

CAPITOLO TERZO

GENERALITÀ SUI VARI TIPI DI MODULAZIONE

1. Tipi di modulazione

Nel campo delle comunicazioni elettriche si presenta la necessità di trasmettere un qualsiasi segnale costituente una «informazione», attraverso un mezzo che separa il trasmettitore dal ricevitore. Tale mezzo può essere lo spazio, una coppia di conduttori costituenti una linea di trasmissione o un tubo conduttore (guida d'onda). L'«efficienza della trasmissione» intesa in senso generale in termini di larghezza di banda, di potenza richiesta, di sensibilità o meno ai disturbi, al rumore e alle distorsioni, ecc., richiede che questa informazione venga manipolata in qualche modo prima di essere trasmessa al mezzo che fa da intermediario fra trasmettitore e ricevitore. Questa manipolazione del segnale di informazione al fine di ottenere la voluta efficienza di trasmissione si compie mediante il processo di modulazione.

La modulazione può essere definita come l'insieme delle operazioni con le quali una data informazione viene trasformata in un opportuno segnale destinato ad essere applicato ad un determinato «canale di trasmissione». Alla ricezione, il processo inverso della modulazione, detto «demodulazione», permette di riottenere l'informazione originaria. Nel processo di modulazione ci si serve di un segnale, detto «portante», il quale fa, per così dire, da «supporto» alla informazione e di esso si viene ad alterare una o più caratteristiche mediante il segnale di informazione, che è anche detto «segnale modulante». Il segnale portante con una o più delle sue caratteristiche modificate dal segnale modulante, costituisce il cosiddetto «segnale modulato». Vi sono diversi modi per produrre segnali modulati e si possono essenzialmente ridurre a due forme:

1. *Modulazione ad onda continua* (C.W. = Continuous Wave modulation), nella quale l'ampiezza o la fase o la frequenza di una data onda sinusoidale (la portante) viene alterata in accordo con il segnale modulante di informazione. Il valore della frequenza del segnale portante è sempre in pratica molto più grande della massima frequenza componente il segnale modulante.
2. *Modulazione ad impulsi* (Pulse modulation), nella quale si utilizza come segnale portante una serie di impulsi dei quali all'atto della modulazione si viene a variare la loro altezza o la larghezza o la posizione nel tempo, secondo la legge corrispondente al segnale di informazione da trasmettere.

La modulazione con onda portante sinusoidale acquista particolare importanza nelle radiotrasmissioni; essa permette di trasmettere segnali a frequenze molto più alte di quelle che compongono il segnale di informazione. Dalla teoria dell'elettromagnetismo è noto che per realizzare un efficiente sistema irradiante energia elettromagnetica (una antenna), questo deve avere dimensioni geometriche almeno dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda del segnale da irradiare. Risulta pertanto materialmente impossibile irradiare un segnale la cui frequenza sia, per fare un esempio, di 1 kHz, dato che la corrispondente lunghezza d'onda è in tal caso di 300 km, a meno di non voler costruire un sistema irradiante di dimensioni gigantesche! È invece possibile irradiare efficientemente un'onda portante di frequenza, ad esempio, di 10 MHz, essendo per essa la lunghezza d'onda di 30 metri, poiché è possibile costruire un «*radiatore*» avente dimensioni paragonabili a tale lunghezza d'onda. Quest'onda portante deve tuttavia «contenere» in qualche suo parametro (ampiezza, frequenza, fase) tutte le caratteristiche del segnale di informazione da trasmettere; a ciò provvede appunto il processo di modulazione che imprime i caratteri del segnale di informazione sul segnale portante e quest'ultimo viene allora a costituire il «supporto» per l'informazione da irradiare.

Come risulterà più evidente in seguito, si può fin d'ora affermare che il processo di modulazione comporta una «traslazione di frequenze»: nella modulazione di ampiezza, ad esempio, le frequenze componenti il segnale modulante vengono traslate sull'asse delle frequenze verso una opportuna regione dell'asse stesso ottenendo in tal modo il cosiddetto «spettro di frequenza» del segnale modulato ed è tale spettro che viene irradiato. Alla estremità ricevente del sistema radio, si compie, nel ricevitore, il processo di demodulazione, mediante il quale le frequenze costituenti lo spettro del segnale modulato vengono traslate, per così dire, all'indietro sull'asse delle frequenze e riportate al loro valore originario, ottenendo quindi le frequenze componenti il segnale modulante.

I principi della modulazione e della demodulazione utilizzati nella radiotrasmissione, possono essere convenientemente sfruttati anche nella trasmissione telefonica detta «a frequenze portanti o vettrici». Senza ricorrere alla modulazione, una coppia di conduttori usata come linea di trasmissione non può «trasportare» che una sola conversazione per volta. Se invece le frequenze vocali corrispondenti a più conversazioni vengono traslate verso bande di frequenza successivamente più alte in modo che i relativi spettri si dispongano uno accanto all'altro senza sovrapporsi, tutte le conversazioni possono essere trasmesse contemporaneamente sulla stessa linea senza interferirsi a vicenda. All'estremità ricevente si possono usare adatti filtri per separare le varie bande di frequenza relative alle varie conversazioni e usare circuiti demodulatori per traslare le frequenze di ciascuna banda nella loro posizione originale della banda fonica. Per la trasmissione della parola, dato che in telefonia si bada non tanto alla fedeltà della riproduzione, ma essenzialmente alla intellegibilità della conversazione, si richiede una banda di frequenze fino ad una frequenza massima di 3400 Hz.

È possibile perciò usare, ad esempio, la banda 0 ÷ 3400 Hz per una conversazione, la banda da 4000 Hz a 7400 Hz per una seconda conversazione, la banda da 8000 Hz a 11 400 Hz per una terza conversazione, e così via di seguito. La modulazione permette perciò di aumentare di molto la «capacità di trasmissione di informazione» di una linea o di un generico «canale di trasmissione», poiché vi è la possibilità, nel punto ricevente, di separare le varie informazioni mediante filtri e riottenerle nella loro banda di frequenza originaria mediante circuiti demodulatori.

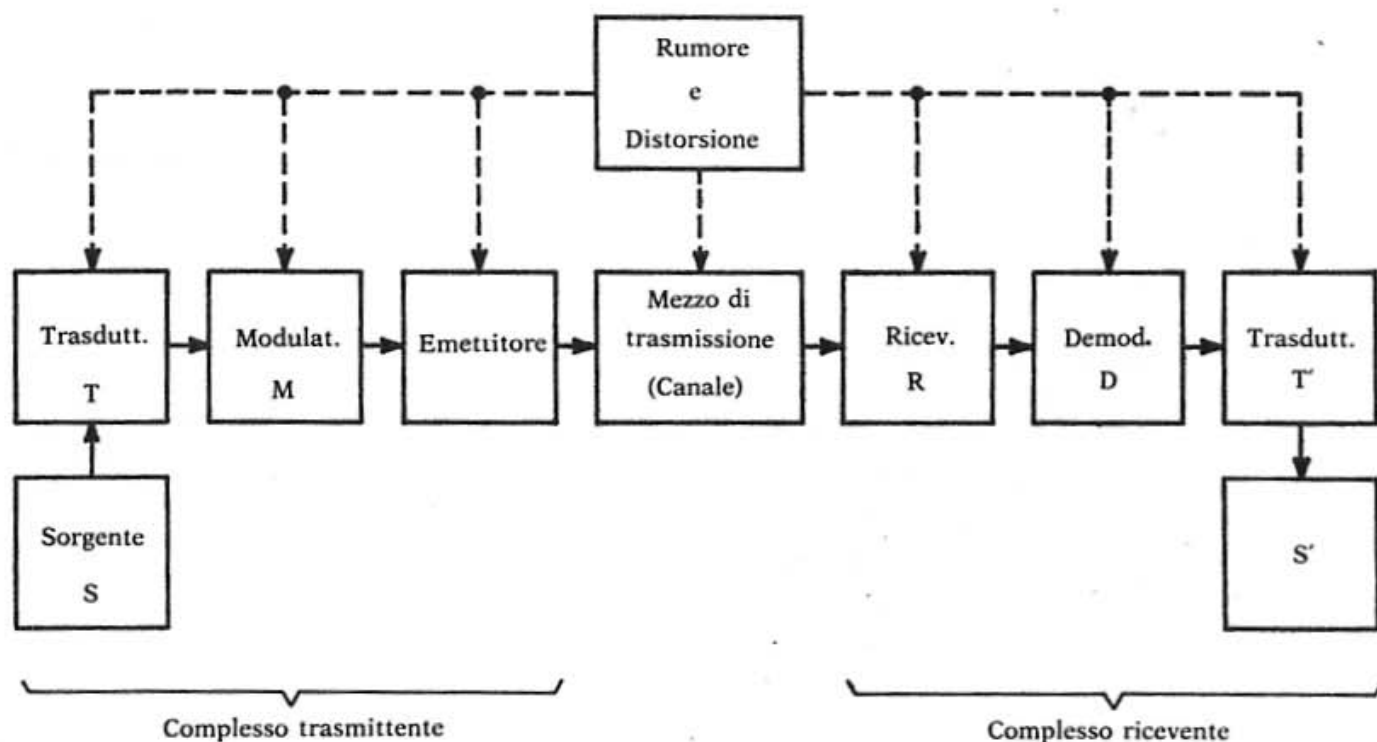


Fig. 1. - Schema a blocchi di un sistema di telecomunicazioni.

