

Collegamenti EME e preamplificatori a basso rumore

(Gianfranco Sabbadini - I2SG)

Premessa

Nelle comunicazioni verso lo spazio , quali ad esempio per riflessione sulla Luna , e' necessario considerare le caratteristiche dell'intero sistema Trasmettitore-Antenna-Ricevitore poiche' ai fini dei risultati le 3 parti risultano strettamente correlate. Ad esempio la potenza irradiata e' data dal prodotto della potenza del trasmettitore per il guadagno dell'antenna ed il rapporto segnale/rumore in ricezione dipende dalla somma delle Temperature Equivalenti di rumore dell'antenna e del ricevitore.

Al fine di evidenziare i problemi relativi alla ricezione di segnali molto deboli ed in particolare all'ottimizzazione del ricevitore sono brevemente esposte alcune considerazioni generali , includendo alcuni dati pratici ed una breve descrizione delle diverse tipologie di pre-amplificatori a basso rumore.

La trattazione dell'argomento e' fatta in modo semplificato al fine di consentire l'accesso anche agli OM meno esperti o a coloro che , privi di esperienze specifiche, desiderano avventurarsi nell'affascinante segmento delle comunicazioni verso lo spazio.

Collegamento EME

Il segnale emesso del trasmettitore ed inviato all'antenna . nel percorso Terra-Luna-Terra subisce una attenuazione . Questa attenuazione di tratta, e' funzione della frequenza di lavoro : considerando che la Luna riflette verso lo spazio circa il 6,5 per cento dell'energia elettromagnetica che intercetta , con una distanza media di 340.000 Km abbiamo i valori riportati in Tabella1.

Notiamo che si tratta di attenuazioni molto elevate che dovremo compensare con il guadagno d'antenna e con potenza adeguata del trasmettitore al fine di ottenere un segnale al ricevitore sufficiente per la demodulazione.

TABELLA 1	
FREQUENZA (MHz)	ATTENUAZIONE (dB)
50	243
144	252
432	262
1296	271
2304	276
5670	284
10450	289

Per calcolare il segnale al ricevitore dobbiamo valutare di quanto il segnale del TX e' attenuato nell'intero percorso ; pertanto - in Decibel - il segnale del TX giungera' al ricevitore attenuato della seguente somma algebrica di valori :

<p><u>Attenuazione totale =</u></p> <p>Attenuazione cavo collegamento TX all'antenna + Guadagno dell'antenna in trasmissione - Attenuazione di tratta + Guadagno d'antenna in ricezione - Perdite di interconnessione al ricevitore</p>

Notiamo che il guadagno d'antenna pesa 2 volte per cui e' implicito che e' molto importante , a parita' di altri fattori , la sua ottimizzazione . Per dare un esempio se disponiamo di 1 KW ed un'antenna con 20 dBi di guadagno (guadagno riferito al radiatore isotropo) e cavi senza perdita abbiamo che :

- # 1KW corrisponde a +60 dDm , cioe' una potenza 60 dB piu' alta ad un milliWatt
- # L'antenna pesa complessivamente +40dB
- # Sottraendo i "dB" relativi all'attenuazione di tratta abbiamo che la potenza

del segnale all'ingresso del ricevitore risulta come da Tabella 2.

TABELLA 2	
FREQUENZA (MHz)	Segnale al Ricevi. (dBm)
50	-143
144	-152
432	-162
1296	-171
2304	-176
5670	-184
10450	-189

La potenza di -143 dBm corrisponde a 0,016 microVolt su 50 Ohm . Per ricevere segnali tanto bassi e' necessario che il ricevitore sia molto sensibile , ovvero che abbia un Fattore di rumore "F" prossimo all'unita' . Il Fattore di Rumore "F" di un ricevitore, così come per qualsiasi quadripolo lineare attivo o passivo, è definito da un numero dato dal rapporto tra 2 rapporti ovvero tra il rapporto del segnale/rumore (Si/Ni) del segnale (Si) all'ingresso del ricevitore e quello presente all'uscita (So/No) ; in forma logaritmica questo rapporto e' chiamato "**Cifra di Rumore** " (NF = "Noise Figure") : (**NF=10log F**)
 Pertanto la Cifra di rumore e' espressa in Decibel e deve assumere valori molto bassi.

