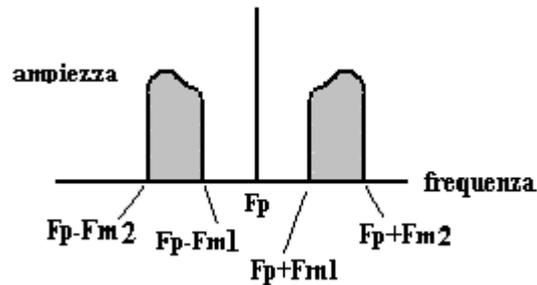


4.20 Il modulatore bilanciato

Grande importanza nella progettazione dei circuiti elettronici riveste il modulatore bilanciato; questo dispositivo trova diverse applicazioni sia nelle tecniche di comunicazione radio sia nel campo dei segnali in bassa frequenza come, ad esempio, nella telefonia subacquea utilizzata tra mezzi navali. Nel presente capitolo ci occuperemo dell'utilizzo del modulatore bilanciato nel campo delle basse frequenze per la generazione di segnali modulati privi della frequenza portante.

La modulazione lineare dei segnali, ottenuta agendo su di una frequenza portante F_p , mediante un segnale vocale definito in una banda di frequenze compresa tra F_{m1} e F_{m2} , è caratterizzata da uno spettro di frequenze quale quello riportato in figura 4.51

figura 4.51



La figura mostra la presenza della riga di frequenza centrale F_p (segnale della portante), ai lati della quale sono presenti due insiemi di frequenze (bande laterali) che si estendono, a sinistra, da $F_p - F_{m2}$ a $F_p - F_{m1}$, e a destra da $F_p + F_{m1}$ a $F_p + F_{m2}$ (questo insieme di frequenze, dopo rivelazione, riproduce il segnale modulante).

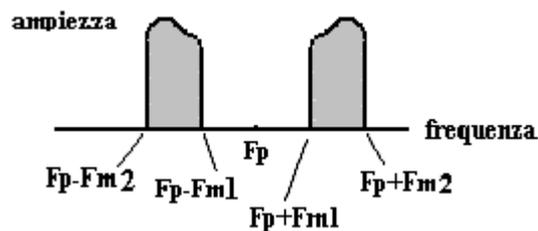
La portante è stata modulata da un segnale vocale e ciascuna banda laterale porta l'informazione del contenuto vocale del segnale modulante; ne segue che la portante F_p non ha in sé alcuna informazione del segnale vocale e pertanto potrebbe essere eliminata.

Il modulatore bilanciato ha appunto lo scopo di produrre uno spettro di modulazione nel quale è assente la portante e sono presenti soltanto le due bande laterali (l'insieme delle sole due bande laterali non restituisce, dopo rivelazione, il segnale modulante; questa possibilità è data dopo opportuna elaborazione dell'insieme frequenziale).

Tre forme di modulazione con portante soppressa possono essere realizzate con il modulatore bilanciato:

- **modulazione DSB** (Double Side Band) a doppia banda laterale (figura 4.52)

figura 4.52



- **modulazione SSB** (Single Side Band) a banda laterale singola comprendente:

- modulazione LSB (Low Side Band) a sola banda laterale inferiore (figura 4.53)

- modulazione USB (Upper Side Band) a sola banda laterale superiore (figura 4.54)

figura 4.53

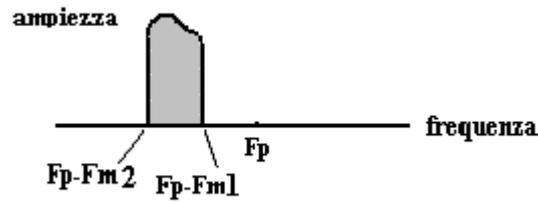
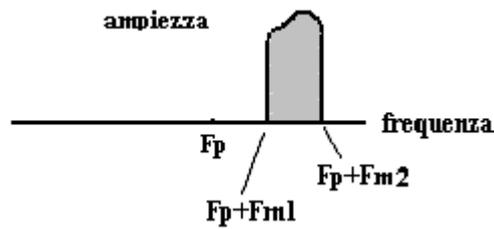


