

Tecniche di modulazione

Le modulazioni analogiche

Angelo Protopapa IK0VVG



Sezione di Roma

Indice

- Introduzione
- Modulazione di Ampiezza (AM)
- Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)
- Modulazione a Singola Banda Laterale (SSB)
- Modulazione a Banda Laterale Vestigiale (VSB)
- Miglioramento della SSB → CE-SSB
- Modulazioni Angolari (PM e FM)



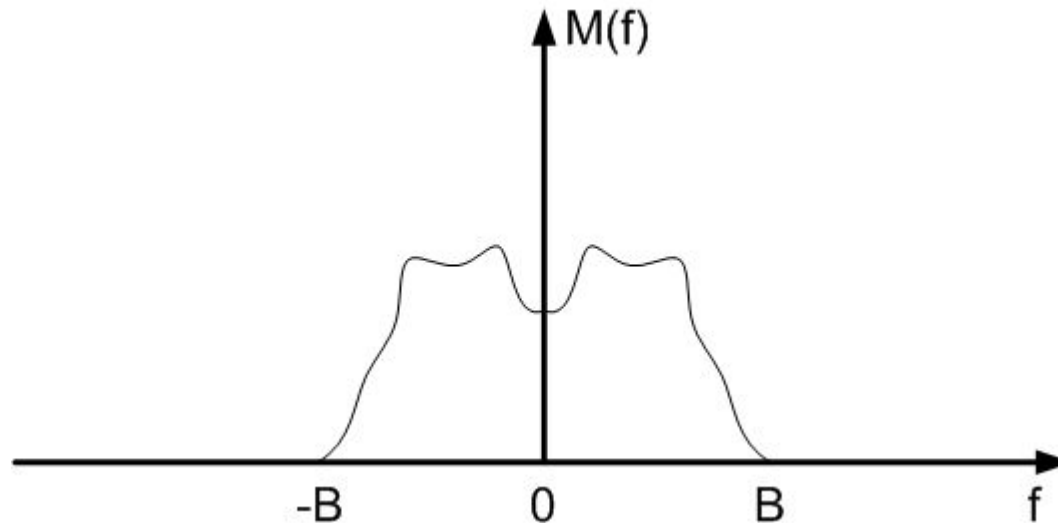
Introduzione

- Le 2 componenti della modulazione sono:
 - Segnale sinusoidale $c(t)$ a frequenza f_0 detto portante
 - Segnale modulante $m(t)$
- La portante $c(t)$ non contiene alcuna informazione:
 - Lo spettro associato alla portante $c(t)$ è una riga
 - La portante $c(t)$ trasporta solo l'informazione On/Off
- Il segnale modulante $m(t)$ contiene tutta l'informazione:
 - Lo spettro associato al segnale $m(t)$ ha una larghezza B (in KHz)
 - Il segnale modulante $m(t)$, così com'è, non può essere trasmesso
- Ma cosa fa la modulazione ?
 - La modulazione crea il segnale modulato $s(t)$
 - Il segnale modulato $s(t)$ contiene la stessa informazione di $m(t)$
 - Il segnale modulato $s(t)$ può essere trasmesso



Segnale modulante $m(t)$

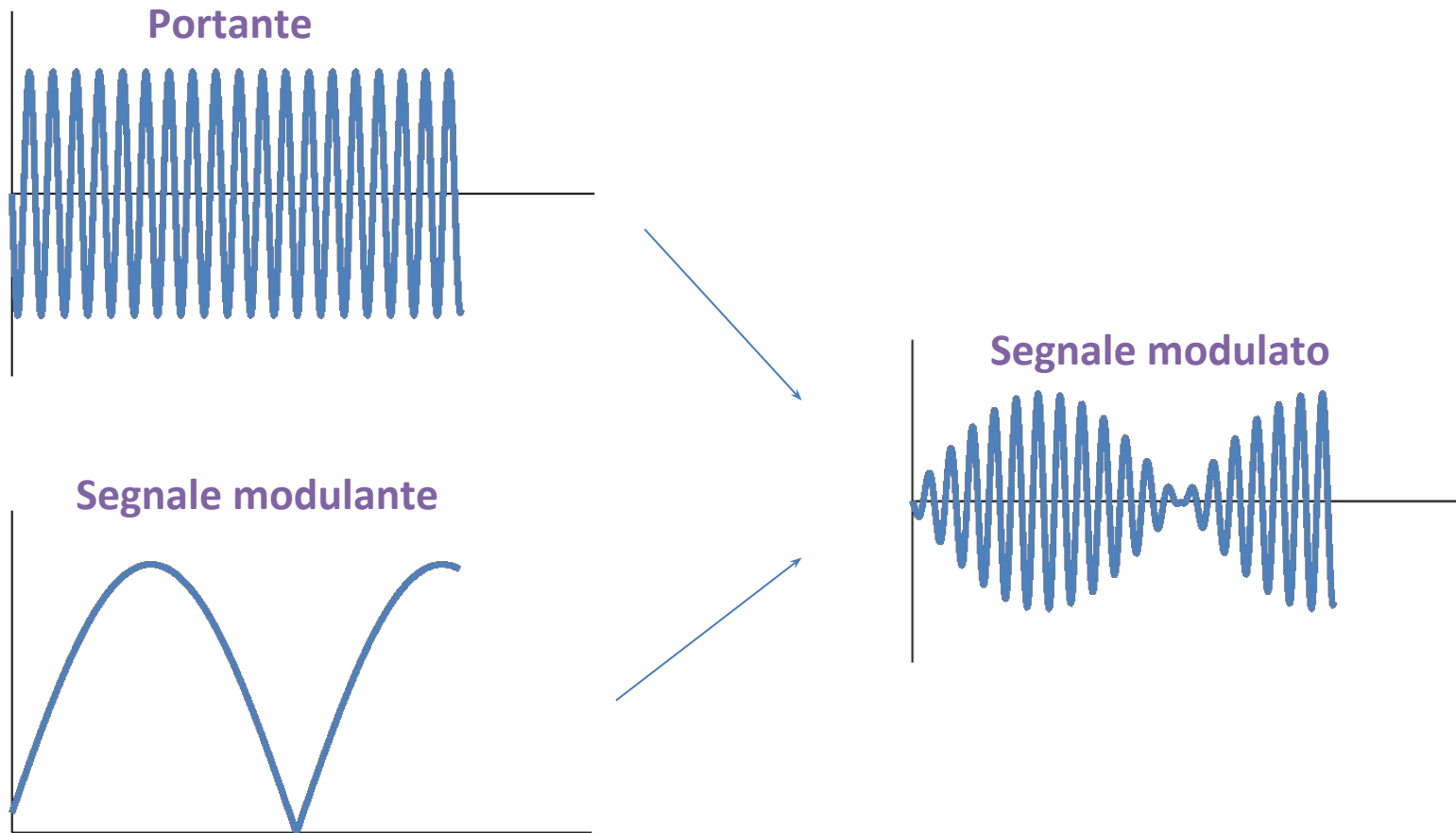
- Il segnale modulante $m(t)$ è un segnale reale (per esempio il segnale in mV all'uscita di un microfono)
- Lo spettro $M(f)$ del segnale $m(t)$ ha una **banda B** (in KHz)
- Lo spettro $M(f)$ del segnale $m(t)$ è simmetrico rispetto a $f=0$



- Proprietà **Hermitiana** della Trasformata di Fourier $m(t) \leftrightarrow M(f)$



