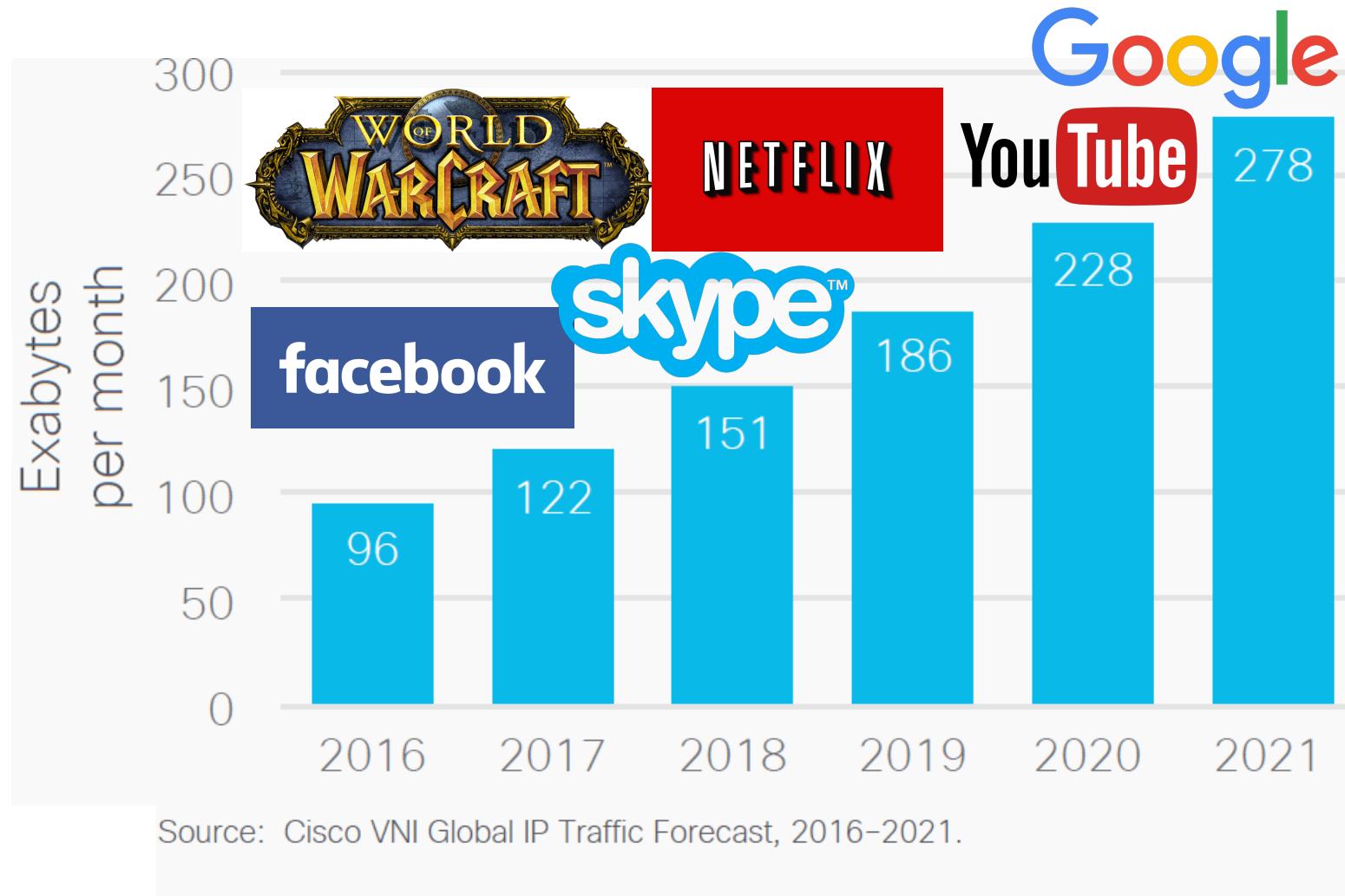




• 7 – Livello Fisico

- Pierpaolo Boffi, Marco Brunero, Alberto Gatto

Crescita del Traffico



Data

Equivalent



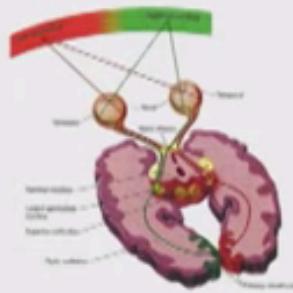
1 Petabyte

10^{15} bytes or 200,000 DVDs



1 Exabyte

10^{18} bytes or 200 million DVDs



1 Zettabyte *10^{21} bytes*



How much is that?

20 Petabytes digital library of all books written in all languages **25 Petabytes**: data processed by Google per day

5 Exabytes: transcript of ‘all words ever spoken’

300 Exabytes: all hard drives sold by Seagate in 2011 or all data stored in the world by 2007

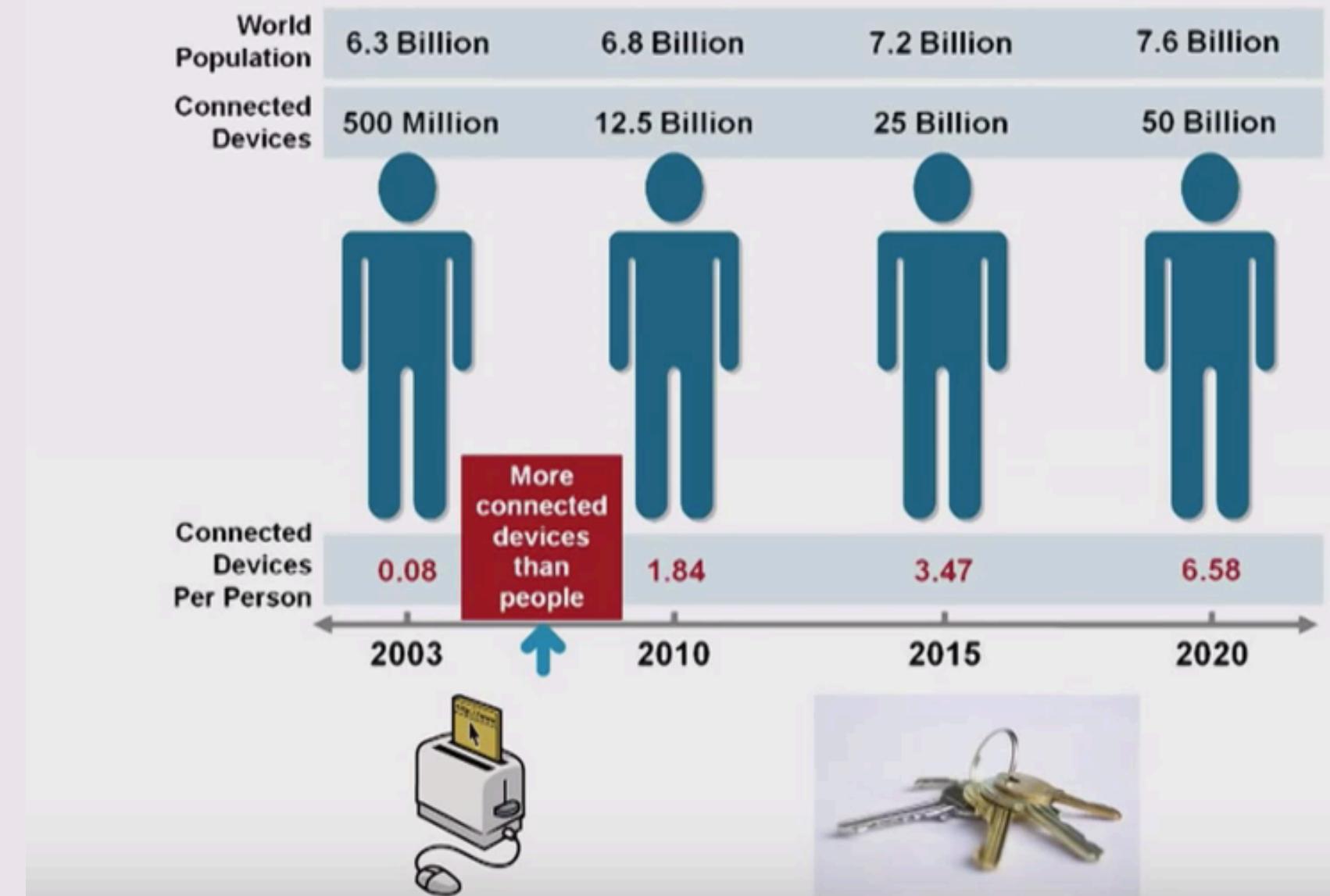
500 Exabytes: content of Internet in 2009

No storage system has achieved 1 Zettabyte yet!!

66 Zettabytes: visual information from eyes to brain of entire human race/year



IoT: INTERNET of THINGS



SATELLITE vs. FIBRA



- 250 commercial satellites: 4 Gbits/s per satellite → **1 Tbit/s**
- **But**, global data traffic in 2013: **100 Tbit/s** → **less 1% on satellite**



Fibra ottica installata nel mondo: +17% per anno

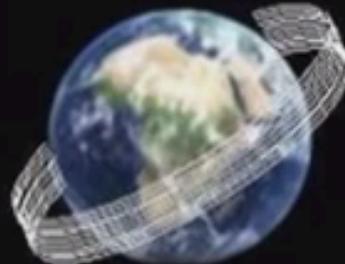
2006 : 745 Mkm
18.000 Earth circumference



2010 : 1.4 Bkm
35.000 Earth circumference



2015 : 3.0 Bkm
76.000 Earth circumference



- **2010 - the length of fibre installed = distance from the Sun to Saturn**
- **2015 - could reach Uranus!**
- **99% of all data is carried on fibre**



773 Mkm



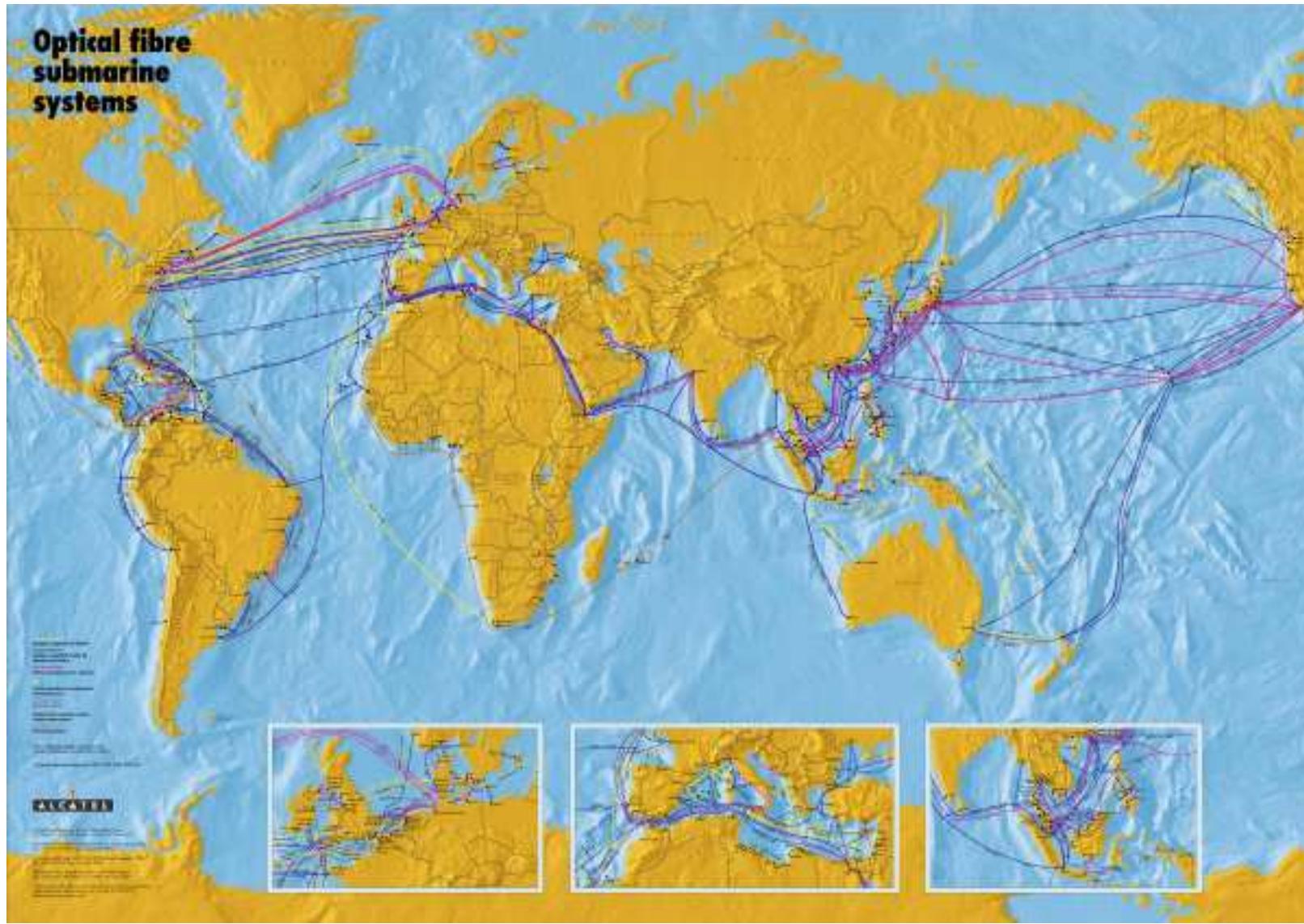
1.4 Bkm



2.8 Bkm

*E.Desnouie, « 50th Anniversary of the first working laser & celebration of Prof. Charles Kao's 2009 Nobel Prize in The Royal Academy of Engineering, London,
17 June 2010, © E.Desnouie 2010*



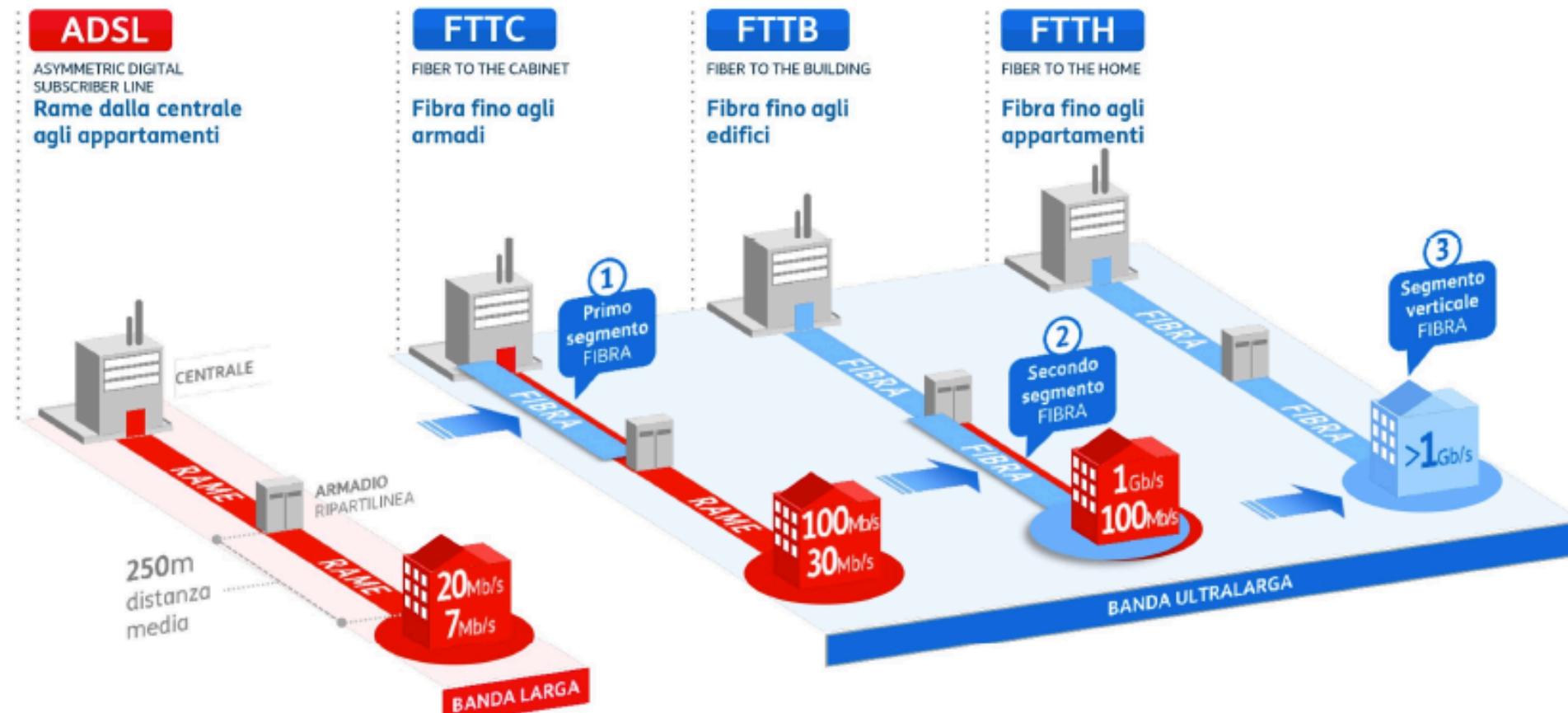


Oggi nel mondo sono installati **circa 3 miliardi di chilometri**
di fibra ottica

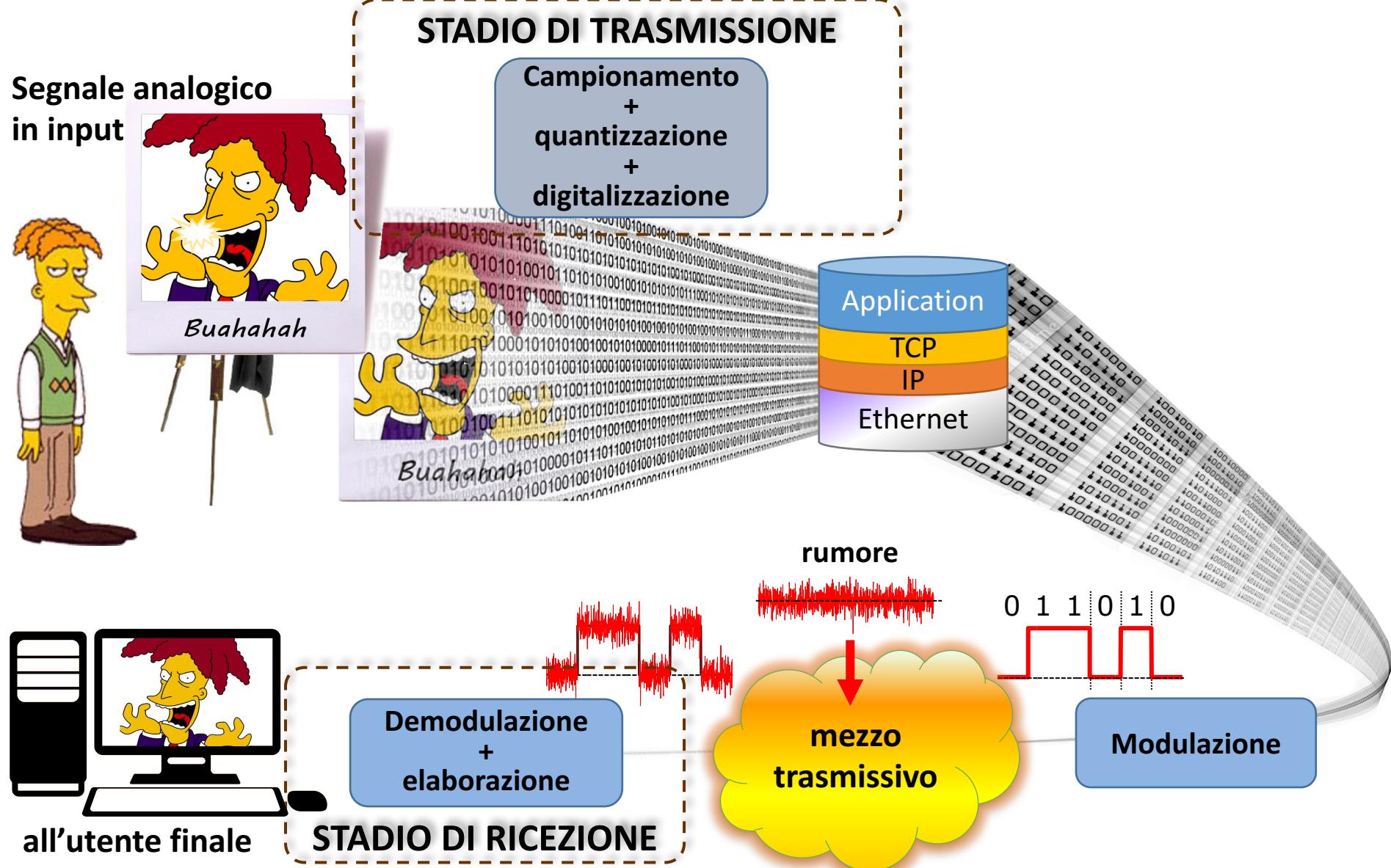


Rete d'accesso: Banda Ultra Larga a casa dell'utente

La velocità (BANDA) di trasmissione potenzialmente disponibile aumenta passando da collegamenti **tutto RAME (ADSL)** a collegamenti **tutto FIBRA (FTTH)**



