

# **Comunicazioni radio numeriche**

Ing. Nico Palermo, IV3NWV  
nicopal@microtelecom.it

# Sistemi di trasmissione analogici

- **A modulazione di ampiezza**
  - **AM**
    - Radiodiffusione in onde medie e corte
- **A modulazione di angolo**
  - **PM, FM**
    - Radiodiffusione nella banda 88 - 108 MHz
    - Comunicazioni terrestri punto a punto
    - Reti radio private
    - Telefonia radiomobile di I generazione (E-TACS)
- **A modulazione di ampiezza e angolo**
  - **SSB, VSB**
    - Comunicazioni radioamatoriali
    - Televisione bianco e nero

# Sistemi di trasmissione numerici

- **A modulazione di ampiezza**
  - **PAM, PCM**
    - Telefonia residenziale
    - Reti in fibra ottica (SONET, WDM)
- **A modulazione d'angolo**
  - **PSK, QPSK, OQPSK,  $\pi/4$  DQPSK, FSK, MSK, GMSK**
    - Comunicazioni via satellite
    - Telefonia radiomobile di II e III generazione (GSM, UMTS)
    - Reti radio mobili terrestri (TETRA)
    - Reti radio locali (WLAN 802.11, DECT, Blue-Tooth, HIPERLAN)
- **A modulazione di ampiezza e angolo**
  - **QAM, TCM, OFDM**
    - Ponti radio a microonde
    - Modem telefonici (V.29, V.32, V.33, ...)
    - Radiodiffusione (DAB)

# Criteri di valutazione

- **Potenza di trasmissione**
  - **Influisce sulla portata del sistema di comunicazione**
    - Sonde di esplorazione interplanetarie
    - Dispositivi portatili a batterie
    - Comunicazioni radioamatoriali
- **Efficienza spettrale**
  - **Quantità di informazione che può essere trasmessa per unità di banda (bit/s/Hz)**
  - **Limite alla velocità di trasmissione o al numero di utenti nella banda disponibile**
    - Modem telefonici
    - Telefonia radiomobile
- **Robustezza alle condizioni di propagazione**
  - **Sensibilità alle distorsioni introdotte da evanescenza, propagazione selettiva, cammini multipli, ecc...**
    - Sistemi di comunicazione radio terrestri

# Limiti teorici

- **Capacità di canale**

Legge di Shannon-Hartley:

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

C : Capacità del canale (bit/s)

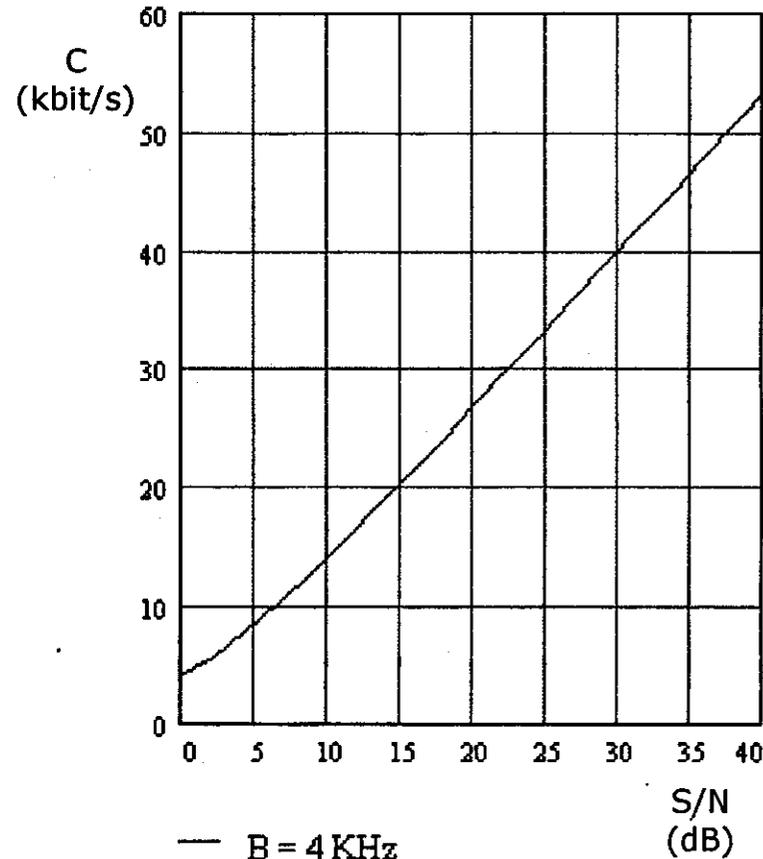
B : Banda occupata (Hz)

S : Potenza del segnale (W)

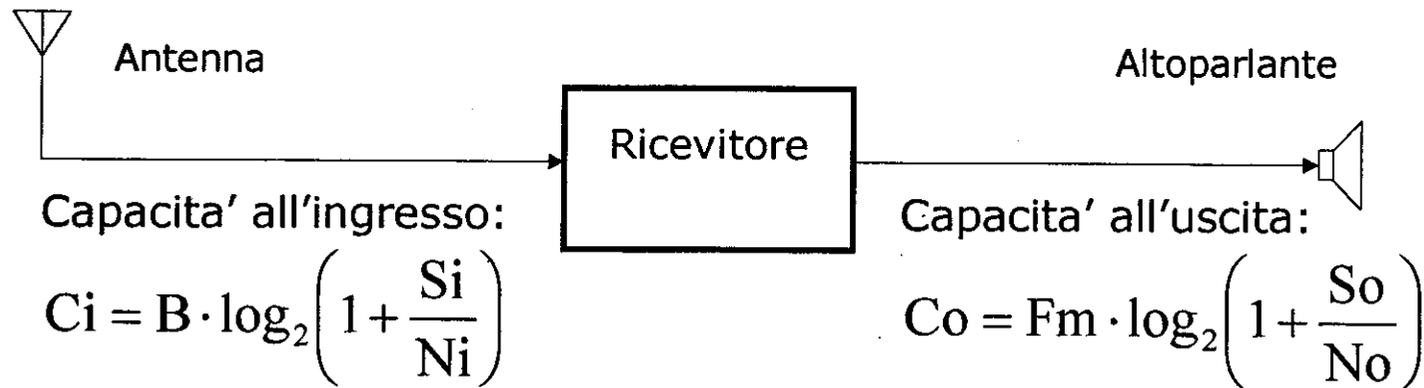
N : Potenza del rumore (W)

- Limite superiore alla quantità di informazione che può essere trasmessa in un canale di comunicazione affetto da rumore bianco additivo

Esempio: canale telefonico



# Il sistema ottimo

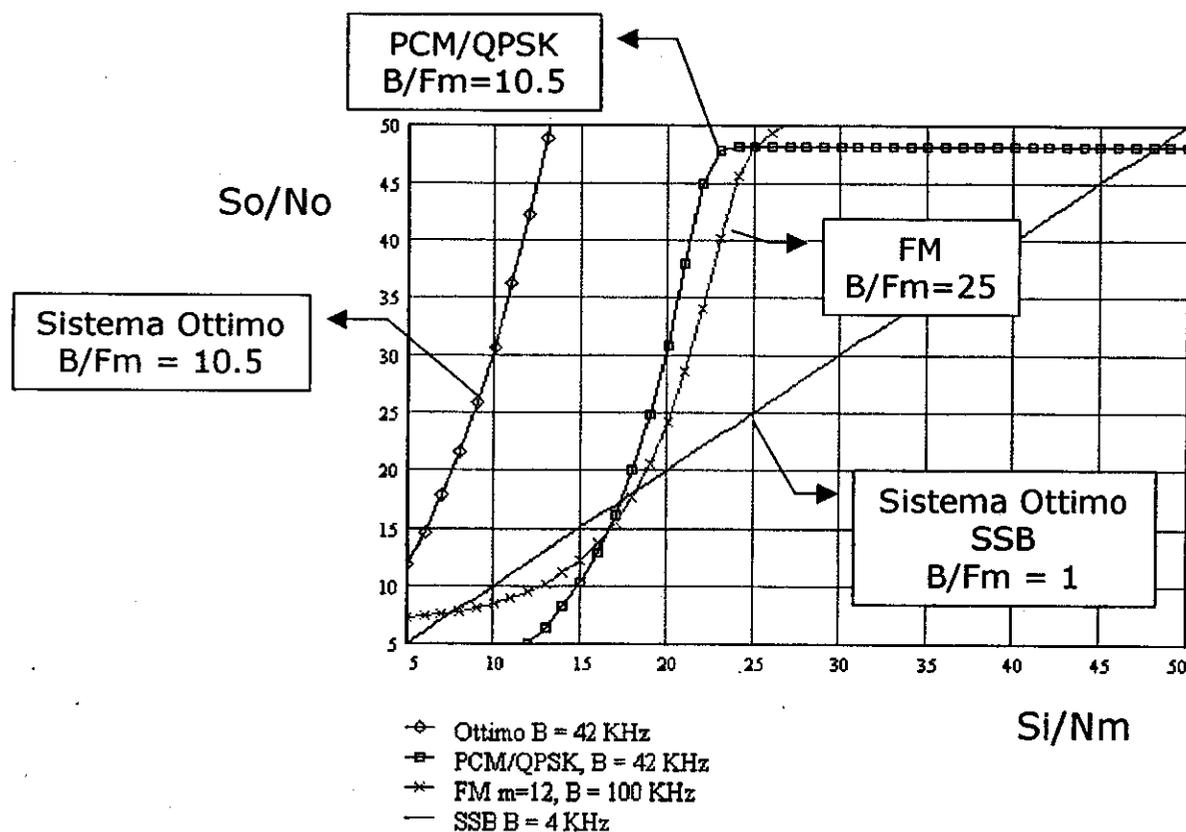


- Il sistema ottimo rilascia all'uscita tutta l'informazione che può essere ricevuta dall'ingresso ( $C_o = C_i$ )
- I sistemi di comunicazione reali hanno sempre prestazioni inferiori
- Le prestazioni del sistema ottimo dipendono da due parametri:
  - **B/Fm** = Espansione di banda
  - **Si/Nm** = Rapporto tra potenza **Si** del segnale ricevuto e la potenza **Nm** del rumore presente all'ingresso del ricevitore e calcolata nella banda **Fm** del segnale utile

$$\left( \frac{S_o}{N_o} \right)_{\text{Opt}} = \left( 1 + \frac{F_m}{B} \cdot \frac{S_i}{N_m} \right)^{\frac{B}{F_m}} - 1$$

