

RF elektronika

Projekat 2: Projektovati **Chebyshev** filter trećeg reda, za graničnu frekvenciju od $f_C = 4$ GHz, za završne otpornosti $R_G = R_L = 50 \Omega$.

1. Projektovati **Chebyshev** filter NF filter trećeg reda ($N=3$, $ripple^* = 0.5$ dB), za graničnu frekvenciju od $f_C = 4$ GHz, završne otpornosti $R_G = R_L = 50 \Omega$, kod koga je **prvi element kalem**.
2. Na osnovu NF prototipa projektovati filter propustnik opsega filter trećeg reda ($N=3$, $ripple = 0.5$ dB) za centralnu frekvenciju $f_0 = 4$ GHz i širinu propustnog opsega čije su donja i gornja granična frekvencije $f_L = 3.7$ GHz i $f_U = 4.4$ GHz.
3. Realizovati NF filter pod 1) sa transmisionim linijama u mikrostrip tehnologiji. Koristiti *Richardson*-ovu transformaciju i *Kuroda* identitet.
4. Odrediti potrebne dimenzije mikrostrip vodova na štampanoj ploči za NF filter pod 1). Koristiti standardni FR4 materijal.

Napomene: $ripple^*$ – varijacija amplitude filtra u propustnom opsegu (daje se **opciono**: važi za filter *Chebyshev*-ljevog tipa)

Podaci za standardni FR4 materijal za izradu štampanih ploča (Ei-PCB, Niš):

- debljina dielektrika $h = 1.6$ mm
- relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 4$
- debljina bakarne folije voda je $35 \mu\text{m}$.

1.

Potražiti tabelu sa vrednostima elemenata za niskofrekventni prototip (za graničnu frekvenciju $\omega_C = 1$ rad/s, odnosno $f_C = 1/2\pi = 0.159$ Hz) filtra **Chebyshev** tipa (**opciono**: sa varijacijom amplitude filtra u propustnom opsegu od 0.5 dB).

Iz tabele prepisati vrstu $N=3$, koja odgovara filteru trećeg reda. Vrednosti elemenata filtra koje važe za završne otpornosti $g_4 = 1 \Omega$ su:

| N | g_1 | g_2 | g_3 | g_4 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 3 | 1.5963 | 1.0967 | 1.5963 | 1.0000 |

Za realizaciju NF filtra se koristi lestvičasta *LC* mreža kod koje su u rednim granama kalemovi a u odvodnim granama kondenzatori. U tekstu zadatka je određeno da prvi element bude kalem, tako da je prva grana redna. Elementi su:

$$L_1 = g_1 = 1.5963 \text{ H}, \quad C_2 = g_2 = 1.0967 \text{ F}, \quad L_3 = g_3 = 1.5963 \text{ H}.$$

Konverzija vrednosti elemenata prototipa u vrednosti koje važe za graničnu frekvenciju $f_C = 4$ GHz se vrši tako što se vrednosti elemenata podele sa graničnom kružnom frekvencijom $\omega_C = 2\pi f_C$, tj.

$$L' = \frac{L}{\omega_C}, \quad C' = \frac{C}{\omega_C}$$

odnosno

$$L'_1 = \frac{L_1}{\omega_C} = 0.064 \text{ nH}, \quad C'_2 = \frac{C_2}{\omega_C} = 43.636 \text{ pF}, \quad L'_3 = \frac{L_3}{\omega_C} = 0.064 \text{ nH}.$$

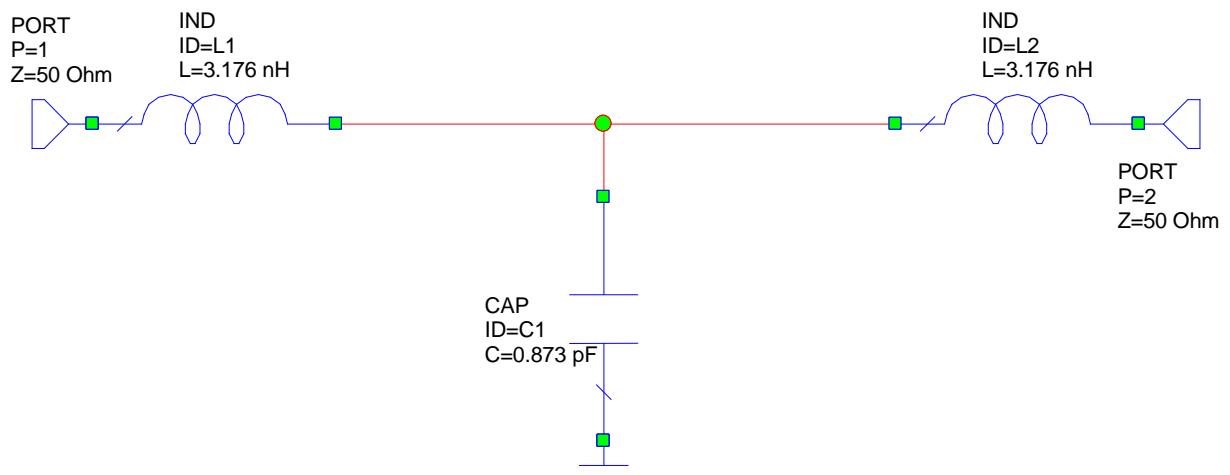
Ovako dobijeni elementi filtra važe za završne otpornosti od $g_4 = 1 \Omega$. Potrebno je izvršiti još jednu konverziju oblika

