

# Fondamenti di Comunicazioni

**Corso: Fondamenti di comunicazioni e Internet (canale I e II)**

**Argomento 11: Rappresentazione digitale dell'informazione**

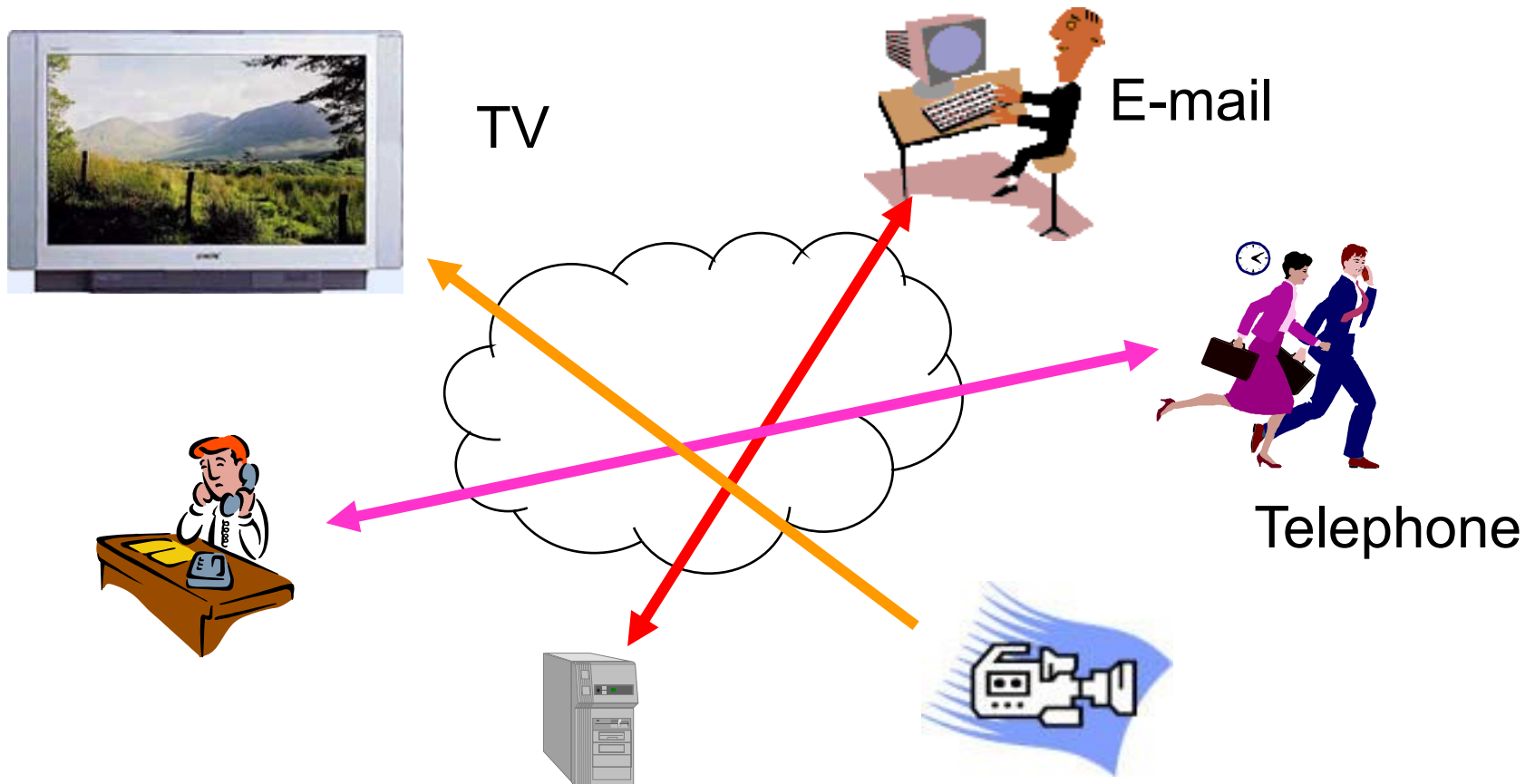
**Tiziana Cattai**  
**email: [tiziana.cattai@uniroma1.it](mailto:tiziana.cattai@uniroma1.it)**



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Digital Networks

- La tecniche di trasmissione digitale abilitano la rete al trattamento di qualsiasi flusso informativo



# Obiettivi e problemi

- **Come ridurre il tempo di trasmissione di un “messaggio” (testo, immagine) ?**
  - Qual è la lunghezza di un “messaggio” ?
  - Quali sono i vincoli che devono essere rispettati nella trasmissione di un “messaggio” ?
- **Può una rete gestire chiamate vocali o video ?**
  - Qual è la banda richiesta per il supporto di una chiamata vocale o video ?
  - Quali sono i vincoli di qualità che devono essere soddisfatti ?
- **Qual è il tempo necessario a trasferire un messaggio senza errori ?**
  - Per quale motivo si verificano errori in trasmissione ?
  - come è possibile rivelare e correggere gli errori in trasmissione ?
- **Qual è la banda disponibile nei vari mezzi trasmissivi (rame, fibra, radio, ecc.) ?**

# Informazione a Blocchi vs. Stream

## ■ Informazione a blocchi

### ■ L'informazione è naturalmente strutturata in unità indipendenti (blocchi)

- Text message
- Data file
- JPEG image
- MPEG file

### ■ Dimensione (size)

- numero di bit (byte) per blocco

## ■ Informazione Stream

### ■ Informazione prodotta e trasmessa in modo continuo

- Real-time voice
- Streaming video

### ■ Bit rate

- misura la quantità di bit prodotti dalla sorgente in una unità di tempo

# Delay di trasferimento di un messaggio

- $L$             numero di bit in un messaggio
- $R$             velocità del sistema di trasmissione (bit/s)
- $t_{\text{prop}}$         tempo di propagazione lungo il mezzo trasmissivo
- $d$             lunghezza del collegamento
- $c$             velocità di propagazione sul mezzo trasmissivo  
( $3 \times 10^8$  m/s nel vuoto,  $2 \times 10^8$  m/s nei mezzi guidati)

$$\textit{Delay minimo} = t_{\text{prop}} + L/R = d/c + L/R$$

- $L$  si riduce mediante **tecniche di compressione**
- $R$  si aumenta mediante **tecniche di trasmissione**
- $d$  si riduce avvicinando sender e receiver

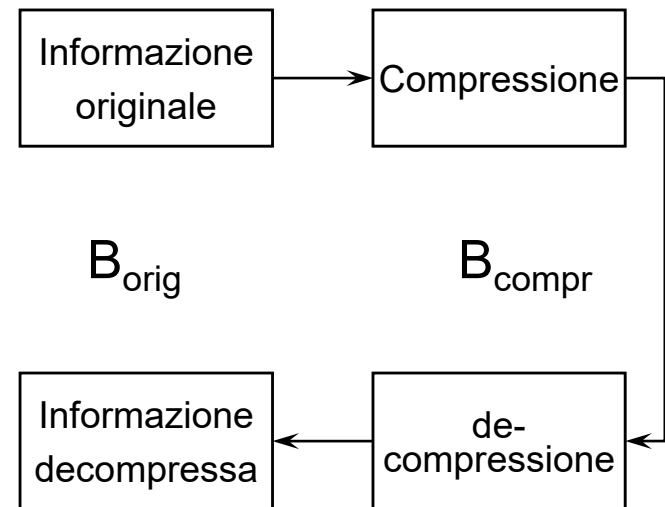
# Compressione

## ■ Algoritmi di compressione dati

- Riducono il numero di bit necessari alla rappresentazione dell'informazione riducendo la ridondanza
- **Senza perdita** (Lossless): l'informazione originale è ricostruita esattamente
  - zip, GIF, fax
- **Con perdita** (lossy): l'informazione decompressa non è identica all'originale
  - JPEG

