

Teoria dei Segnali – Modulazione digitale

Valentino Liberali

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Milano
valentino.liberali@unimi.it



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO

Teoria dei Segnali – Modulazione digitale – 29 novembre 2010

Contenuto

- 1 Modulazione digitale
- 2 Modulazione di ampiezza
- 3 Modulazione di frequenza
- 4 Modulazione di fase
- 5 Simbolo
- 6 Diagrammi dei segnali
- 7 Modulazioni multidimensionali
- 8 Modulazione con memoria

Modulazione digitale (1/2)

Un segnale è modulato in modo digitale quando la modulante è un segnale digitale. In ogni caso, la portante è una sinusoide alla frequenza f_c , quindi il segnale modulato è analogico.

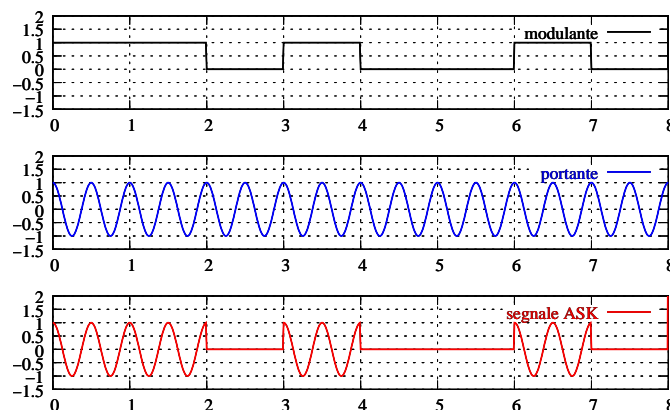
- Modulazione di ampiezza: l'ampiezza (istantanea) è proporzionale al valore digitale della modulante.
- Modulazioni di frequenza e di fase: l'ampiezza del segnale modulato è costante; la frequenza o la fase dipendono dal valore digitale della modulante.
- Modulazioni miste (ampiezza e frequenza o fase): sia l'ampiezza, sia la frequenza o la fase dipendono dal valore digitale della modulante.

Modulazione di ampiezza (ASK) (1/3)

modulante: sequenza di bit [1 1 0 1 0 0 1 0];

portante: $p(t) = \cos 2\pi f_c t$

segnale ASK (Amplitude Shift Keying)



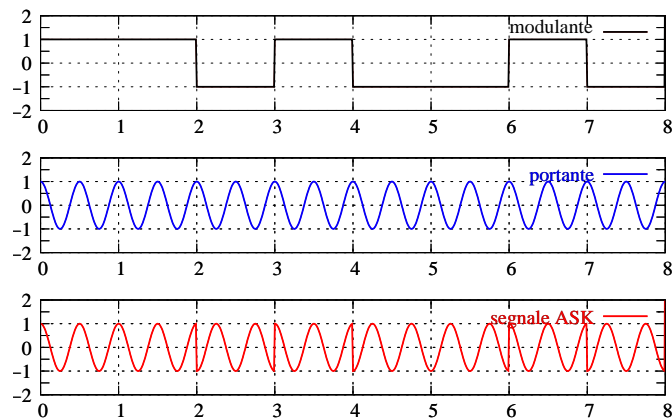
Il segnale modulato ASK è nullo quando il bit trasmesso è zero
→ modulazione a inviluppo non costante

Modulazione di ampiezza (ASK) (2/3)

modulante: sequenza di bit [1 1 0 1 0 0 1 0];

portante: $p(t) = \cos 2\pi f_c t$

segnale ASK con inviluppo costante



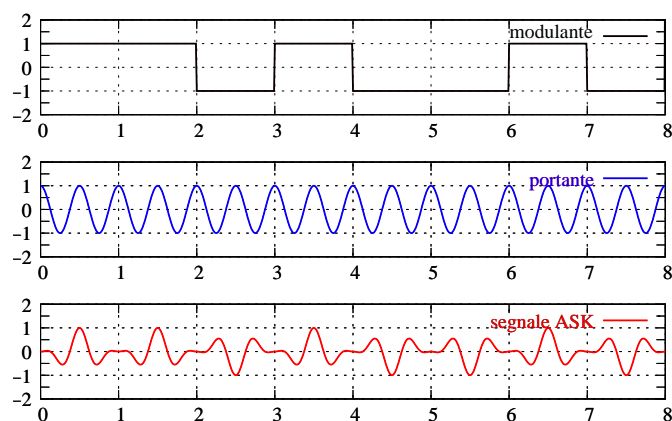
Il segnale modulato ASK ha polarità invertita quando il bit trasmesso è zero
→ modulazione a inviluppo costante