Un sistema di comunicazioni può pertanto, in linea del tutto generale, essere schematizzato come in figura 1 in cui sono evidenti tre parti fondamentali: il complesso *trasmittente*, il *mezzo di trasmissione* o «*canale di trasmissione*», il complesso *ricevente*. Il complesso trasmittente comprende innanzitutto la sorgente di informazione S (voce, musica, immagine, ecc...), un trasduttore T (microfono, pick-up, telecamera, ecc.), che trasforma l'informazione in un segnale elettrico variabile nel tempo, un dispositivo modulatore M nel quale il segnale di informazione va a modificare qualche caratteristica del segnale portante, il trasmettitore o emettitore che invia, con caratteristiche adeguate di banda e di potenza, il segnale portante modulato al mezzo di trasmissione.

Il complesso ricevente comprende innanzitutto la parte ricevente vera e propria R (antenna ricevente e stadii di ingresso e di amplificazione del ricevitore), il demodulatore D che compie l'operazione inversa della modulazione e alla cui uscita si riottiene, a parte gli eventuali disturbi e distorsioni, il segnale elettrico di informazione originario. Il trasduttore T' compie l'operazione inversa del corrispondente organo trasduttore in trasmissione. Infine un organo S' presenta l'informazione al destinatario.

Riferendosi, per esempio, ad un sistema televisivo, S è la scena che viene ripresa, T il trasduttore ottico-elettrico (telecamera), T' il trasduttore elettrico-ottico (cinescopio), S' lo schermo televisivo su cui si forma l'immagine destinata al telespettatore. In figura 1 è stato anche indicato schematicamente, mediante linee tratteggiate, il fatto che i vari stadi compresi fra la sorgente dell'informazione e la sua destinazione, possono introdurre segnali parassiti indicati generalmente come «*rumore*» e *distorsioni* che vanno a *contaminare* l'informazione in transito.

Un'altra causa di contaminazione sono i disturbi di origine esterna, quali ad esempio quelli dovuti a scariche atmosferiche, ad interferenze con linee di energia ecc. È necessario perciò che il sistema di comunicazione sia in grado di contenere tale contaminazione ad un livello sufficientemente basso in modo che il destinatario possa

usufruire dell'informazione ricevuta senza apprezzabile alterazione. Ciò dipende, fra l'altro, dal tipo di modulazione che si sceglie per trasmettere l'informazione.

2. Tipi di modulazione con onda continua

Il segnale portante che deve essere modulato è di forma sinusoidale e può essere rappresentato dalla relazione:

$$v(t) = A \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

in cui $v(t)$ è il suo valore istantaneo, A la sua ampiezza ed il termine $\omega t + \theta$ è un angolo variabile nel tempo. In una forma più generale si può scrivere:

$$v(t) = A \cos \varphi(t) \quad (2)$$

dove $\varphi(t)$ è l'angolo, funzione del tempo, che il vettore ruotante rappresentativo della tensione sinusoidale forma in un dato istante t con una direzione di riferimento (fig. 2).

La pulsazione, detta anche frequenza angolare, è per definizione:

$$\omega = \frac{d}{dt} \varphi(t) \quad (3)$$

e la frequenza del segnale, cioè il numero di cicli nell'unità di tempo, è:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) \quad (4)$$

Dalla (1) si osserva che in un segnale sinusoidale «puro», l'angolo $\varphi(t)$ aumenta linearmente col tempo partendo da un valore iniziale θ all'istante $t=0$, cioè la velocità angolare del vettore rappresentativo è costante. L'angolo θ è chiamato «fase» del segnale e la pulsazione ω è la velocità angolare del vettore ruotante.

Vi sono due metodi fondamentali per imprimere sul segnale portante le caratteristiche del segnale modulante. In uno di essi l'ampiezza A del segnale portante viene variata in accordo con il valore istantaneo del segnale modulante; si ha allora la «modulazione di ampiezza». Nell'altro metodo si agisce sulla legge con cui l'angolo $\varphi(t)$ varia nel tempo; si ha in questo caso la cosiddetta «modulazione angolare». Questa si suddivide a sua volta in due tipi: la *modulazione di frequenza* e la *modulazione di fase*, che sono, come si vedrà in seguito, fra loro intimamente correlate.

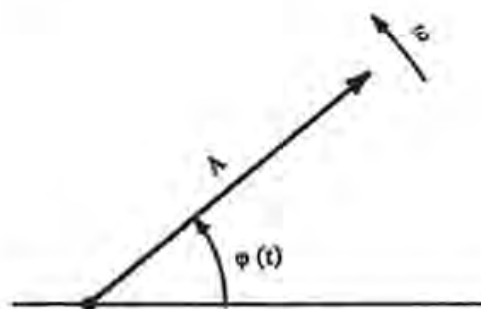


Fig. 2. - Vettore ruotante rappresentativo di una grandezza sinusoidale.

3. Modulazione di ampiezza (A.M. = Amplitude Modulation)

La modulazione di ampiezza si produce variando l'ampiezza del segnale portante in modo che la deviazione dell'ampiezza dal valore che ha in assenza di modulazione, e che nel seguito indicheremo con A_0 , sia direttamente proporzionale al valore istantaneo $v_m(t)$ del segnale modulante; deve essere perciò:

$$\rightarrow A(t) = A_0 + K_a v_m(t) \quad (5)$$

in cui $A(t)$ è l'ampiezza del segnale portante in presenza di modulazione e K_a è una costante di proporzionalità, caratteristica del modulatore.

Il valore istantaneo del segnale modulato è perciò:

$$v(t) = A(t) \cos \omega_0 t = [A_0 + K_a v_m(t)] \cos \omega_0 t \quad (6)$$

dove si è indicato con ω_0 la pulsazione della portante e avendo, per semplicità, posto $\theta=0$, dato che θ nella modulazione di ampiezza è una quantità costante inessenziale.

In figura 3(b) è rappresentato l'andamento nel tempo del segnale modulato mediante il segnale modulante rappresentato in (a). È possibile riconoscere nel segnale modulato tutte le caratteristiche del segnale di informazione modulante dall'andamento della «*curva inviluppo*» dei cicli del segnale modulato in (b).

Nel caso molto semplice in cui il segnale modulante abbia una forma d'onda sinusoidale e sia rappresentato dalla funzione:

$$v_m(t) = V_m \cos \omega_m t$$

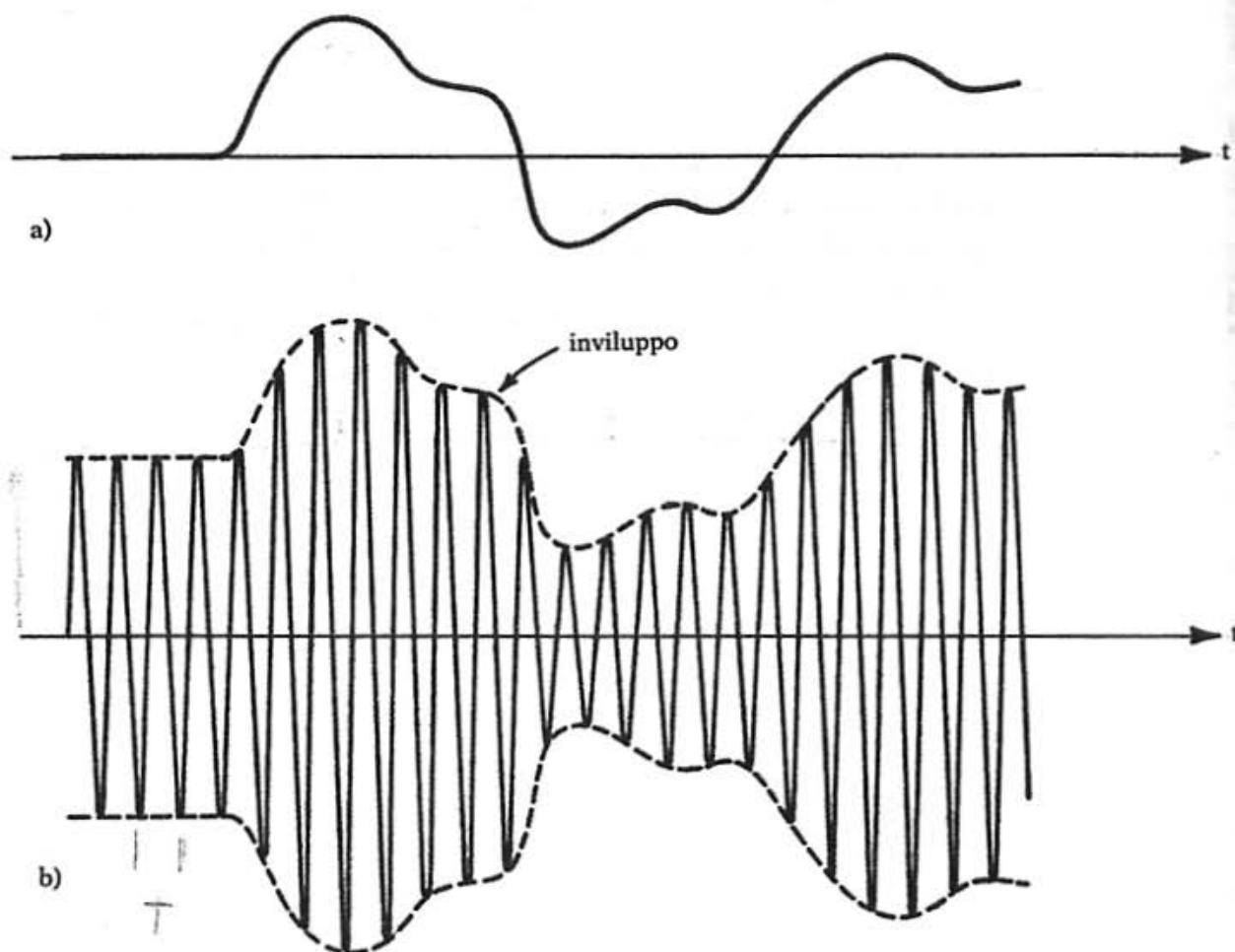


Fig. 3. - In (a), segnale modulante; in (b), segnale modulato.

il valore istantaneo del segnale modulato è:

$$v(t) = (A_0 + K_a V_m \cos \omega_m t) \cos \omega_0 t$$

Indicando con m la quantità $K_a V_m / A_0$,

$$m = \frac{K_a V_m}{A_0}$$

la $v(t)$ si può porre nella forma:

$$v(t) = A_0 (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_0 t \quad (7)$$

La grandezza m si chiama «*indice di modulazione*» o anche «*profondità di modulazione*» poiché, come risulta dalla (7), $m A_0$ è la massima deviazione dell'ampiezza rispetto al valore A_0 in assenza di modulazione. In pratica il valore di ω_m è sempre molto piccolo rispetto a quello della frequenza angolare ω_0 del segnale portante. In figura 4 è rappresentato l'andamento del segnale modulato con segnale modulante di tipo sinusoidale (*modulazione sinusoidale*). Si riconosce la forma sinusoidale dell'involuppo che «*ricopia*» fedelmente l'andamento nel tempo del segnale modulante.

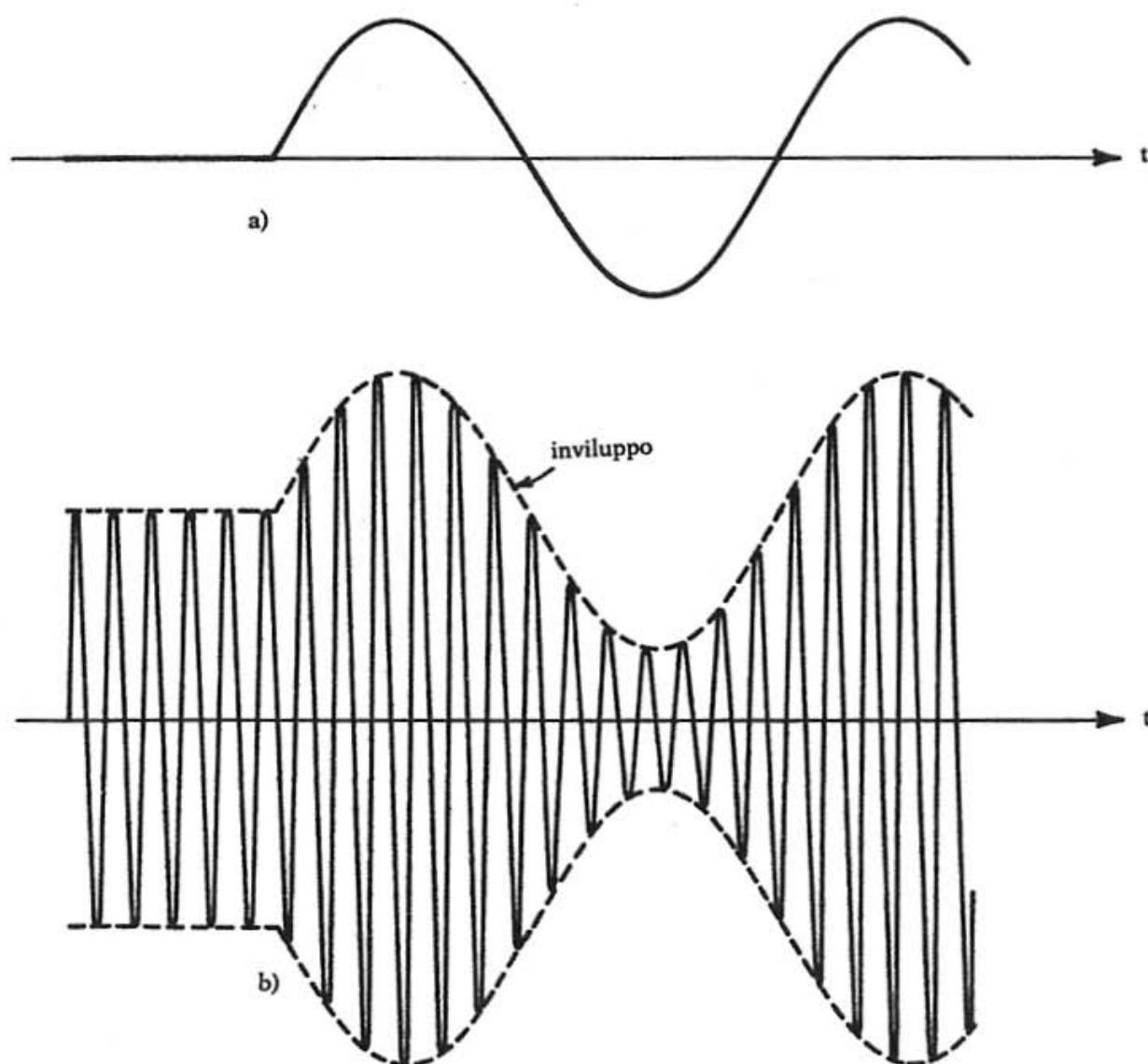


Fig. 4. - In (a), segnale sinusoidale modulante; in (b), segnale modulato.

