



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettronica

RELAZIONE DI LABORATORIO

Progetto di un filtro BP a linee accoppiate

Studenti:

Guadagnoli Emanuele

Roselli Claudio

Veltroni Lorenzo

Zavagli Paolo

A.A. 2005/2006

1. Introduzione

Lo scopo di questa esercitazione è la realizzazione di un filtro passa-banda di tipo Butterworth, mediante l'utilizzo di linee reali parallele accoppiate di lunghezza $\lambda/2$. Le specifiche di progetto forniteci riguardano sia il substrato utilizzato per la realizzazione delle linee reali che le caratteristiche di risposta che si desidera ottenere:

Risposta in frequenza del filtro

- $f_0=2.45$ Ghz
- $B = 120$ MHz
- attenuazione maggiore di 20 dB @ 2.3 ; 2.6 Ghz

Caratteristiche strutturali del substrato

- $\epsilon_r=4.3$
- $\text{Rho}=0.7$ (conducibilità relativa rispetto all'oro)
- $T_{\text{and}}=0.02$
- $H=1.6$ mm
- $T=18$ μm

Si è innanzitutto realizzato il filtro prototipo passa-basso, quindi tramite la trasformazione passa-basso \rightarrow passa-banda abbiamo realizzato il modello a costanti concentrate, verificando il rispetto delle specifiche. Abbiamo quindi realizzato il circuito equivalente a linee accoppiate ideali, applicando le opportune operazioni di trasformazione.

Una volta realizzato il filtro ideale a costanti distribuite abbiamo sostituito le linee ideali con *microstrip* (introducendo un opportuno modello di substrato), eseguendo quindi per entrambi i circuiti le opportune simulazioni, al fine di determinarne le rispettive risposte.

Abbiamo infine realizzato la simulazione elettromagnetica del filtro in *microstrip*.

2. Progettazione del filtro a costanti concentrate

La progettazione del filtro passa-banda passa innanzitutto per la progettazione del filtro prototipo. L'ordine del filtro è determinato dalle specifiche: poiché si richiede, per il passa-basso equivalente

(ottenuto traslando la frequenza di centro banda sulla frequenza nulla), un'attenuazione $A=20\text{dB}@150\text{MHz}$, occorre, considerando il grafico in Figura 1, che alla frequenza normalizzata:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{150}{60} = 2.5$$

l'ordine del filtro N sia tale da ottenere un'attenuazione di almeno 20dB.

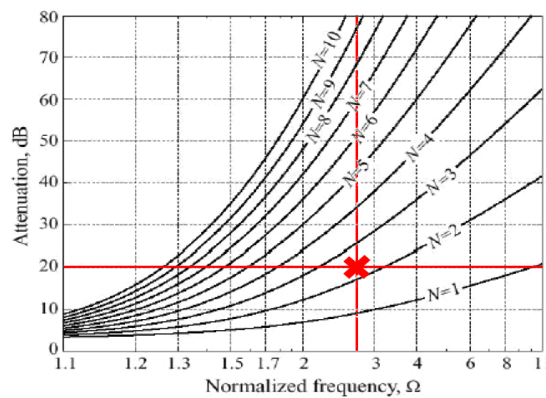


Figura 1: Attenuazione nei filtri Butterworth

La curva appena superiore all'intersezione è quella data da $N=3$; se si sceglie la realizzazione tramite rete a π (che permette di minimizzare il numero di induttori) il circuito prototipo sarà del tipo in Figura 2:

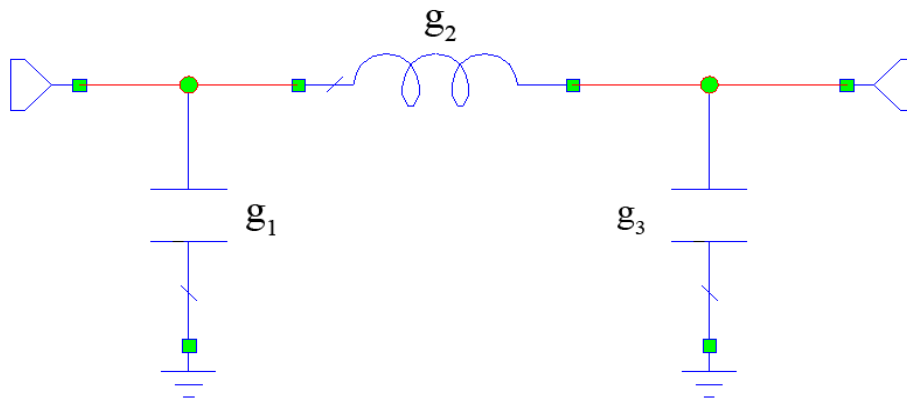


Figura 2: Filtro prototipo

Dove $g_1=1, g_2=2, g_3=1$ (valori ricavati dalle tabelle per $N=3$). Volendo ottenere la relativa risposta allo scopo di un controllo preliminare, occorre ricavare i valori di L, C applicando le

opportune denormalizzazioni rispetto all'impedenza caratteristica (50Ω) e alla frequenza di cut-off $\omega_c = 2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \text{ Hz}$, ottenendo:

$$C_1 = \frac{g_1}{\omega_c \cdot R_0} = 53.05 \text{ pF} \quad L = \frac{g_2 \cdot R_0}{\omega_c} = 265.26 \text{ nH} \quad C_2 = \frac{g_3}{\omega_c \cdot R_0} = 53.05 \text{ pF}$$

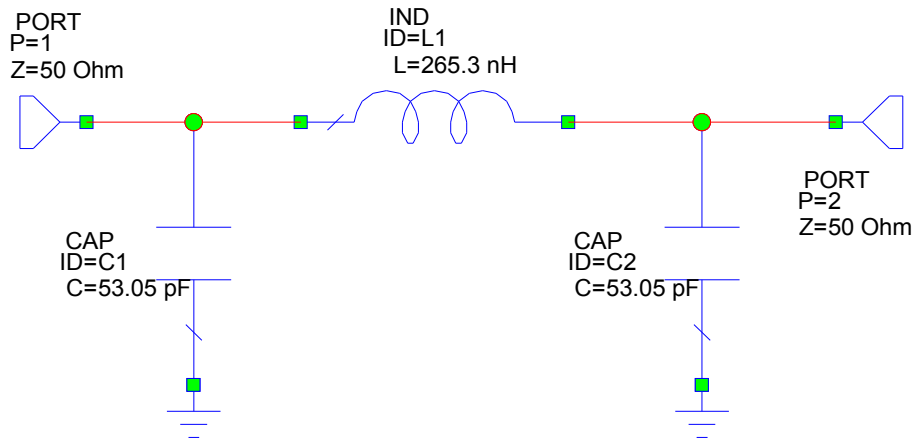


Figura 3: Circuito passa-basso equivalente

Il filtro in Figura 3 presenta la curva di risposta riportata in Figura 4; i requisiti di attenuazione alle frequenze 60MHz, 150MHz sono correttamente rispettati.

