

*Analisi della linearità dell'amplificatore RF-UHF
PRFA300U/B basato su tecnologia LDMOS e
caratterizzazione dei livelli di intermodulazione con
sistema televisivo analogico terrestre.*

(di Carlo Mozetic)

SOMMARIO

1. Introduzione.....	3
1.1. Argomento.....	3
1.2. Abbreviazioni.....	3
2. Analisi del dispositivo.....	3
2.1. Polarizzazione.....	4
2.2. Stadio di ingresso.....	4
2.3. Stadio di uscita.....	5
2.4. Reti di adattamento.....	5
3. Analisi della linearità.....	5
3.1. Ambiente di simulazione.....	6
3.2. Intermodulazione di ordine superiore al secondo.....	8
3.3. Intermodulazione in banda.....	8
3.4. Metodi per aumentare la linearità e loro efficacia.....	9
3.5. Precorrezione.....	10
4. Conclusioni.....	11

1. Introduzione

Il modulo amplificatore PRFA300U/B è nato con il nobile scopo di sostenere la fase di migrazione fra il sistema televisivo analogico tradizionale e quello digitale terrestre (DVB-T), per il quale è previsto un considerevole incremento di linearità degli attuali sistemi di diffusione del segnale televisivo a discapito di una drastica riduzione dell'efficienza. A questo proposito alcune fonderie di semiconduttori stanno perfezionando le attuali tecnologie allo stato solido (LDMOS) orientando i loro prodotti verso le nuove piattaforme digitali. Tuttavia, spesso accade che tali perfezionamenti non siano del tutto compatibili con i sistemi di diffusione tradizionale. L'analisi di tali compatibilità costituisce l'argomento principale della presente trattazione.

1.1. Argomento

In questo documento verrà analizzata l'intermodulazione, ovvero uno dei parametri qualitativi che generalmente identifica la linearità di un generico amplificatore, e vedremo come tale fenomeno possa manifestarsi sotto forme profondamente diverse in funzione della distribuzione spettrale dei segnali in transito. In particolare verrà analizzato il fenomeno dell'intermodulazione "in banda" causato dalla presenza della sottoportante di cromaticità in una trasmissione televisiva analogica (PAL) utilizzando strutture e semiconduttori studiati per la diffusione televisiva digitale terrestre.

1.2. Abbreviazioni

8VSB	8-level Vestigial Side Band
ACPR	Adjacent Channel Power Ratio
BALUN	Balance Unbalance transformer
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
CDP	Code Domain Power
C-OFDM	Coded - Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DVB-T	Digital Video Broadcast – Terrestrial
EVM	Error Vector Magnitude
IF	Intermediate Frequency
IM3	3rd order Intermodulation
LDMOS	Lateral Diffused Metal Oxide Semiconductor
MER	Magnitude Error Ratio
PAL	Phase Alternation Line
PCB	Printed Circuit Board
PBA	Printed Board Assembly
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SWR	Standing Waves Ratio
UHF	Ultra High Frequency

2. Analisi del dispositivo

Il modulo amplificatore PRFA300U/B è realizzato su un unico substrato di materiale isolante incollato su un carrier termicamente conduttivo avente uno spessore di 4mm. Su tale substrato trovano posto due componenti LDMOS Motorola MRF377 , ciascuno con le proprie reti di

adattamento di ingresso e di uscita, uno stadio di ripartizione di ingresso a doppia fase differenziale, uno stadio combiner di uscita complementare al ripartitore in ingresso e un circuito di polarizzazione dei due LDMOS. Nella fig.1 è rappresentato uno dei modelli prototipali per la simulazione mentre la fig.2 illustra il piano di montaggio dell'attuale modulo equipaggiato (PBA). Ciascun componente LDMOS contiene due identici semiconduttori di elevata potenza montati in configurazione differenziale all'interno di un unico package ceramico (375G-04) che ne accomuna i collegamenti di source e, di conseguenza, anche la superficie di dissipazione termica.

