

Fotocopiato in proprio, distribuito gratuitamente, è gradita la collaborazione dei lettori - Il N. 16 è stato inviato a 38 lettori  
Redazione: Ezio Mognaschi, v.le Gorizia, 63 - 27100 Pavia PV, tel. 0382 539522, posta elettronica: mognaschi@fisav.unipv.it

Hanno collaborato a questo numero: E. Mognaschi ed altri.

**Sommario:** Notizie, Inquinamento da campi elettromagnetici, p. 1; Modulazione, p. 2 - 6.

**Notizie:** \* Il 29 e 30 gennaio a Novegro, vicino all'aeroporto di Linate (MI), 17ª edizione di Radiant, rassegna del radiantismo: apparati e componenti per telecomunicazioni, ricetrasmisssioni, elettronica, computer, corredi kit per autocostruzioni, apparati radio e telefonici, antenne, valvole, surplus, strumentazioni elettroniche.

\* XVIII AIR DX Meeting dal 28 al 30 aprile 2000 a Sanremo (IM), organizzazione locale di Marco Mellere.

\* La stazione NSS di Annapolis, Maryland, 21.4 kHz, non è più utilizzata dal 1996 a causa dei tagli al bilancio della marina statunitense (dovuti anche alla distensione internazionale) e dell'uso delle nuove tecnologie dell'informazione. I trasmettitori sono serviti, recentemente, per potenziare la stazione campione di frequenza WWVB di Boulder, mentre le gigantesche antenne, alte alcune centinaia di metri, sono state abbattute il 13 novembre 1999. Per qualche tempo, prima della demolizione, sono state concesse in uso al Radio Club AMRAD per esperimenti in VLF.

\* Gli ultimi esperimenti in VLF dalla Mir nell'ambito del progetto INSPIRE sono stati effettuati nei giorni 20, 21, 22, 27 e 28 novembre 99. L'anno prossimo è prevista la distruzione dell'astronave con il suo rientro nell'atmosfera.

## Inquinamento da campi elettromagnetici

di E. Mognaschi

La Gazzetta Ufficiale n. 257 del 3.11.98 ha pubblicato il D. M. n. 381 del 10.9.98 titolato "Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana". Detto decreto riguarda i "sistemi fissi di telecomunicazioni e radiotelevisivi operanti nell'intervallo di frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz". Ecco i principali limiti indicati:

### LIMITI DI ESPOSIZIONE PER LA POPOLAZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Frequenza (MHz)	Valore efficace di intensità di campo elettrico (V/m)	Valore efficace di intensità di campo magnetico (A/m)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente (W/m <sup>2</sup> )
0.1 - 3	60	0.2	-
>3 - 3000	20	0.05	1
>3000 - 300000	40	0.1	4

### Osservazioni e commenti

Il decreto **non si applica** ai lavoratori esposti per ragioni professionali (art. 1); altrimenti avremmo una paralisi di molte attività industriali, produttive e di telecomunicazione.

Il decreto **non si applica** ai sistemi mobili (ad es. telefoni cellulari); altrimenti nessuno li userebbe più, basti pensare che un telefono operante a 900 MHz produce da 40 a 100 V/m a 1-2 cm di distanza dall'antenna (il cervello), mentre uno operante a 1800 MHz produce da 10 a 30 V/m a 10 cm di distanza. Così pure per i *walkie-talkie* che, a 27 MHz, irradiano circa 1000 V/m a 5 cm, e per i palmari radioamatoriali di ancor maggiore potenza.

Il decreto, stranamente, **non considera** neppure i sistemi fissi tra 9 e 100 kHz anche se regolarmente allocati e probabilmente esistenti anche in Italia. Al di sotto di 9 kHz invece è "terra di nessuno" dal punto di vista delle comunicazioni e, giustamente, il decreto non se ne occupa.

Secondo il decreto, invece, **sono pericolosi** i TX in AM che, a 50 m, producono un campo che può andare da 100 a 400 V/m. Quanto ai TX in FM e televisivi in UHF ce li possiamo tenere anche in cortile perché il loro campo, a 50 m, va da 0.1 a 2 V/m; idem per le stazioni radio base per la telefonia GSM (890-960 MHz) che, sempre a 50 m, danno da 0.1 ad 1 V/m e per quelle DCS (1880 MHz) che danno da 0.1 a 0.5 V/m.

