

(pubblicato su Radiorivista N.5 2005)
 LA CONVERSIONE E LA
 MOLTIPLICAZIONE (parte seconda)

Biagio Matassa IZ0CWZ

Spero di essere riuscito, nella puntata precedente, a convincere qualcuno che l'idea di fare la radio con la moltiplicazione non sia del tutto balzana. Riassumo qui l'idea fondamentale:

Moltiplicando tra loro due segnali sinusoidali si ottengono le frequenze somma e differenza.

La conversione è completata scegliendo con un opportuno filtro una delle due frequenze.

Credo si possa affermare che in ogni dispositivo che compie una conversione di frequenza avviene sempre in qualche modo una moltiplicazione fra segnali.

Il problema grosso in un mixer è quello di avere in uscita il prodotto desiderato con la massima ampiezza possibile e di non avere (o averli più bassi possibile) i prodotti indesiderati.

Un semplice transistor funziona da mixer poiché a causa della risposta non lineare genera prodotti fra segnali in ingresso, in particolare il prodotto fra il segnale dell'oscillatore locale e tutti gli altri, ma ci sono anche prodotti fra segnali forti in arrivo, e in uscita quindi... tanti segnali fantasma!

Un fet, un mosfet a due porte, una valvola, opportunamente polarizzati, danno risultati migliori. Lavorano abbastanza bene integrati tipo MC1496 NE602 o simili, studiati proprio per effettuare una moltiplicazione, ma pure loro generano molto presto prodotti indesiderati al crescere del livello dei segnali.

Tutti sanno adesso che i mixer migliori, per quanto riguarda i segnali forti, si realizzano con diodi o con switch analogici usati come veri e propri interruttori, essi vengono comunemente chiamati mixer a commutazione.

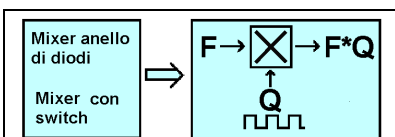


fig.1 Nei mixer a commutazione si ha un prodotto con un'onda quadra

Continuando il nostro discorso semimatematico buttiamo subito l'idea fondamentale:

Il funzionamento di un mixer a commutazione si può schematizzare mediante una moltiplicazione tra il segnale in ingresso e un segnale ad onda quadra di ampiezza unitaria.(fig1)

A prima vista utilizzare un segnale ad onda quadra come segnale moltiplicante sembrerebbe cosa poco indicata poiché, come tutti sanno, il segnale ad onda quadra contiene tante

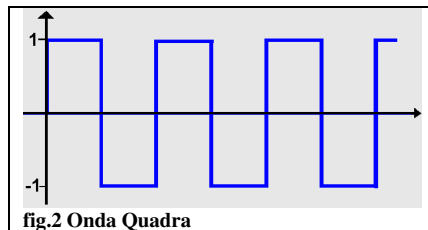
frequenze e quindi si avranno certamente in uscita segnali indesiderati. C'è da vedere però se questi segnali indesiderati diano molto fastidio o si possano sopportare. Esaminiamo un po' nei particolari.

Segnale ad onda quadra.

Un segnale ad onda quadra è un segnale che varia istantaneamente tra un valore massimo e un valore minimo, nel nostro caso tra +1 e -1.

Il matematico francese Jean Baptiste FOURIER ha dimostrato che un segnale periodico di forma qualsiasi, può sempre esprimersi come somma di segnali sinusoidali aventi frequenze multiple della frequenza fondamentale.

Tutte queste frequenze si chiamano armoniche: la prima armonica ha frequenza f (frequenza fondamentale),



la seconda 2f, la terza 3f, 4f, 5f ecc. Il contenuto del teorema di Fourier è familiare al radioamatore perché egli è abituato a considerare le armoniche di un segnale, soprattutto nel trasmettitore. Trasmettendo a 7 MHz possono uscire le frequenze di 14 e 21 MHz, ma anche 700 MHz (100ª armonica)

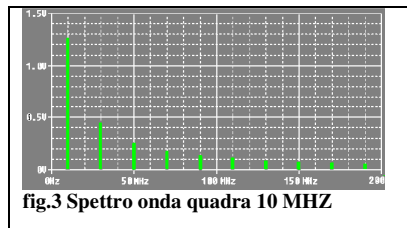
L'ampiezza delle singole armoniche dipende dalla forma particolare del segnale.

