



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Lezione 5 - Livello Fisico I

# INDICE

## 5. LIVELLO FISICO I

1. **Banda del segnale**
2. **Campionamento**
3. **Quantizzazione**
4. **Modulazione**
5. **Capacità di canale**
6. **Attenuazione**
7. **Mezzi trasmissivi**
8. **Rete in fibra ottica**

Parte I (oggi)

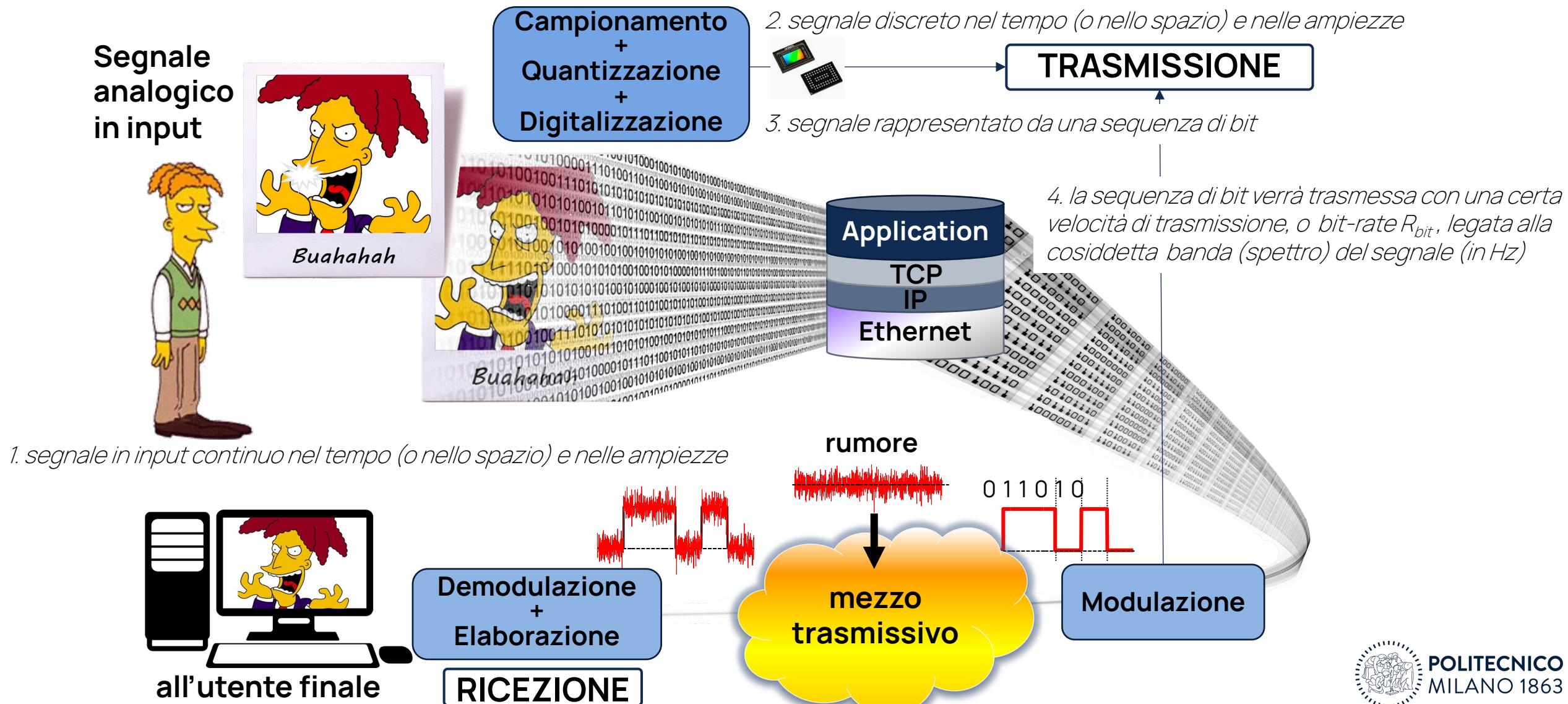
Parte II (domani)

Parte III (lunedì prossimo)

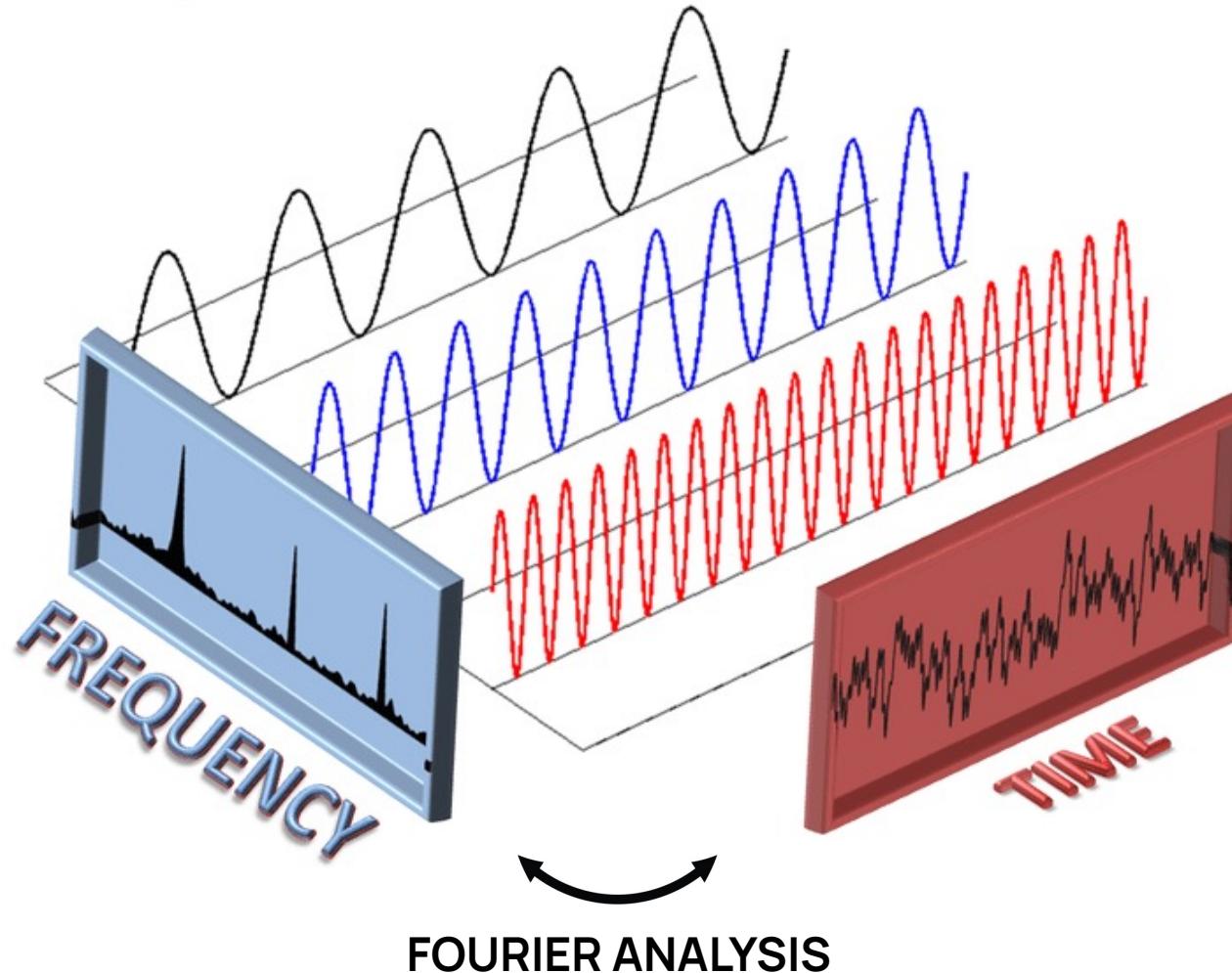
# BANDA DEL SEGNALE

01

# Trasmissione e ricezione del segnale



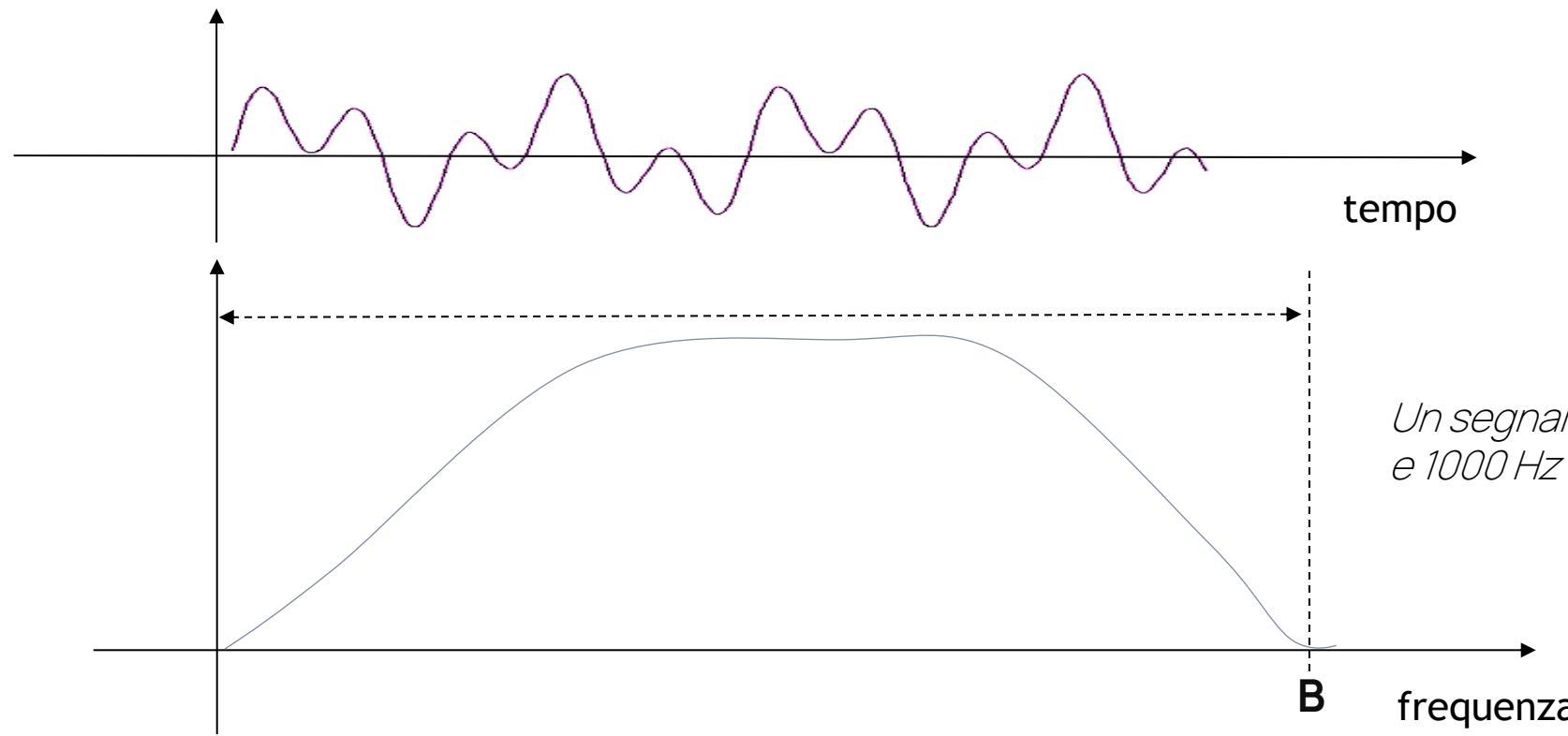
# Corrispondenza tra segnale nel dominio del tempo e banda (*spettro*) nel dominio delle frequenze



- Tempo  $t$  misurato in *secondi* (s)
- Frequenza  $f$  misurata in *Hertz* (Hz, 1/s)

# Banda di segnale

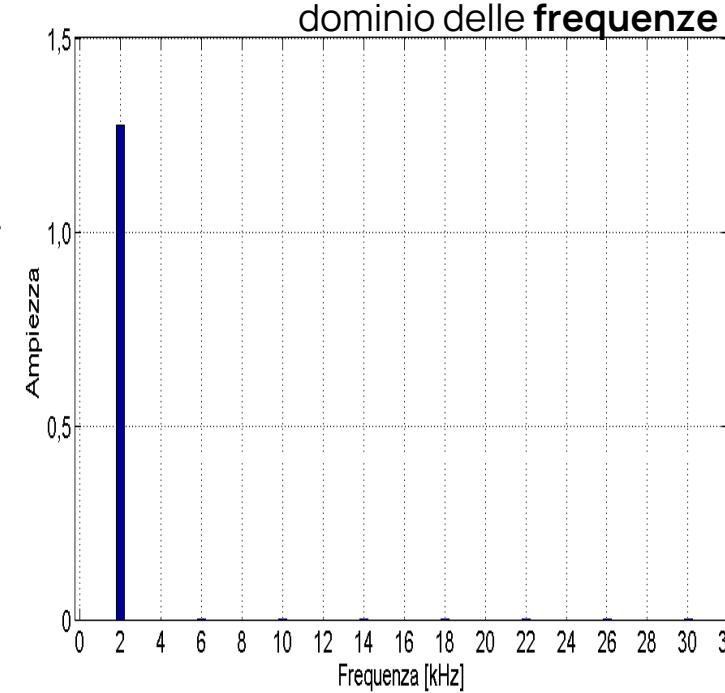
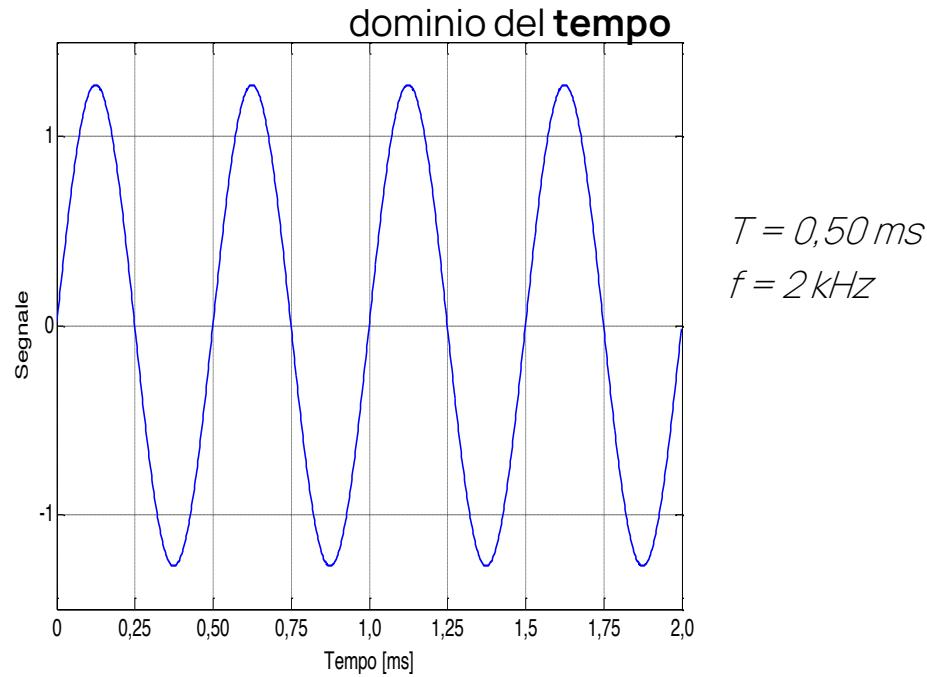
- La **banda di un segnale** ( $B$ ) è l'intervallo di frequenze che il segnale occupa nello spettro delle frequenze.
- Rappresenta la differenza tra la frequenza più alta e quella più bassa contenenti informazioni (energia).
- Fornisce una misura essenziale per rappresentare il segnale senza distorsioni.



