



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Lezione 6 – Livello Fisico II

# INDICE

## 6. LIVELLO FISICO II

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

Parte I

Parte II (oggi)

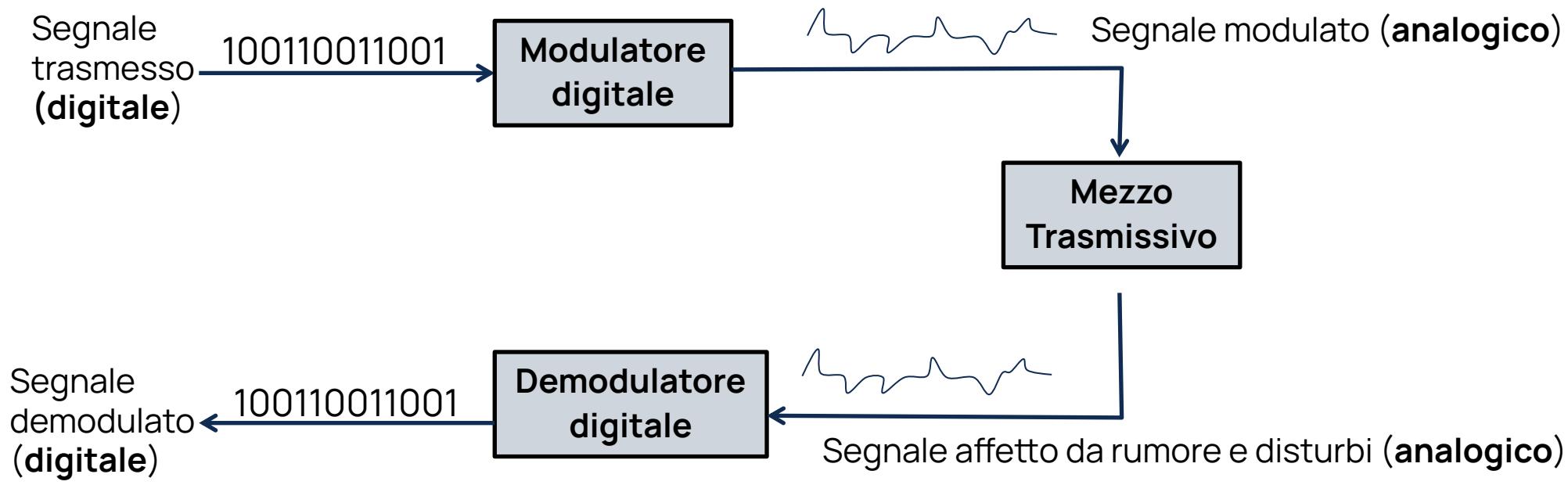
Parte III (lunedì prossimo)

# MODULAZIONE

01

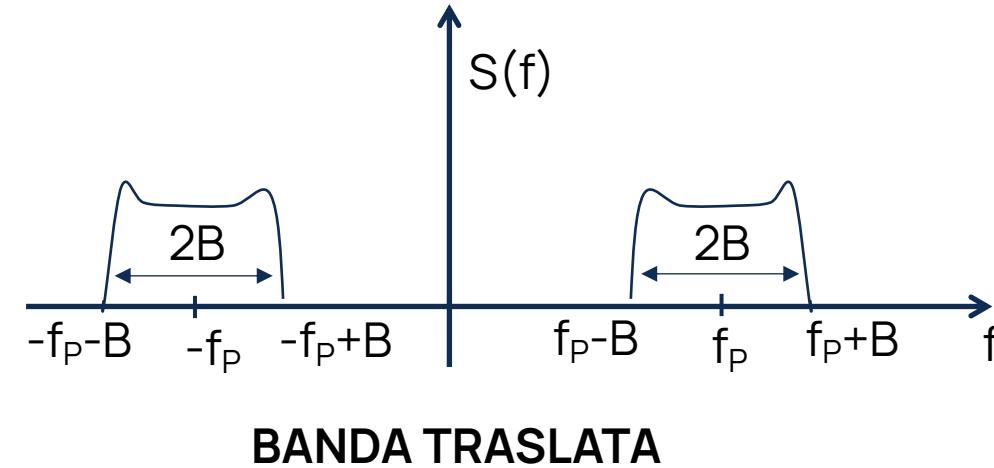
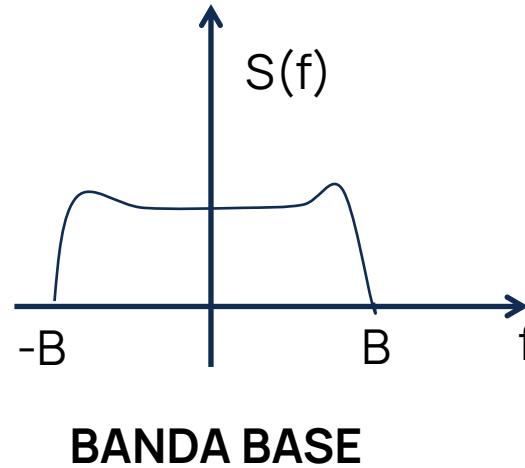
# Modulazione

- 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 (fase, ampiezza, frequenza, ...) e creare il segnale (modulato) che viene inviato nel mezzo trasmittivo.



# Modulazione

- La modulazione di un segnale può avvenire in *banda base* o in *banda traslata*
- **Banda base**: i segnali usati nella modulazione hanno uno spettro contiguo rispetto all'origine.
- **Banda traslata**: i segnali hanno uno spettro traslato (centrato sulla frequenza portante  $f_p$ ) su intervalli di frequenze non contigue all'origine, e la banda trasmissiva (che vedremo dopo) **raddoppia**.



