

## *Modulazioni/Demodulazioni analogiche*

Le modulazioni sono delle tecniche, che si applicano al segnale da trasmettere a distanza, allo scopo di adattarlo alle caratteristiche del canale di comunicazione, mantenendo però invariata la sua informazione. Immaginiamo una trasmissione radio senza alcuna modulazione dove la voce umana, trasformata da un microfono in corrente elettrica, venga irradiata via etere da un'antenna e catturata tramite un'altra antenna ricevente. La banda utile della voce umana non supera i 5KHz, per cui, senza un'opportuna modulazione, anche la frequenza delle onde elettromagnetiche irradiata via etere sarebbe la stessa, con una serie di inaccettabili conseguenze:

Le dimensioni delle antenne sarebbero assolutamente impensabili, dato che alla frequenza di 5KHz, la lunghezza d'onda corrispondente è di 60 Km e per avere una buona efficienza le antenne dovrebbero essere lunghe o 15Km o 30Km in risposta alla tecnica per la scelta delle antenne a  $\lambda/4$  o  $\lambda/2$ .

Potenza elevata impiegata ad alimentare una antenna di queste dimensioni.

Il trasmettitore risulterebbe pesante e voluminoso.

Le frequenze sarebbero le stesse di tutti gli utenti, cioè il canale, senza modulazione, sarebbe unico, per cui tutti ascolterebbero tutti.

Essendo le comunicazioni di fatto pubbliche, non ci sarebbe alcuna forma di privacy.

Da quanto detto se ne deduce l'assoluta necessità della modulazione che, traslando in frequenza il segnale, ed allocando in canali diversi le trasmissioni di utenti diversi, invece, produce esattamente tutti i vantaggi opposti:

Frequenza di trasmissione molto elevata, la lunghezza delle antenne diventa per esempio in FM a 100 MHz, 75cm.

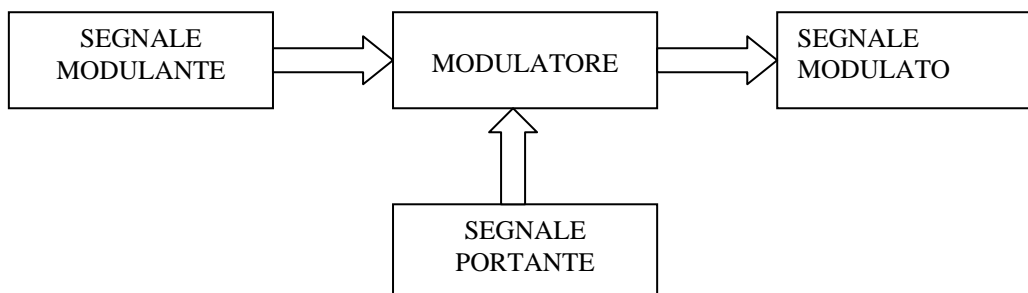
Potenza impiegata diventa molto minore.

Le dimensioni del trasmettitore più piccole.

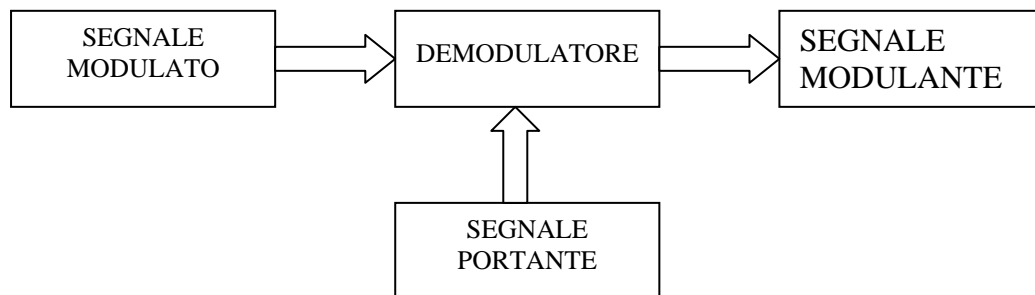
Le frequenze sono diverse per ogni trasmissione, quindi sono possibili moltissime trasmissioni contemporanee senza interferenza reciproca.

Il termine modulazione consiste nell'adattare le caratteristiche dello spettro di un generico segnale da trasmettere in modo che possa attraversare il canale di trasmissione e, nel contempo, consentire la "multiplicazione", cioè la trasmissione contemporanea di molti segnali su uno stesso canale senza avere nessun tipo di interferenza. L'informazione (il segnale da trasmettere sotto forma di segnale elettrico) viene denominato segnale modulante. Deve essere però sempre presente anche un altro segnale, detto portante, che consentirà la traslazione in frequenze più elevate del segnale modulante, per consentirne i vantaggi della modulazione di cui si è sopra esposto.

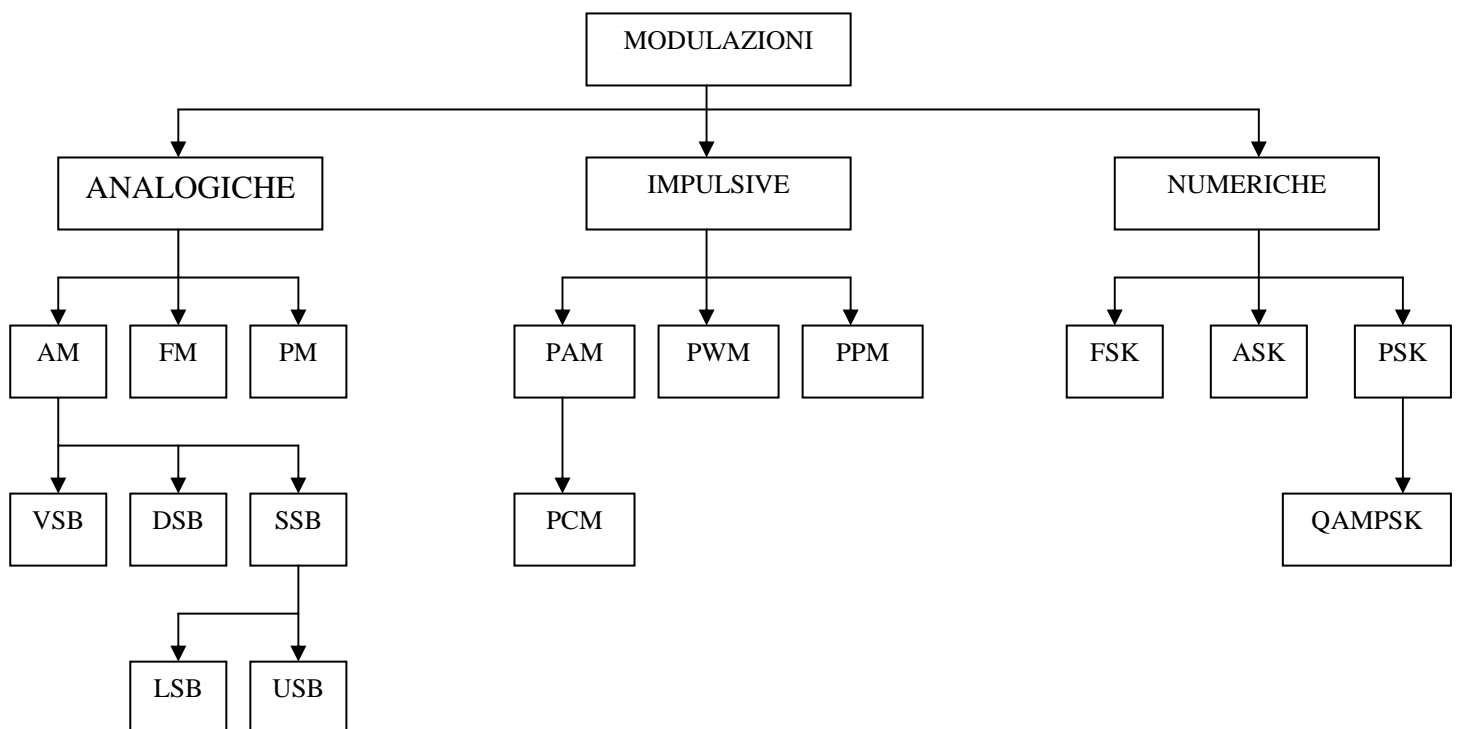
L'operazione di modulazione del segnale ha dunque bisogno di un modulatore (dispositivo elettronico in grado di traslare in frequenza il segnale mantenendo invariata l'informazione da trasmettere).



In ricezione avviene esattamente l'opposto ed il segnale modulato, che ha attraversato il canale di trasmissione, viene demodulato dal demodulatore, ricostruendo il segnale modulante originario che contiene l'informazione.

