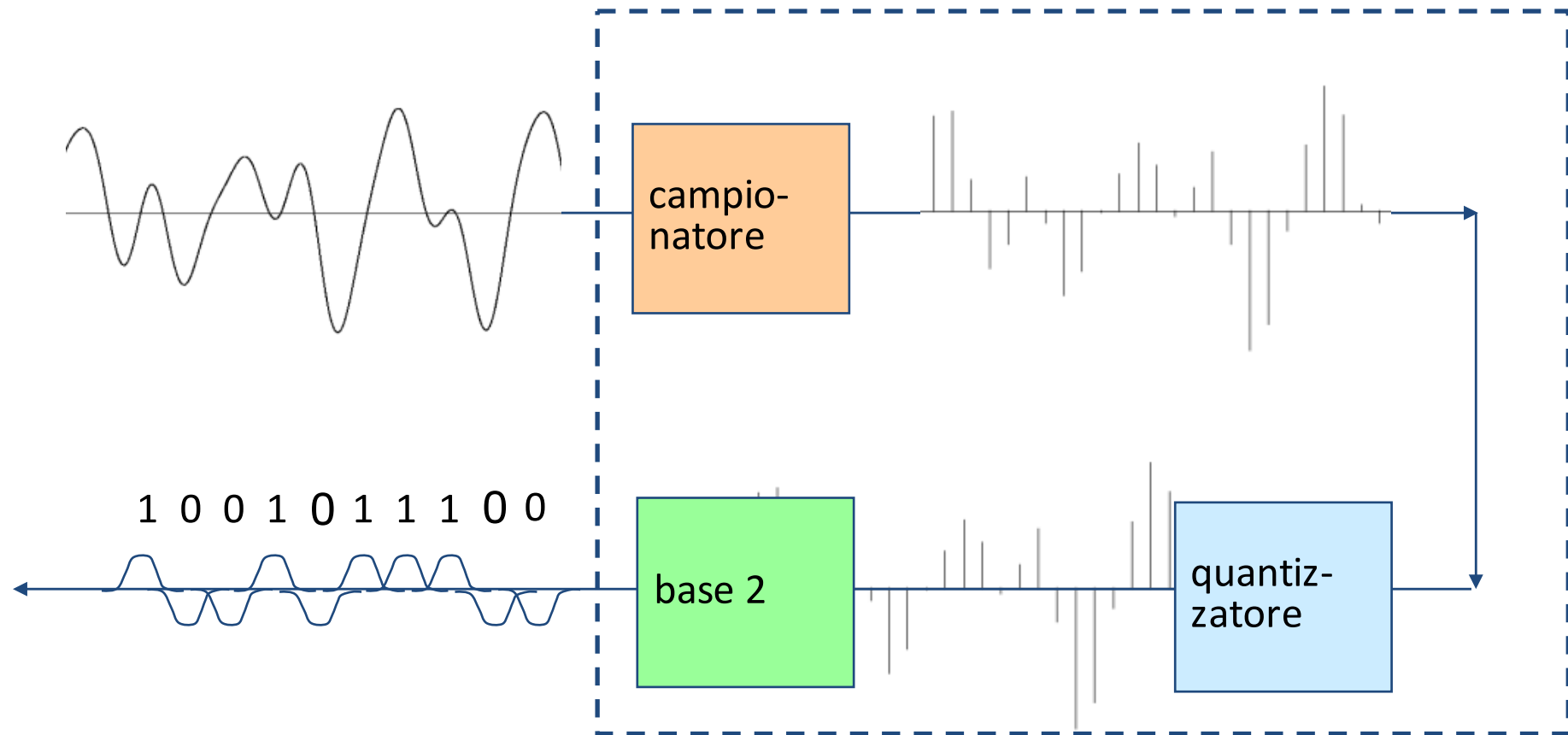
Esempi

Livelli di quantizzazione di alcuni segnali

Segnale telefonico	256 livelli (8 bit)
CD (musica)	65536 livelli (16 bit)
livelli di grigio	256 livelli (8 bit) - 65536 livelli (16 bit)
livelli di colore	16.777.216 (24 bit)



Conversione A-to-D



dunque i segnali sono trasformabili in flussi di bit astratti dai supporti fisici: segnali logici