# Esempi

## Banda base:

- Ethernet (Cat 6)
  - 0 Hz - 250 MHz
- USB 2.0
  - 0 Hz - 480 MHz
- USB 3.0
  - 0 Hz - 5 GHz

## Banda traslata:

### Comunicazioni cellulari:

- 4G LTE:
  - Portante: 600 MHz - 2.6 GHz
  - Banda: 5 MHz - 20 MHz
- 5G NR:
  - Portante: 600 MHz - 52 GHz
  - Banda: 5 MHz - 400 MHz

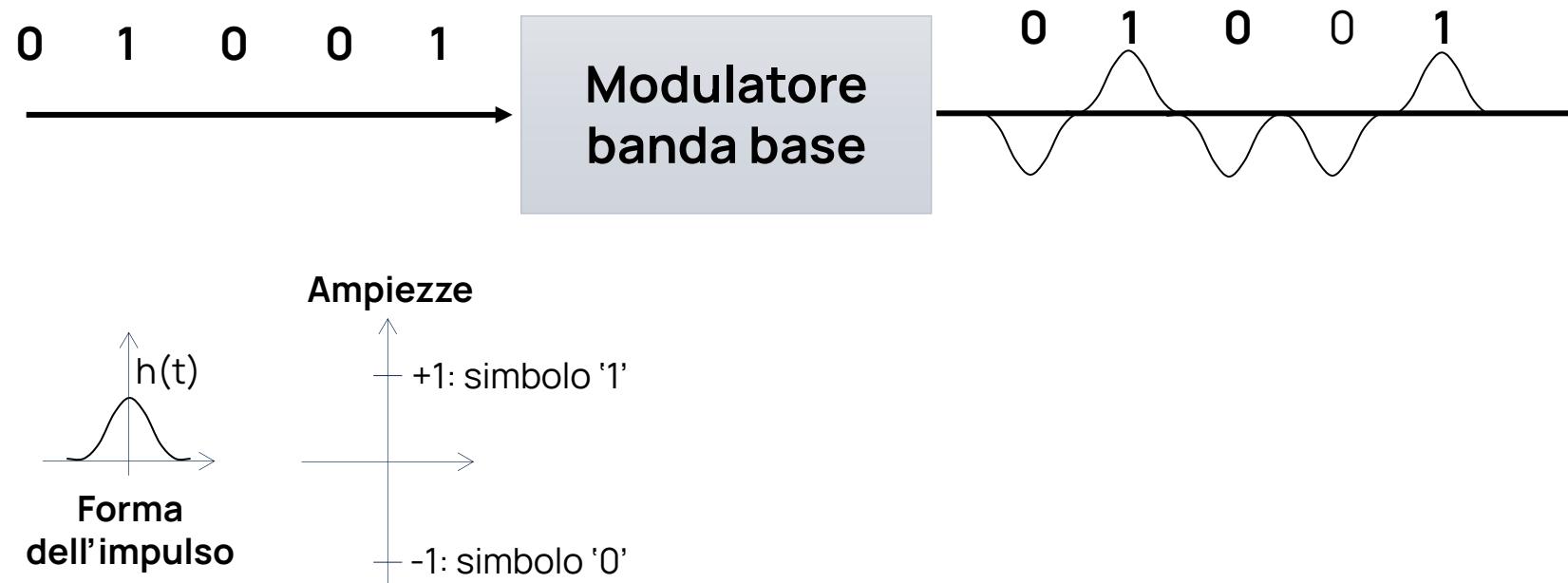
## Banda traslata:

### Comunicazioni satellitari:

- Banda L:
  - Portante: 1.5 GHz - 2.5 GHz
  - Banda: 15 MHz - 30 MHz
- Banda S:
  - Portante: 2 GHz - 4 GHz
  - Banda: 30 MHz - 60 MHz
- Banda C:
  - Portante: 4 GHz - 8 GHz
  - Banda: 36 MHz - 72 MHz
- Banda X:
  - Portante: 7 GHz - 8.5 GHz
  - Banda: 45 MHz - 100 MHz
- Banda Ku:
  - Portante: 12 GHz - 18 GHz
  - Banda: 36 MHz - 72 MHz
- Banda Ka:
  - Portante: 26.5 GHz - 40 GHz
  - Banda: 100 MHz - 500 MHz
- Banda V:
  - Portante: 40 GHz - 75 GHz
  - Banda: 1 GHz+