Il teorema di Fourier permette anche di calcolare l'ampiezza delle diverse armoniche e nel caso dell'onda quadra porta alla conclusione che sono presenti solo le armoniche dispari (1, 3, 5, 7...) e con ampiezze decrescenti.

L'espressione matematica è la seguente:

$$y(t) = \frac{4}{\pi} [1 \cdot \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5\omega t) + \dots] \quad (1)$$

(Qui usiamo la funzione seno anziché coseno come nei discorsi dell'altra puntata ma la sostanza non cambia, ricordiamo inoltre che ω è

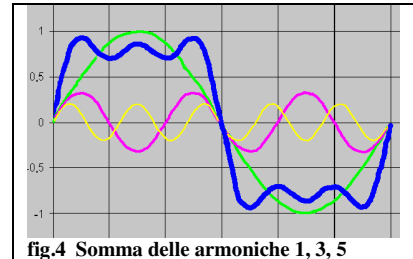


semplicemente $6.28 \cdot f$)
 La dimostrazione di quanto sopra purtroppo non è possibile ma possiamo

verificarne sperimentalmente il contenuto in due modi:

1) Mandiamo in un analizzatore di spettro (vero o simulato) un segnale ad onda quadra di 10 MHz con ampiezza 1 ed osserviamone lo spettro in frequenza (fig3). Vediamo le armoniche di 10, 30, 50, 70, 90Mhz, ecc. e le ampiezze decrescenti secondo i numeri 1, 1/3, 1/5, 1/7..... La fondamentale risulta essere circa 1.3 (cioè $4/\pi$).

2) Sommiamo un certo numero di sinusoidi di frequenza f, 3f, 5f, 7f, 9f



ecc. ed ampiezza 1 1/3 1/5 Ed osserviamo ciò che si ottiene.(fig4) Più aumenta il numero delle armoniche sommate e più ci si avvicina all'onda quadra

Prodotto F*Q

Dopo questa digressione sull'onda quadra, un po' lunga ma necessaria, ritorniamo alla nostra questione del prodotto.

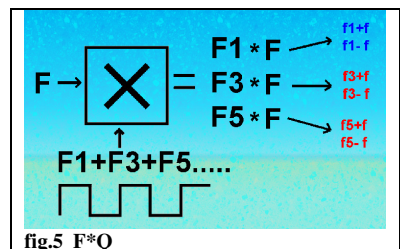
Precisiamo i simboli utilizzati: con una lettera maiuscola (F, F1, F2) indichiamo l'espressione dell'oscillazione sinusoidale (cioè $A \sin(\omega t)$, ecc.) e con una lettera minuscola la frequenza (f, f1, f2).

Sia quindi F il segnale in ingresso di frequenza f e Q il segnale moltiplicante ad onda quadra di frequenza f1. Possiamo scrivere in base a ciò che abbiamo detto per l'onda quadra:

$$Q = F1 + F3 + F5 + \dots$$

dove F1, F3, F5 sono segnali sinusoidali con frequenza f1, $f3=3 \cdot f1$, $f5=5 \cdot f1$ con la giusta ampiezza che non importa precisare.

Allora:
 $F \cdot Q = F \cdot (F1 + F3 + F5) = F \cdot F1 + F \cdot F3 + F \cdot F5$



I tre prodotti (ne scriviamo tre ma sono molti di più) danno ciascuno la somma e la differenza delle frequenze (fig.5).

Il primo prodotto $F \cdot F1$ è proprio quello desiderato per la nostra conversione e ci dà le frequenze $f1-f$ e $f1+f$ esattamente come nel caso dell'oscillatore sinusoidale. Ci sono però

altre frequenze indesiderate.

Vediamo con un esempio quanto esse siano nocive.

Supponiamo di voler realizzare un ricevitore per la frequenza di 1MHz con media frequenza di 9MHz moltiplicando il segnale in ingresso per quello dell'oscillatore locale di 10MHz ad onda quadra. Si ottiene lo spettro di fig.6 con la frequenza desiderata di 9MHz (e 11MHz) e inoltre le frequenze indesiderate intorno a 30, 50, 70MHz. E' evidente che queste frequenze non disturbano affatto.