figura 4.54



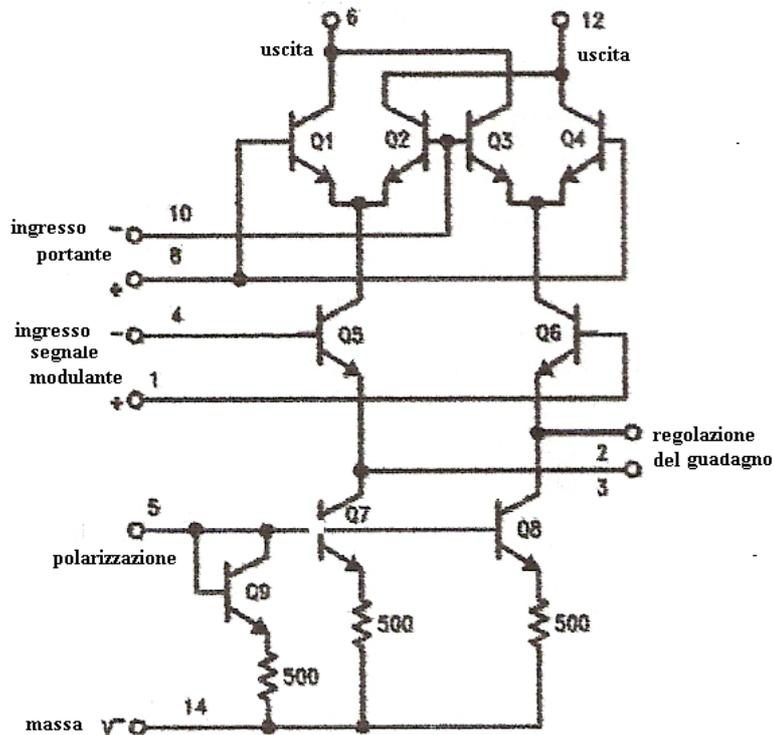
4.20.1 Il modulatore bilanciato per DSB

La modulazione a doppia banda laterale con portante soppressa si ottiene con l'impiego di un particolare circuito integrato, il tipo LM 1496, la cui disposizione meccanica è riportata in figura 4.55 e le caratteristiche circuitali in figura 4.56.

figura 4.55



figura 4.56



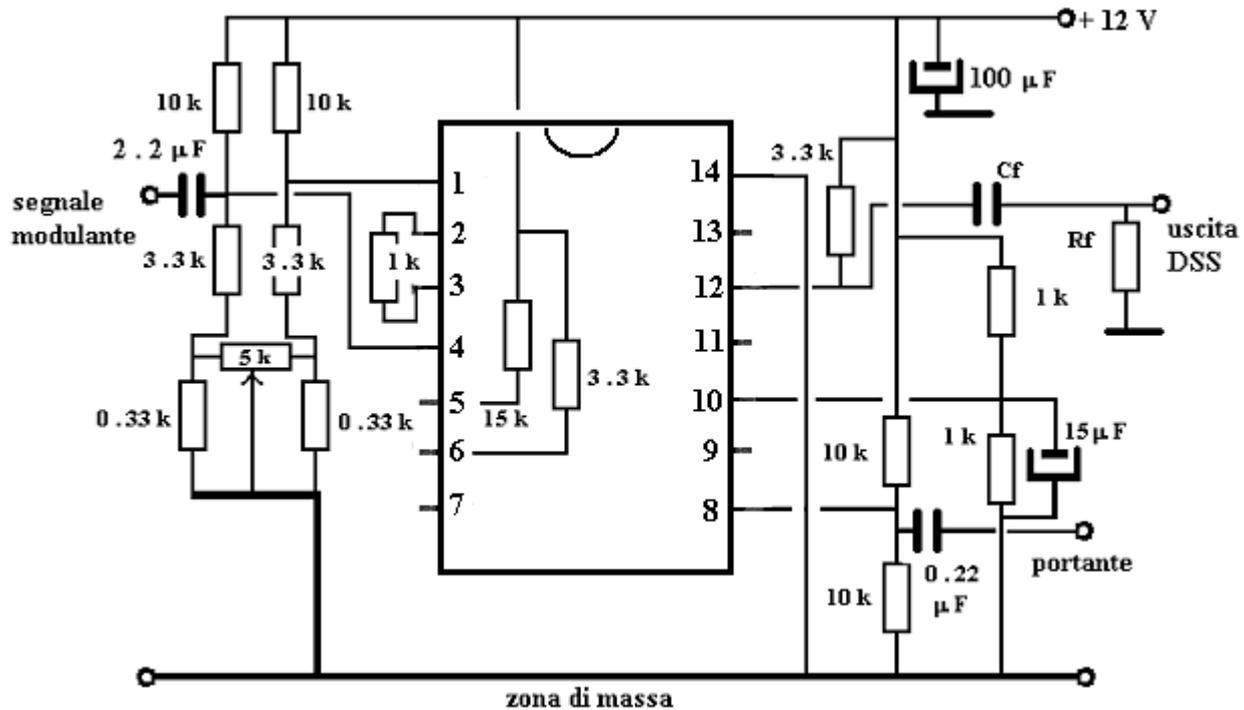
L'integrato LM1496 esegue il prodotto algebrico tra il segnale modulante (applicato ad uno dei due terminali 4 od 1) e la portante (applicata ad uno dei due terminali 8 o 10), ciò grazie ad un particolare circuito bilanciato dal quale il dispositivo trae il nome "modulatore bilanciato". Il risultato del processo matematico (si veda appendice A14) genera un segnale DSB all'uscita dei pin 6 o 12; questo segnale è inquinato, a causa della tecnologia dello LM1496, sia da un segnale spurio della modulazione, sia da un residuo molto basso di portante; per depurare il segnale DSB dallo spurio della modulazione è necessario prelevare il segnale tramite un filtro Rf-Cf., per ridurre al minimo il residuo di portante è necessario un aggiustamento potenziometrico così come mostrato in seguito.