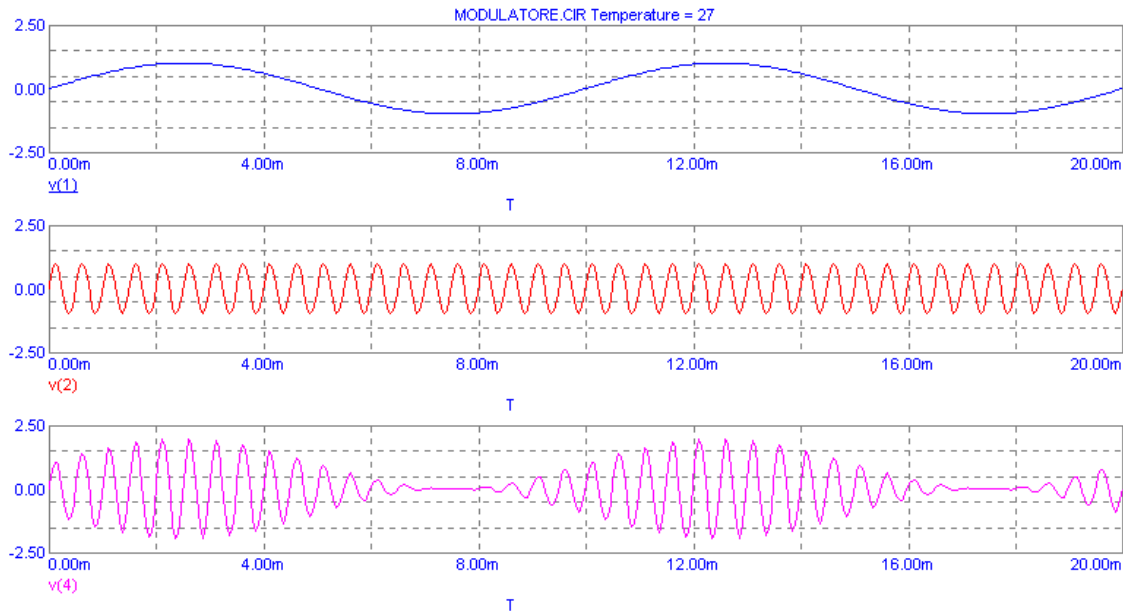


Ovviamente questo è uno schema generale su come modulare e demodulare un segnale per essere trasmesso e, a seconda che il segnale sia analogico, impulsivo o numerico, e che il canale sia un doppino telefonico, una fibra ottica, o l'etere, (caratteristiche fisiche differenti), si ha una classificazione delle modulazioni.



## AM

La modulazione di ampiezza, detta anche AM (Amplitude Modulation) consiste nel variare, istante per istante, l'ampiezza di un segnale, detto portante, in funzione del valore di un altro segnale, detto modulante. La modulazione di ampiezza è largamente diffusa per i vantaggi che offre: semplicità dei circuiti di modulazione e demodulazione e buona utilizzazione dello spettro. Questa tecnica è stata la prima ad essere impiegata sia nel campo radiofonico sia in quello televisivo. Il segnale modulato ha la stessa frequenza della portante.



In alto è rappresentato il segnale modulante, quello centrale è la portante mentre l'ultimo è il segnale modulato. Se la portante è espressa da:

$$V_p(t) = V_p \cos(\omega_p t + \gamma)$$

nella quale per semplicità poniamo  $\gamma = 0$ , mentre la modulante è sinusoidale come la:

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

Il segnale modulato in ampiezza assume l'espressione:

$$V(t) = (V_p + K_a \cdot K_m \cdot \cos \omega_m t) \cdot \cos \omega_p$$

Dove  $K_a$  è una costante di proporzionalità che dipende dalle caratteristiche elettriche del modulatore impiegato. Essendo  $\omega_p \gg \omega_m$ , in un periodo del segnale portante è contenuto un numero elevatissimo di oscillazioni del segnale modulante. L'espressione:

$$V(t) = (V_p + K_a \cdot K_m \cdot \cos \omega_m t) \cdot \cos \omega_p$$

Si può porre nella forma:

$$V(t) = V_p \cdot \left( V_p + \frac{K_a \cdot K_m}{V_p} \cdot \cos \omega_m t \right) \cdot \cos \omega_p t = V_p (1 + m_a \cos \omega_m t) \cos \omega_p t$$

il fattore  $m_a = \frac{K_a \cdot K_m}{V_p}$  prende il nome di indice o profondità di modulazione e deve essere  $m_a = 1$  affinché l'involuppo (per involuppo si intende il luogo dei punti di picco relativi al segnale modulato) del segnale modulato abbia lo stesso andamento dell'informazione da trasmettere. Per

$m_a > 1$  il segnale  $V(t)$  si dice in sovr modulazione. In tal caso si introducono notevoli distorsioni nell'involuppo del segnale modulato che non consentono, in ricezione, una ricostruzione fedele

dell'informazione. Nella radiodiffusione  $m_a = 40\%$ . Sviluppando la seguente espressione :

$$V(t) = V_p (1 + m_a \cos \omega_m t) \cos \omega_p t$$

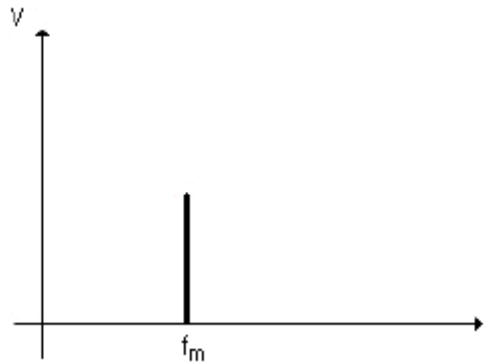
si ha :

$$V(t) = V_p \cdot \cos \omega_p t + V_p \cdot m_a \cdot \cos \omega_p t \cdot \cos \omega_m t$$

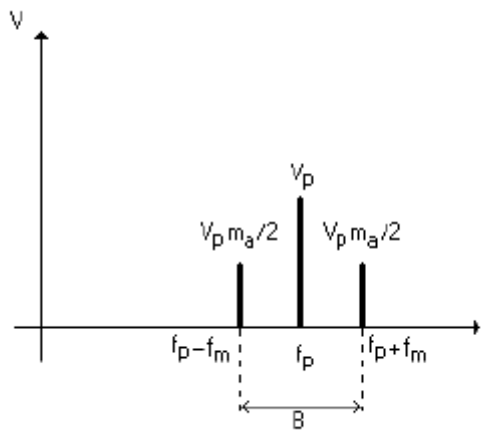
Applicando la formula di Werner relativa al prodotto di funzioni coseno, si ha:

$$V(t) = V_p \cdot \cos \omega_p t + \frac{V_p \cdot m_a}{2} \cdot \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{V_p \cdot m_a}{2} \cdot \cos(\omega_p + \omega_m)t$$

La precedente relazione mostra che un segnale AM, si può ritenere costituito dalla portante più due componenti sinusoidali dette righe o, più in generale, bande laterali. Nella figura seguente si mostra il relativo spettro in frequenza.



Nella figura è illustrato lo spettro del segnale modulante



Nella figura è illustrato lo spettro di un segnale AM nel caso di modulante sinusoidale. Si definisce larghezza di banda o canale la quantità :  $B = 2f_m$ . Se il segnale modulante è una generica funzione periodica scomponibile in una somma di segnali sinusoidali (sviluppo in serie di Fourier) è possibile applicare per ognuno di essi il metodo precedentemente descritto; si otterranno, quindi, un insieme di oscillazioni laterali dovute alle singole componenti del segnale modulante. Nella prossima figura si mostra lo spettro di frequenza del segnale demodulante denominato segnale in banda base. Tale spettro si estende tra  $f_{min}$  ed  $f_{max}$  ed è stato indicato con un triangolo rettangolo, come si è soliti fare in campo telefonico. Nella figura si riporta lo spettro del relativo segnale AM. Si osservi che la modulazione di ampiezza ha prodotto, sostanzialmente la traslazione o conversione di frequenza della banda base generando due bande: la banda laterale inferiore e la banda laterale superiore. Per tale motivo la modulazione AM è nota anche come modulazione in banda traslata. La conversione di frequenza è una interessante proprietà della modulazione AM. Utilizzando un filtro passa banda è possibile ad esempio, estrarre la sola banda laterale superiore che contiene le stesse armoniche del segnale in banda base traslate, però, di una quantità costante pari alla frequenza della portante.

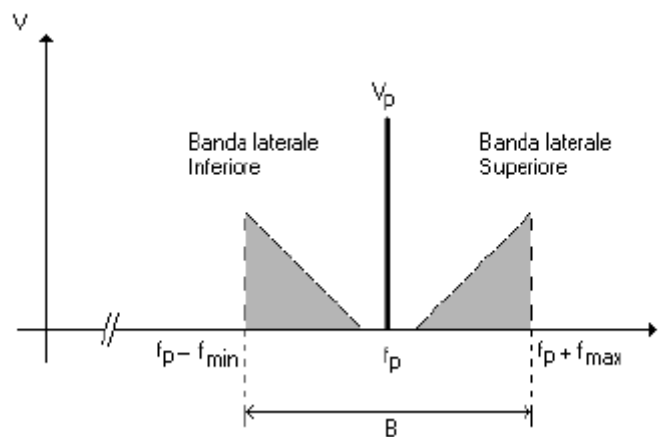
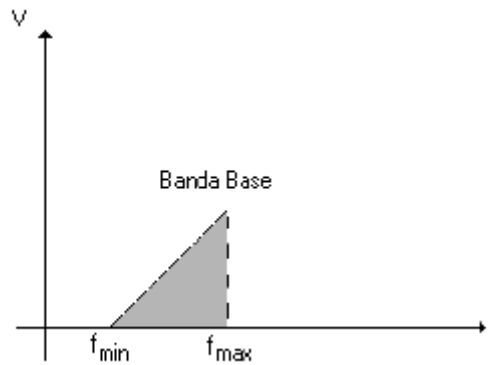


