



POLITECNICO
MILANO 1863



Fondamenti di **TELECOMUNICAZIONI**

Pierpaolo Boffi

Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI



Livello Fisico I

**Banda del segnale, campionamento,
quantizzazione, modulazione, capacità di canale**

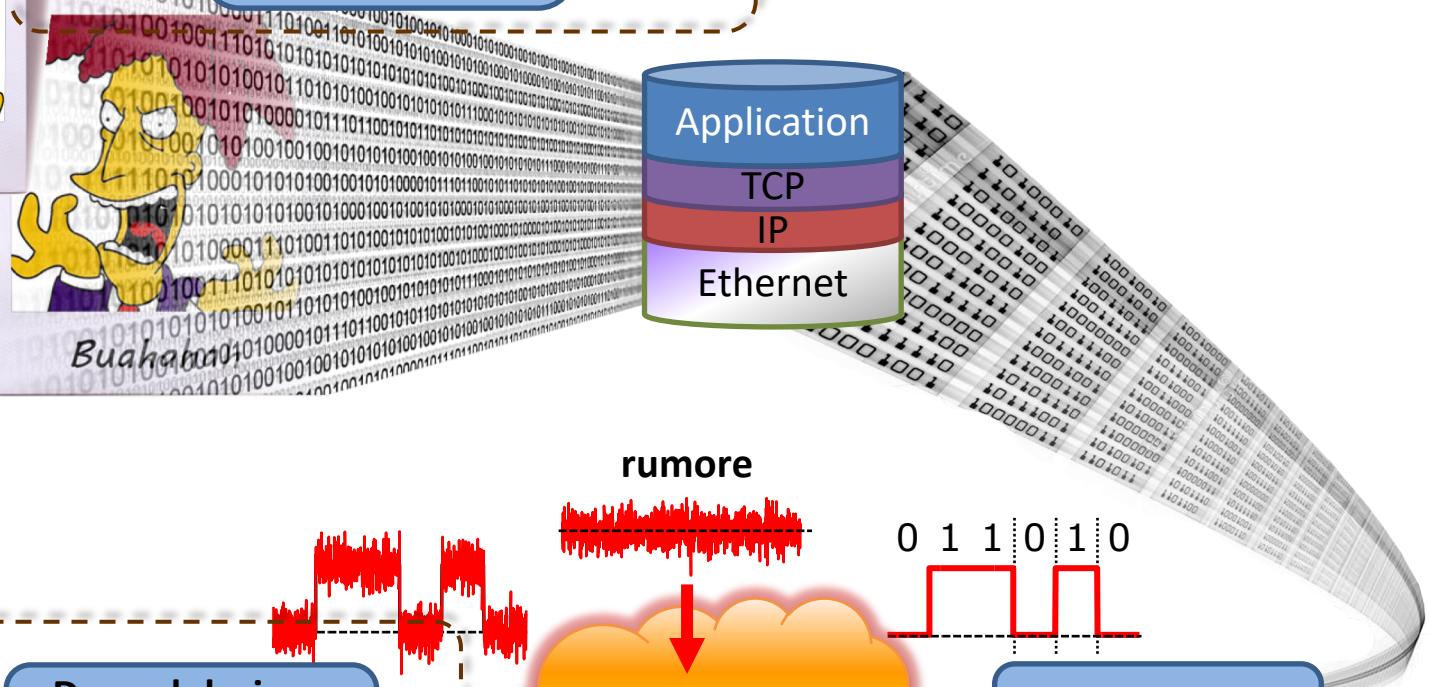
Trasmissione del segnale a LIVELLO FISICO

Segnale analogico
in input



STADIO DI TRASMISSIONE

Campionamento
+
quantizzazione
+
digitalizzazione



all'utente finale

STADIO DI RICEZIONE



Trasmissione del segnale a LIVELLO FISICO

Segnale analogico
in input

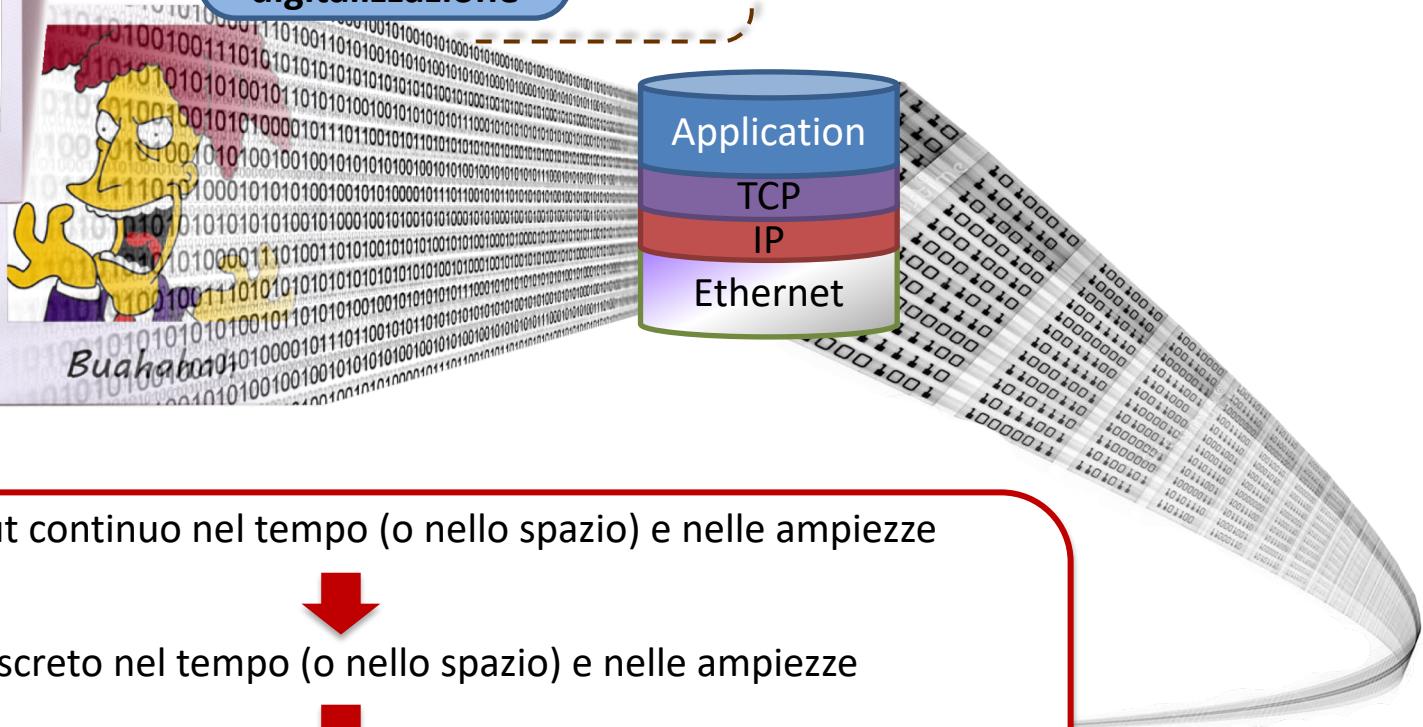


Buahahah



STADIO DI TRASMISSIONE

Campionamento
+
quantizzazione
+
digitalizzazione



segnale in input continuo nel tempo (o nello spazio) e nelle ampiezze



segnale discreto nel tempo (o nello spazio) e nelle ampiezze

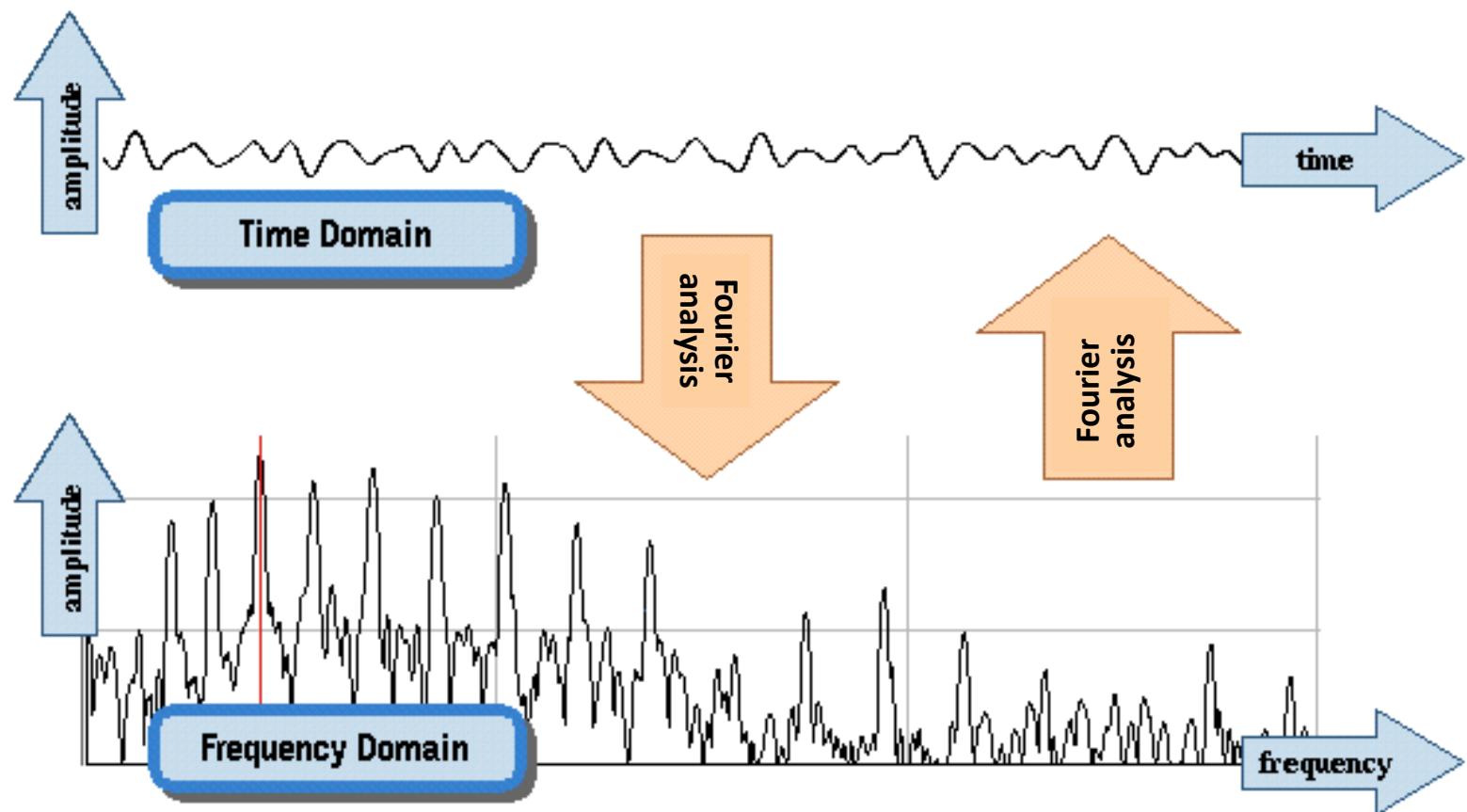


sequenza di bit con una certa velocità di trasmissione o **bit-rate R_{bit}**

legato alla cosiddetta **banda (spettro) del segnale (in Hz)**



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

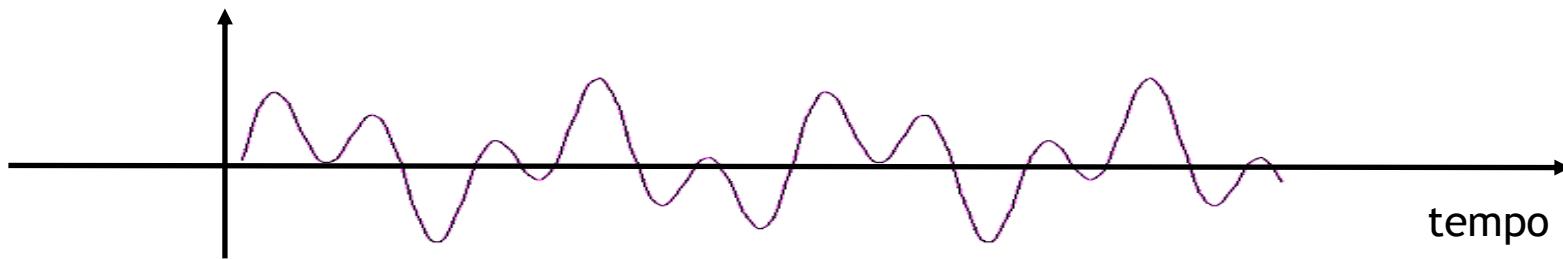


- tempo t misurato in secondi (s)
- frequenza f misurata in Hertz (Hz)

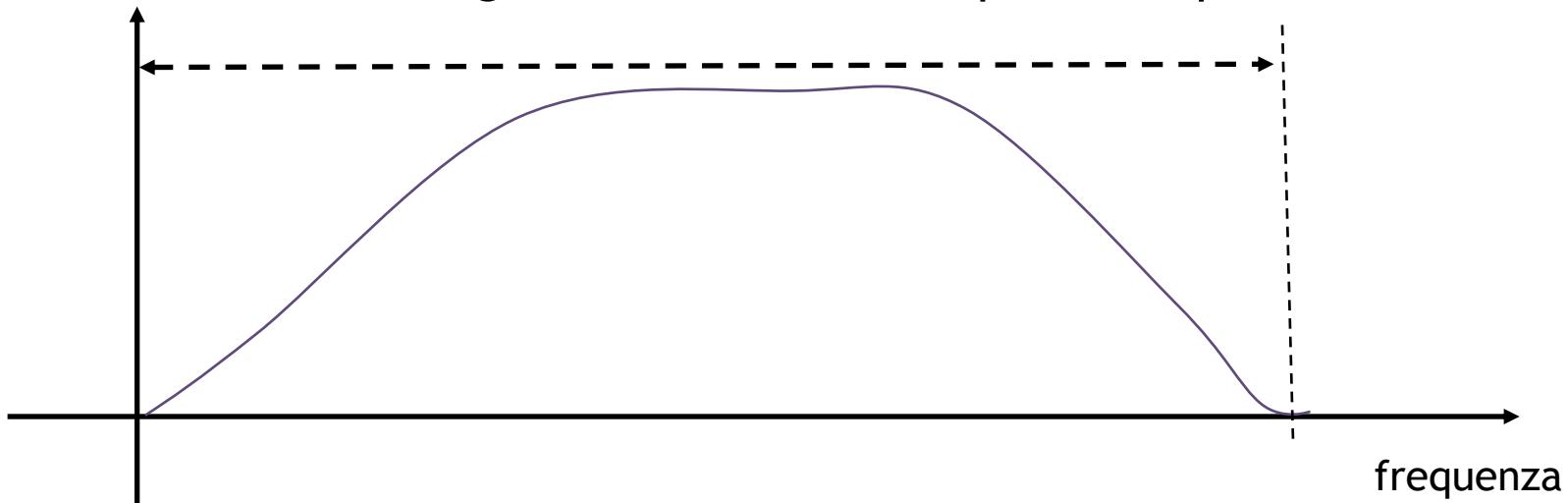


Banda di un segnale

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

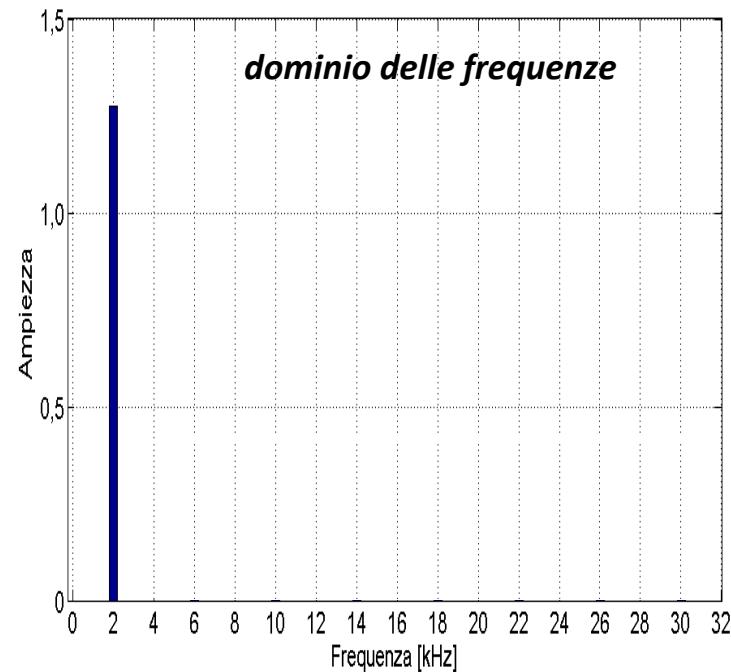
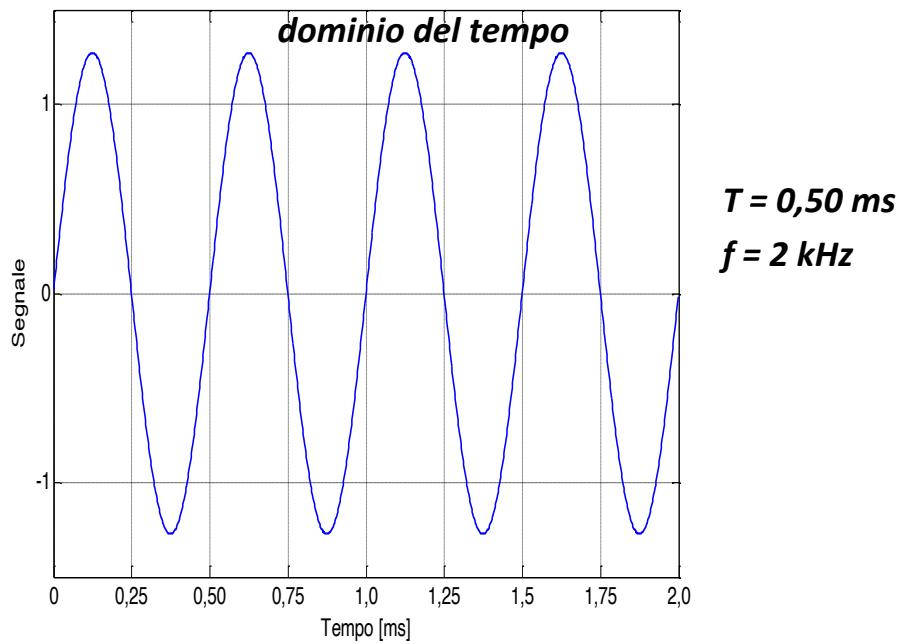


banda del segnale = massimo campo di frequenze usato



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

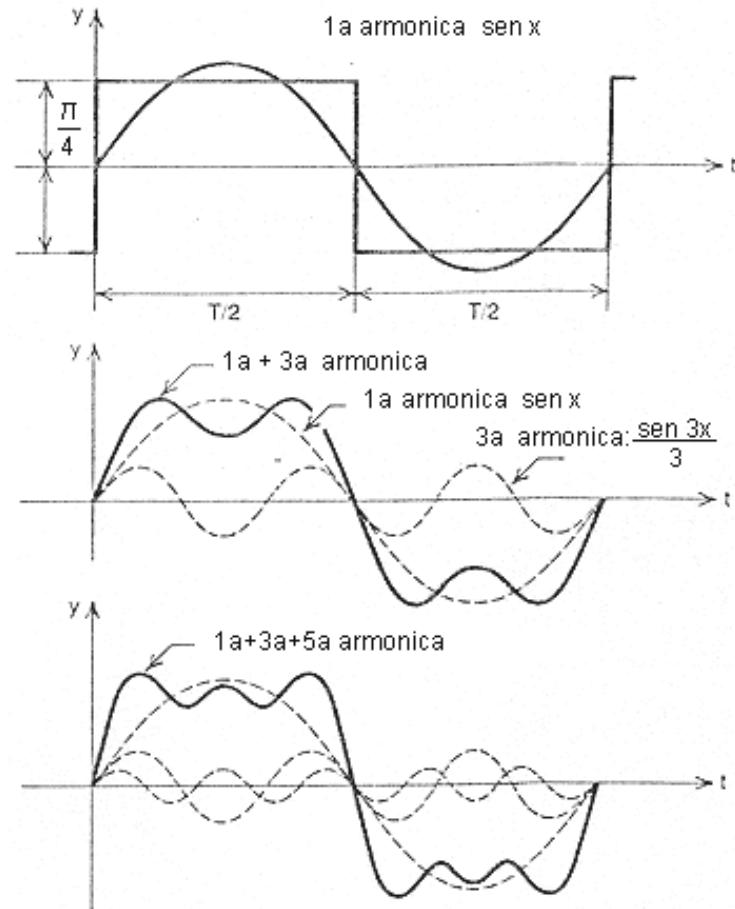


Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- 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