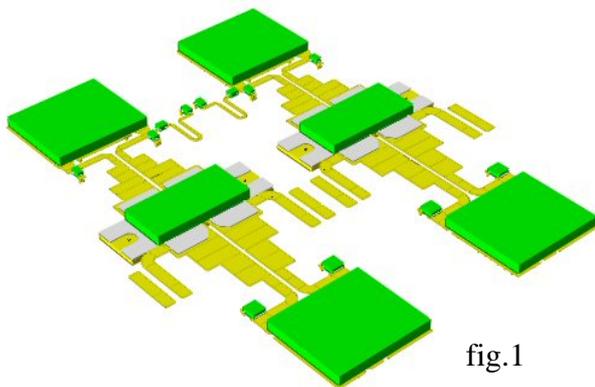


fig.1

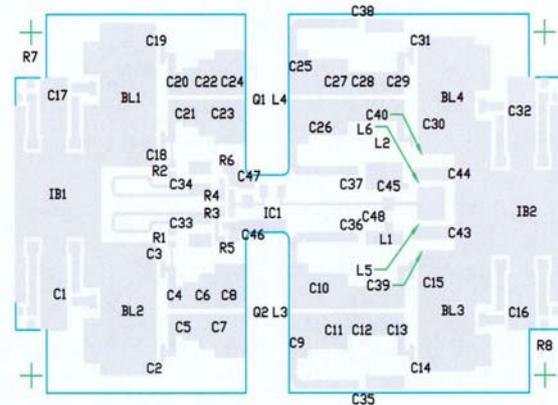


fig.2

2.1. Polarizzazione

Il circuito di polarizzazione comprende una rete di filtro per gli stadi di uscita, una per gli stadi di ingresso, uno stabilizzatore lineare (IC1) e due trimmer resistivi multigiri per la regolazione indipendente del bias di ogni componente LDMOS. L'iniezione delle tensioni di polarizzazioni dei due gate interni avviene attraverso i resistori R1 ed R2 mentre la continuità galvanica dei due balun trasferisce tale polarizzazione anche ai due gates esterni. Sulla rete di adattamento di uscita sono presenti quattro stub di alimentazione; i due interni vengono utilizzati per polarizzare i drain dei due componenti, mentre quelli esterni sono stati lasciati liberi, essi servono solo per ridurre lo sbilanciamento dei carichi in uscita. La polarizzazione dei due drain esterni avviene per mezzo delle due induttanze avvolte in aria L3 ed L4 che realizzano un ponte fra i due drain dei due componenti.

Per mantenere una elevata affidabilità dell'amplificatore per il momento si è deciso di non implementare la compensazione del bias in temperatura. Infatti, si è potuto constatare che utilizzando un adeguato sistema di dissipazione termica la temperatura si stabilizza intorno ai 48°C circa ($T_{amb} = 22^{\circ}\text{C}$) dopo pochi minuti di funzionamento mantenendo un rendimento più che accettabile dell'intero amplificatore, tipicamente stimato intorno al 36-37% alla massima potenza in uscita per una trasmissione televisiva analogica. Inoltre, è stato verificato che durante il ciclo termico di accensione la linearità dei componenti LDMOS utilizzati non subisce alterazioni significative da rendere indispensabile un tracking della compensazione di linearità (precorrezione).

2.2. Stadio di ingresso

Lo stadio di ingresso è costituito da un ripartitore di potenza a banda larga a doppia fase differenziale (4 fasi) il cui andamento è rappresentato nelle fig.2 e 3. L'accoppiatore ibrido IB1 viene utilizzato per dividere in due fasi ortogonali il segnale in ingresso; in seguito, i due balun BL1 e BL2 suddividono ulteriormente i segnali così ottenuti in due coppie di segnali a fasi differenziali

che vengono utilizzate per pilotare i due componenti LDMOS attraverso due distinte reti di adattamento.