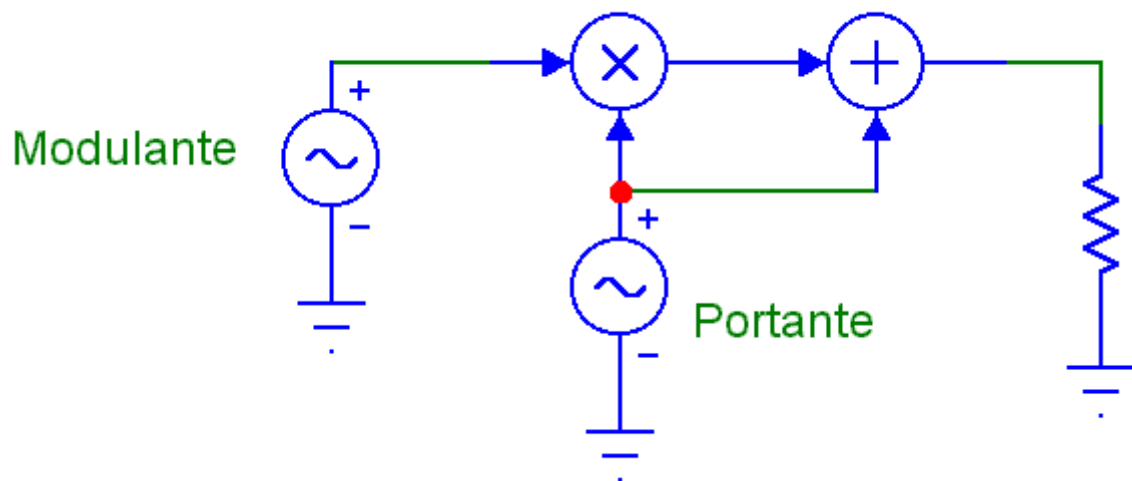
Figura indicando con  $m_1, m_2, m_3, \dots$  gli indici di modulazione di ciascuna componente armonica, l'indice di modulazione complessivo ma è la media geometrica degli indici di modulazione:

$$m_a = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + \dots}$$

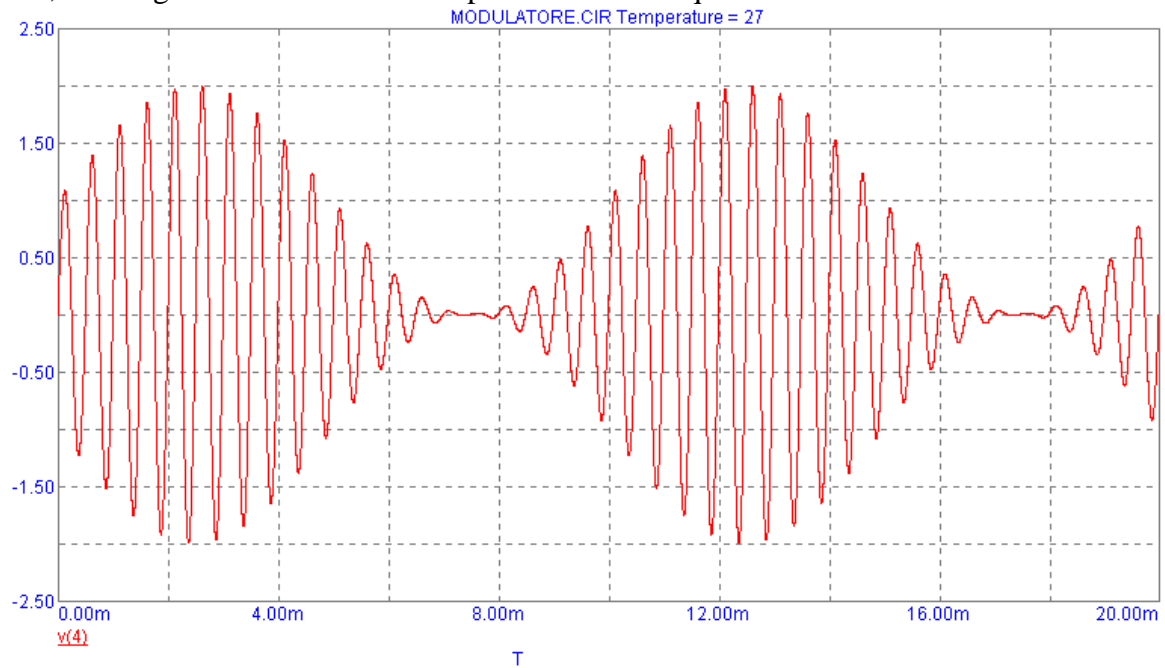
Se  $f_{max}$  è la massima frequenza contenuta nel segnale modulante, supposto periodico, la larghezza di banda risulta:

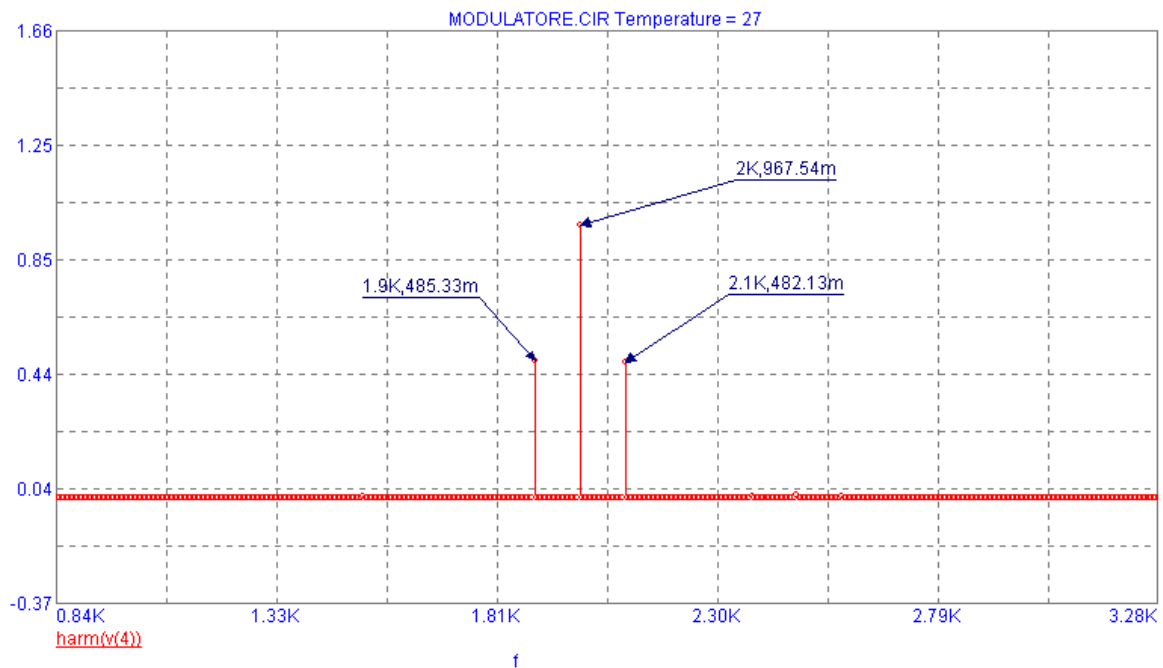
$$B = 2f_{max}$$

Nelle trasmissioni radiofoniche il segnale modulante è il suono il cui campo di frequenza si estende tra 20Hz ÷ 20kHz. La larghezza del canale AM di un segnale sonoro, quindi, dovrebbe occupare una banda  $B=40$ kHz. Per aumentare il numero di canali da moltiplicare si deve ridurre la larghezza di banda da assegnare a ciascuno di essi; si è stabilito, attraverso accordi internazionali, di fissare  $B=10$ kHz in modo da non perdere eccessivamente la fedeltà in trasmissione. Nella radiodiffusione le trasmissioni AM sono allocate nella gamma di frequenze comprese tra 540kHz e 1600kHz. In tal modo avendo assegnato ad ogni canale una banda di 10kHz è possibile moltiplicare circa 100 comunicazioni contemporanee. Lo schema di principio di un modulatore AM è il seguente:



Nella figura successiva è illustrato un esempio di segnale modulato in ampiezza AM con modulante sinusoidale. Abbiamo ottenuto questo segnale modulato con un segnale portante di 4V e frequenza 30kHz, e un segnale modulante con ampiezza 0.3V e frequenza 1kHz





