

*Università degli Studi di Genova*  
*Facoltà di Ingegneria*



Dipartimento di Ingegneria Biofisica ed Elettronica (DIBE)

Tesi di laurea in  
Ingegneria Elettronica

## **VALUTAZIONE SPERIMENTALE DI BALUN A LARGA BANDA**

**RELATORE : Chiar.mo prof. Gian Luigi Gragnani**

**CORRELATORE : Ing. Marco Chiappe**

**ALLIEVO : Maurizio Carnevale**

Anno Accademico 2004-2005

## INDICE

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>1 LINEE DI TRASMISSIONE E ADATTAMENTO.....</b>	<b>4</b>
1.1 La condizione di adattamento.....	4
1.1.1 Adattamento d'impedenza mediante linea lunga $\lambda/4$ .....	5
1.1.2 Adattamento d'impedenza mediante stub.....	7
1.2 La condizione di bilanciamento.....	9
<b>2 STRUTTURE E MATERIALI DEI BALUN.....</b>	<b>12</b>
2.1 <i>Balun</i> tridimensionali.....	12
2.1.1 Bazooka <i>balun</i> .....	12
2.1.2 Linea a $\lambda/2$ .....	13
2.1.3 Dispositivo a trasformatore.....	14
2.1.4 <i>Balun</i> induttivo.....	15
2.1.5 <i>Balun</i> ad anelli di ferrite.....	15
2.2 <i>Balun</i> a circuito stampato.....	16
2.2.1 Giunzioni piane.....	16
2.2.2 Marchand <i>balun</i> .....	16
2.2.3 <i>Balun</i> a doppia Y.....	19
2.3 Guide d'onda.....	22
2.3.1 Coplanar waveguide.....	22
2.3.2 Slotline.....	25
2.3.3 Microstrip.....	26

<b>3 STATO DELL'ARTE.....</b>	<b>28</b>
3.1 CPW – Slotline.....	28
3.1.1 <i>Balun</i> a doppia Y.....	29
3.1.2 Marchand <i>balun</i> .....	31
3.2 CPWFGP – CPS.....	34
3.2.1 <i>Balun</i> a doppia Y.....	34
3.3 CPW – CPS.....	35
3.3.1 Giunzione piana.....	35
3.4 Microstrip – Slotline.....	36
3.4.1 Marchand <i>balun</i> .....	36
3.4.2 <i>Balun</i> a doppia Y.....	37
3.5 Microstrip – CPS.....	38
3.5.1 Giunzione piana.....	38
 <b>4 ANALISI SPERIMENTALE.....</b>	 <b>39</b>
4.1 Fase di progetto.....	40
4.1.1 Dimensionamento della CPW.....	40
4.1.2 Dimensionamento della Slotline.....	42
4.2 Realizzazione dei prototipi.....	44
4.2.1 Prototipo 1.....	44
4.2.2 Prototipo 2.....	45
4.2.3 Prototipo 3.....	47
4.2.4 Prototipo 4.....	47
4.2.5 Prototipo 5.....	49
4.2.6 Prototipo 6.....	52
4.2.7 Prototipo 7.....	53
4.2.8 Prototipo 8.....	53
4.2.9 Prototipo 9.....	54
4.2.10 Prototipo 10.....	54

<b>5 RISULTATI.....</b>	<b>58</b>
5.1 Loop di test.....	59
5.2 Marchand <i>balun</i> .....	61
5.3 Y <i>balun</i> : prototipi senza <i>air-bridge</i> .....	61
5.3.1 Prototipo 2.....	62
5.3.2 Prototipo 3.....	62
5.3.3 Prototipo 4.....	63
5.3.4 Prototipo 9.....	63
5.3.5 Prototipo 10.....	64
5.4 Y <i>balun</i> : prototipi con un <i>air-bridge</i> .....	64
5.4.1 Prototipo 2.....	64
5.4.2 Prototipo 3.....	65
5.4.3 Prototipo 4.....	65
5.4.8 Prototipo 9.....	66
5.4.9 Prototipo 10.....	66
5.5 Y <i>balun</i> : prototipi con due <i>air-bridges</i> .....	67
5.5.1 Prototipo 2.....	67
5.5.2 Prototipo 3.....	67
5.5.3 Prototipo 4.....	68
5.5.4 Prototipo 5.....	68
5.5.5 Prototipo 6.....	69
5.5.6 Prototipo 7.....	69
5.5.7 Prototipo 8.....	70
5.5.8 Prototipo 9.....	70
5.5.9 Prototipo 10.....	71
5.6 Confronti e valutazioni.....	71
5.6.1 Confronto Marchand <i>balun-balun</i> a doppia Y.....	71
5.6.2 Confronto dei prototipi senza <i>air-bridge</i> .....	72
5.6.3 Confronto dei prototipi con un <i>air-bridge</i> .....	73
5.6.4 Confronto dei prototipi con due <i>air-bridges</i> .....	74
5.7 Considerazioni sui risultati.....	76
5.8 Prototipo 10.....	79

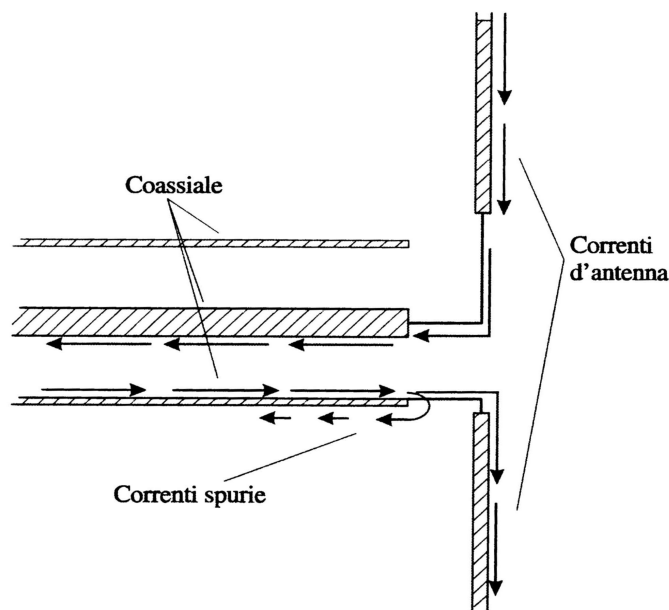
<b>6 CONCLUSIONI.....</b>	<b>81</b>
 <b>APPENDICE 1.....</b>	 <b>83</b>
1 Marchand <i>balun</i> .....	83
2 Y <i>balun</i> : Prototipi senza <i>air-bridge</i> .....	85
3 Y <i>balun</i> : Prototipi con un <i>air-bridge</i> .....	92
4 Y <i>balun</i> : Prototipi con due <i>air-bridges</i> .....	98
5 CPW.....	104
6 Cavi di collegamento.....	106
7 Prototipo 10.....	109
 <b>APPENDICE 2.....</b>	 <b>113</b>
1 Prototipo 1.....	113
2 Prototipo 2.....	114
3 Prototipo 3.....	115
4 Prototipo 4.....	116
5 Prototipo 5.....	117
6 Prototipo 6.....	118
7 Prototipo 7.....	119
8 Prototipo 8.....	120
9 Prototipo 9.....	121
10 Prototipo 10.....	122
11 Prototipo 11.....	123
 <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	 <b>124</b>

## INTRODUZIONE

Quando si usa un'antenna bilanciata (per esempio un dipolo, un'antenna a loop, o una a spirale), il problema di come alimentarla diventa rilevante. I principali sistemi di alimentazione sono sbilanciati come ad esempio il cavo coassiale che risulta anche il più utilizzato. Di conseguenza, per garantire un'alimentazione bilanciata si deve inserire un dispositivo chiamato *balun* (acronimo per *balanced-to-unbalanced converter*) tra l'elemento radiante e la sorgente sbilanciata.

Prendiamo, a titolo di esempio, il dipolo a mezz'onda alimentato al centro tramite un cavo coassiale. L'antenna costituisce un carico intrinsecamente bilanciato rispetto ad un ipotetico piano di simmetria perpendicolare ad essa nel suo punto centrale. Ora, se si vuole che l'antenna irradi secondo la forma prevista del lobo di radiazione, è necessario che venga rispettata l'uguaglianza delle correnti sui due bracci. Siccome, però, la linea di alimentazione non è costituita da due conduttori uguali, l'antenna non viene alimentata in modo bilanciato. Di fatto accade che le tensioni che spingono le correnti dal cavo all'antenna “vedono” nel punto di transizione una discontinuità assai diversa; mentre la totalità della corrente nel conduttore centrale viene sospinta nel corrispondente ramo d'antenna, quella che transita nel conduttore esterno, o più precisamente sulla superficie interna del conduttore, usa la superficie esterna per trovare un parziale ritorno. In conclusione si hanno correnti leggermente diverse nei due rami d'antenna e una radiazione spuria della corrente di ritorno, come mostrato in figura 1.

Poiché tutti i parametri elettrici dell'antenna dipendono essenzialmente dal campo elettromagnetico generato, la deformazione di quest'ultimo causa un funzionamento generale diverso da quello atteso. Si rende dunque necessario l'inserimento del *balun*.



**Fig.1 : Correnti volute e spurie in una connessione diretta sbilanciato/bilanciato**

Oggetto di questa tesi sono i *balun* a circuito stampato. Questi godono di particolare interesse grazie alla loro struttura planare che consente di poterli facilmente integrare nei sistemi a microonde e ad onde millimetriche ottenuti con la tecnologia dei circuiti stampati. Tali circuiti hanno la caratteristica di poter raggiungere larghezze di banda molto ampie. L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare e progettare alcuni tipi di *balun* in grado di funzionare a tali frequenze e soprattutto su una banda più ampia possibile.

Il lavoro è organizzato come segue

- Capitolo 1: Viene presentata la teoria necessaria allo studio delle linee di trasmissione.
- Capitolo 2: Si analizzano diversi tipi di materiali e di configurazioni strutturali di *balun*.
- Capitolo 3: Vengono presi in esame e confrontati alcuni dei più interessanti esempi di *balun* a circuito stampato reperibili in letteratura.

- Capitolo 4: Si descrive in dettaglio tutta la fase di progetto dei *balun* che successivamente sono stati prodotti ed analizzati.
- Capitolo 5: Vengono presentati e commentati i risultati sperimentali delle analisi effettuate sui prototipi di *balun* realizzati.
- Capitolo 6: Viene esposta una discussione critica dei risultati ottenuti e si delineano possibili sviluppi futuri.
- Appendice: È divisa in due sezioni: nella prima vi sono tutte le tabelle relative ai dati sperimentali ricavati in camera anecoica; nella seconda sono raccolte le foto ed i progetti dei prototipi realizzati con le relative schede dei principali parametri costruttivi.
- Bibliografia: Un'ampia e dettagliata bibliografia chiude tutto il lavoro di questa tesi a riprova dello spirito di ricerca e della serietà dell'impegno con i quali lo si è affrontato.



# 1 LINEE DI TRASMISSIONE E ADATTAMENTO

Le linee di trasmissione sono particolari guide d'onda che, dal punto di vista fisico, sono costituite da due conduttori separati da un dielettrico. La loro peculiarità è la possibilità di guidare onde di tipo TEM, che sono caratterizzate dall'avere i campi elettrico e magnetico perpendicolari alla direzione di propagazione e ciò permette di semplificare lo studio della propagazione del campo elettromagnetico. Il *balun* rappresenta l'elemento di transizione tra antenna e linea di alimentazione e da esso dipendono in larga misura le prestazioni dell'intero sistema ricetrasmittente. Esso deve anche garantire la condizione di adattamento tra linea e antenna, la quale implica, in caso di antenna trasmittente, che essa assorba totalmente (cioè senza riflessioni all'indietro) la potenza resa disponibile dalla linea di alimentazione e, in caso di antenna ricevente, che il ricevitore assorba totalmente la potenza resa disponibile all'uscita dell'antenna. In altri termini si può dire che se la linea non è adattata si generano onde stazionarie che è necessario eliminare perchè si verificano perdite di potenza utile, possibile distorsione di ampiezza e di fase del segnale, maggiori perdite per dissipazione termica nei conduttori ed eventualmente nel dielettrico.

## 1.1 La condizione di adattamento

L'adattamento consiste nell'eliminare l'onda riflessa e quindi l'onda stazionaria; in tal modo il generatore vede un'impedenza uguale all'impedenza caratteristica della linea. Questo può essere realizzato nei modi descritti di seguito.

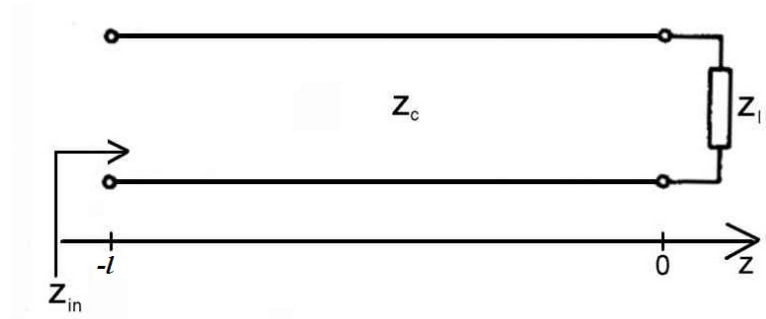


Fig. 1.1 : Linea di trasmissione

### 1.1.1 Adattamento d'impedenza mediante linea lunga $\lambda/4$

Si consideri la generica linea di trasmissione di fig.1.1 e ci si ponga nell'ipotesi di assenza di perdite, cioè

$$\alpha=0 \quad , \text{costante di attenuazione}$$

$$\gamma=\beta=\omega\sqrt{LC} \quad , \text{costante di propagazione}$$

e si prenda come origine del riferimento per l'asse  $z$  il punto in cui c'è il carico. In questo modo essendo

$$V(z)=V_{inc}\exp(-j\omega z)+V_{rfl}\exp(j\omega z)$$

$$I(z)=\frac{V_{inc}}{Z_c}\exp(-j\omega z)-\frac{V_{rfl}}{Z_c}\exp(j\omega z)$$

con  $V_{inc}$  e  $V_{rfl}$  tensioni incidenti e riflesse su  $Z_l$ , e  $Z_c$  impedenza caratteristica della linea, definita come

$$Z_c=\sqrt{\frac{L}{C}}$$

si ha che l'impedenza del carico  $Z_l$  vale

$$Z_l = \frac{V(z=0)}{I(z=0)} = \frac{V_{inc} + V_{rfl}}{V_{inc} - V_{rfl}} Z_c$$

mentre l'impedenza di ingresso  $Z_{in}$ , ad una distanza  $l$  dal carico, è data da

$$Z_{in} = \frac{V(z=-l)}{I(z=-l)} = Z_c \frac{Z_l \cos(\gamma l) + j Z_c \sin(\gamma l)}{Z_c \cos(\gamma l) + j Z_l \sin(\gamma l)} \quad (1)$$

che può essere riscritta ponendo in evidenza l'impedenza  $Z_l$

$$Z_{in} = Z_l \frac{\cos(\gamma l) + j \frac{Z_c}{Z_l} \sin(\gamma l)}{\cos(\gamma l) + j \frac{Z_l}{Z_c} \sin(\gamma l)}$$

Tale impedenza d'ingresso calcolata a distanza  $l = \lambda/4$  dal carico, dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del segnale che si propaga lungo la linea varrà

$$Z_{in} = Z_l \frac{\cos(\gamma \frac{\lambda}{4}) + j \frac{Z_c}{Z_l} \sin(\gamma \frac{\lambda}{4})}{\cos(\gamma \frac{\lambda}{4}) + j \frac{Z_l}{Z_c} \sin(\gamma \frac{\lambda}{4})}$$

La costante di propagazione  $\gamma$  è legata alla lunghezza d'onda del segnale dalla relazione

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \gamma \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$$

Andando poi a sostituire nell'espressione dell'impedenza di ingresso si ottiene

$$Z_{in}(z=\frac{\lambda}{4}) = Z_l \frac{j \frac{Z_c}{Z_l}}{\frac{j Z_l}{Z_c}} = \frac{Z_c^2}{Z_l}$$

In tal modo è possibile dunque adattare linea di alimentazione con impedenza  $Z_{in}$  e carico avente impedenza  $Z_l$  semplicemente inserendo un tratto di linea di lunghezza  $\lambda/4$ .

### 1.1.2 Adattamento d'impedenza mediante stub

Lo stub è un tratto di linea che si inserisce in parallelo alla linea principale e può essere aperto o in cortocircuito; la scelta di uno o dell'altro è essenzialmente dettata da esigenze di carattere tecnologico. L'impedenza d'ingresso dello stub è sempre di tipo reattivo, ossia puramente induttiva o capacitiva. Detta  $l_c$  la lunghezza della linea, e definito il coefficiente di riflessione

$$\rho = \frac{Z_l - Z_c}{Z_l + Z_c}$$

si ottiene nel caso di stub in cortocircuito ( $Z_l = 0$ )

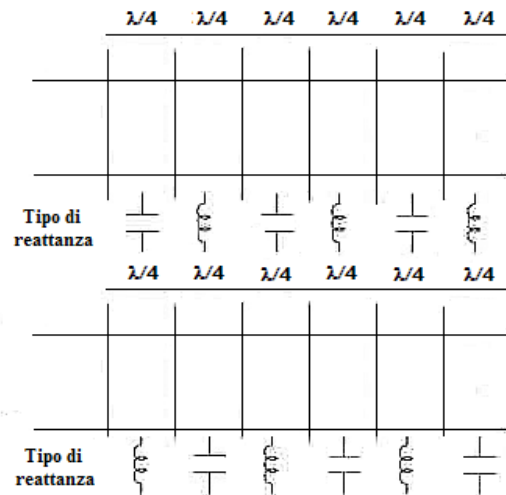
$$Z_{in} = j Z_c \tan(\gamma l_c) \quad e \quad \rho_{cc} = -1$$

mentre nel caso di stub in circuito aperto ( $Z_l = \infty$ )

$$Z_{in} = -j Z_c \cot(\gamma l_c) \quad e \quad \rho_{ca} = 1$$

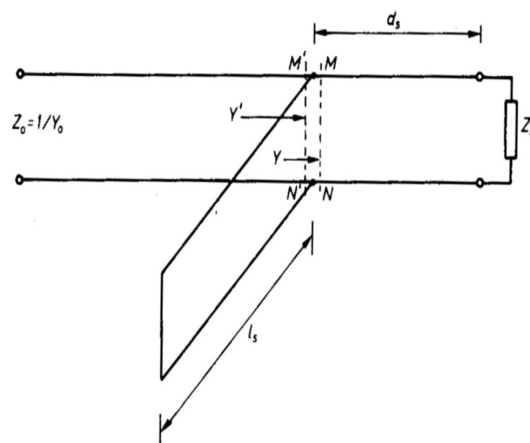
Questo vuol dire che nello stub si genera un'onda stazionaria tale che o la corrente o la tensione presenta uno zero in corrispondenza del carico, rispettivamente nel caso di circuito aperto o di cortocircuito. Quando la distanza dal carico supera  $\lambda/4$ , il segno della suscettività cambia: se l'impedenza era di tipo capacitivo diventa induttivo e viceversa, per assumere nuovamente quello di partenza dopo altri  $\lambda/4$ . La proprietà è illustrata

qualitativamente in figura 1.2.



**Fig. 1.2 : Evoluzione periodica della reattanza in una linea chiusa in cortocircuito (sopra) e a circuito aperto (sotto)**

Selezionando opportunamente la lunghezza dello stub, si può ottenere un dipolo con valore di reattanza desiderato. Prendiamo in esame il caso di stub a corto circuito e consideriamo la figura 1.3 che rappresenta la linea adattata.



**Fig. 1.3 : Linea adattata con stub a corto circuito**

Lo stub è inserito ad una distanza  $d_s$  dal carico, tale che l'ammettenza  $Y'$  vista verso il carico alla sezione  $M'-N'$ , immediatamente a sinistra del collegamento con lo stub abbia parte reale uguale all'ammettenza caratteristica della linea  $Y_o = 1/Z_o$ . Deve cioè essere

$$Y = Y_o + jB$$

con  $B$  suscettanza della linea (inversa della  $X$  cambiata di segno) alla sezione  $M-N$ . Inoltre la lunghezza dello stub  $l_s$  è tale da annullare la componente reattiva di  $Y$

$$Y_s = jB_s = -jB$$

Con queste condizioni, la linea risulta chiusa, alla sezione  $M'-N'$  su un'ammettenza

$$Y' = Y + Y_s = Y_o$$

e quindi pari alla sua ammettenza caratteristica realizzando così l'adattamento.

## 1.2 La condizione di bilanciamento

La condizione di bilanciamento elettrico si riferisce, in generale, a sistemi elettrici collegati al “mondo esterno” mediante tre conduttori, due dei quali hanno l'usuale ruolo di trasferimento di potenza (come di consueto per tutti i bipoli elettrici) mentre il terzo garantisce alcune importanti condizioni di simmetria elettrica volte ad evitare emissioni di potenza spurie in forma guidata o irradiata. Normalmente il conduttore di simmetria è detto “massa del sistema” perchè connesso con le parti metalliche esterne e, nei circuiti stampati, con la superficie non incisa dal circuito, cioè ricoperta uniformemente di rame (detta “piano di massa”). Un sistema elettrico passivo caratterizzato da una massa portata all'esterno si dice *bilanciato* quando l'impedenza tra i due morsetti e la massa è uguale.

Analogamente, se il sistema è attivo oltre all'uguaglianza delle impedenze interne devono essere uguali ed opposte le forze elettromotrici cosicchè la tensione tra i due conduttori attivi sia doppia. La connessione tra un generatore ed un utilizzatore, entrambi bilanciati, può essere effettuata con una linea a tre conduttori bilanciata ossia una linea nella quale l'impedenza caratteristica tra ognuno dei conduttori ed il terzo è la stessa. Nel caso di perfetto adattamento il conduttore di massa non è percorso da corrente; per questo motivo si potrebbe pensare di rimuoverlo, utilizzando due soli conduttori. Mancando tuttavia il terzo conduttore si può ancora parlare di connessione bilanciata solo se i due conduttori sono uguali e sufficientemente lontani da ostacoli esterni: il caso più comune di linea bilanciata a due conduttori è la linea bifilare (o piattina), oggi però in disuso. Il disadattamento per mancato bilanciamento diviene causa di radiazione spuria che provoca una significativa dissipazione di potenza e ancor peggio può creare problemi di natura elettromagnetica e indurre correnti impreviste su altri componenti metallici nell'ambiente circostante (anche sulle stesse antenne). Proprio per evitare questo fenomeno, la connessione viene effettuata in coassiale o in linea a circuito stampato. Il problema di simmetrizzare le correnti di alimentazione ossia di creare adattamento tra antenne bilanciate e linee sbilanciate, viene per l'appunto risolto tramite l'inserimento di un *balun*. La figura 1.4 illustra il circuito equivalente di un *balun* dove una sorgente  $E_s$ , con impedenza  $Z_s$ , viene connessa all'ingresso, e i carichi  $Z_L$ , che possono essere bilanciati o sbilanciati, sono collegati all'uscita. Le frecce tratteggiate verso terra indicano la possibile connessione dei carichi all'uscita del *balun*.

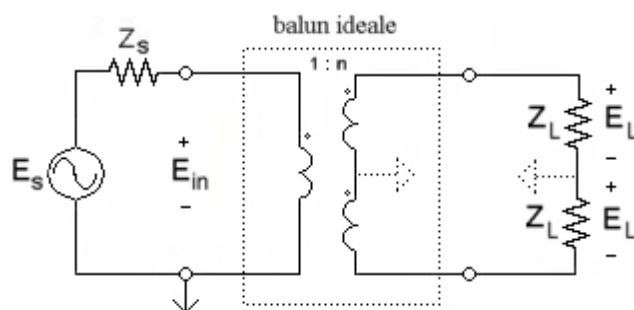


Fig. 1.4 : Circuito equivalente di un *balun*

Se il *balun* è ideale e le impedenze sono adattate tra sorgente e carico allora si può scrivere

$$P_{in} = P_{out}$$

quindi

$$\frac{E_{in}^2}{Z_S} = \frac{E_L^2}{Z_L} + \frac{E_L^2}{Z_L} \Rightarrow \frac{E_{in}^2}{Z_S} = 2 \frac{E_L^2}{Z_L}$$

con n rapporto di trasformazione, che modella gli accoppiamenti elettromagnetici, pari a

$$n = \frac{Z_S}{Z_L}$$



## 2 STRUTTURE E MATERIALI DEI BALUN

Esistono molte tipologie di *balun* che differiscono per struttura e linee di trasmissione e in conseguenza di ciò hanno caratteristiche tecniche e prestazionali differenti. In linea generale si può affermare che un *balun* deve garantire un ampio range di frequenze di lavoro, un basso coefficiente di riflessione, alimentazione bilanciata, una architettura della transizione che sia compatta, e che abbia allo stesso tempo poche perdite.

Dopo una rapida carrellata sui *balun* più classici, questo capitolo affronta l'analisi di quelli a circuito stampato prendendo in esame anche le principali tipologie di guide d'onda che possono essere impiegate.

### 2.1 *Balun* tridimensionali

Appartengono a questa categoria innumerevoli realizzazioni. Quelli di seguito sono una rassegna dei più diffusi.

#### 2.1.1 Bazooka *balun*

Consiste in un cilindro o manicotto da sistemare attorno al cavo coassiale cortocircuitato ad un quarto di lunghezza d'onda di distanza dal punto di alimentazione (fig. 2.1)

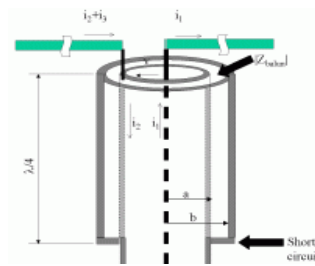


Fig. 2.1 : Bazooka *balun*

Viene creata in pratica una seconda linea di trasmissione coassiale dove il manicotto è la parte più esterna e il vecchio schermo del coassiale diventa il conduttore centrale del nuovo coassiale. Risulta così una linea di trasmissione senza perdita con impedenza infinita per la frequenza cui corrispondono i  $\lambda/4$ . Tale dispositivo avrà un buon funzionamento solo attorno alla frequenza di progetto  $\lambda$  e dunque la sua banda è piuttosto limitata.

### 2.1.2 Linea a $\lambda/2$

È un tratto di linea di trasmissione pari a  $\lambda/2$  collegato tra un reoforo e lo schermo della linea di alimentazione (fig. 2.2)

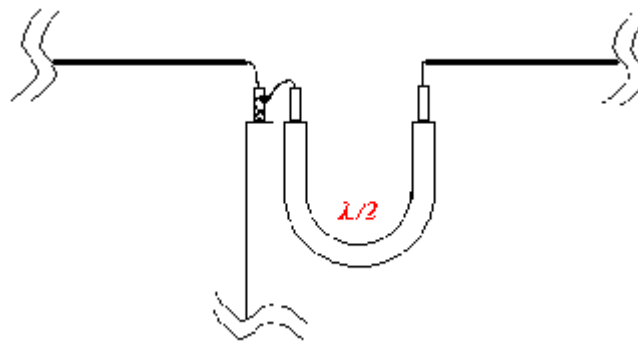


Fig. 2.2 : Schema di principio di un *balun* a  $\lambda/2$

In tal modo viene invertita la fase della tensione e della corrente rispetto a quelle presenti al suo ingresso. Questo tratto di cavo fa sì che la corrente, che sulla calza è uguale e contraria a quella presente sul centrale del cavo, arrivi sul braccio del dipolo invertita, e quindi in modulo e fase uguale a quella sull'altro braccio. Come per il bazooka *balun* le prestazioni

peggiorano allontanandosi dalla frequenza  $\lambda$  perché il funzionamento dipende dal fatto che il tratto di cavo sia della lunghezza elettrica giusta.

### 2.1.3 Dispositivo a trasformatore

All'interno di questa categoria di *balun*, il dispositivo a trasformatore è quello che presenta le caratteristiche più interessanti. Il funzionamento è semplice: la corrente di alimentazione dell'antenna, proveniente dalla linea, viene fatta circolare nell'avvolgimento primario di un trasformatore, mentre i secondari alimentano i due bracci del dipolo in modo che le correnti siano identiche tra di loro (fig. 2.3).

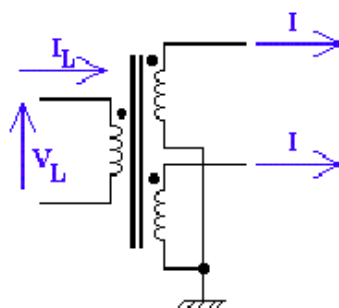


Fig. 2.3 : Schema di principio di un *balun* a trasformatore.

Il trasformatore è un dispositivo a larga banda, in quanto è in grado di funzionare correttamente in tutta l'estensione di banda. Tuttavia, se si utilizza un nucleo, è necessario limitare la potenza, riducendo di conseguenza il range di frequenze, a livelli tali da non causare effetti di surriscaldamento o di saturazione del nucleo stesso. Infatti, i primi tendono a degradarne rapidamente le proprietà magnetiche, mentre i secondi causano distorsione del segnale trasmesso, e quindi la comparsa di emissioni spurie ed indesiderate in quantità inaccettabile. Invece, un vantaggio dell'utilizzo di un trasformatore è dato dal fatto che per le note proprietà l'impedenza al primario viene trasformata al secondario secondo il quadrato del rapporto di trasformazione, per cui con questo tipo di *balun* si riesce ad ottenere, contemporaneamente alla simmetrizzazione, anche l'adattamento di impedenza.

#### 2.1.4 Balun induttivo

Si creano delle spire attorno al cavo di alimentazione in modo da ottenere un solenoide e quindi una induttanza  $L$  (fig. 2.4) la quale blocca le correnti spurie. Inserendo una bacchetta di materiale ferromagnetico, che ha la proprietà di concentrare le linee di forza magnetiche (permeabilità magnetica), l'effetto verrà ulteriormente amplificato.

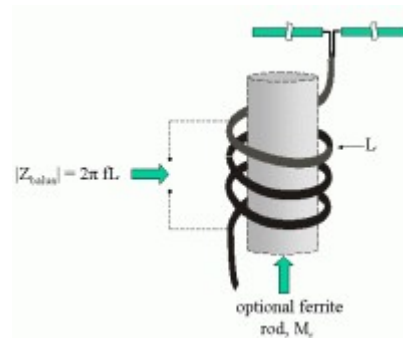


Fig. 2.4 : Balun induttivo

#### 2.1.5 Balun ad anelli di ferrite

È semplicemente formato da un insieme di anelli di ferrite ad alta permeabilità posizionati nei pressi del punto di alimentazione (fig. 2.5) che, grazie alla forte induttanza, sono in grado di bloccare lo scorrimento delle correnti spurie

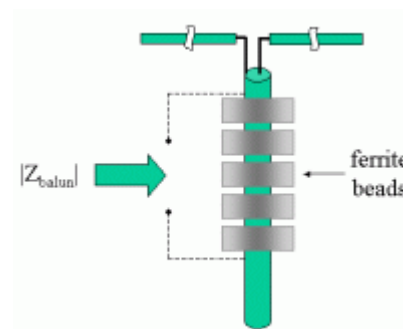


Fig. 2.5 Balun ad anelli di ferrite

## 2.2 *Balun* a circuito stampato

Lo sviluppo dei *balun* a circuito stampato ha avuto inizio nel 1969 quando venne realizzata la prima transizione tra microstrip e slotline ad opera di S.B.Cohn [14]. Da allora sono state proposte numerose differenti configurazioni. Questa categoria di *balun* viene realizzata con la tecnica dei circuiti stampati, ossia per incisione di uno strato metallico su un supporto dielettrico, oppure per deposizione su uno strato dielettrico nel caso di realizzazione su supporti ceramici (ad esempio allumina). Suscitano notevole interesse per via delle dimensioni ridotte e perchè sono in grado di lavorare su un range di frequenze molto ampio.

Diverse possono essere le strutture dei *balun* a circuito stampato: giunzioni piane, Marchand *balun*, *balun* a doppia Y.

### 2.2.1 Giunzioni piane

Sono delle reti nelle quali si costruiscono dei percorsi di diversa lunghezza per le linee di trasmissione in modo da sfasare di  $\lambda/2$  il campo elettrico di un braccio rispetto all'altro. Questo tipo di *balun* ha però banda molto stretta.

### 2.2.2 Marchand *balun*

Consistono di sezioni di linea di diversa impedenza  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  da settare per ottenere la condizione di adattamento tra l'ingresso e l'uscita. Tali sezioni si intersecano ad angolo retto e hanno le terminazioni in circuito aperto o corto circuito che si estendono circa un quarto di lunghezza d'onda oltre il centro del *balun* (fig. 2.6). Il rapporto di trasformazione modella l'accoppiamento elettromagnetico fra le due linee di ingresso e di uscita.

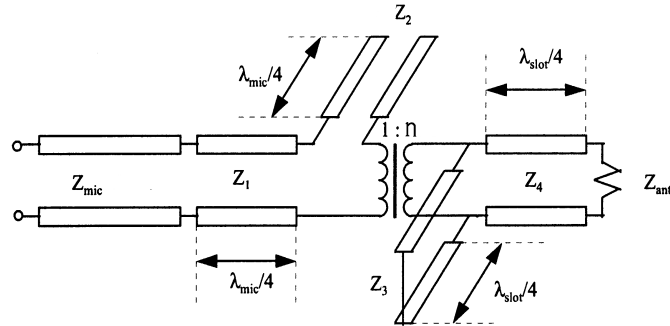


Fig. 2.6 : Circuito equivalente di un generico Marchand *balun*

Sono reti passa-banda.

Un'esatta sintesi dei Marchand *balun* è presentata da Cloete, in [10], dove tali dispositivi vengono presentati come linee trasmissive TEM senza perdite. I circuiti equivalenti dal secondo al quarto ordine sono mostrati in figura 2.7.

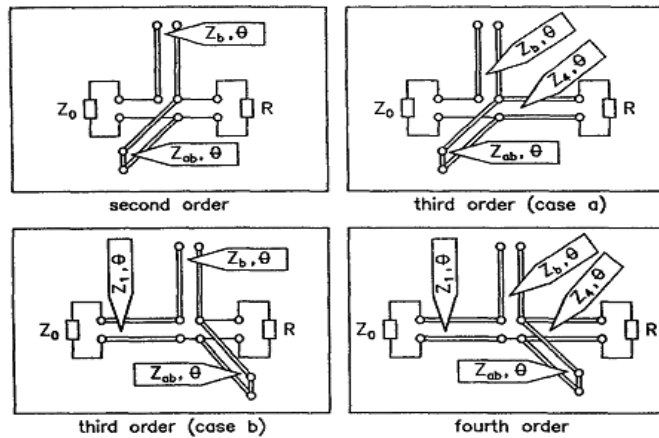


Fig. 2.7 Circuiti equivalenti dei Marchand *balun*

In generale, lo svantaggio dell'approccio introdotto da Cloete è che i suoi risultati non sono presentati in forme semplici, e ad essi non si arriva tramite le relazioni generali per le reti TEM. Un approccio diverso, che permette di ottenere una semplice espressione per la progettazione dei Marchand *balun*, è stata presentata da Trifunović e Jokanović in [8], dove tutte le strutture di figura 2.7 sono considerate come reti senza perdite. Tale studio parte dal calcolo del modulo del coefficiente di riflessione  $\rho$  per un filtro passa banda con risposta di Chebyshev, per arrivare alla formulazione di una espressione generale che

caratterizza i Marchand *balun*. Tutte le reti di figura 2.7 presentano, nell'espressione di  $|p|$  un numero di zeri pari all'ordine del Marchand *balun*, mentre il numero di massimi è pari all'ordine meno uno; inoltre, sia gli zeri che i massimi sono simmetrici rispetto al valore di  $\theta_0 = \pi/2$  ( $\theta$  è la lunghezza elettrica della linea). Dall'espressione trovata da Trifunović e Jokanović, si passa inoltre alla relazione tra la frequenza di taglio inferiore  $f_l$ , la frequenza di taglio superiore  $f_u$  (frequenze di taglio del filtro passa banda) e la lunghezza elettrica  $\theta_c$  relativa al limite inferiore della banda. Difatti assumendo che le linee siano non dispersive (  $\lambda_o/\lambda_g = \text{const}$  , essendo  $\lambda_o$  la lunghezza d'onda nel vuoto e  $\lambda_g$  la lunghezza d'onda nella guida d'onda ) e tenendo conto che le lunghezze fisiche delle linee di trasmissione che formano il *balun* sono  $l = \lambda_g/4$ , si può calcolare la lunghezza elettrica  $\theta_c$  relativa al centro della banda  $\theta_o = \pi/2$

$$\theta_c = \frac{\pi}{B+1} \quad , B = \frac{f_u}{f_l}$$

Questa trattazione comprende anche l'analisi dell'espressione generale nei vari casi particolari, cioè con Marchand *balun* del secondo, terzo e quarto ordine. Il vantaggio di tale analisi è che porta ad un'espressione generale in forma semplice, dalla quale è possibile calcolare le impedenze e le diverse larghezze di banda. Il Marchand *balun* del secondo ordine è quello più diffuso e ha impedenza di carico uguale all'impedenza della linea bilanciata in corto circuito. Per questo tipo di *balun* è stato trovato che l'espressione generale raggiunge un buon grado di approssimazione anche durante misure pratiche. Da notare che c'è irraggiamento quando le lunghezze elettriche delle linee cortocircuitate e in circuito aperto sono maggiori di  $\frac{\pi}{4}$  .

### 2.2.3 Balun a doppia Y

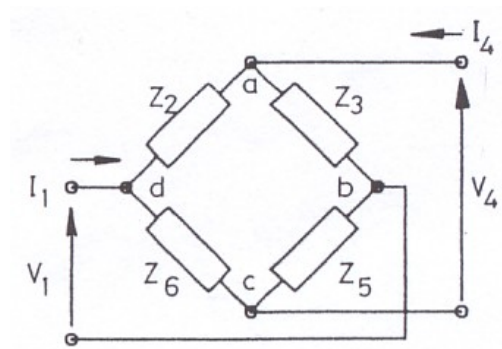
È una giunzione a Y su sei porte, 3 bilanciate e 3 sbilanciate poste alternativamente attorno al centro della struttura. Per avere una trasmissione perfetta tra una coppia di porte bilanciata-sbilanciata le linee associate dovranno avere coefficienti di riflessione con fasi opposte e per questo dovranno essere una cortocircuitata e l'altra dovrà terminare con un circuito aperto. Le lunghezze elettriche dal centro della giunzione alle terminazioni devono essere uguali e quindi:

$$\beta_{bal} l_{bal} = \beta_{unbal} l_{unbal}$$

dove  $\beta_{bal}$ ,  $\beta_{unbal}$  sono le costanti di fase e le  $l_{bal}$ ,  $l_{unbal}$  sono le lunghezze fisiche rispettivamente delle linee bilanciata e sbilanciata. Sperimentalmente si è visto che per evitare effetti radiativi si dovrebbe poi rispettare la relazione

$$2l \leq \frac{\lambda}{4}$$

Sono reti teoricamente passa-tutto e il circuito equivalente è quello di fig. 2.8:



**Fig. 2.8 : Circuito equivalente di un Y balun**

Se il ponte è simmetrico allora  $Z_2=Z_5=Z_a$  ,  $Z_6=Z_3=Z_b$  e la matrice di impedenza si ricaverà come di seguito:



$$\begin{aligned}
 Z_{11} &= \frac{V_1}{I_1}, \quad I_4=0 & \Rightarrow & \quad Z_{11} = \frac{Z_a + Z_b}{2} = Z_A \\
 Z_{22} &= \frac{V_4}{I_4}, \quad I_1=0 & & \quad Z_{22} = Z_{11} = Z_A \quad (\text{il ponte è simmetrico}) \\
 Z_{12} &= \frac{V_1}{I_4}, \quad I_1=0 & \Rightarrow & \quad Z_{12} = \frac{Z_b - Z_a}{2} = Z_B \\
 Z_{21} &= \frac{V_4}{I_1}, \quad I_4=0 & & \quad Z_{21} = Z_{12} = Z_B
 \end{aligned}$$

da cui

$$Z = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B \\ Z_B & Z_A \end{bmatrix}$$

Se c'è un carico  $Z_0$  sulla porta 4 allora la  $Z_{in}$  si ricaverà dal sistema

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B \\ Z_B & Z_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = Z_A - \frac{Z_B^2}{Z_0 + Z_A}$$

Se  $Z_a = j x_a$  e  $Z_b = -j x_b$  allora si avrà

$$Z_A = j \frac{(x_a - x_b)}{2}$$

$$Z_B = -j \frac{(x_a + x_b)}{2}$$

$$Z_{in} = j \frac{x_a - x_b}{2} + \frac{Z_0 \left( \frac{x_a + x_b}{2} \right)^2 - j \left( \frac{x_a - x_b}{2} \right) \left( \frac{x_a - x_b}{2} \right)^2}{\left( \frac{x_a - x_b}{2} \right)^2 + (Z_0^2 - x_a x_b)}$$

e quindi

$$X_{in} = \Im \{ Z_{in} \} = \frac{1}{2Z_0} (x_a - x_b) (Z_0 - R_{in}) \quad (1)$$

$$R_{in} = \Re \{ Z_{in} \} = Z_0 \frac{\left( \frac{x_a + x_b}{2} \right)^2}{\left( \frac{x_a + x_b}{2} \right)^2 + (Z_0^2 - x_a x_b)} \quad (2)$$

Se poi

$$x_a x_b = Z_0^2 \quad (3)$$

cioè

$$Z_a Z_b = Z_0^2$$

allora dalla (2)

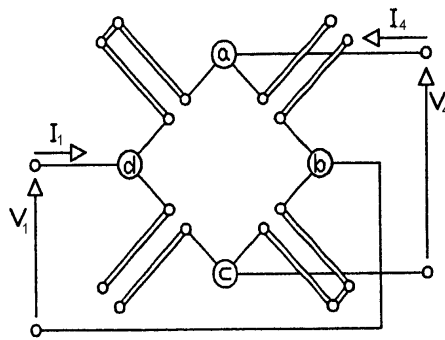
$$R_{in} = Z_0$$

ossia l'impedenza di ingresso (alla porta 1) è uguale a quella di uscita (alla porta 4) e quindi il carico risulta adattato, ed in più dalla (1)

$$X_{in} = 0$$

cioè è puramente reale.