Un circuito elettronico di un modulatore DSB, suggerito per applicazioni in bassa frequenza, e che utilizza l'integrato LM 1496, è riportato in figura 4.57 e di seguito commentato:

- Il circuito è alimentato con +12 Vcc e ha la massa al pin 14; ha un condensatore di fuga da 100 µF.
- Il guadagno dell'integrato è fissato con una resistenza da 1 k collegata tra i pin 2 e 3.
- L'integrato è polarizzato sul +12 V mediante una resistenza da 15 k collegata al pin 5.
- Il terminale d'uscita non utilizzato, pin 6, è collegato al +12 Vcc con una resistenza da 3.3 k.
- Il terminale d'uscita attivo, pin 12, è collegato al +12 Vcc con una resistenza da 3.3 k.
- I terminali d'ingresso, pin 4 e pin 1, sono collegati a due partitori resistivi (10 k + 3.3 k + 0.33 k) bilanciati mediante un trimmer potenziometrico da 5 k.
- Il segnale modulante è applicato, tramite una capacità da 2.2 µF, al pin 4.
- La portante è applicata, tramite una capacità da 0.22 µF, al pin 8

-Il segnale DSS, in uscita da pin 10, è filtrato dalla cellula Cf.-Rf.

figura 4.57



I dati di lavoro dell'integrato, consigliati dal costruttore, sono:

- livello della portante = 60 mV eff. sinusoidali
- livello del segnale modulante = 5 Vpp massimo

Dato che il dimensionamento dei componenti è già definito nello schema di figura 4.57, salvo la cellula Cf-Rf, non resta che impostare un esercizio per valutare la cellula e le forme d'onda del segnale modulante, della portante e del segnale DSS d'uscita:

Dati di base:

Sia da definire il livello e la forma d'onda d'uscita del modulatore DSS una volta che siano applicati ad esso i seguenti segnali:

- segnale modulante, S_m , applicato al pin 4: tensione sinusoidale di 1.5 Vpp alla frequenza 1000 Hz
- portante, F_p , applicata al pin 8: tensione sinusoidale di 60 mVeff alla frequenza 120000 Hz

Calcolo delle due frequenze del segnale DSB

La frequenza facente parte della banda inferiore sarà:

$$f_i = F_p - S_m = 120000 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz} = 119000 \text{ Hz}$$

La frequenza facente parte della banda superiore sarà:

$$f_s = F_p + S_m = 120000 \text{ Hz} + 1000 \text{ Hz} = 121000 \text{ Hz}$$

Dimensionamento della cellula Rf-Cf:

La cellula Cf-Rf ha il compito di depurare il segnale DSB dalla spuria di modulazione del segnale S_m a 1000 Hz; la reattanza di Cf, alla frequenza di 1000 Hz, deve essere grande rispetto alla resistenza da 3.3 k che fa capo al pin 12 d'uscita, è ragionevole assumere una reattanza di 100 volte di tale resistenza: $X_{Cf} = 330000$ ohm, quindi:

$$C_f = 1 / (6.28 * 1000 \text{ Hz} * 330000 \text{ ohm}) = 482 \text{ pF}$$

La reattanza di Cf, la cui capacità è arrotondabile a 470 pF, presenterà una reattanza bassa alle frequenze f_i e f_s , ovvero, per f_i sarà:

$$X_{Cf} = 1 / (6.28 * 119000 * 470 \text{ pF}) = 2847 \text{ ohm}$$

Assumendo ora per Rf il valore di 2847 ohm la cellula attenuerà circa -3 dB alla frequenza di 119000 Hz e di circa 41 dB alla frequenza del segnale di modulazione a 1000 Hz; la spuria di quest'ultimo viene pertanto attenuata, rispetto al livello del segnale SSB di (41dB - 3dB) = 38 db, comparando come un disturbo di ampiezza pari a SSB / 80.

Note sul residuo di portante

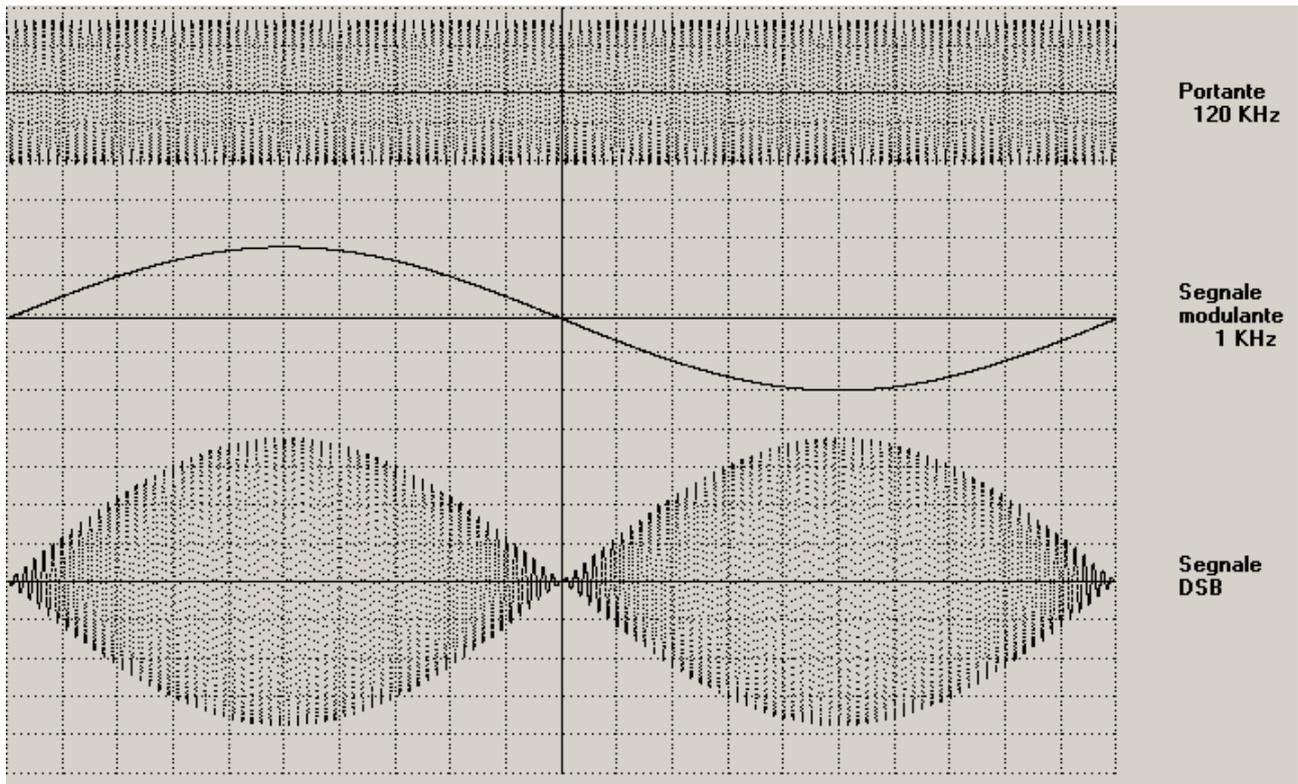
Il residuo di portante potrà essere ridotto di oltre 50 dB, rispetto al livello della DSS, agendo in modo opportuno, secondo quanto di seguito indicato nelle specifiche di taratura.

