



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE, INFORMATICA E STATISTICA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**Progetto di un filtro LPF a ripple costante realizzato con elementi
concentrati e su microstriscia**

Studenti

Elisabetta Cristofori

Alessia Fierravanti

Pierpaolo Granello

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

Sommario

Introduzione3

1. Filtro a ripple costante ad elementi concentrati4

2. Filtro passa basso a step in microstriscia8

Introduzione

In questa relazione illustriamo i passi relativi alla progettazione di un filtro alla Chebyshev (a ripple costante). Il filtro ha le seguenti caratteristiche

- Frequenza di taglio $f_c = 9 \text{ GHz}$
- Attenuazione a f_c pari ad $A_c = 3 \text{ dB}$
- Attenuazione a 12 GHz pari a 20 dB

Tale filtro è progettato in due tecnologie differenti: abbiamo realizzato un filtro ad elementi concentrati e un filtro su microstriscia. Il CAD utilizzato per implementare i modelli circuitali calcolati per via teorica è il software Microwave Office.

Le fasi di progetto relative al filtro ad elementi concentrati sono illustrate nel capitolo 1: si presenta il modello di riferimento, ottenuto dal metodo del passa basso prototipo di riferimento (PBPR). Una volta ottenuto il modello, si specificano le fasi di implementazione su software. In fine, viene verificato che il modello implementato rispetti la specifica, andando a visualizzare il parametro di Scattering S_{21} del circuito che mostra la banda del filtro implementato.

Nel capitolo 2 sono illustrate le fasi di progetto relative al filtro realizzato in microstriscia: abbiamo realizzato un filtro a step. La presentazione del nuovo progetto ricalca quella effettuata nel capitolo 1 per il filtro ad elementi concentrati: si specifica il modello teorico che poi viene implementato nel software, si verifica l'effettiva validità del progetto valutando il parametro Scattering S_{21} e confrontandolo con quello ottenuto dal filtro ad elementi concentrati. Alla fine del capitolo si mostra anche il layout del filtro ottenuto sempre attraverso il CAD.

1. Filtro a ripple costante ad elementi concentrati

I filtri a step sono dei filtri che, pur non avendo una risposta in banda estremamente piatta, come i filtri binomiali, hanno una maggiore attenuazione fuori banda. Le tipologie di filtri sono individuate analizzando la funzione che individua la Power Loss Ratio P_{LR} . Per tutti i filtri vale che:

$$P_{LR} = 1 + \frac{M(\omega^2)}{N(\omega^2)}$$

Alle funzioni M ed N possono essere assegnati diversi andamenti in funzione della frequenza. Questi andamenti individuano la famiglia del filtro. Nel metodo PBPR inizialmente si considerano M ed N funzioni di una pulsazione normalizzata ω' (adimensionale).

Per i filtri alla Chebyshev, si sceglie:

$$N(\omega'^2) = 1 \quad \text{e} \quad M(\omega'^2) = k^2 T_N^2(\omega'^2)$$

Dove T_N sono i polinomi di Chebyshev di grado N:

$$T_N(\omega'^2) = \cos[N \cos^{-1}(\omega')] \quad \text{per } \omega' < 1$$

$$T_N(\omega'^2) = \cosh[N \cosh^{-1}(\omega')] \quad \text{per } \omega' \geq 1$$

I polinomi di Chebyshev godono delle seguenti proprietà: $T_N = 0$ per N dispari, $T_N = 1$ per N pari, con $\omega' = 0$, T_N oscilla tra ± 1 per $\omega' < 1$, altrimenti cresce monotonamente per $\omega' > 1$.

La risposta in frequenza del PBPR può essere ottenuta con dei circuiti elettrici a costanti concentrate realizzati con delle induttanze e delle capacità. Di seguito si riporta il circuito costituito da una cascata di induttanze e capacità in numero pari all'ordine del filtro. In particolare, si può subito notare che, poiché il circuito deve avere un comportamento tipo passa basso, si hanno sempre induttanze in serie e capacità in parallelo. La rete di figura 1, i cui componenti sono quantità normalizzate adimensionali, inizia con una capacità in parallelo. Numerando in maniera progressiva da sinistra verso destra gli elementi con un indice k, la rete presenta capacità per k dispari e induttanze per k pari, e finisce in due modi diversi (capacità o induttanza) a seconda del valore di N.