Modulazione di Ampiezza (AM)



Modulazione di Ampiezza (AM)

- La portante $c(t)$ è espressa come:

$$c(t) = A_c * \cos 2\pi f_0 t$$

- Il segnale modulato $s(t)$ è espresso come:

$$s(t) = A_c * [1 + m(t)] * \cos 2\pi f_0 t$$

dove

- A_c = ampiezza della portante
- f_0 = frequenza RF della portante
- $m(t)$ = segnale modulante con $|m(t)| \leq 1$

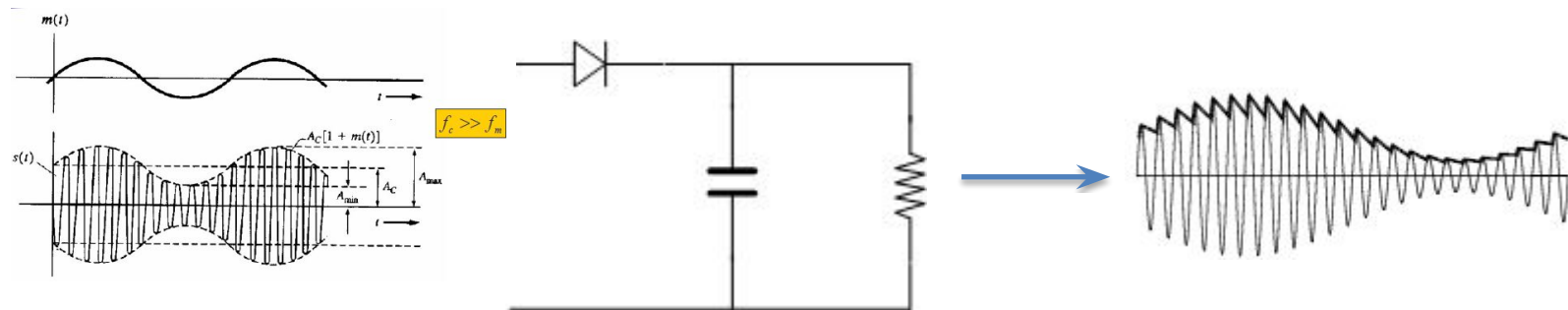


Modulazione di Ampiezza (AM)

- La **profondità** di modulazione è definita come:

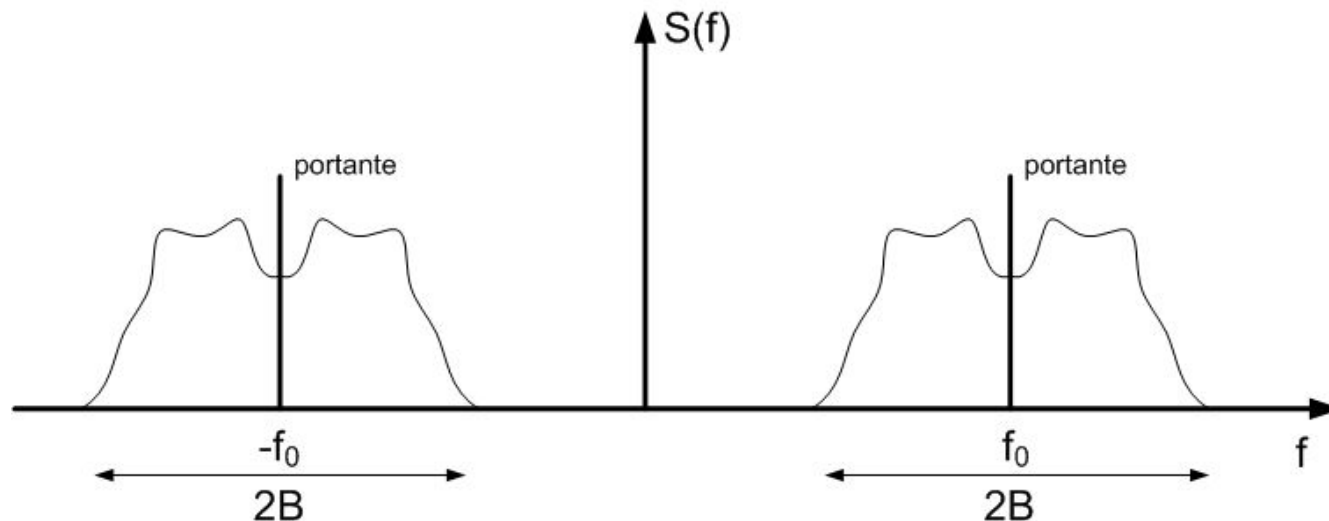
$$\% \text{ mod} = \frac{\max[m(t)] - \min[m(t)]}{2} * 100$$

- Se essa è $< 100\%$ in ricezione è possibile usare un semplice **rivelatore di involuppo**



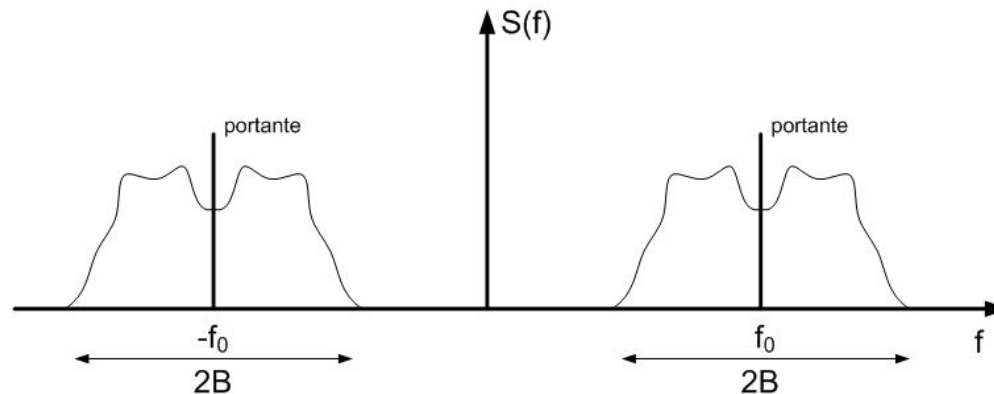
Modulazione di Ampiezza (AM)

- Lo spettro $S(f)$ di un segnale AM presenta:
 - Una replica dello spettro $M(f)$ centrata su f_0
 - Una replica dello spettro $M(f)$ centrata su $-f_0$
 - Una riga (portante) centrata su f_0
 - Una riga (portante) centrata su $-f_0$



Modulazione di Ampiezza (AM)

- La portante si manifesta con 2 righe (su f_0 e $-f_0$)
- Concentrandoci sulle sole frequenze positive:
 - La banda del segnale $s(t)$ è doppia, cioè $2 \times B$ (in KHz)
 - La riga della portante non contiene informazione



Modulazione di Ampiezza (AM)

- La potenza P_S del segnale modulato $s(t)$ è:

$$P_S = \frac{1}{2} A_c^2 + \frac{1}{2} A_c^2 P_m$$

Potenza della portante

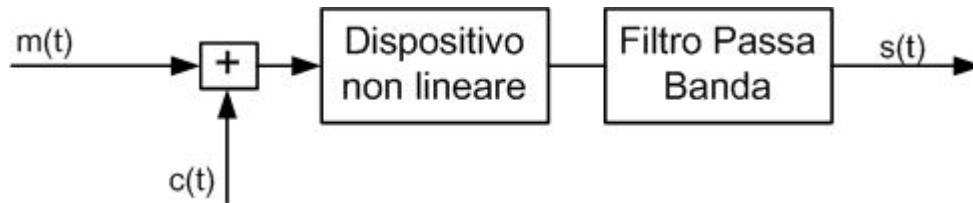
Potenza delle bande laterali

- Circa il 50% della potenza è sprecato nella portante



Modulazione di Ampiezza (AM)