Il vero problema invece è che se all'ingresso arriva un segnale di 39 MHz

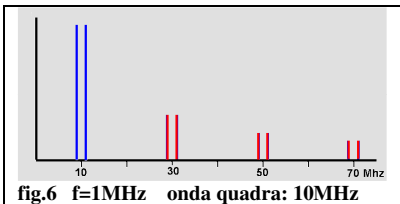


fig.6 f=1MHz onda quadra: 10MHz

(ma anche di 59, 79 21, 41, 61 Mhz ecc..)esso produce ugualmente un segnale in media frequenza di 9 Mhz e quindi un disturbo. Con un buon filtro in ingresso anche questo problema si risolve..

E' invece più difficile difendersi dalle frequenze che arrivano direttamente al mixer circolando subdolamente all'interno del ricevitore, in particolare le armoniche, anche molto elevate, del BFO. Queste frequenze ,moltiplicandosi con i multipli del VFO, producono fischietti vari. Tale fenomeno è comune a tutti i mixer a commutazione ma più evidente in quelli con gli switch. Per ridurlo occorrono schermature e disaccoppiamenti efficaci. Qualche piccolo cinguettio può comunque essere tollerato.

REALIZZAZIONE

La moltiplicazione con un segnale sinusoidale realizzava un convertitore teoricamente perfetto, ma la cui realizzazione pratica era però tutt'altro che perfetta. Tenendo conto che all'ingresso di un ricevitore accanto a un segnale desiderato molto piccolo ci possono essere segnali di ampiezza fino a un milione di volte maggiore, anche piccolissime imperfezioni nella moltiplicazione fanno sì che i prodotti indesiderati siano maggiori di quelli

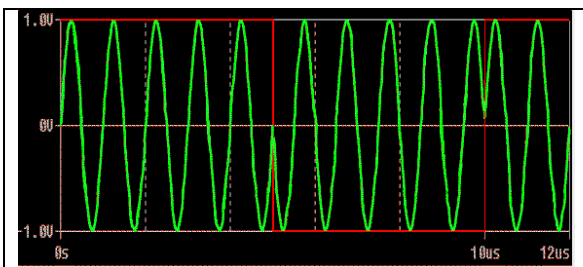


fig.7 prodotto di F a 10MHz(verde) con Q di 1Mhz(rosso)

desiderati.

Realizzare una moltiplicazione con un segnale ad onda quadra è invece molto più semplice.

Infatti moltiplicare il segnale in arrivo per un'onda quadra equivale a

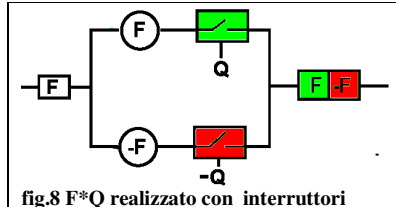


fig.8 F*Q realizzato con interruttori

moltiplicarlo alternativamente per 1 e per -1, il che significa prenderlo tale e quale oppure con polarità invertita (moltiplicando per -1 il massimo diventa minimo e viceversa).

In figura 7 è mostrato tale prodotto.

La moltiplicazione di un segnale F per un'onda quadra si può realizzare, quindi, prendendo alternativamente il segnale F e il segnale di polarità opposta -F.

Ciò è evidente nel caso della fig.7 in cui la frequenza dell'onda quadra è minore della frequenza del segnale ma il risultato è valido anche negli altri casi.

Adesso si comprende facilmente la strada da seguire per la realizzazione pratica: basta avere a disposizione il segnale F e il segnale

-F (cioè il segnale di polarità opposta) e commutare alternativamente fra i due mediante degli interruttori (fig.8). Ci dobbiamo procurare due segnali di polarità opposta anche per il segnale ad onda quadra (li indichiamo con Q e -Q)

Supponiamo che gli interruttori si chiudano con un segnale di comando positivo, allora quando Q è positivo conduce l'interruttore verde, quando Q è negativo conduce quello rosso, per cui per mezzo periodo passa il segnale con una certa polarità e per l'altro mezzo periodo il segnale con polarità invertita.

In tal modo si realizza proprio la moltiplicazione. A questo punto il discorso è concettualmente concluso. Si tratta semplicemente di passare alla traduzione pratica delle idee. Il problema fondamentale è quello di trovare dei dispositivi che possano funzionare da interruttori nei migliori dei modi.

