

Trasformatori VHF/UHF

a cura della Redazione

Quasi tutti gli amplificatori VHF/UHF a larga banda a transistori richiedono trasformatori r.f. Questi servono ad adattare le impedenze d'ingresso e di uscita dei transistori all'impedenza della sorgente del segnale o a quella del carico. In altri casi vengono impiegati per dividere o sommare le potenze r.f. di due o più amplificatori collegati in parallelo.

L'articolo fornisce idee per la progettazione e la realizzazione dei trasformatori più comunemente impiegati.

In un amplificatore r.f. di potenza a larga banda i trasformatori di accoppiamento sono senz'altro i componenti più critici. Ciò per il semplice fatto che i transistori di potenza r.f. lavorano con impedenze d'ingresso e di uscita molto basse, e nonostante gli ultimi progressi tecnologici, la potenza d'uscita fornita è molto più bassa di quella fornita dai tubi per cui, in molti casi, occorre collegare in parallelo due o più amplificatori. In funzionamento a larga banda, questi trasformatori

rappresentano praticamente l'unico sistema che consente di adattare i bassi valori di impedenza del transistoro agli elevati valori di impedenza sia della sorgente del segnale che del carico.

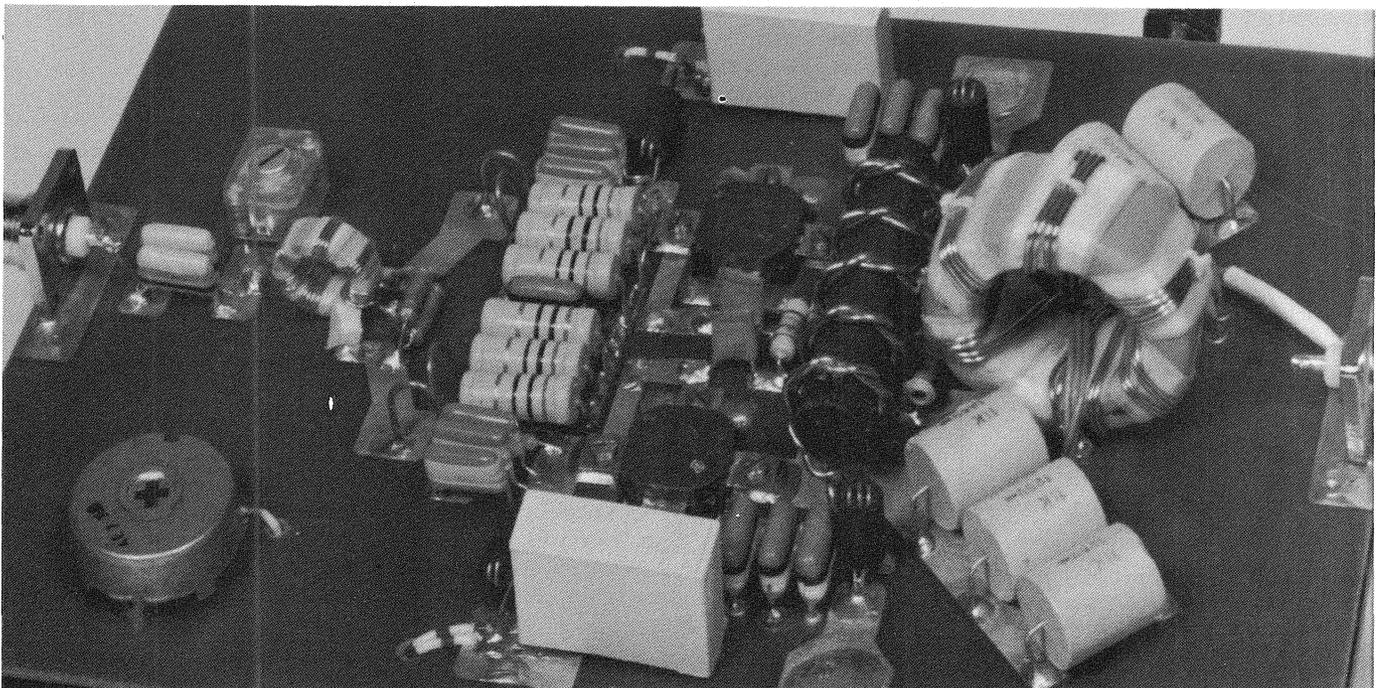
I dati relativi al progetto e al dimensionamento di questi trasformatori si trovano sparsi in pubblicazioni di varia natura. Con un pò di pazienza abbiamo cercato di riunirli e di presentarli in maniera succinta e completa ai nostri lettori.

Nella maggior parte dei progetti oc-

corre inizialmente stabilire:

- 1) il tipo di nucleo da impiegare
- 2) la lunghezza da assegnare alla linea di trasmissione usata per realizzare gli avvolgimenti.