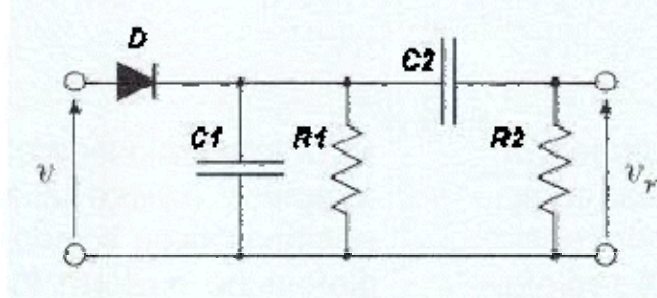
Nella figura sovrastante possiamo vedere il segnale modulato con il suo spettro. E' chiaramente evidente la presenza di modulazione di ampiezza: l'ampiezza del segnale portante varia in modo direttamente proporzionale all'ampiezza istantanea della modulante e la frequenza del segnale modulato è la stessa della portante (2 kHz). Sempre con l'ausilio del simulatore abbiamo visualizzato lo spettro in frequenza del segnale AM. Si nota la presenza della portante alla frequenza di 2 kHz e di una riga a 1,9 kHz e di un'altra riga a 2,1 kHz. La potenza totale del segnale modulato in ampiezza è da dividere tra l'onda portante e le due bande laterali. Considerando il carico R e partendo dalla relazione matematica della modulazione d'ampiezza l'espressione della potenza del segnale modulato risulterà:

$$P_{tot} = \frac{V_p^2}{2R} + \frac{m_a^2 \cdot V_p^2}{8R} + \frac{m_a^2 \cdot V_p^2}{8R} = \frac{V_p^2}{2R} \left( 1 + \frac{m_a^2}{2} \right)$$

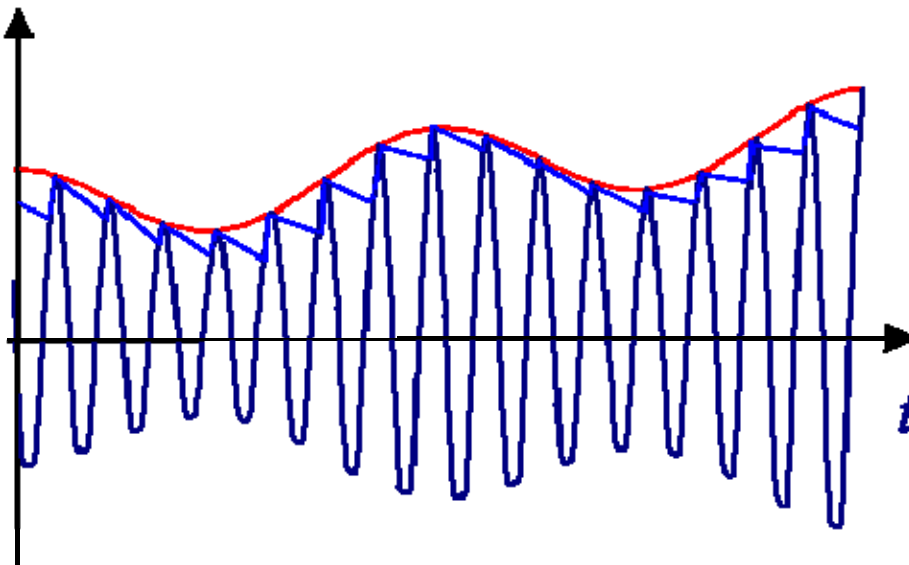
La formula mette in evidenza che la maggior parte della potenza del segnale modulato è attribuito alla portante che è priva di informazione. La restante potenza comprende le due bande simmetriche quindi la potenza utile è la metà di quella restante. Di conseguenza il rendimento di una trasmissione AM è molto basso. Se ad esempio l'indice di modulazione è uguale a 1 il rendimento è del 16 %. Per ovviare a questo spreco di potenza sono state introdotte modulazioni a singola banda (SSB a differenza di quelle con la banda riflessa chiamate DSB). Vi sono poi altri sistemi che riducono l'ampiezza del segnale portante che verrà poi ricostruita dal dispositivo ricevente.

## Demodulazione AM

La demodulazione di un segnale modulato in AM viene effettuata mediante un demodulatore ad involuppo. Questo circuito ha il compito di estrarre l'involuppo da un segnale modulato.



Come si può vedere dalla figura questo demodulatore è composto da un diodo che ha il compito di eliminare la parte negativa del segnale, da due condensatori e due resistenze con il compito di filtrare opportunamente il segnale. In modo particolare la resistenza R2 ed il condensatore C2 sono disposti in modo da ottenere un filtro passa alto. Questo tipo di filtro lascia passare le componenti del segnale ad alta frequenza e blocca invece quelle a bassa frequenza, così facendo il segnale viene traslato verso il basso intorno allo 0. Viceversa la resistenza R1 ed il condensatore C1 sono disposti in modo da ottenere un filtro passa basso con il compito più importante di estrapolare l'involuppo dal segnale modulato.



Come si può intuire dal grafico il valore del condensatore C1, e quindi la sua velocità di scarica, rappresenta il parametro più importante che pregiudica il funzionamento dell'intero demodulatore. Questo perché se il condensatore C1 fosse troppo grande la sua scarica avverrebbe troppo lentamente perdendo così la forma dell'involuppo e quindi del segnale originario, lo stesso accadrebbe se il suo valore fosse troppo piccolo.

Per le ragioni sopra esposte il dimensionamento del demodulatore inizia dal filtro passa basso:

$$\omega_s \cong \frac{1}{C1R1} \quad \text{D} \quad \frac{1}{f_s} \cong 5C1R1$$

Dove  $\omega_s$  corrisponde alla frequenza del segnale modulante.

Per calcolare i valori dei restanti componenti si utilizzano le seguenti relazioni:

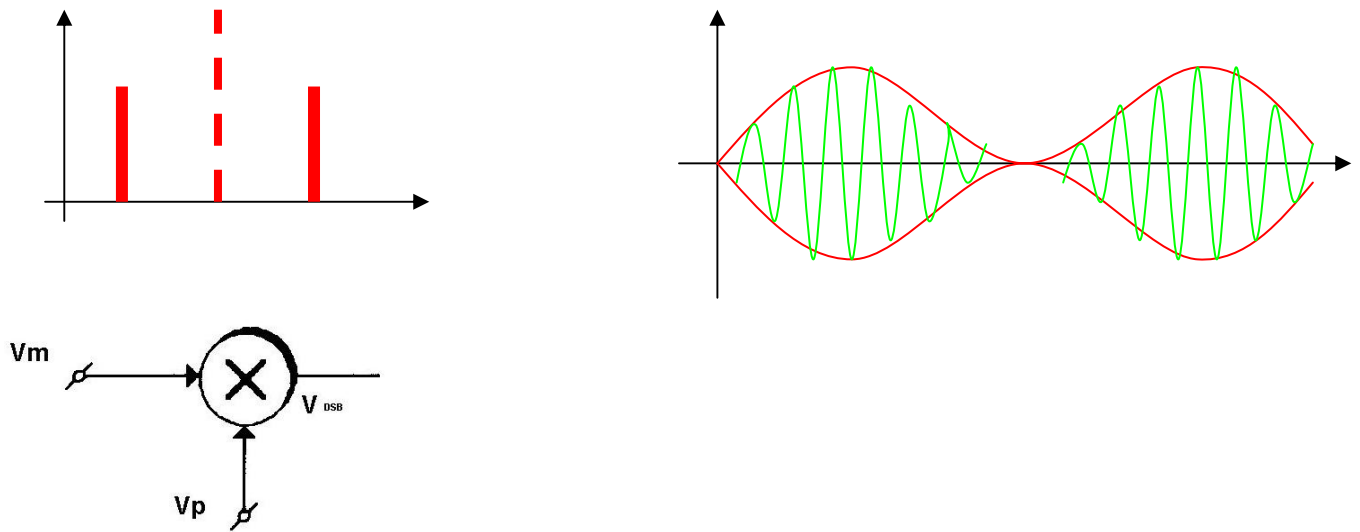
$$R2 \cong 10R1 \quad \frac{3}{4} \quad C2 \cong 10C1$$

## DSB

La modulazione DSB è una modulazione di ampiezza con soppressione della portante



La **MODULAZIONE DSB** o **A DOPPIA BANDA LATERALE** fa parte della modulazione AM; la differenza con quest'ultima sta nel fatto che la portante  $V_p(t)$  viene soppressa nella trasmissione, ma comunque utilizzata nella modulazione, con conseguente trasmissione di delle sole due bande laterali come nel grafico di seguito.



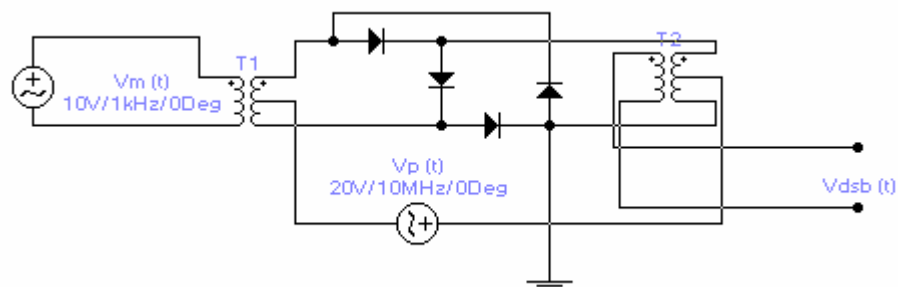
Con la modulazione DSB si ha un notevole risparmio in potenza del 50% rispetto a quella AM poiché  $P_t = P_{bls} + P_{bli} = A^2 B^2 / 4R$ . Nella modulazione AM il valore dell'ampiezza delle bande laterali risulta pari a  $m \cdot A / 2$ , mentre in quella DSB tale valore diventa  $B \cdot A / 2$ ; eguagliando le due equazioni vien fuori che  $m = B$ . La modulazione DSB si può associare ad un caso particolare dell'AM dove  $m = 1$  come riportato di sopra. Se la potenza si dimezza, il rendimento della modulazione DSB risulta del 50% poiché  $\eta = P_{bli} / P_t$ , ma siccome  $P_t = 2 \cdot P_{bli}$ ,  $\eta = 1 / P_{bli}$ .