$$L'' = L' \cdot R_G, \quad C''' = \frac{C'}{R_G}$$

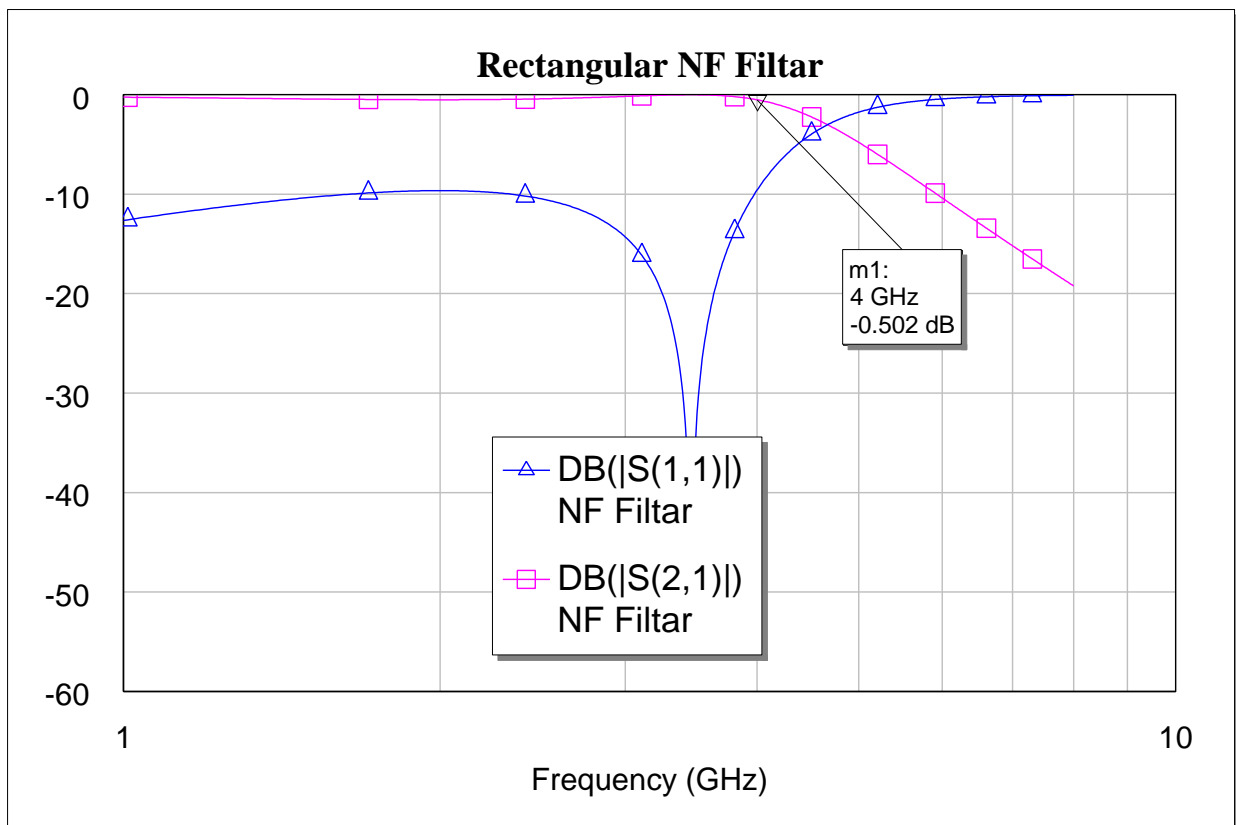
kojom se povećava impedansa elementa tako da je filter podešen za završne otpornosti $R_G = R_L = 50 \Omega$. Dobija se

$$L''_1 = L'_1 \cdot R_G = 3.176 \text{ nH}, \quad C''_2 = \frac{C'_2}{R_G} = 0.873 \text{ pF}, \quad L''_3 = L'_3 \cdot R_G = 3.176 \text{ nH}$$

Ove vrednosti su dodeljeni elementima u jednostavnoj šema NF filtra trećeg reda, sa slike 1(a). Kada se izvrši simulacija u frekvencijskom domenu linearnog kola dobija se frekvencijski odziv kao na slici 1(b). Frekvencijski odziv je dat preko ekvivalentnih S parametara (prenosna karakteristika S_{21} i refleksija na ulazu filtra S_{11}) u decibelima. Šema je uneta i izvršena je simulacija u programu *AWR Microwave Office*. Ova vrsta rezultata se može dobiti u kao linearna RF HSpice, Spectra ili APLAC simulacija.



(a)



(b)

Slika 1. (a) šema NF filtra, (b) frekvencijski odziv NF filtra

2.

Za realizaciju filtra propustnika opsega (PO) se koristi lestvičasta mreža kod koje su u rednim granama redna oscilatorna kola a u odvodnim granama paralelna oscilatorna kola. U zadatku je izabrano da prvi element bude redni, tako da je prva grana redno oscilatorno kolo.

Potrebno je odrediti centralnu frekvenciju $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2.51\text{e}+10$ rad/s, donju $\omega_L = 2\pi f_L = 2.33\text{e}+10$ rad/s i gornju $\omega_U = 2\pi f_U = 2.765\text{e}+10$ rad/s graničnu frekvenciju filtra propustnika opsega.

