

Domenico Marini • I8CVS

E-mail: domenico.i8cvs@tin.it

Misura dei prodotti di intermodulazione nei trasmettitori

Premessa

La distorsione da intermodulazione o Intermodulation Distortion (IMD) è una distorsione che avviene in un amplificatore quando l'ampiezza del segnale di uscita non è esattamente proporzionale a quella del segnale di ingresso per cui ad esempio su una emissione SSB all'uscita di un amplificatore lineare RF le frequenze di 700 Hz potrebbero avere ampiezza maggiore di quelle a 1900 Hz o viceversa rispetto alle stesse frequenze di ingresso generando così distorsione.

Sebbene gli amplificatori siano progettati per essere circa perfettamente lineari entro una porzione della loro banda operativa ogni amplificatore lineare è affetto da non linearità che genera prodotti di distorsione o armoniche rispetto a quelle delle forme d'onda che lo pilotano e quindi sono affetti da una certa percentuale di distorsione.

Distorsione dovuta a intermodulazione

Per misurare ad esempio la IMD totale di un transceiver che pilota un amplificatore lineare bisogna fare un test di linearità con due toni audio f_1 a 700 Hz ed f_2 a 1900 Hz il cui spettro relativo è riportato in Fig. 1.

All'ingresso microfonico del transceiver vengono applicati due segnali di bassa frequenza f_1 ed f_2 di pari ampiezza e spazati di poche centinaia di Hz come sono presenti entro la banda passante di un filtro SSB largo 3 kHz e usando un analizzatore di spettro all'uscita RF dell'amplificatore lineare si misurano in termini relativi i prodotti di intermodulazione dispari i più importanti dei quali sono quelli di terzo, quinto e settimo ordine rispettivamente d3, d5 e d7 come mostrato in Fig. 1.

In SSB si considerano solo i prodotti IMD dispari perché questi ricadono adiacenti al segnale utile e quindi non possono essere rimossi, mentre quelli pari che sono spazati in relazione armonica di f_1 e f_2 possono essere facilmente attenuati dai filtri RF interstadio del transceiver e da quelli di uscita del PA e quindi non hanno un effetto devastante sulla larghezza del canale occupato e relativa qualità di modulazione.

Nelle misure a due toni f_1 e f_2 si specifica il livello di intermodulazione IMD come scarto in dB tra il prodotto indesiderato ed uno dei due toni e come esempio si considera IMD e quindi prodotto indesiderato del terzo ordine, il segnale a frequenza $2f_1-f_2$ oppure il segnale $2f_2-f_1$ come mostrato in Fig. 1 e ciò perché lo scarto in dB

prende in considerazione due grandezze omogenee che, nel caso specifico sono due vettori con pulsazione relativa alle frequenze sopra indicate.

I termini relativi non cambiano se anziché un singolo tono si considerano entrambi i toni applicati all'amplificatore perché in questo caso il segnale utile risulta 3 dB più alto e cioè di potenza doppia e corrisponde al valore medio della potenza che facendo la misura di IMD leggeremmo su un wattmetro connesso all'uscita RF dell'amplificatore e quindi per mantenere omogeneità nei termini di confronto si devono considerare entrambi i prodotti di terzo ordine e per ciò 3 dB in più anche per questi altri e quindi in tutto 6 dB arrivando al PEP come mostra Fig. 1.

In Fig. 1 è riportato anche il valore PEP (Peak Envelope Power) che è il valore istantaneo di ampiezza relativo al battimento tra i segnali utili f_1 e f_2 e questo valore si realizza quando i due vettori si sommano in fase e ciò avviene alla frequenza di battimento f_2 con f_1 che nel caso di test SSB è una frequenza audio e con la stessa frequenza di battimento abbiamo anche i valori istantanei in cui l'uscita dell'amplificatore è nulla.

Per visualizzare facilmente cosa avviene quando i segnali f_1 e f_2

battano fra loro supponiamo di avere due oscillatori di BF con segnali sinusoidali di pari ampiezza uno f_1 a 700 Hz e l'altro f_2 a 1900 Hz.