*Un segnale con componenti in frequenza tra 100 Hz e 1000 Hz ha una larghezza di banda di 900 Hz*

# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

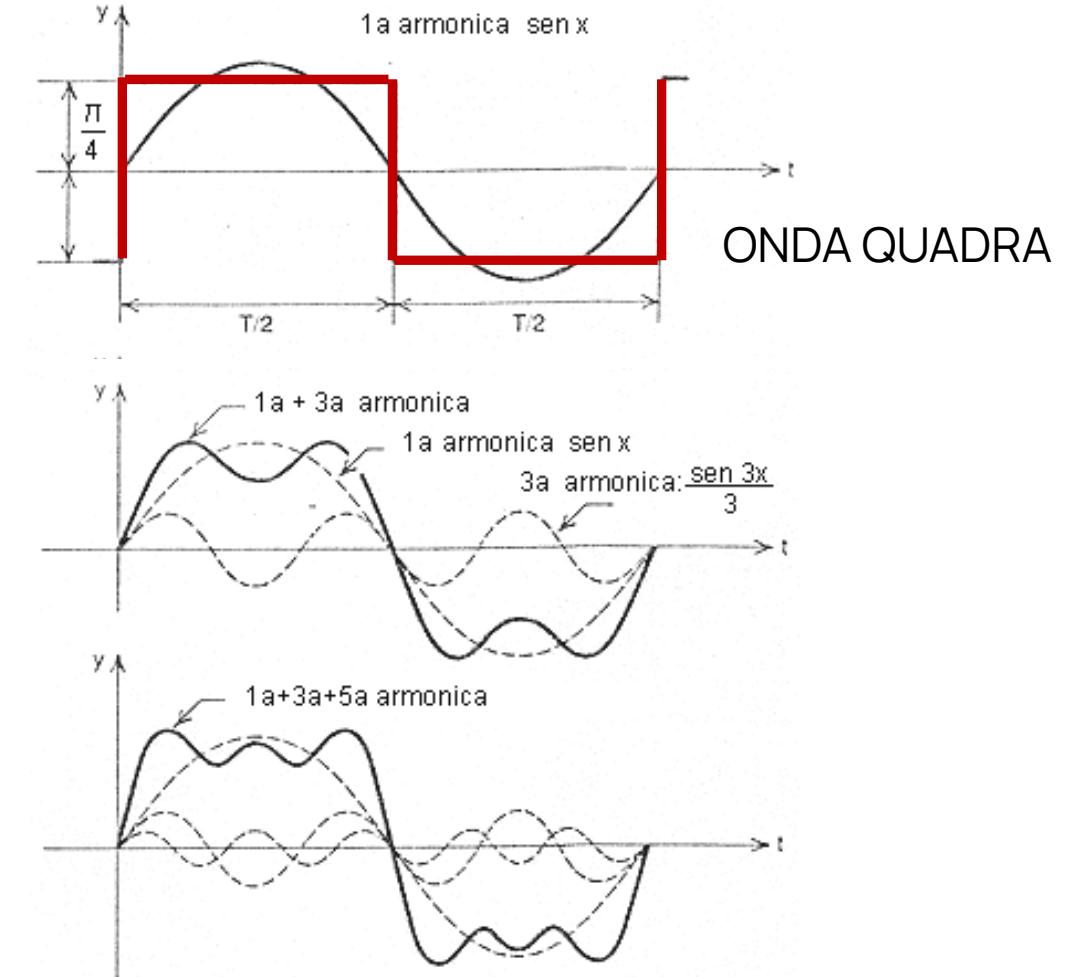
- L'analisi di Fourier consente di studiare qualsiasi segnale scomponendolo in sinusoidi
- Una sinusode *nel dominio del tempo* di periodo  $T$  e frequenza  $f=1/T$  può essere rappresentata *nel dominio delle frequenze* dalla sola componente alla frequenza  $f$



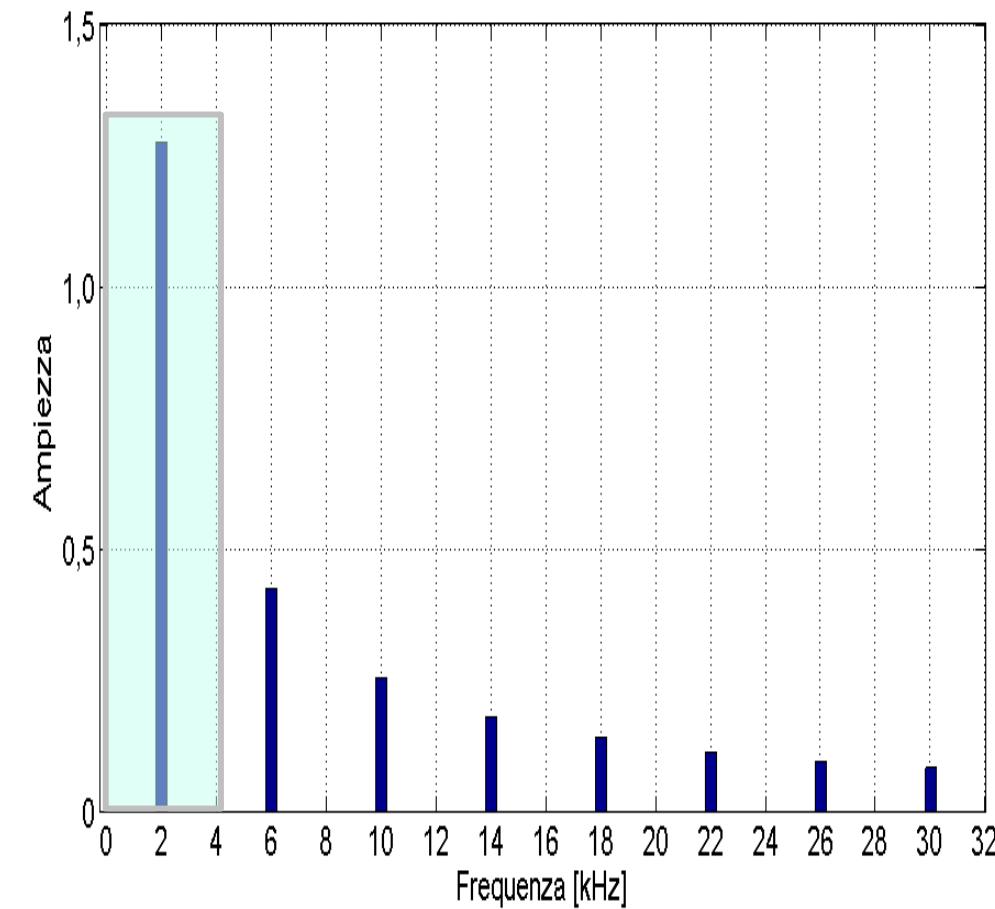
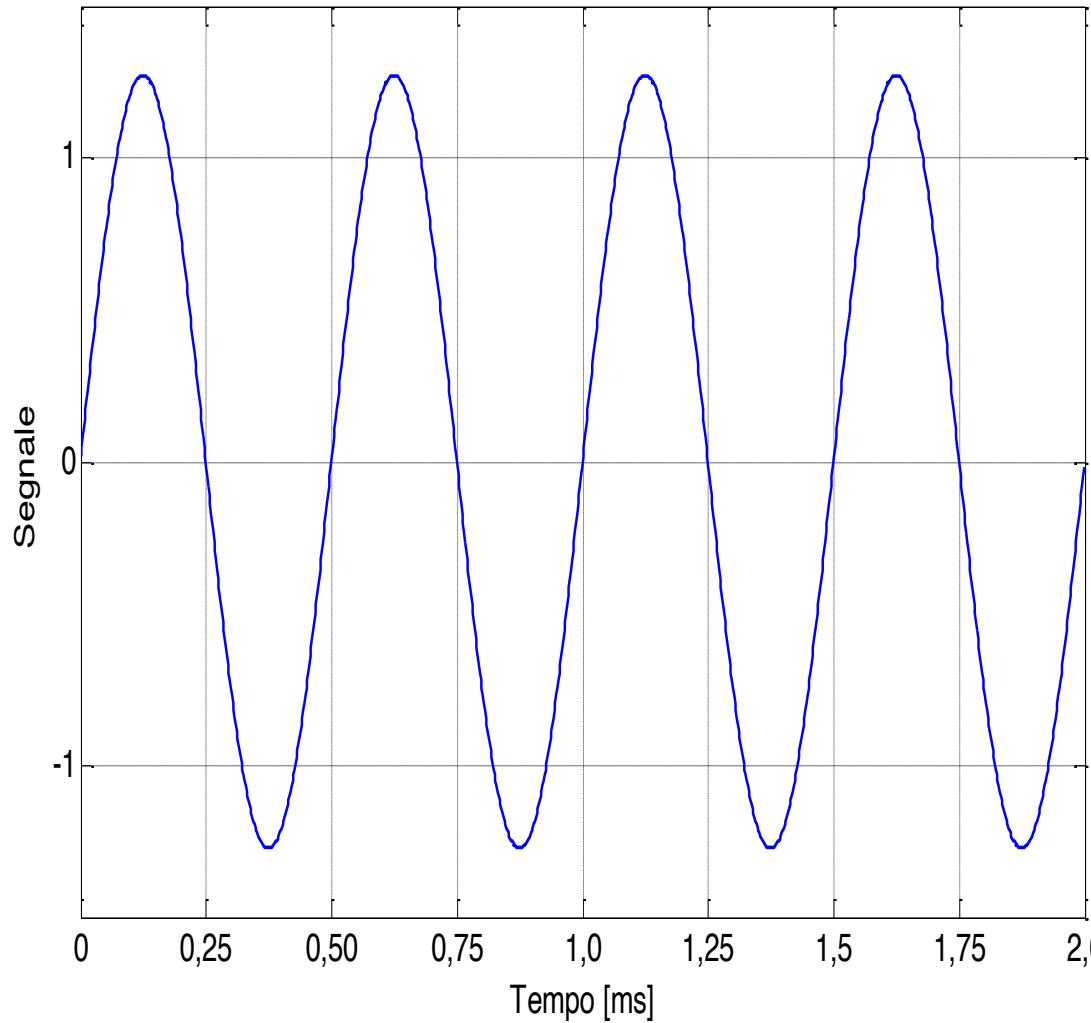
# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- Qualsiasi segnale periodico di periodo  $T$  e frequenza  $f=1/T$  nel dominio del tempo può essere scomposto in un numero discreto di sinusoidi di frequenza multipla di quella del segnale (*serie di Fourier*)
- Le componenti sinusoidali sono dette armoniche

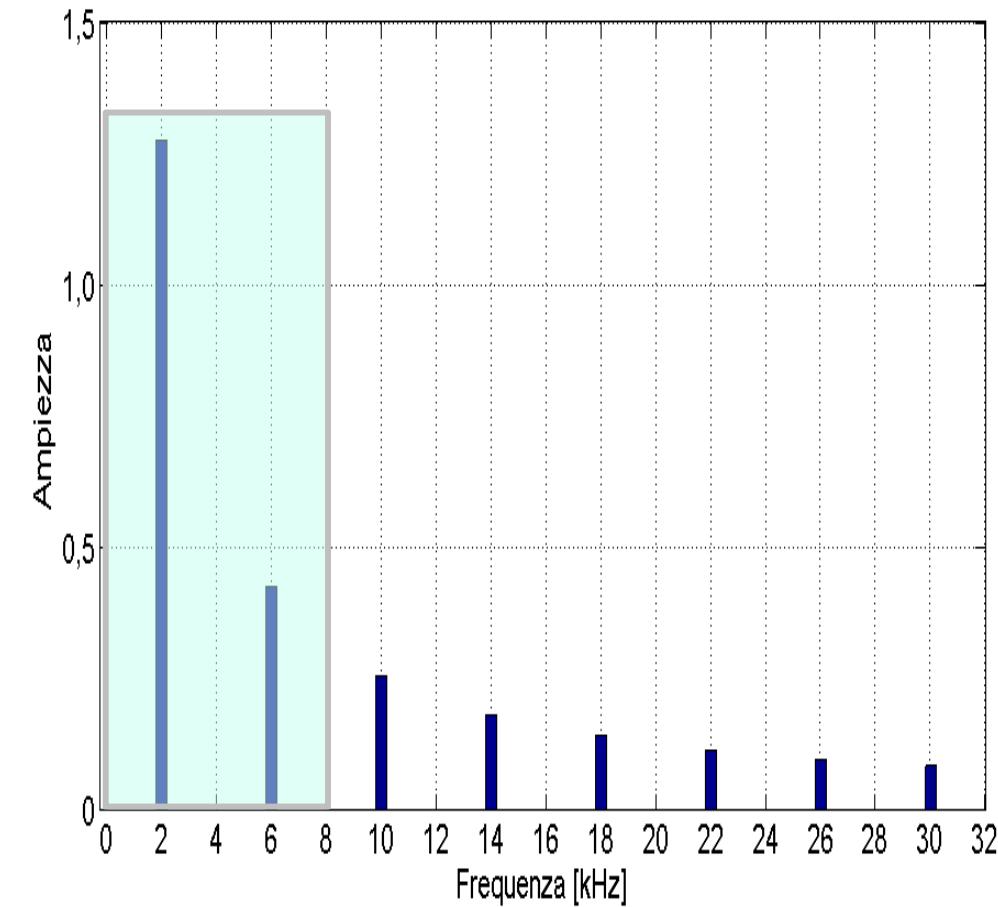
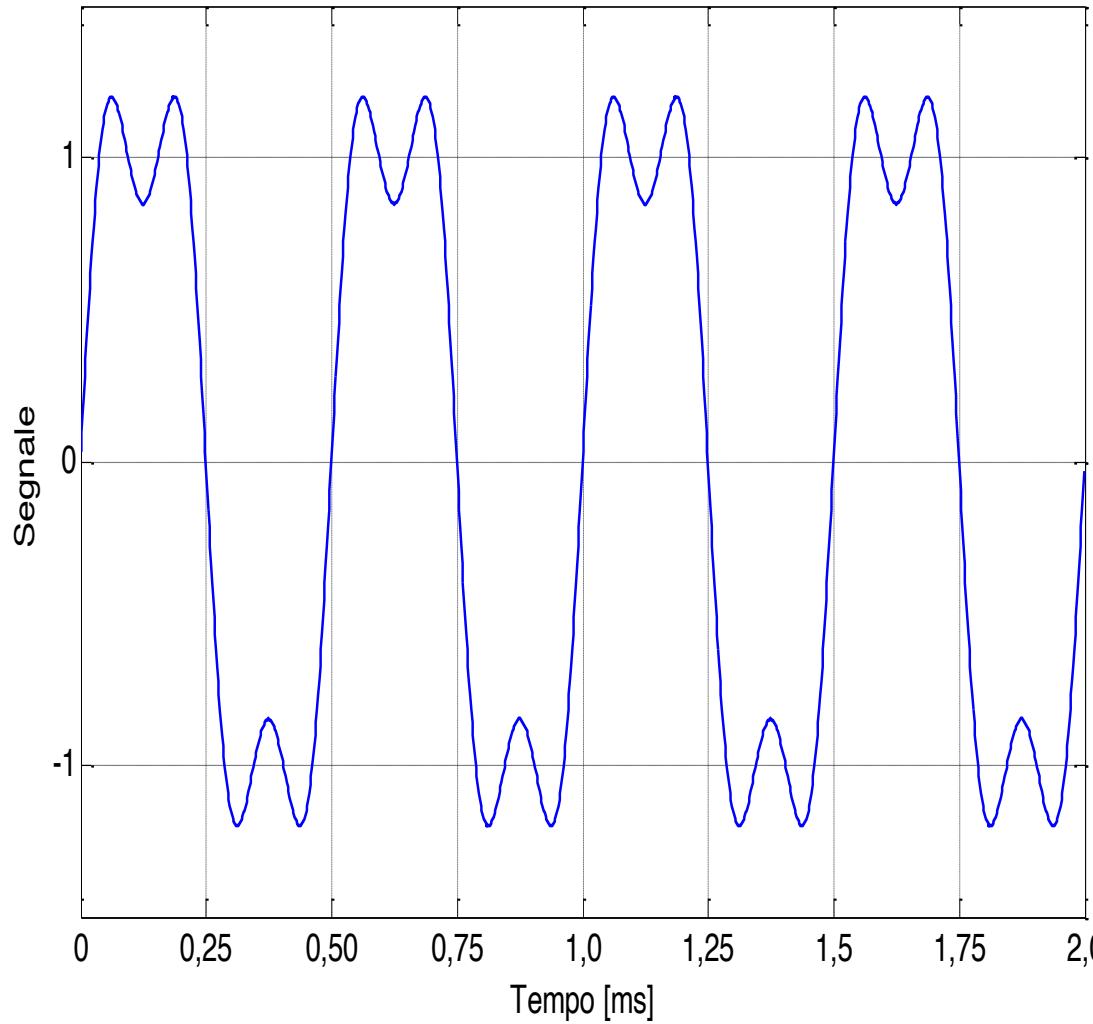
$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)$$