La Cifra di Rumore puo' essere espressa anche come il rapporto tra la potenza di rumore totale all'ingresso del ricevitore e la potenza di rumore di riferimento. La potenza di rumore di riferimento e' quella generata della sola resistenza su cui e' chiuso l'ingresso del ricevitore (es. 50 Ohm) alla temperatura ambiente di 17° C , ovvero 290 Kelvin. Ad esempio se il ricevitore ha una cifra di rumore di 1dB significa che la potenza di rumore all'ingresso del ricevitore e' 1,26 volte piu' alta di quella generata da un resistore da 50 Ohm alla temperatura di 17° Centigradi (corrispondenti a 290 Kelvin) e collegato al suo ingresso . Questa potenza di rumore vale :
 (k= costante di Boltzman espressa in Jule/Kelvin) :

$P_o = kT = 1,38 \cdot \exp(-23) \cdot T \quad (\text{W/Hz})$
ovvero :

$$P_o = -174\text{dBm/ Hz}$$

Essendo la potenza di rumore proporzionale alla temperatura attraverso una costante possiamo utilizzare la "*Temperatura di Rumore*" per definire la sensibilita' del sistema ricevente anziche' la Cifra di Rumore .

Pertanto nel caso in esame abbiamo che la "*Temperatura Equivalente di Rumore*" del ricevitore vale :

$$290 \cdot 1,26 - 290 = 365 - 290 = 75 \text{ Kelvin}$$

Cio' e' conveniente per l'attivita' verso lo spazio perche' ci fornisce una percezione piu' diretta di come e dove dobbiamo focalizzare gli sforzi per migliorare la sensibilita' del nostro sistema ricevente.

L'antenna collegata al nostro ricevitore se adattata per 50 Ohm equivale ad un generatore di segnali con 50 Ohm resistenza interna ; tuttavia i 50 Ohm dell'antenna non sono relativi ad una resistenza fisica , ma alla sua resistenza di radiazione.

La temperatura di rumore dei 50 Ohm dell'antenna non e' la temperatura cui si trova l'antenna , ma quella della regione di spazio verso la quale e' puntato il suo lobo principale. In effetti un'antenna puntata verso il cielo la possiamo paragonare ad un bolometro (cioe' un micro-Wattmetro) con un sensore remoto , cioe' posizionato nella regione di spazio verso cui e' puntata l'antenna. Tale caratteristica, utilizzata sin dalla nascita della radioastronomia , ha permesso di misurare la temperatura di alcuni pianeti , come ad esempio Marte , ben prima dell'impiego delle sonde interplanetarie. La temperatura media del cielo e funzione della frequenza e' riportata in Tabella 3. (Per ulteriori dati vedere Ref.1)

Alle basse frequenza la temperatura di rumore dell'antenna e' circa uguale a quella del resistore a temperatura ambiente , cioe' alla temperatura di riferimento rispetto alla quale si effettua la misura la Cifra di Rumore.

Pertanto , in questo caso , il rapporto "Segnale /Rumore (S/N)" del nostro ricevitore e' direttamente legato alla Cifra di Rumore : ad esempio se riduciamo la Cifra di Rumore da 1 a 0,5 dB il rapporto S/N migliora di 0,5 dB , ed anche se potessimo realizzare un preamplificatore ideale con NF=0 dB il miglioramento sarebbe di 1 dB. Ma salendo in frequenza l'impatto della Cifra di Rumore sul rapporto S/N e' decisamente diverso.

TABELLA 3	
FREQUENZA (MHz)	Temperatura cielo (Kelvin)
50	2000
144	300
432	30
1296	5
2304	< 5
5670	< 5
10450	< 5

Ad esempio in 432 MHz con una antenna ideale puntata verso il cielo la sua Temperatura equivalente sarebbe di 30 Kelvin .

