

## MODULAZIONI NUMERICHE

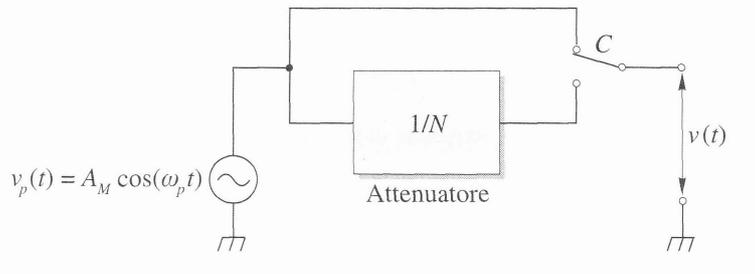
Si chiamano modulazioni numeriche quel tipo di modulazioni in cui il segnale modulante è di tipo numerico e sono impiegate nella trasmissione dati fra modem, nei ponti radio, nei cellulari, nei collegamenti via satellite.

Essenzialmente sono le tre seguenti:

- ASK
- FSK
- PSK

### Modulazione ASK

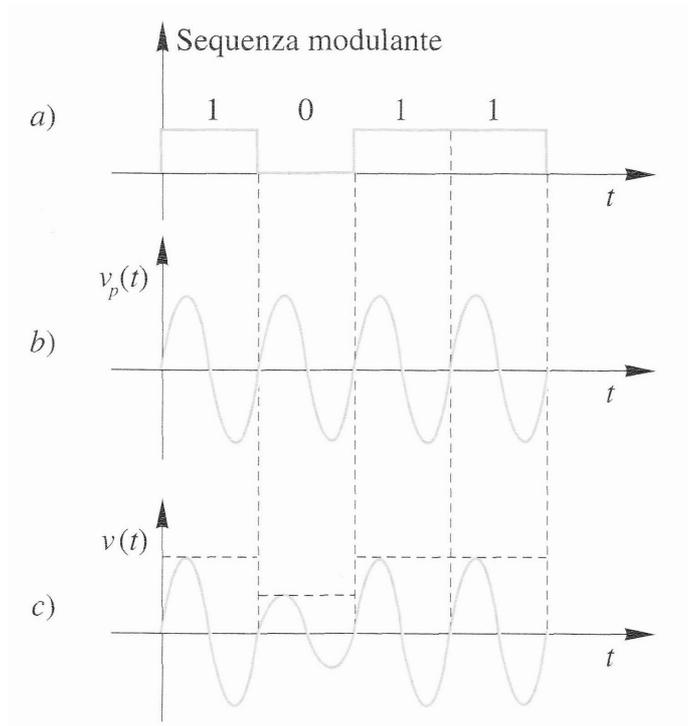
La (*Amplitude Shift Keying*), il cui schema di principio è mostrato in figura, è l'equivalente della modulazione di ampiezza AM nella trasmissione analogica ed è stata la prima a essere utilizzata, ma non ha caratteristiche che consentono di realizzare elevate velocità di trasmissione.



Poiché le posizioni del commutatore C sono associate ai due stati logici della sequenza modulante, il segnale modulato  $v(t)$  assume ampiezza  $A_M$ , per esempio in corrispondenza di un bit 1 e  $\frac{A_M}{N}$  in corrispondenza di un bit 0.

Se l'espressione della portante è:  $v_p(t) = A_M \cos(\omega_p t)$  il segnale modulato ASK vale perciò:

$$v(t) = \begin{cases} A_M \cos(\omega_p t) & \text{per il bit 1} \\ \frac{A_M}{N} \cos(\omega_p t) & \text{per il bit 0} \end{cases}$$