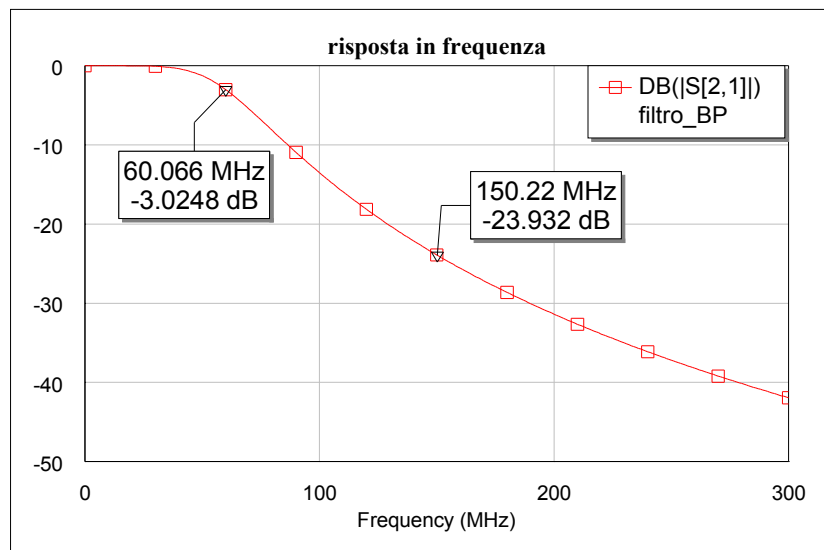


Figura 4: Risposta del filtro passa-basso equivalente

Per costruire il filtro passa-banda occorre traslare rigidamente la risposta in frequenza del passa-basso equivalente della quantità $f_0=2.45\text{GHz}$ (centro banda). Per questo, partendo dal filtro prototipo (Figura 2), si sostituiscono le singole induttanze e capacità con circuiti risonanti come indicato in Figura 5:



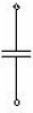
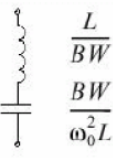
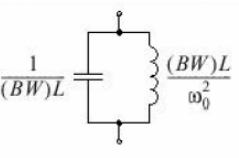



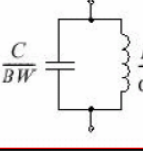
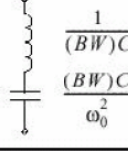
Low-pass prototype	Low-pass	High-pass	Bandpass	Bandstop
 $L = g_k$	 $\frac{L}{\omega_c}$	 $\frac{1}{\omega_c L}$	 $\frac{L}{BW}$ $\frac{BW}{\omega_0^2 L}$	 $\frac{1}{(BW)L}$ $\frac{(BW)L}{\omega_0^2}$
 $C = g_k$	 $\frac{C}{\omega_c}$	 $\frac{1}{\omega_c C}$	 $\frac{C}{BW}$ $\frac{BW}{\omega_0^2 C}$	 $\frac{1}{(BW)C}$ $\frac{(BW)C}{\omega_0^2}$

Figura 5: Trasformazioni LP-BP

dove ω_0 è la pulsazione di centro banda e BW la banda passante. Occorre quindi denormalizzare rispetto all'impedenza caratteristica, moltiplicando tutte le impedenze per R_0 . Il circuito che si ottiene è riportato in Figura 6:

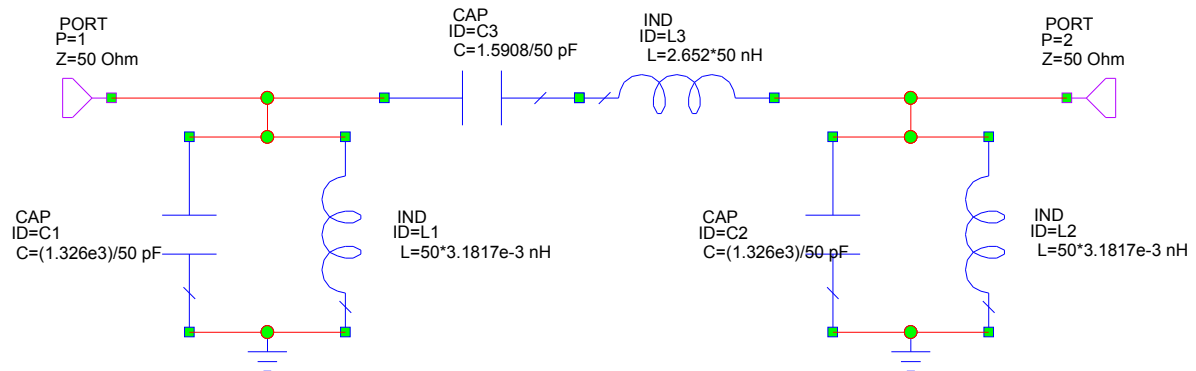


Figura 6: Circuito BP a costanti concentrate

Ad esso corrisponde la risposta in frequenza riportata in Figura 7:

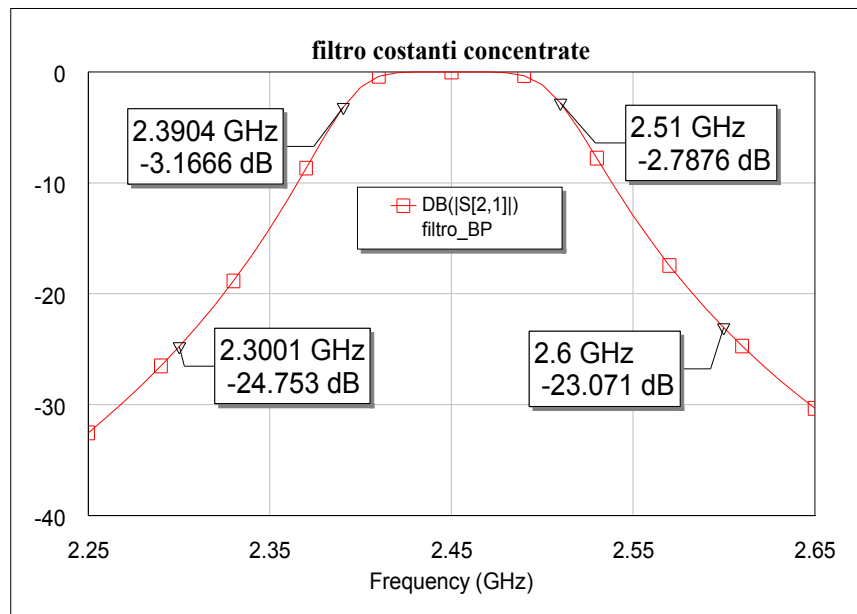


Figura 7: Risposta del filtro BP a costanti concentrate

I valori di attenuazione richiesta sono rispettati; eventuali variazioni sono dovute alle approssimazioni commesse nei calcoli.

3. Progettazione del filtro a linee accoppiate

Una volta realizzato il filtro a costanti concentrate si è provveduto a progettare la struttura fisica vera e propria. Inizialmente si sono utilizzate linee di trasmissione accoppiate ideali (modello CLIN di MWOoffice), secondo lo schema riportato in Figura 8:

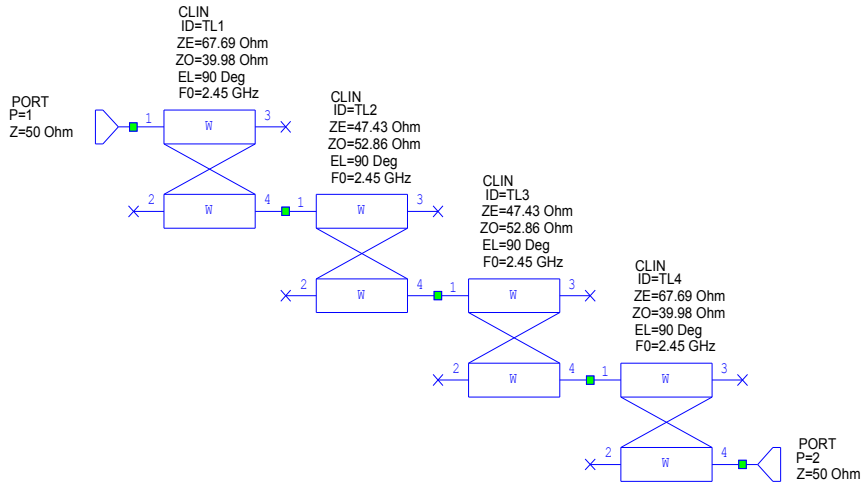


Figura 8: Filtro passa-banda con linee ideali accoppiate

Il numero di linee accoppiate necessarie è legato all'ordine del filtro secondo la relazione

$$N_{acc} = \text{ordine del filtro} + 1.$$

È innanzitutto necessario calcolare le impedenze di modo pari e modo dispari dei vari tratti accoppiati; esse inoltre verranno in seguito utilizzate per sintetizzare le dimensioni W e S delle linee reali. Per ottenere i valori delle impedenze si devono prima ricavare dei parametri numerici utilizzando le seguenti formule:

$$j_{0,1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi BW}{2g_0 g_1}} \quad j_{i,i+1} = \frac{1}{Z_0} \frac{\pi BW}{2\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad j_{N,N+1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi BW}{2g_N g_{N+1}}}$$

dove g_i sono i coefficienti di Butterworth e BW è la banda passante a -3 dB *normalizzata rispetto alla frequenza di centro banda*.