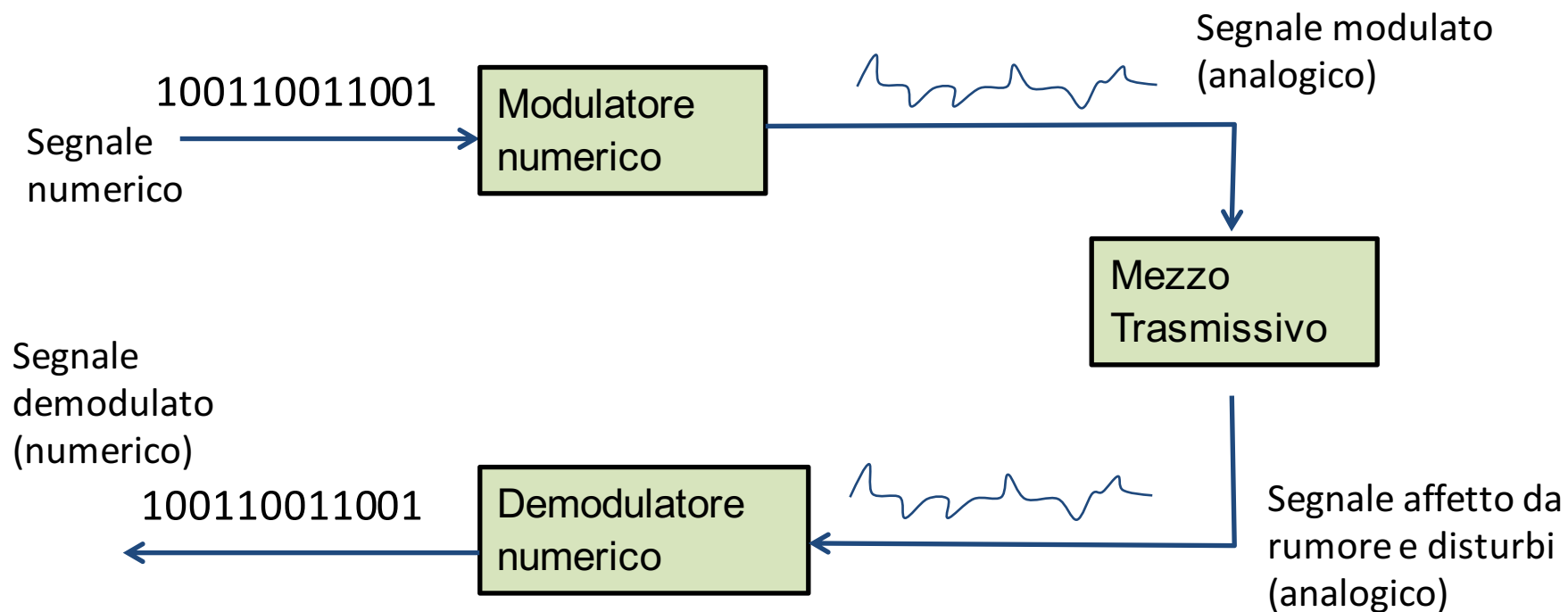
Flussi equivalenti

Segnale	Banda	frequenza di campionamento	flusso binario
Segnale telefonico	300-4000 Hz	8000 Hz	64 kb/s
Voce	300-8000 HZ	16000 HZ	256 kb/s
Musica	100-20.000 Hz	44 KHz	704 kb/s
TV (PAL)	0-5.000.000 Hz (5 MHz)	10 MHz	240 Mb/s
Cinema	0-500 MHz	1 GHz	24 Gb/s



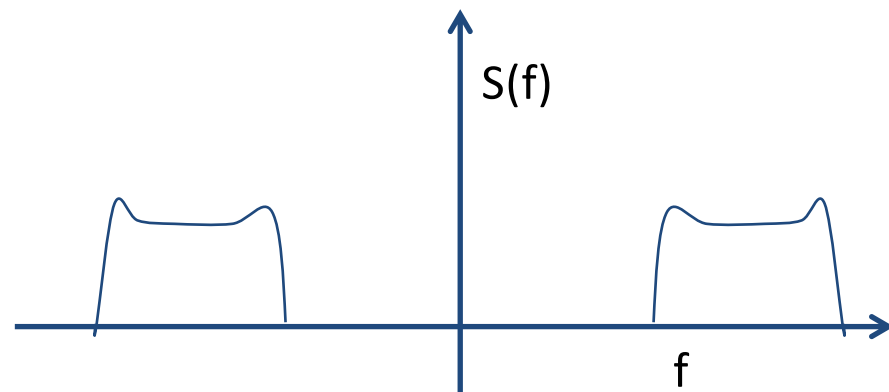
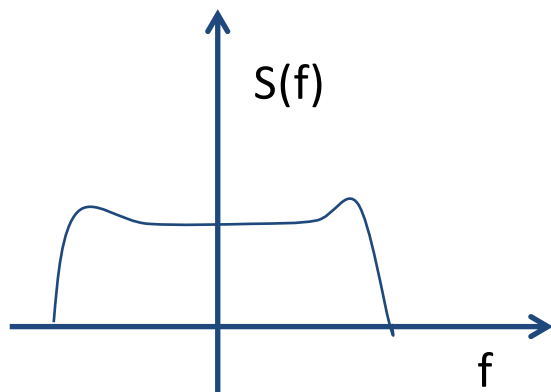
Modulazione