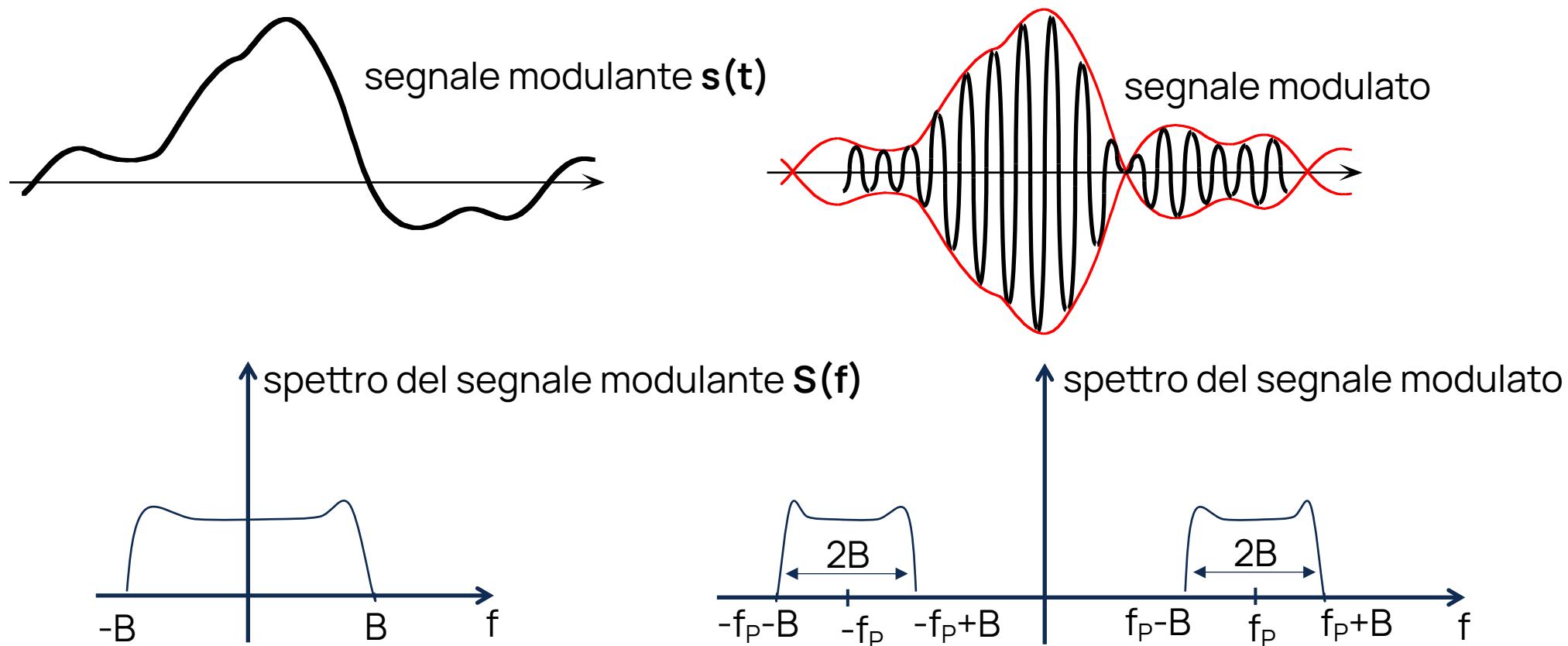
# Modulazione in banda base

- Ethernet, DSL, Audio su cavo, ..
- Esempio: Modulazione d'ampiezza in banda base
- Formato di modulazione di tipo PAM – Pulse Amplitude Modulation: il bit corrisponde ad un impulso di ampiezza positiva (“1”) o negativa (“0”)



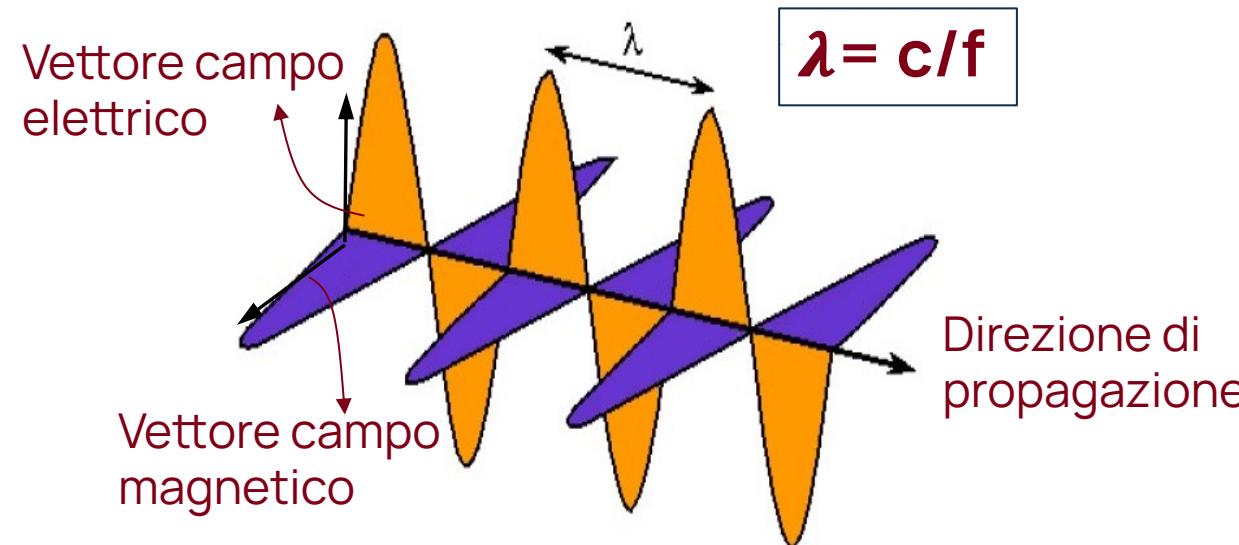
# Modulazione in banda traslata

- 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



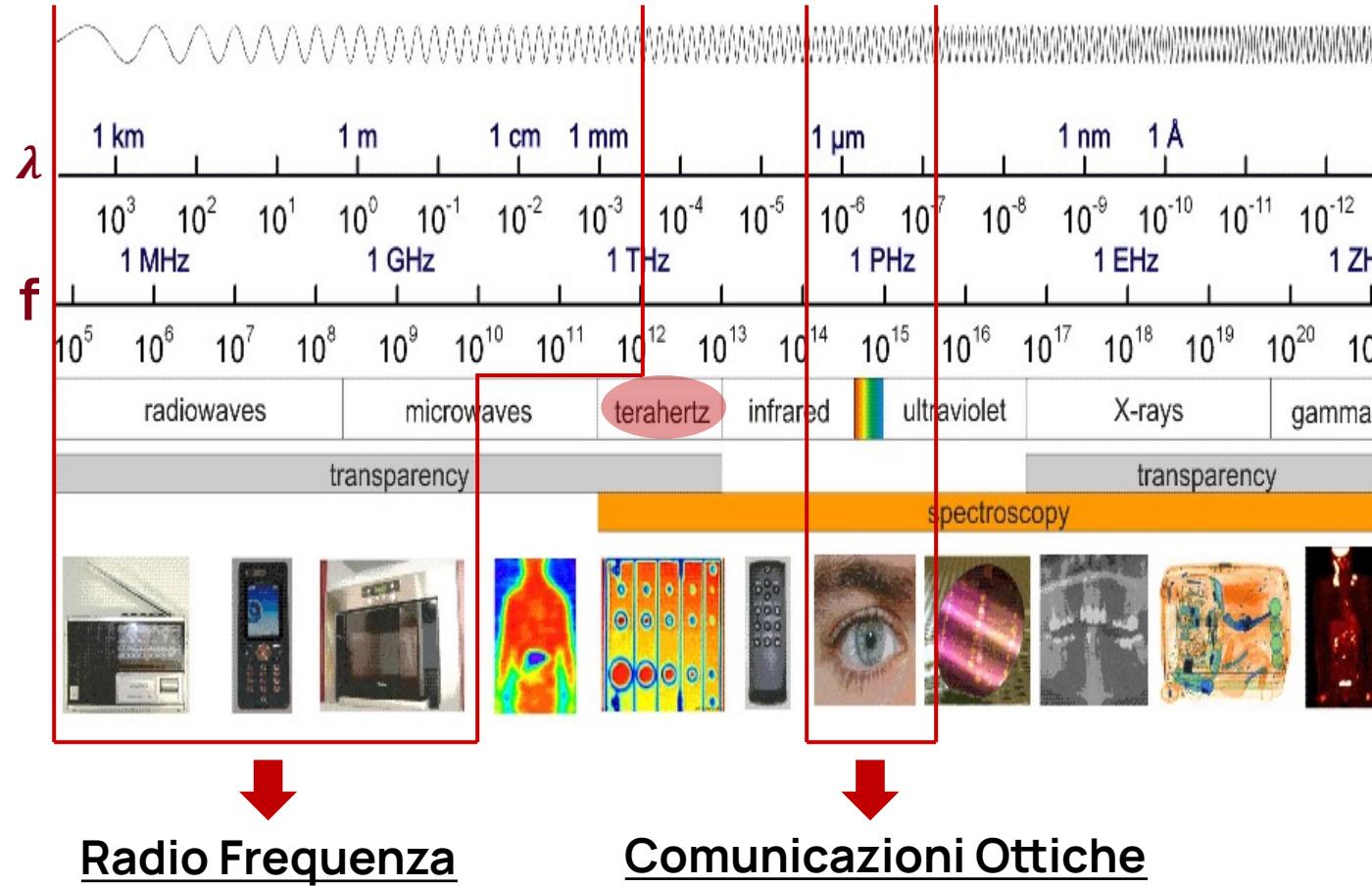
# Propagazione di un segnale mediante una portante