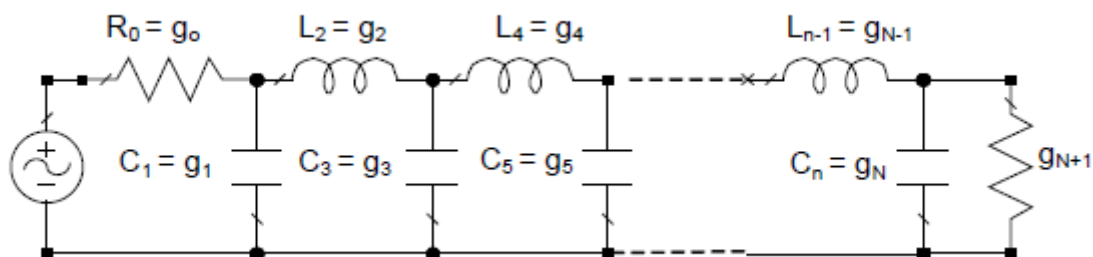


Figura 1. Schema circuitale del modello PBPR

Le specifiche per il dimensionamento di un filtro PBPR prevedono, l'assegnazione di una certa attenuazione fuori banda, nel in esame avremo un'attenuazione a 12 GHz pari a 20 dB, e l'attenuazione al cut-off del filtro che dovrà essere pari a $A_c = 3 \text{ dB}$.

Le funzioni che sono state considerate per la risposta del filtro PBPR sono normalizzate in termini di frequenza. Dal PBPR si passa al passa basso con pulsazione di cut-off ω_c tramite la trasformazione:

$$\omega' = \frac{\omega}{\omega_c} = 1.33$$

Dove ω_c è la pulsazione relativa alla f_c , dunque alla frequenza di cut-off (9 GHz). Mentre ω è la frequenza fuori banda a cui viene assegnato il valore di attenuazione pari a 20 dB (12 GHz).

Partendo da questo presupposto, per trovare il circuito equivalente che rispetta le suddette specifiche utilizziamo un grafico e una tabella. Con il grafico riportato in figura 2, troviamo il numero dei componenti che costituiscono il circuito voluto. In figura sono mostrate varie curve che individuano l'andamento dell'attenuazione fuori banda in funzione della frequenza normalizzata ridotta di un'unità, ovvero in funzione di $\omega' - 1$. Tale grafico è relativo ad una attenuazione al cut-off pari a $A_c = 3 \text{ dB}$, inoltre ciascuna curva è relativa ad un circuito individuato dal numero N dei componenti. Di conseguenza, dall'analisi della figura, nel nostro caso risulta:

$$N = 5$$

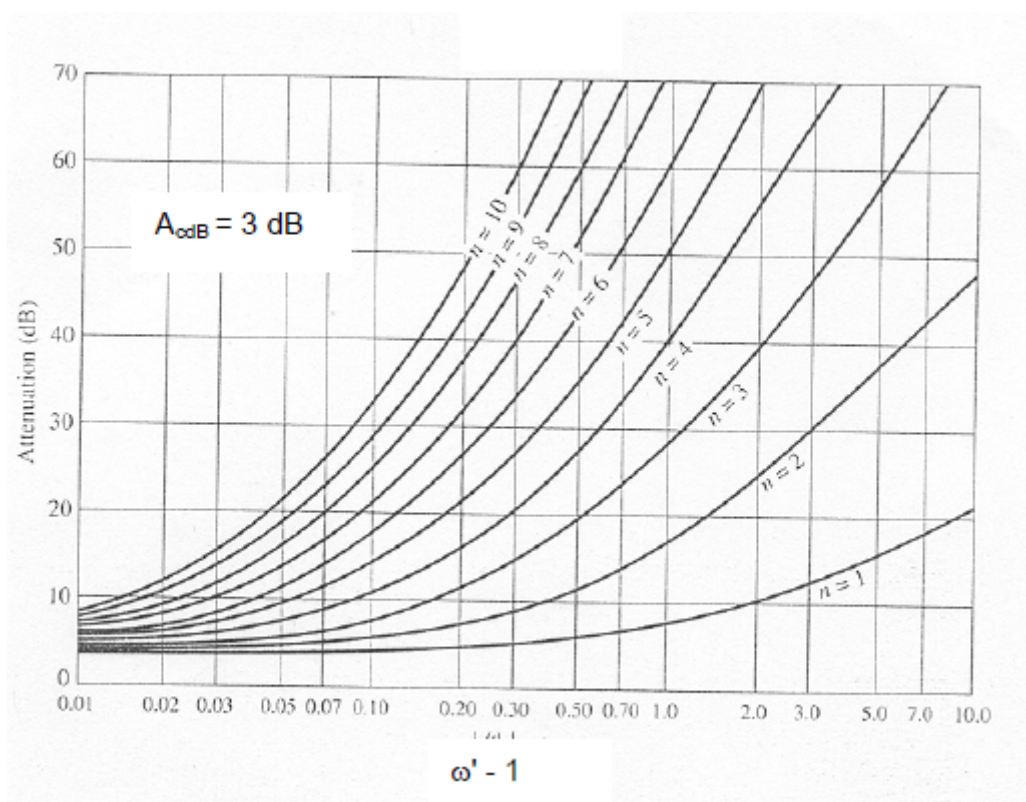


Figura 2. Grafico per il calcolo del numero degli elementi che costituiscono il PBPR