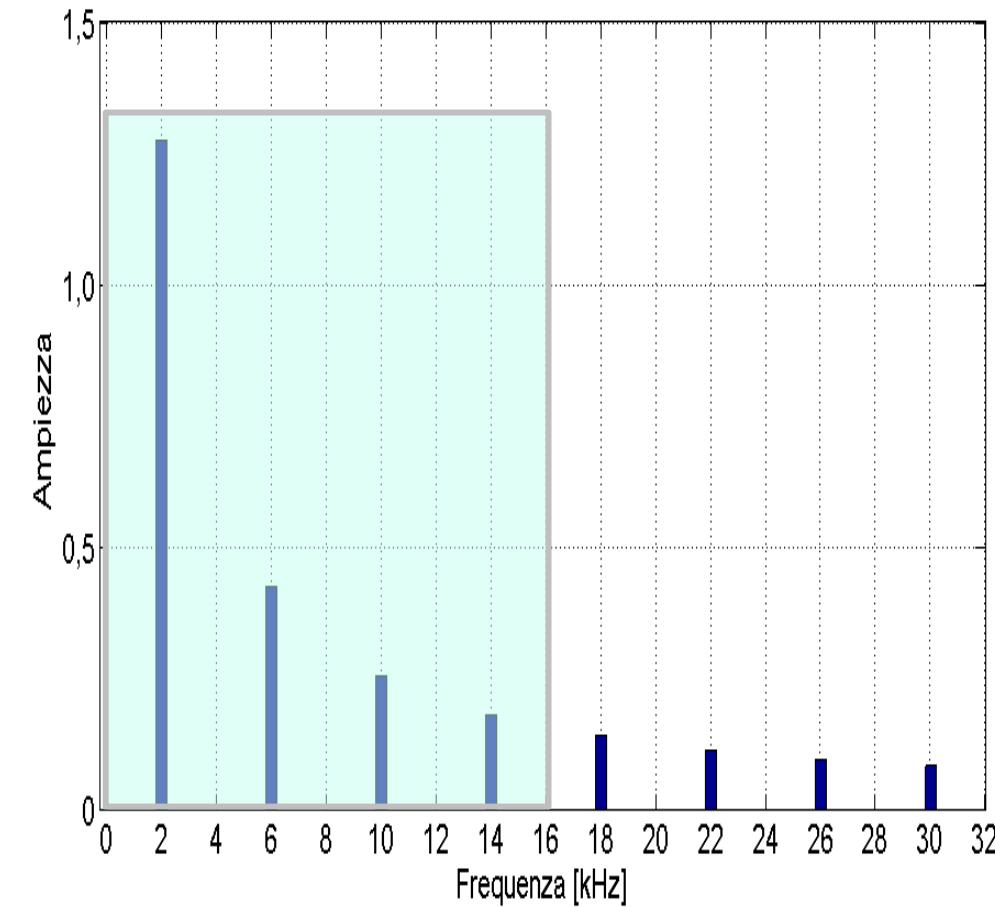
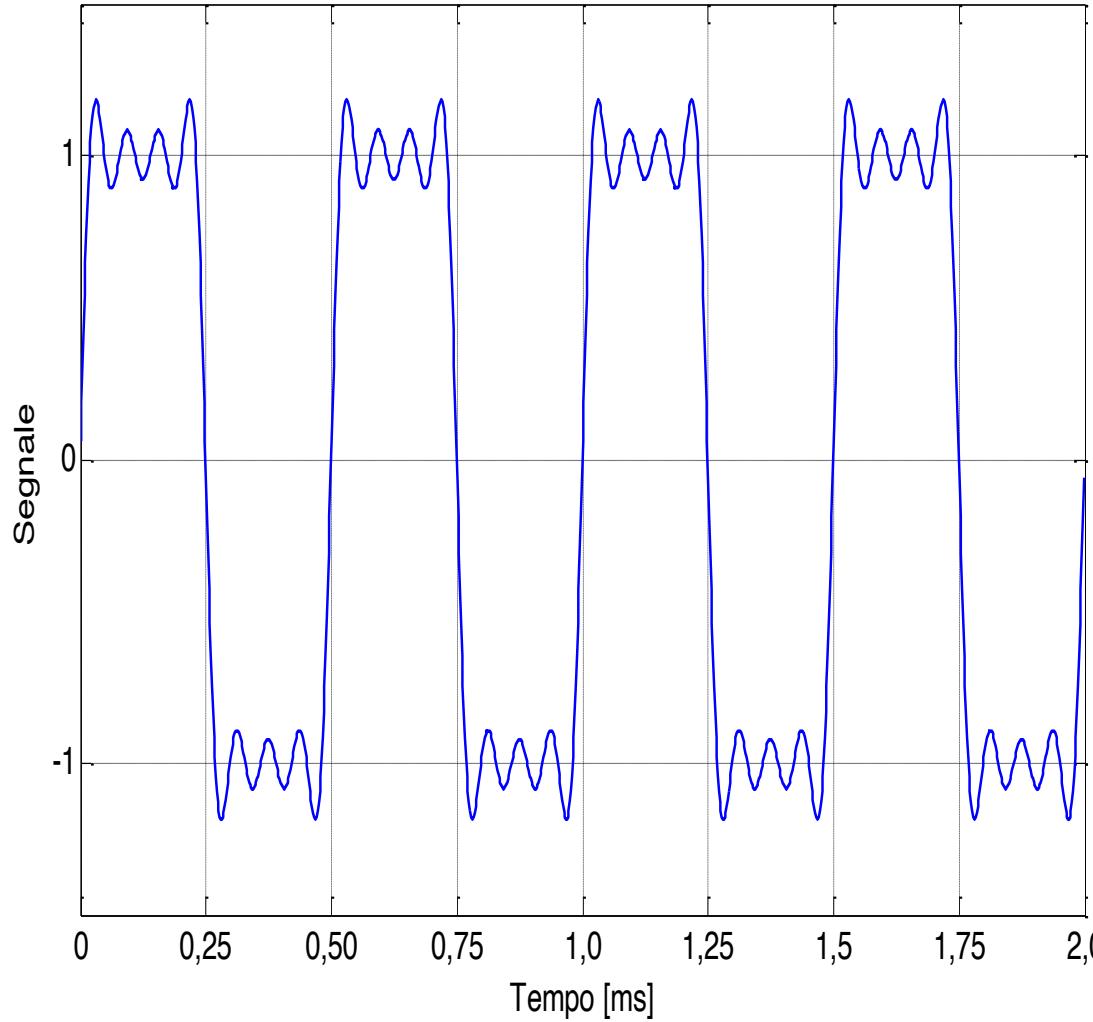
# Spettro di un segnale: onda quadra a media nulla



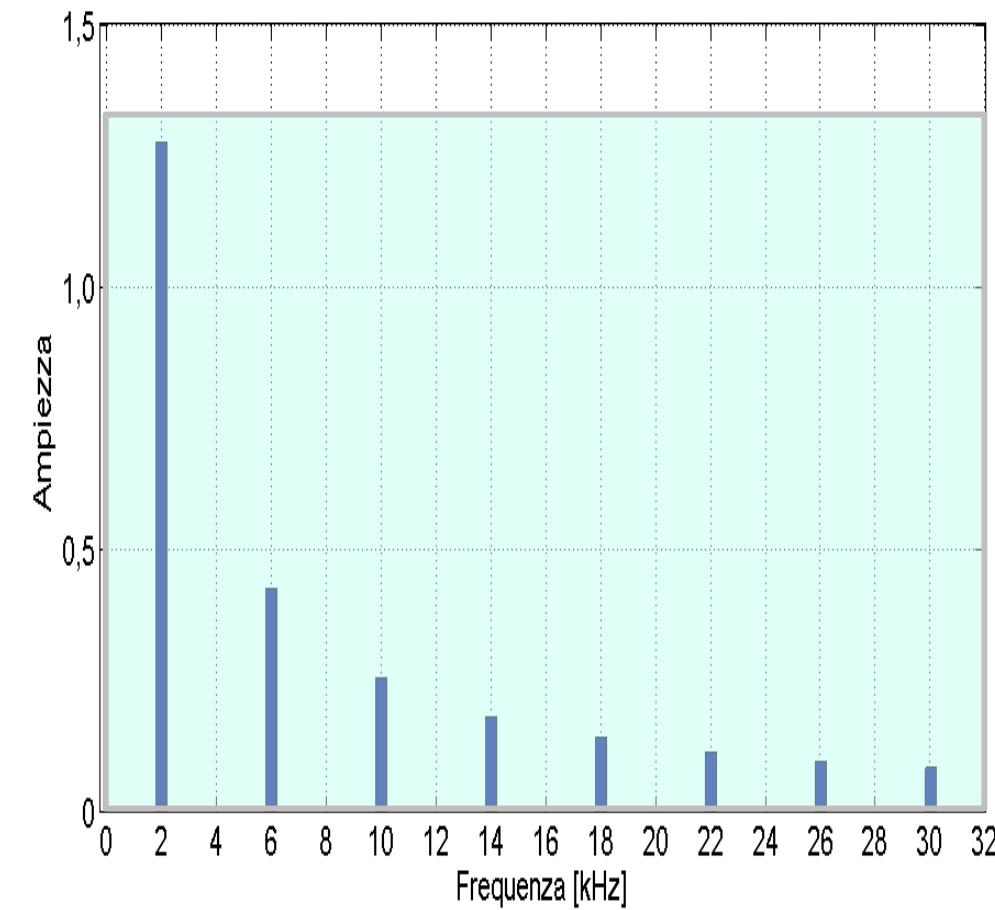
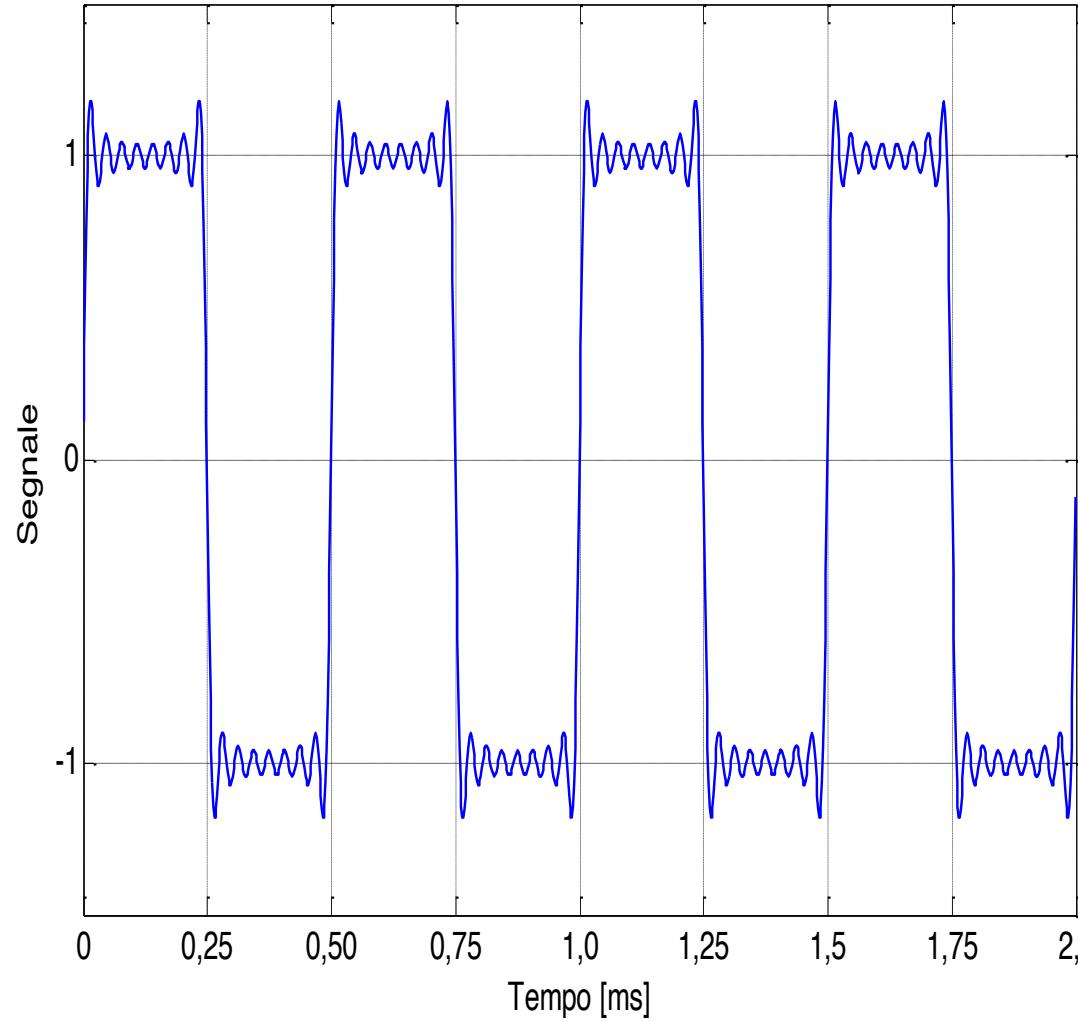
# Spettro di un segnale: onda quadra a media nulla