- Il modulatore AM è di tipo quadratico



- Il dispositivo non lineare “produce” in uscita:
 - Portante $c(t)$ modulata dal segnale $m(t)$
 - Portante $c(t)$
 - Segnali spuri eliminati dal filtro BPF



Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)

- Rimozione della portante
- Modulatore/demodulatore diversi dalla AM
- Il segnale modulato $s(t)$ è espresso come:

$$s(t) = A_c * m(t) * \cos 2\pi f_0 t$$

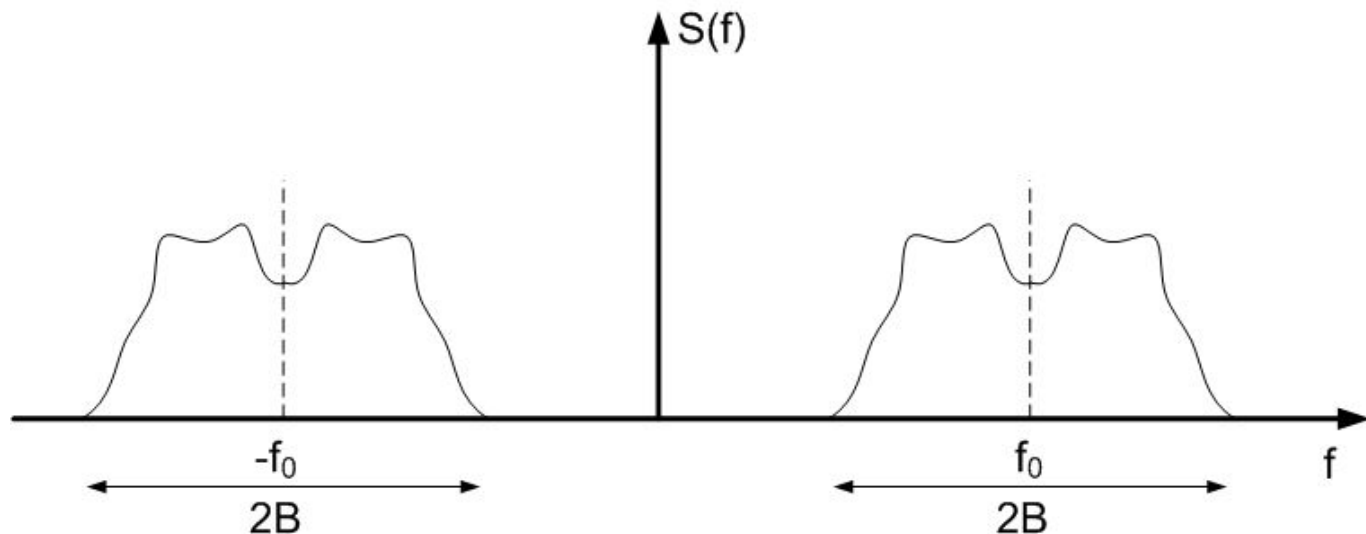
dove

- A_c = ampiezza della portante
- f_0 = frequenza RF della portante
- $m(t)$ = segnale modulante con $|m(t)| \leq 1$



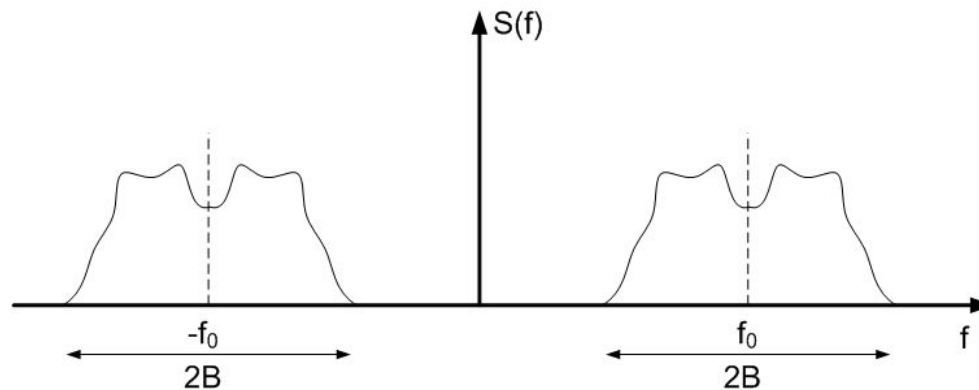
Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)

- Lo spettro $S(f)$ di un segnale DSB-SC presenta:
 - Una replica dello spettro $M(f)$ centrata su f_0
 - Una replica dello spettro $M(f)$ centrata su $-f_0$
 - ~~Una riga (portante) centrata su f_0~~
 - ~~Una riga (portante) centrata su $-f_0$~~



Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)

- Non ci sono più le 2 righe della portante (su f_0 e $-f_0$)
- Concentrandoci sulle sole frequenze positive:
 - La banda del segnale $s(t)$ è ancora doppia, cioè $2xB$ (in KHz)



Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)

- La potenza P_s del segnale modulato $s(t)$ è:

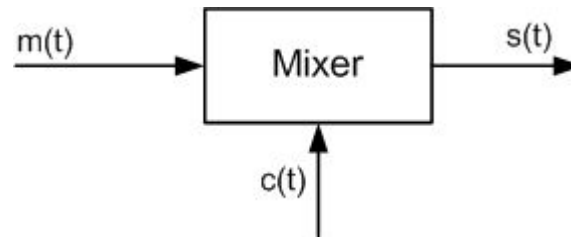
$$P_s = \frac{1}{2} A_c^2 P_m$$

- Essa è dovuta alle sole bande laterali
- Non c'è più spreco di potenza con la portante
- L'efficienza di modulazione è 100%



Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)

- Il modulatore DSB-SC si presenta così:

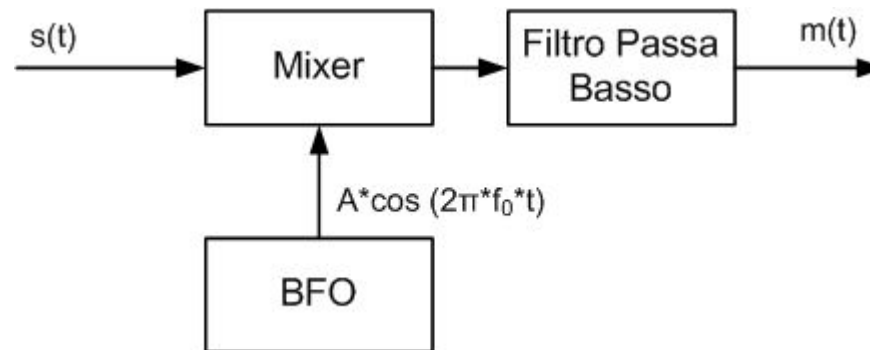


- Il Mixer può essere attivo o passivo
- Molto delicata è la soppressione della portante
- Gli apparati commerciali hanno una soppressione della portante maggiore di 40 dB



Modulazione a Doppia Banda Laterale (DSB-SC)

- La demodulazione di un segnale DSB-SC richiede un rivelatore “a prodotto” (e non di involuppo)



