

## MODULAZIONE DI AMPIEZZA (AM = Amplitude Modulation)

### Introduzione

La **modulazione di ampiezza** è stata la prima modulazione impiegata nelle trasmissioni via etere da **Guglielmo Marconi** agli inizi del secolo, in quanto la più facile da concepire e da realizzare, sia nella fase di trasmissione che di ricezione, specialmente in quei tempi, quando l'elettronica ancora non disponeva di apparecchiature specifiche.

**Modulare in ampiezza** vuol dire far variare l'ampiezza di una **portante** a radiofrequenza secondo l'ampiezza di una **modulante** a bassa frequenza.

Nell'esempio, la voce del presentatore, trasformata in tensione elettrica dal microfono, va a modulare una portante.

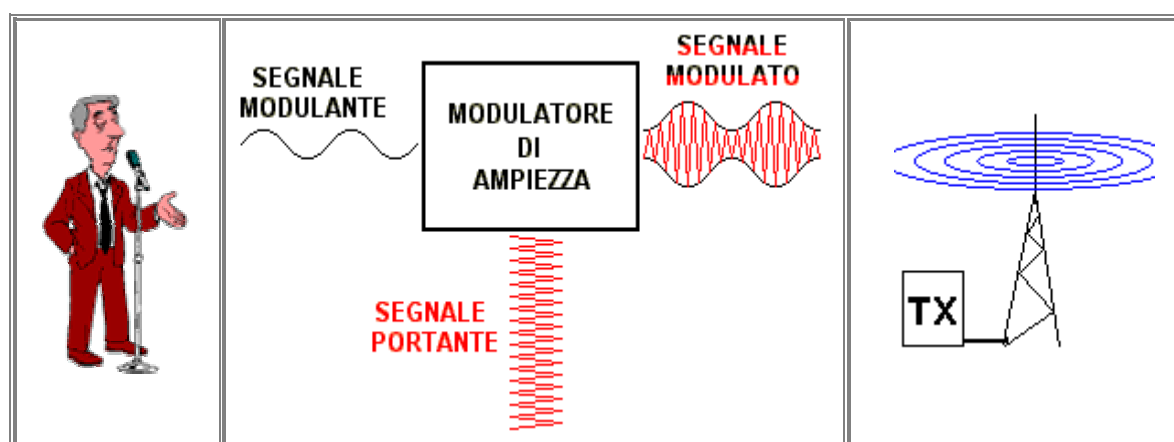


Figura 1 Esempio di AM

Il segnale modulato generato, viene irradiato via etere da un' antenna.

In ricezione un semplice diodo rivela il segnale modulante, la voce umana, e lo porta all'altoparlante che lo riproduce.

È tuttora impiegata dalla RAI - radiotelevisione italiana, nelle radiodiffusioni nella gamma delle onde medie fra 0,52 e 1,6 MHz, ma è poco seguita oggi perché molto disturbata in quanto molto sensibile al rumore.

L'operazione di **modulazione di ampiezza** si effettua partendo da un **segnale elettrico** prodotto da un **oscillatore a radiofrequenza**, cioè alle frequenze usualmente usate nelle trasmissioni radio che vanno dal megahertz in su, e che costituisce la **portante**.

Di questo ci si serve per **portare**, appunto, a distanza l'informazione racchiusa nel segnale a bassa frequenza detto **modulante**.

Il segnale **portante** è costituito da una sinusoide, mentre la **modulante** è un segnale analogico, che può essere schematizzato, per semplicità di calcolo, in un'altra sinusoide, per effetto del teorema di Fourier per cui un qualsiasi segnale periodico od aperiodico, può sempre considerarsi come la somma di infinite sinusoidi.

**Modulazione con modulante sinusoidale e non**

Nella figura 2 sono indicati i tre segnali: **modulante**, a bassa frequenza, **portante**, ad alta frequenza, **modulato**, con la frequenza della portante, ma l'ampiezza che varia secondo la modulante.

Sono indicati anche i periodi e le ampiezze dei tre segnali.