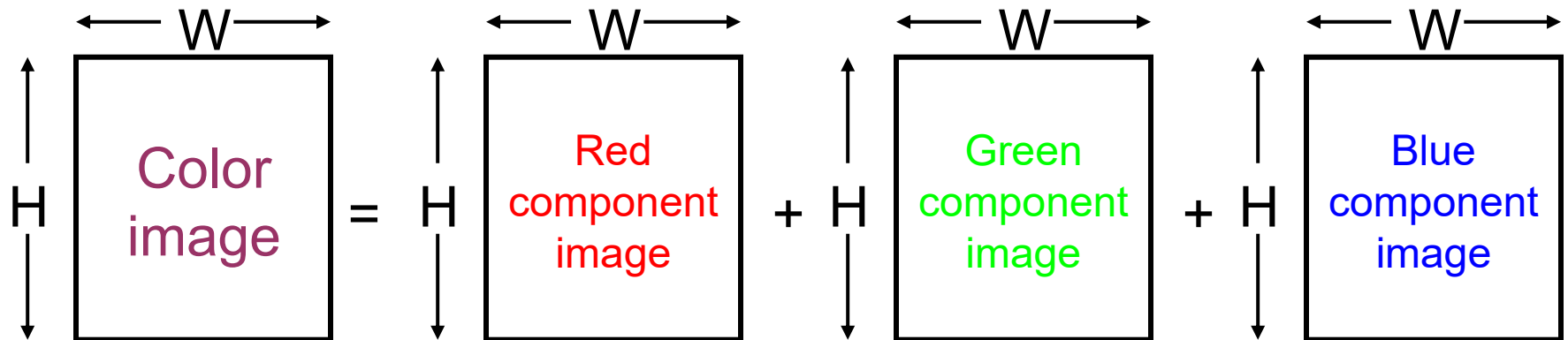
## ■ Rapporto di compressione (Compression Ratio) ( $R_c$ )

- $R_c = B_{orig} / B_{compr}$  (#bits file originale / #bits file compresso)
- Compromesso tra numero di bit e qualità



$$R_c = \frac{B_{orig}}{B_{compr}}$$

# Immagine a colori



$$B_{\text{orig}} = 3 \times H \times W \text{ pixel} \times B \text{ bit/pixel} = 3HWB \text{ bit}$$

Esempio: 8 × 10 inch picture a 400 × 400 pixel per inch<sup>2</sup>

$$400 \times 400 \times 8 \times 10 = 12.8 \text{ million pixels}$$

8 bits/pixel/color

$$12.8 \text{ megapixel} \times 3 \text{ byte/pixel} = 38.4 \text{ megabyte}$$

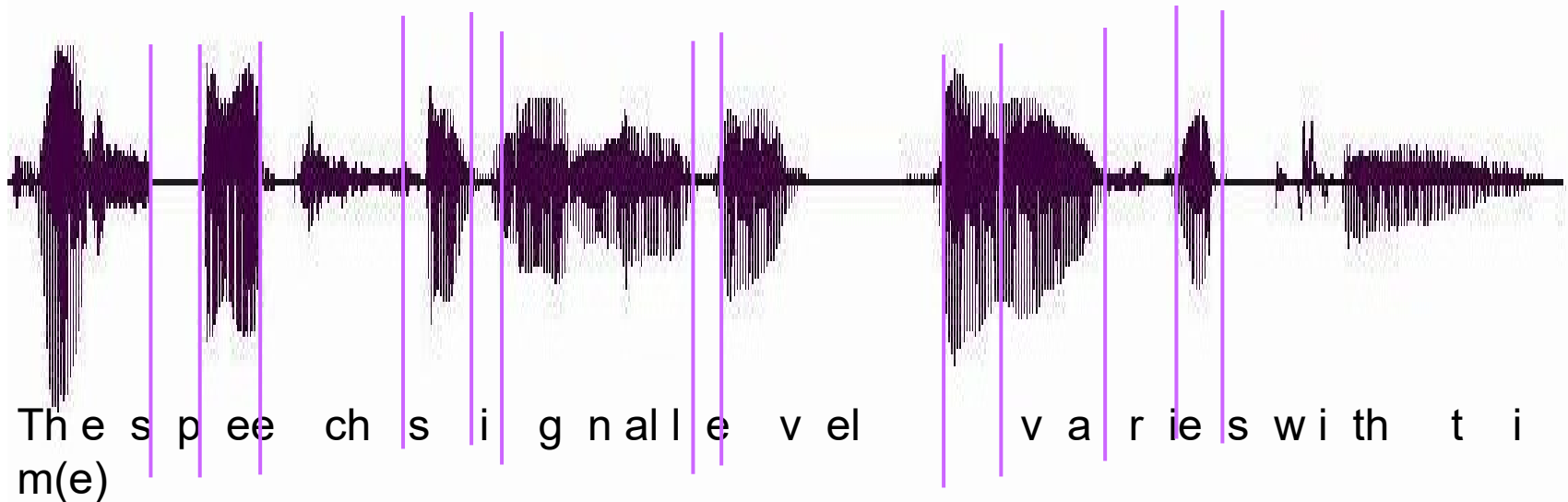
# Esempi di informazione a blocchi

Tipo	Metodo	Formato	Originale	Compressed Ratio
Text	Zip	ASCII	Kbyte-Mbyte	$2 < R_c < 6$
Fax	CCITT Group 3	A4 page 200x100 pixel/in <sup>2</sup>	256 kbyte	5-54 kbyte ( $5 < R_c < 50$ )
Immagine a Colori	JPEG	8x10 in <sup>2</sup> photo 400 <sup>2</sup> pixel/in <sup>2</sup>	38.4 Mbyte	1-8 Mbyte ( $5 < R_c < 30$ )



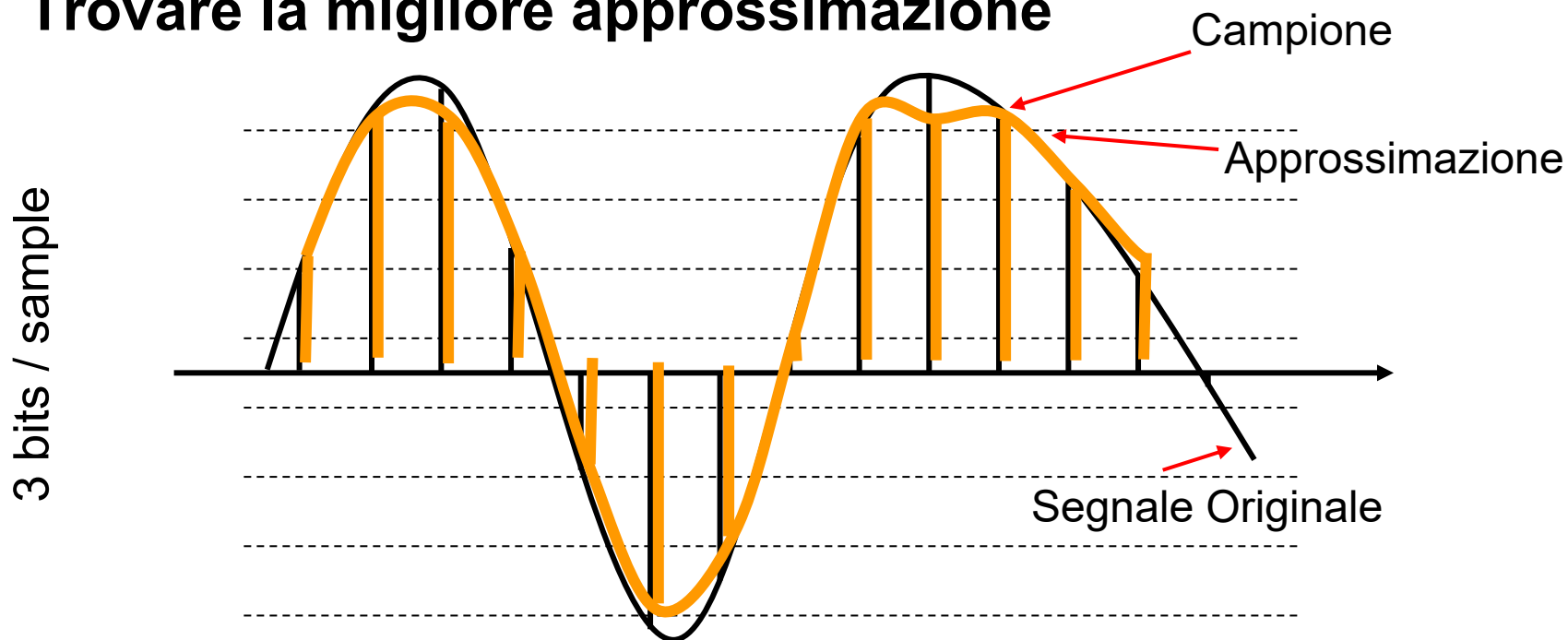
# Stream Information

- Un segnale vocale nella forma originale è di tipo analogico
- Un segnale vocale deve essere digitalizzato e trasmesso in tempo reale
- Il livello del **segnale analogico** varia nel tempo