Quindi :

Con NF=1dB la temperatura totale di rumore all'ingresso e' :

$$\text{Te} = 30 + 75 = 105 \text{ Kelvin}$$

Con NF= 0,5dB la "Te" totale all'ingresso e' :

$$\text{Te} = 30 + 35 = 65 \text{ Kelvin}$$

Infatti 0,5 dB significa un rapporto di 1,122 per cui la Temperatura Equivalente di rumore del ricevitore vale : $(290 \cdot 1,122) - 290 = 35$ Kelvin.

In altri termini , il rumore totale all'ingresso del ricevitore si riduce del rapporto 105/65 che espresso in Decibel significa un miglioramento di circa 2,1 dB.

Con lo stesso miglioramento di NF a 10 GHz il rapporto Segnale/Rumore aumenterebbe di circa 3dB.

A conclusione di queste considerazioni risulta evidente che nelle bande alte e' opportuno considerare la somma delle diverse temperature di rumore al fine di decidere ove focalizzare gli sforzi , i.e :

$$T_e \text{ (Totale)} = \Sigma (T_{\text{antenna}} , T_{\text{cavi}}, T_{\text{rx}} , \text{etc})$$

Qualora si sia in presenza di temperatura d'antenna molto bassa ed altre temperature di rumore - quali indotte dalla perdita dei cavi (o guide d'onda) di interconnessione al ricevitore - già ridotte al minimo o azzerate , anche solo 0,1 dB di miglioramento di un preamplificatore con NF di poche frazioni di dB puo' significare anche 1 dB di miglioramento del rapporto S/N.

Cio' e' naturalmente vero solo nei collegamenti verso lo spazio , perche' nei collegamenti terrestri , ove l'antenna "vede" il terreno la sua temperatura equivalente sara' sempre prossima a quella ambiente di 290 Kelvin , indipendentemente dalla frequenza di lavoro. Anche le perdite dei cavi di interconnessione tra antenna e ricevitore introducono rumore : nel nostro caso trovandosi i cavi a temperatura ambiente , l'attenuazione introdotta contribuisce con una "Te" calcolabile come per la Cifra di Rumore. Quindi 3 dB di attenuazione equivalgono a 290 Kelvin , 1dB a 75 Kelvin , 0,5 dB a 35 Kelvin. Tabelle e grafici di conversione da Decibel a Temperatura Equivalente sono riportati nella Ref.1.

Pertanto , affannarsi a ricercare super-preamplificatori o devolvere risorse per ricevitori con NF bassissimo, in presenza di una Temperature Totale di Rumore d'ingresso elevata per effetto degli altri contributi , non solo non porta risultati ma nel caso delle bande basse puo' indurre altri problemi quali derivanti da una minore resistenza al sovraccarico ai segnali adiacenti , inevitabilmente presenti anche nelle comunicazioni verso lo spazio per effetto dei lobi laterali dell'antenna.

In Tab 4 sono riportati i rapporti S/N per le diverse bande quali otteniamo con TX da 1kW, ricevitore con NF=0,5 dB, perdite di interconnessione all'antenna nulle , e nei due casi di banda passante : 50 Hz e 500 Hz.

TABELLA 4						
		@ B=50Hz			@ B=500Hz	
Tem.Tot		Potenza				
FREQ.	RX	Rumore	Rumore	S/N	Rumore	S/N
(MHz)	(Kelvin)	(dBm/Hz)	(dBm)	(dB)	(dBm)	(dB)
50	2035	-165,5	-148,5	5,5	-138,5	-4,5
144	335	-173	-156	4	-146	-6
432	65	-180	-163	1	-153	-9
1296	40	-182,5	-165,5	-5,5	-155,5	-15,5
2304	< 40	<-182,5	<-165,5	<-5,5	<-155,5	<-15,5
5670	< 40	<-182,5	<-165,5	<-5,5	<-155,5	<-15,5
10450	< 40	<-182,5	<-165,5	<-5,5	<-155,5	<-15,5

Notiamo come sia necessario lavorare con bande passanti strette anche disponendo di potenze elevate. Alle basse frequenze il limite e' dato dalle dimensioni fisiche delle antenne. Ma salendo in frequenza si possono ottenere guadagni elevati con dimensioni non "mostruose". In tutti i casi la sensibilita' del sistema ricevente risulta determinante e premesso che i contributi di rumore di antenna , cavi , commutazione T/R siano gia' stati ridotti al minimo , l'elemento chiave è il preamplificatore a basso rumore che precede il ricevitore . Esaminiamo i criteri generali di progetto di questa parte del sistema e le configurazioni pratiche piu' comuni.