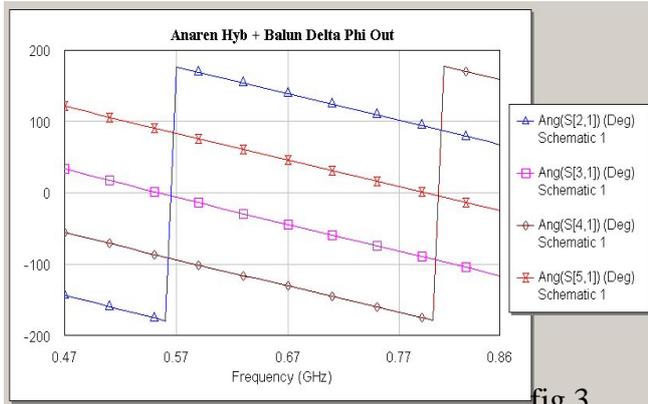


fig.3

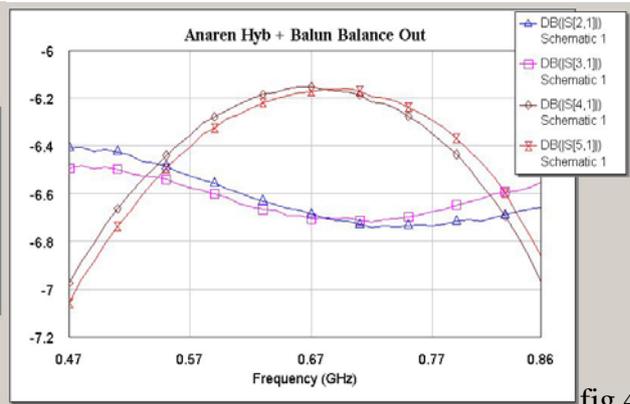


fig.4

2.3. Stadio di uscita

Analogamente allo stadio di ingresso, anche lo stadio di uscita è stato realizzato con una coppia di balun nonché un accoppiatore ibrido (vedi IB2). La configurazione utilizzata per combinare le uscite dei due componenti LDMOS è quella classica a doppia fase differenziale. La separazione galvanica della tensione di alimentazione viene garantita dai due condensatori C16 e C32.

2.4. Reti di adattamento

Le reti di adattamento dei due componenti LDMOS sono di tipo ibrido, parte a costanti distribuite e parte a costanti concentrate. Queste ultime, per ragioni di affidabilità, sono state interamente realizzate con capacità ad alta rigidità dielettrica (350 Vrms), anche quelle utilizzate per le reti di ingresso. Le coppie di reti di adattamento in ingresso e in uscita sono fra loro simmetriche e differenziali. Esse adattano la bassa impedenza dei due componenti LDMOS all'impedenza differenziale dei due balun (25+25 ohm rispetto alla massa elettrica) nel campo delle frequenze di lavoro, ovvero le due bande televisive UHF.

3. Analisi della linearità

In questo capitolo verrà trattata la caratteristica di linearità dell'amplificatore PRFA300U/B. In particolare, come già accennato in precedenza, verrà analizzato il fenomeno dell'intermodulazione "in banda", argomento già ampiamente contemplato e analizzato in passato su numerosi articoli. Questo documento vuole evidenziare il comportamento dei attuali semiconduttori, appositamente studiati per operare su segnali modulati con tecniche digitali, che vengono utilizzati per amplificare segnali modulati ancora con tecniche tradizionali (analogiche).

Premesso che qualsiasi fenomeno di distorsione di una certa rilevanza dipende dalla linearità dei componenti attivi adibiti all'elaborazione dei segnali in transito, poiché i due componenti LDMOS sono gli unici due componenti attivi montati sul modulo amplificatore PRFA300U/B e unicamente coinvolti per l'amplificazione del segnale, è lecito ipotizzare che essi siano direttamente legati alle caratteristiche di intermodulazione del modulo stesso. E' bene chiarire che i parametri di efficienza, adattamento e linearità sono sempre strettamente legati fra loro, ma la loro ottimizzazione coincide con tre impedenze di adattamento distinte. Malgrado ciò, una rete di adattamento ottimizzata per la

massima efficienza non può causare eccessive riflessioni. Quindi è anche lecito ipotizzare che tali differenze di adattamento sono quasi sempre trascurabili e comunque esse vanno contemplate sull'intera banda operativa dell'amplificatore.

3.1. Ambiente di simulazione

Allo scopo di mettere a punto le caratteristiche intrinseche di non linearità dei componenti LDMOS montati sul modulo amplificatore PRFA300U/B sono state intraprese due diverse strategie: la prima è stata condotta direttamente sull'amplificatore attraverso un apposito banco di misura; la seconda, invece, è stata condotta in ambiente simulato utilizzando i modelli non lineari messi a disposizione del Costruttore dei due componenti LDMOS utilizzati (Freescale Semiconductors). Ovviamente in ambiente simulato sono state effettuate tutte quelle analisi teoriche che implicano manovre impraticabili su un target reale.

Un primo punto di verifica sono le curve di polarizzazione e di carico del semiconduttore.