Modulazione di ampiezza (ASK) (3/3)

modulante: sequenza di bit [1 1 0 1 0 0 1 0];

portante: $p(t) = \cos 2\pi f_c t$

segnale ASK con inviluppo a coseno rialzato



Il segnale modulato ASK viene moltiplicato per una funzione inviluppo

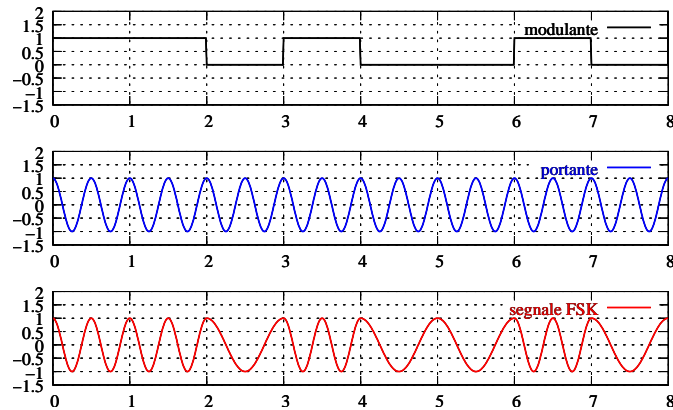
$$\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T_s} \right)$$

Modulazione di frequenza (FSK)

modulante: sequenza di bit [1 1 0 1 0 0 1 0];

portante: $p(t) = \cos 2\pi f_c t$

segnale FSK (Frequency Shift Keying)



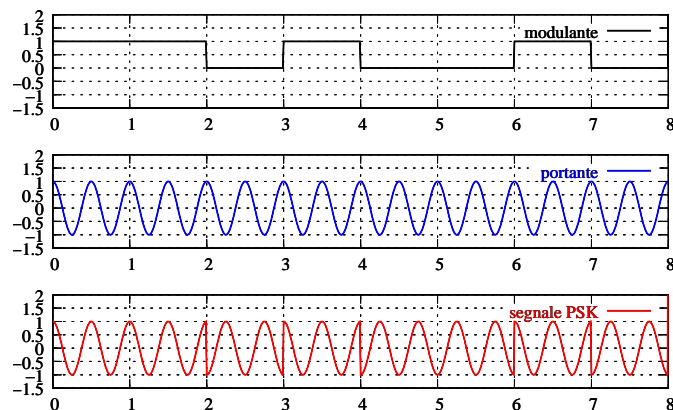
Il segnale modulato FSK ha frequenza f_c quando il bit è uno, e frequenza $\frac{1}{2}f_c$ quando il bit è zero.

Modulazione di fase (PSK)

modulante: sequenza di bit [1 1 0 1 0 0 1 0];

portante: $p(t) = \cos 2\pi f_c t$

segnale PSK (Phase Shift Keying)

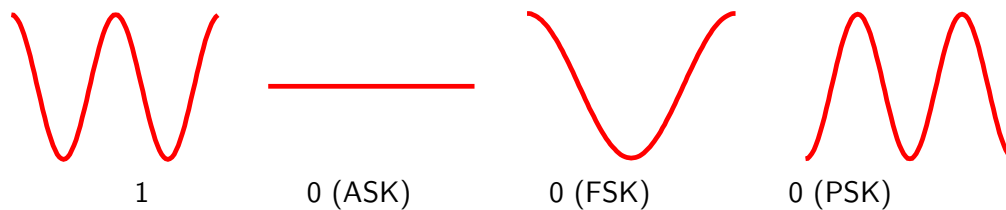


Il segnale modulato PSK è “capovolto” quando il bit è zero.