La scelta del nucleo comporta l'esame di alcuni fattori come, l'entità della potenza trattata dal trasformatore, la permeabilità e le perdite nel materiale magnetico. Così, la massima densità di flusso, compresa la componente in continua, dovrà trovarsi entro il tratto li-



Esempio di applicazione di trasformatori r.f. realizzati mediante toroidi in ferrite e avvolgimenti in bifilare. È un amplificatore lineare a larga banda di potenza (300 W), funzionante con 2 x BLX 15 in parallelo.

neare della curva B-H. La permeabilità, che dovrà essere più elevata possibile in corrispondenza della frequenza di lavoro più bassa, dovrà avere un valore compreso tra 800 e 3000 a seconda della sezione del nucleo. Il materiale dovrà infine avere perdite più basse possibili entro tutto il campo delle frequenze di lavoro.

La linea di trasmissione dovrà essere lunga abbastanza da consentire di effettuare sul nucleo le spire richieste, ma non però tanto lunga da alterare la risposta alle frequenze elevate. È noto che per qualsiasi trasformatore a linea di trasmissione, il valore ottimale dell'impedenza Z_0 è dato da:

$$Z_0 = \sqrt{R_{in} R_L}$$

In corrispondenza dell'impedenza più bassa, il valore minimo dell'induttanza richiesta per avere la risposta desiderata alle basse frequenze è dato da:

$$L = \frac{4R}{2\pi f}$$

nella quale

L = induttanza in μH ,

R = valore dell'impedenza in Ω

f = valore della frequenza in MHz.

Questo valore di induttanza e la permeabilità del nucleo fissano inequivocabilmente il numero delle spire da assegnare all'avvolgimento.

Sei sistemi per adattare e sommare i segnali r.f.

I trasformatori a larga banda possono assumere una grande quantità di

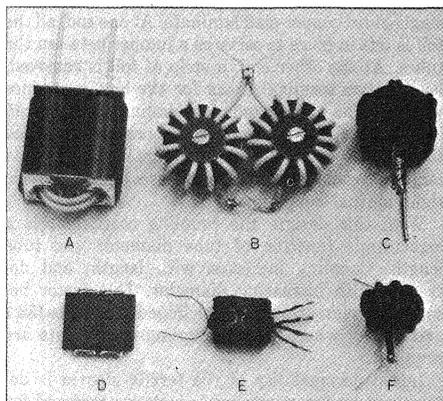


Fig. 1 - Tipi rappresentativi di trasformatori a larga banda r.f. Ciascun trasformatore può essere adattato alle particolari esigenze di un dato progetto. Ad eccezione dei trasformatori A e D, gli avvolgimenti di tutti gli altri trasformatori sono realizzati mediante linee di trasmissione.

fogge e di dimensioni come appunto indicato nei sei prototipi riportati in figura 1.

Il trasformatore indicato con "A" rappresenta il tipo più usato in pratica quando si vogliono ottenere elevati rapporti di impedenza (16:1 e più). A differenza della maggior parte degli altri tipi di trasformatore, non impiega per gli avvolgimenti linee di trasmissione.

Il trasformatore "B", costituito in pratica da una coppia di balun collegati in maniera da realizzare un rapporto di impedenza 4:1, generalmente possiede una larghezza di banda più elevata e può trattare potenze più elevate degli altri tipi di trasformatori (il termine balun è la forma abbreviata della frase "balanced to unbalanced").

Il trasformatore "C" impiega un unico avvolgimento bifilare con presa centrale. I conduttori sono sistemati fisicamente uno accanto all'altro così da realizzare una linea di trasmissione.

Non tutti i trasformatori a larga banda impiegano nuclei toroidali. Per esempio, il trasformatore "D", usato per l'adattamento dei circuiti d'ingresso a potenza relativamente bassa, impiega due avvolgimenti piatti spirali-formi, ciascuno stampato sulla superficie di un wafer ramato (kapton) oppure su un laminato in fibra di vetro a doppia ramatura. Per aumentare l'induttanza, il laminato viene serrato tra due placchette piatte di ferrite.

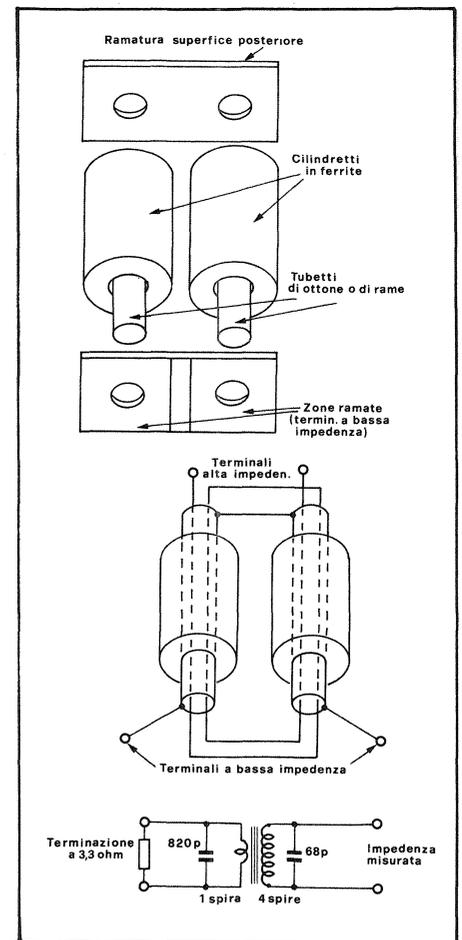
Il trasformatore "E" è un altro tipo usato per piccole potenze. È avvolto con due linee intrecciate inserite nei due fori di un nucleo balun per trasformatori d'antenna TV.