# Digitalizzazione di segnali analogici

- **Campionamento** (sampling) del segnale analogico nel tempo e **codifica** dell'ampiezza dei campioni
- **Trovare la migliore approssimazione**



$$R_s = \text{Bit rate} = \# \text{ bit/sample} \times \# \text{ sample/second}$$

# Bit rate dei segnali digitalizzati

## ■ Larghezza di banda (**Bandwidth**) $W_s$ (Hz)

- indica quanto “velocemente” il segnale varia nel tempo
- Maggiore bandwidth → campioni più frequenti
- Frequenza di campionamento minima  **$F_s = 2 \times F_m$**
- Chiamando con  $W_s$  la banda unilatera  **$F_s = 2 \times W_s$**

## ■ Accuratezza della rappresentazione

- Maggiore accuratezza
  - → minore spaziatura tra approssimazione dei campioni
  - → numero maggiore di bit per campione

# Esempio: Voce & Audio

## Codifica vocale (Telefonia)

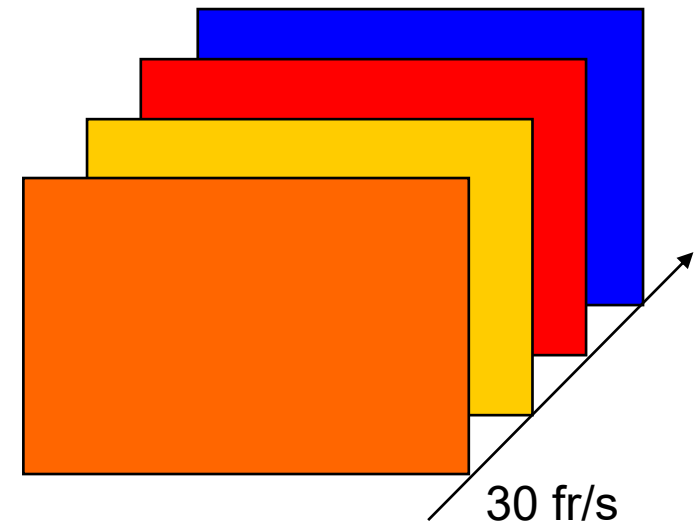
- $W_s = 4 \text{ kHz} \rightarrow 8000$  sample/sec
- 8 bit/sample
- $R_s = 8 \times 8000 = 64 \text{ kbit/s}$
- Nella telefonia mobile si usano codifiche con maggiore rapporto di compressione
  - $R_s = 8\text{-}12 \text{ kbit/s}$

## CD Audio

- $W_s = 22 \text{ kHz} \rightarrow 44000$  sample/sec
- 16 bit/sample
- $R_s = 16 \times 44000 = 704 \text{ kbps}$  per canale
- MP3 usa una codifica con maggiore rapporto di compressione
  - $R_s = 50 \text{ kbit/s}$  per canale audio

# Segnale video

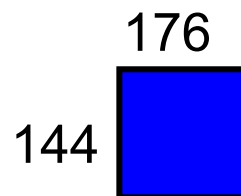
- Sequenza di “quadri” (**picture frame**)
  - ogni picture è digitalizzata e compressa
- Frequenza di ripetizione delle frame
  - 10-30-60 frame/sec in relazione all'obiettivo di qualità
- Risoluzione di ogni picture (**Frame resolution**)
  - Bassa risoluzione per servizio di videoconferenza
  - Risoluzione maggiore per servizio broadcast TV
  - HDTV frames



$$\text{Rate} = M \text{ bits/pixel} \times (W \times H) \text{ pixel/frame} \times F \text{ frame/second}$$

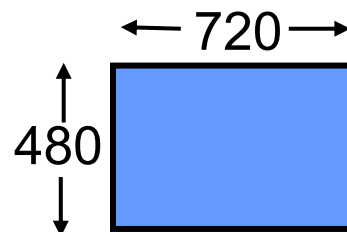
# Frame Video

**QCIF videoconferenza**



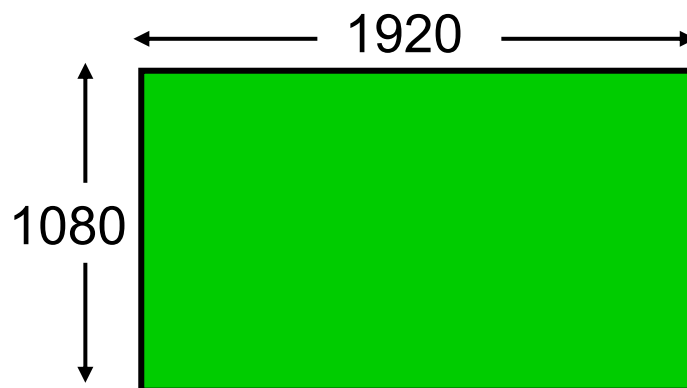
a 30 frame/sec =  
= 760,000 pixel/sec

**Broadcast TV**



a 30 frame/sec =  
=  $10.4 \times 10^6$  pixel/sec

**HDTV**



a 30 frames/sec =  
=  $67 \times 10^6$  pixels/sec

# Digital Video Signals

<b>Tipo</b>	<b>Metodo</b>	<b>Formato</b>	<b>Originale</b>	<b>Compresso</b>
<b>Video Conferenza</b>	<b>H.261</b>	<b>176x144 or 352x288 pix a 10-30 fr/sec</b>	<b>2-36 Mbit/s</b>	<b>64-1544 kbit/s</b>
<b>Full Motion</b>	<b>MPEG2</b>	<b>720x480 pix a 30 fr/sec</b>	<b>249 Mbit/s</b>	<b>2-6 Mbit/s</b>
<b>HDTV</b>	<b>MPEG2</b>	<b>1920x1080 a 30 fr/sec</b>	<b>1.6 Gbit/s</b>	<b>19-38 Mbit/s</b>

# Tipologia di informazioni stream

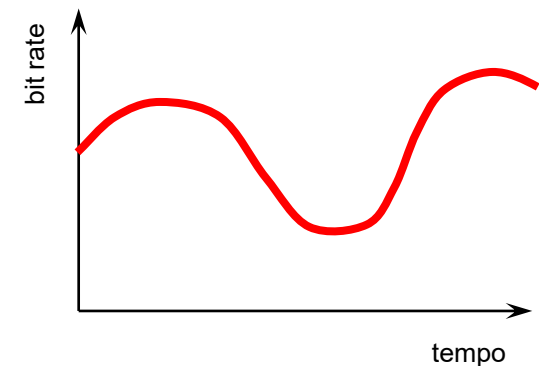
## ■ Constant bit-rate

- Flussi informativi a bit rate costante
  - Es. sorgente telefonica produce un flusso stream a rate costante 64 kbit/s
- La rete deve fornire un canale di comunicazione con banda almeno uguale al bit rate della sorgente
  - Es. Rete telefonica: canali di comunicazione (circuiti) a 64 kbit/s



## ■ Variable bit-rate

- Flussi informativi con bit rate variabile nel tempo
  - Es. sorgente video a qualità costante produce un flusso in cui il bit rate varia in funzione del movimento tra due picture consecutive
- La rete deve supportare in modo efficiente la variabilità del bit rate
  - Es. commutazione di pacchetto o rate-smoothing