I preamplificatori "low-Noise" : principi generali

Il progetto di amplificatori a basso rumore ed incondizionatamente stabili (cioe' che non oscillano con nessuna combinazione di impedenze ai terminali d'ingresso e d'uscita) pone dei problemi che vanno risolti con alcune soluzioni canoniche. Cio' deriva dal fatto che i dispositivi utilizzati , ovvero i transistori ad effetto di campo (MESFET , HEMPT , MODFET) sono inerentemente instabili. Per ottenere basse cifre di rumore l'impiego di FET GaAs e' mandatorio e praticamente riscontriamo gli stessi problemi che mezzo secolo fa abbiamo affrontato nella realizzazione di preamplificatori a basso rumore in UHF con l'impiego di triodi ad alta tranconduttanza come il famoso 417A. (Gm = 24mA/V) In particolare , alle frequenza basse (sino a 5,7 GHz) , il guadagno dei FET e' molto alto ed in ogni caso e' necessario ricercare soluzioni di stabilizzazione che non influenzino la Cifra di

Rumore. Per ottenere risultati accettabili e' necessario risolvere 3 problemi :

- 1) *Circuito di adattamento d'ingresso per la minima Cifra di Rumore , realizzato con basse perdite dissipative.*
- 2) *Circuito d'uscita ottimizzato per il massimo guadagno*
- 3) *Stabilita' incondizionata (cioe' con fattore $K > 1$) (v.ref.1)*

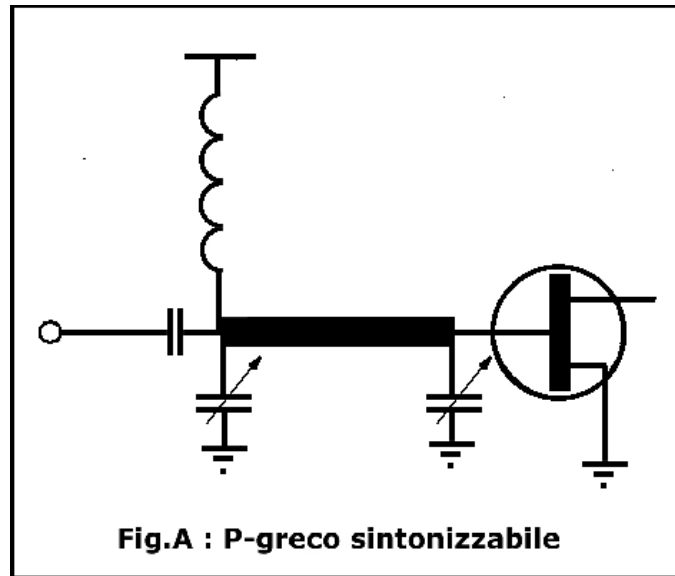
Per soddisfare le condizioni di N.F. minimo vi sono diverse soluzioni :

in tutti i casi la funzione del circuito d'ingresso e' quella di trasformare l'impedenza della sorgente (esempio 50 Ohm) nell'impedenza che il FET deve "vedere" per avere la minima Cifra di Rumore.

Questa "impedenza ottima" e' derivata dal coefficiente di riflessione (Γ_{opt}) che il costruttore riporta nel foglio tecnico del FET. Il circuito che realizza la trasformazione d'impedenza deve avere perdite dissipative minime poiche' queste contribuiscono ad un rumore aggiuntivo che si somma a quello proprio generato dal FET. In altri termini le perdite dissipative del circuito di adattamento , espresse in "**dB**" , si sommano direttamente alla cifra di rumore del FET e nel caso di comunicazioni verso lo spazio , ove la temperatura equivalente dell'antenna e' molto bassa possono , come abbiamo visto , degradare in modo vistoso il rapporto S/N. E' da sottolineare che in ogni caso con l'impiego di FET l'adattamento per NF minimo comporta sempre un **SWR** in ingresso molto elevato: nel caso di un FET ideale , cioe' con NF intrinseco = 0 , il rapporto di onde stazionarie teorico risulta sempre uguale ad infinito. Di seguito sono illustrati alcuni tra i piu' comuni circuiti di adattamento per umore minimo.