Anche il trasformatore "F" è basato sulla tecnica del balun con la differenza che impiega un pezzo di cavo coassiale avvolto su un toroide.

Ognuno di questi sei tipi di trasformatori richiede una costruzione particolare, possiede particolari caratteristiche circuitali e prestazioni che indubbiamente possono contribuire a migliorare il progetto di una apparecchiatura R.F.

Trasformatori a spira unica

Il trasformatore "A" prevede un avvolgimento a spira singola e a bassa impedenza; ciò limita il rapporto d'impedenza all'unità oppure al quadrato di piccoli numeri interi come: 1:1², 1:2², 1:3², 1:4² ecc. In questo caso, l'avvolgimento a bassa impedenza viene realizzato mediante due tubetti di rame (o di ottone) del diametro di 6,25 mm lunghi



f (MHz)	R _p (Ω)	X _p (Ω)
1,0	54,0	+j 1030
2,0	54,0	+j 3090
4,0	54,0	+j 5800
8,0	53,9	-j 300
16,0	53,1	-j 760
32,0	53,2	-j 600

Fig. 2 - Trasformatore che consente di ottenere un gran numero di rapporti di impedenza. Questo trasformatore (A), collegato al circuito di prova riportato in figura, possiede i valori di impedenza riportati nella tabella. I condensatori in parallelo servono a compensare l'induttanza dispersa e ad estendere la risposta verso le frequenze elevate. In figura sono indicati i particolari per la sua realizzazione e per il collegamento degli avvolgimenti.

mediamente 35 mm (figura 2). I tubi sono saldati alle loro estremità a dei pezzi di laminato uno dei quali serve come ponticello di cortocircuito.

Abbiamo così, da un lato, una laminatura in rame continua, dall'altro, divisa in due settori con funzione di capicorda per "l'avvolgimento" a bassa impedenza. L'avvolgimento ad alta impedenza è realizzato con del filo isolato

con buone caratteristiche R.F., infilato nei tubi. Il diametro del filo deve essere più grande possibile onde minimizzare le perdite r.f. e realizzare un mutuo accoppiamento più stretto possibile.

Con questa strutturazione, il coefficiente di accoppiamento diventa una funzione logaritmica del diametro e della lunghezza del tubo. L'accoppiamento tende infatti ad aumentare via via che aumenta la lunghezza e tende invece a diminuire via via che aumenta il diametro. Questo comportamento diventa un fattore molto importante nel caso di rapporti di impedenza elevati (36:1, e oltre), richiedenti coefficienti di accoppiamento di valore elevato.

La permeabilità iniziale dei tubetti in ferrite è determinata dalla minima induttanza necessaria alla più bassa frequenza di lavoro. Qualora si incontrassero difficoltà nel rintracciare questi tubetti di ferrite sarà possibile sostituirli sistemando uno accanto all'altro un certo numero di toroidi. Nella figura 2 sono riportati i valori tipici di impedenza, di questo tipo di trasformatore.

Le caratteristiche del trasformatore indicato con "B" in figura 1, sono, banda passante molto larga e possibilità di trattare potenze elevate. In questo caso, la linea di trasmissione, costituita da cavo coassiale, viene avvolta intor-

no ai toroidi, e ciò allo scopo di aumentare l'induttanza dell'avvolgimento (figura 3). Da notare che la calza schermante del cavo costituisce il conduttore per le correnti elevate, necessario per l'avvolgimento a bassa impedenza (per semplicità, su ogni toroide è indicata soltanto una spira). Impiegando il tipo di ferrite adatto e una corretta lunghezza della linea di trasmissione, questo trasformatore può essere impiegato anche nella banda VHF.

Il trasformatore "B" non ha bisogno di un balun separato per lavorare tra circuiti bilanciati e sbilanciati; questo però solo nel caso in cui le linee di trasmissione siano avvolte su nuclei separati e siano abbastanza lunghe da assicurare un adeguato isolamento tra ingresso e uscita.

Con toroidi normali (per esempio quelli prodotti dalla Indiam General F627-19-Q1), la lunghezza minima della linea, alla frequenza di 2 MHz, è circa 105 mm, mentre la lunghezza massima ammissibile a 30 MHz è circa 500 mm. Gli avvolgimenti in questo caso vengono realizzati con cavo coassiale miniatura da 25 Ω (per esempio, il tipo 260-4118-000 prodotto dalla Microdot).

Il trasformatore "B", chiuso con il valore di impedenza indicato, presenterà i valori di impedenza riportati nella

tabella. I condensatori esterni (figura 3) servono a compensare l'induttanza dispersa, e di conseguenza, estendono la risposta del circuito verso le frequenze elevate.