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

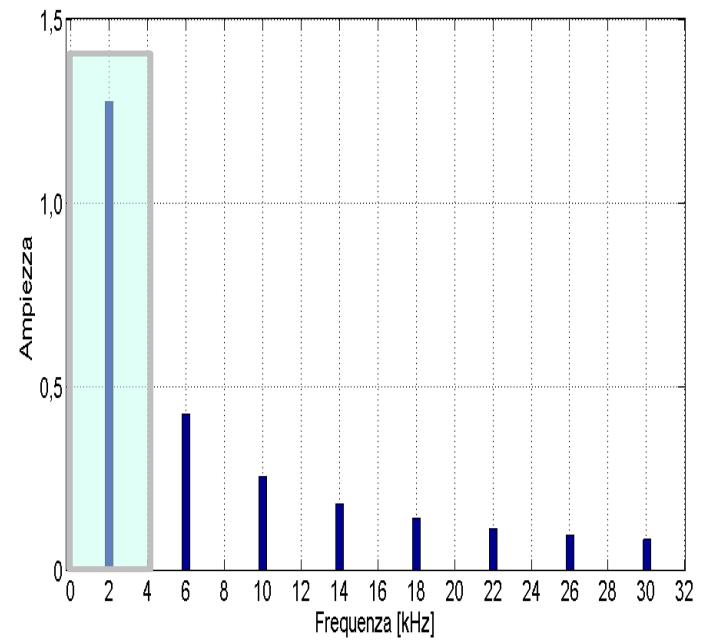
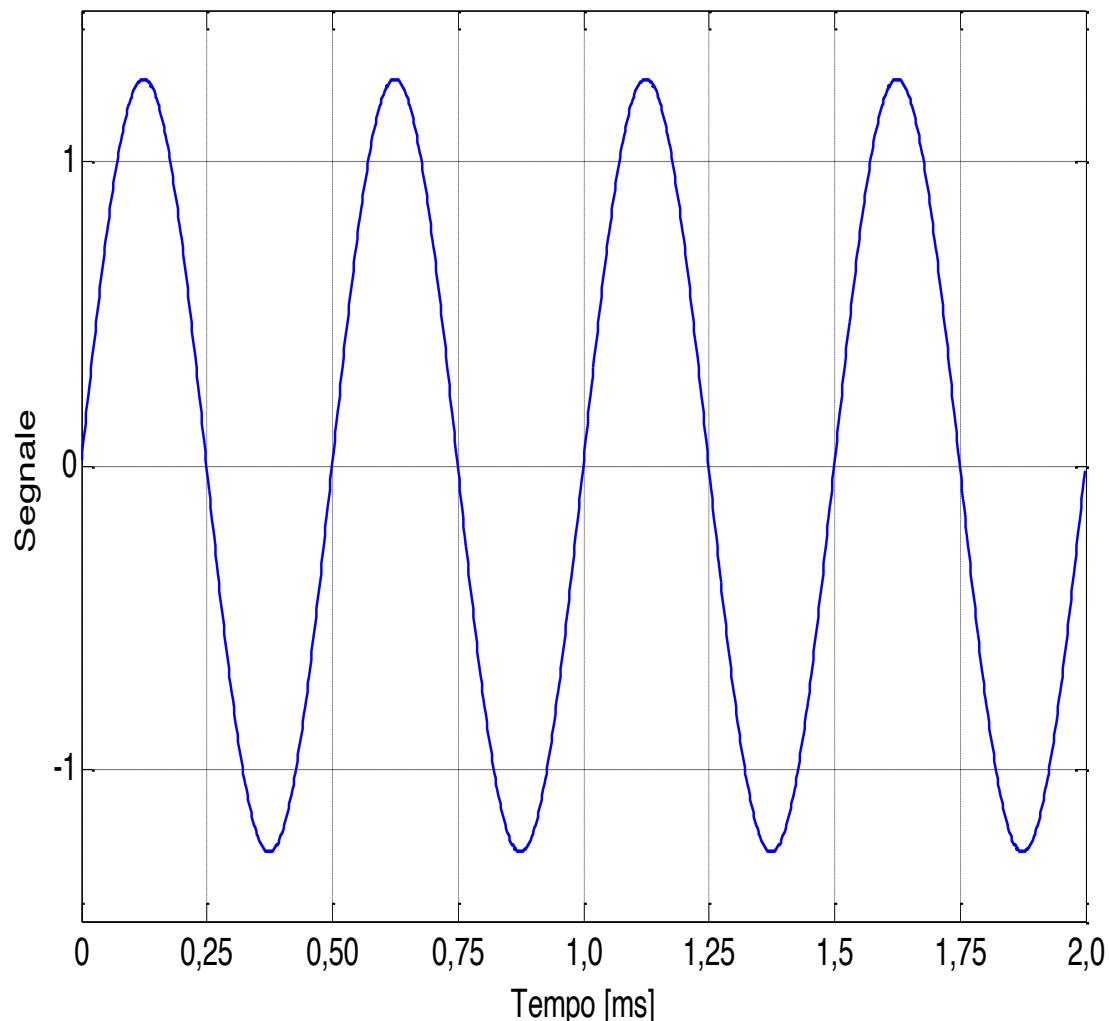


Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

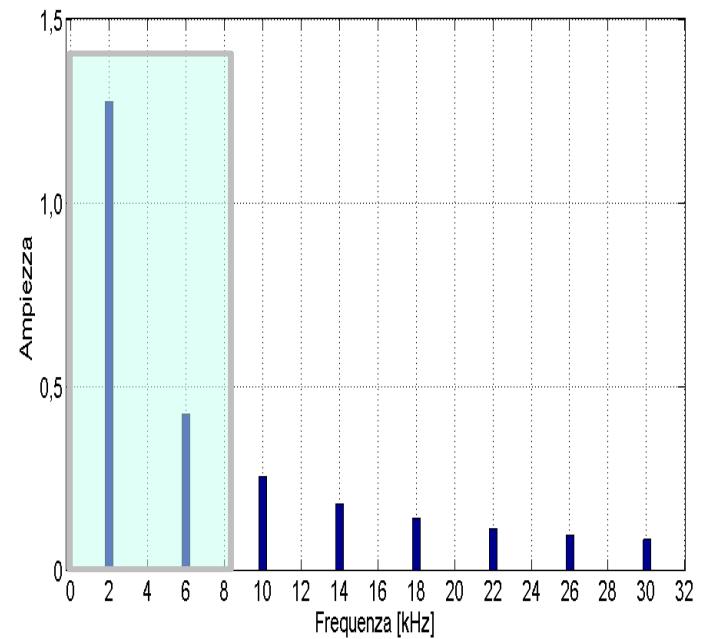
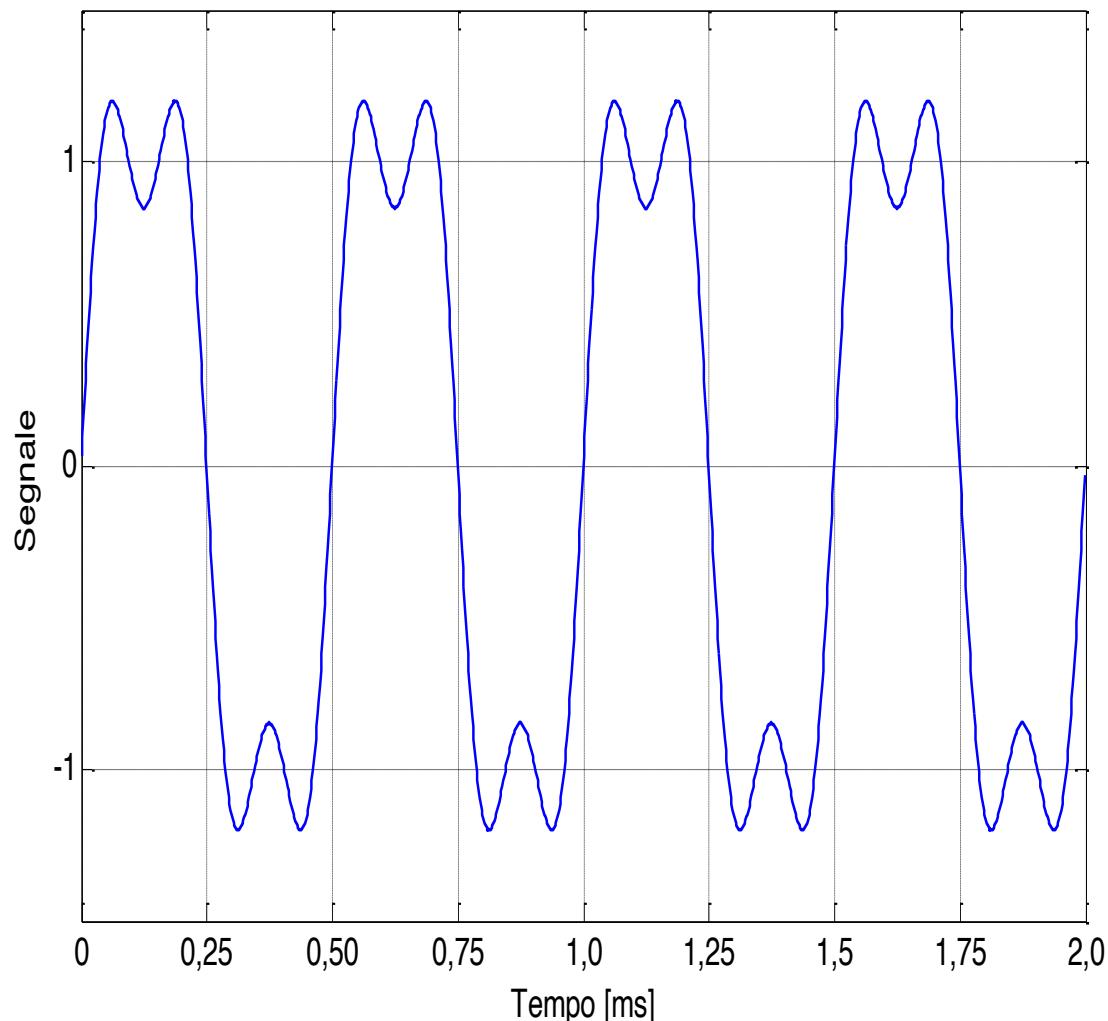
- Qualsiasi segnale $s(t)$ periodico nel dominio del tempo è del tutto equivalente alla somma delle armoniche sinusoidali (componenti in frequenza), ognuna con la propria ampiezza e frequenza.
- Il segnale $s(t)$ variabile nel tempo può quindi essere rappresentato nel dominio delle frequenze dalle sue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



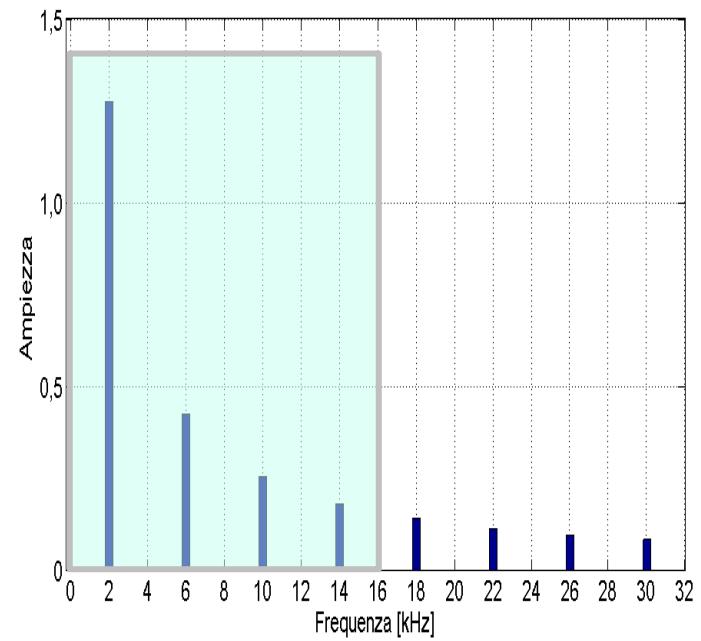
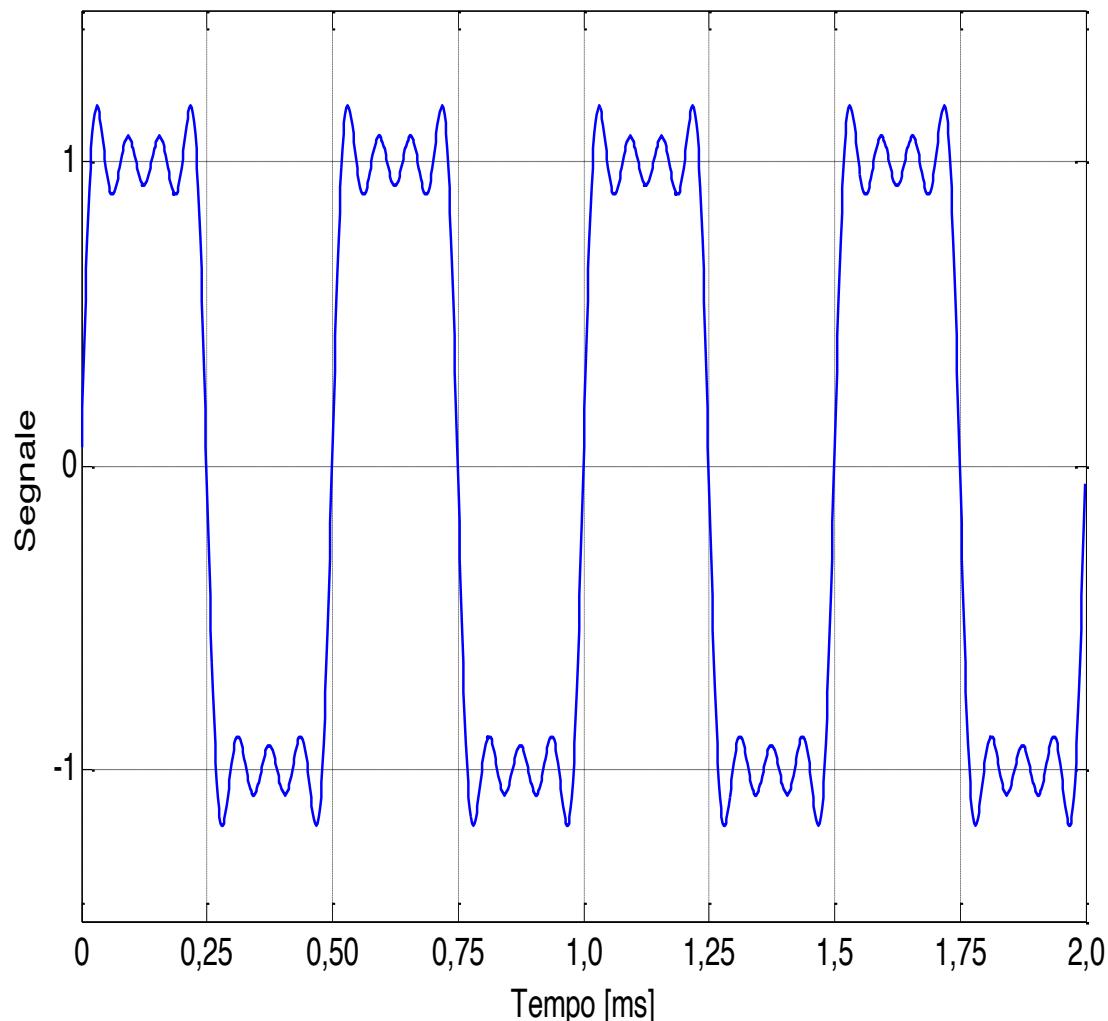
Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*



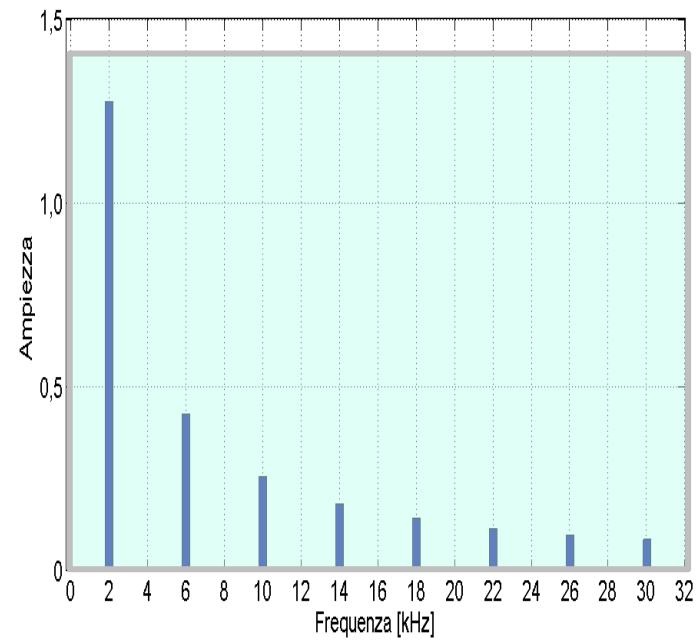
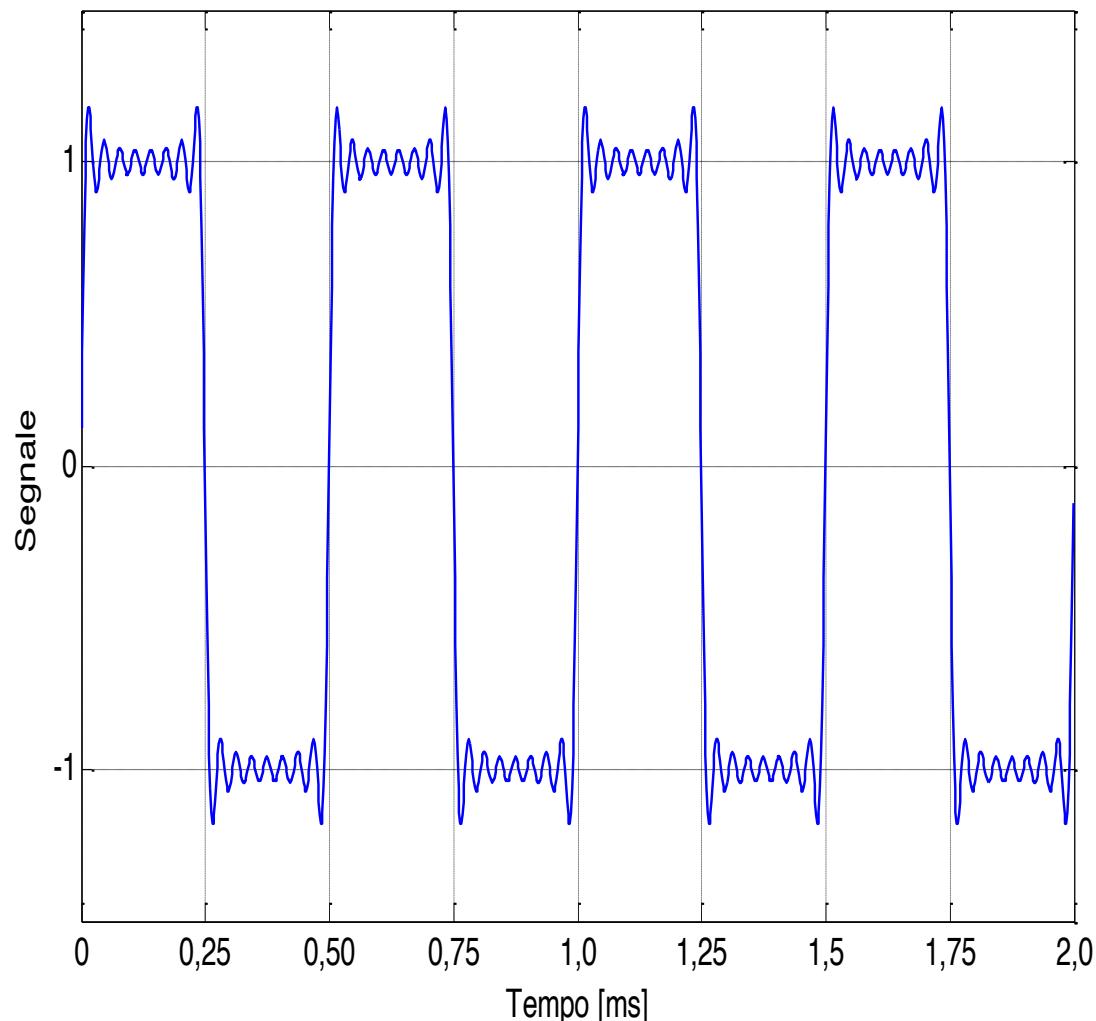
Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*