Elementi se određuju tako što se:

- u rednim granama NF prototipa kalem L zamenjuje rednim oscilatornim kolom koga čine

$$\text{kalem } L_s = \frac{L}{\omega_U - \omega_L} \text{ i kondenzator } C_s = \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0^2 L}, \text{ a}$$

- u odvodnim granama se kondenzator C zamenjuje paralelnim oscilatornim kolom koga čine

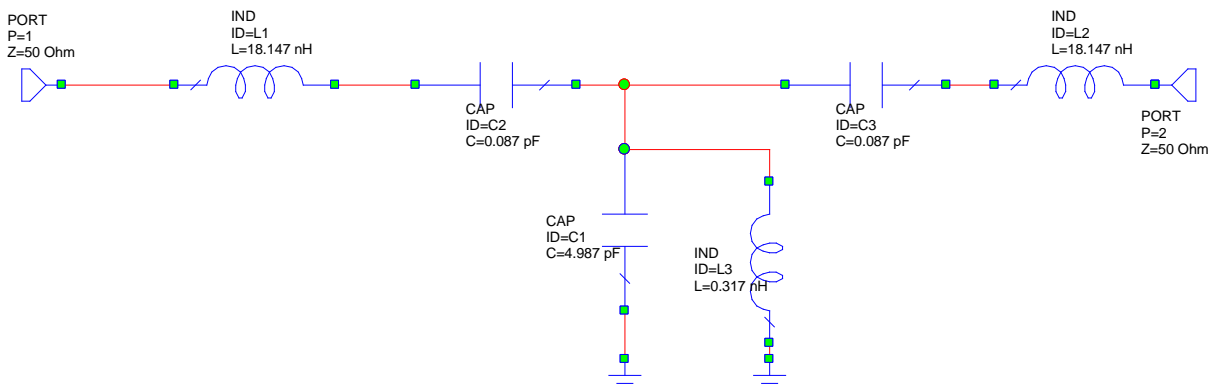
$$\text{kalem } L_p = \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0^2 C} \text{ i kondenzator } C_p = \frac{C}{\omega_U - \omega_L}$$

U ovom primeru su dobijene vrednosti:

- za redna oscilatorna kola $L_{s1} = \frac{L_1}{\omega_U - \omega_L} = L_{s3} = 0.363$ nH i $C_{s1} = \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0^2 L_1} = C_{s3} = 4.362$ pF
- i za paralelno oscilatorno kolo $L_{p2} = \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0^2 C_2} = 0.006$ nH i $C_{p2} = \frac{C_2}{\omega_U - \omega_L} = 249.350$ pF

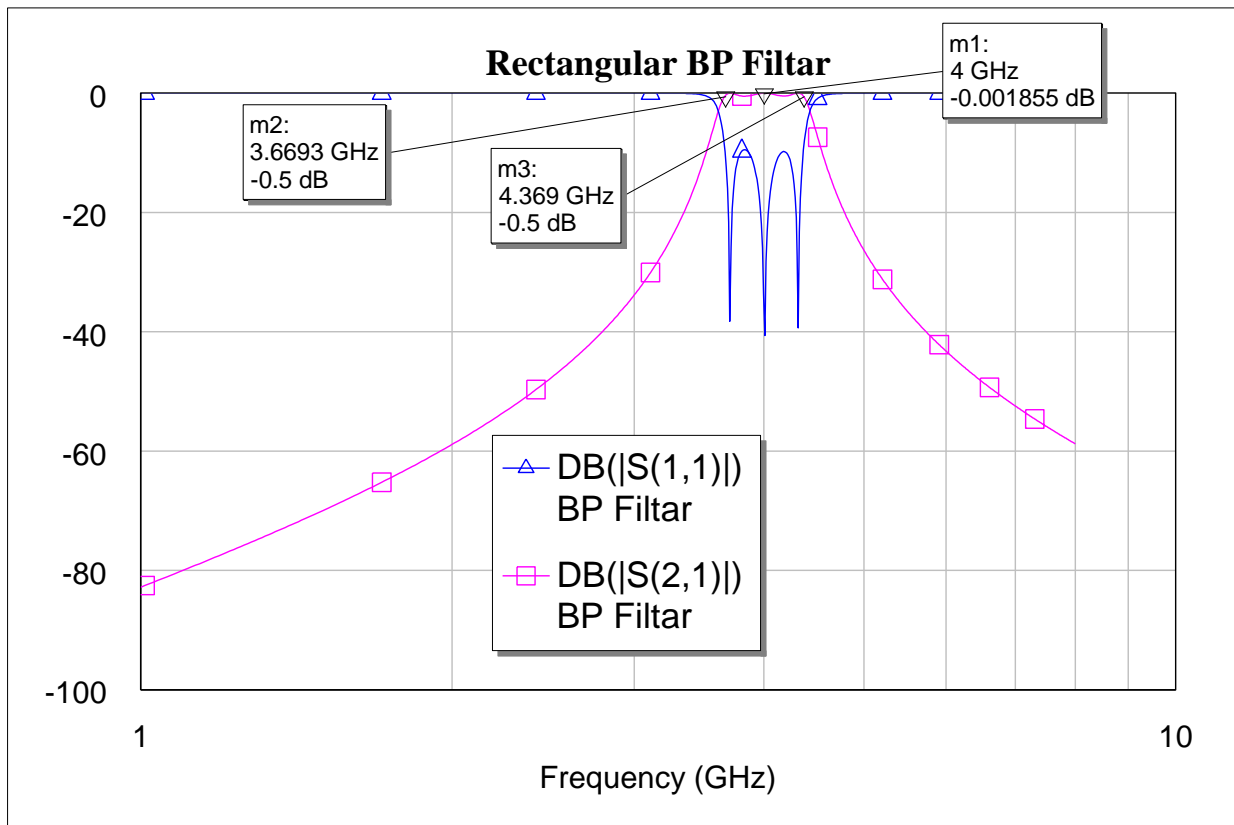
Potrebno je izvršiti još jednu konverziju vrednosti elementa da bi se prilagodili za završne otpornosti $R_G = R_L = 50 \Omega$. Postupak je isti kao i kod NF filtra, gde se sve impedanse elemenata povećavaju 50 puta, tj.