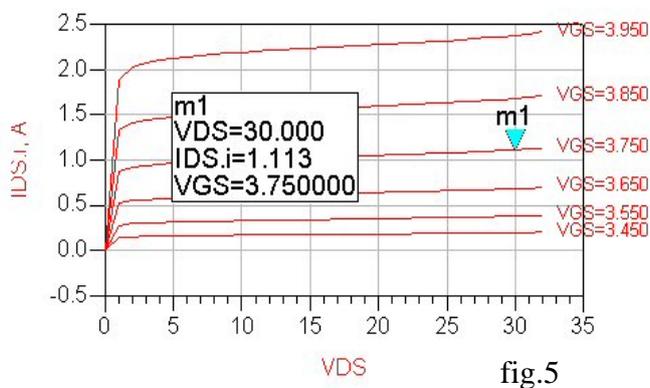


fig.5

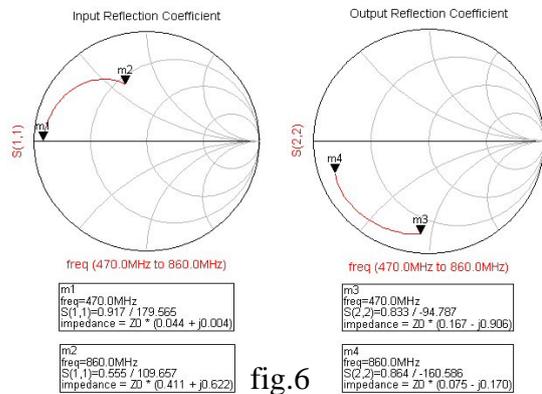


fig.6

In fig.5 è riportato l'andamento della corrente di drain di uno solo dei due chip contenuti all'interno del dispositivo LDMOS in funzione della tensione di drain e della tensione di gate rispetto al source. Il marker m1 individua uno dei possibili punti statici di lavoro in condizioni climatiche ambientali (27°C). Tale punto di lavoro verrà mantenuto per tutte simulazioni che verranno riportate in seguito.

In fig.6 sono stati riportati i parametri di impedenza differenziale in ingresso e in uscita normalizzati a 10 ohm ($Z0=10$). In questa figura è possibile individuare comportamenti analoghi delle due impedenze al variare della frequenza, malgrado la differenza di polarità della componente reattiva. Si noti che i valori simulati attraverso il modello messo a disposizione dalla Freescale Semiconductors sono sostanzialmente diversi rispetto al complesso coniugato dei valori di impedenza delle reti di matching suggerite sul datasheet del componente. Tali differenze non permettono di utilizzare in ambiente simulato le stesse reti di adattamento che sono state implementate sul modulo amplificatore PRFA300U/B, che invece era stato ottimizzato partendo dai valori forniti sul datasheet del componente, quindi al momento considerati più attendibili. Proseguendo con le indagini in ambiente simulato è stato realizzato un circuito di test per l'analisi dell'intermodulazione in banda partendo dai seguenti prerequisiti per la verifica:

- Canale utilizzato = CH33 IV banda televisiva UHF
- Corrente di bias $IDS0 = 0.5$ Ampere per chip (2.0 Ampere totali circa)
- Tensione statica di Drain $VDS = 30$ Volt
- Reali parametri S dei balun e degli accoppiatori ibridi
- Adattamento parziale degli stadi di ingresso e di uscita con semplici reti virtuali
- Simulazione effettuata con algoritmo "Harmonic Balance"