La (3) è verificata quando le linee del ponte sono alternativamente terminate con un corto circuito e un circuito aperto e sono tutte di uguale lunghezza (fig. 2.9)



**Fig. 2.9 : Circuito equivalente di un Y balun adattato**

## 2.3 Guide d'onda

In questo paragrafo verrà sviluppata una panoramica dei vari tipi di linee di trasmissione coplanari, linee cioè che hanno i conduttori tutti sullo stesso piano, in particolare nella superficie superiore di uno strato dielettrico. Queste linee trasmissive includono le Coplanar Waveguide (CPW), le CPW<sub>FGP</sub>, le slotline, le Coplanar Strip (CPS) e le microstrip.

### 2.3.1 Coplanar waveguide

La CPW consiste in una striscia conduttrice centrale e in due piani di terra paralleli ad essa (sulla stessa superficie del dielettrico) come mostrato in figura 2.10. Il modo di propagazione non è un TEM puro per via del fatto che esiste una componente longitudinale del campo magnetico. Si può comunque usare l'approssimazione quasi-TEM perchè la componente trasversale è comunque predominante.

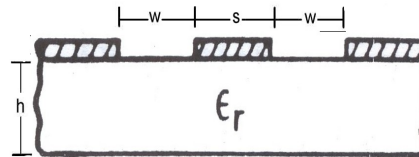


Fig. 2.10 : Coplanar waveguide

I parametri caratteristici delle CPW possono essere definiti come di seguito [1].

L'impedenza caratteristica tenendo conto dello spessore  $t$  del conduttore metallico è data da:

$$Z_o = \frac{30 \pi K(k')}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k)}$$

dove il rapporto  $\frac{K(k)}{K'(k)}$  è approssimabile a:

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln\left(2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}}\right)} \quad , \text{ per } 0 \leq k \leq 0.7$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} \ln\left(2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right) \quad , \text{ per } 0.7 \leq k \leq 1$$

Con  $K(k)$  integrale ellittico completo del primo tipo e

$$K'(k) = K(k') \quad , \quad k' = \sqrt{1-k^2}$$

$$k = \frac{a}{b} \quad , \quad \begin{aligned} a &= \frac{S}{2} \\ b &= \frac{S}{2} + W \end{aligned}$$

essendo  $a$  e  $b$  le dimensioni planari della CPW.

Per quanto riguarda la costante dielettrica efficace, si ha:

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \left\{ \tanh\left[1.785 \log\left(\frac{h}{W}\right) + 1.75\right] + \frac{kW}{h} [0.04 - 0.7k + 0.01(1 - 0.1\varepsilon_r)(0.25 + k)] \right\}$$

$$\varepsilon_{re}^t = \varepsilon_{re} - \frac{0.7(\varepsilon_{re} - 1) \frac{t}{W}}{\frac{K(k)}{K'(k)} + 0.7 \frac{t}{W}}$$

Le CPW hanno buone proprietà quali bassa dispersione, bassa radiazione, semplicità costruttiva di collegamenti sia in serie sia in parallelo. Il principale problema ad esse connesso è l'eccitamento del modo parassita slotline (modo dispari) nei circuiti non simmetrici, come ad esempio nelle giunzioni a T, dovuto al percorso di diversa lunghezza che deve percorrere la corrente magnetica (campo elettrico) nelle slot adiacenti. Questo modo parassita irradia e deve essere eliminato o comunque ridotto. Il modo usuale di risolvere tale problema è quello di inserire uno o più *air bridge* (fig. 2.11). Questo è un

componente passivo ed è semplicemente un ponte metallico che permette di connettere due linee trasmissive senza creare corti circuiti. Nel caso della CPW permette di collegare i due piani di massa garantendo di tenerli allo stesso potenziale senza cortocircuitarli sulla strip centrale. Tali dispositivi sono molto efficaci però costosi da realizzare.

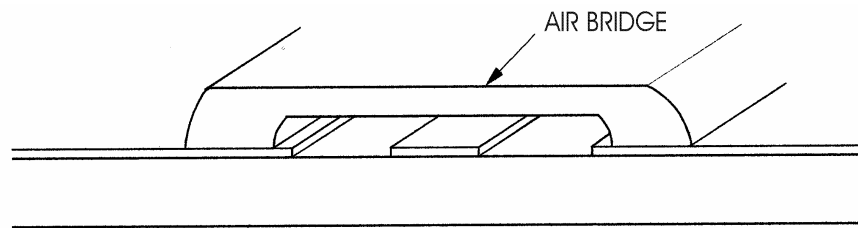


Fig. 2.11 : Esempio di air-bridge

Un'altra soluzione studiata da Omar e Chow in [4] è quello che prevede di inserire ad una distanza dell'ordine dello spessore del dielettrico della CPW un piano di massa superiore e/o inferiore. Questi piani generano un numero infinito di correnti magnetiche immagine di quelle unidirezionali create dal modo slotline aventi stesse ampiezza e direzione di queste ultime. In questo modo aumenta l'impedenza magnetica del modo slotline, sostanzialmente eliminandolo. Viceversa i campi dovuti al modo CPW (pari) dominante generato da correnti magnetiche opposte viene interessato lievemente. Altri vantaggi connessi con questo tipo di soluzione sono riduzione dell'impedenza caratteristica e aumento della resistenza meccanica del substrato. Per contro si verifica una perdita di potenza del modo dominante CPW. Dagli studi fatti sembra che il piano inferiore sia più efficace di quello superiore. L'uso di questo sistema è valido sostituto degli *air bridges*, soprattutto alle basse frequenze, anche se è punto critico la distanza tra CPW e i piani di massa.

Una variante alla CPW è la CPW<sub>FGP</sub> (Coplanar Waveguide with Ground Plane) nella quale il piano di massa risulta finito (fig. 2.12).

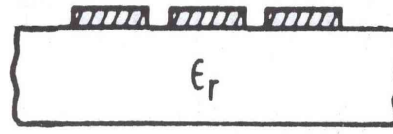


Fig. 2.12 : Coplanar waveguide FGP

### 2.3.2 Slotline

La configurazione base della slotline è mostrata in figura 2.13. Essa consiste in uno strato dielettrico con una stretta scanalatura scavata nello strato metallico posto su una delle due superfici del dielettrico, mentre l'altra superficie è priva di metallizzazione. La geometria planare ben si presta per essere utilizzata nei circuiti a microonde integrati. In una slotline la componente predominante del campo elettrico si propaga con orientazione ortogonale all'asse di simmetria della slot stessa. Il modo di propagazione è non TEM, ma nella maggior parte dei casi è approssimabile ad un modo TE. Comunque, a differenza della guide d'onda convenzionali, non è presente alcuna frequenza di taglio inferiore, perché la slotline è una struttura formata da due conduttori.

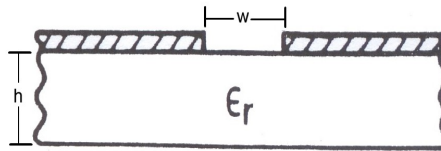


Fig. 2.13 : Slotline

Il calcolo dell'impedenza caratteristica di una slotline [1], viene svolto in due casi separati. Nel primo caso si ha:  $0.02 \leq W/h \leq 0.2$  e l'impedenza caratteristica risulta essere la seguente:

$$Z_o = 72.62 - 35.19 \ln \epsilon_r + 50 \frac{(W/h - 0.02)(W/h - 0.1)}{W/h} + \ln\left(\frac{W}{h} * 10^2\right)(44.28 - 19.58 \ln \epsilon_r) - [0.32 \ln \epsilon_r - 0.11 + \frac{W}{h}(1.07 \ln \epsilon_r + 1.44)] * (11.4 - 6.07 \ln \epsilon_r - \frac{h}{\lambda_o} * 10^2)^2$$

Nel secondo caso si ha  $0.2 \leq W/h \leq 1$  e l'impedenza caratteristica risulta:

$$Z_o = 113.19 - 53.55 \ln \varepsilon_r + 1.25 \frac{W}{h} (114.59 - 51.88 \ln \varepsilon_r) + 20(W/h - 0.2)(1 - W/h) \\ - [0.15 + 0.23 \ln \varepsilon_r + \frac{W}{h}(-0.79 + 2.07 \ln \varepsilon_r)] * [10.25 - 5 \ln \varepsilon_r + \frac{W}{h}(2.1 - 1.42 \ln \varepsilon_r) - \frac{h}{\lambda_o} * 10^2]^2$$

Anche nel calcolo del rapporto  $\lambda_s/\lambda_o$  si considerano due casi:

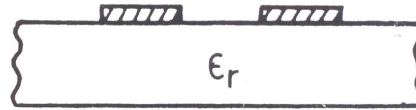
1)  $0.02 \leq W/h \leq 0.2$

$$\lambda_s/\lambda_o = 0.923 - 0.448 \ln \varepsilon_r + 0.2 \frac{W}{h} - (0.29 \frac{W}{h} + 0.047) \ln(\frac{h}{\lambda_o} * 10^2)$$

2)  $0.2 \leq W/h \leq 1$

$$\lambda_s/\lambda_o = 0.987 - 0.483 \ln \varepsilon_r + \frac{W}{h} (0.111 - 0.0022 \varepsilon_r) - (0.121 + 0.094 \frac{W}{h} - 0.0032 \varepsilon_r) \ln(\frac{h}{\lambda_o} * 10^2)$$

Può essere considerata una variante della slotline la CPS ossia la Coplanar Stripline che a differenza della precedente ha i due piani di propagazione di dimensione finita, come si può vedere in figura 2.14. Può anche essere vista come complementare della CPW.



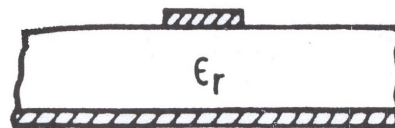
**Fig. 2.14 : Coplanar Stripline**

Il vantaggio di usare CPW o CPS rispetto alle slotline è che la realizzazione di componenti concentrati (attivi o passivi), in serie o in parallelo, risulta più facile.

### 2.3.3 Microstrip

Le microstrip consistono in una stretta strip conduttrice depositata su un dielettrico avente sulla faccia opposta un piano metallico. Come si può vedere in figura 2.15 la sezione trasversale della linea non sia omogenea perchè la struttura è aperta sul lato superiore (c'è

una interfaccia tra dielettrico e aria) e questo comporta che il modo di propagazione fondamentale non è rigorosamente TEM; in realtà, nelle condizioni pratiche di impiego, le componenti longitudinali del campo elettrico e del campo magnetico sono molto piccole rispetto alle altre e si usa la cosiddetta “approssimazione quasi-TEM”. In questo ambito non si può esprimere in forma analitica l’impedenza caratteristica, ma si possono usare formule approssimate.



**Fig. 2.15 : Microstrip**

Per contro questa struttura aperta è vantaggiosa quando tali linee sono inserite in circuiti stampati, poiché può essere modificata e perfezionata anche dopo che il circuito è stato fabbricato.



### 3 STATO DELL'ARTE

In questo capitolo viene presentato uno studio mirato a confrontare varie possibili realizzazioni di *balun* a circuito stampato con particolare attenzione a parametri quali larghezza di banda, ROS e insertion loss. Viene sviluppata una panoramica dei *balun* più interessanti fin qui realizzati prendendo in considerazione le principali tipologie di rete per ogni combinazione di materiali adoperati.

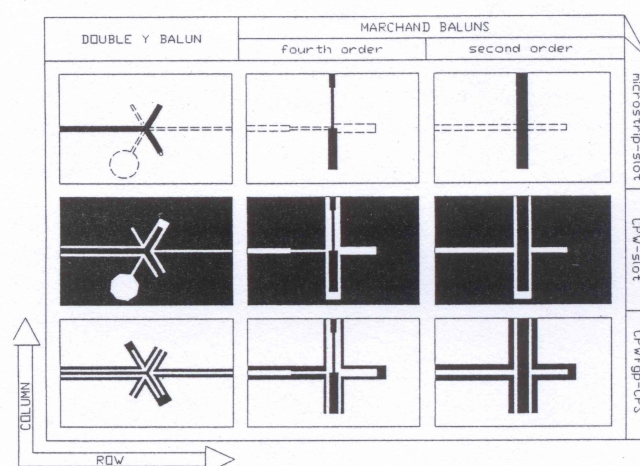


Fig. 3.1 : Classificazione dei *balun* a circuito stampato

#### 3.1 CPW – Slotline

Con la transizione CPW–slotline sono state realizzate diverse strutture, con lo scopo di raggiungere prestazioni sempre migliori combinando in diversi modi le linee trasmissive. Si sono perciò realizzati semplici ed originali circuiti, soprattutto per quanto riguarda la

realizzazione su più piani. La transizione CPW–slotline è un fondamentale componente passivo nei circuiti MMIC; le proprietà di tale transizione sono state argomento di interesse di numerosi studi, nei quali era necessario disporre di una buona transizione per non degradare le prestazioni dei dispositivi, che potevano essere generici circuiti a microonde ma anche antenne. La ricerca di una nuova configurazione tra CPW e slotline che presentasse larghezze di banda sempre superiori è stata oggetto di molti studi e ancora oggi suscita interesse.

### 3.1.1 Balun a doppia Y

Consideriamo la giunzione a doppia Y di figura 3.2. Come visto, CPW e Slotline non supportano una propagazione di tipo TEM ma si può usare l'approssimazione quasi TEM e quindi considerarli come due linee trasmissive. Problema fondamentale legato alle linee di trasmissione, si è detto, è quello dell'adattamento. Secondo la teoria presentata in [13], per mantenere un buon adattamento su un ampio range di frequenze, tutti gli stub e le linee devono essere della stessa lunghezza; però tale condizione può non essere valida, viste le caratteristiche dispersive differenti tra slotline e CPW.

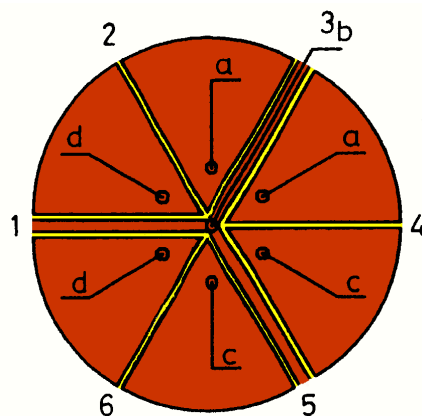


Fig. 3.2 : Giunzione CPW-Slotline

A questo proposito, è necessario analizzare l'evoluzione fisica dei diversi parametri della transizione, per poter quindi sviluppare configurazioni geometriche che permettano di ottenere larghezze di banda sempre migliori. Considerando che il valore della larghezza di banda dipende fortemente dal valore dell'impedenza caratteristica degli stub usati, la realizzazione di CPW con impedenza bassa e di slotline con impedenza alta, costituiscono un significativo limite, soprattutto ad alta frequenza. Inoltre, mentre il valore più grande ottenibile dell'impedenza caratteristica è dato dal limite delle apparecchiature usate, quello più basso dipende intrinsecamente dalla struttura, in particolare quando le dimensioni diventano confrontabili con la lunghezza d'onda. Valori tipici sono di 20 – 25  $\Omega$  per la CPW, e 90 – 100  $\Omega$  per la slotline.

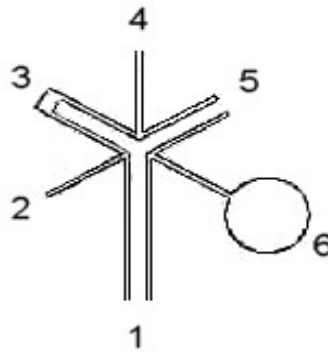


Fig. 3.3 : Y balun CPW-Slotline

La doppia giunzione CPW–Slotline di figura 3.2 è adattata alle porte 1 e 4 se le porte 2, 3, 5 e 6 terminano con un carico adattato, se le impedenze caratteristiche della CPW e della Slotline sono le stesse (per esempio 50 $\Omega$ ), e se gli effetti della giunzione possono essere trascurati. Le porte 1 e 4 sono disaccoppiate; quindi, guardando dalla porta 1, le slotline che conducono alle porte 2 e 6 sono in parallelo una all'altra e in serie con le due CPW parallele che conducono alle porte 3 e 5. Il risultato è che come impedenza di ingresso dalla porta 1 si ha 50 $\Omega$ . Analogamente, guardando dalla porta 4, le slotline che conducono alle porte 2 e 6 sono in serie tra di loro e in parallelo alle CPW in serie che conducono alle porte 3 e 5; guardando dalla porta 4, l'impedenza di ingresso della doppia giunzione è 50 $\Omega$ . A causa della simmetria, tali risultati si ottengono per qualunque coppia di porte.

Consideriamo ora un segnale di ingresso alla porta 1. Esso è diviso in parti uguali tra le porte di uscita 2, 3, 5 e 6. Se le porte di uscita hanno lo stesso coefficiente di riflessione, il segnale è riflesso indietro alla porta 1. Analogamente se il segnale entra dalla porta 4. Ciò significa che un coefficiente di riflessione di  $e^{(j\phi)}$  alle porte 2 e 5 e di  $e^{(j\phi+\pi)}$  alle porte 3 e 6 produce una trasmissione perfetta dalla porta di ingresso 1 alla porta di uscita 4. Come da fig. 3.3, il *balun* ottenuto con giunzione CPW–slotline è formato da due porte in corto circuito (2 e 5), e da due porte in circuito aperto (3 e 6).

Pur essendo teoricamente un passa-tutto, questo tipo di *balun* è limitato in banda e la principale ragione è legata al fatto che il circuito aperto della slotline viene realizzata con lo scasso circolare il quale approssima bene un circuito aperto solo in un range di 2-3 ottave. Per ottenere impedenze più alte per la slotline si potrebbe provare ad usare ad esempio uno stub radiale; questo infatti ha dimostrato a differenza di uno stub rettangolare una lunghezza di risonanza più piccola e una larghezza di banda più ampia mentre se confrontato con uno circolare ha un'insertion loss minore e un migliore coefficiente di riflessione nella banda di lavoro.

Un fenomeno che occorre spesso nelle CPW è la conversione del modo da CPW a slotline dovuto alle differenti distanze che percorrono le onde che si propagano nelle due slot. Siccome esse non possono essere sempre prese della stessa lunghezza, è necessario prevedere una conversione dal modo CPW a quello slotline. Il modo più efficace per risolvere il problema è l'utilizzo degli *air-bridges* perchè questi costituiscono un corto circuito per il modo slotline. Infatti consentono di mantenere i due piani di massa allo stesso potenziale e riescono in tal modo ad eccitare il modo pari della CPW (i vettori di campo elettrico in entrambe le slot hanno stessa ampiezza ma direzioni opposte) ottenendo così un campo elettrico simmetrico.

### 3.1.2 Marchand *balun*

In [6] vengono studiate nuove forme della transizione CPW–slotline, che evidenziano la flessibilità offerta dalla tecnologia su piani co-planari e forniscono strutture compatte ed

alternative alle classiche configurazioni, cioè quelle dove la CPW e la slotline si incrociano ad angolo retto. Il circuito equivalente delle nuove transizioni indicate in [6] e riportato in fig. 3.4 è esattamente lo stesso di quello della transizione classica, così come per ogni altra configurazione.

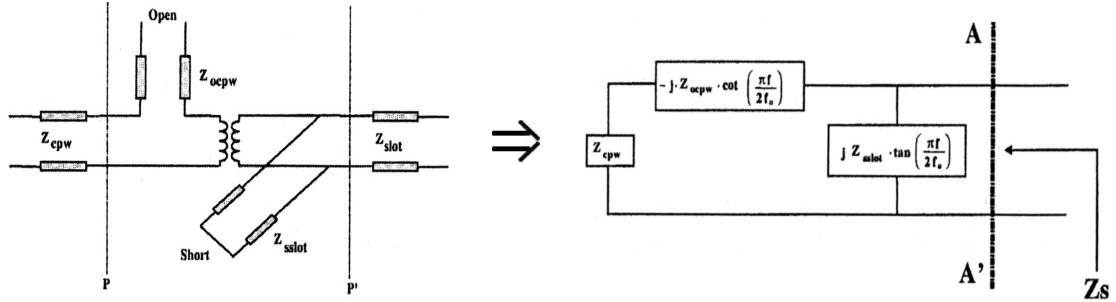


Fig. 3.4 : Circuito equivalente di un CPW-Slotline Marchand *balun*

Il primo passo nello studio di Hettak e Dib, relativo alle nuove transizioni da loro presentate, riguarda l'espressione dell'impedenza caratteristica della transizione, che, naturalmente, dipende dalle impedenze della slotline e della CPW.

$$Z_S = Z_{cpw} \frac{1 - j \left( \frac{Z_{0cpw}}{Z_{cpw}} \right) \cot \phi}{1 - j \left( \frac{Z_{0cpw}}{Z_{slot}} \right) \cot^2 \phi - j \left( \frac{Z_{cpw}}{Z_{slot}} \right) \cot \phi}, \quad \phi = \frac{\pi f}{2 f_0}$$

E' evidente dalla relazione sopra come i migliori risultati, in termini di larghezza di banda, si ottengono nel caso in cui

$$Z_S = Z_{cpw}$$

che è la condizione di adattamento, e questa si ottiene quando

$$\frac{Z_{0cpw}}{Z_{slot}} \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} Z_{slot} &\rightarrow \infty \\ Z_{0cpw} &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

e

$$\frac{Z_{Ocpw}}{Z_{cpw}} = \frac{Z_{cpw}}{Z_{Sslot}} \Rightarrow Z_{Ocpw} = \frac{Z_{cpw}^2}{Z_{Sslot}}$$

In conclusione dunque la migliore scelta da fare è quella di prendere il più alto valore possibile per la  $Z_{Sslot}$  ed il più basso per la  $Z_{Ocpw}$  permesso dai limiti tecnologici, in tal modo si cancella nella formula generale della  $Z_S$  la parte reattiva permettendo di ottenere buone larghezze di banda, a partire da quando  $Z_S$  è uguale a  $Z_{cpw}$ . C'è però un problema legato alla difficoltà di realizzare basse impedenze nelle CPW e alte per le slotline soprattutto ad alte frequenze. Nella pratica si usa un'impedenza di  $40\Omega$  per gli open stub della CPW tenendo conto dei vincoli tecnologici (larghezze di strisce e scassi più piccole) e  $90\Omega$  per la slotline per via di limiti elettrici (effetti radiativi). La scelta di queste impedenze sono dettate, come detto, da vincoli tecnologici e dal tentativo di minimizzare gli effetti delle discontinuità e soprattutto radiazioni parassite. Sempre secondo Hettak e Dib si potrebbero ottenere anche impedenze di  $20\Omega$  per CPW e  $100\Omega$  per slotline ma questo richiederebbe grandi dimensioni trasversali, che poi produrrebbe un incremento di sensibilità dell'impedenza al variare delle dimensioni. Quindi, anche in questo studio, si raggiungono le stesse conclusioni discusse in precedenza in [8].

Il Marchand *balun* comunque ha in generale banda più ristretta rispetto al *balun* a doppia Y e la principale ragione di ciò sta nell'asimmetria indotta dalla giunzione CPW-slotline. Tuttavia i *balun* progettati in [6] presentano caratteristiche interessanti dal punto di vista della banda, delle dispersioni radiative e delle dimensioni. Tutti costruiti su un dielettrico di allumina hanno su un range di frequenze di prova di 1-50GHz banda frazionaria al massimo del 160% per una return loss minore di -10dB e un'insertion loss minore o uguale a 2 dB.

## 3.2 CPW<sub>FGP</sub> – CPS

### 3.2.1 Balun a doppia Y

È il *balun* (fig. 3.6) che ha dimostrato le caratteristiche migliori in termini di larghezza di banda. Difatti, come si è detto, il principale motivo della limitazione in banda della giunzione CPW-slotline è il modo in cui viene realizzato il circuito aperto della slotline, valido per un range di frequenze non molto elevato. Questi due materiali da una parte hanno basse dispersioni e dunque permettono di lavorare a frequenze sotto 1MHz e dall'altra consentono di realizzare un circuito aperto a più ampio spettro. In [3] viene presentato un *balun* realizzato su un dielettrico di allumina con un range di frequenze misurato tra i 300KHz e i 6GHz con ROS di 1.5 e insertion loss minore di 1dB. Il limite di frequenze è dato da vincoli tecnologici (è difficile scendere sotto i 50  $\mu\text{m}$ ) ma si pensa che sia possibile arrivare fino ai 18 GHz.

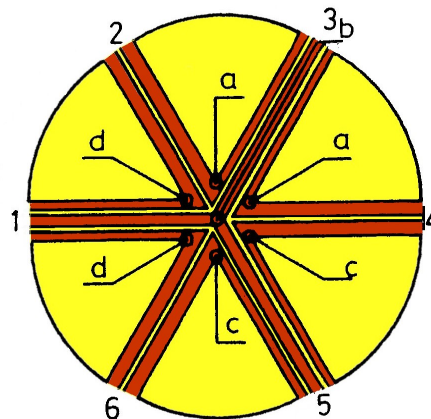


Fig. 3.5 Giunzione CPW<sub>FGP</sub> – CPS

Per minimizzare gli effetti parassiti della giunzione (fig. 3.5) la distanza fra corti circuiti e circuiti aperti e il centro della giunzione deve essere maggiore della dimensione trasversale delle linee che formano la giunzione, e questa dovrebbe essere considerevolmente più piccola di una lunghezza d'onda. Perdite radiative si iniziano ad avere quando la lunghezza elettrica di corti circuiti e circuiti aperti supera i  $22^\circ$  e non possono più essere trascurati a frequenze che superano i  $45^\circ$ . Inoltre, sempre per evitare radiazioni indesiderate la distanza

fra il corto circuito e il circuito aperto deve essere minore di un quarto di lunghezza d'onda.

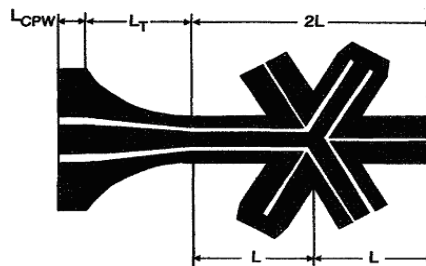


Fig. 3.6 : Y balun CPW<sub>FGP</sub> – CPS

### 3.3 CPW – CPS

#### 3.3.1 Giunzione piana

Interessante è il *balun* presentato in [8] e riportato in figura 3.7 nel quale l'elemento base è uno slot radiale che rappresenta un circuito aperto per un range di frequenze molto ampio e che forza il campo elettrico ad essere prevalentemente tra i due conduttori della CPS.

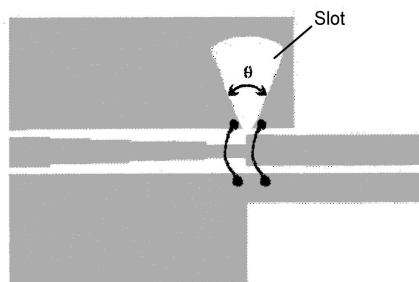


Fig. 3.7 : Balun con slot radiale

I due *air bridges* vicino alla discontinuità garantiscono che il potenziale sui due piani di terra sia identico. Progettualmente la lunghezza del piano di terra è proporzionale alla frequenza più alta di lavoro del *balun*. Esiste anche una proporzionalità inversa tra la lunghezza delle sezioni del trasformatore di impedenza di Chebyshev (necessario per



adattare l'impedenza dell'antenna a quelle della linea di alimentazione) e il coefficiente di riflessione. La larghezza del piano di terra della CPW è circa 2.5 volte la distanza fra i due piani di terra. Realizzato su un substrato con permittività  $\epsilon_r = 10.2$ , presenta una banda misurata che va dai 300 KHz ai 3.4 MHz .

### 3.4 Microstrip – Slotline

Nel Marchand *balun* e in quello a doppia Y la slotline è ricavata nel piano di massa della microstrip ed è pertanto necessario praticare un foro passante al fine di mantenere i due piani di massa presenti sulle due facce del dielettrico allo stesso potenziale. Ciò rende la realizzazione di questi tipi di transizione costosa e complessa.

#### 3.4.1 Marchand *balun*

La transizione microstrip–slotline mostra un comportamento ben approssimabile con quello di un modello TEM, sebbene la slotline non sia una linea trasmissiva puramente TEM. In figura 3.8 ne è riportata la più semplice realizzazione.

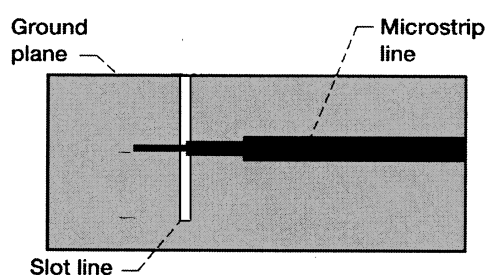


Fig. 3.8 : Microstrip – Slotline Marchand *balun*

Sono state studiate molte varianti, ma i migliori risultati in letteratura sono quelli riportati da Zinieris, Sloan e Davis in [15] nel quale sono stati usati degli stub radiali, come si può

osservare in figura 3.9. Tale *balun*, realizzato su un substrato di Duroid™ 6010 ( $\epsilon_r=10$ ), ha fatto registrare un insertion loss di 1,3 dB nel range di frequenze 3-15 GHz, prestazioni paragonabili dunque a quelle di un *Y balun* realizzato con CPW<sub>FGP</sub> – CPS. A differenza di quest'ultimo però comporta difficoltà in fase realizzativa perchè è di fondamentale importanza la precisione e un accurato allineamento, dal momento che si utilizzano i due lati del dielettrico.

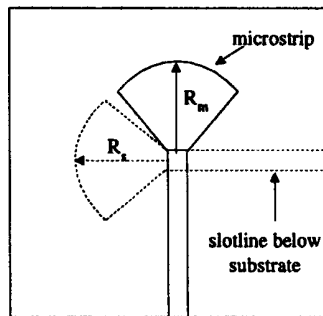


Fig. 3.9 : Microstrip - Slotline Marchand *balun* con stub radiali

### 3.4.2 Balun a doppia Y

Il comportamento è simile a quello visto per la medesima configurazione ma con giunzione CPW-slotline. Tuttavia, come già detto, subentra il problema del foro passante che la rende sconveniente rispetto alla suddetta realizzazione (fig.3.10).

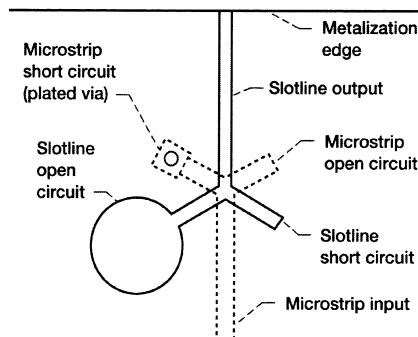


Fig. 3.10 : Microstrip – Slotline *Y balun*

## 3.5 Microstrip – CPS

### 3.5.1 Giunzione piana

Un esempio è la rete di figura 3.11 in cui da una singola microstrip si passa a due microstrip accoppiate elettronicamente, eccitate in modo pari col campo elettrico prevalentemente diretto tra di esse (rispetto a quello verso il piano di massa).

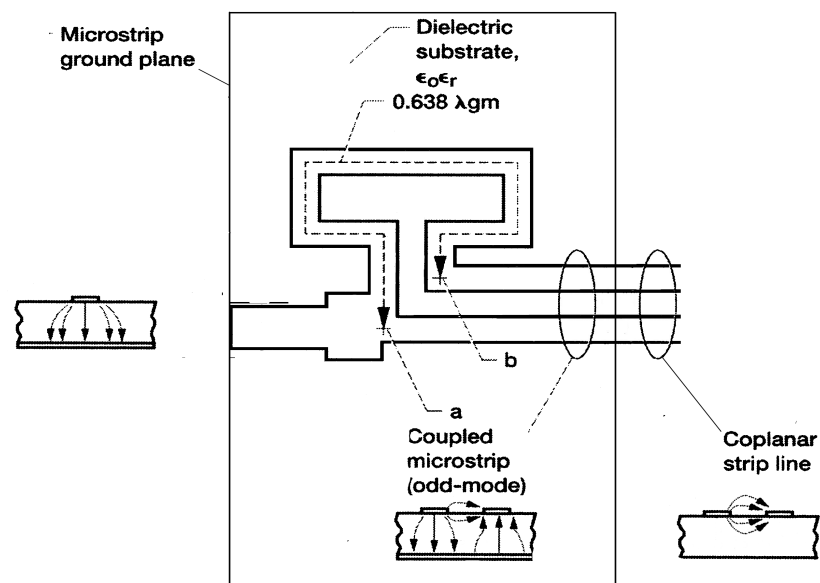


Fig. 3.11 Microstrip – CPS *balun*

Tramite la rete il campo elettrico in *a* e in *b* è sfasato di  $\pi$  percorrendo un percorso di  $\lambda_m/2$  (in realtà  $0.638 \lambda_m$  per compensare le dispersioni dovute agli angoli retti). Un *balun* di questo tipo ha necessariamente banda stretta però è interessante dal momento che mostra come è possibile sfruttare l'accoppiamento elettromagnetico.

## 4 ANALISI SPERIMENTALE

Alla luce di quanto esposto nel precedente capitolo ed in base alle valutazioni fatte si è deciso di lavorare su una giunzione CPW-slotline; questa infatti è semplice da realizzare dal punto di vista fisico dal momento che non richiede di lavorare su due facce.

I primi due prototipi prodotti ed analizzati sono stati un Marchand *balun* ed un *balun* a doppia Y. Visti i risultati più interessanti e migliori in termini di ampiezza di banda riportati dal *balun* a doppia Y si è deciso di porre la nostra attenzione proprio su questi ultimi. Dal momento che il punto più critico pare essere il circuito aperto della slotline, ci si è concentrati su quest'ultimo studiando il comportamento dei *balun* al variare di forma e dimensioni.

Per analizzare il funzionamento dei *balun* proposti si è utilizzata una struttura a cascata (vedi l'esempio in fig.4.1) e successivamente se ne è misurato l'*insertion loss* tramite un analizzatore di spettro. È stato necessario fare ciò per evitare di dover impiegare un oggetto radiante dal comportamento perfettamente noto.

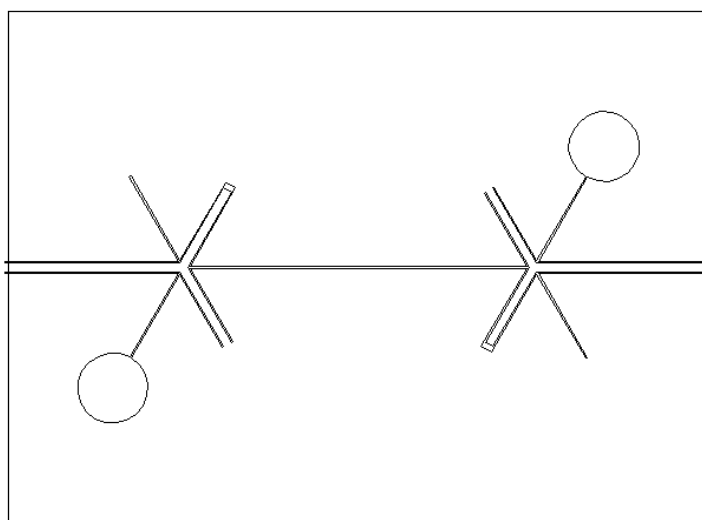


Fig. 4.1 : Esempio di struttura a cascata

## 4.1 Fase di progetto

Primo passo è stato quello di scegliere il supporto sul quale realizzare i *balun*. La valutazione è stata fatta in base al materiale disponibile in laboratorio, alle dimensioni dell'oggetto e al tipo di tecnologia da adoperare. Alla fine si è propeso per quello riportato nella tabella 4.1, avente come dielettrico l'FR3 che risulta economico e con caratteristiche di risposta elettromagnetica accettabili.

<i>Materiale dielettrico</i>	Resina epossidica e carta
<i>Costante dielettrica <math>\epsilon_r</math></i>	4.9 <i>F/m</i>
<i>Spessore dielettrico</i>	1.7 <i>mm</i>
<i>Materiale metallizzazione</i>	Rame
<i>Spessore metallizzazione</i>	35 $\mu m$

Tab. 4.1

Secondo passo è stato quello di decidere la frequenza di lavoro e per far questo si è dovuto tener conto di due vincoli: il primo è legato alla macchina di fresa con la quale sono stati realizzati i prototipi, che lavora su fogli di dimensione massima 275 x 210 *mm*, ed è in grado di praticare degli scassi aventi larghezza massima di 0,2 *mm*  $\pm$  10% utilizzando una punta conica da 60°; il secondo, più stringente, è connesso alle capacità degli strumenti di misura disponibili in laboratorio. In particolare, si è adoperato un analizzatore di spettro in grado di lavorare sulle frequenze tra i 100 KHz e i 3 GHz. Dal momento che la banda massima misurabile è di circa 3 GHz, si è deciso di fissare la frequenza di lavoro a 1,5 GHz.

### 4.1.1 Dimensionamento della CPW

La CPW è la linea di trasmissione cui va direttamente connessa la linea coassiale di ingresso, che ha un'impedenza caratteristica di 50 $\Omega$ . Per avere adattamento tra le due linee si è fissato  $Z_{cpw} = 50\Omega$ . Volendo determinare i parametri strutturali della CPW si è ricorso ad un *CPW calculator* reperibile *freeware* sul sito <http://www.rfdh.com/rfdb/cpw.htm>, che

esegue i calcoli del capitolo 3 e di cui riportiamo in figura 4.2 l'interfaccia utilizzata. Tenendo conto che la dimensione massima  $S+2W$  deve essere inferiore a  $4\text{ mm}$ , che è la distanza tra i due contatti del connettore SMA, si sono ricavati i seguenti valori:

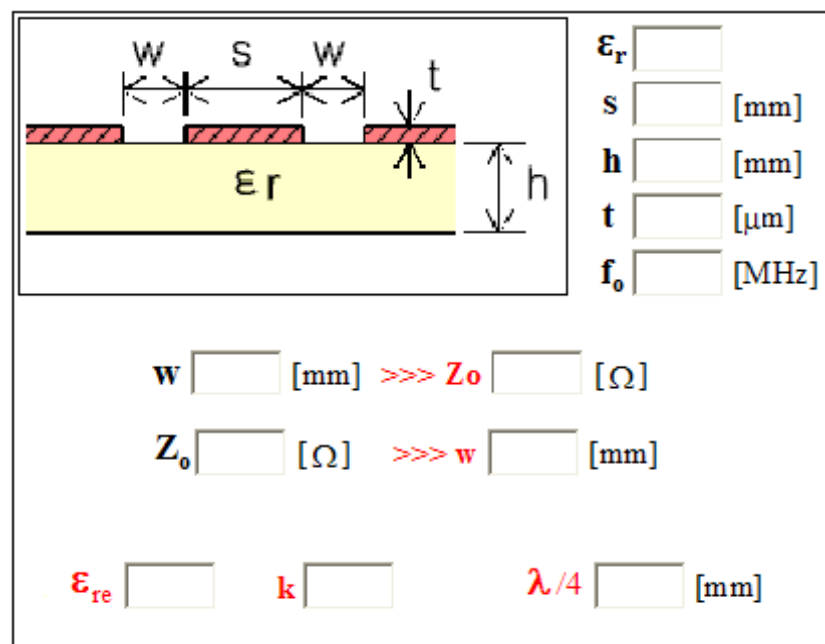
$$W = 0,48\text{ mm}$$

$$S = 3\text{ mm}$$

$$\epsilon_{re} = 2,68$$

$$\lambda_{cpw} = 122,25\text{ mm}$$

che rientrano tranquillamente nei limiti imposti.



The figure shows a schematic of a Coplanar Waveguide (CPW) structure on a substrate with relative permittivity  $\epsilon_r$  and thickness  $h$ . The CPW consists of a central signal strip of width  $W$  and two ground planes separated by a gap  $S$ . The gap width is also  $W$ . The total width of the ground planes is  $2W$ . The thickness of the signal strip is  $t$ .

Below the schematic is a screenshot of the CPW calculator interface. It contains input fields for the following parameters:

- $\epsilon_r$  (relative permittivity)
- $s$  [mm] (gap width)
- $h$  [mm] (substrate thickness)
- $t$  [ $\mu\text{m}$ ] (strip thickness)
- $f_0$  [MHz] (frequency)

The interface also displays calculated values:

- $w$  [mm]  $\gg Z_0$  [ $\Omega$ ]
- $Z_0$  [ $\Omega$ ]  $\gg w$  [mm]
- $\epsilon_{re}$  (effective relative permittivity)
- $k$  (wave number)
- $\lambda/4$  [mm] (quarter wavelength)

Fig. 4.2 : Interfaccia grafica del CPW calculator

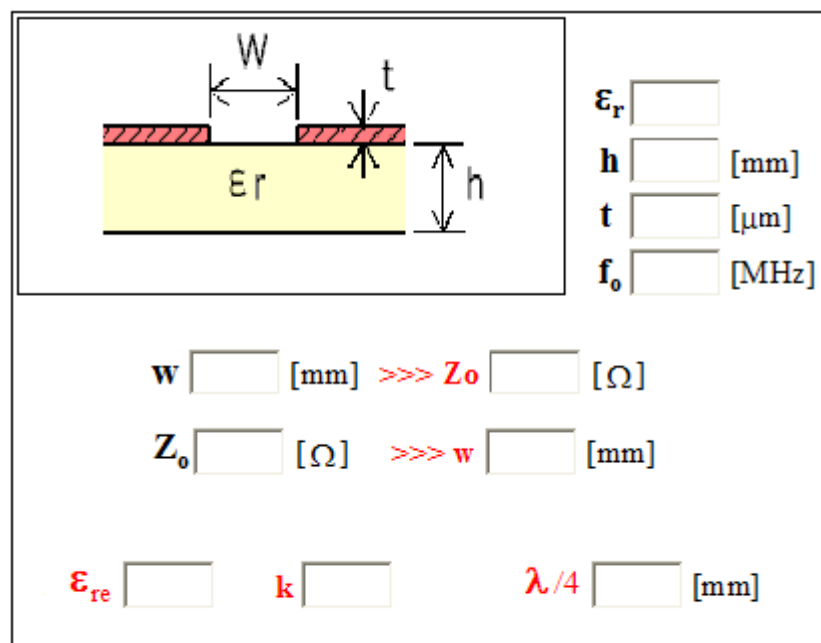
#### 4.1.2 Dimensionamento della Slotline

Per avere adattamento tra CPW e slotline si è provato a fissare  $Z_{slot} = 50\Omega$ . Utilizzando in questo caso lo *slotline calculator* reperibile *freeware* al sito <http://www.rfdh.com/rfdb/slotline.htm>, e del quale si riporta l'interfaccia grafica nella figura 4.3, si sono ricavati i seguenti valori:

$$W = 0,001 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{re} = 7,78$$

$$\lambda_{slot} = 71,70 \text{ mm}$$



The image shows the graphical interface of a slotline calculator. It includes a cross-sectional diagram of a slotline on a substrate with parameters  $W$  (slot width),  $t$  (slot depth),  $h$  (substrate thickness), and  $\epsilon_r$  (relative permittivity). To the right of the diagram are input fields for  $\epsilon_r$ ,  $h$  [mm],  $t$  [ $\mu\text{m}$ ], and  $f_0$  [MHz]. Below the diagram are two rows of calculation results: the first row shows  $w$  [mm] >>>  $Z_0$  [ $\Omega$ ], and the second row shows  $Z_0$  [ $\Omega$ ] >>>  $w$  [mm]. At the bottom, there are three more fields:  $\epsilon_{re}$ ,  $k$ , and  $\lambda/4$  [mm].