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



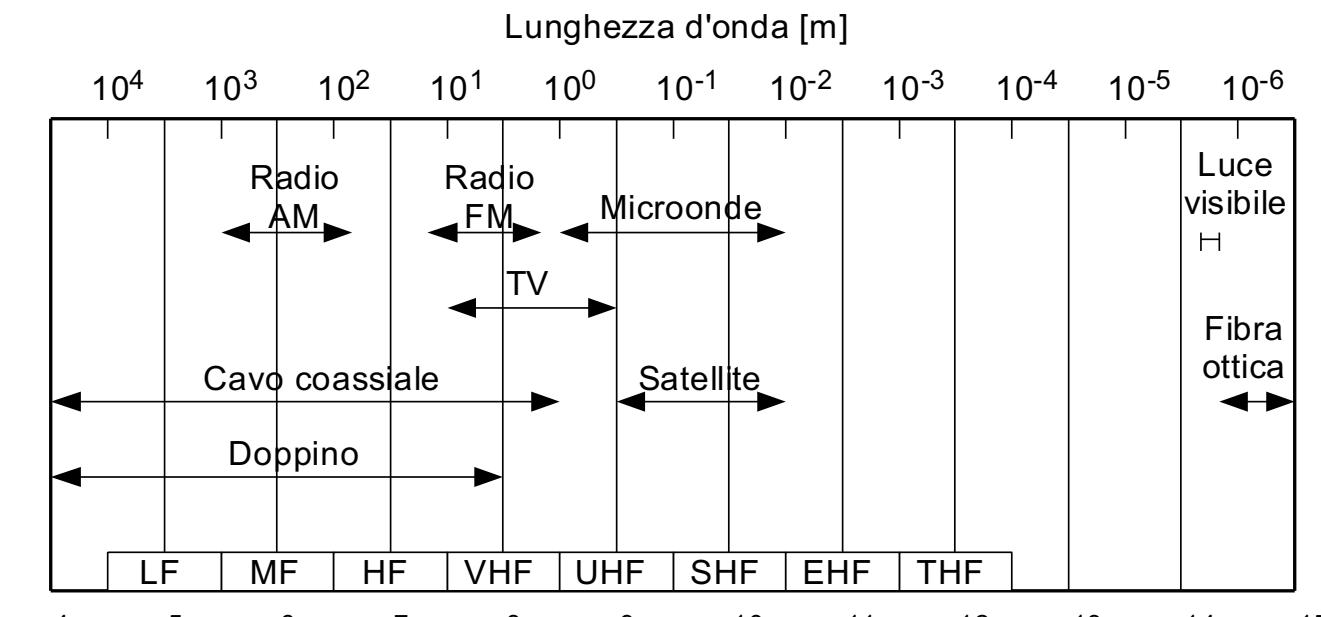
- Le onde elettromagnetiche portanti vengono classificate principalmente in base alla **frequenza**.

# Onde “portanti” per le telecomunicazioni



# Modulazione in banda traslata

- L'uso di un'onda portante e della modulazione in banda traslata è necessaria per sfruttare mezzi trasmittivi caratterizzati da opportune **BANDE PASSANTI**.



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 portante)
- Modulazione di frequenza FSK (cambia **frequenza** della portante)
- Modulazione di fase PSK (cambia **fase** della portante)
- Modulazione QAM (cambia **ampiezza** e **fase** della portante)



ASK: Amplitude Shift Keying

FSK: Frequency Shift Keying

PSK: Phase Shift Keying

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

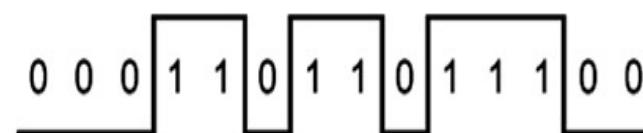
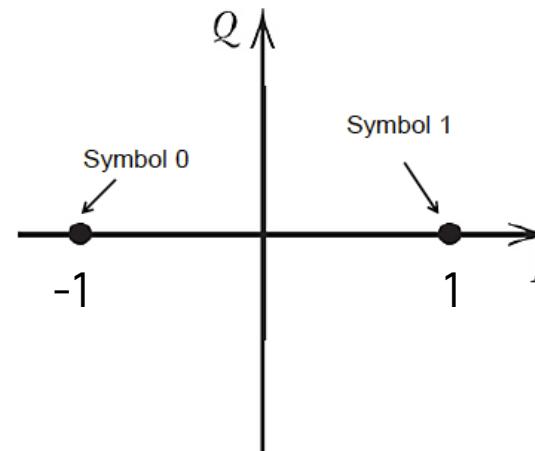
# Modulazione multilivello

- Per aumentare la capacità di canale e dunque trasmettere più bit per ogni simbolo trasmesso, aumentando così l'efficienza spettrale e la velocità di trasmissione dei dati, si ricorra alla  
**MODULAZIONE MULTILIVELLO**
- A differenza delle tecniche di modulazione binaria, dove ciascun simbolo rappresenta solo due possibili stati (0 e 1), nelle modulazioni multilivello **ogni simbolo può assumere più valori**, rappresentando quindi più di un singolo bit.
- Nello specifico, il segnale trasmesso può assumere diversi **livelli di ampiezza, fase o frequenza**, e ciascun livello rappresenta una combinazione unica di bit.
- La rappresentazione multilivello consente di trasmettere **più bit per simbolo**, aumentando così la quantità di informazioni trasmesse in un dato intervallo di tempo.