Trasmissione del segnale a LIVELLO FISICO



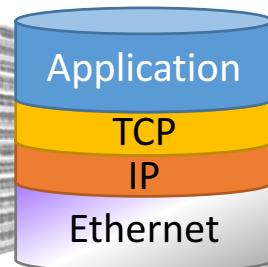
Trasmissione del segnale a LIVELLO FISICO

Segnale analogico
in input



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

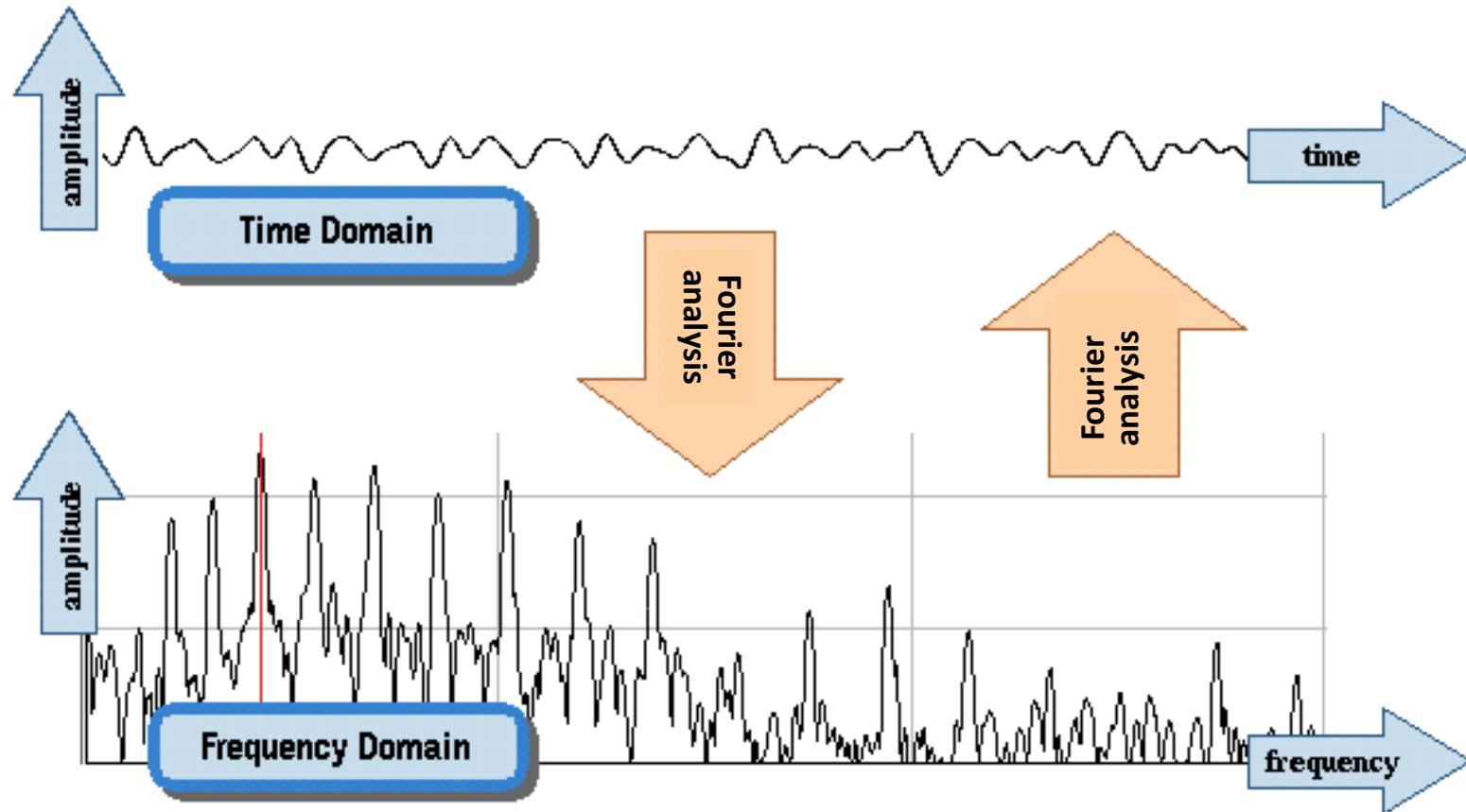


sequenza di bit con una certa velocità di trasmissione o **bit-rate R_{bit}**

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



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

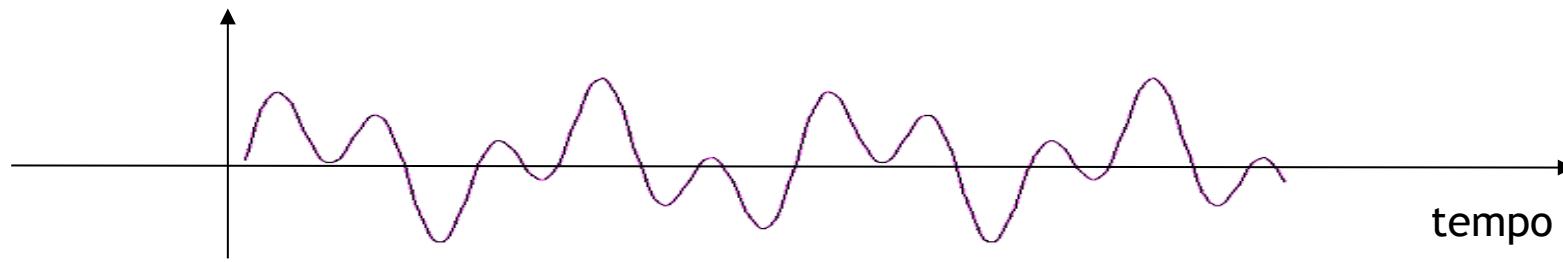


- tempo t misurato in secondi (s)
- frequenza f misurata in Hertz (Hz)

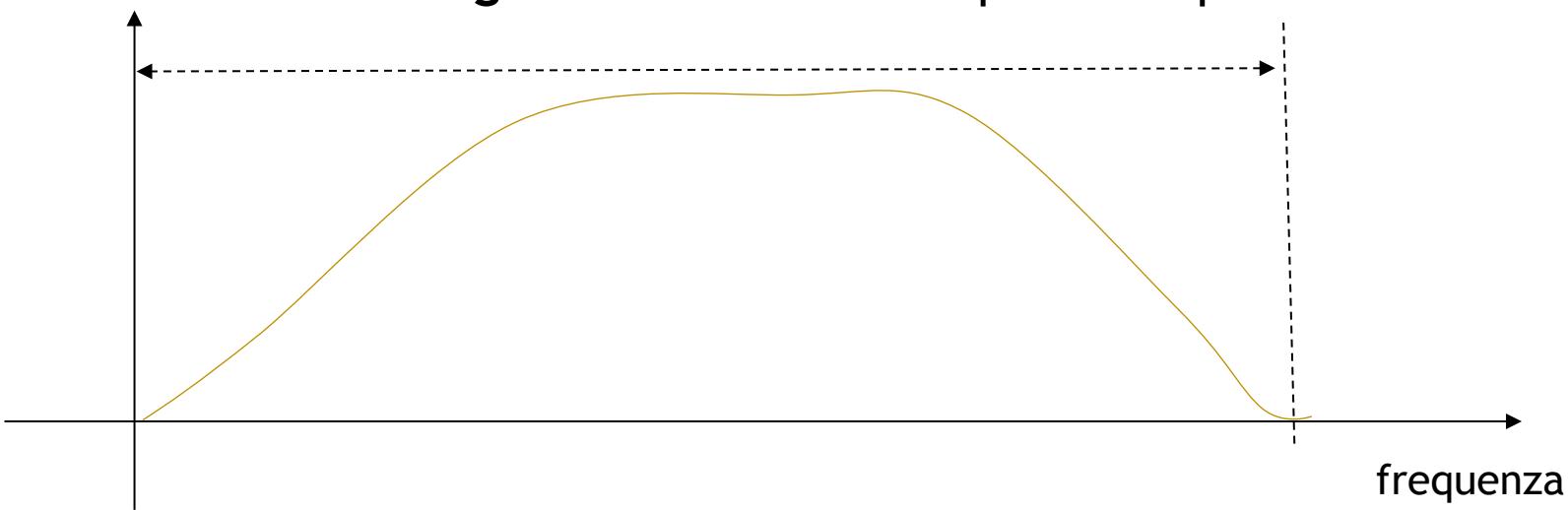


Banda di un segnale

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

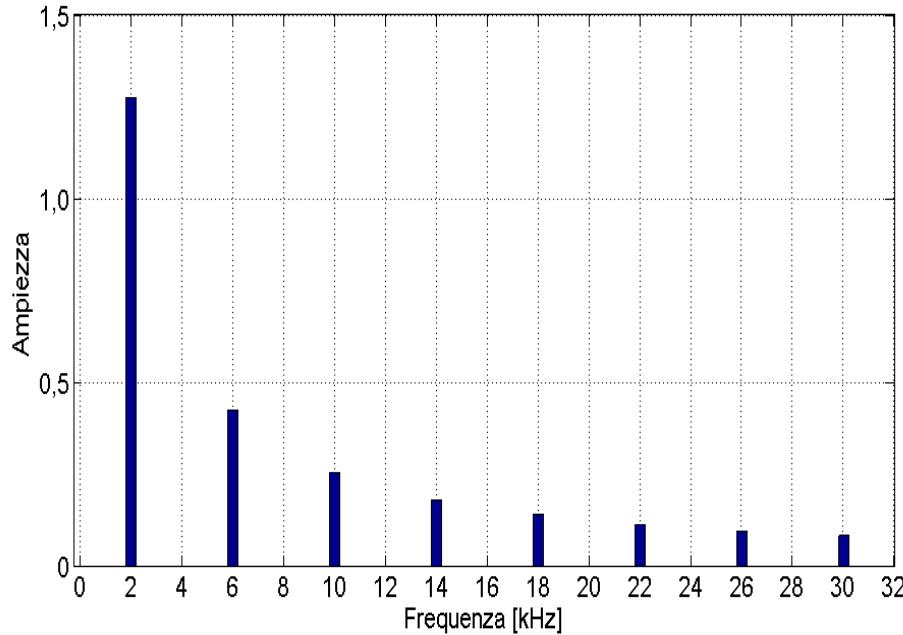
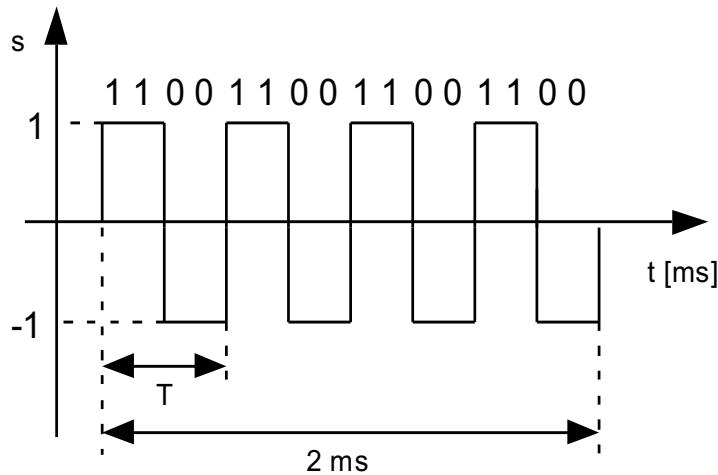


banda del segnale = massimo campo di frequenze usato



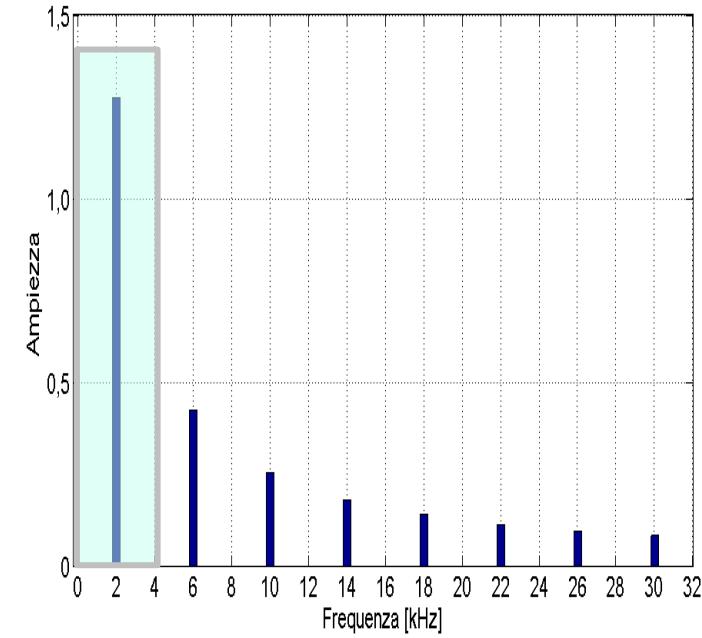
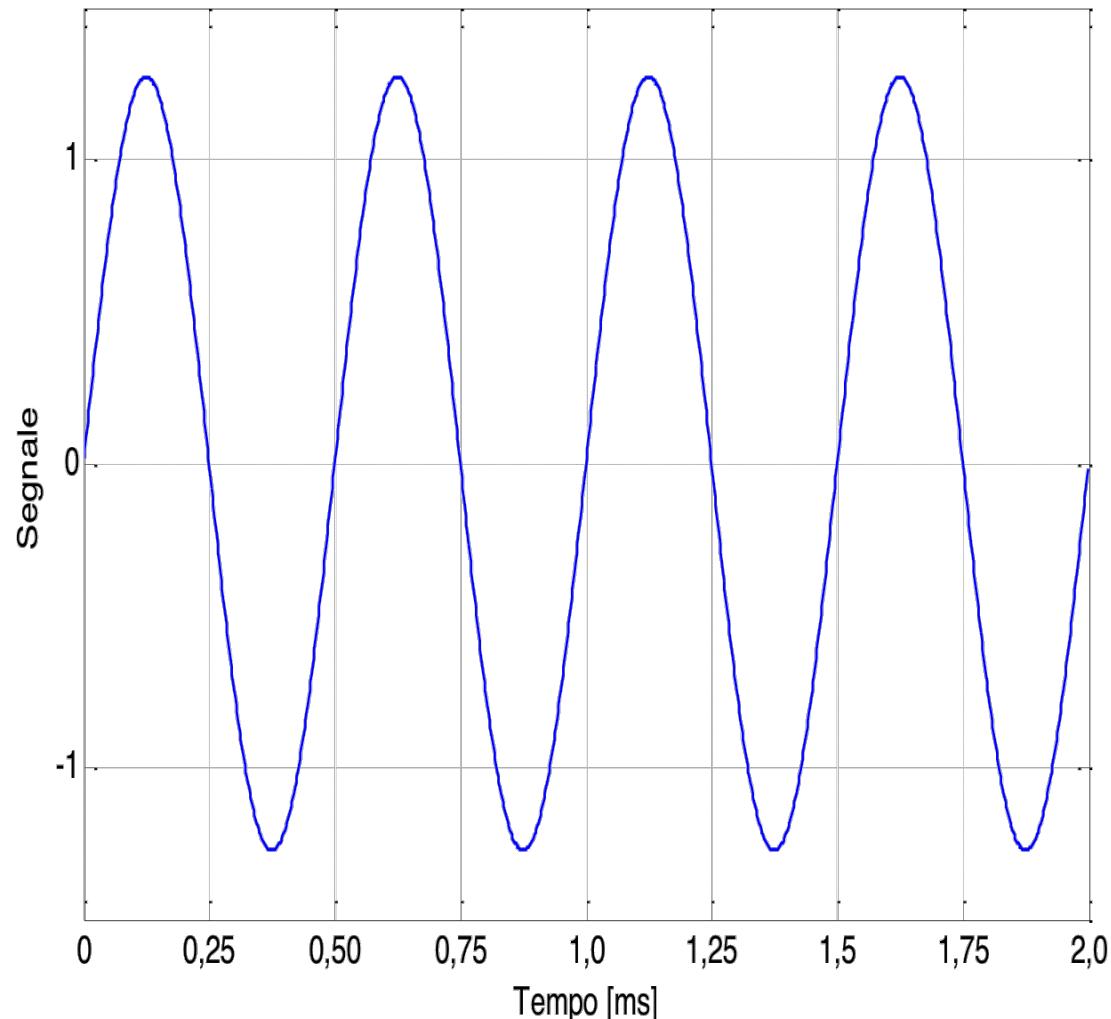
Banda (spettro) di un segnale: esempio 1