- u rednim granama važi $L'_{s1} = L'_{s3} = L_s \cdot R_G = 18.147$ nH i $C'_{s1} = C'_{s3} = \frac{C_s}{R_G} = 0.087$ pF, a
- u paralelnim granama važi $L'_{p2} = L_{p2} \cdot R_G = 0.317$ nH i $C'_{s2} = \frac{C_{s2}}{R_G} = 4.987$ pF



Slika 2. Šema filtra propustnika opsega trećeg reda

Posle izvršene simulacije filtra u frekvencijskom domenu dobija se frekvencijski odziv kao na slici 3. Odziv je dat preko ekvivalentnih S parametara četvoropola filtra (prenosna karakteristika S_{21} i refleksija na ulazu filtra S_{11}) u decibelima.



Slika 3. Frekvencijski odziv filtra propustnika opsega

3.

Richard-sova transformacija omogućava da se skoncentrisana induktivnost zameni kratko spojenim stubom karakteristične impedanse $Z_0 = L$, a kapacitivnost sa otvorenim stubom karakteristične impedanse $Z_0 = 1/C$.

$$jX_L = S \cdot Z_0 \quad \text{i} \quad jB_C = S \cdot Y_0, \quad \text{gde je} \quad S = j \tan \theta$$

Izbor $\lambda_0/8$ (tj. $\theta=45^\circ$) za ekvivalentnu električnu dužinu linije je uobičajan i naziva se „odgovarajućom dužinom linije“. Linija tako ima manje fizičke dimenzije i za slučaj niskopropusnog filtra na graničnoj frekvenciji $f=f_C$ se dobija

$$S = j \tan \theta = j \tan 45^\circ = j1.$$

Karakteristične impedanse voda čija je dužina $\lambda_0 / 8$ sa kojim se menja kalem je

$$z_{0L} = \frac{L}{\tan \theta}$$

a karakteristična impedansa voda kojim se menja kondenzator je

$$z_{0C} = \frac{\tan \theta}{C}.$$

Za filter iz zadatka pod 1) dobija se $z_{0L} = 1.596 \Omega$ i $z_{0C} = 0.912 \Omega$

Ove vrednosti treba denormalizovati uzimajući u obzir otpornost generatora R_G i potrošača R_L po formulama

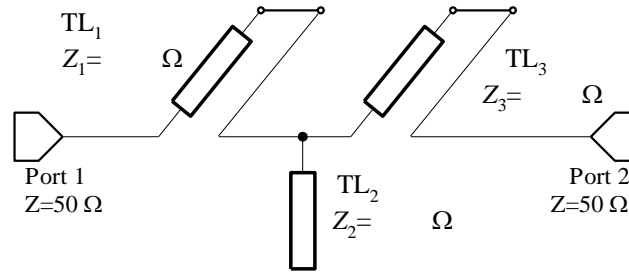
$$Z_{0L} = \frac{R_L \cdot L}{\tan \theta} \quad \text{i} \quad Z_{0C} = \frac{R_L \cdot \tan \theta}{C}.$$

Potrebne karakteristične impedanse vodova su

$$Z_{0L} = \frac{R_L \cdot L}{\tan \theta} = 79.815 \Omega \quad \text{i} \quad Z_{0C} = \frac{R_L \cdot \tan \theta}{C} = 45.591 \Omega.$$