# Spettro di un segnale: onda quadra a media nulla

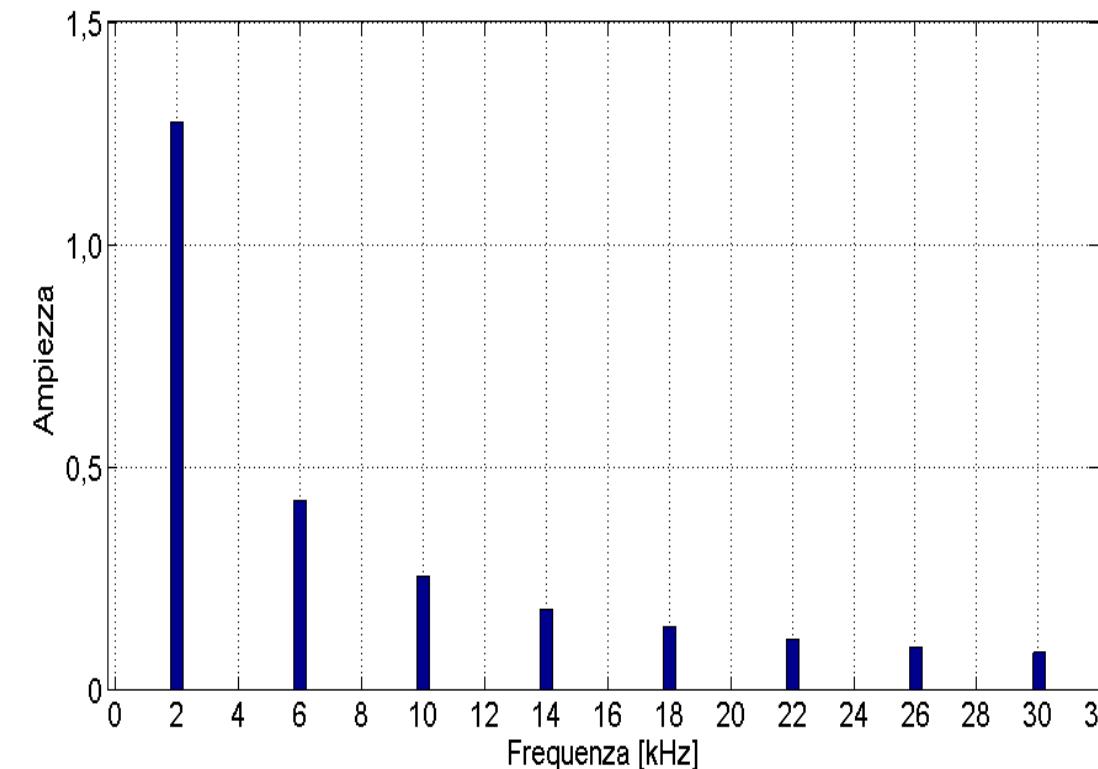
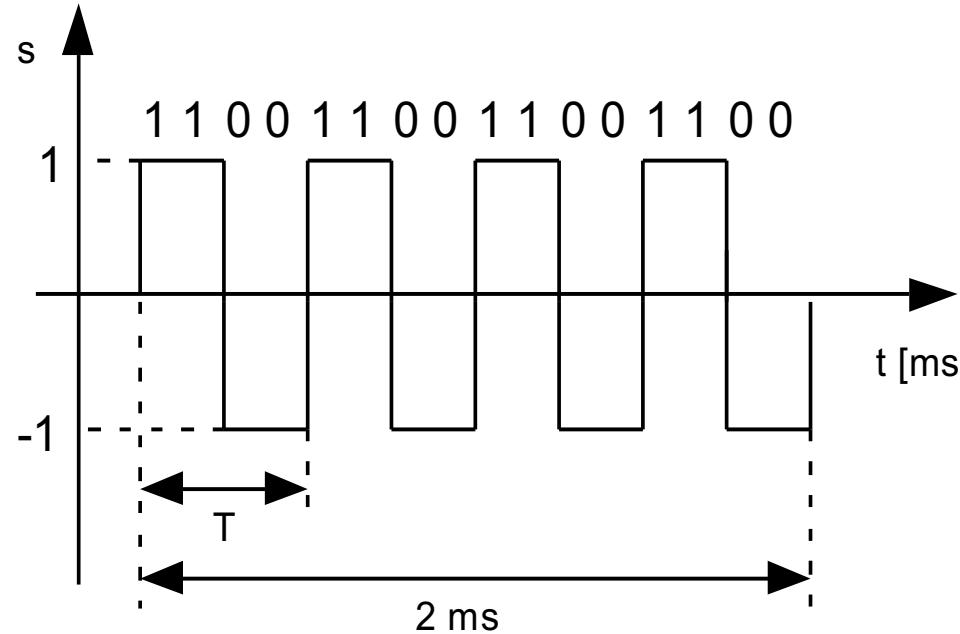


# Spettro di un segnale: onda quadra a media nulla



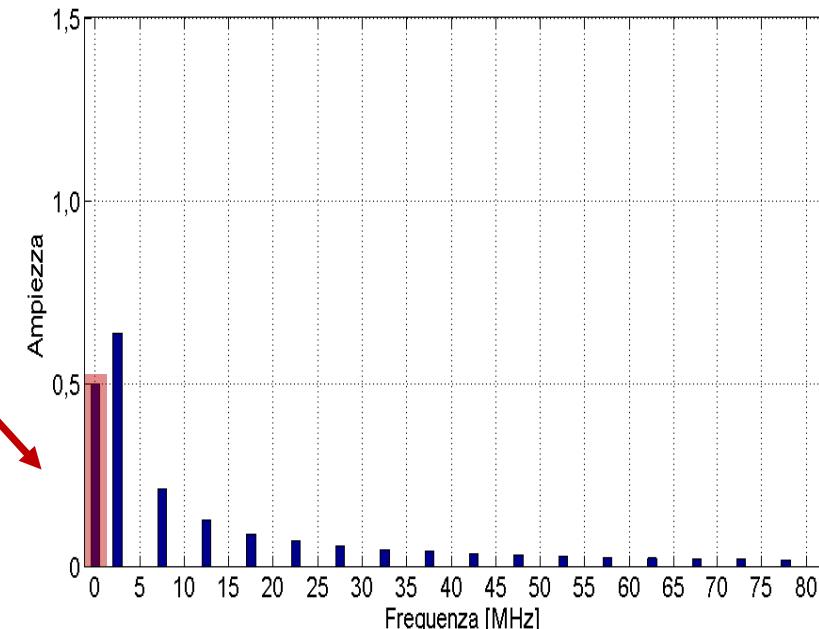
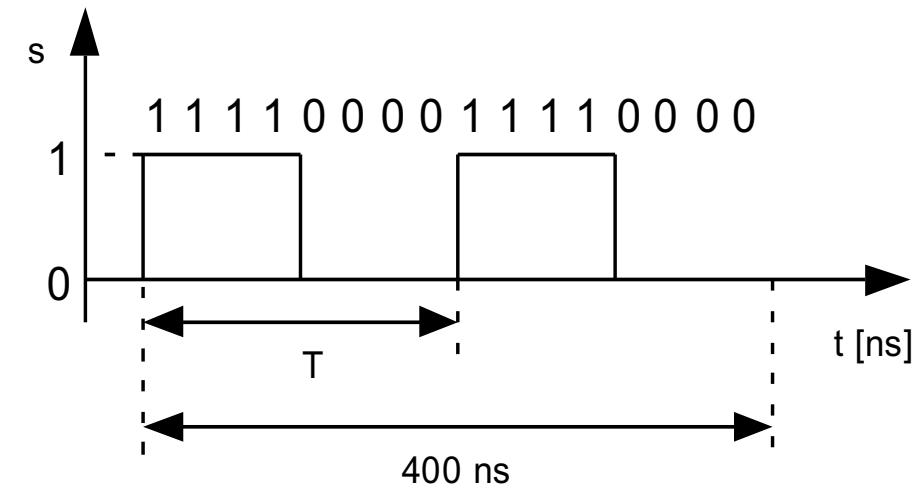
# Spettro di un segnale: onda quadra a media nulla

- Onda quadra → armoniche solo dispari
- La forma dello spettro dipende:
  - dalla durata del singolo periodo  $T$  (→ determina le frequenze delle armoniche)
  - dalla forma dell'impulso che rappresenta il singolo periodo (→ determina il valore dei coefficienti)

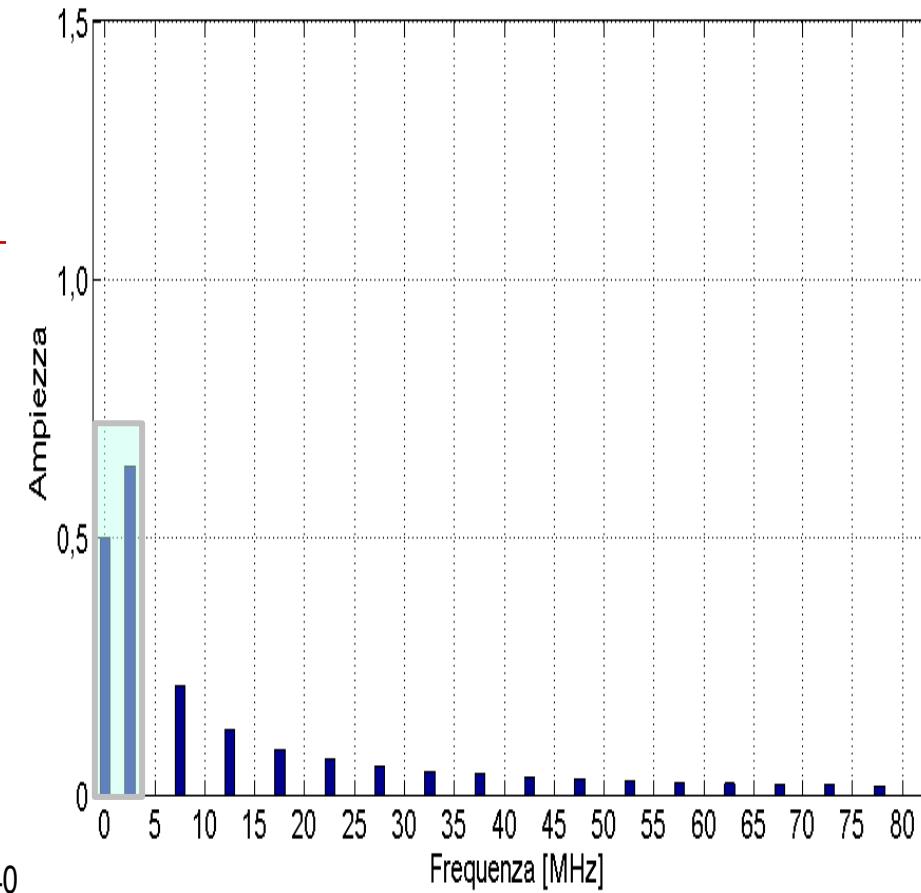
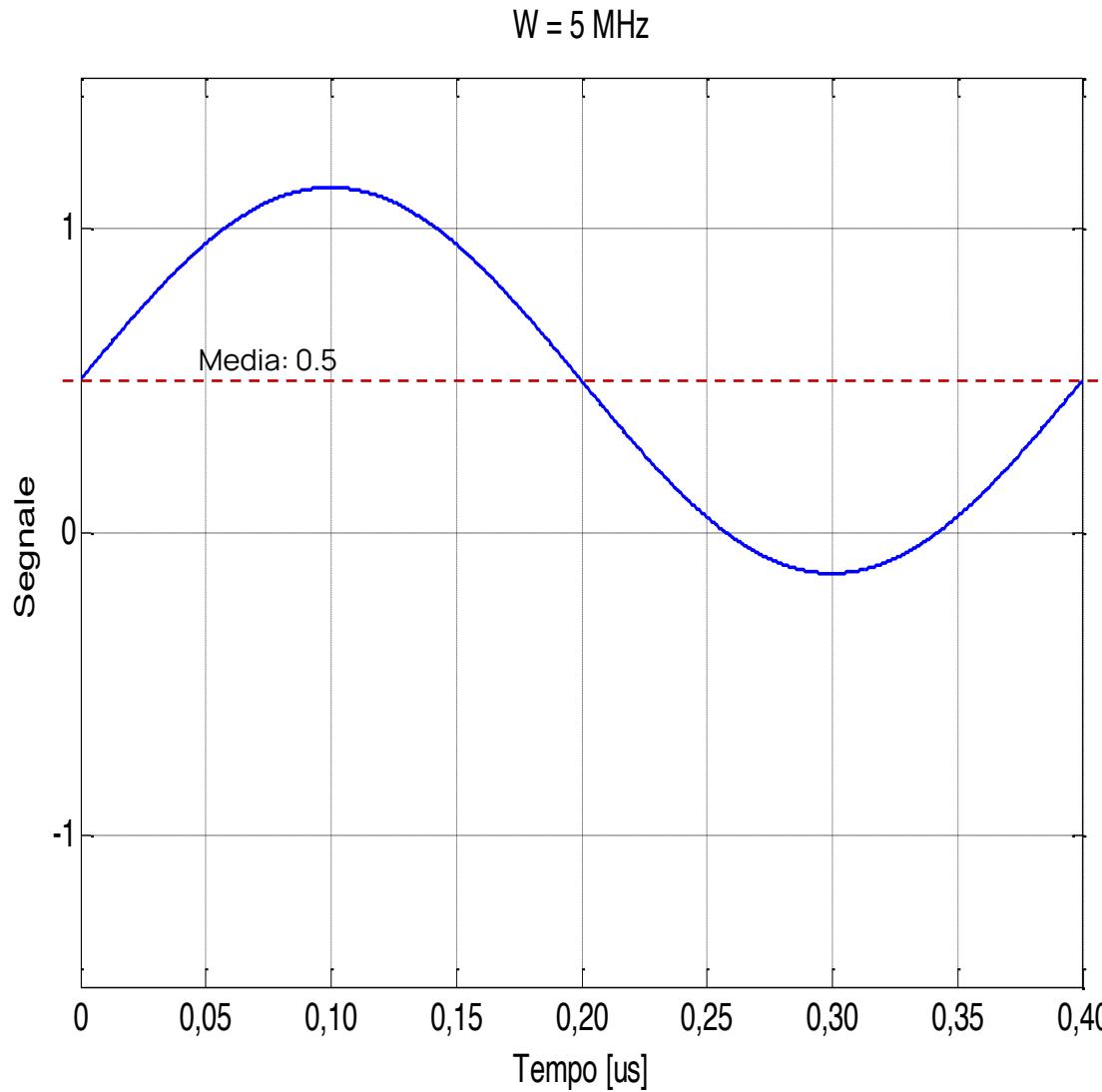