Il circuito ottenuto è riportato in fig.7

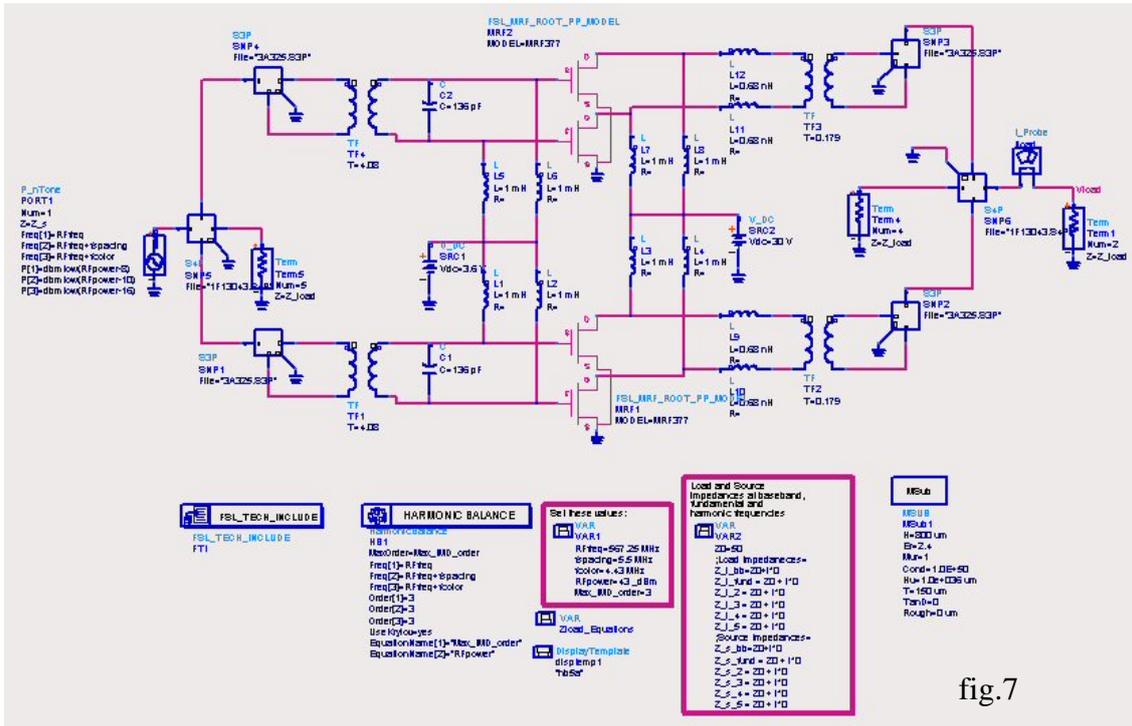


fig.7

Gli induttori L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7 ed L8 da 1mH sono semplicemente utilizzate come blocco RF (choke); esse hanno la medesima efficacia dei moduli virtuali “AC-BLOCK”, disponibili sul catalogo del simulatore. I trasformatori TF1 e TF4, unitamente ai due condensatori C1 e C2 realizzano le due reti di prematching di ingresso; analogamente i trasformatori TF2 e TF3 realizzano il circuito di prematching di uscita unitamente agli induttori L9, L10, L11 e L12.

I risultati di tale simulazione sono riportati in fig.8.

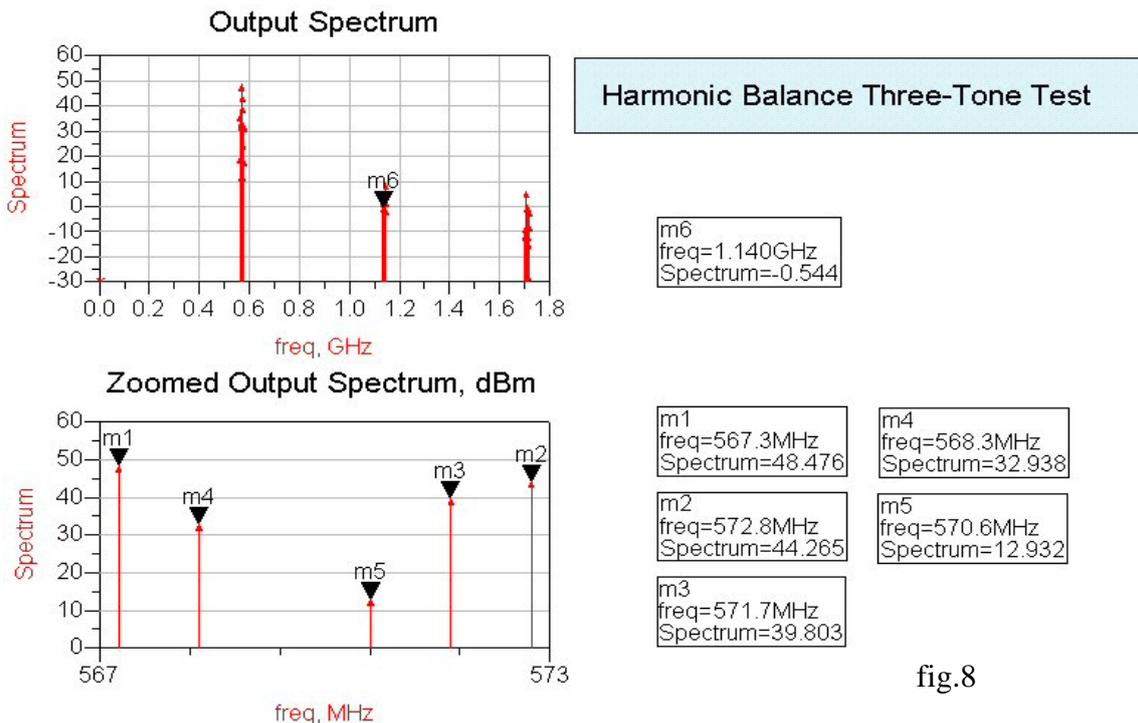


fig.8

I tre toni di ingresso, hanno ampiezze differenti fra loro, in particolare la portante video (m_1) ha un valore pari a -8 dBc rispetto al livello di peak-sync (picco di sincronismo), la portante audio (m_2) e la portante colore (m_3) hanno un valore rispettivamente pari a -10 dBc e -16 dBc sempre rispetto al peak-sync.

Dai risultati di fig.8 si può facilmente sintetizzare quanto segue:

- a) il livello delle frequenze multiple della fondamentale (seconda e terza armonica) si attesta a limiti ragionevoli considerando la classe di lavoro dell'amplificatore (AB1);
- b) contrariamente ai risultati sperimentali sui componenti LDMOS implementati, i livelli di intermodulazione in ambiente simulato risultano oltremodo eccessivi e comunque poco aderenti alla realtà.