Se li applichiamo uno alla volta all'ingresso verticale Y di un oscilloscopio vedremo il segnale a 700 Hz come in Foto 1 e quello a 1900 Hz come in Foto 2, ossia li vedremo a frequenza diversa ma di uguale ampiezza, mentre se li sommiamo e applichiamo insieme sullo stesso canale Y i segnali f_1 ed f_2 batteranno fra loro e ci saranno degli

istanti in cui questi sono in fase e si vedranno con ampiezza doppia cosicché a tensione doppia sullo stesso carico la potenza aumenta di 4 volte o 6 dB arrivando al PEP e altri istanti in cui questi segnali sono in opposizione di fase a 180° per cui la loro ampiezza sarà zero come si vede in Foto 3.

Set-up per la misura di intermodulazione a due toni

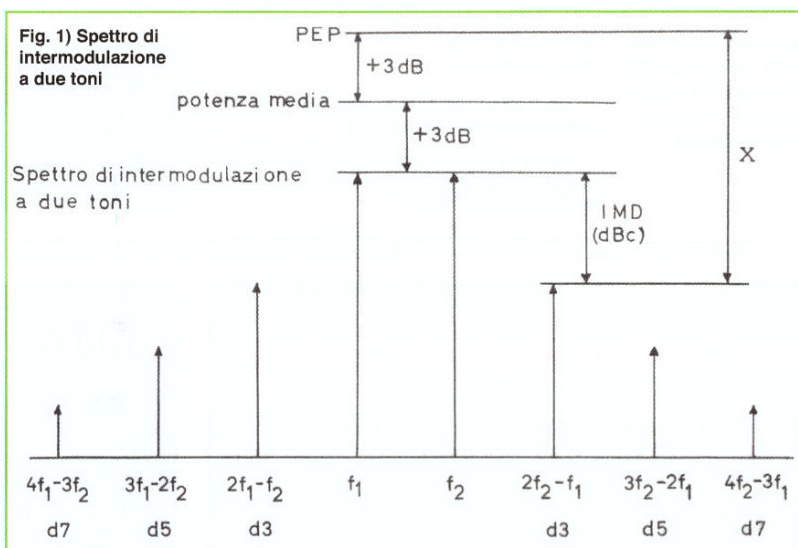
Lo schema a blocchi del Set-Up in Fig. 2 consiste in un doppio oscillatore di bassa frequenza f_1 ed f_2 più un sommatore f_1+f_2 per cui alla sua uscita potremmo commutare a scelta le due frequenze f_1 o f_2 oppure il battimento fra f_1+f_2 .

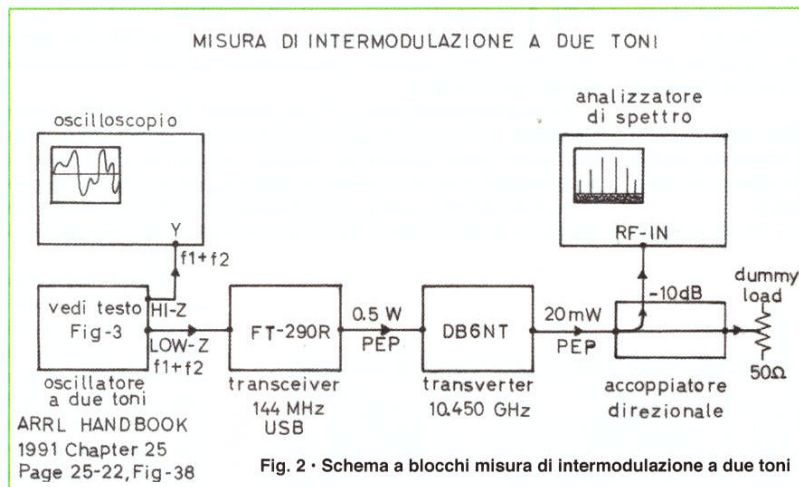
Questo oscillatore autocostruito di cui si riporta lo schema elettrico in Fig. 3 è pubblicato sul volume "The ARRL HANDBOOK" 1991 chapter 25-21.

I due segnali di uscita vengono applicati all'ingresso microfonico di un transceiver che può essere seguito da un eventuale amplificatore lineare e quindi si può misurare la loro IMD complessiva.

L'uscita RF del transceiver o quella dell'amplificatore lineare è inviata ad un accoppiatore direzionale con disaccoppiamento di circa 30 dB e chiuso in uscita su un carico fittizio da 50 Ω di potenza adeguata.

In funzione della potenza dell'amplificatore lineare l'accoppiatore





direzionale può avere un disaccoppiamento di 30 dB oppure 20 dB o anche 10 dB se la potenza da misurare è molto bassa.