Calcolo delle forme d'onda del segnale DSB

È di notevole importanza, per il controllo del circuito modulatore, tracciare le forme d'onda del segnale modulante, della portante e quelle attese in uscita dalla cellula Cf-Rf, forme d'onda che potranno essere verificate, al momento del collaudo del dispositivo, mediante oscilloscopio.

Dette forme d'onda, mostrate, per il nostro esercizio, nel grafico di figura 4.58, sono il risultato di un piccolo programma di calcolo e presentazione riportato in appendice A14.

figura 4.58

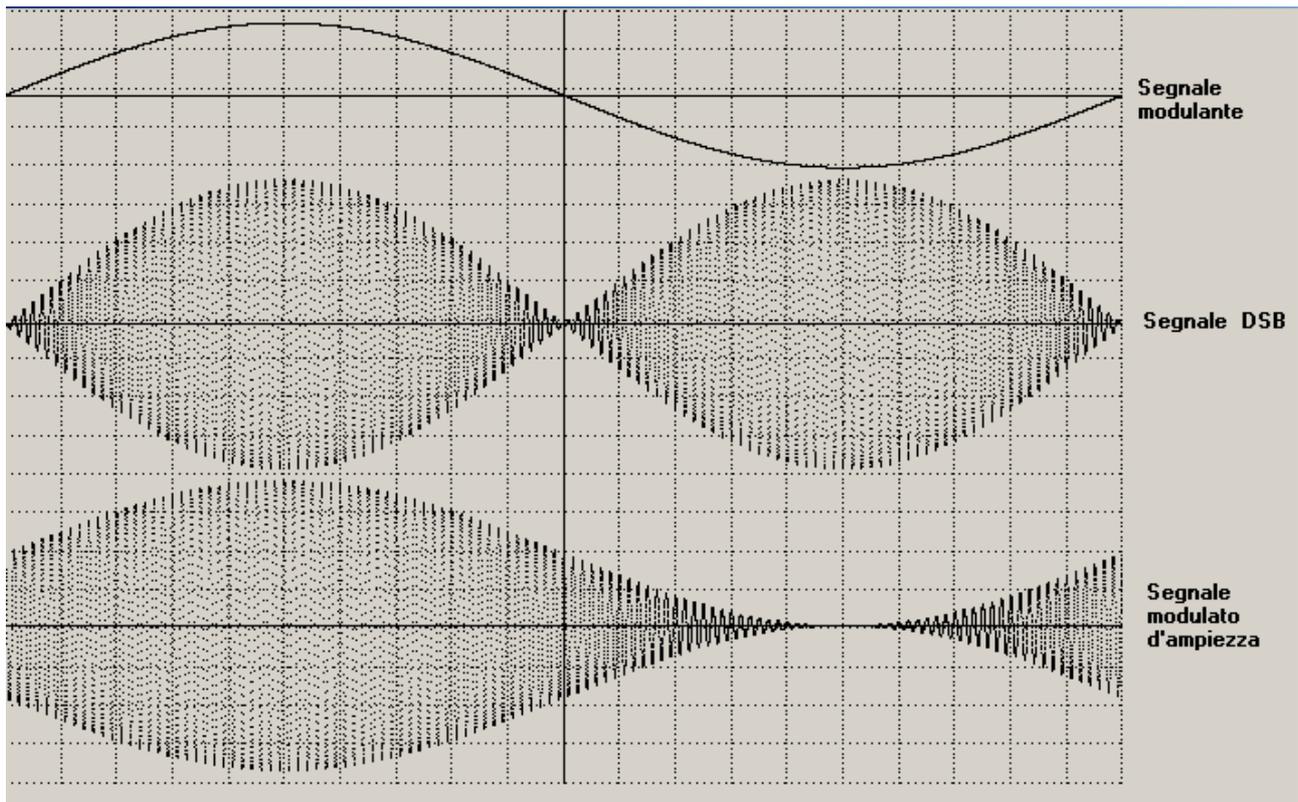


Nella parte alta del grafico è tracciato l'andamento sinusoidale della portante, sotto figura il grafico del segnale sinusoidale della modulante il cui periodo è 120 volte quello della portante, nella parte inferiore è tracciato l'andamento teorico del segnale DSB.