Tabella 1. Valori dei parametri adimensionali

N	3.0 dB Ripple									
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	1.9953	1.0000								
2	3.1013	0.5339	5.8095							
3	3.3487	0.7117	3.3487	1.0000						
4	3.4389	0.7483	4.3471	0.5920	5.8095					
5	3.4817	0.7618	4.5381	0.7618	3.4817	1.0000				
6	3.5045	0.7685	4.6061	0.7929	4.4641	0.6033	5.8095			
7	3.5182	0.7723	4.6386	0.8039	4.6386	0.7723	3.5182	1.0000		
8	3.5277	0.7745	4.6575	0.8089	4.6990	0.8018	4.4990	0.6073	5.8095	
9	3.5340	0.7760	4.6692	0.8118	4.7272	0.8118	4.6692	0.7760	3.5340	1.0000
10	3.5384	0.7771	4.6768	0.8136	4.7425	0.8164	4.7260	0.8051	4.5142	0.6091

Dall'analisi della tabella 1 ricaviamo i valori dei parametri adimensionali, dai quali si ottengono i valori dei 5 elementi reattivi che andranno a costituire il circuito. Riportiamo in seguito i valori di induttanze e capacità, ottenuti dalla denormalizzazione dei parametri g_n rispetto la frequenza di cut-off pari a 9 GHz e alla resistenza di riferimento $R_0 = 50 \Omega$:

- $C_1 = \frac{g_1}{R_0 \omega} = 1.2314 \text{ pF}$
- $L_2 = \frac{g_2 R_0}{\omega} = 0.6736 \text{ nH}$
- $C_3 = \frac{g_3}{R_0 \omega} = 1.6050 \text{ pF}$
- $L_4 = L_2$
- $C_5 = C_1$

Utilizzando tali valori per gli elementi reattivi, si implementa in Microwave Office il seguente circuito.

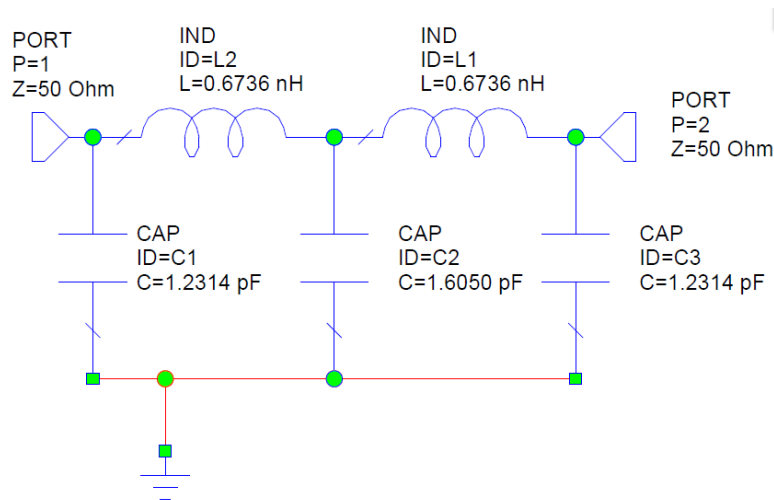


Figura 3. Circuito del filtro passa-basso a ripple costante realizzato con elementi concentrati

A questo punto, possiamo graficare la risposta in frequenza del filtro. Con l'utilizzo del software abbiamo visualizzato l'andamento del parametro S_{21} in dB per valori della frequenza tra circa 0 e 20 GHz a step di 0.01 GHz (figura 4). Con i marker verifichiamo che il valore dell'attenuazione ottenuta a 9 GHz e a 12 GHz sia quella richiesta dalle specifiche. Notiamo che il valore dell'attenuazione alla frequenza di cut-off risulta essere proprio di 3 dB. Mentre a 12 GHz risulta essere maggiore del valore dettato da specifica. Per il setup di questo grafico abbiamo utilizzato la finestra di comando mostrata in figura 5.