Da notare come sia cambiato il problema. Prima dovevamo trovare un moltiplicatore perfetto, adesso semplicemente un interruttore perfetto, cosa molto più semplice. Candidati sono i fet , gli switch analogici, i bus switch, ma anche i diodi.

CIRCUITI PRATICI

Nella figura 9 cominciamo a vedere dei circuiti pratici quasi completi. Il circuito A è la traduzione della figura 8. I due segnali in opposizione di fase sono ottenuti con un trasformatore avente un primario e due secondari con lo stesso numero di spire, mentre gli interruttori sono costituiti da switch tipo 74HC4066 o molto meglio FST3125.

IL segnale Q, ovviamente dovrà variare tra i due valori per far aprire o chiudere gli switch (normalmente 5V e 0V)

Nella figura mancano i particolari delle tensioni continue per il funzionamento degli switch per la qual cosa si consiglia di cercare su Radiorivista tutti i circuiti di mixer presentati ottimamente da i7SWX G.Modà nel corso degli ultimi anni.

Giancarlo ha anche illustrato come ottenere i due segnali ad onda quadra Q e -Q per il pilotaggio degli switch ed ha analizzato con maestria tutte le problematiche relative alla loro utilizzazione.

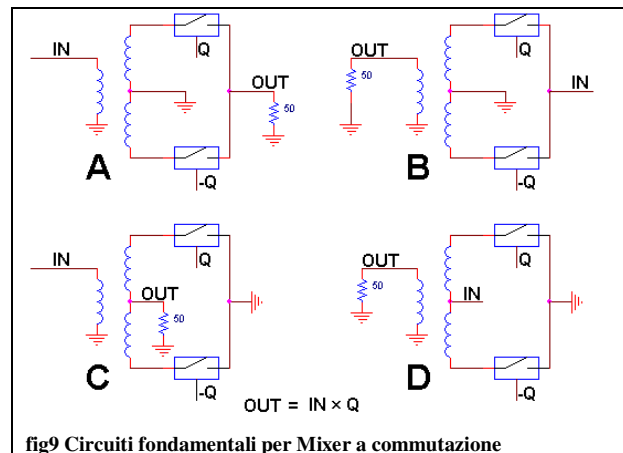


fig.9 Circuiti fondamentali per Mixer a commutazione

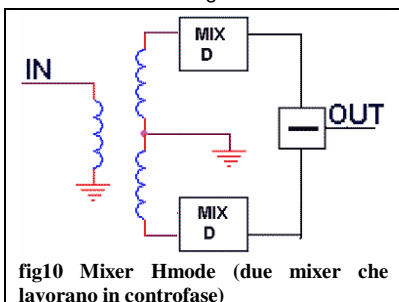
Il circuito A, semplice concettualmente, è perfettamente funzionante sia come mixer sia come rivelatore a prodotto, ma può essere conveniente adoperare le altre varianti illustrate in fig.9.

Il circuito B è ottenuto da A scambiando ingresso e uscita. In questo caso l'inversione di polarità in uscita è ottenuta facendo passare il segnale nell'uno o nell'altro degli avvolgimenti primari.

I circuiti C e D compiono le stesse funzioni di A e B. La loro particolarità è che gli Switch hanno un estremo a massa e ciò è vantaggioso per il loro buon funzionamento.

Nei circuiti A o C l'uscita ha una risposta che parte dalla corrente continua, cosa che non succede negli

atri due, si possono quindi usare come rivelatori a prodotto in un ricevitore. Nei circuiti B e D invece è l'ingresso che parte dalla continua e con essi quindi si possono realizzare ottimi modulatori bilanciati per trasmettitore. Come mixer ordinario si può invece usare uno qualsiasi dei quattro. Il circuito A, ad esempio, viene usato da A. Aquili nel ricevitore apparso in RR di marzo 2004. Negli articoli di Giancarlo Moda si trovano usati anche gli altri.



Esaminiamo anche il mixer Hmode nella descrizione originaria di G3SBI. Per comprenderlo pensiamo al funzionamento di un comune amplificatore in controfase: con un trasformatore si ottengono due segnali opposti, si amplificano e poi si prende la differenza dei due mediante un secondo trasformatore. In questo modo i segnali utili, precedentemente sfasati, si sommano mentre alcune distorsioni vengono eliminate.

Il mixer Hmode può essere considerato come l'insieme di due mixer del tipo precedente, in particolare il tipo **9D**, che lavorano in controfase (fig.10).