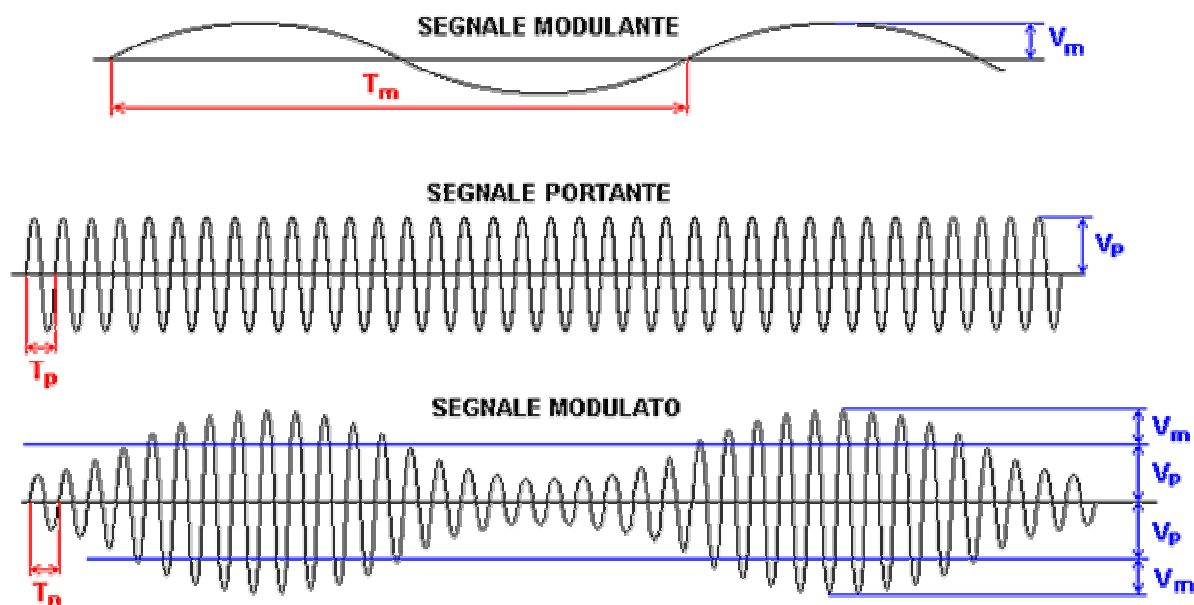


Figura 2. Le forme d'onda della AM

Le funzioni matematiche che esprimono questi segnali possono essere scelte come segue:

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

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

ricordando che pulsazione, frequenza e periodo sono legate fra loro:

$$f_m = \frac{1}{T_m} \quad \omega_m = 2 \cdot \pi \cdot f_m = \frac{2 \cdot \pi}{T_m}$$

$$f_p = \frac{1}{T_p} \quad \omega_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p = \frac{2 \cdot \pi}{T_p}$$

e che deve esistere la condizione:  $f_p \gg f_m$

Per determinare la **formula matematica** del segnale modulato in ampiezza, ricordiamo che l'ampiezza del segnale modulato deve variare, partendo dal valore della portante a riposo, secondo la funzione modulante.

Pertanto il segnale modulato deve risultare:

$$v_{AM}(t) = (V_p + V_m \cos \omega_m t) \cdot \cos \omega_p t$$

Definiamo a questo punto l'**indice di modulazione**, o **profondità di modulazione**, come il rapporto fra l'ampiezza del segnale **modulante** e l'ampiezza del segnale **portante**:

$$m = V_m / V_p$$

e l'espressione del segnale modulato potrà scriversi come segue:

$$v_{AM}(t) = (V_p + mV_p \cos \omega_m t) \cos \omega_p t = V_p \cos \omega_p t + mV_p \cos \omega_m t \cos \omega_p t$$

Questa espressione, ricordando una delle formule di Werner:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

si può esprimere come segue:

$$v_{AM}(t) = V_p \cos \omega_p t + \frac{mV_p}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{mV_p}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t$$

Questa si interpreta come la somma di tre funzioni sinusoidali di cui la prima coincide con la portante a riposo, e le altre due sono due sinusoidi di ampiezza:

$$\frac{mV_p}{2}$$

che come frequenza hanno: una la somma, e una la differenza fra frequenze **portante** e **modulante**.

Il segnale modulato  $v_{AM}(t)$  ha quindi forma diversa a seconda del valore dell'indice di modulazione  $m$ , come rappresentato in figura 3.

