



# **1f – Livello Fisico**

**Antonio Capone**



**POLITECNICO**  
MILANO 1863



# Segnali e frequenze

# Informazione e segnali

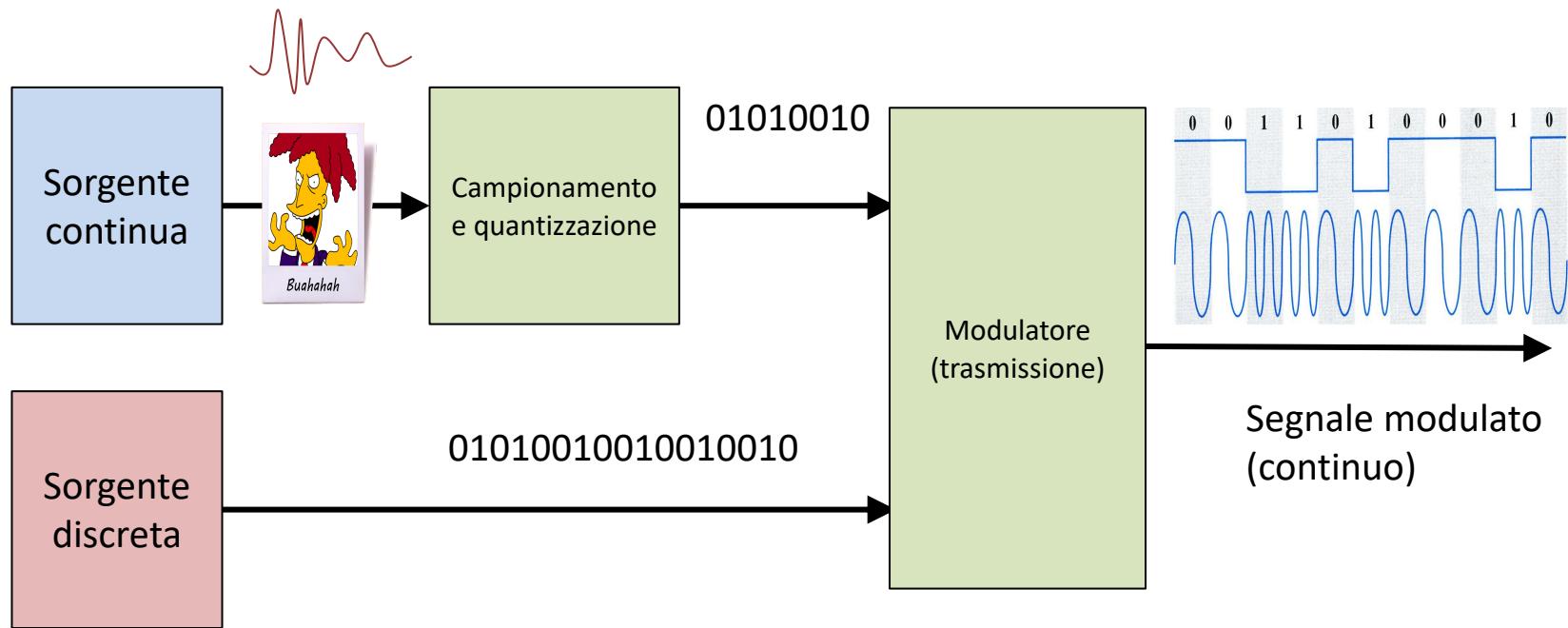
- **Segnali logici (sorgenti numeriche)**
  - Sequenze nativamente numeriche
- **Segnali fisici (sorgenti continue)**
  - Associati a grandezze fisiche e tipicamente continui

Segnali digitali  
(discreti)

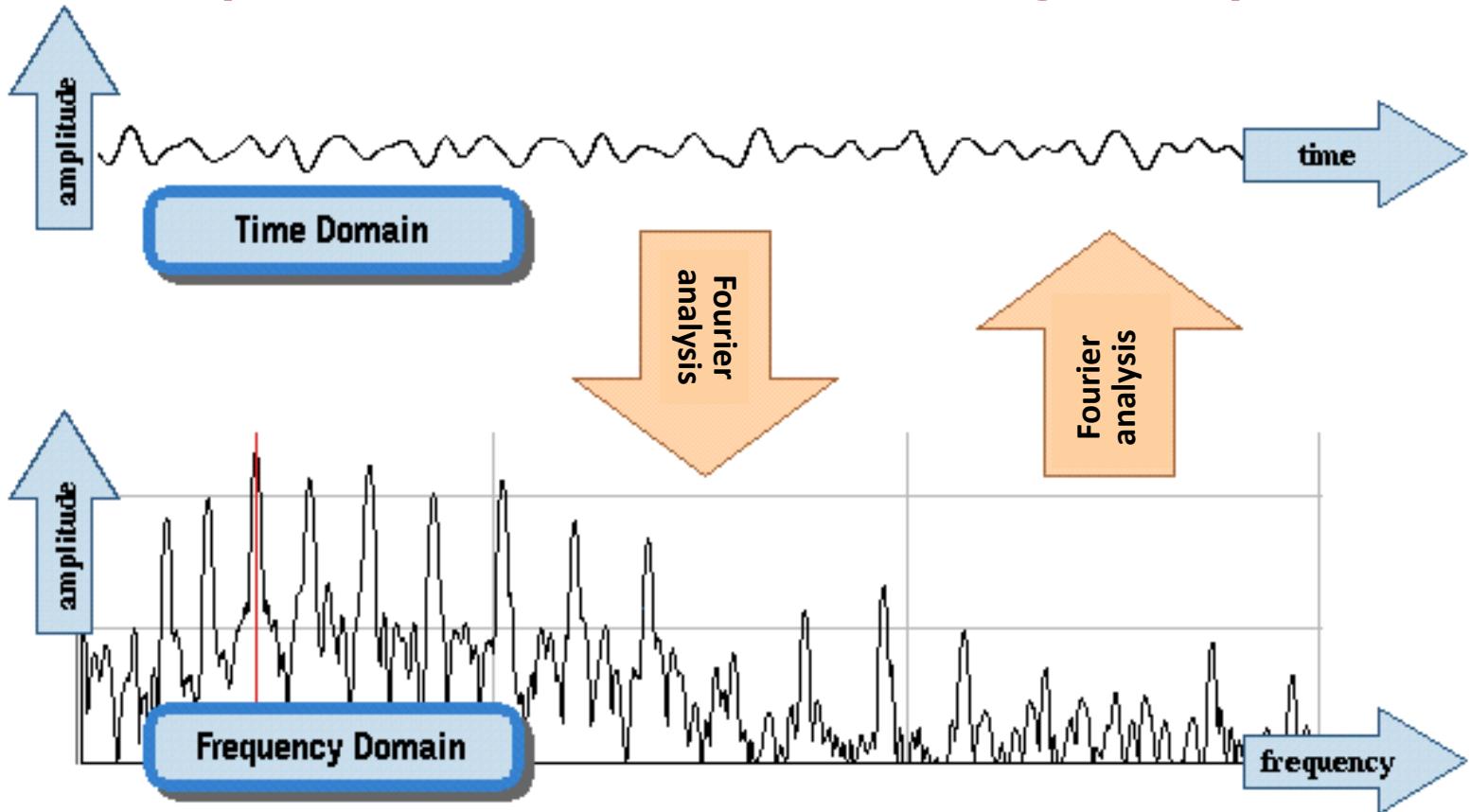
Segnali analogici  
(continui)



# Dalla generazione alla trasmissione digitale di informazione



# Dominio del tempo e dominio delle frequenze (banda/spettro del segnale)

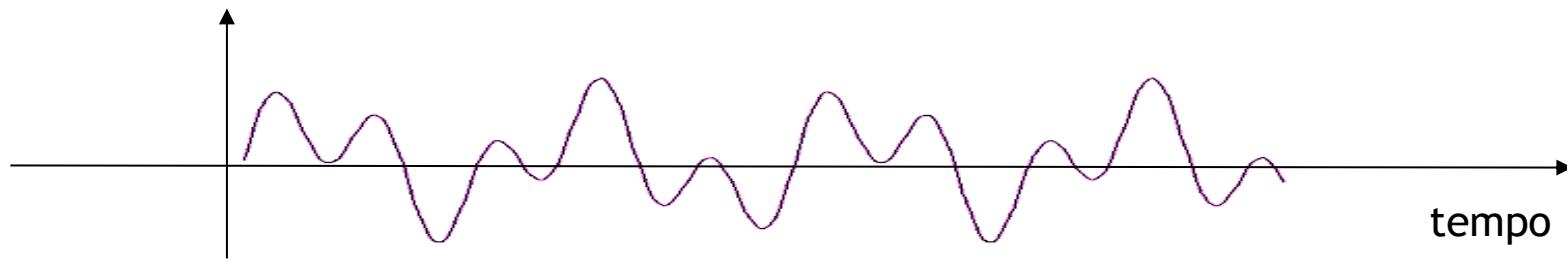


- tempo  $t$  misurato in secondi (s)
- frequenza  $f$  misurata in Hertz (Hz)

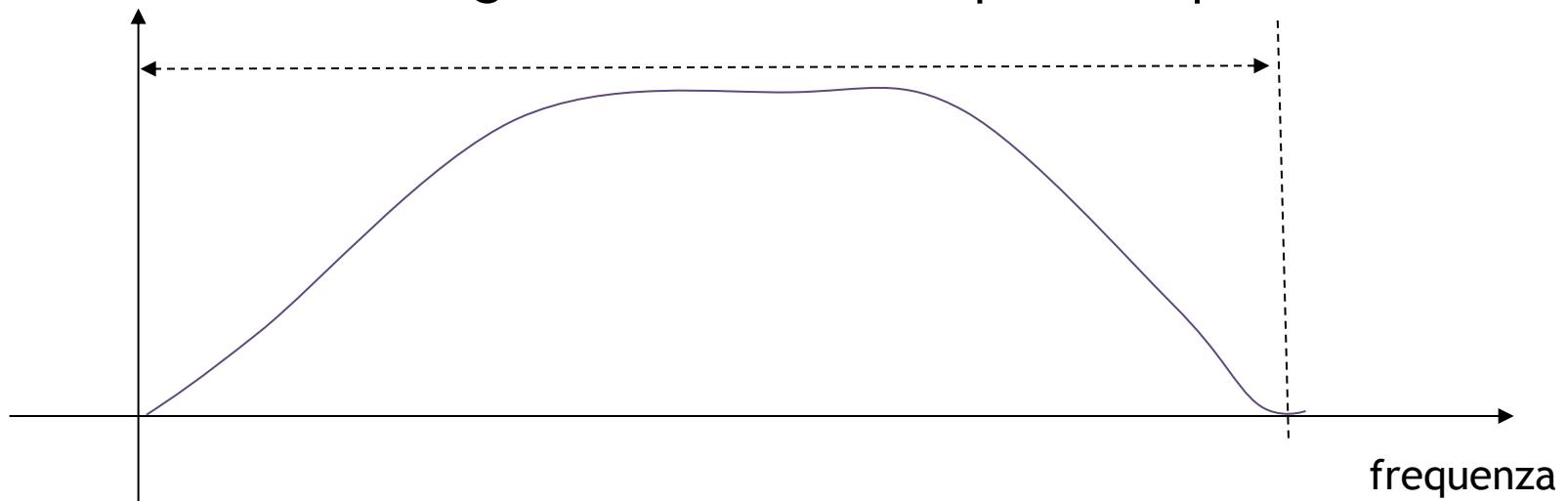


# Banda di un segnale

- E' l'intervallo di componenti in frequenze (sinusoidi nel dominio del tempo) che descrivono il segnale.

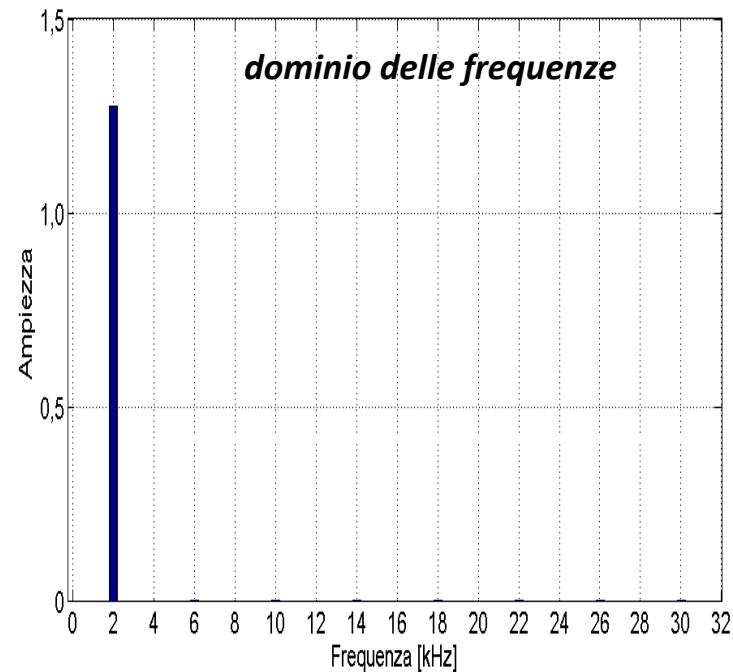
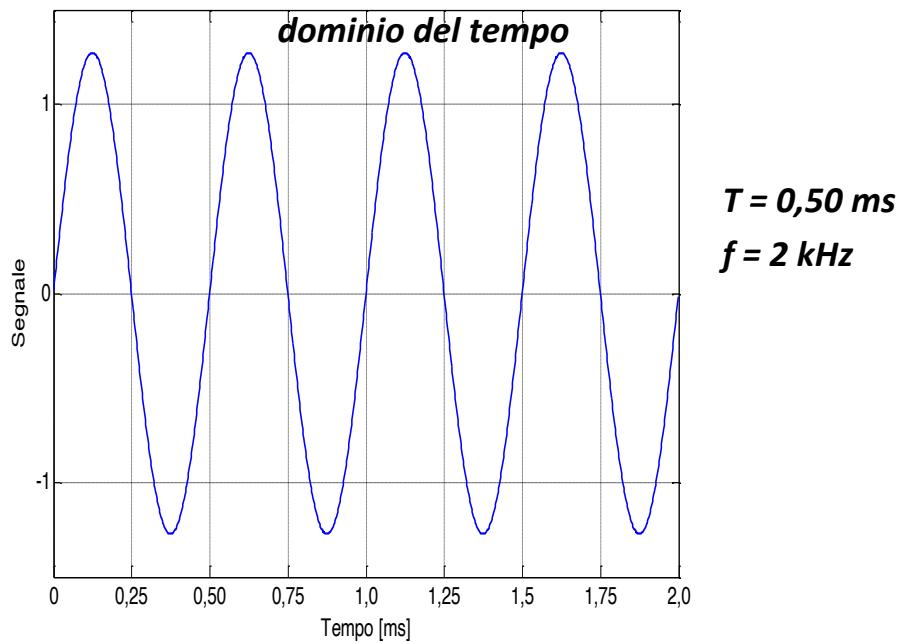


**banda del segnale** = massimo campo di frequenze usato



# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

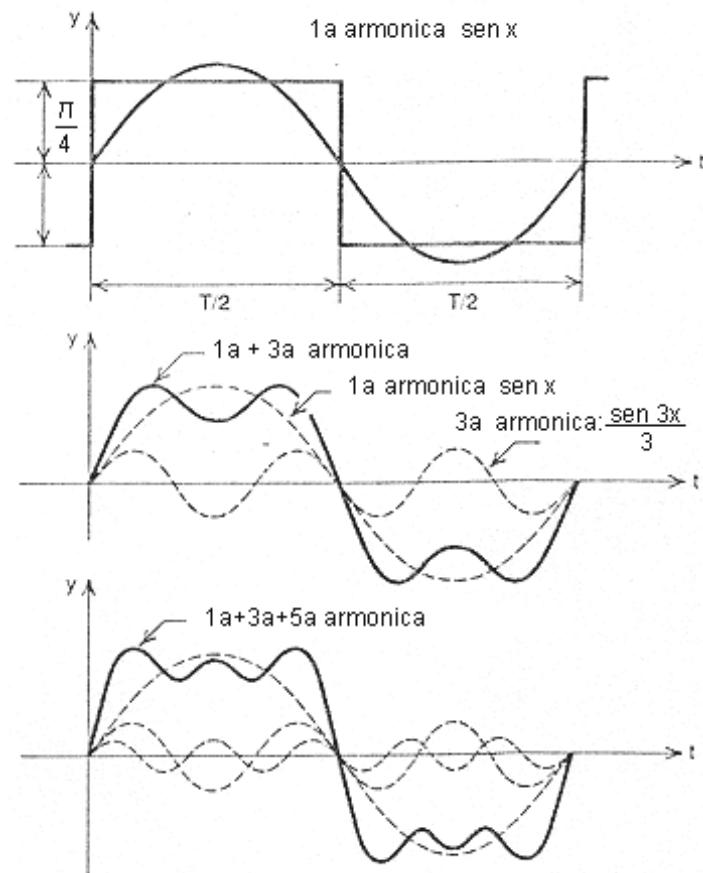
- L'analisi di Fourier consente di studiare qualsiasi segnale scomponendolo in sinusoidi
  - Una sinusoide *nel dominio del tempo* di periodo  $T$  e frequenza  $f=1/T$  può essere rappresentata *nel dominio delle frequenze* dalla sola componente alla frequenza  $f$



# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- L'analisi di Fourier consente di studiare qualsiasi segnale scomponendolo in sinusoidi
  - Qualsiasi segnale periodico di periodo  $T$  e frequenza  $f=1/T$  nel dominio del tempo può essere scomposti in un numero discreto di sinusoidi di frequenza multipla di quella del segnale (*serie di Fourier*)
  - Le sinusoidi componenti sono dette armoniche