Per la sottrazione finale sarebbe sprecato un quarto trasformatore, è sufficiente collegare in parallelo i secondari dei due mixer (tipo D) invertendone uno dei due. Lascio agli esperti la conclusione se si ottengono esattamente i vantaggi della struttura in controfase, ma mi sembra praticamente la stessa cosa.

Nei diversi circuiti esaminati sulle riviste ho notato che anziché sottrarre si è preferito sommare le uscite (senza quindi invertire un secondario), effettuando però l'inversione dei segnali di comando degli interruttori in uno dei due mixer, il che equivale a invertirne l'uscita.

A questo punto i7SVX ha osservato che si poteva effettuare la somma mettendo gli avvolgimenti dei due mixer su uno stesso nucleo, realizzando il tutto con due soli trasformatori anziché tre, e in ciò sta il suo contributo originale oltre al grande merito di aver spinte tante persone a sperimentare, tra cui anche il sottoscritto (ha anche il merito di aver scovato lo FST3125).

Io personalmente ho realizzato un rtx per 40 metri utilizzando l'Hmode come mixer e il circuito 9C come rivelatore a

prodotto. Ho riutilizzato questi due circuiti rispettivamente come modulatore bilanciato e come mixer per il Tx. Per l'oscillatore locale ho usato una frequenza doppia ottenendo i due segnali Q e -Q mediante un divisore per 2. Il tutto non è ancora perfetto, ma i risultati ottenuti non sono inferiori a quelli dei migliori apparati commerciali. In particolare la qualità della modulazione ottenuta con il mixer a commutazione è stata giudicata eccellente anche da corrispondenti molto competenti.

Si potrebbe continuare a lungo a parlare delle proprietà e delle applicazioni di questi mixer, ma a me premeva solo mettere in luce le idee fondamentali, in modo che tanti OM, non solo i più esperti, potessero occuparsi di questi argomenti sia per poter valutare i propri apparati, sia per lavorare su costruzioni proprie. Una volta comprese le idee, la fantasia si può poi sbizzarrire a creare mille soluzioni, una più interessante dell'altra e in ciò consiste la soddisfazione e l'arricchimento intellettuale del radioamatore.

Prima di abbandonare l'argomento poniamoci due domande a cui si può rispondere facilmente.

1) Quale è l'impedenza di ingresso e di uscita di un mixer a commutazione? Osservando uno dei circuiti di fig.9 si può vedere che quando uno degli interruttori è chiuso si ha un trasformatore con rapporto di spire unitario e quindi all'ingresso si vede esattamente la resistenza posta all'uscita e viceversa. Nel nostro disegno perciò l'impedenza di ingresso è semplicemente 50Ω.

2) Quale è l'attenuazione (nel caso ideale)?

Pensiamo di mandare in ingresso un segnale sinusoidale F di ampiezza 1. Dalla figura 5 deduciamo che il prodotto utile è $F \cdot F_1$ (cioè il prodotto di due segnali sinusoidali). F ha ampiezza 1 mentre F_1 ha ampiezza $4/\pi$ come risulta dalla (1) e dalla figura 3. Come scritto nell'articolo precedente, dal prodotto di due segnali sinusoidali di ampiezza A_1 e A_2 si ottengono la frequenza somma e la frequenza differenza con ampiezza $\frac{1}{2} \cdot A_1 \cdot A_2$, nel nostro caso l'ampiezza sarà quindi $\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 4/\pi = 2/\pi = 0.636$. Perciò con un'ampiezza 1 in ingresso si ha l'uscita che a noi interessa di 0.636, un po' più della metà. Con un'ampiezza metà l'attenuazione sarebbe 6db. Quindi l'attenuazione è minore di 6db. Con la calcolatrice si può calcolarla esattamente, si ha:

$$20 \cdot \log(0,636/1) = -3.9\text{db.}$$

Poiché il mixer è passivo l'energia in arrivo si distribuisce (nel caso ideale) fra i diversi segnali in uscita. Se ci fossero unicamente le prime due frequenze la potenza di ciascuna

sarebbe esattamente la metà e quindi l'attenuazione varrebbe 3db. L'energia che se ne va nelle altre frequenze fa perdere solo altri 0.9db.