# Spettro di un segnale: onda quadra a media non-nulla

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

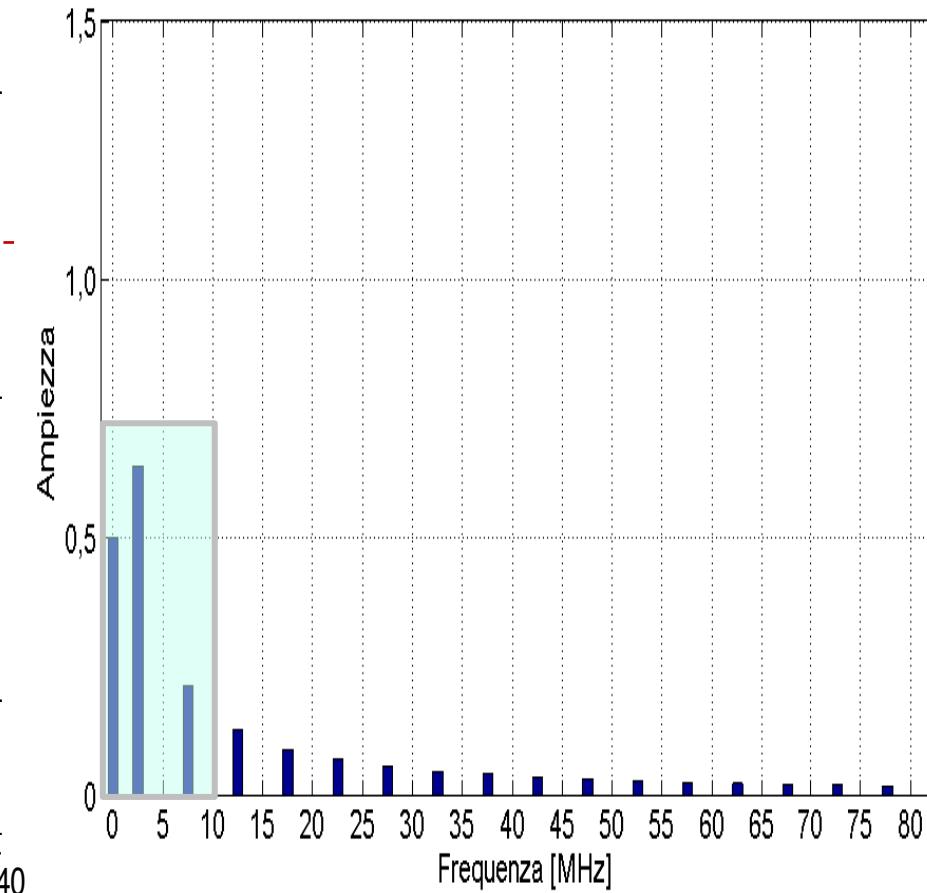
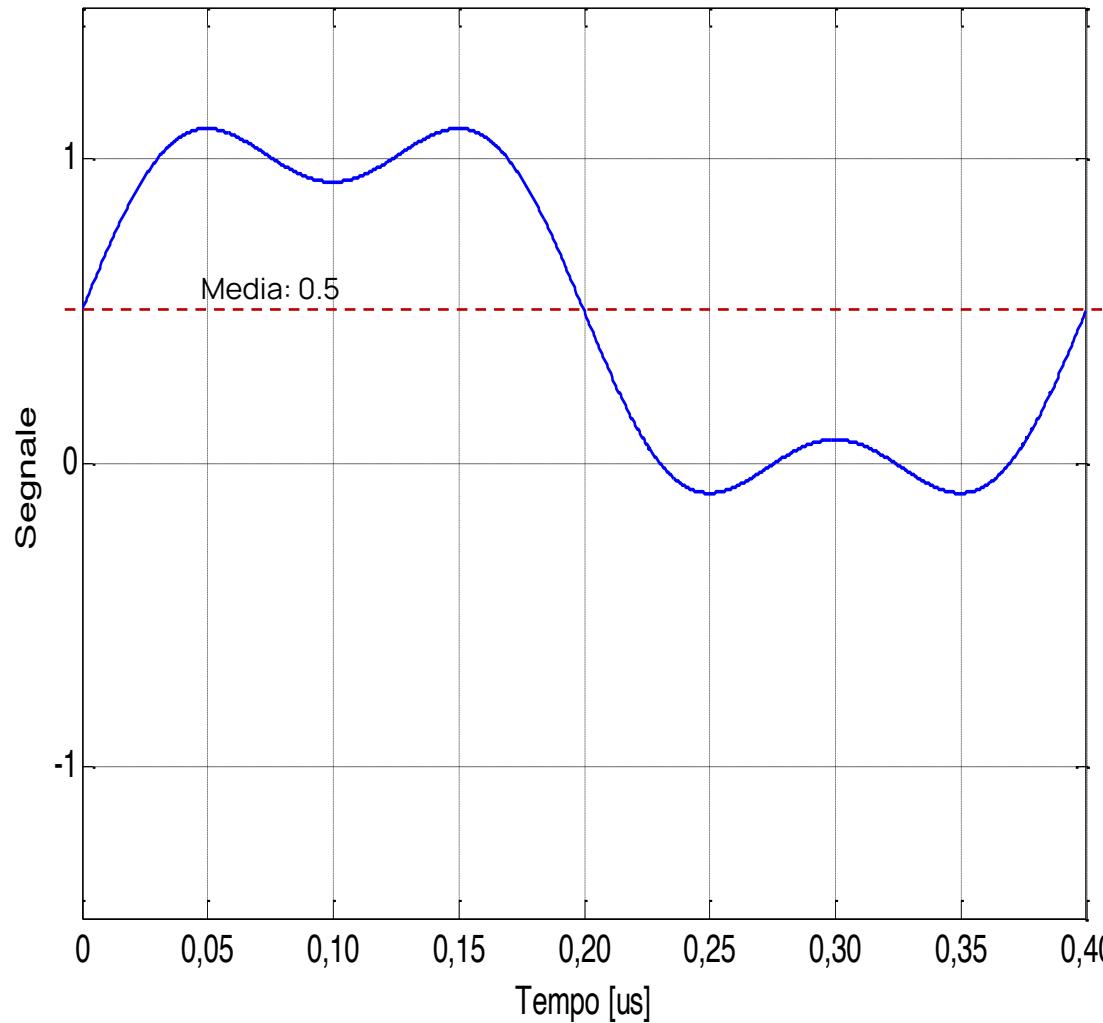


# Spettro di un segnale: onda quadra a media non-nulla



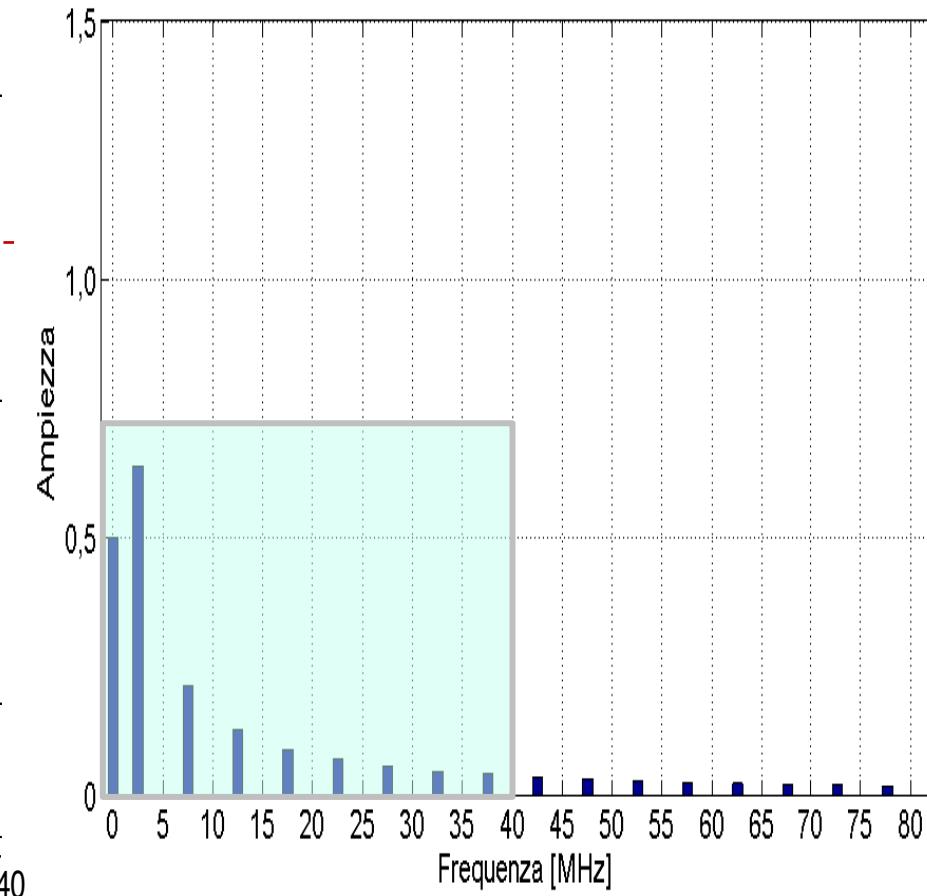
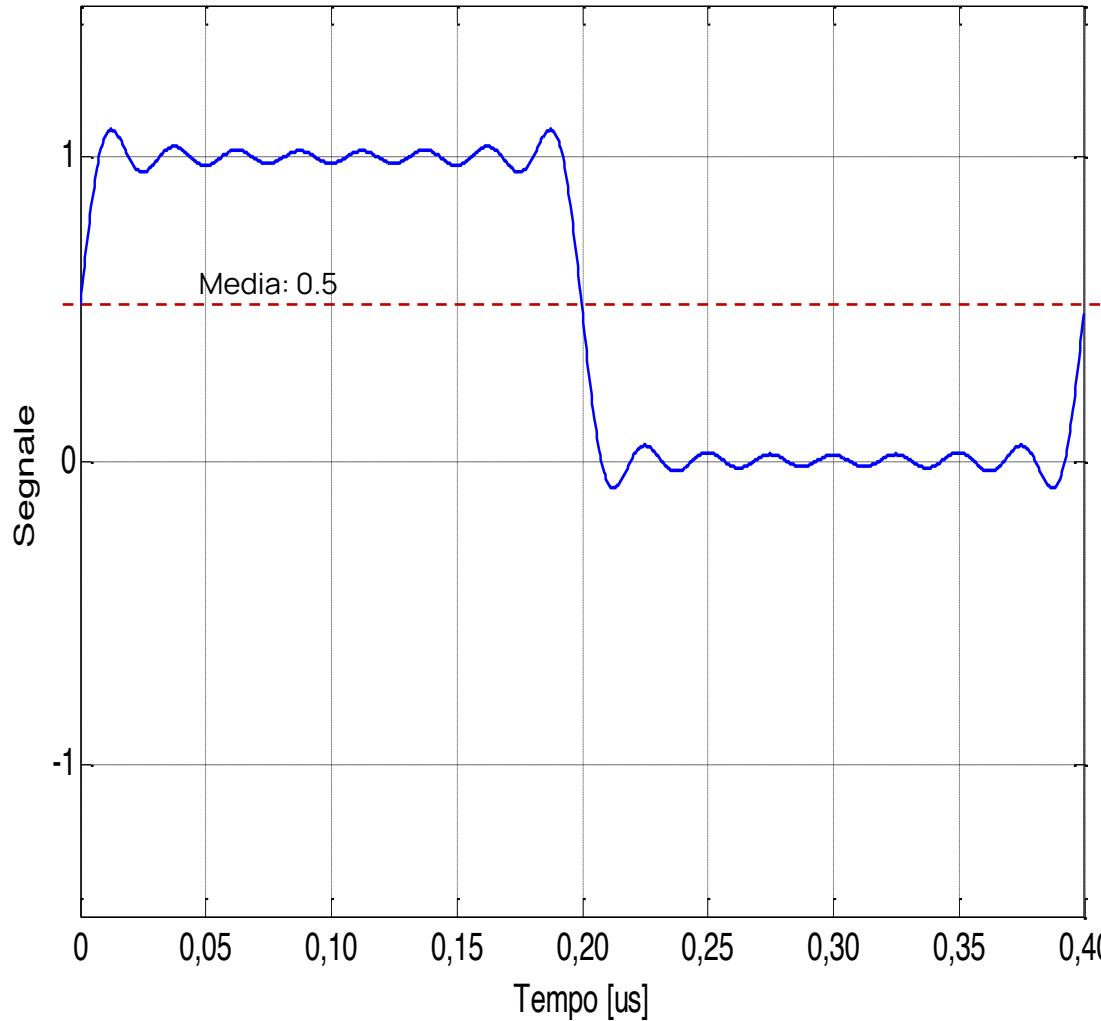
# Spettro di un segnale: onda quadra a media non-nulla

$W = 10 \text{ MHz}$



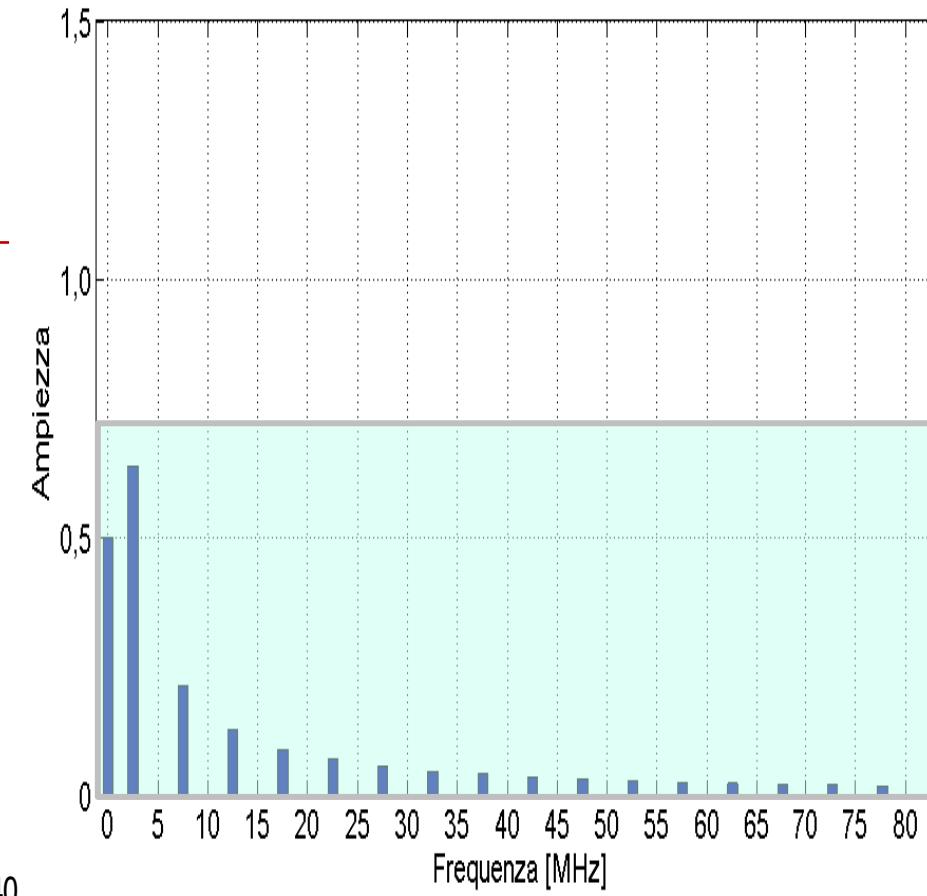
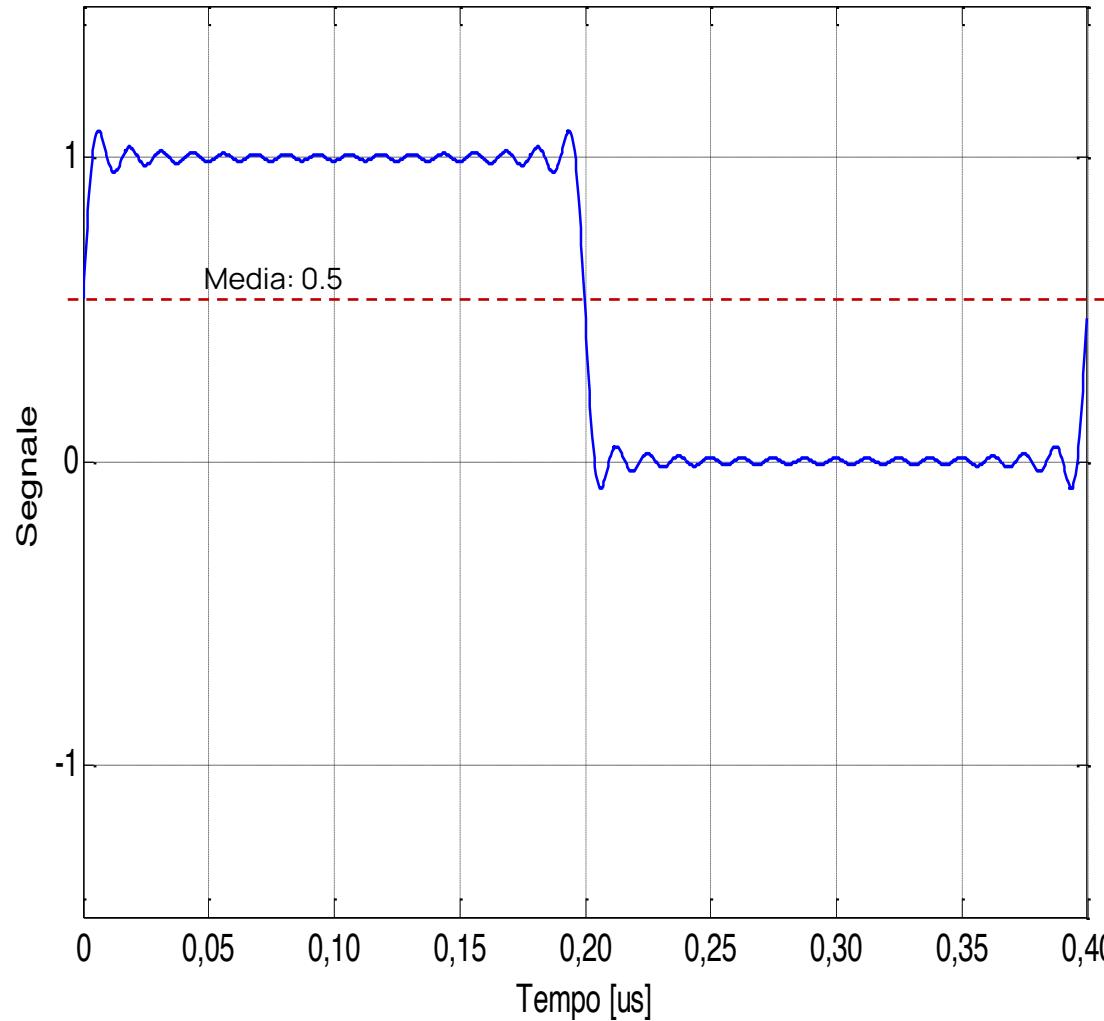
# Spettro di un segnale: onda quadra a media non-nulla