1 : Preamplificatori con P-greco sintonizzabile

Il circuito di Fig.A e' molto diffuso nelle costruzioni amatoriali ,nelle bande VHF e UHF inferiori .



Vantaggi :

- * *Sintonia per NF minimo*

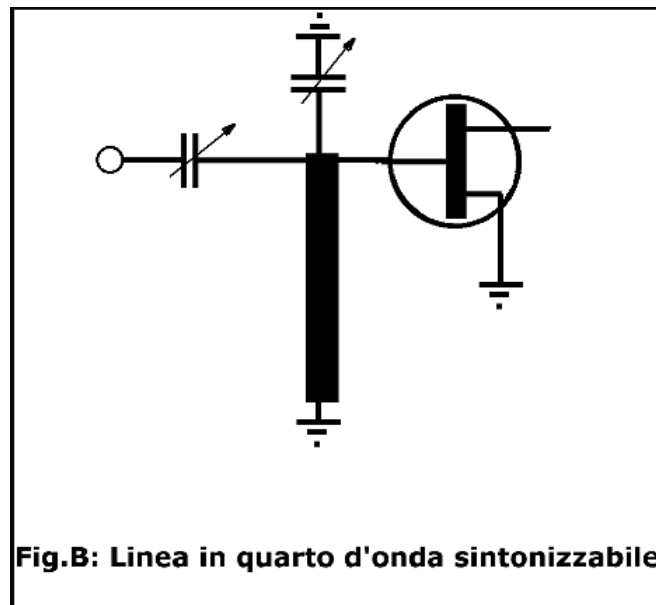
Svantaggi :

- * *Perdite di inserzione dovute a 4 componenti*
- * *Caratteristica di trasferimento passa-basso*
- * *Condensatori variabili costosi*
- * *Utilizzabile sino a solo 2,4 GHz*
- * *Richiede il ritorno a massa*
- * *Richiede condensatore di disaccoppiamento all'ingresso*
- * *Implica una costruzione meccanica*
- * *E' necessaria l'argentatura per massimizzare il Q a vuoto*

2 : Preamplificatori con linea d'ingresso in quarto d'onda sintonizzabile

Per evitare le perdite inerenti i 4 componenti del circuito a P-greco una soluzione consiste nell'impiego di una linea in quarto d'onda sintonizzabile e connessa in cortocircuito verso massa. (v. Fig. B)

La linea e' coassiale cilindrica o in cavita' rettangolare : in questo caso alla perdita del circuito d'ingresso contribuiscono solo 3 componenti.



Vantaggi :

- * *Sintonia per NF minimo*
- * *Non e' richiesto il ritorno a massa*
- * *Basse perdite con condensatori in aria*
- * *Caratteristica di trasferimento passa-alto*

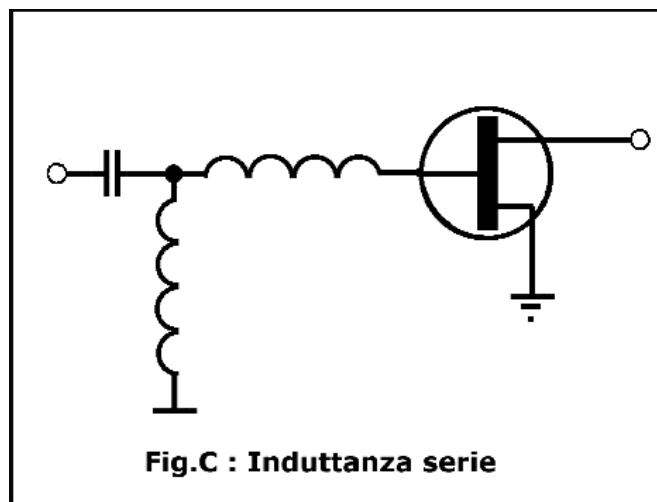
Svantaggi :