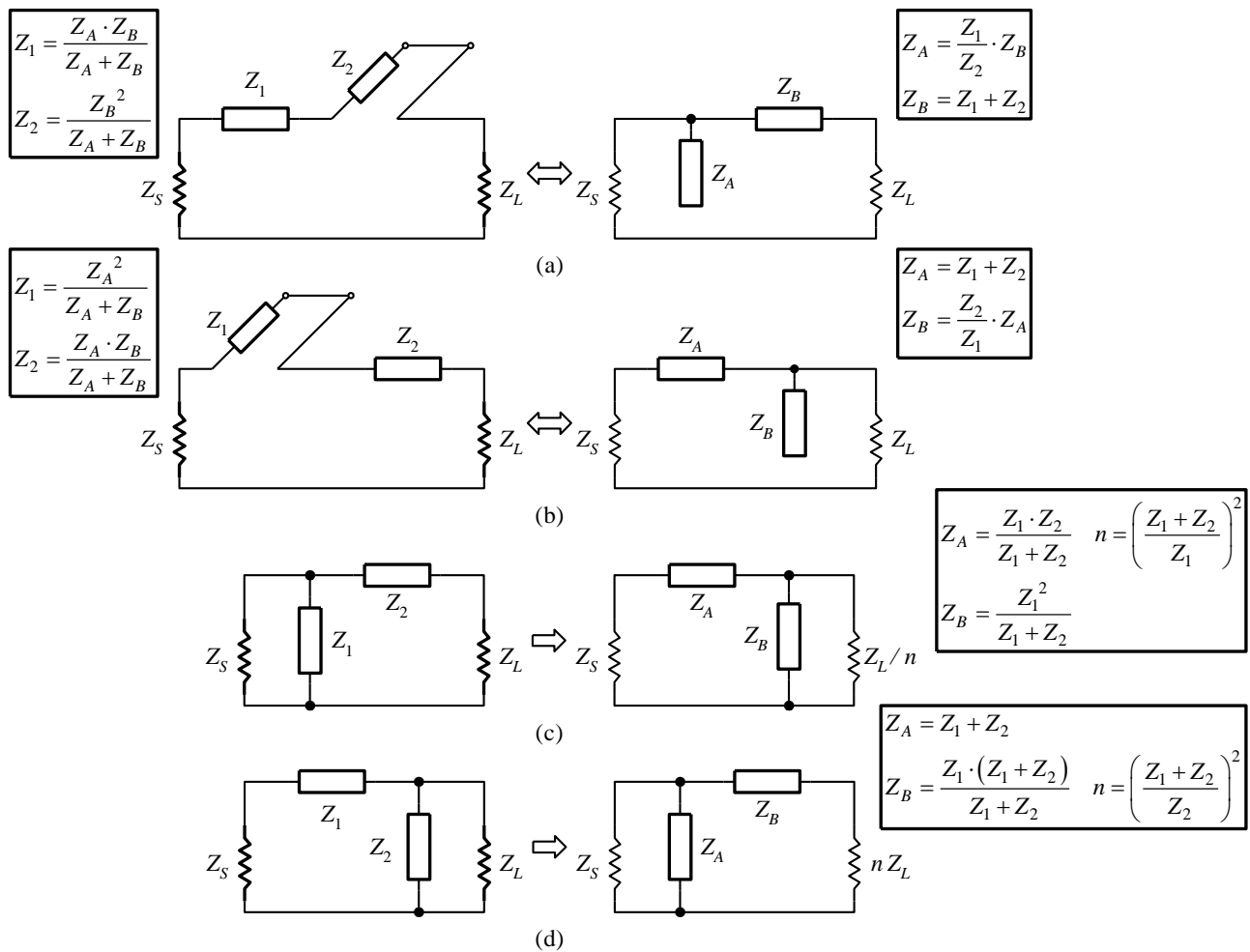
* * *

Realizacija NF filtra sa transmissionim linijama sada dobija oblik sa slike 4. Kondenzator C_2 je zamenjen sa transmissionom linijom TL_2 u obliku otvorenog stuba. Kalemi L_1 i L_3 se menjaju sa transmissionim linijama sa kratkospojenim završetkom. Sve linije imaju ekvivalentnu električnu dužinu $l = \lambda/8$ odnosno $\theta = 45^\circ$ na graničnoj frekvenciji $f_c = 4$ GHz.



Slika 4. NF filter realizovan sa transmissionim linijama

Najčešće je potrebno izvesti realizaciju u mikrostrip tehnologiji. Lako je realizovati otvoreni stub (TL_2) ali se javlja problem sa kratkospojenim vodovima (TL_1 i TL_3) koje nije moguće izvesti u mikrostrip tehnologiji. Da bi ovaj problem bio rešen početna šema sa kratkospojenim vodovima mora biti transformisana i po topologiji i po karakteristikama vodova. Postupak transformacije šeme filtra je zasnovan na *Kuroda* identiteta. Četiri osnovne transformacije su date na slici 5. Ideja je da se promeni topologija mreže a da se pri tome ne utiče na odziv filtra. Ovo treba da pomogne da se kratkospojene transmiseone linije zamene rednim i otvorenim stubovima koji se lako realizuju u mikrostrip tehnologiji.