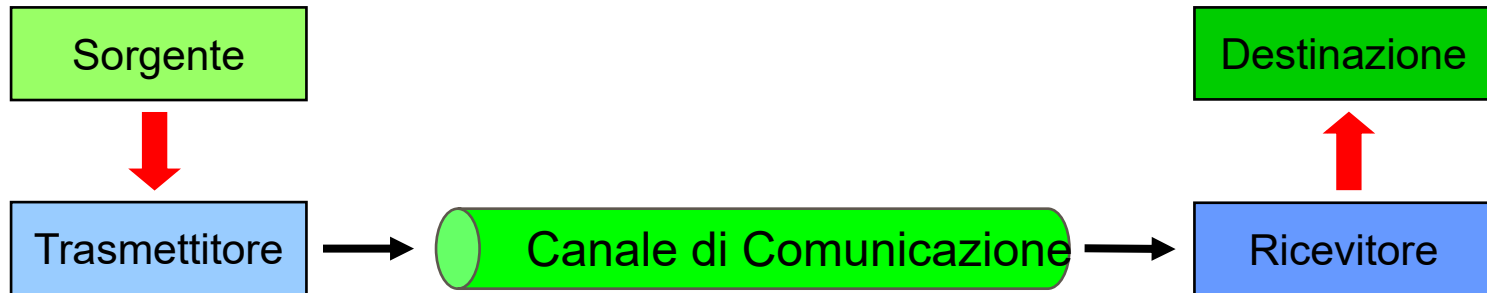


# Parametri di qualità per servizi di tipo Stream

- Possibili problemi introdotti dal transito in rete (**Network Impairment**)
  - Ritardo (**Delay**)
    - Per ogni servizio occorre individuare il vincolo sul ritardo massimo di attraversamento della rete
  - Variabilità del ritardo (**Jitter**)
    - Per ogni servizio occorre individuare il vincolo sulla variabilità massima consentita del ritardo di attraversamento della rete
  - Perdita di informazioni (**Loss**)
    - Per ogni servizio occorre individuare il vincolo sul percentuale massima di bit persi (per errori o congestione) sul totale dei bit trasmessi (**Probabilità di perdita**)
  - I protocolli di trasferimento sono progettati per gestire questi problemi

# **Introduzione alle trasmissioni numeriche**

# Schema di un sistema di trasmissione



## ■ Trasmittitore

- Converte il flusso informativo prodotto da una sorgente in un **segnale** adatto alla trasmissione
- Trasmette il segnale nel mezzo trasmissivo/canale di comunicazione

## ■ Ricevitore

- Riceve il segnale dal mezzo trasmissivo/canale di comunicazione
- Converte il segnale ricevuto in una forma utilizzabile dall'utente finale (destinazione)

# Transmission Impairments



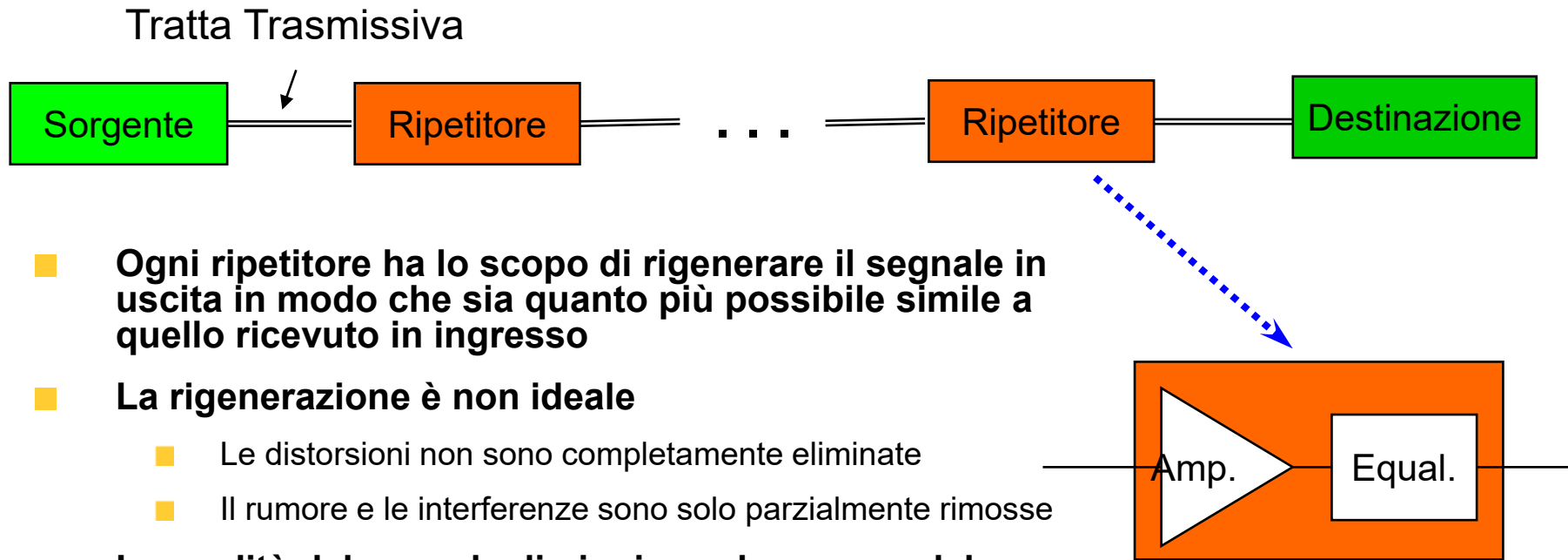
## ■ Canale di Comunicazione ■ Transmission Impairments

- Coppie simmetriche
- Cavi coassiali
- Radio
- Fibra ottiche
- Light in air
- Infrarossi

- Attenuazione del segnale
- Distorsione del segnale
- Rumore additivo
- Interferenza con altri segnali

## ■ Limitano la lunghezza del collegamento

# Trasmissioni analogiche a lunga distanza



- Ogni ripetitore ha lo scopo di rigenerare il segnale in uscita in modo che sia quanto più possibile simile a quello ricevuto in ingresso
- La rigenerazione è non ideale
  - Le distorsioni non sono completamente eliminate
  - Il rumore e le interferenze sono solo parzialmente rimosse
- La qualità del segnale diminuisce al crescere del numero di ripetitori
- Le comunicazioni analogiche sono **distance-limited**
- Analogia
  - Copie multiple di una cassetta musicale

# Analog vs. Digital Transmission

## ■ Trasmissioni analogiche

- tutti i dettagli del segnale devono essere ricostruiti accuratamente



## ■ Trasmissioni numeriche

- devono essere ricostruiti solo i livelli discreti del segnale
- l'impulso originale era positivo o negativo ?



# Trasmissione numeriche a lunga distanza

Tratta Trasmissiva



- **Un rigeneratore ricostruisce la sequenza iniziale di bit e la ritrasmette sulla tratta successiva**

- E' possibile progettare un rigeneratore in modo che la probabilità di errore sia piccola
- Il segnale rigenerato è in pratica identico a quello originale