$W = 40 \text{ MHz}$



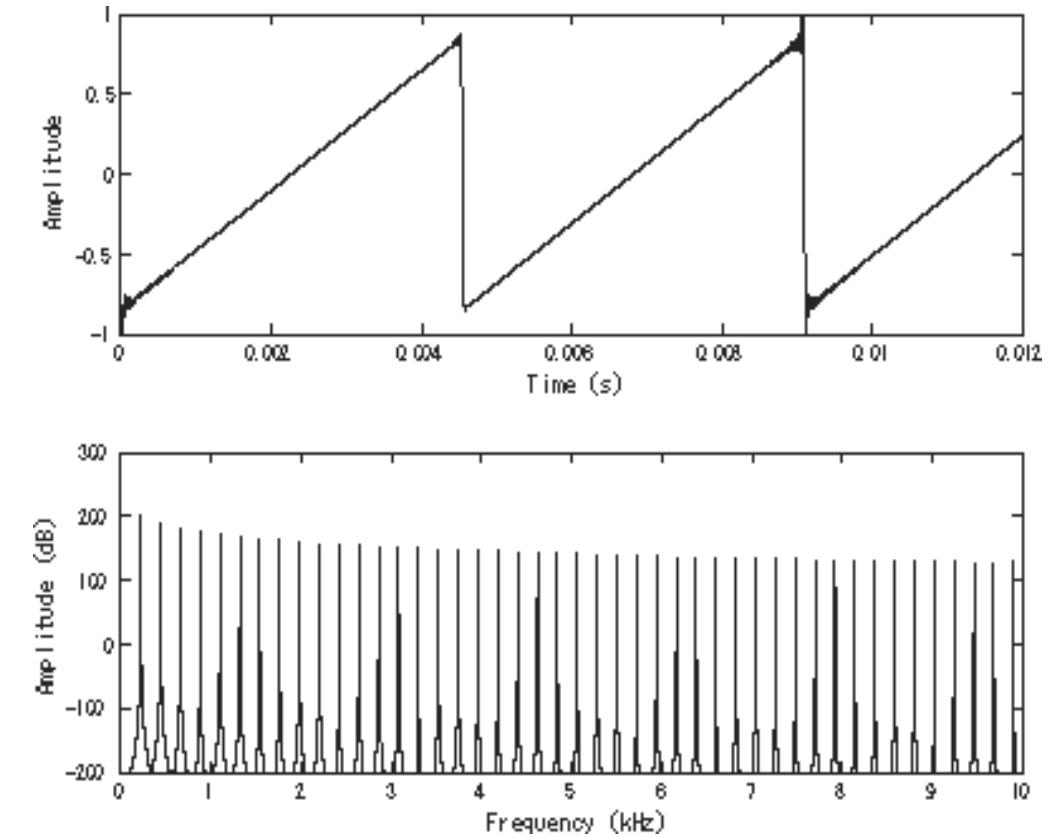
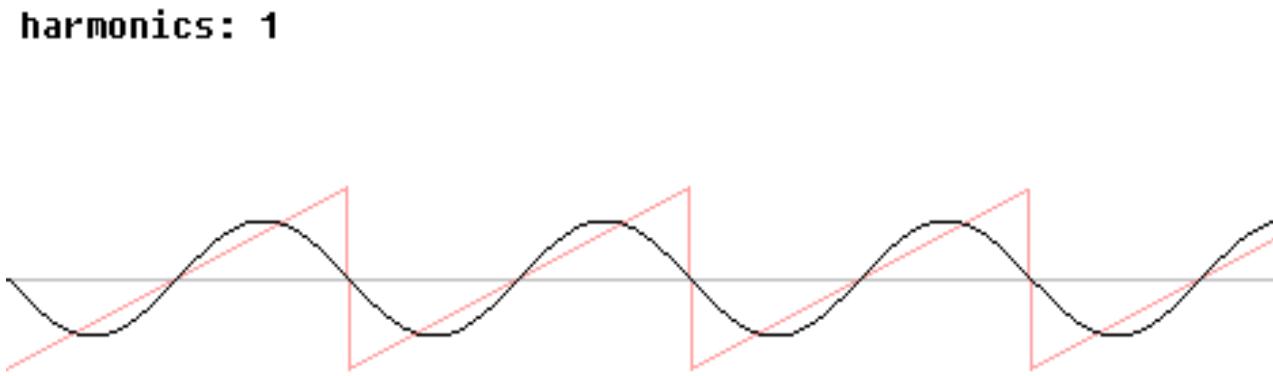
# Spettro di un segnale: onda quadra a media non-nulla

$W = 80 \text{ MHz}$



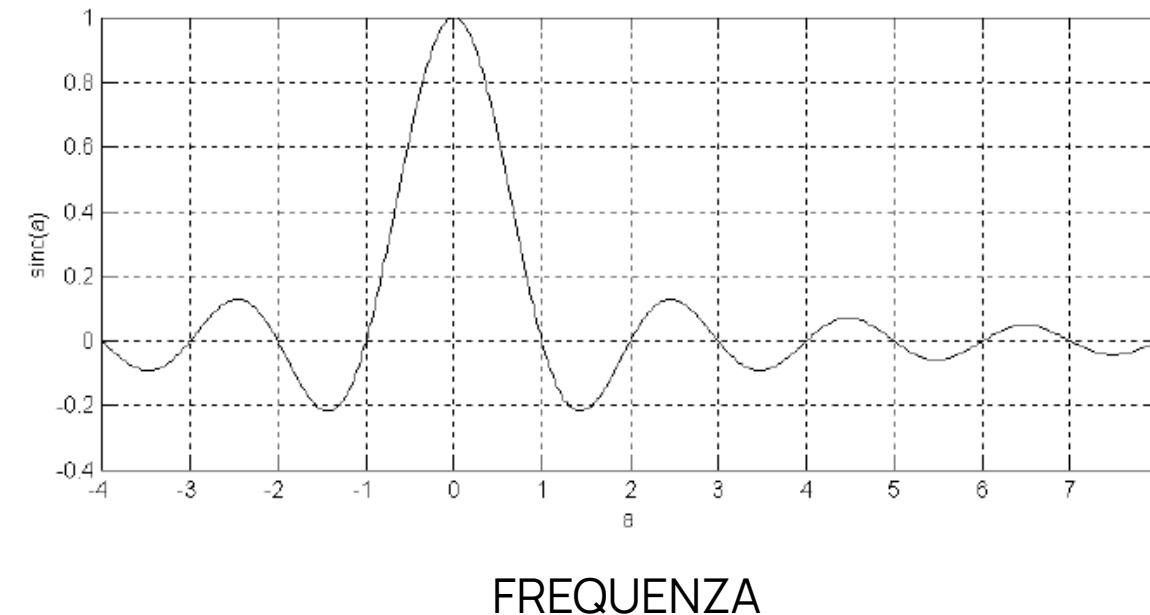
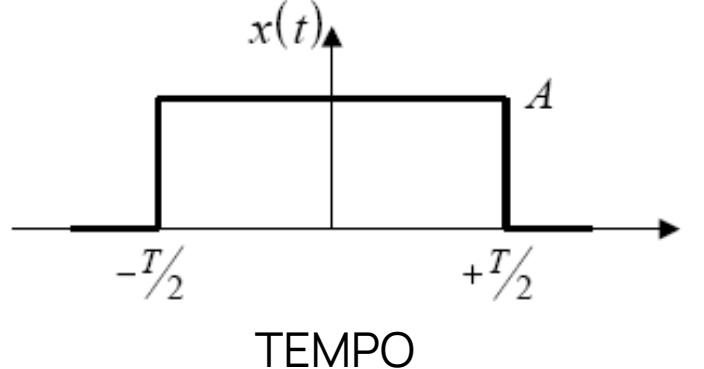
# Onda a dente di sega

- Spettro con armoniche sia pari che dispari



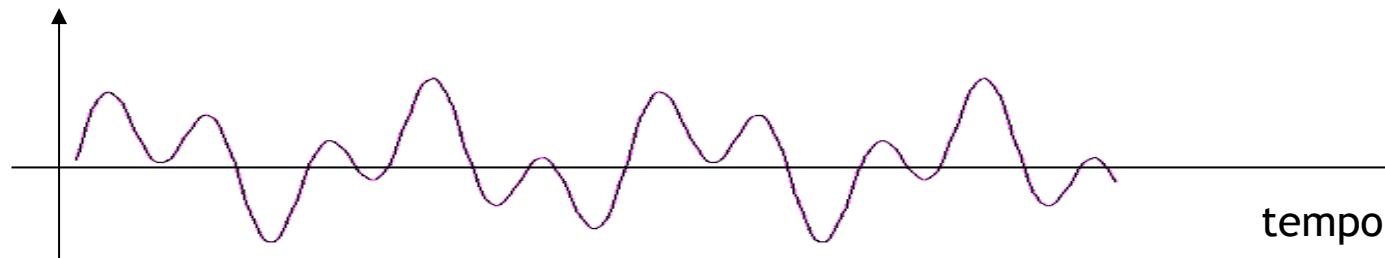
# Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- L'**analisi di Fourier** è estendibile a *qualsiasi segnale variabile nel tempo*.
- Qualsiasi segnale variabile nel tempo (anche non periodico) può essere rappresentato come una somma (infinita, ovvero un integrale) di funzioni sinusoidali (componenti in frequenza), ognuna caratterizzata dalla 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  $S(f)$** .

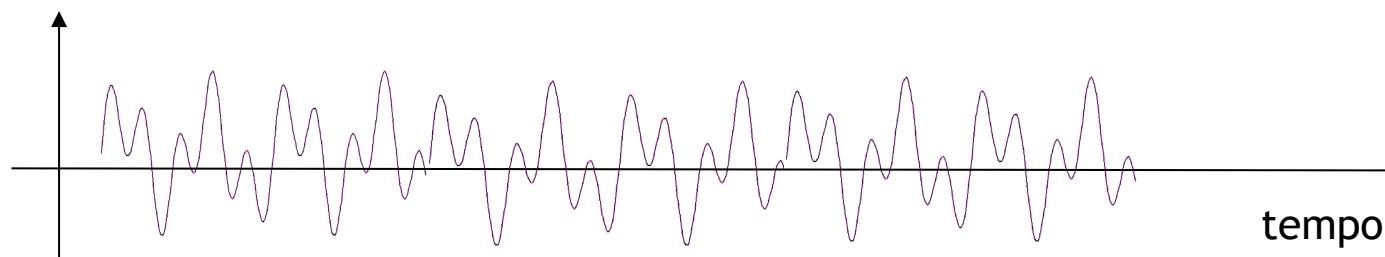


# Effetto temporale della banda

- **Banda stretta:** segnali che variano lentamente nel tempo

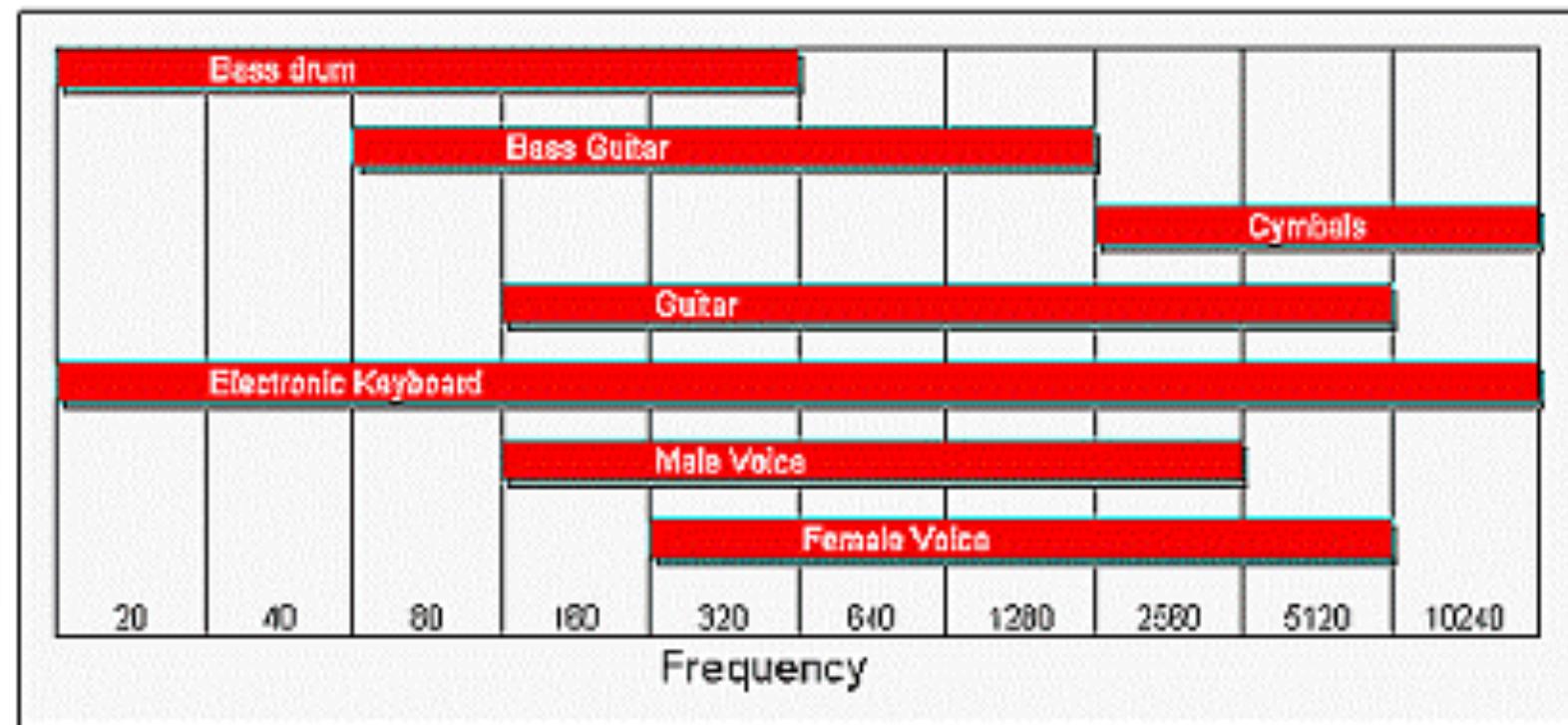


- **Banda larga:** segnali che variano velocemente nel tempo



# Segnali e bande

- Segnali musicali: da 20 Hz a 20 kHz



# Esempi di bande occupate da segnali per TLC

Segnale	Banda
Segnale telefonico	300-4000 Hz
Voce	300-8000 Hz
Musica	20-20.000 Hz
TV (PAL)	0-5.000.000 Hz (5 MHz)
Cinema	0-500 MHz