- **Segnale periodico nel tempo
a media nulla**



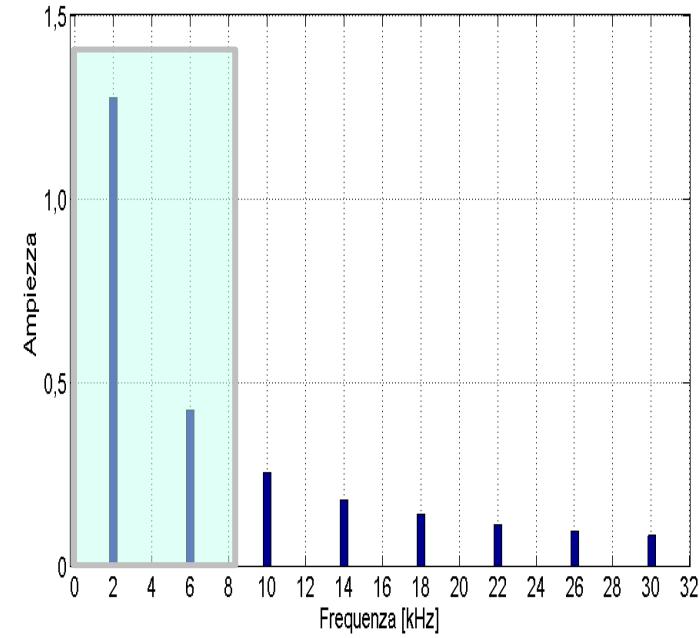
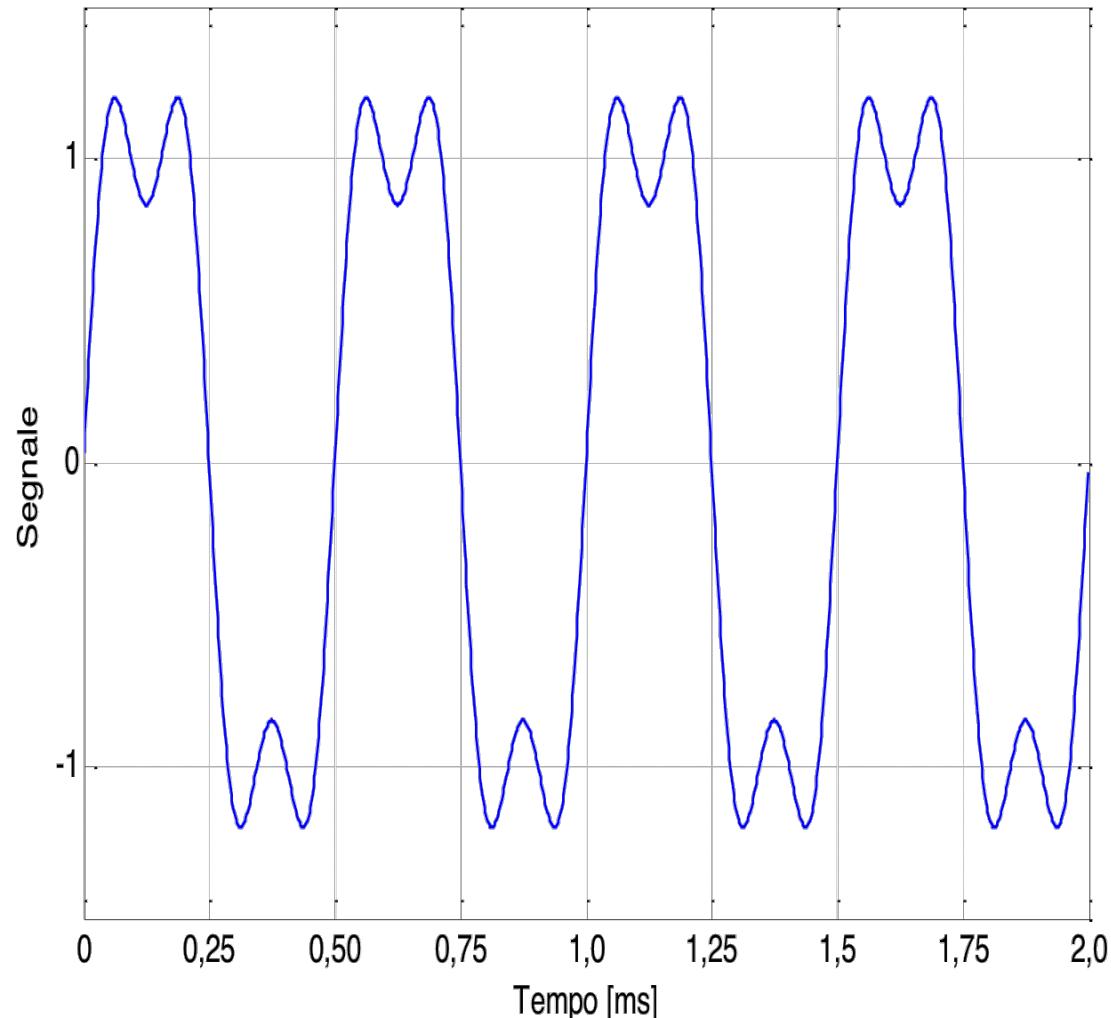
Spettro di un segnale: esempio 1

$W = 4 \text{ kHz}$



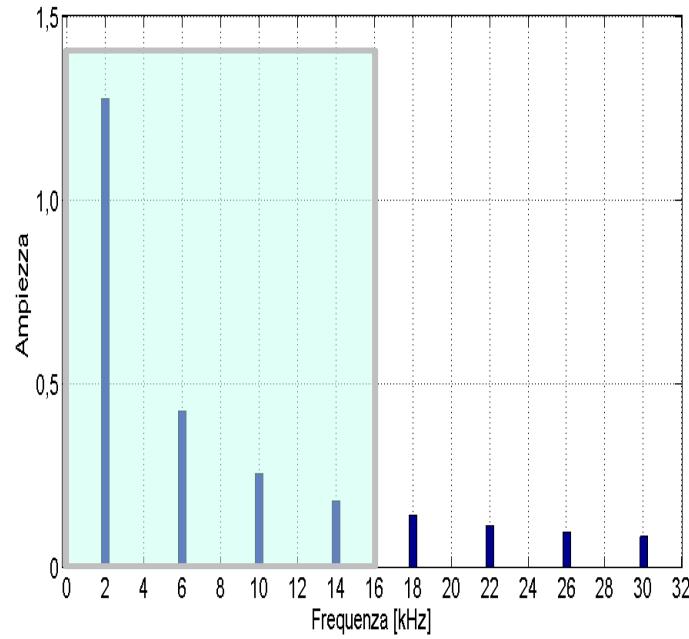
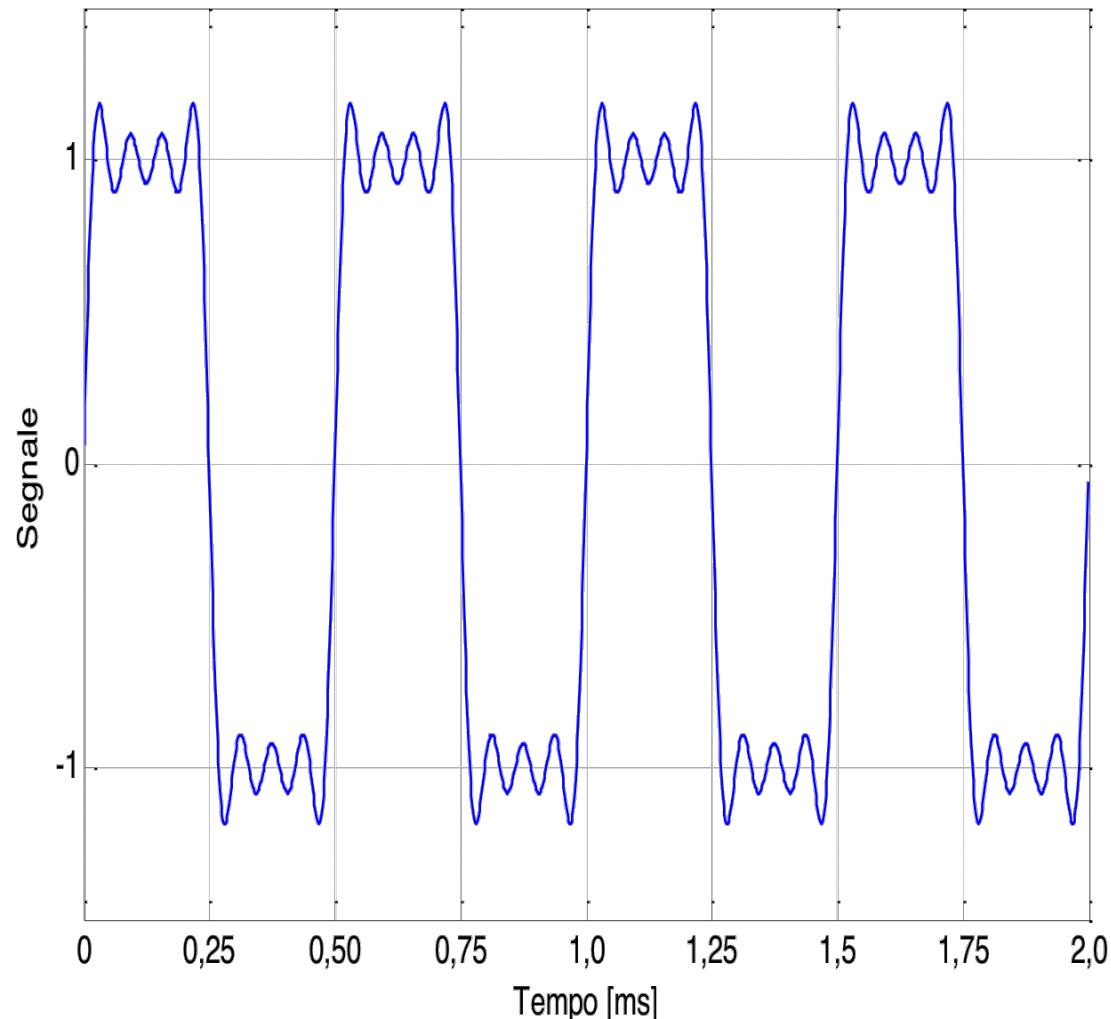
Spettro di un segnale: esempio 1

$W = 8 \text{ kHz}$



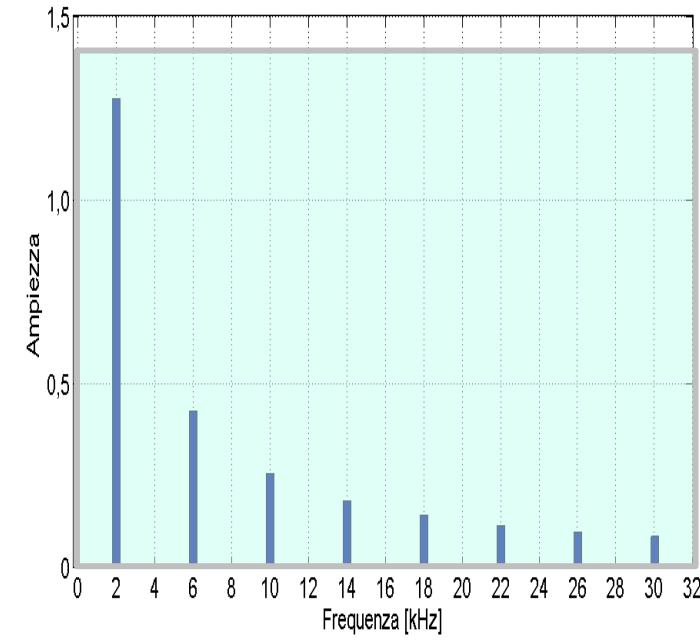
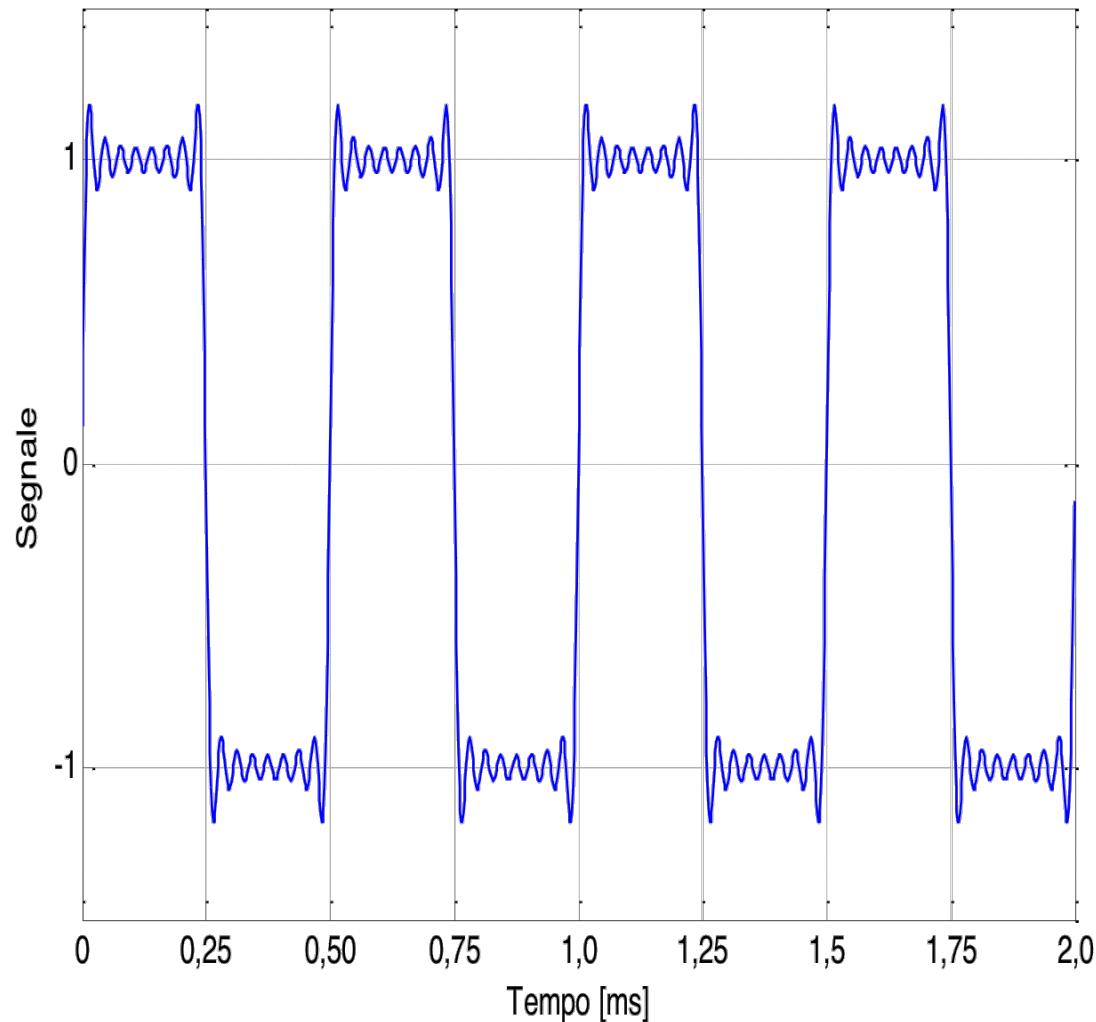
Spettro di un segnale: esempio 1

$W = 16 \text{ kHz}$



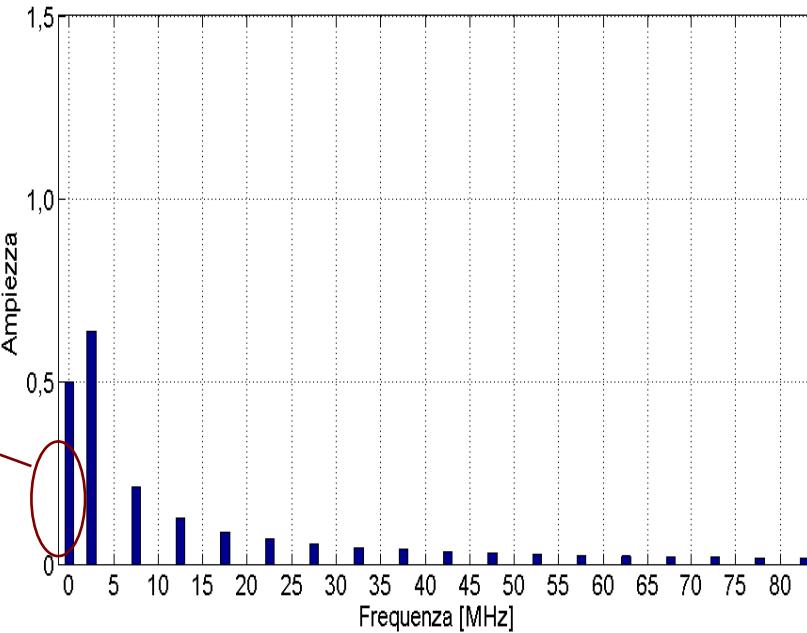
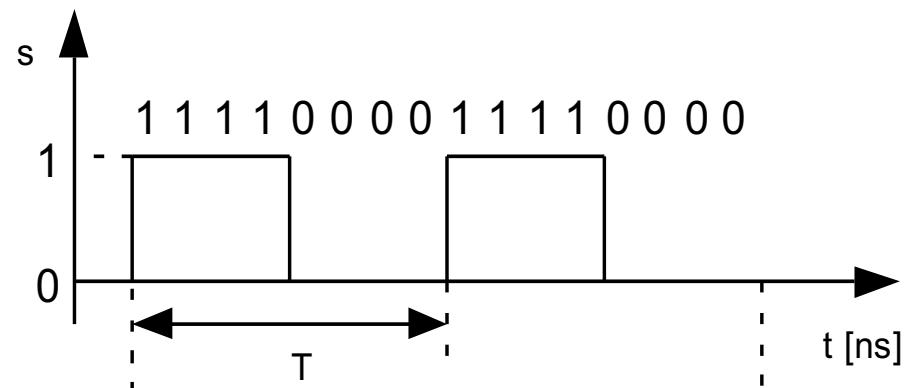
Spettro di un segnale: esempio 1

$W = 32 \text{ kHz}$



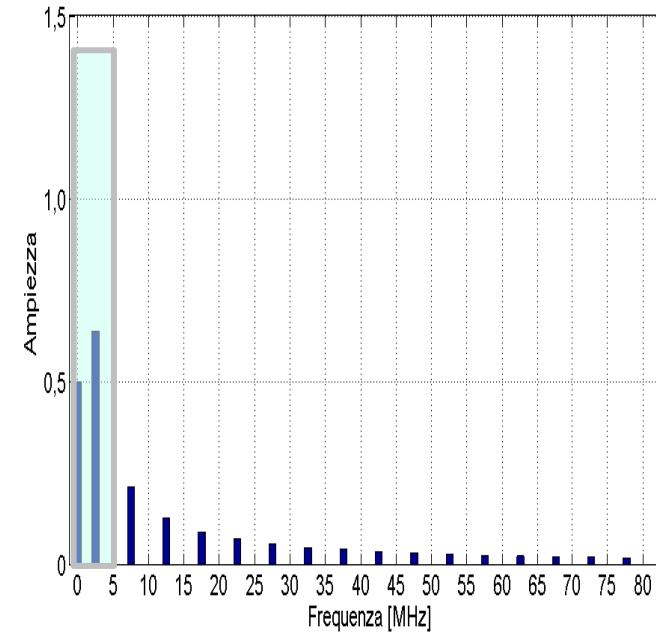
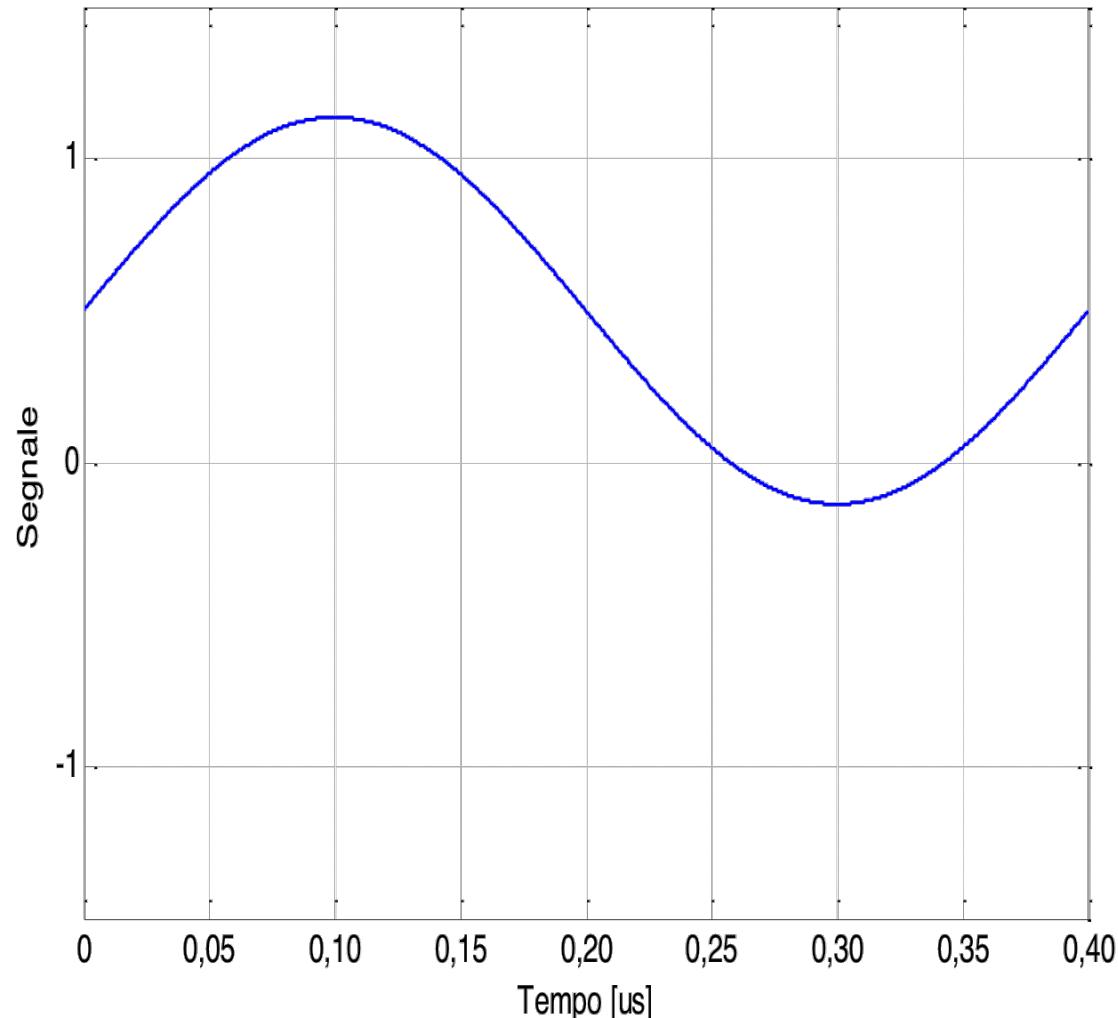
Spettro di un segnale: esempio 2