- La trasmissione di un segnale digitale (numerico) richiede di creare un opportuno segnale che sia adatto ad essere trasportato dal mezzo trasmissivo.
- La sequenza digitale viene usata per modificare (modulare) un qualche parametro del segnale (modulato) inviato nel mezzo trasmissivo.



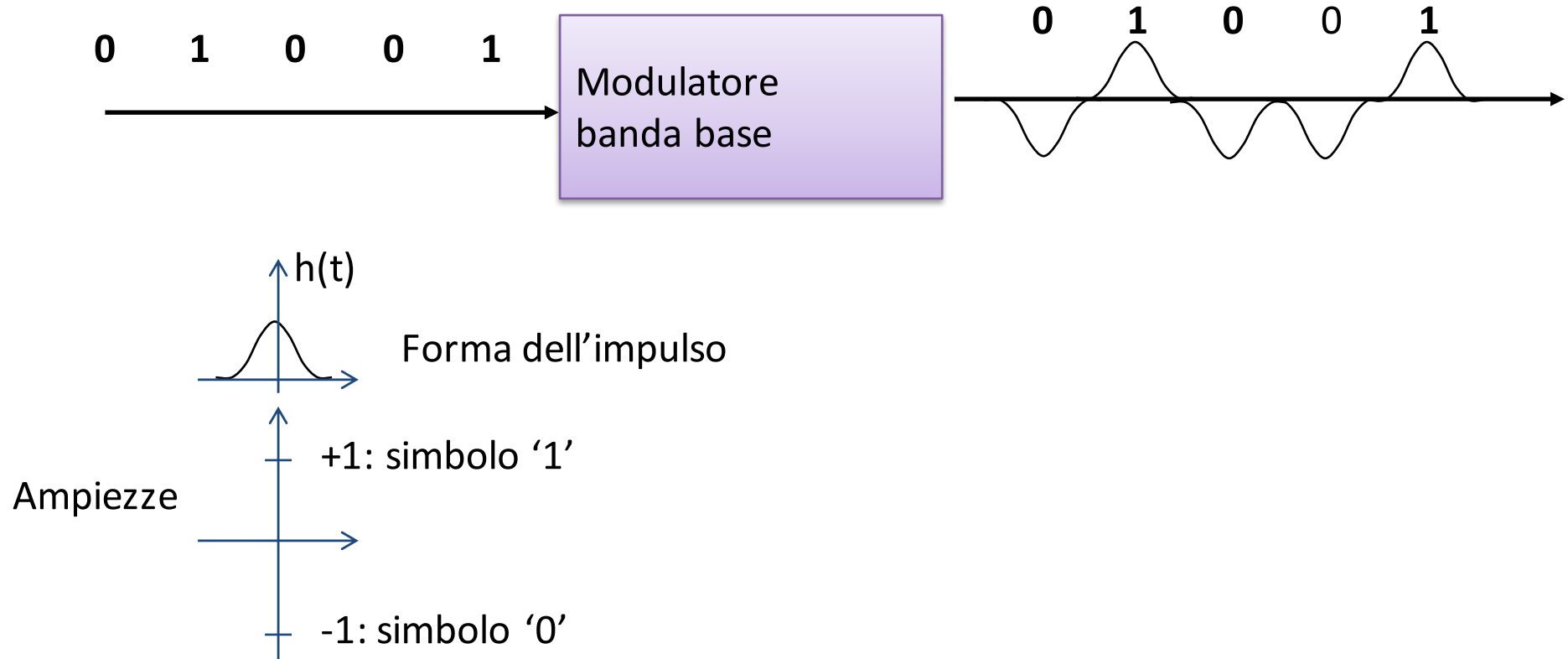
Modulazione

- La modulazione di un segnale può avvenire in banda base o in banda passante
- **Banda base:** i segnali usati nella modulazione hanno uno spettro contiguo rispetto all'origine
- **Banda traslata:** i segnali hanno un spettro traslato su intervalli di frequenze non contigue all'origine