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

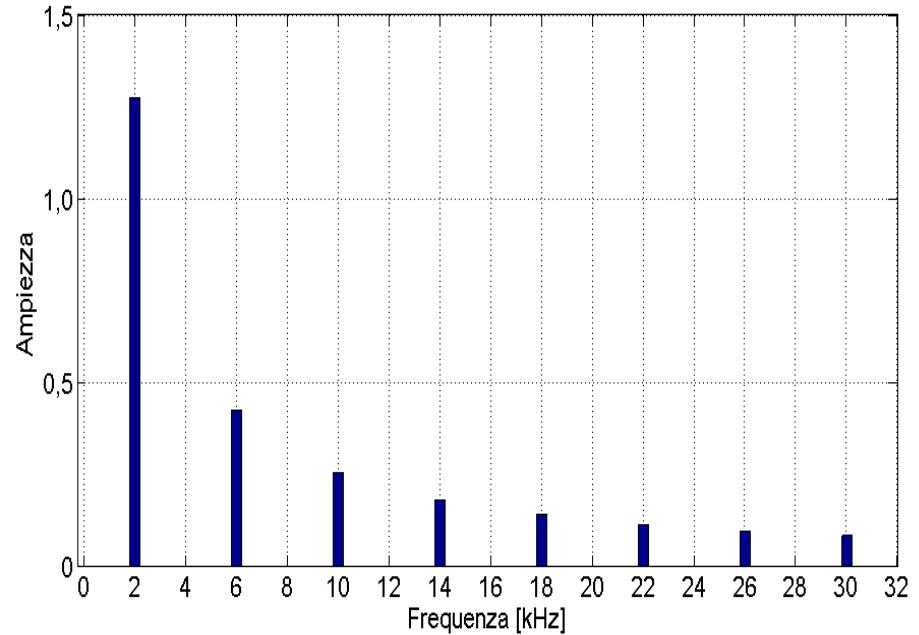
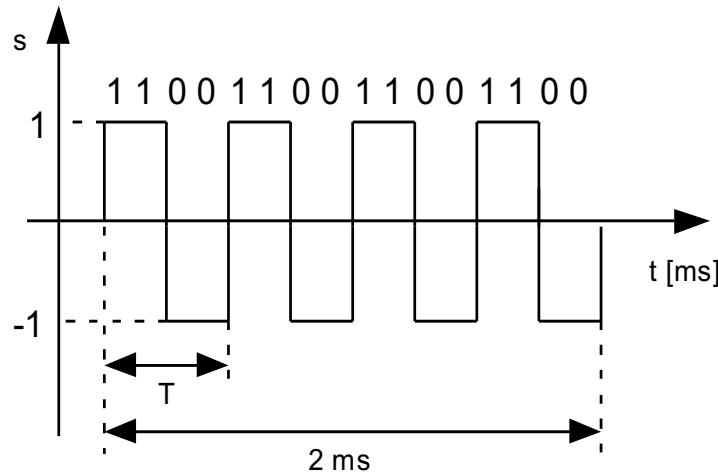


Spettro di un segnale: *onda quadra a media nulla*



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

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

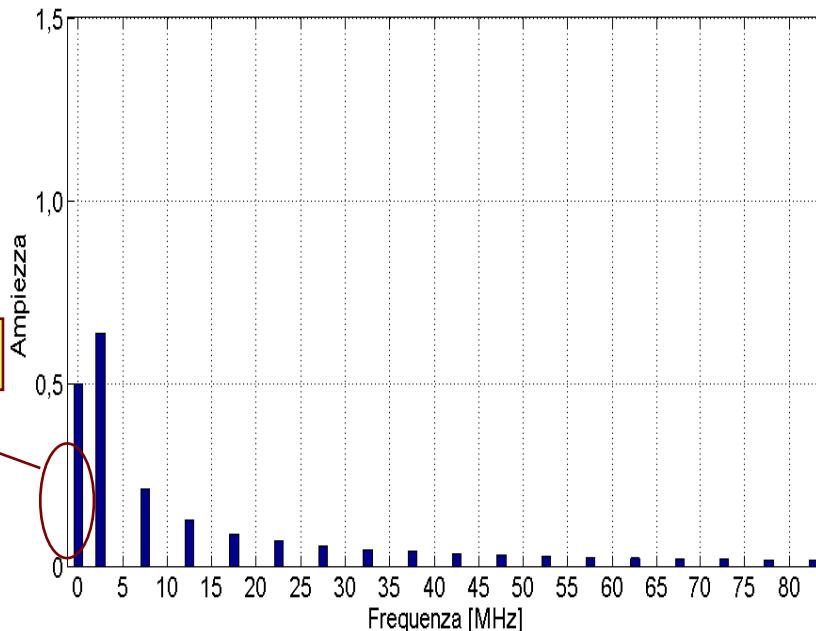
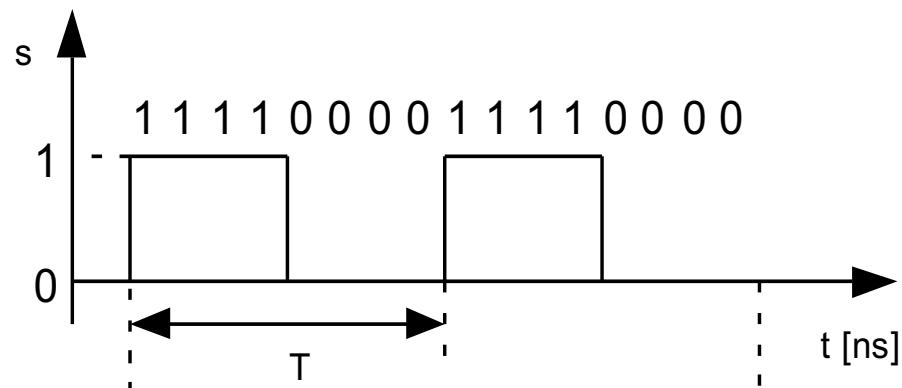


- **Spettro con armoniche dispari**
- **La forma dello spettro dipende**
 - dalla durata del singolo periodo T (\rightarrow determina le frequenze delle armoniche)
 - dalla forma dell'impulso che rappresenta il singolo periodo (\rightarrow determina il valore dei coefficienti)



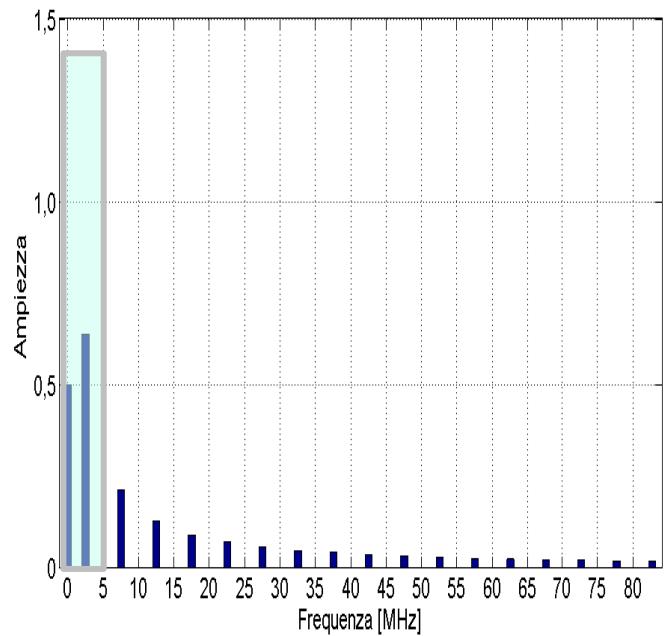
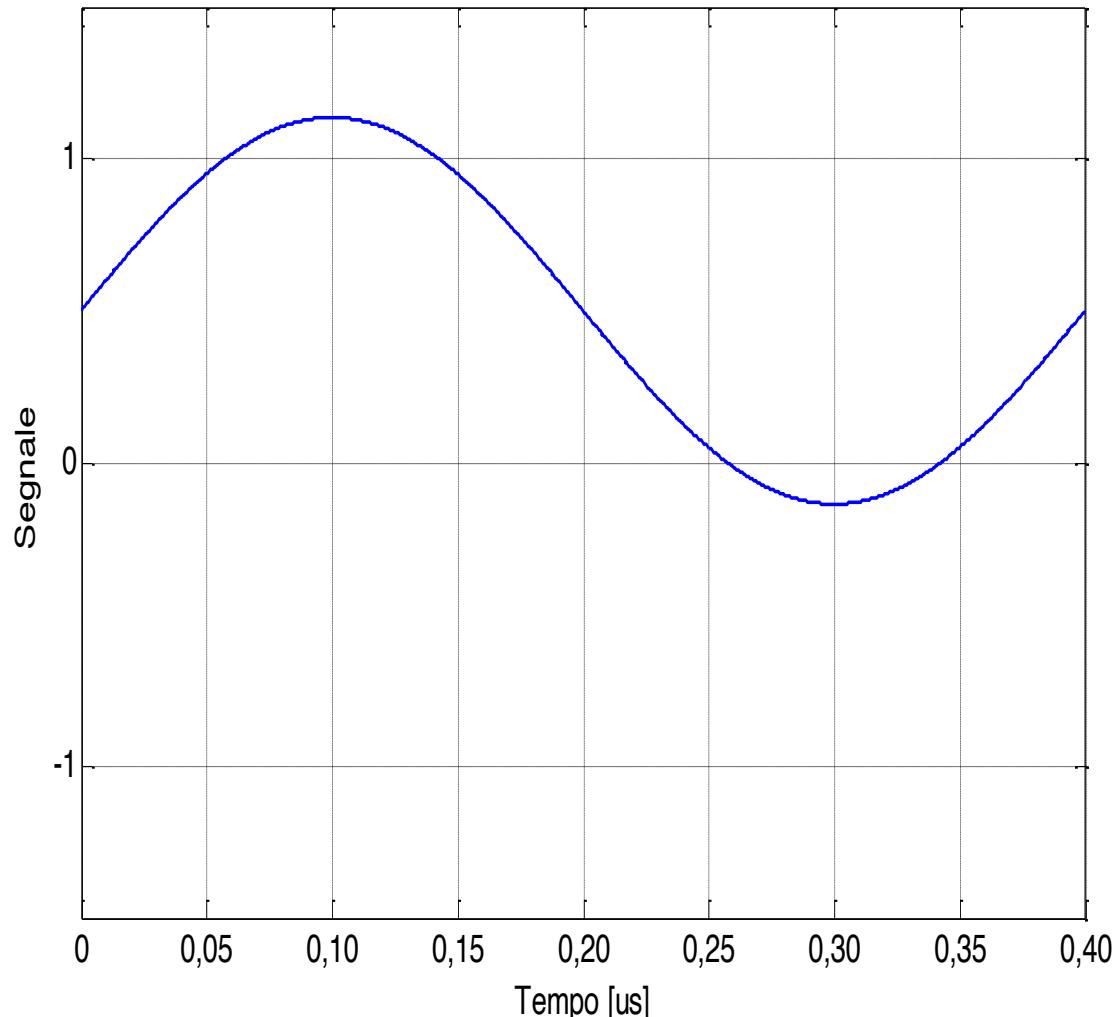
Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

- **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)**



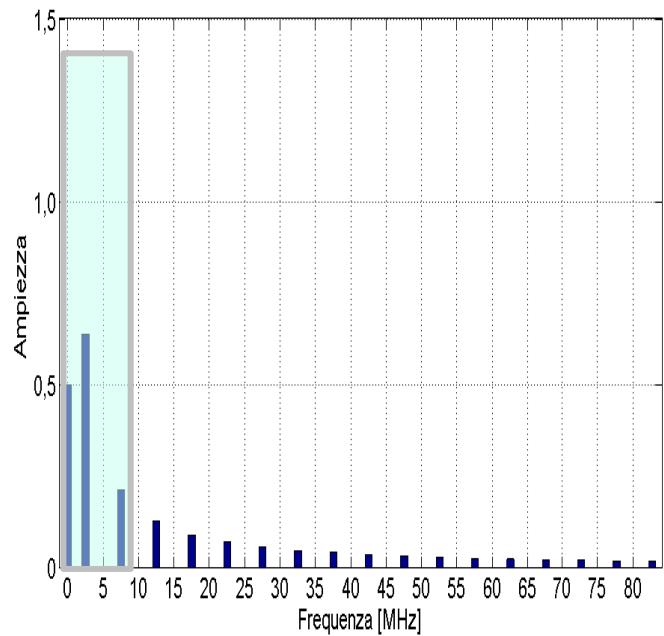
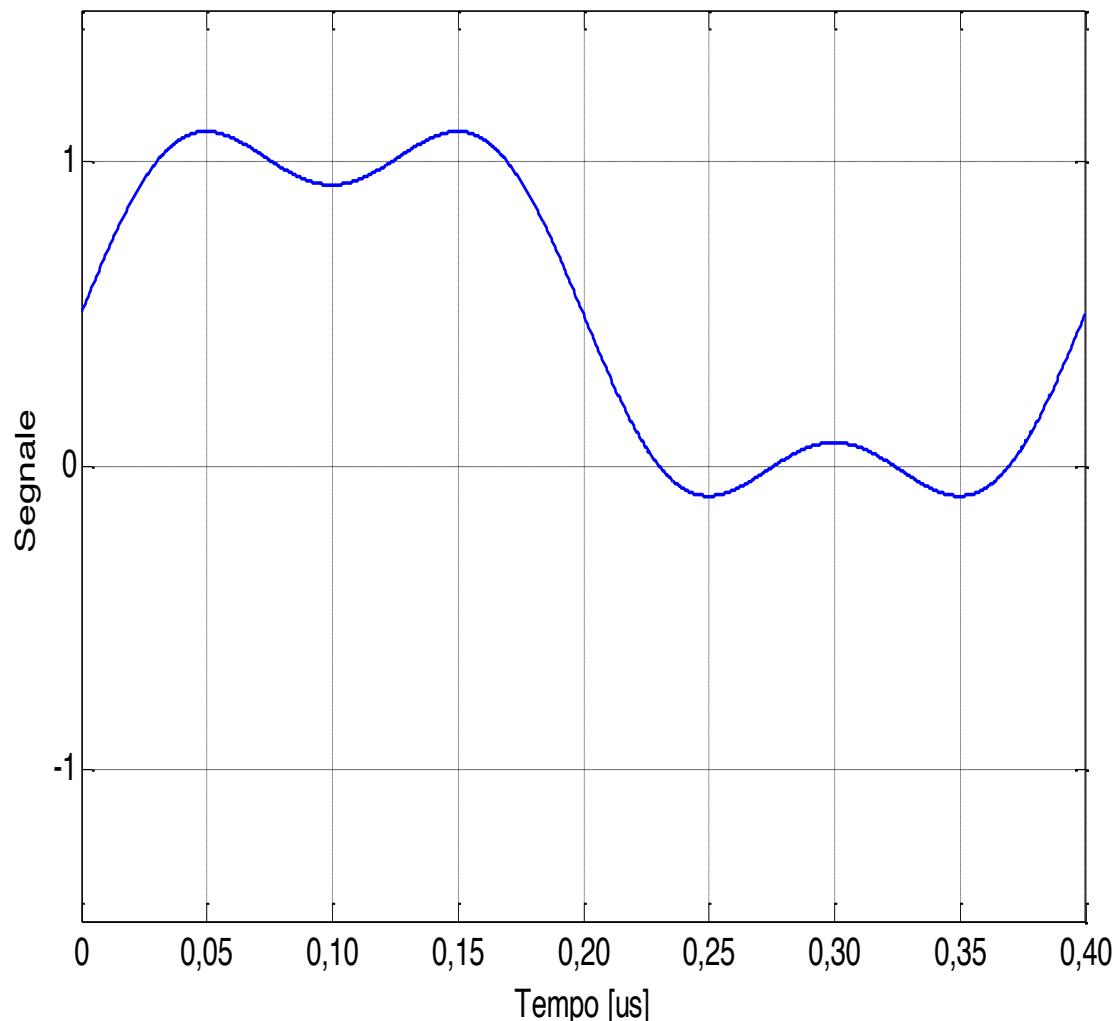
Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

$W = 5 \text{ MHz}$



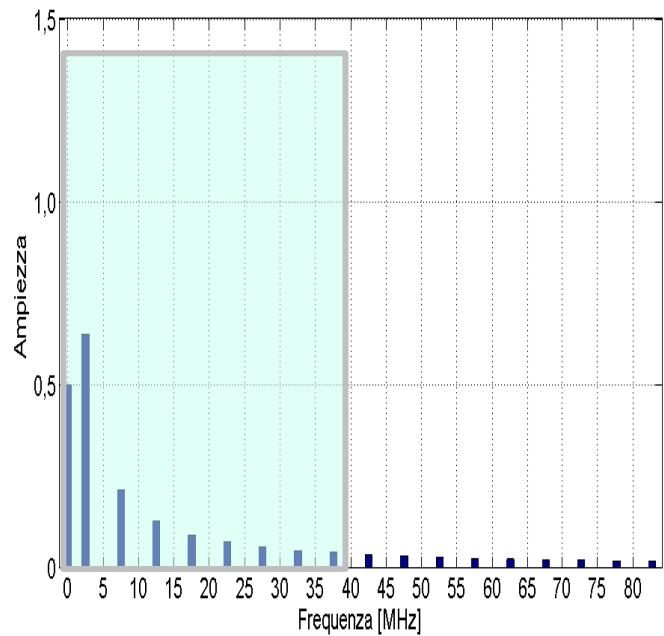
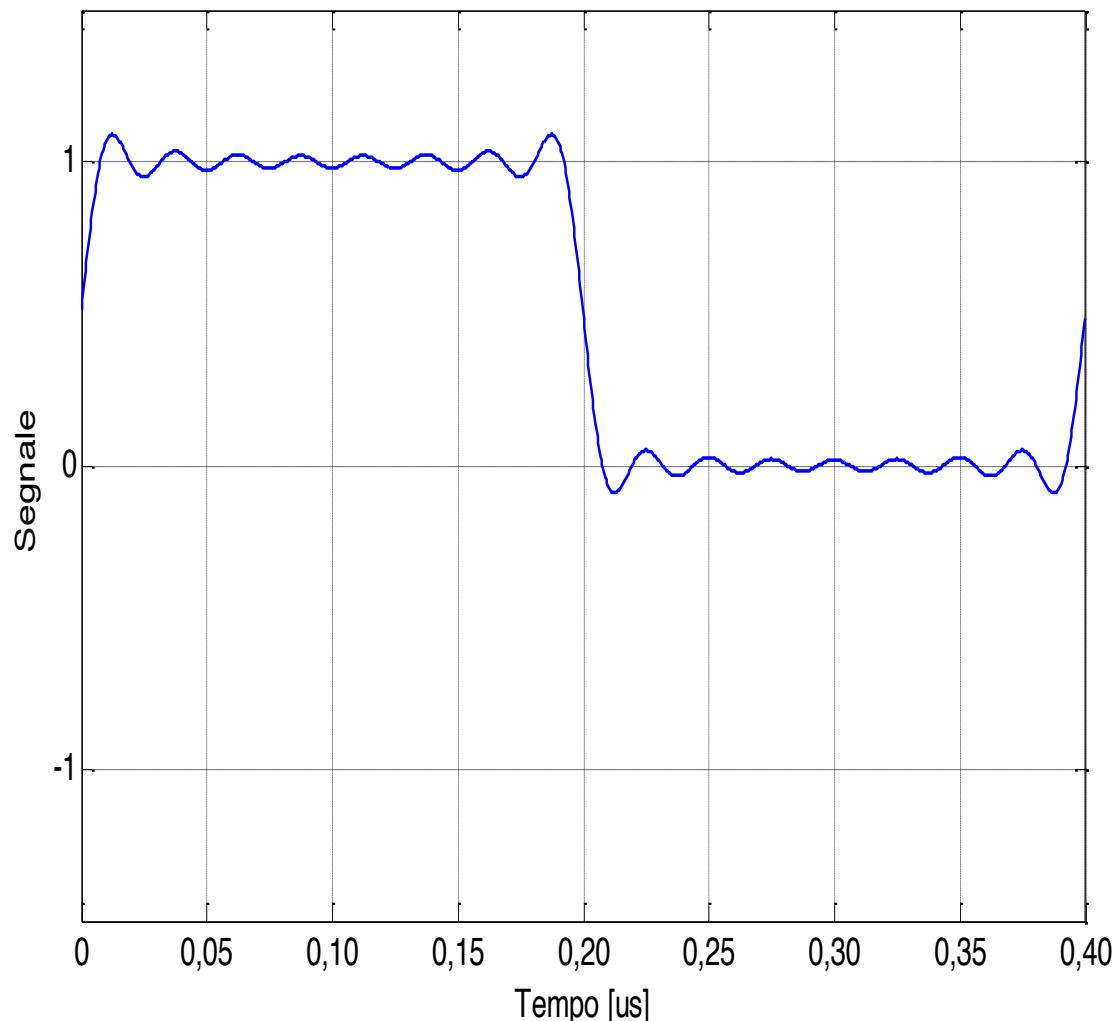
Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