- **Segnale periodico nel tempo a media non-nulla**
- **Spettro con componente continua**



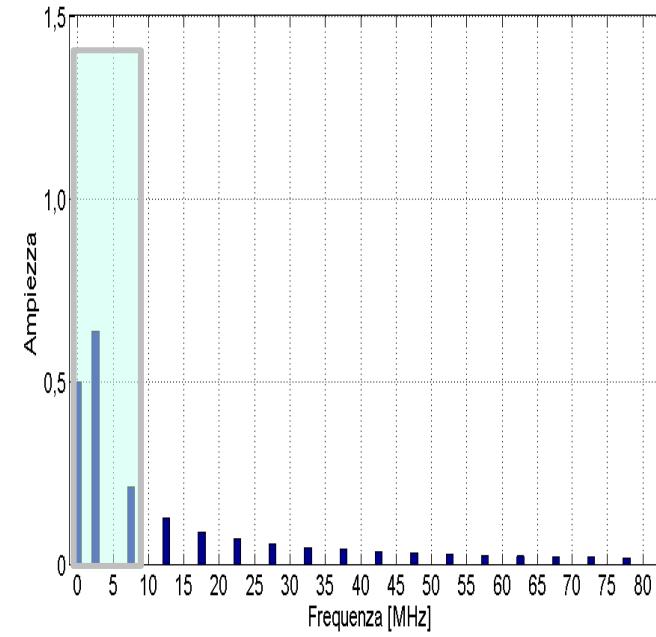
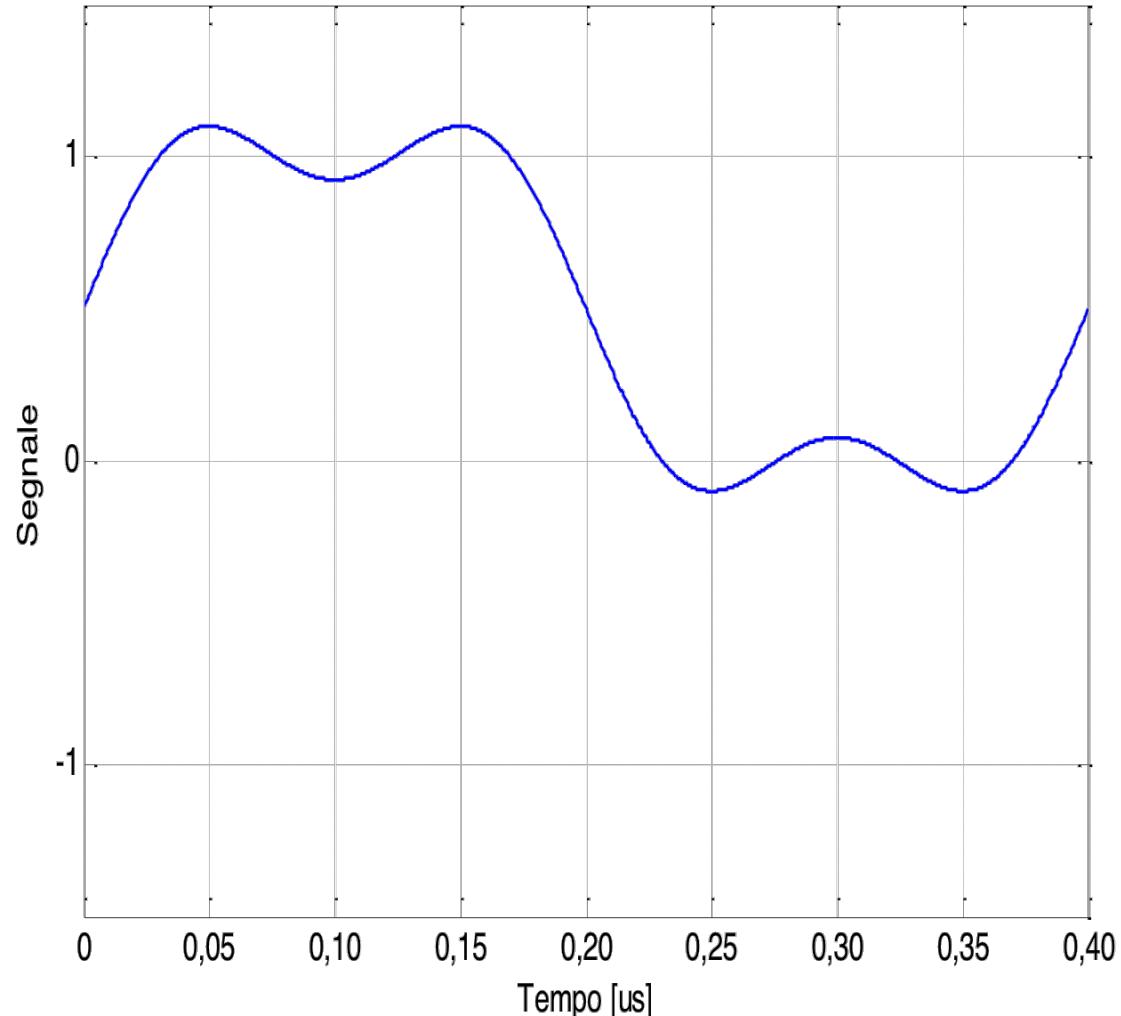
Spettro di un segnale: esempio 2

$W = 5 \text{ MHz}$



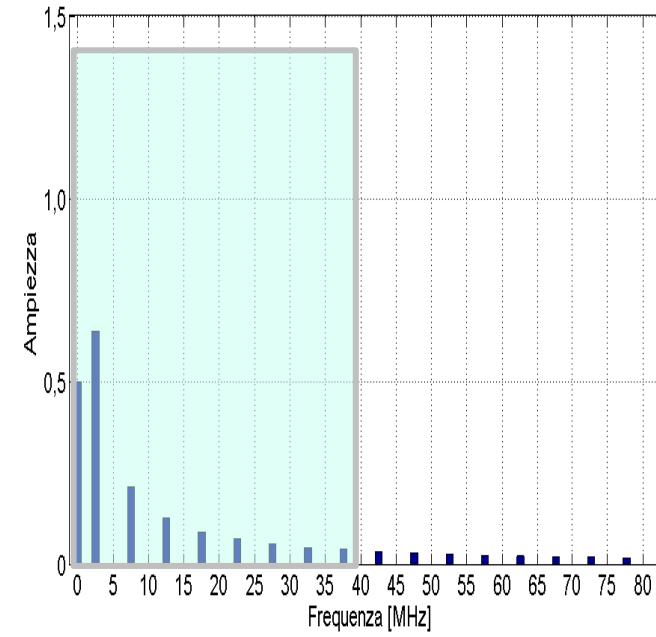
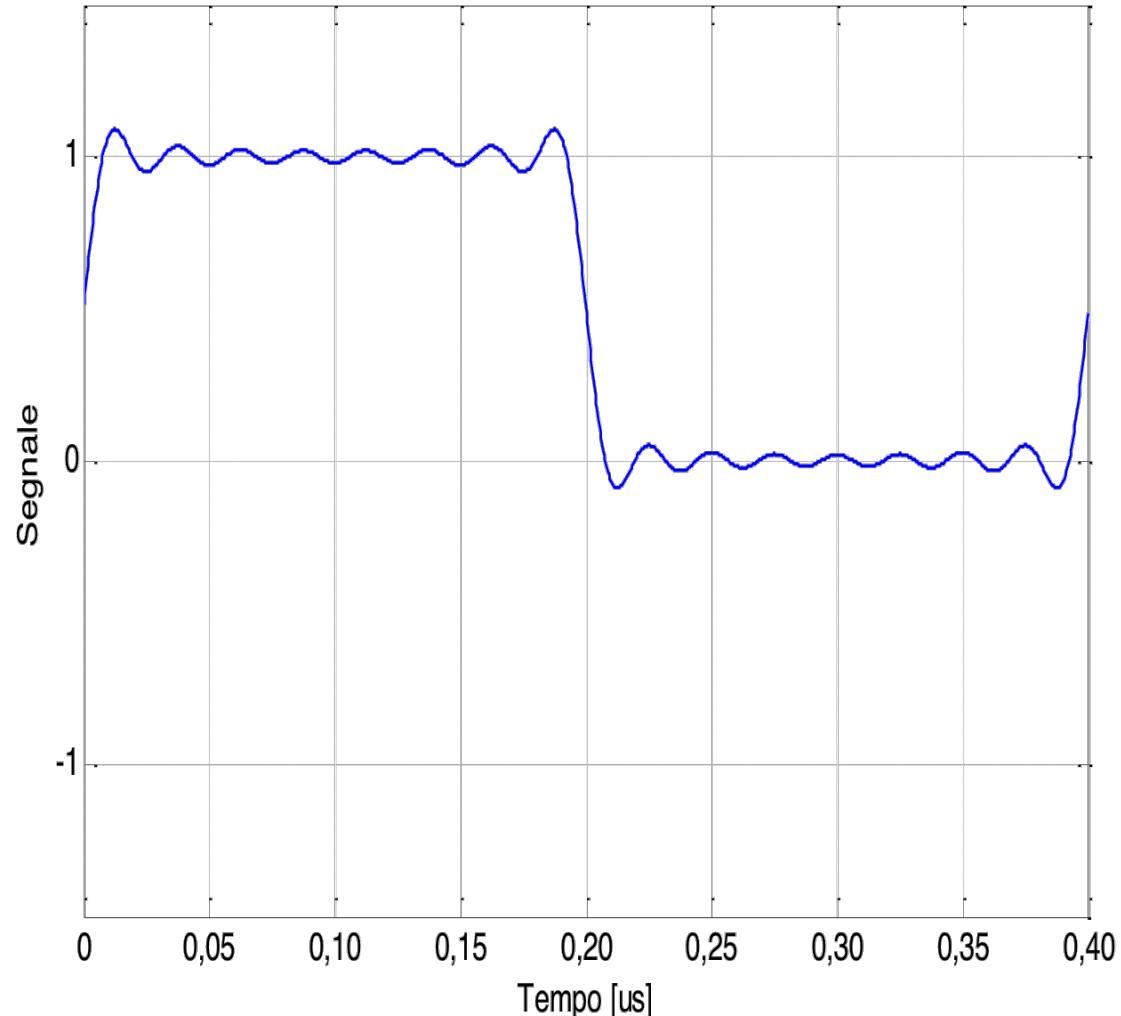
Spettro di un segnale: esempio 2

$W = 10 \text{ MHz}$



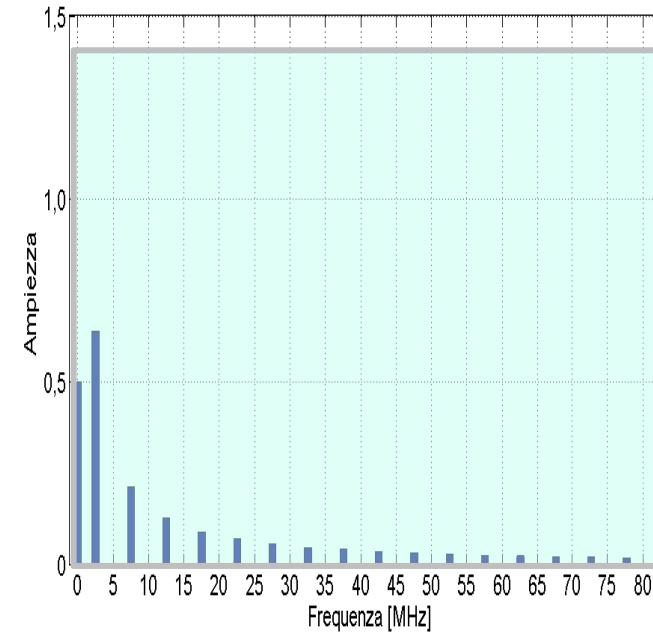
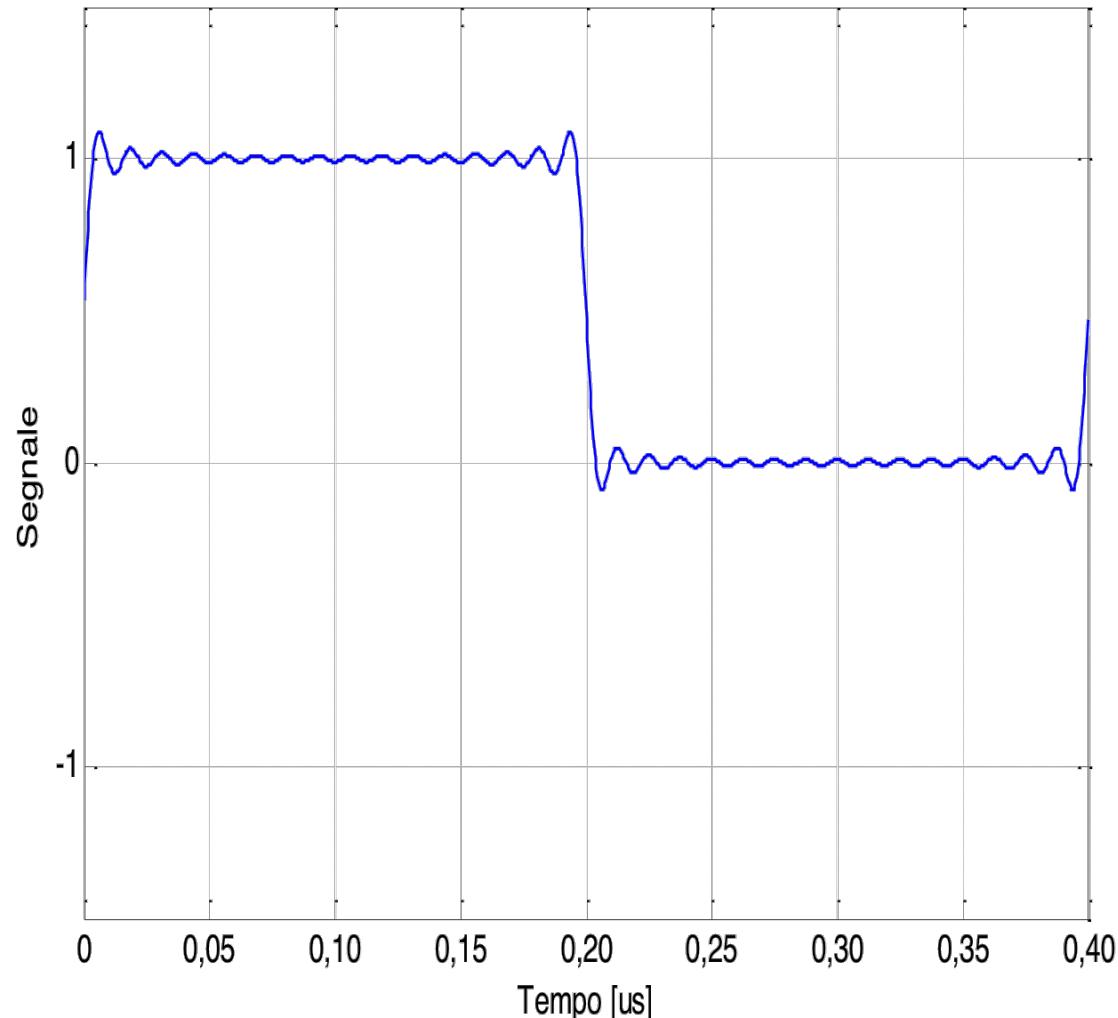
Spettro di un segnale: esempio 2

$W = 40 \text{ MHz}$



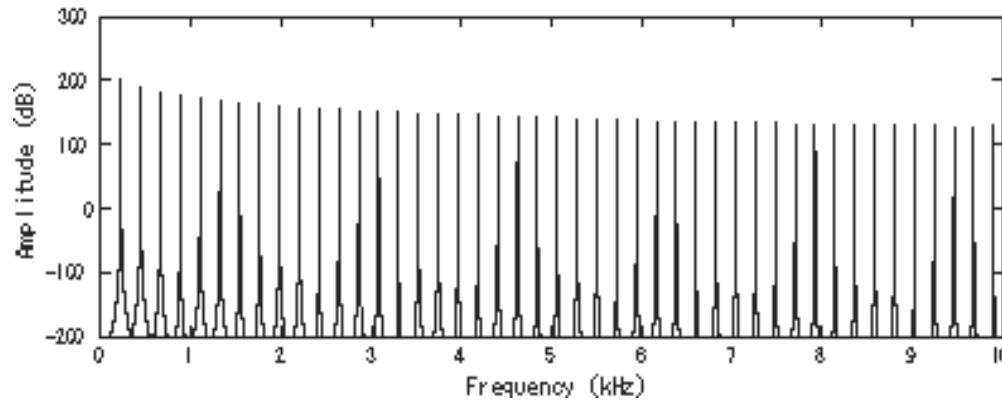
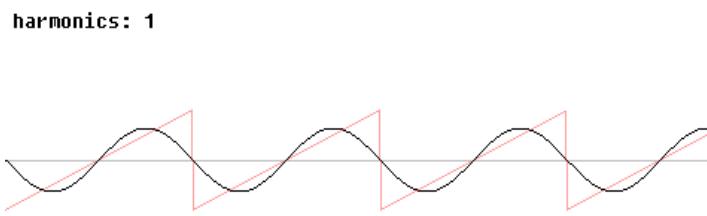
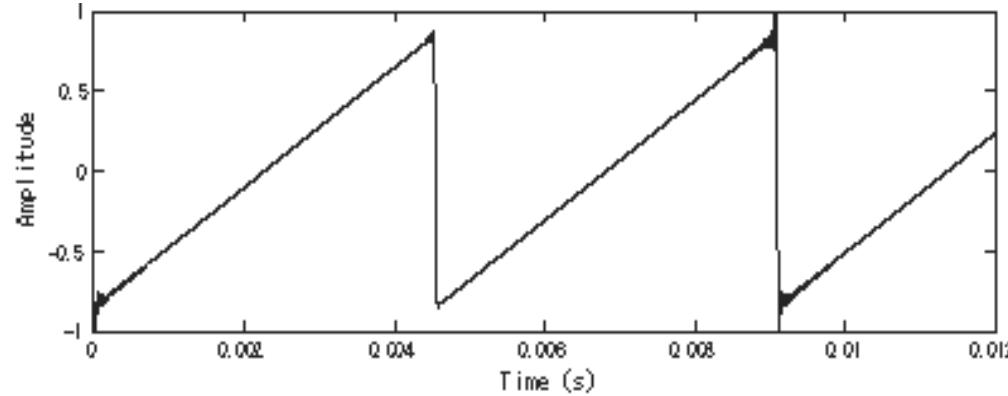
Spettro di un segnale: esempio 2