Un trasformatore a larga banda, a linea di trasmissione molto semplice è il trasformatore "C", formato da un solo avvolgimento bifilare con presa centrale (figura 4). Per ottenere il massimo fattore di accoppiamento, gli avvolgimenti sono molto addossati al nucleo e molto vicini l'uno all'altro.

Il trasformatore "D" viene invece impiegato in tutti quei casi nei quali è previsto un segnale d'ingresso a basso livello. In questo caso (figura 5), gli avvolgimenti sono fotoincisi su laminato a doppio rivestimento in rame (fibra di vetro con strato di rame da entrambe le facce). Lo spessore del dielettrico è in questo caso 0,2 mm e l'area occupata dall'avvolgimento è circa 156 mm². Per migliorare la risposta alle basse frequenze, su ciascun lato della piastra vengono cementate piastrine di ferrite con permeabilità compresa tra 2000 e 3000. Questo tipo di trasformatore può trattare livelli di potenze fino a 10 W e si presta ad essere realizzato in produzioni di serie.

In alcuni casi è possibile avvolgere su un unico nucleo due o più trasforma-

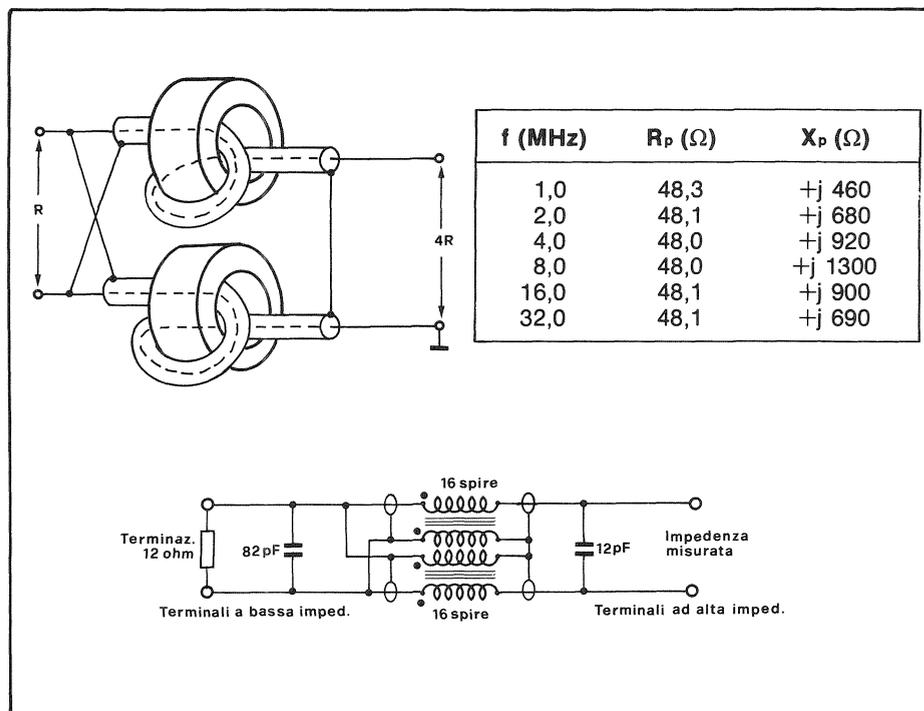


Fig. 3 - Il trasformatore "B" permette di avere notevole larghezza di banda e possibilità di trattare valori elevati di potenza; è formato da due balun. (Per semplicità, è indicata soltanto una spira del nucleo). Nella tabella sono riportati i valori di impedenza in corrispondenza dei valori di frequenza specificati. Tutti gli avvolgimenti sono realizzati in cavo coassiale e i condensatori esterni servono a compensare l'induttanza dispersa.

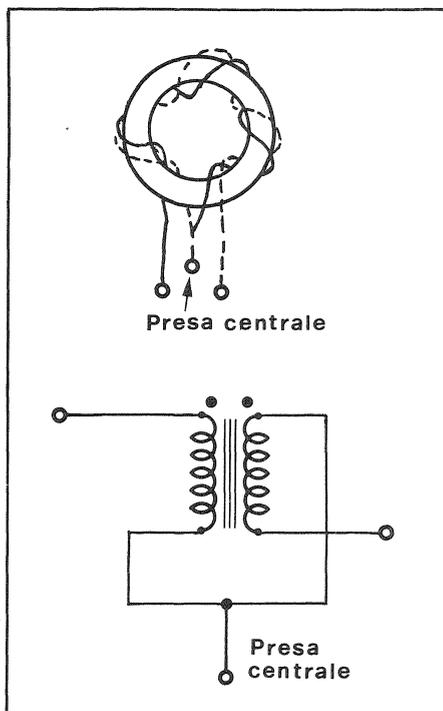


Fig. 4 - Il trasformatore a larga banda convenzionale "C" ha una presa centrale e due avvolgimenti. Per avere un buon accoppiamento entro tutta la banda delle frequenze in gioco, le spire devono trovarsi una accanto all'altra.

tori; ciò è possibile tutte le volte che le linee magnetiche dei vari flussi hanno percorsi indipendenti e il nucleo lavora nel suo tratto lineare. Un esempio di questo tipo di trasformatore è rappresentato in "E" (figure 1 e 6). Dalla parte dei terminali B B', il trasformatore è un tipo a balun, avvolto sullo stesso nucleo sul quale si trova il resto del trasformatore (figura 6).