L'uscita disaccoppiata della potenza diretta viene quindi inviata ad un analizzatore di spettro che nel mio caso è un HP141T con cassetto RF HP8555A.

Le due frequenze f_1 e f_2 all'uscita oscillatore vengono inviate anche ad un oscilloscopio PHILIPS modello PM3217 per monitorare costantemente la forma d'onda sinusoidale a 700 Hz e 1900 Hz nonché il battimento fra le due come si vede rispettivamente in Foto 1 Foto 2 e Foto 3.

Le misure di IMD che saranno descritte sono state effettuate su un transverter DB6NT autocostituito e modificato per banda traffico via satellite da 10.450 a 10.452 GHz con potenza nominale PEP di 20 mW (+13 dBm) e pilotato dai 144 MHz con un transceiver YAESU FT-290R con potenza di uscita 0.5 watt PEP.

Circuito elettrico oscillatore audio a due toni

Lo schema elettrico dell'oscillatore è riportato in Fig. 3 e le frequenze generate sono 700 Hz e 1900 Hz che cadono entrambe entro la banda passante di 3 kHz di un comune filtro per SSB.

Tutti gli amplificatori operazionali U1, U2, U3, sono Dual JFET LF353N oppure TL082 questi ultimi reperibili presso la RS.

Ciascuno dei due toni è generato da un ponte di Wein mediante gli amplificatori operazionali U1B e U2B.

Gli oscillatori sono seguiti dai filtri RC attivi passabasso U1A e U2A e siccome questi filtri richiedono valori non standard di capacità il PCB di Fig. 4 e Fig. 5 è stato predisposto per ospitare due condensatori in parallelo in modo da ottenere la giusta combinazione di capacità richiesta in fase di taratura e tutti i condensatori degli oscillatori e dei filtri devono essere del tipo con dielettrico Polystyrene o Mylar con passo 5 mm.

Per rendere gli oscillatori molto stabili è meglio non usare resistori a grafite spiralizzata o quelli a carbone ma preferibilmente quelli da 1/4 watt a strato metallico tolleranza 5% reperibili alla ESCO in Bibliografia (3) come assortimento di 850 pezzi, 10 per valore alla rinfusa col numero di catalogo 306400 oppure in confezioni nastrate 1/4 watt da 100 pezzi per valore indicando il valore resistivo prescelto e al costo di Euro 1,06 ogni 100 pezzi.

I due toni a 700 Hz e 1900 Hz sono sommati nell'operazionale U3A che ha nel loop di entrata/uscita il potenziometro a 10 giri R4 LEVEL montato sul pannello frontale che serve a regolare simultaneamente il livello di uscita dei due toni A e B.

Le due lampadine DS1 e DS2 montate fra i piedini 6 e massa degli operazionali U1B e U2B sono da 28 volt 40 mA tipo 327-GE oppure da 12 volt 25 mA e servono a stabilizzare le due frequenze generate. Queste lampadine