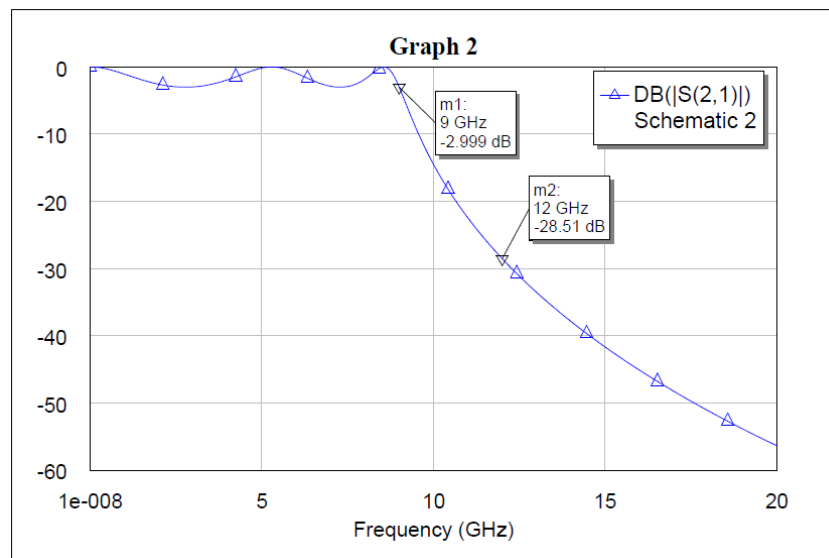


Figura 4. Andamento del parametro S_{21}

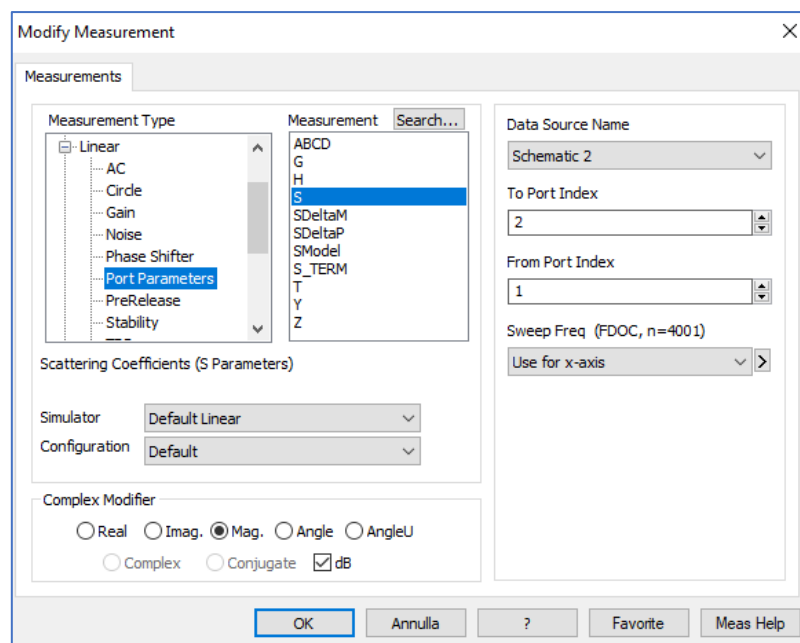


Figura 5. Menù di comando per la visualizzazione della risposta del filtro

2. Filtro passa basso a step in microstriscia

Procediamo ora alla progettazione del filtro a step d'impedenza mediante elementi distribuiti su microstriscia. Il principio su cui si basa questa tecnica è quello di utilizzare tratti di linea corti, cioè $l \ll \lambda/10$, che se è chiusa su di un carico con impedenza in modulo molto maggiore di quella caratteristica della linea ($|Z_L| \gg Z_0$) si comporta come una capacità in parallelo al carico e di valore $C = Y_0 l / c$.

Analogamente una linea corta chiusa su di un carico con impedenza in modulo molto minore di quella caratteristica della linea ($|Z_L| \ll Z_0$) si comporta come una induttanza in serie al carico e di valore $L = Z_0 l / c$.

Partendo da queste considerazioni, imponiamo che la linea ad alta impedenza abbia impedenza caratteristica $Z_A = 75 \Omega$ e che la linea a bassa impedenza abbia impedenza $Z_B = 15 \Omega$.

Una volta stabilite le impedenze caratteristiche, per il calcolo delle geometrie delle linee (la lunghezza L e lo spessore W) bisogna calcolare la lunghezza elettrica θ relativa ad ogni elemento del filtro. A partire dai parametri g_K del PBPR ricavati precedentemente otteniamo:

$$\text{Capacità: } \beta l_1 = \theta_1 = g_1 \frac{Z_B}{R_0} = 1.046 \text{ rad} = 59.846^\circ$$

$$\text{Induttanza: } \beta l_2 = \theta_2 = g_2 \frac{R_0}{Z_A} = 0.508 \text{ rad} = 29.099^\circ$$

$$\text{Capacità: } \beta l_3 = \theta_3 = g_3 \frac{Z_B}{R_0} = 1.361 \text{ rad} = 78.004^\circ$$

$$\text{Induttanza: } \beta l_4 = \theta_4 = g_4 \frac{R_0}{Z_A} = \theta_2$$

$$\text{Capacità: } \beta l_5 = \theta_5 = g_5 \frac{Z_B}{R_0} = \theta_3$$

Infine, definiamo le proprietà dei materiali del substrato e delle linee:

- Costante dielettrica relativa del substrato: $E_R = 3.38$
- Altezza del substrato: $H = 300 \mu m$
- Spessore della linea: $T = 35 \mu m$
- Resistività normalizzata rispetto all'oro del metallo: $R_{Au} = 0.7$
- Tangente di perdita: $Tand = 0.0027$
- Costante dielettrica relativa nominale del substrato: $E_R Norm = 3.38$

Definite tali proprietà, dobbiamo trovare la lunghezza e lo spessore delle linee affinché presentino l'impedenza caratteristica necessaria. Per far ciò, utilizziamo il tool 'TxLINE' interno al software Microwave Office che ci permette di calcolare la geometria di ciascuna linea a partire dalla frequenza di cut-off del filtro che stiamo progettando, dalle caratteristiche dei materiali e dalla lunghezza elettrica della linea presa in considerazione. Otteniamo, quindi, i valori di lunghezze e spessore riportati in tabella 2 relativi a ciascun elemento:

Tabella 2. Lunghezza e spessore di ciascuna linea

Elemento concentrato	Lunghezza L [mm]	Spessore W [mm]
C_1	3.16496	3.39496
L_2	1.71633	0.304251
C_3	4.12525	W_1
L_4	L_2	W_2
C_5	L_1	W_1

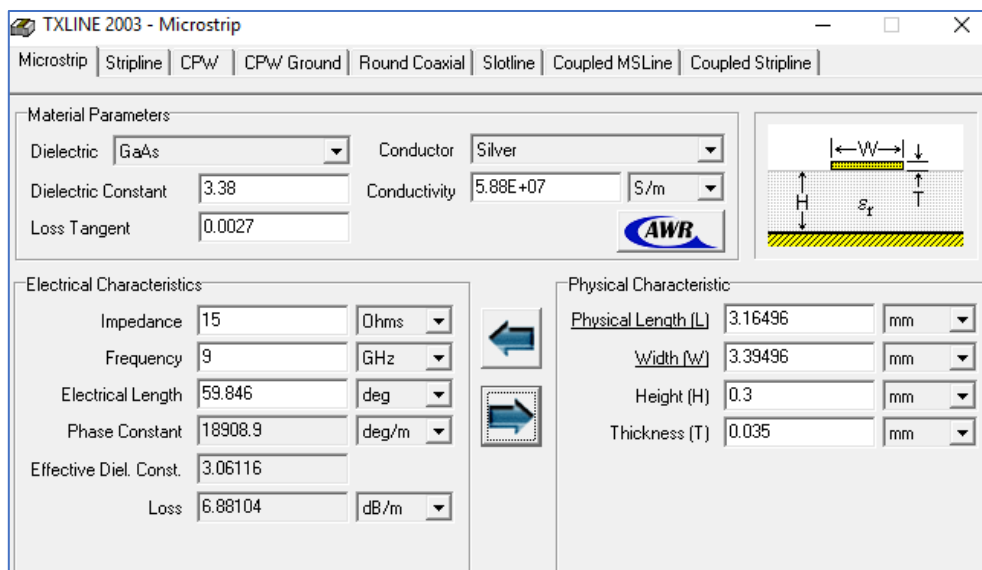


Figura 6. Tool 'TXLINE' di AWR

Inserendo tali valori riportati in tabella otteniamo il seguente schema circuitale di un filtro a step realizzato su microstriscia. Si noti che le lunghezze e le larghezze delle linee sono definite attraverso variabili, che in seguito ci permetteranno di effettuare l'operazione di ottimizzazione mantenendo le linee simmetriche fra loro.