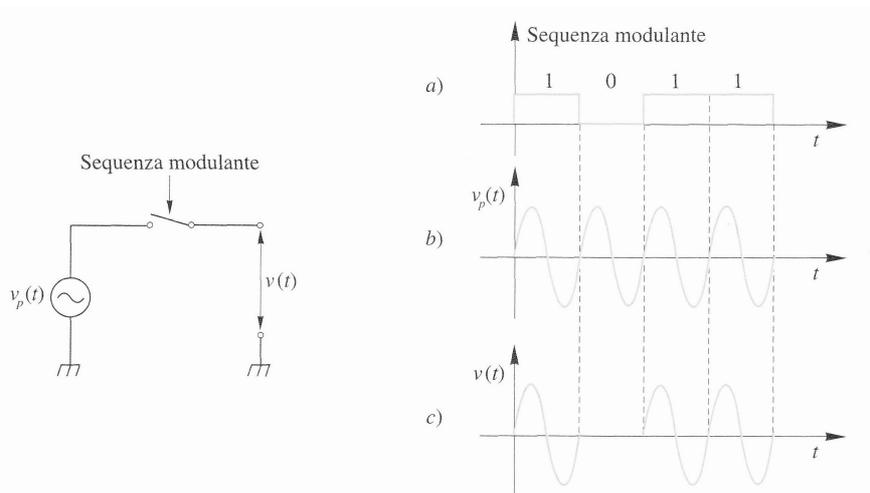


Forme d'onda dei segnali nella modulazione ASK: a) segnale modulante; b) segnale portante; c) segnale modulato. Si osservi che l'involuppo del segnale modulato riproduce la sequenza modulante.

Nel caso in cui in corrispondenza di un bit 0 l'ampiezza della portante sia nulla, si ottiene la **modulazione OOK (ON - OFF Keying)**, che costituisce un caso particolare della modulazione ASK; in questo caso l'espressione del segnale modulato risulta:

$$v(t) = \begin{cases} A_M \cos(\omega_p t) & \text{per il bit 1} \\ 0 & \text{per il bit 0} \end{cases}$$

Nella pratica si usa esclusivamente la tecnica OOK, che in linea di principio può essere realizzata mediante un interruttore elettronico che interrompe la portante al ritmo della sequenza modulante, come indicato in figura.



Modulazione OOK: a) segnale modulante; b) segnale portante; c) segnale modulato.

Come si vedrà in seguito, la modulazione ASK è utilizzata nelle modulazioni lineari miste (ASK-PSK), in cui l'informazione trasmessa è contenuta sia nei salti di ampiezza sia in quelli di fase della portante.

## LA MODULAZIONE FSK

Nella modulazione digitale di frequenza **FSK** (Frequency Shift Keying) ad ogni simbolo logico viene assegnata una frequenza di valore compreso all'interno della banda passante del mezzo trasmissivo.

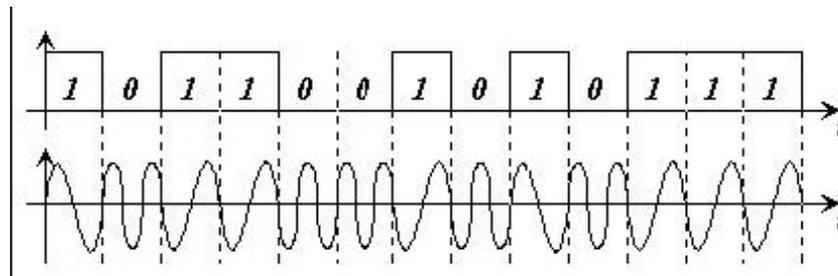
Se l'espressione della portante è:

$$v_p(t) = A_M \cos(\omega_p t)$$

associando per esempio al bit 1 la frequenza  $f_A = f_p + \Delta f$  e al bit 0 la frequenza  $f_B = f_p - \Delta f$ , il segnale modulato FSK assume la forma:

$$v(t) = \begin{cases} A_M \cos(\omega_A t) = A_M \cos(\omega_p + 2\pi \cdot \Delta f) \cdot t & \text{per il bit 1} \\ A_M \cos(\omega_B t) = A_M \cos(\omega_p - 2\pi \cdot \Delta f) \cdot t & \text{per il bit 0} \end{cases}$$