- Il segnale di battimento in genere è a $f_0 = f_{RF} \pm f_{IF}$
- Se il RX è a conversione diretta sarà $f_0 = f_{RF}$



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- La DSB-SC ha eliminato la portante (presente in AM)

ma

- La banda del segnale DSB-SC è ancora **2xB**

inoltre

- Le bande USB e LSB contengono le **stesse** informazioni

quindi

- Il passo successivo è **eliminare** una delle 2 bande

Si arriva così alla modulazione SSB



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Il segnale modulato $s(t)$ è espresso come:

$$s(t) = A_c * [m(t) \cos 2\pi f_0 t \pm m_h(t) \text{sen } 2\pi f_0 t]$$

- $m_h(t)$ = **trasformata di Hilbert** del segnale $m(t)$, in pratica è una sua versione sfasata di 90°
- Il segno - determina un segnale USB
- Il segno + determina un segnale LSB

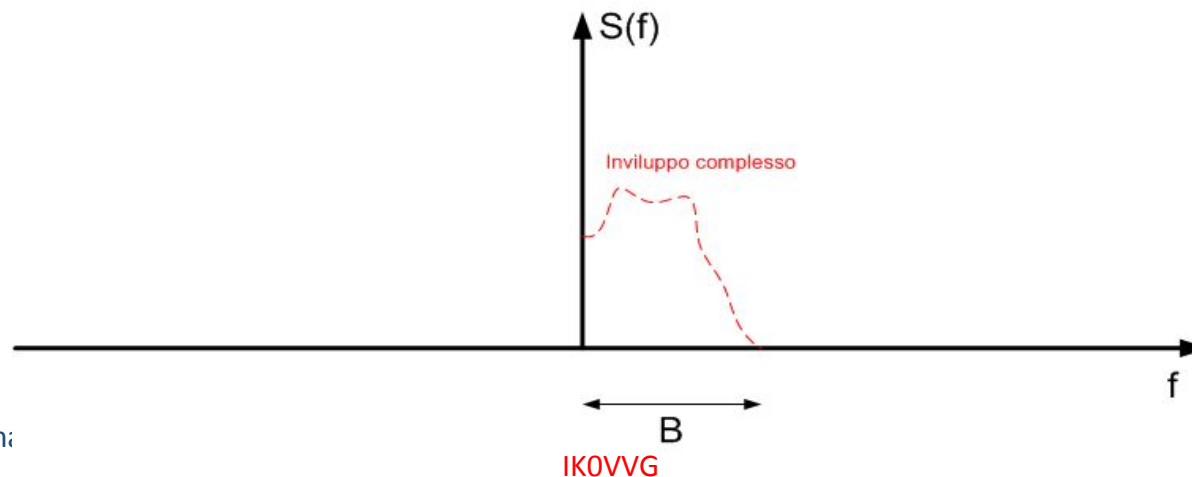


Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- In banda base si ha l'involuppo complesso :

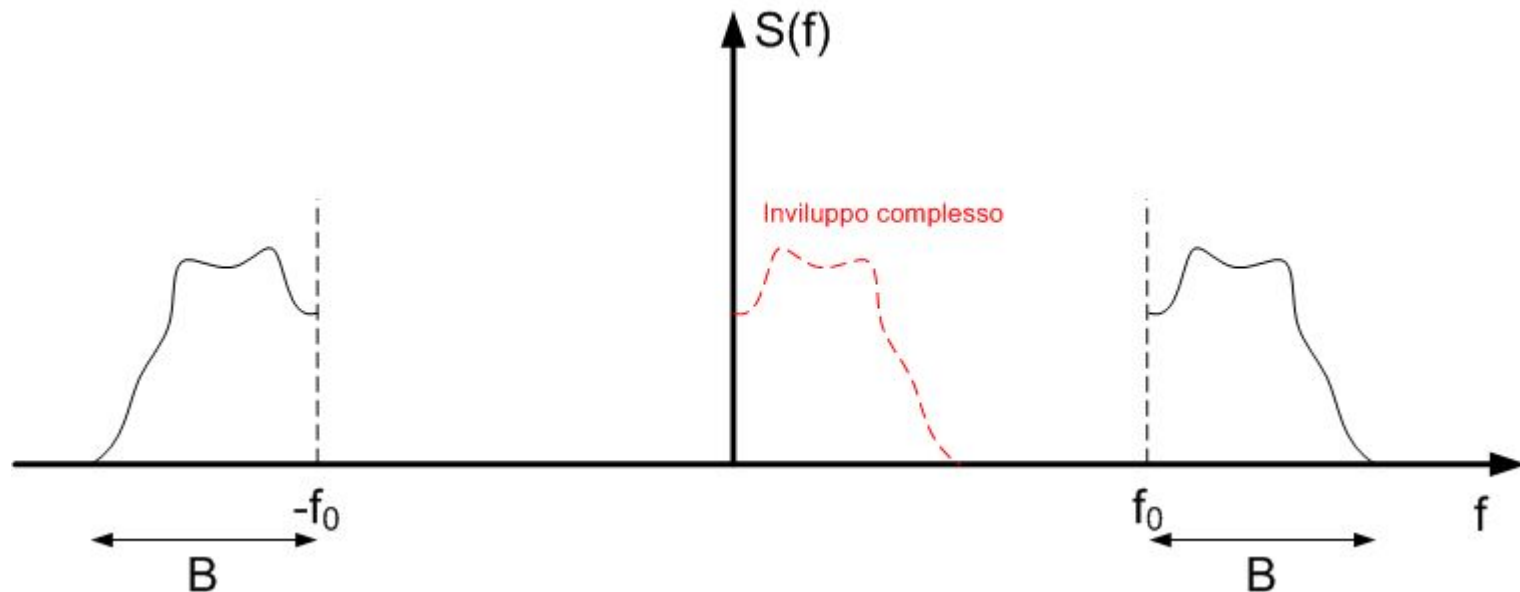
$$A_c * [m(t) \pm j * m_h(t)]$$

- Ad esso corrisponde uno spettro che **non** è più simmetrico rispetto a $f=0$



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Banda Laterale Superiore (USB)