### MODULATORI DSB.

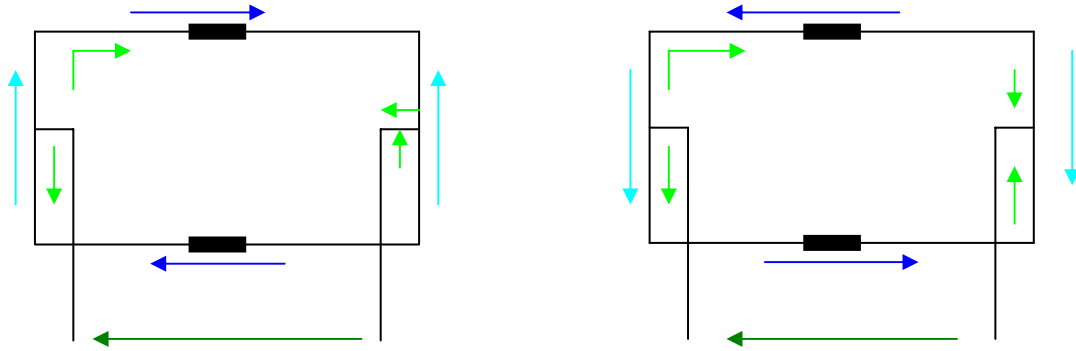
I modulatori DSB si dividono in **passivi**, che sfruttano la caratteristica principale dei diodi e che a sua volta si dividono in **modulatori a ponte** e **ad anello**, e in **attivi**, che sfruttano i Bjt.

Il modulatore sotto riportato è quello "bilanciato passivo ( a diodi ) ad anello".

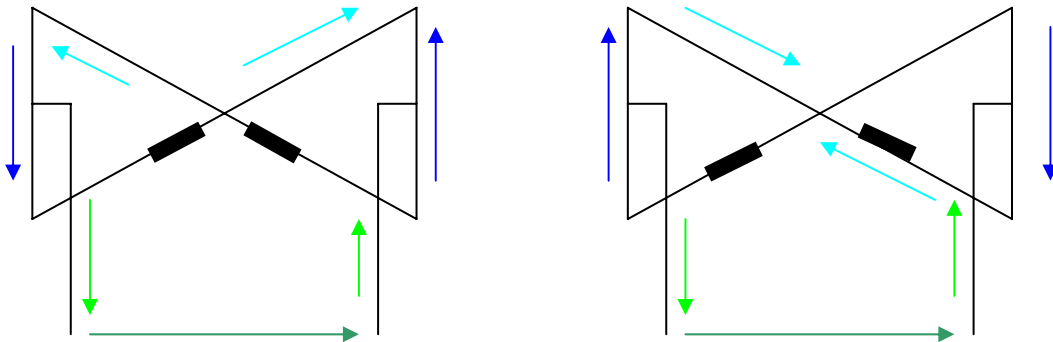
N.B.: dopo tali modulatori passivi sono quasi sempre posti filtri passa banda.



Considerando i 4 diodi presenti nel circuito di figura come ideali e l'ampiezza  $A$  della  $V_m(t)$  molto maggiore dell'ampiezza  $B$  della  $V_p(t)$ , gli stessi diodi si apriranno e chiuderanno a ritmo della portante dando origine ai seguenti 4 casi:



Nei primi due casi si nota come, tenendo conto del verso della  $V_p(t)$  (freccia verde scuro) lavorano solo i due diodi opposti, che la  $V_m(t)$  (freccia azzurra) viene riportata in uscita così com'è.



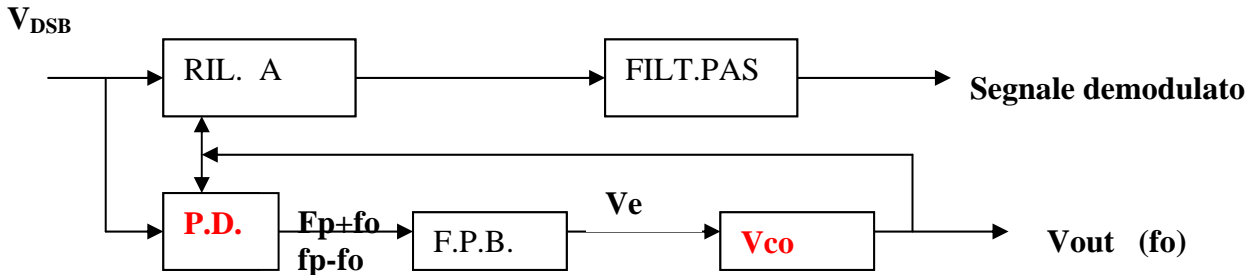
Come si nota invece nei casi in cui la  $V_p(t)$  si inverte, la  $V_m(t)$  viene portata in uscita sempre sfasata di  $180^\circ$  poiché i diodi che lavorano sono quelli sui rami ad incrocio. La  $V_p(t)$ , come si può vedere viene prodotta ma non trasmessa poiché essa genera correnti opposte che si annullano nell'avvolgimento secondario del secondo trasformatore T2.

In definitiva quindi, la  $V_{DSB}(t)$  risulta:  $V_{DSB}(t) = f(t) * V_m(t)$  dove la  $f(t)$  è in effetti una *funzione di commutazione* ovvero un onda quadra a frequenza della portante.

Nella realtà però i due diodi non si comportano in modo ideale e, quindi si preferisce utilizzare diodi integrati in uno stesso chip in modo che le loro caratteristiche siano molto simili. Inoltre, la  $V_m(t)$ , nonostante  $f_m < f_p$ , entra in gioco nella polarizzazione dei diodi e i trasformatori non hanno una presa perfettamente centrale e per questo motivo si utilizzano resistenze e condensatori addizionali per migliorare il centramento.

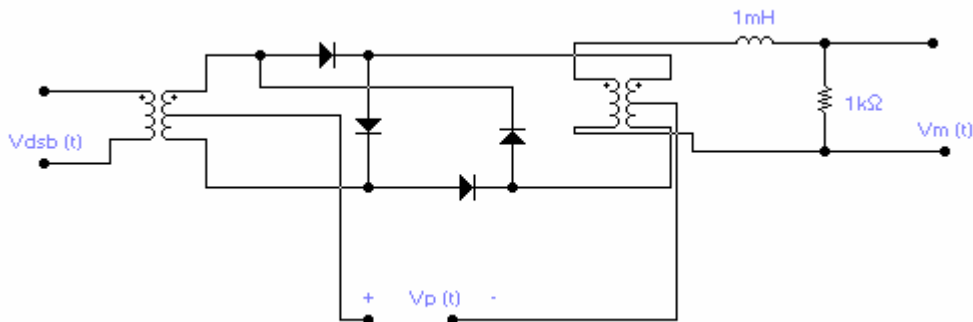
## DEMODULATORI DSB.

La demodulazione DSB può semplicemente essere rappresentata dal seguente schema a blocchi:



Il problema principale della demodulazione DSB è quello di ricostruire la “portante” in ampiezza ed in fase. Tale rigenerazione si ottiene con un circuito locale detto **P.L.L.** ovvero circuito ad aggancio di fase. Esso è formato da un P.D. (rilevatore di fase) che non fa altro che confrontare la  $f_p$  di ingresso con la  $f_0$  proveniente da un Vco (oscillatore a controllo di tensione) che in base all’uscita del P.D. modifica la sua frequenza fin quando  $V_e$  (segnale di errore) sia pari a zero. Naturalmente l’aggancio di fase avviene quasi istantaneamente e l’oscillatore a controllo di tensione lavora per un campo di frequenza ben preciso e, quindi, a priori bisogna conoscere il valore orientativo della  $f_p$ .