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

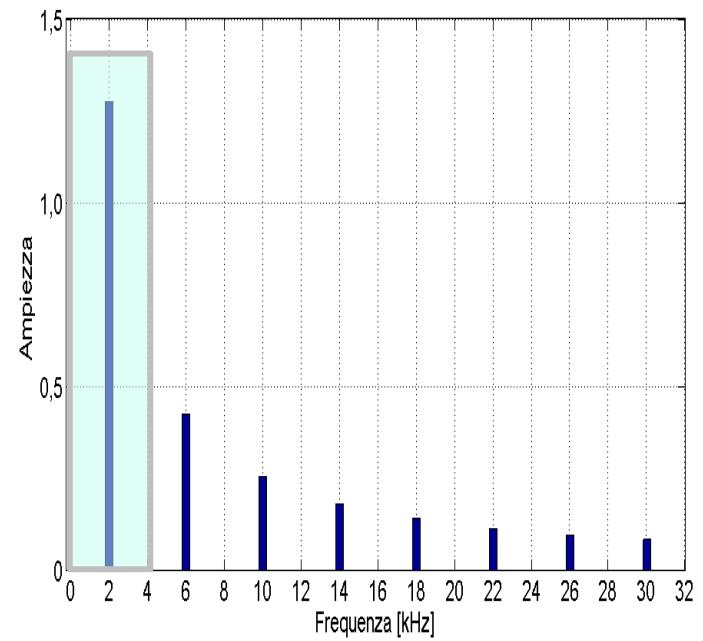
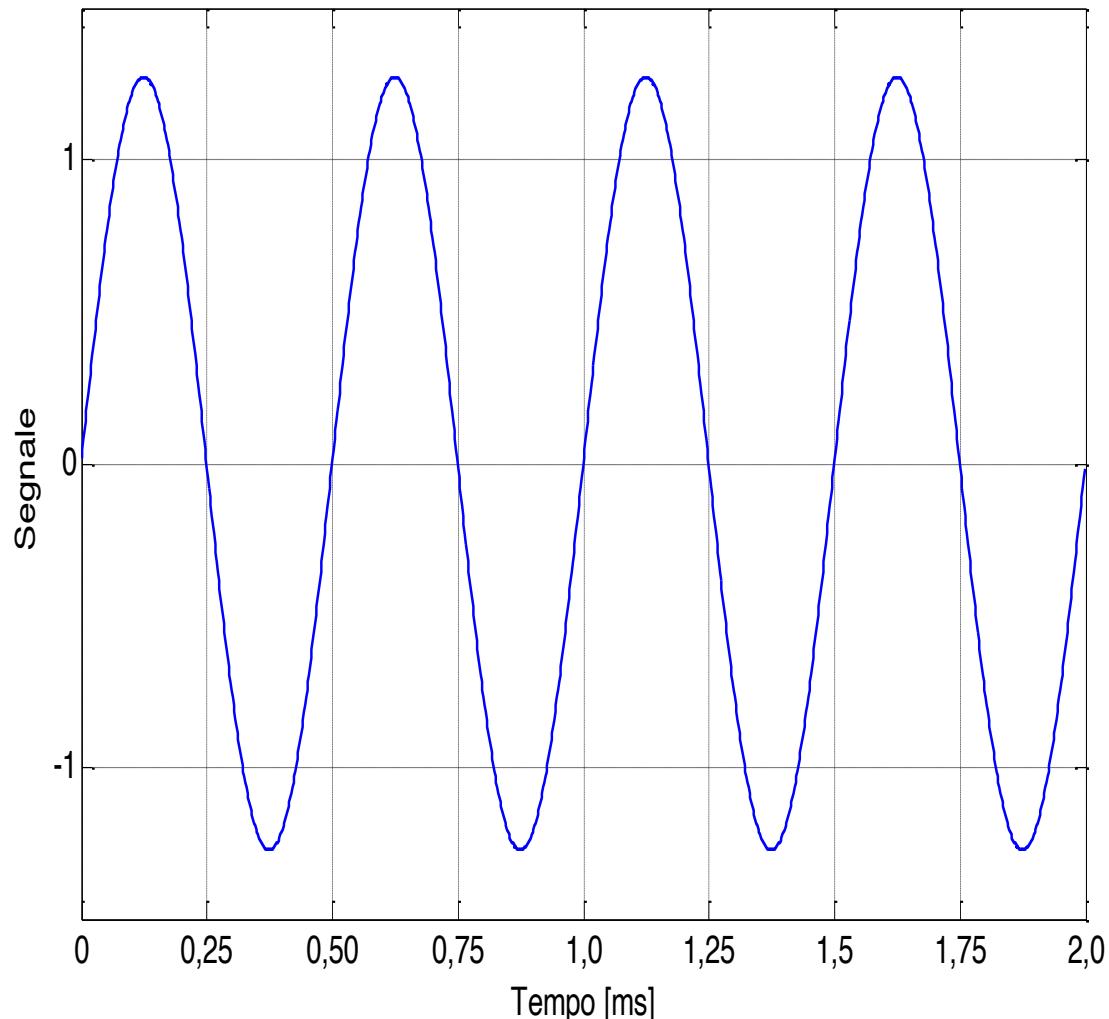


# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

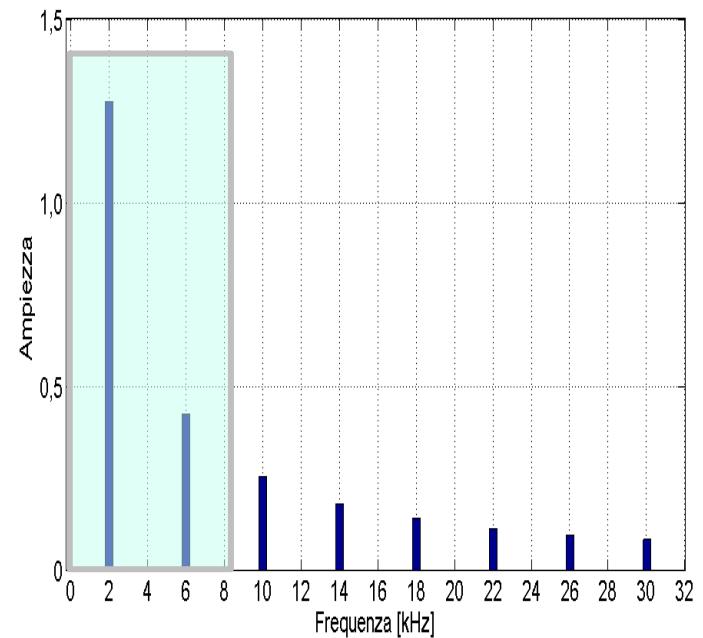
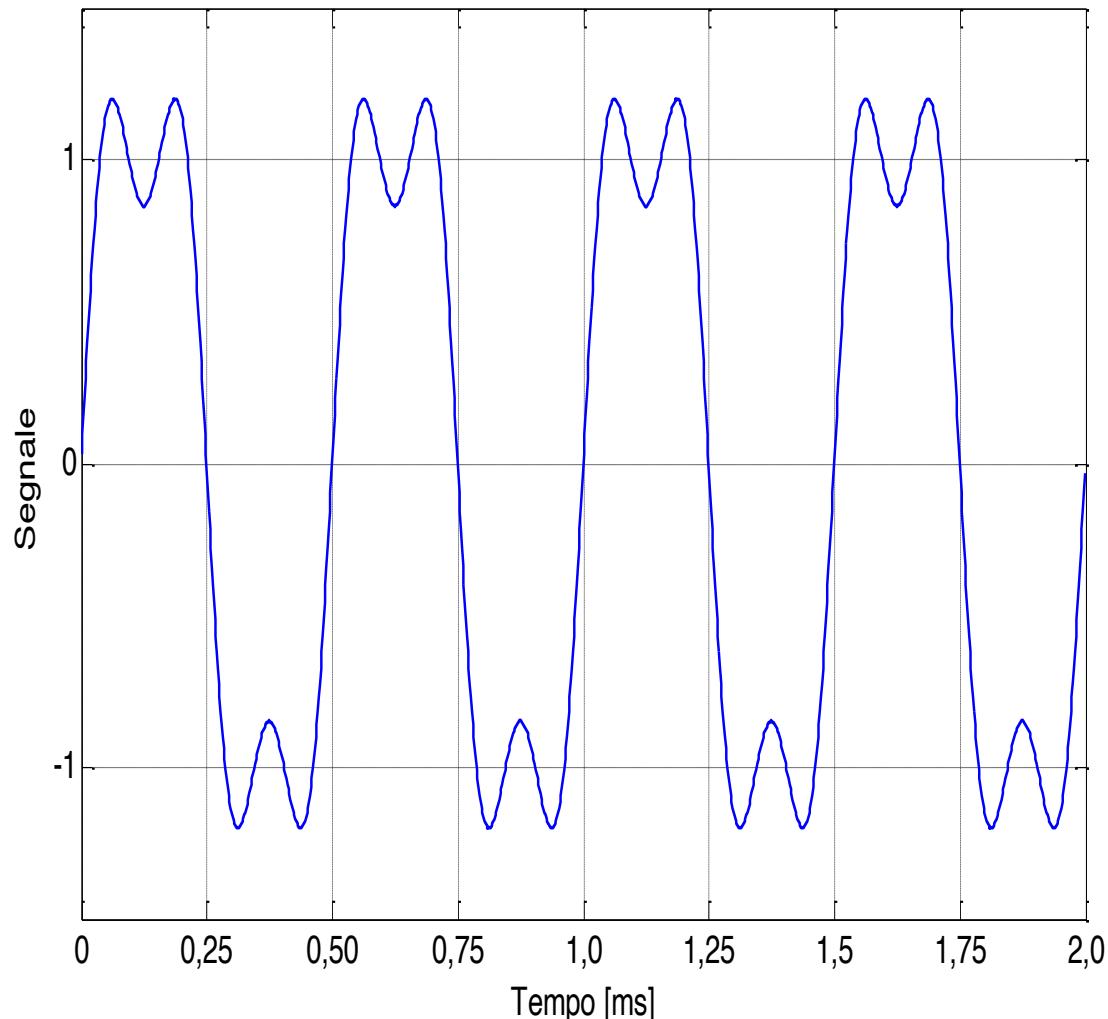
- Qualsiasi segnale  $s(t)$  periodico nel dominio del tempo è del tutto equivalente alla somma delle armoniche sinusoidali (componenti in frequenza), ognuna con la propria ampiezza e frequenza.
- Il segnale  $s(t)$  variabile nel tempo può quindi essere rappresentato nel dominio delle frequenze dalle sue componenti in frequenza che costituiscono lo **SPETTRO del segnale  $S(f)$** .



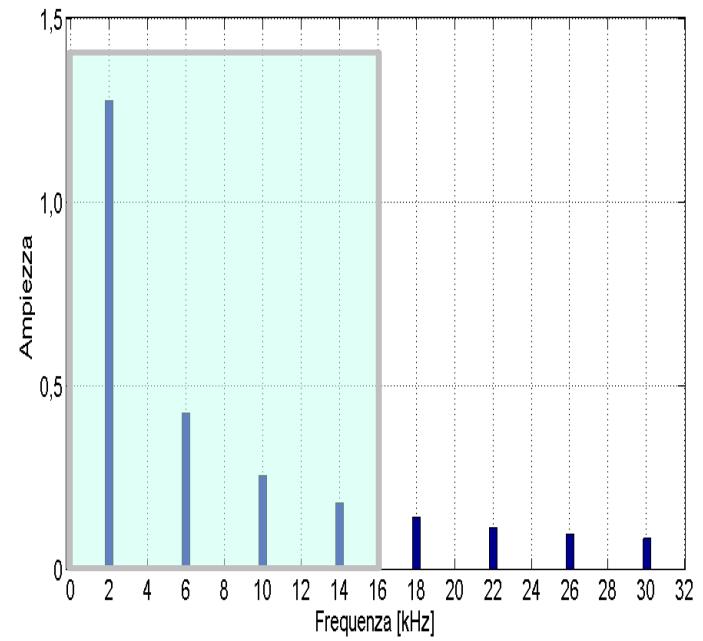
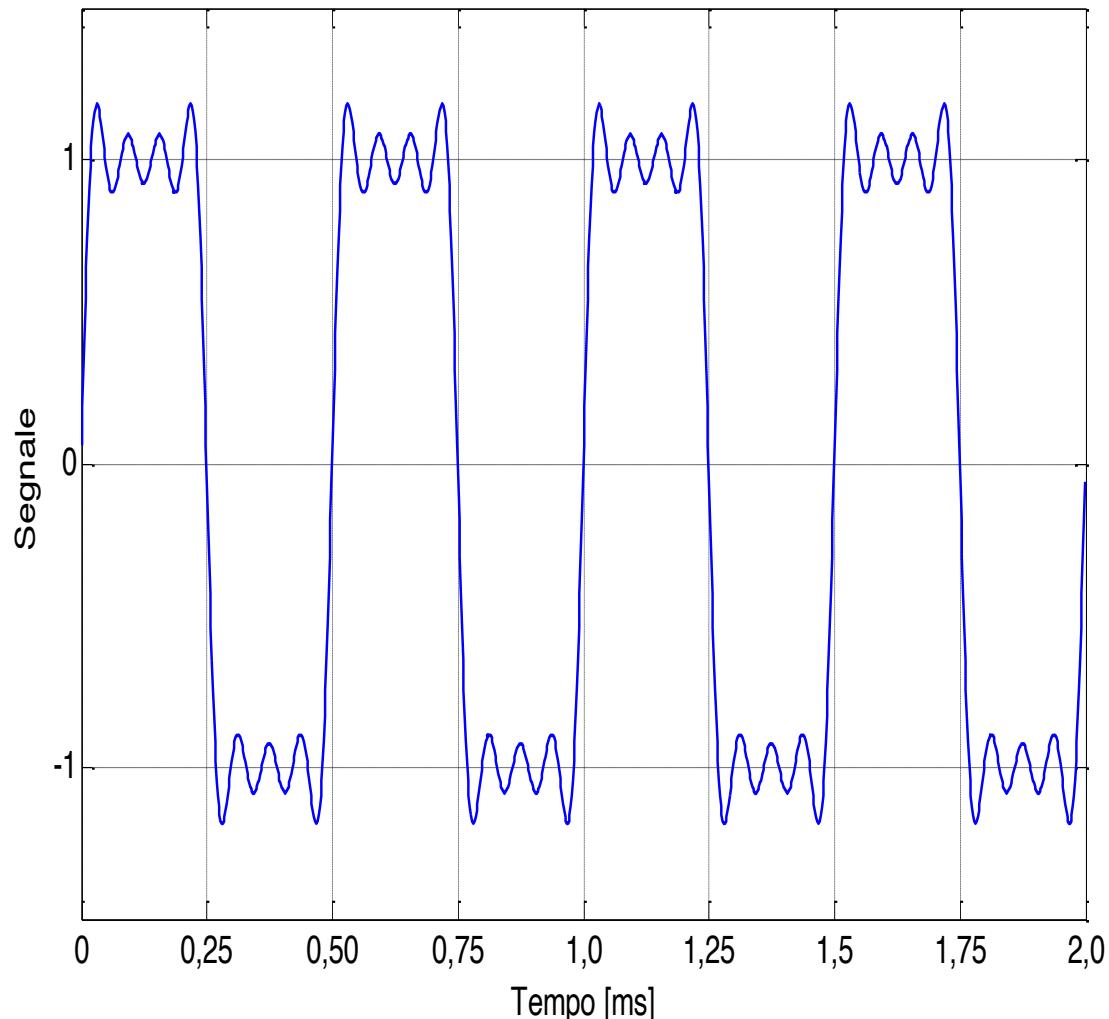
# Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*



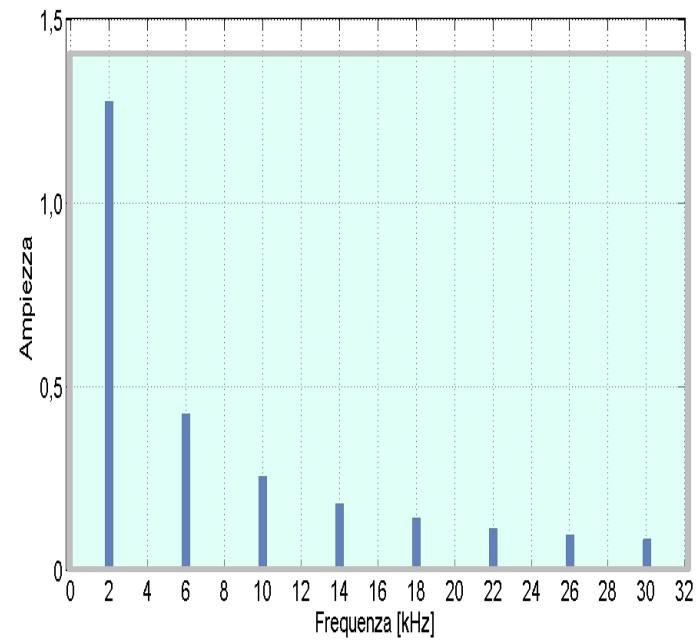
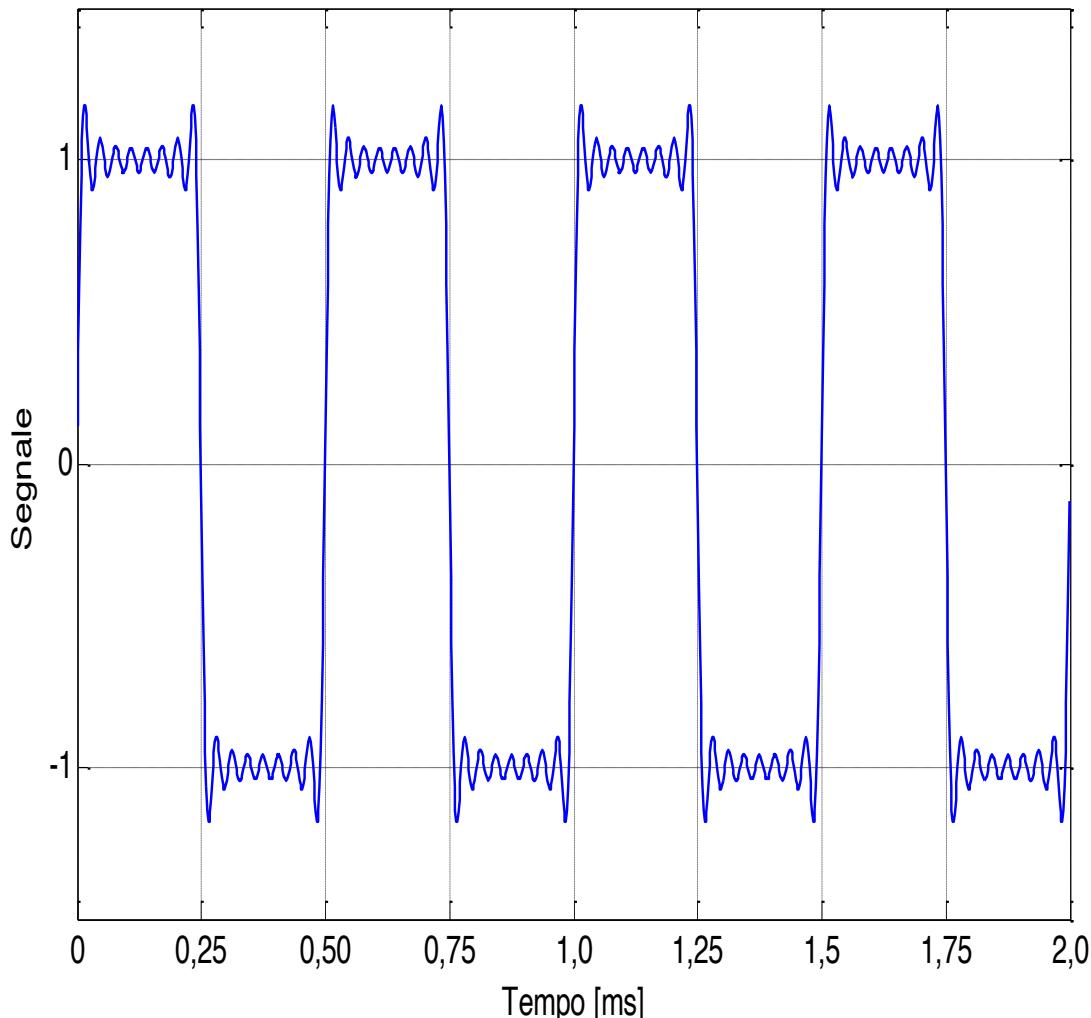
# Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*



# Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*

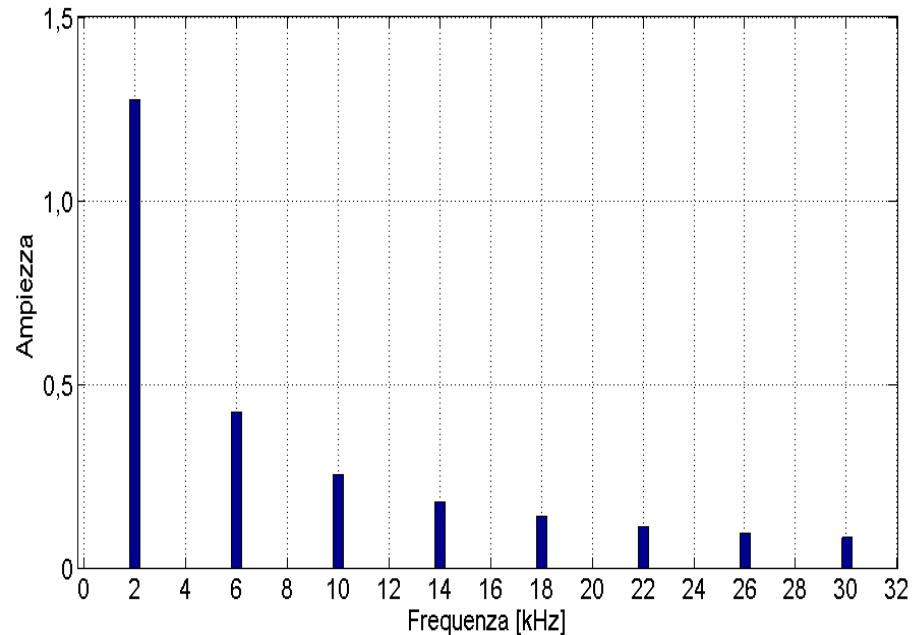
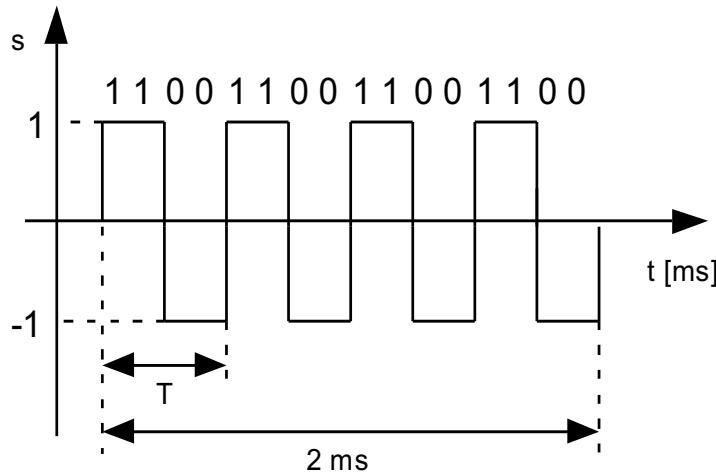


# Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*



# Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*

$$s(t + T) = s(t) \quad t \geq 0$$

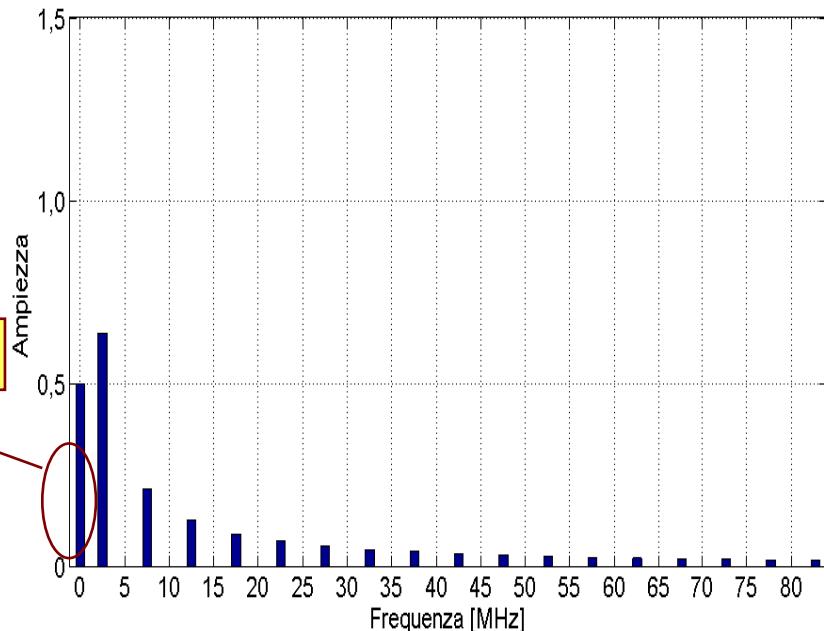
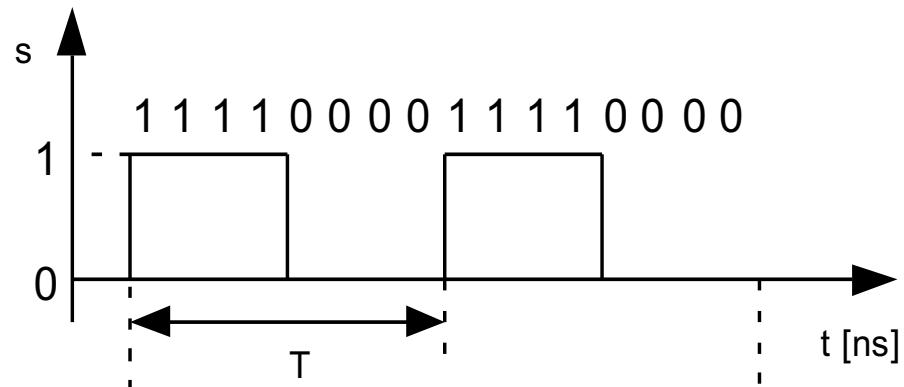


- Spettro con armoniche dispari
- La forma dello spettro dipende
  - dalla durata del singolo periodo  $T$  ( $\rightarrow$  determina le frequenze delle armoniche)
  - dalla forma dell'impulso che rappresenta il singolo periodo ( $\rightarrow$  determina il valore dei coefficienti)



# Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

- Onda quadra con media non-nulla
- Nel tempo c'è una componente costante
- Nelle frequenze c'è una componente a frequenza  $f=0$  (componente continua)

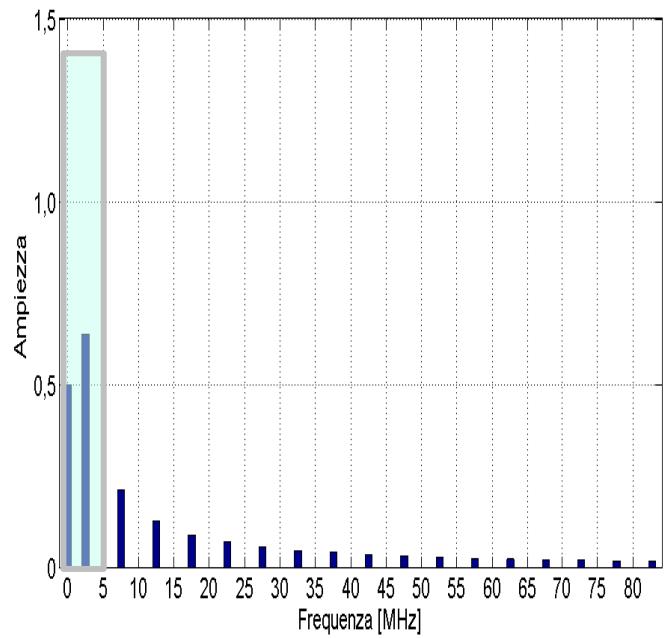
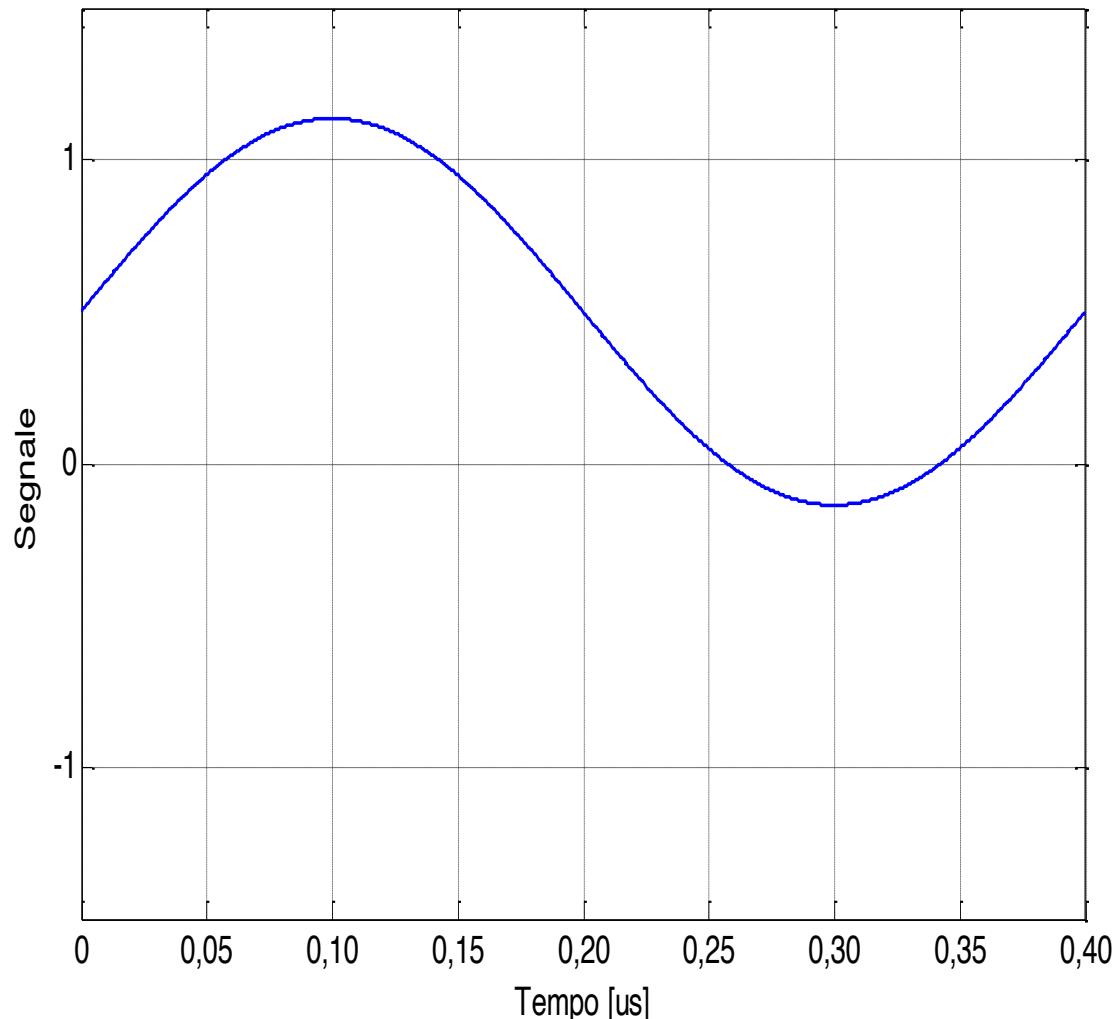


Componente continua



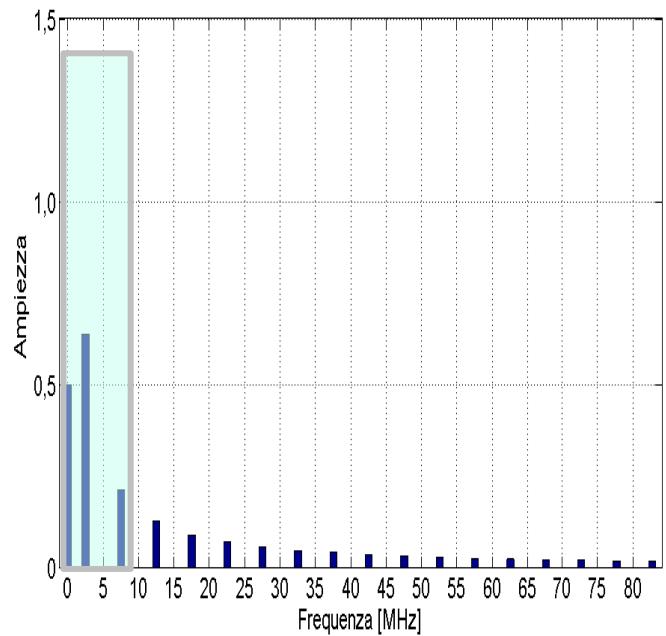
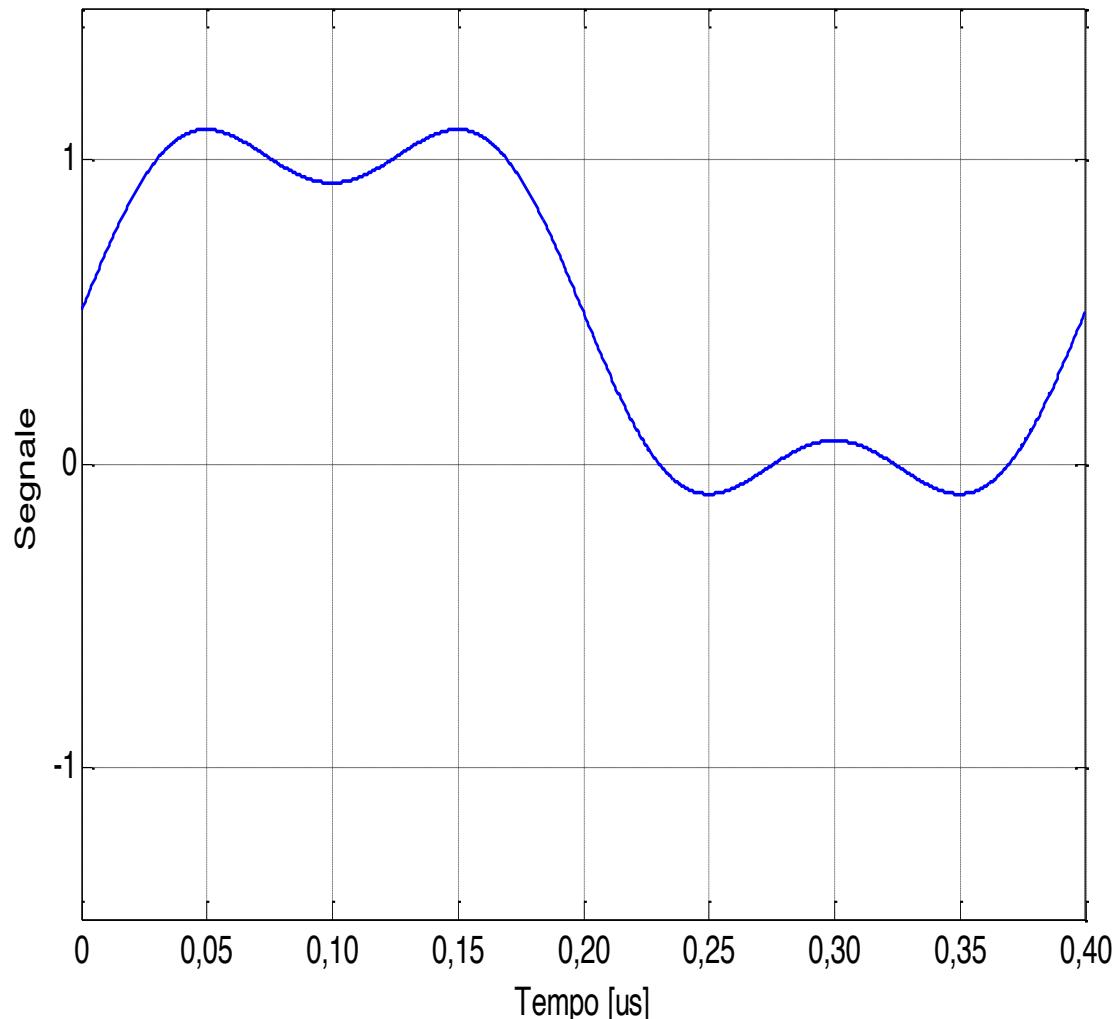
# Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

$W = 5 \text{ MHz}$



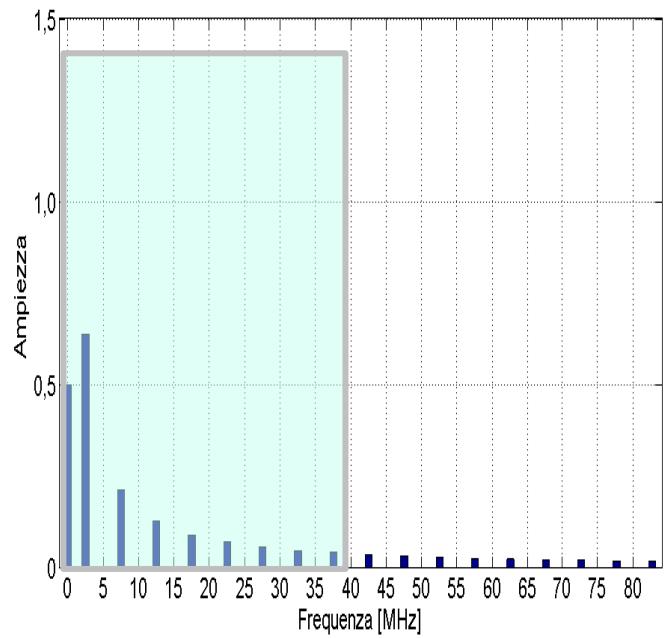
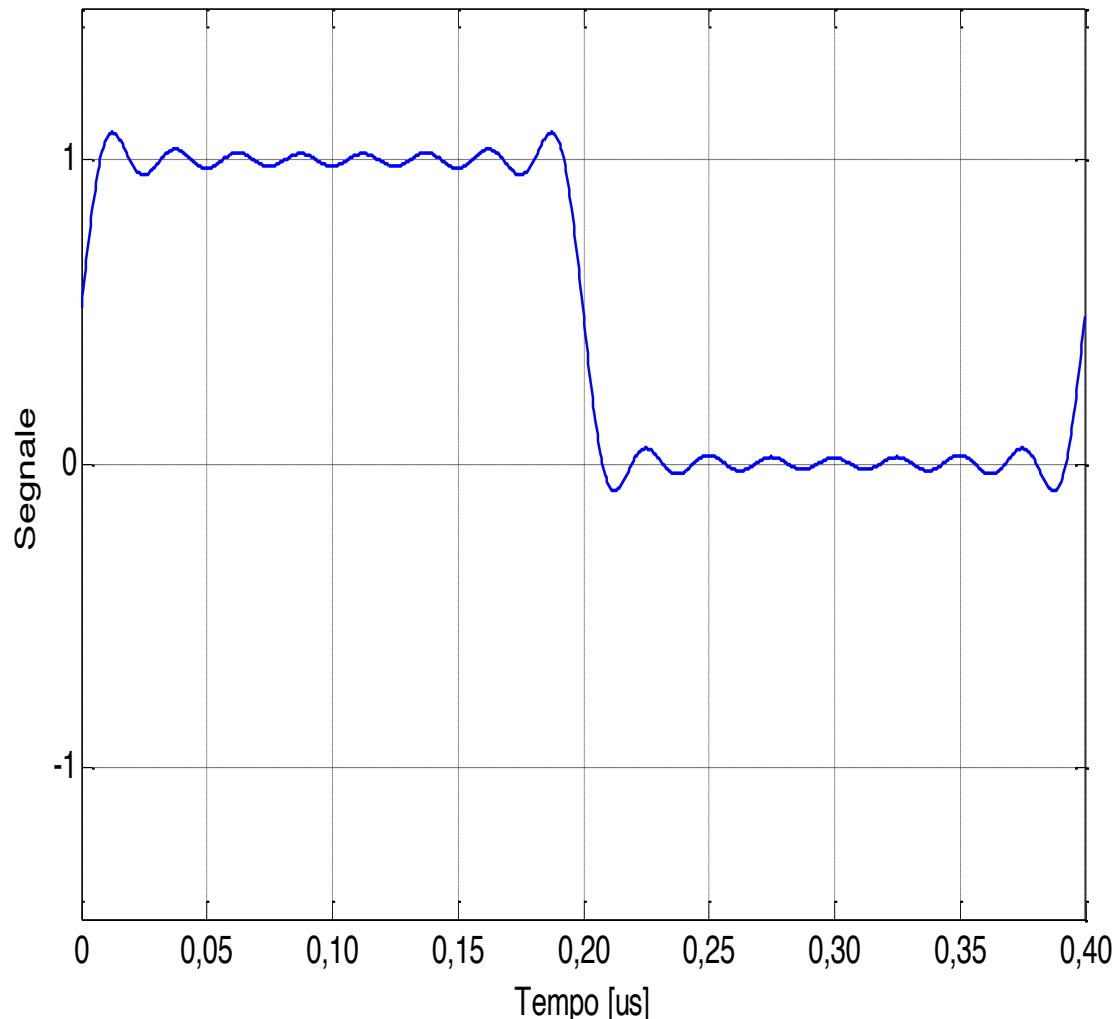
# Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