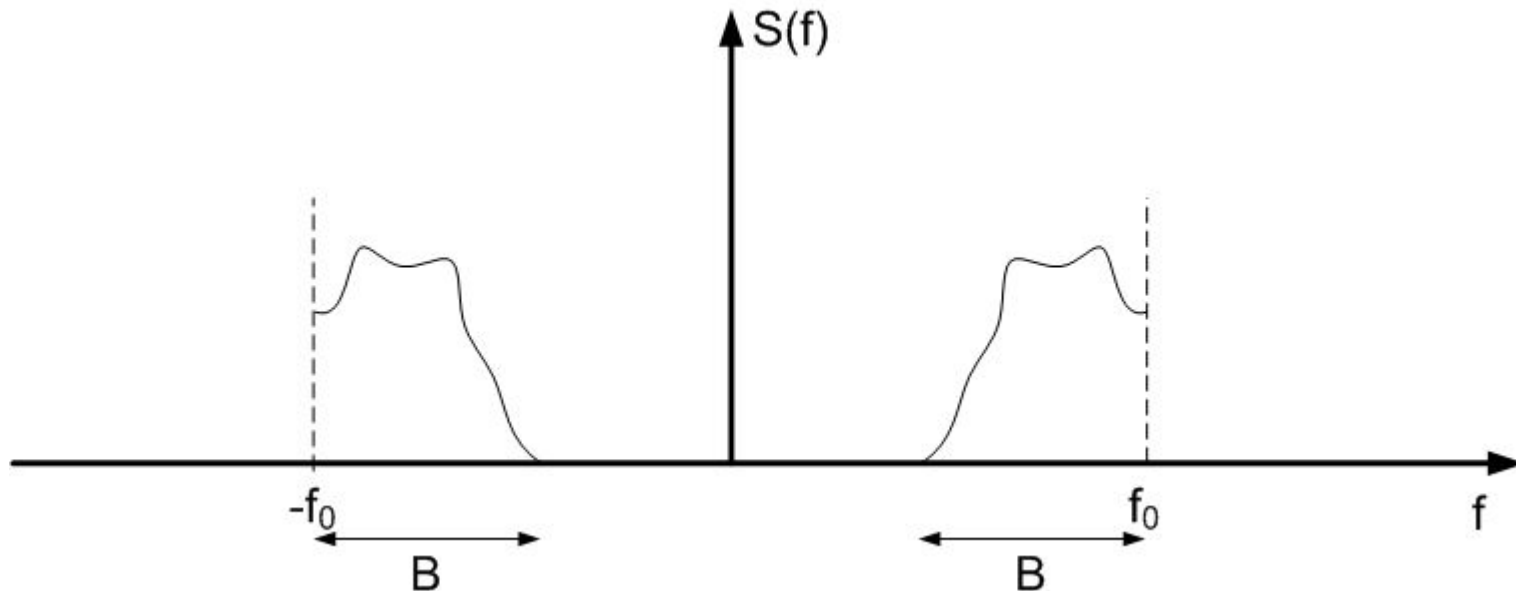


- La banda del segnale USB è uguale a B (in KHz)



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Banda Laterale Inferiore (LSB)



- La banda del segnale LSB è uguale a B (in KHz)



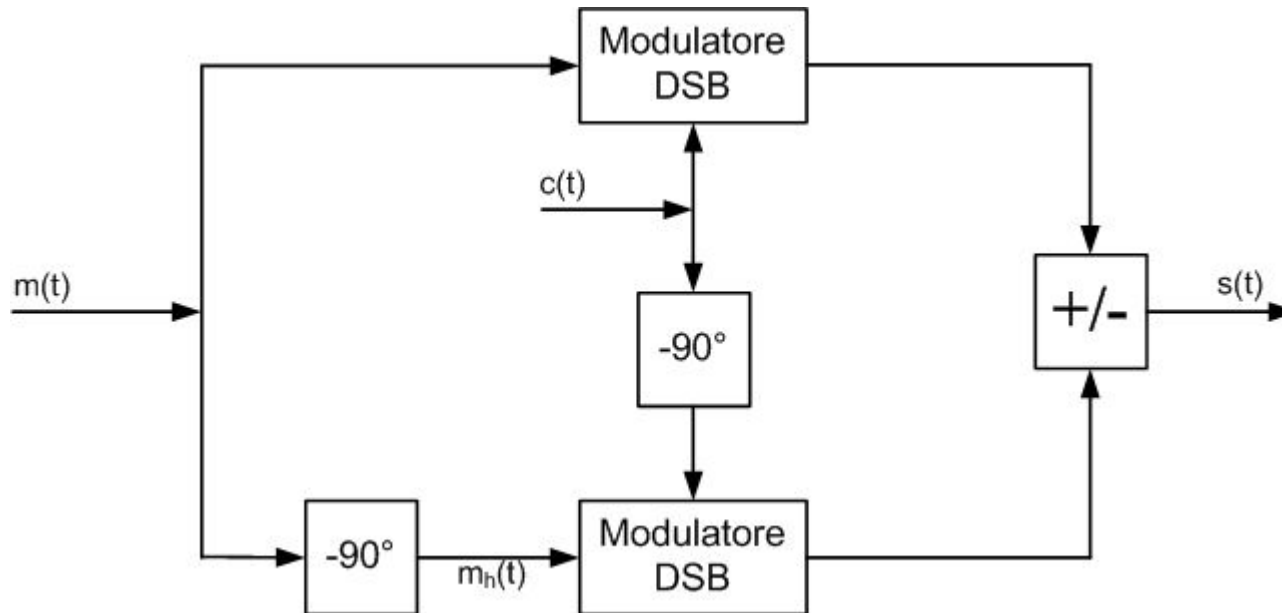
Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Lo spettro $S(f)$ di un segnale SSB presenta:
 - Una replica dello spettro $M(f)$ centrata su f_0
 - Una replica dello spettro $M(f)$ centrata su $-f_0$
 - Lo spettro $M(f)$ non è più **bilatero** (LSB + USB) bensì **monilatero** (sola LSB o sola USB)
- Concentrandoci sulle sole frequenze positive:
 - La banda del segnale $s(t)$ è B , ovvero è uguale alla banda del segnale modulante $m(t)$



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Il modulatore SSB si presenta nel seguente modo:



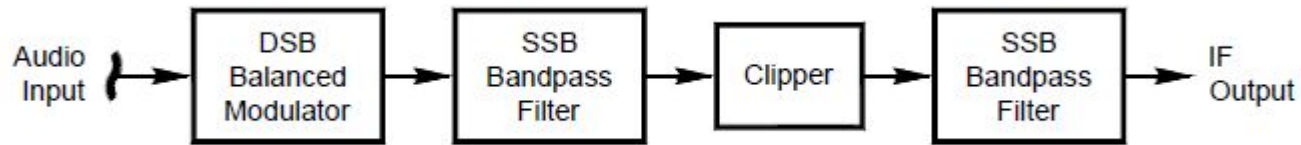
Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Tecniche di Modulazione SSB:
 - Filtraggio della banda laterale indesiderata
 - Metodo di Phasing
 - Etc.
- Negli apparati commerciali la cancellazione della banda laterale indesiderata è maggiore di 55 dB
- La potenza P_s del segnale modulato $s(t)$ è:
- Essa è $P_s = A_c^2 P_m$ una sola banda laterale



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

- Modulatore SSB con filtraggio banda indesiderata
- E' ancora usato negli RTX "home made"