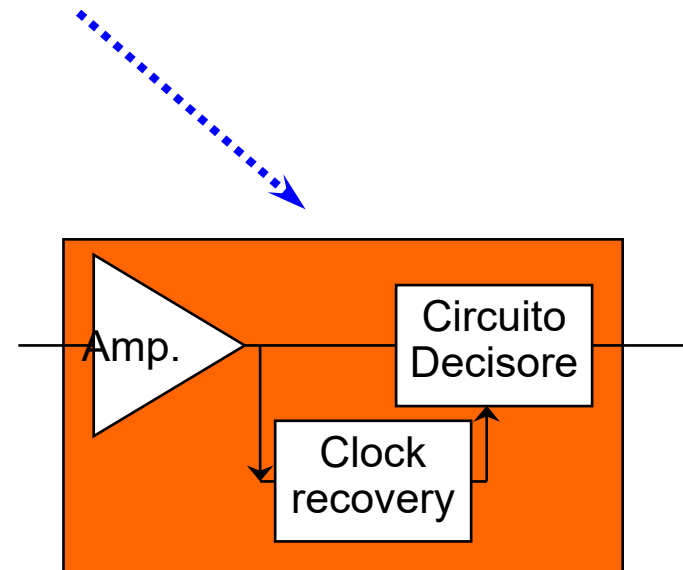
- **Analogia**

- copie multiple di un file MP3

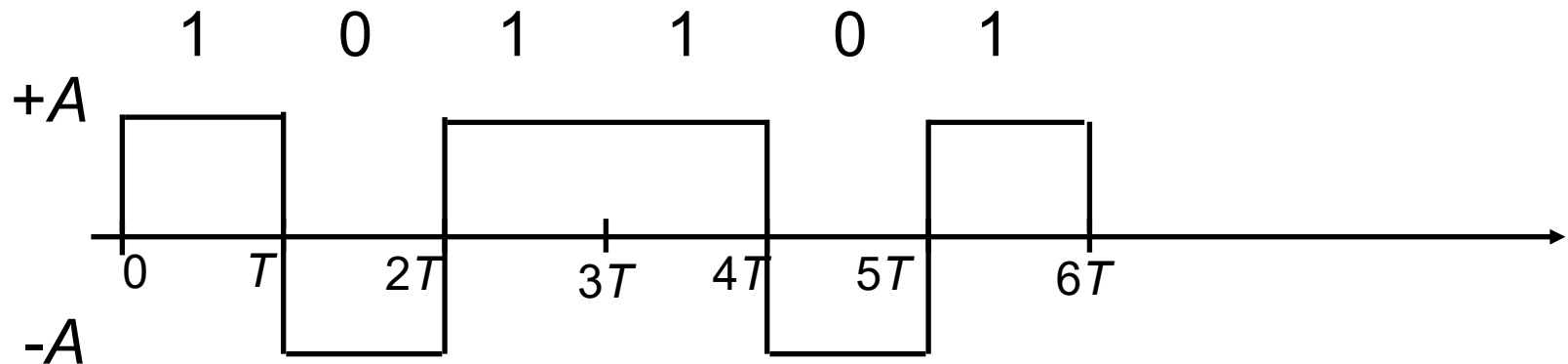
- **Le comunicazioni numeriche sono possibili anche a lunghissima distanza**

- **Sistemi numerici vs. sistemi analogici**

- Minore potenza, distanze maggiori, costi ridotti
- Funzioni più semplici di monitoraggio, moltiplicazione, codifica, ecc.



# Segnale numerico binario



$$\text{Bit rate}(F_b) = 1 \text{ bit} / T \text{ seconds}$$

## ■ Per uno specifico mezzo trasmissivo

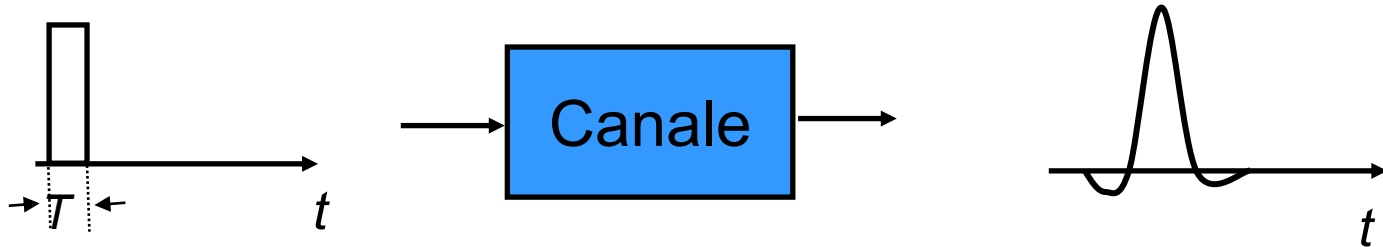
- Come possiamo aumentare il bit rate in trasmissione ?
- Come possiamo ottenere un trasferimento affidabile ?
- Ci sono limiti al bit rate e all'affidabilità della trasmissione ?



# Trasmissione ad impulsi

## ■ Obiettivo

- Rendere massimo il rate di trasmissione degli impulsi in un canale, ovvero rendere  $T$  il più piccolo possibile



- Se l'ingresso è un impulso di breve durata, l'uscita sarà un impulso “allargato” e “arrotondato”

- due impulsi consecutivi possono sovrapporsi tra loro

## ■ Domanda

- qual è la frequenza massima  $F$  di trasmissione degli impulsi in modo che non ci sia interferenza tra loro ?

## ■ Risposta

- $F = 2 \times W_c$  impulsi/secondo
- dove  $W_c$  è the larghezza di banda unilaterale del canale (**Bandwidth**)

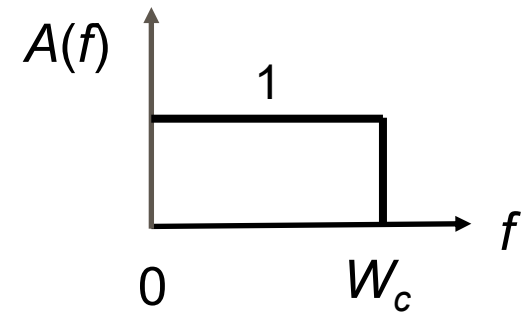
# Larghezza di banda di un canale trasmissivo



■ **Se il segnale di ingresso ad un canale è una sinusoide di frequenza  $f$  allora**

- l'uscita sarà una sinusoide della stessa frequenza  $f$
- attenuata di un fattore  $A(f)$  che dipende da  $f$
- $A(f) \approx 1$ , il segnale transita inalterato
- $A(f) \approx 0$ , il segnale è bloccato

■ **La larghezza di banda  $W_c$  è definita come l'intervallo di frequenze per cui  $A(f) \approx 1$**