con  $\omega_A = 2\pi f_A$  e  $\omega_B = 2\pi f_B$



Esempio di modulazione FSK

La frequenza del segnale modulato varia tra le frequenze  $f_A$  e  $f_B$  dette **frequenze di manipolazione**, passando da una all'altra ad ogni transizione della sequenza modulante; il parametro  $\Delta f$ , denominato **deviazione di frequenza**, rappresenta lo scostamento dalla frequenza portante (detta anche **frequenza centrale** in quanto collocata al centro della banda disponibile).

La scelta delle due frequenze deve essere fatta in modo da realizzare il migliore compromesso tra quattro diverse esigenze: limitare l'occupazione della banda; ottenere una sufficiente separazione tra le due frequenze in modo da evitare l'interferenza intersimbolica; mantenere il periodo relativo alle due sinusoidi minore o uguale alla frequenza di bit dell'informazione digitale e mantenere una continuità di fase nelle variazioni di stato.

Quest'ultima condizione, assolutamente necessaria, è richiesta per il corretto funzionamento del circuito di demodulazione, il quale, essendo solitamente costituito da un rivelatore di passaggio per lo zero, deve essere in grado di identificare con massima precisione il salto di frequenza.

Il rapporto tra  $f_B - f_A$  (differenza tra le frequenze di modulazione) e la velocità di modulazione  $V_m$  costituisce l'**indice di modulazione**  $m_f$  cioè:

$$m = \frac{f_B - f_A}{V_m} = \frac{2 \cdot \Delta f}{V_m}$$

dal quale dipende la larghezza di banda del segnale modulato.

Le frequenze  $f_A$  e  $f_B$  sono state standardizzate dalle organizzazioni internazionali di normalizzazione in modo da permettere la comunicazione tra apparati modem prodotti dalle diverse

aziende elettroniche. Ad esempio sono molto conosciute le raccomandazioni V.21 e V.23 della C.C.I.T.T. che riguardano i modem fonici, generalmente utilizzati per l'interfacciamento del computer alla linea telefonica, le quali riportano questi valori:

	$f_A$ [Hz]	$f_B$ [Hz]	$V_m$ [bit/s]	$m_f$
V.21	980	1180	300	0,66
V.23	1300	2100	1200	0,66

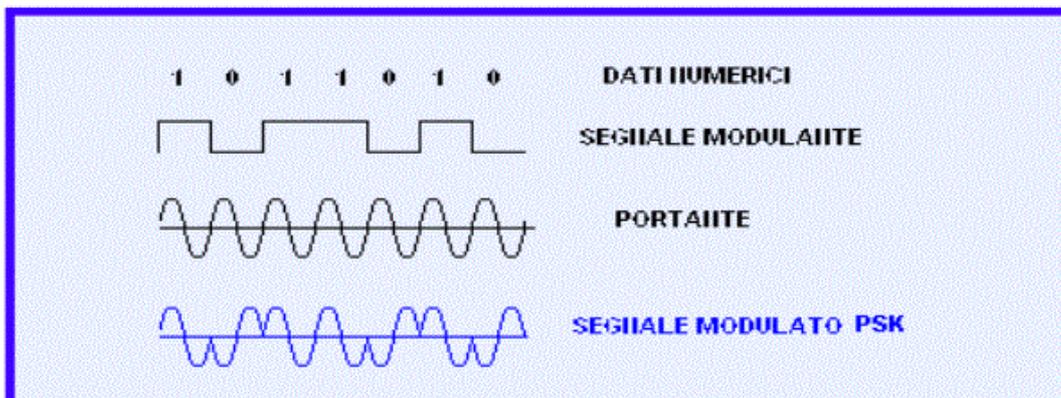
Le modulazioni FSK sono tuttora usate nei ponti radio e nelle trasmissioni fra cellulari del tipo GSM.