Fig. 4.3 : Interfaccia grafica dello slotline calculator

Le dimensioni in termini di ingombro fisico potrebbero essere accettabili, ma creano altre problematiche di diversa natura legate tra di loro:

- la larghezza della slot risulta troppo piccola per essere realizzata con le attrezzature a disposizione;

- all'aumentare di tale dimensione, per portarla vicino a valori compatibili con la fresa, vi è un incremento sensibile dell'impedenza.

Si è allora proceduto in maniera diversa: si è preso il parametro più critico tra quelli in esame, cioè la larghezza dello scasso, e, facendolo aumentare con un passo di  $0,05 \text{ mm}$  a partire dal valore limite di  $0,2 \text{ mm}$ , si sono calcolati tutti gli altri parametri per cercare il miglior compromesso. I risultati sono riportati nella tabella 4.2. Si è deciso di fissare la dimensione  $W$  della slot a  $0,6 \text{ mm}$ , che è un valore accettabile per la strumentazione disponibile, e che fornisce un'impedenza pari a circa  $86\Omega$  ed una lunghezza d'onda pari a  $142,77 \text{ mm}$ .

$Z_0 [\Omega]$	$W [\text{mm}]$	$\epsilon_{re}$	$\lambda_g [\text{mm}]$
72,97	0,2	2,12	137,29
74,93	0,25	2,09	138,30
76,76	0,3	2,07	139,16
78,49	0,35	2,04	139,90
80,13	0,4	2,02	140,57
81,71	0,45	2,01	141,18
83,22	0,5	1,99	141,75
84,69	0,55	1,98	142,28
86,11	0,6	1,96	142,77
87,48	0,65	1,95	143,24
88,82	0,7	1,94	143,69
90,12	0,75	1,93	144,11

Tab. 4.2

Questo significa avere un disadattamento tra CPW e slotline che però, essendo il rapporto di onda stazionaria pari a

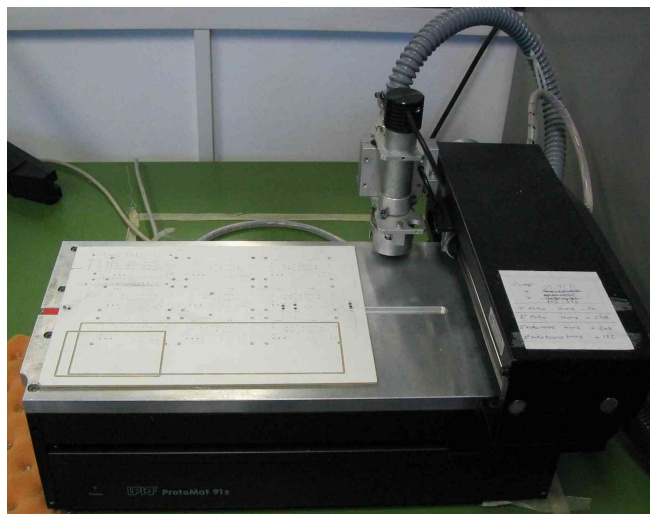
$$ROS \approx 1,7$$



può essere considerato accettabile, anche se si dovrà tener conto che comporta un peggioramento del risultato finale stimabile attorno ai 2dB.

## **4.2 Realizzazione dei prototipi**

Per la realizzazione pratica dei *balun* si è dapprima utilizzato un programma di grafica avanzato col quale sono stati progettati. Successivamente i file così ottenuti sono stati convertiti nel formato macchina .gbr esteso ed infine si è proceduto con la fresatura della lastra metallo-dielettrico FR3 tramite la fresa LPKF (fig.4.4). In ultima fase sono stati saldati i connettori SMA e gli *air-bridges*. Si riportano nei successivi paragrafi le descrizioni di tutti i prototipi realizzati. Per i risultati sperimentali si rimanda al capitolo 5.



**Fig. 4.4 : Foto fresa lpkf**

### **4.2.1 Prototipo 1**

Questo *balun* è stato realizzato rispettando le specifiche riportate nel capitolo 2.2.2. Le dimensioni di CPW e slotline sono quelle descritte nei paragrafi precedenti. Nell'appendice 2 si riportano nel dettaglio le misure di progetto.

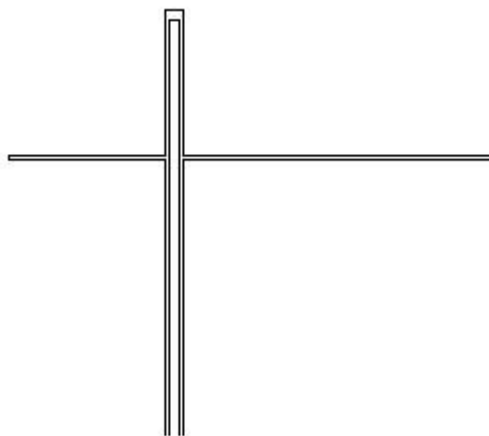


Fig. 4.5 Prototipo 1

#### 4.2.2 Prototipo 2

Per questo e per tutti i successivi prototipi di *balun* a doppia Y, si è seguito quanto esposto nel capitolo 2.2.3. Anche in questo caso le dimensioni di CPW e slotline sono quelle descritte nei paragrafi precedenti.

La forma del circuito aperto della slotline, come si può vedere in figura 4.6, è circolare.

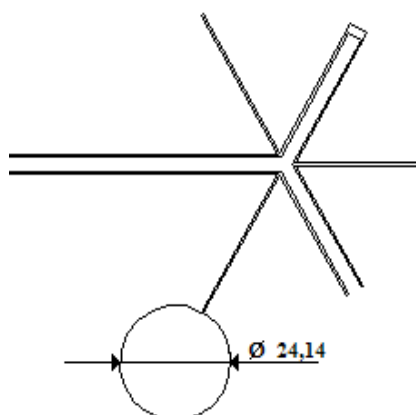


Fig. 4.6 Prototipo 2

Dal momento che non è stato possibile trovare in letteratura come dimensionare la circonferenza, si sono provate due strade, una seguita per questo prototipo, l'altra per il prototipo 3 e verrà descritta successivamente.

La prima prende spunto dal lavoro fatto da Schüppert in [17] il quale esamina i Marchand *balun* ed in particolare analizza gli stub circolari. Come visto nel capitolo 2, per questo tipo di *balun* la lunghezza fisica degli stub deve essere uguale a  $\lambda/4$ . Nel caso di uno stub circolare nasce il problema di come prendere questa lunghezza  $l$ , se pari al suo diametro o a metà della circonferenza (vedi fig.4.7).

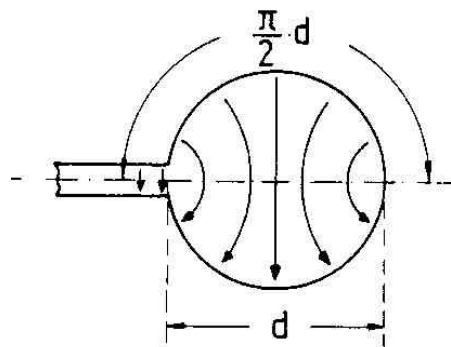


Fig. 4.7 : Stub circolare

Attraverso diverse analisi sperimentali, Schüppert ha dedotto che si deve assumere quale lunghezza fisica metà della circonferenza, cioè

$$l = \frac{\pi}{2} d \approx 1,5 d$$

e quindi dovendo essere  $l = \lambda/4$  si avrà che il diametro  $d$  sarà uguale a

$$d = \lambda/6$$

Al fine di poter trasporre tale analisi nel caso specifico che intendiamo analizzare, si deve tener conto del fatto che mentre nel Marchand *balun* lo stub circolare sostituisce quello rettangolare, in quello a doppia Y lo stesso stub circolare deve essere inserito al termine di quello rettangolare non avendo però specifiche circa la sua lunghezza fisica

Seguendo le ipotesi di Schüppert, dunque, il diametro della circonferenza è stato preso pari a  $d = 24,14 \text{ mm}$ .

#### 4.2.3 Prototipo 3

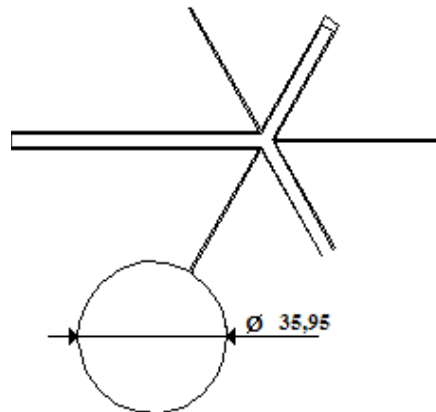


Fig. 4.8 : Prototipo 3

Questo prototipo è simile nella struttura al precedente, ma differisce da esso per la dimensione dello slot circolare. Si è così fissata la lunghezza fisica dello slot circolare non più uguale a metà circonferenza ma pari al diametro, cioè

$$l = d$$

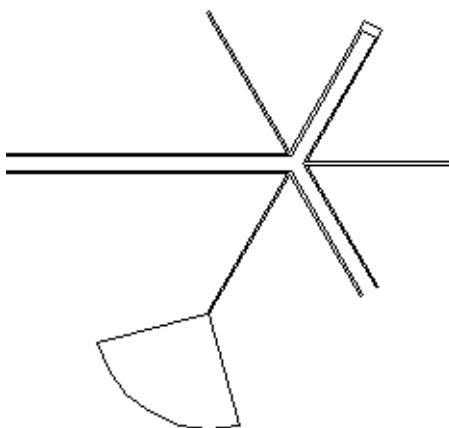
e in tal modo si ottiene

$$d = \lambda/4 = 35,95 \text{ mm}$$

#### 4.2.4 Prototipo 4

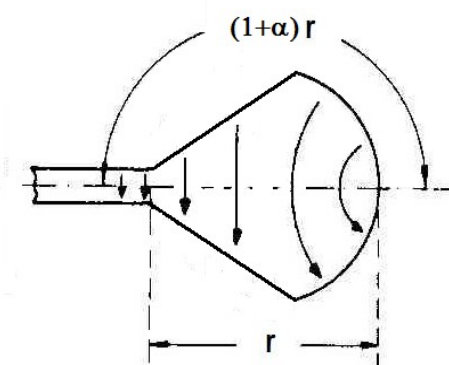
Il presente prototipo, visibile in figura 4.9, è stato progettato con uno stub radiale. Questo costituisce una novità poichè, mentre questo tipo di geometria è stata in passato già applicata a diversi tipi di *balun* producendo buoni risultati, non si è trovato in letteratura

alcun esempio nell'ambito dei *balun* a doppia Y. I vantaggi di uno stub radiale sono principalmente la sua compattezza ed il fatto di possedere una regione di risonanza piuttosto ampia. Inoltre, come detto nel capitolo 3 gli stub radiali hanno dimostrato di avere un'insertion loss minore e un miglior coefficiente di riflessione nella banda di lavoro rispetto ad uno circolare.



**Fig.4.9 Prototipo 4**

Per dimensionare lo stub si è preso in considerazione ancora una volta il lavoro di Schüppert e si è supposto di poter seguire un ragionamento simile per lo stub radiale in virtù della somiglianza tra le due geometrie.



**Fig. 4.10 : Stub radiale**

Per lo stub circolare si è dimostrato che la lunghezza fisica è pari a metà della circonferenza, così per lo stub radiale imporremo che questa sarà uguale a metà del suo perimetro. Facendo riferimento alla figura 4.10 si può dunque scrivere che

$$l = r + \alpha_{rad} r = (1 + \alpha_{rad}) r$$

dove  $\alpha_{rad}$  è metà dell'angolo sotteso all'arco in radianti. Imponendo poi ancora una volta  $l = \lambda/4$  si avrà che

$$r \approx \lambda/7 = 20,7 \text{ mm}$$

#### 4.2.5 Prototipo 5

Si è provato ad applicare la teoria dei frattali.

Questi sono figure geometriche caratterizzate dal ripetersi sino all'infinito di uno stesso motivo su scala sempre più ridotta. Non è possibile darne una definizione univoca, tanto che neppure lo stesso Mandelbrot, padre fondatore della teoria dei frattali, la fornisce se non in modo molto approssimativo ed intuitivo. Si può però considerare frattale un insieme  $F$  che soddisfi le quattro proprietà elencate qui di seguito:

- 1) Autosimilarità:  $F$  è unione di un numero di parti che, ingrandite di un certo fattore, riproducono tutto  $F$ . In altri termini  $F$  è unione di copie di se stesso a scale differenti, o ancora, una parte dell'oggetto  $F$  è simile al tutto.
- 2) Struttura fine:  $F$  rivela dettagli ad ogni ingrandimento.
- 3) Irregolarità:  $F$  non si può descrivere come luogo di punti che soddisfano semplici condizioni geometriche o analitiche (la funzione è ricorsiva:  $F = \{Z | Z = f(f(f(\dots)))\}$ ).

- 4) Dimensioni di autosimilarità maggiori della dimensione topologica. La caratteristica di queste figure, dalla quale deriva il loro nome, è che, sebbene esse possano essere rappresentate in uno spazio convenzionale a due o tre dimensioni, la loro dimensione non è intera. Questo a patto che non si pretenda di rappresentare infinite iterazioni, cioè trasformazioni per le quali si conserva il particolare motivo geometrico. In effetti la lunghezza di un frattale "piano" non può essere misurata definitivamente, ma dipende strettamente dal numero di iterazioni al quale si sottopone la figura iniziale.

Dal punto di vista matematico un frattale si costruisce come di seguito descritto.

Si consideri un insieme di  $N$  trasformazioni (non necessariamente affini) del piano cartesiano  $\{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$  e le si applichino allo stesso sottoinsieme  $A$  del piano. Come risultato si otterrà una famiglia di  $N$  sottoinsiemi del piano cartesiano  $\{T_1(A), T_2(A), T_3(A), \dots, T_N(A)\}$ . Sia  $A_1$  l'insieme ottenuto come unione di questi sottoinsiemi. Si applichino di nuovo le  $N$  trasformazioni all'insieme  $A_1$  così ottenuto e si consideri l'unione degli  $N$  insiemi immagine. Si chiami questo insieme  $A_2$ . Operando nello stesso modo su  $A_2$  si otterrà  $A_3$ . Continuando così, si produrrà una successione di insiemi  $\{A_1, A_2, A_3, \dots\}$ . Sotto certe condizioni tale successione convergerà ad un insieme limite  $F$ , ossia la successione si stabilizzerà. Questo insieme limite  $F$  si definisce frattale, anzi frattale IFS (*Iterated Function System*) ovvero frattale ottenuto iterando un insieme di trasformazioni del piano.

Il motivo per cui questa strada sembra attraente è legato principalmente alla proprietà di autosomiglianza. Infatti un circuito aperto autosomigliante, cioè contenente più copie di sé stesso a diverse scale, potrebbe essere in grado di lavorare in modo simile a differenti frequenze e di conseguenza garantire buone prestazioni su un ampio range di frequenze, e questo senza necessitare di grandi superfici.

Sono stati presi in esame due frattali il *Sierpinski gasket* ed il fiocco di neve di Koch.

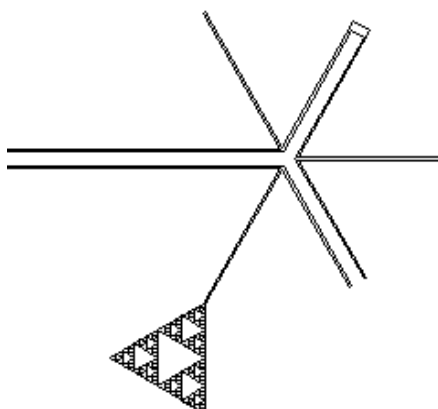


Fig. 4.11 : Prototipo 5

In questo primo prototipo (fig. 4.11) il circuito aperto è realizzato con il *Sierpinski gasket*. La costruzione di tale frattale parte da un triangolo. Presi i punti medi dei suoi lati, si uniscono tra di loro formando quattro nuovi triangoli uguali, dopodichè si riempie il triangolo centrale. Per ciascuno di questi, escluso il centrale, si prendono i punti medi, li si uniscono dando origine a quattro nuovi triangoli dei quali si riempie il centrale. La procedura, visibile in figura 4.12, viene iterata dando così forma al frattale in esame.



Fig.4.12 : Procedura per la creazione del *Sierpinski gasket*

In questo prototipo si è partiti da un triangolo equilatero, avente di conseguenza angoli di  $60^\circ$ , e la procedura è stata iterata quattro volte. Il numero di iterazioni è stato scelto tenendo conto della sensibilità della fresa; infatti con quattro iterazioni si arriva al limite del suo raggio di curvatura e con un numero di iterazioni superiore si sarebbe perso in



definizione. Per dimensionare il triangolo di partenza si è seguito un ragionamento simile a quello fatto nel caso del prototipo 4. Chiamato  $a$  il lato del triangolo, la lunghezza elettrica risulta essere  $l = a$  che porta ad avere, sempre secondo lo stesso procedere

$$a = \lambda/4 = 35,95 \text{ mm}$$

#### 4.2.6 Prototipo 6

Si è voluto indagare come varia il comportamento del *balun* con il *Sierpinski gasket* al variare del numero di iterazioni. Pertanto questo ed i successivi tre prototipi sono stati realizzati con un numero di iterazioni sempre minore: il presente ne ha tre, il successivo due, l'ultimo una sola. Il prototipo 9 ha il solo triangolo di partenza. Potrebbe sembrare strano il fatto che il primo prototipo sia quello col maggior numero di iterazioni mentre i successivi ne hanno un minor numero e non il viceversa. La ragione sta nel fatto che per produrre fisicamente questo prototipo ed i successivi è stato sufficiente prendere il prototipo 5 ed eliminare tramite uno scalpellino i triangoli interni partendo dai più piccoli per questo prototipo e via via quelli di dimensioni maggiori per i successivi. Si è così evitato di dover produrre quattro schede ex-novo che avrebbero comportato un costo, seppur sostenibile, quantomeno facilmente evitabile.

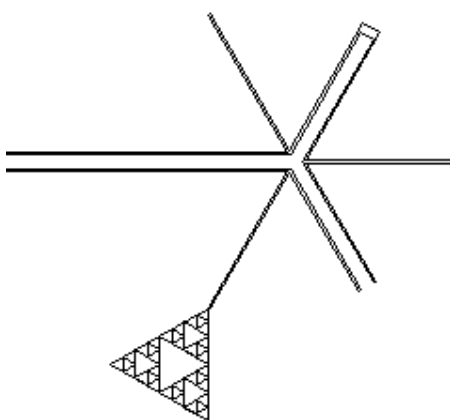
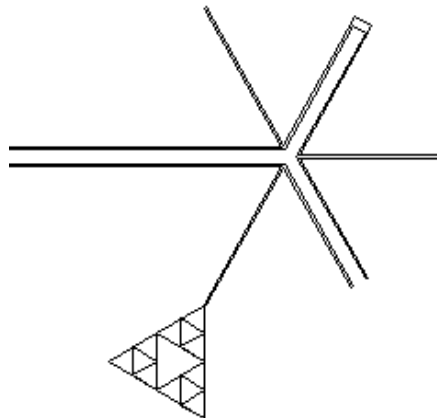


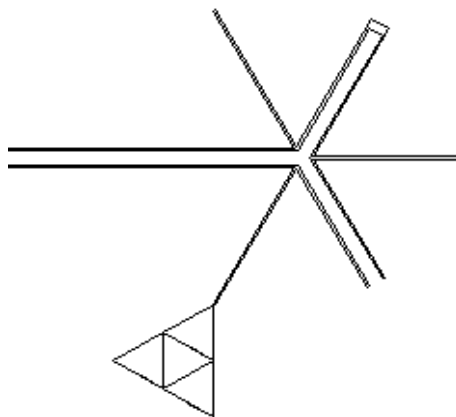
Fig. 4.13 : Prototipo 6

#### **4.2.7 Prototipo 7**



**Fig. 4.14 : Prototipo 7**

#### **4.2.8 Prototipo 8**



**Fig. 4.15 : Prototipo 8**

#### 4.2.9 Prototipo 9

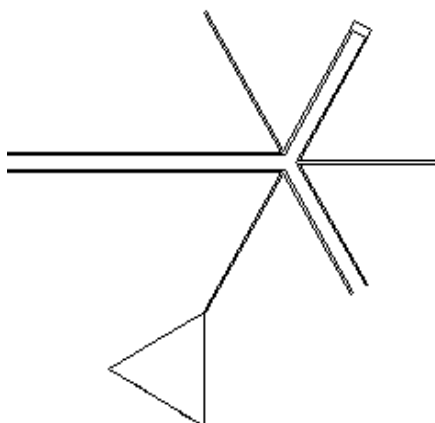
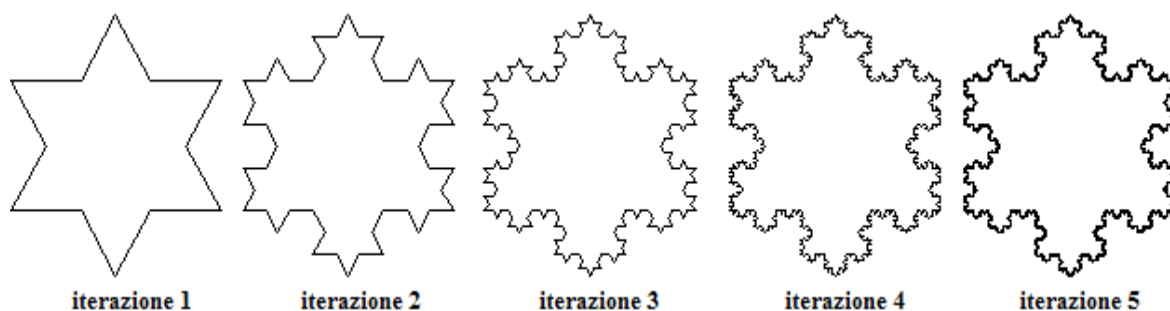


Fig. 4.16 : Prototipo 9

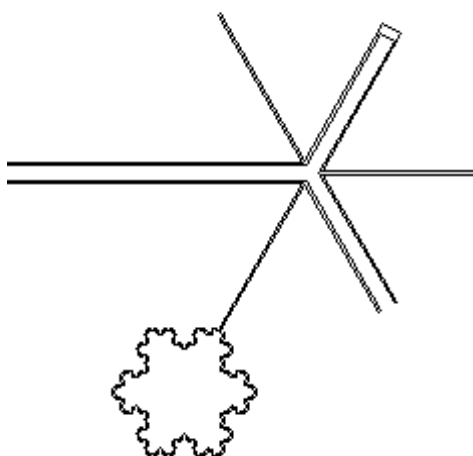
#### 4.2.10 Prototipo 10

Nel presente prototipo il circuito aperto è stato realizzato con il fiocco di neve di Koch. Questo è un frattale che tende ad aumentare la superficie di se stesso con l'aumentare del numero di iterazioni, a differenza del precedente che tende invece ad iterare verso l'interno riducendo in sostanza la sua superficie “vuota”. La sua costruzione può essere fatta in diversi modi. Il procedimento qui seguito parte da due triangoli equilateri ruotati di  $180^\circ$  l'uno rispetto all'altro e sovrapposti sul baricentro. Le sei punte che si vengono così a formare sono dei nuovi triangoli equilateri di lato pari ad  $1/3$  rispetto a quello di partenza. Si prende la figura di partenza, la si copia scalandola di  $1/3$ , la si sovrappone ad una delle punte della figura lasciando poi il solo perimetro; si fa questa operazione per ciascuna delle sei punte della figura iniziale. La procedura, visibile in figura 4.17, viene iterata dando così forma al frattale in questione.



**Fig. 4.17 : Procedura per la creazione del fiocco di neve di Koch**

Nel prototipo in esame (fig.4.18), sempre per problemi legati alla definizione della macchina di fresa, ci si è fermati alla terza iterazione. Per dimensionare il fiocco di neve si è fissata la sua area in modo che fosse pari a quella dello slot circolare del prototipo 2.



**Fig. 4.18 : Prototipo 10**

Calcolare l'area di un frattale è, per le ragioni deducibili da quanto esposto nel paragrafo 4.2.5, un'operazione non semplice. Nel nostro caso è stato possibile dato il basso numero di iterazioni anche se è intervenuto l'ulteriore problema di dover combinare non solo l'area del frattale con quella dello slot circolare ma anche il numero di iterazioni con la precisione

della fresa. Si è dunque impostato un semplice algoritmo di risoluzione, visibile in fig.4.19.

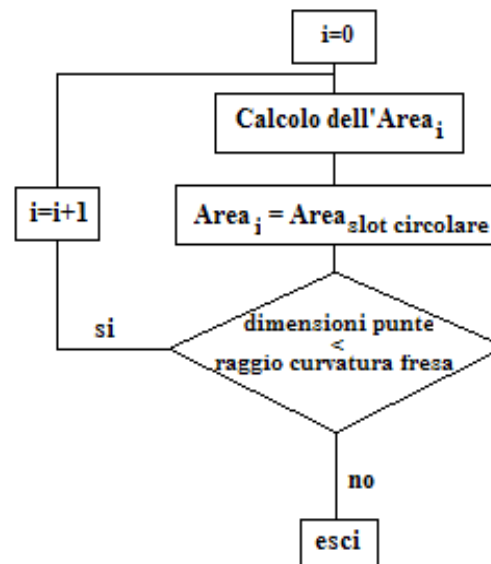


Fig. 4.19 : Algoritmo di risoluzione

Di seguito si riportano i calcoli necessari per determinare le aree i-esime. L'  $Area_0$  relativa all'iterazione 0 è l'area di un singolo triangolo di lato  $l$ .

Iterazione 0:  $Area_{triangolo} = Area_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} l^2$

Iterazione 1:  $Area_1 = Area_0 + 3 \frac{1}{9} Area_0 = \frac{4}{3} Area_0$

Iterazione 2:  $Area_2 = \frac{4}{3} Area_0 + 12 \frac{1}{81} Area_0 = \frac{40}{27} Area_0$

Iterazione 3:  $Area_3 = \frac{40}{27} Area_0 + 16 \frac{1}{729} Area_0 = \frac{376}{243} Area_0 = 1,34 l^2$

Si è poi imposto che

$$Area_3 = Area_{stub\ circolare}$$

e quindi

$$1,34 l^2 = \pi r^2$$

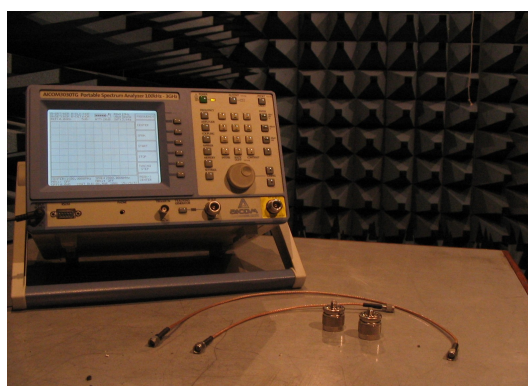
$$l^2 = \frac{\pi}{1,34} r^2$$

da cui

$$l = 1,5 r$$

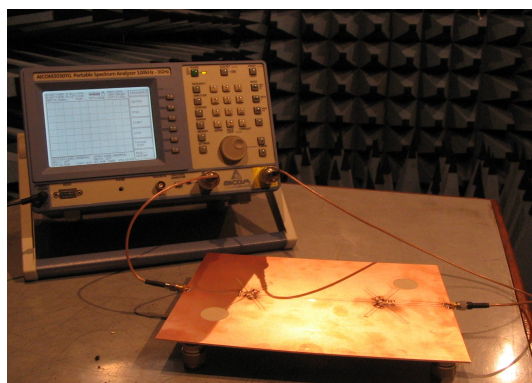
## 5 RISULTATI

In questo capitolo vengono presentati i risultati sperimentali delle analisi effettuate in camera anecoica sui prototipi di *balun* prodotti.



**Fig. 5.1 : Sistema di misura**

Nella figura 5.1 viene mostrato il sistema col quale sono state effettuate le misurazioni. Questo è costituito dall'analizzatore di spettro AICOM GIE3030TG, da due riduttori e da una coppia di cavetti coassiali di collegamento da 26 e 50 *cm*. Ogni misura è stata fatta collegando i connettori SMA dei prototipi in esame con le porte di ingresso e uscita dell'analizzatore di spettro tramite gli appositi cavetti (figura 5.2). I riduttori sono serviti per adattare l'attacco dei cavetti alle porte dell'analizzatore.



**Fig. 5.2 : Esempio di misura**

Si è poi impostato sull'analizzatore il range di frequenze di studio (200 MHz - 3 GHz), entro cui far variare il segnale da inviare alla scheda ed i valori di uscita sono poi stati raccolti in tabelle (vedi Appendice 2) e successivamente graficati ed analizzati. È da notare tuttavia che i dati così ottenuti non rappresentano solamente la risposta dei prototipi in esame ma anche quella dei dispositivi utilizzati per la connessione di questi con l'analizzatore di spettro. È necessario, infine, tener conto anche delle dispersioni del materiale col quale sono costruiti. Come prima operazione, dunque, si è realizzato un *loop* di test connettendo una lastra di FR3 all'analizzatore, come sopra descritto, per ricavare la sua risposta in frequenza e quella del sistema.

## 5.1 Loop di test

Per poter studiare la risposta in frequenza del materiale e del sistema di misura si è dovuto veicolare il segnale dell'analizzatore su una lastra di FR3. Per fare ciò si è incisa su di essa una CPW avente lunghezza pari a quella dei prototipi e parametri costruttivi uguali a quelli descritti al paragrafo 4.1.1.

L'andamento dello spettro è riportato nella figura 5.3.

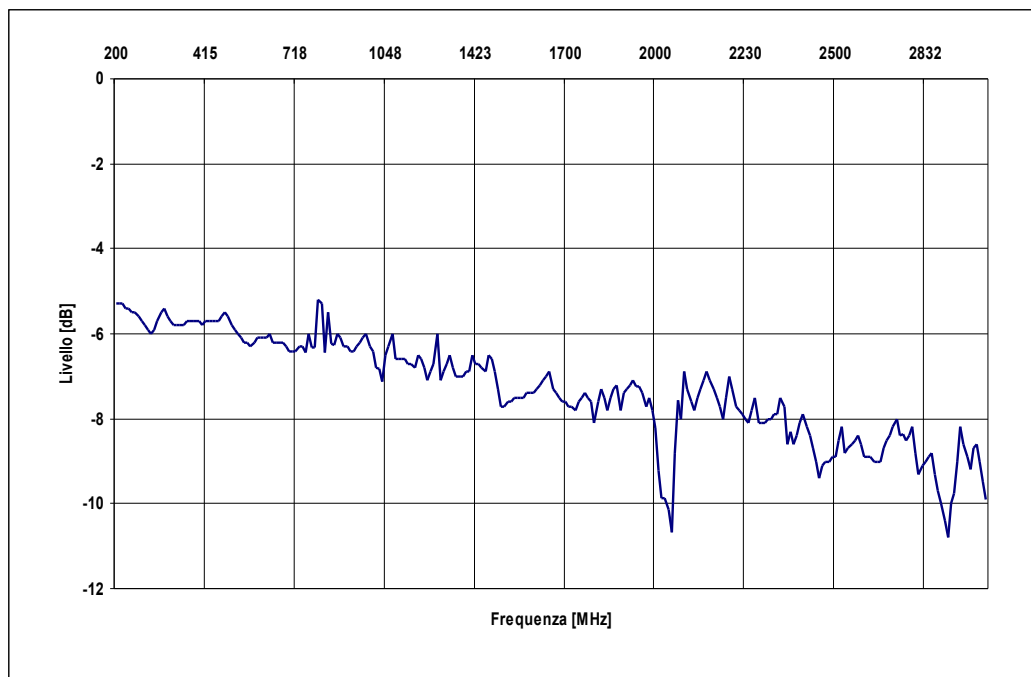


Fig.5.3 Spettro del loop di test [200-3000MHz, 2dB/div]



È da notare che, essendo l'impedenza caratteristica della CPW uguale a quella del sistema di misura, tra i due non si ha perdita di potenza di segnale dovuto a disadattamento. Si può invece osservare che c'è un abbassamento del segnale di quasi 5dB nel range di frequenze di osservazione e che la risposta è tutt'altro che lineare, ma fortemente oscillatoria soprattutto a partire dai 1800 MHz. Per capire quanta parte è dovuta al materiale e quanta ai dispositivi di connessione si sono realizzati due ulteriori *loop* tra ingresso e uscita dell'analizzatore di spettro, ciascuno con uno dei due cavetti di connessione (fig. 5.4, 5.5).

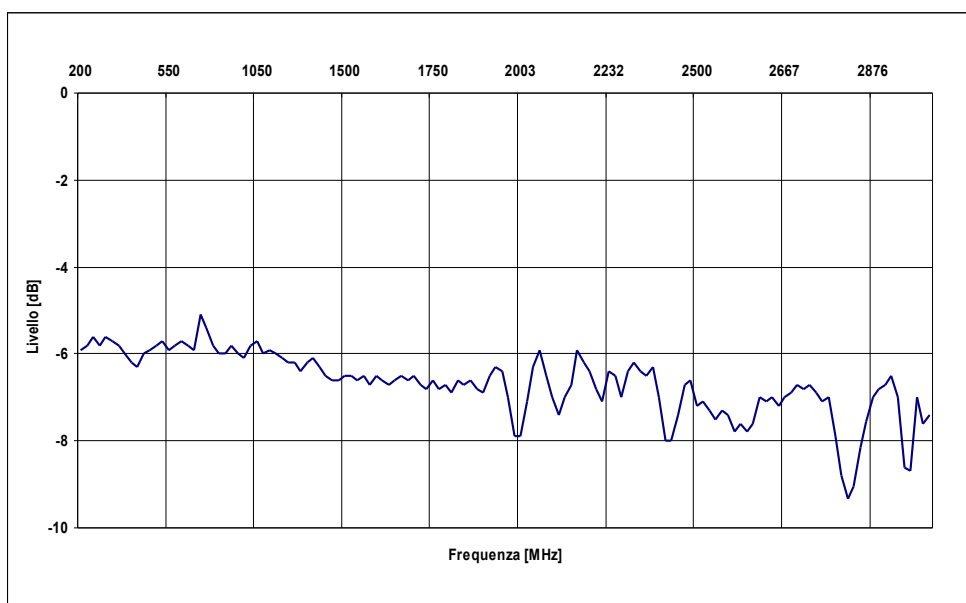


Fig. 5.4 : Spettro del cavo da 26cm [200-3000MHz, 2dB/div]

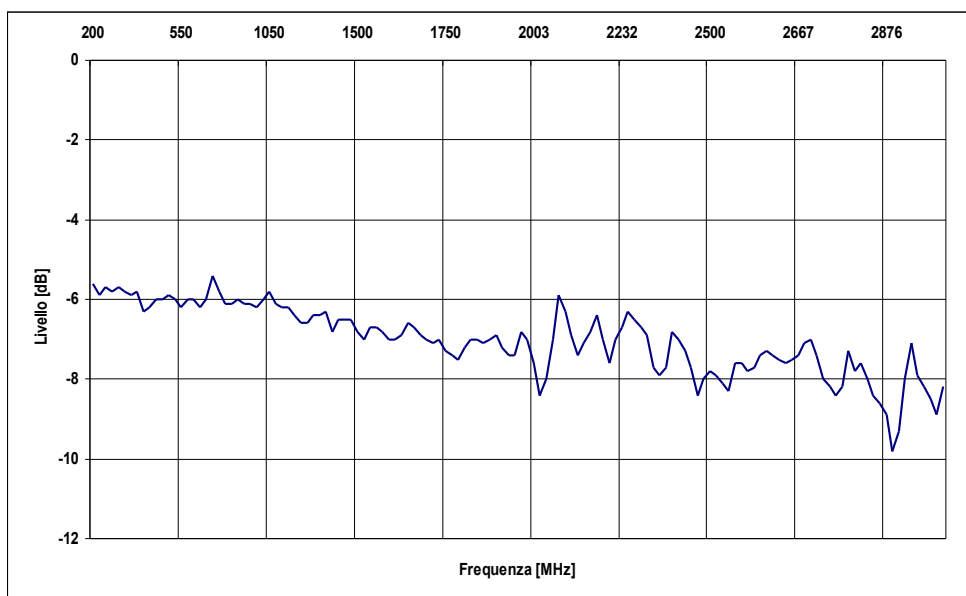


Fig. 5.5 : Spettro del cavo da 50cm [200-3000MHz, 2dB/div]

Si può riscontrare un andamento molto simile a quello visto in precedenza per l'FR3 e pertanto si può concludere che la dispersione dovuta ai dispositivi di connessione è trascurabile e che la figura 5.3 rappresenta la dissipazione del solo materiale. Successivamente si è passati all'analisi dapprima del Marchand *balun*, per poi passare a quella dei prototipi di *balun* a doppia Y, realizzata quest'ultima in tre fasi che differiscono una dall'altra esclusivamente per il numero di *air-bridge* montati sulle schede. Questi sono costituiti da quadrelli metallici di sezione  $1\text{ mm}^2$  ripiegati manualmente ad U conferendo loro un'altezza di  $1\text{ mm}$ , e inseriti mediante saldatura a stagno presso i laboratori del DIBE. Per ciascuna misura effettuata si riporta l'andamento dello spettro, necessario per poter studiare in dettaglio il comportamento del prototipo in esame e trarre le debite conclusioni.

Si tenga presente che i grafici riportati tengono conto di due *balun* per scheda e pertanto per avere il comportamento di un singolo *balun* è necessario aggiungere 3 dB ai risultati ottenuti.

## 5.2 Marchand *balun*

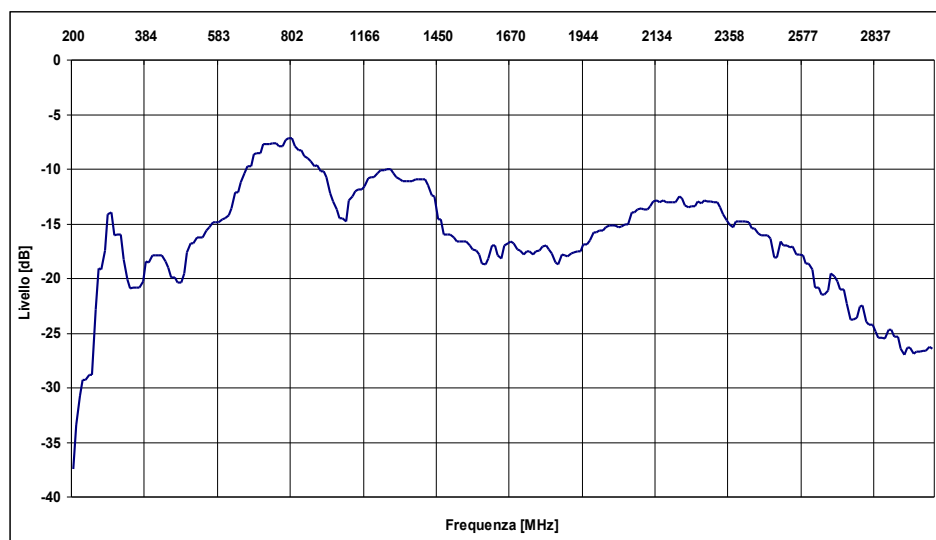


Fig. 5.6 Spettro del Prototipo 1 [200-3000MHz, 5dB/div]

## 5.3 Y *balun* : prototipi senza *air-bridge*

I prototipi 5, 6, 7, 8 non sono stati inseriti perchè presentano un andamento piuttosto deludente e assolutamente poco significativo.