Canale passa  
basso ideale

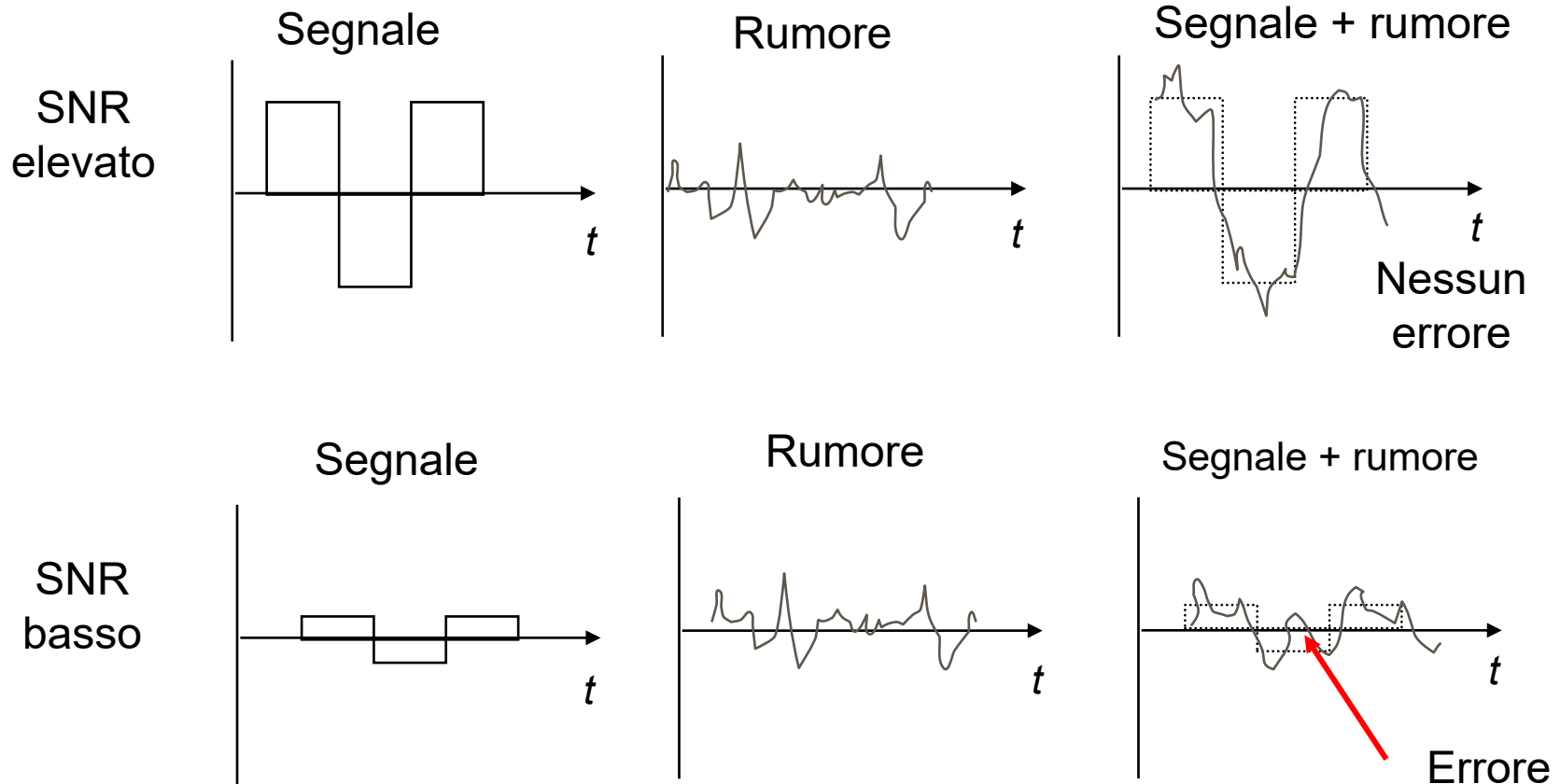
# Trasmissione ad impulsi multilivello

- Se l'ampiezza degli impulsi può assumere due valori (-D a +D), ogni impulso può rappresentare un solo bit informativi
- Se l'ampiezza degli impulsi può assumere valori finiti e discreti tra -D e +D ogni impulso può rappresentare 2 bit.
- Per rappresentare un segnale che può assumere  $M = 2^K$  livelli, si ha bisogno di K bit.  $F_b = K \times F_s$
- In assenza di rumore il bit rate può essere incrementato aumentando il valore di m (quindi i livelli M del segnale)
  - **Attenzione**: aumentando M si riduce la distanza tra livelli adiacenti

# Rumore

- **Tutti i sistemi fisici introducono rumore**
  - Gli elettroni vibrano a temperature superiori allo zero assoluto, il moto degli elettroni introduce rumore
- **La presenza di rumore limita l'accuratezza della misura dell'ampiezza del segnale ricevuto**
- **L'effetto del rumore è modellabile come un segnale additivo rispetto al segnale utile**
- **Gli errori nella rivelazione del segnale ricevuto appaiono quando la separazione tra i livelli del segnale è comparabile con il livello di rumore**
- **Il Bit Error Rate (BER) aumenta quando diminuisce il rapporto segnale-rumore (signal-to-noise ratio)**
- **Il rumore pone un limite al numero di livelli che possono essere utilizzati nella trasmissione di impulsi e quindi un limite al bit rate in trasmissione**

# Signal-to-Noise Ratio



$$\text{SNR} = \frac{\text{Potenza media del segnale}}{\text{Potenza media del rumore}}$$

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \text{SNR}$$

# Limite di Shannon alla capacità di un canale

$$C = W_c \log_2 (1 + SNR) \text{ bit/s}$$

- C è una funzione della larghezza di banda e del rapporto segnale rumore
- Se il bit rate di trasmissione R è inferiore a C ( $R < C$ ) è possibile ottenere un BER arbitrariamente piccolo
  - è necessario introdurre una codifica di linea opportuna
- Se  $R > C$ , non è possibile ridurre il BER a valori arbitrariamente piccoli
- La capacità C può essere utilizzata come una misura di riferimento per stabilire quanto un sistema di trasmissione è vicino alle migliori prestazioni possibili

# Esempio

- Calcolare la capacità limite di Shannon per un canale di comunicazione telefonico con  $W_c$  (banda unilatera) = 3400 Hz and  $SNR = 10000$

# Esempio

- Calcolare la capacità limite di Shannon per un canale di comunicazione telefonico con  $W_c$  (banda unilatera) = 3400 Hz and  $SNR = 10000$

$$\begin{aligned} C &= W_c \log_2 (1 + SNR) = 3400 \log_2 (1 + 10000) = \\ &= 3400 \log_{10} (10001) / \log_{10} 2 = 45200 \text{ bit/s} = \\ &= \mathbf{45.2 \text{ kbit/s}} \end{aligned}$$

Si osservi che  $SNR = 10000$  corrisponde a

$$SNR \text{ (dB)} = 10 \log_{10}(10000) = \mathbf{40 \text{ dB}}$$



# Bit rate in sistemi di trasmissione numerici

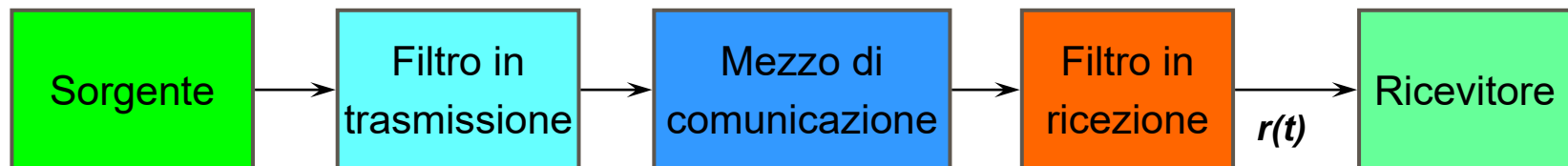
Sistema	Bit Rate	Osservazioni
Telephone twisted pair	33.6-56 kbit/s	4 kHz telephone channel
Ethernet twisted pair	10 Mbps, 100 Mbit/s	100 meters of unshielded twisted copper wire pair
Cable modem	500 kbps-4 Mbps	Shared CATV return channel
ADSL twisted pair	64-640 kbps in, 1.536-6.144 Mbit/s out	Coexists with analog telephone signal
2.4 GHz radio	2-11 Mbit/s	IEEE 802.11 wireless LAN
28 GHz radio	1.5-45 Mbit/s	5 km multipoint radio
Optical fiber	2.5-40 Gbit/s	1 wavelength
Optical fiber	>1600 Gbit/s	Many wavelengths

# Esempi di canali trasmissivi

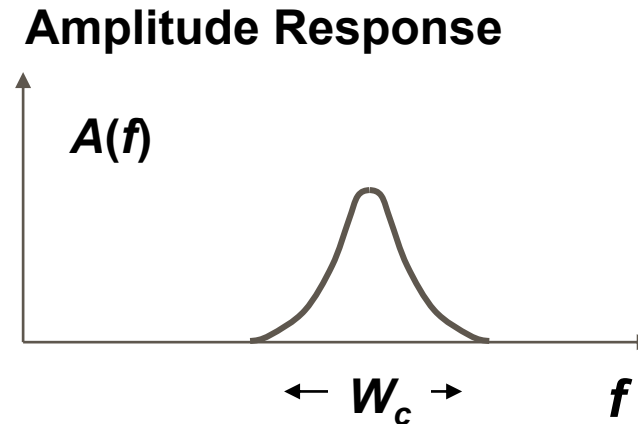
Channel	Bandwidth	Bit Rate
Canale telefonico	3 kHz	33 kbit/s
Coppia simmetrica	1 MHz	1-6 Mbit/s
Cavo coassiale	500 MHz (6 MHz per canale)	30 Mbit/s/ channel
5 GHz radio (IEEE 802.11)	300 MHz (11 channels)	54 Mbit/s / channel
Fibra ottica	Molti TeraHertz	40 Gbit/s / wavelength

# Canali di comunicazione

- Per **canale di comunicazione** si intende l'unione dei mezzi trasmissivi e dei dispositivi (elettronici o ottici) che sono attraversati dal segnale lungo il percorso tra sorgente e destinazione
  - Equalizzatori, amplificatori, ecc.
- Spesso si usa il termine **filtro** per indicare gli effetti del canale sul segnale che lo attraversa