$W = 10 \text{ MHz}$



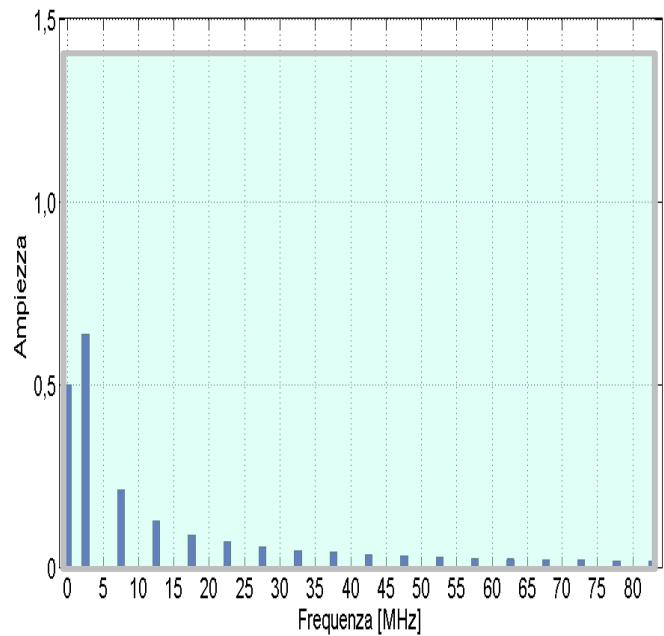
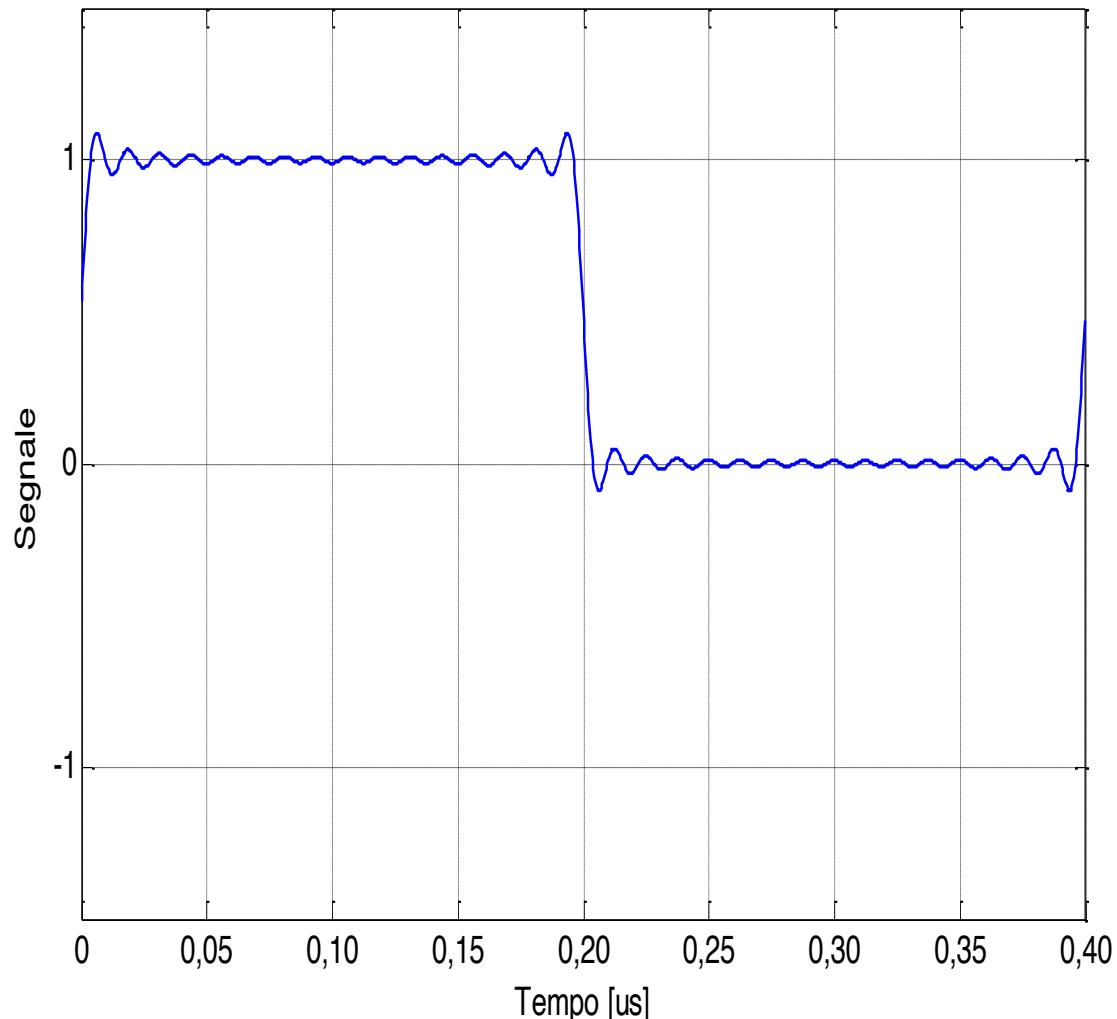
Spettro di un segnale: *onda quadra a media non-nulla*

$W = 40 \text{ MHz}$



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

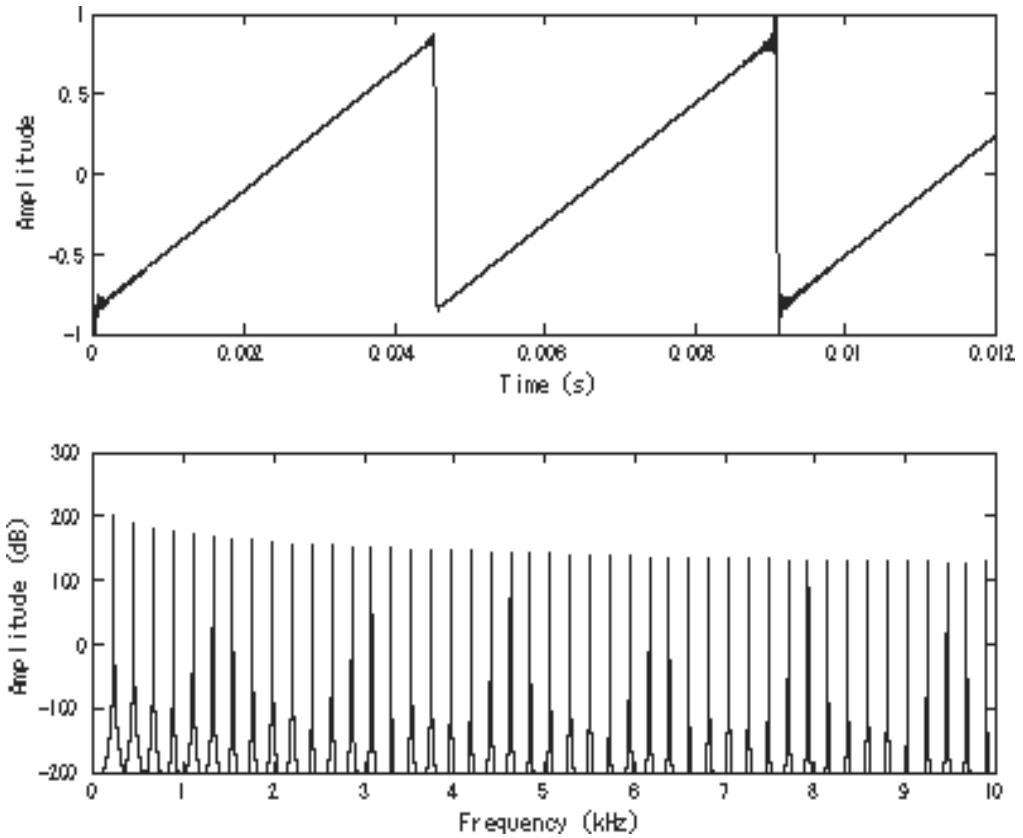
$W = 80 \text{ MHz}$



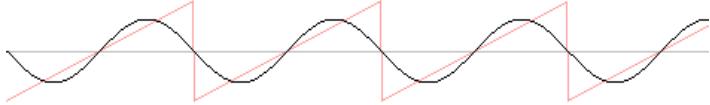
Spettro di un segnale: *dente di sega*

Onda a dente di sega

Spettro con armoniche
sia pari che dispari

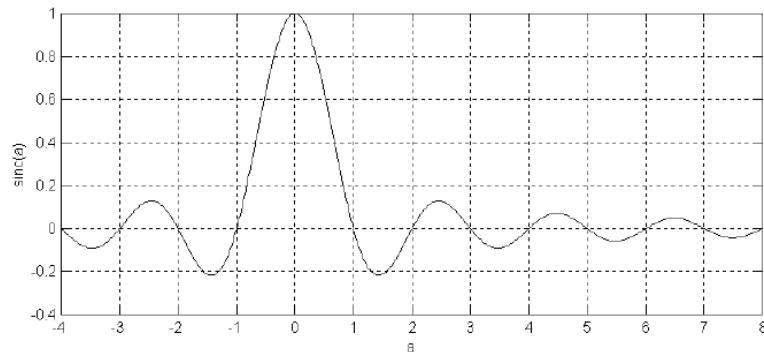
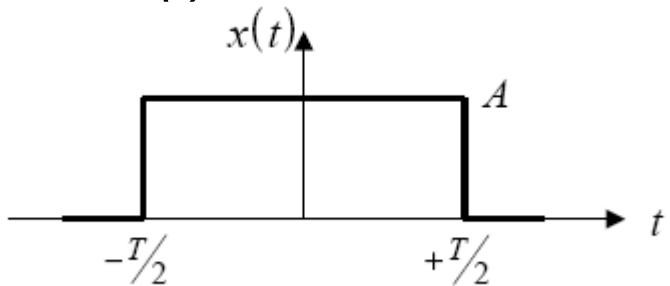


harmonics: 1



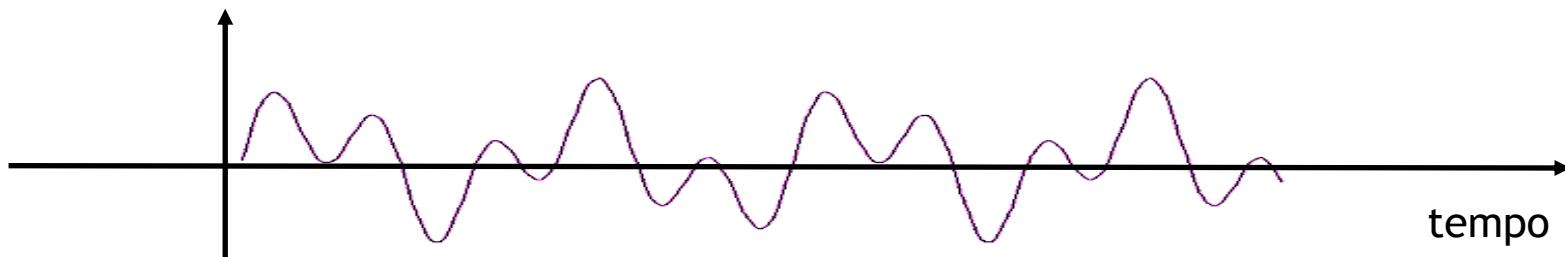
Caratterizzazione spettrale dei segnali analogici

- 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 $S(f)$** .

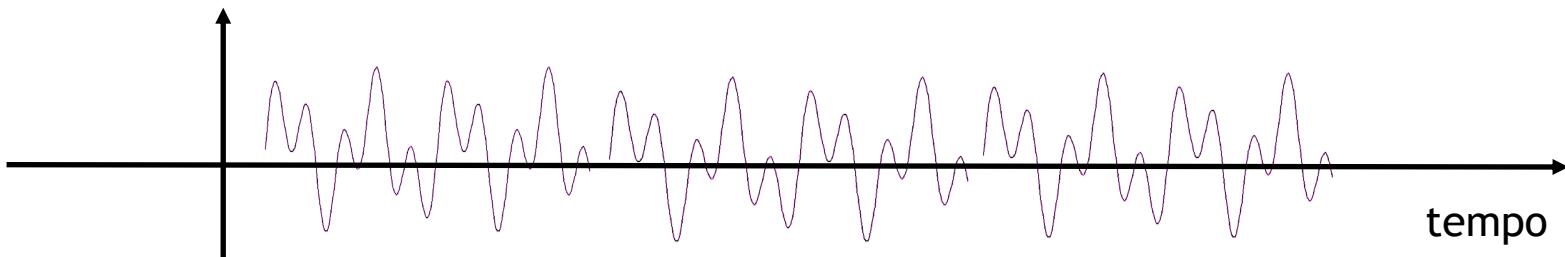


Effetto temporale della banda

banda stretta: segnali che variano lentamente nel tempo

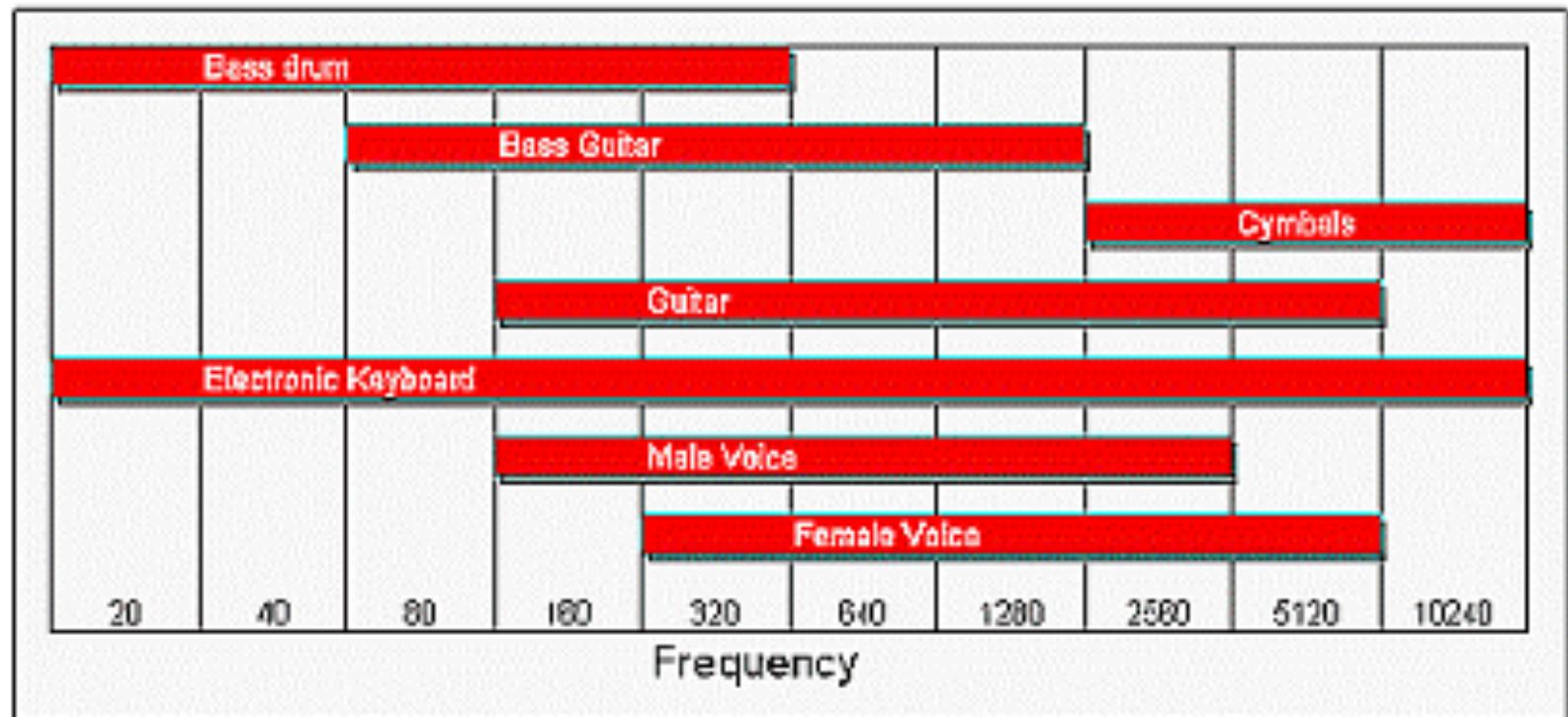


banda larga: segnali che variano velocemente nel tempo



Segnali e Bande

Segnali musicali: da 50 Hz a 20 kHz



Esempi di bande occupate da segnali per TLC

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



Conversione analogico/digitale

La rappresentazione
umana della realtà è
“continua”



mondo analogico

Gli elaboratori numerici
gestiscono informazione
“discreta”



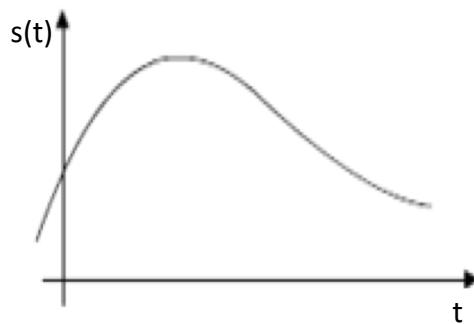
mondo digitale

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

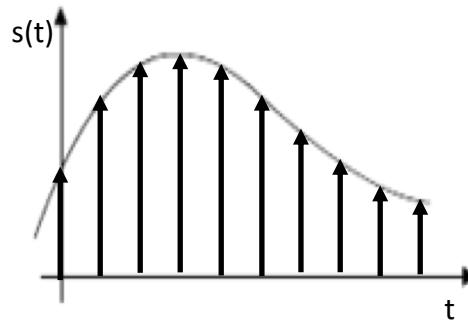


Campionamento

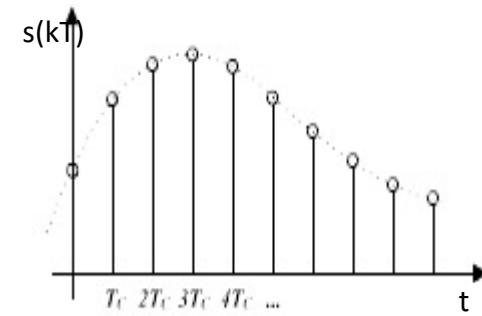
Segnale analogico



campionamento



segnale campionato

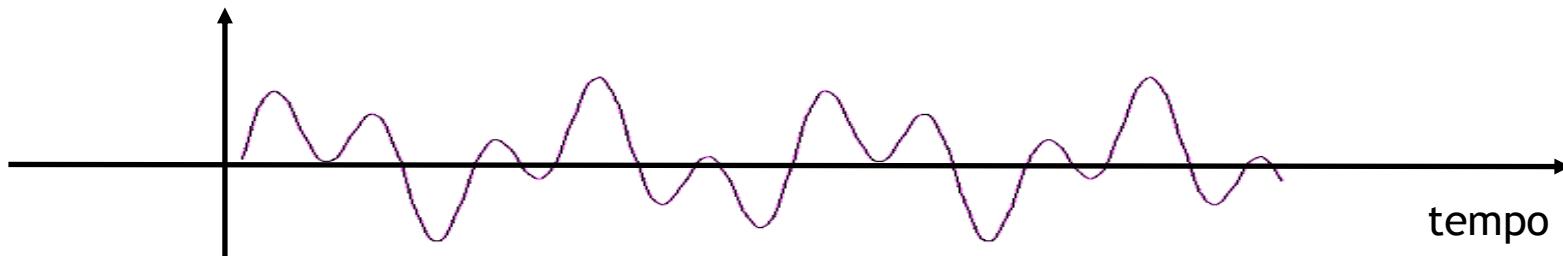


- Ogni segnale analogico di banda B può essere ricostruito interamente in base ai suoi campioni presi a frequenza $2B$