# Analogico e numerico a confronto (1)

Rapporto Segnale/Rumore all'uscita del ricevitore  
in funzione del rapporto Segnale/Rumore all'ingresso del demodulatore  
in sistemi SSB, FM e PCM



# Analogico e numerico a confronto (2)

## Obiettivo: Qualita' telefonica

Rapporto Segnale/Rumore desiderato  $S_o/N_o = 48$  dB

Sistema di trasmissione	Tipo	Rapporto $S_i/N_m$	Banda occupata	Portata a parita' di potenza	Potenza a parita' di portata
<b>SSB</b> Portante soppressa $B/F_m = 1$	Analogico	48 dB	4 KHz	1 Km	1 W
<b>FM</b> $\Delta f/F_m = 12$ $B/F_m = 25$	Analogico	25 dB	100 KHz	14 Km	5 mW
<b>PCM,</b> QPSK, 8 bit/sample $B/F_m = 10.5$	Numerico	23 dB	42 KHz	18 Km	3 mW
<b>Ottimo</b> $B/F_m = 10.5$		13 dB	42 KHz	56 Km	300 $\mu$ W

# Analogico e numerico a confronto (3)

## Qualche conclusione

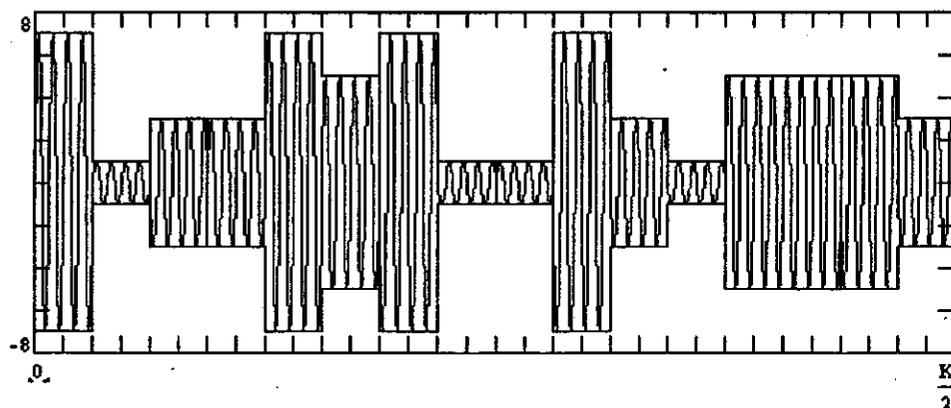
- Il sistema di trasmissione SSB e' **ottimo**:
  - Non esiste altro sistema numerico o analogico che uguagli le sue prestazioni **a parità di banda occupata** ( $B/F_m = 1$ ) e di potenza di trasmissione
- Occupazione di banda e potenza di trasmissione sono obiettivi in contrasto:
  - un utilizzo di banda maggiore a quello strettamente necessario ( $B/F_m > 1$ ) consente di risparmiare potenza di trasmissione,
  - una maggior potenza di trasmissione consente di risparmiare l'occupazione di banda
- La modulazione FM non e' un sistema di trasmissione ottimo
  - Un sistema numerico PCM e' migliore di un sistema FM:
    - A parità di qualità occupa meno della metà della banda
    - A parità di qualità richiede una potenza di trasmissione inferiore
- I sistemi numerici promettono un utilizzo più efficiente della banda e della potenza a disposizione

# Sistemi numerici PAM (ASK) (1)

- L'informazione da trasmettere viene codificata nell'**ampiezza** della portante (**P**ulse **A**mplitude **M**odulation o anche **A**mplitude **S**hift **K**eying)
- A ogni livello viene associata un'unica sequenza di bit di informazione, Esempio: PAM a quattro livelli
  - -3 V -> 00
  - -1 V -> 01
  - 1 V -> 11
  - 3 V -> 10
- All'aumentare del numero dei livelli ammessi e a parità di velocità di trasmissione e di potenza ricevuta:
  - Diminuisce l'occupazione di banda (meno livelli al secondo da trasmettere)
  - Diminuisce la tolleranza al rumore (minor distanza tra i livelli)

## Sistemi numerici PAM (2)

**Andamento di un segnale 8-PAM nel tempo**



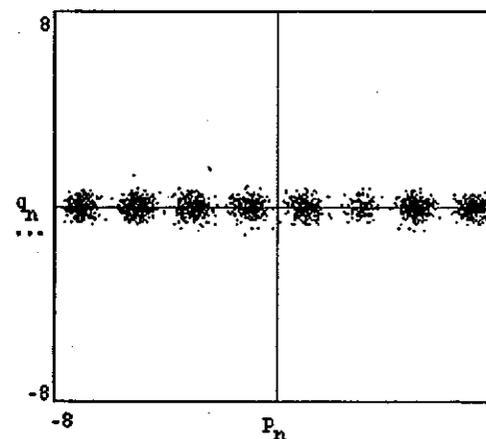
**Pro:**

- Semplicità realizzativa
- Efficiente occupazione di banda per gli schemi a molti livelli

**Contro:**

- Negli schemi a molti livelli scarsa tolleranza al rumore e necessita' di una grande linearità del trasmettitore