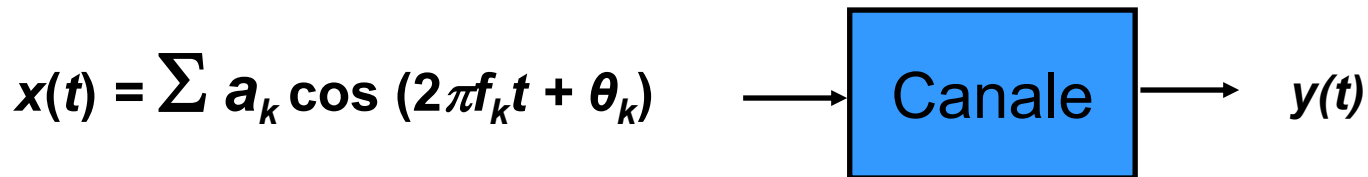


# Canale passabanda



- **Alcuni canali di comunicazione si comportano come un filtro passa-banda**
  - bloccano le basse e le alte frequenze
- ***La larghezza di banda* è l'ampiezza dell'intervallo di frequenze per cui il segnale in uscita ha una potenza non trascurabile**

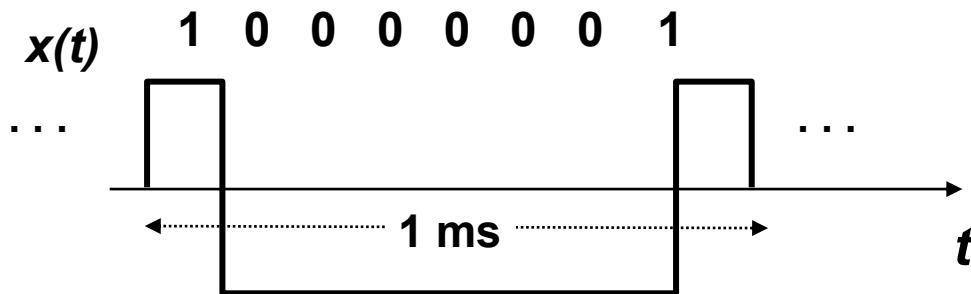
# Distorsione



- **Il canale introduce sul segnale in ingresso  $x(t)$  due effetti**
  - Se la risposta in frequenza non è “piatta”, le componenti di frequenza del segnale d’uscita  $y(t)$  avranno ampiezza diversa rispetto a quelle del segnale d’ingresso  $x(t)$
  - Se la risposta in fase non è “piatta”, le componenti di frequenza del segnale d’ingresso  $x(t)$  subiranno ritardi diversi

$$y(t) = \sum A(f_k) a_k \cos [2\pi f_k t + \theta_k + \Phi(f_k)]$$

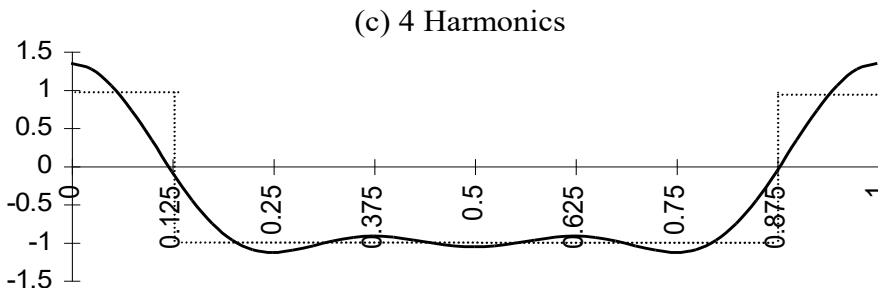
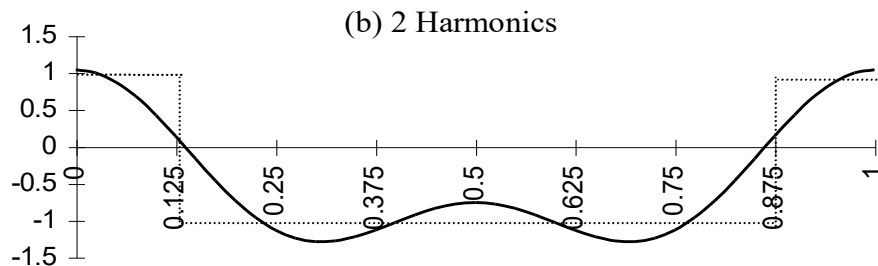
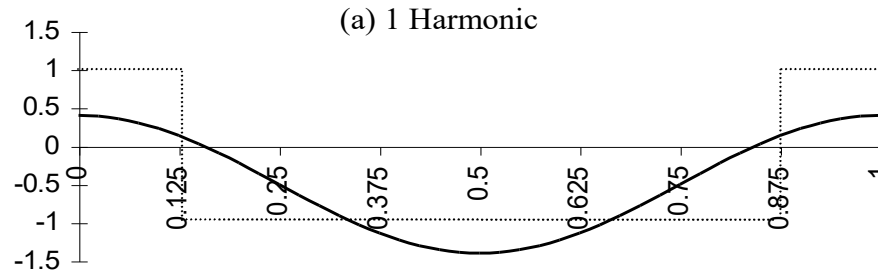
# Esempio: Distorsione di ampiezza (1)



$$\begin{aligned}
 x(t) = & -0,5 + \frac{4}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right) \cos(2\pi 1000t) + \\
 & + \frac{4}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{4}\right) \cos(2\pi 2000t) + \\
 & + \frac{4}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{3\pi}{4}\right) \cos(2\pi 3000t) + \dots
 \end{aligned}$$

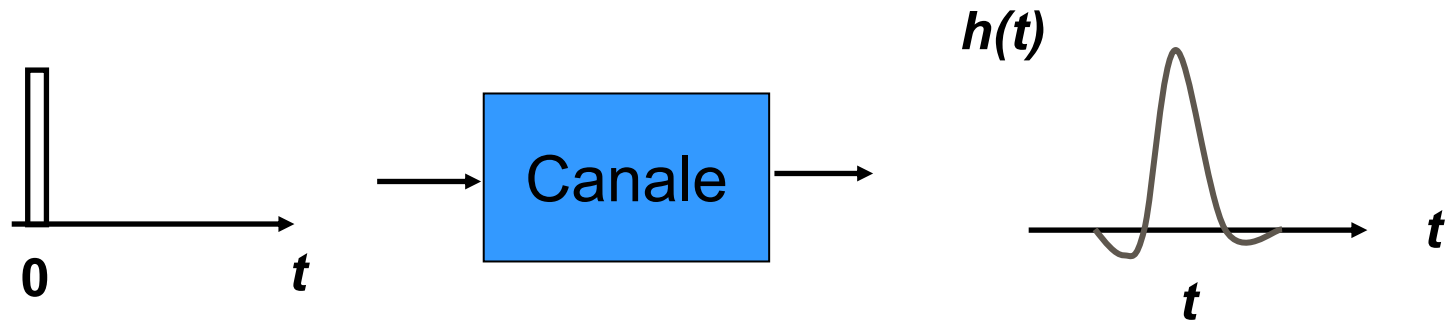
- Sia  $x(t)$  il segnale in ingresso ad un canale che si comporta come un filtro passa basso ideale
  - ritardo nullo
  - $W_c = 1.5 \text{ kHz}$ ,  $2.5 \text{ kHz}$ , o  $4.5 \text{ kHz}$
- Se  $W_c = 1.5 \text{ kHz}$  passano solo i primi due termini
- Se  $W_c = 2.5 \text{ kHz}$  passano solo i primi tre termini
- $W_c = 4.5 \text{ kHz}$  passano solo i primi cinque termini

# Esempio: Distorsione di ampiezza (2)



■ **Tanto maggiore è la banda del canale, tanto minore sarà la distorsione introdotta dal canale sul segnale di ingresso**