# Modulazione multilivello di ampiezza

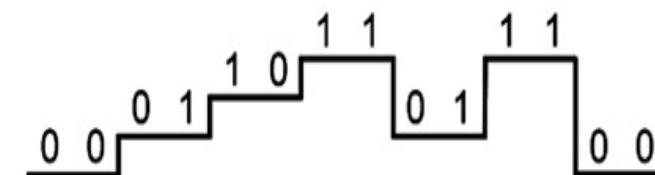
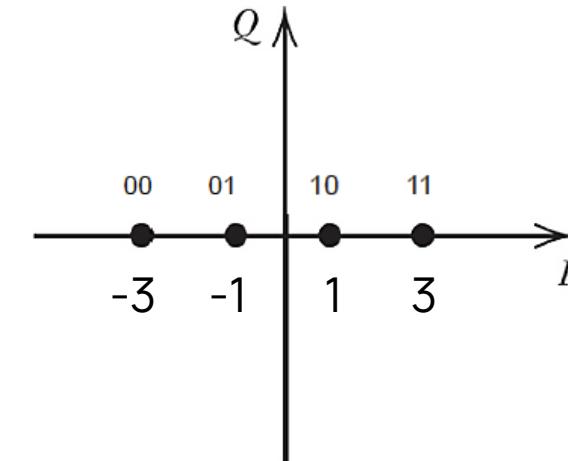
## ASK o PAM binario

- 2 simboli (valori di ampiezza)
- 1 bit per simbolo



## 4-ASK o 4-PAM binario

- 4 simboli (valori di ampiezza)
- 2 bit simbolo



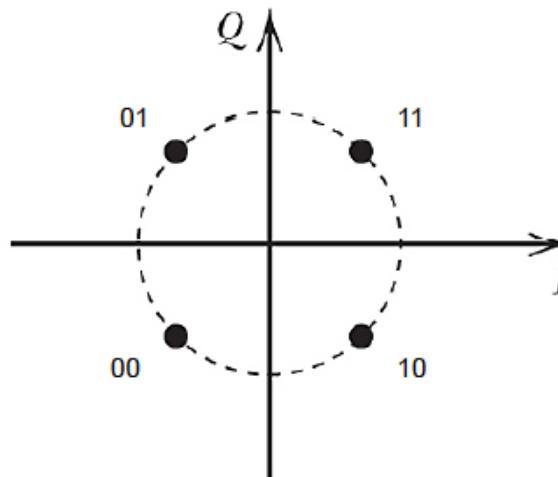
# Modulazione multilivello di fase

□ Esempio PSK:

- Flusso di bit in ingresso è diviso in gruppi di  $\log_2(N)$
- Si usano **N simboli** diversi (con fasi diverse)
- Ogni simbolo è composto da  $n=\log_2(N)$  bit