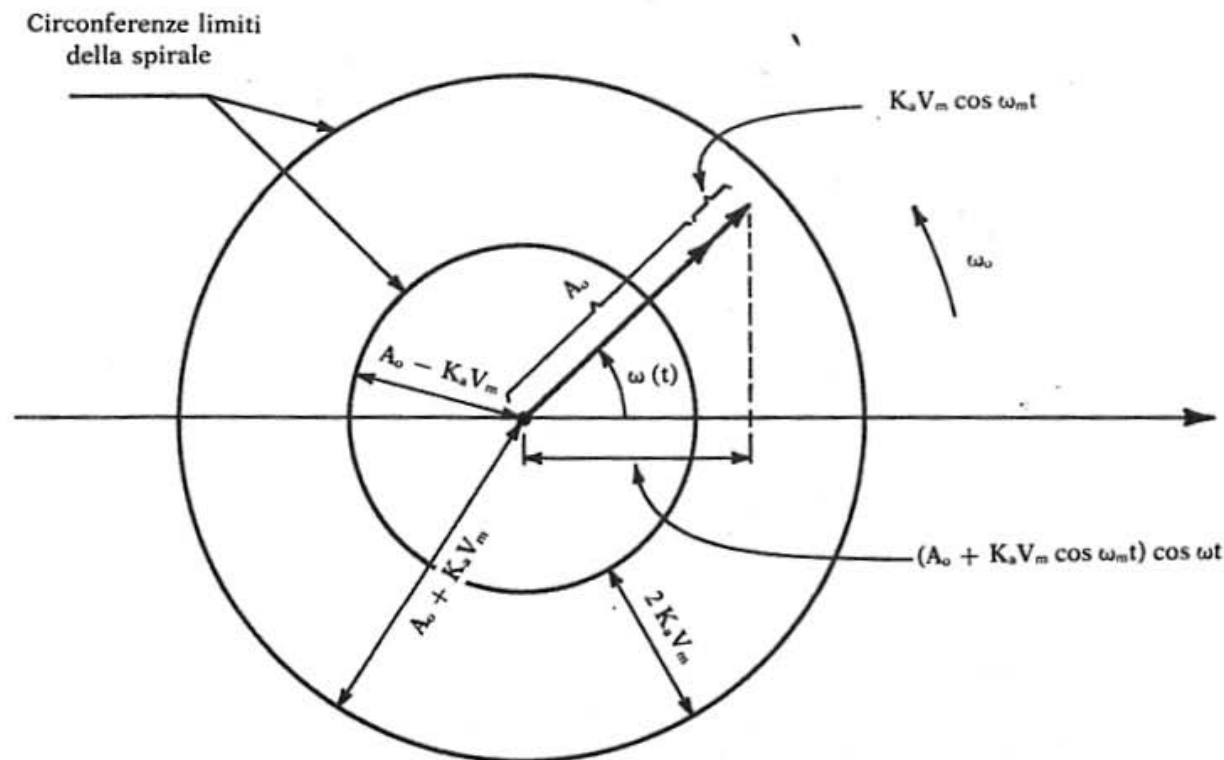


Fig. 5. - Rappresentazione di un segnale modulato in ampiezza mediante un vettore ruotante.

Essendo $\omega_0 \gg \omega_m$, sotto ciascun ciclo dell'involuppo, anche se non evidente in fig. 4 per motivi di disegno, è contenuto un numero molto grande di cicli del segnale portante, per cui la variazione di ampiezza da un ciclo di portante al successivo è estremamente piccola. È possibile allora definire meglio l'*involuppo* come il luogo dei punti di picco del segnale portante modulato. Ad esempio, con un segnale sinusoidale modulante di frequenza 1 kHz e un segnale portante di frequenza 10 MHz, si hanno 10 000 cicli della portante per ogni ciclo del segnale modulante; è evidente quindi che la variazione di ampiezza dei cicli di portante da un ciclo al successivo è del tutto trascurabile e soltanto dopo diversi cicli è possibile avere una variazione di ampiezza osservabile.

Il valore istantaneo del segnale modulato in ampiezza con modulante sinusoidale, dato dalla relazione (7), può essere pensato come la proiezione, su un asse orizzontale, di un vettore ruotante con velocità angolare costante e uguale alla pulsazione della portante, la cui lunghezza, durante la rotazione, varia nel tempo, con ritmo dato dalla frequenza modulante, fra un valore minimo $A_0(1-m)$ ed un valore massimo $A_0(1+m)$, come risulta dalla rappresentazione di figura 5. In questa figura la punta del vettore deve pensarsi dotata di un movimento di rotazione con velocità angolare ω_0 e di un movimento radiale con velocità determinata dalla pulsazione del segnale modulante; la punta del vettore descrive perciò una spirale compresa fra le due circonferenze di raggio $A_0(1-m)$ e $A_0(1+m)$. La proiezione del vettore ruotante, fatta sull'asse orizzontale, rappresenta, in figura, il valore istantaneo del segnale modulato.

4. Modulazione di frequenza (F.M. = Frequency modulation)

La modulazione di frequenza si ottiene lasciando inalterata l'ampiezza A_0 del segnale portante e variando la frequenza in modo che la sua deviazione istantanea,

rispetto al valore f_0 in assenza di modulazione, sia direttamente proporzionale al valore istantaneo del segnale modulante $v_m(t)$. La pulsazione istantanea $\omega(t)$ assume quindi l'espressione:

$$\omega(t) = \omega_0 + K_f v_m(t) \quad (8)$$

in cui ω_0 è la pulsazione della portante in assenza di modulazione e K_f è una costante di proporzionalità caratteristica del modulatore.

Nella (8) la quantità $K_f v_m(t)$ rappresenta la deviazione istantanea della pulsazione rispetto al valore in assenza di modulazione.

Per avere l'angolo istantaneo $\varphi(t)$ da sostituire nella (2) al fine di ottenere l'espressione del valore istantaneo del segnale modulato in frequenza, possiamo scrivere, in base alla relazione (3):

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t + K_f \int_0^t v_m(t) dt \quad (9)$$

Il valore istantaneo del segnale modulato in frequenza è allora:

$$v(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + K_f \int_0^t v_m(t) dt \right] \quad (10)$$

in cui A_0 è l'ampiezza della portante che non viene alterata nel processo di modulazione di frequenza.

Nel caso particolare di segnale modulante sinusoidale:

$$v_m(t) = V_m \cos \omega_m t$$

la pulsazione istantanea è:

$$\omega(t) = \omega_0 + K_f V_m \cos \omega_m t \quad (11)$$

Per l'angolo istantaneo $\varphi(t)$ si ha:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \frac{K_f V_m}{\omega_m} \sin \omega_m t \quad (12)$$

con t misurato a partire da un istante per cui φ è zero. Il valore istantaneo del segnale modulato in frequenza da un segnale modulante di tipo sinusoidale è quindi:

$$v(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + \frac{K_f V_m}{\omega_m} \sin \omega_m t \right] \quad (13)$$

(È importante osservare che sarebbe errato sostituire direttamente nell'espressione (1) al posto di ω l'espressione (11). Infatti il prodotto ωt è uguale all'angolo istantaneo φ del segnale portante *soltanto* nel caso in cui ω è costante. Se ω è variabile, come si ha appunto nella modulazione di frequenza, l'angolo è in relazione con la pulsazione ω secondo la relazione data dalla (9) e *non* è dato da $\omega(t)$ volte il tempo t).

Negli oscillogrammi della figura 6(a), (b) e (c) sono rappresentate le forme d'onda di tre segnali modulati in frequenza con segnale modulante rispettivamente sinusoidale, a denti di sega e trapezoidale. Si osserva che l'ampiezza del segnale modulato è costante e uguale al valore in assenza di modulazione, mentre i singoli cicli hanno un periodo variabile nel tempo secondo una legge che è determinata dall'andamento del segnale modulante. Quest'ultimo, che rappresenta l'informazione da trasmettere, lo si ritrova,