Il nucleo impiegato è quello normalmente usato nei balun di antenna dei televisori. Le linee C e D sono formate da filo di rame smaltato da 0,31 mm (AWG 30). Queste linee hanno un valore caratteristico di impedenza (Z_0) di 32 Ω , valore quest'ultimo che si avvicina al valore ottimo calcolato di 25 Ω . Gli

avvolgimenti C e D sono in bifilare e avvolti sulla parte centrale del nucleo; gli avvolgimenti sono disposti uno sopra l'altro. L'avvolgimento del balun (e cioè la linea E) ha un flusso con direzione diversa da quello delle linee C e D; questo è, come già detto, il motivo per cui, esso può utilizzare lo stesso nucleo sul quale si trovano gli avvolgimenti C e D. È realizzato in bifilare, formato da filo smaltato con diametro da 0,27 mm (AWG 32) e presenta un'impedenza Z_0 di 60 Ω (il valore ottimo di impedenza è 50 Ω). Se l'avvolgimento E dovesse avere un valore di impedenza più basso, esso potrebbe essere realizzato con filo di diametro maggiore oppure intrecciando due o più coppie di filo insieme.

Per esempio, quattro coppie di filo da 0,19 mm (AWG 36) possono dare un valore di impedenza Z_0 di circa 18 Ω .

Il valore di induttanza dell'avvolgimento E deve corrispondere pressappoco alla somma delle induttanze degli avvolgimenti C e D. Il valore della reattanza in corrispondenza dei terminali B B' deve essere +j 200. Per ottenere questo valore in un trasformatore con rapporto di 4:1, C e D dovranno avere tre spire ciascuno mentre in un trasformatore con rapporto di 9:1 le spire dovranno essere 4.

Il trasformatore "F" è essenzialmente un balun a larga banda; contiene un terzo avvolgimento che serve a bilanciare nelle applicazioni con riferimento

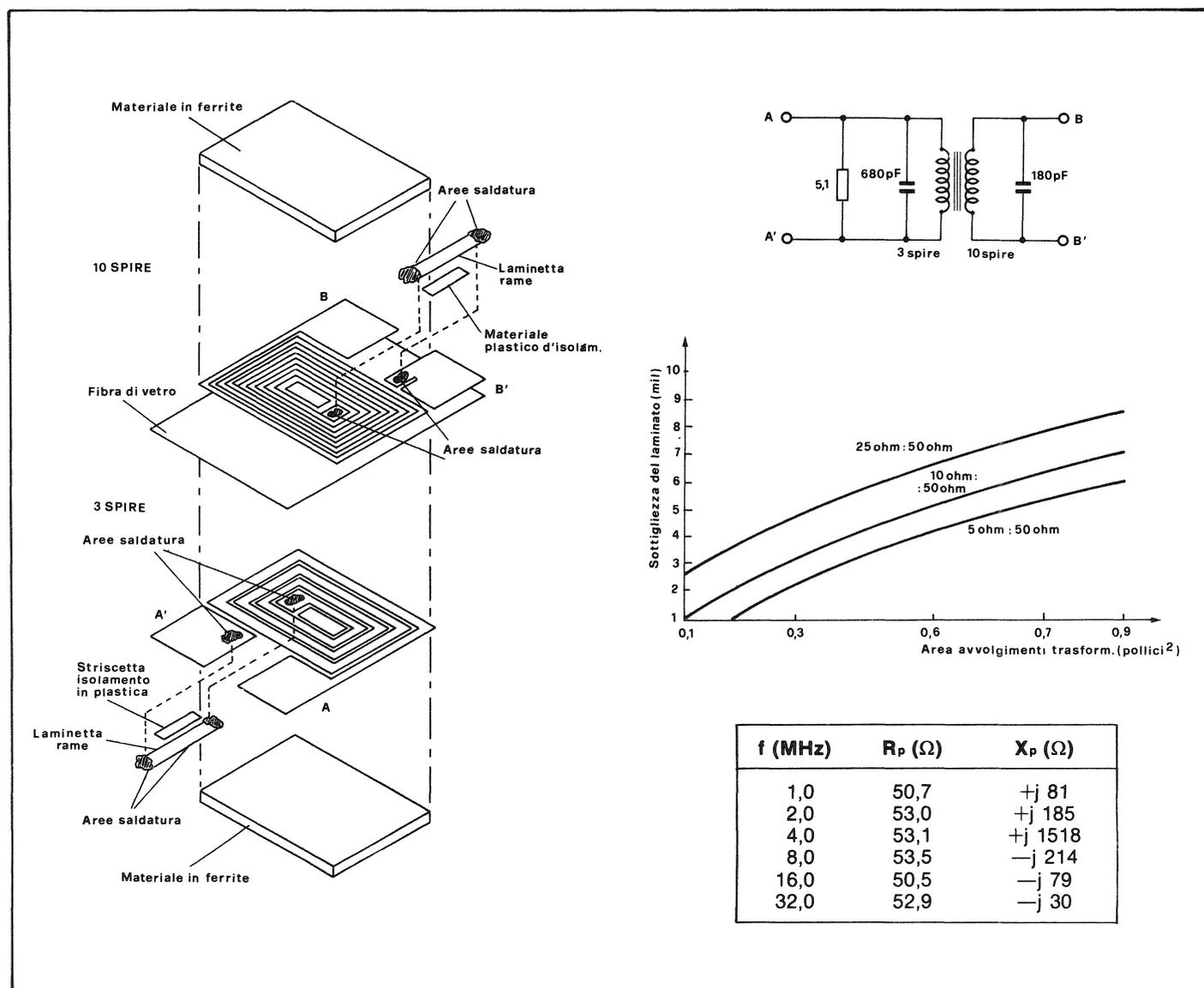
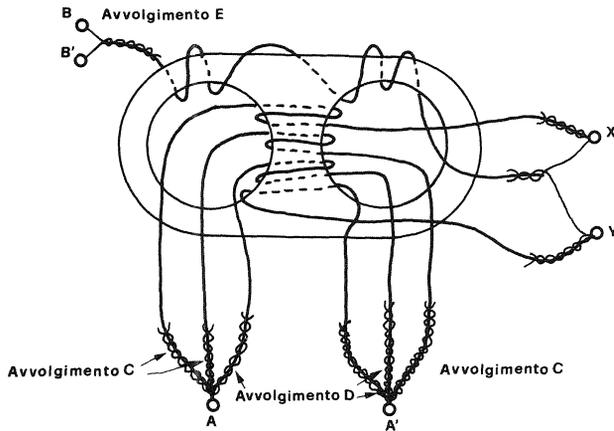