L'andamento del segnale DSB, mostrato in figura 4.58, è simile per qualsiasi valore della portante e del segnale di modulazione; può pertanto servire da riscontro per qualsiasi progetto dello stesso tipo. È di notevole interesse osservare come nel grafico del segnale DSB questo si azzeri in corrispondenza dello zero del segnale modulante; ciò significa che, in assenza di tale segnale, l'uscita DSB non è presente.

L'andamento del segnale DSB è confacente con il proprio spettro in frequenza già visto in figura 4.52; ad evitare che il profilo del segnale DSB possa essere erroneamente valutato come quello appartenente ad un segnale modulato in ampiezza, il cui spettro è riportato in figura 4.51, viene mostrata, in figura 4.59/a la differenza esistente tra i due profili originati dalla stessa portante e dallo stesso segnale modulante.

figura 4.59/a



Le differenze tra i due profili delle forme d'onda sono evidenti, in particolare si osservi che quando il segnale DSB si azzerava, sullo zero della modulante, il segnale modulato d'ampiezza presenta invece il livello della portante.

Sui livelli dei segnali

Con il livello della portante a 60 mV eff e con un'ampiezza del segnale modulante di 1.5 Vpp si ottiene un segnale DSB che nel picco massimo è di circa 0.5 Vpp.

L'ampiezza del segnale DSB è indipendente dall'ampiezza della portante ed è invece proporzionale all'ampiezza del segnale modulante.

Specificazioni di taratura

Le modalità di taratura del modulatore DSB riguardano soltanto l'operazione di riduzione del residuo di portante; questa procedura richiede l'applicazione al modulatore della sola portante: in assenza del segnale modulante, si collega l'oscilloscopio all'uscita della cellula Cf-Rf e, osservando l'ampiezza del residuo a 120000 Hz, si ruota il potenziometro da 5 k ohm, facente parte dei due partitori collegati ai pin 1 e 4, per ridurre al massimo il residuo di portante.

Osservazioni

Se il progetto del modulatore DSB richiede una maggiore attenuazione della spuria del segnale di modulazione, la cellula Cf-Rf può essere sostituita da un adatto filtro passa banda da progettare secondo quanto indicato nel successivo capitolo 5.

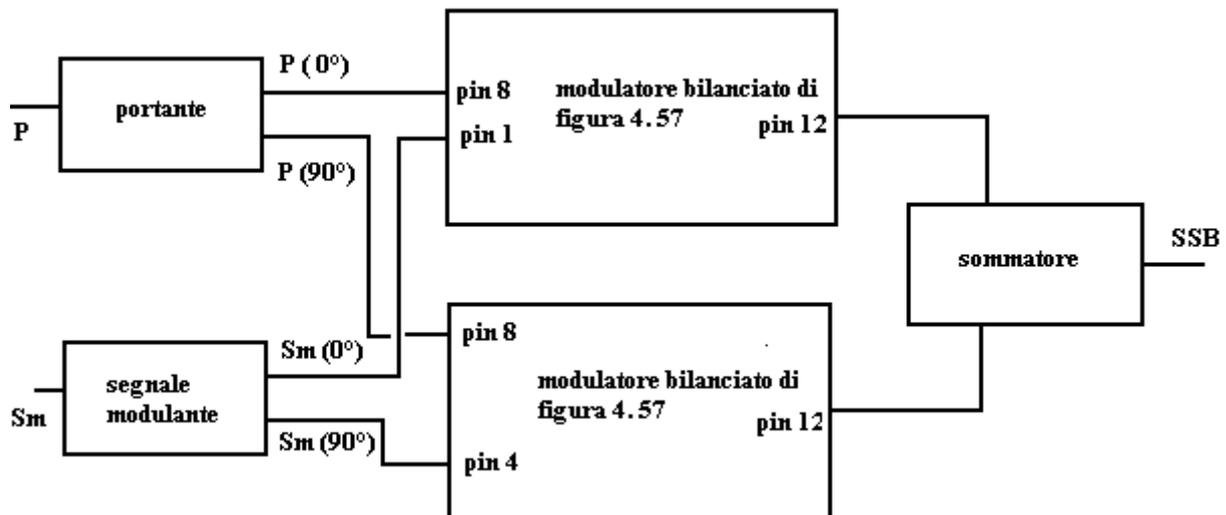
Per ottenere una efficace riduzione, sia della spuria del segnale modulante, sia del residuo di portante, il circuito del modulatore deve essere costruito con cura evitando collegamenti lunghi e accoppiamenti tra percorsi di segnale e di portante.

4.20.2 Il modulatore bilanciato per SSB

Per realizzare un modulatore di segnale SSB, comprendente la possibilità di generare tanto i segnali LSB quanto quelli USB, si impiega ancora l'integrato LM 1496 montato in due configurazioni uguali a quella mostrata in figura 4.57.

In questo tipo d'applicazione i due circuiti menzionati necessitano di due reti di sfasamento a 90° così come è illustrato nello schema a blocchi del nuovo modulatore riportato in figura 4.60.

figura 4.60



In questo nuovo circuito la distribuzione dei segnali ai modulatori è la seguente:

- la portante è applicata, con fase 0° al modulatore superiore (pin 8)
 - la portante è applicata con fase 90° al modulatore inferiore (pin 8).
 - la modulante è applicata, con fase 0° al modulatore superiore (pin 1)
 - la modulante è applicata con fase 90° al modulatore inferiore (pin 4)
 - i due segnali all'uscita dei due modulatori (pin 12) vengono sommati tra loro ottenendo all'uscita del sommatore il segnale SSB; con questa configurazione il segnale SSB è del tipo USB.
- Se entrambi i due segnali modulanti, l'uno con fase 0° l'altro con fase 90°, sono collegati ai pin 1 dei due modulatori il segnale SSB è del tipo USB; si passa cioè dalla banda laterale unica superiore alla banda laterale unica inferiore commutando semplicemente un conduttore dal pin 4 del modulatore inferiore al pin 1 dello stesso.