Essendo l'attenuazione teorica 3.9db, una realizzazione pratica in cui si abbia un'attenuazione di 5db è da considerarsi molto buona e da quanto riferito sembra essere abbastanza facile da ottenere, mentre dai cataloghi dei migliori mixer a diodi non si osservano attenuazioni inferiori a 7 o 8 db!

Il merito maggiore di questi mixer non è però la bassa attenuazione ma piuttosto l'elevata resistenza all'intermodulazione (vedere ancora i lavori di i7SWX). Ciò è dovuto al fatto che il meccanismo degli switch realizza quasi perfettamente l'operazione di moltiplicazione anche per ampiezze piuttosto elevate dei segnali in ingresso.

MIXER con DIODI

Dopo aver compreso il funzionamento dei mixer con gli switch è facile comprendere come lavorano quelli con i diodi, anche se i relativi circuiti sono meno semplici.

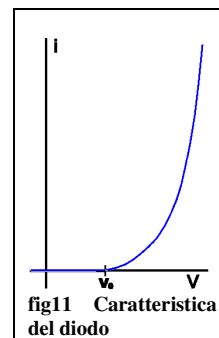
In questi mixer gli interruttori sono realizzati con dei diodi.

Per comprendere come i diodi possano funzionare da interruttori esaminiamo la loro curva caratteristica corrente-tensione (fig.11).

Per tensioni inferiori a V_0 (intorno a mezzo Volt) il diodo praticamente non conduce (interruttore aperto). Per tensioni superiori a V_0 comincia a condurre e la conducibilità aumenta molto rapidamente.

Quindi per tensioni un po' superiori a V_0 il diodo diventa un conduttore (interruttore chiuso). Più la corrente è elevata e più è un buon conduttore.

Possiamo dire che il diodo è



un interruttore comandato in corrente.

Il primo problema per i mixer a diodi è che gli interruttori devono essere comandati con una notevole corrente (gli switch non richiedevano praticamente corrente), e quindi l'oscillatore locale deve fornire una discreta potenza (in termini tecnici da 5 a oltre 25 dbm). Il secondo problema, molto complicato da risolvere, è come far passare questa corrente.

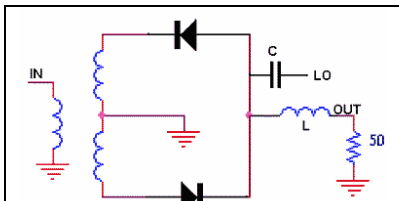


fig.12 Rivelatore a prodotto con due diodi

Ci proponiamo ora di realizzare il circuito 9A con i diodi. Consideriamo prima un esempio imperfetto e poi quello perfezionato.

In figura 12 abbiamo un rivelatore a prodotto con due diodi. Quando LO è positivo conduce il diodo superiore, quando è negativo conduce quello inferiore ed ecco quindi realizzata la funzione dei due interruttori del circuito 9A. L'induttanza L impedisce che il segnale dell'oscillatore locale si sprechi su R e viceversa C non fa andare verso l'oscillatore il segnale di bassa frequenza ottenuto. Questi semplici accorgimenti permettono il passaggio

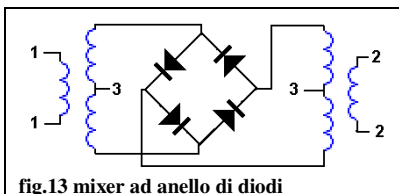


fig.13 mixer ad anello di diodi

dei diversi segnali sugli stessi conduttori. Resta l'inconveniente che la corrente di LO trova difficoltà a passare attraverso l'induttanza del trasformatore e induce anche un segnale verso l'ingresso..

La soluzione ottimale è quella della figura 13: il classico mixer ad anello di diodi.

Esso possiede tre coppie di terminali che possono essere usate indifferentemente per l'ingresso, per l'oscillatore locale o per l'uscita. (la sola coppia 3 ha risposta dalla DC).

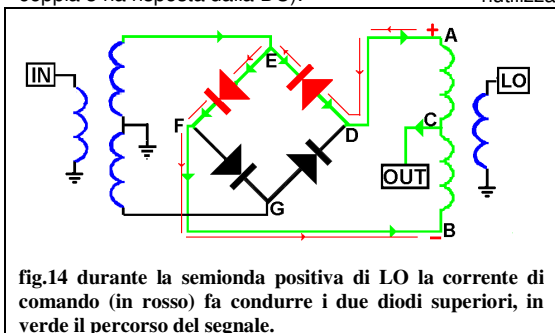


fig.14 durante la semionda positiva di LO la corrente di comando (in rosso) fa condurre i due diodi superiori, in verde il percorso del segnale.