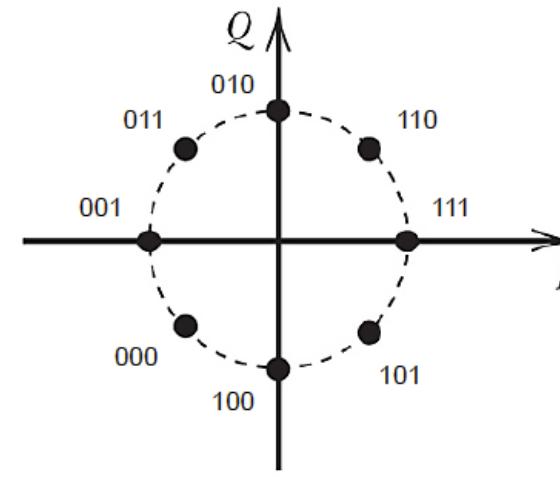
□ QPSK

- 4 simboli (valori di fase)
- 2 bit per simbolo

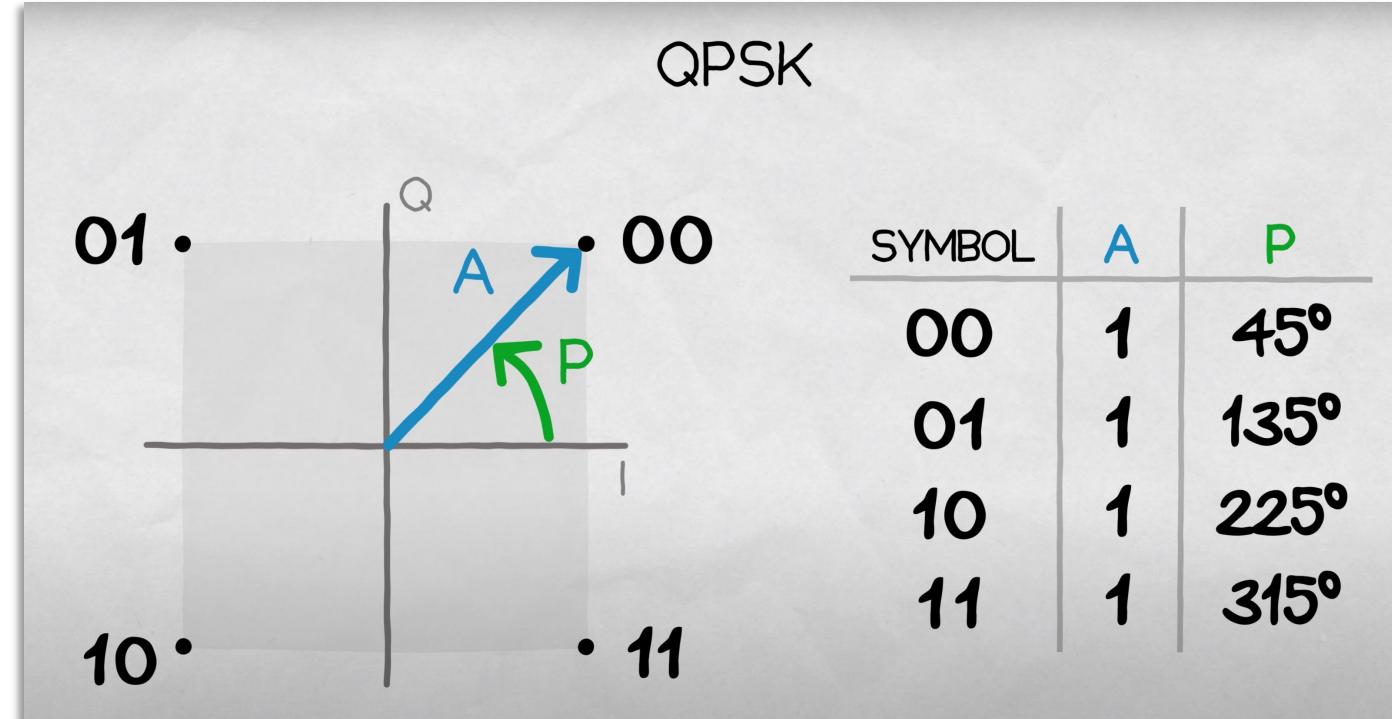
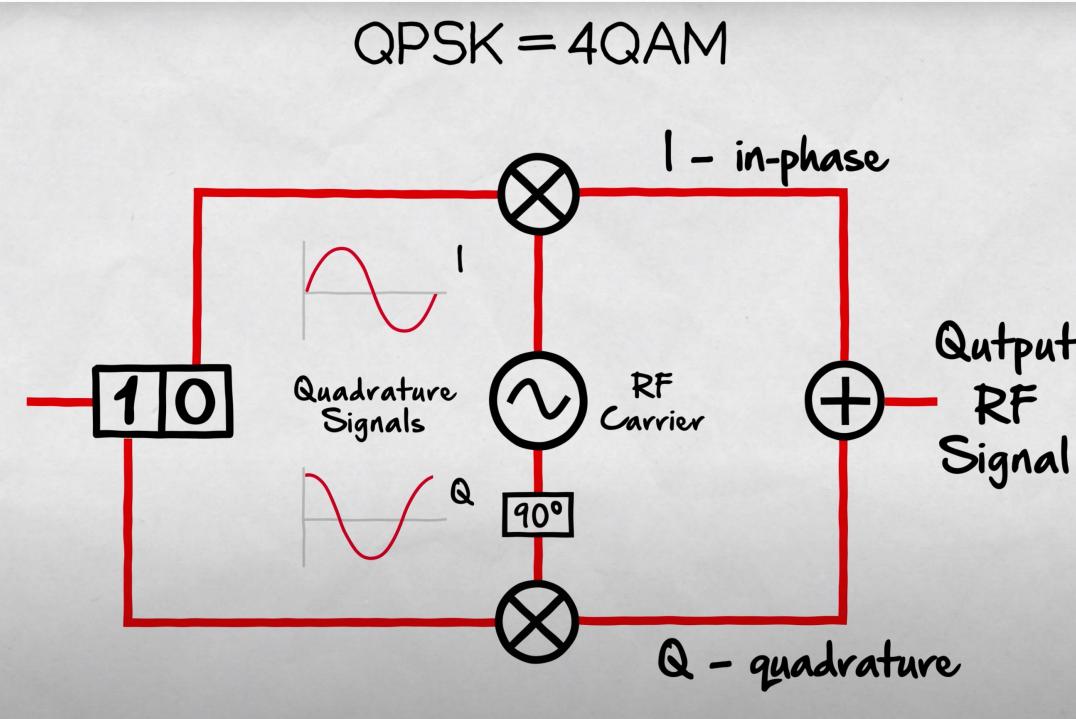


□ 8-PSK

- 8 simboli (valori di fase)
- 3 bit per simbolo



# Modulazione multilivello di fase



<https://www.youtube.com/watch?v=YnWCRUoTEAI>

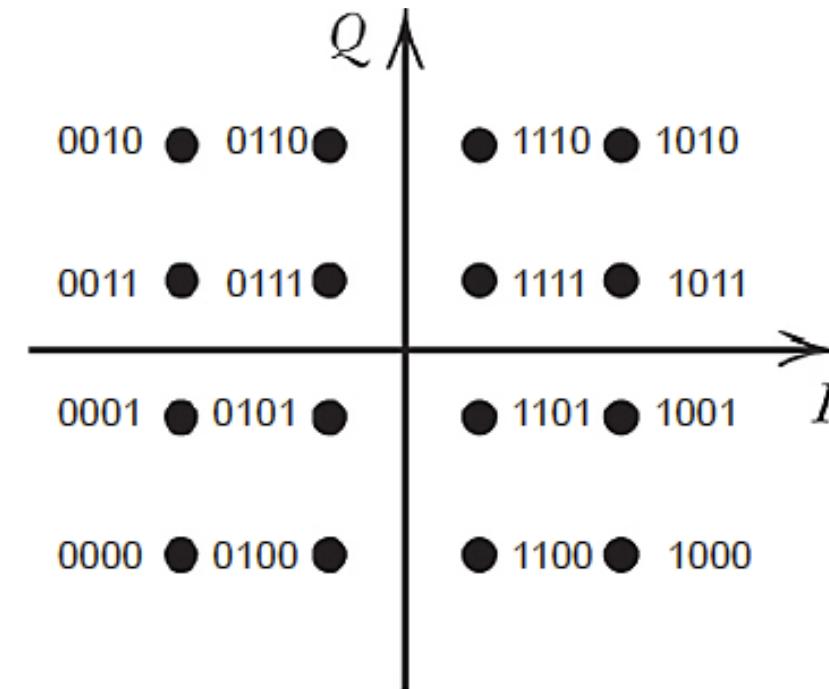
# Modulazione multilivello di ampiezza e fase