$W = 80 \text{ MHz}$



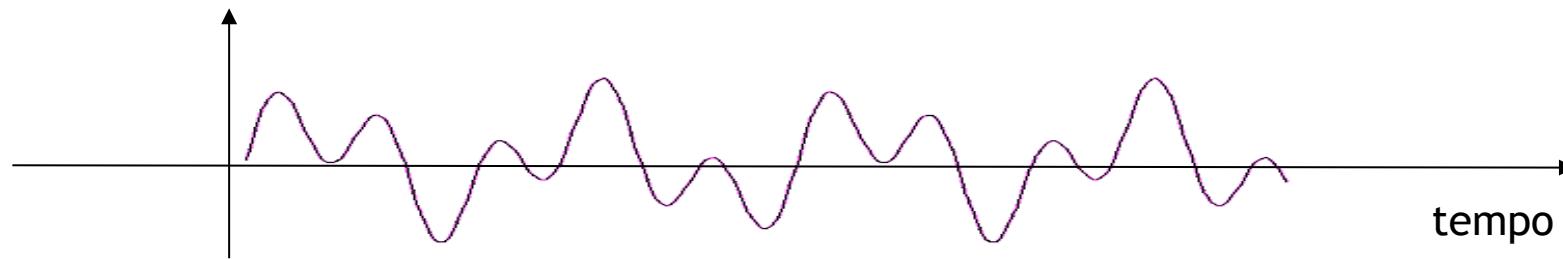
Spettro di un segnale: *esempio 3*

- **Onda a dente di sega**

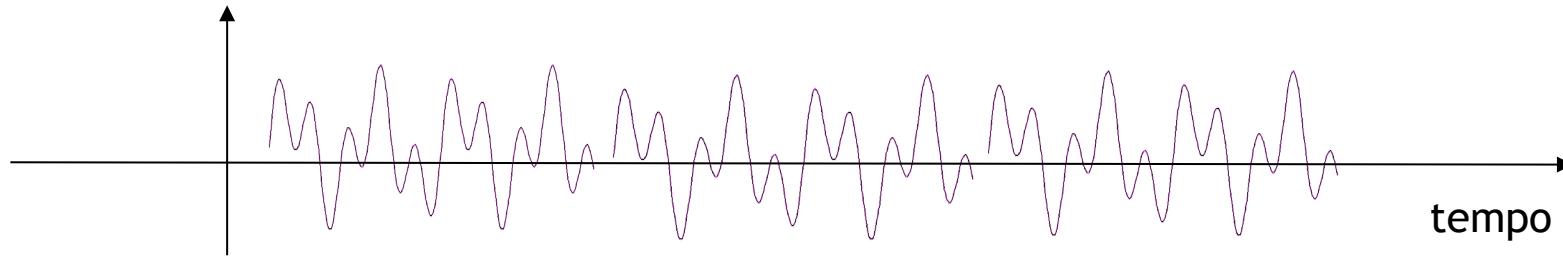


Effetto temporale della dimensione della banda

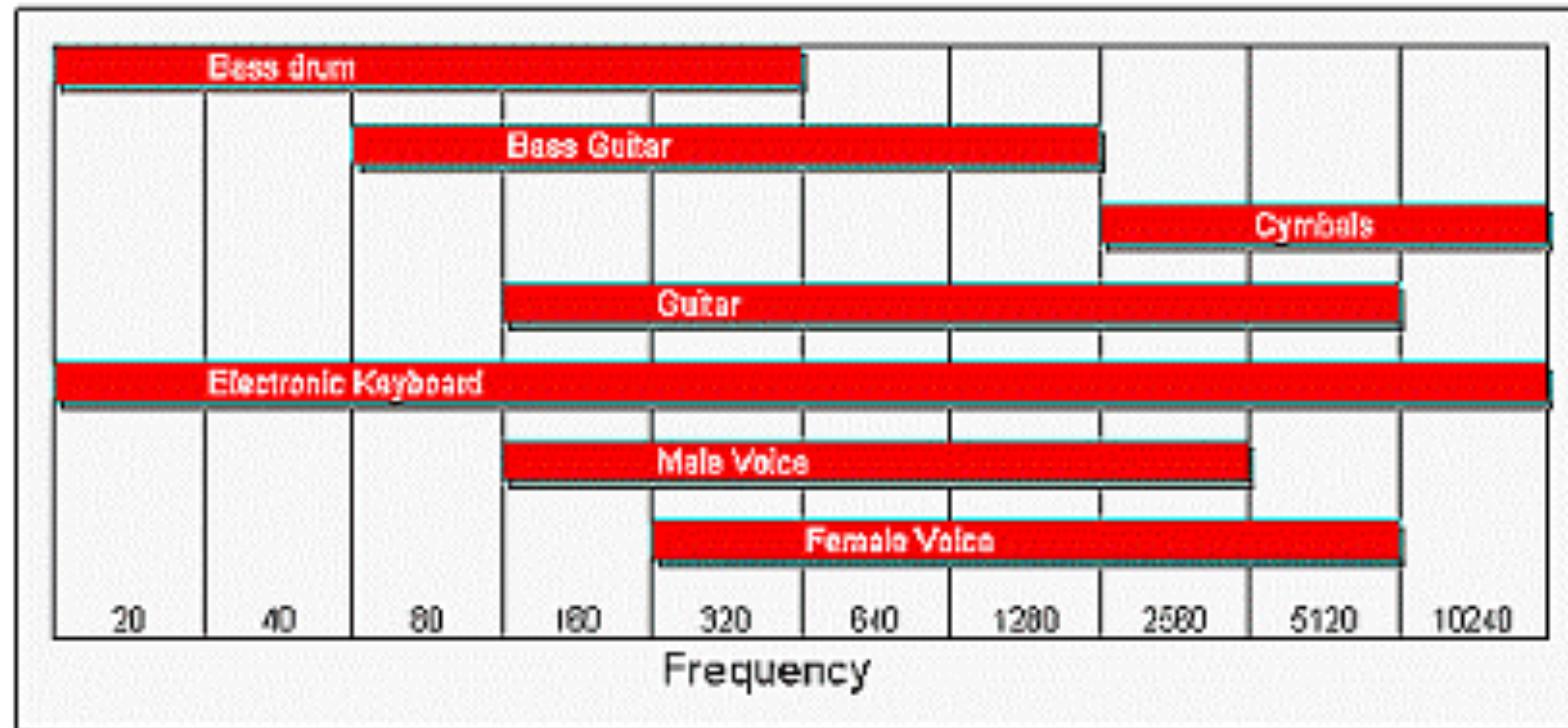
banda stretta: segnali che variano lentamente nel tempo



banda larga: segnali che variano velocemente nel tempo



Esempi di bande (rate) occupate da segnali TLC

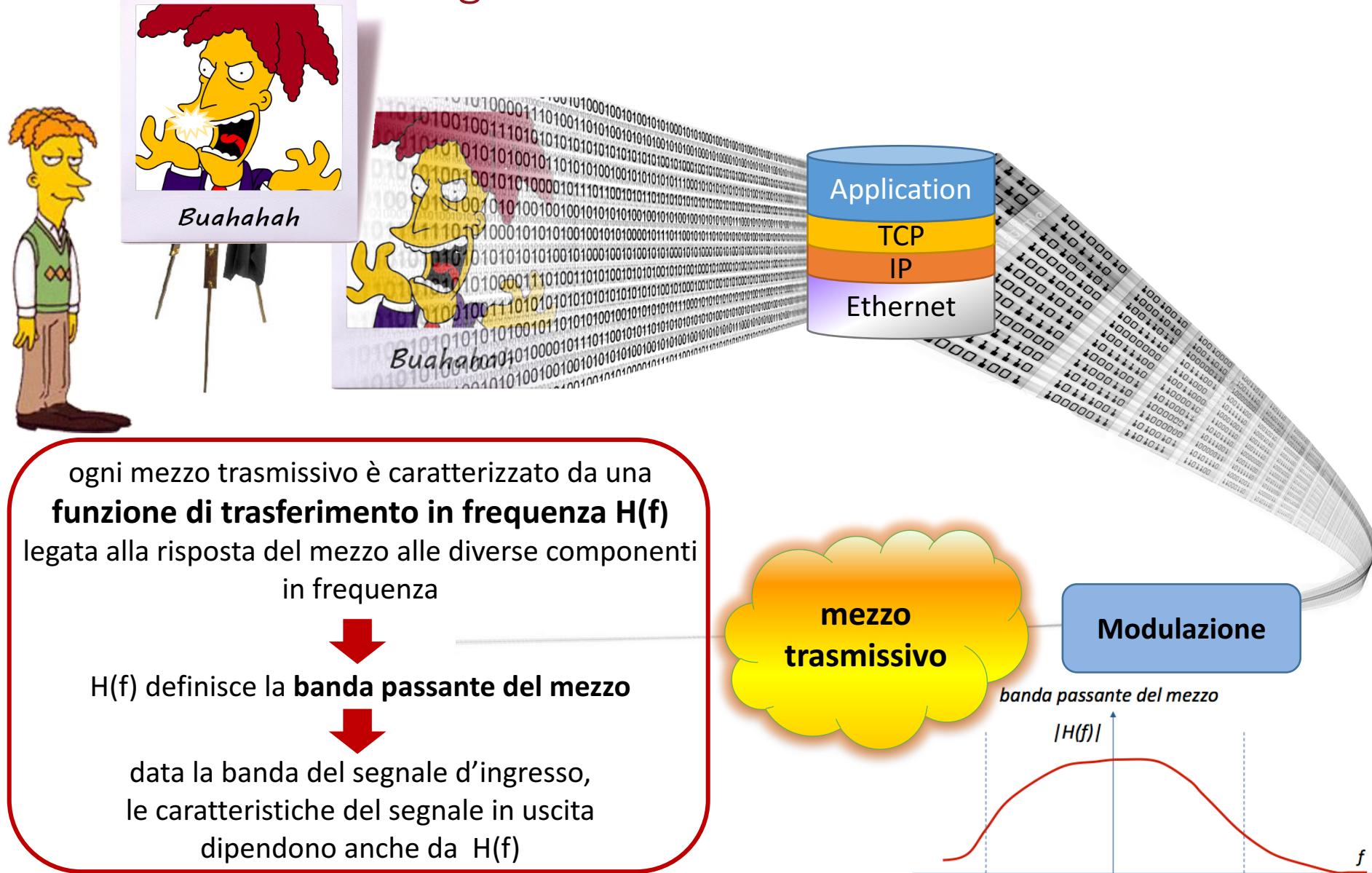


Esempi di bande (rate) occupate da segnali TLC

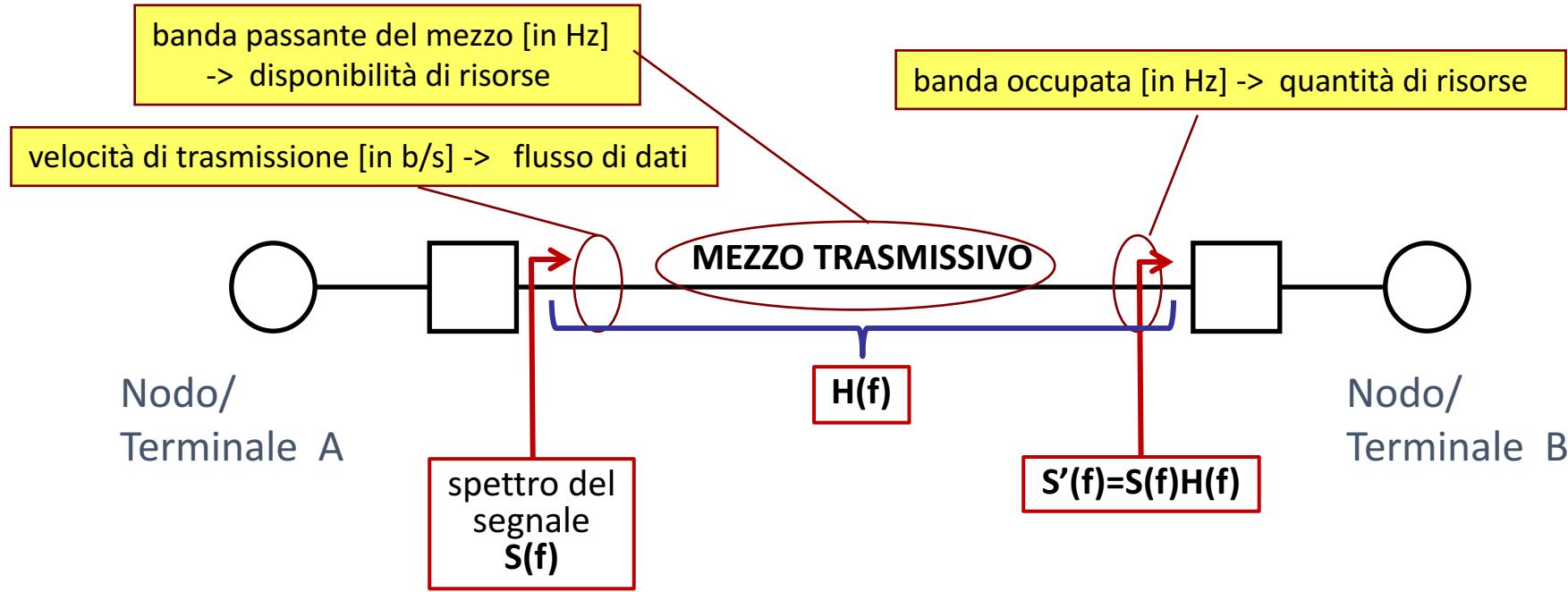
Segnale	Banda
Segnale telefonico	300-4000 Hz
Voce	300-8000 Hz
Musica	100-20.000 Hz
TV (PAL)	0-5.000.000 Hz (5 MHz)
Cinema	0-500 MHz



Trasmissione del segnale a LIVELLO FISICO



Banda passante del mezzo trasmittivo

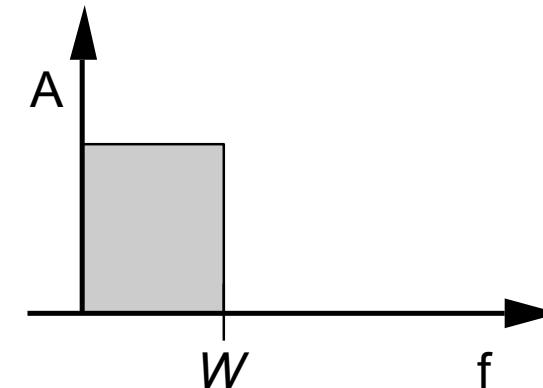


- Il segnale con la sua banda (spettro) propagando nel mezzo trasmittivo può subire distorsioni (attenuazione, dispersione, ritardo) legate alla funzione di trasferimento del mezzo.
- Per evitare distorsioni il canale deve modificare lo spettro del segnale il meno possibile
banda passante del mezzo > banda occupata dal segnale



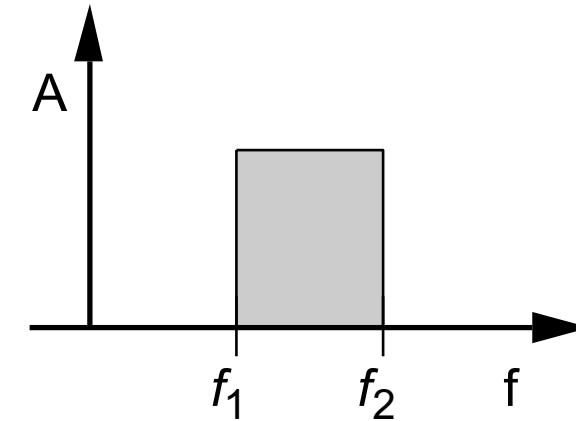
Trasmissione passa-basso e passa-banda

- **Trasmissione passa-basso (o in banda base)** se il mezzo presenta una banda passante intorno alla frequenza 0



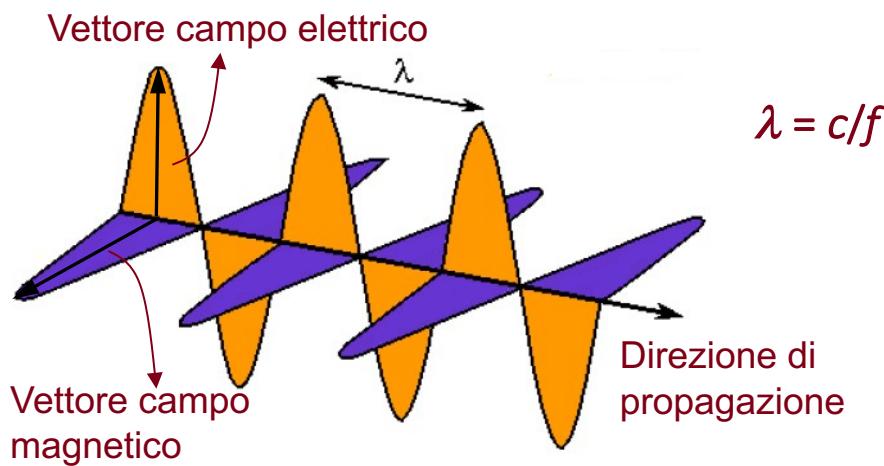
- **Trasmissione passa-banda (o in banda passante)** se il mezzo presenta una banda passante in un diverso range di frequenze

→ **Viene usata un'onda portante per trasmettere il segnale**



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) per mezzo di un supporto (**portante**) che è **un'onda elettromagnetica a opportuna frequenza (lunghezza d'onda)**

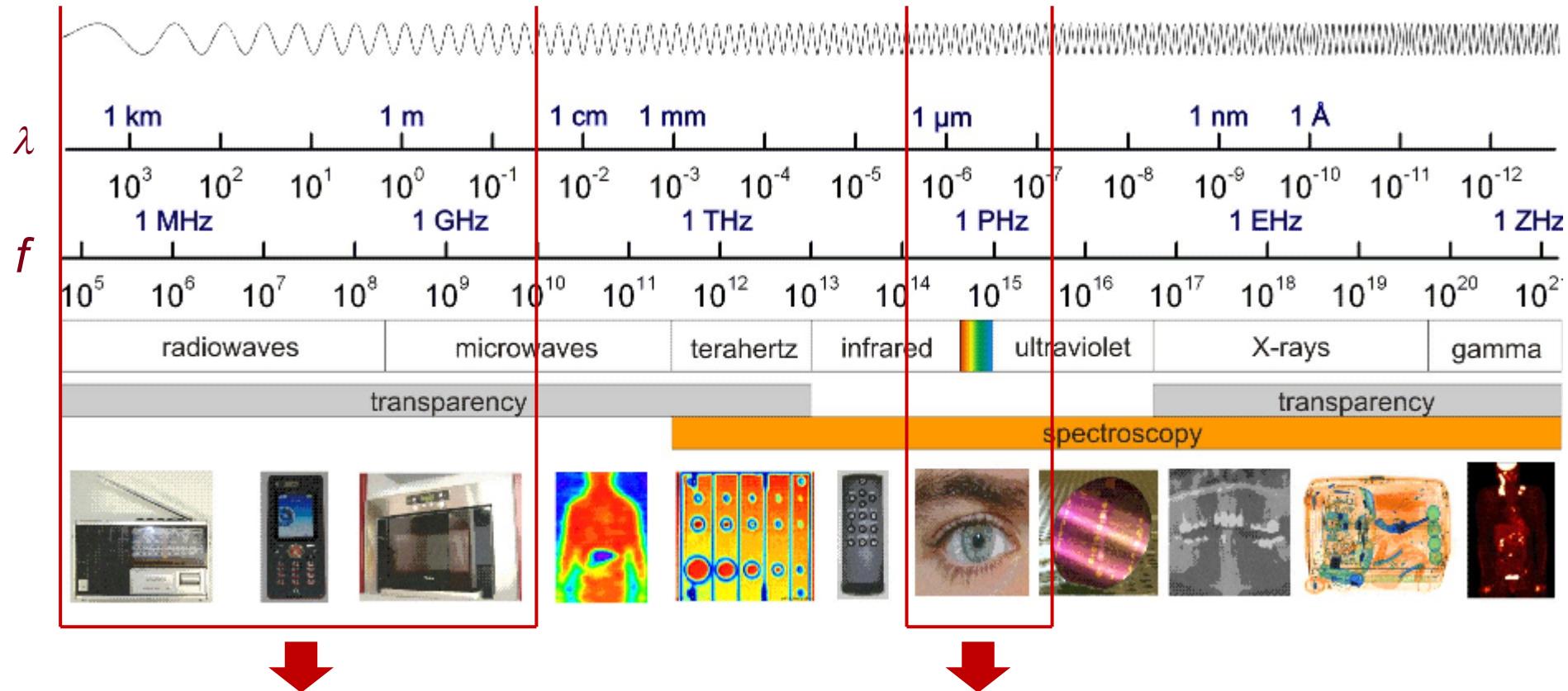


- Le onde elettromagnetiche portanti vengono classificate principalmente in base alla frequenza.