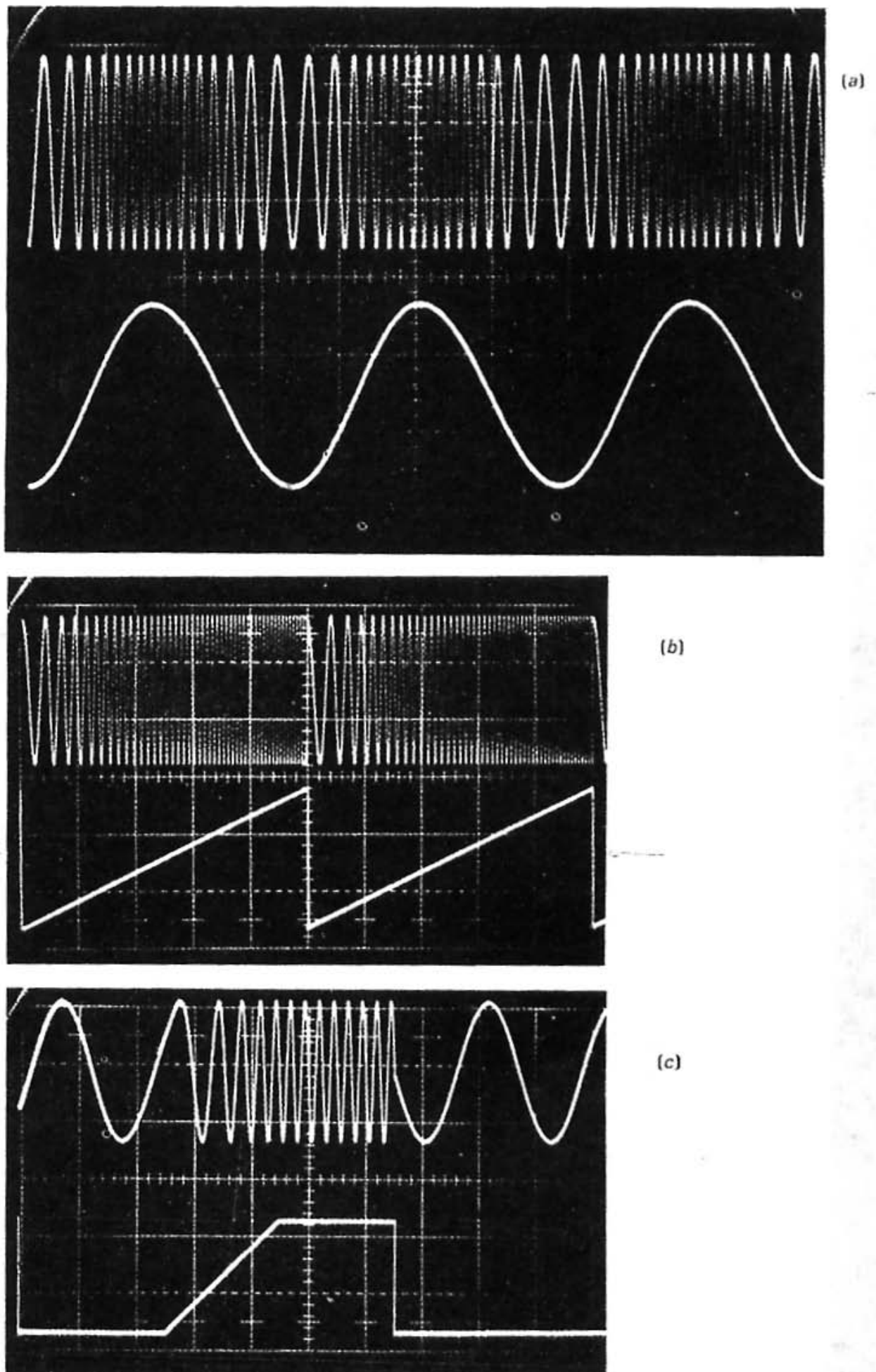


Fig. 6. - Segnali modulati in frequenza: (a), con un segnale sinusoidale; (b), con un segnale a denti di sega; (c), con un segnale di forma trapezoidale.

per così dire, «nascosto» nel segnale modulato sotto forma di variazione della frequenza rispetto al valore della frequenza della portante in assenza di modulazione.

5. Modulazione di fase (P.M. = Phase Modulation)

La modulazione di fase si produce variando l'angolo di fase θ nella (1) in modo che la deviazione istantanea dell'angolo di fase, rispetto al valore θ_0 in assenza di modulazione (che, per semplicità, può assumersi uguale a zero), sia direttamente proporzionale al valore istantaneo del segnale modulante $v_m(t)$. Si fa in modo, cioè, che sia:

$$\theta(t) = \theta_0 + K_p v_m(t) \quad (14)$$

in cui K_p è una costante di proporzionalità caratteristica del modulatore di fase. Scegliendo convenientemente l'istante iniziale in modo che la fase iniziale θ_0 sia nulla, l'angolo istantaneo $\varphi(t)$ è:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + K_p v_m(t) \quad (15)$$

Il valore istantaneo del segnale modulato in fase è perciò:

$$v(t) = A_0 \cos [\omega_0 t + K_p v_m(t)] \quad (16)$$

La pulsazione istantanea del segnale modulato in fase si può ottenere, in base alla relazione (3), mediante derivazione rispetto al tempo; si ha:

$$\omega(t) = \omega_0 + K_p \frac{d}{dt} v_m(t) \quad (17)$$

Da quest'ultima relazione si osserva che la deviazione di frequenza del segnale modulato in fase, rispetto alla frequenza f_0 in assenza di modulazione, è proporzionale *non al valore istantaneo del segnale modulante, bensì al valore istantaneo della derivata del segnale modulante fatta rispetto al tempo*. In figura 7(b) è rappresentato l'andamento del segnale modulato in fase con un segnale modulante di forma rettangolare rappresentato in (a); si osserva che, in base alla (17), la frequenza del segnale modulato è costante e pari ad f_0 negli intervalli di tempo $t_1 \div t_2$, $t_2 \div t_3$, $t_3 \div t_4$, ma negli istanti t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , nei quali il segnale modulante passa istantaneamente da un valore ad un altro, si verifica un improvviso salto di fase del segnale modulato, proporzionale al salto del valore del segnale modulante.

In figura 8(b) è rappresentato il segnale modulato in fase supponendo di eseguire la modulazione con il segnale modulante di forma trapezoidale rappresentato in (a). Negli intervalli di tempo $t_1 \div t_2$ e $t_3 \div t_4$ la frequenza del segnale modulato in fase è costante e pari al valore f_0 in assenza di modulazione, poiché in tali intervalli il segnale modulante è costante. La frequenza del segnale modulato in fase è anche costante, ma maggiore di f_0 , nell'intervallo $t_2 \div t_3$; in tale intervallo, infatti, il segnale modulante che si è supposto cresce linearmente nel tempo, per cui nella (17) la derivata $dv_m(t)/dt$ è costante e pari a $\Delta V/(t_3 - t_2)$ e la pulsazione angolare è $\omega_0 + K_p \Delta V/(t_3 - t_2)$ con ΔV indicato in (a). Sempre nell'intervallo $t_2 \div t_3$ si osserva un progressivo aumento dello sfasamento del segnale modulato rispetto al segnale in assenza di modulazione. All'istante t_4 il segnale modulante ritorna bruscamente al valore che aveva prima dell'istante t_2 e nel segnale

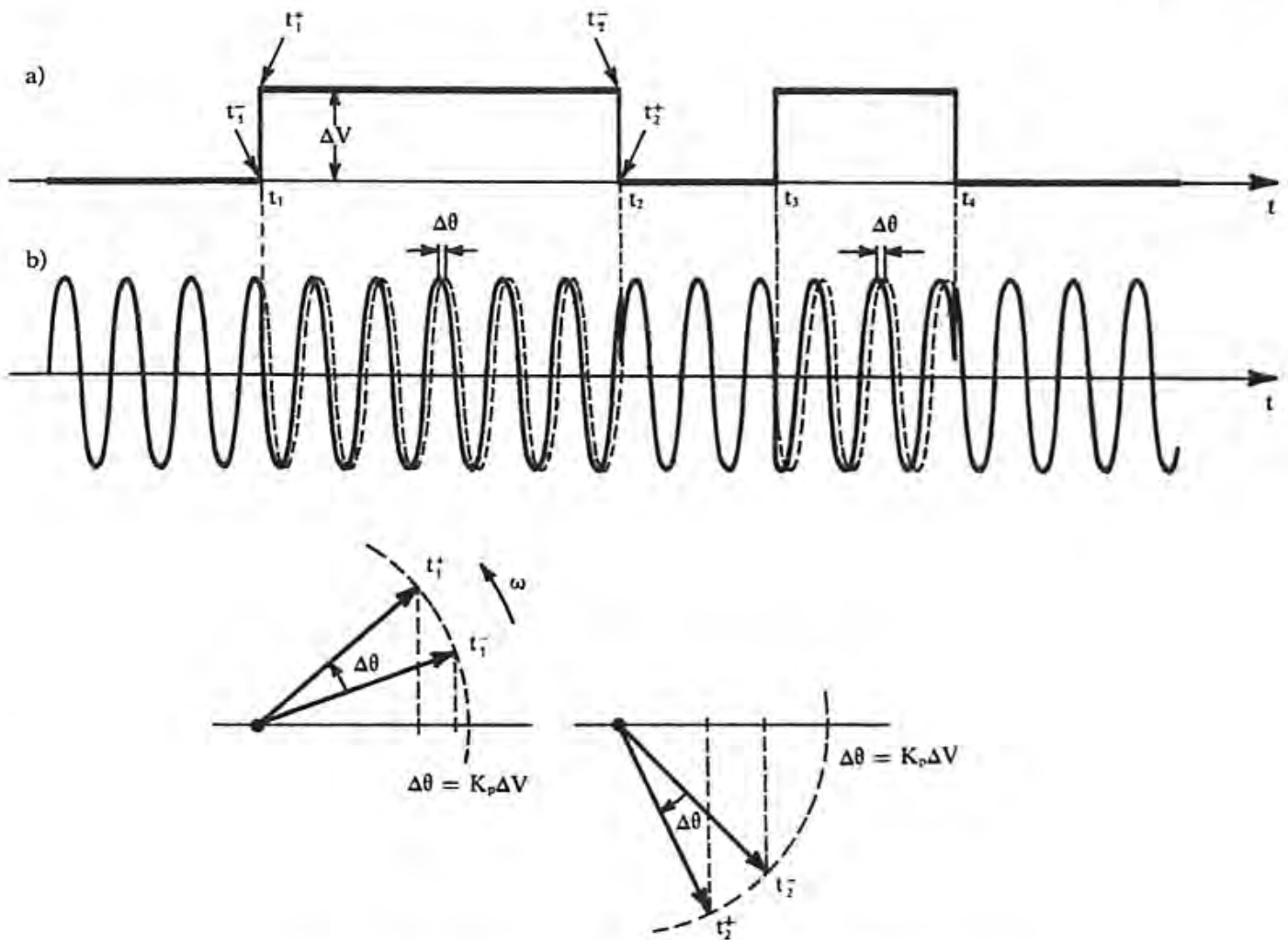


Fig. 7. - Modulazione di fase con segnale modulante rettangolare.