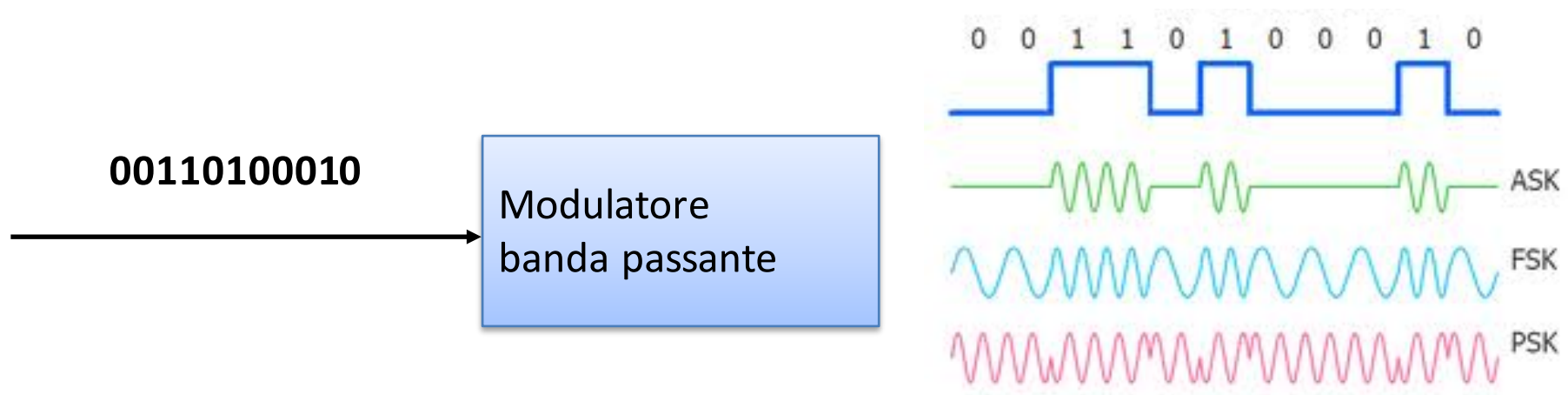
Modulazione

- Esempio: Modulazione d'ampiezza in banda base (PAM)



Modulazione

- Esempio: Modulazioni di ampiezza, frequenza e fase in banda traslata



ASK: Amplitude Shift Keying
FSK: Frequency Shift Keying
PSK: Phase Shift Keying

Mezzi trasmissivi

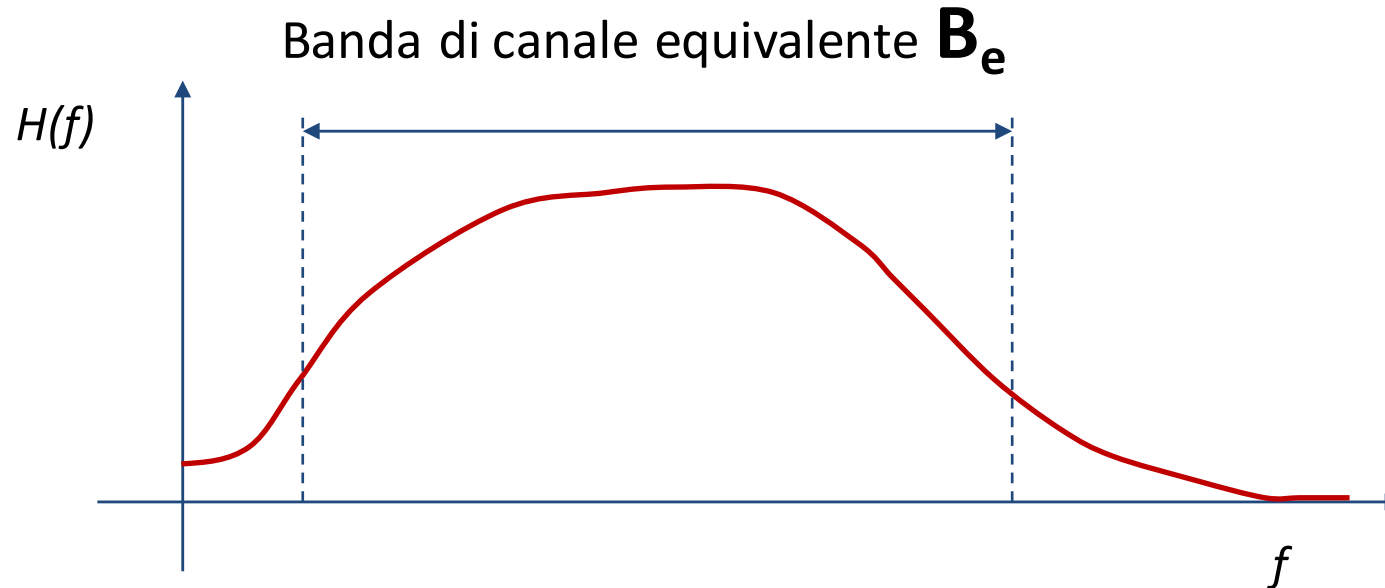
- Il canale trasmissivo è l'insieme di
 - trasmettitore
 - mezzo trasmissivo
 - Ricevitore