Onde “portanti” per TELECOMUCAZIONI

$$\lambda = c/f$$



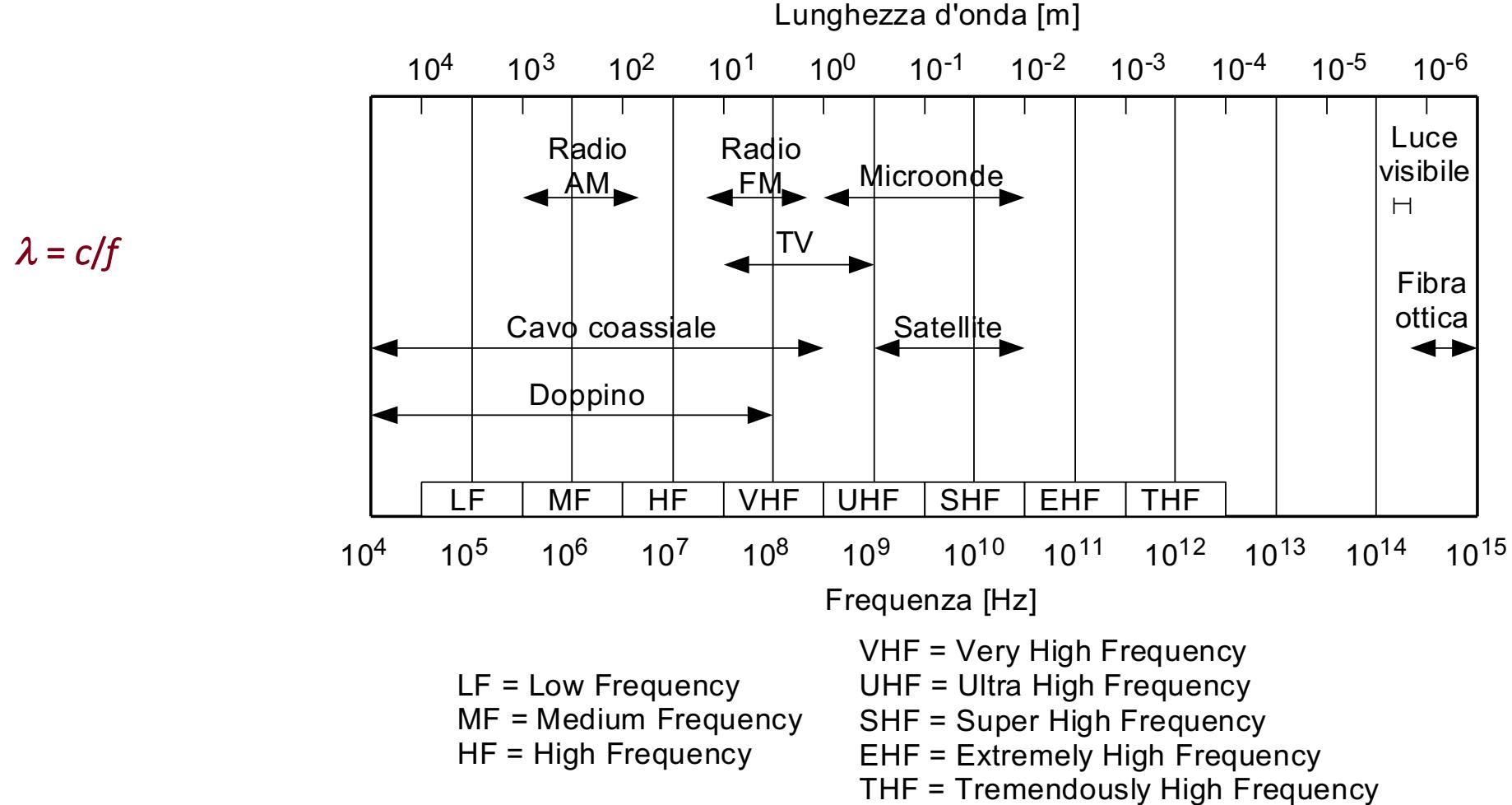
Radio Frequenza

Comunicazioni

Ottiche



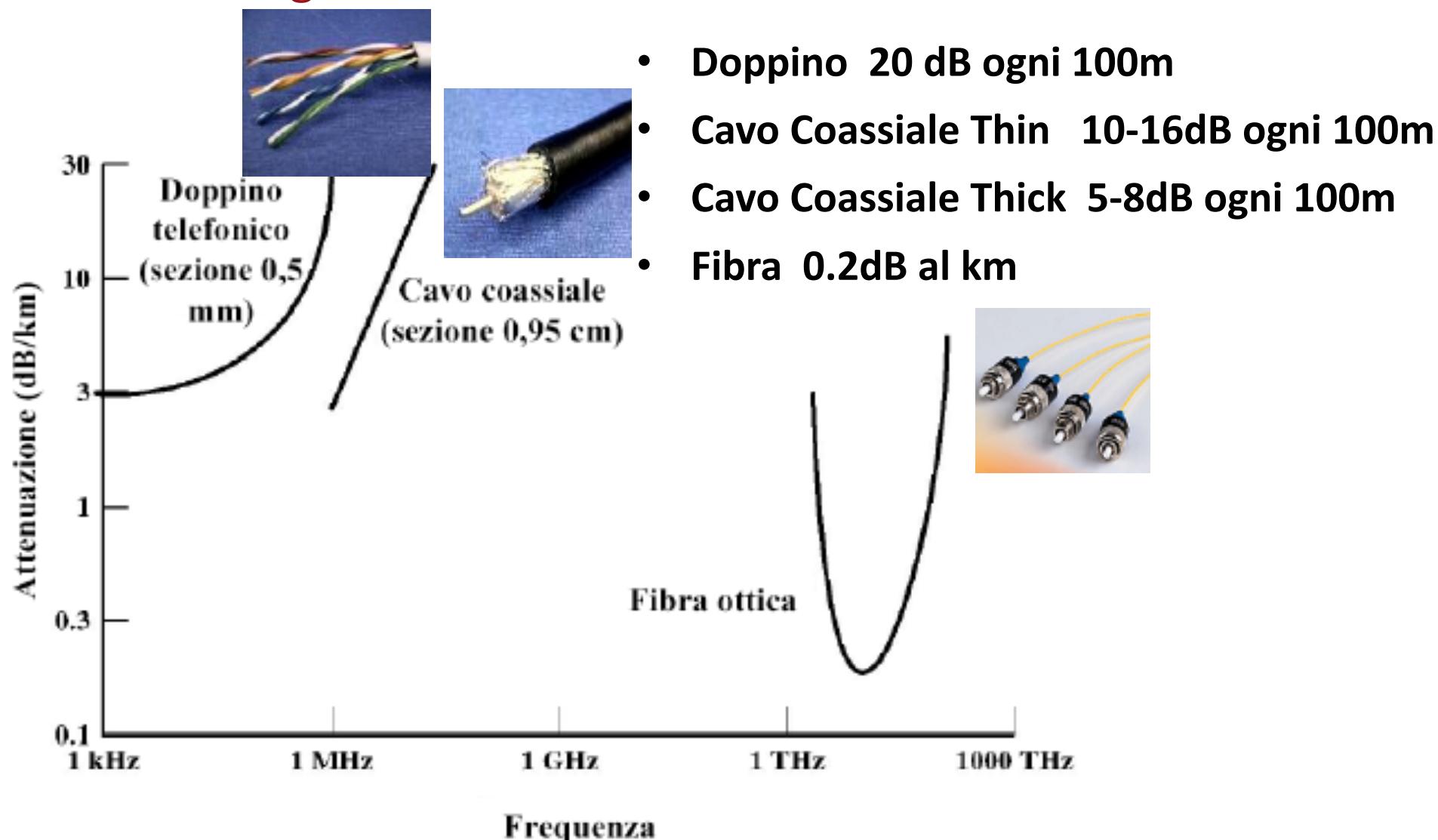
Trasmissione passa-banda con uso di portante



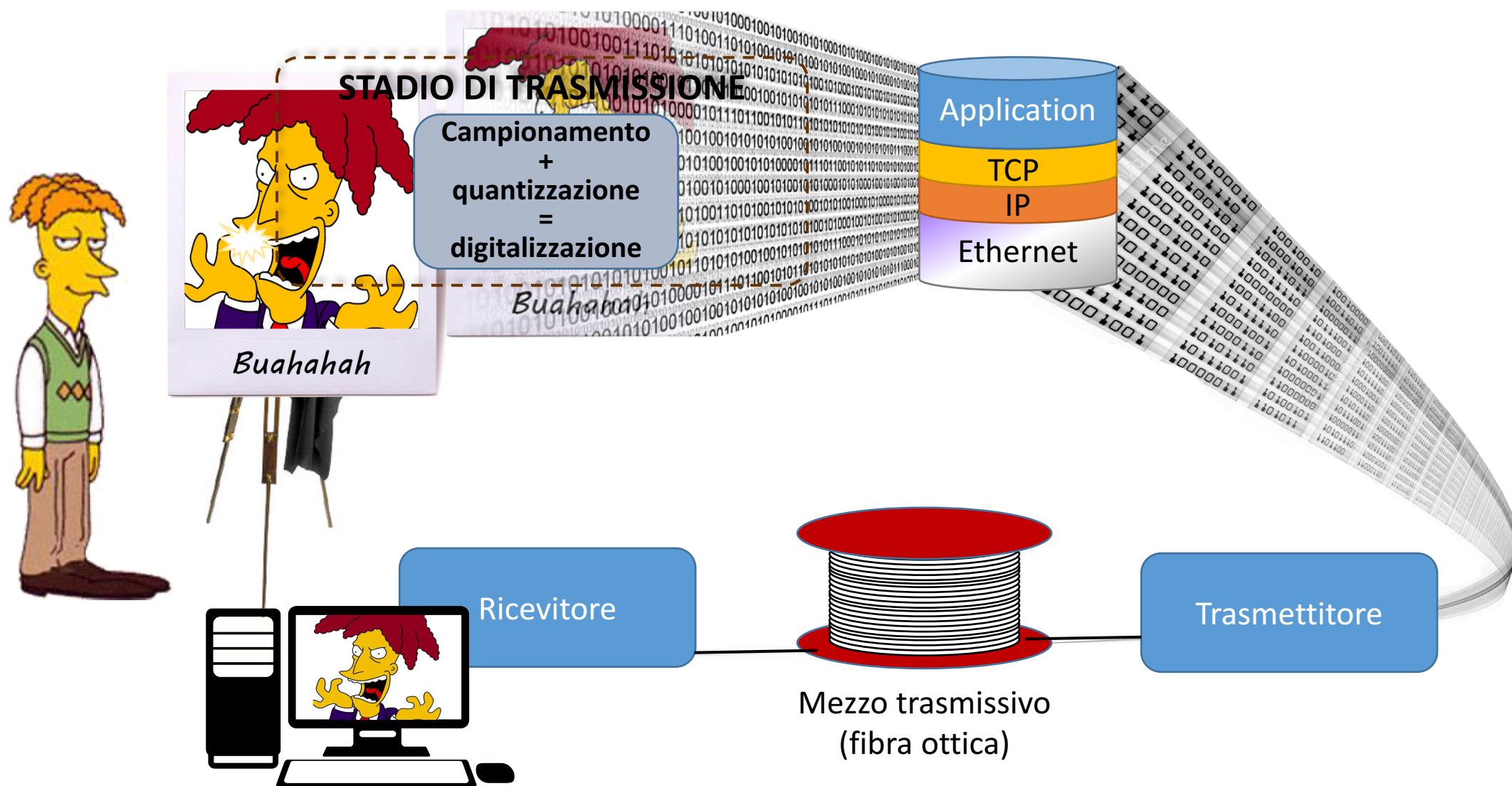
- In generale, più è alta la frequenza della portante del segnale, maggiore è la banda passante a disposizione per il trasporto dell'informazione e, dunque, **maggior è la quantità di informazione trasferibile nell'unità di tempo.**



Mezzi trasmissivi guidanti a confronto



Descrizione dell'esperimento



Conversione analogico/digitale

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



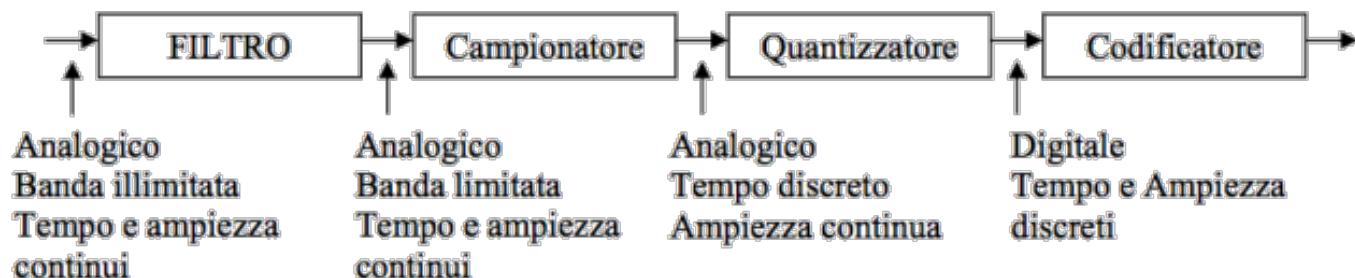
mondo analogico

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



mondo digitale

È necessario trasformare i segnali analogici in un loro equivalente digitale



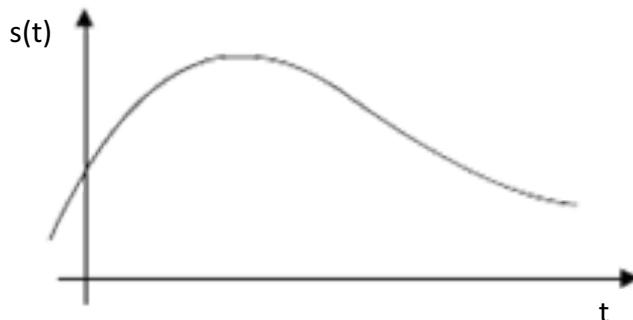
Campionamento

Teorema di Nyquist

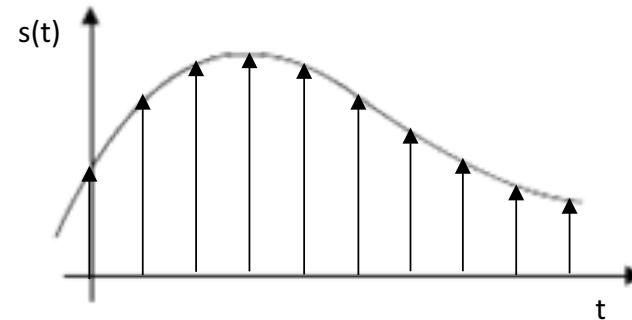
Un segnale del tempo è completamente determinato dai suoi campioni presi a distanza T tale che $T \leq 1/2B$, dove B è la banda del segnale, o usando la frequenza di campionamento $f_c = 1/T$:

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

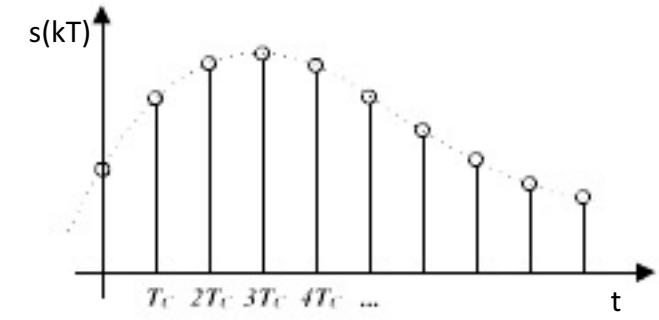
Segnale analogico



campionamento



segnale campionato



Campionamento

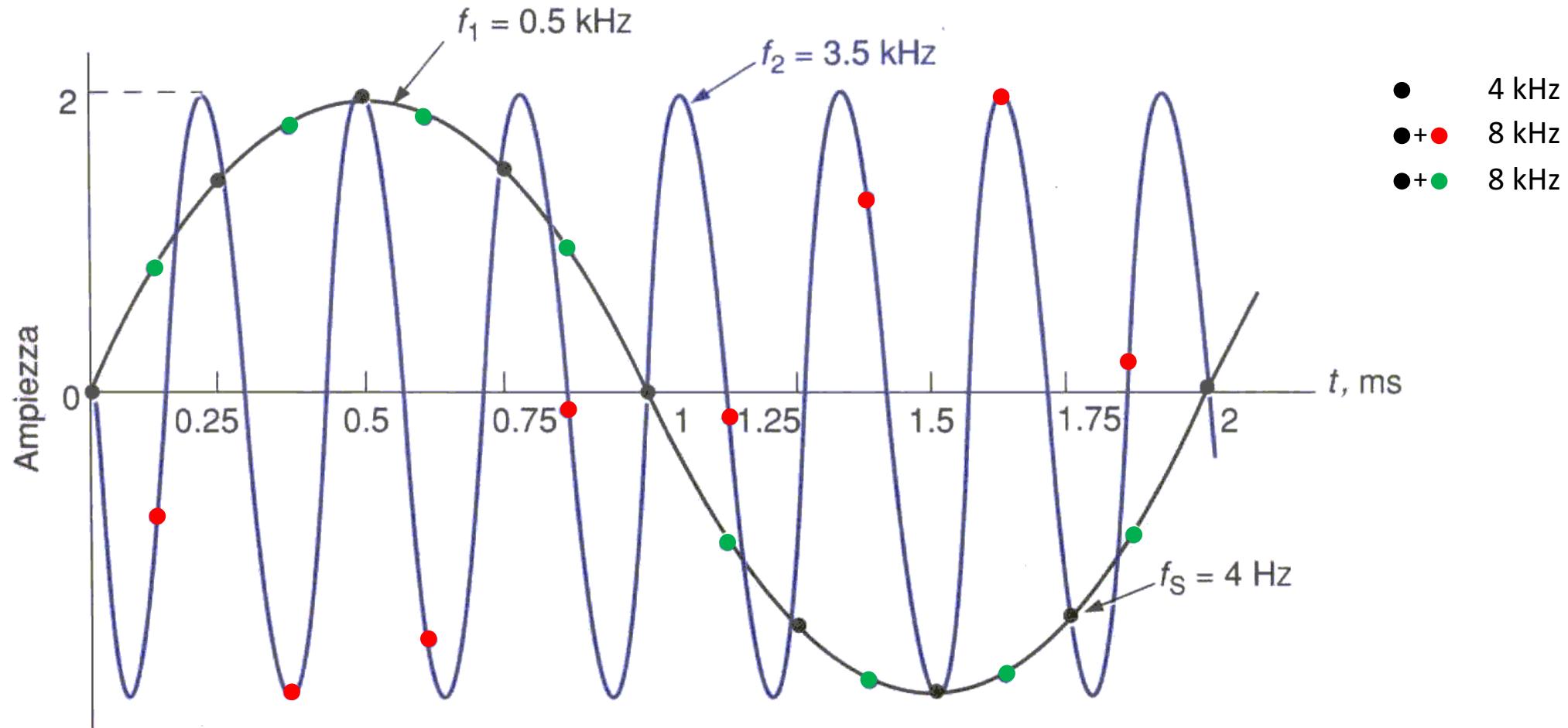
$$f_c \geq 2B = f_N \quad \text{frequenza di Nyquist}$$

- 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)
- Il contenuto informativo viene **completamente preservato** se si utilizza una frequenza di campionamento maggiore della frequenza di Nyquist
- la “**Banda**” rappresenta il **contenuto informativo**



Campionamento

Cosa succede se non si rispetta il teorema di Nyquist?