I parametri $j_{0,1}$ e $j_{3,4}$ sono relativi alle linee che collegano il filtro alle linee di ingresso e di uscita, mentre $j_{1,2}$ e $j_{2,3}$ sono relativi alle linee accoppiate che costituiscono il filtro vero e proprio. Le formule per ricavare i valori delle resistenze sono le seguenti:

$$Z_{0e(i,i+1)} = Z_0 \cdot [1 + Z_0 \cdot j_{i,i+1} + (Z_0 \cdot j_{i,i+1})^2]$$

$$Z_{0o(i,i+1)} = Z_0 \cdot [1 - Z_0 \cdot j_{i,i+1} + (Z_0 \cdot j_{i,i+1})^2]$$

con Z_0 impedenza caratteristica delle linee di ingresso/uscita (50 Ω)

I valori calcolati dei vari parametri j e delle relative impedenze sono riportati in Tabella 1:

$j_{0,1}$	0,005542	$Z_{0,o(0,1)}$	39,98 Ω	$Z_{0,e(0,1)}$	67,69 Ω
$j_{1,2}$	0,001086	$Z_{0,o(1,2)}$	47,43 Ω	$Z_{0,e(1,2)}$	52,86 Ω
$j_{2,3}$	0,001086	$Z_{0,o(2,3)}$	47,43 Ω	$Z_{0,e(2,3)}$	52,86 Ω
$j_{3,4}$	0,005542	$Z_{0,o(3,4)}$	39,98 Ω	$Z_{0,e(3,4)}$	67,69 Ω

Tabella 1: Parametri j e relative impedenze di modo pari e dispari

I valori dovrebbero essere utilizzati per sintetizzare i parametri fisici S e W , ma il *tool* TxLine incluso in MWOOffice non prevede la modalità di sintesi per le microstrip accoppiate e si è dovuto procedere per tentativi. In alternativa, è possibile utilizzare opportuni grafici che mettono in relazione i valori delle impedenze di modo pari e dispari con le grandezze S/d e W/b , dove b rappresenta lo spessore del substrato.

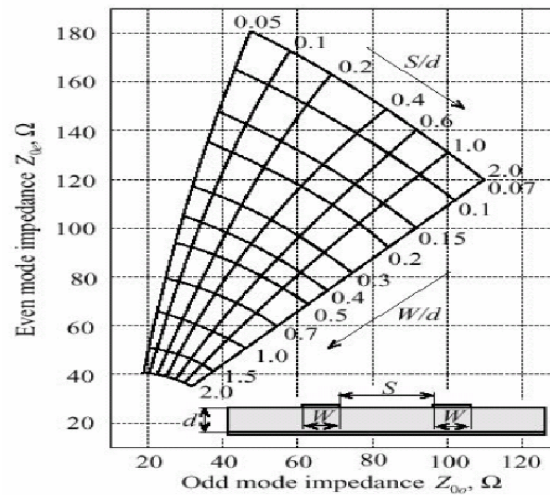


Figura 9: $Z_{e,o}$ in funzione delle caratteristiche fisiche

Lo schema del filtro a *microstrip* accoppiate (fisicamente realizzabile) è riportato in Figura 10:

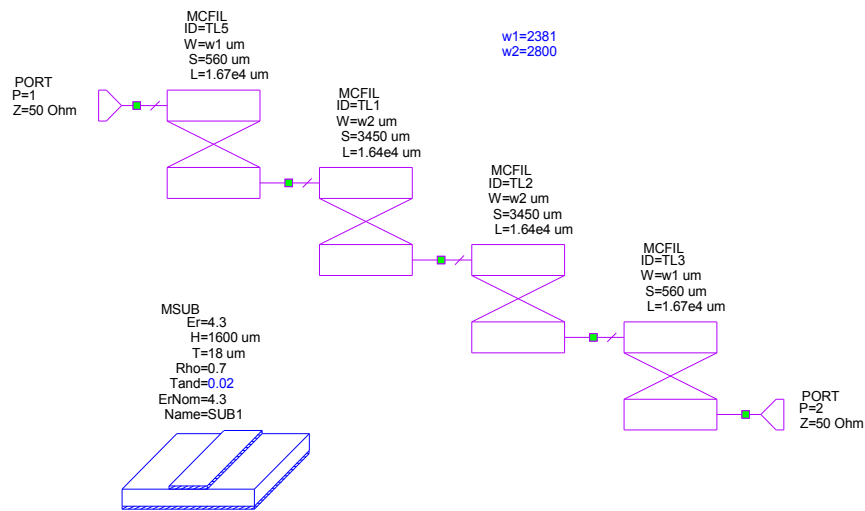


Figura 10: Filtro passa-banda a microstrip accoppiate

Le curve di risposta dei due filtri a linee accoppiate sono riportate in Figura 11 e Figura 12:

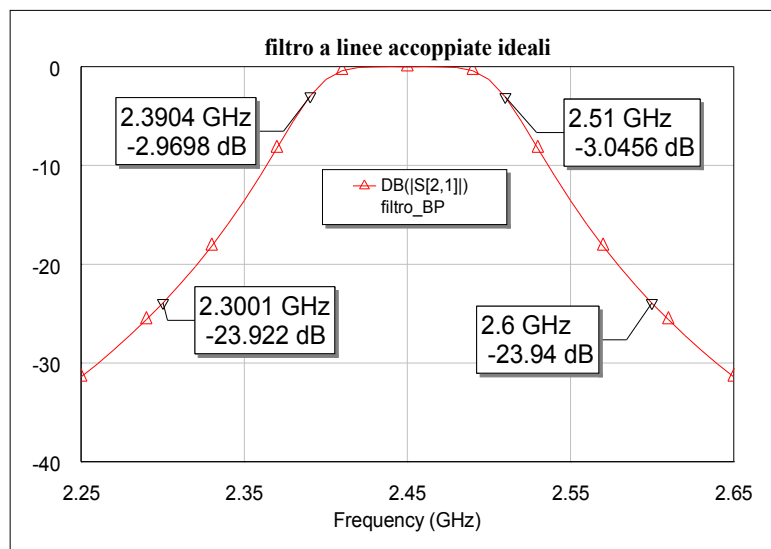


Figura 11: Risposta del filtro a linee ideali accoppiate

Il filtro ideale ha, ovviamente, una risposta sostanzialmente identica al filtro a costanti concentrate. Il filtro a microstrip accoppiate invece, complice la perdite della struttura reale, è caratterizzato da una maggiore attenuazione in banda passante e da una minore attenuazione fuori banda. Le specifiche sono comunque rispettate.

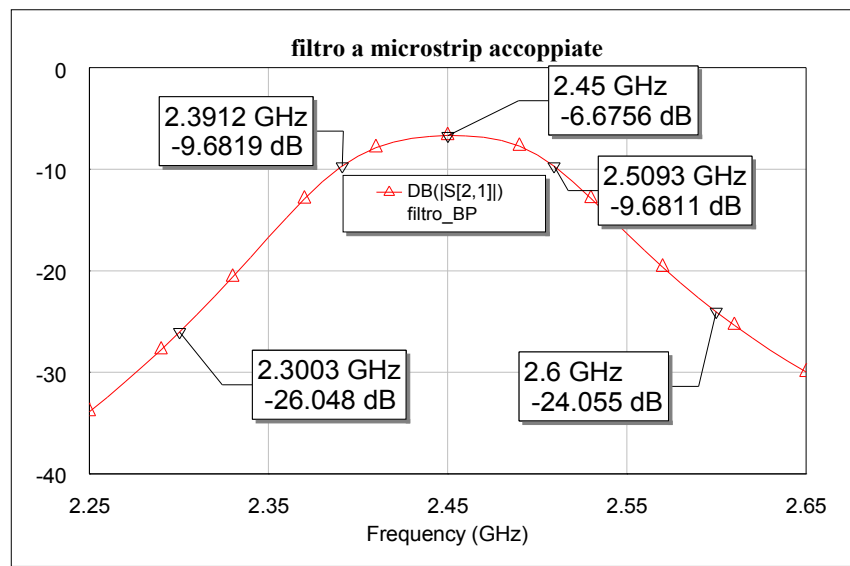


Figura 12: Risposta del filtro a microstrip accoppiate

4. Simulazione Elettromagnetica

Una volta realizzato il filtro in *microstrip*, è possibile visualizzarne il layout (v. Figura 13) ed effettuarne la simulazione elettromagnetica.