### 5.3.1 Prototipo 2

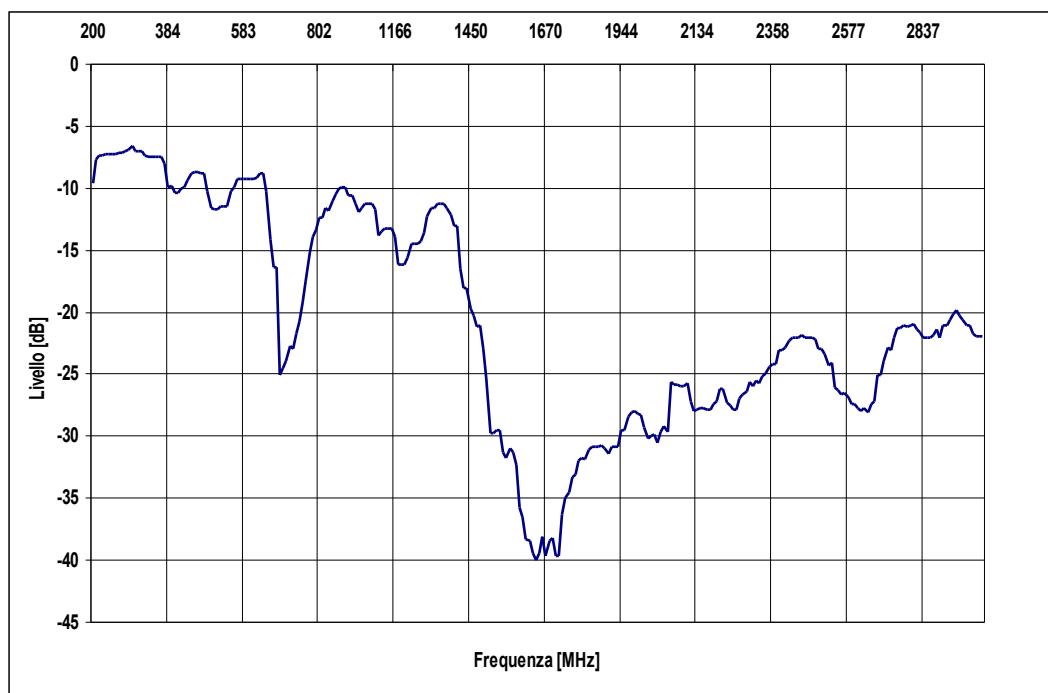
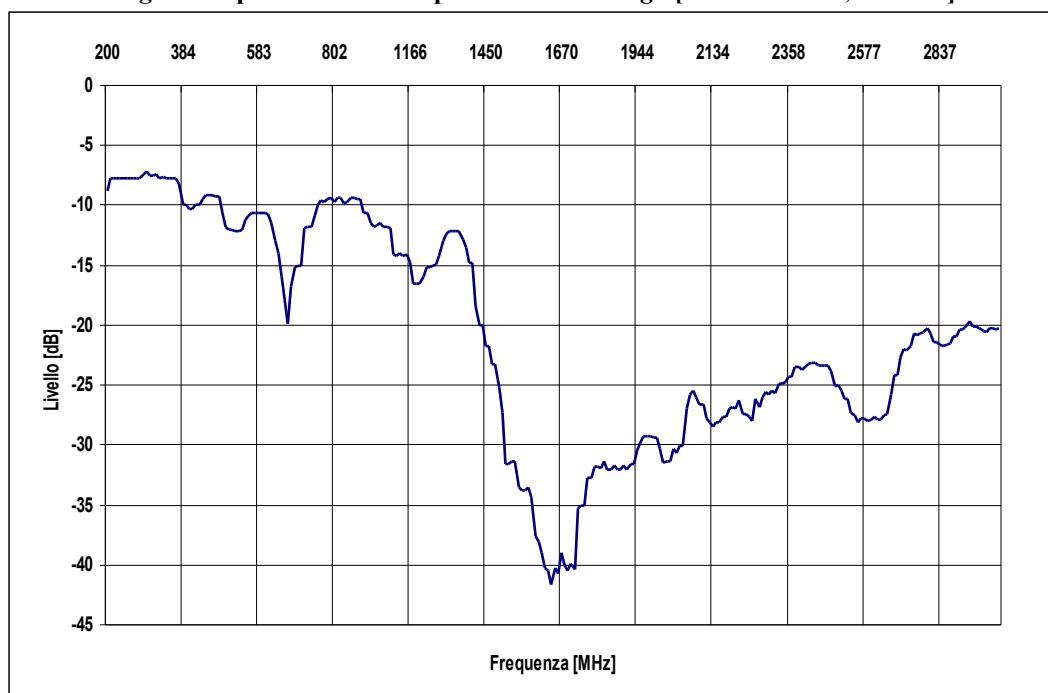


Fig. 5.7 Spettro del Prototipo 2 senza *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.3.2 Prototipo 3

Fig. 5.8 : Spettro del Prototipo 3 senza *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]



### 5.3.3 Prototipo 4

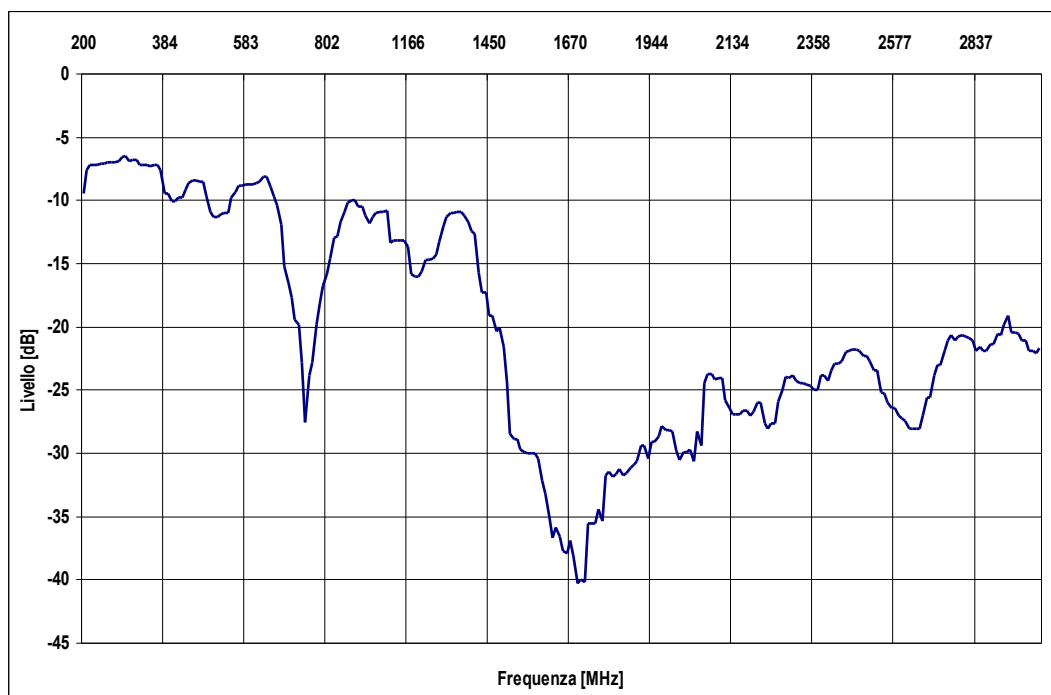


Fig. 5.9 : Spettro del Prototipo 4 senza *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.3.4 Prototipo 9

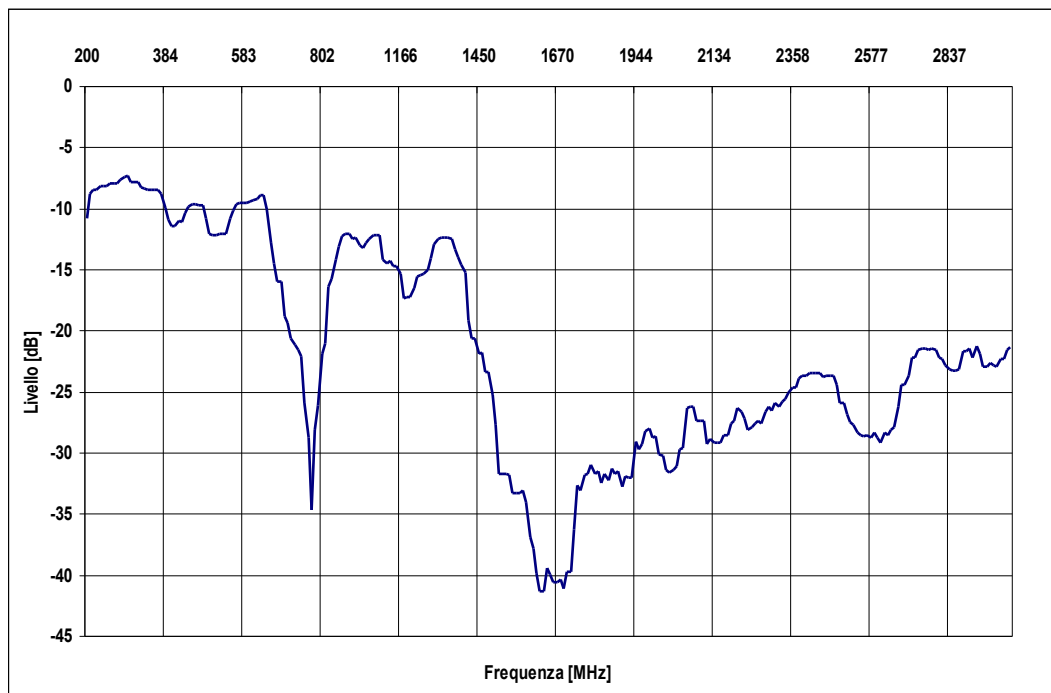


Fig. 5.10 : Spettro del Prototipo 9 senza *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.3.5 Prototipo 10

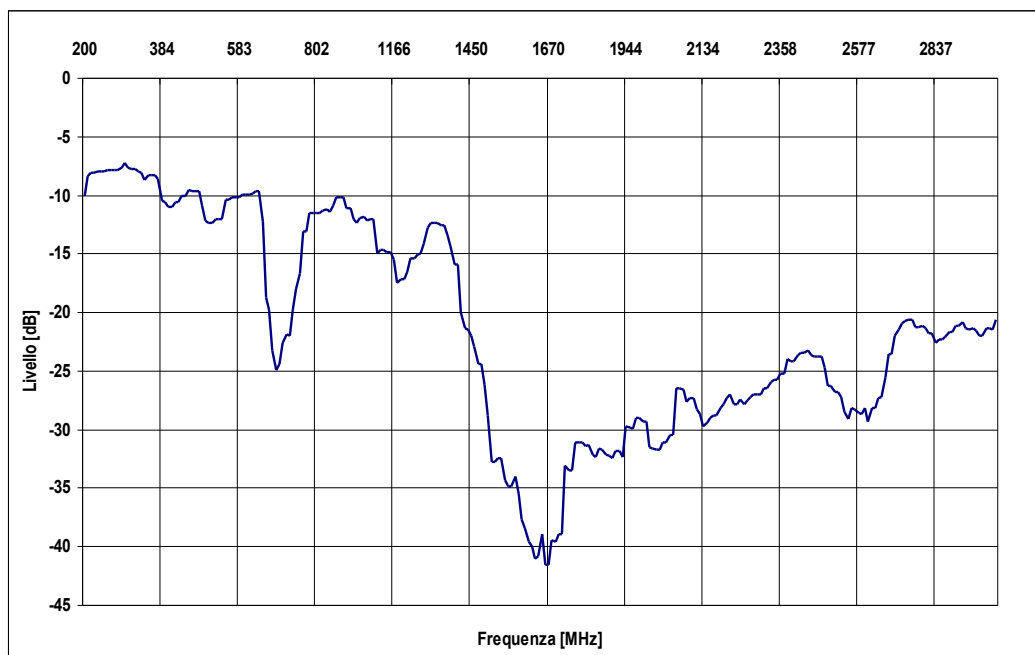


Fig. 5.11 : Spettro del Prototipo 10 senza *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

## 5.4 Y balun : prototipi con un *air-bridge*

### 5.4.1 Prototipo 2

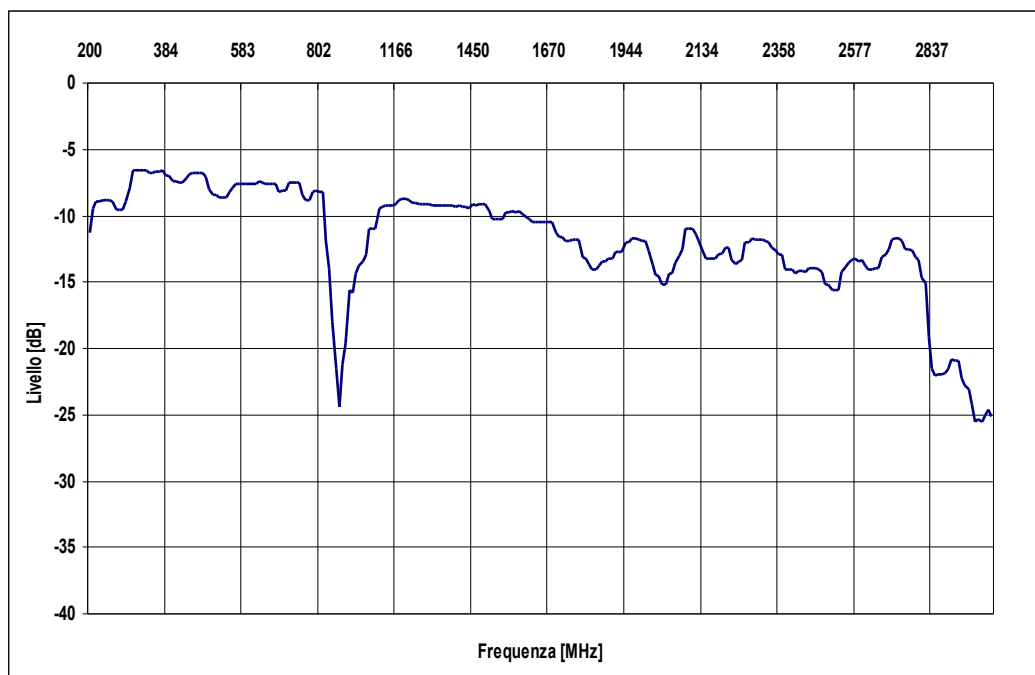


Fig. 5.12 : Spettro del Prototipo 2 con 1 *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.4.2 Prototipo 3

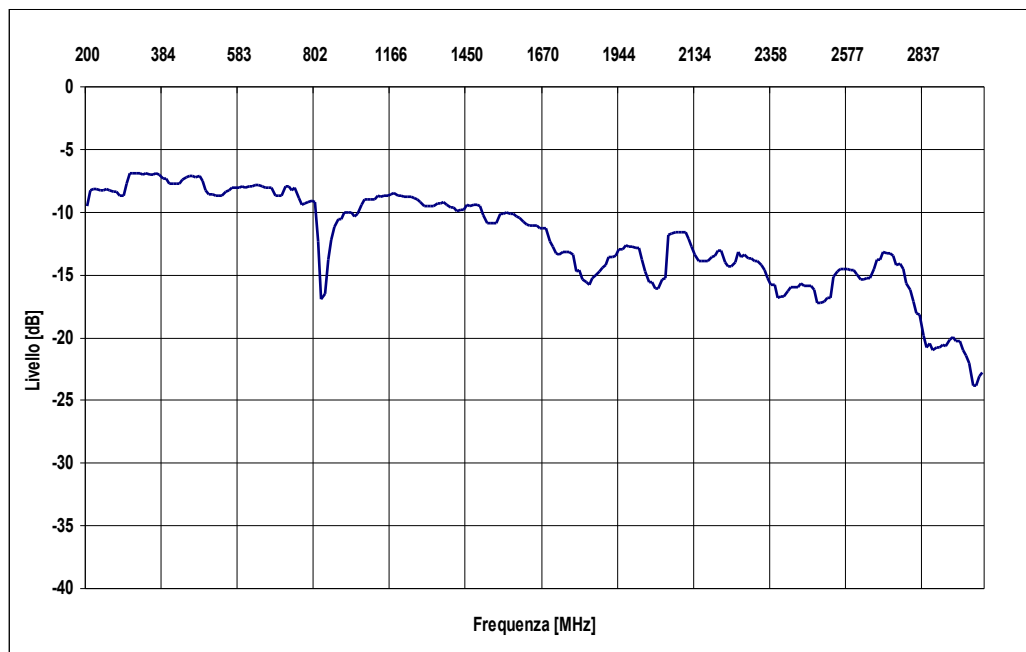


Fig. 5.13 : Spettro del Prototipo 3 con 1 *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.4.3 Prototipo 4

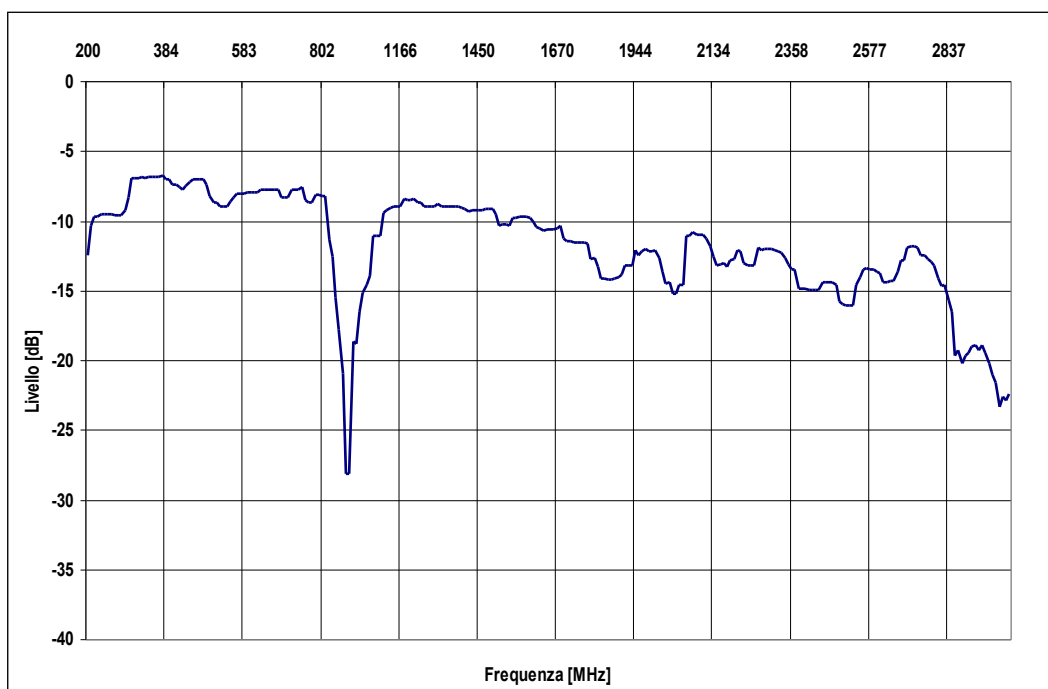


Fig. 5.14 : Spettro del Prototipo 4 con 1 *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

#### 5.4.4 Prototipo 9

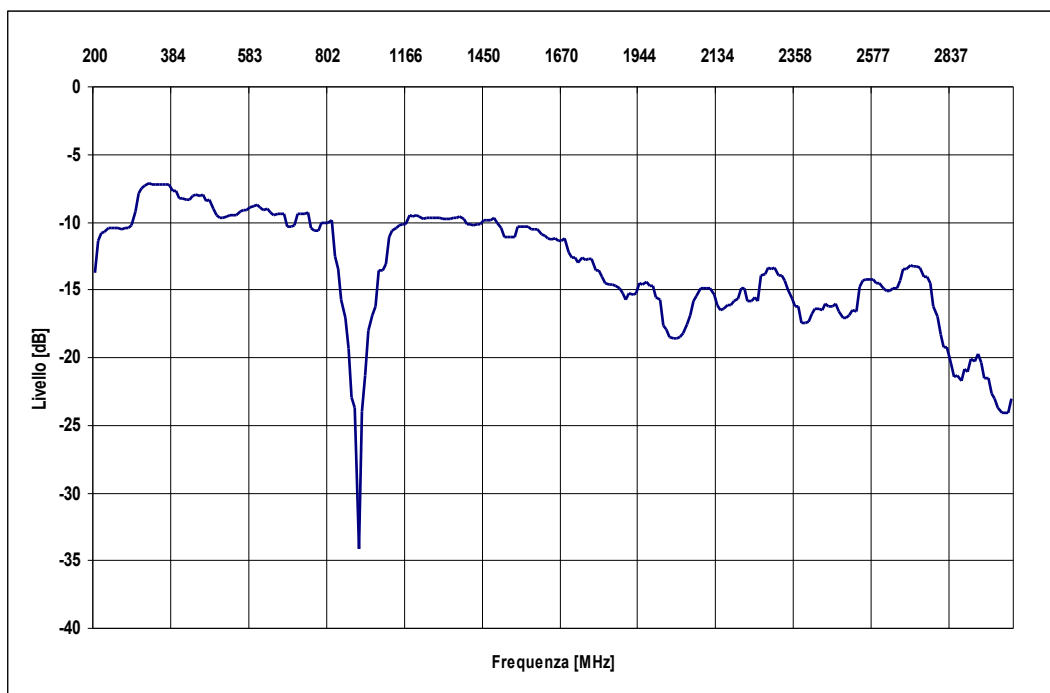


Fig. 5.15 : Spettro del Prototipo 9 con 1 *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

#### 5.4.5 Prototipo 10

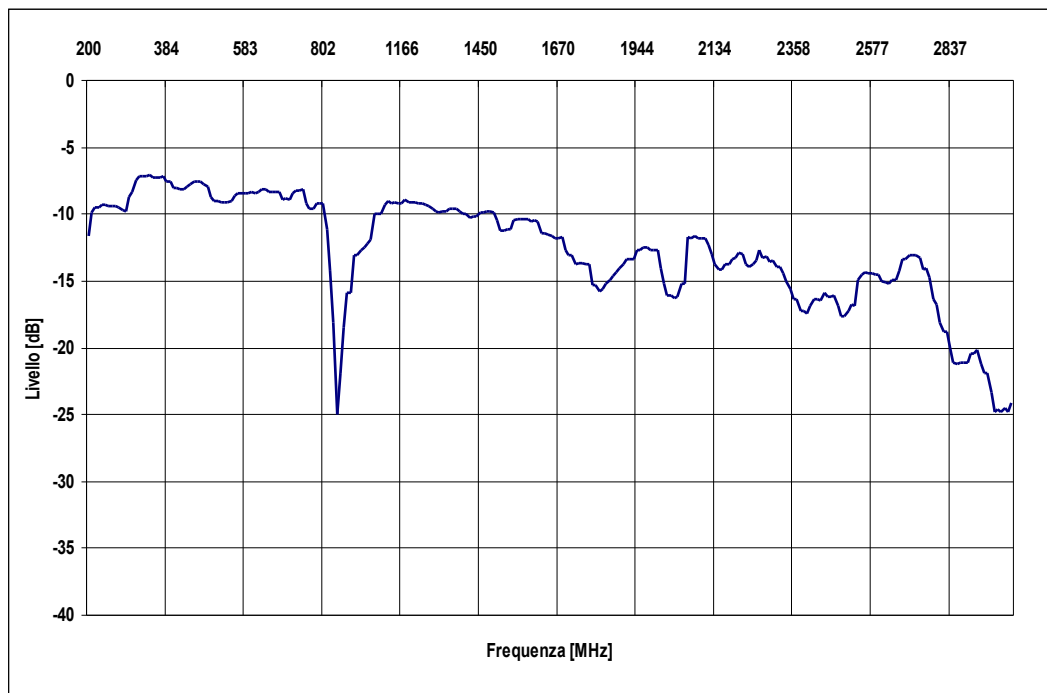


Fig. 5.16 : Spettro del Prototipo 10 con 1 *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

## 5.5 Y balun :prototipi con due air-bridges

### 5.5.1 Prototipo 2

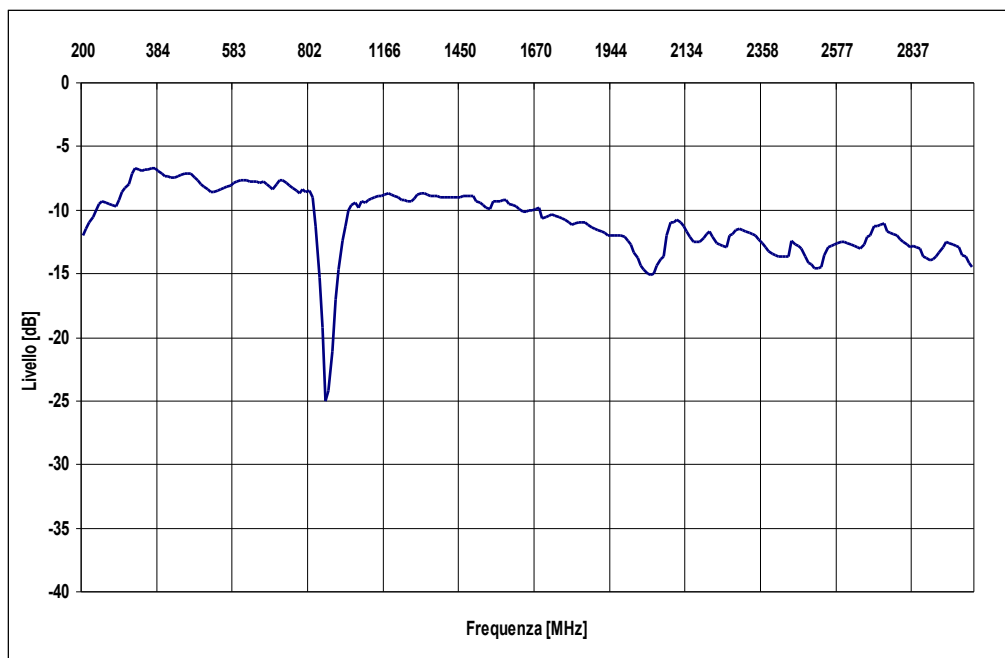


Fig. 5.17 : Spettro del Prototipo 2 con 2 air-bridges [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.2 Prototipo 3

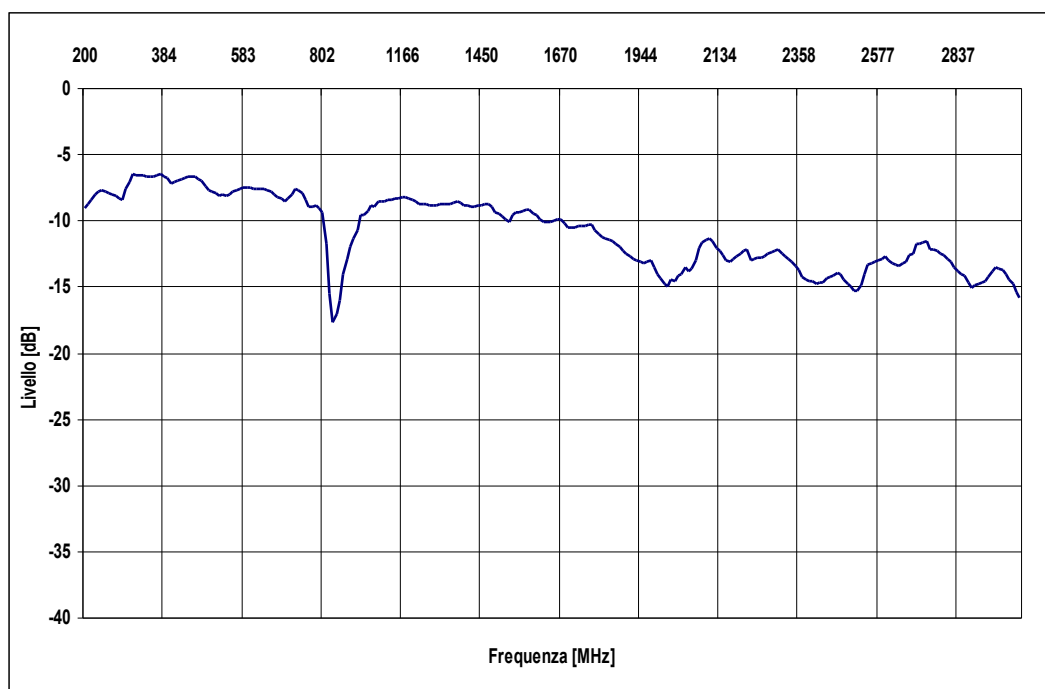


Fig. 5.18 : Spettro del Prototipo 3 con 2 air-bridges [200-3000MHz, 5dB/div]



### 5.5.3 Prototipo 4

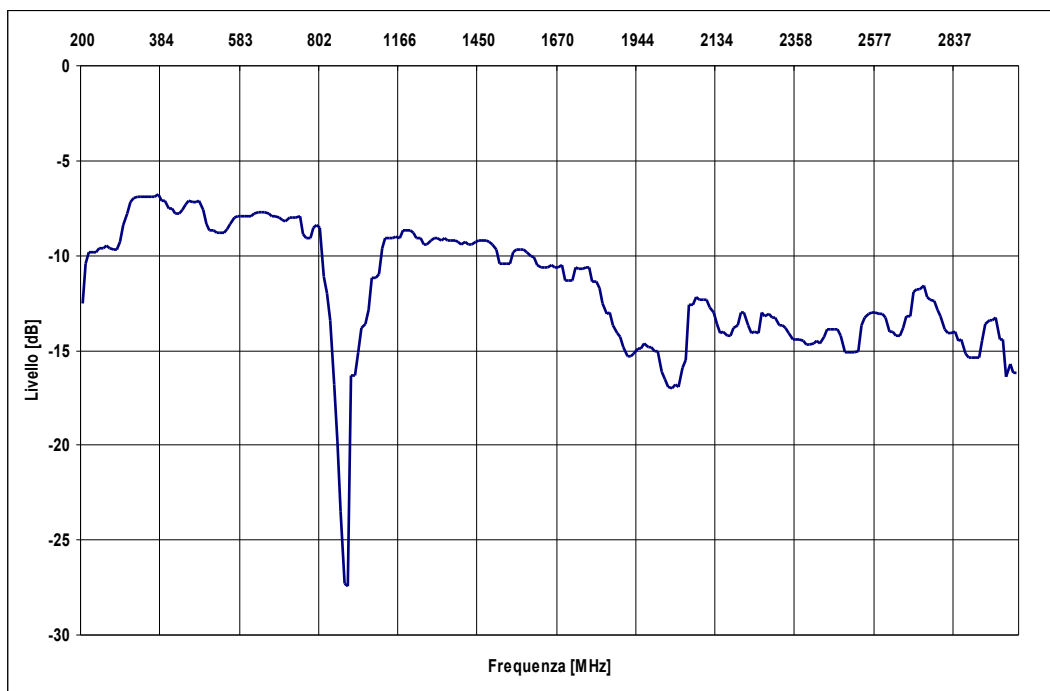


Fig. 5.19 : Spettro del Prototipo 4 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.4 Prototipo 5

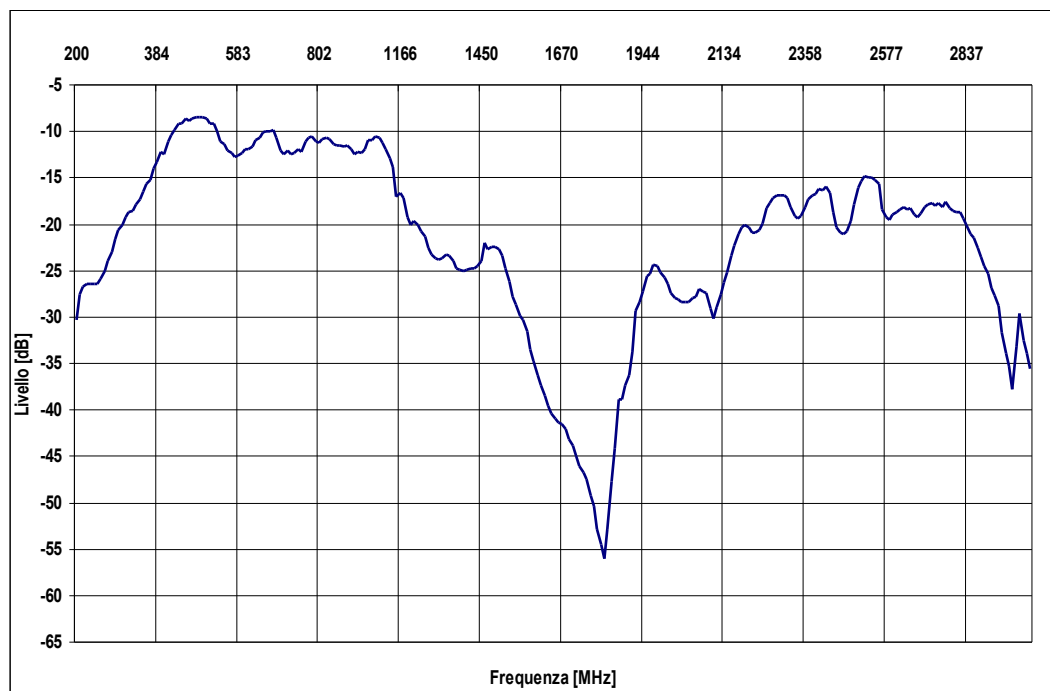


Fig. 5.20 : Spettro del Prototipo 5 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.5 Prototipo 6

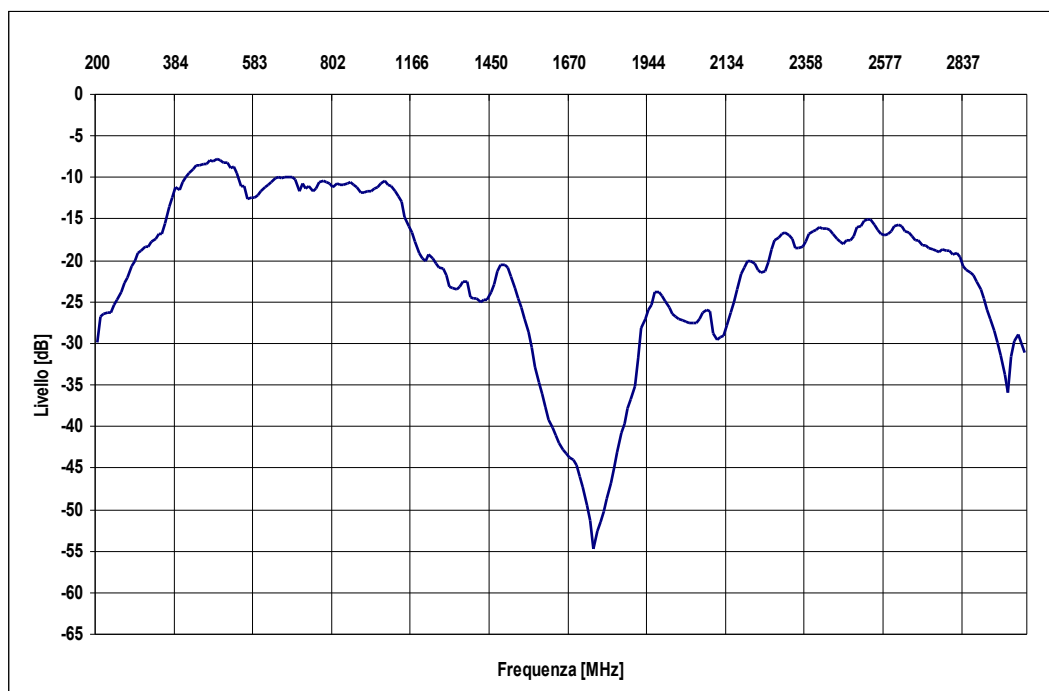


Fig. 5.21 : Spettro del Prototipo 6 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.6 Prototipo 7

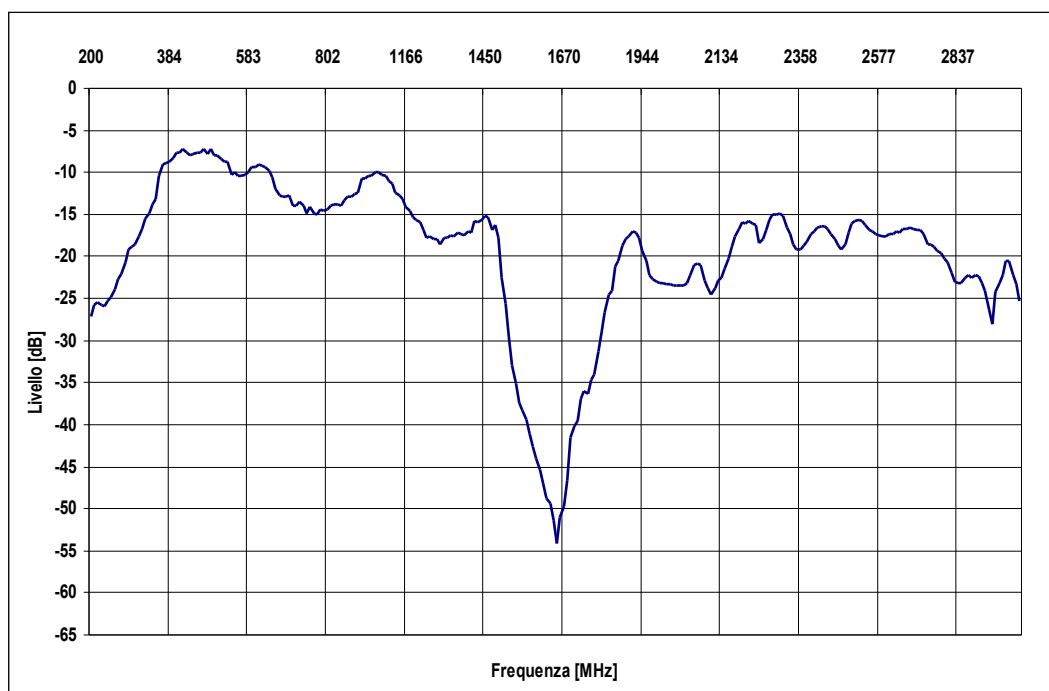


Fig. 5.22 : Spettro del Prototipo 7 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.7 Prototipo 8

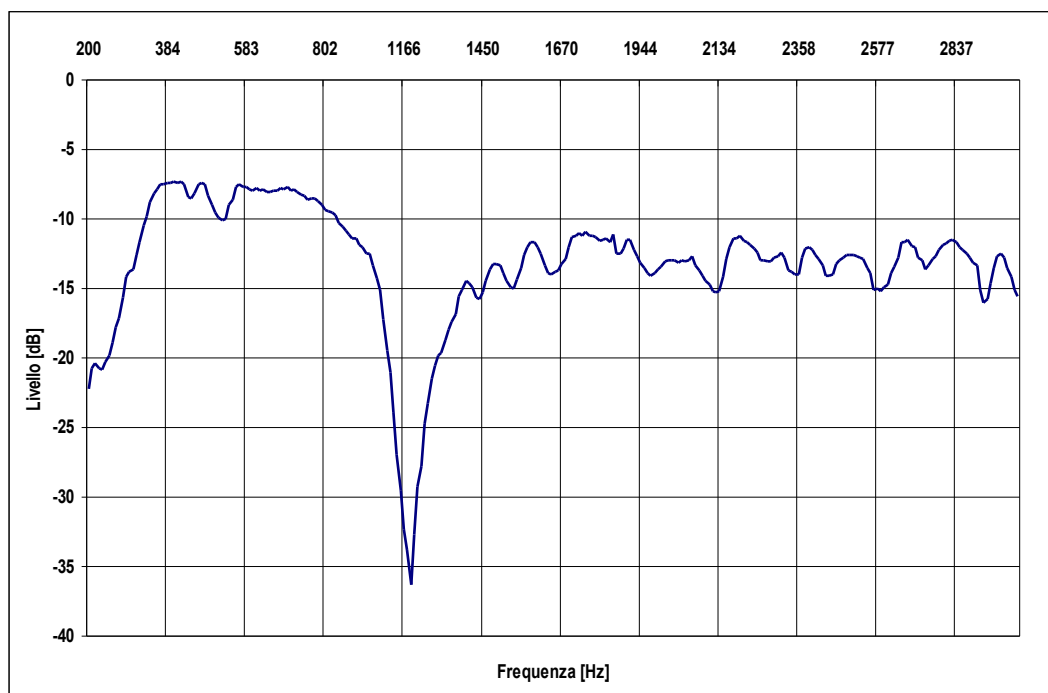


Fig. 5.23 : Spettro del Prototipo 8 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.8 Prototipo 9

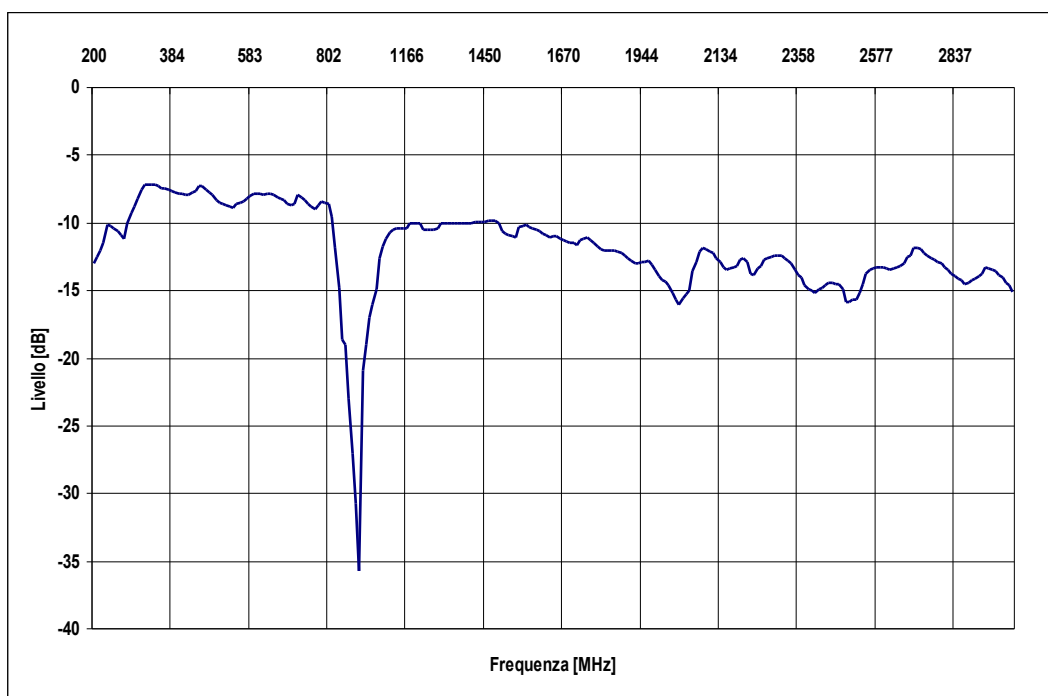


Fig. 5.24 : Spettro del Prototipo 9 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

### 5.5.9 Prototipo 10

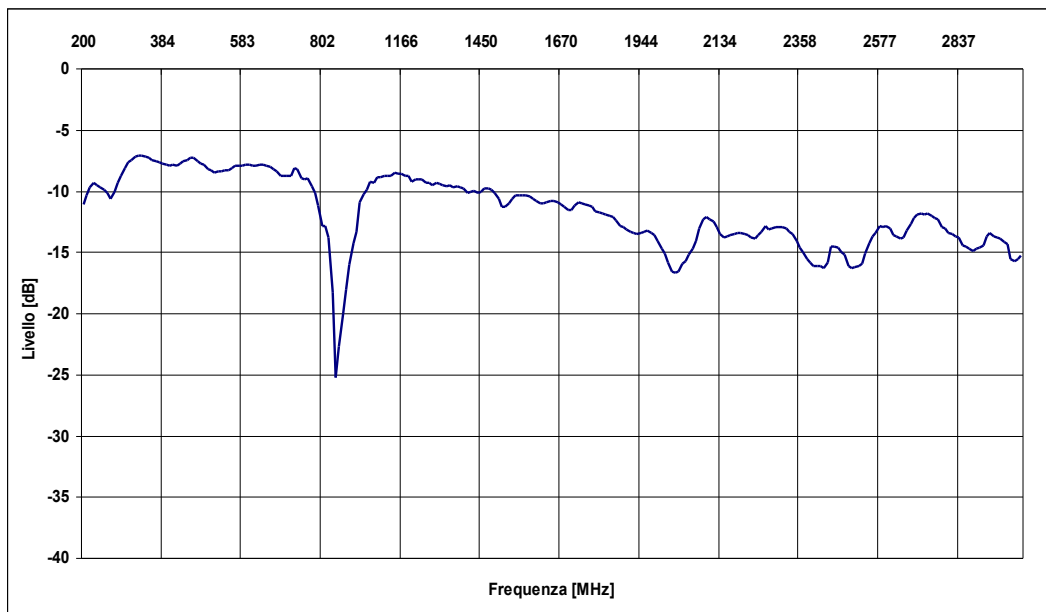


Fig. 5.25 : Spettro del Prototipo 10 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

## 5.6 Confronti e valutazioni

### 5.6.1 Confronto Marchand *balun-balun* a doppia Y

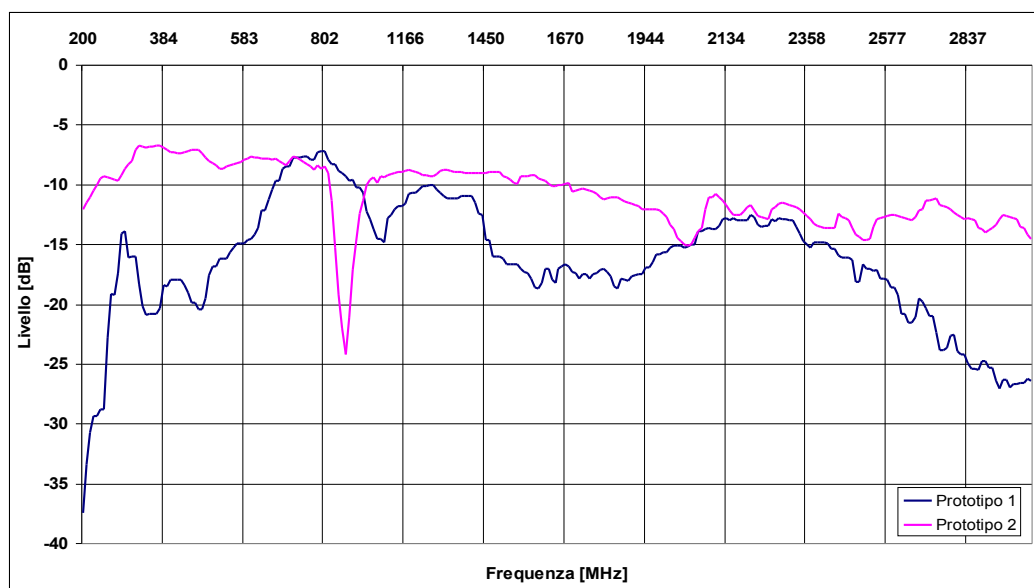
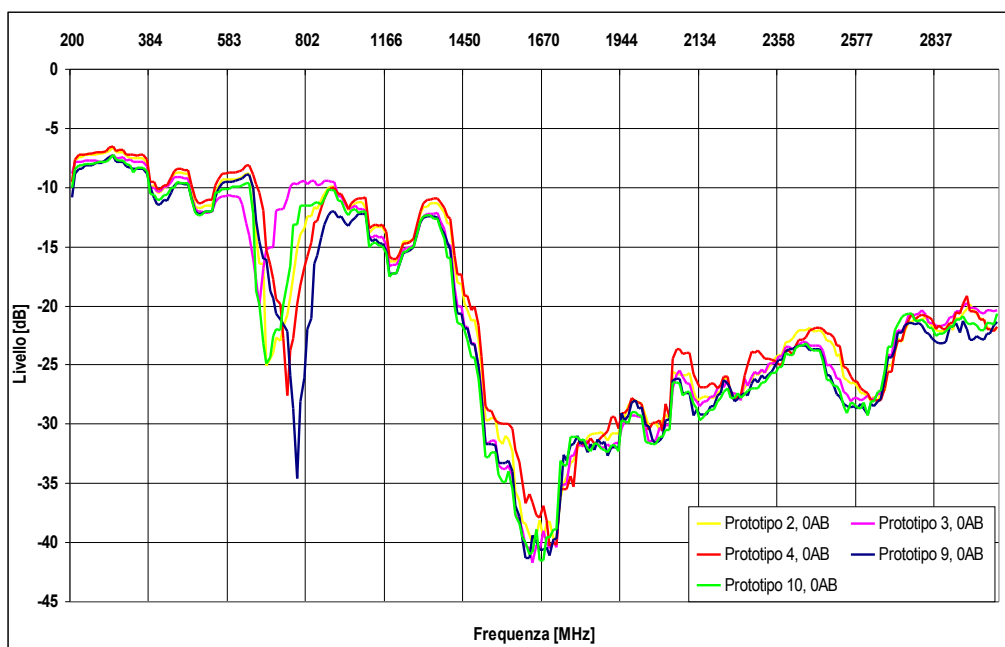


Fig. 5.26 : Confronto degli spettri Marchand *balun-balun* a doppia Y  
[200-3000MHz, 5dB/div]

In figura 5.26 sono riportati gli andamenti degli spettri del Marchand *balun* e del primo prototipo di *balun* a doppia Y realizzato. È possibile osservare come il Marchand presenti un andamento in frequenza peggiore di quello dell'altro prototipo e, soprattutto, un netto comportamento passa banda. Quest'ultima osservazione ci ha indotti ad abbandonare lo studio dei Marchand *balun* per favorire quello dei *balun* a doppia Y che è parso più promettente.