Il decreto ci fa invece capire di non avvicinarci a meno di 100 m da un radar per il controllo del traffico aereo (operante tra 1 e 10 GHz) poiché ivi il campo va da 10 a 60 V/m, cioè: attenzione agli aeroporti. Mentre ci lascia intendere che possiamo usare senza preoccupazioni il forno a microonde di casa in quanto il suo campo a 2.45 GHz è di soli 20 V/m a 30 cm!

È stato un insperato godimento intellettuale poter leggere sulla *Gazzetta Ufficiale*, pure se relegata negli allegati al decreto, la definizione corretta di alcune grandezze fisiche che descrivono la propagazione delle onde elettromagnetiche ed alcune formule fondamentali, composte, seppure con un certo affanno e disagio, dal Poligrafico dello Stato, meglio avvezzo al logorroico giuridichese che agli integrali definiti.

**Nota.** I dati numerici relativi ai campi prodotti da trasmettitori ed elettrodomestici sono stati tratti da un articolo di P. Rossi, C. Grandi ed F. Benvenuti, apparso nel n. 109 dei *Quaderni di Le Scienze*, settembre 1999.

Con questo numero di *Radioonde* inizia (in mancanza di meglio) la pubblicazione del testo di alcune dispense di radiotecnica che riportano il contenuto di un breve corso tenuto nel 1999 presso la Fondazione Luigi Clerici di Pavia per allievi delle scuole professionali, in ottemperanza ad una disposizione della Comunità Europea per l'integrazione dei correnti programmi scolastici.

## Modulazione

di E. Mognaschi

### 1. Introduzione

La trasmissione a distanza di informazioni fa generalmente ricorso al processo di modulazione di un segnale portante per diverse ragioni. Quando l'informazione (audio, video o altra) si estende su di un intervallo di frequenze che copre parecchie ottave, le caratteristiche di propagazione potrebbero variare considerevolmente in quest'intervallo di modo che il mezzo che trasporta l'informazione potrebbe introdurre considerevoli distorsioni; un esempio, nel campo audio, è fornito dalla distorsione dovuta all'effetto dell'impedenza, funzione della frequenza, delle linee telefoniche. Invece, nella modulazione di un segnale portante, ad alta frequenza, con un segnale modulante, a bassa frequenza, solo un ristretto intervallo di frequenze (in termini di ottave) è interessato al processo di trasmissione. Un altro vantaggio della modulazione consiste nel fatto che, usando diverse portanti, si può utilizzare un unico canale (spazio o cavo coassiale) per trasmettere simultaneamente più segnali utili e quindi più informazioni contemporaneamente. Inoltre, l'efficienza del processo di radiazione è generalmente maggiore solo ad alte frequenze ed è quindi preferibile trasmettere alla frequenza più alta possibile, compatibilmente con altre esigenze.

È interessante osservare che anche nel corpo umano il problema della trasmissione dei suoni è stato risolto in modo analogo: i muscoli della bocca e della cavità orale sono in grado di contrarsi a velocità non superiori a 10 volte al secondo, mentre le dimensioni della bocca sono troppo piccole per emettere, in modo efficiente, suoni della lunghezza d'onda corrispondente a 10 Hz (o inferiori) cioè di 30 m (o maggiori). La soluzione è consistita nel generare, con le corde vocali, suoni di frequenze molto maggiori (centinaia o migliaia di Hz) e di modularli a bassa frequenza con gli organi della cavità orale.

Per definizione la *modulazione* è il processo con il quale viene prodotto un segnale le cui caratteristiche variano in funzione del valore istantaneo di un altro segnale detto modulante.