## ❑ Esempio QAM:

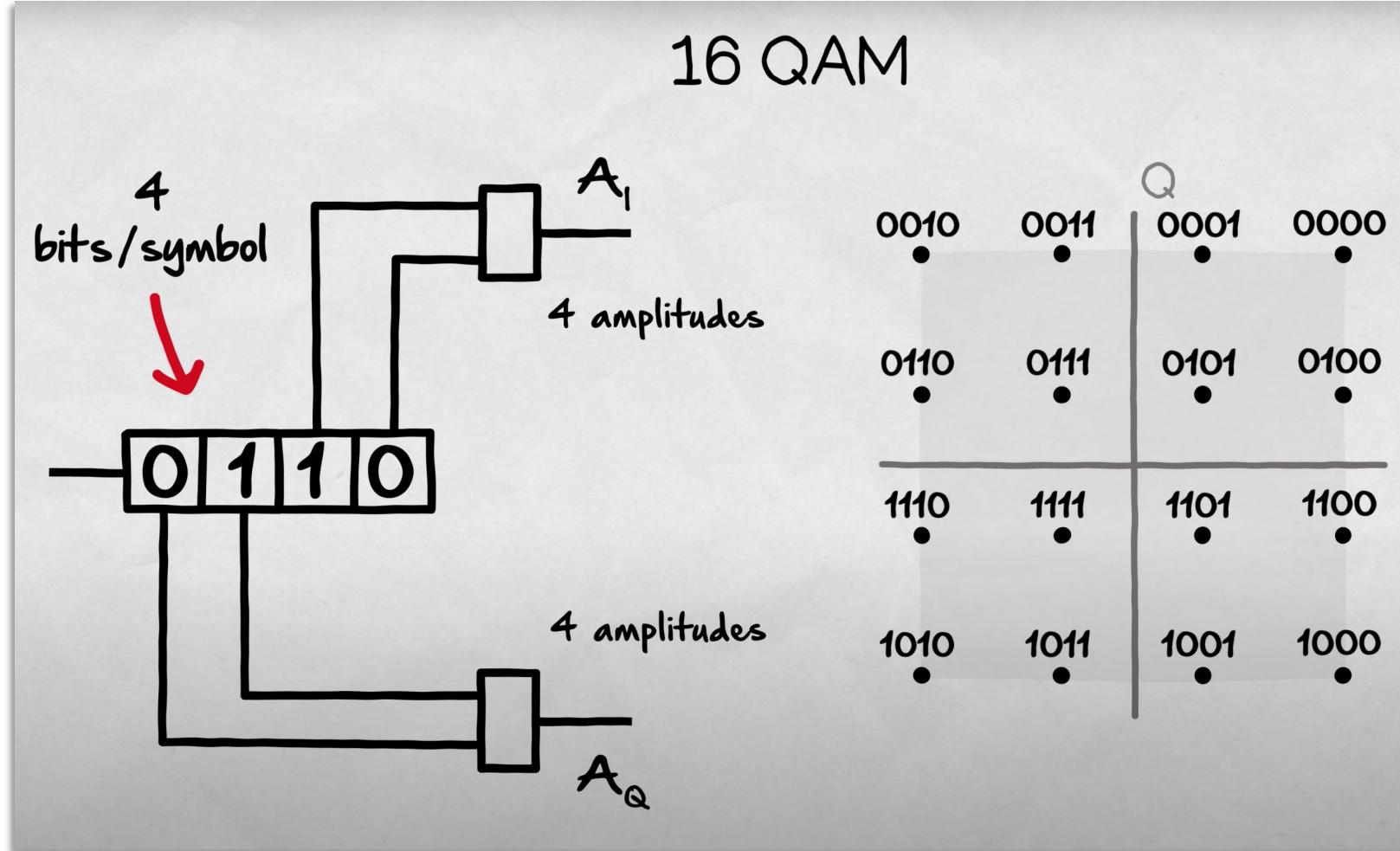
- ❑ Flusso di bit in ingresso è diviso in gruppi di  $\log_2(N)$
- ❑ Si usano N simboli diversi (con ampiezze e fasi diverse)
- ❑ Ogni simbolo è composto da  $n=\log_2(N)$  bit

## ❑ 16-QAM

- ❑ 16 simboli (combinazioni di ampiezza e fase)
- ❑ 4 bit per simbolo



# Modulazione multilivello di fase



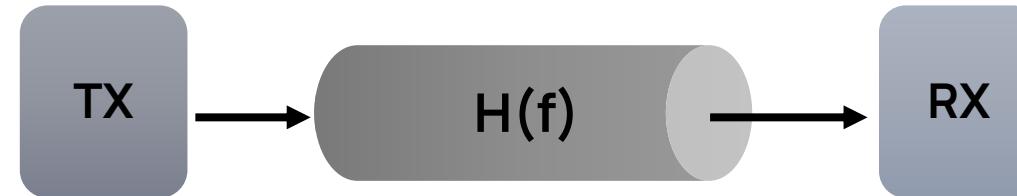
# CAPACITÀ DI CANALE

01

# Canale trasmittivo

- Il canale trasmittivo è l'insieme di:

- Trasmettitore **TX**
  - Mezzo trasmittivo
  - Ricevitore **RX**

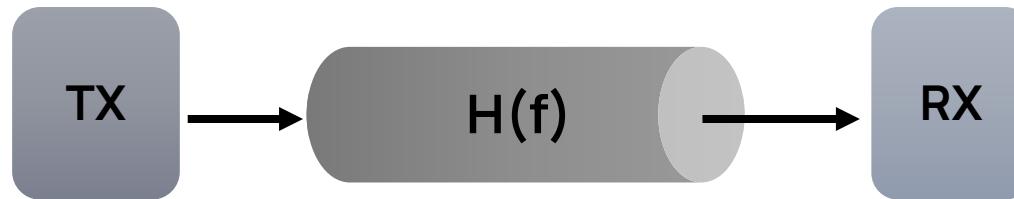


- È caratterizzato da:

- Una **velocità di trasmissione** (o **capacità**) **R** (in *bps* o *bit/s*) che dipende dalla banda del mezzo trasmittivo e dalla modulazione utilizzata;
  - E da un ritardo di propagazione del segnale  **$\tau$** .