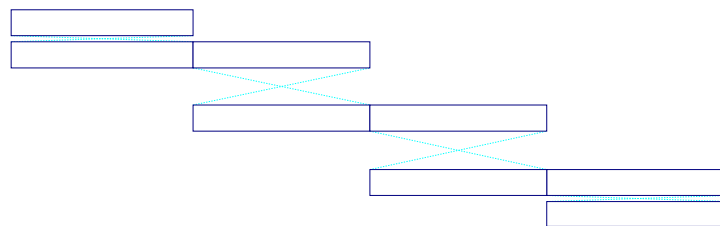


Figura 13: Layout filtro in microstrip

Per fare questo occorre prima definire le caratteristiche del box di simulazione, cioè della “scatola” ai cui bordi sono definite le condizioni al contorno necessarie ai calcoli (realizzati attraverso il metodo dei momenti). Il sistema è composto di due strati (dielettrico ed aria); le condizioni al contorno sono, in basso, di conduttore perfetto (*ground plane*), ed in alto di spazio libero (377Ohm). Le dimensioni del box sono tali da racchiudere agevolmente il layout; le divisioni di calcolo sono tali che la griglia non sia troppo fitta (0.5mm x 0.5 mm), visto che la simulazione

risulta onerosa per il calcolatore. L'altezza dello strato superiore deve essere molto maggiore di quella del dielettrico (1.6mm), in modo da approssimare la condizione di spazio libero: abbiamo semplicemente scelto l'ordine di grandezza superiore (16mm).

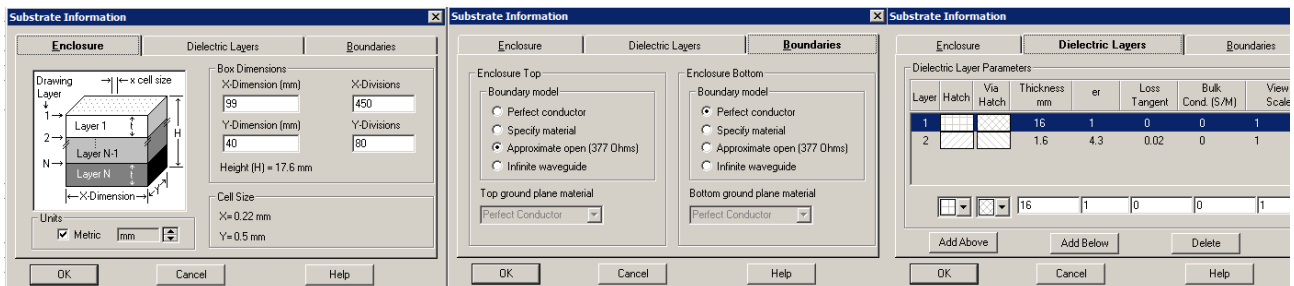


Figura 14: Definizione del box

Trasportiamo quindi il layout nello strato opportuno (quello sottostante), aggiungendo due tratti di linea a 500Ohm che ne connettono le estremità al confine del box come in Figura 15. La larghezza di tali tratti è stata calcolata attraverso il tool TXLine, ed è pari a 3.189mm.