$W = 10 \text{ MHz}$



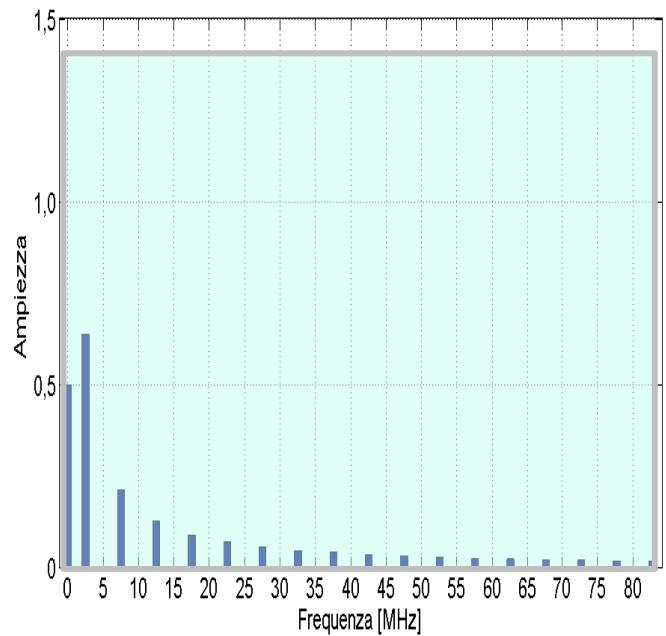
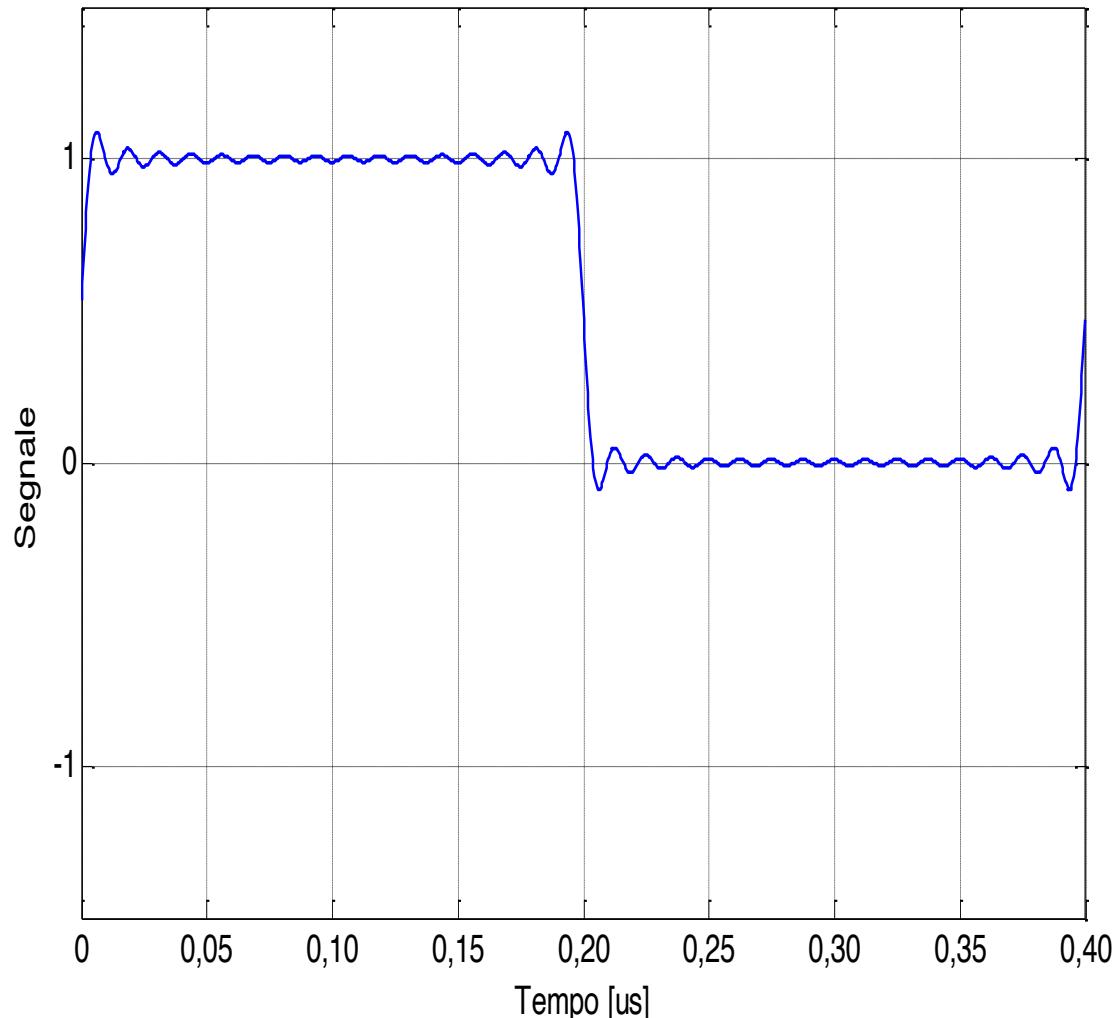
# Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

$W = 40 \text{ MHz}$



# Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

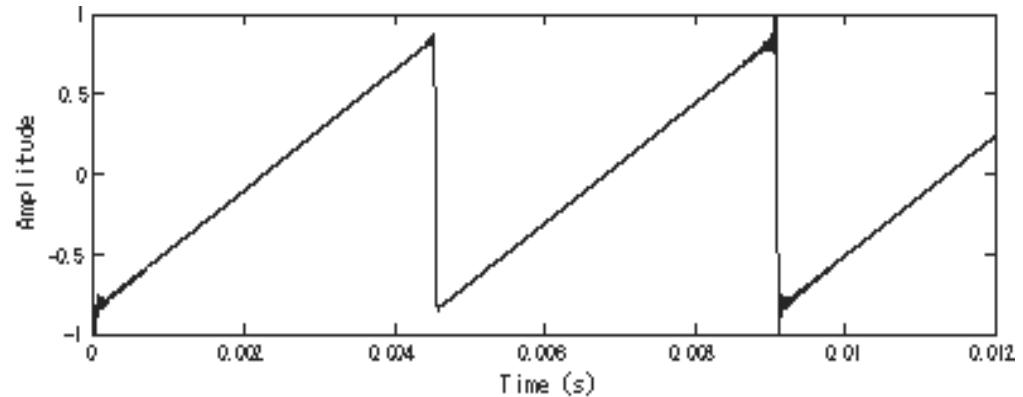
$W = 80 \text{ MHz}$



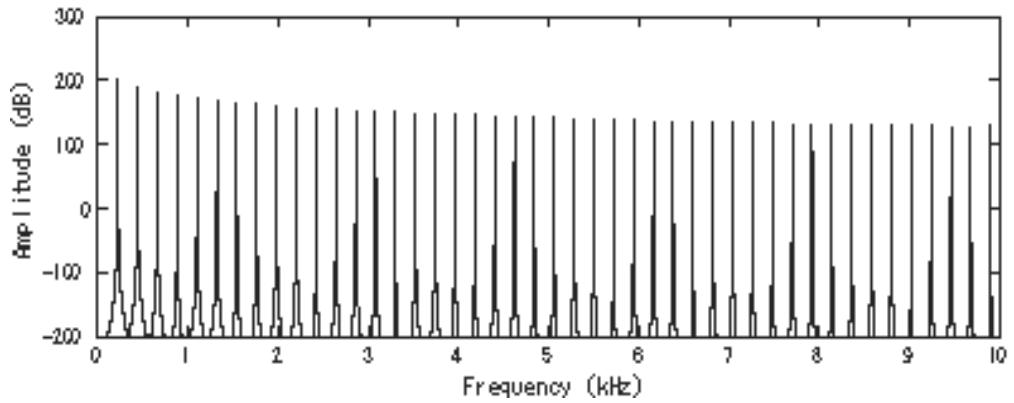
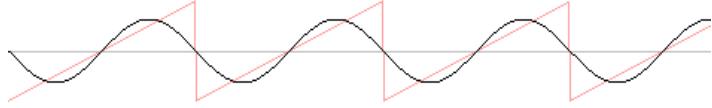
# Spettro di un segnale: *dente di sega*

Onda a dente di sega

Spettro con armoniche  
sia pari che dispari

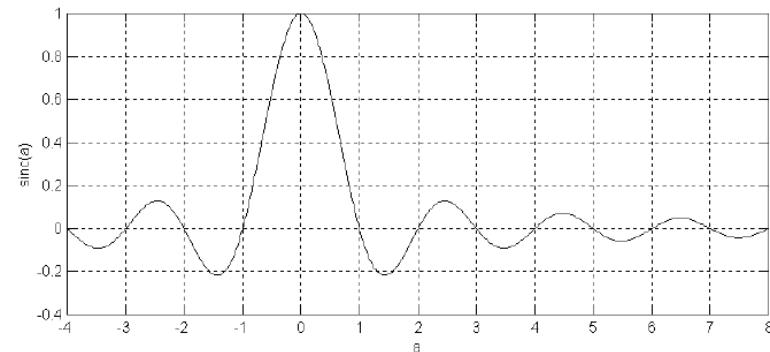
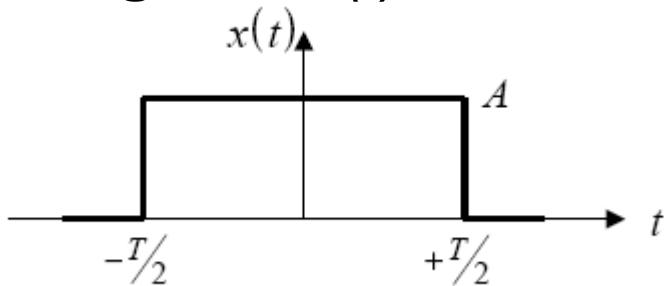


harmonics: 1



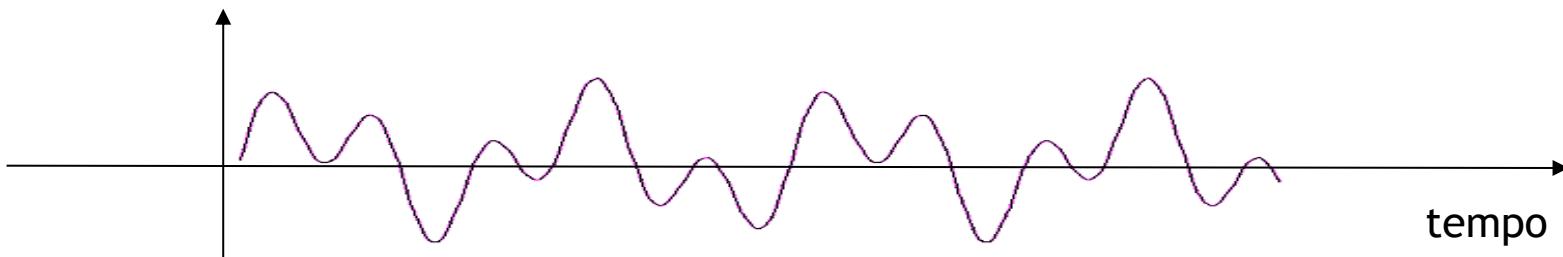
# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- L'analisi di Fourier è estendibile a qualsiasi segnale variabile nel tempo.
- Qualsiasi segnale variabile nel tempo (anche non periodico) è del tutto equivalente alla somma di funzioni sinusoidali (componenti in frequenza), ognuna con la propria ampiezza e frequenza.
- Il segnale  $s(t)$  variabile nel tempo può quindi essere rappresentato nel dominio delle frequenze dalle sue componenti in frequenza che costituiscono lo **SPETTRO del segnale  $S(f)$** .

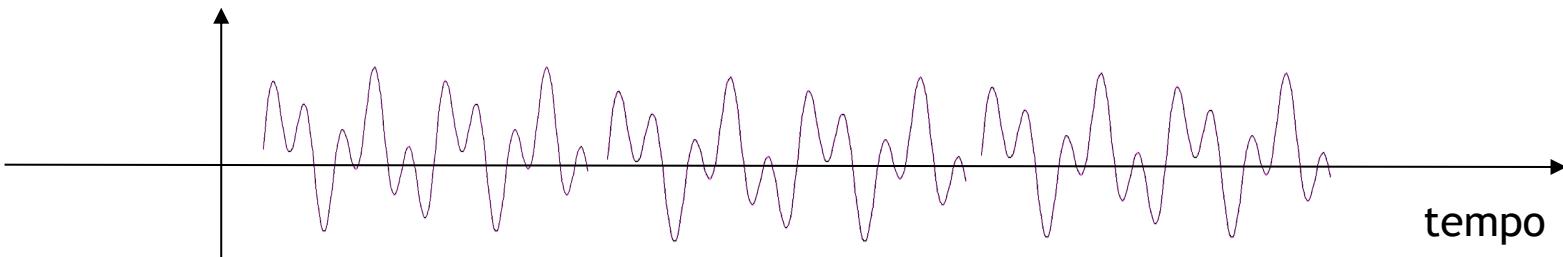


# Effetto temporale della banda

**banda stretta:** segnali che variano lentamente nel tempo

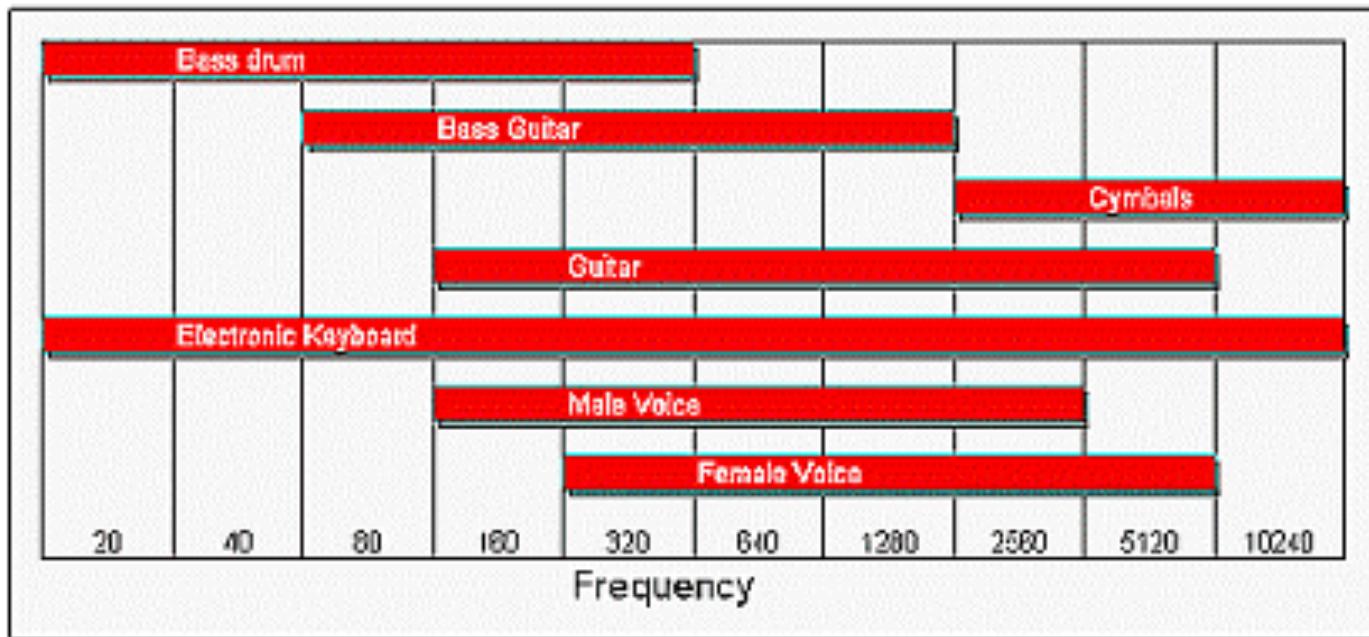


**banda larga:** segnali che variano velocemente nel tempo



# Segnali e Bande

Segnali musicali: da 50 Hz a 20 kHz



# Esempi di bande occupate da segnali per TLC

Segnale	Banda
Segnale telefonico	<b>300-4000 Hz</b>
Voce	<b>300-8000 Hz</b>
Musica	<b>100-20.000 Hz</b>
TV (PAL)	<b>0-5.000.000 Hz (5 MHz)</b>
Cinema	<b>0-500 MHz</b>





**POLITECNICO**  
MILANO 1863



# Conversione analogico-digitale

# Conversione analogico/digitale

La rappresentazione  
umana della realtà è  
**“continua”**

↓  
mondo analogico

Gli elaboratori numerici  
gestiscono informazione  
**“discreta”**

↓  
mondo digitale

**È necessario trasformare i segnali analogici  
in un loro equivalente digitale**

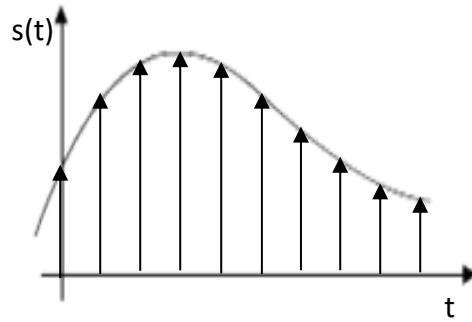


# Campionamento

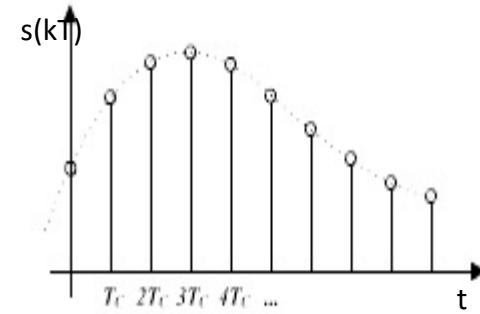
Segnale analogico



campionamento



segnale campionato



- Ogni segnale analogico di banda B può essere ricostruito interamente in base ai suoi campioni presi a frequenza  $2B$