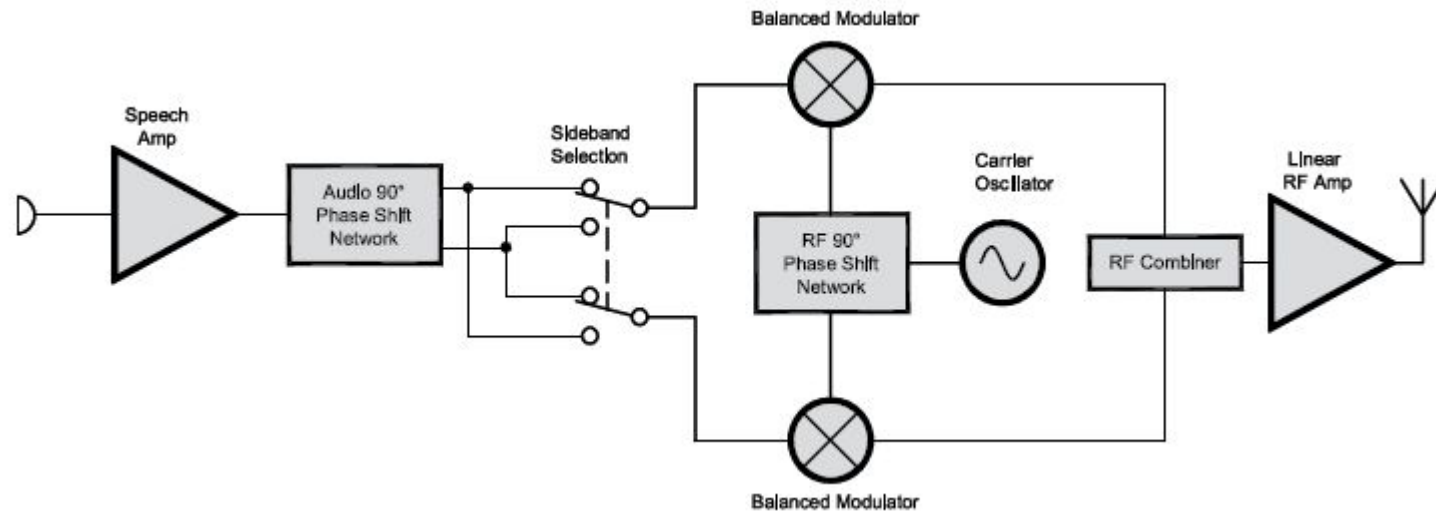
- La Trasformata di Hilbert introduce un overshooting
- Per limitare l'overshooting ci vuole il clipper

Il Clipper e il filtro SSB BPF equivalgono al



Modulazione a Banda Laterale Unica (SSB)

Modulatore SSB con tecnica Phasing



Il problema dell' overshooting c'è sempre !



Confronto fra AM, DSB-SC e SSB

Modulazione	Portante	Banda	Rivelatore	Efficienza
AM	SI	2xB	Inviluppo	50% max
DSB-SC	NO	2xB	Prodotto	100%
SSB	NO	B	Prodotto	100%



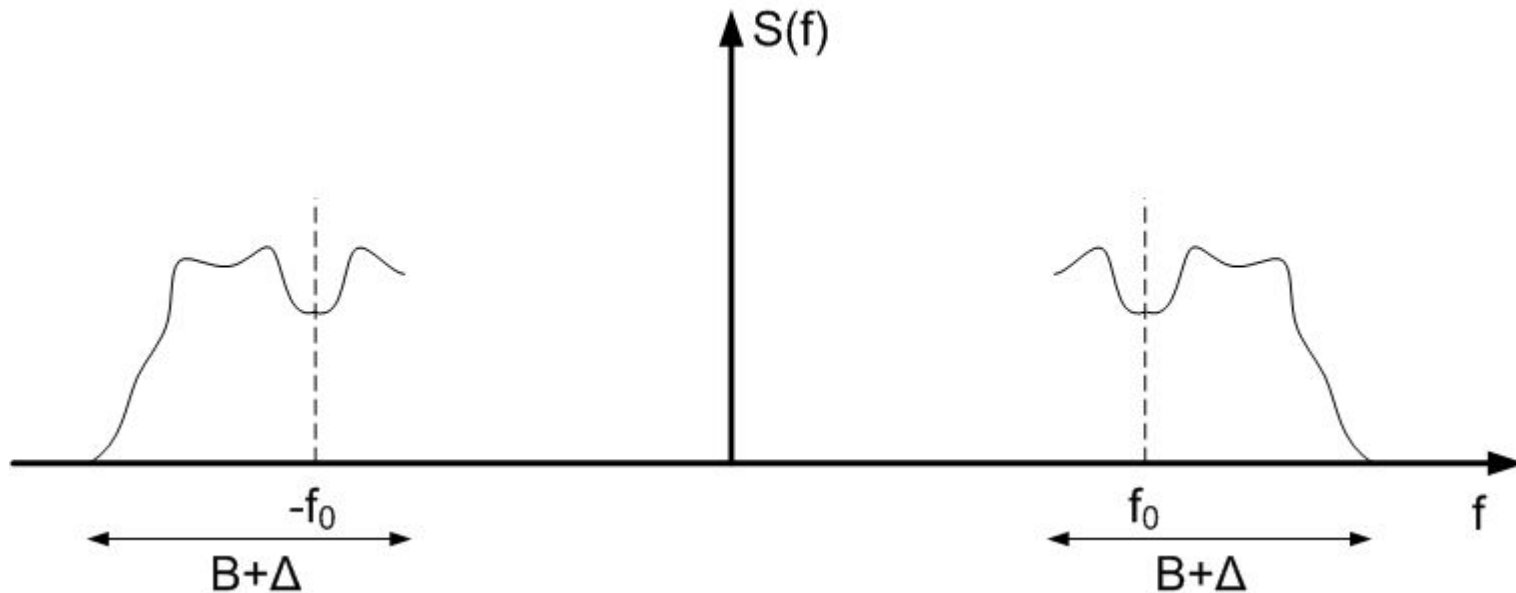
Modulazione a Banda Laterale Vestigiale (VSB)

- In certe applicazioni (per es. TV analogica):
 - La modulazione DSB era poco efficiente in termini di banda
 - La modulazione SSB era più difficile da realizzare
- Allora si è cercato un compromesso fra DSB e SSB:
 - Soppressione parziale della banda laterale inferiore
 - Uso di un filtro passa-banda → filtro **vestigiale**
 - Risposta in frequenza asimmetrica rispetto a $\pm f_0$
- Questa si chiama Modulazione VSB
- Non è utilizzata in apparati amatoriali



Modulazione a Banda Laterale Vestigiale (VSB)

- Banda Laterale Vestigiale (VSB)



- La banda del segnale VSB è uguale a $B + \Delta$ (in KHz)



Miglioramento della SSB → CE-SSB

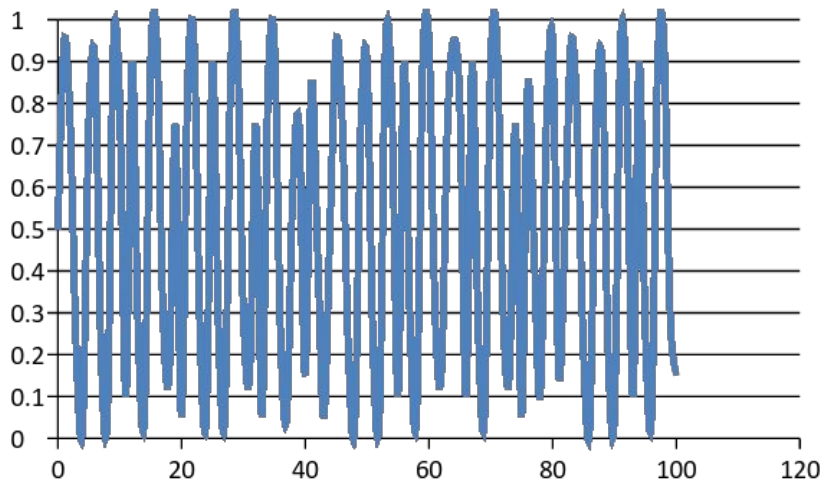
- La Trasformata di Hilbert è uno **shift** di 90° sulla fase del segnale audio $m(t)$
- Essa produce “**overshoots**” anche se $m(t)$ è “peak-limited”
- L’involuppo RF del segnale SSB presenta “overshoots”
- Questo accade **sempre**, a prescindere dal tipo di modulatore
- Gli “overshoots”, se non eliminati o ridotti:
 - causano un “non necessario” intervento dell’ALC
 - possono generare falsi allarmi di tipo “over-driving” in Lineari S.S.
- In ogni caso si ha **riduzione** di potenza RF per l’SSB