- è caratterizzato da una **velocità di trasmissione** v (bps) che dipende dalla banda del mezzo e dalla potenza ricevuta
- e da un ritardo di propagazione del segnale τ

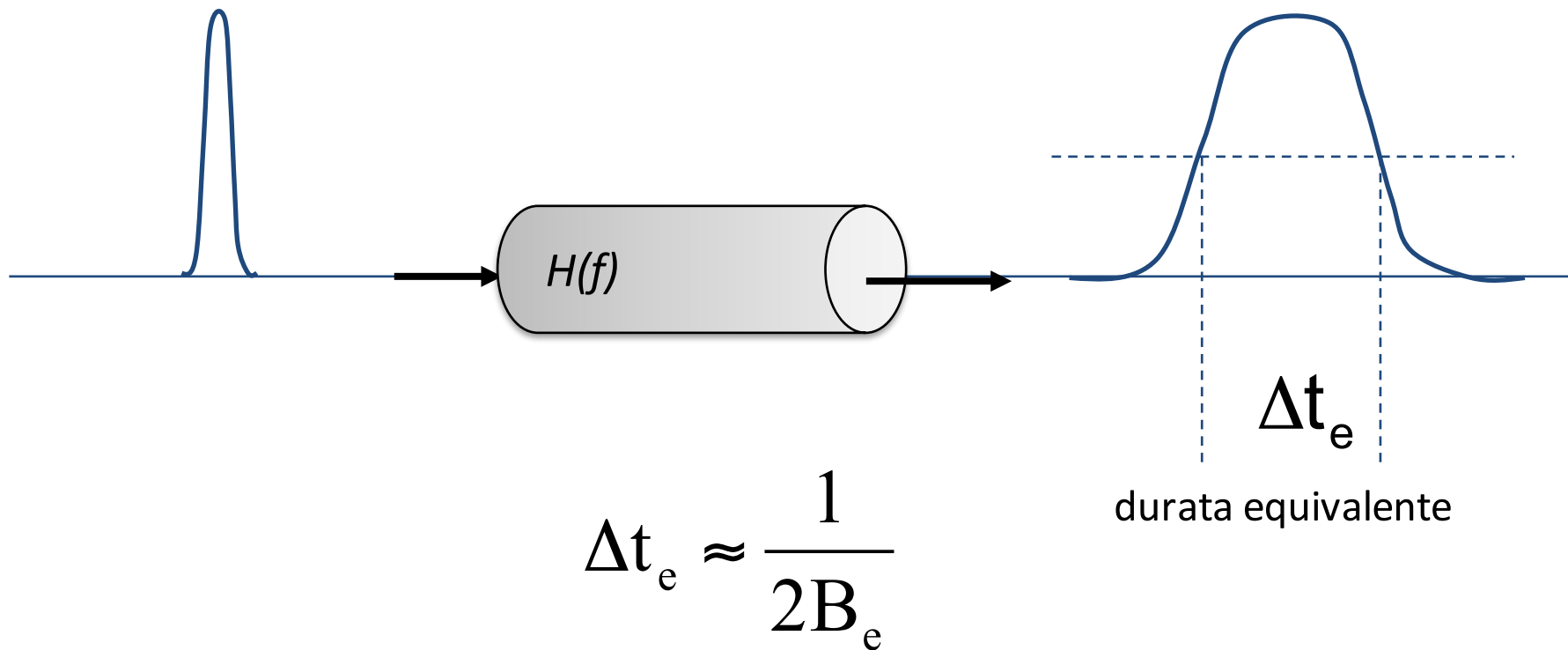
Banda di Canale

- Il mezzo trasmissivo è caratterizzato da una funzione di trasferimento in frequenza $H(f)$ che determina le caratteristiche del segnale in uscita dato quello d'ingresso



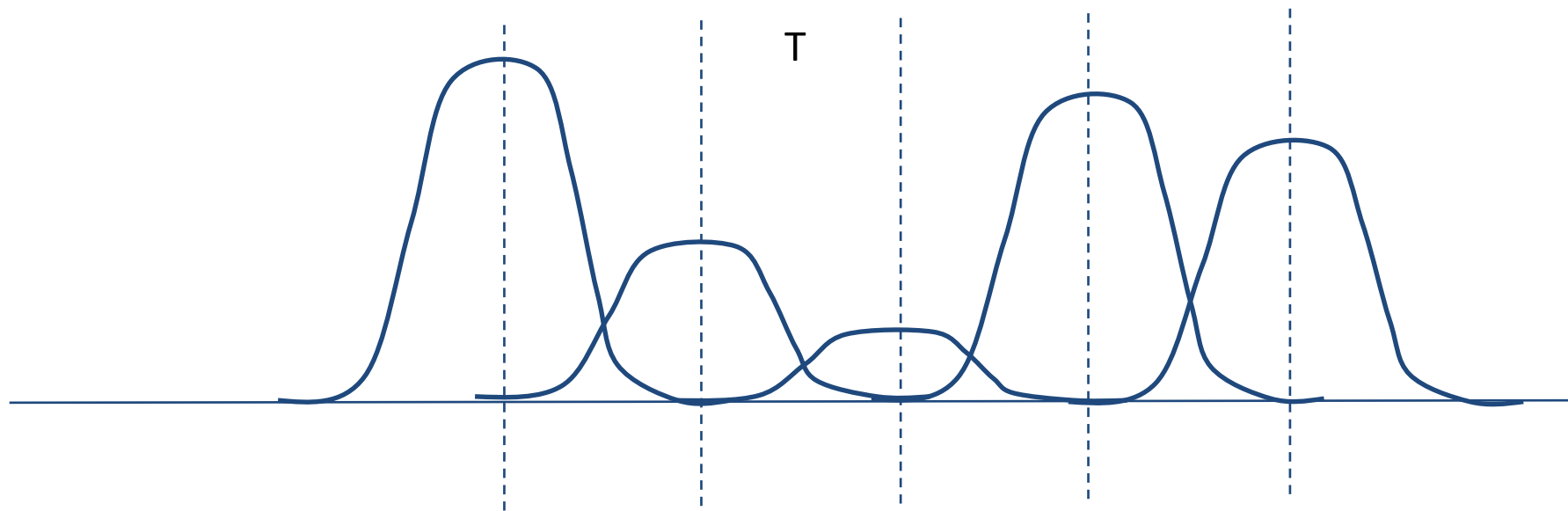
Banda di Canale