FSK e PSK sono immediatamente distinguibili, ma ASK simmetrica e PSK a due livelli sono uguali!

Simbolo

Un **simbolo** è l'unità minima di informazione digitale che viene trasmessa.
Simboli binari:



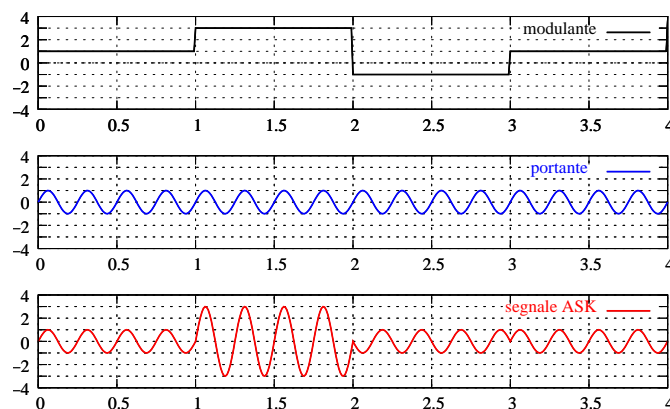
È possibile utilizzare più simboli diversi, per codificare gruppi di bit anziché bit singoli.

Modulazione di ampiezza (PAM) (1/2)

modulante: sequenza di parole digitali;

portante: $p(t) = \sin 2\pi f_c t$

segnale PAM

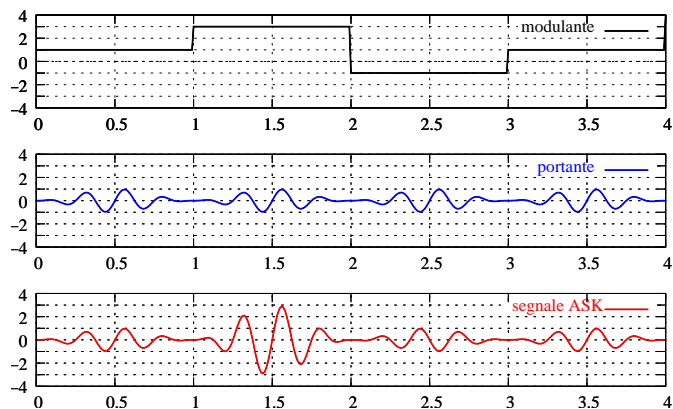


Modulazione di ampiezza (PAM) (2/2)

modulante: sequenza di parole digitali

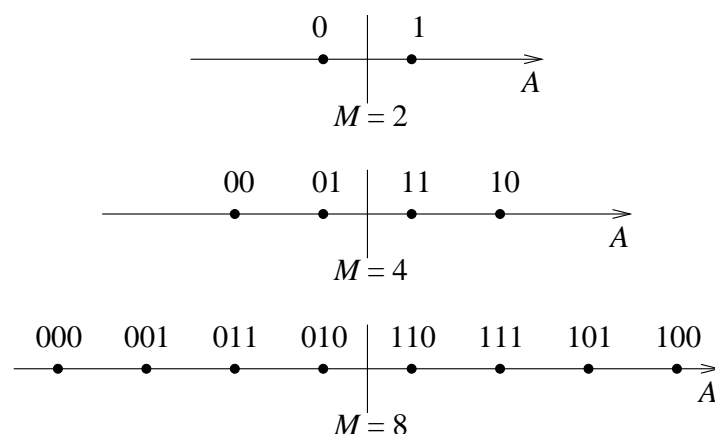
portante: $p(t) = \sin 2\pi f_c t$ con forma $(1 - \cos 2\pi(f_c/4)t)$