# Campionamento

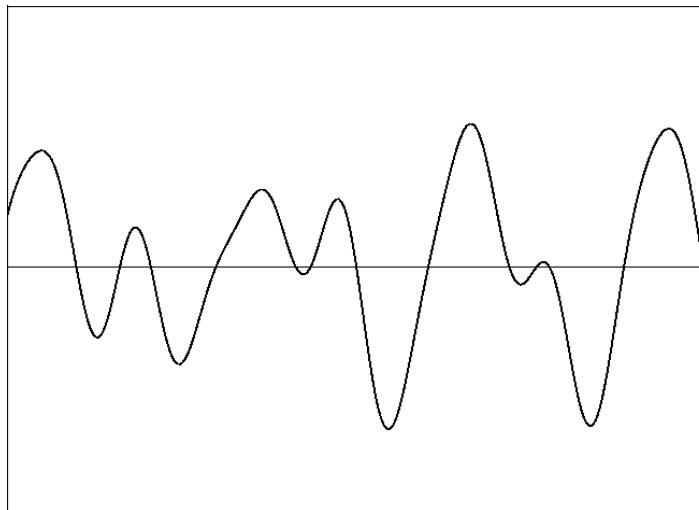
## Teorema di Nyquist

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

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

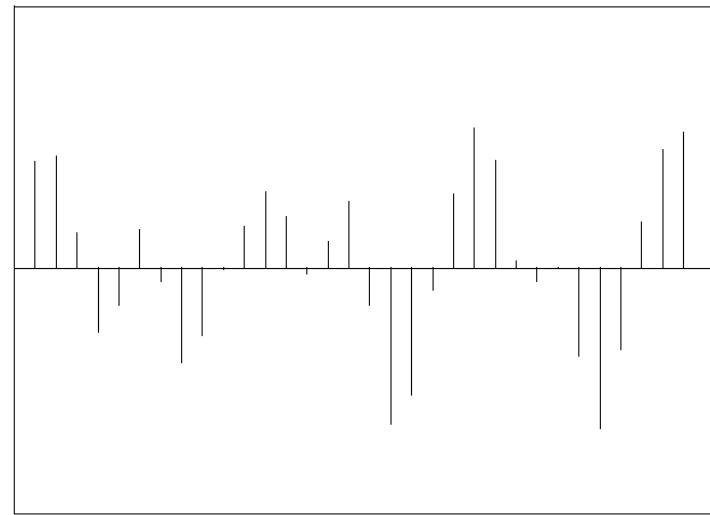
segnale

Ampiezza



segnale campionato

Ampiezza



# Campionamento: teorema di Nyquist

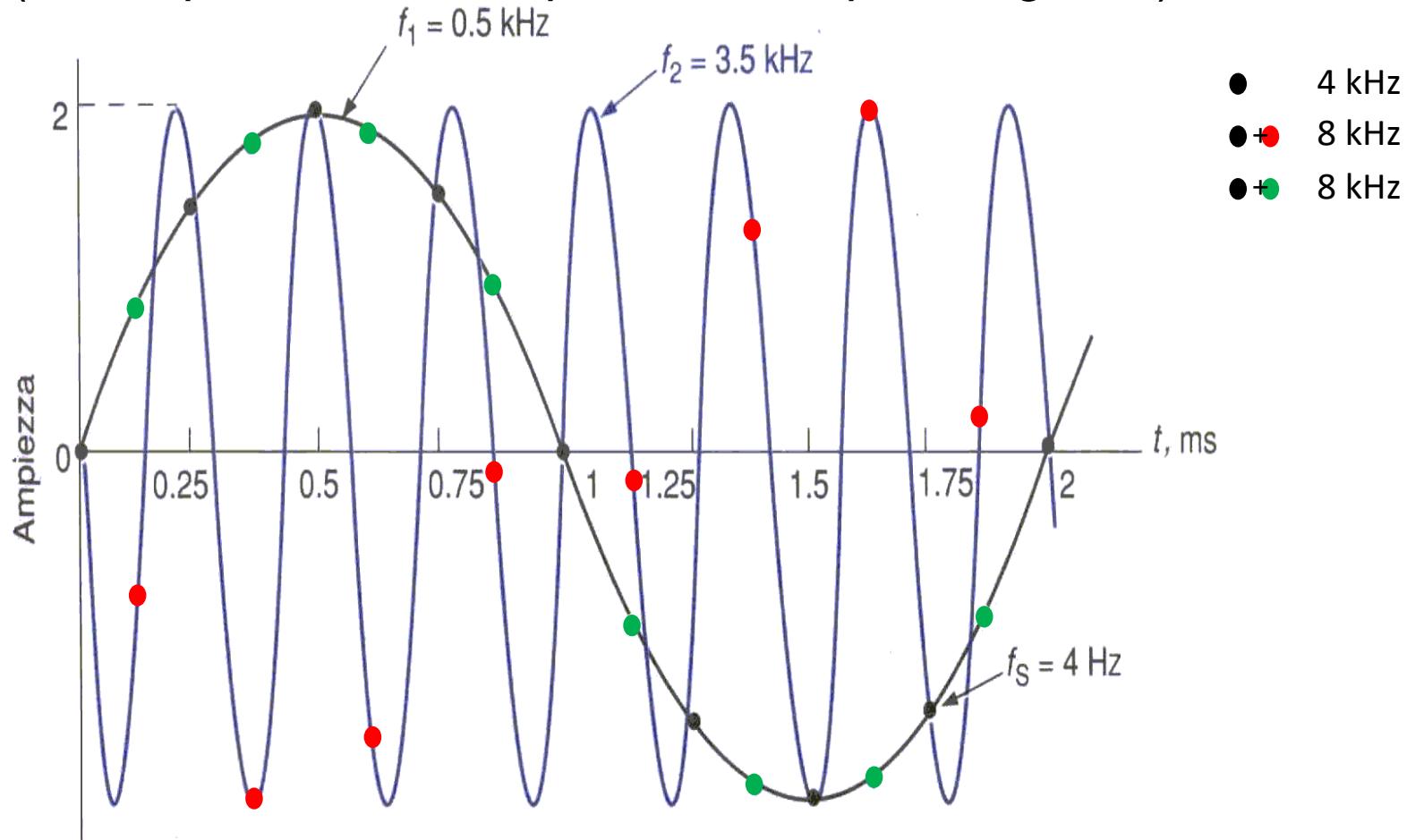
$$f_c \geq 2B = f_N \quad \text{frequenza di Nyquist}$$

- 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 B**” rappresenta il **contenuto informativo**



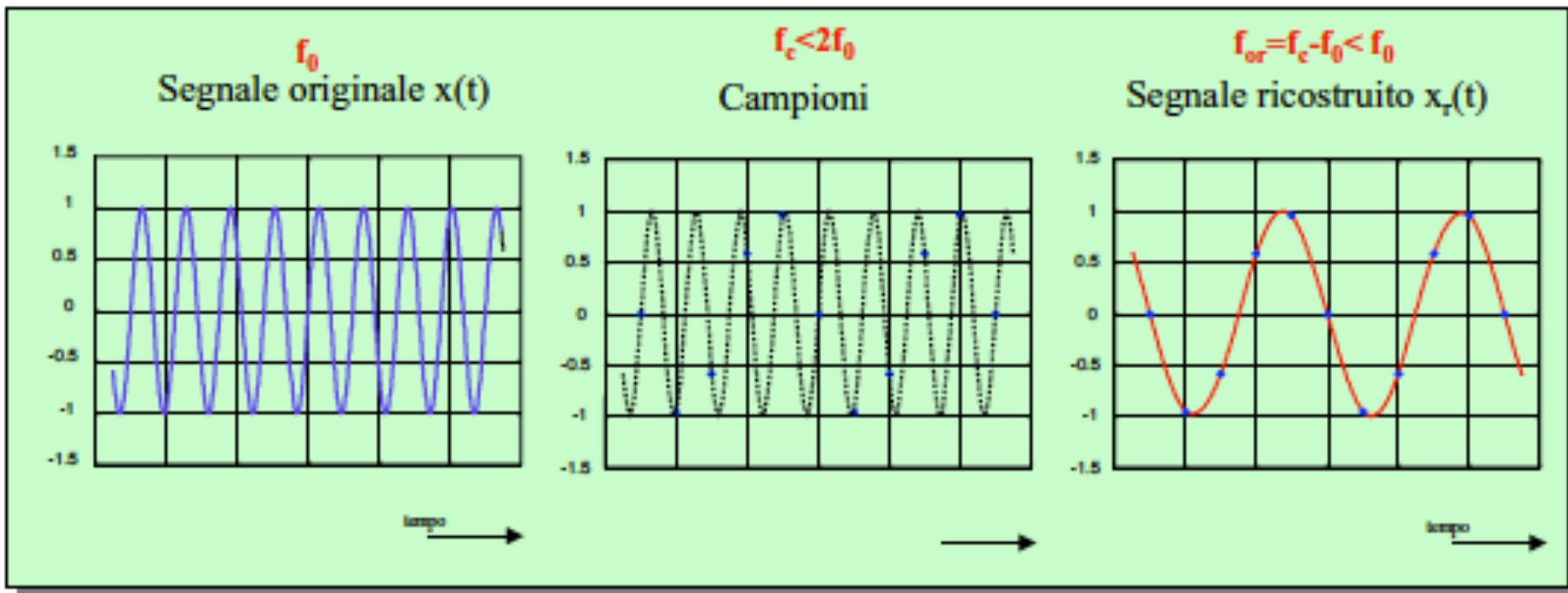
# Campionamento: teorema di Nyquist

Cosa succede se non si rispetta il teorema di Nyquist  
(non si prendono i campioni alla frequenza giusta)?



# Campionamento: teorema di Nyquist

Cosa succede se non si rispetta il teorema di Nyquist  
(non si prendono i campioni alla frequenza giusta)?



# Frequenze di campionamento tipiche

Segnale	Banda	Frequenza di campionamento
Segnale telefonico	300-4000 Hz	<b>8000 Hz</b>
Voce	300-8000 Hz	<b>16000 Hz</b>
Musica	100-20.000 Hz	<b>40 kHz</b>
TV (PAL)	0-5.000.000 Hz (5 MHz)	<b>10 MHz</b>
Cinema	0-500 MHz	<b>1 GHz</b>



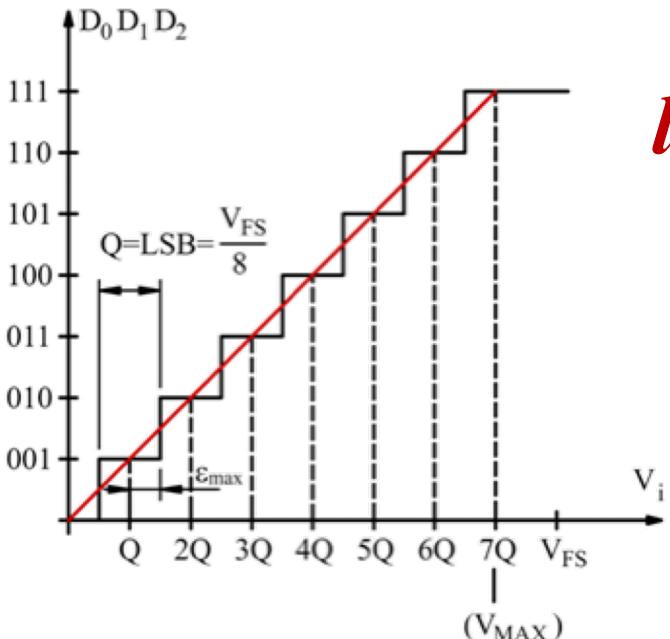
# Campionamento: teorema di Nyquist

- 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 in frequenza* posto al ricevitore che taglia le frequenze oltre  $2B$



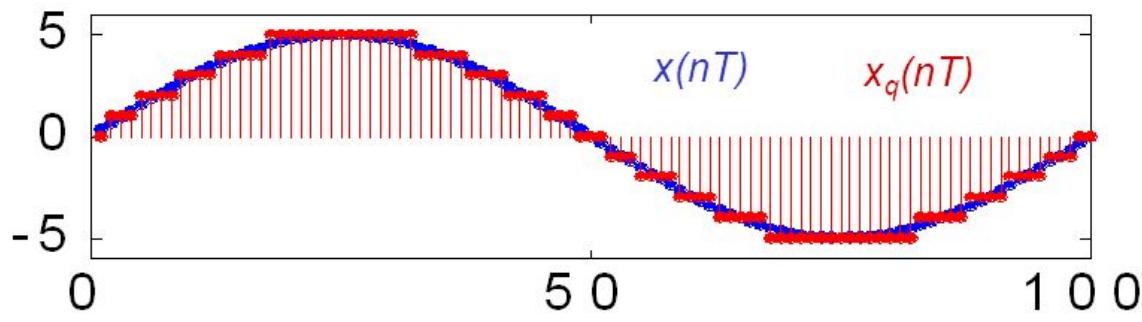
# Quantizzazione

- E' l'operazione con cui un segnale *continuo* nelle ampiezze (numero infinito di ampiezze disponibili) è trasformato in *discreto* (numero finito di ampiezze disponibili)
- Nella trasformazione si commette un *errore* di approssimazione (quantizzazione)
- Più livelli, meno errore di quantizzazione
- Ogni livello viene rappresentato da una sequenza di bit



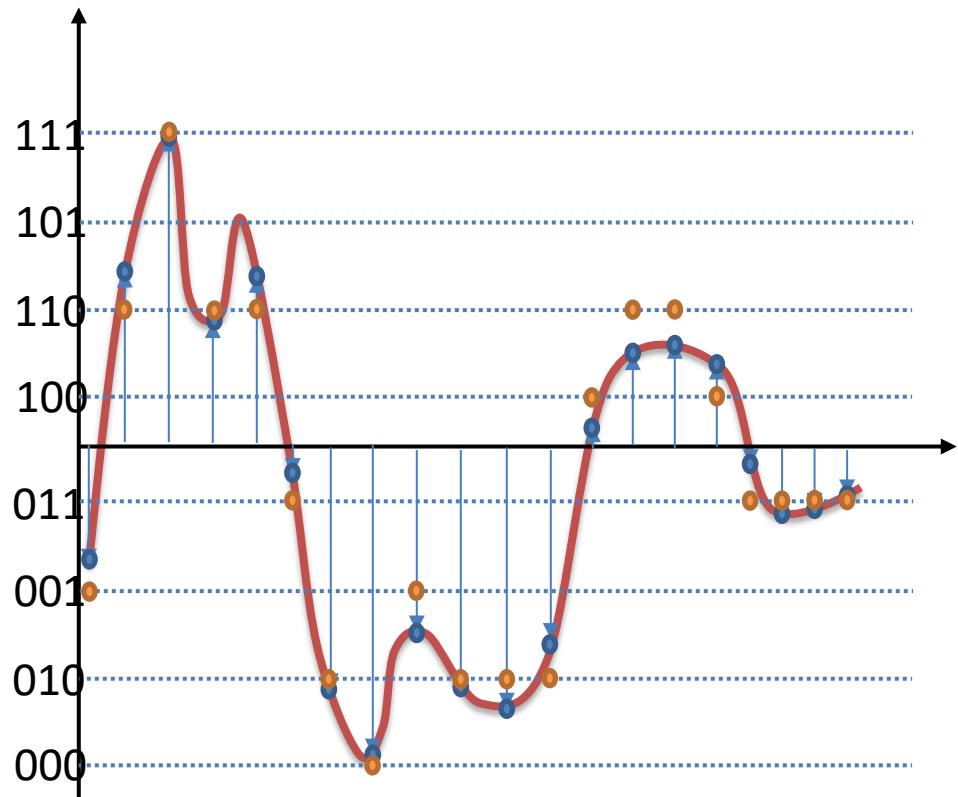
$$l = 2^b$$

**$l$  numero di livelli di quantizzazione**  
 **$b$  numero di bit per livello**



# Digitalizzazione di un segnale: riepilogo

**Campionamento:** misura dell'ampiezza del segnale in specifici istanti di tempo equispaziati tra loro



Introduzione di livelli **discreti** di ampiezza

**Quantizzazione:** rappresentazione dell'ampiezza continua del segnale campionato mediante i livelli discreti

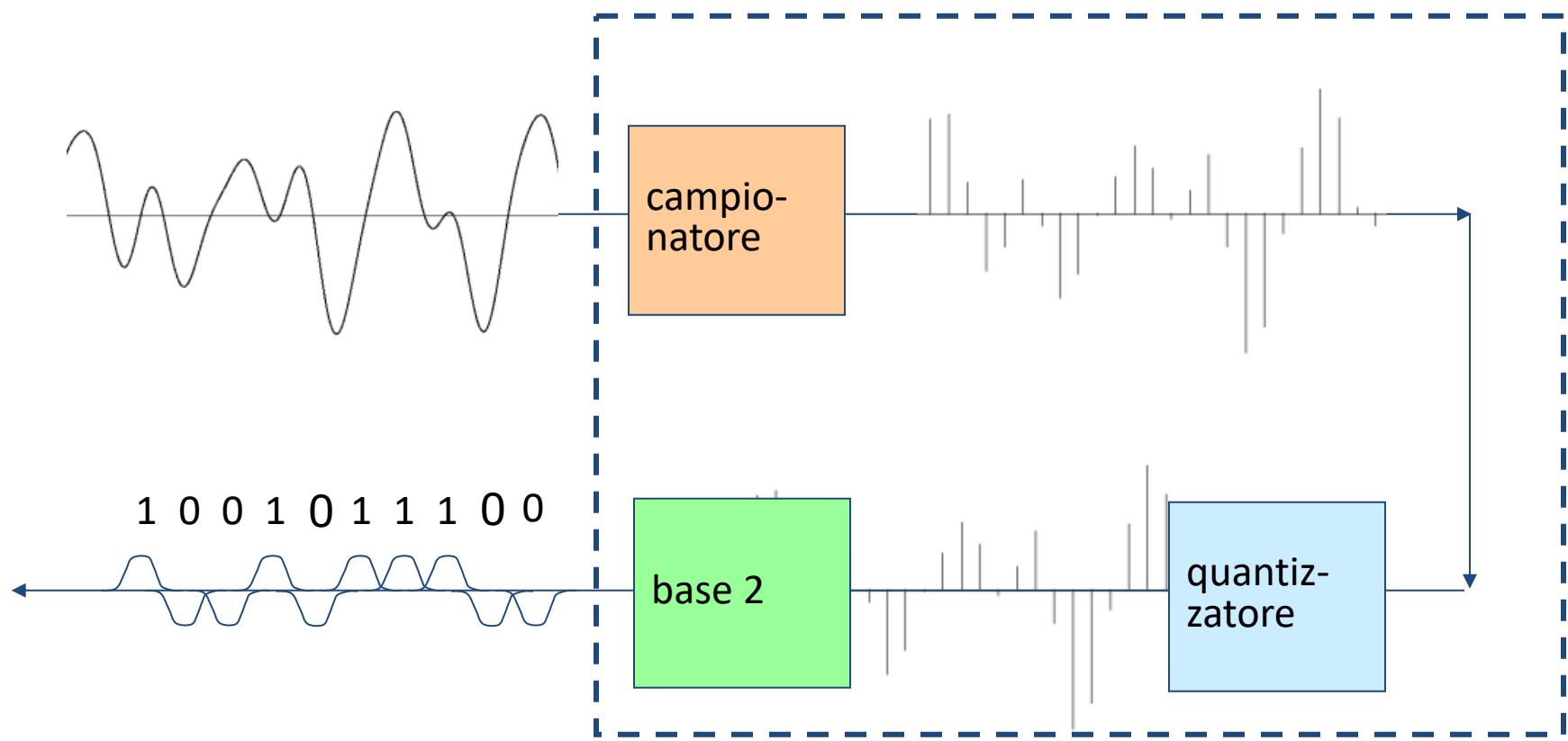
Associazione di uno specifico gruppo di bit per ogni livello discreto di quantizzazione