Un segnale non modulato  $V_p(t)$ , cioè un segnale portante, può essere scritto nella forma

$$V_p(t) = A_p \sin[\phi(t)] \quad (1)$$

ove  $A_p$  è l'ampiezza e  $\phi(t)$  la fase, funzione del tempo. La (1) può essere scritta

$$V_p(t) = A_p \sin(2\pi f_p t + \phi_p) \quad (2)$$

ove  $f_p$  è la frequenza e  $\phi_p$  l'angolo di fase. Non si confonda la fase

$$\phi(t) = 2\pi f_p t + \phi_p \quad (3)$$

con l'angolo di fase  $\phi_p$ . La derivata temporale della (3) fornisce il legame tra fase e frequenza:

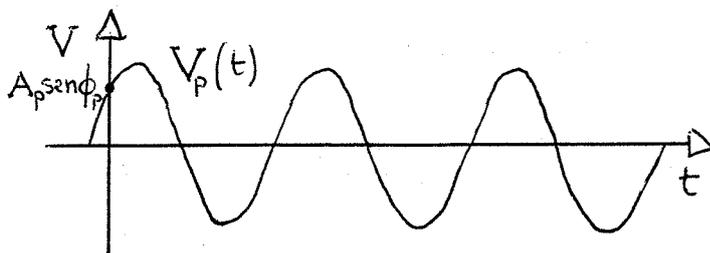


Fig. 1 - Segnale non modulato.

$$d\phi(t)/dt = 2\pi f_p = \omega_p \quad (4)$$

ove  $\omega_p$  è detta pulsazione e rappresenta la velocità con cui aumenta, nel tempo, la fase. Frequenza e pulsazione differiscono per un fattore moltiplicativo pari a  $2\pi$  radianti; la prima si misura in Hz, la seconda in  $\text{rad s}^{-1}$ .

Tornando alla (2) si può osservare che è possibile modulare un segnale portante facendo variare uno, o più, dei tre parametri che lo caratterizzano: si può modulare l'ampiezza, la frequenza o la fase. Il segnale modulato avrà l'espressione

$$V_p(t) = A_p(t) \sin[\omega_p(t)t + \phi_p(t)] \quad (5)$$

qualora tutti e tre i parametri varino nel tempo. Usualmente si modula o solo l'ampiezza o la frequenza e, di conseguenza anche la fase (e viceversa) in quanto questi due ultimi parametri sono legati dalla (4).

Sia

$$V_m(t) = A_m \sin \omega_m t \quad (6)$$

il segnale modulante, di ampiezza  $A_m$  e di pulsazione  $\omega_m$ . Vediamo, nei diversi casi, la teoria della modulazione. Si tenga presente che il processo di modulazione fa sempre ricorso ad elementi circuitali non lineari: diodi, triodi, transistor, ecc.

## 2.a Modulazione d'ampiezza (*amplitude modulation AM*)

La modulazione d'ampiezza si ottiene facendo variare l'ampiezza della portante in funzione dell'ampiezza e della frequenza del segnale modulante. La pulsazione della portante è, solitamente, molto maggiore di quella del segnale modulante e viene scelta in base alla frequenza alla quale si desidera trasmettere.

Il segnale modulato ha la forma

$$V(t) = (A_p + kA_m \sin \omega_m t) \sin \omega_p t \quad (7)$$

Il fattore d'ampiezza  $A_p + kA_m \sin \omega_m t$  esprime la variazione sinusoidale dell'ampiezza dell'onda ed il fattore di proporzionalità  $k$  determina la massima variazione dell'ampiezza dell'onda per un dato segnale modulante  $A_m$ . Nella (7) la fase arbitraria, costante  $\phi_p$  è stata posta uguale a zero in quanto non interviene nel processo di modulazione.

La (7) può essere riscritta nella forma

$$V(t) = A_p (1 + m \sin \omega t) \sin \omega_p t \quad (8)$$

ove  $A_p$  è l'ampiezza del segnale modulato ed  $m = kA_m/A_p$  prende il nome di *profondità di modulazione*.