- Determina la larghezza dell'impulso ricevuto



Velocità di Canale

- E' la velocità massima di trasmissione degli impulsi
- Si misura in imp/s (baud)



Aaffinché gli impulsi siano distinguibili occorre che $T \geq \Delta t_e \approx \frac{1}{2B_e}$

Velocità massima: $V = \frac{1}{T} \approx 2B_e$



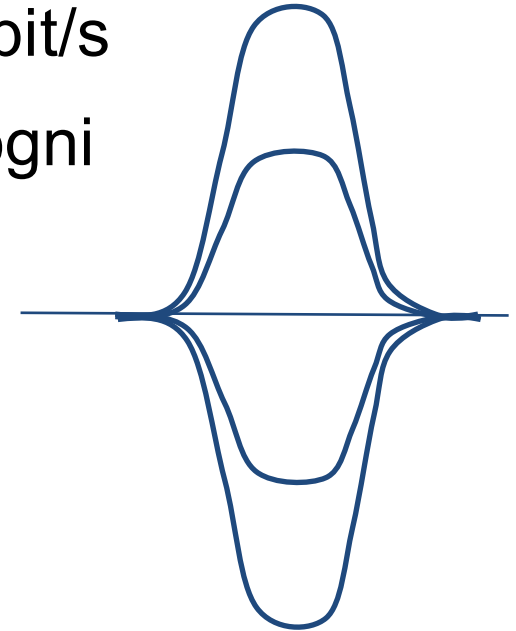
Velocità di trasmissione

- E' la velocità di trasmissione R misurata in bit/s
- Dipende dal n. di bit b (livelli l) associati a ogni impulso