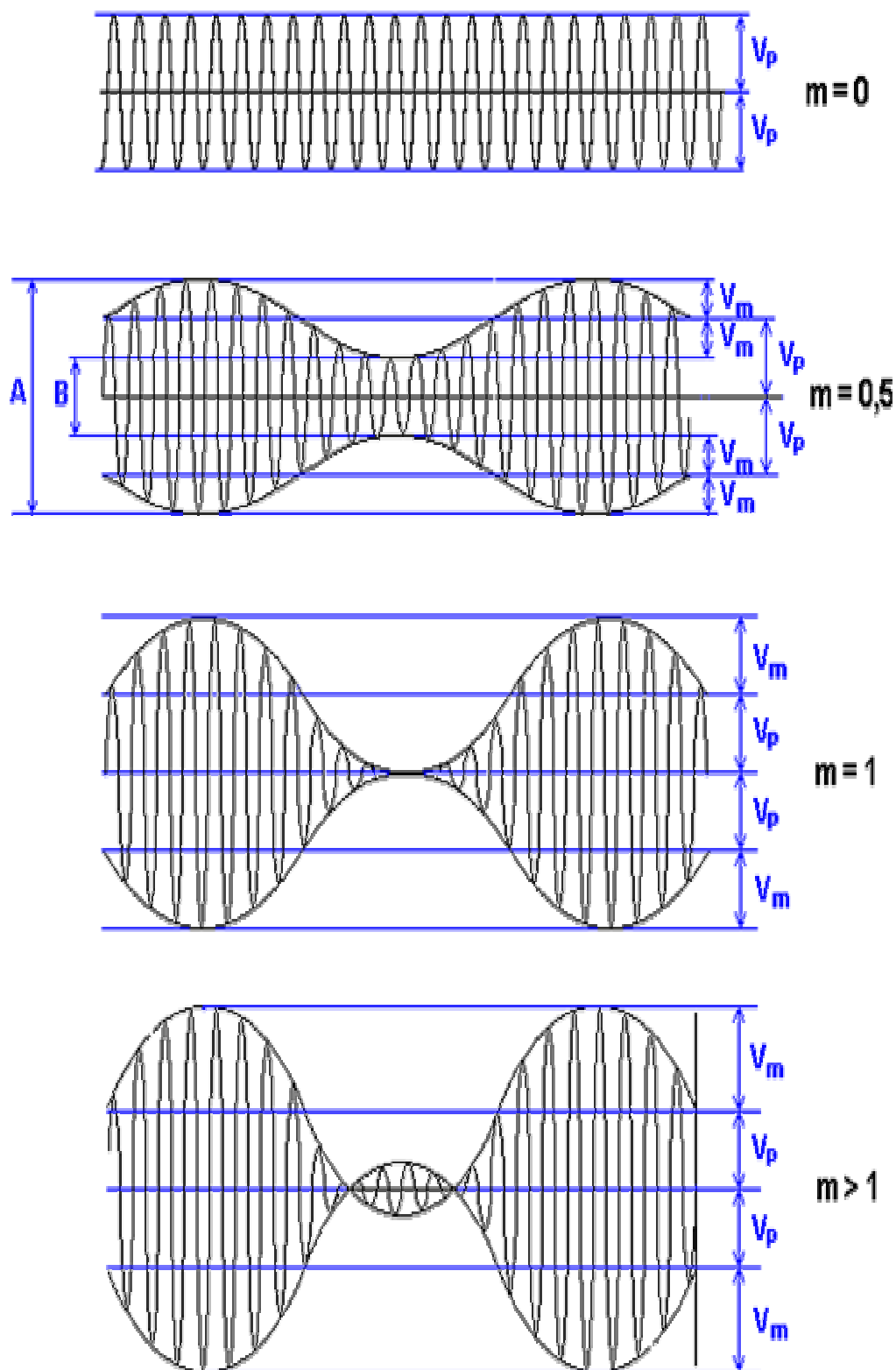


Figura 3. Forme d'onda della AM per diversi valori di  $m$

L'indice di modulazione  $m$  può variare fra 0 e 1 :  $0 < m < 1$

Ricordando la formula di  $m$ :  $m = V_m / V_p$

si osserva infatti che  $m = 0$  vuol dire che non c'è **modulante**, quindi non si trasmette alcuna informazione, pur impegnando il canale con la portante.

Se  $m = 0,5$  si è nelle condizioni ottimali.

Se  $m = 1$  si ha il massimo della modulazione.

Se  $m > 1$  allora si è in forte distorsione da **crossover** come rappresentato in figura 3.

L'indice di modulazione  $m$  si può rilevare dall'immagine sopra con la formula:

$$m = \frac{A - B}{A + B} = \frac{(2V_p + 2V_m) - (2V_p - 2V_m)}{(2V_p + 2V_m) + (2V_p - 2V_m)} = \frac{4V_m}{4V_p} = \frac{V_m}{V_p}$$

L'indice di modulazione fin qui descritto è rilevato, in antenna, cioè all'uscita del modulatore, ma talora si dispone del segnale all'ingresso del modulatore, in tal caso si deve tenere conto della **costante del modulatore**  $K_{AM}$  e la formula diventa:

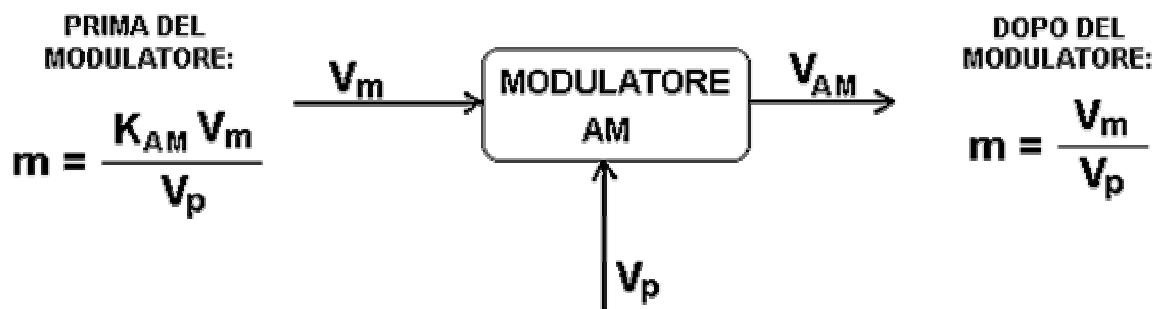


Figura 4 L'indice di modulazione  $m$  prima e dopo il modulatore

## SPETTRO DEL SEGNALE AM

Dall'espressione

$$v_{AM}(t) = V_p \cos \omega_p t + \frac{mV_p}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{mV_p}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t$$

facendo la trasformata di Fourier, si può ottenere la rappresentazione nel dominio delle frequenze (spettro) di figura 5, dove sono rappresentate: il segnale **modulante**, il segnale **portante** e il segnale **modulato** in ampiezza.