**Costellazione 8-PAM in presenza di rumore**

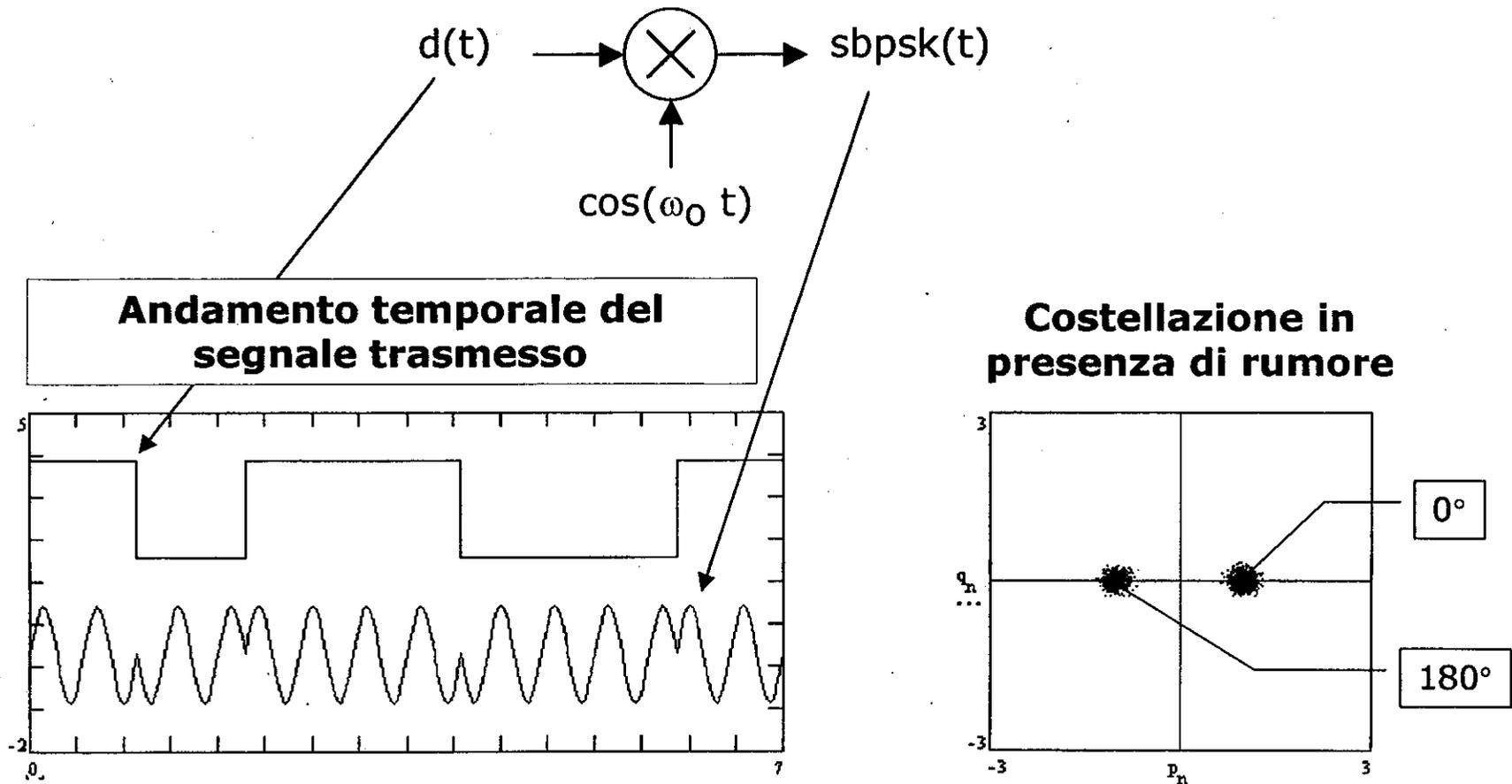


# Sistemi numerici PSK

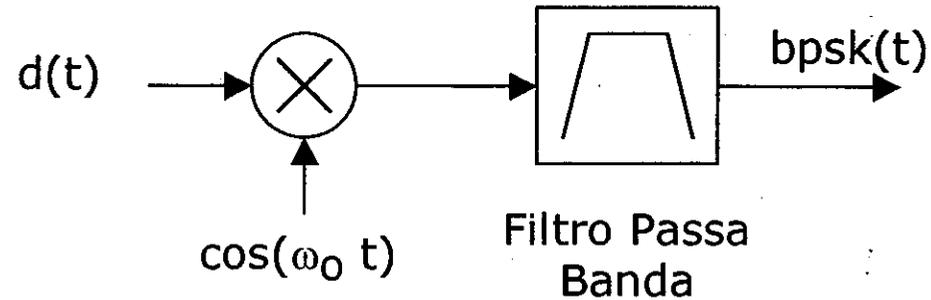
- L'informazione da trasmettere viene codificata nella **fase** della portante (**Phase Shift Keying**)
- A ogni fase viene associata un'unica combinazione di bit di informazione. Esempi:
  - **BPSK** = PSK binaria ( $0^\circ - 180^\circ$ ) => 1 bit/fase
  - **QPSK** = PSK quaternaria ( $45^\circ - 135^\circ - 225^\circ - 315^\circ$ ) => 2 bit/fase
  - **M-PSK** = PSK a M fasi => 8-PSK = 8 fasi => 3 bit/fase
- All'aumentare delle fasi ammesse e a parità di velocità di trasmissione e di potenza ricevuta:
  - Diminuisce l'occupazione di banda (meno fasi al secondo),
  - Diminuisce la tolleranza al rumore (minor "distanza" tra le fasi)

# Sistemi numerici BPSK

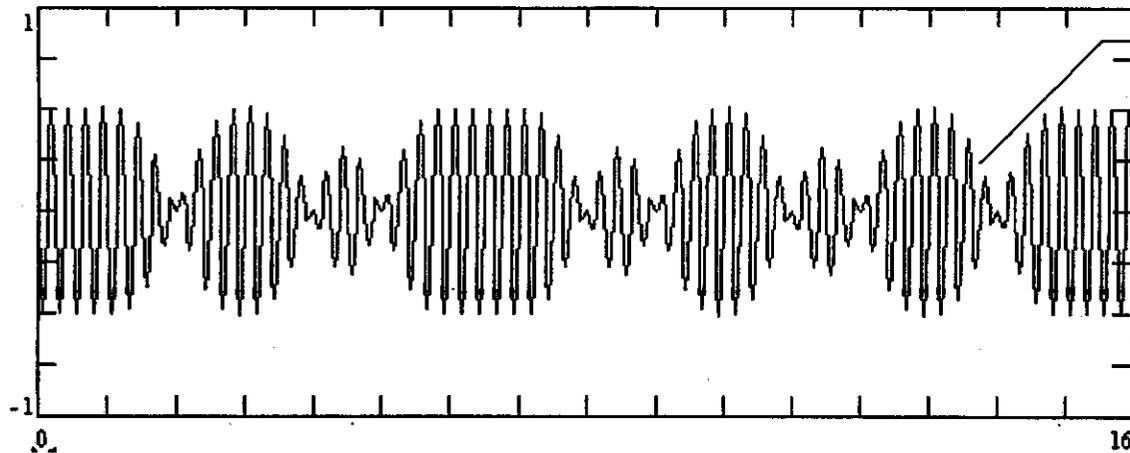
## Schema di principio del modulatore



# BPSK in pratica



## Andamento temporale del segnale filtrato

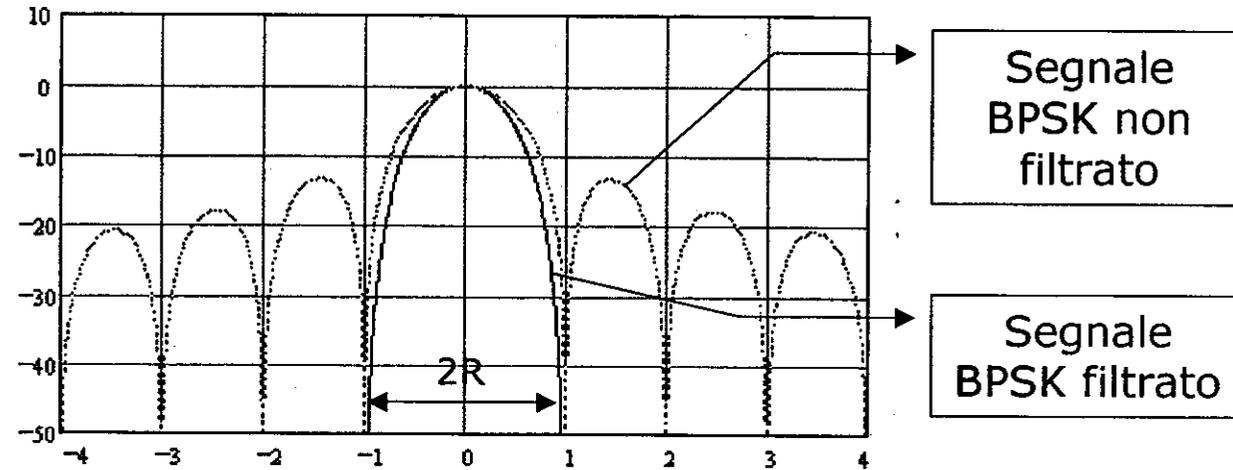


Il filtraggio causa  
ampie variazioni di  
inviluppo.

E' necessario  
utilizzare un  
trasmettitore  
**lineare**

# Pro e contro BPSK

## Spettro di un segnale BPSK



### Pro:

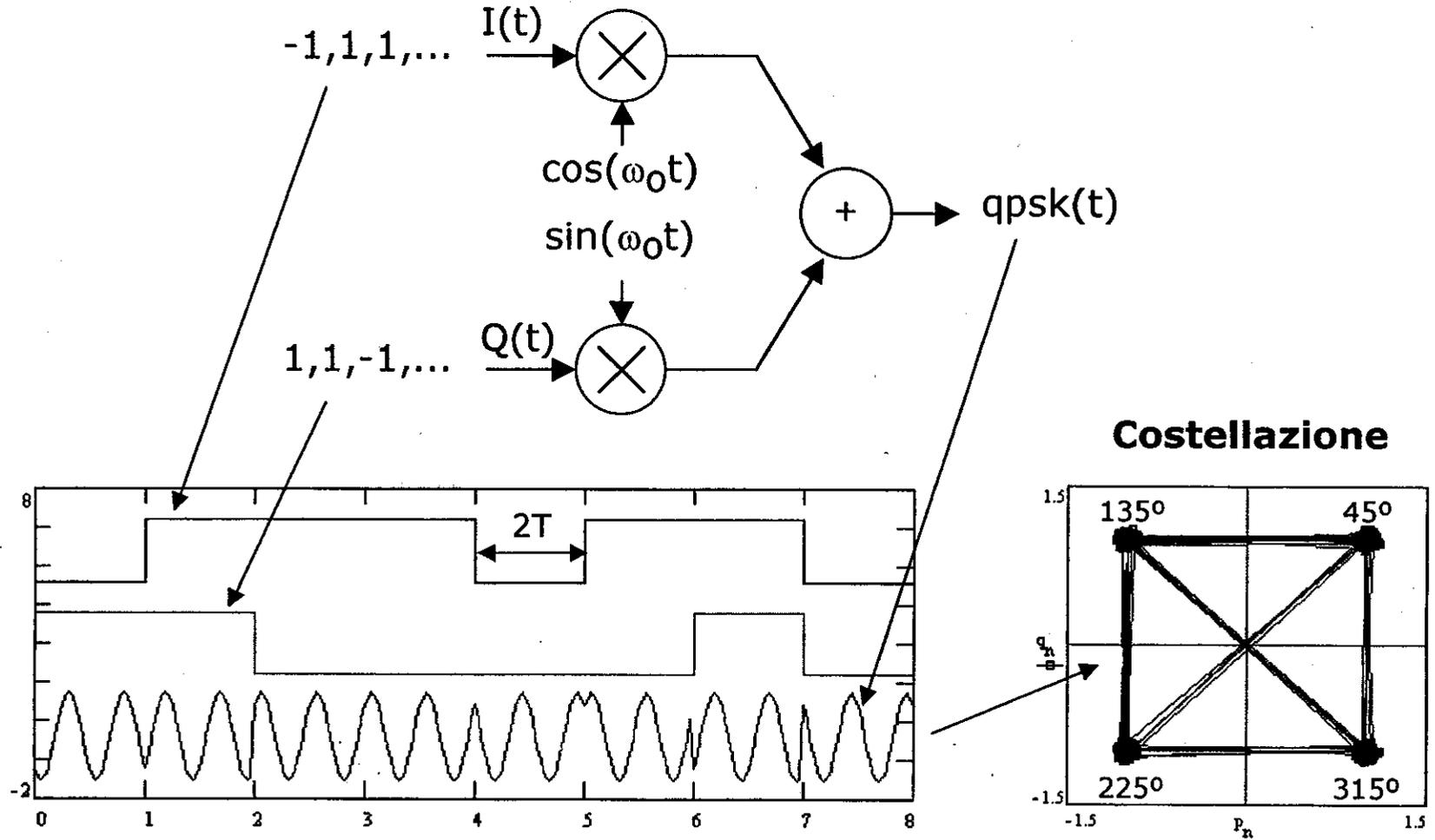
- Realizzazione relativamente semplice
- Ottima immunità al rumore