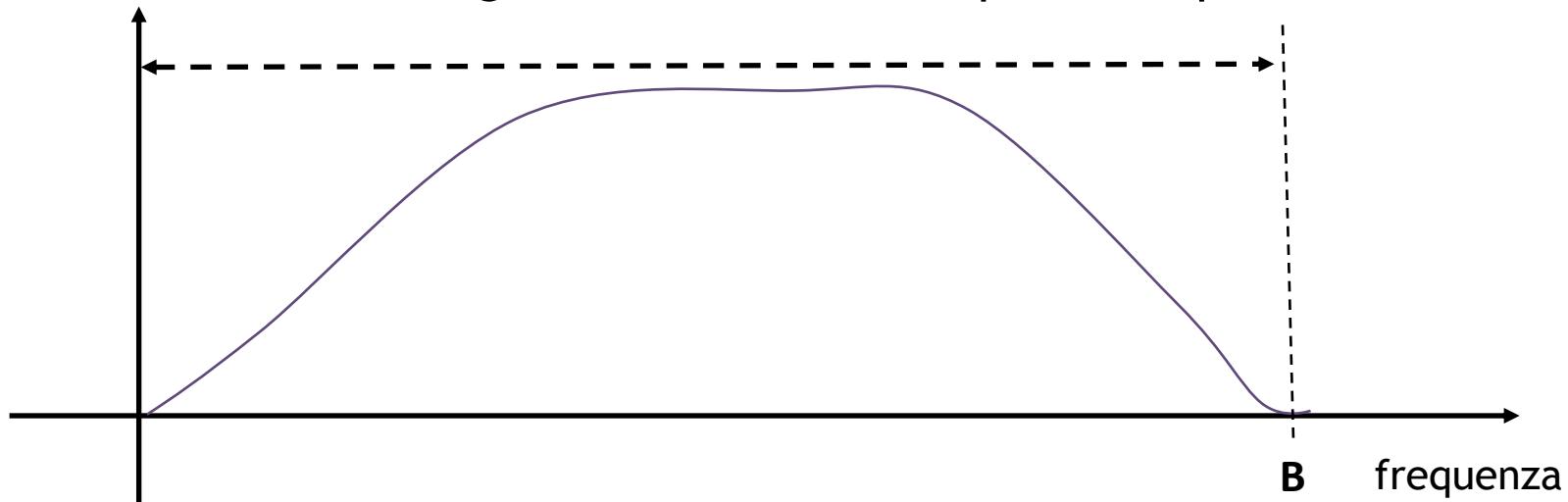


Banda di un segnale

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



banda del segnale = massimo campo di frequenze usato



Campionamento

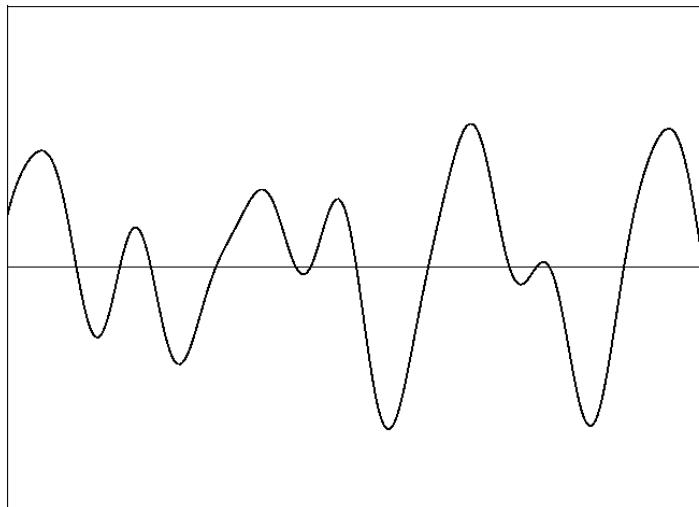
Teorema di Nyquist

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 $f_c = 1/T$:

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

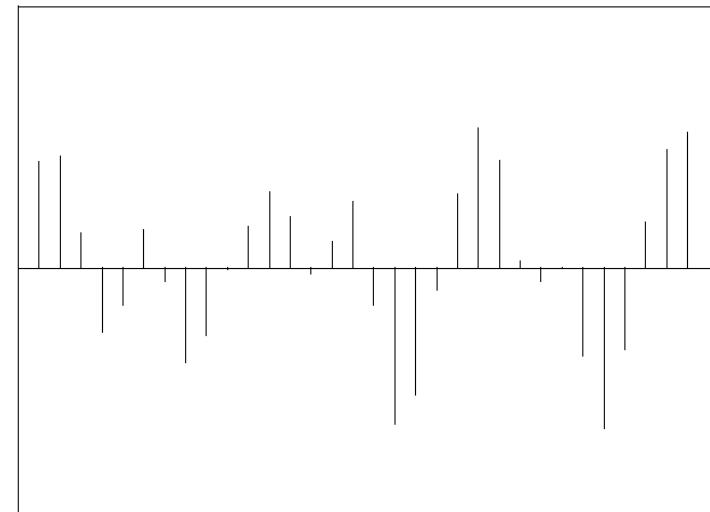
segnale

Ampiezza



segnale campionato

Ampiezza



Campionamento: teorema di Nyquist

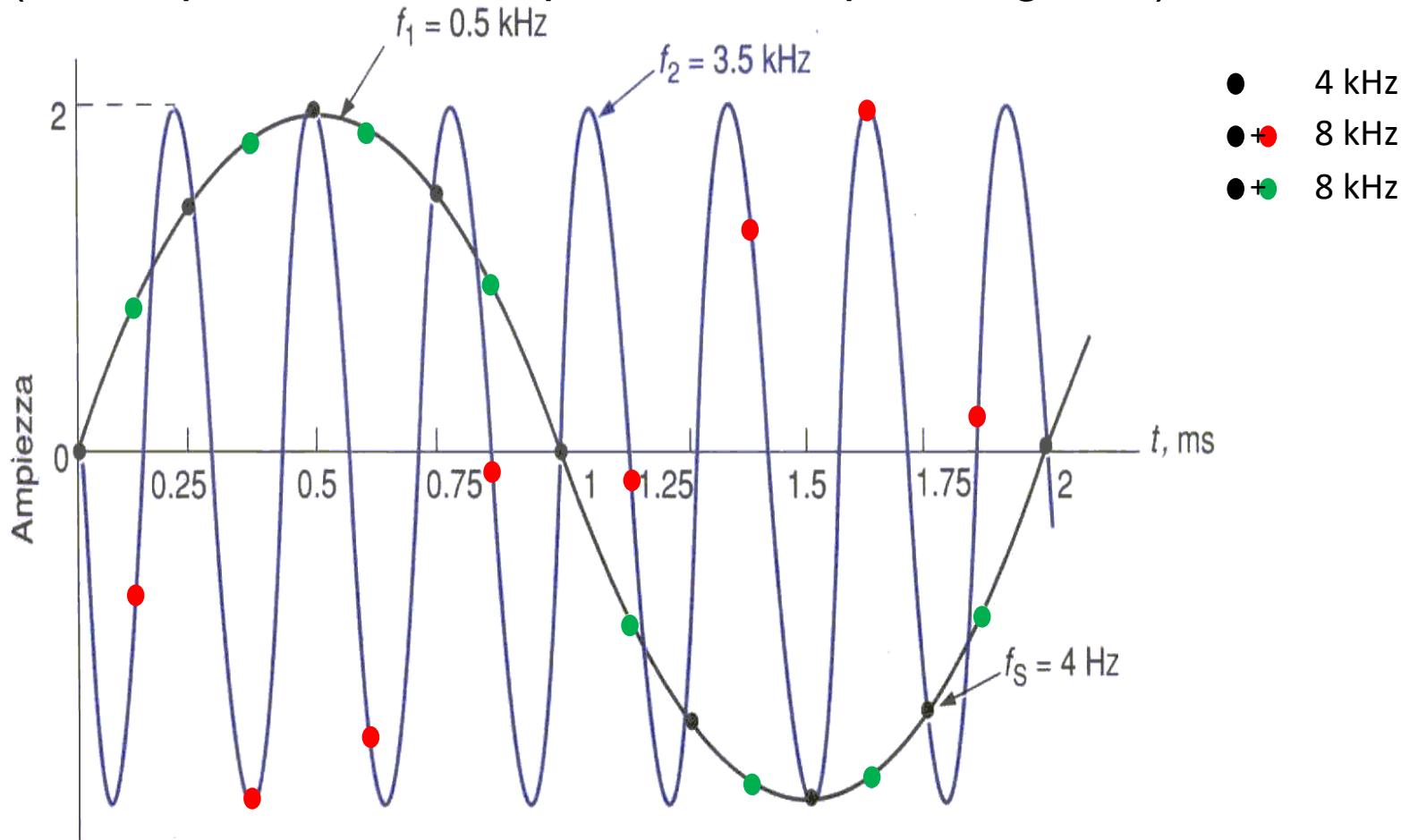
$$f_c \geq 2B = f_N \quad \text{frequenza di Nyquist}$$

- 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**



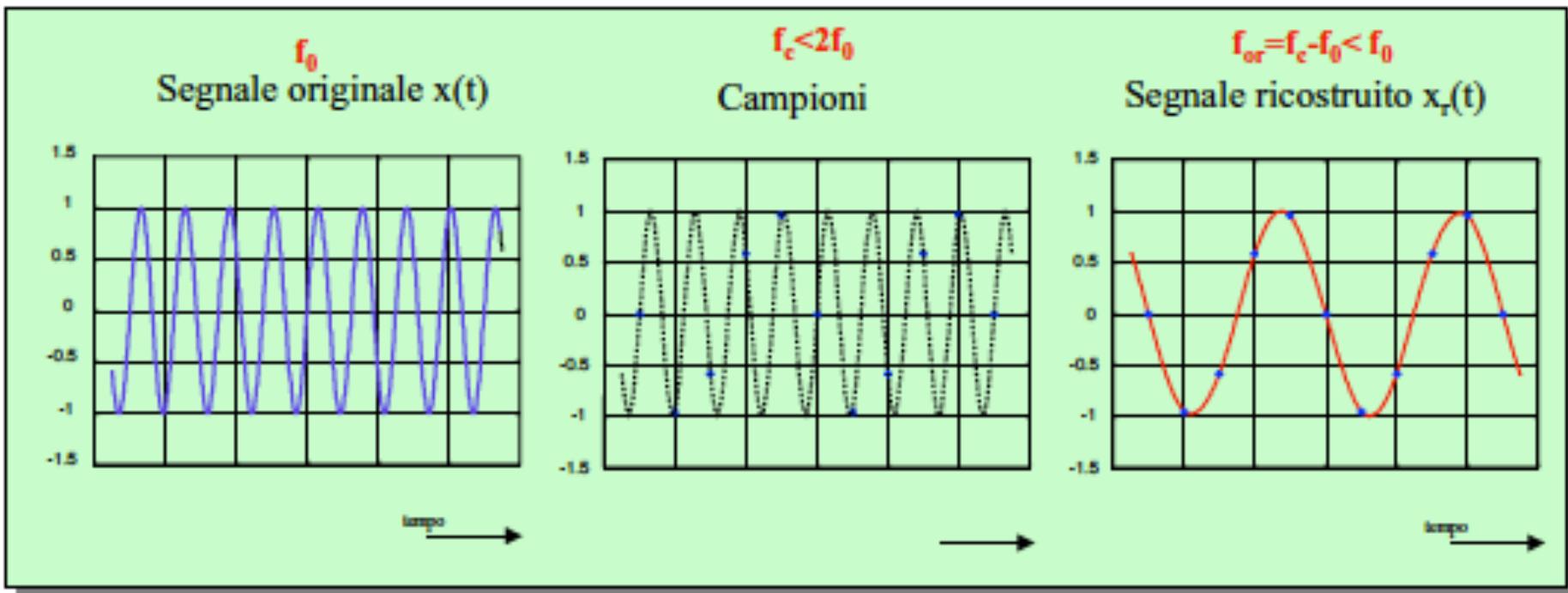
Campionamento: teorema di Nyquist

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)?



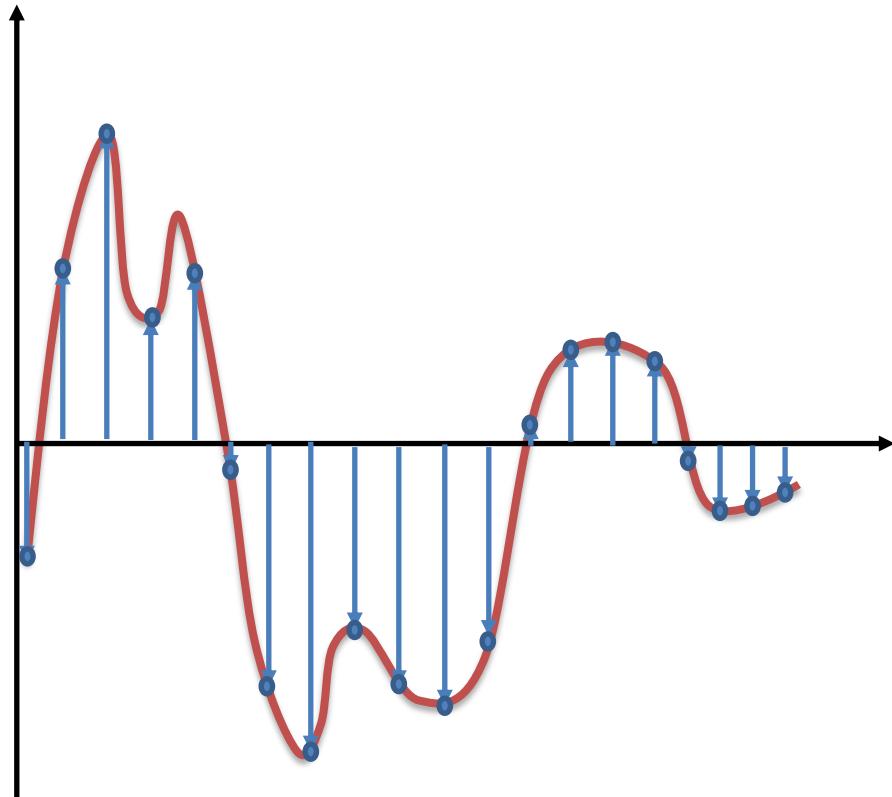
Frequenze di campionamento tipiche

Segnale	Banda	Frequenza di campionamento
Segnale telefonico	300-4000 Hz	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



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 B

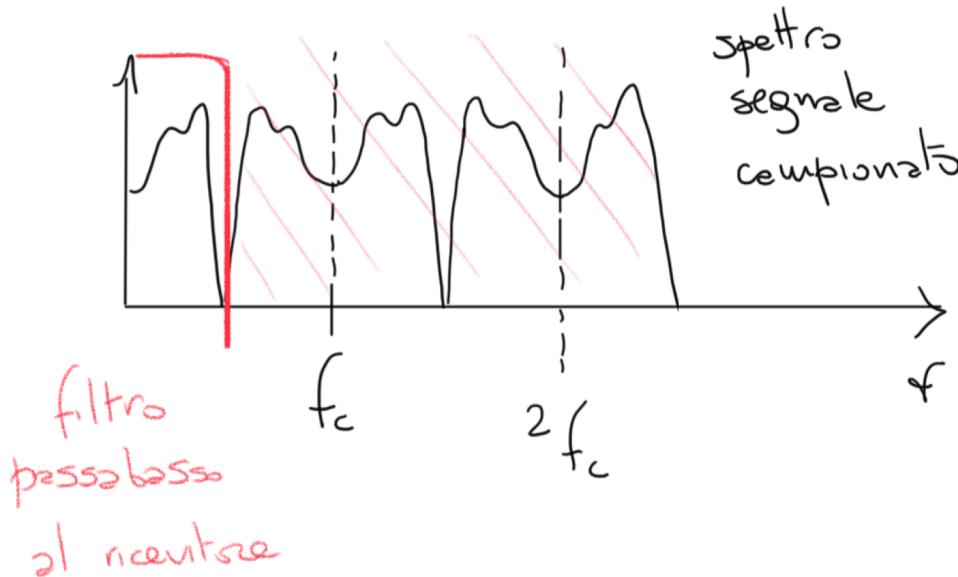
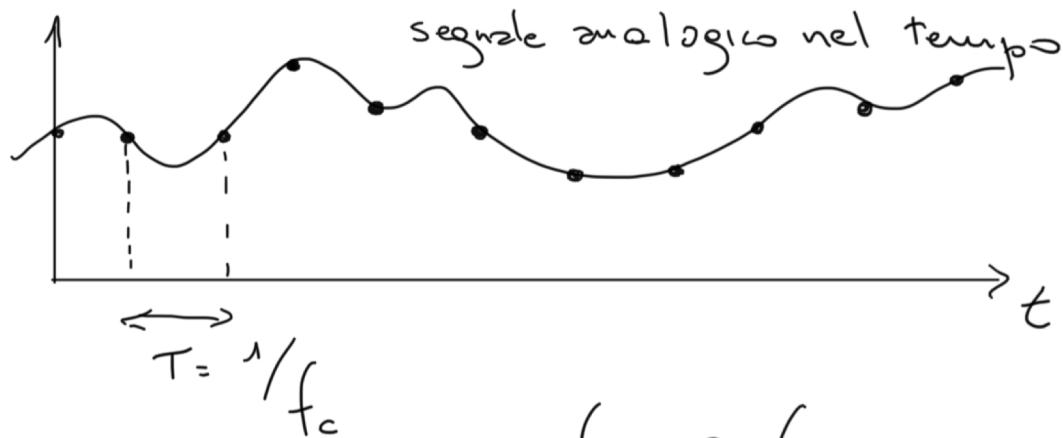
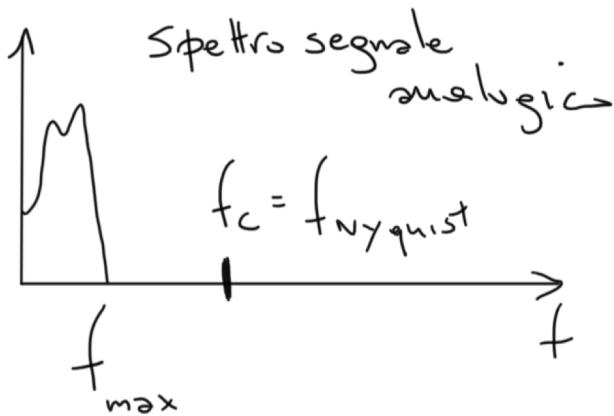