Si osservi come l'operazione di modulazione ha dato luogo ad una traslazione in frequenza del segnale modulante  $f_m$  della quantità  $f_p$ .

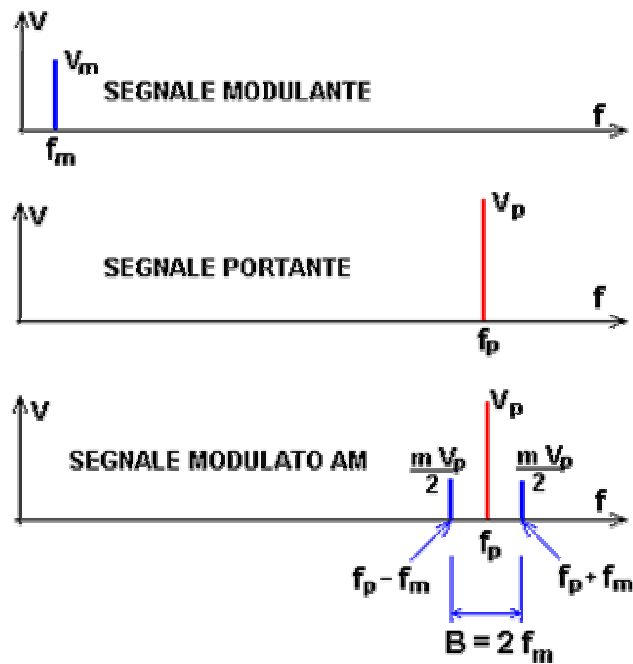


Figura 5. Spettri dei segnali componenti la AM

Si osservi la larghezza di banda del segnale modulato che risulta essere il doppio della frequenza  $f_m$  modulante, infatti:

$$B = (f_p + f_m) - (f_p - f_m) = 2f_m$$

Se la modulante non è di tipo sinusoidale e occupa in banda base una banda  $B = f_{\max} - f_{\min}$ , si possono distinguere due casi:  $f_{\min} \neq 0$  ed  $f_{\min} = 0$  come riportato in figura 3.6.

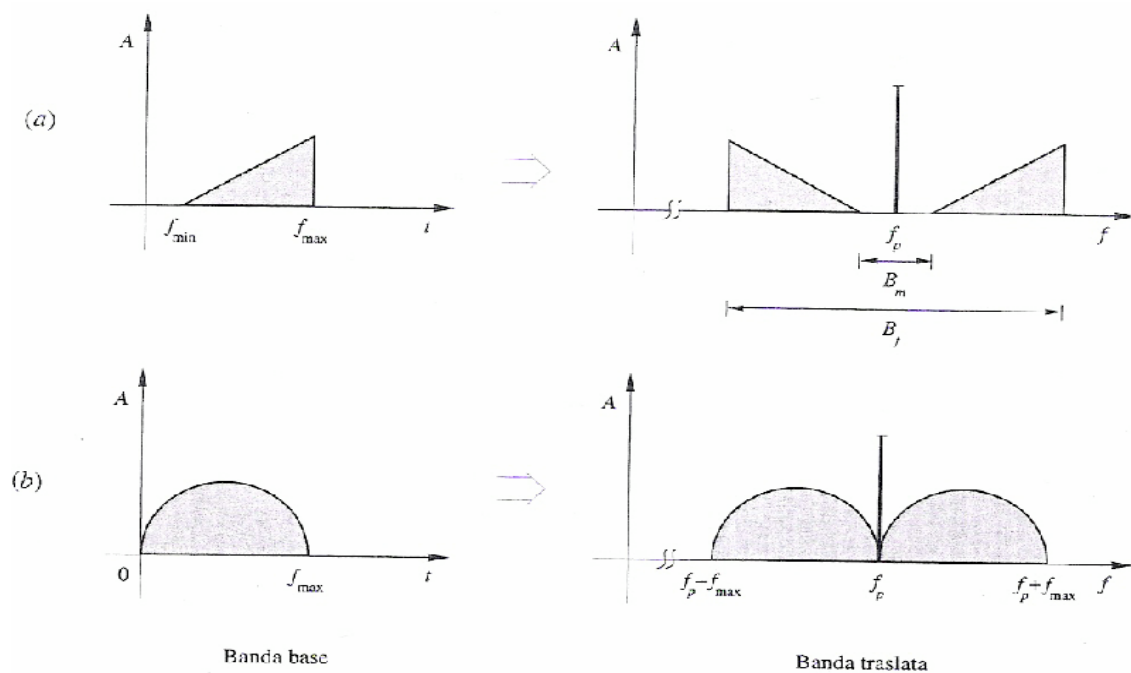


Figura 6 Esempi di spettri di segnali modulanti non sinusoidali

## POTENZA DI UN SEGNALE MODULATO IN AM

Poiché un segnale modulato in ampiezza è costituito dalla somma di tre segnali distinti, come si può vedere dal suo spettro di ampiezza (figura 7), la sua potenza sarà data dalla somma delle potenze dei tre segnali:

$$P_{AM} = P_p + P_{left} + P_{right}$$

dove, con  $P_p$  si è indicata la potenza della portante, con  $P_{right}$  la potenza della riga destra e con  $P_{left}$ , la potenza della riga sinistra.