### 5.6.2 Confronto dei prototipi senza *air-bridge*



**Fig. 5.27 : Confronto degli spettri dei Prototipi 2, 3, 4, 9, 10  
senza *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]**

I prototipi 2, 3, 4, 9, 10 realizzati senza *air-bridge* evidenziano un comportamento scarso soprattutto a partire dai 1000 MHz; tuttavia su di essi si possono fare alcune considerazioni interessanti.

Innanzitutto osservando la figura 5.27, si può notare come gli spettri siano molto simili tra di loro ed abbiano un andamento piuttosto irregolare. Tutti i prototipi presentano un picco negativo tra i 700 e gli 800 MHz che differisce sostanzialmente nella profondità e nell'ampiezza di banda: quello più piccolo è relativo al prototipo 3; quelli dei prototipi 2 e

10 sono molto simili; quello invece del prototipo 9 ha profondità e banda maggiore di tutti. In tutti e cinque i casi il segnale, dopo una nuova caduta intorno ai 1200 MHz, precipita a -40 dB intorno ai 1600 MHz per poi risalire lentamente fino a -20 dB.

### 5.6.3 Confronto dei prototipi con un *air-bridge*

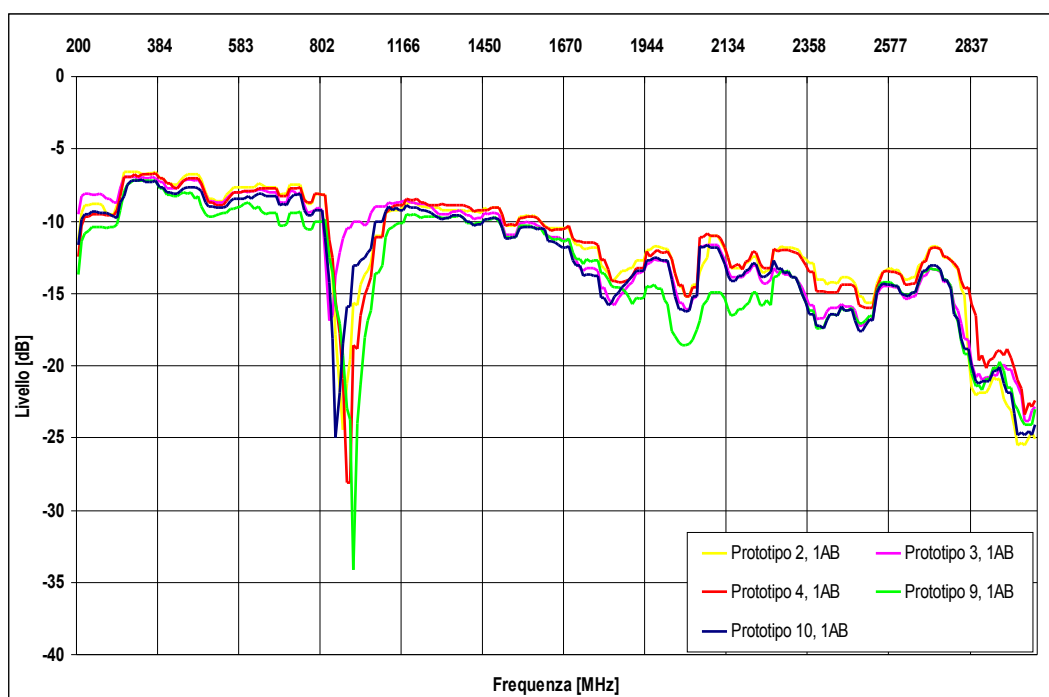


Fig. 5.28 : Confronto degli spettri dei Prototipi 2, 3, 4, 9, 10  
con un *air-bridge* [200-3000MHz, 5dB/div]

Anche in questo caso si può notare che gli spettri sono molto simili. Tuttavia esistono alcune differenze rispetto al caso precedente.

Si può osservare (fig.5.28) che non sono più presenti le brusche cadute di potenza intorno ai 1600 MHz, e che gli spettri rimangono a livelli al di sopra dei -15 dB per il 33,3% in più delle frequenze rispetto al caso senza *air-bridge*. I segnali scendono bruscamente solo oltre i 2500 MHz, ma rimangono comunque a livelli più alti del caso precedente. I forti picchi negativi sono ancora presenti anche se sono spostati leggermente verso centro banda; siamo infatti ora tra gli 850 ed i 950 MHz. Si può però osservare che la profondità di essi è rimasta praticamente invariata. Si può ancora notare che il prototipo 9 è ancora quello con

le prestazioni peggiori; possiede infatti il picco più profondo e più spostato verso centro banda e il suo spettro rimane sotto quello delle curve degli altri prototipi per quasi tutto il range di frequenze in esame. Il prototipo 4 ha mostrato il miglior comportamento alle frequenze più alte.

#### 5.6.4 Confronto dei prototipi con due *air-bridges*

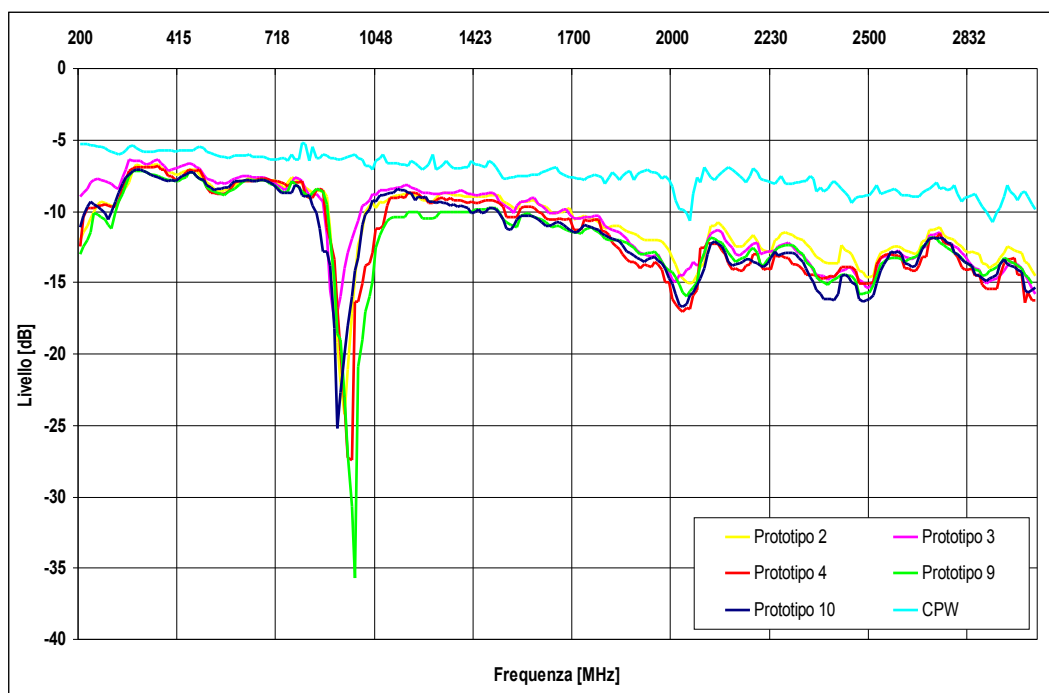


Fig. 5.29 : Confronto degli spettri dei Prototipi 2, 3, 4, 9, 10  
con due *air-bridges* e CPW [200-3000MHz, 5dB/div]

Questa è la serie di misure più interessante. I prototipi 5, 6, 7, 8 verranno analizzati successivamente.

Si sottolinea anche in questo caso il sostanziale accordo tra gli andamenti dei vari spettri (fig.5,29). Rispetto al caso precedente, i picchi negativi sono rimasti all'incirca nelle stesse posizioni ed hanno più o meno le stesse dimensioni. Si ha un netto miglioramento del comportamento alle alte frequenze, dove non è più presente la brusca caduta di potenza che prima si manifestava a partire dai 2500 MHz anche se si può osservare che il segnale tende ad abbassarsi all'aumentare della frequenza. Come si può notare dallo spettro della CPW

inserito nel grafico questa è però una tendenza presente anche nella semplice CPW e pertanto non è da attribuire ad un difetto di progettazione quanto piuttosto alla risposta del materiale. Si può altresì osservare che alcune cadute di potenza negli spettri 2, 3, 8, 9, 10, quali ad esempio quelli intorno ai 1500, ai 2000 ed ai 2800 MHz, si trovano alle stesse frequenze anche nella CPW e sono pertanto anche questi imputabili al comportamento dell'FR3.

Ricordiamo infine che in fase di progettazione si era accettato di assumere un disadattamento tra CPW e slotline che avrebbe comportato un peggioramento delle prestazioni di circa 2 dB, che diventano 4 dB essendo presenti due giunzioni CPW-slotline su ogni prototipo. Si può pertanto affermare che il comportamento dei *balun* è più che buono, a meno dei picchi attorno ai 900 MHz. Si consideri tra l'altro che gli *air-bridges* sono stati realizzati e saldati a mano con la ovvia imprecisione che questo comporta.

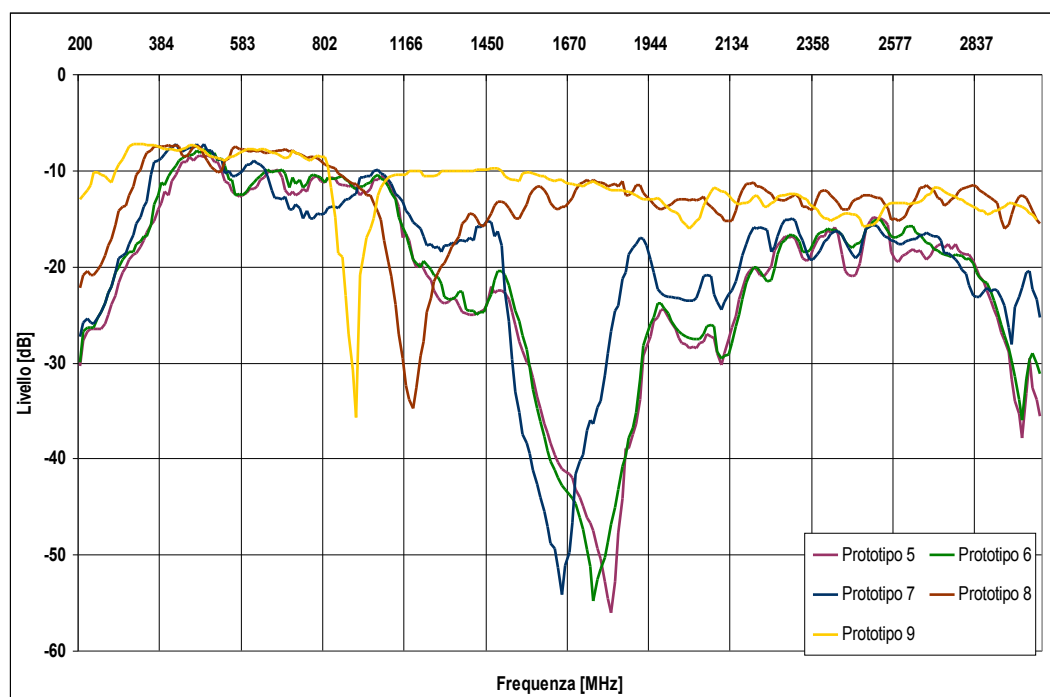


Fig. 5.30 : Confronto degli spettri dei Prototipi 5, 6, 7, 8, 9 con due *air-bridges* [200-3000MHz, 10dB/div]

Discorso a parte meritano i prototipi 5, 6, 7, 8, 9. Questi, infatti, ricordando quanto esposto nel capitolo 4, sono derivati tutti dal prototipo 5 per asportazione di materiale conduttore e perciò hanno un comportamento fortemente correlato tra di loro. Il prototipo 9, già inserito



nel grafico di fig. 5.29, è stato inserito anche in questo poichè anche esso è derivato dal prototipo 5.

Si può osservare (fig.5.30) che i prototipi 5 e 6 hanno uno spettro pressochè identico e presentano un picco estremamente profondo in centro banda, riscontrabile anche negli altri prototipi ma a frequenze più basse. A parte i prototipi 8 e 9, gli altri hanno dimostrato prestazioni pessime. Ciò è imputabile al fatto che il triangolo di Sierpinski con un numero troppo elevato di iterazioni presenta troppo materiale conduttore e, anzichè simulare un circuito aperto, in effetti fa “vedere” alla slotline un corto circuito stravolgendo in sostanza la struttura fondamentale del *balun* a doppia Y.

## 5.7 Considerazioni sui risultati

Si è cercato di dare una spiegazione a quei picchi presenti in tutti i prototipi che in effetti limitano la banda dei balun. Si sono pertanto fatte alcune osservazioni:

- i prototipi differiscono uno dall'altro solo per la forma del circuito aperto e di conseguenza ogni differenza nel comportamento è imputabile esclusivamente al modo in cui questo viene realizzato;
- la posizione dei picchi si sposta verso il centro della banda con l'aumentare degli *air-bridges* ma si conservano le dimensioni, specie per quanto riguarda la loro profondità;
- i prototipi 2 e 10 hanno uno spettro praticamente identico pur avendo forme differenti del circuito aperto: evidentemente quest'ultimo non è un parametro critico. L'unico fattore che accomuna i due è l'area del circuito aperto della slotline;
- i prototipi 2 e 3 hanno circuiti aperti uguali nella forma ma differenti per l'area e i rispettivi spettri differiscono sostanzialmente per il picco negativo: più profondo e vicino al centro banda quello del prototipo 2, meno marcato e più spostato verso le basse frequenze quello del prototipo 3;
- il picco dei prototipi 5, 6, 7, 8, 9 è sempre più spostato verso le basse frequenze

ed è sempre meno profondo all'aumentare della superficie vuota del circuito aperto della slotline. In particolare, i prototipi 5 e 6 presentano uno spettro estremamente somigliante: calcolando la porzione di area percentuale che differisce tra i due vediamo che è appena del 10% circa. Il prototipo 7 inizia ad avere uno spettro che segue il trend sopra descritto ed in effetti in questo caso si è attorno al 25% di superficie in meno. Si passa poi al 43% circa del prototipo 8, quota questa che inizia ad essere significativa, tanto che la curva si discosta parecchio dalle precedenti. Con l'ultima asportazione di materiale conduttore del prototipo 9 si arriva ad avere il picco meno profondo e a frequenza più bassa;

- il prototipo 9 si è dimostrato il peggiore tra i prototipi non frattali ed è quello che ha area dello scasso minore;

Da quanto detto si deduce che evidentemente esiste un legame tra area del circuito aperto della slotline e posizione e profondità del picco. Per verificare ciò, per ciascun prototipo si sono calcolati i valori delle aree dei circuiti aperti delle slotline e si sono inseriti in una tabella (tab.3) assieme ai corrispondenti valori di profondità e posizione dei picchi.

	<i>Area [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Profondità del picco [dB]</i>	<i>Posizione del picco [MHz]</i>
Prototipo 3	1013,97	-17,7	874
Prototipo 2	457,45	-25,0	900
Prototipo 10	457,45	-25,2	897
Prototipo 4	336,36	-27,4	930
Prototipo 9	248,79	-35,7	944
Prototipo 8	186,59	-36,3	1202
Prototipo 7	139,95	-54,1	1650
Prototipo 6	104,96	-54,8	1759
Prototipo 5	78,72	-56,0	1815

**Tab. 3**

Successivamente si sono graficati tali valori ponendo sull'asse delle ascisse le aree e su quello delle ordinate la profondità dei picchi (in valore assoluto) e la loro posizione, per

vedere l'andamento di queste due grandezze al variare dell'area (fig. 5.31).

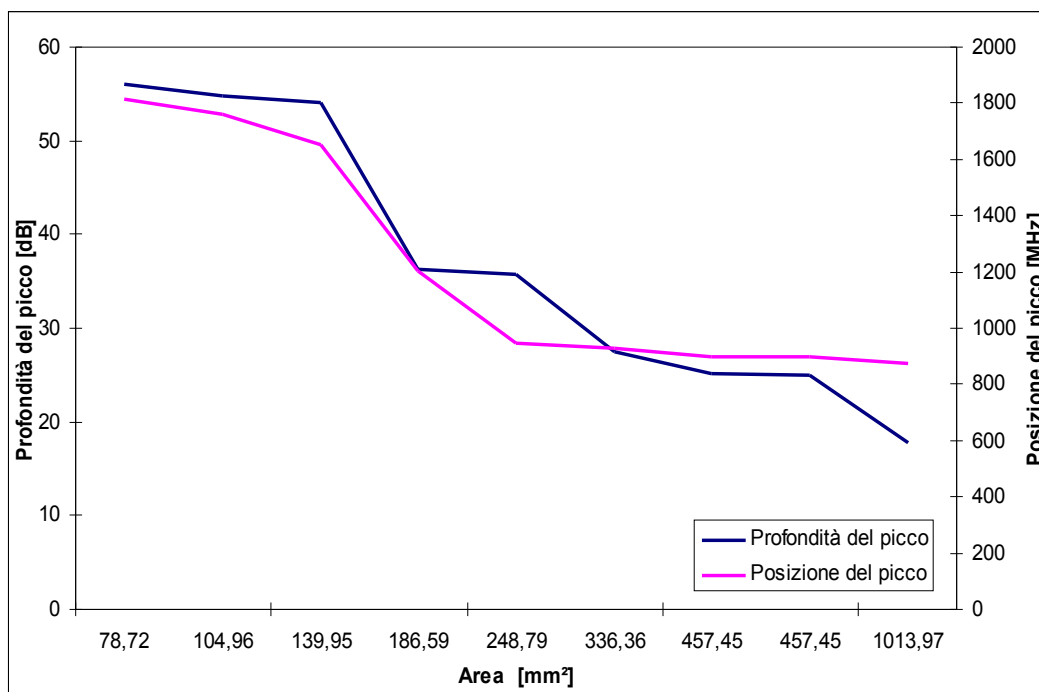


Fig. 5.31 : Andamenti della profondità e della posizione del picco al variare dell'area

Risulta in tal modo evidente la relazione sopra supposta; infatti si può vedere come all'aumentare dell'area, la profondità dei picchi diminuisca e la loro posizione segua la stessa tendenza. Tuttavia si può notare che l'andamento della posizione dei picchi sia più regolare e che, dopo un certo valore di area, sembra non subire più variazioni. Questo fa supporre che aumentando ancora l'area, il picco resti in una posizione pressochè invariata. Viceversa l'andamento della profondità del picco va per salti e si può supporre che, aumentando ulteriormente l'area, il picco si riduca.

Per verificare le nostre supposizioni si è progettato e realizzato un ultimo prototipo di *balun* del quale riportiamo di seguito la descrizione e l'analisi.

## 5.8 Prototipo 11

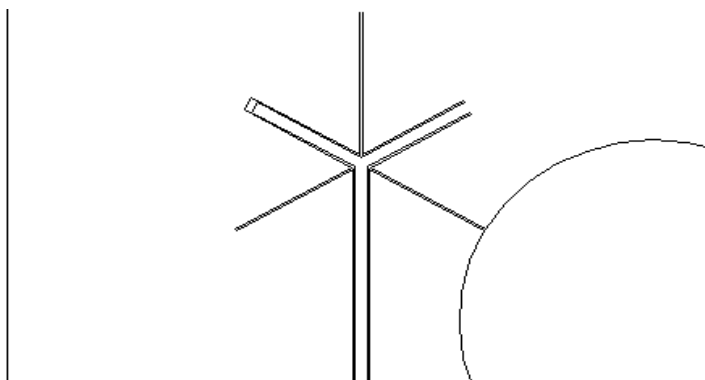


Fig. 5.32 : Prototipo 11

Come si può vedere questo è stato realizzato praticando uno scasso dal profilo circolare. Si è cercato di dimensionarlo in modo da coprire la superficie maggiore possibile senza andare ad intaccare eccessivamente il piano di terra della CPW, che altrimenti sarebbe rimasta troppo sbilanciata, nè la slotline, facendo in modo che questa terminasse ad angolo retto per non modificarne l'impedenza di progetto. L'area ad esso associata è di 2057,24  $mm^2$ . Visti i risultati dei precedenti prototipi si è deciso di evitare di effettuare le misure senza e con un *air-bridge* e quindi di procedere direttamente all'analisi con due *air-bridges*. Si riporta in figura 5.33 l'andamento dello spettro rilevato in camera anecoica.

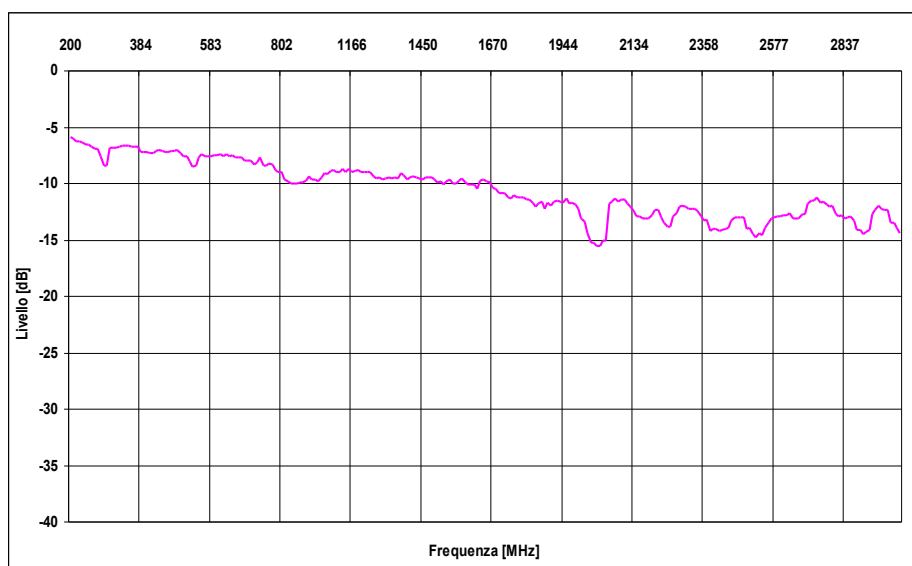


Fig. 5.33 : Spettro del Prototipo 11 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

Il picco, come si può vedere, è drasticamente ridotto e la lieve caduta di potenza che si

manifesta è presente all'incirca alle stesse frequenze: si è avuta pertanto conferma di quanto ipotizzato. Mettendo a questo punto a confronto lo spettro del prototipo 11 con quello del prototipo che ha dimostrato il miglior comportamento, cioè il numero 3, e quello della CPW, si possono fare ulteriori interessanti osservazioni (fig.4.34)

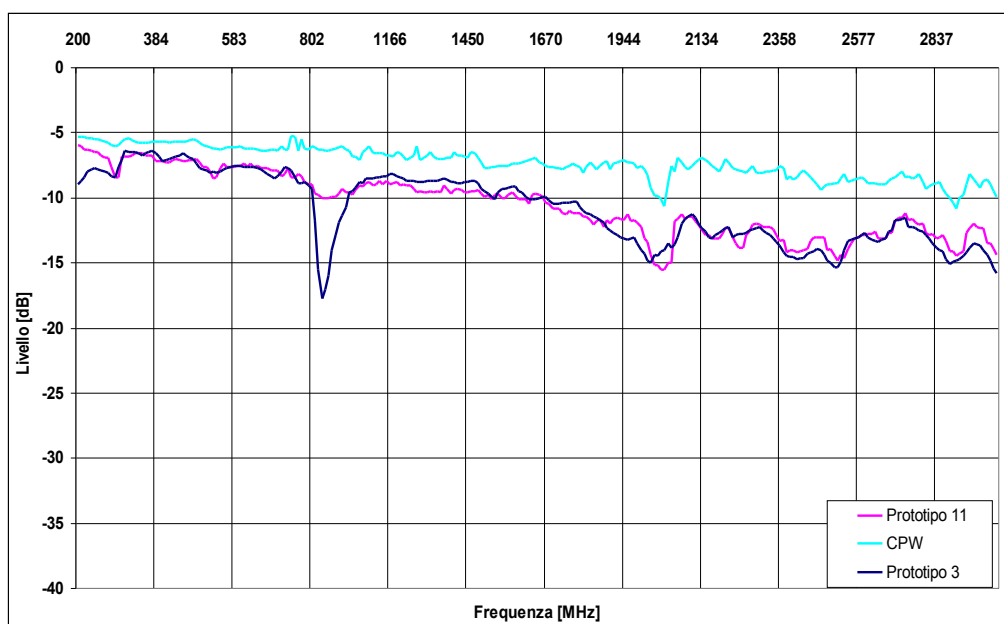


Fig. 5.34 : Spettro del Prototipo 11 con 2 *air-bridges* [200-3000MHz, 5dB/div]

Si può osservare come il prototipo 11 sia in linea con il prototipo 3. Le differenze più evidenti sono alle estremità di banda dove guadagna qualche dB, soprattutto alle frequenze più basse, e tra i 900 e i 1600 MHz circa dove perde qualcosa anche se si rimane entro il dB di differenza. Anche in questo caso si può vedere come il materiale influenzi notevolmente il rendimento dei *balun*.

## 6 CONCLUSIONI

Nella presente tesi è stato portato avanti un attento lavoro di ricerca sui *balun* a larga banda a circuito stampato. Tra questi si è posta particolare attenzione e si sono analizzati approfonditamente i *balun* CPW-slotline a doppia Y studiandone il comportamento al variare di forma e dimensione di quello che è stato individuato come il loro parametro più critico e cioè il circuito aperto della slotline. Si sono pertanto progettati e poi realizzati 11 prototipi di *balun*; su questi sono state effettuate delle misure che poi sono state raccolte in tabelle, graficate e successivamente analizzate criticamente. Si sono potuti così ricavare i seguenti risultati sperimentali:

- L'ipotesi di Schüppert per i Marchand *balun* utilizzata in fase di progetto ed enunciata nel paragrafo 4.2.1 non è valida nel caso di *balun* a doppia Y; a conferma di ciò il comportamento nettamente migliore dimostrato dal prototipo 2 rispetto al prototipo 1.
- Non si hanno particolari vantaggi nell'impiego dello stub radiale nei *balun* a doppia Y, come invece da letteratura sembra riportare in altre tipologie di *balun*.
- I vantaggi che la teoria frattale riporta in altri ambiti dei campi elettromagnetici, quale ad esempio quello delle antenne, non sussistono in quello da noi indagato o per lo meno non sono così rilevanti, soprattutto se confrontati con altre geometrie più semplici da implementare e realizzare che hanno prestazioni pressochè equivalenti.
- È stata dimostrata la necessità dell'utilizzo di *air-bridge*;
- È stato confermato che nei *balun* a doppia Y il circuito aperto della slotline è il punto critico. A differenza di quanto si è pensato però, ed è questo il risultato più interessante, ciò che determina il buon funzionamento del dispositivo non è la forma del circuito aperto quanto piuttosto la superficie che questo occupa.

- Sulle basi di quanto dimostrato è stato prodotto un prototipo di *balun* dalle prestazioni molto interessanti.
- Come sviluppi futuri si potrebbe studiare il comportamento dei *balun* a frequenze maggiori e su materiali con costante dielettrica più alta. Sarebbe inoltre interessante verificare il rendimento dell'ultimo *balun* realizzato su un antenna a circuito stampato.

## TABELLE DATI

Si riportano di seguito le tabelle contenenti i dati delle misure effettuate dui prototipi analizzati.

### 1 Marchand *balun*

Frequenza [MHz]	Livello [dB]	Frequenza [MHz]	Livello [dB]	Frequenza [MHz]	Frequenza [MHz]
200	-37,4	1154	-11,8	2109	-13,4
219	-33,4	1166	-11,6	2120	-12,9
230	-30,7	1200	-10,8	2134	-12,8
233	-29,3	1202	-10,7	2146	-13,0
239	-29,3	1205	-10,7	2150	-12,8
244	-28,8	1219	-10,4	2157	-13,0
247	-28,8	1250	-10,1	2162	-13,0
250	-22,8	1255	-10,1	2168	-13,0
261	-19,1	1266	-10,0	2185	-13,0
270	-19,2	1269	-10,0	2193	-12,5
281	-17,4	1300	-10,4	2196	-12,7
284	-14,1	1320	-10,7	2200	-13,3
300	-13,9	1328	-10,9	2213	-13,5
317	-16,1	1339	-11,1	2221	-13,4
320	-16,0	1345	-11,1	2230	-13,4
326	-16,0	1350	-11,1	2250	-12,9
328	-18,3	1356	-11,1	2258	-13,1
348	-20,1	1370	-10,9	2280	-12,8
350	-20,9	1381	-10,9	2300	-12,9
354	-20,8	1400	-10,9	2308	-12,9
356	-20,8	1401	-10,9	2311	-13,0
359	-20,8	1423	-11,5	2319	-13,0
362	-20,3	1426	-12,4	2330	-13,5



384	-18,4	1434	-12,5	2336	-14,1
393	-18,5	1450	-14,6	2350	-14,7
400	-17,9	1457	-14,6	2358	-15,0
404	-17,9	1471	-16,0	2364	-15,3
407	-17,9	1474	-16,0	2389	-14,8
415	-17,9	1485	-16,0	2395	-14,8
421	-18,4	1500	-16,2	2398	-14,8
429	-19,0	1516	-16,6	2400	-14,8
446	-19,9	1518	-16,6	2414	-14,9
450	-19,9	1521	-16,6	2417	-15,4
457	-20,4	1524	-16,6	2420	-15,4
458	-20,4	1550	-17,0	2442	-15,9
474	-19,5	1560	-17,3	2445	-16,1
500	-17,6	1563	-17,4	2448	-16,1
508	-16,8	1566	-17,8	2450	-16,1
514	-16,8	1574	-18,6	2456	-16,3
522	-16,2	1600	-18,7	2482	-18,1
524	-16,2	1605	-18,2	2487	-18,1
527	-16,2	1616	-17,0	2496	-16,6
550	-15,6	1628	-17,0	2500	-17,0
560	-15,3	1630	-17,9	2507	-17,0
575	-14,9	1644	-18,2	2538	-17,2
578	-14,9	1650	-17,0	2550	-17,1
583	-14,9	1667	-16,8	2566	-17,8
586	-14,6	1670	-16,6	2571	-17,8
589	-14,5	1675	-16,8	2577	-17,9
600	-14,2	1700	-17,3	2585	-18,6
608	-13,6	1712	-17,4	2588	-18,6
645	-12,1	1714	-17,8	2600	-19,2
650	-12,1	1750	-17,5	2616	-20,8
678	-11,2	1751	-17,5	2619	-20,8
700	-10,4	1759	-17,8	2624	-21,5
715	-9,7	1765	-17,5	2630	-21,5
718	-9,7	1768	-17,4	2650	-21,1
746	-8,6	1796	-17,1	2670	-19,5
750	-8,5	1800	-17,0	2672	-19,8
751	-8,5	1815	-17,3	2700	-20,3
754	-7,7	1838	-17,7	2703	-21,0
757	-7,7	1843	-18,5	2706	-21,0

760	-7,7	1850	-18,7	2722	-22,3
765	-7,6	1863	-17,8	2750	-23,8
776	-7,6	1882	-17,9	2756	-23,8
793	-7,9	1891	-18,0	2759	-23,6
796	-7,9	1900	-17,7	2784	-22,6
799	-7,3	1919	-17,6	2800	-22,5
800	-7,2	1922	-17,5	2823	-23,9
802	-7,2	1924	-17,5	2826	-24,2
804	-7,9	1944	-16,9	2832	-24,2
850	-8,3	1950	-16,9	2837	-24,9
874	-8,3	1961	-16,5	2848	-25,4
897	-8,8	1964	-15,8	2850	-25,4
900	-9,0	1966	-15,8	2868	-25,5
916	-9,3	1975	-15,6	2871	-24,7
922	-9,7	1978	-15,6	2879	-24,7
930	-9,6	2000	-15,3	2882	-25,3
944	-10,2	2008	-15,1	2890	-25,3
950	-10,2	2020	-15,1	2900	-26,4
956	-10,7	2025	-15,1	2918	-27,0
986	-12,2	2031	-15,3	2932	-26,3
989	-12,9	2039	-15,2	2935	-26,3
1000	-13,7	2042	-15,0	2944	-26,9
1048	-14,5	2050	-15,0	2950	-26,7
1050	-14,5	2076	-13,9	2958	-26,7
1054	-14,8	2084	-13,9	2974	-26,6
1100	-12,8	2090	-13,7	2977	-26,6
1121	-12,5	2098	-13,6	2983	-26,2
1135	-12,0	2100	-13,7	3000	-26,4
1150	-11,8	2104	-13,7		

## 2 Y balun : Prototipi senza air-bridge

Frequenza [MHz]	LIVELLO [dB]				
	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	Prototipo 8	Prototipo 9
200	-9,6	-8,8	-9,5	-10,8	-10,0
219	-7,7	-7,8	-7,6	-8,8	-8,4

230	-7,4	-7,8	-7,2	-8,4	-8,1
233	-7,4	-7,8	-7,2	-8,4	-8,1
239	-7,2	-7,7	-7,2	-8,1	-8,0
244	-7,2	-7,7	-7,1	-8,1	-8,0
247	-7,2	-7,7	-7,1	-8,1	-8,0
250	-7,2	-7,7	-7,0	-7,9	-7,9
261	-7,1	-7,8	-7,0	-7,9	-7,8
270	-7,1	-7,8	-7,0	-7,9	-7,8
281	-7,0	-7,7	-6,9	-7,6	-7,8
284	-6,9	-7,4	-6,6	-7,4	-7,6
300	-6,6	-7,2	-6,5	-7,3	-7,2
317	-7,0	-7,5	-6,9	-7,8	-7,6
320	-7,0	-7,5	-6,8	-7,8	-7,7
326	-7,0	-7,4	-6,8	-7,8	-7,7
328	-7,3	-7,7	-7,2	-8,2	-8,0
348	-7,5	-7,6	-7,2	-8,3	-8,1
350	-7,5	-7,8	-7,2	-8,4	-8,7
354	-7,5	-7,8	-7,3	-8,4	-8,3
356	-7,5	-7,8	-7,2	-8,4	-8,3
359	-7,5	-7,8	-7,2	-8,4	-8,3
362	-8,0	-8,2	-7,6	-8,8	-8,6
384	-9,9	-10,0	-9,5	-9,9	-10,5
393	-9,8	-10,0	-9,5	-10,9	-10,6
400	-10,4	-10,3	-10,1	-11,4	-11,0
404	-10,4	-10,3	-10,1	-11,4	-11,0
407	-10,0	-9,9	-9,8	-11,0	-10,6
415	-9,9	-9,9	-9,8	-11,1	-10,6
421	-9,4	-9,5	-9,1	-10,4	-10,0
429	-8,8	-9,1	-8,6	-9,8	-10,0
446	-8,7	-9,1	-8,4	-9,6	-9,5
450	-8,7	-9,1	-8,4	-9,6	-9,6
457	-8,8	-9,2	-8,5	-9,7	-9,6
458	-8,8	-9,2	-8,5	-9,7	-9,6
474	-10,2	-10,7	-9,7	-10,8	-10,9
500	-11,6	-11,8	-10,9	-12,0	-12,1
508	-11,7	-12,0	-11,3	-12,2	-12,3
516	-11,7	-12,0	-11,3	-12,2	-12,3
522	-11,5	-12,1	-11,1	-12,0	-12,0
524	-11,5	-12,1	-11,0	-12,0	-12,0
527	-11,5	-12,0	-11,0	-12,0	-12,0
550	-10,3	-11,2	-9,8	-10,8	-10,4
560	-9,9	-10,9	-9,3	-10,1	-10,4
575	-9,3	-10,7	-8,8	-9,6	-10,1
578	-9,3	-10,7	-8,8	-9,5	-10,1
583	-9,3	-10,6	-8,7	-9,5	-10,1
586	-9,3	-10,7	-8,7	-9,5	-9,9

589	-9,3	-10,7	-8,7	-9,4	-9,9
600	-9,2	-10,8	-8,6	-9,3	-9,9
608	-9,1	-11,4	-8,5	-9,2	-9,8
645	-8,8	-13,0	-8,1	-8,9	-9,6
650	-8,8	-14,0	-8,1	-8,9	-9,6
678	-10,2	-16,0	-8,9	-10,0	-12,2
700	-14,1	-17,8	-9,7	-12,8	-18,7
715	-16,4	-19,9	-10,4	-14,5	-19,8
718	-16,4	-16,8	-11,9	-16,0	-23,2
746	-25,1	-15,2	-15,2	-16,0	-24,9
750	-24,5	-15,0	-16,5	-18,7	-24,4
751	-24,0	-15,0	-17,7	-19,3	-22,6
754	-22,7	-11,9	-19,4	-20,6	-21,9
757	-23,0	-11,8	-19,8	-21,1	-22,0
760	-21,7	-11,8	-22,8	-21,5	-19,8
765	-20,7	-10,9	-27,5	-22,1	-18,0
776	-19,2	-9,9	-23,8	-25,9	-16,6
793	-17,5	-9,6	-22,8	-28,7	-13,1
796	-15,1	-9,7	-19,8	-34,6	-13,1
799	-13,9	-9,5	-18,2	-28,1	-11,5
800	-13,4	-9,4	-16,7	-26,1	-11,5
802	-12,4	-9,7	-15,8	-21,9	-11,5
804	-12,4	-9,4	-14,6	-21,0	-11,5
850	-11,6	-9,4	-12,9	-16,4	-11,3
874	-11,8	-9,8	-12,8	-15,7	-11,2
897	-11,0	-9,7	-11,7	-14,2	-11,4
900	-10,5	-9,4	-10,9	-13,1	-10,9
916	-10,0	-9,4	-10,2	-12,3	-10,1
922	-9,9	-9,5	-10,0	-12,0	-10,2
930	-9,9	-9,5	-10,0	-12,0	-10,2
944	-10,6	-10,7	-10,5	-12,5	-11,1
950	-10,6	-10,7	-10,5	-12,4	-11,1
956	-11,3	-11,4	-11,2	-13,0	-12,0
986	-11,9	-11,8	-11,8	-13,2	-12,3
989	-11,6	-11,7	-11,3	-12,8	-11,9
1000	-11,3	-11,5	-11,0	-12,5	-11,8
1048	-11,2	-11,8	-10,9	-12,2	-12,1
1050	-11,2	-11,8	-10,9	-12,2	-12,0
1054	-11,7	-11,9	-10,8	-12,2	-12,0
1100	-13,8	-14,1	-13,4	-14,2	-15,0
1121	-13,5	-14,2	-13,2	-14,5	-14,7
1135	-13,3	-14,0	-13,1	-14,3	-14,6
1150	-13,3	-14,2	-13,2	-14,7	-14,9
1154	-13,3	-14,1	-13,1	-14,7	-14,9
1166	-13,9	-14,8	-13,7	-15,3	-15,5
1200	-16,2	-16,6	-15,8	-17,3	-17,5