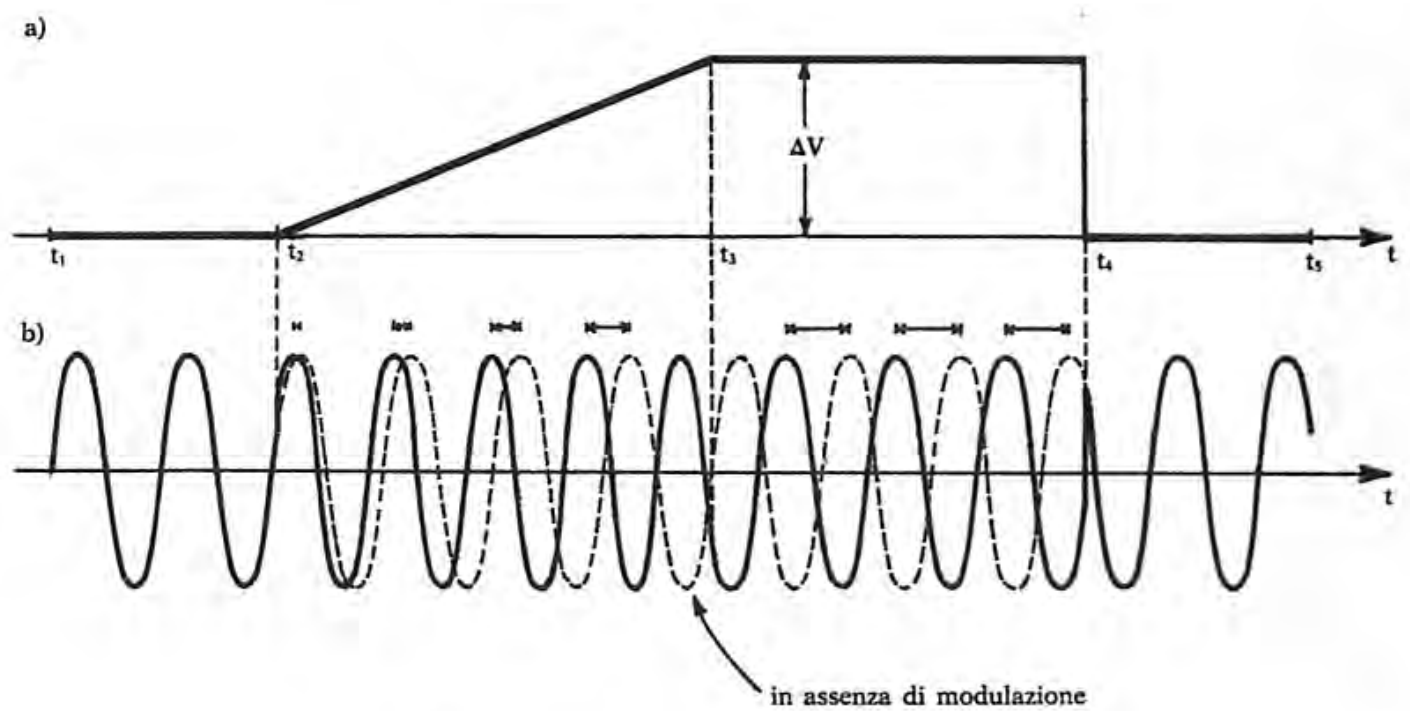


Fig. 8. - Modulazione di fase con segnale modulante trapezoidale.

modulato si ha un improvviso salto di fase dopo il quale l'andamento [fig. 8(b)] ritorna ad essere, istante per istante, quello in assenza di modulazione.

Nel caso particolare in cui il segnale modulante è di forma sinusoidale:

$$v_m(t) = V_m \cos \omega_m t$$

si ha:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + K_p V_m \cos \omega_m t$$

e il valore istantaneo del segnale modulato è:

$$v(t) = A_0 \cos [\omega_0 t + K_p V_m \cos \omega_m t] \quad (18)$$

La pulsazione angolare istantanea è:

$$\omega(t) = \omega_0 - K_p V_m \omega_m \sin \omega_m t \quad (19)$$

In figura 9(d) è rappresentato l'andamento del segnale modulato in fase con modulante di tipo sinusoidale. Si può constatare la somiglianza di questo segnale con quello rappresentato nella stessa figura in (c) che è invece modulato in frequenza con lo stesso segnale modulante sinusoidale.

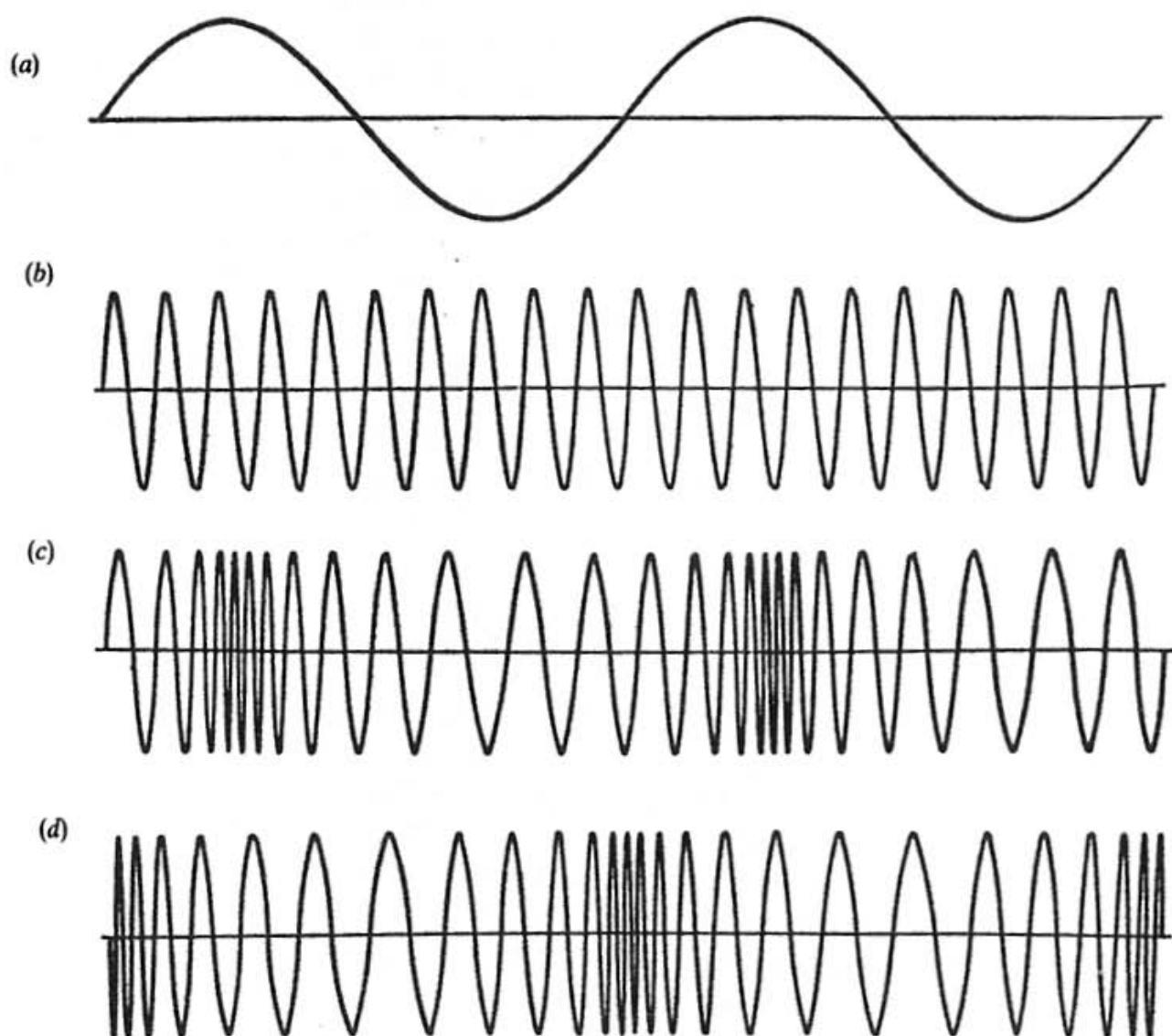


Fig. 9. - In (a), segnale modulante sinusoidale; in (b), portante; in (c), segnale modulato in frequenza; in (d), segnale modulato in fase.