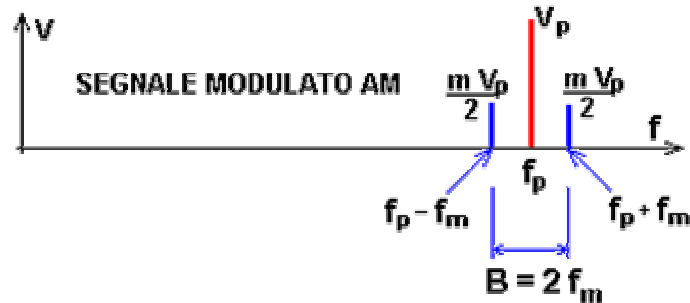


Figura 7. Lo spettro di ampiezza di un segnale modulato AM

Indicando con  $R_0$  la resistenza di radiazione dell'antenna trasmittente, dai valori delle tensioni, espresse in **valori massimi**, indicate in figura, e nota  $R_0$ , si trova la potenza complessiva del segnale modulato in AM in funzione dell'indice di modulazione  $m$ :

$$P = V_{eff} \cdot I_{eff} = V_{eff}^2 / R_0 = (V_p / \sqrt{2})^2 / R_0$$

$$\begin{aligned} P_{AM} = P_p + P_{left} + P_{right} &= \frac{V_p^2}{2R_0} + \frac{\left(\frac{mV_p}{2}\right)^2}{2R_0} + \frac{\left(\frac{mV_p}{2}\right)^2}{2R_0} = \frac{V_p^2 + \frac{m^2V_p^2}{4} + \frac{m^2V_p^2}{4}}{2R_0} = \\ &= \frac{\frac{4V_p^2 + m^2V_p^2 + m^2V_p^2}{4}}{2R_0} = \frac{4V_p^2 + m^2V_p^2 + m^2V_p^2}{4} \cdot \frac{1}{2R_0} = \frac{4V_p^2 + 2m^2V_p^2}{8R_0} = \frac{2V_p^2 + m^2V_p^2}{4R_0} = \\ &= \frac{V_p^2}{2R_0} \cdot \frac{2 + m^2}{2} = P_p \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \end{aligned}$$

**RENDIMENTO DI MODULAZIONE**

Dalla formula appena ricavata si vede che la potenza del segnale modulato in **AM** cresce con il crescere dell'indice di modulazione **m**.

Si è visto anche che il segnale modulato è formato da tre righe spettrali di cui due, uguali, rappresentano il segnale modulato, cioè l'informazione, e la terza, la più intensa, rappresenta la portante che invece non porta alcuna informazione.

Da questa osservazione si deduce che la modulazione di ampiezza ha un basso rendimento informativo, nel senso che per trasmettere una sola delle due righe laterali, che da sola contiene tutta l'informazione, si è invece costretti a trasmettere altre due righe, di cui una, la portante, di potenza molto maggiore.

Il rendimento di modulazione si definisce dunque come il rapporto fra la potenza del segnale informativo trasmesso contenuto in una sola delle due righe laterali, diviso tutta la potenza che si deve trasmettere, che è costituita da tre righe:

$$\eta = \frac{P_{\text{inf}}}{P_p} = \frac{\frac{\left(\frac{mV_p}{2}\right)^2}{2R_0}}{\frac{V_p^2}{2R_0} + \frac{\left(\frac{mV_p}{2}\right)^2}{2R_0} + \frac{\left(\frac{mV_p}{2}\right)^2}{2R_0}} = \frac{\frac{\left(\frac{mV_p}{2}\right)^2}{2R_0}}{V_p^2 + \left(\frac{mV_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{mV_p}{2}\right)^2} = \frac{\frac{m^2 V_p^2}{4}}{V_p^2 + 2 \frac{m^2 V_p^2}{4}} =$$

$$= \frac{\frac{m^2}{4}}{1 + \frac{m^2}{2}} = \frac{\frac{m^2}{4}}{\frac{2 + m^2}{2}} = \frac{m^2}{4} \cdot \frac{2}{2 + m^2} = \frac{m^2}{2(2 + m^2)}$$

In questa formula, sostituendo i valori limite attribuibili ad **m**, cioè **0** ed **1**, si ottengono i valori

minimo e massimo del rendimento:

$$\eta = \frac{m^2}{2(2 + m^2)} = \frac{0}{2(2 + 0^2)} = 0$$

$$\eta = \frac{m^2}{2(2 + m^2)} = \frac{1}{2(2 + 1^2)} = \frac{1}{2 \cdot 3} = \frac{1}{6} \cong 0,17$$



Se ne deduce che, se l'indice di modulazione  $m = 0$ , cioè non si modula, il rendimento  $\eta = 0$ , come è logico, se però si modula con indice di modulazione  $m = 1$ , allora il massimo rendimento ottenibile, è appena del **17 %**.