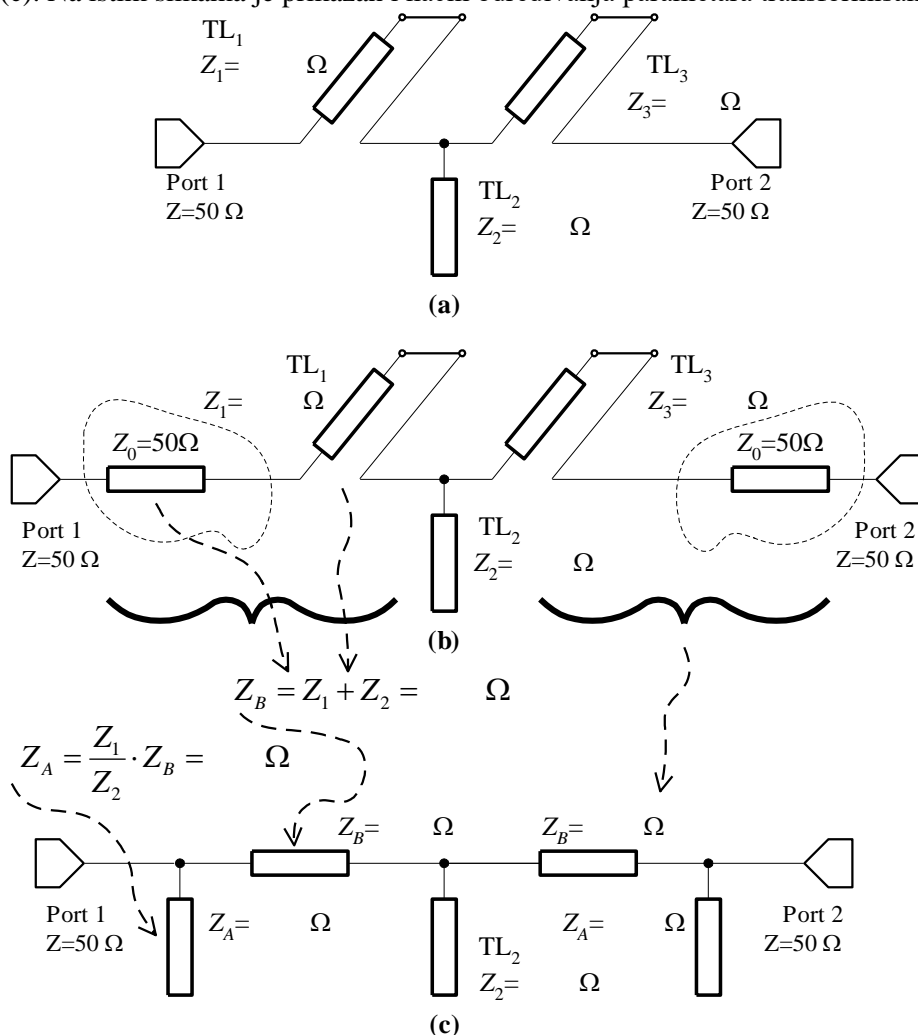


Slika 5. Kuroda identiteti

Da bi se primenila neka od četiri osnovna Kuroda identiteta, šema NF filtra sa slike 6(a) mora da se proširi transmissionom linijom ali tako da se njenim uvođenjem ne promeni prenosna karakteristika filtra. Transmisiona linija koja ispunjava ovaj uslov ima karakterističnu impedansu koja je ista kao i završne

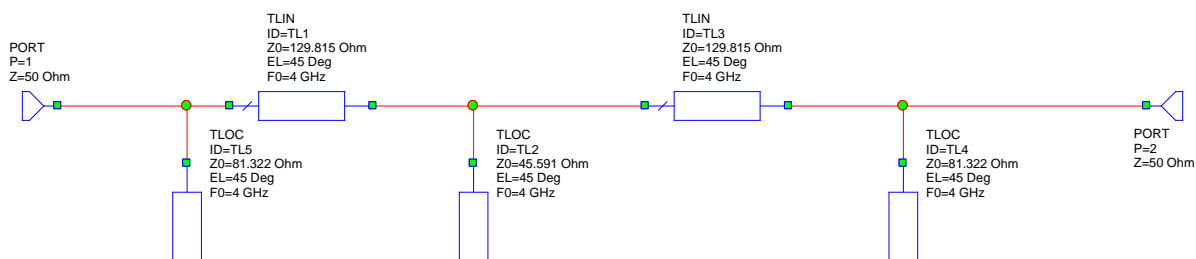
otpornosti na koju je projektovan filter, a to znači da se na oba kraja filtra može da doda vod karakteristične impedanse $Z_0=50\ \Omega$. Proširena šema filtra sa dva dodata voda je prikazana na slici 6(b).

Sada se na rednu vezu dodatih vodova i kratkospojenih vodova TL_1 i TL_3 primenjuje *Kuroda* identitet sa slike 5(a) sa leve i 5(b) sa desne strane. Ovaj postupak transformacije šeme NF filtra je grafički ilustrovan na slikama 6(b) i 6(c). Na istim slikama je prikazan i način određivanja parametara transformisanih vodova.