### Contro:

- Efficienza di banda modesta ( in pratica non superiore a 0.7 bit/s/Hz)
- Variazioni di inviluppo molto ampie e necessità di amplificatori di potenza lineari a evitare la degradazione dell'efficienza spettrale

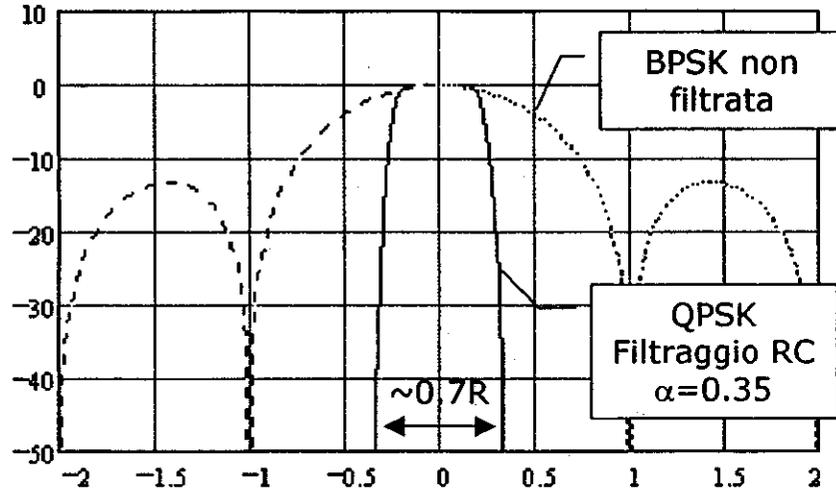
# Sistemi numerici QPSK

## Schema di principio del modulatore

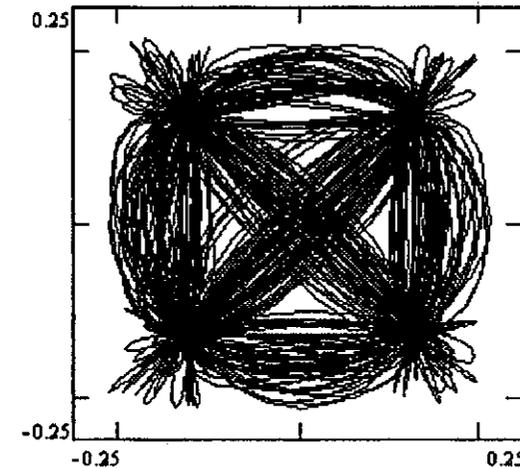


# Pro e contro QPSK

## Occupazione spettrale



## QPSK con filtraggio RC $\alpha=0.35$



### Pro:

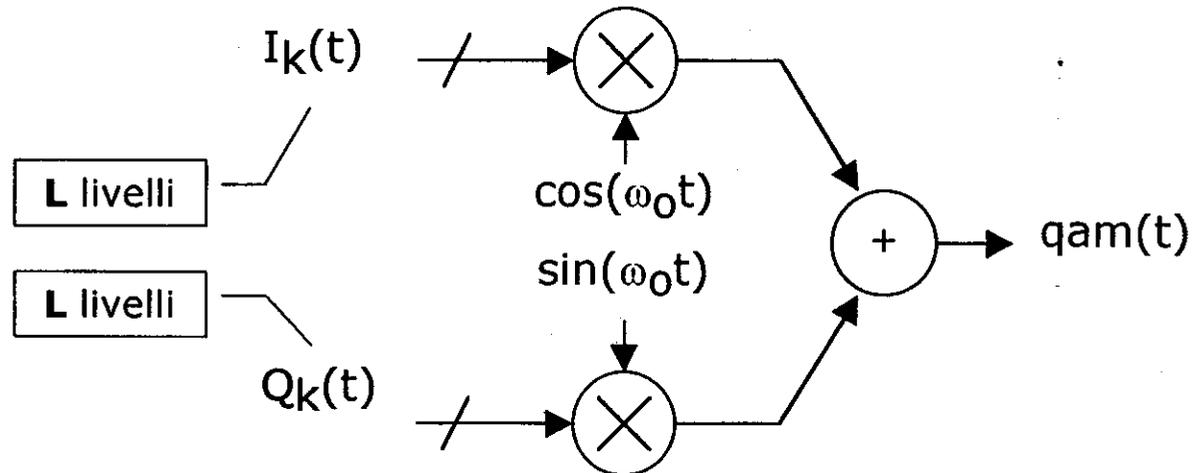
- Stessa immunità al rumore dei sistemi BPSK
- Efficienza di banda doppia rispetto ai sistemi BPSK ( $\sim 1,4$  bit/s/Hz)

### Contro:

- Come nei sistemi BPSK, l'involuppo e' affetto da fluttuazioni molto ampie. Necessita' di amplificatori di potenza lineari a evitare il degrado dell'efficienza spettrale

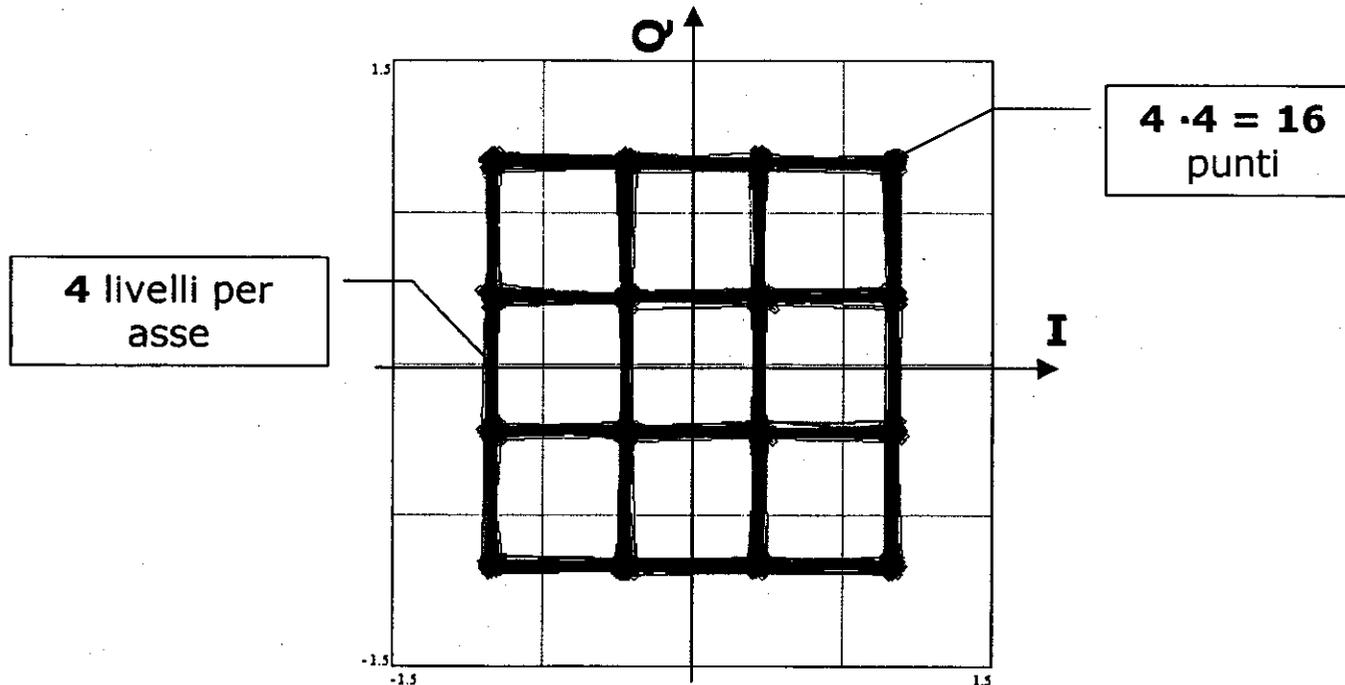
# Sistemi numerici QAM

## Schema di principio del modulatore



- Le componenti in fase e in quadratura della portante sono modulate in ampiezza (Quadrature Amplitude Modulation)
- Ognuno dei due segnali modulanti  $I_k$  e  $Q_k$  e' a  $L$  livelli equidistanti ( $\log_2(L)$  bit/livello)
- Ogni coppia  $(I_k, Q_k)$  codifica  $2 \cdot \log_2(L)$  bit:
  - QPSK e' un caso particolare di QAM ( $L=2 \Rightarrow 2$  bit/simbolo)
  - 16-QAM  $\Rightarrow L=4 \Rightarrow 4$  bit/simbolo
  - 64-QAM  $\Rightarrow L=8 \Rightarrow 6$  bit/simbolo
  - 256-QAM  $\Rightarrow L=16 \Rightarrow 8$  bit/simbolo