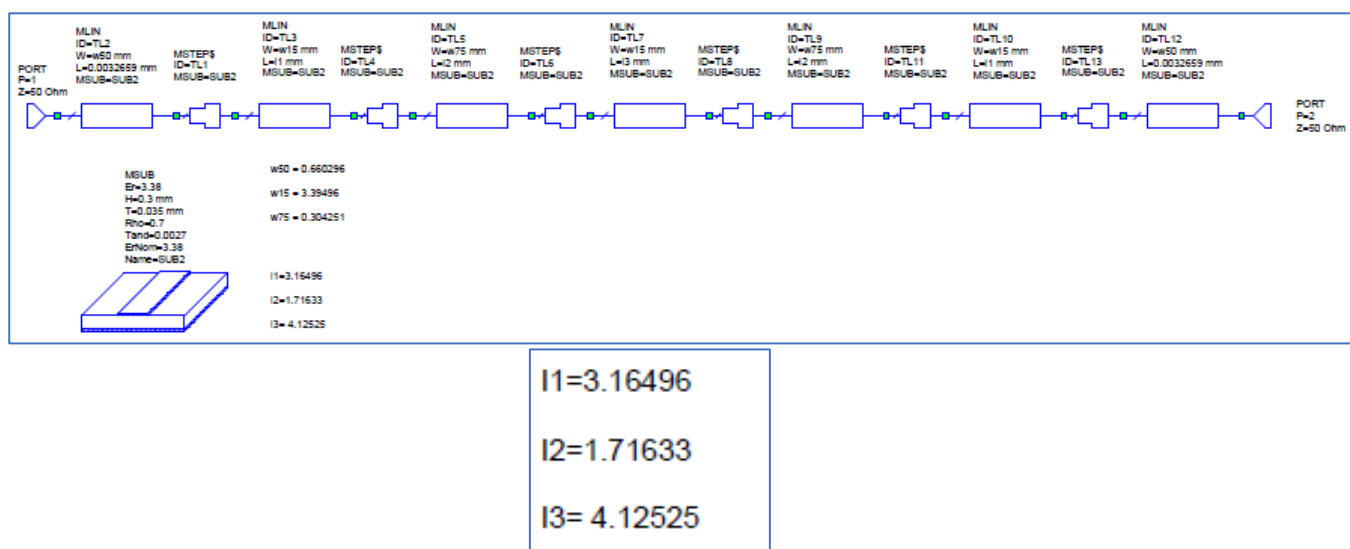


Figura 7. Filtro realizzato su microstriscia.

Quindi visualizziamo la sua risposta (figura 8), come fatto precedentemente per il filtro realizzato con elementi concentrati. Possiamo notare che la specifica sull'attenuazione alla frequenza di cut-off non viene rispettata: infatti a 9 GHz l'attenuazione risulta maggiore.

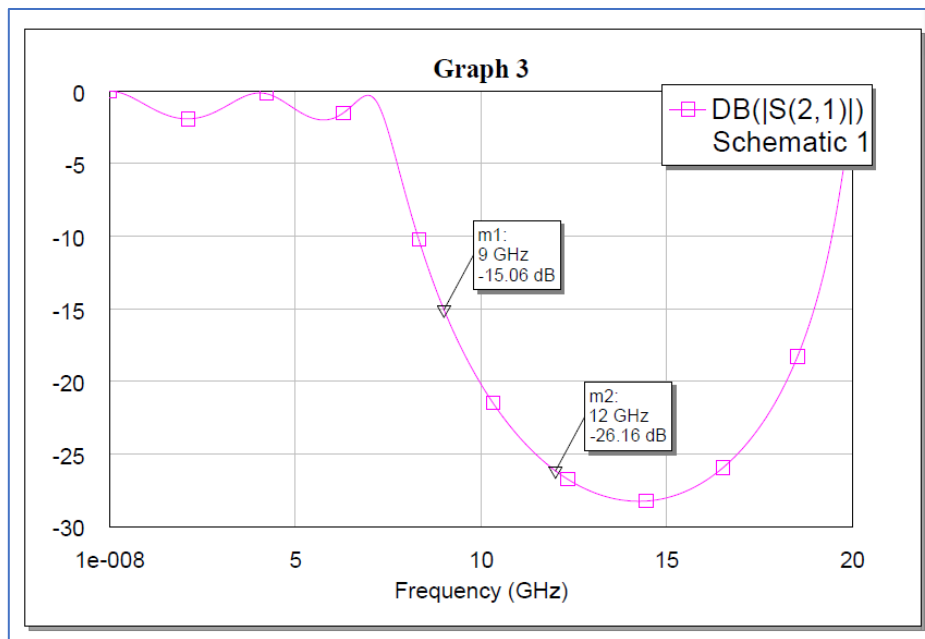


Figura 8. Risposta del filtro non ottimizzato

Per migliorare il comportamento del filtro, si utilizza il tool di ottimizzazione: utilizziamo il menù di comando mostrato in figura per impostare come goals dell'ottimizzazione le specifiche sui valori di attenuazione al cut off e a 12 GHz. L'ottimizzazione è stata effettuata solamente sui parametri con i quali abbiamo espresso la lunghezza delle linee.