- * *2 condensatori variabili*
- * *Costruzione meccanica complessa*
- * *E' necessaria l'argentatura per massimizzare il Q a vuoto*
- * *Non integrabile in circuiti con microstrip*
- * *Utilizzabile sino a solo 2,4 GHz*

3 : Preamplificatori con induttanza serie in ingresso

Nei casi ove l'impedenza ottima di sorgente per NF minimo abbia parte reale prossima a 50 Ohm e parte immaginaria induttiva , il circuito

d'ingresso si riduce ad una semplice induttanza in serie (Fig. C)



Vantaggi :

- * *E' possibile la sintonia per NF minimo*
- * *Semplicita' e basso costo*
- * *Bassa perdita (un solo elemento)*
- * *Adatto per circuiti in microstrip*

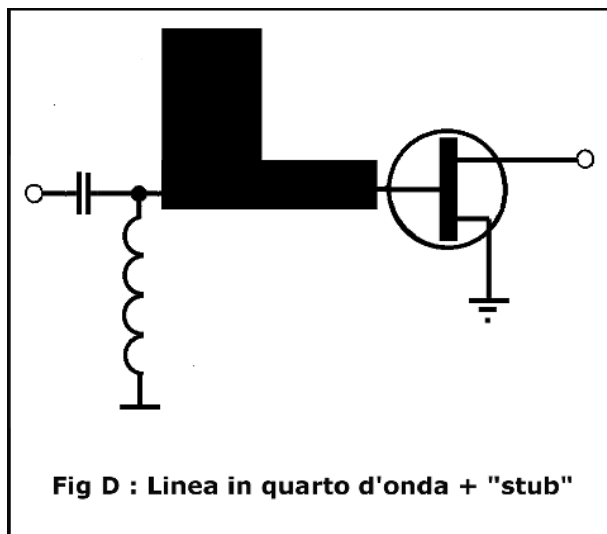
Svantaggi :

- * *Utilizzabile sino a solo 2,4 GHz*
- * *Richiede il ritorno a massa*
- * *Richiede condensatore di disaccoppiamento all'ingresso*

4 : Trasformatore in quarto d'onda con "stub" in parallelo

E' un circuito classico realizzabile su circuito stampato con tecnologia *microstrip*. Un tronco di linea di impedenza appropriata realizza la parte reale dell'impedenza ottima , mentre la parte immaginaria e' ottenuta con un tronco di linea aperto

connesso all'estremita'.



Vantaggi :

- * *Adatto per costruzione in microstrip*
- * *Realizzabile sino ad oltre 24 GHz*
- * *Bassa perdita se realizzato con laminato in TEFLON*

Svantaggi :

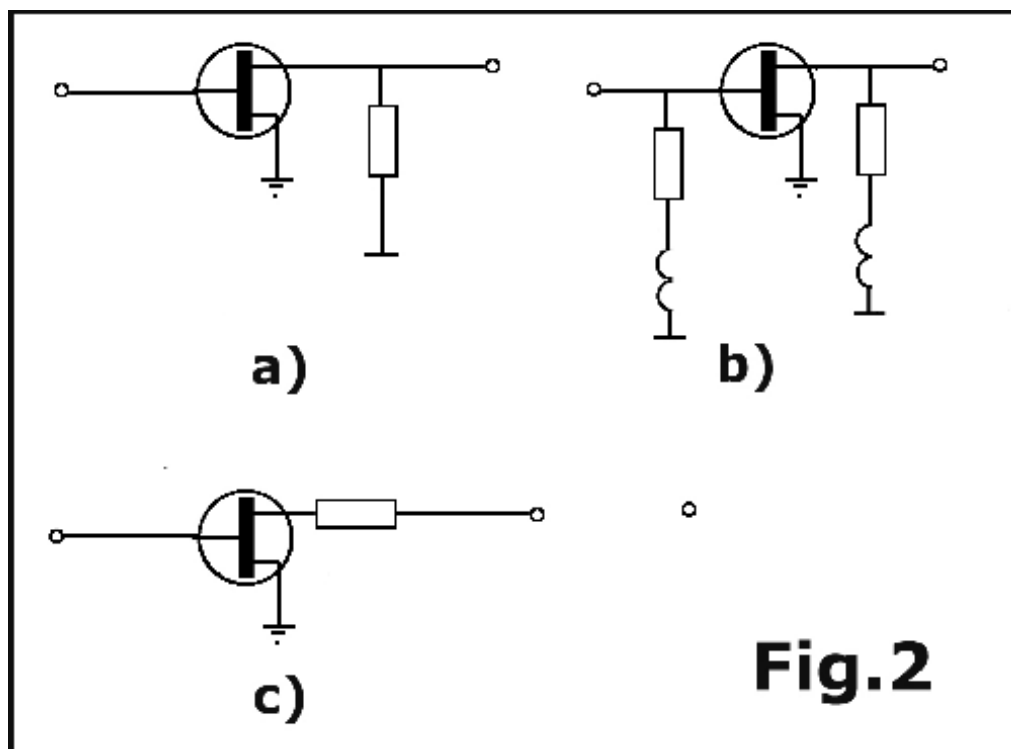
- * *Aggiustaggio difficile (e' un NO-TUNE)*
- * *Solo aggiustamento possibile e' la parte immaginaria
cioe' la lunghezza dello "stub"*
- * *Richiede condensatore di disaccoppiamento all'ingresso*
- * *E' richiesto il ritorno a massa*