Fig. 5 - Il trasformatore "D", impiegante avvolgimenti stampati, è particolarmente adatto per applicazioni che prevedono segnali d'ingresso di basso livello. Oltre al circuito di misura e ai valori di impedenza relativi alle varie frequenze, sono indicate anche le curve tracciate sperimentalmente relative allo spessore del laminato in funzione all'area degli avvolgimenti del trasformatore per tipiche condizioni di adattamento di impedenza (mil = 0,0254 mm).



Impedenza ai terminali B		
f (MHz)	R _p (Ω)	X _p (Ω)
1,0	53,0	+j 185
2,0	52,6	+j 330
4,0	52,9	+j 430
8,0	53,1	+j 600
16,0	53,2	+j 750
32,0	53,5	+j 3060

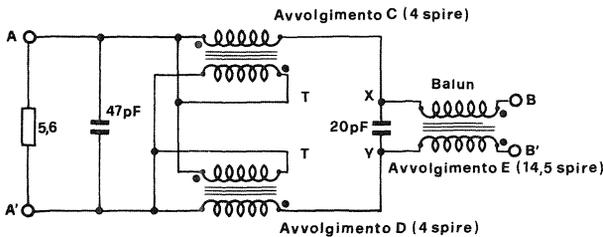


Fig. 6 - Se il "tracciato" dei flussi magnetici segue "strade" diverse e se non si verificano fenomeni di saturazione è possibile avvolgere su un unico nucleo due o più trasformatori. Questo trasformatore/balun (trasformatore E) è realizzato con coppie bifiliari di filo di rame smaltato attorcigliato. Per semplicità su ciascun avvolgimento sono state disegnate soltanto poche spire. Sono stati riportati anche i valori di impedenza in funzione della frequenza nonché un tipico circuito di misura.

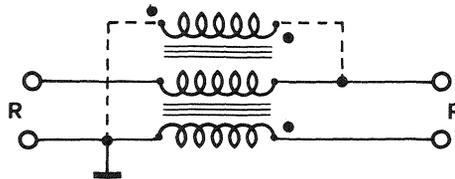


Fig. 7 - Il trasformatore "F", è un tipico balun a larga banda contiene anche un terzo avvolgimento (opzionale) che fornisce la corrente di magnetizzazione. Viene impiegato per bilanciare le tensioni tra i terminali a destra e massa in applicazioni con riferimento a massa.

a massa (figura 7), le tensioni presenti tra i terminali a destra e massa. Si deve sempre tener presente che il balun deve considerarsi l'elemento base di tutti i trasformatori a linea di trasmissione. Con i trasformatori a linea di trasmissione normalmente sono possibili soltanto rapporti di impedenza rappresentati da numeri interi. Ciò non esclude però che non siano possibili anche altri valori di rapporti, ovviamente a scapito della larghezza di banda.