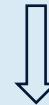
Più banda



Più ricchezza di contenuti

# Conversione analogico/digitale

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



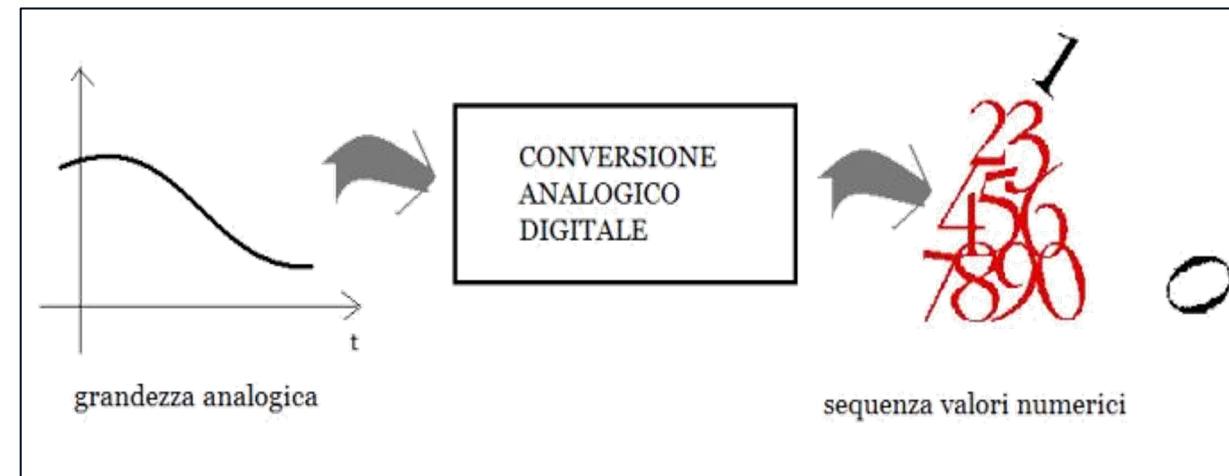
mondo **analogico**

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



mondo **digitale**

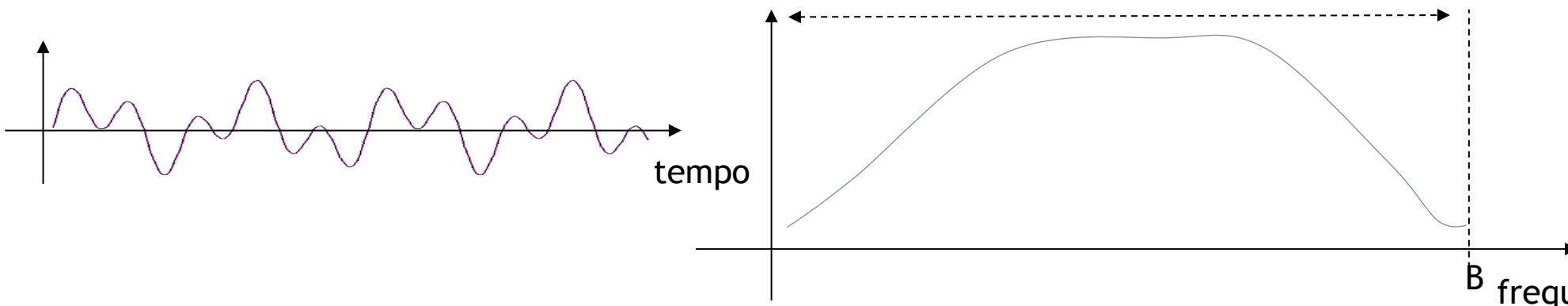
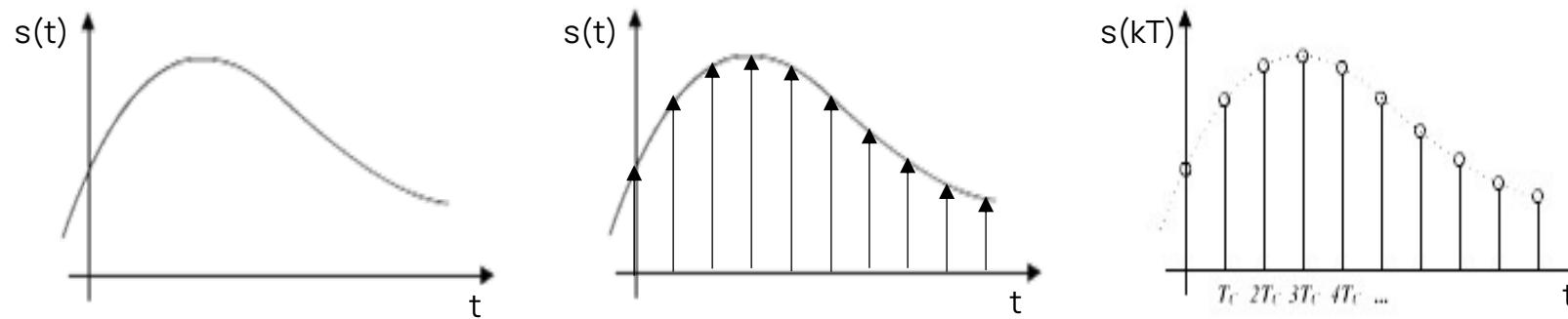
È necessario trasformare i segnali analogici  
in un loro equivalente digitale



# Conversione analogico/digitale

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

**segnale analogico** → **CAMPIONAMENTO** → **segnale campionato**

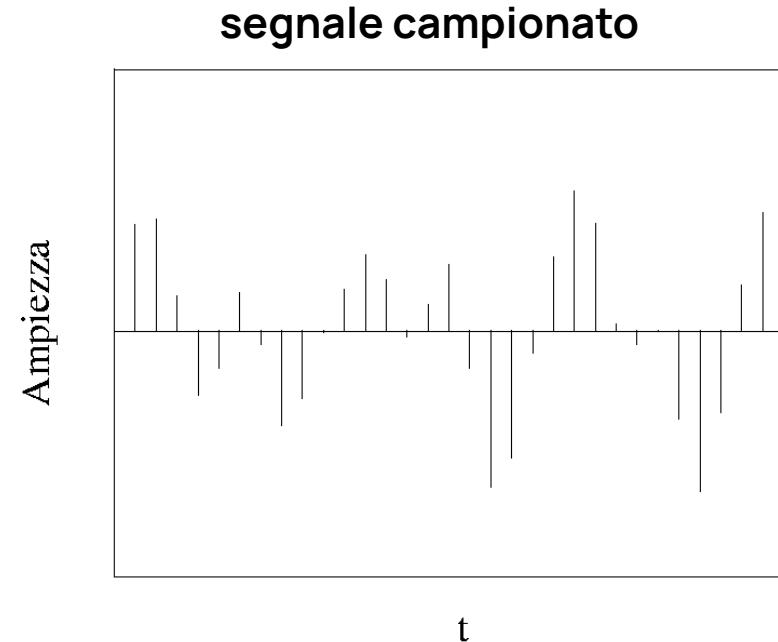
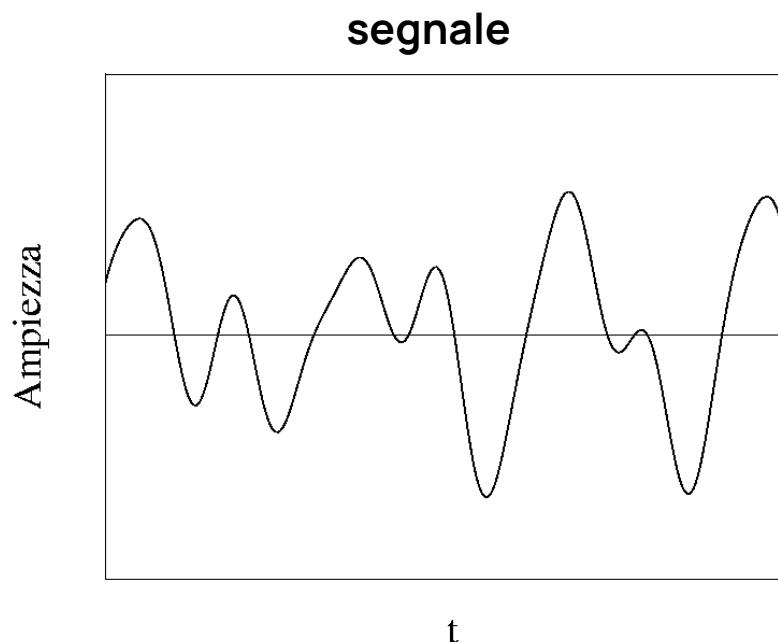


# Campionamento

## □ Teorema di Nyquist

- Un segnale nel tempo è completamente determinato dai suoi campioni presi a distanza  $T$  tale che  $T_c \leq 1/2f_{MAX}$ , dove  $f_{MAX}$  è la massima frequenza della banda del segnale, o usando la frequenza di campionamento  $f_c = 1/T_c$ :

$$f_c \geq 2f_{MAX} = f_N \text{ (frequenza di Nyquist)}$$



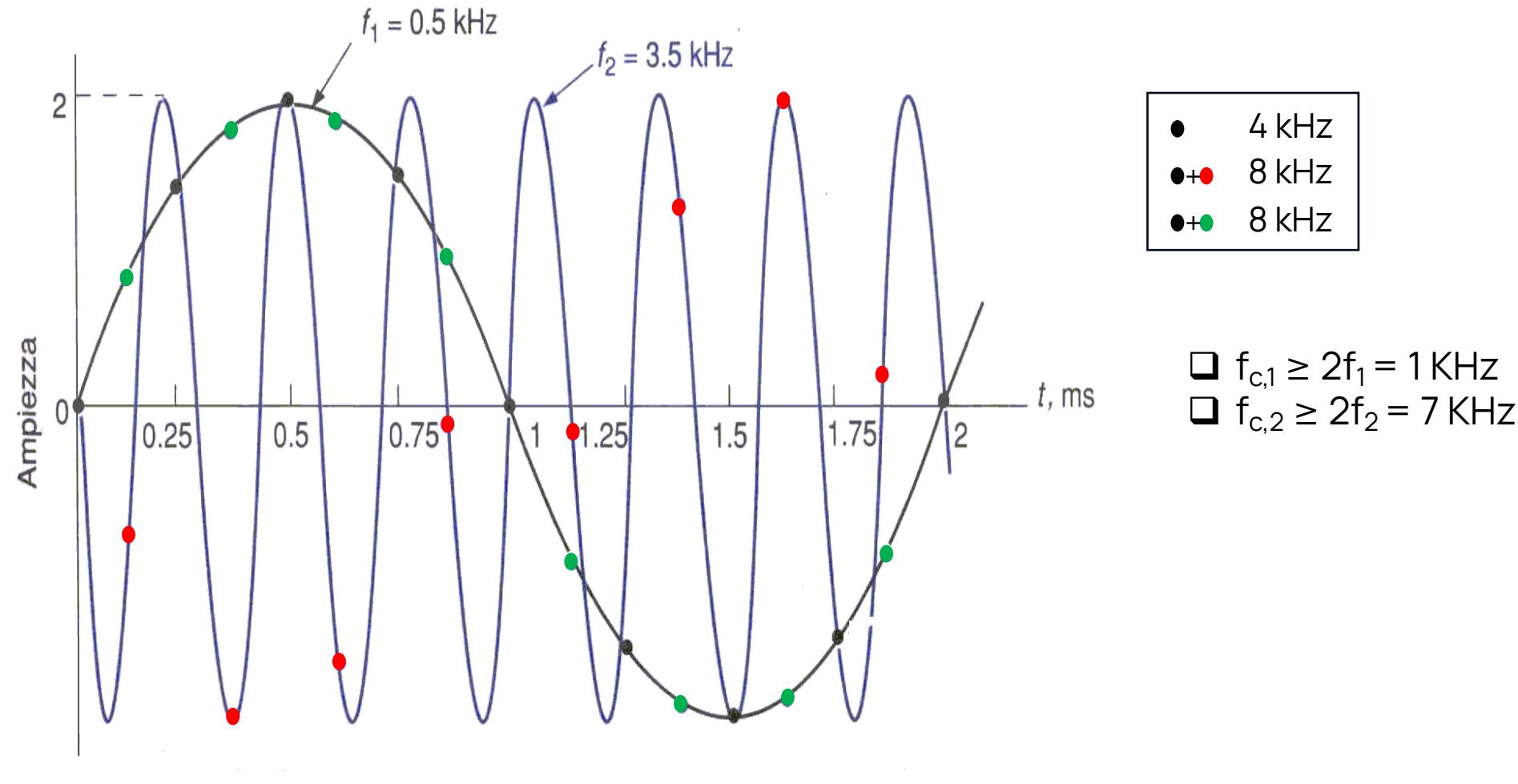
# Campionamento: Teorema di Nyquist

$$f_c \geq 2f_{MAX} = f_N \text{ (frequenza di Nyquist)}$$

- 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)

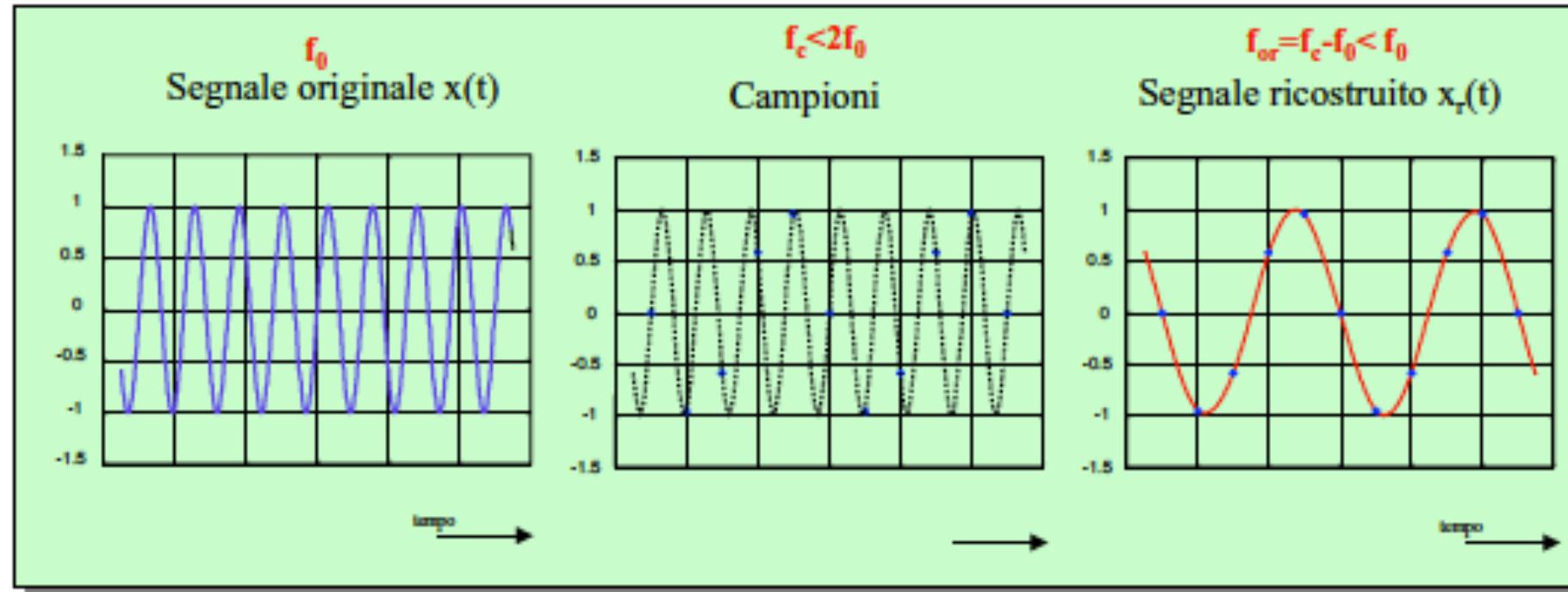
# Campionamento: Teorema di Nyquist

- 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)?