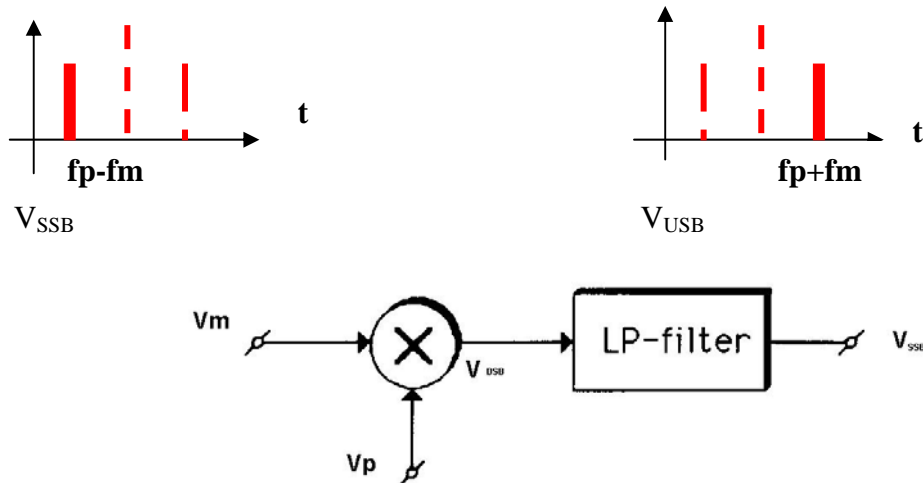
Il circuito elettrico del RILEVATORE A PRODOTTO è molto simile a quello del modulatore con l’unica differenza che la  $V_p(t)$  viene generata dal blocco P.L.L. ed il gruppo L-C rappresenta il filtro passa basso:



## SSB

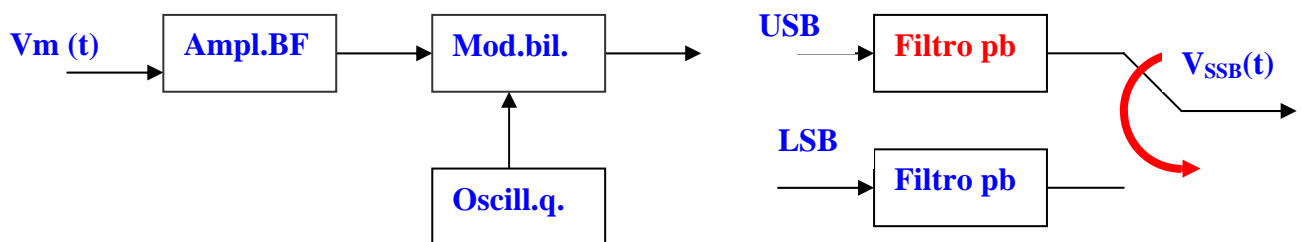
Con la **MODULAZIONE SSB** viene trasmessa una sola banda laterale; essa si divide in **LSB** (singola banda inferiore) e in **USB** (singola banda superiore). Tale modulazione deriva in modo diretto da quella DSB con l'apporto di semplici filtri passa banda.

I vantaggi di questa tecnica di modulazione sono il risparmio in potenza (a parità di segnale trasmesso la potenza totale della SSB è circa il 25% di quella della AM) ed un rendimento del 100%. La "banda di frequenza" della SSB è la metà di quella della DSB ed AM ( $B=f_m$ ) il che permette di utilizzare tale tecnica specialmente per le comunicazioni telefoniche e televisive. Inoltre, se la  $V_m(t)$  modulata non è sinusoidale la banda trasmessa è compresa fra due valori ben precisi.



Anche in questo caso il problema principale è la ricostruzione della portante in ricezione e la presa centrale dei trasformatori che provocano distorsioni; per eliminare parzialmente tali problemi si utilizza la tecnica **VSB** (banda laterale parzialmente soppressa) con cui si trasmette una parte di portante, un'intera banda laterale ed una parte dell'altra (tramite filtri di ampiezza vestgiale).

I modulatori SSB sono principalmente due: **MODULATORE CON FILTRO** e **MODULATORE CON SFASAMENTO** o DELLA FASE. Quello "con filtro" è il seguente:

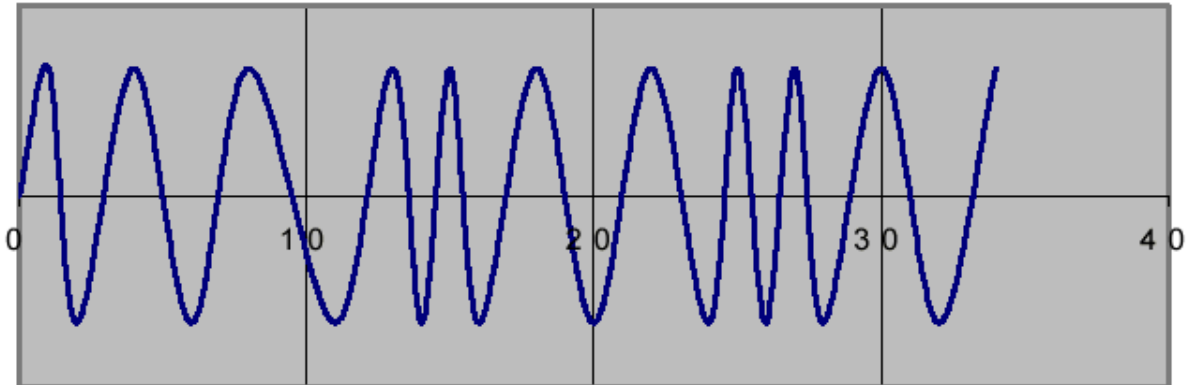


Il blocco modulatore è lo stesso visto per la DSB e a seconda del filtro che si utilizza dopo la modulazione si ottiene la LSB o la USB.

## FM

La modulazione di frequenza FM (frequency Modulation) consiste nel far variare la frequenza della portante in modo proporzionale all'ampiezza istantanea del segnale modulante. Questa Modulazione venne messa appunto da Armstrong nel 1935 ed aveva come importante vantaggio quello di ridurre i disturbi di ricezione dovuti alle interferenze dei motori elettrici funzionanti in vicinanza dell'apparecchio ricevente o in caso di temporale. L'ampiezza del segnale FM è costante e coincide con quella della portante. Detta  $\omega_p$  la pulsazione della portante e supponendo il segnale modulante del tipo sinusoidale:

$$V_m(t) = V_m \cdot \cos \omega_m t.$$



la pulsazione  $\omega(t)$  del segnale modulato in frequenza sarà variabile come espresso dalla seguente relazione:

$$\omega(t) = \omega_p + K_f \cdot V_m(t)$$

dove  $K_f$  è una costante di proporzionalità. Combinando le due precedenti relazioni si ha:

$$\omega(t) = \omega_p + K_f \cdot V_m \cdot \cos \omega_m t$$

La frequenza istantanea:

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} = f_p + \frac{K_f V_m}{2\pi} \cdot \cos \omega_m t$$

La quantità:

$$\Delta f = \frac{K_f V_m}{2\pi}$$

è denominata deviazione massima di frequenza. La  $f(t)$ , pertanto, varia tra  $f_p - \Delta f$  e  $f_p + \Delta f$ . Dopo vari passaggi l'espressione analitica del segnale FM risulta:

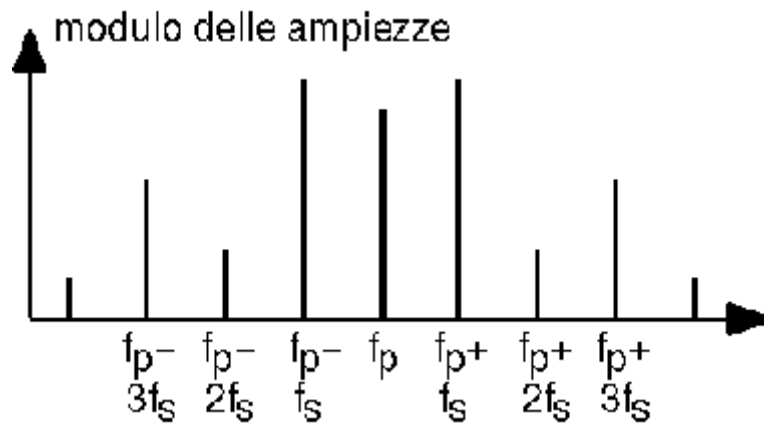
$$v(t) = V_p \cdot \cos \varphi(t) = V_p \cos \left( \omega_p t + \frac{K_f V_m}{\omega_m} \cdot \sin \omega_m t \right)$$

Il termine:

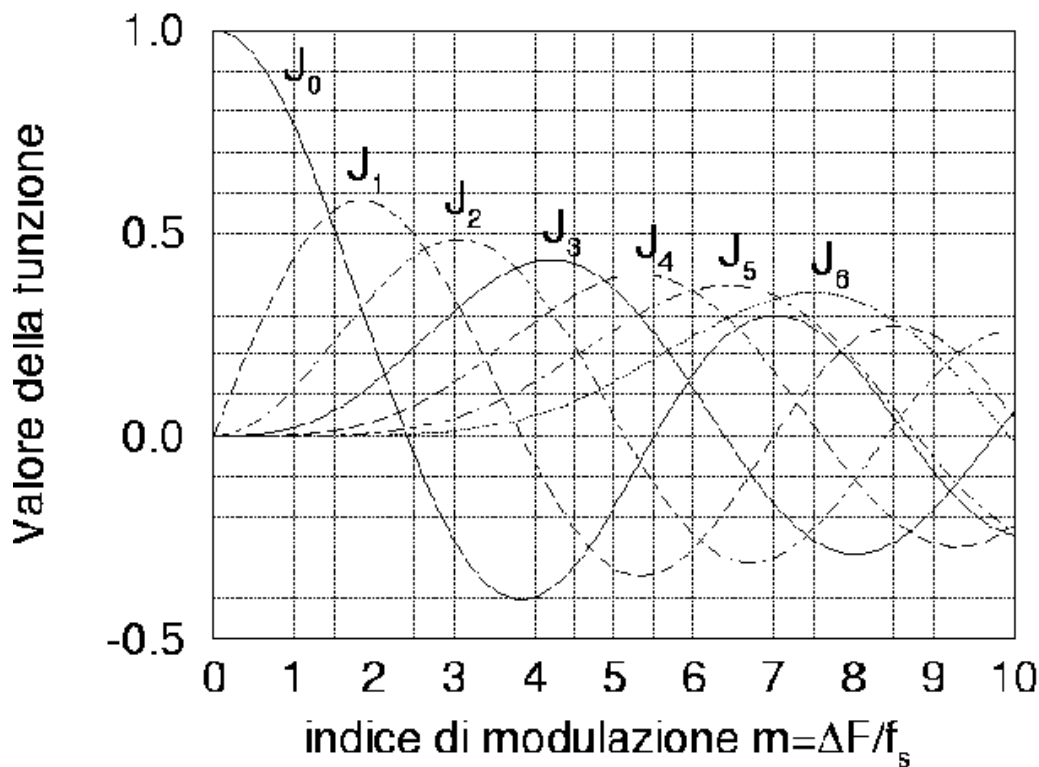
$$m_f = \frac{K_f V_m}{\omega_m} = \frac{K_f V_m}{2\pi f_m} = \frac{\Delta f}{f_m}$$