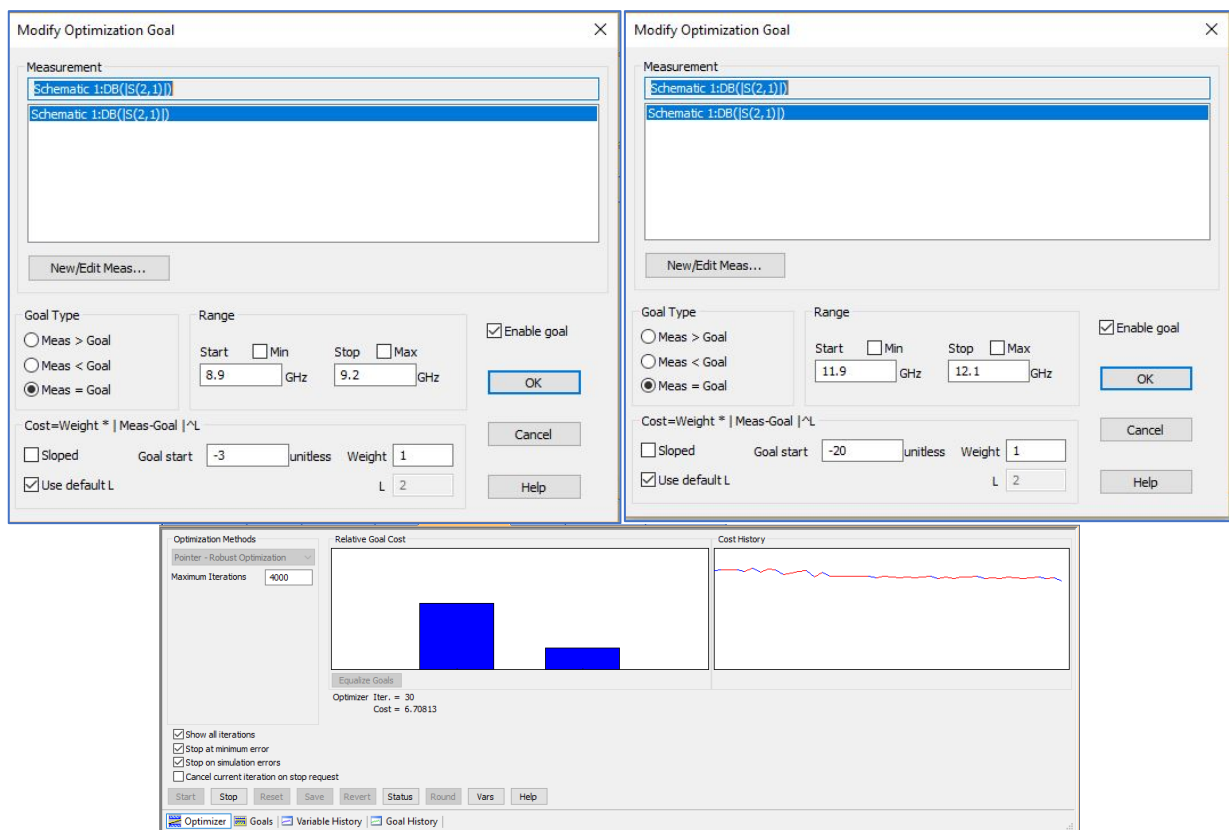


Figura 9. Tool di ottimizzazione di AWR

Edit Equation

Variable Name: = Variable Value:

Variable Type

☒ Variable definition
☐ Parameter definition
☐ Display value

Parameter Definition

Description:

☐ Does not affect layout

Unit Type: Data Type:

Tuning/Optimization

☐ Tune ☒ Optimize ☐ Constrain

Lower bound: Upper bound:

Step Size:

Statistics

☐ Use statistics ☐ Optimize yield ☐ In percent

Distribution Type:

Std. Dev.: N/A:

Pass Down Mode

☒ None ☐ Weak ☐ Strong

OK **Cancel** **Help**

Figura 10. Menù di comando per impostare l'ottimizzazione sul parametro l_1

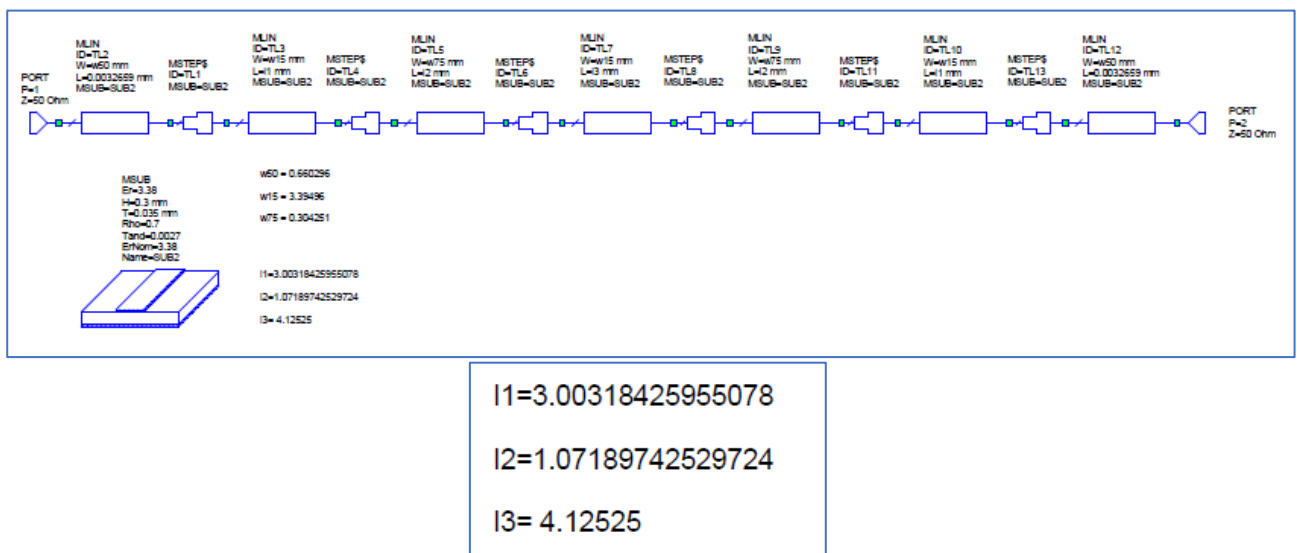


Figura 11. Filtro realizzato su microstriscia ottimizzato

Dopo l'ottimizzazione otteniamo il circuito mostrato in figura 11. Per verificare la validità dell'operazione di ottimizzazione visualizziamo l'andamento del parametro S_{21} : l'ottimizzazione permette il rispetto delle specifiche.

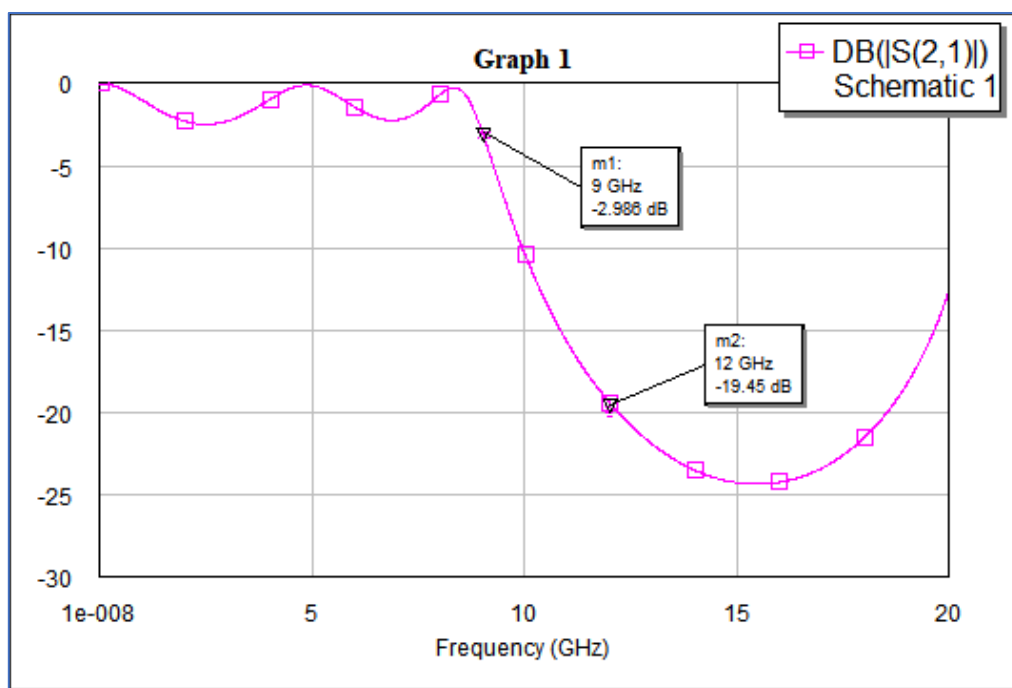


Figura 12. Risposta del filtro ottimizzato

In ultima analisi abbiamo visualizzato il layout del circuito ottimizzato.

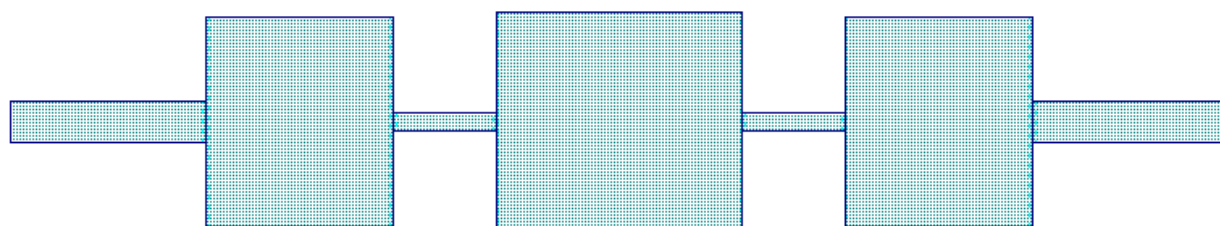


Figura 13. Layout