Un'interessante soluzione è rappresentata da un toroide avvolto con cavo coassiale (per esempio, il Microdot 260-4118-000). In questo caso, la presa può essere effettuata in qualunque punto della calza schermante; siccome però l'impedenza di questo cavo è 25 Ω, l'impedenza Z_o ottima sarà ottenibile solo con un rapporto di impedenza 4:1. Rapporti di impedenza più bassi richiedono normalmente un valore più elevato del condensatore di compensazione; questo, com'è noto, è collegato tra il terminale ad impedenza elevata e massa. Per livelli di potenza intorno ai 500 W è consigliabile impiegare cavi coassiali con diametro più grande, e in questo caso, per avere una linea a bassa impedenza potrà essere necessario

mettere in parallelo due cavi coassiali con impedenza più elevata.

Separazione e somma di segnali r.f. mediante ibridi

Scopo finale di tutti i trasformatori trattati è poter lavorare assieme a componenti ibridi (accoppiatori), impiegati questi ultimi per sommare o separare segnali r.f. Lo scopo da raggiungere in questi casi è realizzare bassa attenuazione e minima interazione tra le varie sorgenti di segnale esterne (transistori di potenza) che alimentano l'ibrido.

In figura 8 sono riportati due tipici ibridi, entrambi in grado di separare oppure sommare segnali r.f. Normalmente hanno un'impedenza di 50 Ω e sono formati da trasformatori a larga banda e resistori di bilanciamento non induttivi, di basso valore. In normali condizioni di lavoro, questi resistori dissipano una potenza molto bassa. Solitamente, se tutte le uscite di un "partitore" fossero caricate alla stessa maniera, oppure se tutte le sorgenti che alimentano un "combinatore" risultassero in fase e avessero uguale ampiezza, attraverso i resistori di bilanciamento non scorrerebbe alcuna corren-

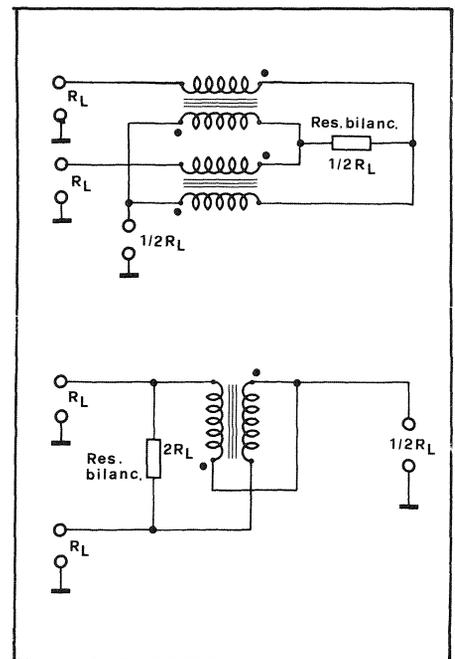


Fig. 8 - Sono due ibridi-base, impiegati per sommare oppure dividere potenze r.f. Sono formati da trasformatori a larga banda e da resistori r.f. di bilanciamento di basso valore. Se i livelli di potenza e i valori di impedenze sui morsetti R_L sono uguali, e se le tensioni sono in fase, nei resistori di bilanciamento non scorrerà corrente.