La (8) può essere riscritta nella forma

$$V(t) = A_p \sin \omega_p t + A_p m \sin \omega t \sin \omega_p t \quad (9)$$

e sviluppata nel seguente modo

$$V(t) = A_p \sin \omega_p t + (mA_p/2) \cos(\omega_p - \omega)t + (mA_p/2) \cos(\omega_p + \omega)t \quad (10)$$

ove il primo termine ha la pulsazione della portante, il secondo rappresenta la banda laterale inferiore o *lower side band* (LSB), il terzo la banda laterale superiore o *upper side band* (USB). L'effetto della non linearità del modulatore è quindi di generare le bande laterali della portante, come si può apprezzare dalla (10). In genere è  $0 \leq m \leq 1$ ; il limite inferiore  $m = 0$  corrisponde all'assenza di modulazione, il limite superiore corrisponde alla massima modulazione, mentre se  $m > 1$  si ha sovrarmodulazione con distorsione del segnale trasmesso.

In Fig. 2 è rappresentato il segnale modulante e quello modulato, l'involuppo tratteggiato mostra le variazioni temporali del massimo del segnale. La forma dell'involuppo è la stessa di quella dell'informazione che si vuole trasmettere.

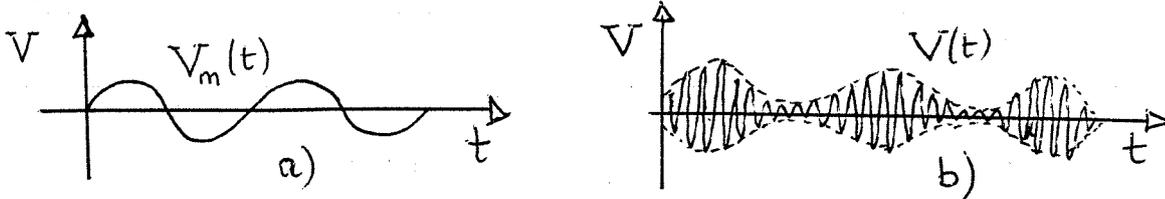


Fig. 2 - a) segnale modulante e b) segnale modulato in ampiezza.

In generale, se il segnale modulante, anziché essere espresso dalla (6), è del tipo più generale  $g(t)$ , il segnale modulato, invece che dalla (8) è dato da

$$V(t) = A_p [1 + m g(t)] \sin \omega_p t. \tag{11}$$

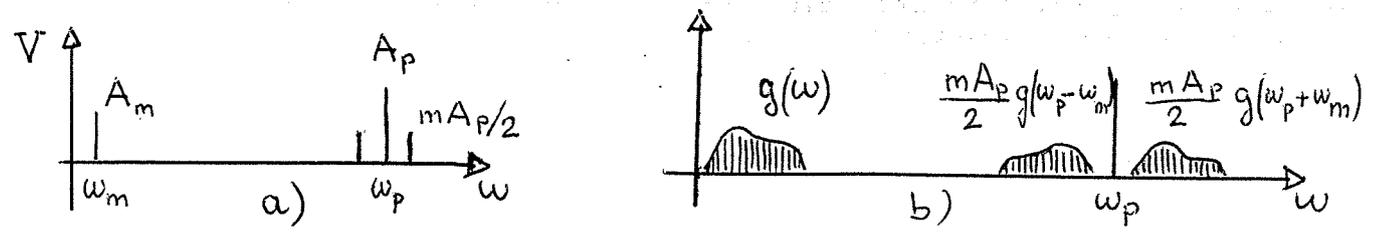


Fig. 4 - Spettro di un segnale modulato in ampiezza: a) modulazione con una singola frequenza; b) modulazione con un segnale  $g(t)$ . La funzione  $g(\omega)$  rappresenta la trasformata di Fourier della funzione  $g(t)$ .

Dal punto di vista dell'energia del segnale, che è proporzionale al quadrato dell'ampiezza, e, per il teorema di Fourier, pari alla somma delle energie delle sue componenti individuali, avremo che l'energia del segnale (10) è proporzionale ad

$$A_p^2 + (A_p m/2)^2 + (A_p m/2)^2 = A_p^2 (1 + m^2/2) \tag{12}$$

Cioè il processo di modulazione somma all'energia della portante una quantità di energia pari ad  $A_p^2 m^2/2$ , che deve essere fornita dal circuito modulatore. Se  $m = 1$ , il contenuto energetico delle due bande laterali è pari a metà di quello della portante.