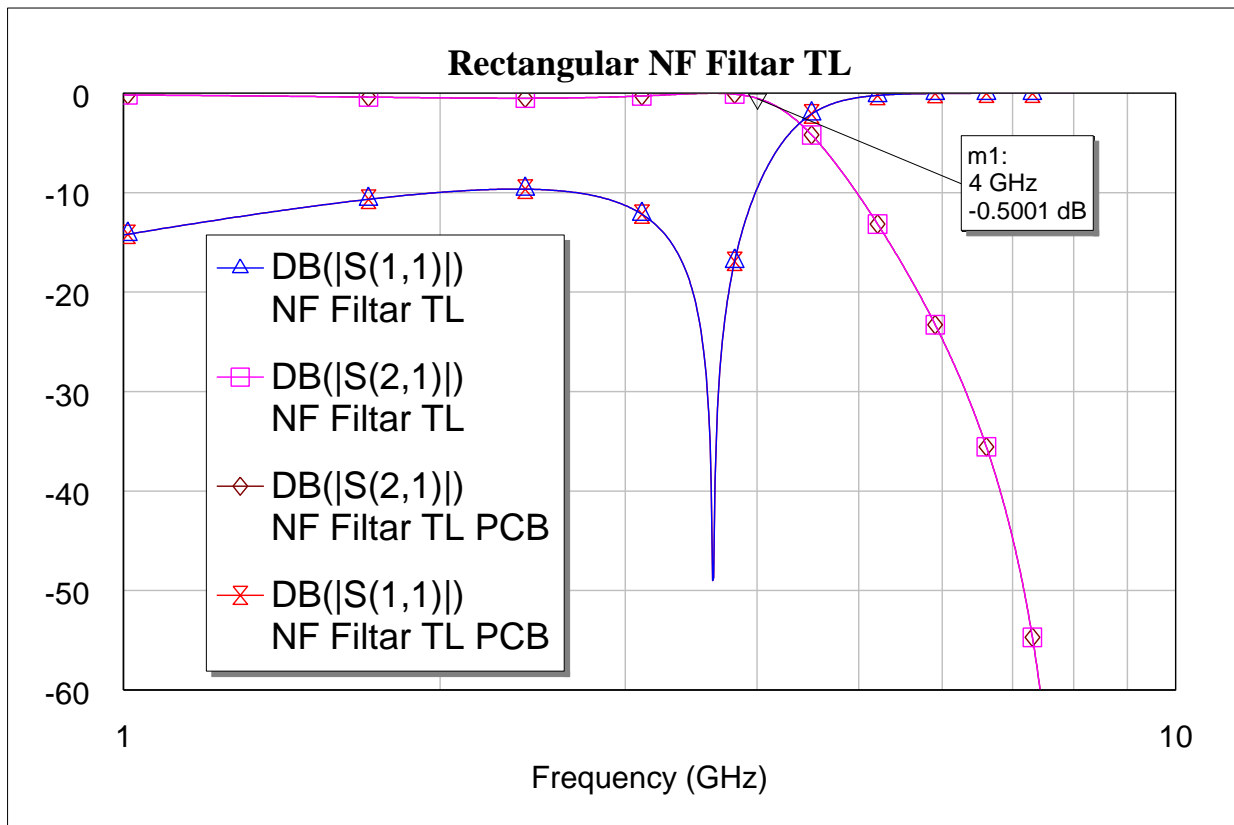


Slika 6. Šema NF filter i transformacije primenom *Kuroda* identiteta

Konačna šema uneta u *Microwave Office* je data na slici 7, dok je rezultat simulacije frekvencijskog odziva filtra prikazan na slici 8.



Slika 7. Konačna šema NF filter



Slika 8. Simulacija odziva NF filtar

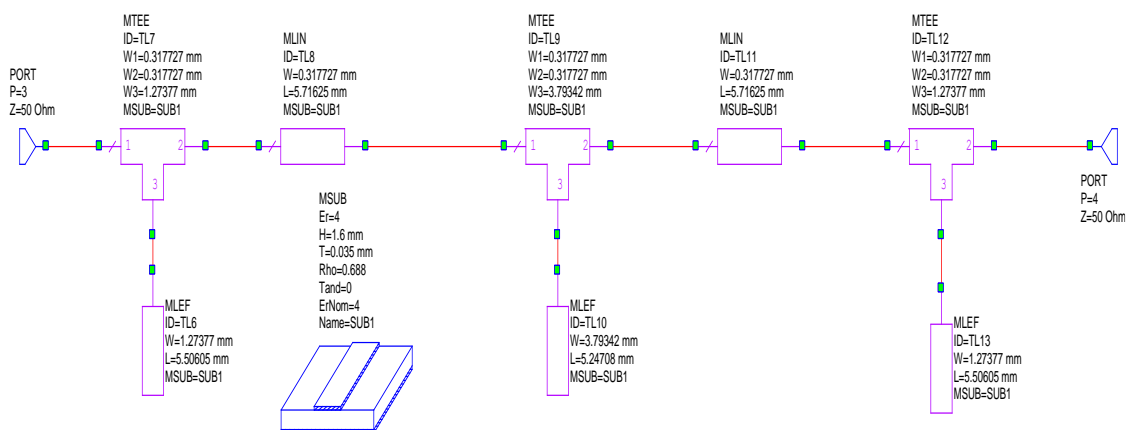
4.

Da bi se nacrtao *layout* pločice što predstavlja implementaciju ovog NF filtra moraju se prvo odrediti fizičke dimenzije vodova. One se određuje na osnovu osobina usvojenog materijala pločice (oznaka po industrijskom standardu je FR4), traženih karakterističnih impedansi i ekvivalentnih električnih dužina vodova.