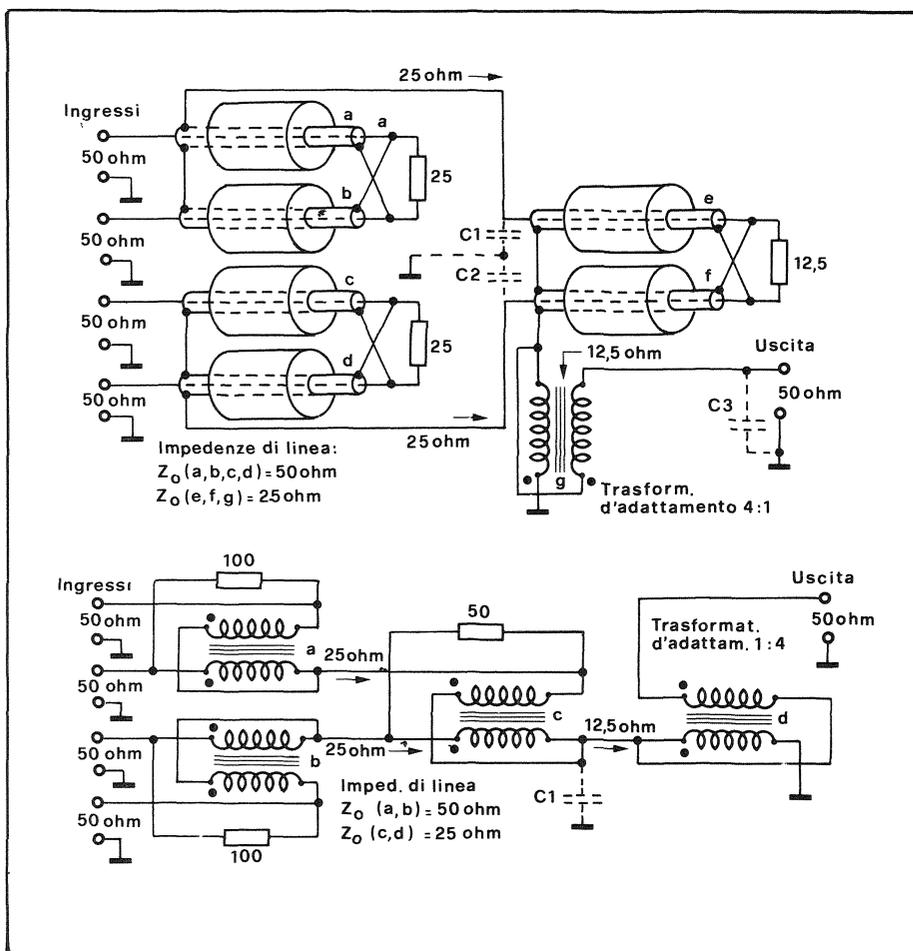


Fig. 9 - Tre ibridi a due ingressi collegati in cascata, sono in grado di sommare potenze, provenienti da quattro sorgenti r.f. Le connessioni in alto sono una semplice extrapolazione del circuito in alto di figura 8, mentre le connessioni in basso sono estensioni del circuito in basso di figura 8. In ogni caso, per adattare i carichi a 50 Ω , sono richiesti all'uscita trasformatori in salita. Queste reti-ibride possono anche servire per dividere potenze r.f.

Bibliografia

Electronic Design - 1981

Granberg, H., "Broadband Linear Power Amplifiers Using Push-Pull Transistors", AN-593, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1975.

Granberg, H., "Broadband Transformers and Power Combining Techniques", AN-749, Motorola Semiconductor Products Inc., 1976.

Granberg, H., "Get 300 Watts PEP Linear Across 2 to 30 MHz from this Push-Pull Amplifier", EB-27, Motorola Semiconductor Products Inc., 1978.

Granberg, H., "1-kW-Solid State Style", QST, Aprile-Maggio 1976.

Hejhall, R., "Solid State Linear Power Amplifier Design", Motorola Semiconductor Products Inc., 1972.

Hilbers, "Design of High-frequency Wideband Power Transformers". ECO 6907, Philips, Eindhoven, Olanda 1971. (Distribuito da Amperex Inc., Hicksville, NY).

Krauss e Allen, "Designing Toroidal Transformers to Optimize Wideband Performance", *Electronics*, Agosto 1973.

Lefferson, "Twisted Wire Transmission Line", *IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging*, Dicembre, 1971.

Lewis, "Notes on Low Impedance, High-Frequency Broadband Transformer Techniques", Collins Radio Co., Cedar Rapids, IA, Novembre 1964.

Special Issue on Solid State Transmitter Design, *Philips Telecommunications Review*, Novembre 1972.

Pitzalis, O., e Couse, T., "Broadband Transformer Design for RF Transistor Amplifiers, ECOM-2989, U.S. Army Electronics Command, Fort Monmouth, New Jersey, Luglio, 1968.

Ruthroff, "Some Broadband Transformers". *Proceedings of the IRE*, Agosto 1957.

te. I resistori sono comunque richiesti per offrire un basso ingresso alle onde stazionarie (R.O.S. oppure VSWR) nel caso in cui un transistor si dovesse guastare.

Se, per esempio, l'ibrido fosse impiegato per "dividere" potenze, e se la giunzione di un transistor si "aprisse", metà della potenza d'ingresso verrebbe dissipata nel resistore di bilanciamento mentre l'altra metà verrebbe applicata all'amplificatore ancora in funzione. A causa della presenza nei circuiti d'ingresso di un amplificatore a larga banda, di reti compensatrici guadagno/frequenza, nessun ingresso a 50 Ω verrà messo in corto qualora si verificasse il cortocircuito della giunzione base-emettitore.

Se l'ibrido serve invece a sommare potenze e se un solo amplificatore lavora, metà della sua potenza di uscita verrà dissipata nei resistori di bilanciamento, mentre l'altra metà verrà applicata al carico. L'amplificatore in funzione "vedrà" sempre il corretto valore dell'impedenza di carico (una caratteristica fondamentale per i combinatori ibridi), anche nel caso in cui al carico venisse applicata una potenza ridotta. I resistori di bilanciamento devono essere non induttivi e devono essere calcolati per dissipare il 25% della potenza complessiva trattata, a meno che non sia previsto qualche interruttore termico automatico che blocchi il funzionamento appena si verifica un repentino aumento di temperatura.

Il grado di isolamento ottenibile tra i terminali d'ingresso dipende dalla frequenza di lavoro e dalla strutturazione dell'ibrido. Valori tipici, validi per funzionamento compreso tra 2 e 30 MHz vanno da 30 a 40 dB. Per sommare due o più uscite, gli ibridi del tipo indicato in figura 8 possono essere collegati in cascata (figura 9).