Invece della profondità di modulazione  $m$  si usa, a volte, la percentuale di modulazione  $m(\%)$

$$m(\%) = 100 m \tag{13}$$

una corretta modulazione non deve superare il 100%.

### 2.b Circuiti per la modulazione d'ampiezza

La modulazione d'ampiezza si può effettuare sommando al segnale portante il segnale modulante per mezzo di un *elemento circuitale non lineare* (modulatore di van der Bijl).  
Sia

$$V_{in}(t) = A_p \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t \tag{14}$$

la somma dei due segnali *all'ingresso* del circuito di modulazione. La corrente nell'elemento non lineare può essere sviluppata in serie di potenze di  $V_{in}(t)$  e scritta nella forma

$$I(t) = \alpha V_{in}(t) + \beta V_{in}(t)^2 + \dots \tag{15}$$

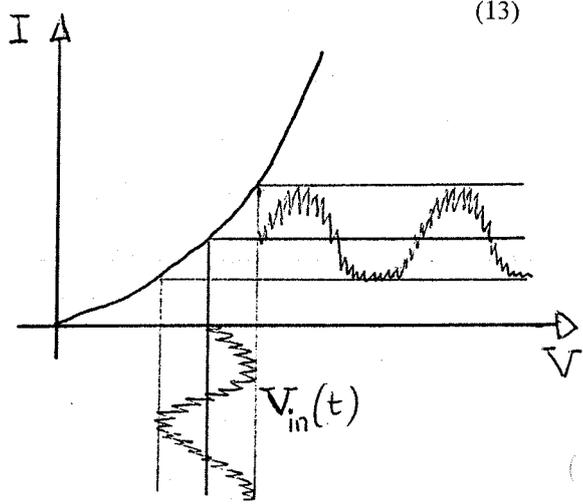


Fig. 3 - Caratteristica non lineare di un modulatore.

ove è sufficiente arrestarsi al termine di secondo grado (*modulatore quadratico*).

Sostituendo la (14) nella (15) otteniamo

$$I(t) = \alpha (A_p \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t) + \beta (A_p^2 \sin^2 \omega_p t + 2A_p A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t + A_m^2 \sin^2 \omega_m t) =$$

$$= \alpha A_p \sin \omega_p t + \alpha A_m \sin \omega_m t + \beta A_p^2 (1 - \cos 2\omega_p t)/2 + \beta A_m^2 (1 - \cos 2\omega_m t)/2 + 2\beta A_p A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t \tag{16}$$

Sviluppando i prodotti si osserva che, nella (16), due termini corrispondono ad una componente continua della corrente, due termini corrispondono alle pulsazioni (a bassa frequenza)  $\omega_m$  e  $2\omega_m$  ed un termine corrisponde alla pulsazione  $2\omega_p$ , doppia di quella della portante. Tutti questi termini possono essere trascurati in quanto eliminabili con opportuni elementi di accoppiamento: i primi tre con un accoppiamento a trasformatore o capacitivo, l'ultimo con opportuni filtri. L'espressione della corrente può, allora, essere scritta

$$I \cong \alpha A_p \sin \omega_p t + 2\beta A_p A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t \tag{17}$$

e, raccogliendo  $\sin \omega_p t$ ,

$$I \cong A (1 + m \sin \omega_m t) \sin \omega_p t \quad (18)$$

ove  $A = \alpha A_p$  è l'ampiezza della corrente modulata ed  $m = 2\beta A_m / \alpha$  prende il nome di *profondità di modulazione*.  
La (18), come fatto per la (8), può essere riscritta nella forma

$$I \cong A \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t \quad (19)$$

e sviluppata nel seguente modo

$$I \cong A \sin \omega_p t + (A_m/2) \cos (\omega_p - \omega_m)t + (A_m/2) \cos (\omega_p + \omega_m)t \quad (20)$$

ove vengono evidenziate la portante e le bande laterali.

Un altro circuito è il *modulatore bilanciato* che, come vedremo, può essere adattato per eliminare automaticamente la portante.