$$b = \log_2 l$$

$$l = 2^b$$

velocità massima $R \approx 2B_e b$



- La velocità massima non può essere aumentata arbitrariamente aumentando i livelli (bit per impulso) a causa del rumore che può far equivocare il livello in ricezione (**errore di ricezione**)



Errori in ricezione

- In ricezione è possibile che venga riconosciuta una sequenza di bit diversa da quella trasmessa (bit errati)

10011010100100100101000101000

10001010100110100101000111000

- cause:
 - **rumore termico** (mezzi trasmissivi, apparati di ricezione e trasmissione)
 - interferenza da altre trasmissioni sullo stesso mezzo
 - disturbi elettromagnetici
 - perdite di sincronismo
 - ...



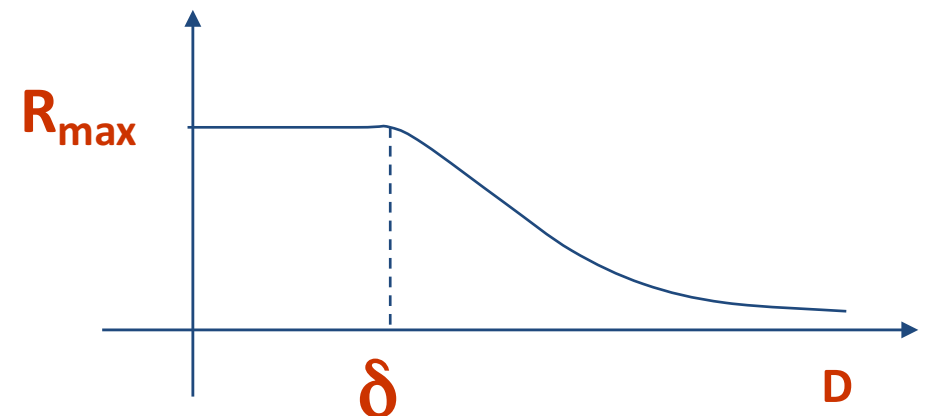
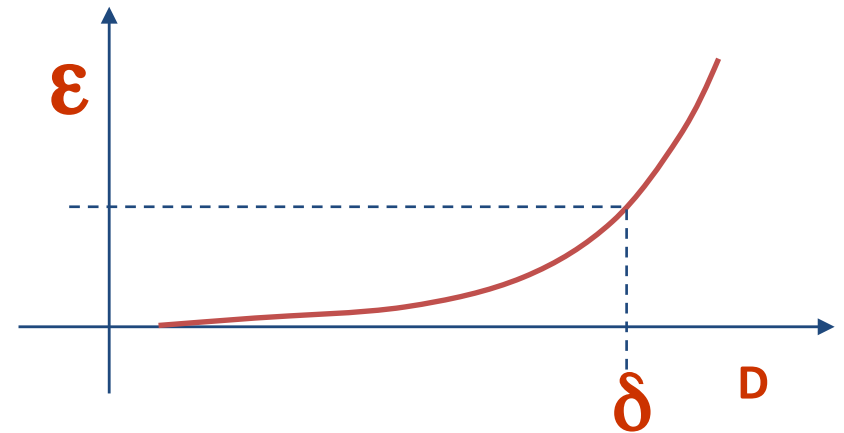
Errori in ricezione

- Il **rumore** è un **processo casuale** che altera il valore dell'impulso misurato in ricezione
- Se l'alterazione è più grande della differenza tra i livelli viene commesso un errore
- A pari livello di rumore, la probabilità d'errore dipende dalla differenza tra i livelli (energia dell'impulso)
- Tale energia dipende dalla potenza del segnale ricevuto
- Il mezzo trasmissivo riduce tale energia (attenuazione del mezzo) tanto più quanto maggiore è la distanza percorsa