segnale PAM



Diagrammi dei segnali – PAM

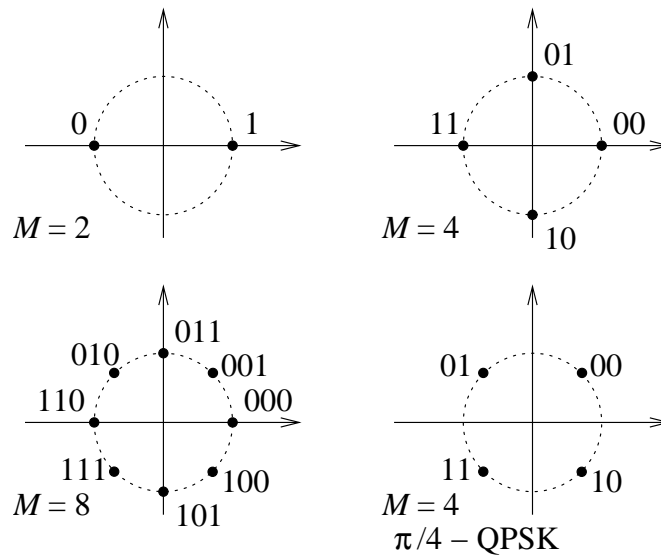
PAM (Pulse Amplitude Modulation),
detta anche ASK (Amplitude Shift Keying)



L'ampiezza A corrisponde al codice della parola digitale a M bit; il codice Gray minimizza gli effetti dell'errore di decodifica (la *distanza di Hamming* tra codici adiacenti è 1).

Diagrammi dei segnali – PSK (1/2)

PSK (Phase Shift Keying)



Diagrammi dei segnali – PSK (2/2)

Le PSK sono **modulazioni ad inviluppo costante**, perché l'ampiezza del segnale non dipende dal codice trasmesso. Per questo motivo, sono adatte alle telecomunicazioni mobili anche su lunghe distanze e sono usate per WLAN e UMTS.

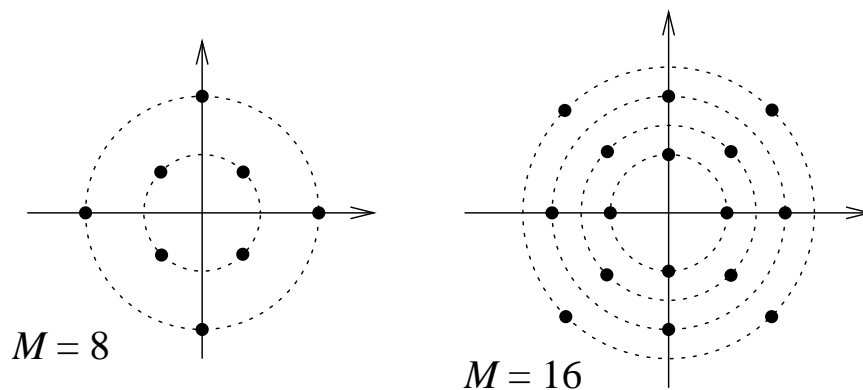
Per $M = 2$ si ha la BPSK (Binary PSK), che è come la ASK.

Per $M = 4$ si ha la QPSK (Quadrature PSK).

La variante $\pi/4$ -QPSK (ottenuta aggiungendo alla QPSK uno sfasamento costante di $\pi/4$) e con gli impulsi filtrati con forma gaussiana è detta anche GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) ed è usata nelle telecomunicazioni wireless (telefonia mobile GSM), perché semplifica la sincronizzazione tra il trasmettitore e il ricevitore.

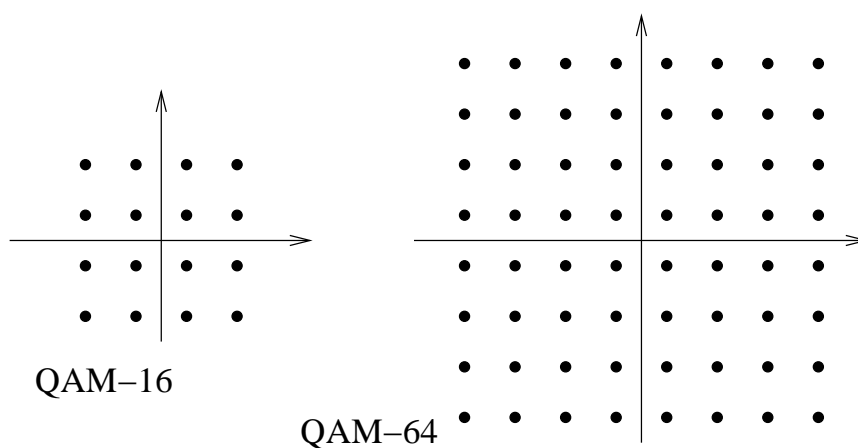
Diagrammi dei segnali – PAM-PSK

È possibile combinare PAM e PSK, ottenendo una **modulazione bidimensionale** in cui sia l'ampiezza sia la fase dipendono dal codice trasmesso.