è detto indice o profondità di modulazione e rappresenta la massima deviazione della fase del segnale FM. La precedente relazione in funzione di  $v(t)$  è una funzione trigonometrica del coseno che può essere sviluppata in una serie di armoniche mediante lo sviluppo in serie di Bessel. Applicando lo sviluppo di Bessel si ha:

$$v(t) = V_p [j_0(m_f) \cos \omega_p t + j_1(m_f) \cos(\omega_p \pm \omega_m)t + j_2(m_f) \cos(\omega_p \pm 2\omega_m)t + \dots]$$



Il valore numerico da assegnare ai termini  $J_0, J_1, \dots$  dipende da  $m_f$  e si può dedurre del seguente grafico.



Se il segnale modulante  $V_m(t)$  è una generica funzione periodica si può scomporre in una somma di armoniche (teorema di Fourier) ad ognuna delle quali applicare la relazione della modulazione in frequenza sviluppata in serie di Bessel. Da quanto detto si deduce che lo spettro di un segnale FM è teoricamente infinito ma, in pratica, si trascurano le componenti più esterne e si assume la seguente formula di Carson:

$$B = 2(\Delta f + f_m) = 2f_m \cdot (m_f + 1)$$

I vantaggi della modulazione di frequenza rispetto a quella di ampiezza, oltre quelli nominati all'inizio, sono la banda più stretta e il fatto che la potenza trasmessa è sempre la stessa. Il campo di

frequenze assegnate alle trasmissioni radiofoniche FM si estende tra 88 MHz e 108 MHz equivalente a più di 100 canali distinti. In campo televisivo la banda assegnata ad ogni canale è di 8MHz per l'UHF (300 MHz-3000MHz) e 7 MHz per il VHF (30 MHz-300MHz). In realtà il segnale TV è un segnale composto di cui la componente video è modulata in ampiezza e quella audio in frequenza e le due portanti sono separate tra loro di 5.5 MHz all'interno del canale video.

## PM

La “*modulazione di fase*” è una tecnica di modulazione capace di far variare l'angolo di fase della portante. La variazione di tale angolo è proporzionale al valore istantaneo della modulante per mantenere una legge lineare.

Ponendo i valori dei segnali uguali a:

$V_p(t) = A \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi_p)$  dove  $\varphi_p$  rappresenta lo sfasamento iniziale;

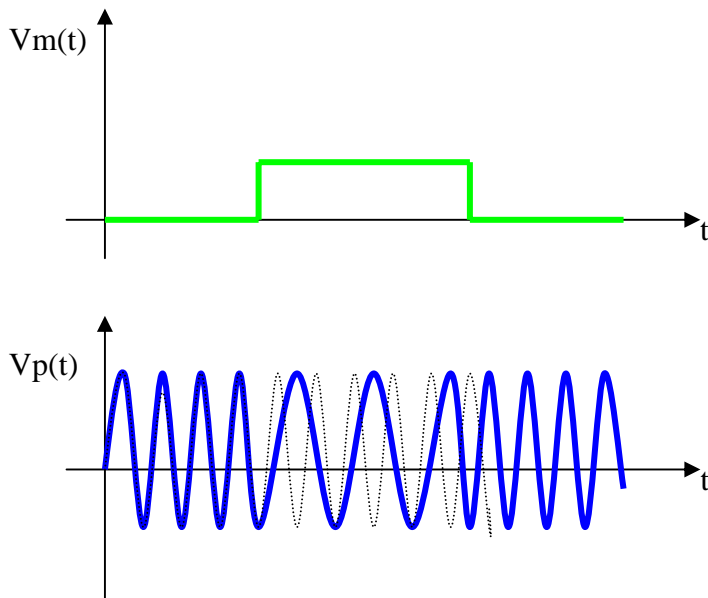
$V_{PM}(t) = A \cdot \cos[\omega_p \cdot t + k_p \cdot V_m(t)]$  dove  $[\omega_p \cdot t + k_p \cdot V_m(t)] = \varphi_{PM}$  dovuto alla portante per la presenza di  $\omega_p$ , e da una legge di proporzionalità relativa alla modulazione e pari a  $k_p \cdot V_m(t)$  quindi associabile ad un  $\Delta\varphi$ . Il segnale modulato può essere esprimibile come:

$V_{PM}(t) = A \cdot \cos[\omega_p \cdot t + k_p \cdot B \cdot \cos\omega_m \cdot t]$ .

Inoltre:  $\varphi_{PM}(t) = \varphi_p + \Delta\varphi_{PM}$ , ma  $\omega_{PM}(t) = d\varphi_{PM}/dt = \omega_p + k_p \cdot (dV_m(t)/dt)$ .

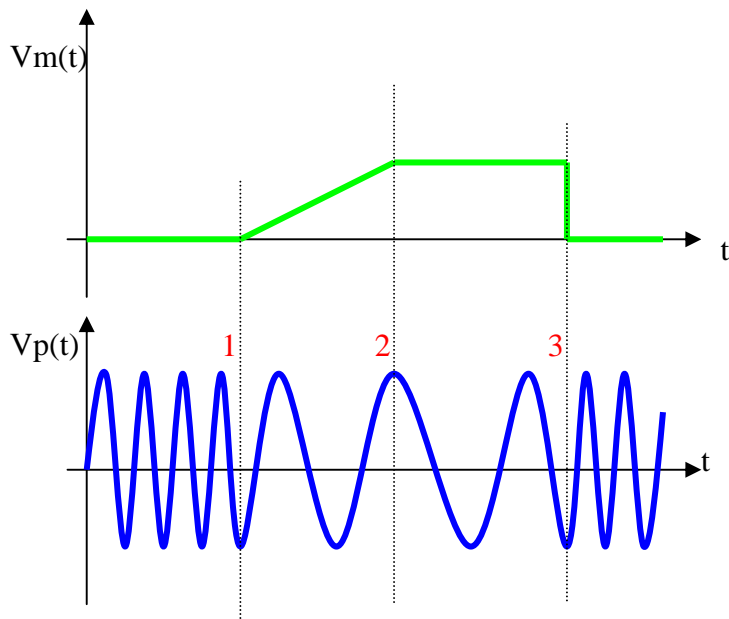
A seconda dei segnali modulati la frequenza della portante varierà in modo diverso tenendo presente che se  $V_m(t)$  è costante la portante assume una frequenza diversa da quella originaria ma comunque costante e inoltre che la modulazione PD risulta sfasata di 180° rispetto a quella FM (se la modulante aumenta, diminuisce la frequenza della portante e viceversa):

1. Se  $V_m(t)$  è un segnale rettangolare:



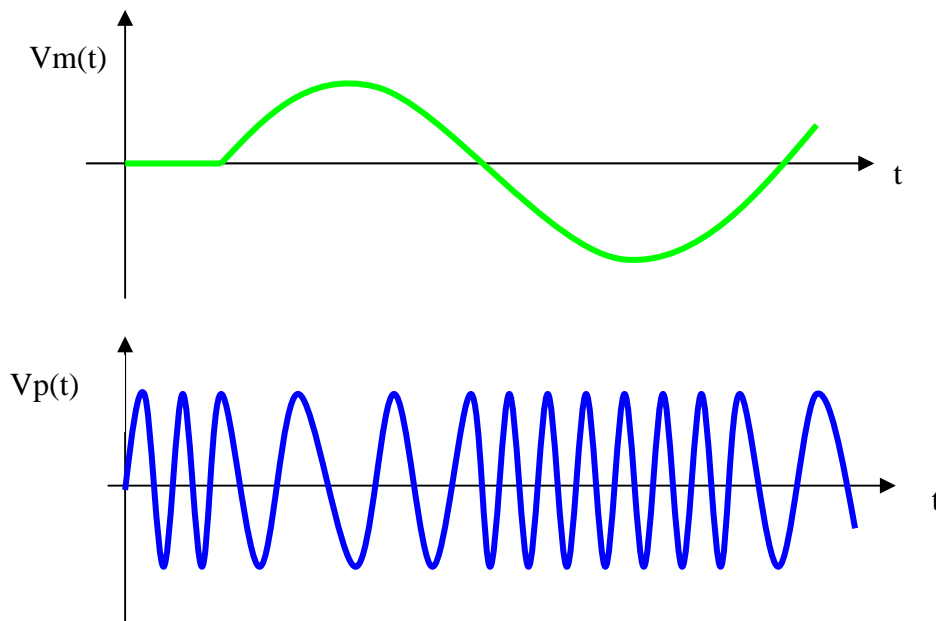
Si ha sfasamento che però rimane costante quando la  $V_m(t)$  va a regime.