E' opportuno precisare che il contributo m_4 non deriva da una intermodulazione di grado superiore al secondo, ma è il risultato del seguente doppio battimento: $m_1+m_2-m_3$. Pertanto, la sua ampiezza è rigidamente legata al valore di ogni singolo tono in ingresso, e senza alcun fattore moltiplicativo.

3.2. Intermodulazione di ordine superiore al secondo

Il contributo m_5 deriva dal seguente prodotto di intermodulazione: $2m_3-m_2$. Trattasi di un prodotto del terzo ordine (IM3) che cade all'interno della banda contemplata. Anche in questo caso il risultato della simulazione sembra essere molto lontano dalla realtà, anche se il comportamento di tale entità risulta compatibile con quella di un prodotto del terzo ordine.

Aumentando il numero massimo di armoniche contemplato dal simulatore i risultati non cambiano in modo significativo. Anche variando l'adattamento di ingresso e di uscita dei due componenti LDMOS i risultati non sembrano avere alcun effetto sui livelli di intermodulazione in ambiente simulato. A questo punto è stato accertato che il modello fornito dalla Freescale è idoneo solo per simulazioni a due toni, questo a fronte di una precisa richiesta di chiarimento alla Casa Madre.

Poiché il Costruttore non ha fornito elementi utili per risolvere il problema, si è deciso di proseguire ulteriori indagini su un target reale messo a disposizione dalla Italteltec.

3.3. Intermodulazione in banda

Utilizzando un banco opportunamente configurato per la misura dell'intermodulazione, è stato possibile misurare tale fenomeno direttamente sul modulo amplificatore. La misura è stata effettuata con un segnale televisivo di test opportunamente studiato per mettere in risalto i valori di intermodulazione. In pratica si tratta di amplificare una portante RF modulata in analogico (PAL) con un segnale video di test costituito da uno schermo interamente di colore rosso (barra rossa). Con questo segnale video la sottoportante del colore a 4,43 MHz assume un livello molto alto, paragonabile con quello utilizzato nel test a tre toni, e quindi costituisce un valido metodo di misura alternativo, e sicuramente più pratico e immediato rispetto al precedente. Inoltre, con questo sistema è anche possibile verificare l'efficacia di un eventuale precorrettore di linearità direttamente sull'amplificatore sottoposto a misura.

I risultati ottenuti con tale metodo mettono in risalto un diverso comportamento dei semiconduttori LDMOS utilizzati sull'amplificatore rispetto ai loro predecessori, almeno per quanto riguarda le sue caratteristiche su segnali modulati in analogico. In pratica, nelle stesse condizioni di polarizzazione

con cui si è impostata la simulazione (vedi par. 3.1), il valore di intermodulazione in banda dipende sostanzialmente dalla propagazione delle fasi all'interno del packages dei due semiconduttori piuttosto che dalla linearità che è invece ottimizzata per una corretta trasmissione digitale.

A tale proposito, si ricorda che i componenti LDMOS utilizzati sull'amplificatore PRFA300U/B sono caratterizzati per una trasmissione televisiva digitale (DVBT OFDM e ATSC 8VSB) e non per quella analogica. In ogni caso, come vedremo in seguito, una tecnica di precorrezione in cui viene contemplata la compensazione delle fasi è comunque in grado di ridurre il valore di intermodulazione "in banda" a valori ottimali, pertanto l'amplificatore è comunque in grado di erogare un segnale analogico di ottima qualità utilizzando un idoneo circuito di precorrezione.

3.4. Metodi per aumentare la linearità e loro efficacia

Le cause di una scarsa linearità di un amplificatore possono essere riassunte in un elenco:

- 1) Errata regolazione della corrente di riposo.
- 2) Saturazione.
- 3) Eccesso di SWR.
- 4) Instabilità, tendenza ad oscillare.
- 5) Sbilanciamento dei carichi di ingresso o di uscita.
- 6) Sbilanciamento della polarizzazione sotto carico

Per quanto riguarda il punto (1) è accertato che la variazione della corrente di riposo I_{DS0} entro limiti ragionevoli (0.5-2.0 Ampere) non incide massicciamente sul livello di intermodulazione in banda. Ovviamente il guadagno dell'amplificatore è direttamente proporzionale alla corrente di riposo.

Per i punti (2), (3) e (4) si può affermare con assoluta certezza che in fase di progettazione ogni dettaglio è stato analizzato e ottimizzato con particolare cura, pertanto tali eventi si ritengono contemplabili solo in caso di guasto.