Errori in ricezione

- Esiste un limite alla potenza trasmessa (e ricevuta)
- Dunque, fissato l'errore e esiste un limite alla distanza massima raggiungibile con una certa velocità R
- Oltre questo limite si può aumentare la distanza raggiunta riducendo la velocità R



Codici correttori

- Si può abbassare la probabilità d'errore in un blocco adottando codici correttori d'errore (Forward Error Correction -FEC)
- Questi consistono nell'aggiungere dei bit di ridondanza (parità) in modo che gli errori che occorrono, se limitati in numero, possono essere corretti: codice (n,k)

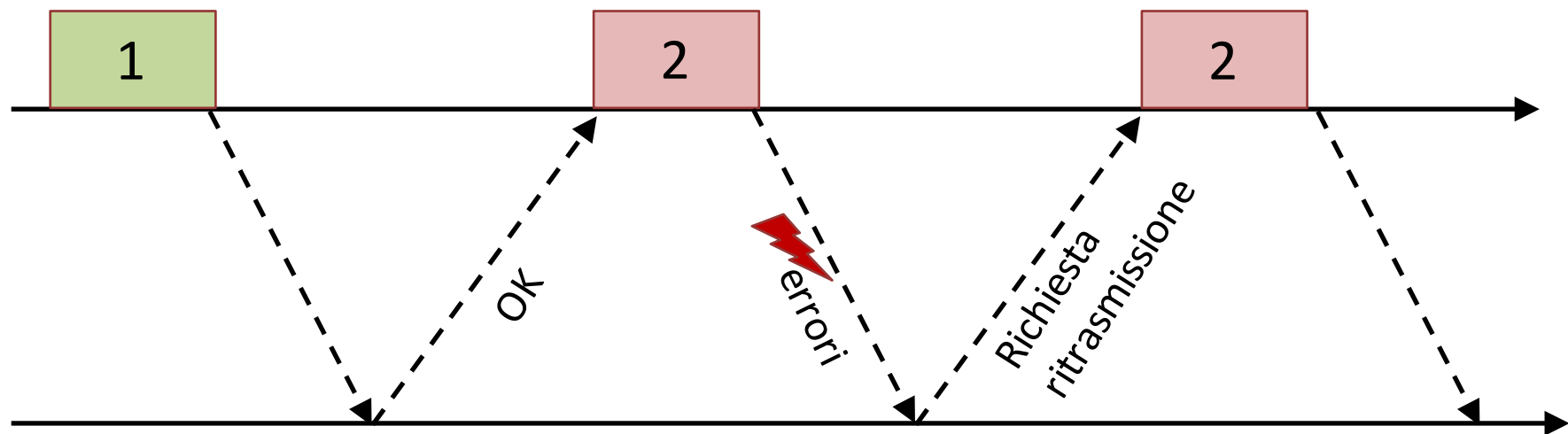


- sono progettati in modo da correggere sino a c errori (potere correttore del codice)
- **Esempio:** Codice a ripetizione $(n,1)$: consiste nella ripetizione n volte del bit da trasmettere ($n-1$) cifre di parità. Con n dispari è in grado di correggere $c=(n-1)/2$ errori



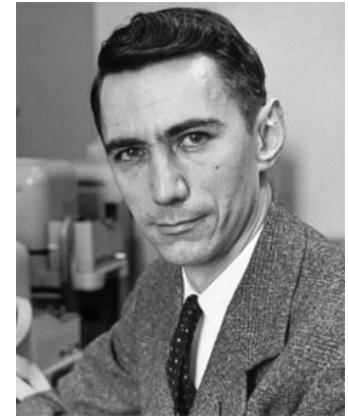
Ritrasmissione

- Se un codice non riesce a correggere un errore può spesso riuscire a rilevarlo (il controllo di parità dà risultato negativo)
- Nella trasmissione a commutazione di pacchetto è possibile rilevare gli errori in ricezione e richiedere la ritrasmissione del pacchetto errato (**ARQ – Automatic Repeat reQuest**)



Capacità di canale

- In ogni caso, nonostante codici e ritrasmissione, esiste un **limite alla velocità massima di un canale**
- Tale velocità detta **Capacità di Canale** è stata scoperta e dimostrata da **Claude Shannon** nel 1940



$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

C : capacità di canale [bps]

B : banda del canale [Hz]

S : potenza del segnale [w]

N : potenza del rumore [w]