### MODULAZIONE nPSK

La modulazione PSK (Phase Shift Keying) è ampiamente utilizzata in congiunzione con la modulazione di ampiezza ASK nella realizzazione dei modem fonici, nei sistemi in ponte radio numerici e nei sistemi televisivi che impiegano il digitale terrestre.

È una modulazione digitale, ovvero una modulazione con portante sinusoidale e segnale informativo di tipo digitale. Il **segnale portante** essendo sinusoidale è continuo nel tempo e nell'ampiezza, mentre quello **modulante** essendo digitale si presenta discreto nel tempo e nelle ampiezze.

Il principio di funzionamento, visibile in figura, consiste nel modificare la fase della portante in corrispondenza dello stato logico 0 o 1 del segnale modulante.



Per facilitare il processo di demodulazione al ricevitore le fasi vengono scelte il più possibile distanti tra loro, in questo caso per la PSK lo sfasamento è di  $180^\circ$ .

Quando il segnale modulante  $V_m$  ha valore 1 la fase della portante rimane inalterata ( $\phi = 0^\circ$ ) e il segnale modulato non è altro che la portante; quando invece il segnale  $V_m$  è 0 si produce un'inversione di fase di  $180^\circ$  ( $\phi = 180^\circ$ ). Le combinazioni citate sono ben visibili nella figura sopra riportata.

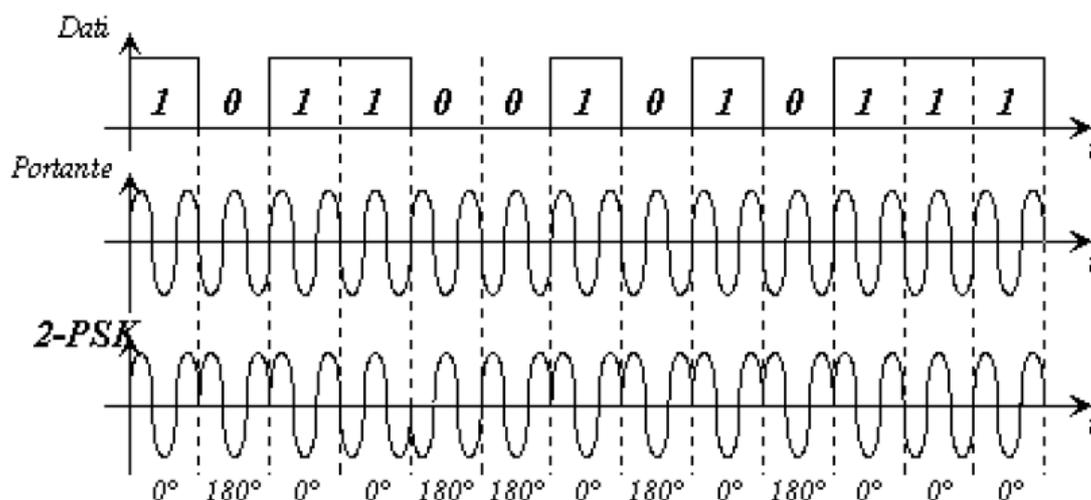
La PSK è la tecnica che offre le migliori prestazioni ed è realizzata sia nella versione **bifase** (B-PSK) che nella versione **polifase** (3-PSK, 4-PSK, 8-PSK o QAM): la prima, più semplice, è normalmente utilizzata nei sistemi a bassa velocità di trasmissione; la seconda consente di trasmettere a velocità più elevate.

La modulazione PSK con le sue varianti (2PSK, 4PSK, 8PSK, QAM) è utilizzata attualmente nelle trasmissioni a ponte radio numerici in contemporanea ad altre modulazioni come la PCM

## MODULAZIONE B-PSK

La modulazione 2PSK o bifase è la più semplice delle modulazioni PSK ed è impiegata nei sistemi di trasmissione dati a bassa velocità (in genere a 1200 bit/s su linea telefonica commutata).