Il funzionamento del nuovo circuito si può spiegare sommariamente come segue lasciando in appendice A14 gli sviluppi matematici alla base del processo:

ciascun modulatore, ricevendo la portante e la modulante, produce alla propria uscita, pin 12, un segnale DSB; il segnale DSB del modulatore superiore può essere indicato in termini elementari come:

$$DSB_{(superiore)} = USB + LSB$$

cioè un segnale che contiene la somma delle bande laterali superiore ed inferiore.

Il segnale DSB del modulatore inferiore può essere indicato, invece, come:

$$DSB_{(inferiore)} = USB - LSB$$

cioè un segnale che contiene, a seguito della creazione della DSB inferiore con portante e segnale modulante sfasati di 90°, rispetto al modulatore superiore, la differenza tra la banda laterale superiore e quella inferiore.

Sommando, quindi, la DSB superiore con la DSB inferiore si ha la cancellazione dei termini LSB con il raddoppio dei termini USB come di seguito riportato, ottenendo infine il segnale USB:

$$\mathbf{DSB_{(superiore)} + DSB_{(inferiore)} = (USB + LSB) + (USB - LSB) = 2USB}$$

Se entrambi i pin 1 dei due modulatori ricevono i segnali modulanti, rispettivamente a fase 0° e 90° , le espressioni sopra riportate assumono segni algebrici diversi:

$$\mathbf{DSB_{(superiore)} = USB + LSB}$$

$$\mathbf{DSB_{(inferiore)} = LSB - USB}$$

e la loro somma porta alla esplicitazione della banda laterale inferiore:

$$\mathbf{DSB_{(superiore)} + DSB_{(inferiore)} = (USB + LSB) + (LSB - USB) = 2LSB}$$

A questo punto non resta che esaminare le caratteristiche degli sfasatori e del sommatore; per quest'ultimo si può vedere quanto già scritto nel paragrafo 4.8.2, mentre per gli sfasatori alcune considerazioni vanno fatte:

-sfasatore per la portante.

Lo sfasatore per la portante deve lavorare soltanto per la frequenza fissa, F_p , stabilita per tale funzione, quindi sarà sufficiente calcolare due reti RC, l'una che sfasa $+45^\circ$, l'altra che sfasa -45° per ottenere lo sfasamento di 90° voluto tra le due cellule.

-sfasatore per la modulante.

Generalmente il segnale modulante è definito in bande vocali di alcune migliaia di Hz per cui non è possibile realizzare uno sfasamento costante di 90° per tutte le frequenze della banda, con semplici cellule RC; si deve invece ricorrere a circuiti speciali dei quali tratteremo di seguito, con un esempio.

Impostiamo ora un esercizio per valutare le reti di sfasamento, le forme d'onda del segnale modulante, della portante, dei segnali DSB dei due modulatori, e del segnale USB d'uscita del circuito di figura 4.60:

Dati di base:

Siano da calcolare le cellule Cf-Rf, le reti di sfasamento e i segnali d'uscita del modulatore USB di figura 4.60 una volta che si debbano applicare ad esso i seguenti segnali:

-segnale modulante, S_m , applicato ai pin 1 e 4 dei due modulatori: tensione di 1.5 Vpp in banda da $F_{m1} = 200$ Hz a $F_{m2} = 2000$ Hz, con sfasamento costante di 90° nella banda.

-portante, F_p , applicata ai pin 8 dei due modulatori: tensione sinusoidale di 60 mVeff alla frequenza 120000 Hz con fase 0° e 90°

Calcolo della banda del segnale USB

La banda di frequenze USB sarà compresa tra

$$F_p + F_{m1} = 120000 \text{ Hz} + 200 \text{ Hz} = 120200 \text{ Hz}$$

e

$$F_p + F_{m2} = 120000 \text{ Hz} + 2000 \text{ Hz} = 122000 \text{ Hz}$$

Dimensionamento delle cellule Rf-Cf:

Le cellule Cf-Rf hanno il compito di depurare i segnali USB dalle spurie di modulazione del segnale modulante; la reattanza di Cf, alla frequenza inferiore della banda modulante, deve essere

grande rispetto alle resistenze da 3.3 k che fa capo ai pin 12 d'uscita dei due modulatori; è ragionevole assumere una reattanza di 100 volte di tale resistenza: $X_{Cf} = 330000 \text{ ohm}$, quindi:

$$C_f = 1 / (6.28 * 200 \text{ Hz} * 330000 \text{ ohm}) = 2412 \text{ pF}$$

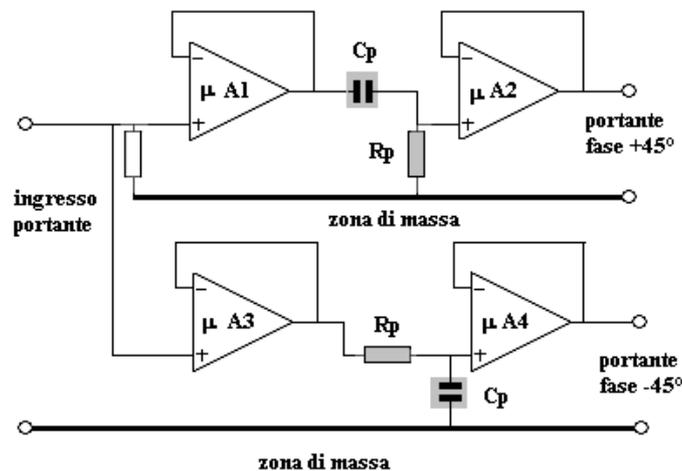
La reattanza di C_f , la cui capacità è arrotondabile a 2700 pF, presenterà una reattanza bassa alla frequenza inferiore del segnale USB, ovvero sarà:

$$X_{Cf} = 1 / (6.28 * 120200 * 470 \text{ pF}) = 490 \text{ ohm}$$

Dimensionamento della rete di sfasamento per la portante

La rete di sfasamento per la portante dovrà lavorare alla frequenza di 120000 Hz realizzando, per il circuito di modulazione USB, due segnali sfasati tra loro di 90° ; questo si ottiene semplicemente calcolando una cellula R_p - C_p (passa basso) tale da sfasare -45° alla frequenza della portante ed assumendo la stessa cellula invertita, C_p - R_p (passa alto), per sfasare $+45^\circ$.

Le cellule potranno essere collegate, mediante un operazionale quadruplo, ad esempio il tipo MC33079, alimentato tra +12V e -12V, come illustrato in figura 4.61 (evidenziate in color grigio). figura 4.61



Le cellule devono essere dimensionate con valori di R_p sufficientemente alti per non caricare gli operazionali; un valore di $R_p = 2.2 \text{ Kohm}$ è adatto.

Fissato il valore di R_p il valore di C_p si ricava come segue :

Dovendo sfasare di 45° la cellula dovrà avere:

$$X_{Cp} = R_p$$

quindi

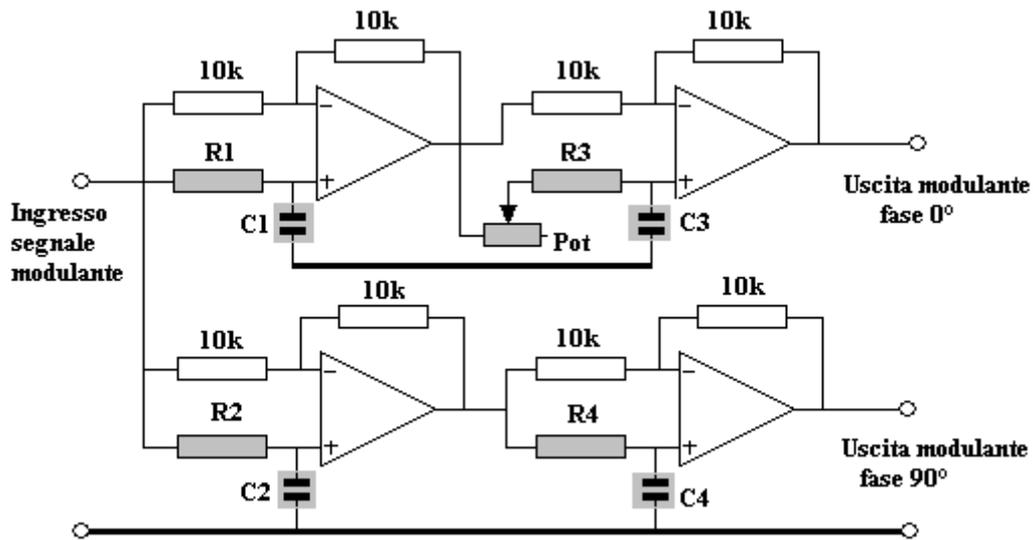
$$C_p = 1 / (6.28 * 120000 \text{ Hz} * 2200 \text{ ohm}) = 603 \text{ pF} \text{ (da arrotondare a } 600 \text{ pF)}$$

Dimensionamento della rete di sfasamento per la modulante

La rete di sfasamento per la modulante dovrà sfasare 90° in tutta banda di frequenze compresa tra $F_{m1} = 200 \text{ Hz}$ e $F_{m2} = 2000 \text{ Hz}$; questa necessità impone l'impiego di un particolare circuito di sfasamento notevolmente complicato da calcolare. Molta letteratura è disponibile su questo argomento per chi volesse approfondirlo, qui ci limitiamo a riportare un circuito quotato che ha dato buoni risultati sperimentali.

La rete di sfasamento, evidenziata in grigio, e gli operazionali ad essa collegati sono mostrati in figura 4.62.

figura 4.62



Il circuito integrato è un quadruplo tipo MC33079 alimentato tra +12V e - 12V, le resistenze nei rami di controreazione sono tutte uguali da 10 k ohm al 5%, le resistenze ed i condensatori della rete di sfasamento sono:

R1 = 2200 ohm 1%	C1 = 12600 pF 1%
R2 = 9000 ohm 1%	C2 = 12600 pF 1%
R3 = 22000 ohm 5%	C3 = 11900 pF 1%
R4 = 124000 ohm 1%	C4 = 11900 pF 1%
Pot = 30000 ohm	

Taratura dello sfasatore

La taratura del circuito si esegue mediante un generatore di segnali sinusoidali, collegato all'ingresso, ed un oscilloscopio con gli assi X ed Y collegato alle due uscite.