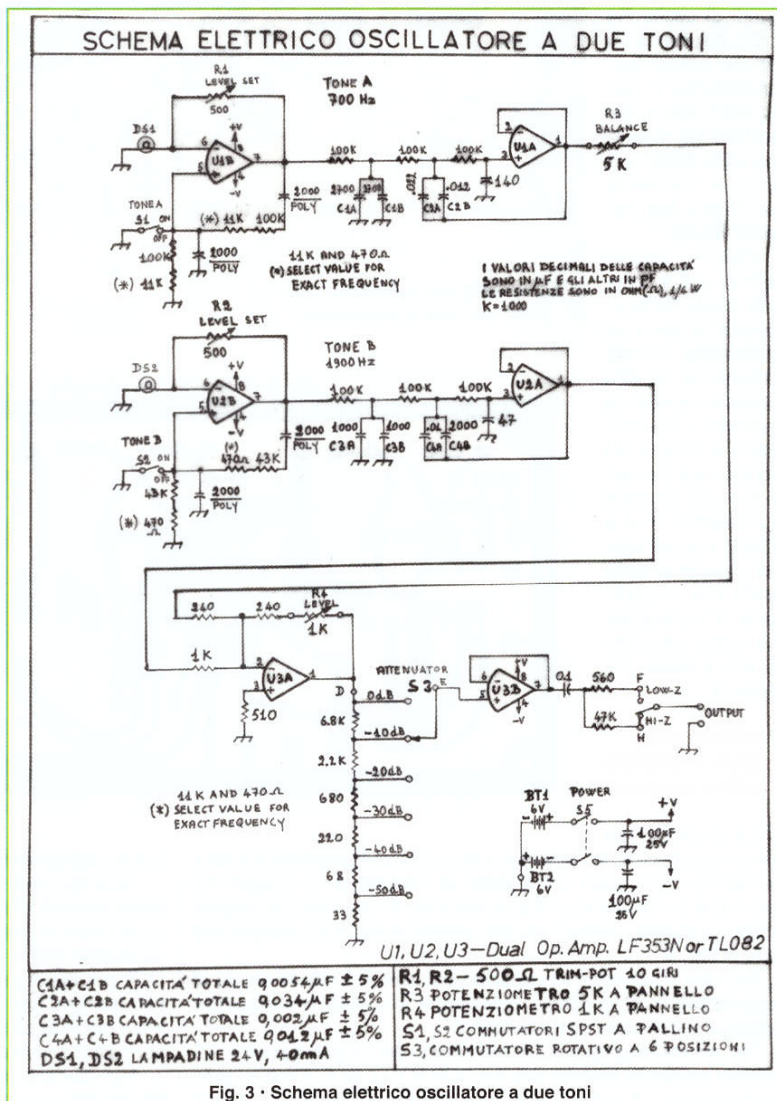


Fig. 3 - Schema elettrico oscillatore a due toni

sono di uso nelle spie di apparati militari e se non disponibili si possono usare quelle a pisello a 24 volt per gli alberi di Natale.

Il potenziometro a 10 giri R3 BALANCE montato sul pannello frontale serve a regolare il livello del Tono A da 700 Hz senza influenzare il livello del Tono B da 1900 Hz.

All'uscita dell'amplificatore somma U3A c'è un attenuatore resistivo a gradini con passi di 10 dB ciascuno e il suo commutatore rotativo ATTENUATOR S3 è montato con la manopola di comando sul pannello frontale dello strumento come si vede in **Foto 5**.

I potenziometri multigiri R3 BALANCE e R4 LEVEL montati sul pannello frontale sono dotati di manopola contagiri Spectrol modello 16-1-11 con diametro esterno 22 mm e 15 giri con risoluzione centesimale e foro 1/4 di pollice catalogo ESCO 1010300.

L'uso dei due comandi di uscita R4 e S3 permette di variare contemporaneamente e con facilità l'uscita dei due toni A e B entro una vasta gamma di valori e finemente sul valore del segnale voluto.

L'ultimo operazionale U3B è collegato come "Voltage Follower" e serve ad amplificare l'uscita fornendola ad alta o bassa impedenza mediante il commutatore a levetta S4 montato sul pannello frontale insieme ai connettori HI-Z e LOW-Z e questi valori di impedenza sono adatti alla maggior parte di transceiver che usano microfoni ad alta e bassa impedenza.

Costruzione e taratura oscillatore audio a due toni

La disposizione dei componenti e il loro cablaggio non è critica e trattandosi di bassa frequenza si può usare una basetta di vetronite G-10 millefori ma coloro che preferiscono il PCB di vetronite G-10 ramata su singola faccia troveranno i disegni lato componenti in **Fig. 4** e il disegno lato piste in **Fig. 5**.

Siccome l'oscillatore viene usato sul banco di misura vicino al trasmettitore in prova questo deve essere alloggiato in una scatola metallica schermante come in **Foto 5**.

Per evitare l'ingresso di RF nell'interno del circuito questo è alimentato mediante batterie tipo AA DURACELL da 1.5 volt in serie che forniscono +6 volt e -6 volt come si vede nello schema elettrico

di **Fig. 3** ma usando un buon contenitore metallico per tutto lo strumento con una buona schermatura e un buon filtraggio della rete a 220 volt AC si può usare anche un alimentatore duale entrocontenuto al posto delle batterie.

La taratura dell'oscillatore A per ottenere 700 Hz esatti va fatta collegando un frequenzimetro all'uscita HI-Z oppure LOW-Z dello strumento e selezionando per tentativi il valore dei due resistori a strato metallico da 11 k nominali collegati al piedino 5 di U1B mentre il valore di 1900 Hz esatti va trovato selezionando per tentativi i due resistori a strato metallico da 470 Ω nominali collegati al piedino 5 di U2B.