Il punto (5) mette in guardia da eventuali dissimmetrie sulle reti di adattamento. Una evidente dissimmetria si può notare osservando la fig.9. L'iniezione della polarizzazione di gate su un singolo ramo della rete di ingresso può essere un problema. Considerando i valori di impedenza sul punto di iniezione è altamente improbabile che tale dissimmetria possa causare fenomeni di un certo rilievo, tuttavia allo scopo di verificare l'impatto della linea di polarizzazione è stato innalzato il valore del resistore di polarizzazione (vedi freccia) senza peraltro ottenere miglioramenti apprezzabili sui valori di intermodulazione.

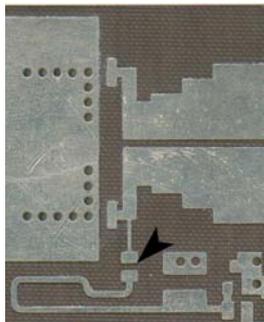
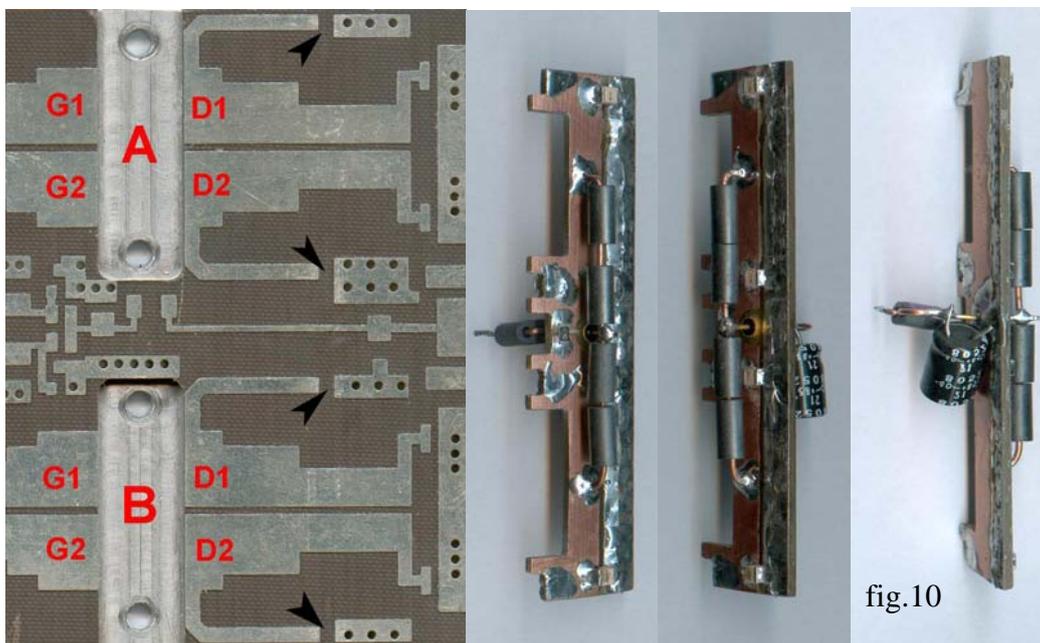


fig.9

Una verifica dello sbilanciamento della polarizzazione sotto carico non è affatto semplice e talvolta neppure perseguibile senza correre il rischio di danneggiare l'amplificatore. In effetti uno sbilanciamento della polarizzazione è probabile quando si alimenta un doppio amplificatore differenziale attraverso due soli stub laterali di alimentazione, come in questo caso. Quello che è difficile stabilire è l'entità di tale sbilanciamento, ma soprattutto è difficile immaginare quale possa essere il suo impatto sulle caratteristiche elettriche dell'intero modulo.

Per portare avanti le indagini anche su quest'ultimo punto è stato deciso di operare una modifica drastica del sistema di alimentazione del modulo evitando, per quanto possibile, di alterare il funzionamento delle due reti di adattamento di uscita dei due componenti LDMOS. In pratica è stato realizzato un ponte di alimentazione attraverso un secondo circuito stampato montato ortogonalmente sul substrato del modulo amplificatore. In fig.10 è mostrata la patch hardware con cui è stato realizzato il ponte; essa è rappresentata in tre diverse angolazioni. I punti di connessione sul substrato del modulo sono stati marcati con quattro frecce di colore nero.



La patch hardware si pone i seguenti obiettivi:

- Utilizzare tutti e quattro gli stub di uscita per la polarizzazione dei drain.
- Ridurre la resistenza che si interpone fra i componenti LDMOS e il nodo di alimentazione.
- Rimuovere i choke L3 ed L4 per la continuità galvanica fra i drain dei due semiconduttori.
- Aumentare considerevolmente l'efficacia del filtro di alimentazione.