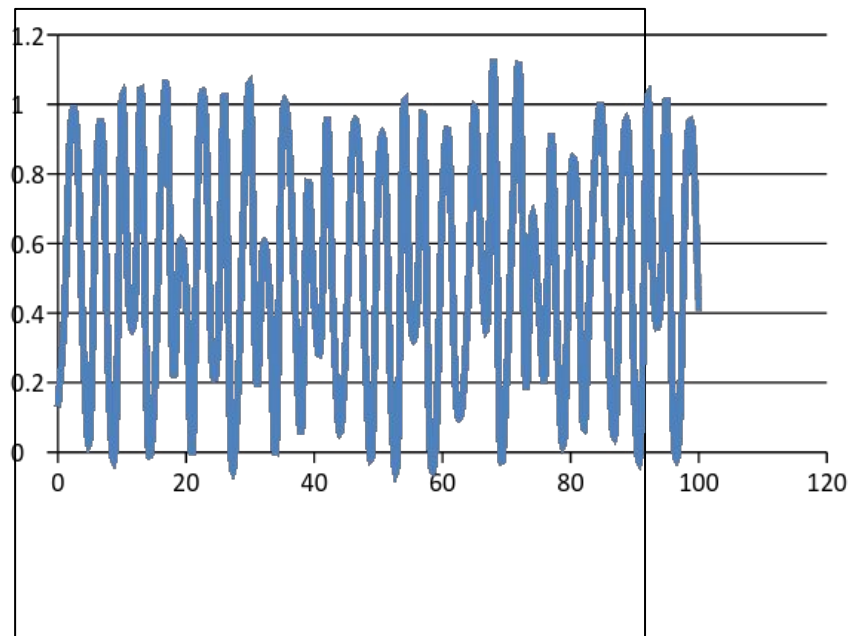
Miglioramento della SSB → CE-SSB

Confronto fra segnale $m(t)$ e la sua Trasformata di Hilbert $m_h(t)$

Segnale $m(t)$

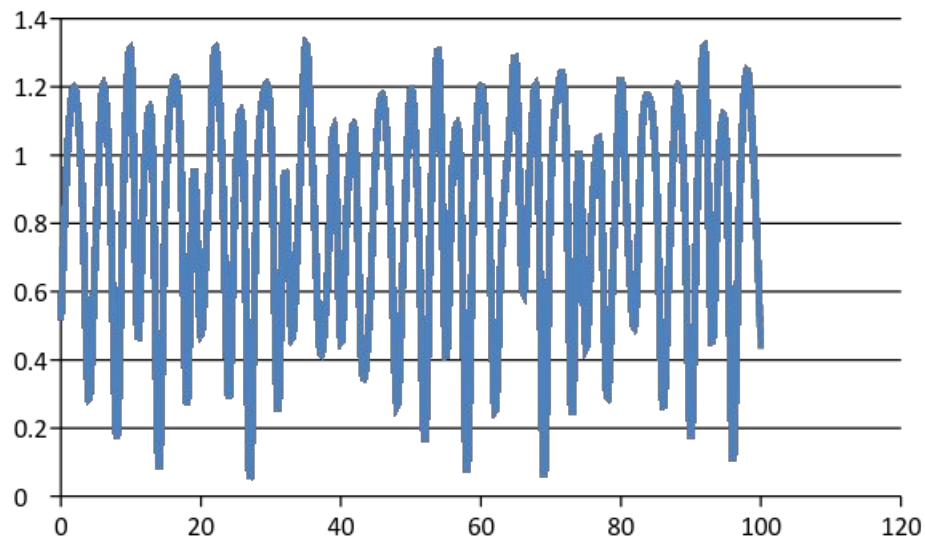


Segnale $m_h(t)$



Miglioramento della SSB → CE-SSB

- L'effetto di "overshooting" è ancora più visibile nel modulo dell'involucro complesso del segnale SSB



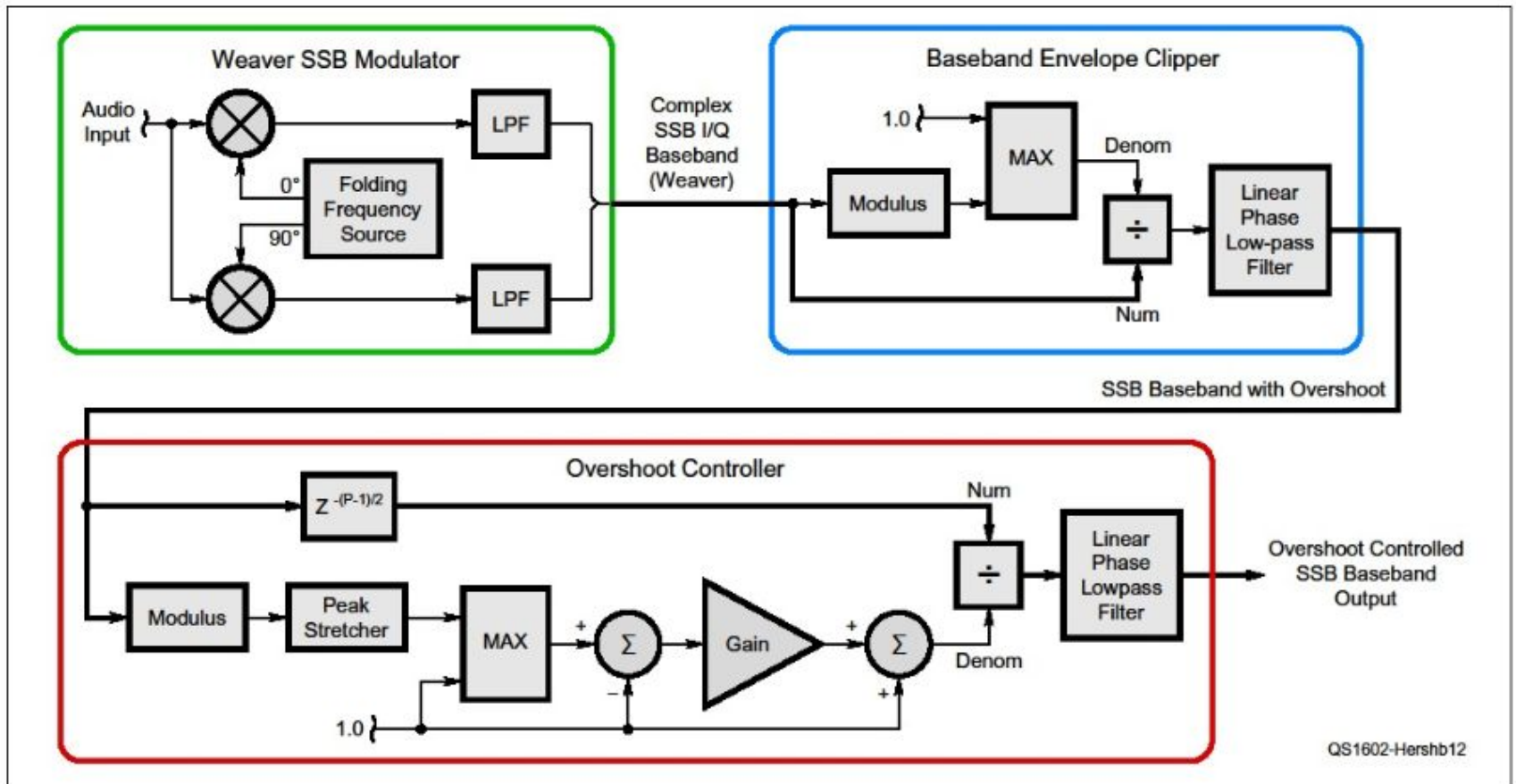
Miglioramento della SSB → CE-SSB

- Il problema di “overshooting” deve essere risolto, o almeno mitigato, per massimizzare la potenza media
- La tecnica risultata più efficace è la CE-SSB, ovvero **Controlled Envelope SSB**
- Articoli scritti da Dave W9GR su QST e QEX
- Essa è basata su:
 - Baseband Envelope Clipper
 - Overshoot Controller
- E' attualmente utilizzata su RTX SDR (per es. Flexradio)