Questi resistori a strato metallico hanno una tolleranza del 5% che permette di selezionare fra più resistori disponibili quelli di valore giusto per ottenere le due frequenze esatte di 700 Hz e 1900 Hz in quanto più il valore ohmico aumenta e più la frequenza si abbassa e viceversa.

In **Fig. 3** questi resistori sono contrassegnati da un asterisco (*) e non devono essere sostituiti con trimmer potenziometrici che non sono stabili nel tempo.

I due trimmer potenziometrici di feedback a 10 giri R1 e R2 da 500 Ω vanno tarati in modo che l'uscita di ciascun oscillatore misurata ai piedini 7 di U1B e U2B sia circa 0.5 volt di valore efficace AC e per questa misura si può usare un comune voltmetro analogico del tipo tester ICE 680R settato a 2 volt AC fondo scala ma in ogni caso i due potenziometri di feedback R1 e R2 vanno regolati al minimo livello di contoreazione in modo che gli oscillatori inneschino facilmente e si stabi-

lizzano rapidamente.

Quando i due oscillatori vengono alimentati questi impiegano alcuni secondi affinché la loro ampiezza e frequenza divenga stabile e ciò è dovuto alla bassissima corrente che scorre nelle due micro-lampadine DS1 e DS2 connesse nel circuito di feedback di U1B e U2B che riscaldandosi fanno aumentare la resistenza ohmica dei loro filamenti che varia in un range molto ampio da 63 Ω a freddo e temperatura ambiente fino a 480 Ω con 25 mA a caldo ma ciò è normale e non causa pregiudizi.

Per ottenere una buona forma d'onda sinusoidale la taratura dei filtri RC attivi passabasso U1A e U2A va fatta collegando l'uscita LOW-