*Appendice 1: Tabelle dati*

---

1202	-16,2	-16,5	-16,0	-17,2	-17,2
1205	-16,2	-16,5	-16,0	-17,2	-17,2
1219	-15,6	-16,0	-15,6	-16,5	-16,5
1250	-14,5	-15,2	-14,7	-15,5	-15,4
1255	-14,5	-15,1	-14,7	-15,4	-15,4
1266	-14,5	-15,0	-14,6	-15,3	-15,1
1269	-14,3	-14,9	-14,3	-15,0	-15,0
1300	-13,6	-14,2	-13,3	-14,0	-14,1
1320	-12,2	-12,9	-12,0	-12,9	-12,8
1328	-11,6	-12,4	-11,3	-12,5	-12,4
1339	-11,6	-12,2	-11,0	-12,4	-12,3
1345	-11,3	-12,2	-11,0	-12,4	-12,3
1350	-11,3	-12,2	-10,9	-12,4	-12,6
1356	-11,3	-12,1	-10,9	-12,5	-12,6
1370	-11,6	-12,8	-11,2	-13,3	-13,4
1381	-12,1	-13,5	-11,7	-13,9	-14,3
1400	-13,0	-14,8	-12,4	-14,6	-15,9
1401	-13,0	-14,8	-12,6	-15,2	-15,9
1423	-16,5	-18,4	-15,7	-19,1	-20,0
1426	-18,0	-20,0	-17,3	-20,6	-21,4
1434	-18,1	-20,0	-17,3	-20,6	-21,5
1450	-19,7	-21,7	-19,1	-21,9	-22,0
1457	-20,3	-21,7	-19,1	-21,8	-22,9
1471	-21,2	-23,2	-20,3	-23,3	-24,4
1474	-21,1	-23,2	-20,0	-23,3	-24,4
1485	-22,9	-25,2	-21,6	-25,2	-26,2
1500	-25,3	-27,3	-24,3	-27,7	-28,8
1516	-29,7	-31,6	-28,5	-31,7	-32,8
1518	-29,7	-31,6	-28,9	-31,7	-32,8
1521	-29,5	-31,4	-28,9	-31,7	-32,4
1524	-29,5	-31,4	-29,7	-31,8	-32,4
1550	-31,3	-33,5	-29,9	-33,3	-34,3
1560	-31,7	-33,8	-30,0	-33,3	-34,9
1563	-31,0	-33,8	-30,0	-33,3	-34,9
1566	-31,3	-33,5	-30,0	-33,1	-34,0
1574	-32,3	-34,4	-30,4	-34,0	-35,5
1600	-35,7	-37,6	-32,2	-36,9	-37,7
1605	-36,5	-38,1	-33,2	-37,8	-38,4
1616	-38,3	-39,0	-35,0	-39,8	-39,6
1628	-38,4	-40,3	-36,7	-41,3	-40,0
1630	-39,4	-40,5	-35,9	-41,3	-41,0
1644	-40,0	-41,7	-36,6	-39,4	-40,8
1650	-39,4	-40,2	-37,7	-39,9	-38,9
1667	-38,1	-40,7	-37,9	-40,6	-41,5
1670	-39,6	-39,0	-36,9	-40,6	-41,5
1675	-38,4	-40,0	-38,1	-40,4	-39,5

1700	-38,2	-40,5	-40,3	-41,1	-39,6
1712	-39,7	-39,9	-40,0	-39,7	-38,9
1714	-39,7	-40,4	-40,2	-39,7	-38,9
1750	-36,3	-35,3	-35,5	-36,2	-33,1
1751	-35,0	-35,1	-35,5	-32,6	-33,5
1759	-34,5	-35,1	-35,5	-33,1	-33,5
1765	-33,3	-32,7	-34,4	-31,8	-31,1
1768	-33,1	-32,7	-35,3	-31,7	-31,1
1796	-32,0	-31,8	-31,7	-31,0	-31,1
1800	-31,7	-31,8	-31,4	-31,7	-31,4
1815	-31,9	-31,9	-31,8	-31,5	-31,3
1838	-31,1	-31,4	-31,6	-32,4	-32,1
1843	-30,9	-32,0	-31,2	-31,7	-32,3
1850	-30,8	-32,0	-31,7	-32,2	-31,6
1863	-30,8	-31,7	-31,5	-31,3	-31,7
1882	-30,7	-32,0	-31,1	-31,7	-32,1
1891	-31,0	-32,0	-30,9	-31,5	-32,2
1900	-31,4	-31,7	-30,6	-32,7	-32,4
1919	-30,8	-32,1	-29,4	-31,9	-31,8
1922	-30,8	-31,6	-29,4	-32,0	-31,8
1924	-30,8	-31,6	-30,4	-32,0	-32,3
1944	-29,5	-30,4	-29,1	-29,1	-29,7
1950	-29,5	-29,8	-29,1	-29,7	-29,8
1961	-28,4	-29,3	-28,7	-29,3	-29,9
1964	-28,1	-29,3	-27,8	-28,2	-29,0
1966	-28,0	-29,3	-28,1	-28,0	-29,0
1975	-28,2	-29,4	-28,2	-28,7	-29,3
1978	-28,3	-29,4	-28,3	-28,6	-29,3
2000	-29,3	-30,3	-29,8	-30,1	-31,5
2008	-30,2	-31,5	-30,5	-30,2	-31,6
2020	-30,0	-31,4	-29,9	-31,4	-31,7
2025	-29,9	-31,4	-29,9	-31,6	-31,7
2031	-30,5	-30,3	-29,7	-31,4	-31,1
2039	-29,6	-30,6	-30,6	-31,1	-31,1
2042	-29,2	-30,1	-28,3	-29,7	-30,5
2050	-29,6	-30,1	-29,4	-29,6	-30,5
2076	-25,6	-27,0	-24,5	-26,3	-26,5
2084	-25,8	-25,8	-23,7	-26,2	-26,5
2090	-25,8	-25,5	-23,7	-26,2	-26,6
2098	-25,9	-26,0	-24,1	-27,4	-27,6
2100	-25,9	-26,6	-24,0	-27,4	-27,3
2104	-25,7	-26,6	-24,0	-27,4	-27,3
2109	-27,2	-27,8	-25,8	-29,3	-28,3
2120	-28,0	-28,1	-26,4	-28,8	-28,7
2134	-27,9	-28,5	-26,9	-29,2	-29,7
2146	-27,7	-28,1	-26,9	-29,2	-29,4

*Appendice 1: Tabelle dati*

---

2150	-27,7	-28,1	-26,9	-29,2	-29,0
2157	-27,8	-27,7	-26,6	-28,5	-28,8
2162	-27,8	-27,7	-26,6	-28,5	-28,8
2168	-27,4	-27,0	-27,0	-27,6	-28,1
2185	-27,2	-26,8	-26,7	-27,4	-27,8
2193	-26,2	-26,9	-26,0	-26,3	-27,3
2196	-26,2	-26,3	-26,0	-26,6	-27,0
2200	-27,3	-27,4	-27,6	-27,1	-27,8
2213	-27,5	-27,4	-28,0	-28,1	-27,8
2221	-27,8	-27,6	-27,6	-27,9	-27,4
2230	-27,8	-28,0	-27,6	-27,6	-27,8
2250	-26,9	-26,2	-25,9	-27,4	-27,5
2258	-26,6	-26,8	-25,0	-27,6	-27,2
2280	-26,4	-26,0	-23,9	-26,6	-27,0
2300	-25,6	-25,6	-24,0	-26,2	-27,0
2308	-25,9	-25,8	-23,8	-26,5	-27,0
2311	-25,5	-25,4	-24,2	-25,9	-26,5
2319	-25,7	-25,7	-24,5	-26,2	-26,5
2330	-25,2	-24,9	-24,5	-25,8	-26,0
2336	-24,9	-24,9	-24,6	-25,6	-25,7
2350	-24,4	-24,8	-24,7	-25,0	-25,7
2358	-24,2	-24,3	-25,0	-24,6	-25,2
2364	-24,2	-24,3	-25,0	-24,6	-25,2
2389	-23,1	-23,5	-23,8	-23,9	-24,0
2395	-23,1	-23,5	-23,8	-23,7	-24,2
2398	-22,8	-23,7	-24,2	-23,7	-24,2
2400	-22,3	-23,5	-23,4	-23,5	-23,6
2414	-22,0	-23,3	-22,9	-23,4	-23,4
2417	-22,0	-23,1	-22,9	-23,4	-23,4
2420	-22,0	-23,1	-22,7	-23,4	-23,2
2442	-21,8	-23,4	-22,0	-23,8	-23,6
2445	-22,1	-23,4	-21,9	-23,7	-23,8
2448	-22,1	-23,4	-21,8	-23,7	-23,8
2450	-22,0	-23,4	-21,8	-23,7	-23,8
2456	-22,2	-23,8	-21,9	-24,4	-24,7
2482	-23,0	-25,1	-22,3	-25,9	-26,3
2487	-23,0	-25,0	-22,3	-25,9	-26,3
2496	-23,4	-25,5	-22,7	-26,8	-26,8
2500	-24,3	-26,2	-23,4	-27,5	-26,8
2507	-24,1	-26,2	-23,4	-27,7	-27,2
2538	-26,1	-27,3	-25,2	-28,3	-28,5
2550	-26,3	-27,5	-25,3	-28,5	-29,1
2566	-26,6	-28,1	-26,0	-28,6	-28,2
2571	-26,5	-27,8	-26,4	-28,5	-28,3
2577	-26,8	-27,8	-26,4	-28,7	-28,6
2585	-27,4	-28,0	-27,0	-28,3	-28,7

2588	-27,4	-27,9	-27,2	-28,7	-28,2
2600	-27,7	-27,6	-27,4	-29,2	-29,3
2616	-28,0	-27,9	-28,0	-28,3	-28,1
2619	-27,7	-27,9	-28,0	-28,5	-28,1
2624	-28,1	-27,5	-28,0	-28,1	-27,3
2630	-27,4	-27,4	-28,0	-27,9	-27,2
2650	-27,2	-25,8	-27,0	-26,2	-25,5
2670	-25,1	-24,2	-25,6	-24,4	-23,5
2672	-25,1	-24,2	-25,6	-24,4	-23,5
2700	-24,0	-22,7	-23,8	-23,7	-22,0
2703	-22,8	-22,0	-23,0	-22,2	-21,5
2706	-23,1	-22,1	-23,0	-22,2	-20,9
2722	-22,1	-21,7	-21,9	-21,6	-20,7
2750	-21,3	-20,7	-21,1	-21,4	-20,6
2756	-21,3	-20,8	-20,6	-21,4	-20,6
2759	-21,0	-20,7	-21,1	-21,5	-21,2
2784	-21,2	-20,6	-20,8	-21,4	-21,2
2800	-21,1	-20,3	-20,7	-21,6	-21,1
2823	-20,9	-20,7	-20,8	-22,2	-21,4
2826	-21,4	-21,4	-20,9	-22,3	-21,8
2832	-21,6	-21,4	-21,1	-22,8	-21,8
2837	-22,0	-21,6	-21,9	-23,1	-22,6
2848	-22,1	-21,7	-21,6	-23,2	-22,3
2850	-22,1	-21,6	-21,9	-23,2	-22,3
2868	-21,8	-21,5	-21,9	-23,1	-22,1
2871	-21,4	-20,9	-21,4	-21,7	-21,7
2879	-22,0	-20,9	-21,4	-21,7	-21,7
2882	-21,0	-20,4	-20,5	-21,4	-21,1
2890	-21,0	-20,4	-20,6	-22,2	-21,1
2900	-20,6	-20,0	-19,8	-21,2	-20,8
2918	-20,2	-19,7	-19,1	-21,9	-21,4
2932	-19,8	-20,1	-20,4	-22,9	-21,5
2935	-20,3	-20,1	-20,4	-22,9	-21,4
2944	-20,6	-20,2	-20,5	-22,6	-21,6
2950	-21,0	-20,5	-21,1	-22,8	-22,0
2958	-21,1	-20,6	-21,1	-22,9	-22,0
2974	-21,7	-20,3	-21,9	-22,3	-21,4
2977	-21,9	-20,3	-21,9	-22,3	-21,4
2983	-21,9	-20,4	-22,1	-21,6	-21,5
3000	-21,9	-20,3	-21,7	-21,3	-20,6



### 3 Y balun : Prototipi con un air-bridge

Frequenza [MHz]	LIVELLO [dB]				
	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	Prototipo 8	Prototipo 9
200	-11,3	-9,5	-12,4	-13,7	-11,6
219	-9,4	-8,3	-10,3	-11,4	-9,9
230	-8,9	-8,1	-9,7	-10,8	-9,5
233	-8,9	-8,1	-9,7	-10,7	-9,5
239	-8,8	-8,2	-9,5	-10,4	-9,3
244	-8,8	-8,2	-9,5	-10,4	-9,3
247	-8,8	-8,1	-9,5	-10,4	-9,4
250	-8,9	-8,2	-9,5	-10,4	-9,4
261	-9,5	-8,4	-9,6	-10,5	-9,4
270	-9,5	-8,4	-9,6	-10,4	-9,4
281	-9,5	-8,7	-9,6	-10,4	-9,7
284	-8,9	-8,7	-9,2	-10,2	-9,8
300	-7,9	-7,7	-8,3	-9,2	-8,7
317	-6,6	-6,9	-6,9	-7,8	-8,3
320	-6,6	-6,9	-6,9	-7,5	-7,4
326	-6,6	-6,9	-6,9	-7,3	-7,2
328	-6,6	-6,9	-6,8	-7,1	-7,2
348	-6,6	-7,0	-6,9	-7,2	-7,2
350	-6,8	-6,9	-6,8	-7,2	-7,1
354	-6,8	-7,0	-6,8	-7,2	-7,3
356	-6,7	-7,0	-6,8	-7,2	-7,3
359	-6,7	-6,9	-6,8	-7,2	-7,3
362	-6,6	-7,0	-6,7	-7,2	-7,2
384	-7,0	-7,3	-7,0	-7,7	-7,6
393	-7,0	-7,3	-7,0	-7,7	-7,6
400	-7,4	-7,7	-7,4	-8,2	-8,0
404	-7,4	-7,7	-7,4	-8,2	-8,0
407	-7,5	-7,7	-7,6	-8,3	-8,1
415	-7,5	-7,7	-7,7	-8,3	-8,1
421	-7,2	-7,4	-7,5	-8,1	-7,9
429	-6,9	-7,2	-7,2	-8,0	-7,7
446	-6,8	-7,1	-7,0	-8,1	-7,6
450	-6,8	-7,1	-7,0	-8,0	-7,6
457	-6,8	-7,2	-7,0	-8,4	-7,6
458	-6,8	-7,1	-7,0	-8,3	-7,7
474	-7,1	-7,5	-7,4	-9,0	-7,9
500	-8,0	-8,2	-8,2	-9,5	-8,7
508	-8,4	-8,6	-8,7	-9,6	-9,0
516	-8,4	-8,6	-8,7	-9,6	-9,0
522	-8,6	-8,7	-8,9	-9,6	-9,1

524	-8,6	-8,7	-8,9	-9,5	-9,1
527	-8,6	-8,7	-8,9	-9,4	-9,1
550	-8,2	-8,4	-8,6	-9,4	-9,0
560	-7,9	-8,2	-8,3	-9,1	-8,6
575	-7,6	-8,0	-8,0	-9,1	-8,4
578	-7,6	-8,0	-8,0	-9,0	-8,4
583	-7,6	-8,0	-8,0	-8,9	-8,4
586	-7,6	-7,9	-7,9	-8,8	-8,4
589	-7,6	-8,0	-7,9	-8,6	-8,3
600	-7,6	-7,9	-7,9	-8,8	-8,4
608	-7,6	-7,9	-7,9	-9,1	-8,3
645	-7,4	-7,8	-7,7	-9,0	-8,1
650	-7,5	-7,8	-7,7	-9,3	-8,1
678	-7,6	-7,9	-7,7	-9,5	-8,3
700	-7,6	-8,0	-7,7	-9,4	-8,3
715	-7,6	-8,0	-7,7	-9,4	-8,3
718	-7,6	-8,0	-7,7	-9,4	-8,3
746	-8,2	-8,7	-8,3	-10,3	-8,9
750	-8,1	-8,7	-8,3	-10,3	-8,8
751	-8,1	-8,7	-8,3	-10,2	-8,9
754	-7,5	-7,9	-7,7	-9,4	-8,4
757	-7,5	-7,9	-7,7	-9,4	-8,2
760	-7,5	-8,2	-7,7	-9,4	-8,2
765	-7,5	-8,0	-7,6	-9,3	-8,1
776	-8,4	-8,9	-8,5	-10,4	-9,2
793	-8,8	-9,4	-8,7	-10,6	-9,6
796	-8,8	-9,3	-8,7	-10,6	-9,6
799	-8,2	-9,2	-8,1	-10,0	-9,2
800	-8,1	-9,1	-8,1	-10,0	-9,2
802	-8,2	-9,2	-8,2	-10,0	-9,2
804	-8,2	-12,3	-8,2	-9,9	-11,1
850	-11,9	-16,9	-11,3	-12,5	-14,2
874	-13,9	-16,5	-12,5	-13,5	-18,1
897	-17,9	-13,8	-15,5	-15,7	-25,0
900	-21,5	-12,2	-17,8	-17,1	-21,9
916	-24,4	-11,2	-20,9	-19,3	-18,5
922	-21,2	-10,5	-28,1	-22,9	-15,9
930	-19,5	-10,5	-28,1	-23,7	-15,9
944	-15,6	-10,0	-18,6	-34,1	-13,1
950	-15,8	-10,0	-18,8	-24,0	-13,1
956	-14,4	-10,0	-16,5	-21,3	-12,7
986	-13,7	-10,3	-15,1	-18,0	-12,5
989	-13,4	-10,1	-14,6	-16,9	-12,2
1000	-12,9	-9,4	-13,9	-16,2	-11,9
1048	-11,0	-9,0	-11,1	-13,6	-10,0
1050	-11,0	-9,0	-11,1	-13,6	-10,0

*Appendice 1: Tabelle dati*

---

1054	-11,0	-9,0	-11,1	-13,0	-10,0
1100	-9,4	-9,0	-9,4	-11,1	-9,3
1121	-9,3	-8,7	-9,2	-10,6	-9,0
1135	-9,2	-8,8	-9,0	-10,4	-9,2
1150	-9,2	-8,7	-8,9	-10,2	-9,1
1154	-9,2	-8,7	-8,9	-10,1	-9,2
1166	-9,1	-8,6	-8,9	-10,1	-9,2
1200	-8,8	-8,5	-8,4	-9,5	-8,9
1202	-8,7	-8,7	-8,5	-9,6	-9,1
1205	-8,7	-8,7	-8,5	-9,5	-9,1
1219	-8,8	-8,8	-8,4	-9,6	-9,1
1250	-9,0	-8,8	-8,7	-9,8	-9,2
1255	-9,0	-8,8	-8,7	-9,7	-9,2
1266	-9,1	-8,9	-8,9	-9,7	-9,3
1269	-9,1	-9,0	-8,9	-9,7	-9,4
1300	-9,1	-9,2	-8,9	-9,7	-9,6
1320	-9,1	-9,5	-8,9	-9,7	-9,8
1328	-9,2	-9,5	-8,8	-9,8	-9,9
1339	-9,2	-9,5	-8,9	-9,8	-9,8
1345	-9,2	-9,5	-8,9	-9,8	-9,8
1350	-9,2	-9,3	-8,9	-9,7	-9,6
1356	-9,2	-9,3	-8,9	-9,7	-9,6
1370	-9,2	-9,2	-8,9	-9,6	-9,6
1381	-9,2	-9,4	-8,9	-9,8	-9,8
1400	-9,3	-9,6	-9,0	-10,1	-10,0
1401	-9,2	-9,6	-9,1	-10,1	-10,0
1423	-9,3	-9,9	-9,3	-10,2	-10,3
1426	-9,3	-9,8	-9,2	-10,1	-10,2
1434	-9,4	-9,8	-9,2	-10,1	-10,2
1450	-9,1	-9,4	-9,2	-9,9	-9,9
1457	-9,2	-9,5	-9,2	-9,9	-9,9
1471	-9,1	-9,4	-9,1	-9,9	-9,8
1474	-9,1	-9,4	-9,1	-9,7	-9,8
1485	-9,1	-9,5	-9,1	-10,0	-9,9
1500	-9,6	-10,2	-9,5	-10,4	-10,5
1516	-10,3	-10,9	-10,3	-11,1	-11,2
1518	-10,3	-10,9	-10,2	-11,1	-11,2
1521	-10,3	-10,9	-10,2	-11,1	-11,1
1524	-10,3	-10,9	-10,3	-11,1	-11,1
1550	-9,7	-10,1	-9,8	-10,3	-10,5
1560	-9,7	-10,1	-9,8	-10,3	-10,4
1563	-9,6	-10,0	-9,7	-10,3	-10,4
1566	-9,7	-10,1	-9,7	-10,3	-10,4
1574	-9,6	-10,1	-9,7	-10,5	-10,4
1600	-9,8	-10,3	-9,8	-10,5	-10,6
1605	-10,0	-10,4	-10,0	-10,5	-10,5

1616	-10,3	-10,8	-10,4	-10,9	-10,6
1628	-10,5	-11,0	-10,5	-11,0	-11,4
1630	-10,5	-11,1	-10,7	-11,2	-11,4
1644	-10,5	-11,1	-10,6	-11,3	-11,5
1650	-10,5	-11,1	-10,6	-11,2	-11,6
1667	-10,5	-11,3	-10,6	-11,4	-11,8
1670	-10,5	-11,3	-10,5	-11,4	-11,8
1675	-10,5	-11,3	-10,3	-11,2	-11,7
1700	-11,3	-12,3	-11,2	-12,2	-12,7
1712	-11,6	-12,7	-11,4	-12,6	-13,1
1714	-11,6	-13,2	-11,4	-12,6	-13,1
1750	-11,9	-13,4	-11,5	-13,0	-13,8
1751	-11,9	-13,2	-11,5	-12,6	-13,7
1759	-11,8	-13,2	-11,5	-12,8	-13,7
1765	-11,8	-13,2	-11,5	-12,7	-13,8
1768	-11,8	-13,3	-11,6	-12,7	-13,8
1796	-13,1	-14,7	-12,7	-13,6	-15,3
1800	-13,2	-14,6	-12,6	-13,6	-15,3
1815	-13,6	-15,4	-13,3	-14,0	-15,8
1838	-14,1	-15,6	-14,1	-14,5	-15,6
1843	-14,0	-15,8	-14,1	-14,6	-15,2
1850	-13,7	-15,3	-14,2	-14,6	-14,9
1863	-13,4	-15,0	-14,2	-14,7	-14,6
1882	-13,4	-14,7	-14,1	-14,9	-14,3
1891	-13,2	-14,4	-14,0	-15,3	-14,0
1900	-13,2	-14,2	-13,8	-15,7	-13,8
1919	-12,7	-13,6	-13,2	-15,3	-13,4
1922	-12,7	-13,6	-13,2	-15,4	-13,4
1924	-12,7	-13,4	-13,2	-15,3	-13,4
1944	-12,0	-13,0	-12,1	-14,5	-12,7
1950	-12,0	-12,9	-12,4	-14,6	-12,7
1961	-11,7	-12,6	-12,2	-14,4	-12,5
1964	-11,7	-12,7	-12,0	-14,7	-12,5
1966	-11,8	-12,7	-12,2	-14,7	-12,7
1975	-11,9	-12,8	-12,2	-15,5	-12,7
1978	-11,9	-12,8	-12,1	-15,7	-12,7
2000	-12,6	-13,8	-12,6	-17,6	-14,0
2008	-13,6	-14,7	-13,6	-17,9	-15,2
2020	-14,5	-15,6	-14,5	-18,4	-16,1
2025	-14,6	-15,6	-14,4	-18,6	-16,1
2031	-15,2	-16,1	-15,2	-18,5	-16,3
2039	-15,2	-16,1	-15,2	-18,5	-16,2
2042	-14,4	-15,4	-14,6	-18,1	-15,2
2050	-14,4	-15,2	-14,6	-17,5	-15,2
2076	-13,5	-11,8	-11,1	-16,9	-11,7
2084	-13,0	-11,7	-11,1	-15,8	-11,8

2090	-12,5	-11,6	-10,8	-15,4	-11,6
2098	-11,0	-11,6	-11,0	-14,9	-11,8
2100	-11,0	-11,6	-11,0	-14,9	-11,8
2104	-11,0	-11,6	-11,0	-14,9	-11,8
2109	-11,4	-12,1	-11,2	-14,9	-12,3
2120	-11,9	-12,7	-11,8	-15,4	-13,0
2134	-12,5	-13,4	-12,5	-16,1	-13,8
2146	-13,2	-13,9	-13,2	-16,5	-14,1
2150	-13,2	-13,9	-13,1	-16,4	-14,1
2157	-13,2	-13,9	-13,0	-16,1	-13,8
2162	-13,2	-13,9	-13,3	-16,1	-13,8
2168	-12,9	-13,6	-12,8	-15,8	-13,4
2185	-12,8	-13,5	-12,7	-15,6	-13,3
2193	-12,4	-13,1	-12,1	-14,9	-12,9
2196	-12,4	-13,1	-12,2	-14,9	-13,0
2200	-13,3	-14,0	-13,0	-15,8	-13,8
2213	-13,6	-14,3	-13,2	-15,8	-13,9
2221	-13,4	-14,3	-13,2	-15,5	-13,8
2230	-13,3	-14,0	-13,2	-15,8	-13,5
2250	-12,0	-13,2	-11,9	-13,9	-12,7
2258	-12,0	-13,6	-12,1	-13,8	-13,3
2280	-11,7	-13,4	-12,0	-13,4	-13,2
2300	-11,8	-13,7	-12,0	-13,5	-13,6
2308	-11,8	-13,7	-12,0	-13,4	-13,5
2311	-11,8	-13,9	-12,1	-13,9	-13,9
2319	-11,9	-13,9	-12,2	-13,9	-13,9
2330	-12,0	-14,2	-12,3	-14,3	-14,4
2336	-12,4	-14,6	-12,6	-15,0	-15,0
2350	-12,6	-15,2	-13,1	-15,6	-15,6
2358	-12,9	-15,8	-13,5	-16,2	-16,4
2364	-12,9	-15,8	-13,5	-16,2	-16,4
2389	-14,0	-16,8	-14,8	-17,4	-17,2
2395	-14,0	-16,7	-14,8	-17,4	-17,2
2398	-14,0	-16,7	-14,8	-17,3	-17,4
2400	-14,4	-16,3	-14,9	-16,8	-16,9
2414	-14,2	-16,0	-14,9	-16,4	-16,4
2417	-14,2	-16,0	-14,9	-16,4	-16,4
2420	-14,3	-16,0	-14,9	-16,5	-16,5
2442	-13,9	-15,7	-14,4	-16,0	-15,9
2445	-13,9	-15,9	-14,4	-16,2	-16,2
2448	-13,9	-15,9	-14,4	-16,2	-16,2
2450	-14,0	-15,9	-14,4	-16,0	-16,1
2456	-14,3	-16,2	-14,6	-16,6	-16,9
2482	-15,2	-17,2	-15,8	-17,1	-17,6
2487	-15,2	-17,2	-15,9	-17,1	-17,6
2496	-15,6	-17,1	-16,0	-16,9	-17,2

*Appendice 1: Tabelle dati*

---

2500	-15,6	-16,8	-16,0	-16,5	-16,8
2507	-15,6	-16,8	-16,0	-16,6	-16,9
2538	-14,3	-15,1	-14,6	-14,8	-14,9
2550	-13,8	-14,7	-14,0	-14,3	-14,5
2566	-13,5	-14,5	-13,5	-14,2	-14,3
2571	-13,3	-14,5	-13,4	-14,2	-14,4
2577	-13,2	-14,5	-13,5	-14,2	-14,4
2585	-13,4	-14,6	-13,5	-14,5	-14,5
2588	-13,3	-14,6	-13,6	-14,5	-14,5
2600	-13,7	-14,9	-13,7	-14,9	-15,0
2616	-14,0	-15,4	-14,4	-15,1	-15,1
2619	-14,0	-15,4	-14,4	-15,1	-15,2
2624	-13,9	-15,2	-14,3	-14,9	-14,9
2630	-13,9	-15,2	-14,3	-14,9	-14,9
2650	-13,1	-14,5	-13,6	-14,3	-14,2
2670	-12,9	-13,8	-12,8	-13,5	-13,4
2672	-12,5	-13,8	-12,8	-13,5	-13,4
2700	-11,8	-13,2	-11,9	-13,2	-13,1
2703	-11,7	-13,3	-11,8	-13,3	-13,1
2706	-11,7	-13,3	-11,8	-13,3	-13,1
2722	-11,9	-13,5	-11,9	-13,4	-13,3
2750	-12,5	-14,2	-12,4	-14,0	-14,1
2756	-12,5	-14,1	-12,4	-14,0	-14,0
2759	-12,6	-14,5	-12,7	-14,5	-14,7
2784	-13,1	-15,7	-12,9	-16,2	-16,4
2800	-13,3	-16,2	-13,2	-17,0	-16,8
2823	-14,7	-17,1	-14,1	-18,3	-18,1
2826	-15,1	-18,1	-14,7	-19,2	-18,8
2832	-19,2	-18,2	-14,6	-19,2	-18,8
2837	-21,5	-19,8	-15,7	-20,5	-20,0
2848	-22,0	-20,8	-16,5	-21,4	-21,1
2850	-21,9	-20,5	-19,6	-21,3	-21,2
2868	-21,9	-21,0	-19,2	-21,7	-21,1
2871	-21,8	-20,8	-20,2	-20,9	-21,1
2879	-21,4	-20,8	-19,6	-21,0	-21,1
2882	-20,8	-20,6	-19,4	-20,1	-20,4
2890	-20,9	-20,7	-19,0	-20,3	-20,4
2900	-20,8	-20,2	-18,9	-19,7	-20,1
2918	-22,2	-19,9	-19,2	-20,4	-21,2
2932	-22,7	-20,3	-18,8	-21,5	-21,9
2935	-23,1	-20,3	-19,4	-21,5	-21,9
2944	-24,2	-21,0	-20,2	-22,7	-23,3
2950	-25,5	-21,3	-21,0	-23,0	-24,8
2958	-25,3	-22,0	-21,5	-23,7	-24,6
2974	-25,5	-23,8	-23,3	-24,1	-24,8
2977	-25,0	-23,8	-22,5	-24,1	-24,5

2983	-24,6	-23,1	-22,8	-24,1	-24,8
3000	-25,1	-22,8	-22,4	-23,0	-24,1

#### 4 Y balun : Prototipi con due air-bridges

Frequenza [MHz]	LIVELLO [dB]								
	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	Prototipo 4	Prototipo 5	Prototipo 6	Prototipo 7	Prototipo 8	Prototipo 9
200	-12,0	-9,0	-12,5	-30,2	-29,9	-27,2	-22,2	-13,0	-11,1
219	-11,5	-8,7	-10,4	-27,0	-26,7	-25,7	-20,7	-12,5	-10,3
230	-11,0	-8,4	-9,8	-26,7	-26,3	-25,4	-20,4	-12,0	-9,7
233	-10,5	-8,0	-9,8	-26,4	-26,3	-25,7	-20,7	-11,5	-9,3
239	-10,0	-7,8	-9,8	-26,4	-26,3	-25,8	-20,8	-10,1	-9,5
244	-9,5	-7,7	-9,6	-26,4	-25,3	-25,3	-20,3	-10,2	-9,7
247	-9,3	-7,8	-9,6	-26,4	-24,7	-24,7	-19,7	-10,4	-9,9
250	-9,4	-7,9	-9,5	-25,8	-23,8	-23,8	-18,8	-10,6	-10,1
261	-9,5	-8,0	-9,6	-25,0	-22,7	-22,7	-17,7	-10,9	-10,6
270	-9,6	-8,1	-9,7	-23,9	-22,1	-22,1	-17,1	-11,2	-10,0
281	-9,7	-8,3	-9,7	-22,9	-20,6	-20,6	-15,6	-10,0	-9,3
284	-9,2	-8,4	-9,3	-21,6	-20,1	-19,1	-14,1	-9,3	-8,7
300	-8,6	-7,6	-8,4	-20,6	-19,2	-18,7	-13,7	-8,8	-8,1
317	-8,3	-7,1	-7,8	-20,0	-18,8	-18,6	-13,6	-8,2	-7,6
320	-8,0	-6,4	-7,1	-19,1	-18,3	-17,6	-12,6	-7,5	-7,4
326	-7,1	-6,5	-7,0	-18,7	-18,4	-16,6	-11,6	-7,2	-7,2
328	-6,7	-6,5	-6,9	-18,6	-17,7	-15,4	-10,4	-7,2	-7,1
348	-6,8	-6,5	-6,9	-17,8	-17,4	-14,8	-9,8	-7,2	-7,1
350	-6,9	-6,6	-6,9	-17,2	-16,8	-13,8	-8,8	-7,2	-7,2
354	-6,8	-6,7	-6,9	-16,4	-16,8	-13,1	-8,1	-7,3	-7,3
356	-6,8	-6,6	-6,9	-15,5	-15,6	-10,4	-7,9	-7,4	-7,4
359	-6,7	-6,5	-6,9	-15,2	-13,5	-9,1	-7,5	-7,4	-7,5
362	-6,7	-6,4	-6,8	-14,0	-12,5	-8,9	-7,5	-7,5	-7,6
384	-6,9	-6,6	-7,1	-13,3	-11,2	-8,7	-7,4	-7,6	-7,7
393	-7,1	-6,8	-7,1	-12,2	-11,5	-8,3	-7,4	-7,7	-7,8
400	-7,3	-7,2	-7,5	-12,5	-10,6	-7,7	-7,3	-7,8	-7,9
404	-7,3	-7,1	-7,5	-11,1	-10,0	-7,6	-7,4	-7,8	-7,8
407	-7,4	-7,0	-7,8	-10,4	-9,5	-7,2	-7,3	-7,9	-7,9
415	-7,4	-6,9	-7,8	-9,8	-8,9	-7,7	-7,5	-7,9	-7,7
421	-7,3	-6,8	-7,6	-9,1	-8,6	-8,0	-8,4	-7,7	-7,5
429	-7,2	-6,7	-7,3	-9,1	-8,4	-7,8	-8,5	-7,6	-7,4
446	-7,1	-6,6	-7,1	-8,6	-8,4	-7,6	-8,1	-7,3	-7,3
450	-7,1	-6,7	-7,2	-8,9	-8,3	-7,6	-7,5	-7,3	-7,3

*Appendice 1: Tabelle dati*

457	-7,1	-6,9	-7,2	-8,6	-7,9	-7,2	-7,4	-7,5	-7,5
458	-7,4	-7,0	-7,1	-8,4	-8,1	-7,8	-7,5	-7,7	-7,7
474	-7,7	-7,4	-7,6	-8,5	-7,8	-7,2	-8,3	-7,9	-7,8
500	-8,0	-7,7	-8,3	-8,4	-7,9	-7,9	-9,0	-8,3	-8,2
508	-8,2	-7,8	-8,7	-8,6	-8,3	-7,9	-9,5	-8,5	-8,3
516	-8,4	-7,9	-8,7	-9,1	-8,2	-8,4	-9,9	-8,6	-8,5
522	-8,6	-8,1	-8,8	-9,1	-8,9	-8,8	-10,1	-8,7	-8,4
524	-8,6	-8,0	-8,8	-10,0	-8,7	-8,8	-10,0	-8,8	-8,4
527	-8,5	-8,1	-8,8	-11,1	-9,5	-10,3	-9,0	-8,9	-8,3
550	-8,4	-8,0	-8,6	-11,4	-11,0	-10,0	-8,6	-8,6	-8,3
560	-8,3	-7,8	-8,3	-12,1	-11,0	-10,5	-7,7	-8,5	-8,1
575	-8,2	-7,7	-8,0	-12,3	-12,5	-10,5	-7,5	-8,4	-7,9
578	-8,1	-7,6	-7,9	-12,7	-12,4	-10,3	-7,7	-8,2	-7,9
583	-7,9	-7,5	-7,9	-12,6	-12,5	-10,0	-7,7	-8,0	-7,9
586	-7,8	-7,5	-7,9	-12,3	-12,1	-9,3	-7,9	-7,8	-7,8
589	-7,6	-7,5	-7,9	-11,9	-11,6	-9,4	-8,0	-7,8	-7,8
600	-7,7	-7,6	-7,9	-11,9	-11,2	-9,0	-7,8	-7,8	-7,9
608	-7,7	-7,6	-7,8	-11,6	-10,8	-9,2	-8,0	-7,9	-7,9
645	-7,8	-7,6	-7,7	-10,9	-10,5	-9,4	-7,9	-7,8	-7,8
650	-7,8	-7,6	-7,7	-10,6	-10,1	-9,8	-8,0	-7,8	-7,8
678	-7,8	-7,7	-7,7	-10,1	-9,9	-10,6	-8,0	-7,9	-7,9
700	-7,9	-7,8	-7,8	-10,0	-10,1	-12,0	-8,0	-8,1	-8,0
715	-7,8	-8,0	-7,9	-10,0	-10,0	-12,8	-8,0	-8,2	-8,2
718	-8,0	-8,2	-7,9	-9,9	-10,0	-12,8	-7,8	-8,3	-8,4
746	-8,2	-8,3	-7,9	-10,7	-9,9	-12,9	-7,9	-8,6	-8,7
750	-8,4	-8,5	-8,1	-12,0	-10,2	-12,7	-7,7	-8,7	-8,7
751	-8,0	-8,3	-8,2	-12,5	-11,7	-14,0	-8,0	-8,6	-8,7
754	-7,6	-8,0	-8,0	-12,1	-10,7	-14,0	-7,9	-7,9	-8,7
757	-7,7	-7,6	-8,0	-12,5	-11,4	-13,5	-8,0	-8,1	-8,1
760	-7,9	-7,7	-8,0	-12,3	-11,0	-13,9	-8,2	-8,3	-8,2
765	-8,1	-7,9	-7,9	-11,9	-11,7	-14,9	-8,3	-8,6	-8,9
776	-8,3	-8,4	-8,9	-12,2	-11,4	-14,1	-8,6	-8,8	-9,0
793	-8,5	-8,9	-9,1	-11,1	-10,6	-14,9	-8,5	-9,0	-8,9
796	-8,7	-8,9	-9,1	-10,6	-10,4	-15,0	-8,5	-8,7	-9,6
799	-8,4	-8,8	-8,5	-10,5	-10,6	-14,4	-8,7	-8,4	-10,1
800	-8,6	-9,0	-8,4	-11,0	-10,6	-14,5	-9,0	-8,5	-11,1
802	-8,5	-9,3	-8,5	-11,2	-11,2	-14,3	-9,3	-8,6	-12,8
804	-9,0	-11,7	-11,1	-10,8	-10,6	-13,9	-9,4	-9,5	-12,8
850	-11,3	-15,5	-12,0	-10,6	-10,8	-13,8	-9,5	-11,8	-13,8
874	-15,3	-17,7	-13,4	-10,7	-10,8	-13,8	-9,7	-14,8	-18,2
897	-19,2	-17,0	-16,8	-11,3	-10,7	-13,9	-10,3	-18,6	-25,2
900	-25,0	-16,0	-19,8	-11,4	-10,6	-13,4	-10,5	-19,0	-22,7
916	-24,1	-14,0	-23,5	-11,5	-10,9	-12,9	-10,8	-23,0	-20,0
922	-21,1	-12,9	-27,3	-11,5	-11,1	-12,9	-11,1	-27,0	-18,0
930	-17,1	-11,9	-27,4	-11,4	-11,7	-12,5	-11,4	-30,7	-16,0
944	-14,7	-11,3	-16,3	-11,9	-11,8	-12,4	-11,4	-35,7	-14,2