Diagrammi dei segnali – QAM

QAM (Quadrature Amplitude Modulation)



È una modulazione **bidimensionale**, che risulta dalla combinazione di due PAM modulate con portanti seno e coseno (ortogonali fra di loro). QAM-64 è usata nell'ADSL.

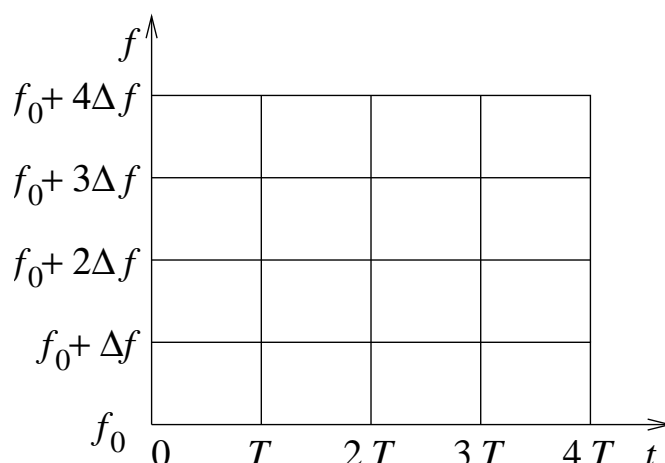
Modulazioni multidimensionali (1/2)

È possibile avere modulazioni con più di due dimensioni: oltre che ampiezza e fase, si usano tempo e frequenza.

Divisione di tempo: L'intervallo di tempo T_1 è diviso in N sottointervalli di durata $T = T_1/N$. In ciascun sottointervallo di durata T viene trasmesso un simbolo. Con una modulazione in quadratura, in ogni intervallo T_1 si trasmettono $2N$ simboli.

Divisione di frequenza: La banda B viene suddivisa in N sottobande di larghezza $\Delta f = B/N$. Ciascuna sottobanda ha una sua frequenza portante; le portanti devono essere sufficientemente separate per evitare interferenze. Con una modulazione in quadratura, si trasmettono contemporaneamente $2N$ simboli (due per ogni portante).

Modulazioni multidimensionali (2/2)



Ortogonalità delle frequenze

Le portanti a due frequenze diverse $p_m(t) = \cos(2\pi(f_c + m\Delta f)t)$ e $p_k(t) = \cos(2\pi(f_c + k\Delta f)t)$, sono ortogonali rispetto alla durata T del simbolo quando

$$\int_0^T \cos(2\pi(f_c + m\Delta f)t) \cos(2\pi(f_c + k\Delta f)t) dt = 0$$

Questo si verifica se

$$\Delta f = \frac{1}{2T}$$

e $m \neq k$.

Modulazione con memoria (1/2)

Un semplice esempio di modulazione binaria con memoria è il seguente:

- se il bit da trasmettere è 0, trasmetto il simbolo precedente;
- se il bit da trasmettere è 1, trasmetto l'altro simbolo.

Matematicamente, dalla sequenza dei bit da trasmettere $\{a_k\}$ si ottiene la sequenza

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1}$$

(dove l'operatore \oplus indica la somma modulo 2).

Modulazione con memoria (2/2)

La modulazione binaria con memoria può essere rappresentata come una macchina a due stati S_0 e S_1 ; allo stato S_0 è associato il livello $-A$, mentre allo stato S_1 è associato il livello $+A$ (supponendo di avere un segnale PAM). Il bit 0 non fa cambiare stato, mentre il bit 1 fa cambiare stato.

L'andamento temporale del segnale può essere rappresentato con un diagramma a "traliccio" (in inglese, *trellis*).