Campionamento: ricostruzione del segnale al ricevitore

- 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 B



Campionamento: ricostruzione del segnale al ricevitore

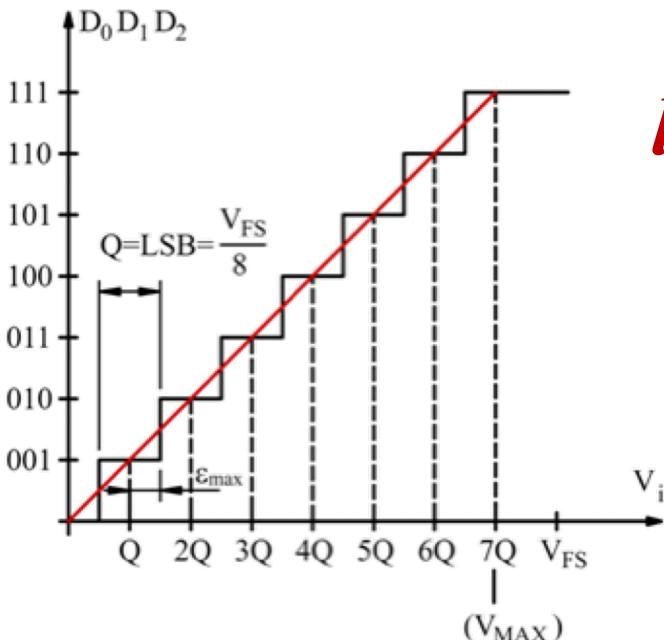


$$f_c = 2 f_{max}$$



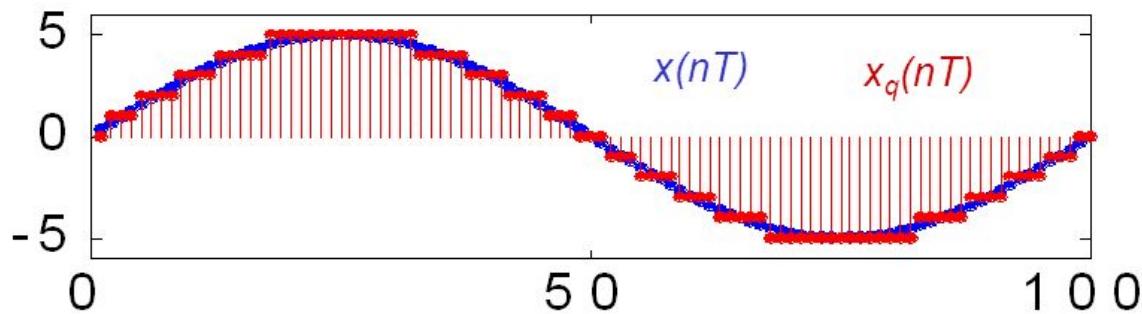
Quantizzazione

- 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

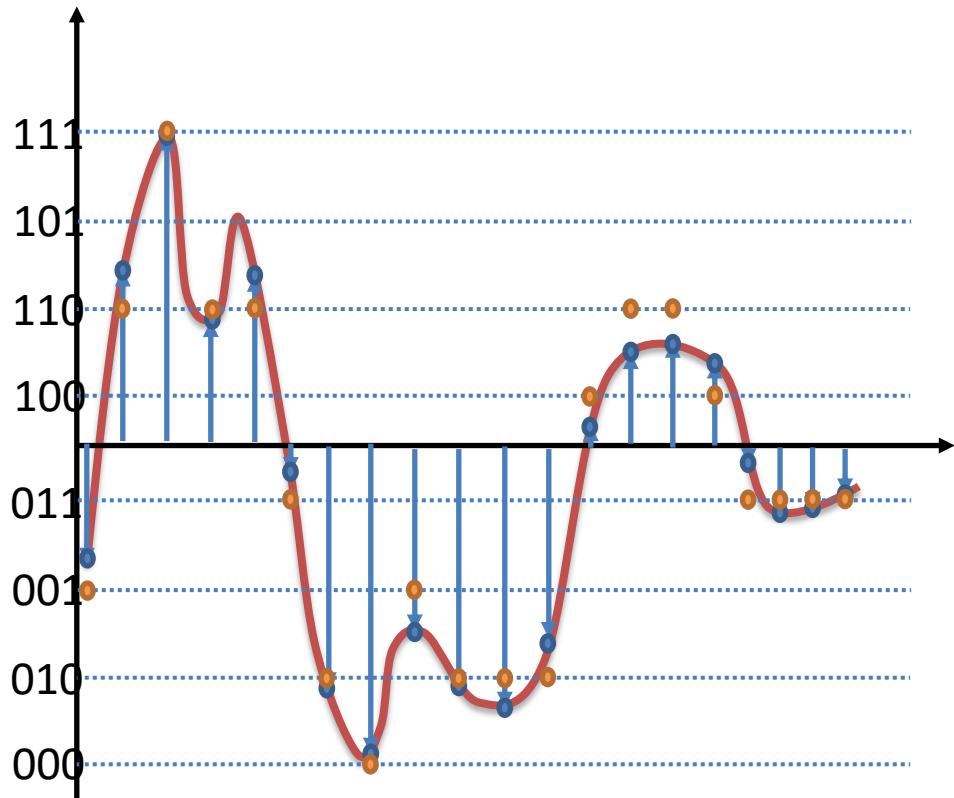


$$l = 2^b$$

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

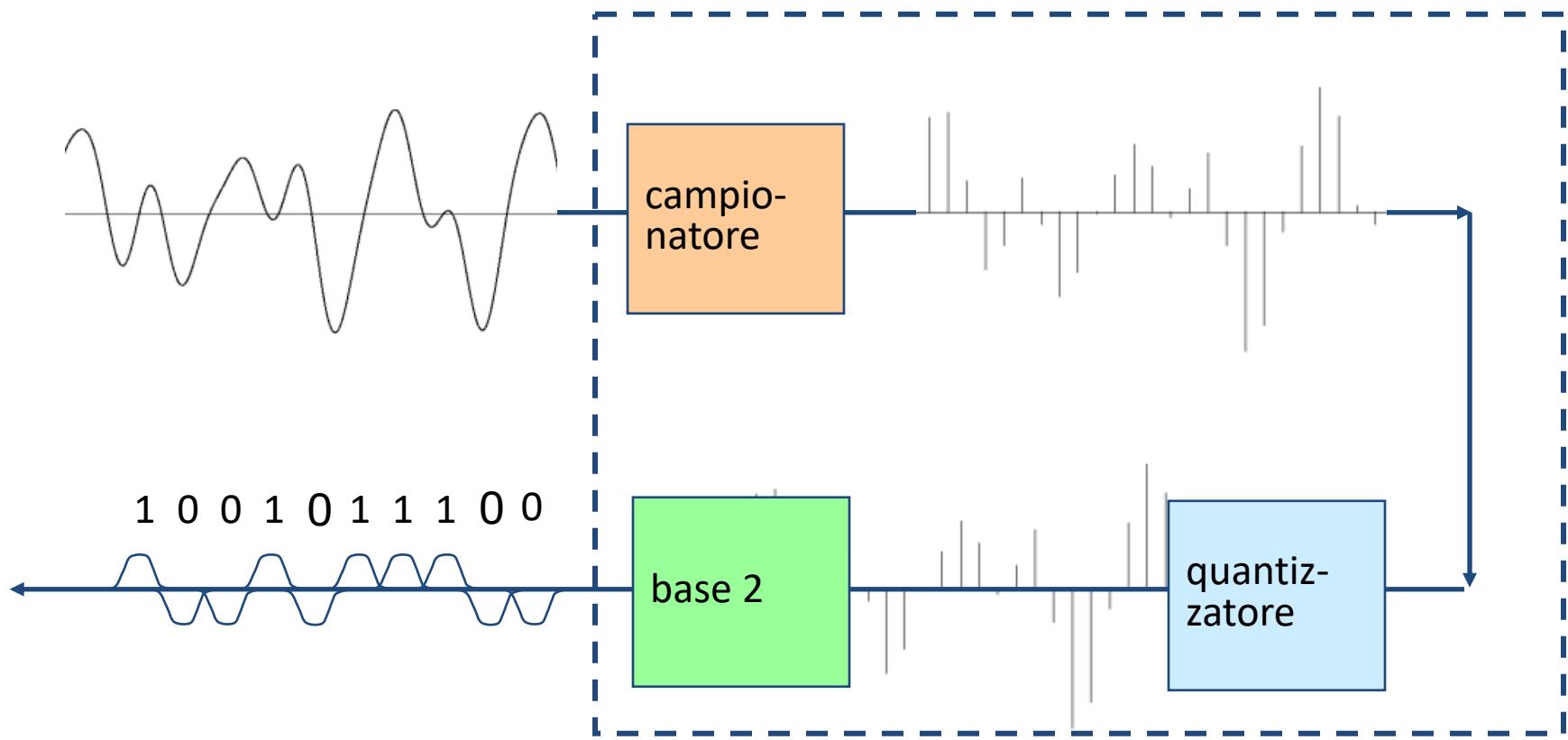
Associazione di uno specifico gruppo di bit per ogni livello discreto di quantizzazione

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



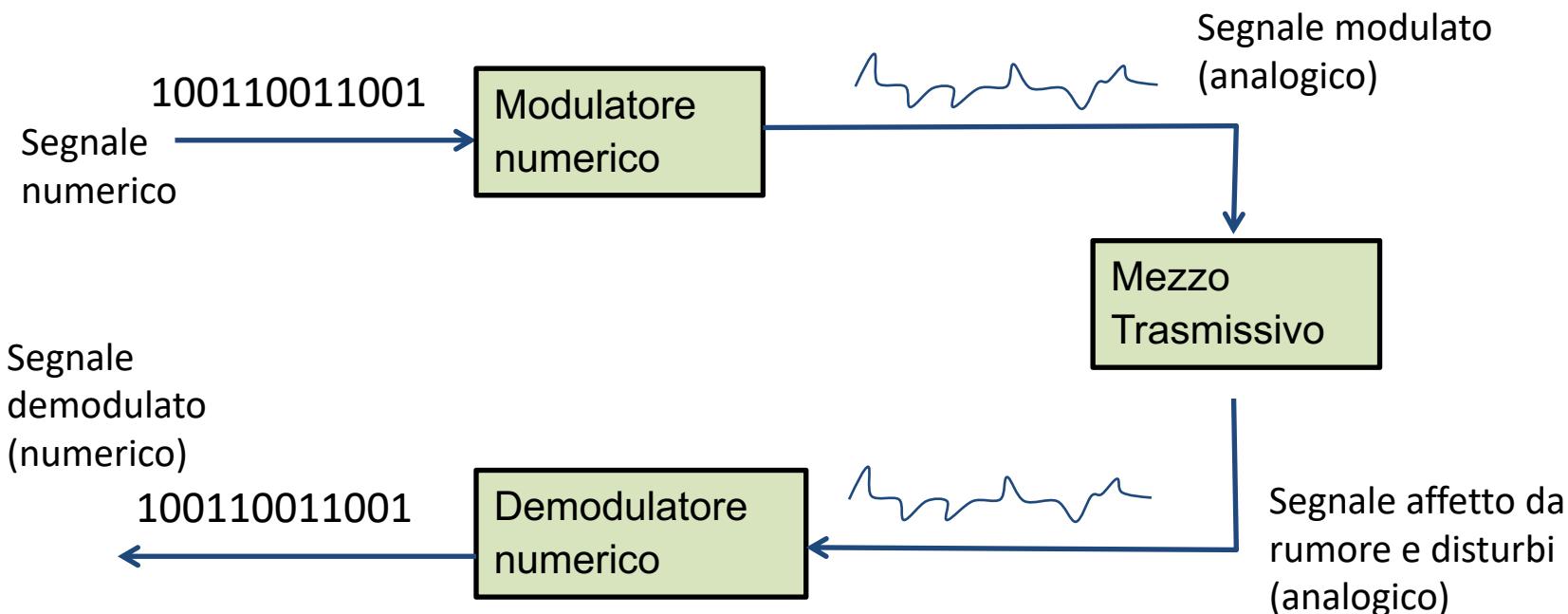
Flussi binari equivalenti

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



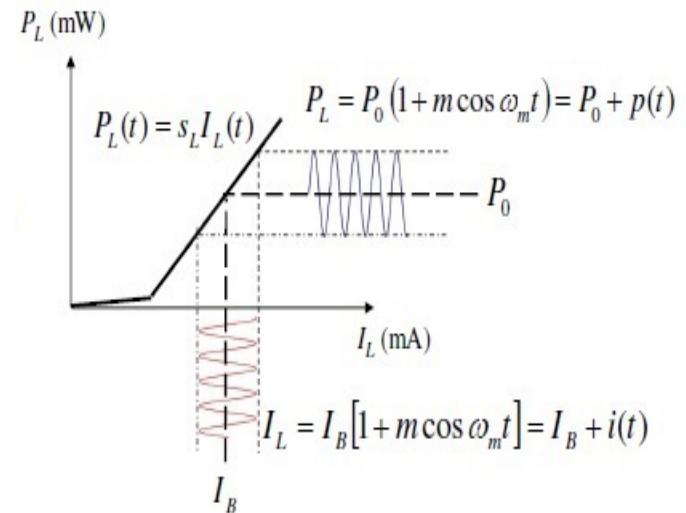
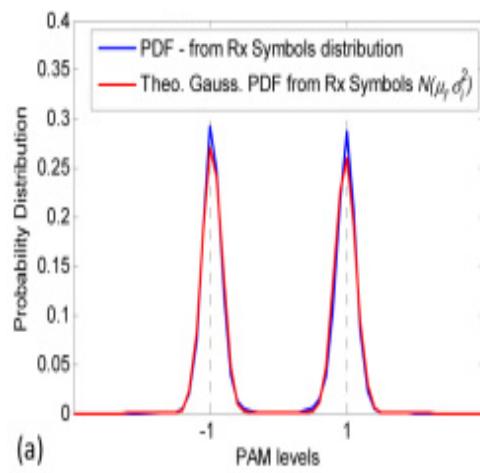
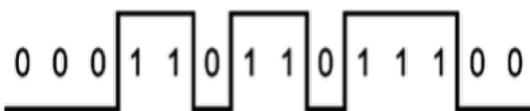
Modulazione

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



Modulazione di ampiezza binaria

PAM2-NRZ

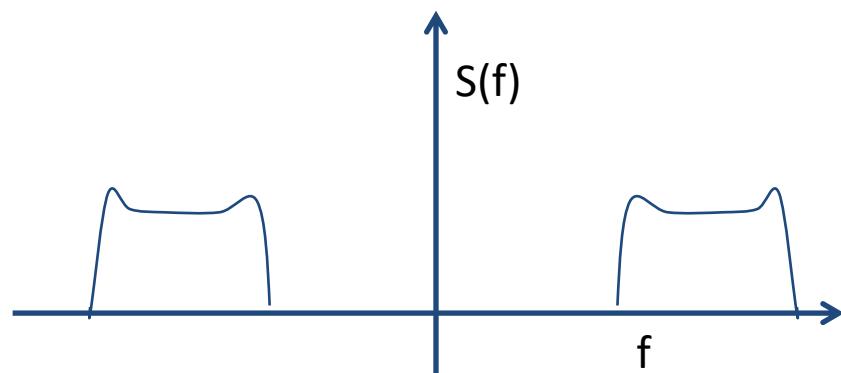
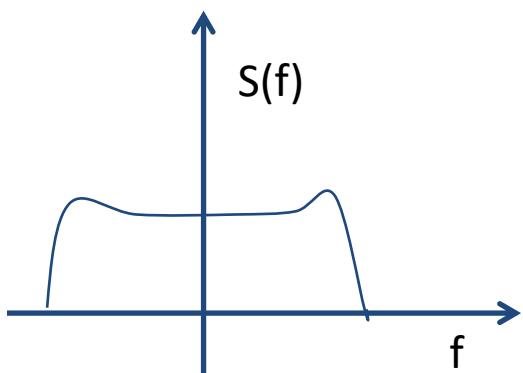


- Modulazione di ampiezza : i bit 1 e 0 sono rappresentati tramite due livelli di ampiezza distinti del segnale da modulare
- Modulazione molto utilizzata nei sistemi di trasmissione per la sua semplicità



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

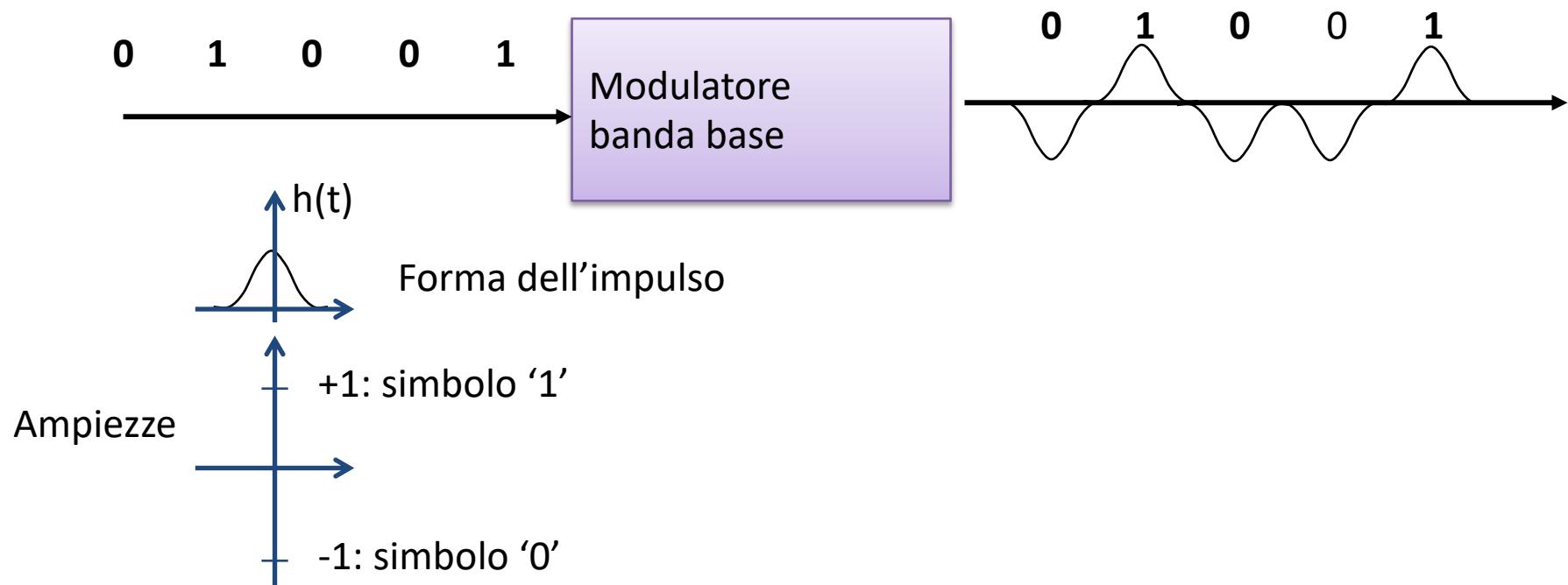


Modulazione in banda base

- Esempio: Modulazione d'ampiezza in banda base

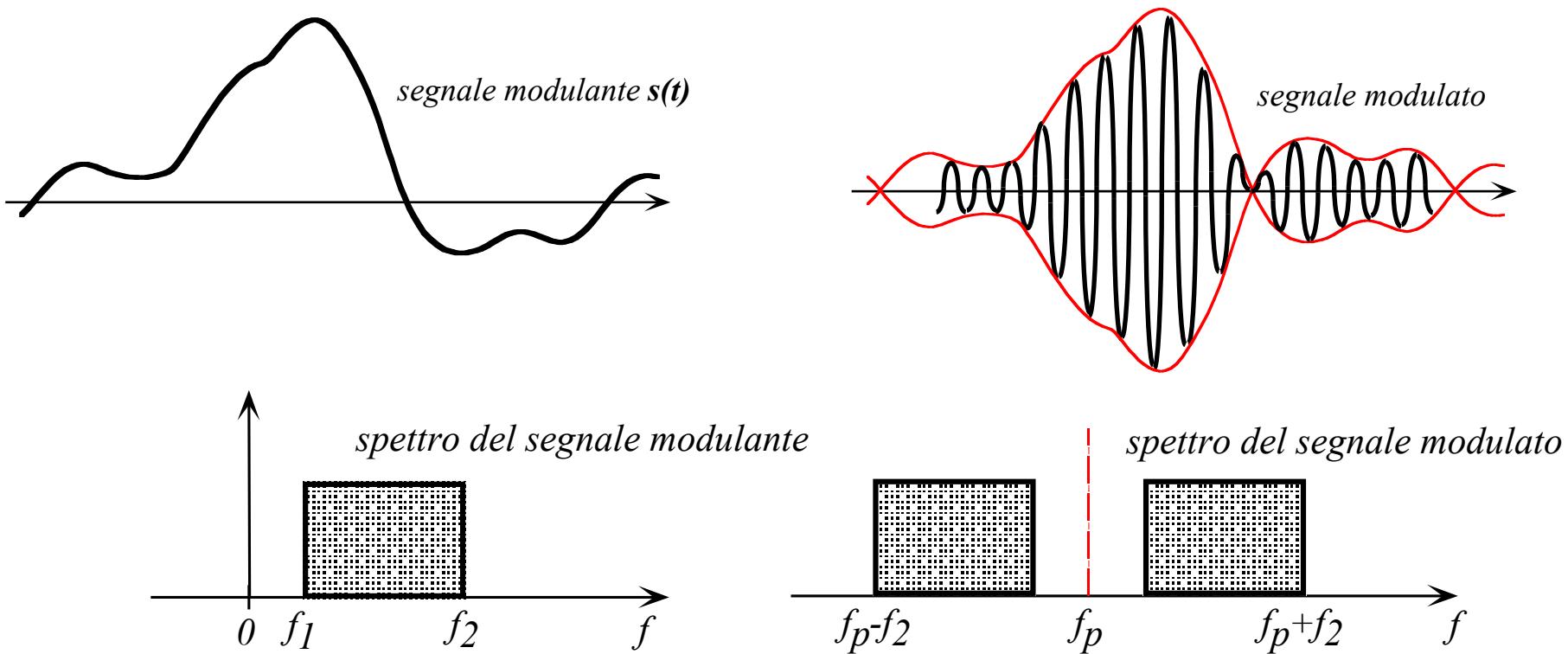
Formato di modulazione di tipo **PAM – Pulse Amplitude Modulation**