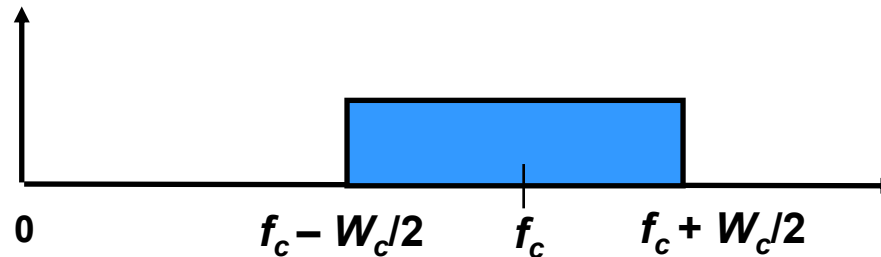
# Caratterizzazione nel dominio del tempo



- La caratterizzazione di un canale nel dominio del tempo richiede la conoscenza della **risposta impulsiva  $h(t)$** 
  - Si applica in ingresso al canale un impulso di durata molto breve si osserva il segnale in uscita
  - tipicamente  $h(t)$  è una copia ritardata e distorta dell'impulso in ingresso
- La larghezza della risposta impulsiva fornisce un'indicazione di quanto velocemente l'uscita segue l'ingresso e quindi di quanto velocemente possono essere trasmessi gli impulsi in ingresso

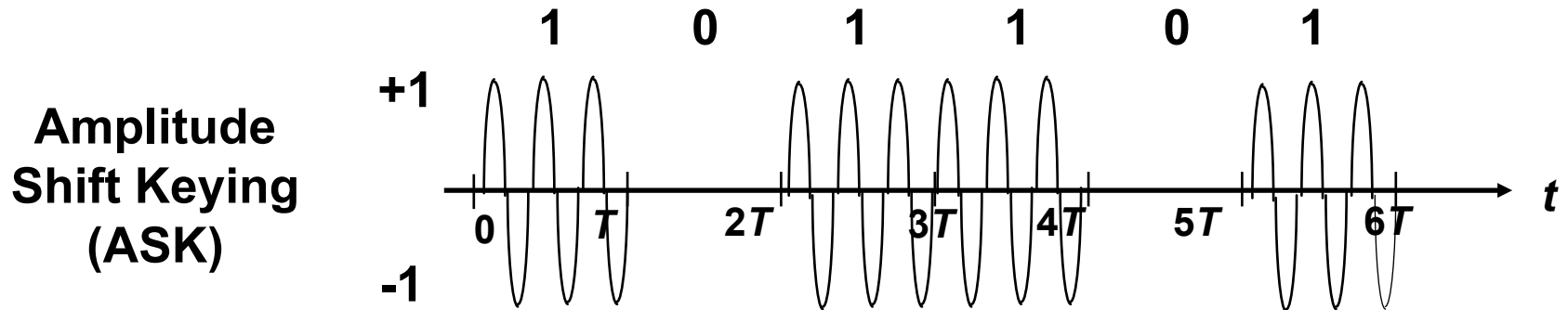


# Canali passa-banda



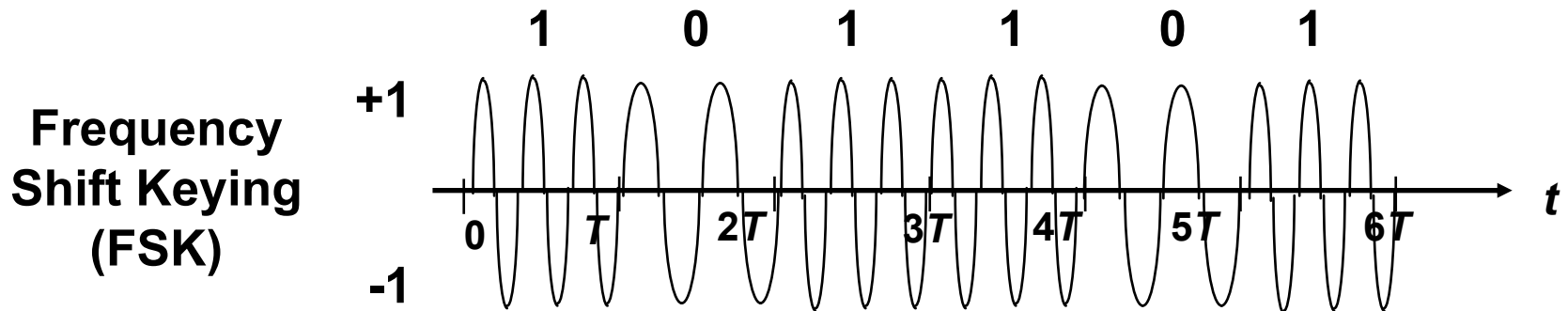
- I canali passa-banda sono passanti per un intervallo di frequenze centrate intorno ad una frequenza centrale  $f_c$ 
  - Canali radio channels, modem telefonici e xDSL
- I modulatori numerici (**Modem**) utilizzano forme d'onda che hanno frequenze che sono passanti per un canale passa-banda
- Un segnale sinusoidale di frequenza  $f_c$  è centrato nella banda del canale
  - Un modulatore inserisce l'informazione in una senoide  $[\cos(2\pi f_c t)]$

# Modulazione di Ampiezza



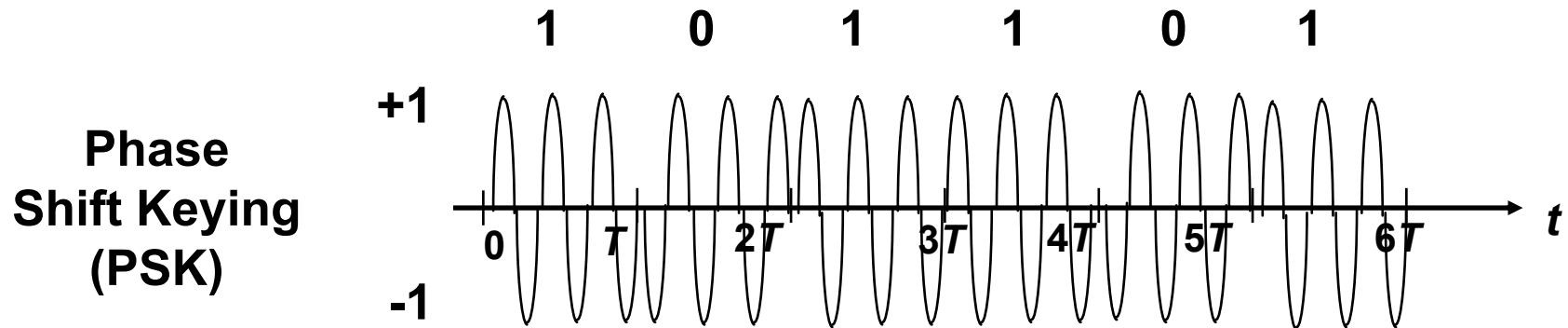
- Un modulatore ASK mappa ogni bit informativo nell'ampiezza di una sinusoide a frequenza  $f_c$ 
  - “1” trasmissione del segnale sinusoidale
  - “0” nessun segnale
- Il demodulatore individua i periodi in cui è presente il segnale e i periodi in cui il segnale è assente

# Modulazione di Frequenza



- Un modulatore FSK mappa ogni bit informativo nella frequenza di un segnale sinusoidale
  - “1” trasmissione di un segnale di frequenza  $f_c + d$
  - “0” trasmissione di un segnale di frequenza  $f_c - d$
- Un demodulatore individua la potenza intorno alle frequenze  $f_c + d$  o  $f_c - d$

# Modulazione di Fase



- **Un modulatore PSK mappa ogni bit informativo nella fase di un segnale sinusoidale**
  - “1” trasmissione del segnale  $A \cos(2\pi ft)$  → fase 0
  - “0” trasmissione del segnale  $A \cos(2\pi ft + \pi)$  → fase  $\pi$
- **E' equivalente a moltiplicare un segnale  $\cos(2\pi ft)$  per +A or -A**
  - “1” trasmissione del segnale  $A \cos(2\pi ft)$  → moltiplicazione per A
  - “0” trasmissione del segnale  $A \cos(2\pi ft + \pi) = -A \cos(2\pi ft)$  → moltiplicazione per -A