Miglioramento della SSB → CE-SSB

- Un modulatore CE-SSB si presenta come segue:



Modulazioni Angolari

- Le modulazioni angolari sono:
 - Modulazione di Fase → **PM** = Phase Modulation
 - Modulazione di Frequenza → **FM** = Frequency Modulation
- Sono caratterizzate da un'ampiezza costante
- Modulazione **PM** → varia la fase della portante
- Modulazione **FM** → varia la frequenza istantanea della portante
- Variazioni di fase e variazioni di frequenza sono legate
- La frequenza istantanea è la derivata rispetto al tempo della fase

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}$$



Modulazioni Angolari

- La modulazione di fase **PM** è caratterizzata da:
 - **Fase istantanea $\theta(t)$** proporzionale al segnale modulante $m(t)$

$$\theta(t) = 2\pi f_0 t + k * m(t)$$

- Il segnale modulato $s(t)$ è uguale quindi a:

$$s(t) = A_c * \cos[2\pi f_0 t + k * m(t)]$$

dove k è l'indice di sensitività in fase e f_0 è la frequenza della portante



Modulazioni Angolari

- La modulazione di frequenza **FM** è caratterizzata da:
 - **Frequenza istantanea $f_i(t)$** proporzionale al segnale modulante $m(t)$

$$f_i(t) = f_0 + k * m(t)$$

- Il segnale modulato $s(t)$ è uguale quindi a:

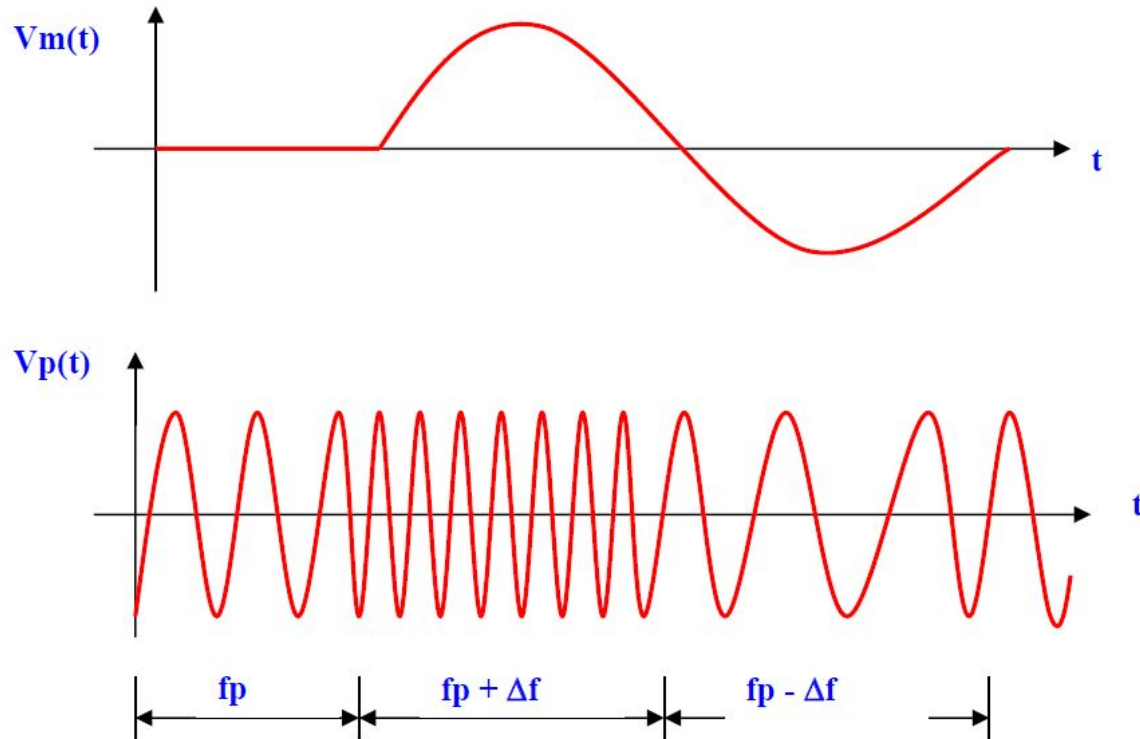
$$s(t) = A_c * \cos[2\pi(f_0 + k * m(t)) * t]$$

dove k è l'indice di sensitività in frequenza e f_0 è la frequenza della portante



Modulazioni Angolari

- Un segnale **FM** si presenta in questo modo:



- La quantità Δf è la **deviazione in frequenza**



Modulazioni Angolari

- I modulatori FM includono sempre un **compressore** per ridurre la deviazione in frequenza (e quindi la banda occupata)
- L'**indice di modulazione** m_f è il rapporto fra la deviazione in frequenza e la massima frequenza audio del segnale:

- L'indice di $m_f = \frac{\Delta f}{f_m}$ è max 1.0 per $f < 29$ MHz:
 - Se il segnale audio ha una banda di 3 KHz, la deviazione in frequenza sarà uguale a 3 KHz
 - Si parla di **Narrowband FM** (deviazione in frequenza = 3 KHz)
- L'indice di modulazione è > 1.0 in VHF e UHF:
 - Se il segnale audio ha una banda di 3 KHz, la deviazione in frequenza sarà maggiore di 3 KHz, per es. 5 KHz
 - Si parla di **Wideband FM** (deviazione in frequenza > 3 KHz)



Modulazioni Angolari

- A differenza della modulazione d'ampiezza (AM, DSB, SSB), la modulazione angolare è **non lineare**
- Nella modulazione d'ampiezza lo spettro del segnale modulato è una replica di quello del segnale modulante
- In termini di banda si ha, per un segnale audio con $B = 3$ KHz:
 - **AM** → la banda del segnale modulato è $2xB = 6$ KHz
 - **DSB** → la banda del segnale modulato è $2xB = 6$ KHz
 - **SSB** → la banda del segnale modulato è $B = 3$ KHz
 - **FM** → la banda del segnale modulato è $\gg 6$ KHz (!?)



Modulazioni Angolari

- In realtà lo spettro di un segnale FM è composto da **infinite** righe che diventano trascurabili oltre un certo punto
- Il 98% della energia spettrale di un segnale FM è all'interno di una banda convenzionale BW, definita dalla **regola di Carlson**:

$$BW = 2 * (\text{deviazione in frequenza} + \text{banda segnale modulante})$$

- Nell'esempio precedente di deviaz. = 5 KHz e banda = 3 KHz, si ha che il 98% dell'energia spettrale è in una banda pari a 16 KHz.
- La potenza di un segnale FM è costante ed uguale a quella della portante





Domande ?



Commenti ?