## Un esempio: 16-QAM

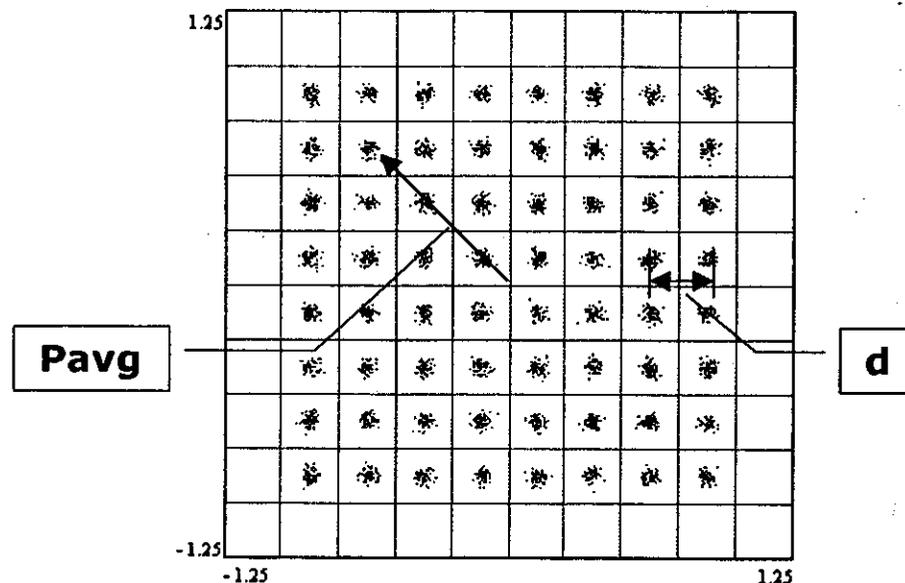


- Le coppie  $(I_k, Q_k)$  individuano  $L \cdot L$  punti (simboli) nel piano I-Q
- Ogni simbolo è identificato univocamente da 4 bit
- Poiché la banda occupata è legata alla durata dei simboli, l'efficienza di banda è 4 volte superiore di quella dei sistemi BPSK:

$$\mathbf{R/B = 2.8 \text{ bit/s/Hz}}$$

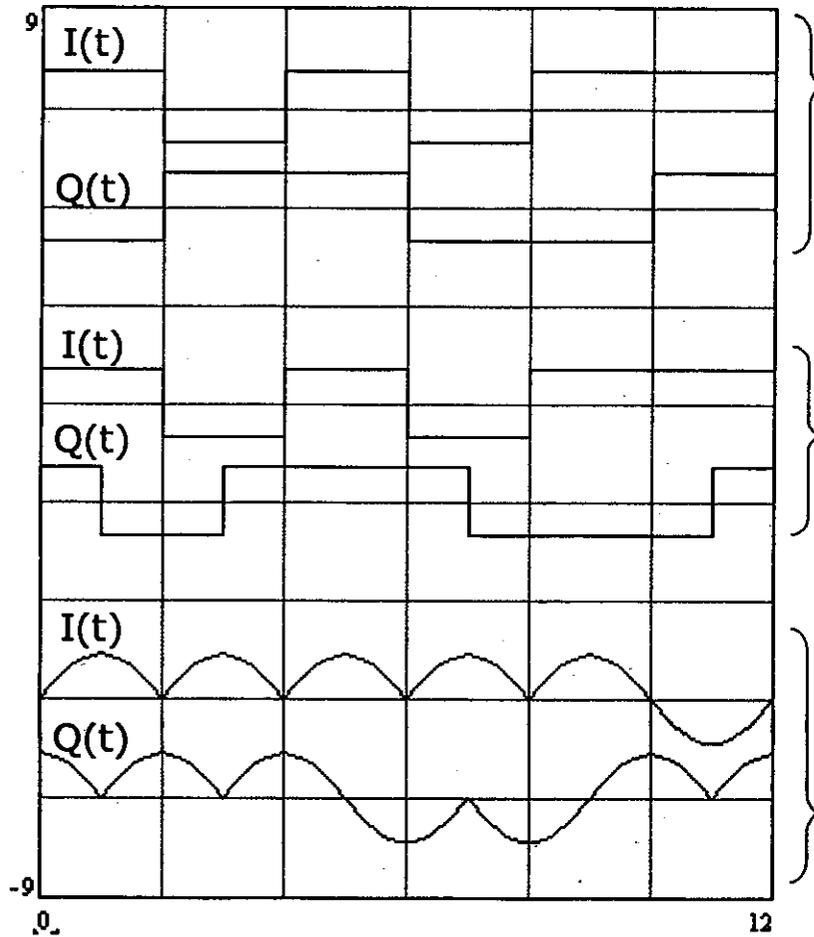
# Pro e contro QAM

## Segnale 64-QAM affetto da rumore



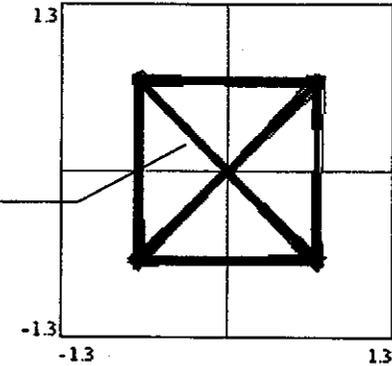
- **Pro**
  - L'efficienza di banda e' molto alta negli schemi a molti punti (da 4 a 6 bit/s/Hz per sistemi da 64 a 256 punti)
- **Contro**
  - Il rapporto tra distanza minima tra i simboli  $d$  e potenza media  $P_{avg}$  e' piccolo al crescere del numero dei punti nella costellazione
  - grande sensibilita' al rumore, ai disallineamenti del sistema, alle distorsioni del trasmettitore

# QPSK, OQPSK e MSK



## QPSK

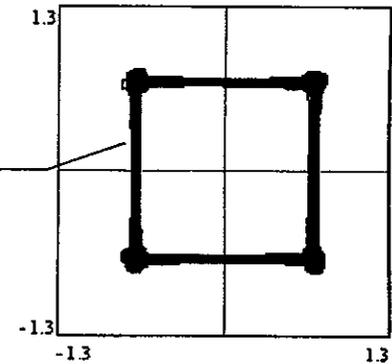
Variazioni di  
involuppo  
accentuate



## OQPSK

Offset QPSK

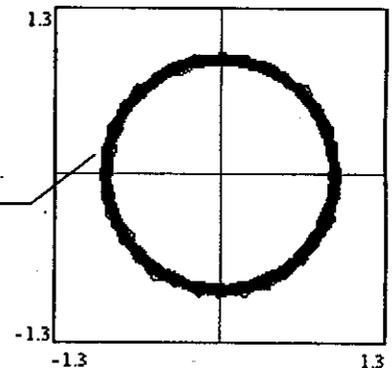
Variazioni di  
involuppo  
moderate



## MSK

Minimum  
Shift  
Keying

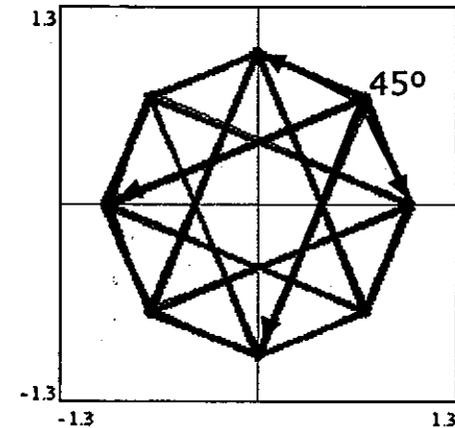
Nessuna  
variazione



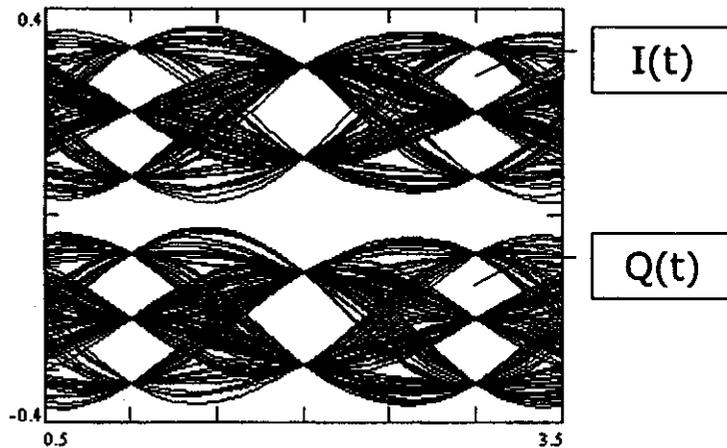
# $\pi/4$ DQPSK

- Sistema PSK quaternario (2bit/simbolo) a otto fasi
- Stessa efficienza spettrale della modulazione QPSK (1.4 bit/s/Hz), ma con minori fluttuazioni di inviluppo
- Richiede amplificatori di trasmissione lineari
- Usato nella telefonia radiomobile statunitense e nelle reti radio terrestri private (TETRA)