Stabilizzazione dei circuiti preamplificatori

La stabilita' inerente dei moderni FET normalmente utilizzati negli amplificatori a basso rumore e' definita dal fattore "K" , il cui valore varia da 0,1 ad 1 GHz a circa 1 a 10 GHz. Il fattore di stabilita' intrinseca di alcuni dispositivi e' riportato in Tabella 5

Tab. 5		K-Factor @ F [GHz]				
		1	2	4	6	10
ATF10136	Avantek	0.32	0.51	0.94	1.02	1.06
NE71085	NEC	N/A	0.19	0.36	0.59	0.95
FHX06	Fujitsu	0.13	0.26	0.35	0.63	0.95
ATF35076	Avantek	0.13	0.17	0.33	0.51	0.73
MGF4316	Mitsubishi	0.10	0.27	0.53	0.60	0.90
MGF1302	Mitsubishi	0.11	0.15	0.42	0.68	1.26

Per ottenere la stabilita' incondizionata del circuito e' necessario forzare il valore intrinseco del dispositivo ad un valore superiore ad 1. Cio' viene fatto con l'impiego di componenti dissipativi (resistenze) ed elementi reattivi.



Con riferimento a Fig.2 osserviamo che il metodo **a)** e' talvolta usato ma e' poco efficace poiche' riduce il guadagno ma non aumenta l'isolamento tra ingresso ed uscita. Il metodo **c)** e' il piu' comune ed efficace perche' riduce il guadagno ma contestualmente aumenta anche l'isolamento tra il circuito d'ingresso e l'uscita. Col metodo **b)** si riduce il guadagno alle basse frequenze, mentre alla frequenza di lavoro non si ha perdita (essendo le resistenze isolate dalle due induttanze). Per aumentare il fattore di stabilita' si ricorre anche all'impiego di elementi reattivi,