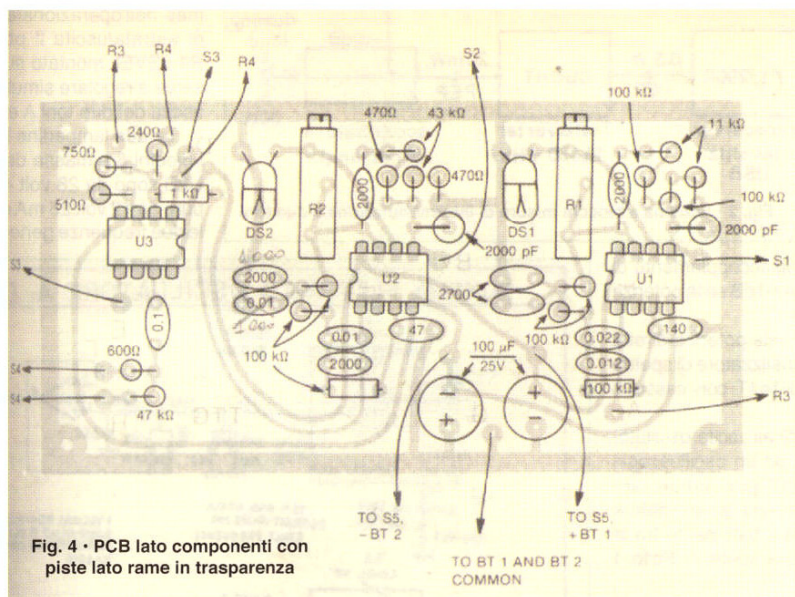


Fig. 4 - PCB lato componenti con piste lato rame in trasparenza

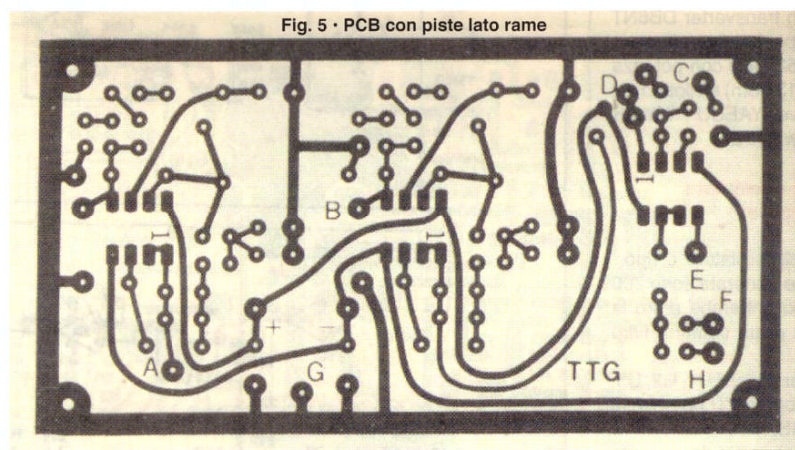
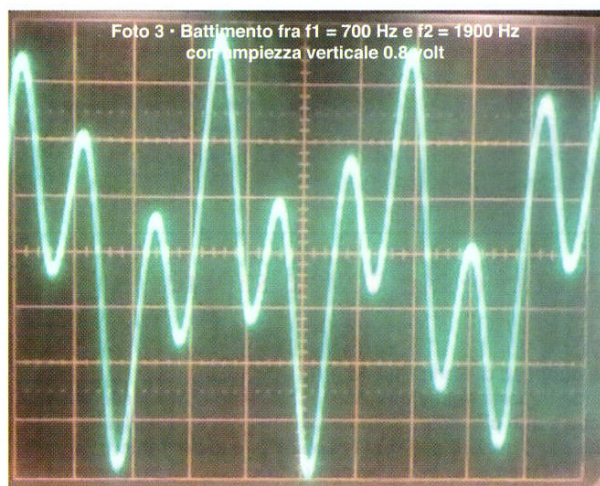
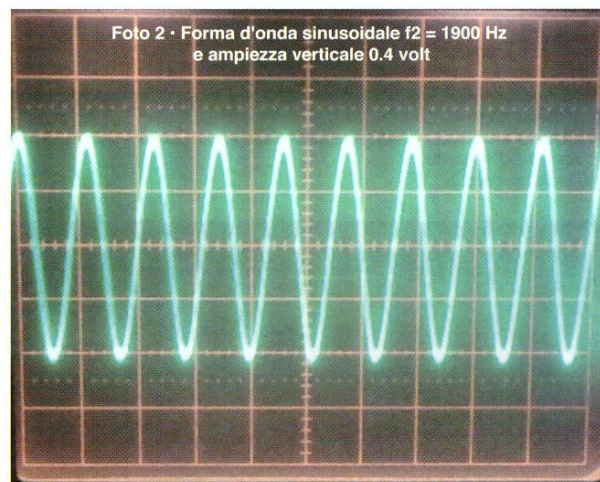
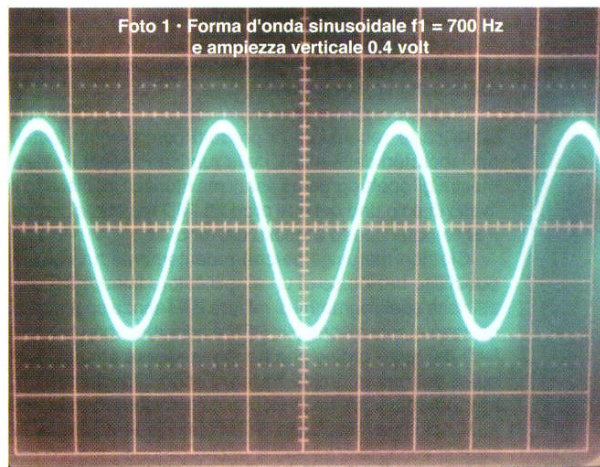


Fig. 5 - PCB con piste lato rame

Teoria



Z o HI-Z a un oscilloscopio dopodiché per l'oscillatore del tono A a 700 Hz bisogna trovare la combinazione parallelo dei condensatori C1A e C1B più quelli C2A e C2B fino a ottenere una forma d'onda come in **Foto 1** e ciò richiede un congruo numero di condensatori da 2700 pF, 22000 pF e 12000 pF da provare e che con le loro tolleranze del 5% permetteranno di ottenere a forza di tentativi la giusta combinazione

parallelo per ottenere la forma d'onda sinusoidale.

Nel mio oscillatore misurando col capacimetro ho visto che il parallelo C1A+C1B è contenuto fra 5130 pF e 5670 pF mentre per C2A+C2B il parallelo è contenuto fra 32300 pF e 35700 pF.

Per ottenere una buona forma d'onda sinusoidale la stessa procedura vale per l'oscillatore del tono B a 1900 Hz lavorando sul parallelo dei condensatori C3A e C3B più quelli del parallelo C4A e C4B per i quali occorre un congruo assortimento di valori da 1000 pF, 2000 pF e 10000 pF e per ottenere una buona forma sinusoidale come in **Foto 2** almeno nel mio strumento il parallelo C3A+C3B deve variare nel range da 1900 pF a 2100 pF mentre per C4A + C4B il parallelo deve essere contenuto fra 11400 pF e 12600 pF.