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



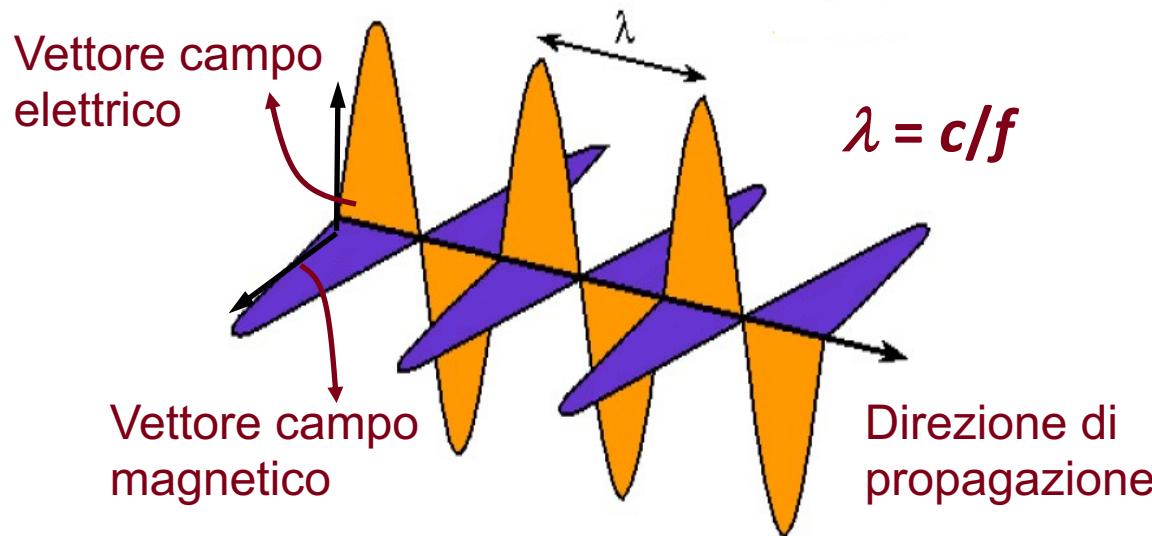
Modulazione in banda traslata

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



Propagazione di un segnale mediante una portante

- Il segnale può propagarsi nell'**atmosfera** (collegamenti terrestri o collegamenti Terra-spazio) o in un **mezzo trasmisivo 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)**

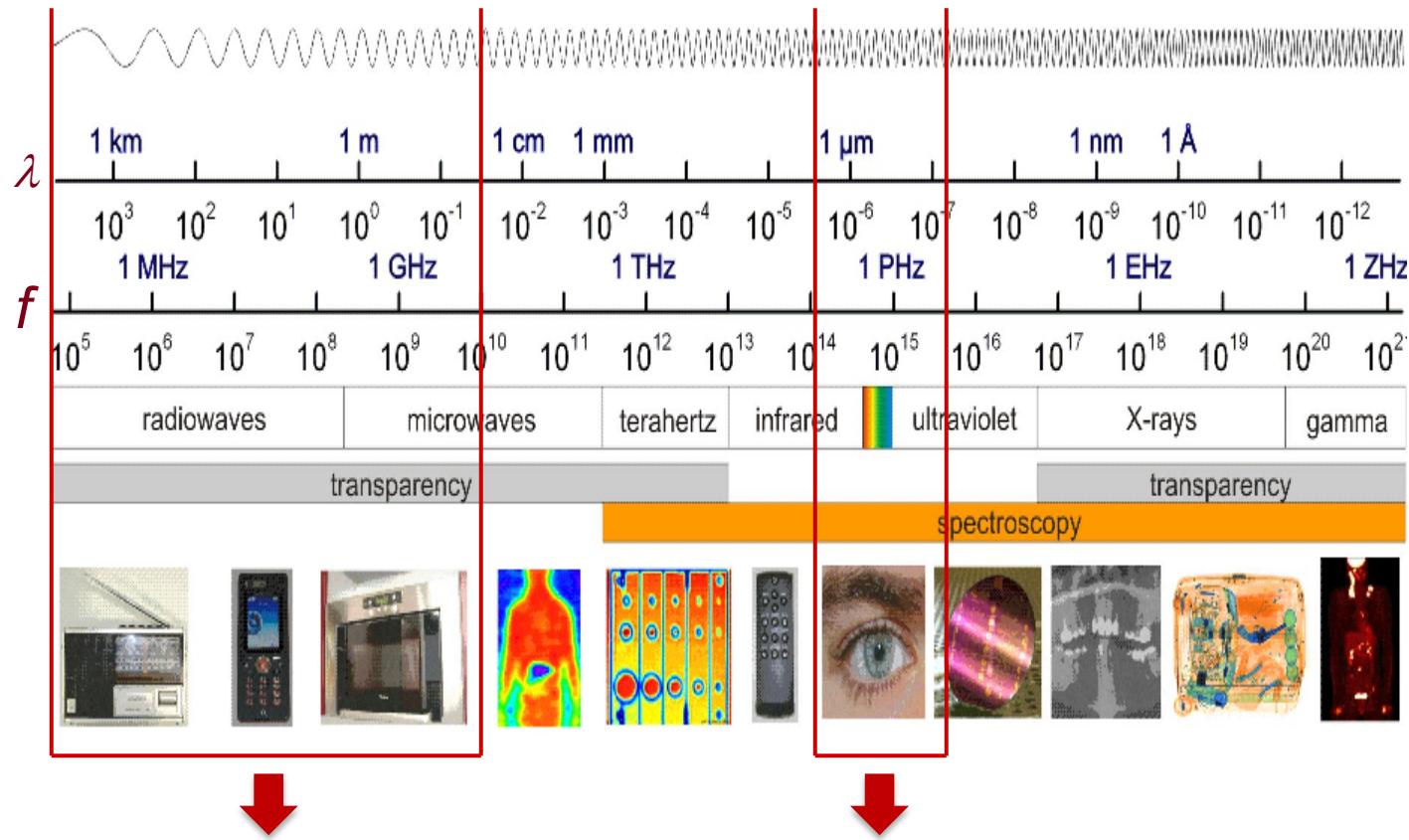


- Le onde elettromagnetiche portanti vengono classificate principalmente in base alla frequenza.



Onde “portanti” per TELECOMUCAZIONI

$$\lambda = c/f$$



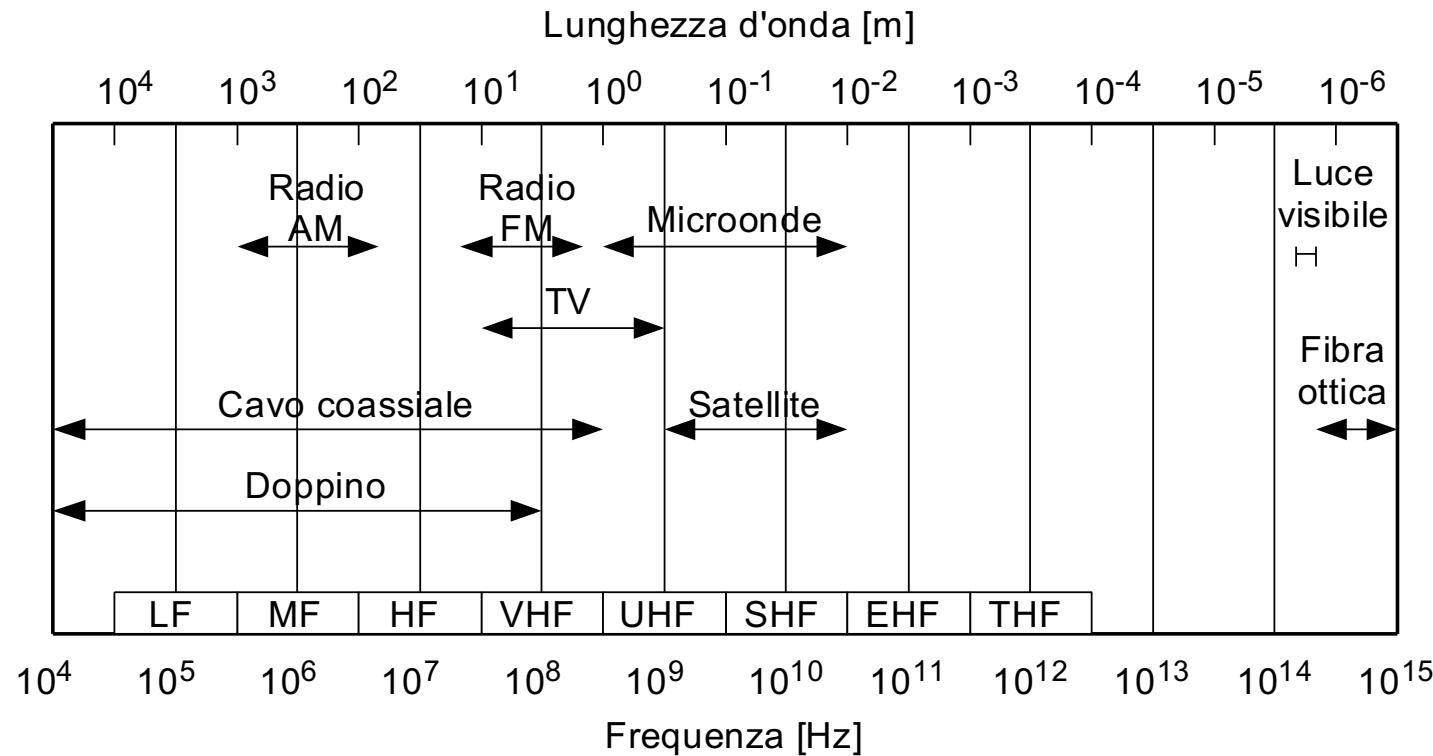
Radio
Frequenza

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
QAM: Quadrature Amplitude Modulation



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 valori di ampiezza diversi
 - Per ogni valore di ampiezza trasmesso (chiamato anche **simbolo**) corrispondono allora *logicamente* $n=\log_2 N$ bit

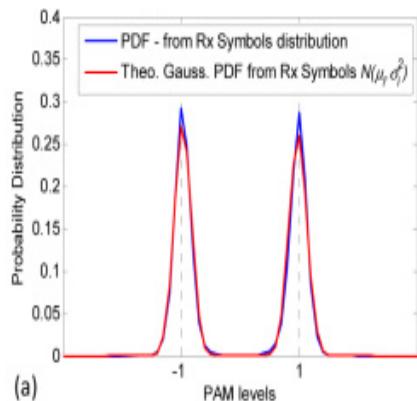
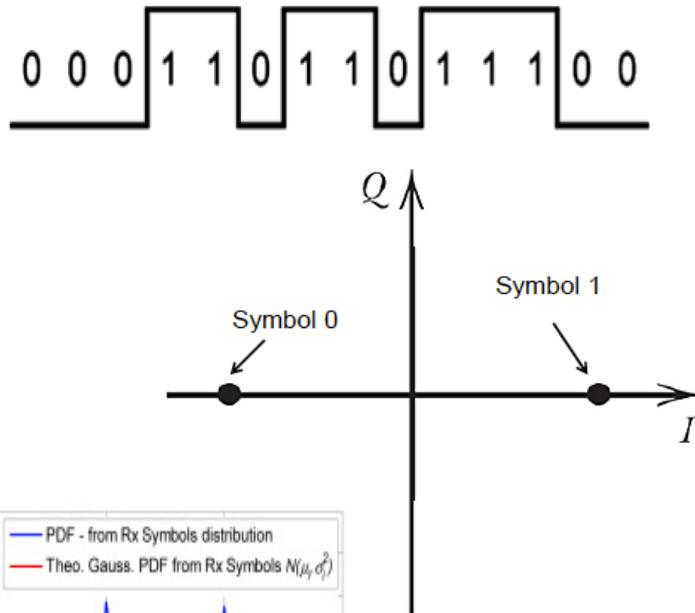


Modulazione multilivello di ampiezza

ASK o PAM binario

2 valori di ampiezza

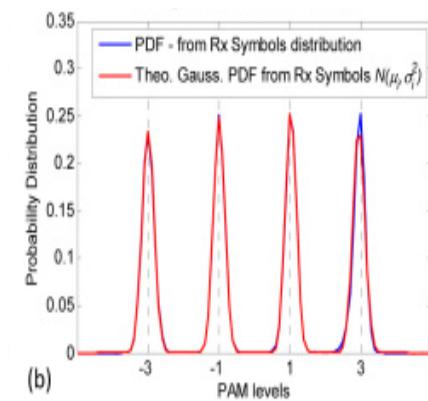
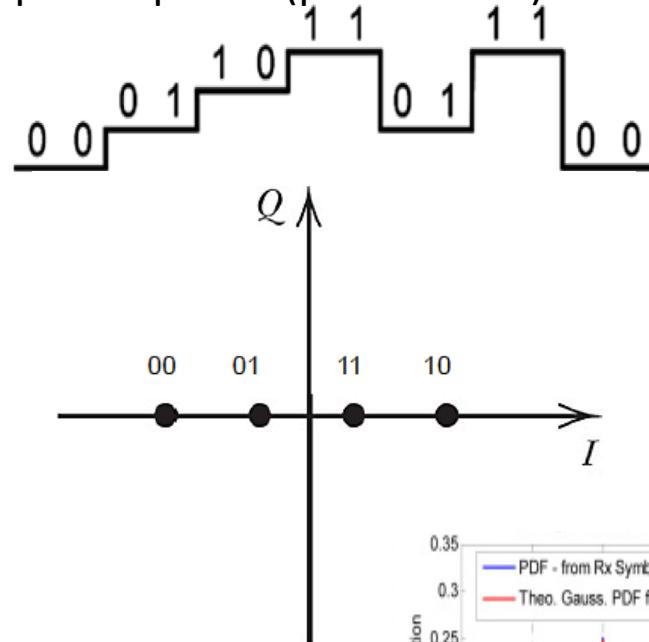
1 bit per ampiezza (x simbolo)



4-ASK o 4PAM

4 valori di ampiezza

2 bit per ampiezza (per simbolo)



Modulazione multilivello di fase

Esempio PSK in banda traslata:

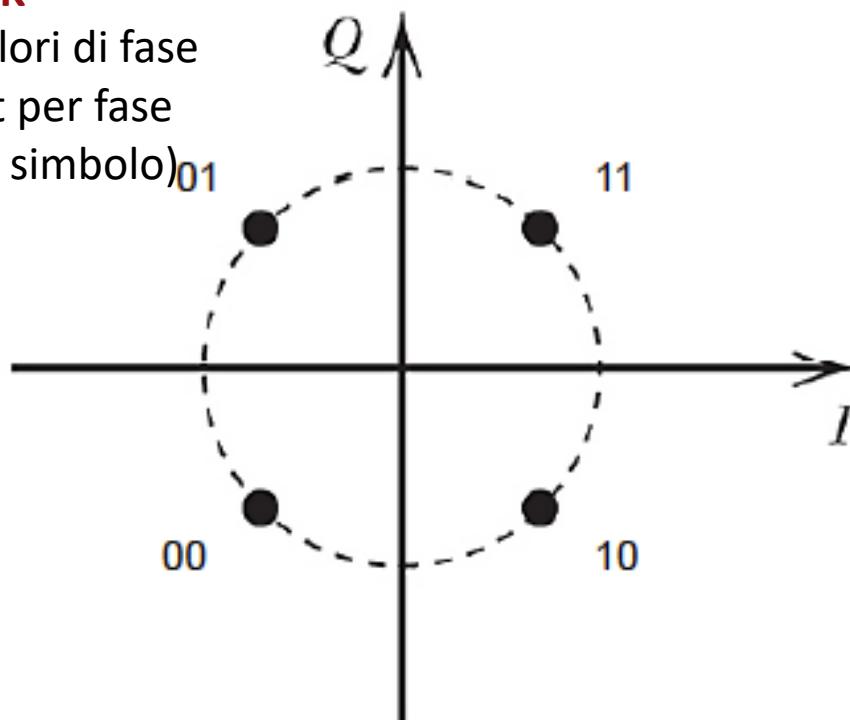
- Flusso di bit in ingresso è diviso in gruppi di $\log_2(N)$
- Si usano N valori di fase diversi (simboli)
- Per ogni valore di fase trasmesso (chiamato anche **simbolo**) corrispondono logicamente $n=\log_2 N$ bit

QPSK

4 valori di fase

2 bit per fase

(per simbolo)

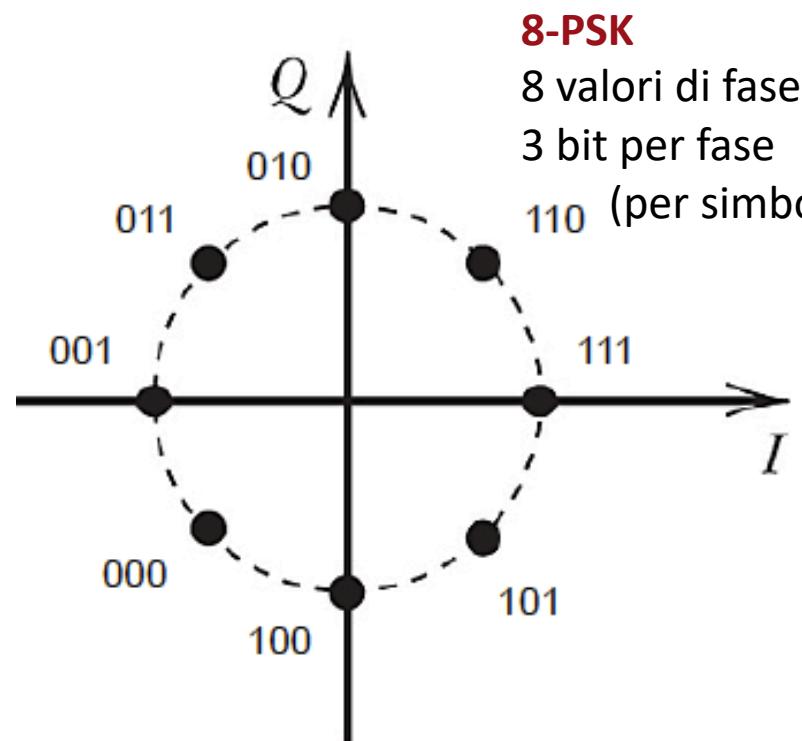


8-PSK

8 valori di fase

3 bit per fase

110 (per simbolo)