*Appendice 1: Tabelle dati*

950	-12,4	-10,7	-16,3	-12,5	-11,6	-10,7	-11,8	-20,9	-13,3
956	-11,3	-9,6	-15,1	-12,2	-11,6	-10,7	-12,0	-19,0	-10,9
986	-10,0	-9,5	-13,8	-12,3	-11,4	-10,5	-12,5	-17,0	-10,2
989	-9,6	-9,2	-13,6	-11,9	-11,2	-10,5	-12,5	-16,0	-9,8
1000	-9,4	-8,7	-12,9	-10,9	-10,7	-10,0	-13,3	-14,9	-9,2
1048	-9,8	-8,9	-11,2	-10,9	-10,4	-9,9	-14,2	-12,6	-9,2
1050	-9,3	-8,5	-11,2	-10,4	-10,8	-10,3	-15,0	-11,7	-8,8
1054	-9,4	-8,5	-11,0	-10,6	-11,0	-10,4	-17,2	-11,2	-8,8
1100	-9,2	-8,5	-9,6	-11,2	-11,6	-11,0	-19,4	-10,7	-8,7
1121	-9,1	-8,4	-9,1	-11,9	-12,2	-11,3	-21,0	-10,5	-8,7
1135	-9,0	-8,4	-9,1	-12,8	-12,9	-12,4	-23,9	-10,4	-8,7
1150	-8,9	-8,3	-9,1	-13,8	-14,8	-12,7	-26,9	-10,4	-8,4
1154	-8,9	-8,3	-9,0	-17,0	-15,9	-13,2	-29,5	-10,4	-8,5
1166	-8,8	-8,2	-9,1	-16,6	-16,6	-14,1	-32,2	-10,4	-8,5
1200	-8,7	-8,2	-8,7	-17,2	-17,7	-14,5	-33,7	-10,0	-8,7
1202	-8,8	-8,3	-8,7	-19,2	-19,2	-15,4	-36,3	-10,0	-8,7
1205	-8,9	-8,4	-8,7	-20,0	-19,6	-15,7	-32,6	-10,0	-9,2
1219	-9,0	-8,5	-8,8	-19,5	-20,1	-16,0	-29,2	-10,0	-9,0
1250	-9,2	-8,7	-9,1	-20,1	-19,3	-16,8	-27,7	-10,5	-9,0
1255	-9,2	-8,7	-9,1	-20,7	-19,7	-17,8	-24,7	-10,5	-9,0
1266	-9,3	-8,7	-9,4	-21,3	-20,3	-17,6	-23,2	-10,5	-9,3
1269	-9,3	-8,8	-9,4	-22,5	-20,7	-18,0	-21,5	-10,5	-9,3
1300	-9,1	-8,8	-9,2	-23,2	-21,0	-17,9	-20,6	-10,4	-9,4
1320	-8,8	-8,8	-9,1	-23,6	-21,8	-18,5	-19,8	-10,0	-9,3
1328	-8,7	-8,7	-9,1	-23,7	-23,1	-17,8	-19,5	-10,0	-9,3
1339	-8,7	-8,7	-9,2	-23,6	-23,3	-17,8	-18,6	-10,0	-9,4
1345	-8,8	-8,7	-9,1	-23,3	-23,4	-17,5	-17,9	-10,0	-9,5
1350	-8,9	-8,7	-9,2	-23,4	-23,1	-17,6	-17,3	-10,0	-9,5
1356	-8,9	-8,6	-9,2	-24,0	-22,6	-17,2	-16,8	-10,0	-9,7
1370	-8,9	-8,5	-9,2	-24,7	-22,6	-17,3	-15,5	-10,0	-9,5
1381	-9,0	-8,6	-9,3	-24,8	-24,4	-17,4	-15,0	-10,0	-9,7
1400	-9,0	-8,8	-9,4	-25,0	-24,6	-17,0	-14,4	-10,0	-9,7
1401	-9,0	-8,8	-9,3	-24,9	-24,6	-17,2	-14,6	-10,0	-10,1
1423	-9,0	-8,9	-9,4	-24,8	-25,0	-15,8	-14,9	-9,9	-10,0
1426	-9,0	-8,9	-9,4	-24,7	-24,6	-15,9	-15,6	-9,9	-9,9
1434	-9,0	-8,8	-9,3	-24,4	-24,7	-15,6	-15,7	-9,9	-10,1
1450	-9,0	-8,8	-9,2	-23,9	-23,8	-15,2	-15,2	-9,9	-10,0
1457	-8,9	-8,7	-9,2	-22,0	-22,9	-15,4	-14,4	-9,8	-9,8
1471	-8,9	-8,7	-9,2	-22,7	-21,3	-16,8	-13,6	-9,8	-9,8
1474	-8,9	-8,9	-9,3	-22,4	-20,5	-16,3	-13,2	-9,8	-9,9
1485	-8,9	-9,3	-9,4	-22,4	-20,5	-17,8	-13,2	-10,0	-10,1
1500	-9,3	-9,5	-9,7	-22,7	-20,8	-22,6	-13,3	-10,6	-10,6
1516	-9,4	-9,7	-10,4	-23,4	-21,8	-25,6	-13,8	-10,8	-11,2
1518	-9,6	-9,9	-10,4	-24,7	-23,3	-29,6	-14,4	-10,9	-11,3
1521	-9,8	-10,1	-10,4	-26,1	-24,5	-33,0	-14,9	-11,0	-11,0
1524	-9,9	-9,6	-10,4	-27,8	-25,7	-35,1	-15,0	-11,1	-10,6

*Appendice 1: Tabelle dati*

1550	-9,3	-9,3	-9,8	-28,7	-27,1	-37,4	-14,3	-10,3	-10,3
1560	-9,3	-9,3	-9,7	-29,9	-28,6	-38,4	-13,5	-10,2	-10,3
1563	-9,3	-9,2	-9,7	-30,3	-30,4	-39,4	-12,6	-10,1	-10,3
1566	-9,2	-9,1	-9,7	-31,6	-32,8	-41,1	-12,0	-10,3	-10,3
1574	-9,2	-9,1	-9,8	-33,5	-34,7	-42,6	-11,6	-10,4	-10,4
1600	-9,5	-9,5	-10,0	-34,7	-36,0	-44,0	-11,6	-10,5	-10,6
1605	-9,6	-9,6	-10,1	-36,3	-37,6	-45,4	-12,0	-10,6	-10,8
1616	-9,7	-9,9	-10,5	-37,3	-39,2	-47,1	-12,5	-10,8	-11,0
1628	-9,9	-10,1	-10,6	-38,4	-40,1	-48,8	-13,3	-10,9	-11,0
1630	-10,1	-10,1	-10,6	-39,6	-41,1	-49,3	-13,8	-11,1	-10,9
1644	-10,1	-10,1	-10,6	-40,4	-42,0	-51,3	-14,0	-11,0	-10,8
1650	-10,0	-10,0	-10,5	-41,0	-42,7	-54,1	-13,7	-11,0	-10,8
1667	-10,0	-9,9	-10,6	-41,3	-43,1	-51,1	-13,7	-11,2	-10,9
1670	-9,9	-9,9	-10,6	-41,5	-43,7	-49,7	-13,2	-11,3	-11,1
1675	-9,8	-10,2	-10,5	-42,0	-44,0	-46,6	-12,8	-11,4	-11,3
1700	-10,6	-10,5	-11,3	-43,1	-44,6	-41,5	-12,0	-11,5	-11,5
1712	-10,5	-10,5	-11,3	-43,9	-46,0	-40,2	-11,3	-11,5	-11,5
1714	-10,4	-10,5	-11,3	-44,9	-47,2	-39,6	-11,2	-11,6	-11,2
1750	-10,3	-10,4	-10,6	-46,1	-49,4	-37,0	-11,0	-11,3	-10,9
1751	-10,4	-10,4	-10,7	-46,7	-51,2	-36,0	-11,2	-11,2	-11,0
1759	-10,5	-10,4	-10,7	-47,5	-54,8	-36,3	-10,9	-11,1	-11,1
1765	-10,6	-10,3	-10,6	-49,3	-52,5	-34,6	-11,2	-11,3	-11,2
1768	-10,8	-10,3	-10,6	-50,4	-51,5	-34,0	-11,2	-11,5	-11,3
1796	-11,0	-10,7	-11,4	-52,8	-50,3	-31,3	-11,3	-11,7	-11,6
1800	-11,2	-11,0	-11,4	-54,5	-48,7	-29,0	-11,5	-11,9	-11,7
1815	-11,1	-11,2	-11,7	-56,0	-46,8	-26,7	-11,4	-12,0	-11,8
1838	-11,0	-11,3	-12,2	-52,8	-45,0	-24,5	-11,9	-12,0	-11,9
1843	-11,0	-11,4	-12,5	-47,7	-43,1	-24,0	-11,6	-12,0	-12,0
1850	-11,0	-11,5	-12,6	-44,0	-40,8	-21,2	-11,1	-12,0	-12,1
1863	-11,2	-11,7	-13,0	-38,8	-39,7	-20,6	-12,5	-12,1	-12,4
1882	-11,4	-11,9	-13,3	-38,9	-37,8	-18,7	-12,5	-12,2	-12,8
1891	-11,5	-12,3	-13,5	-37,4	-36,7	-18,0	-12,1	-12,4	-12,9
1900	-11,6	-12,5	-13,5	-36,3	-35,2	-17,6	-11,4	-12,6	-13,1
1919	-11,7	-12,7	-13,7	-33,8	-31,7	-17,0	-11,4	-12,8	-13,3
1922	-11,8	-12,9	-14,0	-29,3	-28,1	-17,1	-12,2	-13,0	-13,4
1924	-12,0	-13,0	-13,7	-28,3	-27,1	-17,7	-12,6	-13,0	-13,5
1944	-12,0	-13,1	-13,7	-27,3	-25,9	-19,2	-13,1	-12,9	-13,4
1950	-12,0	-13,2	-13,8	-25,6	-25,2	-20,6	-13,5	-12,9	-13,3
1961	-12,0	-13,1	-13,5	-25,3	-23,8	-22,3	-13,8	-12,8	-13,2
1964	-12,0	-13,0	-13,7	-24,4	-23,8	-22,6	-14,0	-13,1	-13,4
1966	-12,1	-13,5	-14,0	-24,4	-24,3	-22,9	-13,8	-13,5	-13,6
1975	-12,4	-14,0	-15,0	-25,2	-24,8	-23,1	-13,6	-13,9	-14,0
1978	-12,7	-14,3	-15,0	-25,7	-25,6	-23,1	-13,4	-14,2	-14,7
2000	-13,3	-14,8	-16,1	-26,4	-26,3	-23,2	-13,0	-14,3	-15,1
2008	-13,7	-15,0	-16,5	-27,4	-26,7	-23,3	-13,0	-14,6	-15,8
2020	-14,4	-14,4	-16,9	-27,9	-27,0	-23,3	-13,0	-15,2	-16,6

*Appendice 1: Tabelle dati*

2025	-14,7	-14,5	-17,0	-28,1	-27,2	-23,5	-13,0	-15,7	-16,6
2031	-15,0	-14,1	-16,8	-28,4	-27,3	-23,4	-13,1	-16,0	-16,5
2039	-15,1	-14,0	-16,9	-28,3	-27,5	-23,4	-13,0	-15,6	-15,9
2042	-15,0	-13,5	-15,9	-28,4	-27,5	-23,2	-13,0	-15,3	-15,7
2050	-14,4	-13,8	-15,5	-27,9	-27,5	-22,2	-13,0	-15,0	-15,2
2076	-13,9	-13,6	-12,6	-27,8	-27,0	-21,0	-12,6	-13,6	-14,7
2084	-13,6	-13,0	-12,6	-27,0	-26,2	-20,8	-13,3	-12,9	-14,0
2090	-12,0	-12,0	-12,2	-27,2	-26,0	-21,0	-13,7	-12,1	-13,0
2098	-11,0	-11,6	-12,3	-27,4	-26,1	-22,9	-14,0	-11,8	-12,3
2100	-11,0	-11,4	-12,3	-29,0	-28,8	-23,7	-14,4	-11,9	-12,1
2104	-10,8	-11,3	-12,3	-30,2	-29,5	-24,5	-14,7	-12,1	-12,3
2109	-11,0	-11,5	-12,7	-28,9	-29,2	-23,7	-15,1	-12,2	-12,5
2120	-11,3	-12,0	-13,0	-27,5	-29,1	-22,8	-15,2	-12,6	-12,9
2134	-11,7	-12,3	-13,6	-26,2	-27,8	-22,5	-15,1	-12,9	-13,5
2146	-12,1	-12,6	-14,1	-25,1	-26,2	-21,4	-14,1	-13,3	-13,8
2150	-12,5	-13,0	-14,0	-23,3	-25,0	-20,3	-12,8	-13,5	-13,7
2157	-12,5	-13,1	-14,2	-22,3	-23,4	-18,8	-12,0	-13,4	-13,6
2162	-12,5	-12,9	-14,2	-21,0	-21,6	-17,6	-11,4	-13,3	-13,5
2168	-12,2	-12,7	-13,8	-20,4	-20,7	-16,6	-11,4	-13,2	-13,4
2185	-11,9	-12,5	-13,7	-20,0	-20,0	-15,9	-11,2	-12,7	-13,4
2193	-11,7	-12,3	-13,0	-20,2	-20,1	-16,0	-11,5	-12,6	-13,5
2196	-12,1	-12,2	-13,0	-20,8	-20,4	-15,8	-11,6	-12,9	-13,6
2200	-12,6	-13,0	-13,7	-20,9	-21,1	-16,1	-11,8	-13,7	-13,8
2213	-12,7	-12,9	-14,1	-20,6	-21,4	-16,2	-12,1	-13,8	-13,9
2221	-12,8	-12,8	-14,0	-19,9	-21,3	-18,4	-12,4	-13,4	-13,6
2230	-12,9	-12,8	-14,1	-18,2	-20,2	-17,9	-13,0	-13,2	-13,3
2250	-12,0	-12,7	-13,0	-17,7	-18,7	-16,8	-13,0	-12,7	-12,8
2258	-11,9	-12,5	-13,2	-17,1	-17,5	-15,6	-13,0	-12,6	-13,1
2280	-11,6	-12,4	-13,1	-16,8	-17,2	-15,0	-13,0	-12,5	-13,0
2300	-11,5	-12,3	-13,3	-16,9	-16,7	-15,0	-12,8	-12,4	-12,9
2308	-11,6	-12,2	-13,3	-16,9	-16,6	-14,9	-12,6	-12,4	-12,9
2311	-11,7	-12,5	-13,7	-17,1	-16,8	-15,2	-12,4	-12,4	-12,9
2319	-11,8	-12,7	-13,7	-18,2	-17,3	-16,5	-12,7	-12,6	-13,0
2330	-11,9	-12,9	-13,8	-19,1	-18,4	-17,2	-13,7	-12,8	-13,3
2336	-12,0	-13,1	-14,1	-19,4	-18,4	-18,5	-13,7	-13,0	-13,5
2350	-12,3	-13,4	-14,4	-19,1	-18,3	-19,2	-14,0	-13,5	-14,0
2358	-12,6	-13,7	-14,4	-18,1	-17,7	-19,2	-14,0	-13,8	-14,6
2364	-12,9	-14,2	-14,4	-17,2	-16,7	-18,6	-12,7	-14,0	-15,0
2389	-13,2	-14,4	-14,5	-16,9	-16,4	-18,2	-12,1	-14,6	-15,5
2395	-13,4	-14,5	-14,7	-16,8	-16,2	-17,3	-12,0	-14,9	-15,8
2398	-13,5	-14,5	-14,7	-16,2	-16,0	-17,0	-12,2	-15,0	-16,1
2400	-13,6	-14,7	-14,6	-16,4	-16,2	-16,5	-12,6	-15,2	-16,1
2414	-13,6	-14,6	-14,5	-15,9	-16,2	-16,3	-12,9	-14,9	-16,1
2417	-13,6	-14,6	-14,6	-16,6	-16,2	-16,3	-13,3	-14,8	-16,2
2420	-13,6	-14,3	-14,3	-18,7	-16,7	-16,7	-14,0	-14,6	-15,8
2442	-12,4	-14,2	-13,9	-20,4	-17,4	-17,3	-14,0	-14,4	-14,5

*Appendice 1: Tabelle dati*

2445	-12,7	-14,1	-13,9	-20,9	-17,7	-18,0	-14,0	-14,4	-14,4
2448	-12,8	-13,9	-13,9	-21,0	-18,0	-18,7	-13,2	-14,5	-14,6
2450	-13,0	-14,0	-13,9	-20,8	-17,6	-19,1	-13,0	-14,5	-15,0
2456	-13,6	-14,4	-14,2	-19,6	-17,5	-18,5	-12,7	-14,9	-15,2
2482	-14,2	-14,8	-15,1	-17,9	-17,1	-17,1	-12,6	-15,8	-16,1
2487	-14,3	-15,0	-15,1	-16,0	-16,0	-16,0	-12,6	-15,8	-16,3
2496	-14,6	-15,3	-15,1	-15,3	-15,8	-15,8	-12,6	-15,7	-16,2
2500	-14,6	-15,3	-15,1	-14,8	-15,2	-15,6	-12,6	-15,7	-16,1
2507	-14,5	-14,9	-15,0	-14,9	-15,0	-15,8	-12,7	-15,2	-15,9
2538	-13,5	-14,0	-13,7	-14,9	-15,1	-16,2	-12,8	-14,5	-15,1
2550	-12,9	-13,3	-13,3	-15,2	-15,7	-16,8	-13,5	-13,7	-14,2
2566	-12,8	-13,2	-13,1	-15,6	-16,3	-17,0	-13,8	-13,5	-13,7
2571	-12,7	-13,1	-13,0	-18,4	-16,8	-17,2	-15,0	-13,4	-13,4
2577	-12,6	-13,0	-13,0	-19,3	-16,9	-17,4	-15,0	-13,3	-12,8
2585	-12,5	-12,9	-13,1	-19,5	-16,8	-17,6	-15,1	-13,3	-12,8
2588	-12,5	-12,7	-13,1	-18,9	-16,5	-17,6	-14,9	-13,3	-12,8
2600	-12,6	-13,0	-13,3	-18,7	-15,9	-17,3	-14,7	-13,4	-13,0
2616	-12,7	-13,2	-14,0	-18,4	-15,7	-17,2	-13,8	-13,5	-13,6
2619	-12,8	-13,3	-14,0	-18,2	-15,7	-17,0	-13,4	-13,4	-13,7
2624	-12,9	-13,4	-14,2	-18,4	-16,4	-17,1	-12,8	-13,3	-13,8
2630	-13,0	-13,2	-14,2	-18,3	-16,7	-16,7	-11,7	-13,2	-13,8
2650	-12,7	-13,1	-13,8	-18,9	-17,1	-16,7	-11,7	-13,0	-13,2
2670	-12,1	-12,6	-13,2	-19,2	-17,5	-16,5	-11,5	-12,5	-12,6
2672	-12,0	-12,5	-13,2	-18,8	-17,6	-16,7	-11,9	-12,4	-12,2
2700	-11,3	-11,7	-11,9	-18,2	-18,1	-16,8	-12,0	-11,8	-11,9
2703	-11,3	-11,7	-11,8	-17,8	-18,2	-16,9	-12,8	-11,8	-11,8
2706	-11,2	-11,6	-11,8	-17,7	-18,5	-17,3	-13,0	-11,9	-11,9
2722	-11,1	-11,5	-11,6	-18,0	-18,6	-18,6	-13,6	-12,2	-11,8
2750	-11,7	-12,2	-12,2	-17,7	-18,8	-18,6	-13,3	-12,4	-11,9
2756	-11,8	-12,2	-12,3	-18,2	-18,9	-18,8	-12,9	-12,6	-12,1
2759	-11,9	-12,3	-12,4	-17,6	-18,7	-19,2	-12,7	-12,7	-12,2
2784	-12,0	-12,5	-12,9	-18,3	-18,8	-19,6	-12,2	-12,9	-12,9
2800	-12,3	-12,6	-13,2	-18,5	-18,8	-20,2	-11,8	-13,0	-13,0
2823	-12,5	-12,9	-13,9	-18,6	-19,2	-20,7	-11,7	-13,3	-13,4
2826	-12,7	-13,1	-14,1	-18,7	-19,1	-21,9	-11,5	-13,5	-13,5
2832	-12,9	-13,5	-14,1	-19,3	-19,6	-23,0	-11,4	-13,7	-13,7
2837	-12,8	-13,8	-14,0	-20,1	-20,6	-23,1	-11,6	-13,9	-13,8
2848	-12,9	-14,0	-14,5	-21,0	-21,1	-23,1	-12,0	-14,1	-14,4
2850	-13,0	-14,1	-14,4	-21,4	-21,4	-22,5	-12,2	-14,2	-14,5
2868	-13,6	-14,7	-15,2	-22,5	-21,7	-22,2	-12,5	-14,5	-14,7
2871	-13,7	-15,1	-15,4	-23,5	-22,6	-22,5	-12,7	-14,4	-14,9
2879	-14,0	-14,9	-15,4	-24,5	-23,5	-22,2	-13,1	-14,2	-14,7
2882	-13,8	-14,8	-15,4	-25,3	-24,6	-22,4	-13,3	-14,1	-14,6
2890	-13,6	-14,7	-15,4	-26,8	-26,0	-23,2	-15,0	-13,9	-14,4
2900	-13,3	-14,5	-14,5	-27,7	-27,1	-24,0	-16,0	-13,7	-13,7
2918	-12,9	-14,2	-13,6	-28,8	-28,4	-26,3	-15,7	-13,3	-13,4

2932	-12,5	-13,8	-13,4	-31,7	-29,8	-28,0	-14,6	-13,4	-13,7
2935	-12,6	-13,5	-13,4	-33,9	-31,3	-24,1	-13,5	-13,5	-13,8
2944	-12,7	-13,6	-13,3	-35,2	-33,7	-23,1	-12,6	-13,6	-13,9
2950	-12,8	-13,7	-14,4	-37,8	-35,9	-22,1	-12,5	-13,8	-14,1
2958	-12,9	-14,0	-14,4	-33,1	-31,6	-20,5	-12,7	-14,0	-14,3
2974	-13,5	-14,4	-16,4	-29,5	-29,7	-20,4	-13,5	-14,4	-15,5
2977	-13,6	-14,8	-15,7	-32,5	-29,0	-22,2	-14,1	-14,6	-15,7
2983	-14,2	-15,4	-16,2	-33,8	-30,0	-23,3	-15,1	-15,1	-15,5
3000	-14,5	-15,8	-16,2	-35,5	-31,1	-25,2	-15,5	-15,0	-15,3

## 5 CPW

Frequenza [MHz]	Livello [dB]	Frequenza [MHz]	Livello [dB]	Frequenza [MHz]	Livello [dB]
200	-5,3	1154	-6,7	2109	-7,3
219	-5,3	1166	-6,7	2120	-7,1
230	-5,3	1200	-6,8	2134	-6,9
233	-5,4	1202	-6,5	2146	-7,1
239	-5,4	1205	-6,6	2150	-7,3
244	-5,5	1219	-6,8	2157	-7,5
247	-5,5	1250	-7,1	2162	-7,7
250	-5,6	1255	-6,9	2168	-8,0
261	-5,7	1266	-6,7	2185	-7,5
270	-5,8	1269	-6,0	2193	-7,0
281	-5,9	1300	-7,1	2196	-7,3
284	-6,0	1320	-6,9	2200	-7,7
300	-5,9	1328	-6,7	2213	-7,8
317	-5,7	1339	-6,5	2221	-7,9
320	-5,5	1345	-6,8	2230	-8,0
326	-5,4	1350	-7,0	2250	-8,1
328	-5,6	1356	-7,0	2258	-7,8
348	-5,7	1370	-7,0	2280	-7,5
350	-5,8	1381	-6,9	2300	-8,1
354	-5,8	1400	-6,9	2308	-8,1
356	-5,8	1401	-6,5	2311	-8,1
359	-5,8	1423	-6,7	2319	-8,0
362	-5,7	1426	-6,7	2330	-8,0
384	-5,7	1434	-6,8	2336	-7,9
393	-5,7	1450	-6,9	2350	-7,9
400	-5,7	1457	-6,5	2358	-7,5

*Appendice 1: Tabelle dati*

---

404	-5,7	1471	-6,6	2364	-7,7
407	-5,8	1474	-6,9	2389	-8,5
415	-5,7	1485	-7,3	2395	-8,3
421	-5,7	1500	-7,7	2398	-8,5
429	-5,7	1516	-7,7	2400	-8,4
446	-5,7	1518	-7,6	2414	-8,1
450	-5,7	1521	-7,6	2417	-7,9
457	-5,6	1524	-7,5	2420	-8,2
458	-5,5	1550	-7,5	2442	-8,4
474	-5,6	1560	-7,5	2445	-8,7
500	-5,8	1563	-7,5	2448	-9,0
508	-5,9	1566	-7,4	2450	-9,4
514	-6,0	1574	-7,4	2456	-9,1
522	-6,1	1600	-7,4	2482	-9,0
524	-6,2	1605	-7,3	2487	-9,0
527	-6,2	1616	-7,2	2496	-8,9
550	-6,3	1628	-7,1	2500	-8,9
560	-6,2	1630	-7,0	2507	-8,5
575	-6,1	1644	-6,9	2538	-8,2
578	-6,1	1650	-7,3	2550	-8,8
583	-6,1	1667	-7,4	2566	-8,7
586	-6,1	1670	-7,5	2571	-8,6
589	-6,0	1675	-7,6	2577	-8,5
600	-6,2	1700	-7,6	2585	-8,4
608	-6,2	1712	-7,7	2588	-8,6
645	-6,2	1714	-7,7	2600	-8,9
650	-6,2	1750	-7,8	2616	-8,9
678	-6,3	1751	-7,6	2619	-8,9
700	-6,4	1759	-7,5	2624	-9,0
715	-6,4	1765	-7,4	2630	-9,0
718	-6,4	1768	-7,5	2650	-9,0
746	-6,3	1796	-7,6	2670	-8,7
750	-6,3	1800	-8,1	2672	-8,5
751	-6,4	1815	-7,6	2700	-8,4
754	-6,0	1838	-7,3	2703	-8,2
757	-6,3	1843	-7,5	2706	-8,0
760	-6,3	1850	-7,8	2722	-8,4
765	-5,2	1863	-7,5	2750	-8,3
776	-5,3	1882	-7,3	2756	-8,5
793	-6,4	1891	-7,2	2759	-8,4
796	-5,5	1900	-7,8	2784	-8,2
799	-6,2	1919	-7,4	2800	-8,8
800	-6,2	1922	-7,3	2823	-9,3
802	-6,0	1924	-7,2	2826	-9,1
804	-6,1	1944	-7,1	2832	-9,0
850	-6,3	1950	-7,2	2837	-8,9

874	-6,3	1961	-7,2	2848	-8,8
897	-6,4	1964	-7,3	2850	-9,3
900	-6,4	1966	-7,7	2868	-9,7
916	-6,3	1975	-7,5	2871	-10,0
922	-6,2	1978	-7,8	2879	-10,4
930	-6,1	2000	-7,7	2882	-10,8
944	-6,0	2008	-7,2	2890	-10,0
950	-6,3	2020	-7,4	2900	-9,7
956	-6,4	2025	-7,6	2918	-9,0
986	-6,8	2031	-7,8	2932	-8,2
989	-6,8	2039	-8,3	2935	-8,6
1000	-7,1	2042	-8,8	2944	-8,9
1048	-6,5	2050	-9,2	2950	-9,2
1050	-6,3	2076	-8,9	2958	-8,7
1054	-6,0	2084	-6,9	2974	-8,6
1100	-6,6	2090	-7,3	2977	-9,0
1121	-6,6	2098	-7,6	2983	-9,5
1135	-6,6	2100	-7,8	3000	-9,9
1150	-6,6	2104	-7,5		

## 6 Cavi di collegamento

Cavetto da 26 cm			Cavetto da 50 cm	
Frequenza [MHz]	Livello [dB]		Frequenza [MHz]	Livello [dB]
200	-5,9		200	-5,6
250	-5,8		250	-5,9
270	-5,6		270	-5,7
300	-5,8		300	-5,8
330	-5,6		330	-5,7
350	-5,7		350	-5,8
370	-5,8		370	-5,9
400	-6,0		400	-5,8
426	-6,2		426	-6,3
430	-6,3		430	-6,2
450	-6,0		450	-6,0
470	-5,9		470	-6,0
500	-5,8		500	-5,9
530	-5,7		530	-6,0
550	-5,9		550	-6,2
600	-5,8		600	-6,0

650	-5,7		650	-6,0
700	-5,8		700	-6,2
750	-5,9		750	-6,0
800	-5,1		800	-5,4
830	-5,4		830	-5,8
850	-5,8		850	-6,1
900	-6,0		900	-6,1
930	-6,0		930	-6,0
950	-5,8		950	-6,1
970	-6,0		970	-6,1
1000	-6,1		1000	-6,2
1030	-5,8		1030	-6,0
1050	-5,7		1050	-5,8
1100	-6,0		1100	-6,1
1150	-5,9		1150	-6,2
1200	-6,0		1200	-6,2
1230	-6,1		1230	-6,4
1250	-6,2		1250	-6,6
1300	-6,2		1300	-6,6
1350	-6,4		1350	-6,4
1379	-6,2		1379	-6,4
1400	-6,1		1400	-6,3
1430	-6,3		1430	-6,8
1450	-6,5		1450	-6,5
1479	-6,6		1479	-6,5
1480	-6,6		1480	-6,5
1500	-6,5		1500	-6,8
1516	-6,5		1516	-7,0
1550	-6,6		1550	-6,7
1558	-6,5		1558	-6,7
1574	-6,7		1574	-6,8
1594	-6,5		1594	-7,0
1600	-6,6		1600	-7,0
1630	-6,7		1630	-6,9
1647	-6,6		1647	-6,6
1650	-6,5		1650	-6,7
1679	-6,6		1679	-6,9
1689	-6,5		1689	-7,0
1700	-6,7		1700	-7,1
1730	-6,8		1730	-7,0
1750	-6,6		1750	-7,3
1770	-6,8		1770	-7,4
1773	-6,7		1773	-7,5
1800	-6,9		1800	-7,2
1824	-6,6		1824	-7,0
1830	-6,7		1830	-7,0



1850	-6,6		1850	-7,1
1870	-6,8		1870	-7,0
1900	-6,9		1900	-6,9
1944	-6,5		1944	-7,2
1947	-6,3		1947	-7,4
1950	-6,4		1950	-7,4
1986	-7,0		1986	-6,8
2000	-7,9		2000	-7,0
2003	-7,9		2003	-7,6
2031	-7,1		2031	-8,4
2050	-6,3		2050	-8,0
2070	-5,9		2070	-7,0
2087	-6,5		2087	-5,9
2100	-7,0		2100	-6,3
2118	-7,4		2118	-6,9
2123	-7,0		2123	-7,4
2150	-6,7		2150	-7,1
2176	-5,9		2176	-6,8
2182	-6,2		2182	-6,4
2200	-6,4		2200	-7,0
2221	-6,8		2221	-7,6
2230	-7,1		2230	-7,0
2232	-6,4		2232	-6,7
2250	-6,5		2250	-6,3
2255	-7,0		2255	-6,5
2300	-6,4		2300	-6,7
2333	-6,2		2333	-6,9
2350	-6,4		2350	-7,7
2352	-6,5		2352	-7,9
2353	-6,3		2353	-7,7
2392	-7,0		2392	-6,8
2400	-8,0		2400	-7,0
2410	-8,0		2410	-7,3
2430	-7,4		2430	-7,7
2450	-6,7		2450	-8,4
2468	-6,6		2468	-8,0
2500	-7,2		2500	-7,8
2505	-7,1		2505	-7,9
2530	-7,3		2530	-8,1
2437	-7,5		2437	-8,3
2546	-7,3		2546	-7,6
2550	-7,4		2550	-7,6
2582	-7,8		2582	-7,8
2588	-7,6		2588	-7,7
2600	-7,8		2600	-7,4
2624	-7,6		2624	-7,3

2638	-7,0	2638	-7,4
2650	-7,1	2650	-7,5
2657	-7,0	2657	-7,6
2661	-7,2	2661	-7,5
2667	-7,0	2667	-7,4
2670	-6,9	2670	-7,1
2700	-6,7	2700	-7,0
2750	-6,8	2750	-7,4
2765	-6,7	2765	-8,0
2770	-6,9	2770	-8,2
2784	-7,1	2784	-8,4
2800	-7,0	2800	-8,2
2827	-7,9	2827	-7,3
2843	-8,8	2843	-7,8
2847	-9,3	2847	-7,6
2850	-9,0	2850	-8,0
2860	-8,1	2860	-8,4
2870	-7,5	2870	-8,6
2876	-7,0	2876	-8,9
2888	-6,8	2888	-9,8
2900	-6,7	2900	-9,3
2907	-6,5	2907	-8,0
2932	-7,0	2932	-7,1
2950	-8,6	2950	-7,9
2960	-8,7	2960	-8,2
2964	-7,0	2964	-8,5
2977	-7,6	2977	-8,9
3000	-7,4	3000	-8,2

## 7 Prototipo 11

Frequenza [MHz]	Livello [dB]	Frequenza [MHz]	Livello [dB]	Frequenza [MHz]	Livello [dB]
200	-5,9	1154	-8,6	2109	-11,8
219	-6,0	1166	-8,9	2120	-12,1
230	-6,3	1200	-8,8	2134	-12,4
233	-6,3	1202	-8,8	2146	-12,9
239	-6,4	1205	-9,0	2150	-12,9
244	-6,5	1219	-8,9	2157	-13,1
247	-6,5	1250	-9,0	2162	-13,1

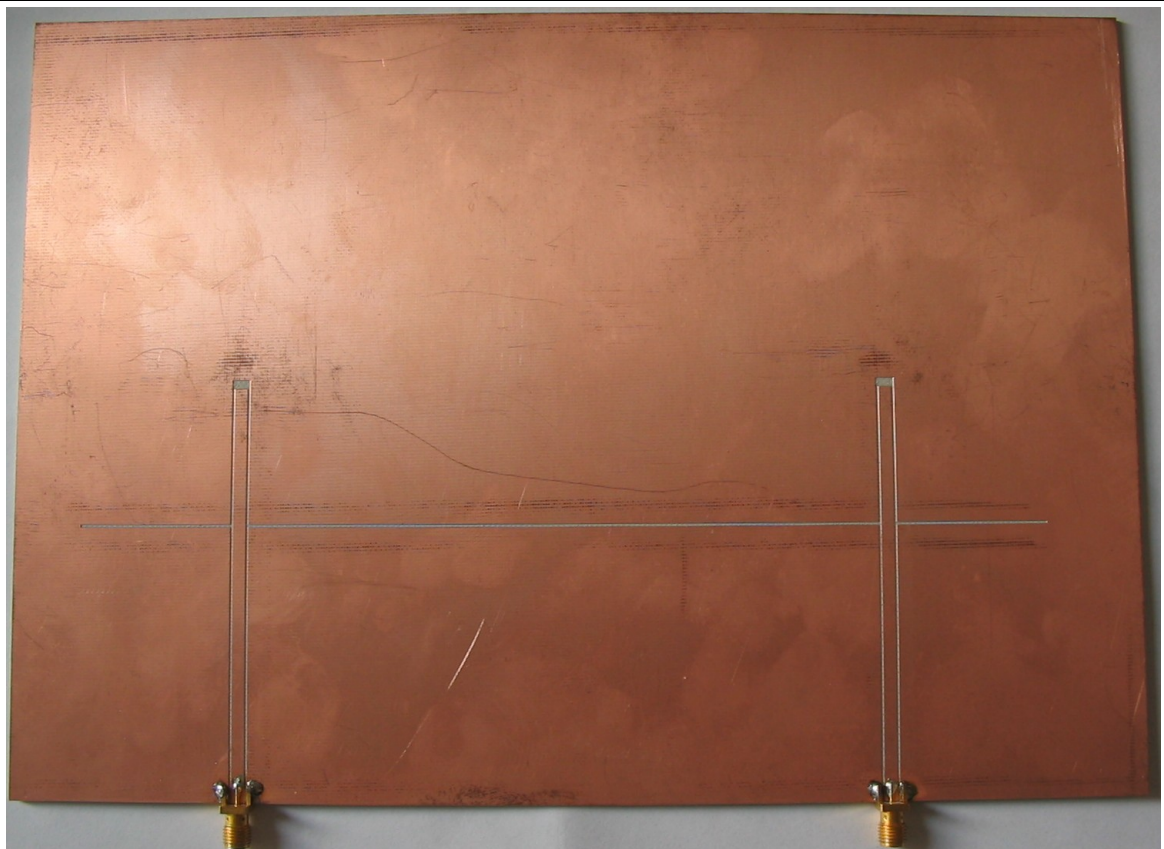
250	-6,7	1255	-9,0	2168	-13,1
261	-6,9	1266	-9,3	2185	-12,8
270	-6,9	1269	-9,5	2193	-12,3
281	-7,6	1300	-9,4	2196	-12,3
284	-8,4	1320	-9,6	2200	-13,0
300	-8,4	1328	-9,5	2213	-13,5
317	-6,8	1339	-9,4	2221	-13,8
320	-6,8	1345	-9,5	2230	-13,8
326	-6,8	1350	-9,4	2250	-12,9
328	-6,7	1356	-9,5	2258	-12,6
348	-6,6	1370	-9,0	2280	-12,1
350	-6,6	1381	-9,2	2300	-12,0
354	-6,6	1400	-9,6	2308	-12,1
356	-6,7	1401	-9,4	2311	-12,2
359	-6,7	1423	-9,3	2319	-12,2
362	-6,7	1426	-9,4	2330	-12,2
384	-7,2	1434	-9,5	2336	-12,4
393	-7,2	1450	-9,6	2350	-12,9
400	-7,2	1457	-9,4	2358	-13,3
404	-7,3	1471	-9,4	2364	-13,2
407	-7,3	1474	-9,4	2389	-14,2
415	-7,1	1485	-9,6	2395	-14,0
421	-7,0	1500	-9,9	2398	-14,0
429	-7,1	1516	-9,8	2400	-14,2
446	-7,2	1518	-10,0	2414	-14,1
450	-7,2	1521	-9,8	2417	-14,0
457	-7,1	1524	-9,6	2420	-13,9
458	-7,1	1550	-10,0	2442	-13,3
474	-7,0	1560	-10,0	2445	-13,0
500	-7,3	1563	-9,7	2448	-13,0
508	-7,6	1566	-9,5	2450	-13,0
514	-7,6	1574	-9,8	2456	-13,0
522	-8,0	1600	-10,1	2482	-14,0
524	-8,5	1605	-10,1	2487	-13,9
527	-8,4	1616	-10,0	2496	-14,5
550	-7,7	1628	-10,4	2500	-14,8
560	-7,4	1630	-9,7	2507	-14,4
575	-7,6	1644	-9,6	2538	-14,6
578	-7,6	1650	-9,8	2550	-13,9

583	-7,6	1667	-9,9	2566	-13,5
586	-7,5	1670	-10,4	2571	-13,1
589	-7,5	1675	-10,4	2577	-13,0
600	-7,4	1700	-10,8	2585	-12,9
608	-7,6	1712	-10,8	2588	-12,9
645	-7,4	1714	-10,8	2600	-12,8
650	-7,6	1750	-11,2	2616	-12,8
678	-7,5	1751	-11,3	2619	-12,6
700	-7,7	1759	-10,9	2624	-13,1
715	-7,7	1765	-11,2	2630	-13,1
718	-7,7	1768	-11,2	2650	-13,1
746	-7,9	1796	-11,2	2670	-12,7
750	-7,9	1800	-11,4	2672	-12,7
751	-7,9	1815	-11,4	2700	-11,8
754	-8,3	1838	-11,7	2703	-11,5
757	-8,1	1843	-12,1	2706	-11,5
760	-7,0	1850	-11,8	2722	-11,2
765	-8,4	1863	-11,6	2750	-11,7
776	-8,4	1882	-12,2	2756	-11,6
793	-8,2	1891	-11,7	2759	-11,9
796	-8,3	1900	-12,0	2784	-12,1
799	-8,7	1919	-11,6	2800	-12,0
800	-8,9	1922	-11,5	2823	-12,7
802	-7,9	1924	-11,6	2826	-12,9
804	-9,6	1944	-11,7	2832	-12,8
850	-9,8	1950	-11,3	2837	-13,1
874	-10,0	1961	-11,8	2848	-13,0
897	-10,0	1964	-11,7	2850	-12,9
900	-10,0	1966	-11,9	2868	-13,3
916	-9,9	1975	-12,2	2871	-14,1
922	-9,9	1978	-13,1	2879	-14,1
930	-9,7	2000	-13,4	2882	-14,5
944	-9,3	2008	-14,4	2890	-14,3
950	-9,6	2020	-15,2	2900	-14,1
956	-9,6	2025	-15,2	2918	-12,7
986	-9,8	2031	-15,5	2932	-12,3
989	-9,4	2039	-15,5	2935	-12,0
1000	-9,0	2042	-15,0	2944	-12,2
1048	-9,1	2050	-15,0	2950	-12,3

1050	-8,8		2076	-11,8		2958	-12,3
1054	-8,8		2084	-11,6		2974	-13,5
1100	-9,0		2090	-11,3		2977	-13,5
1121	-8,9		2098	-11,6		2983	-13,9
1135	-8,6		2100	-11,4		3000	-14,4
1150	-8,9		2104	-11,4			

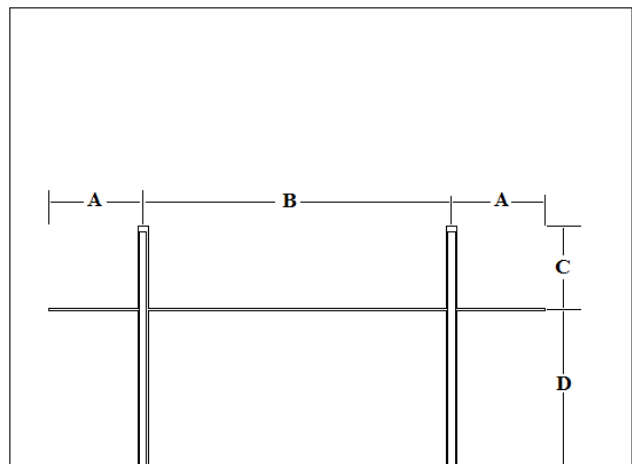
## PROTOTIPI

### 1 Prototipo 1

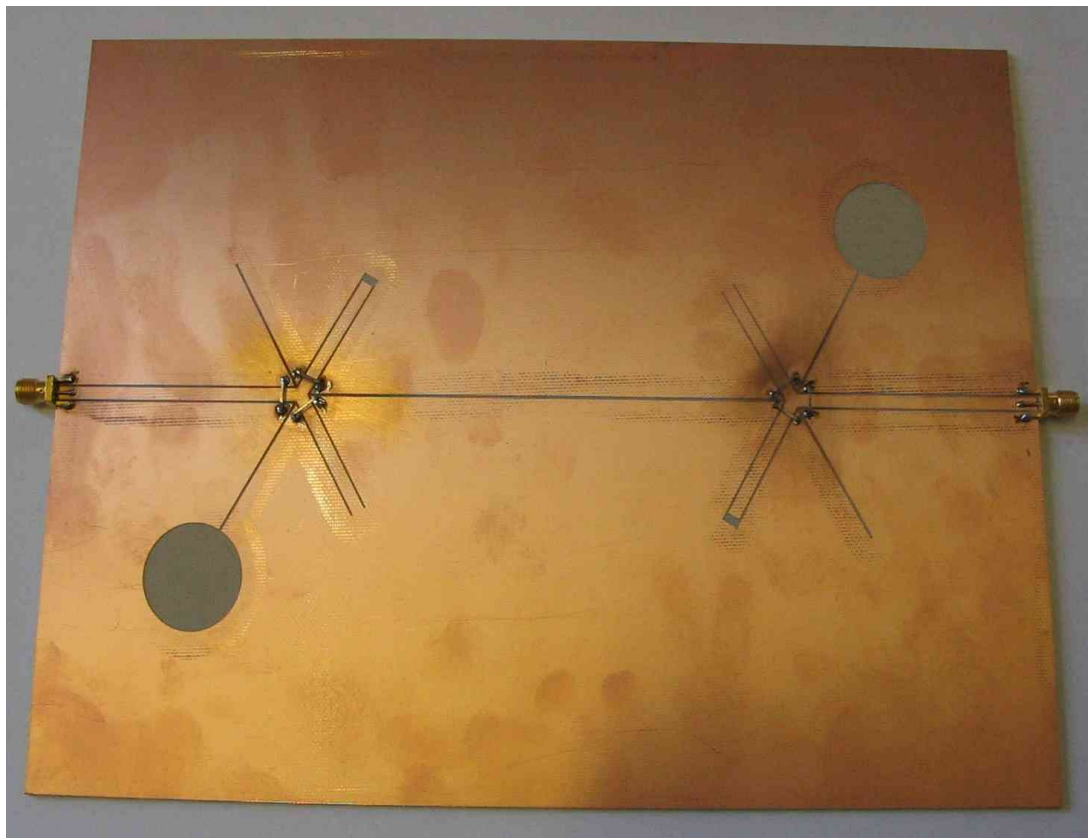


CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $C = 30,56 \text{ mm}$   
 $D = 60 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $A = 35,69 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$