Il collegamento fra lo strumento e l'ingresso microfonico del transceiver deve essere fatto con un buon cavetto schermato e per questo motivo sull'uscita LOW-Z ho collegato uno spezzone di cavo coassiale RG58/U munito all'altro estremo di connettore per il microfono mentre sull'uscita HI-Z ho collegato uno spezzone di cavo RG-8/U munito all'altro estremo di un connettore BNC maschio in modo da poterlo collegare facilmente all'ingresso Y dell'oscilloscopio per controllare anche la forma d'onda sinusoidale dei due oscillatori a 700 Hz e 1900 Hz la cui distorsione è bassissima ed inferiore ad 1%.

Esecuzione della misura di IMD sul transverter DB6NT per 10.450 GHz (Fig. 2)

Per vedere i due segnali f_1 e f_2 separati di $1900-700 = 1200$ Hz bisogna settare l'analizzatore di spettro ad elevata selettività e nel caso dello HP8555A impostare i seguenti valori:

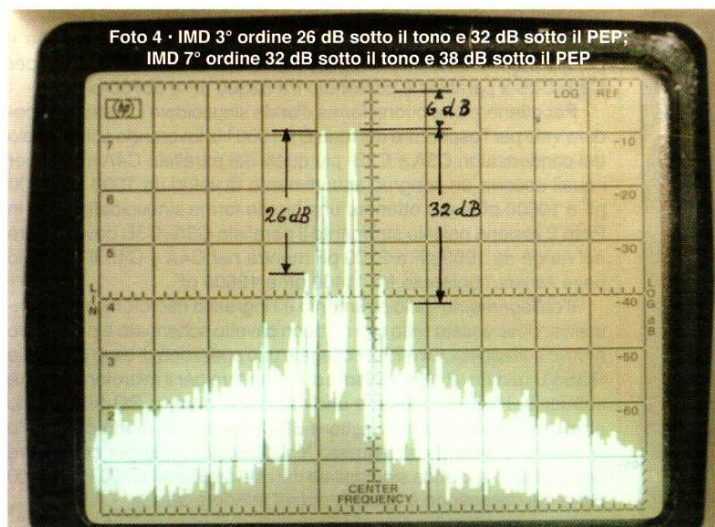
BAND WIDTH = 0.1 kHz
SCAN WIDTH = 2 kHz/Div
VIDEO FILTER = 100 Hz
SCAN TIME/DIV = 1 sec.
VERTICAL = 10 dB/Div

Siccome il mixer di ingresso dell'analizzatore di spettro HP8555A accetta un massimo di +10 dBm regolare inizialmente il suo INPUT ATTENUATOR su 30 dB posizione questa che accetta senza danni fino a 100 mW e usare un accoppiatore direzionale che lavora fino a 10 GHz con disaccoppiamento di 10 dB come ad esempio il NARDA modello 3004-10.

Tuttavia data la bassa potenza di uscita 20 mW del transverter DB6NT questo lo si può collegare direttamente al connettore RF INPUT dell'analizzatore di spettro interponendo per precauzione un attenuatore fisso esterno da 10 dB adatto fino ai 12 GHz.

Operazioni da seguire

- 1) Commutare su LOW = 0.5 watt la potenza di uscita a 144 MHz del transceiver pilota FT-290R e metterlo in Modo USB.
- 2) Commutare il BAND selector dell'analizzatore di spettro HP8555A sulla banda 8.23-14.35 GHz e col FINE TUNE sintonizzarsi su 10.450 GHz; Commutare INPUT ATTENUATOR su 30 dB.
- 3) Accendere l'oscillatore a due toni e commutare a -10 dB il suo attenuatore dopodiché mettere ON solo il tono a 1900 Hz e sintonizzare l'analizzatore di spettro per vederlo apparire sotto forma di un segnale RF a 10.450 GHz.
- 4) Regolare il potenziometro LEVEL dell'oscillatore a due toni e il commutatore INPUT ATTENUATOR dell'analizzatore di spettro fino a portare il livello di questo segnale in alto sul reticolo al LOG REF che rappresenta il livello della potenza PEP del transverter.
- 5) Mettere OFF il tono a 1900 Hz e mettere ON il tono a 700 Hz e regolare il comando BALANCE dell'oscillatore a due toni fino a raggiungere sul reticolo dell'analizzatore di spettro lo stesso livello di segnale al LOG REF.
- 6) Mettere ON entrambi i toni a 700 Hz e 1900 Hz e sul monitor



farlo apparire migliore ma si confronta erroneamente un valore istantaneo con un valore efficace per cui in realtà i 32 dB rispetto al PEP del transverter DB6NT sono in realtà soltanto 26 dB veri.