Modulazione multilivello di ampiezza e fase

- Esempio QAM in banda traslata:

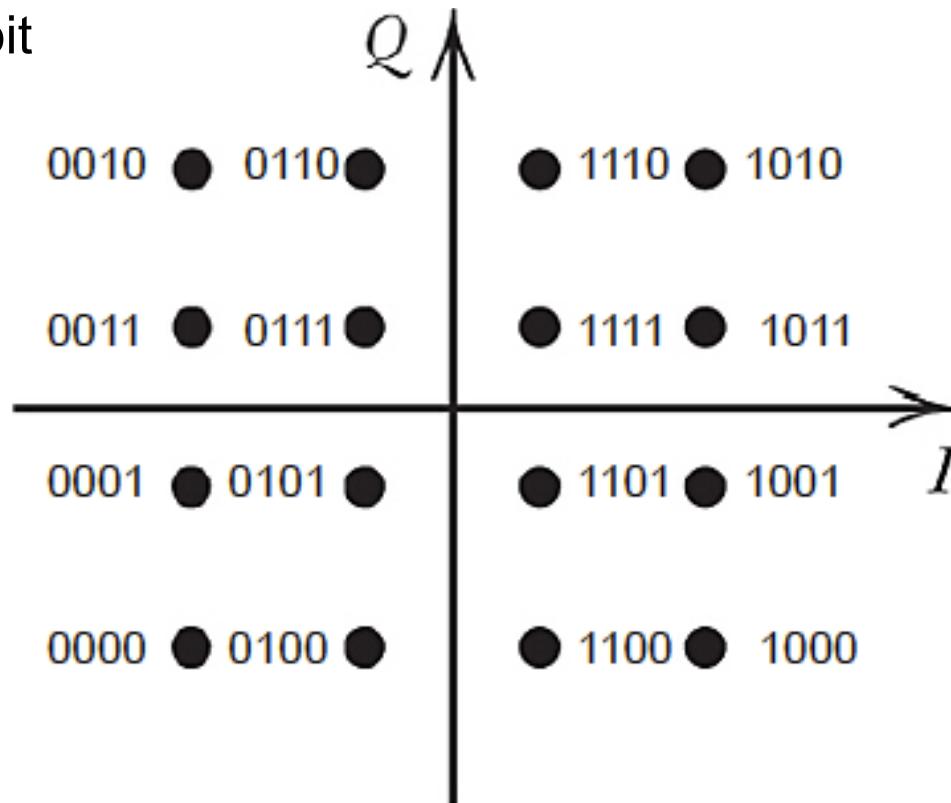
- Flusso di bit in ingresso è diviso in gruppi di $\log_2(N)$
- Si usano N simboli diversi (con ampiezze e fasi diverse)
- Per ogni simbolo trasmesso corrispondono logicamente $n=\log_2 N$ bit

16QAM

16 combinazioni
di fase e ampiezza

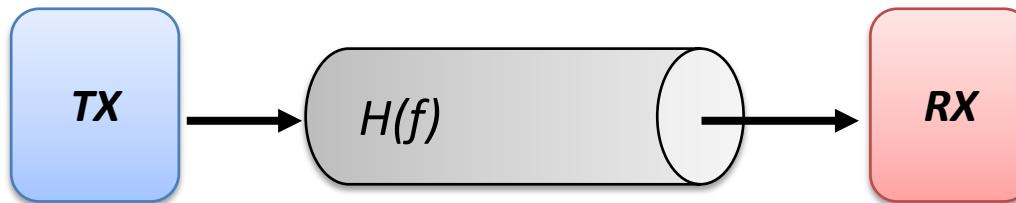
(chiamati anche SIMBOLI)

4 bit per simbolo



Canale trasmittivo

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



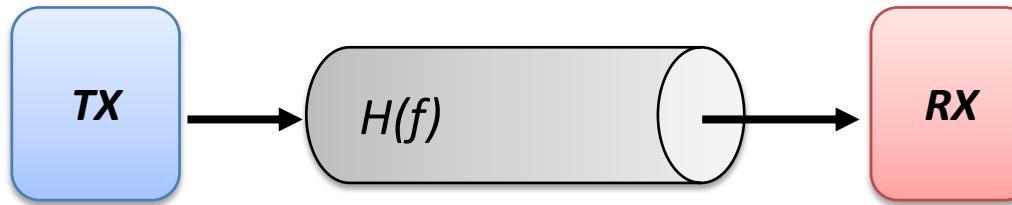
- è caratterizzato da una **velocità di trasmissione (o capacità) R** (in bps o bit/s) che dipende dalla banda del mezzo trasmittivo e dalla potenza ricevuta
- e da un **ritardo di propagazione** del segnale τ



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.

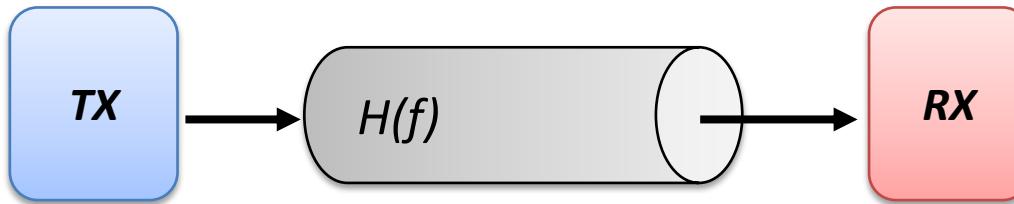
Tale regione è chiamata **BANDA PASSANTE DEL CANALE**



Banda di Canale

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).



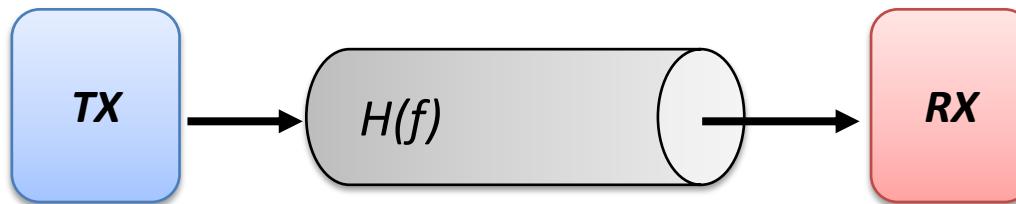
Per qualunque mezzo trasmittivo la banda passante si riduce all'aumentare della lunghezza del mezzo percorso.



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

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

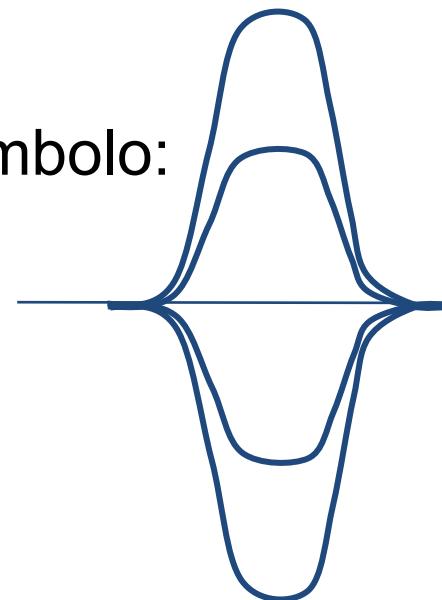
- Caso di trasmissione multilivello con n bit per simbolo:
-> velocità di trasmissione massima

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

$$n = \log_2 N$$

N simboli
 n bit per simbolo

$$N = 2^n$$



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

- Caso di trasmissione multilivello con n bit per simbolo:
-> velocità di trasmissione massima $R \approx nB$ bit/s

$$n = \log_2 N$$

N simboli

$$N = 2^n$$

n bit per simbolo

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



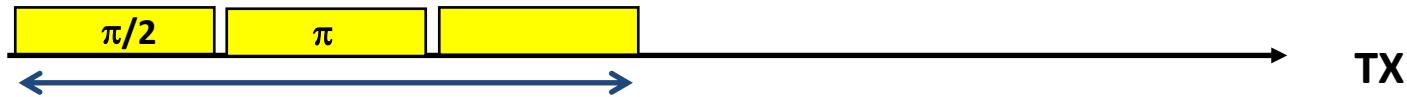
Velocità di trasmissione in caso di trasmissione multilivello a parità di capacità del segnale

L bits



- Se si usa **modulazione binaria** con velocità di trasmissione R , serve un canale trasmittivo con una banda B almeno larga quanto R $B \geq R$

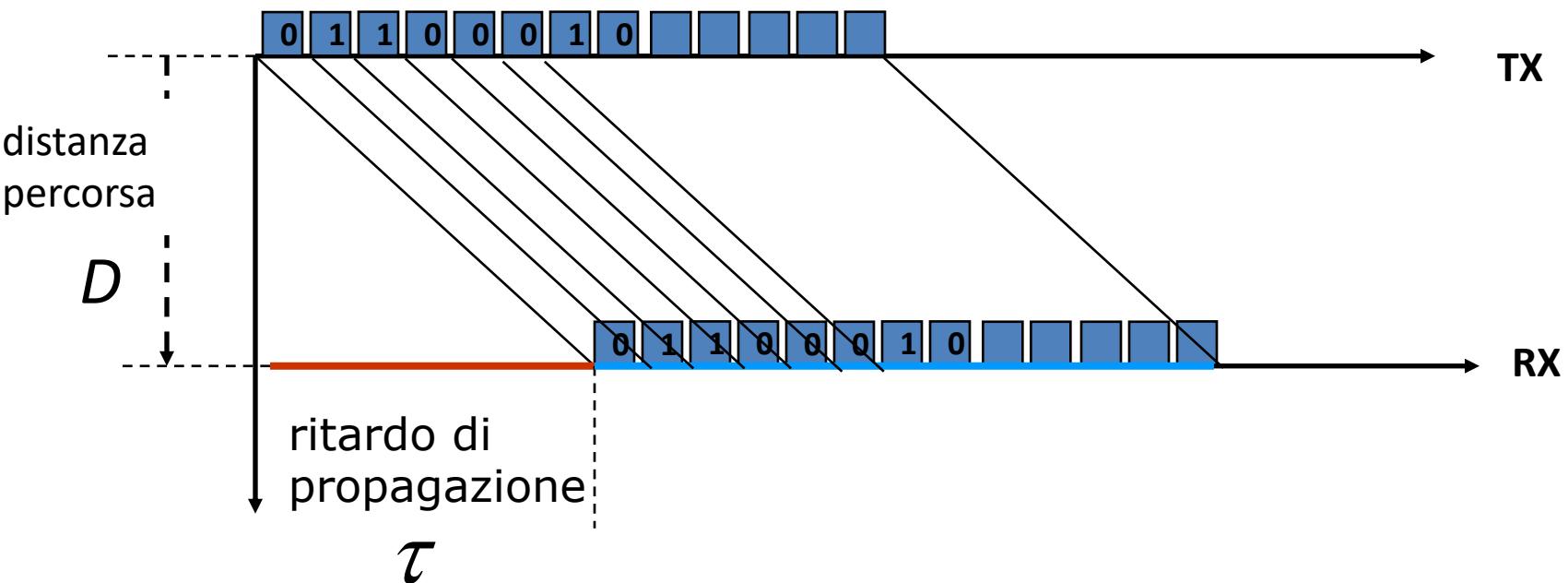
L/n simboli



Se si usa **modulazione multilivello** (con n bit per simbolo) con velocità di trasmissione complessiva pari a R , serve un canale trasmittivo con una banda B almeno larga quanto R/n $B \geq R/n$



Ritardo di propagazione



- Il ritardo τ affinché un impulso trasmesso dal TX raggiunga il RX dipende dalla distanza D (in m) e dalla velocità di propagazione v (in m/s, prossima alla velocità della luce)
- **è indipendente dalla modulazione**

$$\tau = \frac{D}{v}$$



Errori in ricezione

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

10011010100100100101000101000

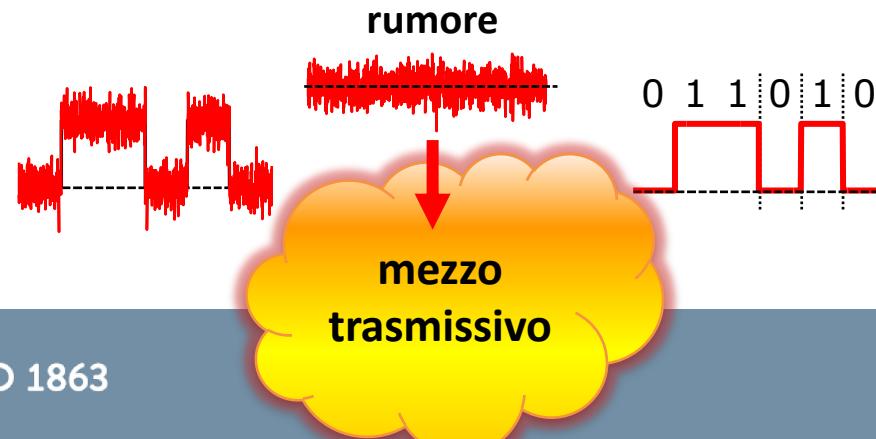
10001010100110100101000111000

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

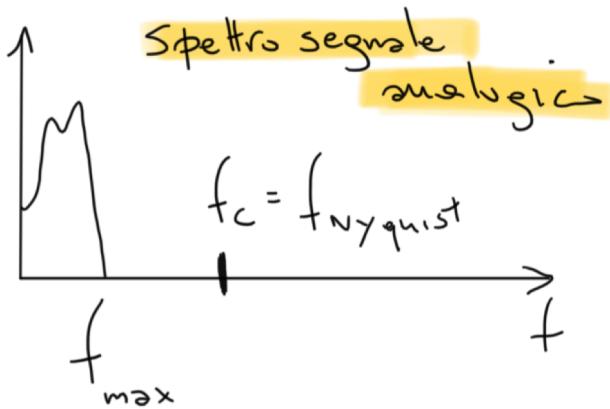


Errori in ricezione

- 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



Conversione analogica-digitale

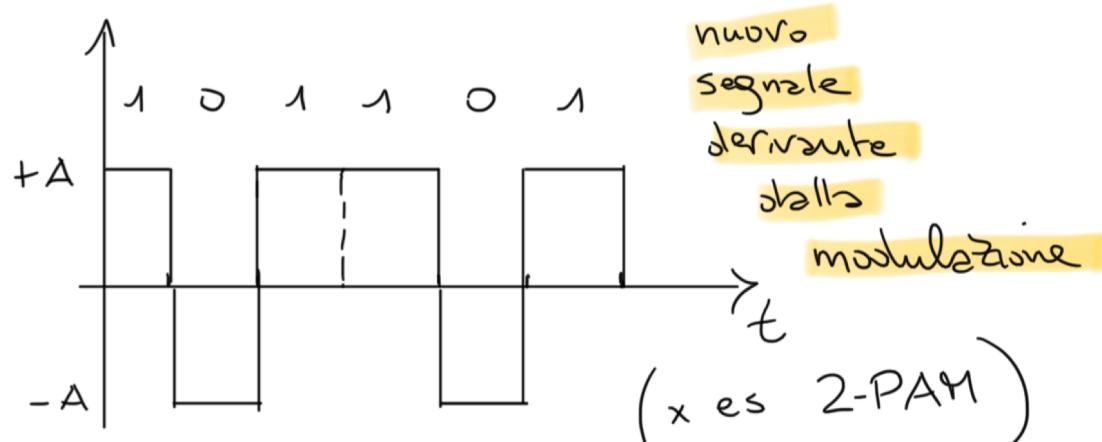


$$f_c = 2f_{max} \Rightarrow \text{QUANTIZZAZIONE}$$

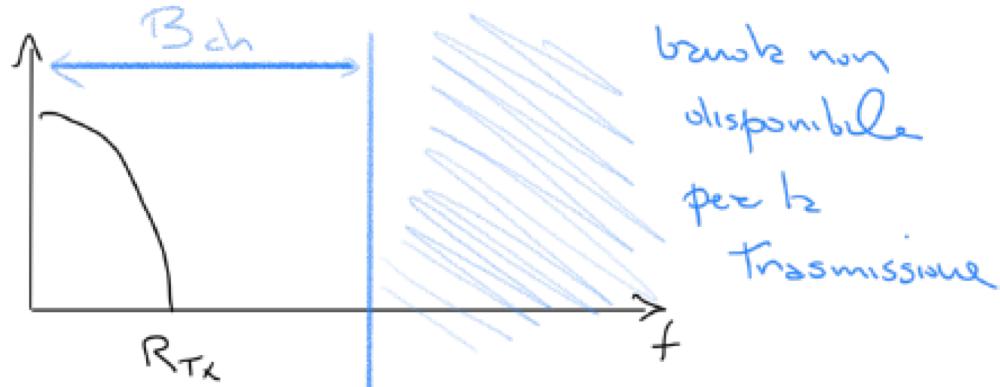


b bit per campione
(bit per livello)

$$R_{TX} = b f_c$$



Trasmissione in banda base



bande presenti
nel canale

$$B_{ch} \geq R_{Tx}$$

rate di trasmissione (fisico dell'impulso)

$$B_{ch} \geq \frac{R_b}{n}$$

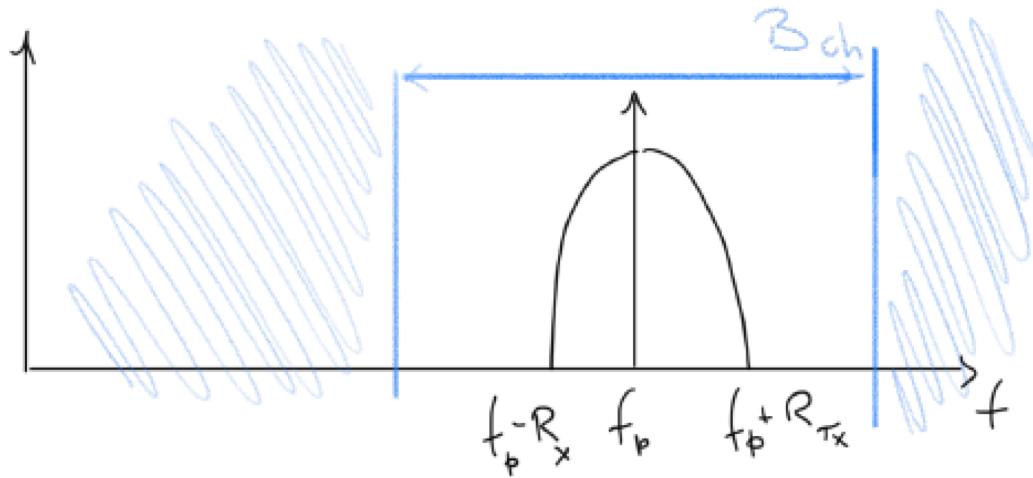
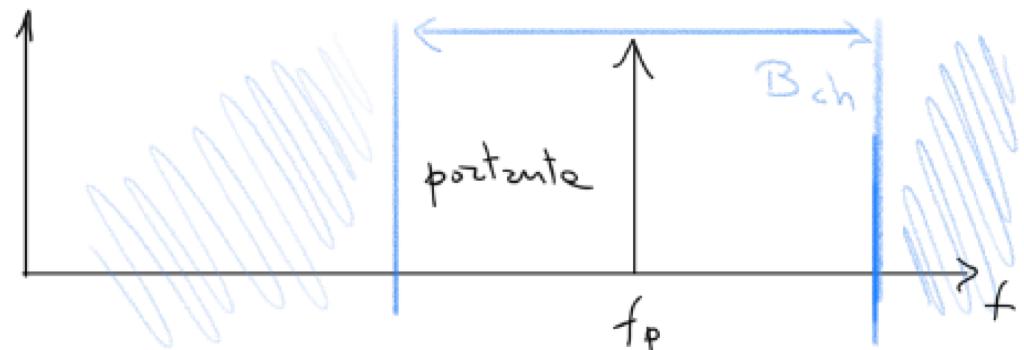
R_b bit-rate

n bit per simbolo

(modulazione
multi-level)



Trasmissione in banda passante



segnale in banda traslata

→ GRAZIE A MODULAZIONE
DELLA PORTANTE, LO SPETTRO DEL SEGNALE È TRASLATO