Nella figura 14 è realizzato, anche se non sembra, il circuito 9A. Analizziamone il funzionamento. Ricordando che l'oscillatore locale deve fornire un segnale piuttosto robusto, consideriamo il semiperiodo in cui A è positivo rispetto a B. La corrente generata, (in rosso) farà il percorso ADEFB, rendendo conduttori i due diodi

superiori. In queste condizioni la corrente del segnale (in verde) seguirà due percorsi EDAC e EFBC che si riuniscono all'uscita. I due diodi, considerati in parallelo, costituiscono l'interruttore superiore della figura 9A.

Da notare che in LO non si avrà nessuna tensione indotta in quando le due correnti (uguali e di verso opposto) generano un flusso esattamente nullo e quindi gli avvolgimenti del trasformatore non oppongono alcun ostacolo al passaggio del segnale verso l'uscita, è come se non ci fossero.

Quando la tensione di LO cambia polarità condurranno i due diodi inferiori e la corrente del segnale arriverà in uscita attraverso i due percorsi GDAC e GFBC. Quindi i due interruttori della figura 9A sono costituiti rispettivamente dalla coppia di diodi superiore (in parallelo) e dalla coppia inferiore. Concettualmente il mixer ad anello di diodi e il circuito di figura 9A sono identici, la maggiore complicazione del circuito con i diodi deriva dal fatto che dobbiamo far passare una corrente di comando negli stessi circuiti in cui passa la corrente del segnale, mentre nel mixer con switch il comando viene effettuato comodamente con una tensione su un elettrodo separato.

Chi vuole può utilmente studiare il percorso delle correnti mettendo il segnale d'ingresso sulla coppia 3. In questo caso il segnale può essere anche di bassa frequenza, e si può realizzare un buon modulatore bilanciato.

Se si volesse ottenere con i diodi qualcosa di simile all'Hmode, basterebbe usare due mixer in controfase ispirandosi alla figura 10. E' proprio ciò che ha fatto, se ho ben interpretato, Pietro Iellici (I2BUM) nel suo ottimo ricetrans per 40 m. a conversione diretta apparso sul n.11 2001 di Radiorivista. Anche lui ha riutilizzato tale circuito come modulatore bilanciato in trasmissione ottenendo, naturalmente, una soppressione della portante molto buona.

Da quanto esposto sopra appare evidente che l'oscillatore locale dovrebbe essere un oscillatore ad onda quadra. In pratica si usa sempre un oscillatore sinusoidale, anche perché realizzare un buon oscillatore ad onda quadra di una certa potenza sarebbe

problematico ed i risultati non cambierebbero molto.

I mixer con i diodi non sono da buttare via completamente dal momento che sono arrivati quelli con gli switch, essi restano pur sempre validi e sono più semplici da realizzare a parte la non lieve difficoltà della potenza elevata dell'oscillatore. Lascio ad ognuno la

valutazione sul pro e contro.

Non sarebbe male che venissero fuori in radio discussioni su questo argomento che sostituissero le eterne disquisizioni.... sui microfoni!!

A questo punto credo proprio che sia giunto il momento di mettere la parola fine perché ho l'impressione di aver messo troppa carne al fuoco.

Sintesi finale

1)La moltiplicazione fra il segnale d'ingresso e un altro segnale sinusoidale (oscillatore locale) è il modello di un mixer perfetto che dà in uscita la somma e la differenza fra le due frequenze.

2)La moltiplicazione fra il segnale d'ingresso e un segnale ad onda quadra di ampiezza 1 è il modello di un mixer non perfetto, poiché oltre alla somma e alla differenza da anche altre frequenze.

3)Il primo modello è di difficile realizzazione mentre il secondo si può realizzare con elevata perfezione mediante interruttori ottenuti con l'uso di diodi o, meglio ancora, di switch.

4)C'è spazio infinito per la sperimentazione.

Sono gradite le critiche perché altrimenti potrebbe significare che nessuno abbia sopportato fino in fondo la lettura di questo articolo! (www.biagio.matassa@tin.it)