## TIPI DI MODULAZIONE AM

Come visto precedentemente la modulazione AM si divide in DSB, SSB e VSB.

### DSB

La DSB è una modulazione di ampiezza con portante soppressa come riportato in figura 8 e si può ottenere moltiplicando due segnali che hanno entrambi valor medio nullo.

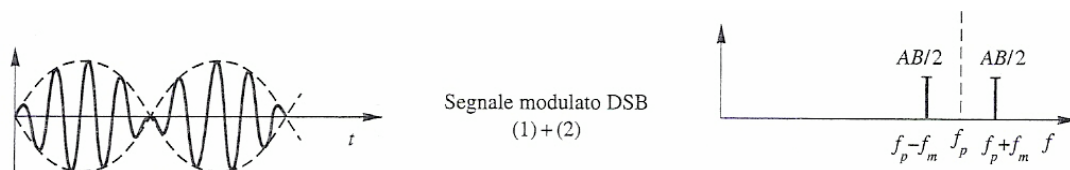


Figura 8. Segnale DSB in funzione del tempo e relativo spettro

Ciò permette di non avere potenza sprecata nella trasmissione della portante, ma in fase di demodulazione bisogna ricrearla e questo complica il circuito di demodulazione.

### SSB

La SSB è una modulazione di ampiezza a banda laterale unica, che può quindi essere BLI o BLS, come riportato in figura 9.

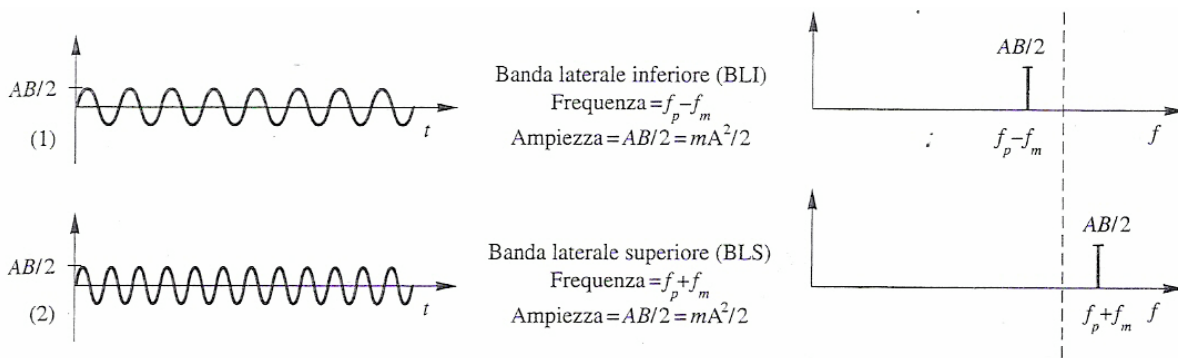


Figura 9. Segnali SSB in funzione del tempo e relativi spettri

Si ottiene da un segnale DSB facendo seguire al modulatore un filtro passa banda. Si ha la minima occupazione di banda. Il trasmettitore e il ricevitore sono più complicati. La potenza è impiegata tutta per la trasmissione del segnale. È adatta per trasmissioni bidirezionali.

### VSB

Prende il nome di modulazione d'ampiezza vestigiale. Ciò consiste in una modulazione d'ampiezza con trasmissione della portante e con soppressione parziale di una banda laterale. Si utilizza per trasmissioni televisive.

## MODULATORI

Un sistema di base della modulazione AM (che può essere per esempio un sistema di trasmissione radio) é rappresentato in figura 10

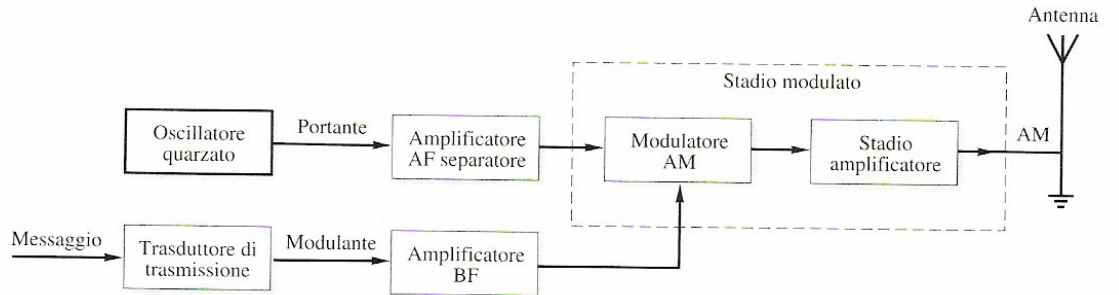


Figura 10. Schema a blocchi di un modulatore AM

ed è costituito da:

- un trasduttore audio-elettrico (microfono) che trasforma la grandezza fisica di ingresso (onde sonore) in un segnale elettrico variabile con legge analogica (modulante);
- un amplificatore a bassa frequenza per amplificare l'ampiezza del segnale elettrico fornito dallo stadio di trasduzione dando così il giusto livello di potenza richiesto dallo stadio successivo;
- un oscillatore per generare il segnale di supporto ad alta frequenza (portante). Di solito viene impiegato un oscillatore al quarzo per consentire una maggior stabilità di frequenza e di ampiezza;
- un amplificatore-separatore ad alta frequenza (AF) che ha il compito di impedire un assorbimento di potenza dall'oscillatore (presenta un'elevata impedenza di ingresso) tutelando così il buon funzionamento di quest'ultimo;
- un modulatore AM costituito da un amplificatore a bassa potenza funzionante in classe B che esegue la modulazione di ampiezza;
- uno stadio di amplificazione che fornisce la potenza richiesta dal mezzo trasmissivo (antenna). Poiché gli amplificatori di potenza perdono la loro linearità al crescere del livello di potenza dell'uscita si preferisce impiegare più stadi di amplificazione.

## DEMODULATORI

Il processo inverso della modulazione è chiamato *demodulazione* ed i dispositivi che la eseguono prendono il nome *demodulatori* o *rivelatori*. Tali dispositivi insieme ad altri utilizzati per riottenere l'informazione originaria vengono chiamati *ricevitori*.

## DEMODULATORI AM

Lo schema di principio della demodulazione AM (demodulazione di involuppo) è riportato in figura 11

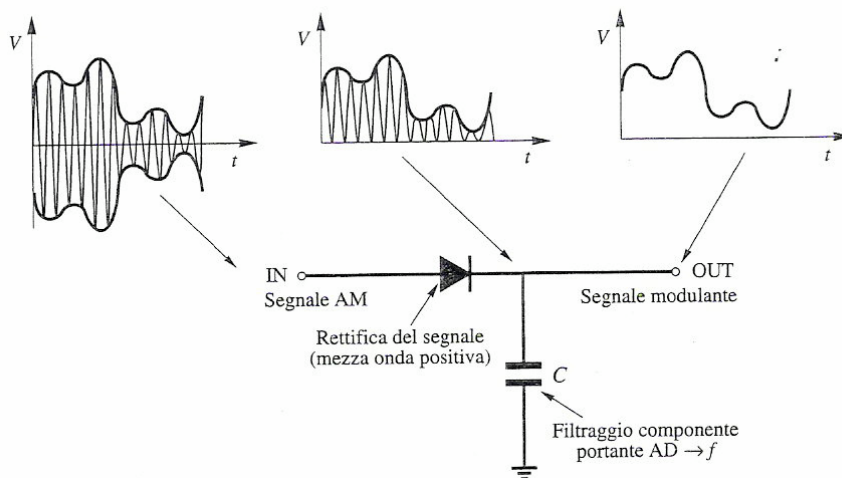


Figura 11. Schema di principio della demodulazione AM

Il demodulatore reale ha però una resistenza  $R$  in parallelo alla capacità, per cui quello che succede è riportato in figura 12, dove è rappresentato anche il fenomeno del taglio diagonale.

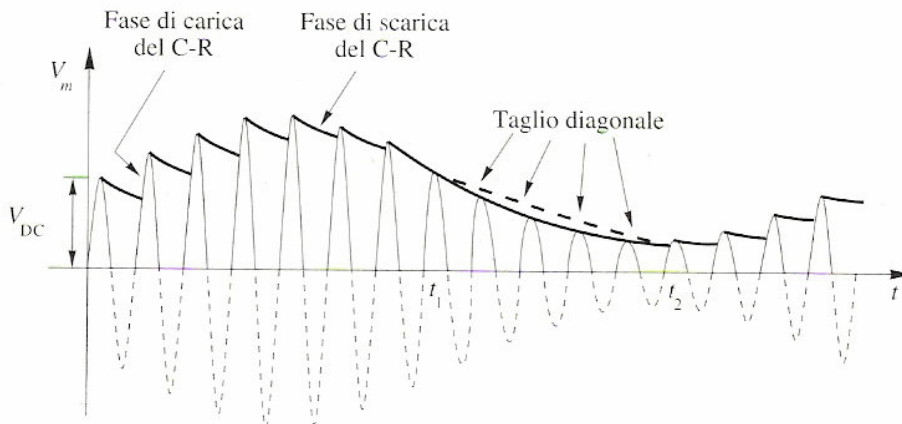


Figura 12. Rivelazione di involuppo

Il funzionamento di questo rivelatore dipende dal valore della costante di tempo  $\tau = RC$ .

Quindi se  $RC \ll T_p$  si ottengono dentellature più evidenti e quindi un involuppo non accettabile;

se  $RC \gg T_p$  si ottengono dentellature meno evidenti, approssimando meglio l'involuppo del segnale modulato, ma correndo il rischio di causare una distorsione di taglio diagonale.