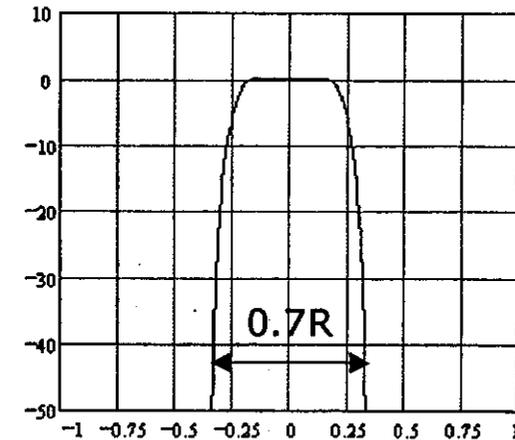
## Costellazione



## Segnali modulanti



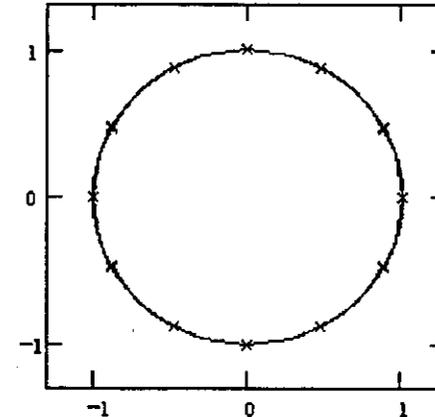
## Spettro



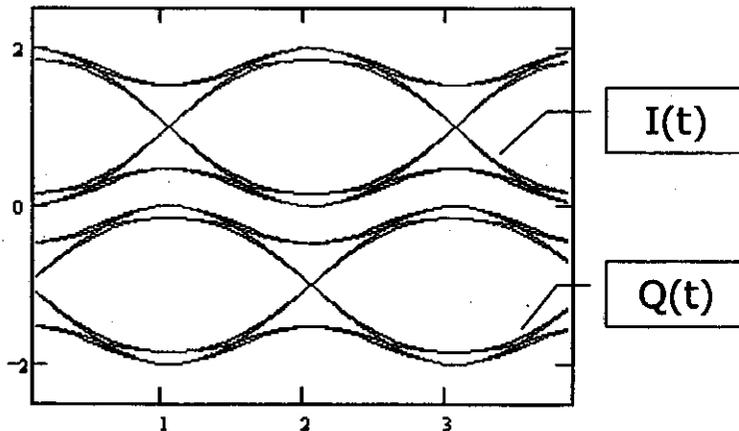
# GMSK

- Sistema MSK con filtraggio **G**aussiano
- L'efficienza spettrale (0.8 bit/s/Hz) e' inferiore a quella della modulazione  $\pi/4$  DQPSK
- L'inviluppo e' di ampiezza **costante**
- E' possibile usare amplificatori di trasmissione saturati (risparmio di alimentazione)
- Usato nella telefonia radiomobile europea (GSM)

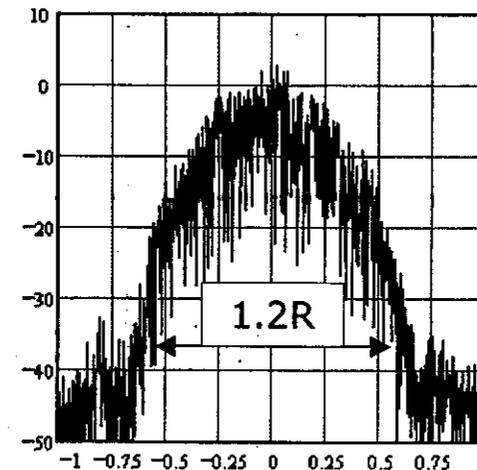
## Costellazione



## Segnali modulanti



## Spettro

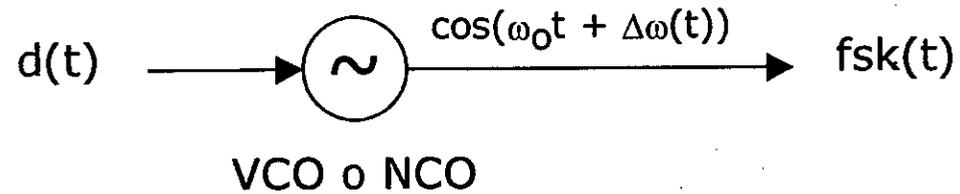


# Sistemi FSK

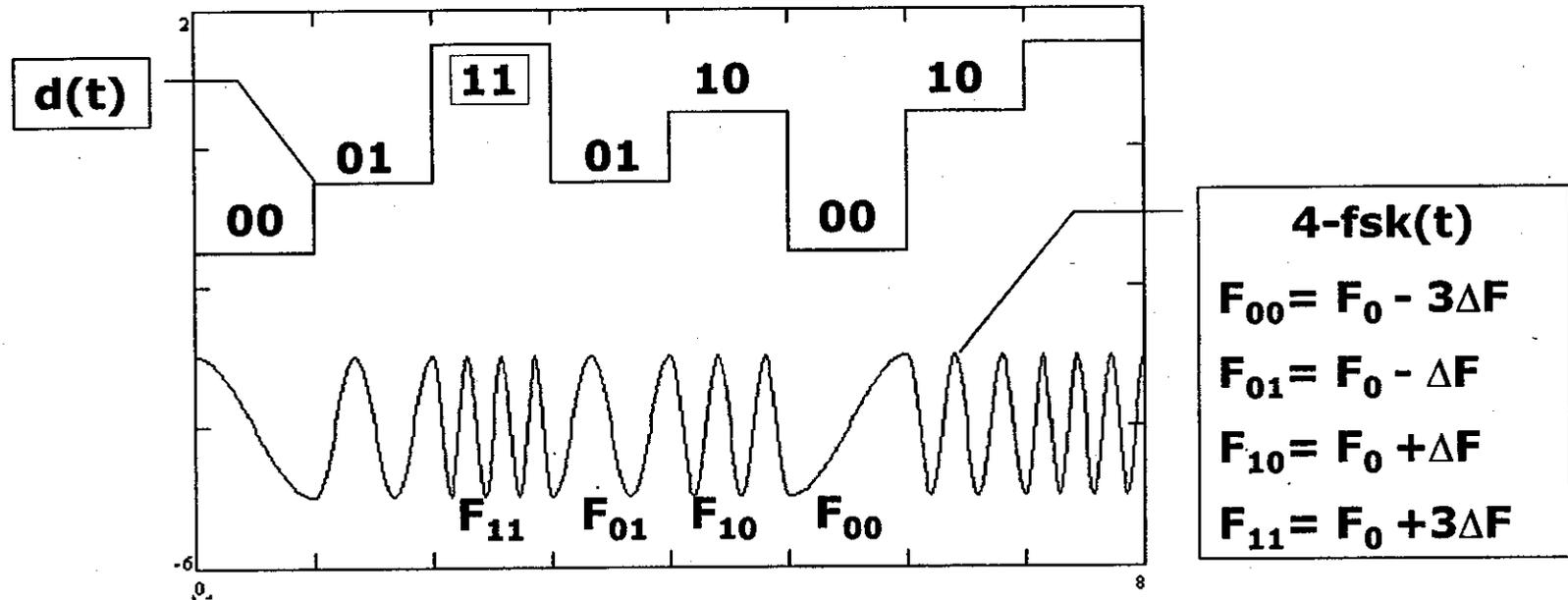
- L'informazione da trasmettere viene codificata nella **frequenza** della portante (**F**requency **S**hift **K**eying)
- A ogni frequenza viene associata un'unica combinazione di bit di informazione
  - **2-FSK** = FSK binaria ( $F_0 - \Delta f, F_0 + \Delta f$ ) => 1 bit/frequenza
  - **4-FSK** = FSK quaternaria ( $F_0 - 3\Delta f, F_0 - \Delta f, F_0 + \Delta f, F_0 + 3\Delta f$ ) => 2 bit/frequenza
  - **M-FSK** = FSK a M frequenze => 16-FSK = 16 frequenze => 4 bit/frequenza
- L'inviluppo e' costante
- All'aumentare delle frequenze ammesse e a parità di velocità di trasmissione e di potenza ricevuta, al contrario dei sistemi ASK e PSK:
  - **Aumenta** l'occupazione di banda !!!
  - **Aumenta** la tolleranza al rumore !!!