Ricostruzione del segnale

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



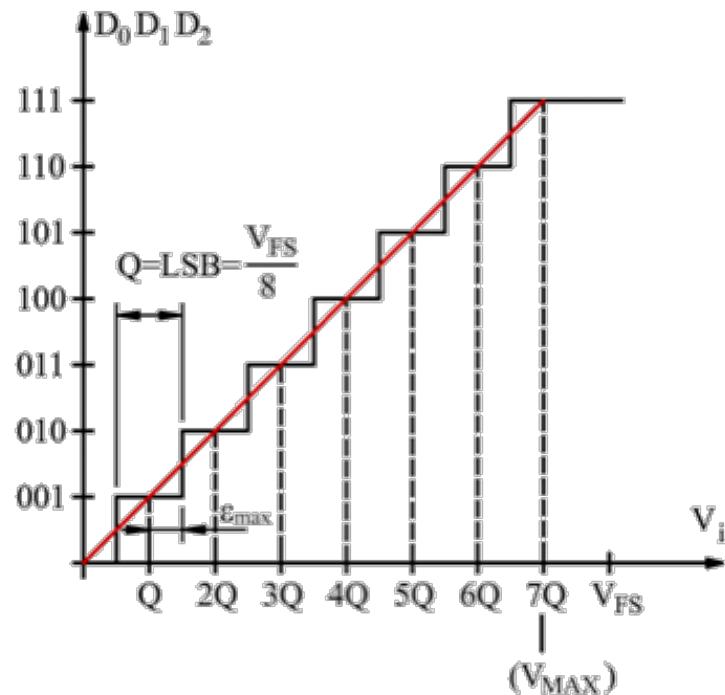
Frequenze di campionamento tipiche

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

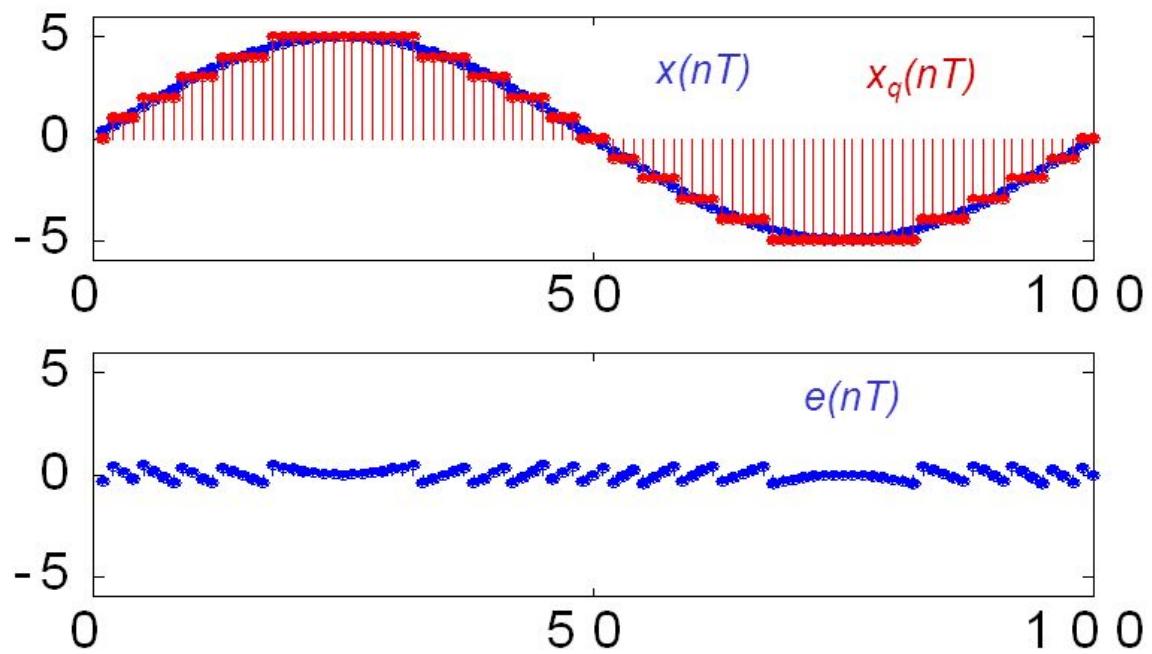


Quantizzazione

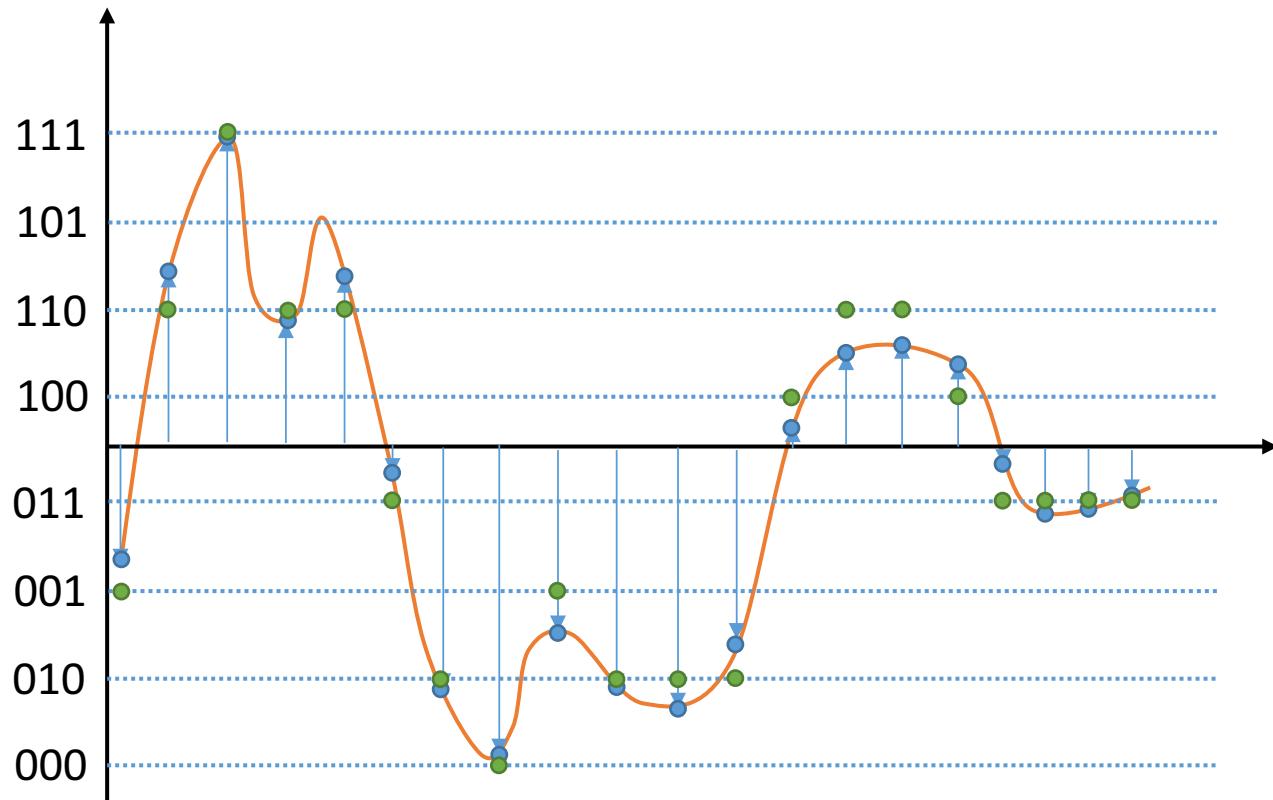
- E' l'operazione con cui un segnale *continuo* nelle ampiezze (numero infinito di ampiezze disponibili) è trasformato in *discreto* (numero finito di ampiezze disponibili)
- Nella trasformazione si commette un errore di approssimazione (quantizzazione)
- Più livelli, meno errore di quantizzazione
-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



$$l = 2^b$$



Digitalizzazione di un segnale: riepilogo



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

Se $f_c > f_{Nyquist}$ il contenuto informativo del segnale è completamente preservato

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
010 100 110 110 100 011 011 011 011 011



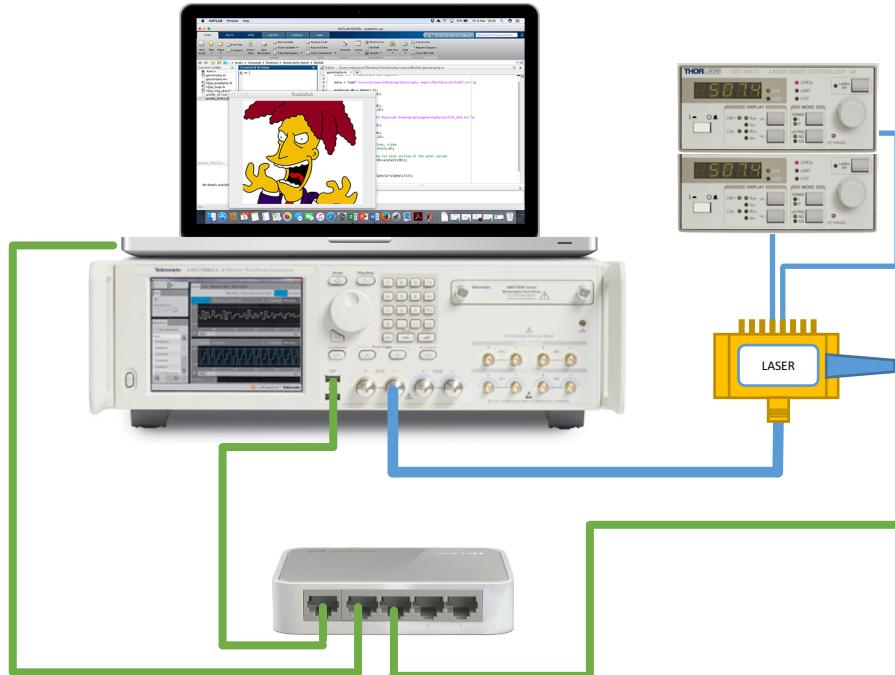
Flussi binari equivalenti

Segnale	Banda	Frequenza di campionamento	Livelli di quantizzazione	Flusso binario
Segnale telefonico	300-4000 Hz	8000 Hz	256 livelli (8 bit)	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



Setup sperimentale: livello fisico

Matlab & Arbitrary Waveform Generator
50 GS/s



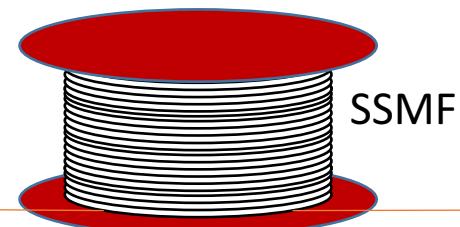
Cavo Ethernet

Fibra ottica

Cavo elettrico (high RF bandwidth)

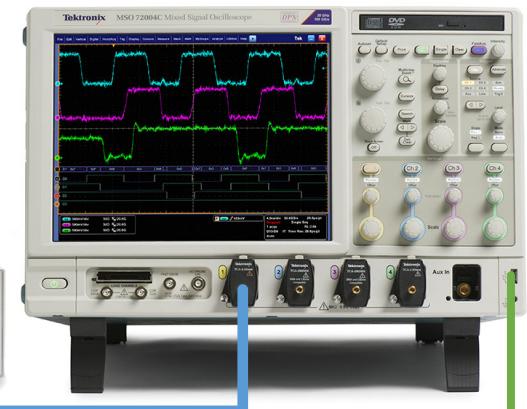
$$v = c/n = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\tau = 1/v = 5 \cdot 10^{-9} \text{ s/m} = 5 \text{ ns/m}$$



SSMF

PIN
receiver



Real time Oscilloscope
12.5 GS/s
31.25 MS
Time span = 2.5 ms

$$\tau_{\text{bit}} = 1/R$$

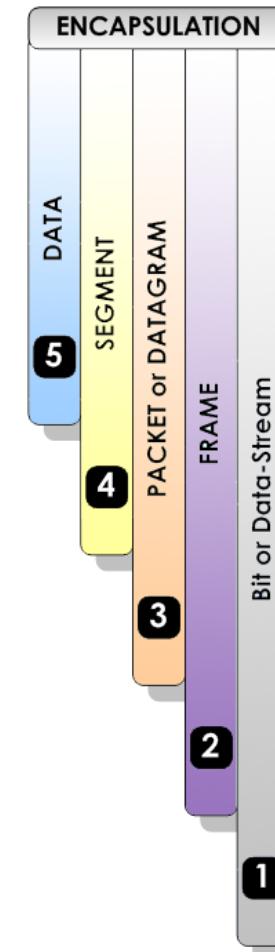
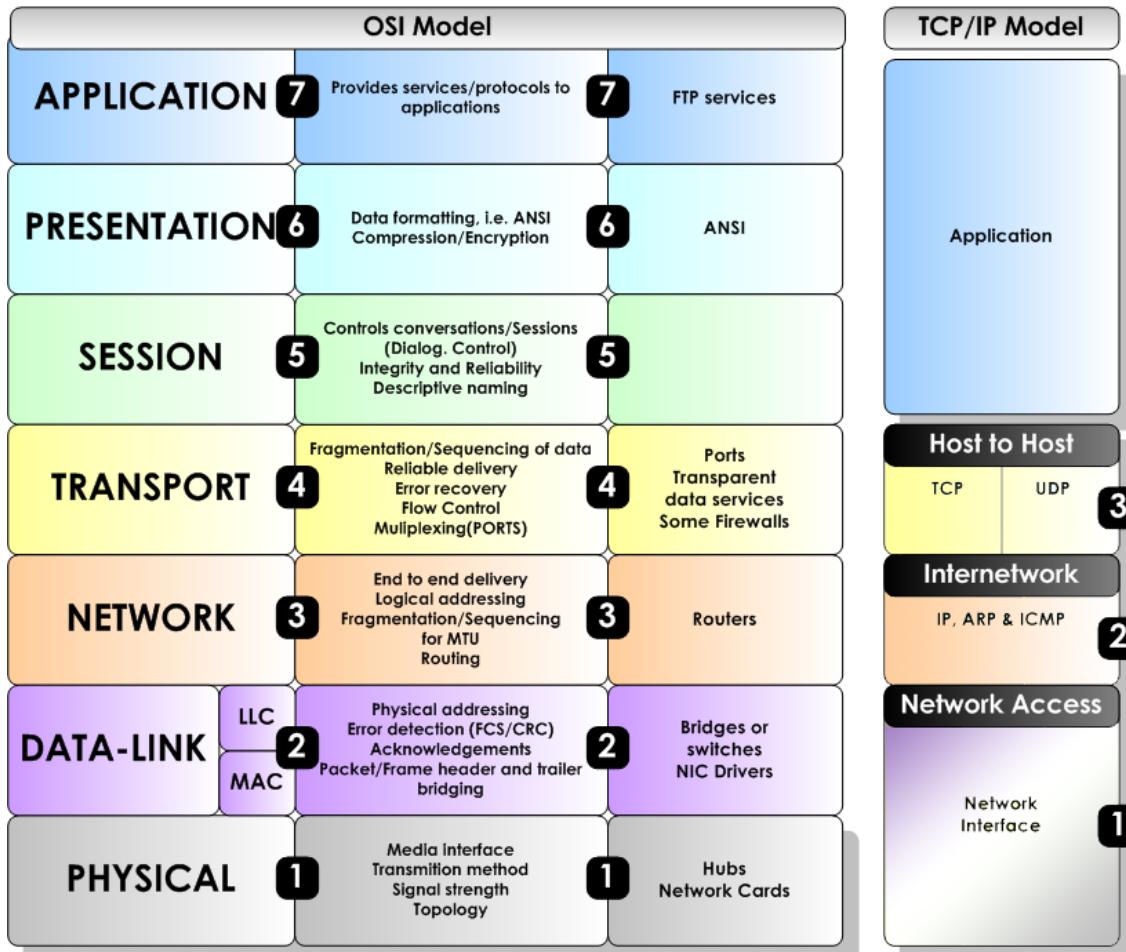
$$R = 6.25 \text{ Gbit/s}$$
$$\tau_{\text{bit}} = 160 \text{ ps}$$

$$R = 100 \text{ Mbit/s}$$
$$\tau_{\text{bit}} = 10 \text{ ns}$$

$$R = 56 \text{ kbit/s}$$
$$\tau_{\text{bit}} = 17.86 \mu\text{s}$$



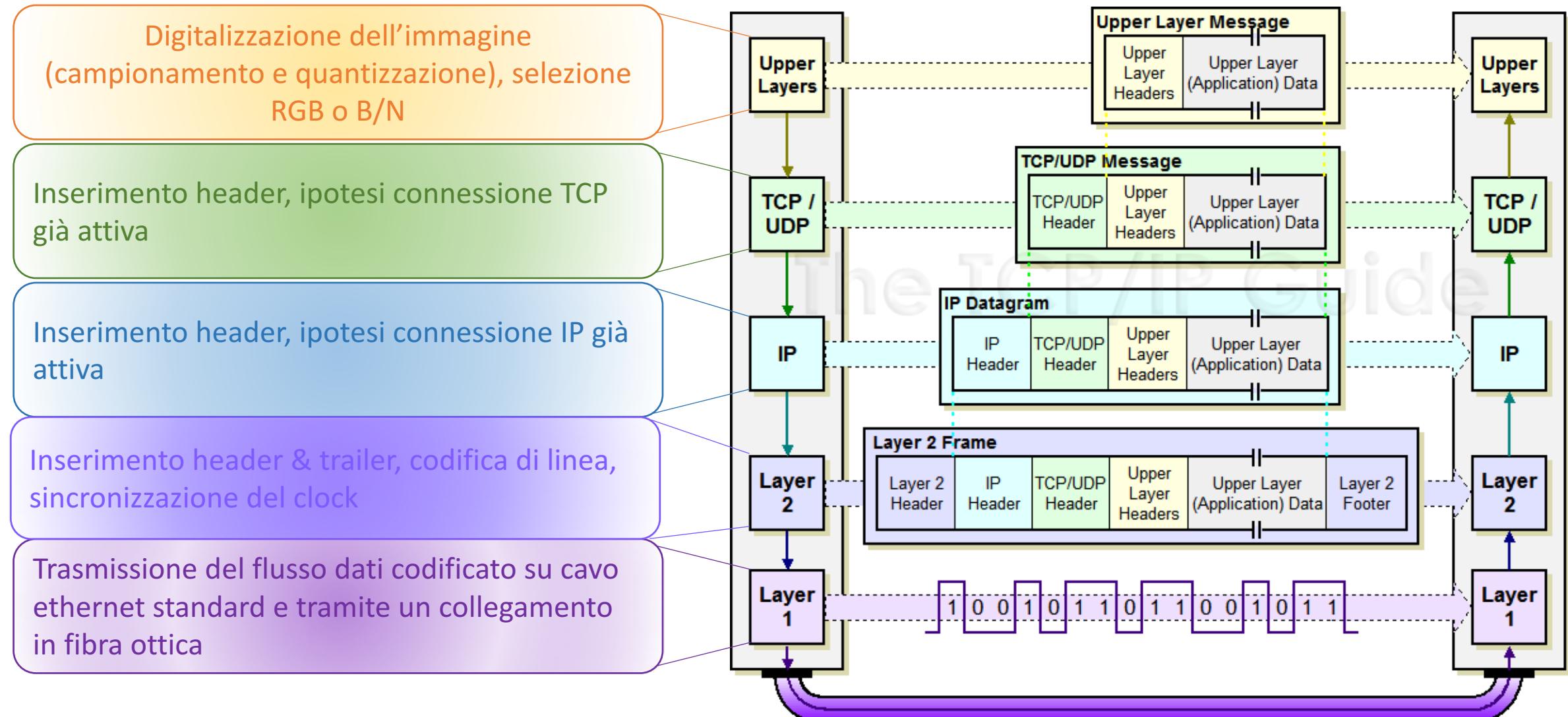
The OSI Model (Open Systems Interconnection)