**DEMODULATORI DSB**

Per demodulare segnali DSB si utilizzano demodulatori a prodotto come riportato in figura 13:

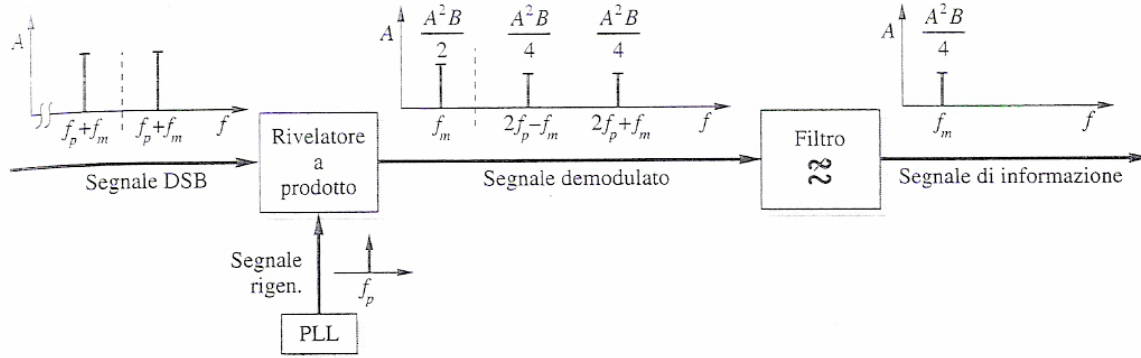


Figura 13 Schema a blocchi di un demodulatore a prodotto

**CONFRONTO FRA I VARI TIPI DI MODULAZIONE**

<i>Caratteristiche</i>	<i>Tecnica AM</i>	<i>Tecnica DSB</i>	<i>Tecnica SSB</i>
<i>Banda del segnale modulato</i>	$B_{AM} = 2f_{max}$	$B_{DSB} = B_{AM} = 2f_{max}$	<sup>Ⓢ</sup> $B_{SSB} = \frac{1}{2} B_{AM} = f_{max}$
<i>n° di canali per mezzo trasmissivo</i>	basso	$n^{\circ} = C_{AM} = C_{DSB}$ (basso) n° canali AM = n° canali DSB	<sup>Ⓢ</sup> n° canali SSB = doppio n° canali AM
<i>Potenza totale di trasmissione</i>	$P_t = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \cdot \frac{A^2}{2}$ ( $R = 1 \Omega$ )	$P_t = \frac{1}{4} (A \cdot B)^2$	<sup>Ⓢ</sup> $P_t = \frac{1}{8} (A \cdot B)^2$
<i>Potenza associata alla portante</i>	$P_p = \frac{A^2}{2}$ ; ( $R = 1 \Omega$ )	<sup>Ⓢ</sup> $P_p = 0$	<sup>Ⓢ</sup> $P_p = 0$
<i>Rendimento max di modulazione</i>	$n = 16,7\%$	$n = 50\%$	<sup>Ⓢ</sup> $n = 100\%$
<i>Modulatore</i>	Amplificatore di potenza (classe B o C)	<sup>Ⓢ</sup> Ponte bilanciato a diodi	<sup>Ⓢ</sup> — Ponte bilanciato a diodi — Ponte a sfasamento
<i>Problemi di trasmissione</i>	Più stadi di amplificazione	<sup>Ⓢ</sup> Trasformatori a prese centrali	— Trasformatori a prese centrali — Rete sfasatrice a 90° a banda larga
<i>Demodulatore</i>	<sup>Ⓢ</sup> Rivelatore di involuppo	Rivelatore a prodotto	Rivelatore a prodotto
<i>Problemi di ricezione</i>	<sup>Ⓢ</sup> Distorsione di taglio diagonale	Ricostruzione della portante (distorsione di fase o di frequenza)	Ricostruzione della portante (distorsione di fase o di frequenza)
<i>Complessità circuitale in TX</i>	Maggiore	<sup>Ⓢ</sup> Minore	<sup>Ⓢ</sup> — Minore — Media
<i>Complessità circuitale in RX</i>	<sup>Ⓢ</sup> Minore	Maggiore	Maggiore
<i>Rapporto S/N in uscita</i>	Minore	Minore	<sup>Ⓢ</sup> Maggiore
<i>Costo del sistema</i>	Alto	<sup>Ⓢ</sup> Basso	<sup>Ⓢ</sup> Medio
<i>Impiego</i>	— Trasmissioni radio — Trasmissioni TV (tecnica derivante VSB)	— Trasmissioni radio — Trasmissioni SSB	<sup>Ⓢ</sup> — Trasmissioni radio in campo specifico — Trasmissioni telefoniche (FDM, PSK) — Trasmissione dati (PSK)

<sup>Ⓢ</sup> = vantaggio rispetto alle altre tecniche.

Tabella 1 Confronto fra i diversi tipi di modulazione