Nella modulazione B-PSK (Bipolar - PSK) o 2-PSK la portante mantiene valori costanti per ampiezza e frequenza, ma assume due valori di fase a seconda del valore logico del bit del segnale modulante. Per garantire la massima protezione dal rumore e dalle interferenze vengono scelti i due valori di fase estremi come  $0^\circ$  e  $180^\circ$ ; nella figura seguente è riportato il diagramma delle tempificazioni di un segnale 2-PSK.



**Diagramma delle tempificazioni di un segnale 2-PSK**

## MODULAZIONE 4PSK

La modulazione 4PSK, anche detta Q-PSK (Quadrature-PSK), viene utilizzata nella trasmissioni dati a 34 Mbps via ponte radio e nei modem funzionanti a 2400 bps.

La modulazione consiste nel generare 4 diversi valori di sfasamento, ad ognuno dei quali si associa un gruppo di due bit denominato **dibit**.

Gli sfasamenti, come tutte le regole riguardanti le telecomunicazioni, sono stati stabiliti dall'*ITU-T* e sono:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  per la modulazione di tipo A e :  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$  per la modulazione di tipo B.

Nella tabella seguente si possono vedere le relative combinazioni binarie dei bit e le relative variazioni di fase secondo la tecnica A e B previste nei modem V. 26.

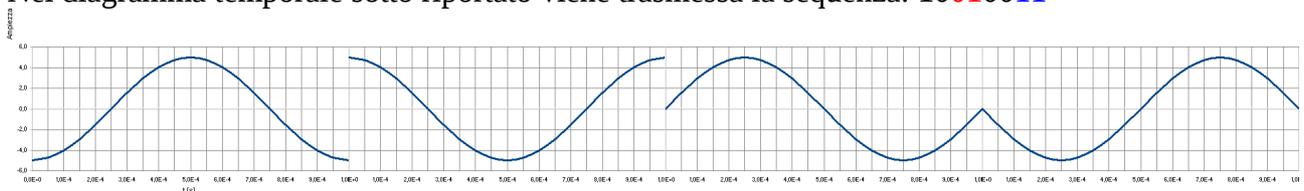
Numero	Valore Binario	Dibit GRAY	Cambiamento di fase	
			Modulazione di tipo A	Modulazione di tipo B
0	00	00	$0^\circ$	$45^\circ$
1	01	01	$90^\circ$	$135^\circ$
2	10	11	$180^\circ$	$225^\circ$
3	11	10	$270^\circ$	$315^\circ$

Si noti che si è utilizzato il codice Gray in modo che i livelli di fase adiacenti differiscano tra loro di un solo bit. Ciò consente una maggiore precisione nella trasmissione e quindi una riduzione degli errori.