In Fig. 4 sono rappresentati due esempi di modulatore bilanciato di cui ora esamineremo il funzionamento. Si assume che il circuito sia simmetrico e che i diodi od i FET siano identici e che il loro funzionamento corrisponda a leggi quadratiche.

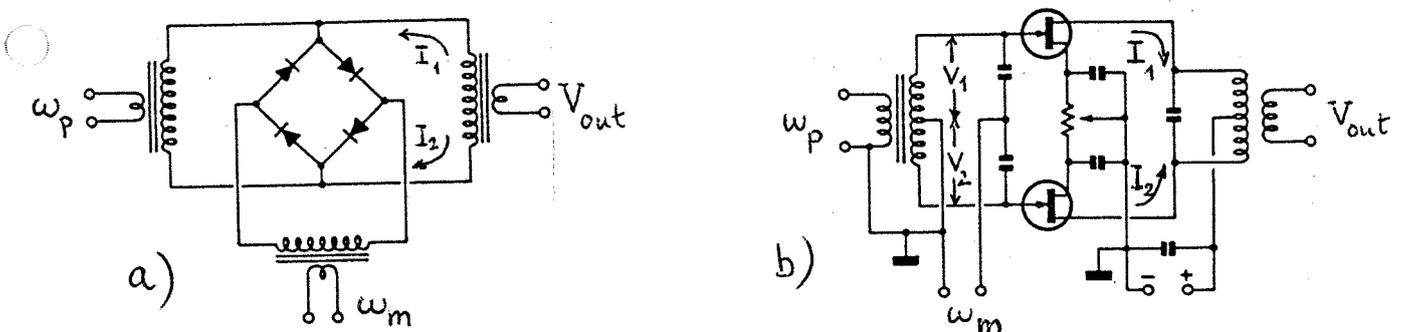


Fig. 4 - Circuiti di modulatori bilanciati: a) modulatore ad anello di diodi; b) modulatore a FET.

Le correnti  $I_1$  ed  $I_2$  nei due elementi possono essere scritte, in funzione dei segnali d'ingresso  $V_1$  e  $V_2$ , nella forma

$$\begin{aligned} I_1 &= \alpha V_1(t) + \beta V_2(t)^2 \\ I_2 &= \alpha V_2(t) + \beta V_1(t)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

Ma i segnali d'ingresso nelle due sezioni dei circuiti hanno, rispettivamente, la forma

$$\begin{aligned} V_1(t) &= A_p \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t \\ V_2(t) &= -A_p \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t \end{aligned} \quad (22)$$

Le correnti hanno quindi le espressioni

$$\begin{aligned} I_1(t) &= \alpha (A_p \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t) + \beta (A_p^2 \sin^2 \omega_p t + 2A_p A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t + A_m^2 \sin^2 \omega_m t) \\ I_2(t) &= \alpha (-A_p \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t) + \beta (A_p^2 \sin^2 \omega_p t - 2A_p A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t + A_m^2 \sin^2 \omega_m t) \end{aligned} \quad (23)$$

Se si trascurano limitazioni di banda dovute al trasformatore d'uscita, il segnale in uscita sarà dato dalla differenza delle correnti, moltiplicata per una costante  $K$ . Il segnale d'uscita sarà quindi

$$V_{out}(t) = K(I_1(t) - I_2(t)) \quad (24)$$

Introducendo le (23) nella (24) si ottiene

$$V_{out}(t) = K(2\alpha A_p \sin \omega_p t + 4\beta A_p A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t) \quad (25)$$

che può essere riscritta nella forma

$$V_{out}(t) = 2K\alpha A_p [1 + 2A_m (\beta/\alpha) \text{sen } \omega_m t] \text{sen } \omega_p t \quad (26)$$

che è simile alla (8). Il suo spettro contiene quindi sia la portante che le bande laterali.

In certe applicazioni è vantaggioso usare il modulatore bilanciato in modo da eliminare la portante. Questo si ottiene facilmente scambiando tra loro i generatori dei segnali modulante e portante come in Fig. 5.

Così facendo, il segnale d'uscita contiene solamente le bande laterali di pulsazioni  $\omega_p + \omega_m$  e  $\omega_p - \omega_m$ .