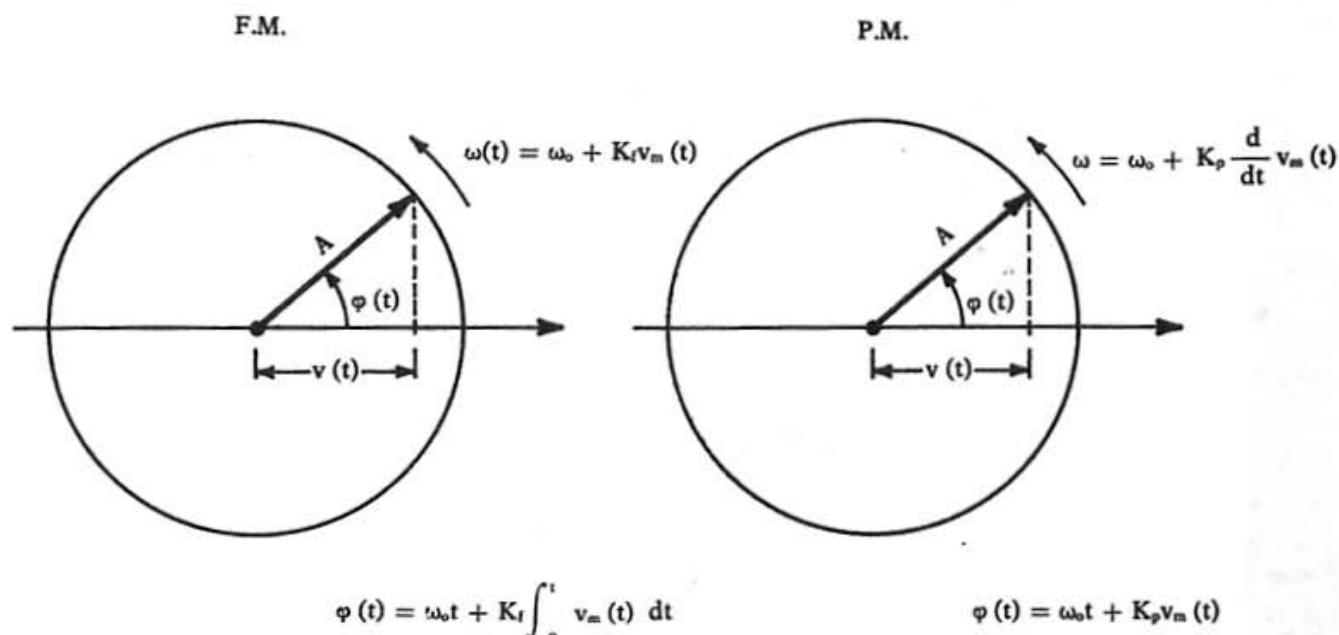


Fig. 10. - Vettori ruotanti rappresentativi di un segnale modulato in frequenza o in fase.

La somiglianza fra i segnali modulati in frequenza e in fase quando il segnale modulante è sinusoidale può essere spiegata osservando che la derivata e l'integrale di un segnale modulante sinusoidale, eseguiti rispetto al tempo, hanno ancora una forma d'onda sinusoidale, a parte uno sfasamento di $1/4$ di ciclo di segnale modulante.

In generale si può dire che la modulazione di frequenza comporta sempre una corrispondente modulazione di fase, e, viceversa, una modulazione di fase comporta sempre una modulazione di frequenza corrispondente. Nella *modulazione di frequenza* (F.M.) la forma d'onda della deviazione di frequenza, rispetto alla frequenza in assenza di modulazione, «ricopia» la forma d'onda del segnale modulante; nella *modulazione di fase* (P.M.), invece, è la forma d'onda della deviazione dell'angolo di fase θ che «ricopia» quella del segnale modulante.

Essendo, sia nella F.M. sia nella P.M., costante l'ampiezza del segnale modulato, il valore istantaneo di quest'ultimo può essere pensato come la proiezione, istante per istante, sull'asse orizzontale, di un vettore di lunghezza costante A_0 ruotante con velocità angolare variabile nel tempo secondo le leggi date dalle relazioni (8) e (17) rispettivamente per la modulazione di frequenza e per la modulazione di fase (fig. 10).

6. Modulazione ad impulsi

Nei sistemi a modulazione di impulsi la portante, anziché essere un'onda continua, è costituita da una successione periodica di impulsi.

Il segnale modulante che costituisce l'informazione può modulare l'ampiezza degli impulsi, producendo in tal modo la *modulazione tipo P.A.M.* (Pulse Amplitude Modulation), oppure può variare la larghezza, cioè la durata degli impulsi, dando luogo alla *modulazione tipo P.D.M.* (Pulse Duration Modulation), oppure può variare la posizione degli impulsi rispetto alla posizione da essi assunta in assenza di modulazione, variando l'istante di presentazione del fronte anteriore o del fronte posteriore dei singoli impulsi; in tal caso si ottiene la modulazione di tipo *P.P.M.* (Pulse Position Modulation). In figura 11, in (a) è rappresentata la serie di impulsi di durata τ e di

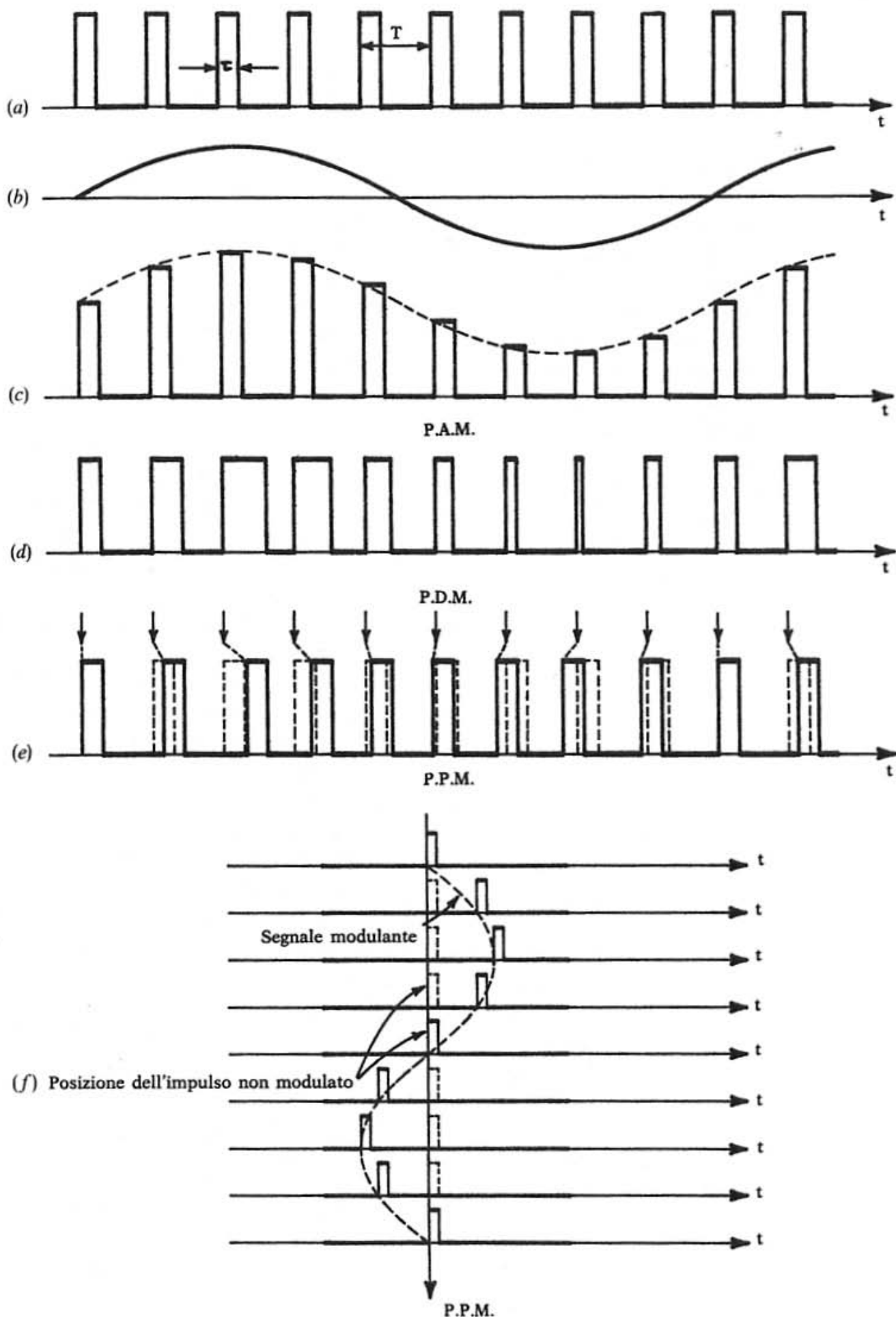


Fig. 11. - (a) Impulsi non modulati; (b) segnale modulante; (c) impulsi modulati in ampiezza; (d) impulsi modulati in durata; (e) impulsi modulati in posizione; (f) variazione della posizione dell'impulso rispetto alla sua posizione in assenza di modulazione per diversi valori del segnale modulante.

periodo T ; in (b) il segnale modulante supposto di tipo sinusoidale ed in (c), (d), (e) rispettivamente gli impulsi dopo la modulazione *P.A.M.*, *P.D.M.*, *P.P.M.*

Nella modulazione *P.A.M.* l'ampiezza degli impulsi aumenta o diminuisce rispetto al valore in assenza di modulazione, a seconda del valore e del segno del segnale modulante. Nella modulazione *P.D.M.* la larghezza di ciascun impulso aumenta o diminuisce a seconda del valore e del segno del segnale modulante. Nella modulazione *P.P.M.* la larghezza e l'altezza degli impulsi rimangono inalterate mentre l'istante di presentazione del fronte anteriore o del fronte posteriore dei singoli impulsi viene ritardato o anticipato in accordo con il segnale modulante.