# FSK in pratica

## Schema di principio di un modulatore FSK



## Andamento temporale di un segnale 4-FSK



# Banda dei segnali FSK

- Il tasso di trasmissione dei toni (simboli)  $R_s$  e' tanto inferiore quanto maggiore e' il numero  $N$  dei simboli ammessi:

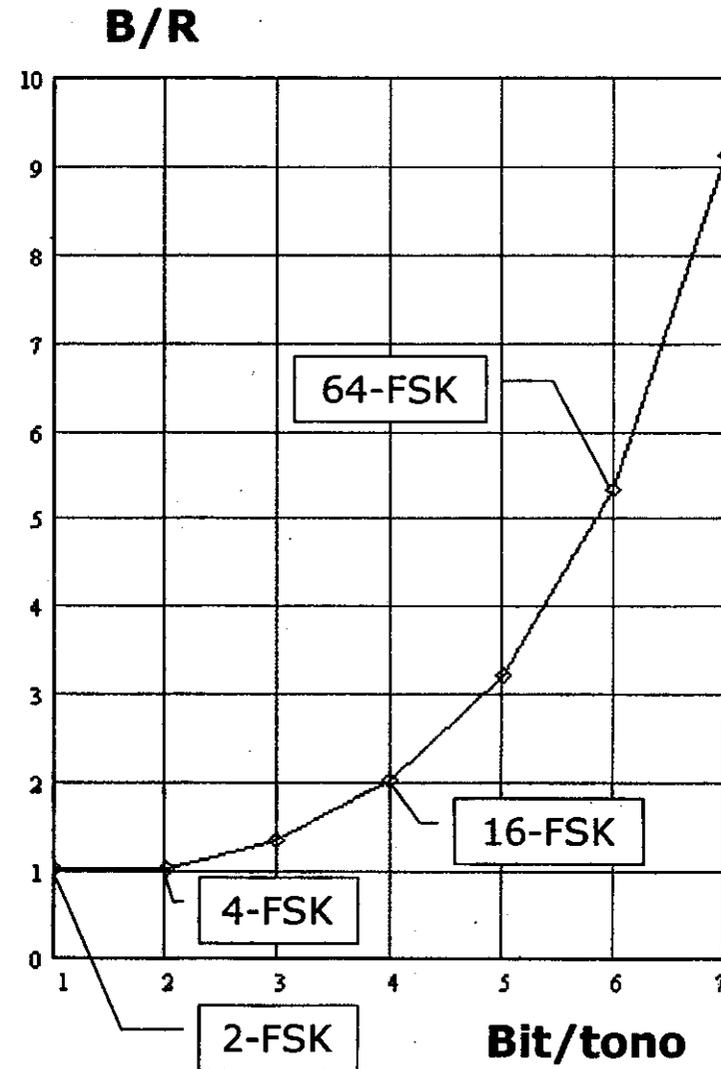
$$R_s = R / \log_2(N)$$

- Per una ricezione ottima (demodulazione coerente) la spaziatura tra i toni non puo' essere inferiore al valore minimo:

$$2\Delta F = 0.5 R_s$$

- La banda totale occupata, pari a  $2\Delta F N$ , cresce con il numero  $N$  dei simboli ammessi:

$$B/R \geq 0.5 N / \log_2(N)$$



# Pro e contro FSK

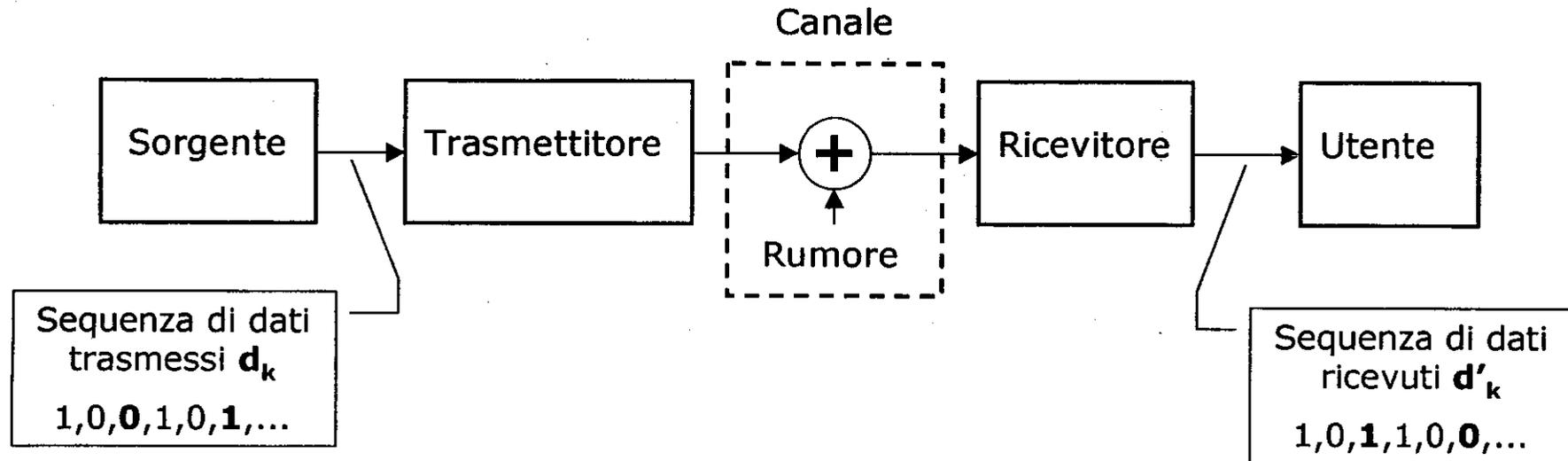
- **Pro**

- I sistemi binari sono i piu' semplici sistemi di trasmissione (demodulazione a discriminazione di frequenza)
- Al crescere del numero dei livelli (toni) aumenta l'immunita' al rumore (demodulazione coerente o incoerente)
- Per  $M \rightarrow \infty$  la potenza di trasmissione necessaria a ottenere una qualita' prefissata e' inferiore a qualsiasi altro sistema
  - Gli schemi a 256 livelli sono stati utilizzati in passato nelle sonde interplanetarie (Es. Voyager):
  - Distanza minima Giove-Terra  $\sim 670.000.000$  Km
  - Distanza minima Saturno-Terra  $\sim 1.350.000.000$  Km !!!

- **Contro**

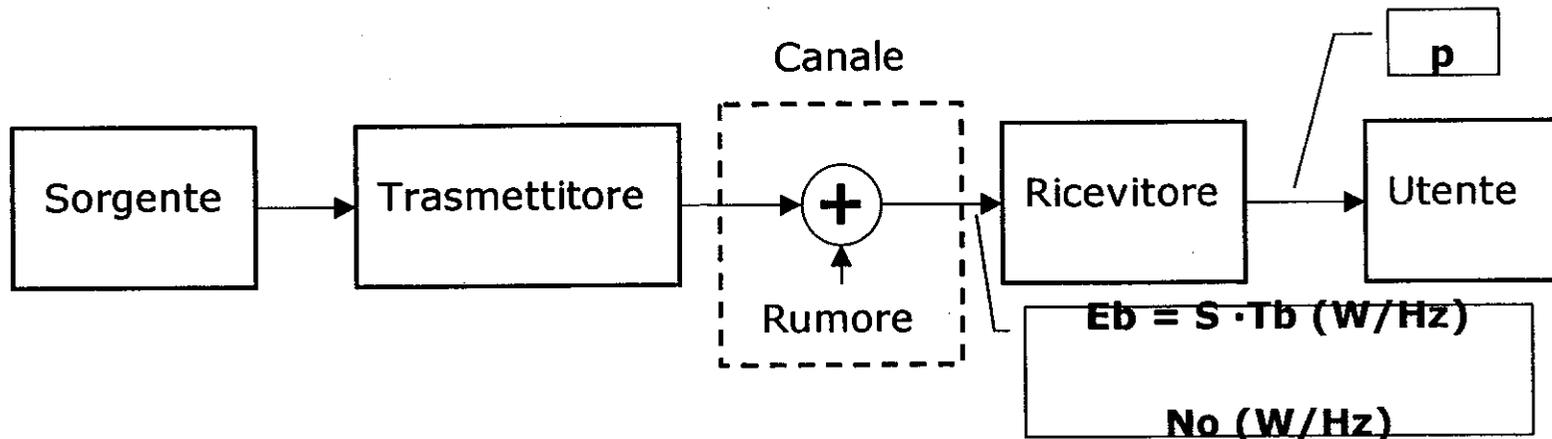
- L'efficienza spettrale e' bassa e tende a zero all'aumentare del numero dei livelli
- I sistemi a molti livelli richiedono un demodulatore molto complesso (un correlatore per ogni livello trasmesso):
  - 256 livelli => 256 correlatori => 512 miscelatori, 512 filtri !!!