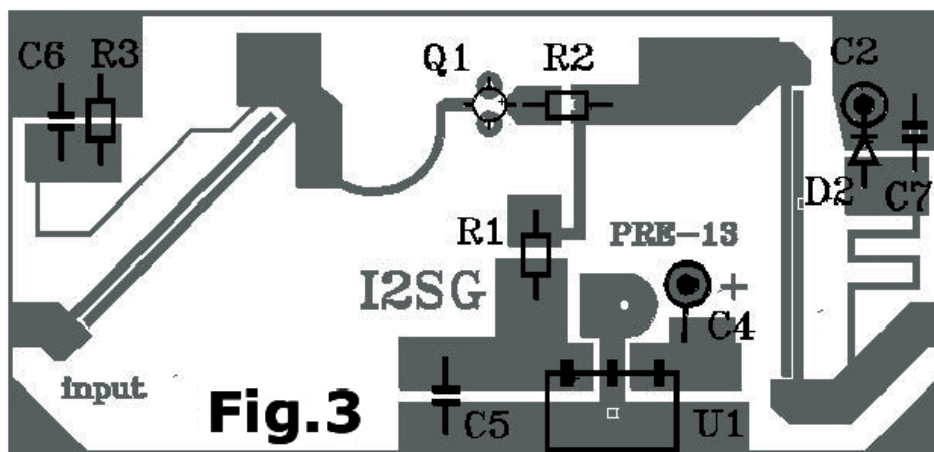
ed in particolare ad una controreazione del dispositivo con l'impiego di una induttanza di piccolo valore disposta in serie al ritorno a massa del "source". Questa tecnica e' illustrata con un esempio alla Ref.1 (pag.160...162) V'e' da osservare che gli elementi dissipativi disposti all'uscita influenzano la Cifra di Rumore con un contributo di secondo ordine che decresce con il guadagno dello stadio. Ad esempio se abbiamo un amplificatore con 15 dB di guadagno e 0,5 dB di rumore , introducendo 3 dB di attenuazione all'uscita la Cifra di Rumore sale a 0,6dB (a temperatura ambiente).

Nella fase di progetto i radioamatori hanno oggi a disposizione potenti strumenti di calcolo , simulazione ed ottimizzazione dei circuiti , riducendo le incertezze e con risultati pratici eccellenti.

Questi strumenti sono pacchetti *software* , alcuni dei quali di pubblico dominio, quale ad esempio il "Serenade SV" gia' illustrato nella rivista QST , e che possono essere utilizzati con comunissimi PC.

Per coloro che , privi di strumentazione, desiderano cimentarsi nella costruzione di preamplificatori a basso rumore sono disponibili molti progetti NO-TUNE descritti in diverse pubblicazioni radiantistiche. In Fig.3 ad esempio e' riportato un preamplificatore per la banda dei 13 centimetri che e' gia' stato realizzato da diversi OM interessati all'argomento ed e' descritto alla Ref.1

Questo preamplificatore e' basato sui concetti sinteticamente esposti : circuito per NF minimo in *microstrip* come da soluzione di Fig D , stabilizzazione con applicazione combinata dei metodi illustrati in Fig.2b , Fig.2c e controreazione ai terminali di "source".



L'originalita' del progetto e' costituita anche dall'impiego di accoppiatori in quarto d'onda all'ingresso e all'uscita in sostituzione dei condensatori di disaccoppiamento al fine di ottenere una maggiore reiezione dei segnali fuori banda.

Cio' e' importante per evitare possibili sovraccarichi quando si impiegano antenne non particolarmente selettive come ad esempio le antenne ad elica comunemente usate per il traffico via satellite in Banda S. (Ref.6 , Ref.7)

I due accoppiatori sono visibili nella Fig.3 , che riporta il circuito stampato con la disposizione dei componenti . Il circuito e' realizzato con substrato in *TEFLON* di ottima qualita' (Rogers 5880) e misura 34 x 54 millimetri.

Il preamplificatore citato a 2,4 GHz ha un guadagno tipico di 15 dB ed una Cifra di Rumore di 0,8...0,9 dB senza alcuna sintonia del circuito .

Aggiustando la lunghezza dello "stub" capacitivo del circuito d'ingresso si puo' ottenere un N.F. migliore , sino a valori di circa 0,6dB.

In quest'ultimo caso e' tuttavia richiesta una adeguata strumentazione di misura , introducendo anche le correzioni dovute agli errori inevitabilmente presenti quando si e' in presenza di valori di NF molto bassi.

BIBLIOGRAFIA

- 1) **"Compendium UHF e Microonde" I2SG - Edizione 8/2001**
- 2) **" International Microwave Handbook " RSGB-ARRL Ed.2002**
- 3) **" Noise performance factors in communications systems "**
W.W. Mumford , E.H. Scheibe -Horizon House
- 4) **" Das Project AMSAT Phase 3-D" DF5DP CQDI 6/1967**
- 5) **"Taschenbuch fur Hochfrequenztechnik " Mainke - Gundlach**
- 6) **" The ARRL Antenna Handbook " ARRL**
- 7) **" Antennas " J.D. Kraus - McGraw-Hill , Second Edition**