# Canale trasmittivo

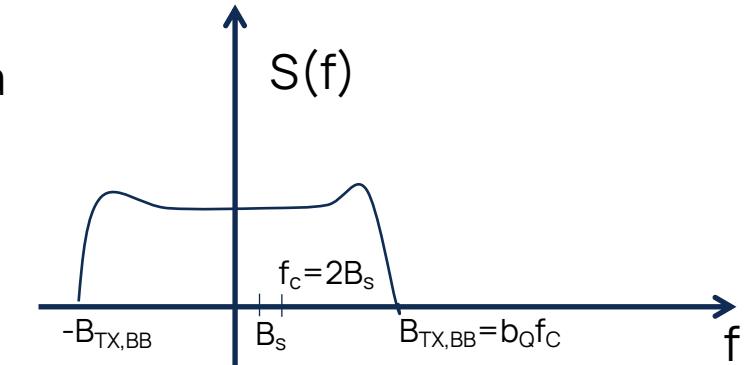
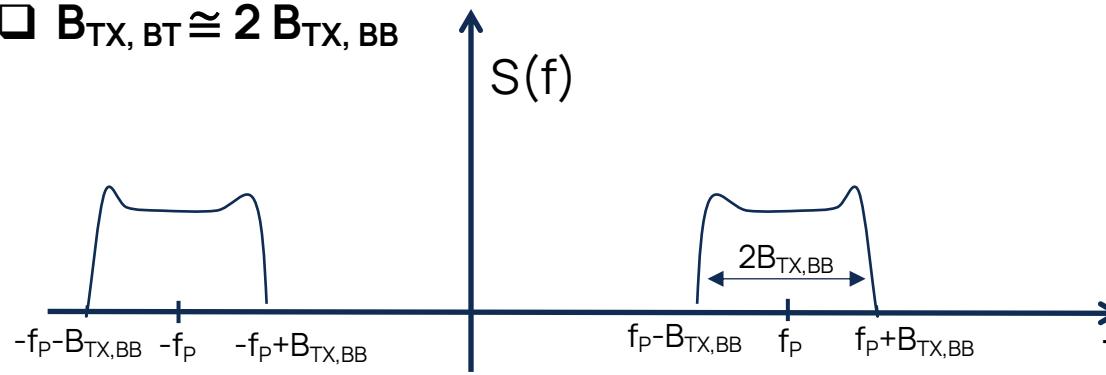
- Le alterazioni principali che il mezzo trasmittivo può introdurre sono:
  - l'**attenuazione** della potenza del segnale in funzione della distanza percorsa e della frequenza del segnale;
  - l'introduzione di un **ritardo** differente per ogni componente in frequenza del segnale (dispersione).



- 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 trasmittiva

- La banda trasmittiva (o banda di trasmissione) corrisponde allo spettro di frequenze necessario per il trasporto dell'informazione originale.
- Nel caso di modulazione in banda base, la banda trasmittiva è data dalla seguente relazione:
  - $B_{TX, BB} \approx b_Q f_C$ , dove  $b_Q$  rappresenta il numero di bit per livello di quantizzazione  $L_Q$  e  $f_C$  è la frequenza di campionamento
- Nel caso invece di modulazione in banda traslata, come indicato nell'immagine sottostante, la banda trasmittiva **raddoppia** (risultato fondamentale della teoria dell'analisi spettrale di Fourier):
  - $B_{TX, BT} \approx 2 B_{TX, BB}$



# Banda del canale

- Per quanto visto nella slide precedente, affinché un segnale sia ricevuto come è stato trasmesso, è necessario che la banda passante (o banda del canale) sia:
  - Uguale o più ampia della banda trasmissiva:  $B_c \geq B_{TX,BB}$  (MODULAZIONE IN BANDA BASE)
  - Uguale o più ampia del doppio della banda trasmissiva:  $B_c \geq 2B_{TX,BB}$  (MODULAZIONE IN BANDA TRASLATA)
- 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  $B_c$

□ Trasmissione **binaria**:

→ velocità di trasmissione massima  $R \approx B_c$  bit/s

□ Trasmissione **multilivello** con  $n$  bit per simbolo:

→ velocità di trasmissione massima  $R \approx nB_c$  bit/s

$$n = \log_2 N$$

$$N = 2^n$$

$N$  simboli

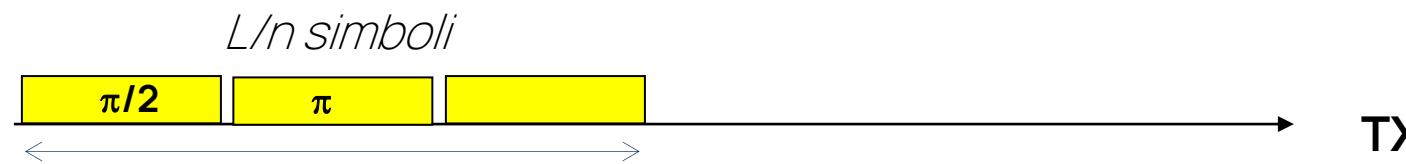
$n$  bit per simbolo

□ 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 modulazione multilivello a parità di banda passante del canale



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



- 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  $R/n$ :  $B \geq R/n$

# Errori di ricezione

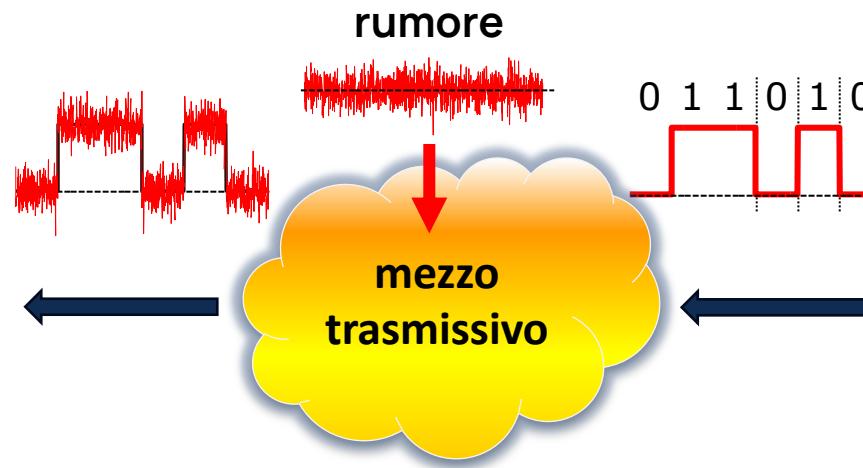
- In ricezione è possibile che venga riconosciuta una sequenza di bit diversa da quella trasmessa (bit errati)

**10011010100100100101000101000**  
**10001010100110100101000111000**

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

# Rumore

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



# Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

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