Pila
protollare
OSI

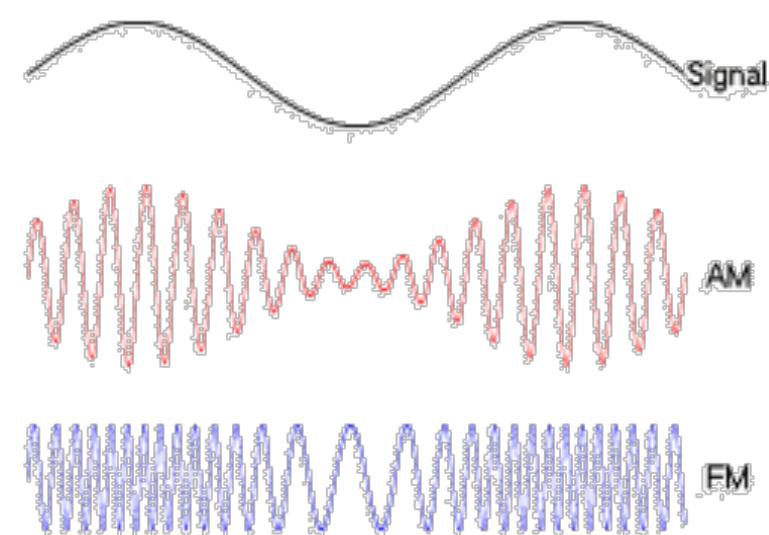
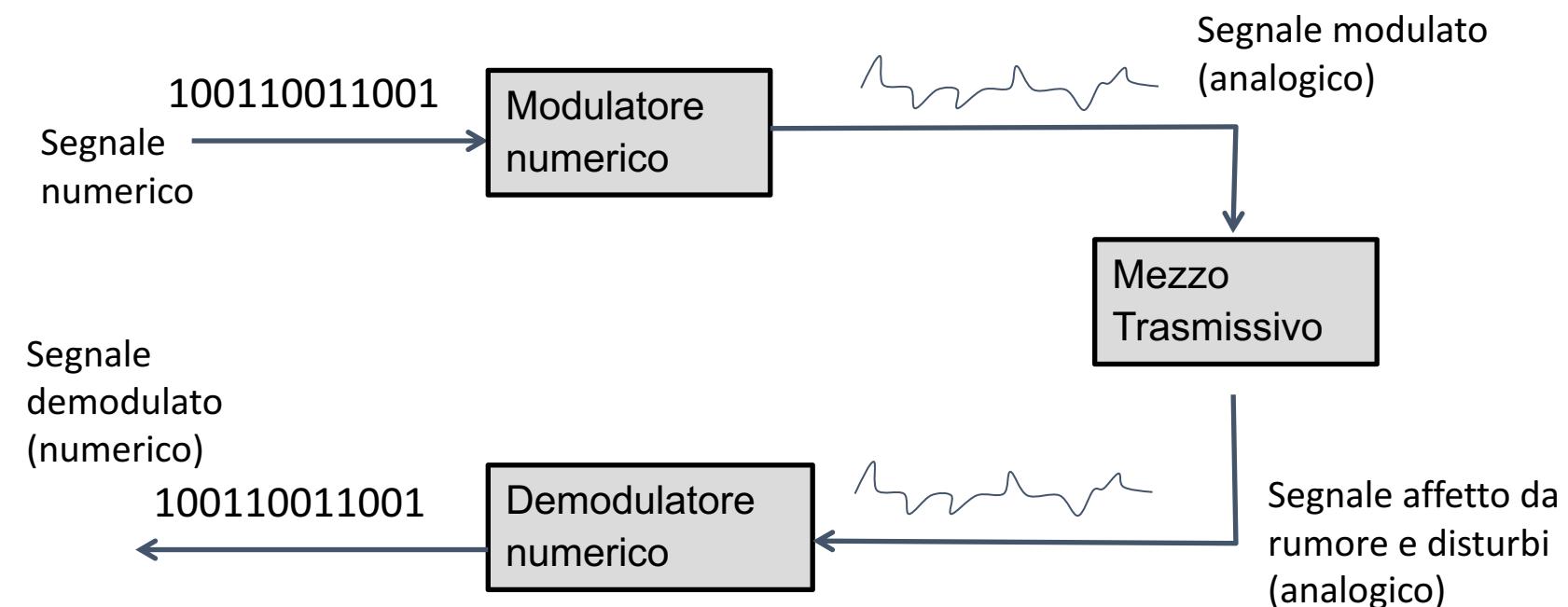


Pila protocollare - esperimento



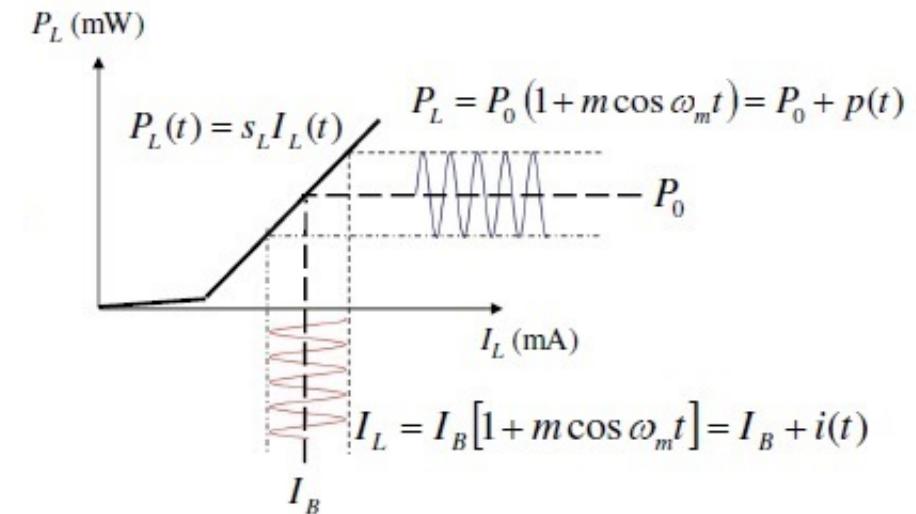
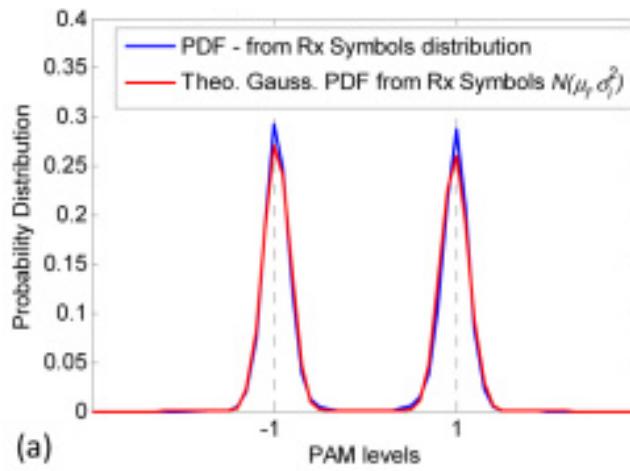
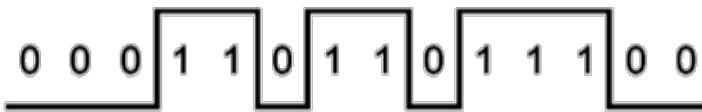
Modulazione

- 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 PAM-2 NRZ (Non-Return to Zero): 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



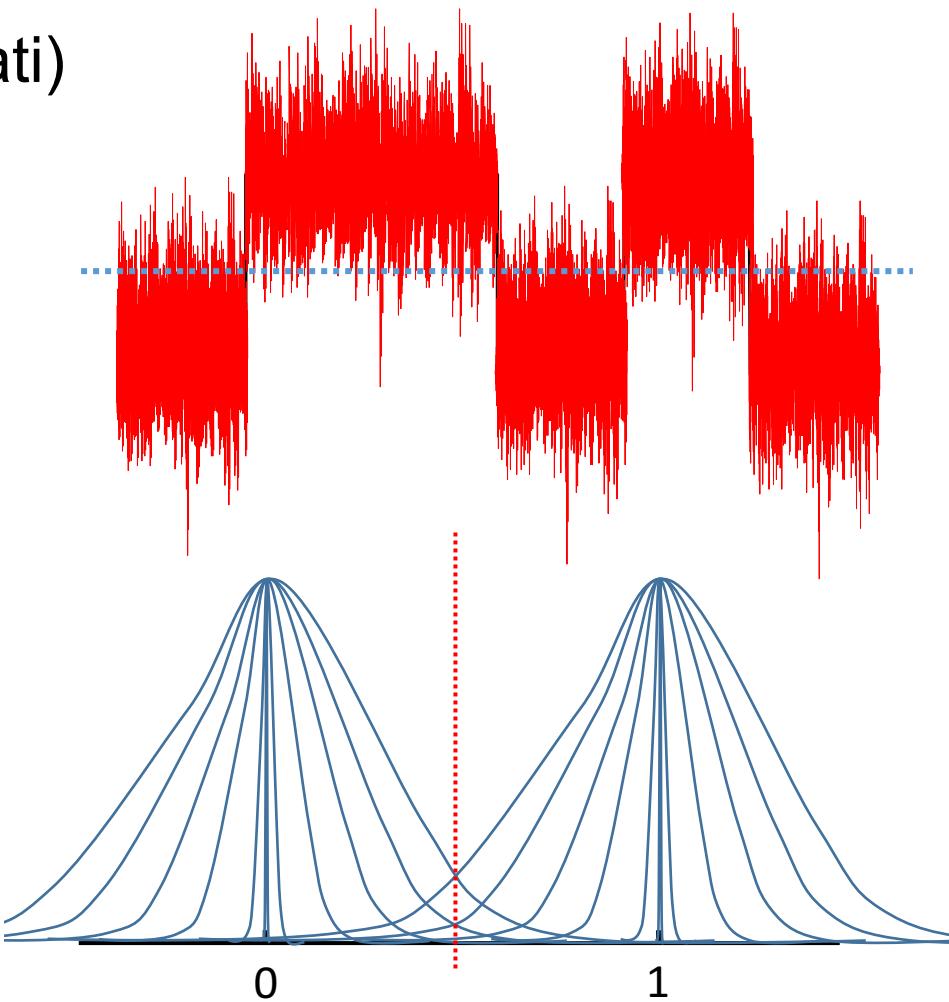
Errori in ricezione

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

Trasmesso **10011010100100100101000101000**

Ricevuto **00101010001010110010011111010**

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



Esercizio – Trasmissione binaria RGB (6.25 Gb/s)

- Bit-rate = 6.25 Gb/s
 - #bit(file) = #pixel_x•#pixel_y•3 bytes = 1280•720•8•3 = 22118400 bit
 - #bit(pacchetto) = (payload_{ethernet} – header_{tcp} – header_{ip}) bytes = (1500-20-20)•8 bit = 1460•8 bit = 11680 bit
 - #pacchetti = [#bit(file)/#bit(pacchetto)]_{int sup} = 1894 pacchetti
 - Espansione 8b/10b = 1.25
 - OH = (20+20+38)•8•#pacchetti = 1181856 bit
-

$$\#bit\ totali = (\#bit(file) + OH) \cdot Espansione\ 8b/10b = (22118400 + 1181856) \cdot 1.25 = 29125320$$

$$T_{necessario} = \frac{\#bit\ totali}{Bit - rate} = \frac{29125320}{6.25 \cdot 10^9} \cong 4.66\ ms$$

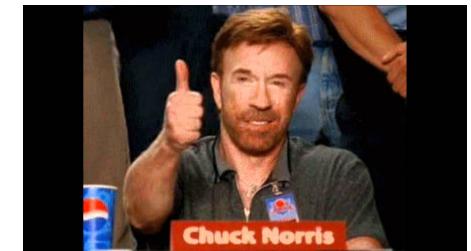


Esercizio – Trasmissione binaria B/N (6.25 Gb/s)

- Bit-rate = 6.25 Gb/s
 - $\#bit(file) = \#pixel_x \cdot \#pixel_y \text{ bytes} = 1280 \cdot 720 \cdot 8 = 7372800 \text{ bit}$
 - $\#bit(pacchetto) = (\text{payload}_{\text{ethernet}} - \text{header}_{\text{tcp}} - \text{header}_{\text{ip}}) \text{ bytes} = (1500 - 20 - 20) \cdot 8 \text{ bit} = 1460 \cdot 8 \text{ bit} = 11680 \text{ bit}$
 - $\#pacchetti = [\#bit(file)/\#bit(pacchetto)]_{\text{int sup}} = 632 \text{ pacchetti}$
 - Espansione 8b/10b = 1.25
 - OH = $(20+20+38) \cdot 8 \cdot \#pacchetti = 394368 \text{ bit}$
-

$$\#bit \text{ totali} = (\#bit(file) + OH) \cdot \text{Espansione 8b/10b} = (7372800 + 394368) \cdot 1.25 = 9708960$$

$$T_{necessario} = \frac{\#bit \text{ totali}}{\text{Bit - rate}} = \frac{29125320}{6.25 \cdot 10^9} \approx 1.55 \text{ ms}$$

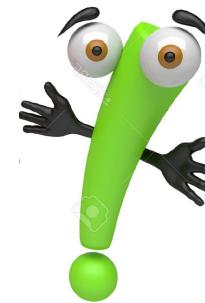


Esercizio – Trasmissione binaria RGB (56 kb/s)

$$Bit - rate = 56 \text{ kb/s}$$

$$\#bit\ totali = (\#bit(file) + OH) \cdot Espansione\ 8b/10b = (22118400 + 1181856) \cdot 1.25 = 29125320$$

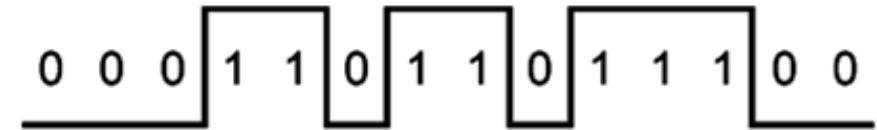
$$T_{necessario} = \frac{\#bit\ totali}{Bit - rate} = \frac{29125320}{56 \cdot 10^3} \approx 520 \text{ s}$$



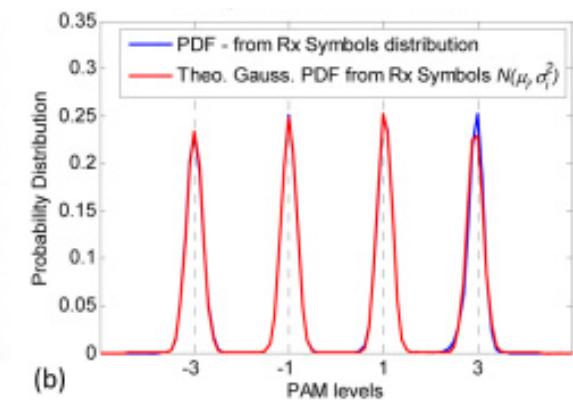
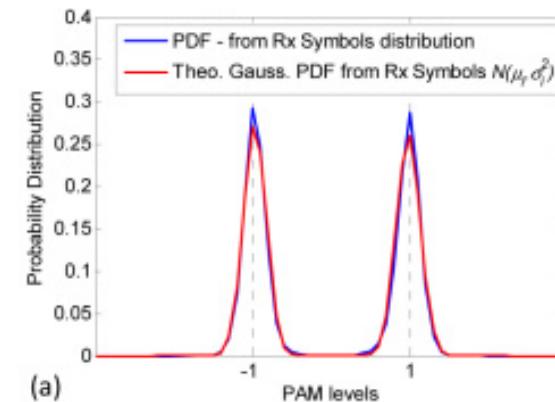
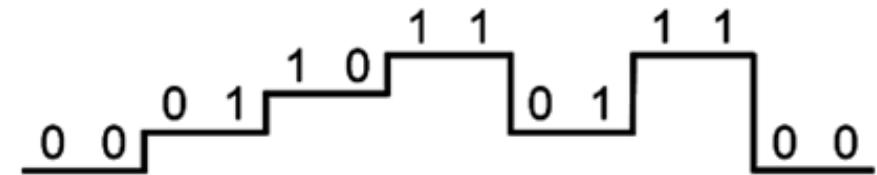
Modulazioni avanzate: PAM-M

- Per aumentare la capacità di canale senza modificare la banda di frequenza e il time slot allocato è necessario incrementare l'ordine della modulazione
- **PAM-M:**
 - Flusso di bit diviso in gruppi di $\log_2(M)$
 - M simboli disponibili $\rightarrow M$ livelli di ampiezza
- La capacità è aumentata di un fattore $\log_2(M)$
- Il segnale trasmesso risulta più sensibile al rumore e alle distorsioni

PAM2-NRZ



PAM4



Esercizio – Trasmissione 4 livelli RGB

- Bit-rate = $6.25 \cdot \log_2(M)$ Gb/s = $6.25 \cdot 2$ Gb/s = 12.5 Gb/s
 - #bit(file) = #pixel_x • #pixel_y • 3 bytes = $1280 \cdot 720 \cdot 8 \cdot 3$ = 22118400 bit
 - #bit(pacchetto) = (payload_{ethernet} – header_{tcp} – header_{ip}) bytes = $(1500 - 20 - 20) \cdot 8$ bit = $1460 \cdot 8$ bit = 11680 bit
 - #pacchetti = $\lceil \frac{\text{#bit(file)}}{\text{#bit(pacchetto)}} \rceil$ = 1894 pacchetti
 - Espansione 8b/10b = 1.25
 - OH = $(20 + 20 + 38) \cdot 8 \cdot \text{#pacchetti}$ = 1181856 bit
-

$$\text{#bit totali} = (\text{#bit(file)} + \text{OH}) \cdot \text{Espansione 8b/10b} = (22118400 + 1181856) \cdot 1.25 = 29125320$$

$$\text{#simboli totali} = \frac{(\text{#bit(file)} + \text{OH}) \cdot \text{Espansione 8b/10b}}{\log_2(M)} = \frac{(22118400 + 1181856) \cdot 1.25}{2} = 14562660$$

$$T_{\text{necessario}} = \frac{\text{#simboli totali}}{\text{Bit - rate}} = \frac{14562660}{6.25 \cdot 10^9} \cong 2.33 \text{ ms}$$