# Immunita' al rumore



- A causa del rumore la sequenza ricevuta puo' differire da quella trasmessa (errori di decodifica)
- In un canale radio il rumore di origine termica si somma al segnale ricevuto (rumore bianco additivo e gaussiano) e gli errori nella sequenza ricevuta sono casuali
- La probabilita'  $p$  di errata decodifica di un bit (o BER da Bit Error Rate = Tasso di errore sui bit) e' un importante parametro di valutazione del sistema di comunicazione in esame

# Probabilità di errore



- La probabilità di errore **p** è funzione decrescente del rapporto tra l'energia associata a ogni bit **E<sub>b</sub>** e la potenza di rumore nell'unità di banda **N<sub>o</sub>** presenti all'ingresso del ricevitore:

$$p = f (E_b/N_o)$$

- L'energia associata a ogni bit è proporzionale alla potenza ricevuta **S** e alla durata del bit **T<sub>b</sub>** :

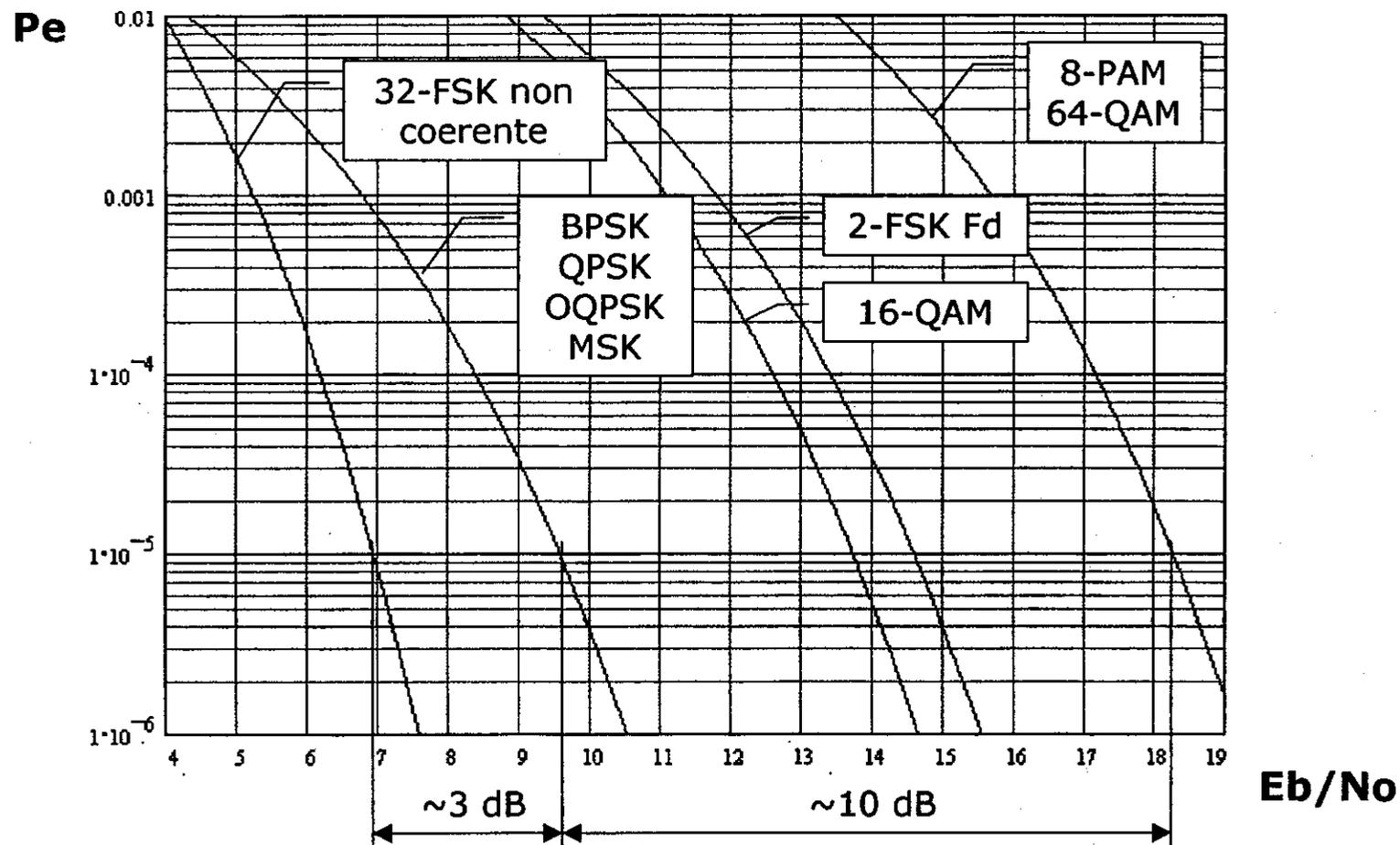
$$E_b = S \cdot T_b$$

- Maggiore velocità di trasmissione => minore durata dei bit trasmessi  
=> minore energia per bit => maggiore probabilità di errore:

**“Chi va piano va sano e lontano”**

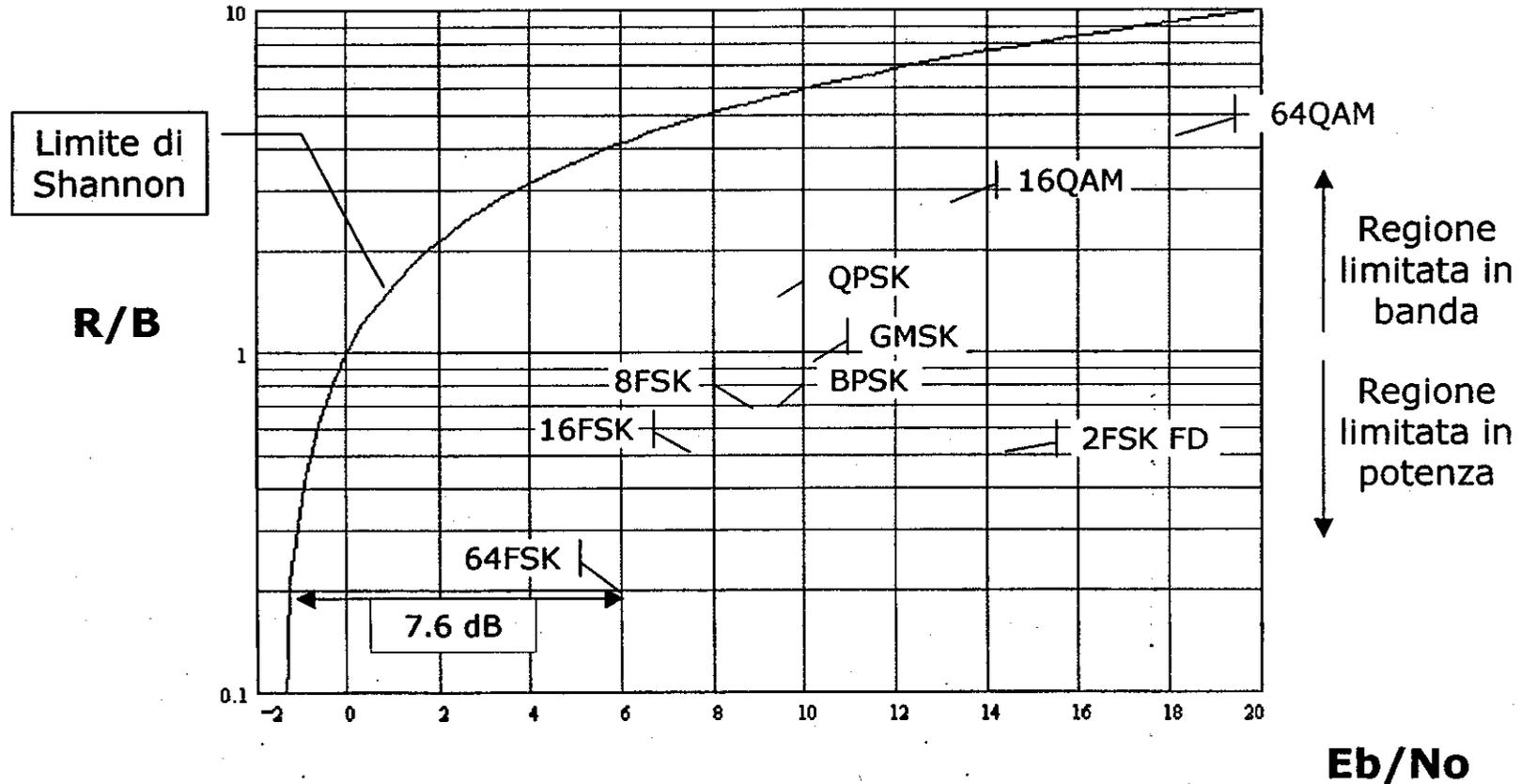
# Probabilità di errore

## Sistemi numerici a confronto



# Efficienza spettrale e potenza

Sistemi numerici a confronto ( $P_e=10^{-5}$ )



# Conclusioni

- I sistemi QAM sono i piu' idonei quando e' richiesta un'alta efficienza spettrale:
  - Ponti radio ad alta capacita'
  - Modem telefonici (TCM)
- I sistemi FSK sono i piu' idonei quando e' richiesta una bassa potenza di trasmissione:
  - Sonde spaziali
  - Dispositivi a basso consumo
- I sistemi binari o quaternari (BPSK, QPSK, GMSK) realizzano un compromesso tra semplicita' realizzativa, banda occupata e potenza di trasmissione (ma sono lontani dal limite della capacita' del canale)

## Per chi ne vuole sapere di piu' ...

- H. Taub, I. Schilling - Principles of Communication Systems (II edition) McGraw-Hill International Editions, 1986
- S. Benedetto, E. Biglieri, V. Castellani - Digital Transmission Theory - Prentice Hall International Editions, 1987
- W. Webb, L. Hanzo - Modern Quadrature Amplitude Modulation - IEEE Press, 1994
- K. Feher - Wireless Digital Communications - Prentice Hall International Edition, 1995
- L. Larson - RF and Microwave Circuit Design for Wireless Communications - Artech House Publishers, 1996