Impostando l'oscillatore su alcune frequenze della banda di lavoro si deve regolare il potenziometro, pot, fino ad ottenere un cerchio sullo schermo dell'oscilloscopio; l'operazione deve essere ripetuta diverse volte onde minimizzare l'errore di fase.

Si tenga presente che, non essendo possibile avere un cerchio perfetto per tutte le frequenze, si dovrà mediare in modo che gli errori vengano distribuiti in tutta la banda; non deve infatti essere ottenuto un cerchio perfetto ad una certa frequenza penalizzando fortemente tutte le altre.

La precisione di fase che il circuito consente è sufficiente per la maggior parte degli impieghi quando il segnale modulante è un segnale vocale nel parlato.

Note sui residui di portante

I residui di portante dei due modulatori potranno essere ridotti di oltre 50 dB, rispetto al livello della USB, agendo in modo opportuno, secondo quanto di seguito indicato nelle specificazioni di taratura dell'esercizio precedente.

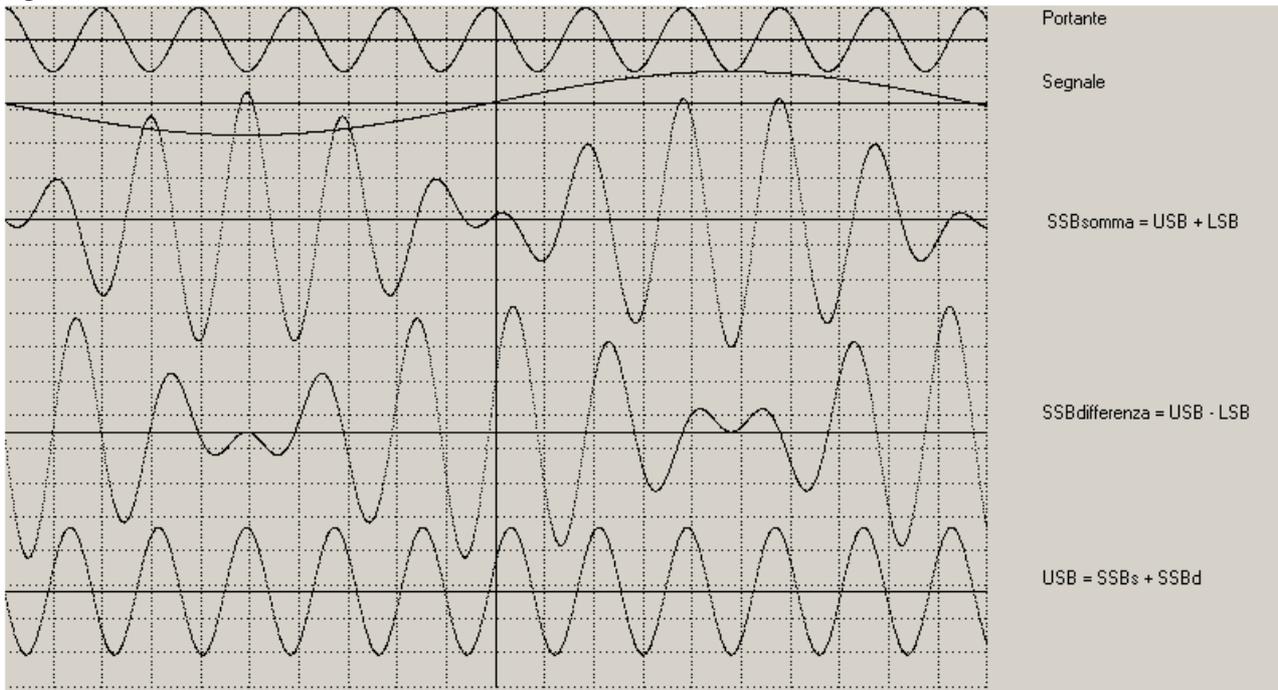
Calcolo delle forme d'onda del segnale USB

È di notevole importanza, per il controllo del circuito modulatore, tracciare le forme d'onda del segnale modulante, della portante e quelle attese, sia in uscita dai pin 12 dei due modulatori, sia in uscita dal sommatore, forme d'onda che potranno essere verificate, al momento del collaudo del dispositivo, mediante oscilloscopio.

Dette forme d'onda, mostrate nel grafico di figura 4.63, e sono il risultato di un piccolo programma di calcolo e presentazione riportato in appendice A14.

Nella figura sono tracciate le curve per valori molto inferiori alla $F_p = 120000$ Hz di lavoro allo scopo di consentire la visualizzazione, all'interno degli involuipi DSB, dell'onda portante con le relazioni di fase che consentono di ottenere, dopo la somma, il segnale USB.

figura 4.63



In alto è tracciata una portante avente una frequenza di circa 11000 Hz; sotto, il segnale modulante, scelto nella banda, alla sola frequenza di 1000 Hz.

Seguono l'involuppo della $DSB_{(superiore)}$; $DSB_{(superiore)} = USB + LSB$ e l'involuppo della $DSB_{(inferiore)}$; $DSB_{(inferiore)} = USB - LSB$, infine nella traccia più bassa è tracciato l'andamento del segnale in uscita dal sommatore, cioè $USB = 2 SSB$.

I profili degli involuipi e tutte le forme d'onda sono simili per qualsiasi frequenza della portante e singola della modulante; non sono mostrate le curve con il segnale della modulante in banda 200 Hz – 2000 Hz perché prive di significato applicativo e di controllo.