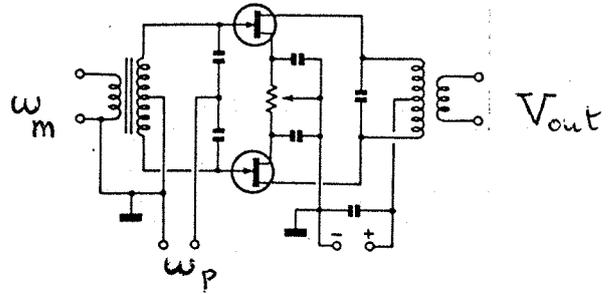


Fig. 5 - Modulatore bilanciato che sopprime la portante.

Se l'uscita di un modulatore a portante soppressa viene fatta passare attraverso un opportuno circuito di filtro si può eliminare anche una delle bande laterali. Il segnale risultante conterrà allora solo una delle bande laterali (*single side-band suppressed-carrier SSSC*). I vantaggi di sopprimere la portante ed, eventualmente, anche una delle bande laterali consistono, nei due casi, nel risparmio di energia e, nel secondo, anche di occupare solo metà della larghezza di banda.

La caratteristica della modulazione d'ampiezza non è solo, come si è visto, lo spostamento di una frequenza modulante in una posizione più alta nello spettro di frequenza. Con il processo di modulazione è possibile anche spostare in su, o in giù, nella scala delle frequenze un qualsiasi segnale ad alta frequenza. Poiché questo spostamento non coinvolge direttamente l'informazione trasmessa, i cambiamenti di frequenza così ottenuti non vengono chiamati modulazione, ma piuttosto, come vedremo, processi di rivelazione.

### 3.a Modulazione di fase e di frequenza (*phase modulation PM, frequency modulation FM*)

Se nella (2), invece di far variare l'ampiezza  $A$  in funzione del segnale da trasmettere si fa variare l'argomento  $\phi(t)$ , tenendo  $A$  costante, si ottiene la modulazione angolare. Esistono due possibilità: modulare la fase  $\phi_p$ , o modulare la frequenza  $f_p$ .

Nella modulazione di fase è la fase della portante ad essere variata in accordo con il segnale modulante  $V_m(t)$ ; quindi un *segnale modulato in fase* ha la forma

$$V_p(t) = A_p \text{sen } [\omega_p t + (\phi_p + \Delta\phi_p \text{sen } \omega_m t)] \quad (27)$$

ove la quantità  $\Delta\phi_p \text{sen } \omega_m t$  è detta *deviazione istantanea di fase* ed è espressa in radianti.

Nella modulazione di frequenza è la frequenza istantanea  $f_p$ , ad essere variata in accordo con il segnale modulante  $V_m(t)$ . Ricordando la (4) ove ora, al posto di  $f_p$ , si scriva  $f_p + \Delta f_p \text{sen } \omega_m t$ , ove  $\Delta f_p$  è la deviazione di frequenza rispetto ad  $f_p$ , cioè

$$d\phi(t)/dt = 2\pi (f_p + \Delta f_p \text{sen } \omega_m t) \quad (28)$$

ed integrando la (28) si ottiene

$$\phi(t) = \omega_p t - (\Delta\omega_p / \omega_m) \cos \omega_m t + \phi_0 \quad (29)$$

ove  $\phi_0$  è una costante.

Il *segnale modulato in frequenza* ha quindi l'espressione

$$V_p(t) = A_p \text{sen } [\omega_p t - (\Delta\omega_p / \omega_m) \cos \omega_m t + \phi_0] \quad (30)$$

Il confronto tra la (30) (FM) e la (27) (PM) mostra che, a parte un fattore  $\phi_0$  inessenziale in quanto costante, le due espressioni differiscono per la presenza nell'argomento (cioè tra le parentesi quadre) della funzione  $\cos \omega_m t$ , piuttosto che  $\text{sen } \omega_m t$ . I due segnali (27) e (30) sono perciò in quadratura tra loro. (segue)

*Buon Natale e Felice Anno Nuovo a tutti i lettori*