Il segnale analogico è ora in forma digitale

001 110 111 110 110 011 010 000  
001 010 010 010 100 110 110 100  
011 011 011 011



# Conversione A-to-D



I segnali analogici per essere trasmessi in formato digitale sono trasformati in flussi di bit astratti dai supporti fisici: segnali logici



# Flussi binari equivalenti

Segnale	Banda	Frequenza di campionamento	Livelli di quantizzazione	Flusso binario
Segnale telefonico	300-4000 Hz	8000 Hz	256 livelli (8 bit)	<b>64 kb/s</b>
Voce	300-8000 Hz	16000 Hz	65536 livelli (16 bit)	<b>256 kb/s</b>
Musica	100-20 kHz	44 kHz	65536 livelli (16 bit)	<b>704 kb/s</b>
TV (PAL)	0 - 5 MHz	10 MHz	16.777.216 livelli (colori) (24 bit)	<b>240 Mb/s</b>
Cinema	0-500 MHz	1 GHz	16.777.216 livelli (colori) (24 bit)	<b>24 Gb/s</b>





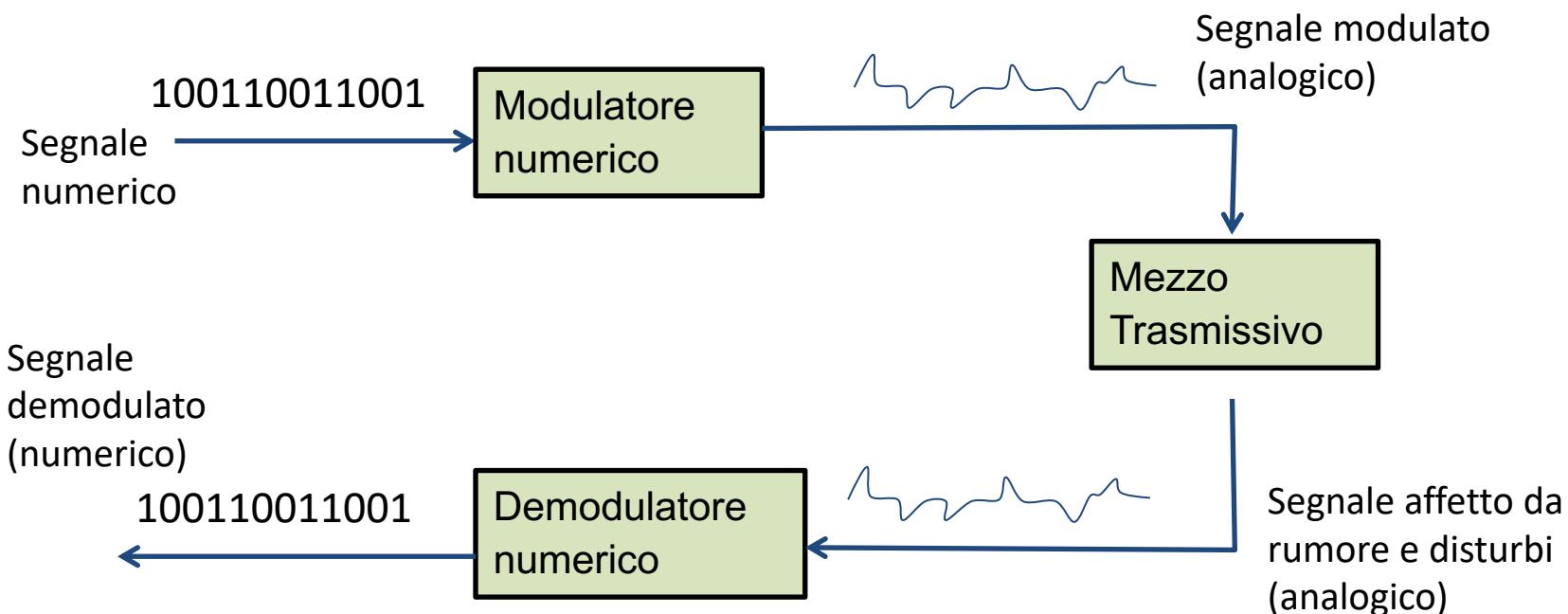
**POLITECNICO**  
MILANO 1863



# Modulazione e trasmissione

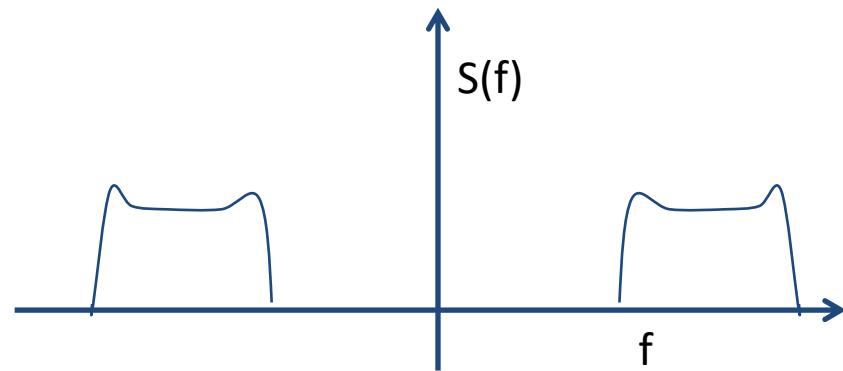
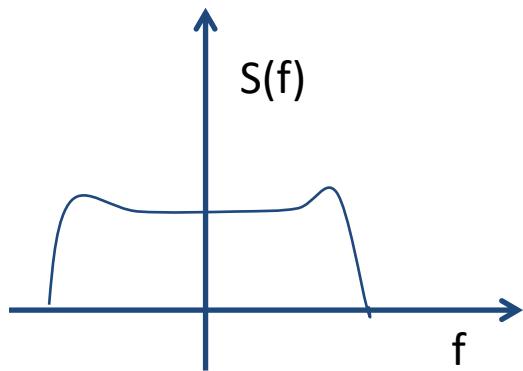
# Modulazione

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



# 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 (o in banda passante):** i segnali hanno un spettro traslato su intervalli di frequenze non contigue all'origine

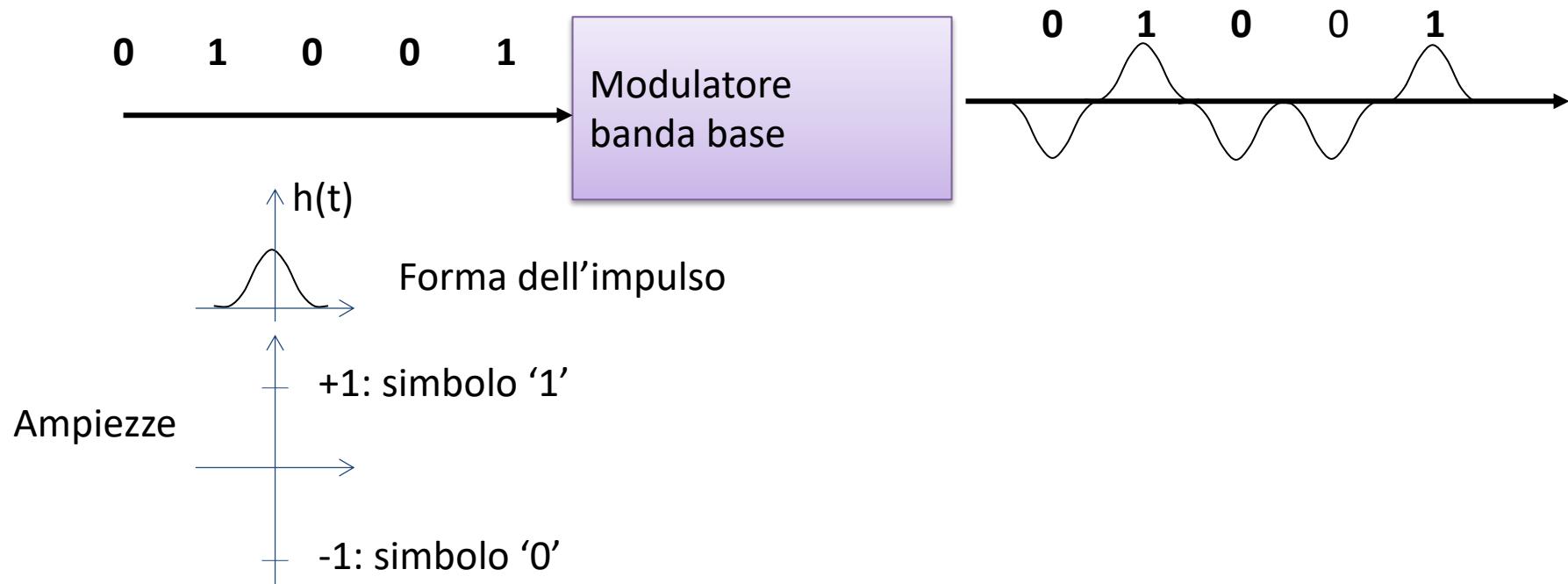


# Modulazione in banda base

- Esempio: Modulazione d'ampiezza in banda base

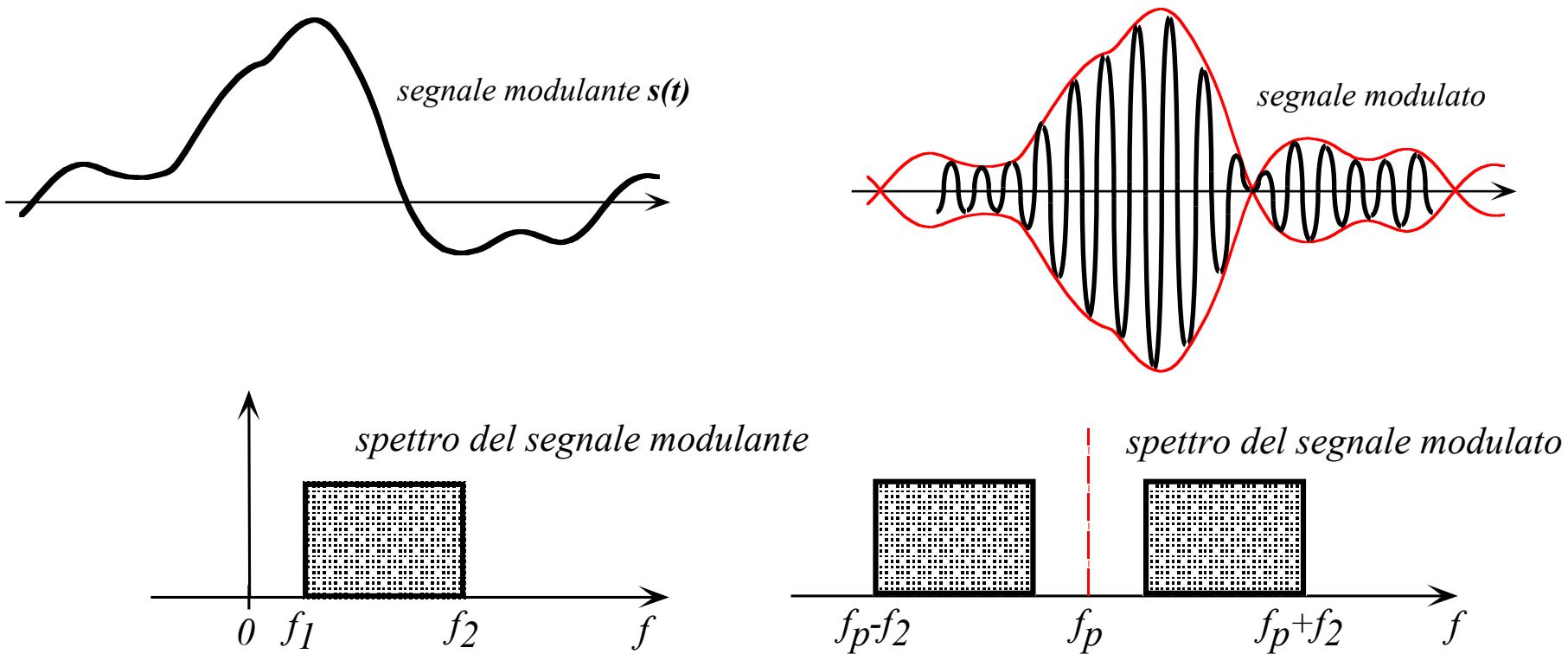
Formato di modulazione di tipo **PAM – Pulse Amplitude Modulation**

**Modulation:** il bit corrisponde ad un impulso di ampiezza positiva (“1”) o negativa (“0”)



# Modulazione in banda traslata

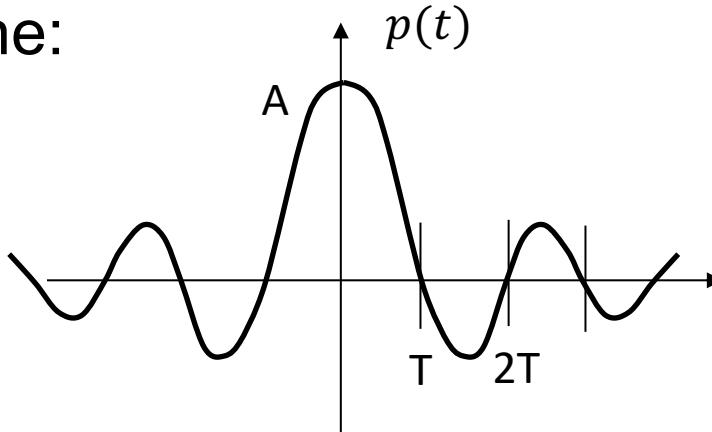
Si usa un'onda elettromagnetica (sinusoide) detta **PORTANTE (carrier)** ad una determinata frequenza ( $f_p$ ) per traslare lo spettro del segnale intorno alla frequenza della portante



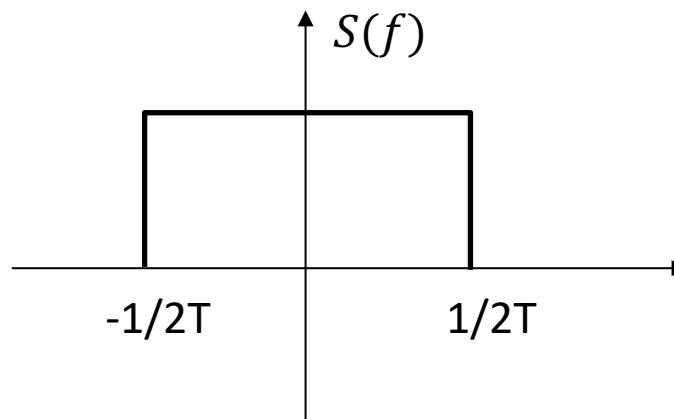
# Banda ed efficienza spettrale

- Se per la modulazione **PAM** usiamo come forma dell'impulso la funzione:

$$p(t) = A \frac{\sin\left(\pi \frac{t}{T}\right)}{\frac{\pi t}{T}}$$

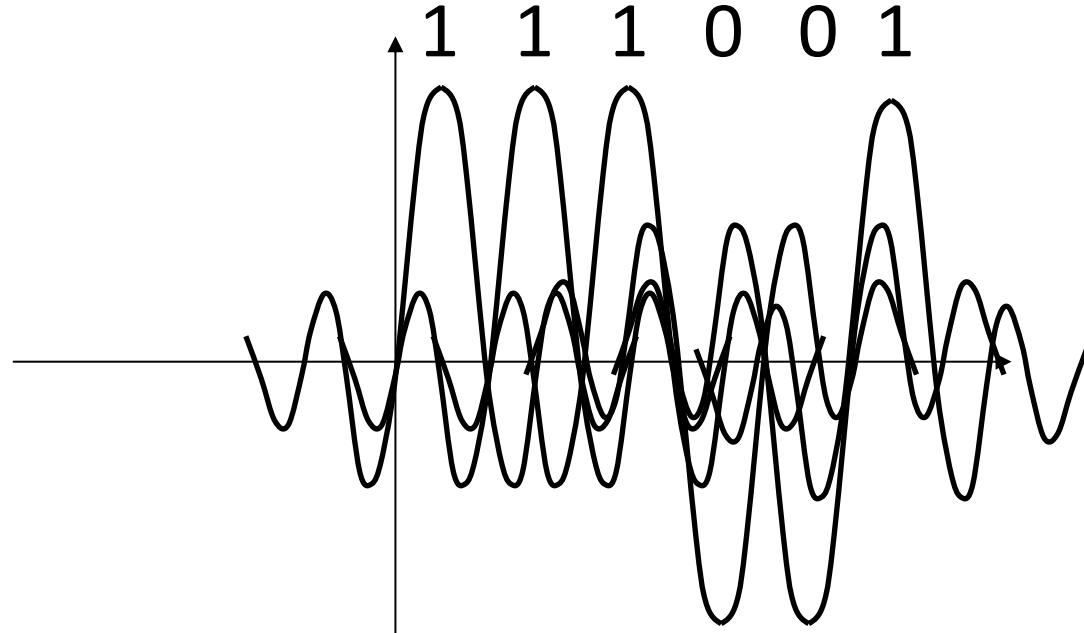


- Che ha come trasformata nel dominio delle frequenze  
 $S(f) = AT \operatorname{rect}(fT)$



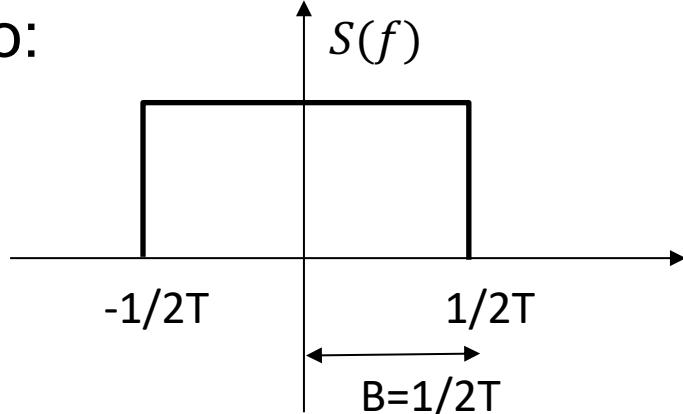
# Banda ed efficienza spettrale

- Essendo gli zeri della funzione in corrispondenze degli istanti di tempo  $T, 2T, \dots$ , è possibile ottenere segnali del tipo:



# Banda ed efficienza spettrale

- La banda occupata dal segnale risulta dunque pari al rate in bit al secondo:



In generale vengono usati impulsi più compatti nel tempo con banda maggiore

- In modo analogo a quanto visto per il campionamento, la frequenza di Nyquist ci dice che possiamo trasmettere a una frequenza (rate) doppia rispetto alla banda

$$R \approx 2B$$

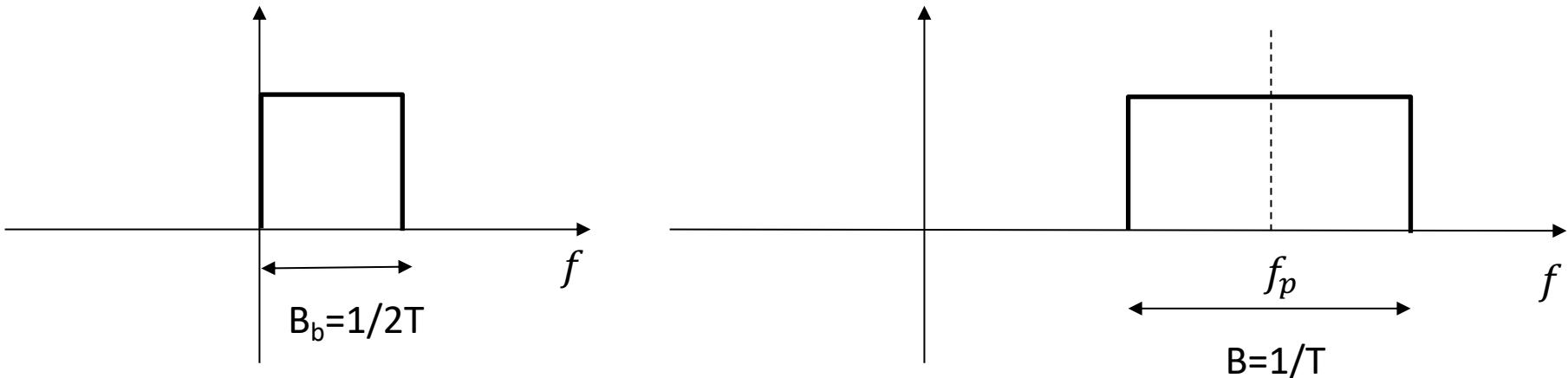
Efficienza spettrale (rapporto tra rate e banda):

$$\eta = \frac{R}{B} = 2 \text{ bps/Hz}$$



# Banda ed efficienza spettrale

- Nel caso di modulazione in banda passante, la banda occupata aumenta e nel caso binario l'efficienza spettrale scende:



$$R \approx B$$

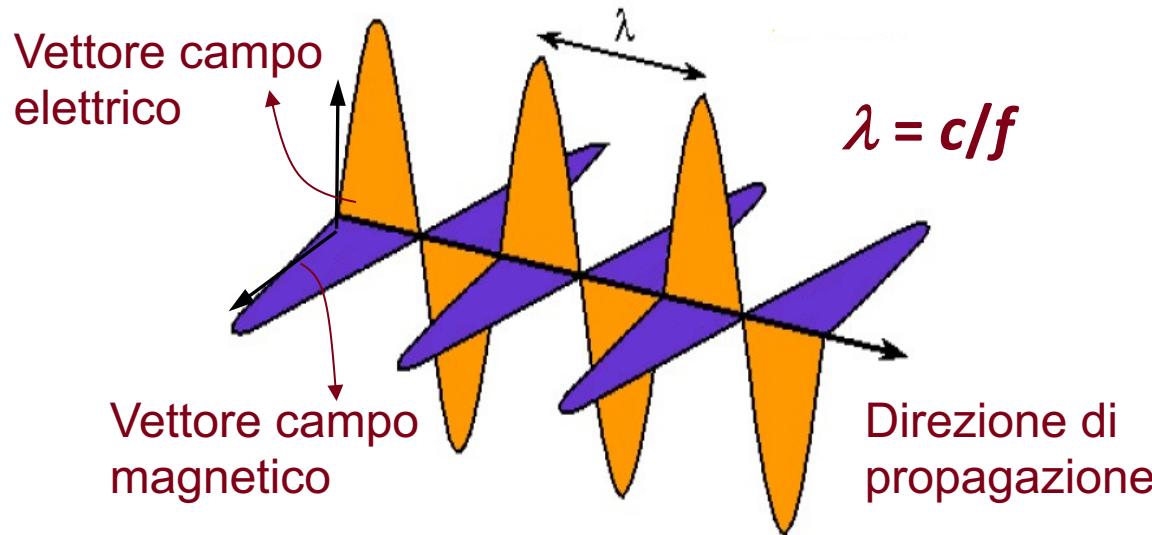
Efficienza spettrale:

$$\eta = \frac{R}{B} = 1 \text{ bps/Hz}$$



# Propagazione di un segnale mediante una portante

- Il segnale può propagarsi nell'**atmosfera** (collegamenti terrestri o collegamenti Terra-spazio) o in un **mezzo trasmissivo guidante** (doppino telefonico in rame, cavo coassiale, fibra ottica) attraverso la modulazione di un'**onda portante** che è **un'onda elettromagnetica a opportuna frequenza (lunghezza d'onda)**

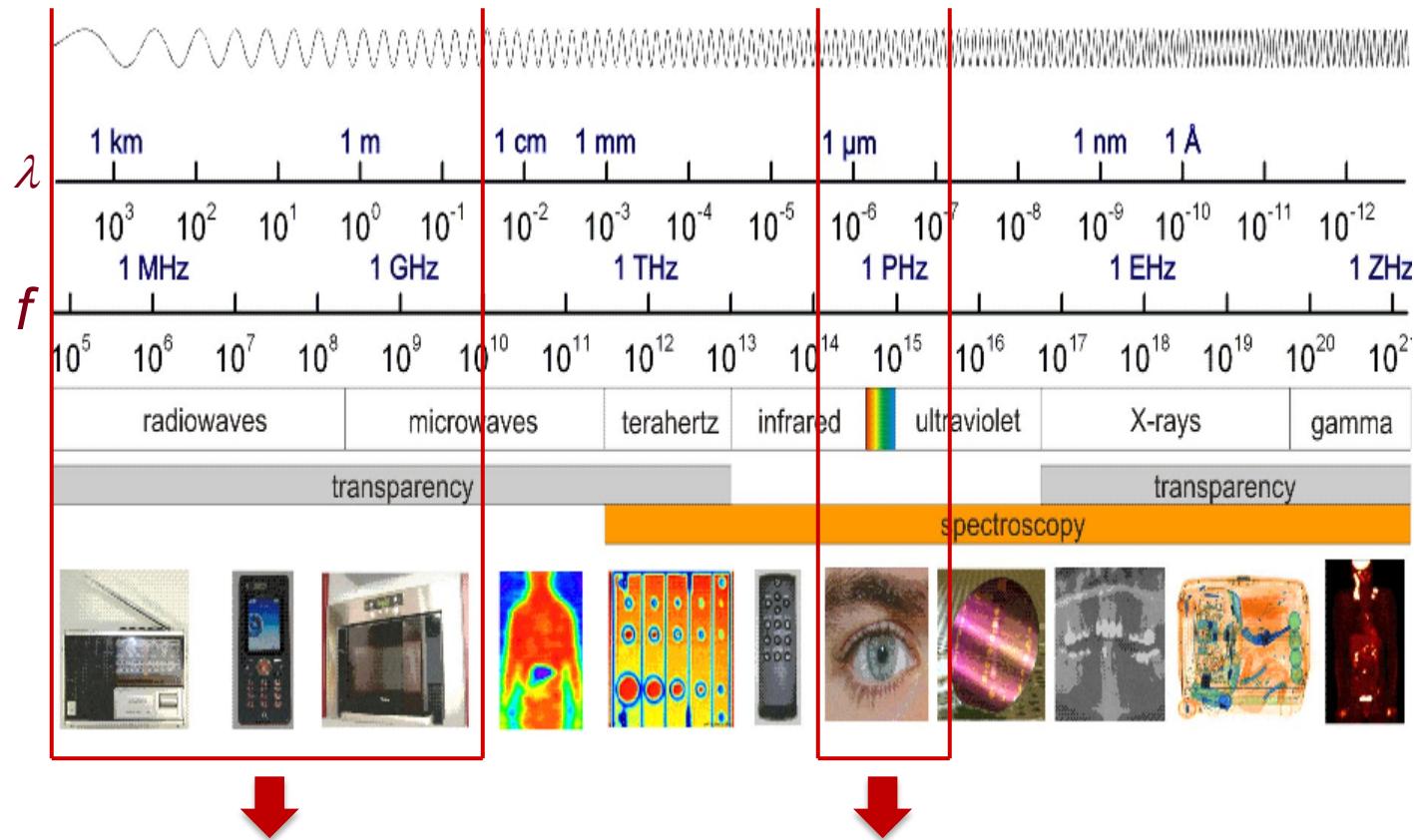


- Le onde elettromagnetiche portanti vengono classificate principalmente in base alla frequenza.



# Onde “portanti” per TELECOMUCAZIONI

$$\lambda = c/f$$



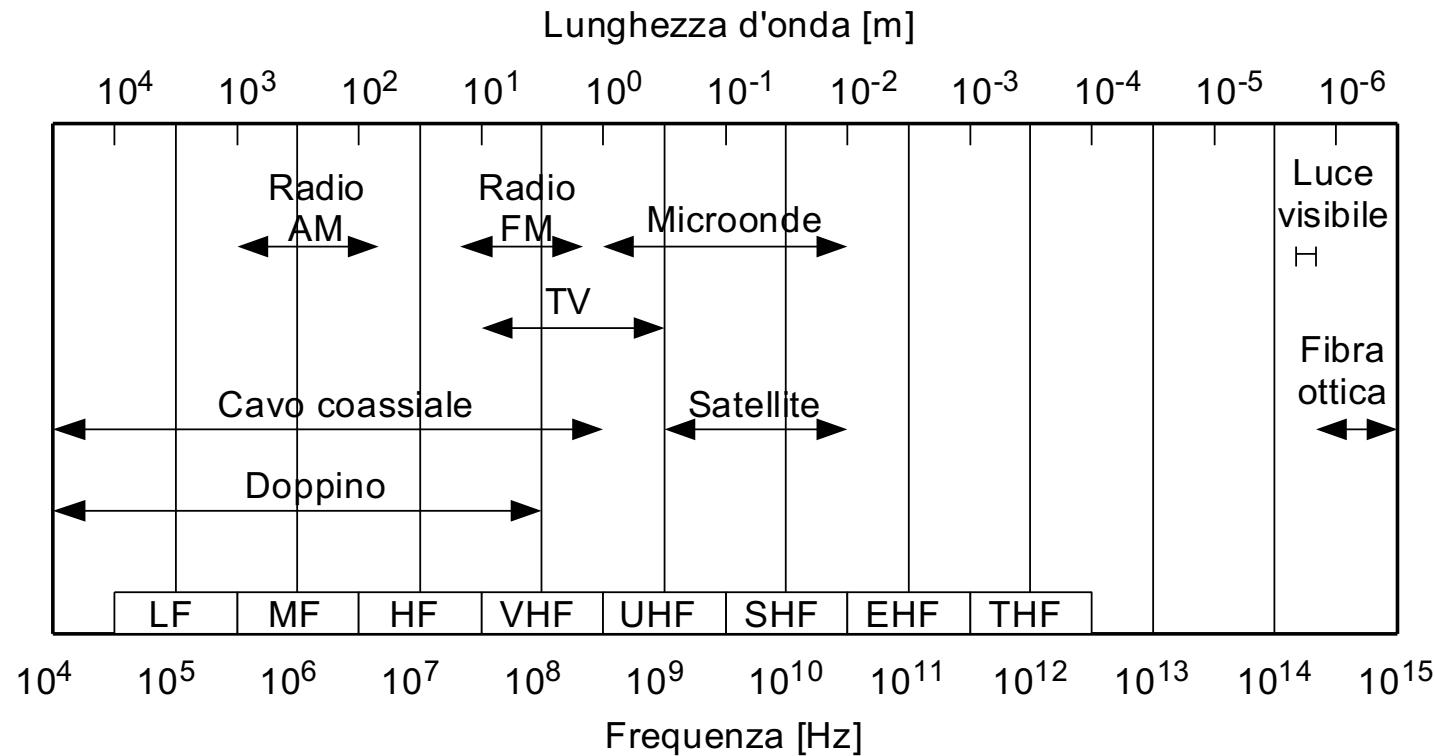
Radio  
Frequenza

Comunicazioni  
Ottiche



# Modulazione in banda traslata

L'uso di un'onda portante e della modulazione in banda traslata è necessaria per sfruttare mezzi trasmissivi caratterizzati da opportune BANDE PASSANTI, dove il mezzo può trasmettere lo spettro del segnale senza alterarlo.



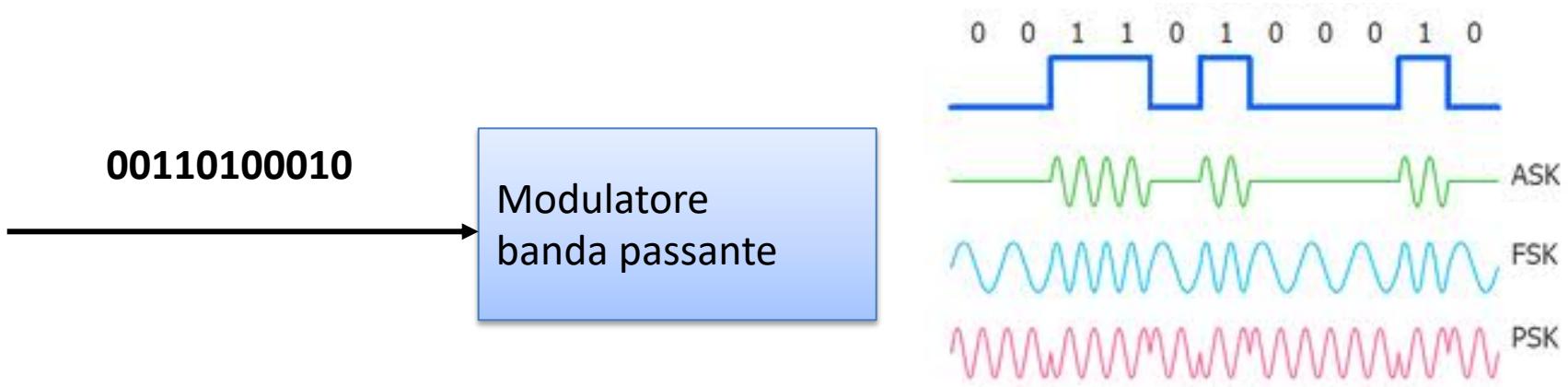
LF = Low Frequency  
MF = Medium Frequency  
HF = High Frequency

VHF = Very High Frequency  
UHF = Ultra High Frequency  
SHF = Super High Frequency  
EHF = Extremely High Frequency  
THF = Tremendously High Frequency



# Modulazione in banda traslata

- Esempi:
  - modulazione di ampiezza **ASK** (cambia ampiezza della carrier)
  - modulazione di frequenza **FSK** (cambia frequenza della carrier)
  - modulazione di fase **PSK** (cambia fase della carrier)
  - modulazione **QAM** (cambiamento misto di ampiezza e fase)



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



# Modulazione multilivello

- Per aumentare la capacità di canale senza modificare la banda di frequenza e il time-slot associato è necessario incrementare l'ordine della modulazione:

## MODULAZIONE MULTILIVELLO

- Esempio PAM in banda base o ASK in banda traslata:
  - Flusso di bit in ingresso è diviso in gruppi di  $\log_2 N$
  - Si usano  $N$  *livelli di ampiezza* diversi
  - Per ogni livello di ampiezza trasmesso (chiamato anche simbolo) corrispondono allora *logicamente*  $n = \log_2 N$  bit

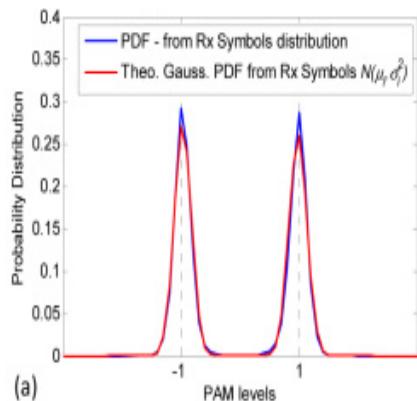
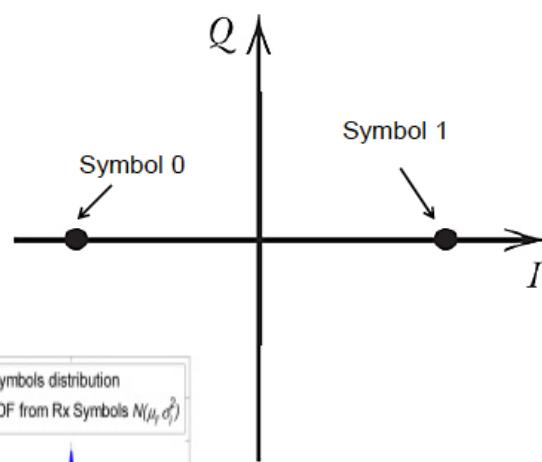
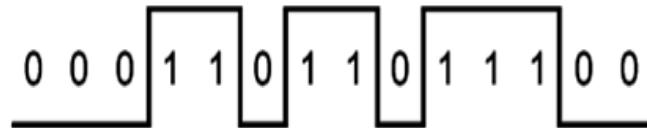


# Modulazione multilivello di ampiezza

ASK o PAM binario

2 livelli di ampiezza

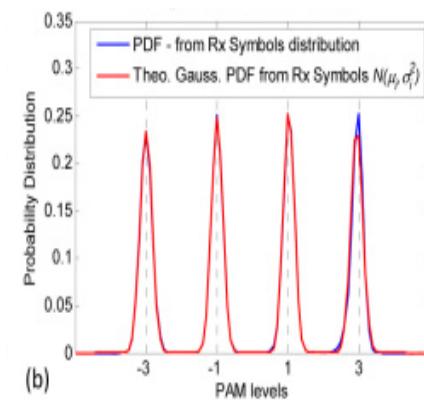
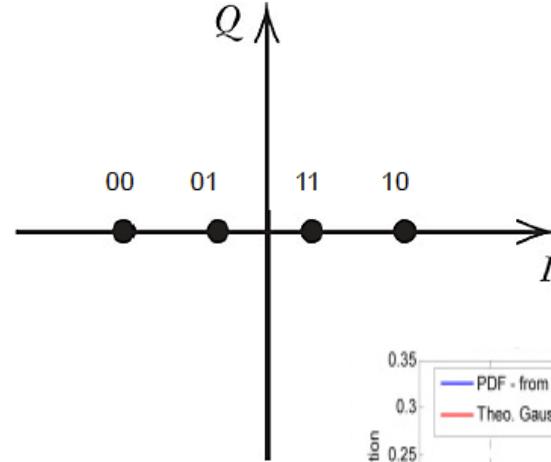
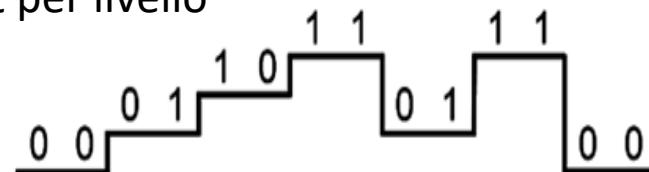
1 bit per livello