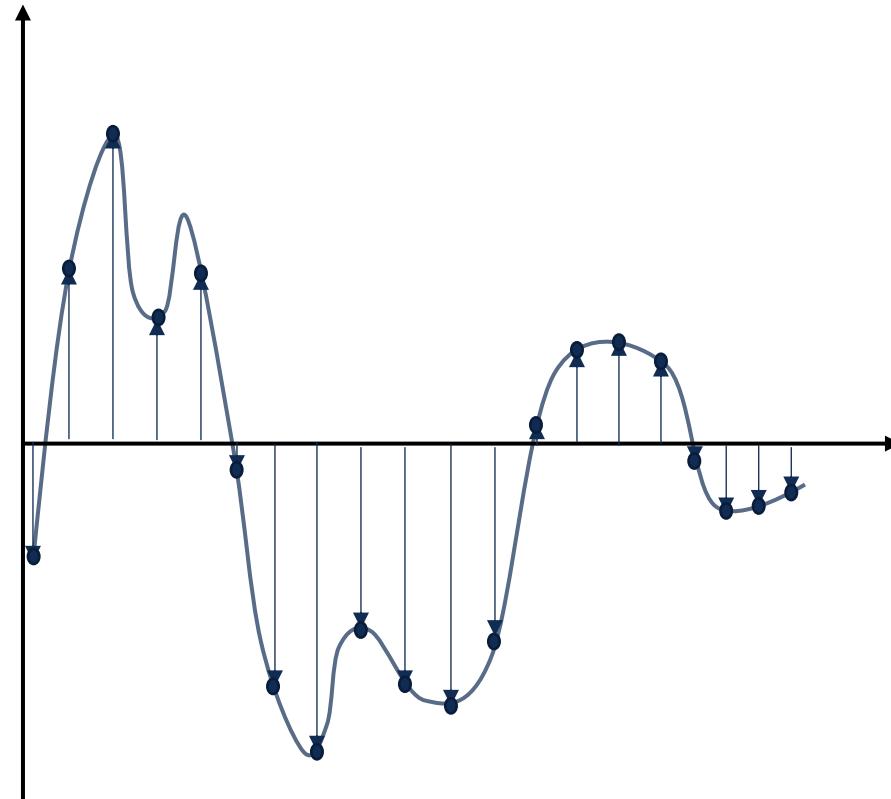


# Frequenze di campionamento tipiche

Segnale	Banda	Frequenza di campionamento
Segnale telefonico	300-4000 Hz	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

# Campionamento di un segnale

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

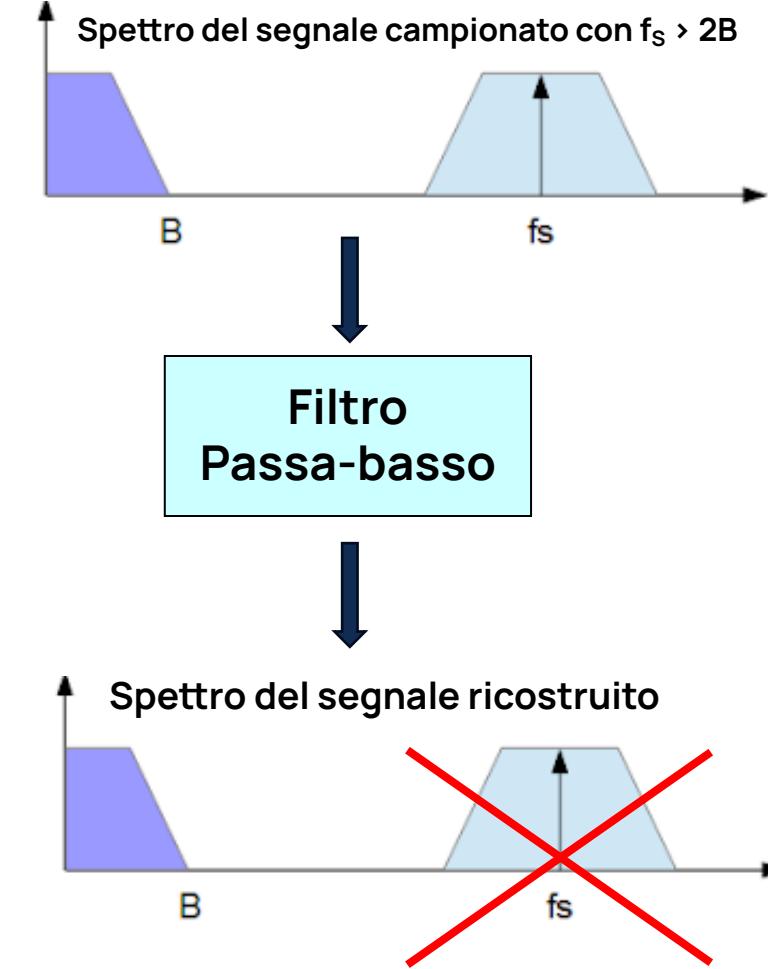
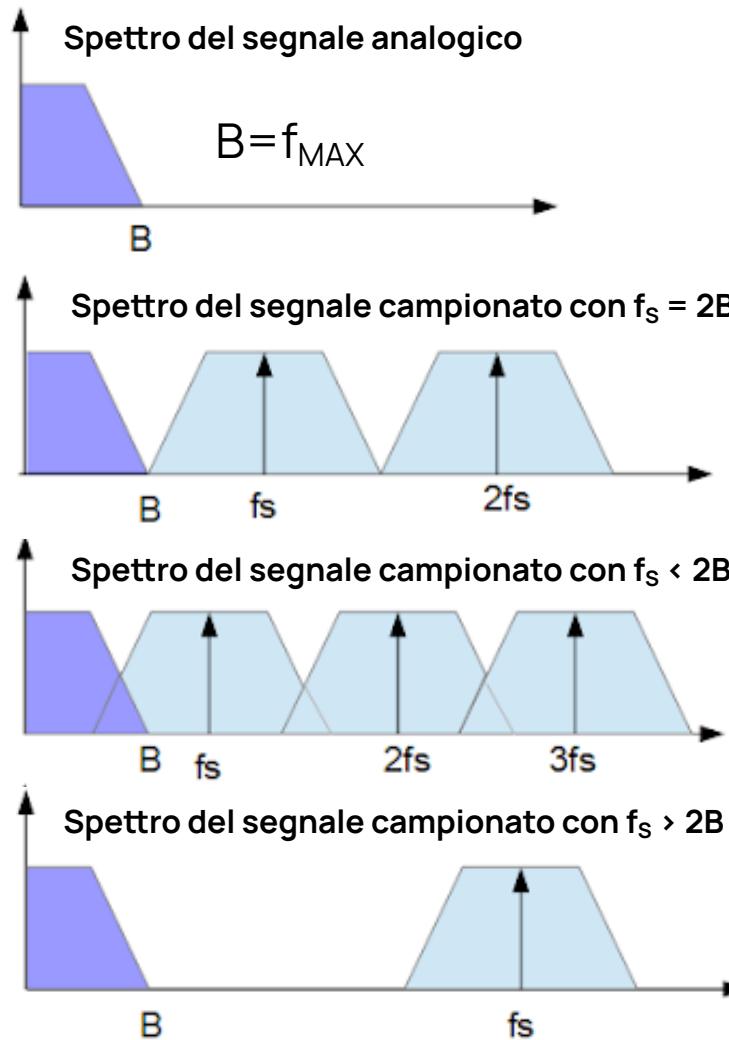


# Ricostruzione di un segnale campionato

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

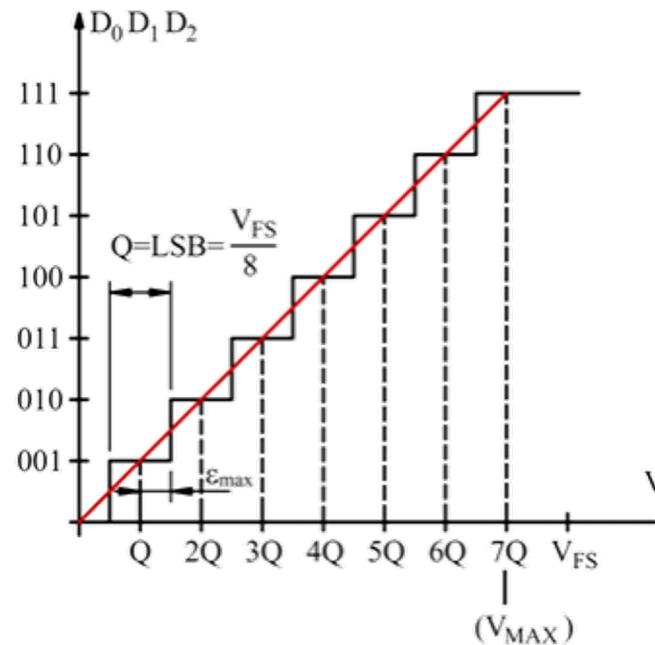


# Ricostruzione di un segnale campionato



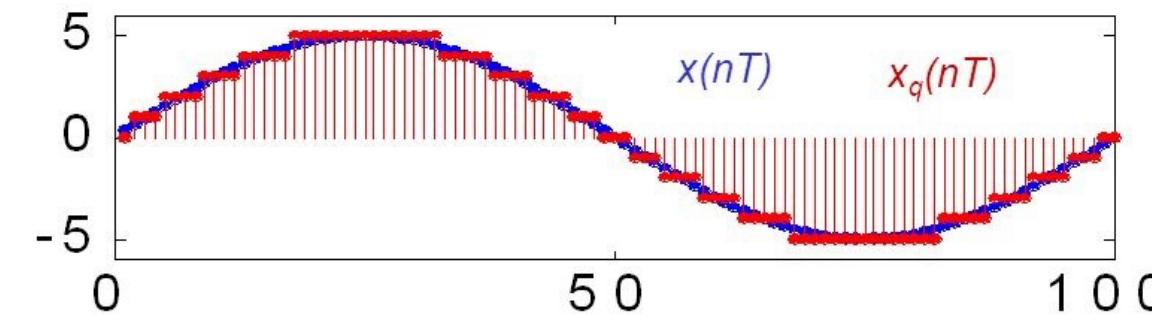
# Quantizzazione

- 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



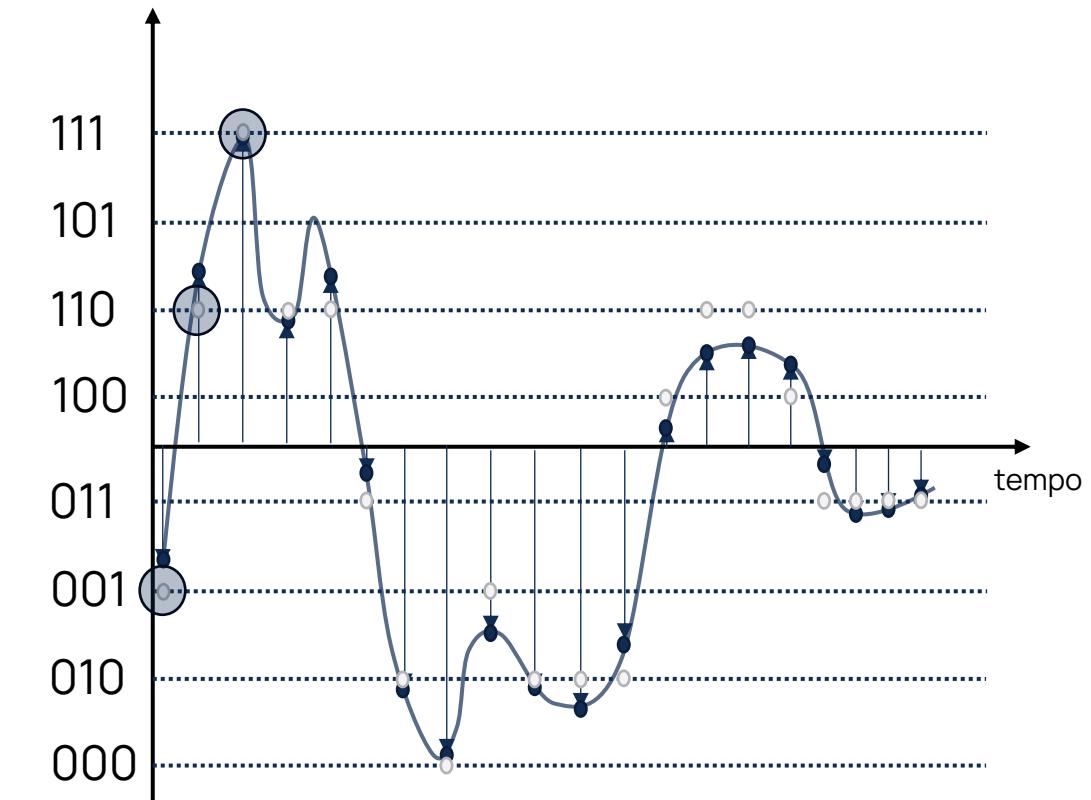
$/ = 2^b$

$b$ : 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 d'ampiezza e associazione di uno specifico gruppo di bit per ogni livello
- **Quantizzazione:** rappresentazione dell'ampiezza continua del segnale campionato mediante i livelli discreti
- 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

# 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>

# Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla  
[marco.mezzavilla@polimi.it](mailto:marco.mezzavilla@polimi.it)