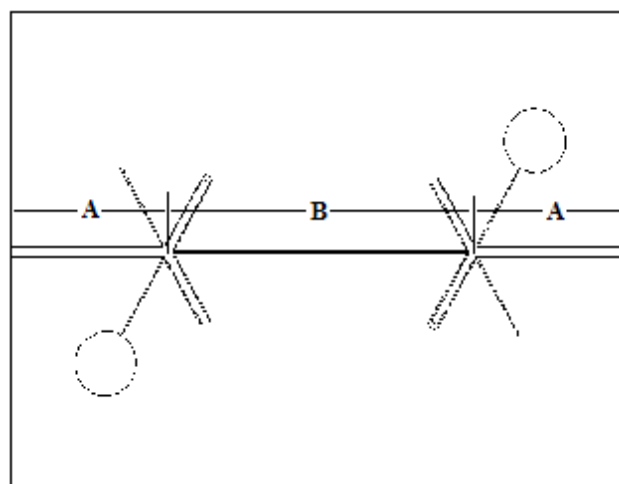
## 2 Prototipo 2



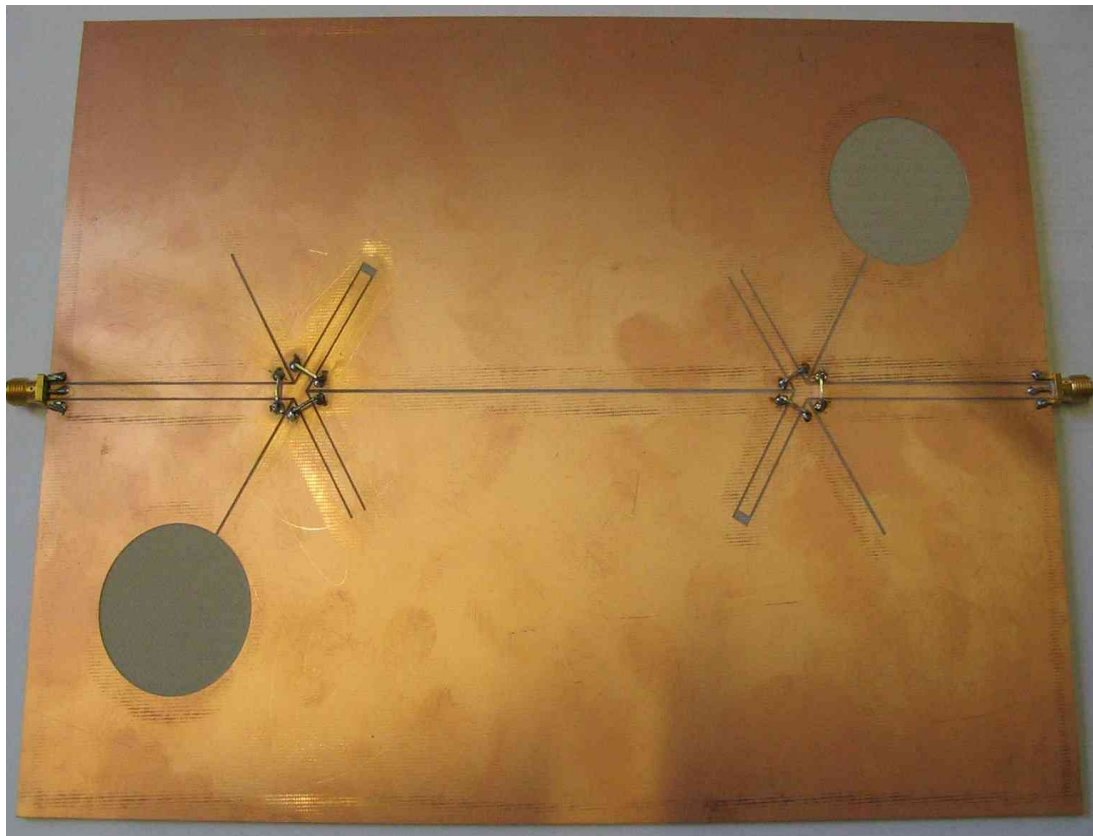
CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot circolare :  $\varnothing = 24,14 \text{ mm}$



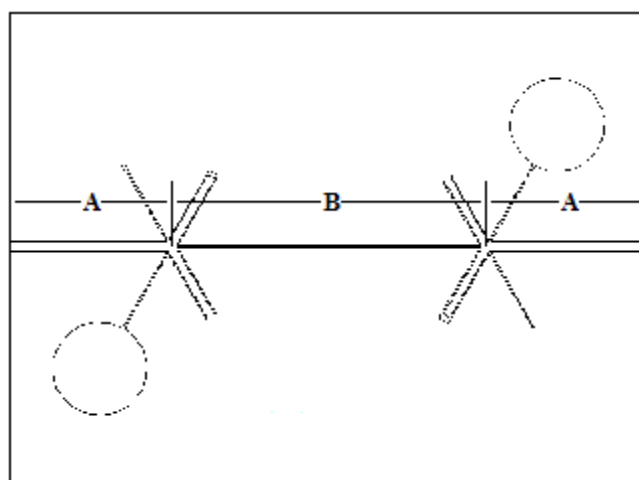
### 3 Prototipo 3



CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

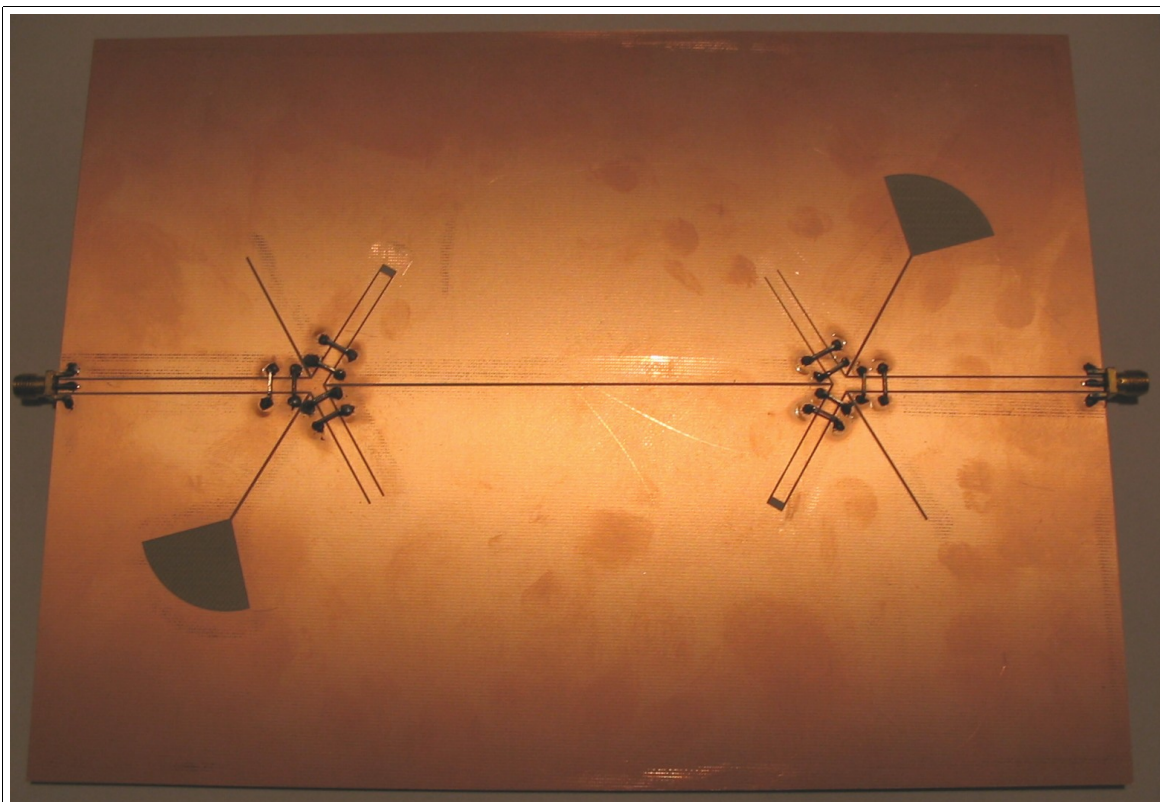
Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot circolare :  $\varnothing = 35,95 \text{ mm}$





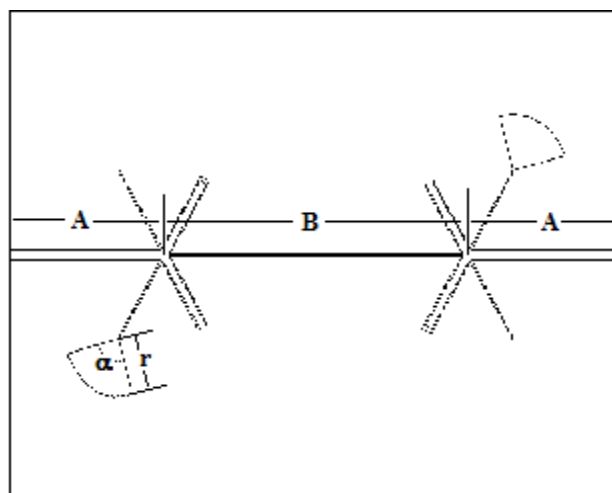
## 4 Prototipo 4



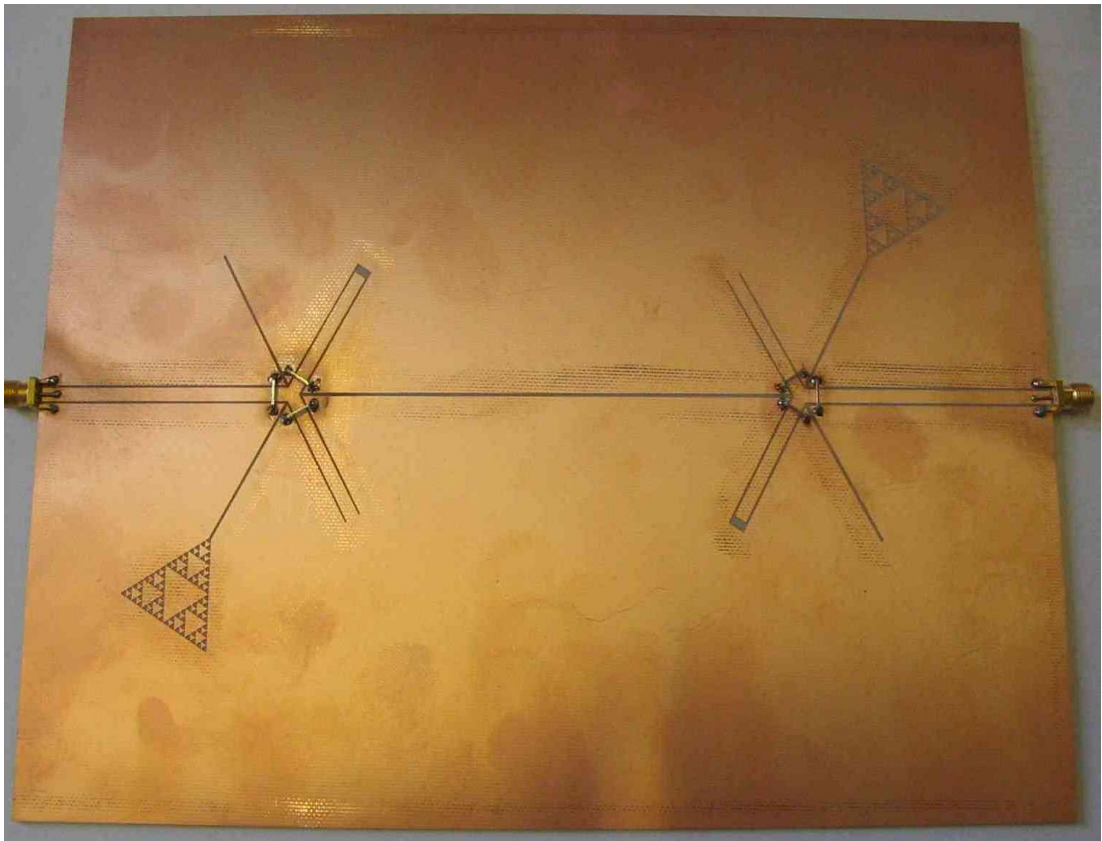
CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot radiale :  $\alpha = 90^\circ$   
 $r = 20,7 \text{ mm}$



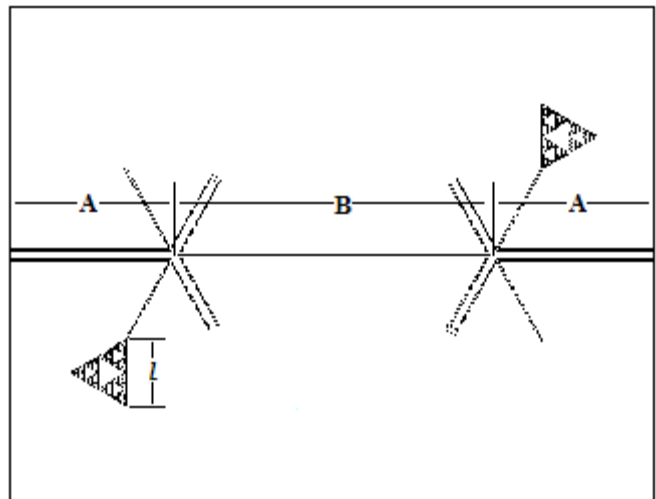
## 5 Prototipo 5



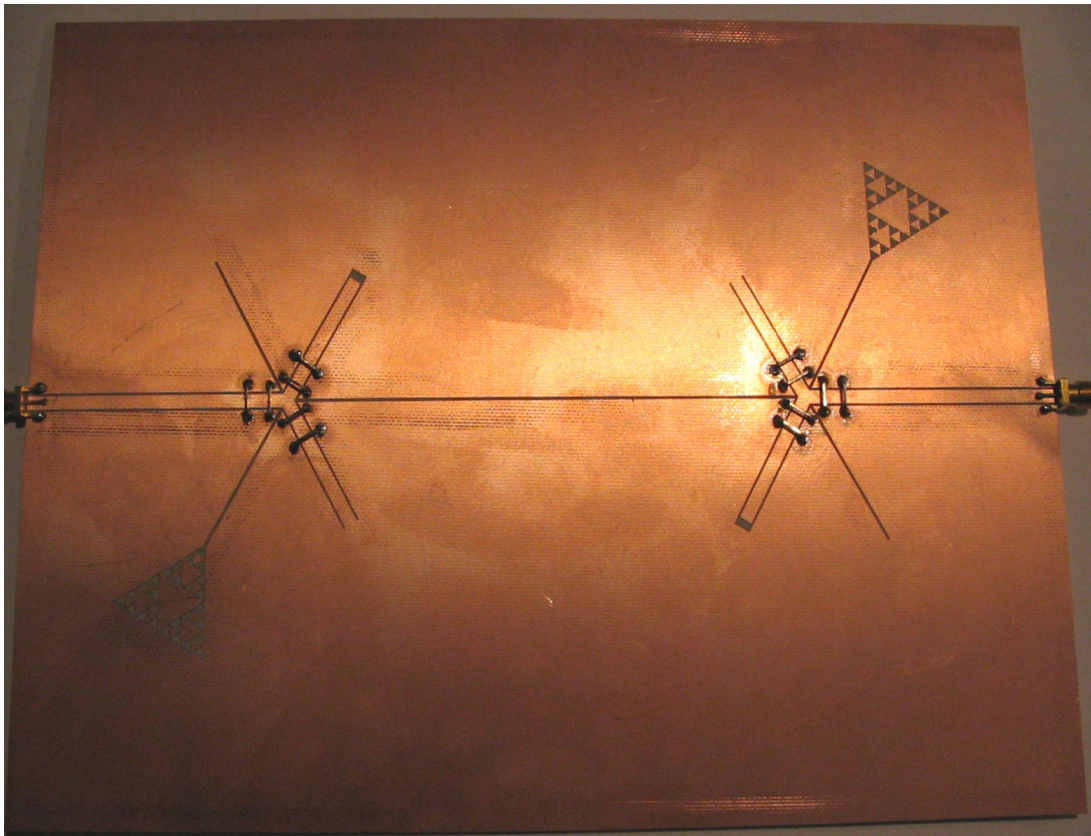
CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot Sierpinski :  $l = 35,95 \text{ mm}$



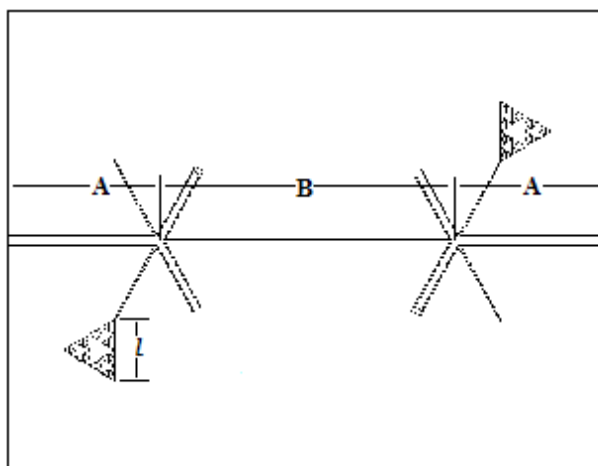
## 6 Prototipo 6



CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

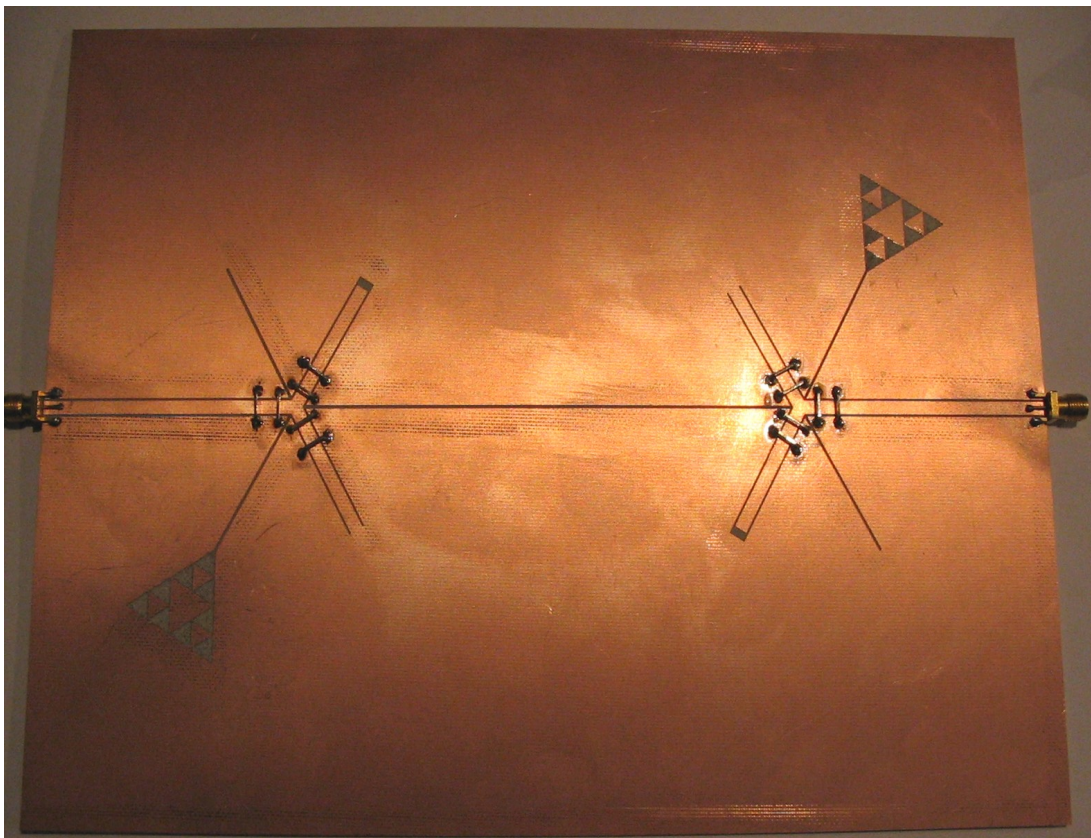
Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot Sierpinski :  $l = 35,95 \text{ mm}$





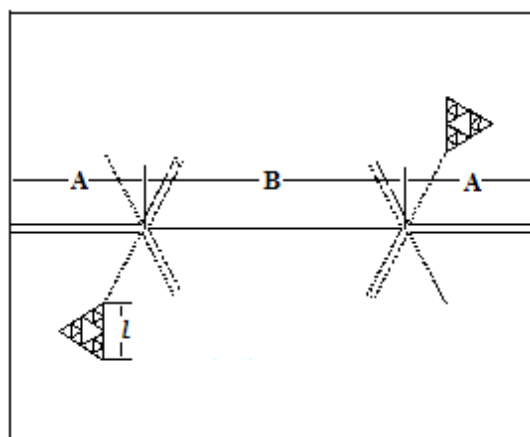
## 7 Prototipo 7



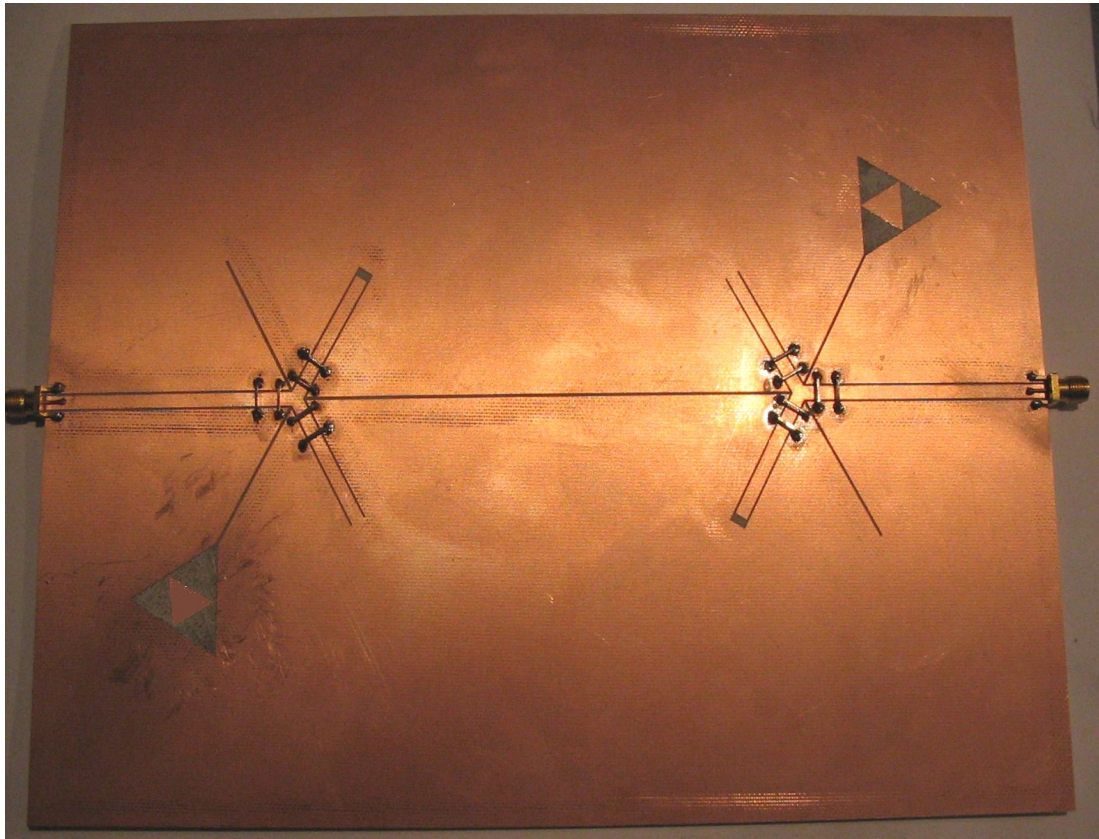
CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot Sierpinski :  $l = 35,95 \text{ mm}$



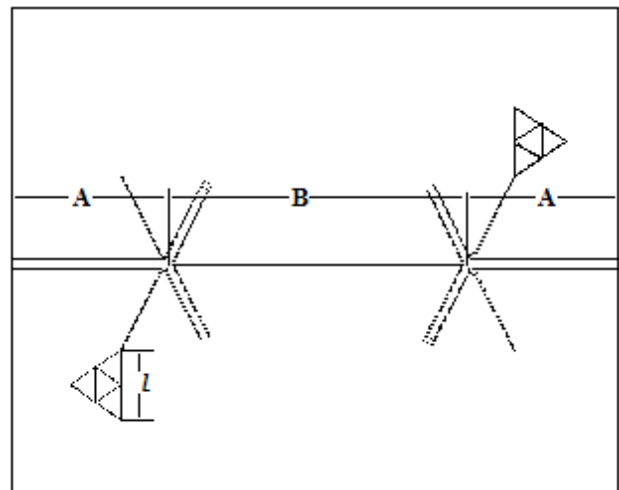
## 8 Prototipo 8



CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

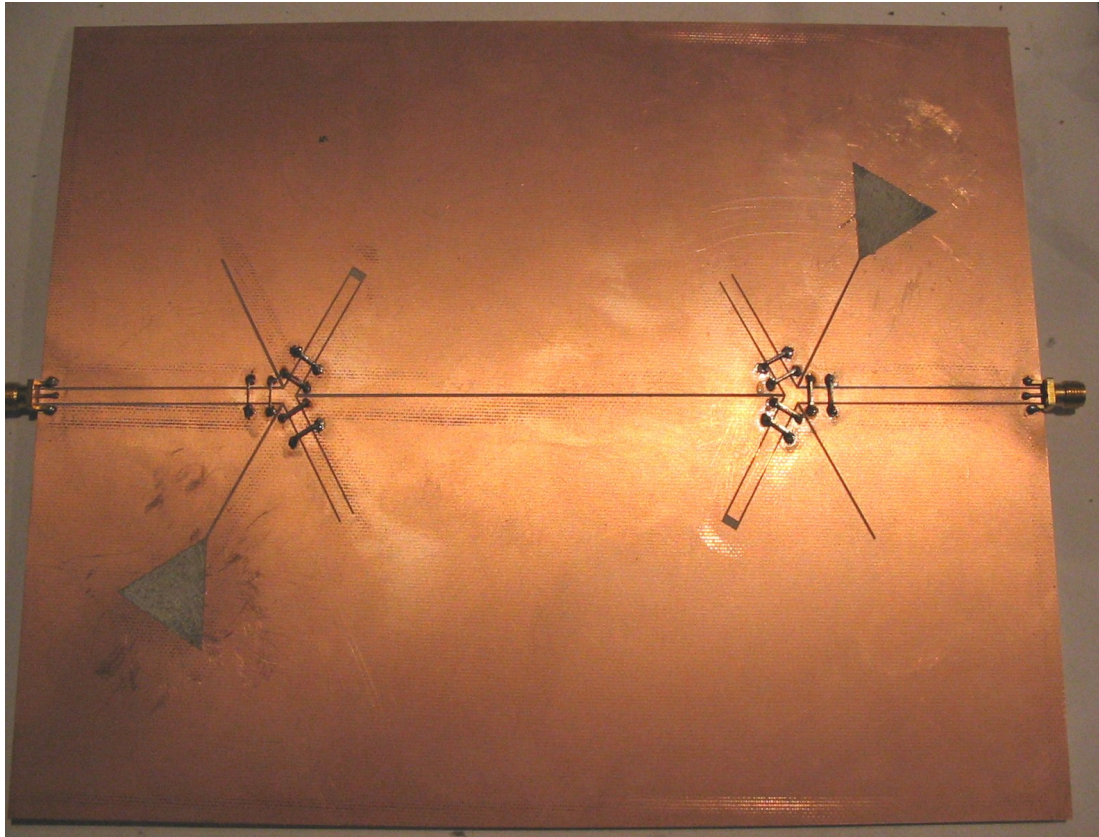
Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot Sierpinski :  $l = 35,95 \text{ mm}$





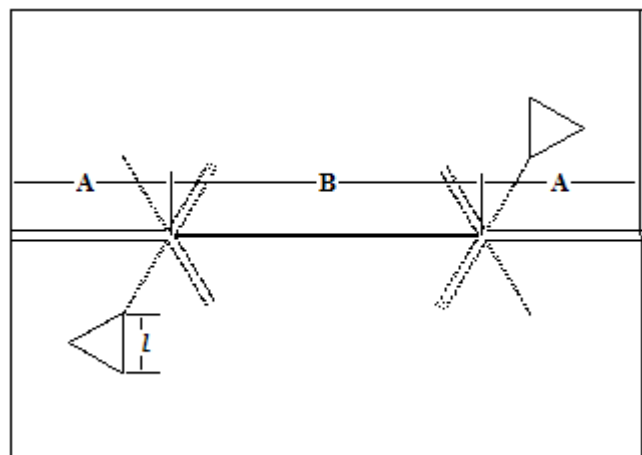
## 9 Prototipo 9



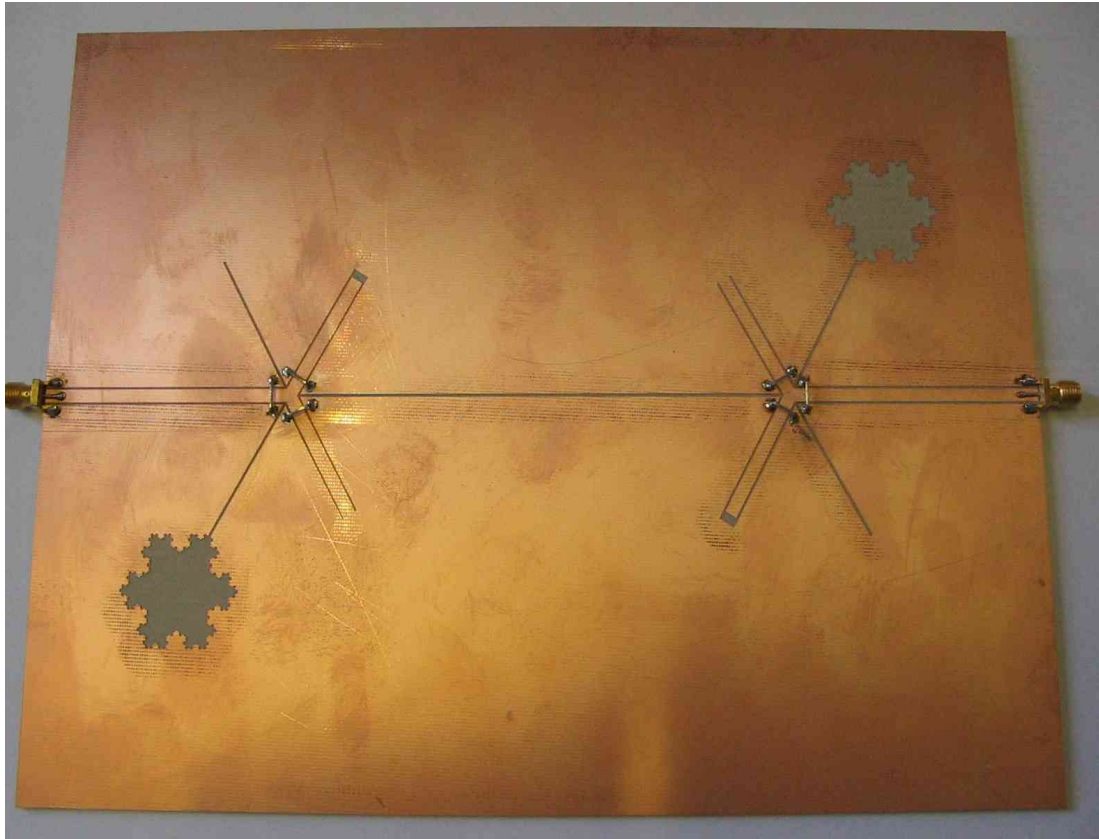
CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot triangolare :  $l = 35,95 \text{ mm}$



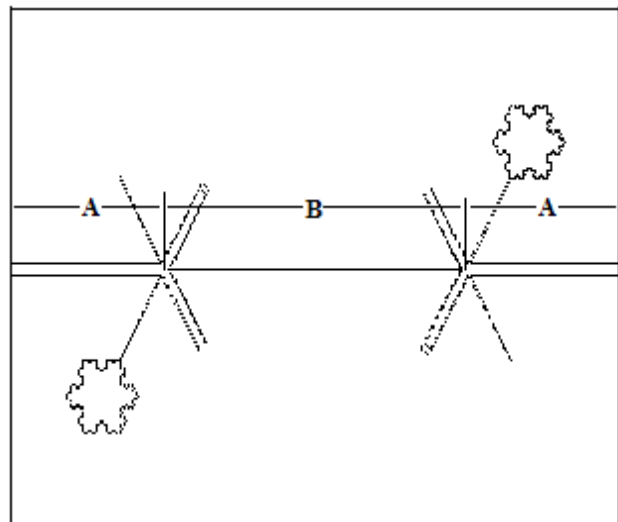
## 10 Prototipo 10



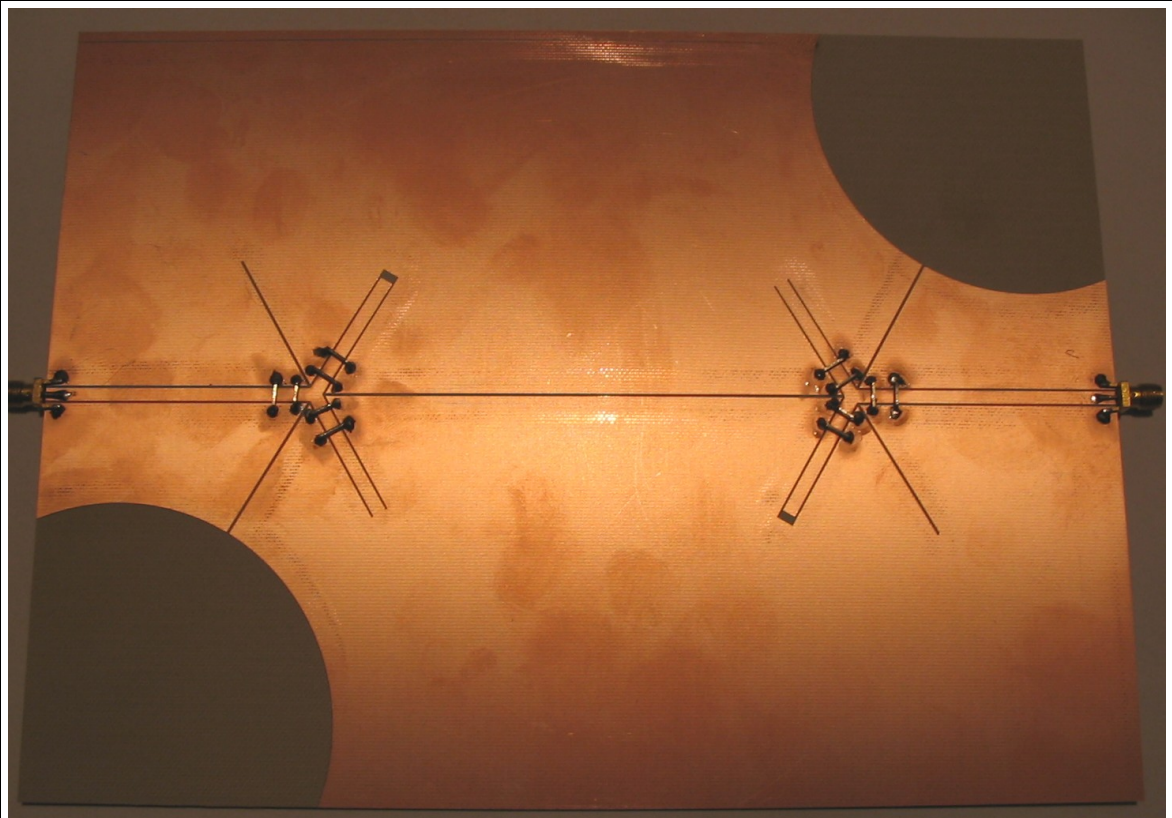
CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot Koch :  $l = 36,21 \text{ mm}$



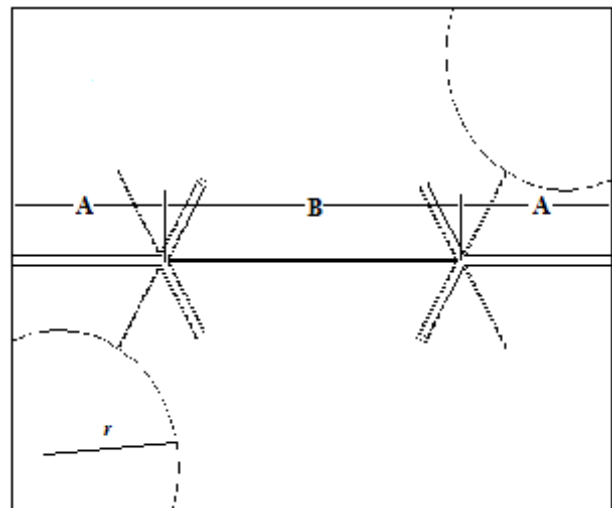
## 11 Prototipo 11



CPW :  $Z_{cpw} = 50 \Omega$   
 $\lambda_{cpw} = 122,25 \text{ mm}$   
 $A = 61 \text{ mm}$

Slotline:  $Z_{slot} = 86 \Omega$   
 $\lambda_{slot} = 142,77 \text{ mm}$   
 $B = 120 \text{ mm}$

Slot :  $r = 48,68 \text{ mm}$





## BIBLIOGRAFIA

- [1] R.C.Gupta, R.Gar, I.J.Bahl *"Microstrip lines and slotlines"* , Artech House, Norwood, MA,1979
- [2] R.Q.Lee *"Notch antennas"*, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, NASA/TM-2004-213057, Luglio 1994
- [3] V.Trifunović, B.Jokanović *"Four decade bandwidth uniplanar balun"*, Electronics Lett., Marzo 1992, Vol.28, No.6
- [4] A.A.Omar, Y.L.Chow *"Coplanar Waveguide with top and bottom shields in place of air-bridges"* , IEEE Trans.MTT,Vol.41, No.9, Settembre 1993
- [5] V.Trifunović, B.Jokanović *"Review of printed Marchand and double Y baluns: characteristic and application"* , IEEE Trans.MTT,Vol.42, No.8, Agosto 1994
- [6] K.Hettak, N.I.Dib *"New miniature broad-band CPW-to-Slotline transitions"*, IEEE Trans.MTT, Vol.48, No.1, Gennaio 2000
- [7] K.P.Ma, Y.Qian *"Analysis and applications of a new CPW-Slotline transition"*, IEEE Trans.MTT, Vol.47, No.4, Aprile 1999
- [8] J.Thaysen, K.B.Jakobsen, J.Appel-Hansen *"A wideband balun: how does it work?"*, Technical University of Denmark, applied microwave & wireless, Giugno 2000
- [9] N.I.Dib, R.N.Simons, L.P.B.Katehi *"Broadband uniplanar Microstrip to Slotline transition"*, Lewis Research Center, NASA Contractor Report 195448, Marzo 1995

- [10] J.H.Cloete "*Graphs of circuits elements for the Marchand baluns*", Microwave J., Maggio 1981
- [11] K.V.Puglia "*Electromagnetic simulation of some common balun structure*", IEEE Microwave M., Settembre 2002
- [12] A.B.Smolders, M.J.Arts "*Wideband antenna element with integrated balun*", IEEE APS int.Symposium Atlanta, USA, 1998
- [13] Grammer, Yngvesson "*Coplanar waveguide transitions to slotline*" IEEE Trans.MTT, Vol.41, Settembre 1993
- [14] S.B.Cohn "*Slotline on dielectric substrate*" IEEE Trans.MTT, Vol.17, Ottobre 1969
- [15] M.M.Zinieris, R.Sloan, L.E.Davis "*A broadband microstrip to slotline transition*" MOT Letters, Vol.18, No.5, Agosto 5 1998
- [16] G.Ghione, C.U.Naldi "*Coplanar waveguides for MMIC applications: effect of upper shielding, conductor backing, finite-extent ground planes, and line-to-line coupling*" IEEE Trans.MTT, Vol.35, No.3, Marzo 1987
- [17] B.Schüppert "*Analysis and design of microwave balanced mixers*" IEEE Trans.MTT, Vol.34, No.1, Gennaio 1986
- [18] G.Ghione, C.U.Naldi "*Analytical formulas for coplanar lines in hybrid and monolithic mics*" Electronics Lett., Febbraio 1984, Vol.20, No.4
- [19] V.S.Möttönen "*Wideband coplanar waveguide-to-rectangular waveguide transition using fin-line taper*" IEEE microwave and wireless component letters, Vol.15, No.2, Febbraio 2005
- [20] B.Schüppert "*Microstrip slotline transitions: modeling and experimental investigation*" IEEE Trans.MTT, Vol.36, No.8, Agosto 1988
- [21] H.A.Atwater "*The design of the radial line stub: a useful microstrip circuit element*" Microwave J., Novembre 1985

- [22] K.S.Ang, I.D.Robertson “*Analysis and design of impedance-transforming planar Marchand baluns*” IEEE Trans.MTT, Vol.49, No.2, Febbraio 2001
- [23] W.M.Fathelbab “*New classes of miniaturized Marchand baluns*” IEEE Trans.MTT, Vol.53, No.4, Aprile 2005