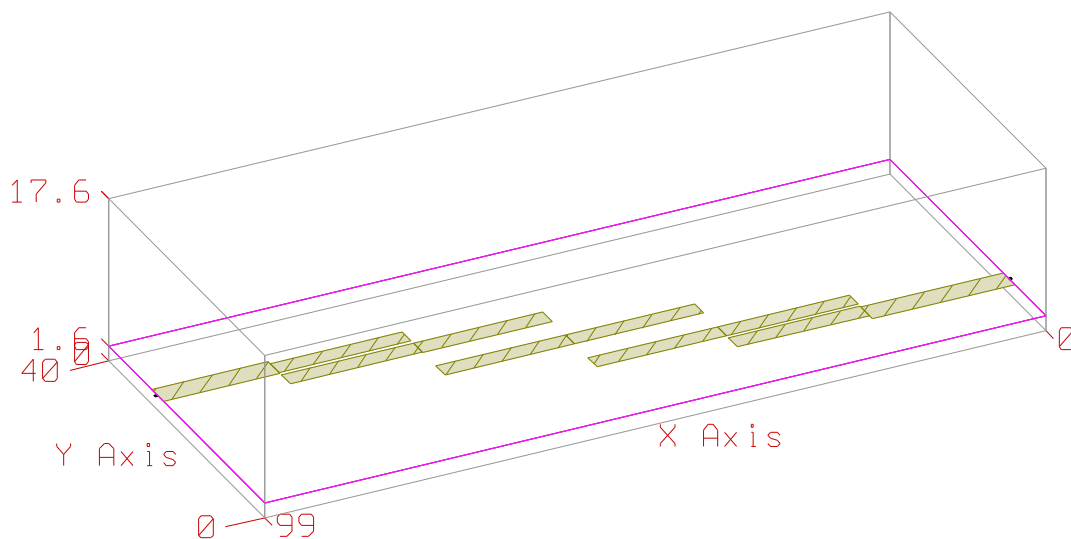


Figura 15: Box di simulazione con filtro e porte, vista 3D

Occorre quindi specificare un range di frequenze (2.44Ghz ; 2.46Ghz) entro le quali effettuare la simulazione, ottenendo l'andamento delle correnti visualizzato in Figura 16:

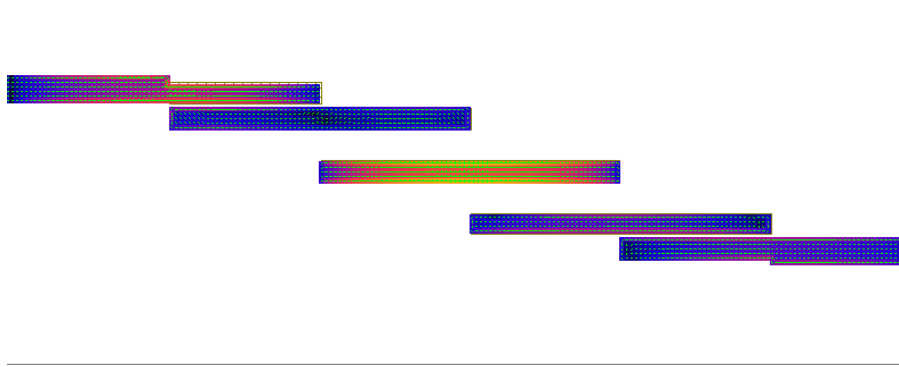


Figura 16: Andamento delle correnti nel filtro

Come si può facilmente osservare, tra i vari tratti di linea si verifica l'accoppiamento, e l'onda entrante nella porta a sinistra raggiunge la porta a destra a meno di una certa attenuazione ed un certo sfasamento. Effettuando anche la simulazione dei campi elettrici, si può notare un certo comportamento radiativo, soprattutto in corrispondenza degli estremi delle *strip*.

5. Conclusioni

L'esercitazione consiste nella progettazione di un filtro BP a *microstrip* accoppiate, nello studio della risposta in frequenza e nella verifica delle specifiche. Una volta note le dimensioni fisiche del circuito è stato inoltre possibile procedere alla simulazione del comportamento elettromagnetico, verificando l'andamento delle correnti, l'accoppiamento e la presenza di un comportamento radiativo indesiderato.

Il comportamento del filtro in *microstrip* è stato inoltre confrontato con quello di un filtro realizzato a costanti concentrate e, successivamente, con quello di un filtro realizzato con linee ideali, da cui è stato ricavato lo stesso modello in *microstrip*. Il confronto ha evidenziato una maggiore attenuazione per quest'ultimo (circa 6dB), dovuta essenzialmente alle perdite introdotte dal substrato. Abbassando la tangente di perdita si è infatti riscontrato un sostanziale miglioramento della risposta, che tende a quella del circuito ideale.