4-ASK o 4PAM

4 livelli di ampiezza

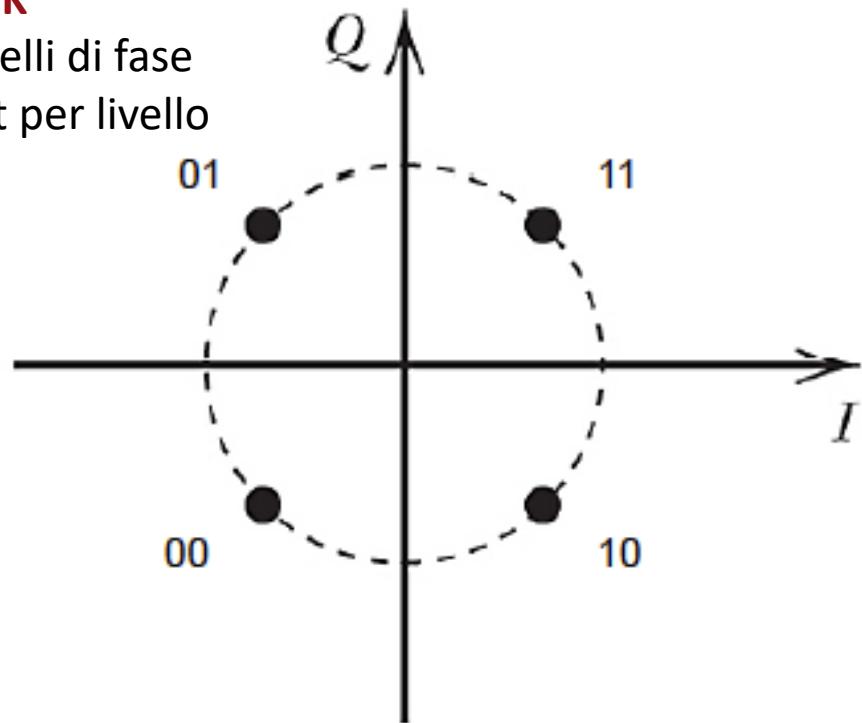
2 bit per livello



# Modulazione multilivello di fase

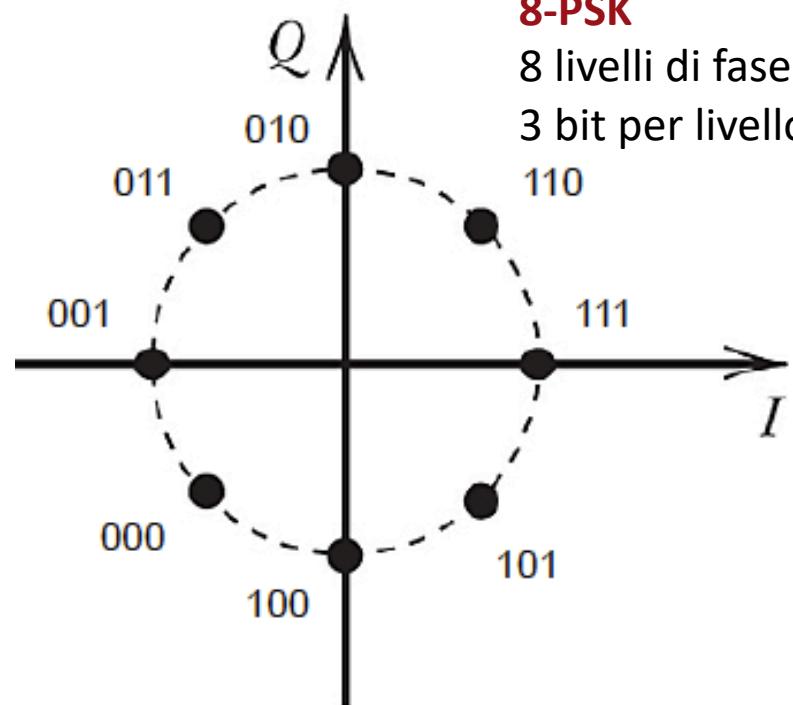
**QPSK**

4 livelli di fase  
2 bit per livello



**8-PSK**

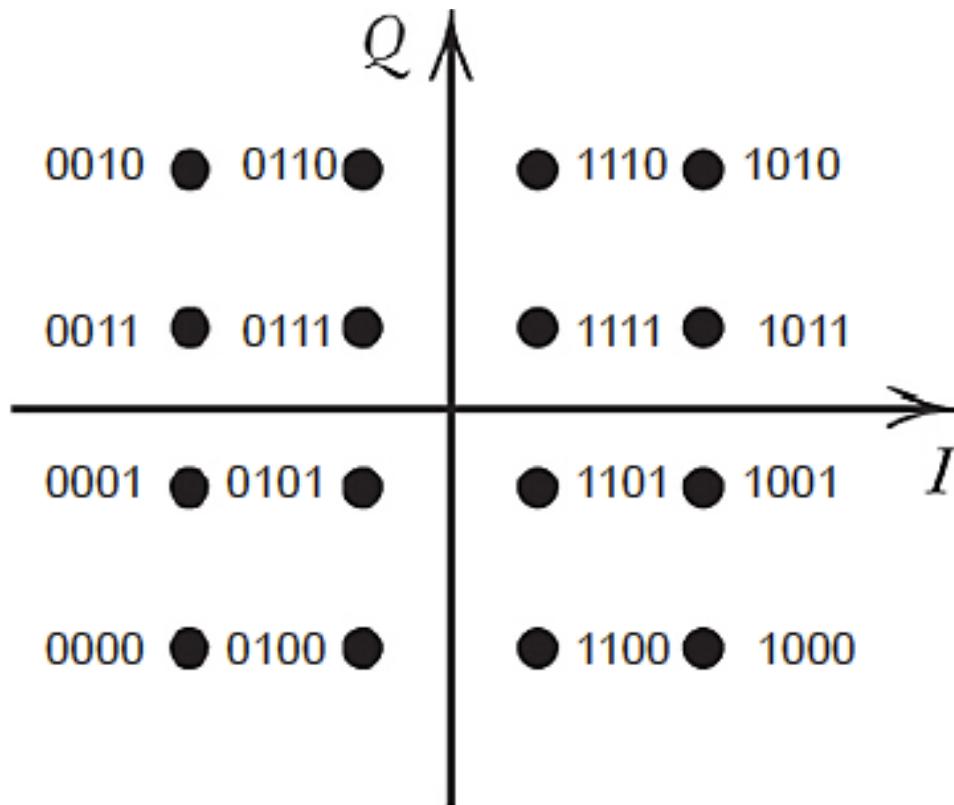
8 livelli di fase  
3 bit per livello



# Modulazione multilivello di ampiezza e fase

## 16QAM

16 livelli di fase e ampiezza  
**(chiamati anche SIMBOLI)**  
4 bit per livello



# Efficienza spettrale modulazione multi-livello

- Nel caso di modulazione multilivello, lo stesso forma dell'impulso trasporta  $n$  bit per ciascun simbolo occupando la stessa banda  $B$
- Quindi l'efficienza spettrale della modulazione multilivello  $\eta_s$  aumenta ci circa  $n$  volte rispetto al caso della modulazione binaria  $\eta_b$
- Indicando con  $R_s$  il rate in simboli al secondo (baud) e con  $R_b$  il rate in bit al secondo si ha:

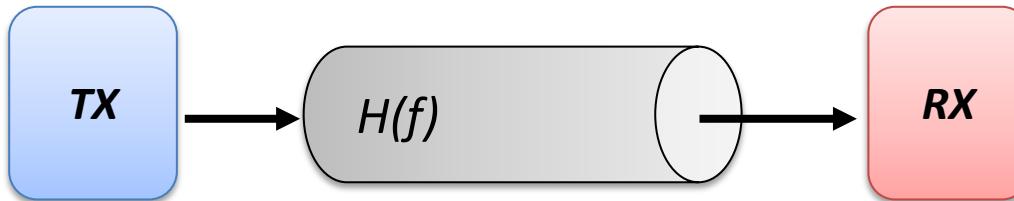
$$R_b = nR_s$$

$$\eta_s = n\eta_b$$



# Canale trasmissivo

- Il canale trasmissivo è l'insieme di
  - trasmettitore TX
  - mezzo trasmissivo
  - ricevitore RX



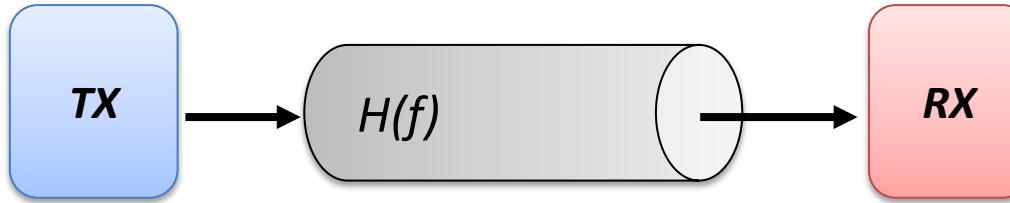
- è caratterizzato da una **velocità di trasmissione (o capacità)  $R$**  (in bps o bit/s) che dipende dalla banda del mezzo trasmissivo e dalla potenza ricevuta
- e da un **ritardo di propagazione** del segnale  $\tau$



# Banda di Canale

Le alterazioni principali che il mezzo trasmittivo può introdurre sono:

- l'attenuazione della potenza del segnale in funzione della distanza percorsa e della frequenza del segnale;
- l'introduzione di un ritardo differente per ogni componente in frequenza del segnale (dispersione).



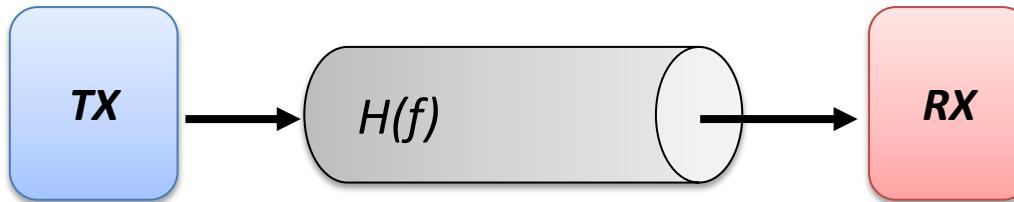
Ogni mezzo trasmittivo presenta una regione nel dominio delle frequenze in cui si ha la migliore risposta in termini di attenuazione e dispersione.

Tale regione è chiamata **BANDA PASSANTE DEL CANALE**



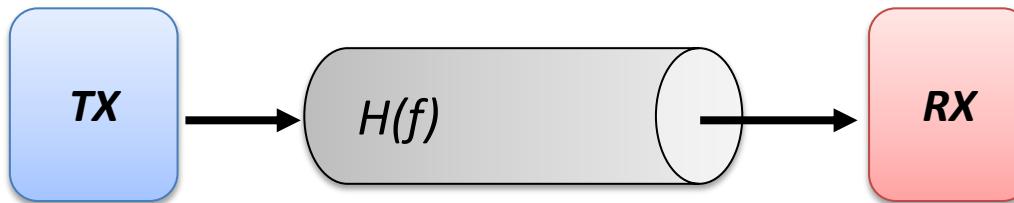
# Banda di Canale

Per qualunque mezzo trasmittivo la banda passante si riduce all'aumentare della lunghezza del mezzo percorso.



# Banda di Canale

- Perché un segnale sia ricevuto come è stato trasmesso, è necessario che la banda passante sia uguale o più ampia della banda di frequenza del segnale stesso.
- Altrimenti, il segnale viene privato di alcune delle sue armoniche (cioè le componenti in frequenza dello spettro del segnale che cadono al di fuori della banda passante del canale) e quindi distorto, cioè alterato.



# Velocità di trasmissione in caso di modulazione multilivello a parità di banda passante del canale

Canale con banda passante pari a  $B$

- Caso di trasmissione binaria:  
-> velocità di trasmissione massima

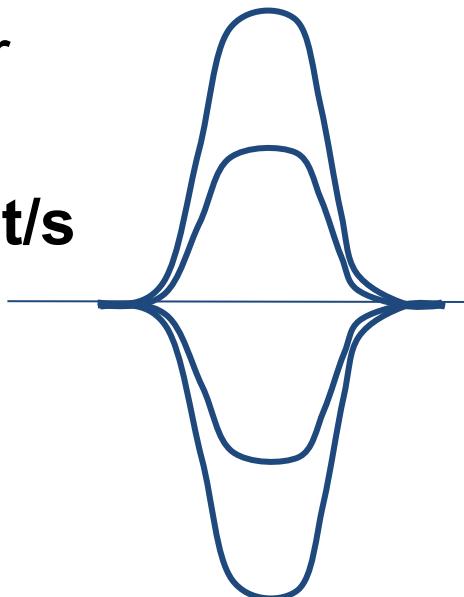
$$R \approx B \text{ bit/s}$$

- Caso di trasmissione multilivello con  $n$  bit per simbolo:  
-> velocità di trasmissione massima

$$R \approx nB \text{ bit/s}$$

$$n = \log_2 N$$

$$N = 2^n$$



# **Velocità di trasmissione in caso di modulazione multilivello a parità di banda passante del canale**

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



# Classificazione dei mezzi trasmissivi

- **Mezzi trasmissivi guidati:**
  - Mezzi elettrici: ad ogni bit è associato un particolare valore di tensione o corrente, oppure determinate variazioni di tali grandezze
  - Mezzi ottici (fibre ottiche): basati sulla propagazione guidata della luce
- **Mezzi non guidati**
  - Onde radio (wireless): il segnale è associato ad un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio che ha la proprietà di riprodurre a distanza una corrente elettrica in un dispositivo ricevente (antenna)



# Attenuazione



Se il segnale di ingresso ha un potenza  $P_{IN}$  e il segnale di uscita ha una potenza  $P_{OUT}$  si definisce ATTENUAZIONE del collegamento A il rapporto:

$$A = P_{OUT} / P_{IN}$$

in **dB**:  $A_{dB} = 10 \log_{10} ( P_{OUT} / P_{IN} )$

$$\left\{ \begin{array}{l} -10\text{dB} \text{ significa } P_{OUT} = P_{IN}/10 \\ -3\text{dB} \text{ significa } P_{OUT} = P_{IN}/2 \\ -40\text{dB} \text{ significa } P_{OUT} = 10^{-4} P_{IN} \end{array} \right.$$



# Alcuni valori di attenuazione

- **Mezzi wireless:**

$$A = kd^{-x} \quad x = 2, 3, 4, 5$$

- **Mezzi guidati:**

- Doppino telefonico CAT5: 20dB/100m
- Cavi coassiali thin: 15dB/100m
- Cavo coassiali thik: 5-10dB/100m

- **Fibre Ottiche**

Attenuazione tipica:

1° finestra 850 nm → 2 dB/km

2° finestra 1310 nm → 0.4 dB/km

3° finestra 1550 nm → 0.2 dB/km



# 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 trasmittivo riduce tale energia (attenuazione del mezzo) tanto più quanto maggiore è la distanza percorsa



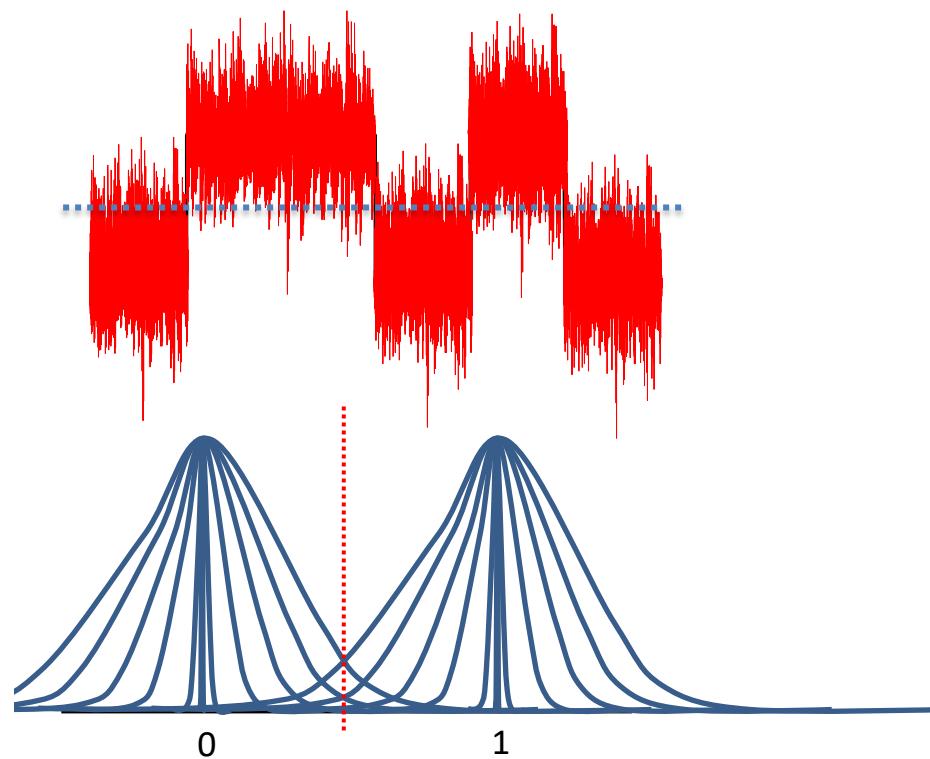
# Errori in ricezione

Trasmesso

**10011010100100100101000101000**

Ricevuto

**00101010001010110010001111010**



# 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  $(n,k)$

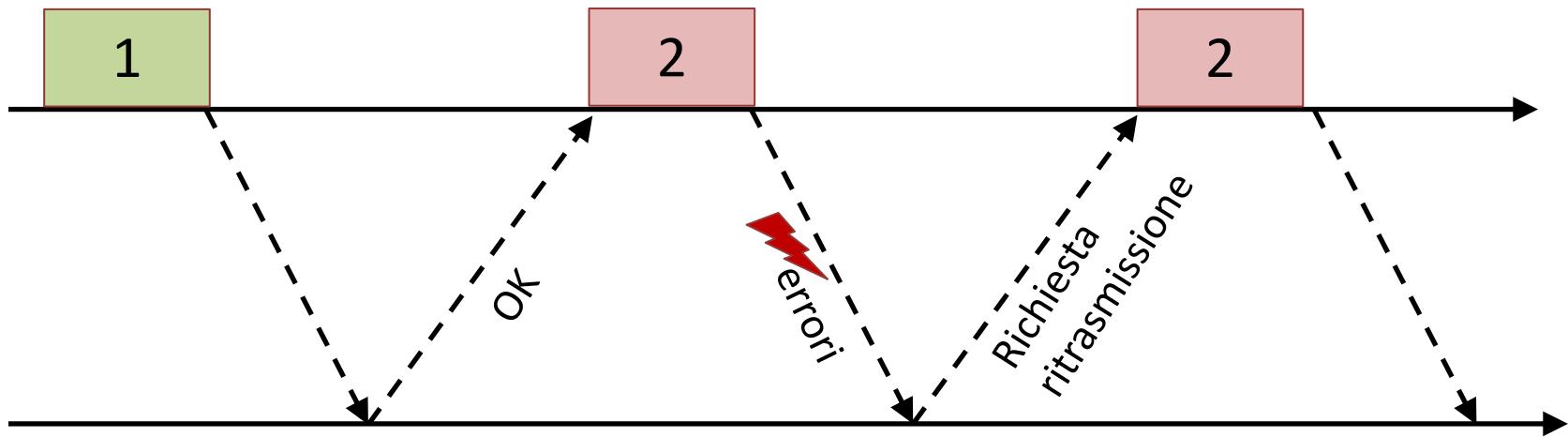


- sono progettati in modo da correggere sino a  $c$  errori (potere correttore del codice)
- **Esempio:** Codice a ripetizione  $(n,1)$ : consiste nella ripetizione  $n$  volte del bit da trasmettere ( $n-1$ ) cifre di parità. Con  $n$  dispari è in grado di correggere  $c=(n-1)/2$  errori



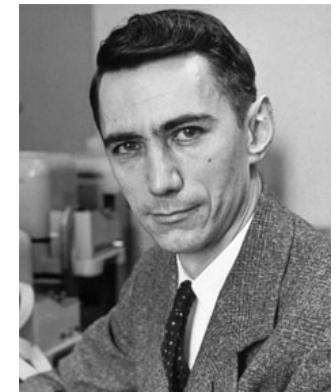
# Ritrasmissione

- 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]