2. Se  $V_m(t)$  è trapezoidale:



In tal caso lo sfasamento aumenta tra i punti 1 e 2, si mantiene costante quando  $V_m(t)$  è a regime (tra i punti 2 e 3), si annulla dopo il terzo punto.

3. Se  $V_m(t)$  è sinusoidale:



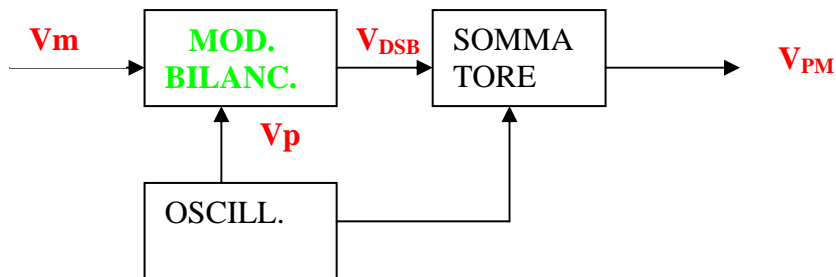
Questa volta lo sfasamento aumenta fino al valore massimo di  $V_m(t)$  per diminuire fino ad un valore minimo in corrispondenza del relativo valore minimo di  $V_m(t)$ .

In definitiva per passare da un segnale FM ad uno PD basta integrare lo stesso, mentre per il passaggio contrario basta derivare.



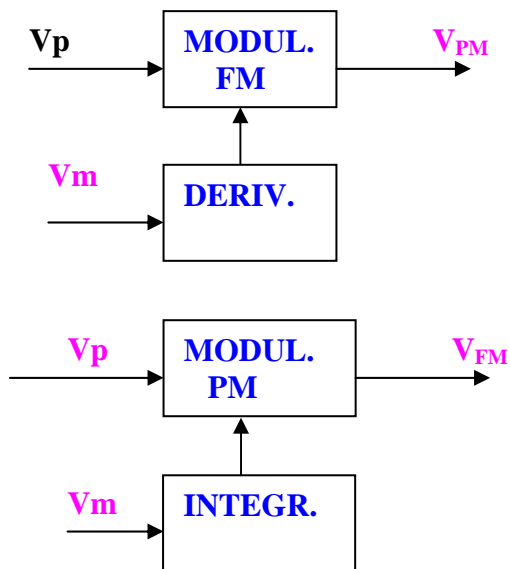
## MODULATORE PM.

I modulatori PM possono essere a **banda stretta** o a **banda larga**. Lo schema a blocchi di seguito riporta un modulatore a banda stretta così detto perché ha un indice di modulazione basso ovvero minore di 1:



Siccome:

$f_{FM} = f_p + (k \cdot V_m(t) / 2\pi)$ , per passare da  $V_{FM}$  ad una  $V_{PM}$  si avrà:

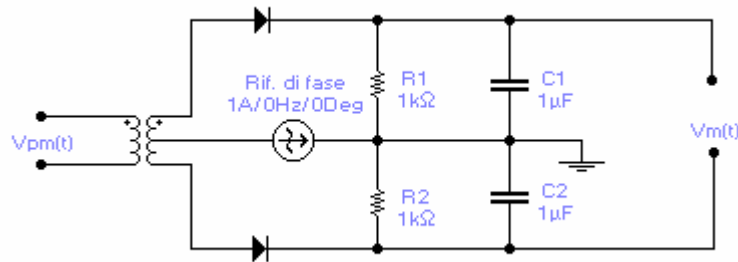


Invece, poiché:

$f_{PM} = f_p + [(k / 2\pi) \cdot (dV_m(t) / dt)]$ , per passare da una  $V_{PM}$  ad una  $V_{FM}$  avremo:

## DEMODULATORI PM.

I demodulatori PM sono gli stessi utilizzati con la tecnica FM; oltre quelli già visti in precedenza, però, viene utilizzato anche il “*rilevatore di fase analogico*” riportato di seguito:



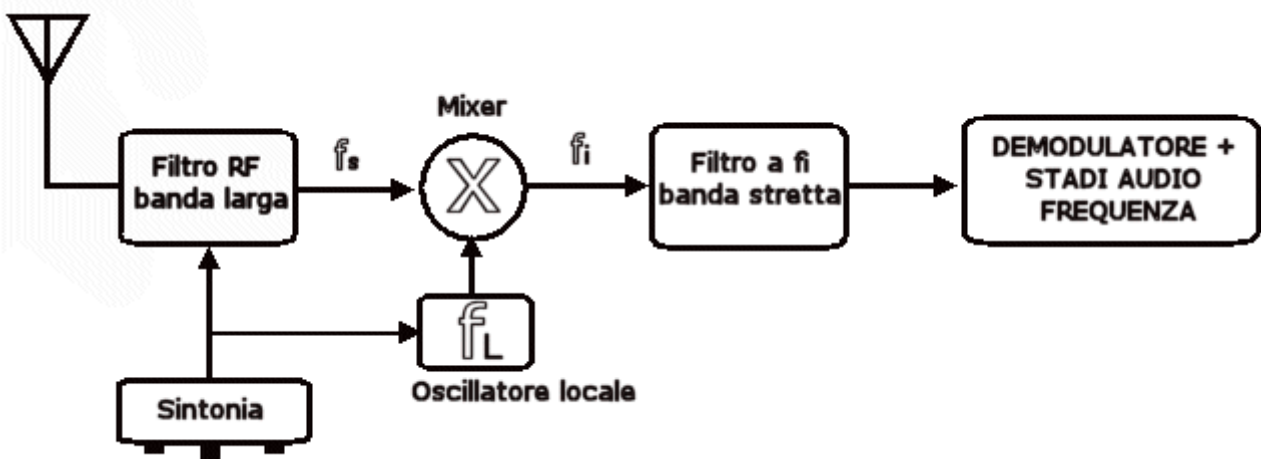
Quando  $f_{PM} \neq f_p$ , il circuito si comporta da moltiplicatore dando origine ad un “battimento” e quindi proprio alla  $V_m(t)$ ; inoltre, se  $V_{PM}(t)$  è costante, anche  $V_m(t)$  è un segnale costante.

## RICEVITORE SUPERETERODINA AM

La tecnica di conversione **supereterodina** è utilizzata in numerosi apparecchi ricevitori in grado di ricevere e demodulare una vasta gamma di frequenze.

L'utilizzo di filtri a radiofrequenza, necessari per selezionare la frequenza, in numero pari al numero di stazioni che si vogliono ricevere sarebbe antieconomico e fornirebbe un numero limitato di stazioni ricevibili.

D'altro canto sarebbe anche sconsigliabile realizzare un solo filtro a frequenza variabile che copra tutto lo spettro radio: sarebbe troppo difficile e costosa la sua realizzazione. Si è pensato quindi ad un sistema in grado di convertire le frequenze ricevute ad una frequenza fissa chiamata frequenza intermedia  $f_i$  alla quale operano tutti i circuiti di filtraggio e demodulazione.



Per fare questo i ricevitori supereterodina sfruttano un particolare circuito chiamato mixer. All'ingresso di questo circuito si pongono il segnale proveniente dall'antenna, che sarà processato da un filtro a RF a banda larga centrato su una frequenza  $f_s$  e un segnale generato da un oscillatore locale ad una frequenza  $f_L$  tale che  $f_i = |f_L - f_s|$ . Quando su un ricevitore supereterodina azioniamo i comandi di sintonia, quindi, andiamo a variare sia la  $f_s$  del primo filtro che la  $f_L$  dell'oscillatore

locale per mantenere sempre verificata l'identità. Il mixer sottrae le frequenze dei due segnali e restituisce sempre un segnale con il contenuto informativo del segnale prelevato dall'antenna ma traslato alla  $f_i$ . A questa frequenza opera il filtro a banda stretta che seleziona il canale desiderato e invia il segnale ai demodulatori.

Il mixer è semplicemente un circuito che opera in maniera non lineare sfruttando la distorsione da intermodulazione per produrre la componente alla frequenza differenza. In presenza di  $n$  segnali all'ingresso del blocco RF vi è la possibilità di selezionare un solo segnale, ma si dà il caso che un segnale adiacente, sotto forma di disturbo passi attraverso il filtro passa banda, anche se molto selettivo, posto nel blocco MIXER. Questo evento si chiama *problema della banda immagine*. Ricordando che  $\cos(a) * \cos(b) = 1/2[\cos(a + b) + \cos(a - b)]$ , otterremo per ogni segnale due componenti. Una ad alta frequenza  $\cos[2p(f_s+f_L)t]$ , ed una a bassa frequenza  $\cos[2p(f_s-f_L)t]$ , per ogni segnale entrante. La componente ad alta frequenza verrà sicuramente filtrata, mentre per quella a bassa frequenza bisognerà tener conto del fatto che:  $\cos(a) = \cos(-a)$  e quindi che  $f_L-f_s$  di un segnale non voluto coincida ugualmente con la frequenza  $f_i$  su cui è centrato il filtro passa banda del blocco MIXER. Si renderà necessario, come da figura, inserire un sintonizzatore sulla frequenza  $f_s$  in modo da filtrare a monte del blocco MIXER le componenti che non faranno parte del segnale utile.