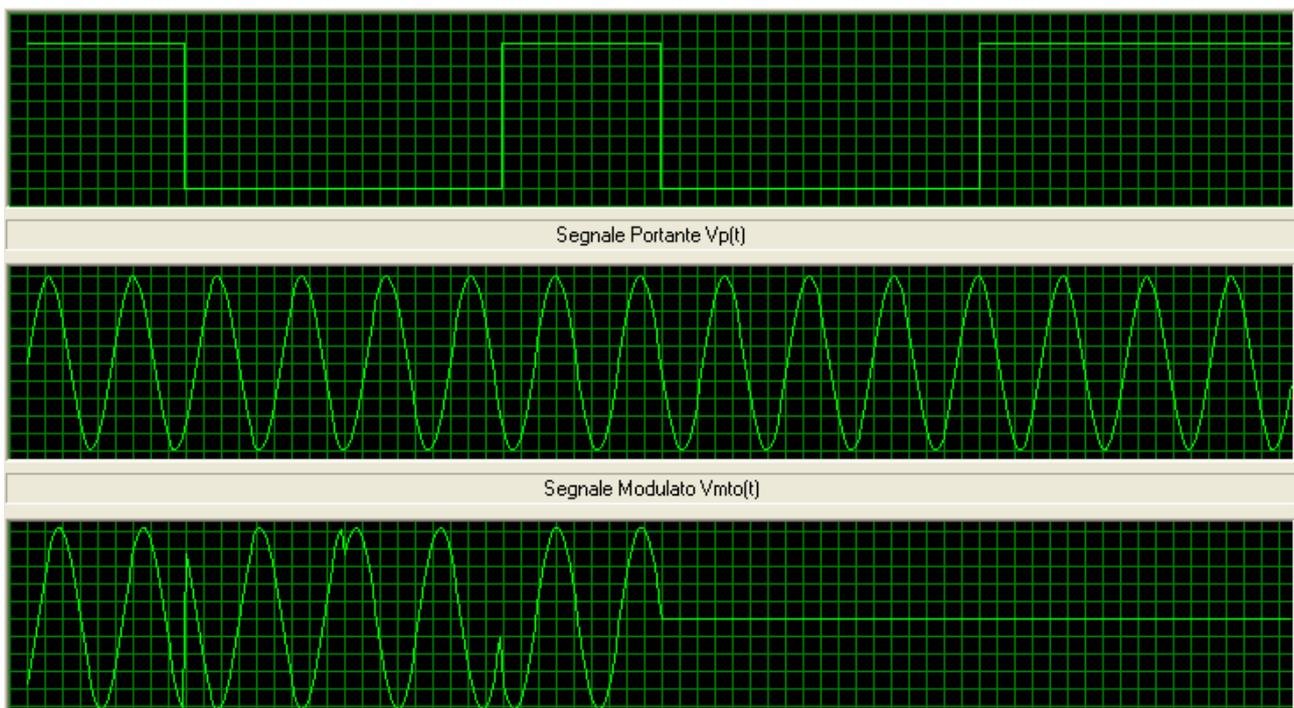
Esempio: scegliamo una modulazione 4 PSK di tipo A (caso più semplice)

Dibit 00  $\Rightarrow$  fase  $0^\circ$       Dibit 01  $\Rightarrow$  fase  $90^\circ$       Dibit 11  $\Rightarrow$  fase  $180^\circ$       Dibit 10  $\Rightarrow$  fase  $270^\circ$

Nel diagramma temporale sotto riportato viene trasmessa la sequenza: **10010011**



La stessa sequenza con una *modulazione di tipo B* avrebbe ottenuto il seguente diagramma temporale:



**MODULAZIONE 8PSK**

La modulazione 8PSK è utilizzata nelle trasmissioni dati a 68 Mbps via ponte radio e nei modem funzionanti a 4800 bps.

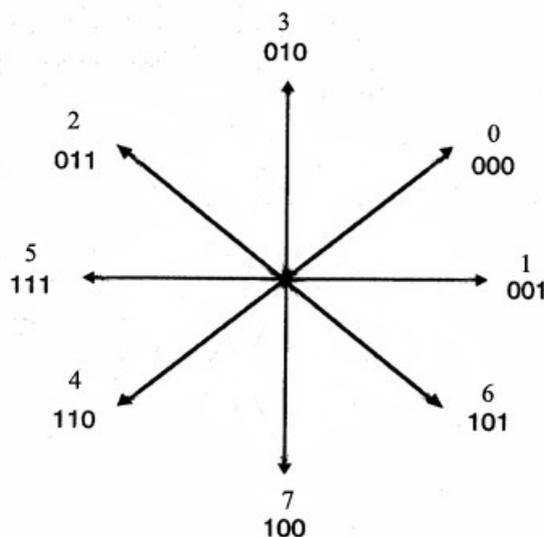
Questa modulazione consente di lavorare a velocità doppia rispetto alla modulazione 4PSK. La modulazione consiste nel sfasare il segnale con tre diversi valori di sfasamento. Ciò permette di inviare il segnale in pacchetti di tre bit, detti **tribit**.