Malgrado ciò, con tale modifica sono stati rilevati miglioramenti sull'intermodulazione "in banda" poco percettibili strumentalmente e comunque tali da non giustificare un'implementazione così invasiva.

3.5. Precorrezione

Uno schema di principio idoneo per operare la precorrezione di linearità sul modulo amplificatore PRFA300U/B è riportato in fig.11. Esso è composto da una linea di ritardo, un predistorsore avente la possibilità di regolare l'ampiezza e la fase del suo segnale in ingresso e un nodo sommatore.

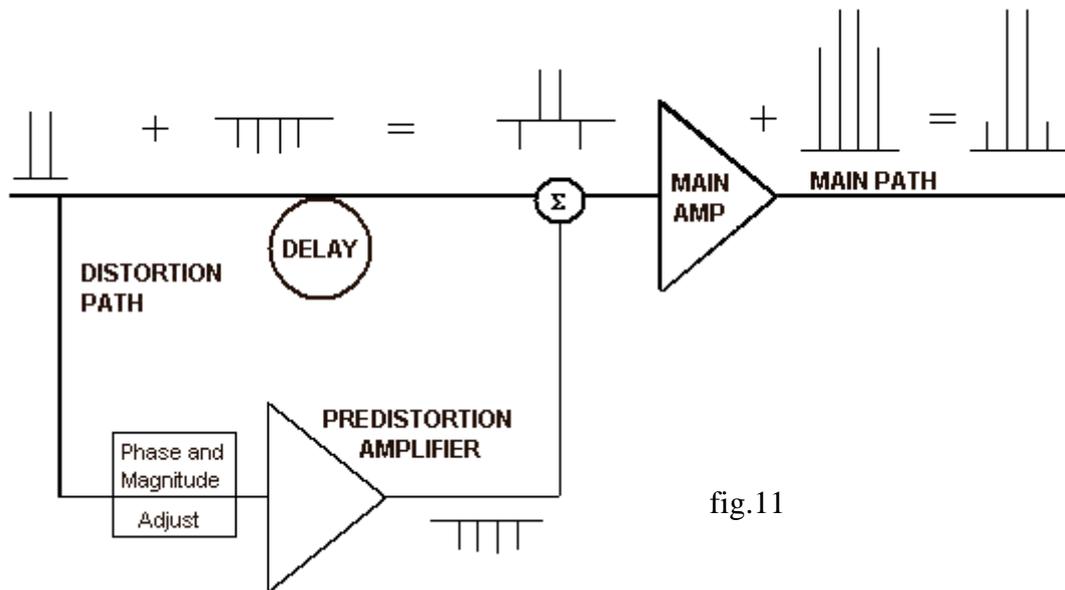


fig.11

Il principio di funzionamento è semplice: poiché la non linearità del modulo amplificatore genera prodotti di intermodulazione, si riduce tale effetto facendo amplificare al modulo un segnale opportunamente predistorto derivato da un secondo elemento non lineare posto in ingresso avente un effetto distortore complementare a quello dell'amplificatore principale. In sostanza la somma dei due effetti distortori opposti si traduce in un aumento della linearità del modulo e una determinante riduzione dell'intermodulazione. Nel caso specifico è stato anche accertato che, una volta effettuata la compensazione con il segnale di test (barra rossa), le caratteristiche qualitative del segnale RF rimangono indipendenti dal livello delle portanti di luminanza e di cromaticità.

4. Conclusioni

A valle di tutte le verifiche e le simulazioni orientate a stabilire gli effetti su una trasmissione televisiva analogica effettuata attraverso il modulo amplificatore PRFA300U/B, già caratterizzato per una diffusione digitale terrestre DVBT, si può sintetizzare quanto segue:

- a) Il modulo amplificatore è perfettamente in grado di supportare anche una trasmissione televisiva analogica, ma necessita di una opportuna compensazione in fase di installazione attraverso opportuni circuiti di precorrezione.
- b) L'accoppiamento di più moduli amplificatori omogenei della stessa serie per ottenere potenze superiori non incide sulla linearità complessiva del sistema di amplificazione. Uno o più moduli possono essere compensati dallo stesso circuito precorrettore.

Pertanto, il modulo amplificatore PRFA300U/B è particolarmente idoneo per realizzare amplificatori di grande potenza in banda UHF proprio per le ragioni evidenziate al punto (b) oltre che alla sua indiscutibile affidabilità, già peraltro ampiamente verificata in fase di sperimentazione.