Purtroppo anche una rivista seria come QST che pubblica le recensioni di prodotti commerciali testati nei laboratori della ARRL nella rubrica Product Review mostra gli spettrogrammi esatti ma riferisce per iscritto il livello di solo uno dei due prodotti IMD rispetto al valore PEP e non rispetto a quello del tono.

Ciò non meraviglia perché recentemente ho visto la pubblicità nazionale di un amplificatore lineare HF che esibisce spettrogrammi di misure IMD senza specificare se sono riferite al tono o al PEP e addirittura con prodotti IMD del terzo ordine che hanno la stessa ampiezza di quelli del quinto ordine nascondendo consciamente o involontariamente tra le pieghe delle misure i "buchi" dei quali solo una minoranza di OM tecnicamente preparati oggi si accorge e questo è anche un buon motivo per imparare a farsi le misure da soli in casa propria.

Bibliografia

- 1) The ARRL HANDBOOK 1991 chapter 25-21 e Printed-Circuit Board Etching Patterns page 5.
- 2) Linearità a due toni e fantasie..... di Gianfranco Sabbadini I2SG Radio Rivista 2/97 pag. 68.
- 3) <http://www.esco.it/>

dell'analizzatore di spettro appariranno i due segnali RF a 10.450 GHz separati di 1200 Hz più i prodotti di intermodulazione IMD come si vede in Foto 4.

- 7) Con il comando LEVEL dell'oscillatore a due toni e partendo dal LOG REF abbassare il livello dei due segnali di 6 dB letti sul reticolo verticale dell'analizzatore di spettro in modo da mettersi 6 dB sotto il PEP.
- 8) La Foto 4 mostra che i prodotti di intermodulazione del terzo ordine hanno una IMD di 26 dB rispetto al tono e di $26+6=32$ dB rispetto al PEP mentre quelli di quinto ordine hanno una IMD di 32 dB rispetto al tono e di $32+6=38$ dB rispetto al PEP.

Conclusione

Una IMD del terzo ordine di 26 dB in tensione rispetto al tono rappresenta un livello di distorsione di $10^{-(26/20)} = 20$ e $1/20 = 0.05$ ossia circa il 5% e quindi udibile a un orecchio abbastanza raffinato per cui il transverter DB6NT da me autocostruito e che si trascina dietro anche l'intermodulazione del pilota FT-290R ha una linearità discreta e non eccezionale e tuttavia, dignitosa.

Purtroppo oggi giorno è prassi normale da parte dei costruttori commerciali o non definire la IMD del terzo ordine che è la più importante o talvolta specificarla in modo ingannevole riferendo il livello di solo uno dei due prodotti IMD rispetto al valore PEP.

In questo secondo caso si gonfia il valore di IMD di 6 dB per



Mi piace!

Vi è piaciuto questo articolo?
Se Si potete votarlo on-line visitando il
nostro sito www.ari.it

Duplicati RadioRivista, tutto quello che dovete sapere

Arrivano in Segreteria Generale un gran numero di richieste di duplicati di RadioRivista.

Il problema sembrerebbe essere in parte di natura fisiologica, ma in parte anche dovuto a consistenti ritardi nello smistamento delle riviste in taluni compartimenti postali. Vi ricordiamo che come più volte comunicato con altre Circolari, l'invio dei duplicati di RadioRivista, viene effettuato in abbonamento postale, per il quale è prevista la spedizione di un numero minimo di copie. Tale spedizione viene eseguita, per ragioni economiche, nel momento in cui è raggiunto un numero sufficiente di richieste, di norma una sola volta al mese.

Rassicuriamo i Soci che le loro richieste non vengono assolutamente trascurate, ma raggruppate e, successivamente, evase tutte assieme. Vi invitiamo, quindi, a non presentare richiesta di duplicato prima dell'inizio del mese successivo; qualora i mancati recapiti e/o ritardi dovessero ripetersi con frequenza, si suggerisce di presentare un reclamo all'Ufficio Postale locale, utilizzando l'apposita modulistica e facendone pervenire copia alla Segreteria Generale.