Come nelle altre modulazioni, anche in questa l'ITU-T ha stabilito dei valori di sfasamento. Essi sono elencati in questa tabella.

Numero	Valore Binario	Tribit GRAY	Fase
0	000	000	45°
1	001	001	360°
2	010	011	135°
3	011	010	90°
4	100	110	225°
5	101	111	180°
6	110	101	315°
7	111	100	270°

Un modulatore 8PSK può essere realizzato utilizzando due modulatori 4PSK pilotati da portanti con stessa ampiezza e frequenza ma sfasati tra loro di 45°.

Infine si mostra in figura il diagramma vettoriale o anche detto costellazione. Si nota come i valori 1-3-5-7 siano collocati sugli assi e i valori 0-2-4-6 siano collocati sulle diagonali.

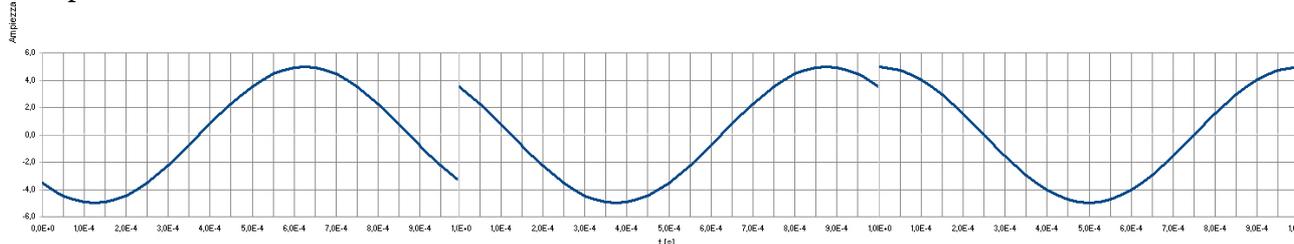


### Diagramma vettoriale modulazione 8PSK

Per fare un esempio semplificato nel quale siamo assegnate le seguenti fasi:

Tribit 000 ⇒ fase 0°	Tribit 001 ⇒ fase 45°	Tribit 011 ⇒ fase 90°	Tribit 010 ⇒ fase 135°
Tribit 110 ⇒ fase 180°	Tribit 111 ⇒ fase 225°	Tribit 101 ⇒ fase 270°	Tribit 100 ⇒ fase 315°

trasmettendo la sequenza **111010011** otterremo il seguente diagramma temporale facilmente interpretabile:



## MODULAZIONE QAM

La modulazione QAM (Quadrature Amplitude Modulation) utilizza contemporaneamente la modulazione di ampiezza e quella di fase. Essa infatti è frutto della fusione della modulazione ASK e PSK che permettono di ottenere, a parità di banda passante, trasmissioni più veloci.

Il sistema più utilizzato della QAM è nella sua forma a 16 stati detta 16QAM.

La 16QAM è una modulazione **quadribit**, cioè a quattro bit. I bit vengono indicati dal più significativo al meno significativo: Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>.

La serie di bit viene codificata nel seguente modo: il bit Q<sub>1</sub> descrive l'ampiezza della portante, gli altri tre, Q<sub>2</sub> Q<sub>3</sub> Q<sub>4</sub>, determinano la fase del segnale modulato col metodo 8PSK (tribit).

Ecco come si presenta la tabella della verità del seguente sistema.