Come appare dalla figura 11(c) il segnale modulato *P.A.M.* può essere considerato ottenuto dal segnale modulante, prendendo di quest'ultimo, per una durata pari a τ , soltanto i valori in determinati istanti (*campioni*, *samples*). Se il ritmo di ripetizione di questi «campioni», cioè la cosiddetta «frequenza di campionamento», è abbastanza elevato, l'informazione trasmessa è sufficiente per permettere la ricostruzione dello stesso segnale modulante in forma continua nel ricevitore. Infatti, in base ad un teorema, noto come *teorema del campionamento*, se il segnale modulante $v_m(t)$ non contiene frequenze maggiori di una frequenza massima f_{\max} , esso è completamente determinato dando i suoi valori (*campioni*) in corrispondenza di istanti di tempo separati fra loro di una quantità minore od al più uguale a $1/(2 f_{\max})$.

Per il segnale telefonico, essendo $f_{\max} = 3400$ Hz, l'intervallo fra i campioni è stato fissato a $1/8000 = 125 \mu s$.

In pratica non è necessario nemmeno trasmettere i valori esatti dei vari campioni del segnale modulante. Il campo dei valori del segnale di informazione da trasmettere viene suddiviso in un certo numero di intervalli finiti di ampiezza q (A, B, C, D, E, \dots) (in fig. 12) a ciascuno dei quali è assegnato il valore $0, 1q, 2q, 3q, 4q, \dots$, uguale all'ordinata del punto medio dell'intervallo stesso. A ciascun istante di campionamento, come appare dalla figura 12(b), il valore del segnale modulante viene approssimato (*quantizzato*) con il valore assegnato all'intervallo in cui esso è compreso.

La quantità q è chiamata «*passo di quantizzazione*». Viene in tal modo trasmesso soltanto un discreto numero di valori quantizzati. Nella modulazione cosiddetta *P.C.M.* o modulazione a codice di impulsi (*Pulse Code Modulation*) ciascun valore del segnale modulante quantizzato viene trasformato, prima della trasmissione, in un *gruppetto di impulsi* secondo un determinato codice, ad esempio il codice binario. Ciascun gruppetto di impulsi rappresenta, nel codice scelto, il valore quantizzato del segnale modulante, come appare dalla figura 12(c).

Con n impulsi binari per ciascun gruppetto, si possono rappresentare 2^n distinti *livelli quantizzati*, cioè il segnale da trasmettere può essere quantizzato in 2^n livelli. Molto usato, specie nella telefonia, è il valore di $n=7$ che permette di quantizzare il segnale con 128 livelli distinti. Ovviamente il processo di quantizzazione introduce un certo errore nella riproduzione del segnale. Il segnale demodulato differirà dall'originario segnale di informazione; l'effetto complessivo di tale errore di quantizzazione equivale alla introduzione di un *rumore* addizionale nel sistema, chiamato «*rumore di quantizzazione*». Tale rumore può essere ridotto ad un valore accettabile aumentando il numero dei livelli di quantizzazione.

Si può quindi riassumere che nel sistema *P.C.M.*, il segnale di informazione dà luogo, dopo campionatura e quantizzazione, ad un segnale di tipo *P.A.M.* quantizzato, il quale a sua volta viene trasformato in una serie di gruppi di impulsi in codice (ad esempio binario) che costituisce il segnale che viene trasmesso. In ricezione, per ottenere

il primitivo segnale di informazione, la serie di impulsi *P.C.M.* deve essere *decodificata* e riconvertita in una serie di impulsi di tipo *P.A.M.* quantizzati dai quali infine si ricava il segnale di informazione.

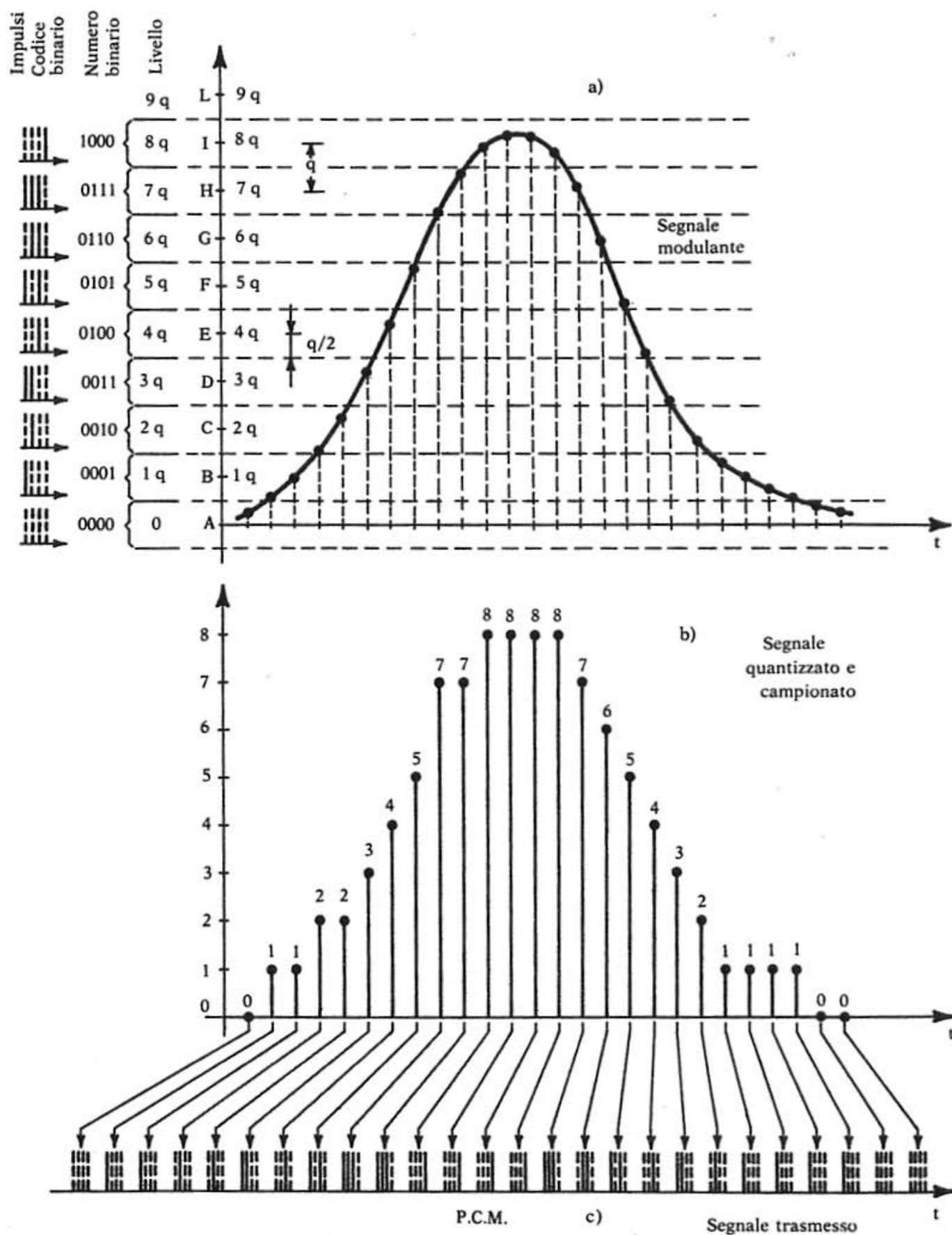


Fig. 12. - Quantizzazione e codificazione P.C.M. di un segnale. Nei gruppetti di impulsi la mancanza di impulso è indicata a tratteggio.