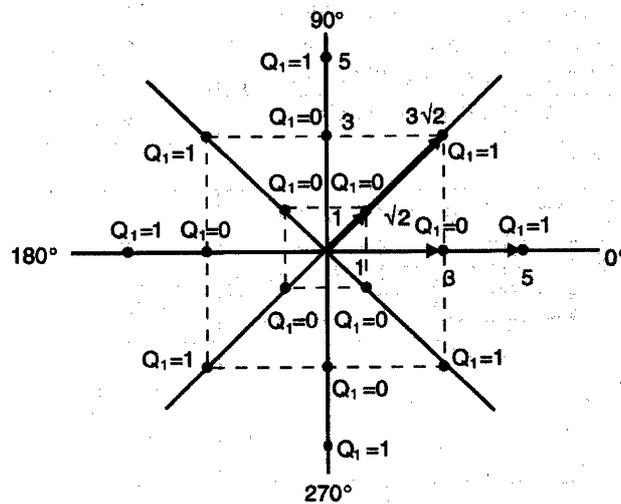
Q <sub>1</sub>	Ampiezza	Fase	Q <sub>4</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub>	Valore decimale	Fase
0	3 V	0°, 90°, 180°, 270°	0	0	1	1	0°
1	5 V		0	0	0	0	45°
0	$\sqrt{2}$ V	45°, 135°, 225°, 315°	0	1	0	3	90°
1	$3\sqrt{2}$ V		0	1	1	2	135°
			1	1	1	5	180°
			1	1	0	4	225°
			1	0	0	7	270°
			1	0	1	6	315°

N. Stati	Q <sub>4</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>	Valore decimale	Ampiezza	Fase
1	0	0	1	0	1	3 V	0°
2	0	0	1	1	1	5 V	0°
3	0	0	0	0	0	$\sqrt{2}$ V	45°
4	0	0	0	1	0	$3\sqrt{2}$ V	45°
5	0	1	0	0	3	3 V	90°
6	0	1	0	1	3	5 V	90°
7	0	1	1	0	2	$\sqrt{2}$ V	135°
8	0	1	1	1	2	$3\sqrt{2}$ V	135°
9	1	1	1	0	5	3 V	180°
10	1	1	1	1	5	5 V	180°
11	1	1	0	0	4	$\sqrt{2}$ V	225°
12	1	1	0	1	4	$3\sqrt{2}$ V	225°
13	1	0	0	0	7	3 V	270°
14	1	0	0	1	7	5 V	270°
15	1	0	1	0	6	$\sqrt{2}$ V	315°
16	1	0	1	1	6	$3\sqrt{2}$ V	315°

Analizzando la tabella si possono ipotizzare tutte le possibili combinazioni di bit presenti in una trasmissione.

Questa modulazione è utilizzata nei *ponti radio numerici* a 140 Mbps e nella trasmissione via cavo a 9600 bps.

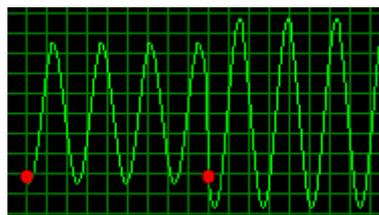
Si mostra, inoltre, in figura successiva il diagramma vettoriale, noto anche come costellazione, per la modulazione 16QAM.



**Costellazione per la modulazione 16QAM**

Per ottenere il risultato espresso dalla rappresentazione grafica è necessario utilizzare 2 portanti sfasate di 90° (da qui il termine quadratura) che abbiano ampiezze di valore discreto 0, 1, 3, 5. Il primo dei quadri-bit (Q0) determina la scelta tra la “mezza costellazione” interna o esterna. Le ampiezze relative delle portanti della mezza costellazione interna sono 0, 1, 3; quella della mezza costellazione esterna sono 0, 3, 5.

Il diagramma temporale di figura rappresenta la codifica **00100011**. Il primo quadribit differisce dal secondo solamente per l’ampiezza della portante mentre la fase, indicata dal punto rosso, rimane la stessa.



Il diagramma temporale di figura rappresenta la codifica **001000110000001**. Le ampiezze dei quadribit sono rispettivamente 3, 5,  $\sqrt{2}$ ,  $3\sqrt{2}$  V mentre le fasi sono, come da tabella precedente, 0° e 45°.