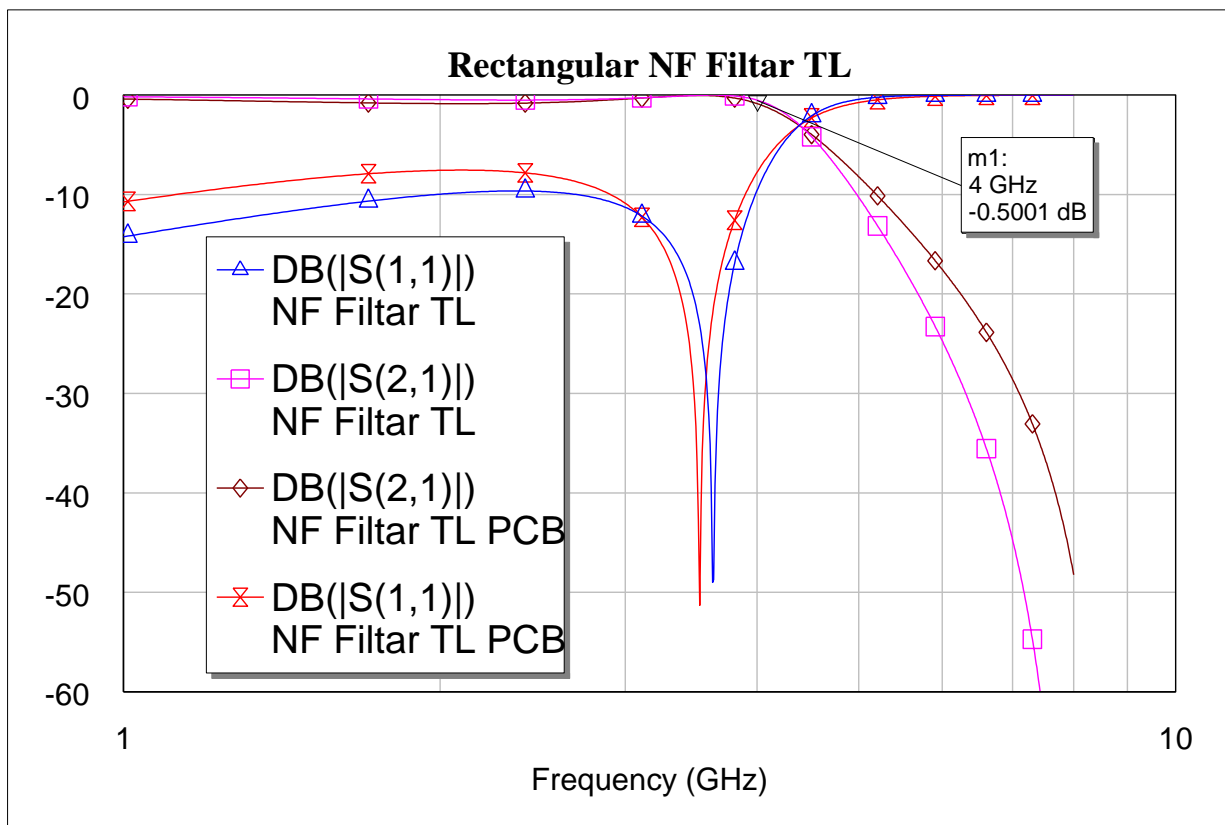
Postoje kompleksni izrazi za tačno određivanje dimenzija potrebnih mikrostrip vodova, ali je tako ovaj posao uraditi koristeći slobodne softvere poput „*TXLine*“. Potrebno je u program uneti parametre pločice (dielektričnu konstantu ϵ_r , debljinu dielektrika H, debljinu provodnika T) i željnu karakterističnu impedansu i ekvivalentnu električnu dužinu voda, pa će program odrediti traženu dužinu L i širinu voda W.

Šema sa slike 7 se menja šemom sa slike 10. na kojoj su idealni vodovi zamenjeni realnim koji su opisani preko svojih fizičkih dimenzija (širine W i dužine L) i osobina materijala od koga se planira izrada štampane ploče. U odnosu na šemu sa slike 7, dodata su i mesta spajanja vodova, tkz. T-spojevi koji su neophodni da bi se izvelo fizičko spajanje vodova na štampi. Materijal za izradu štampane ploče (*microstrip substrat* - MSUB) je obavezni deo ovakve električne šeme. Za standardne materijale postoji biblioteka sa odgovarajućim parametrima.

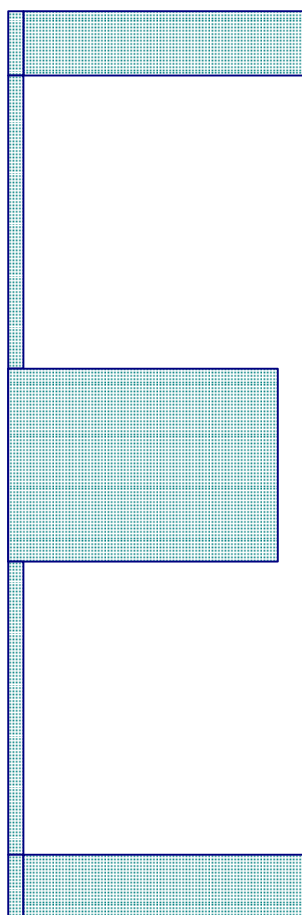
Simulacija šeme sa slike 10 je data na slici 11 i pokazuje da mikrostrip NF filtra ima tražene karakteristike sa graničnom frekvencijom $f_c = 4$ GHz. Izvestna manja odstupanja su moguća zbog dodatih T-spojeva (*T-Junction*). Da ne bi značajnije iskomplikovali proces projektovanje mikrostrip filtra, može se uradi trimovanje prenosne karakteristike manjim korekcijama dimenzija vodova u okviru programskog paketa *Microwave Office*. Layout filtra (2D i 3D izgled) dat je na slici 12.



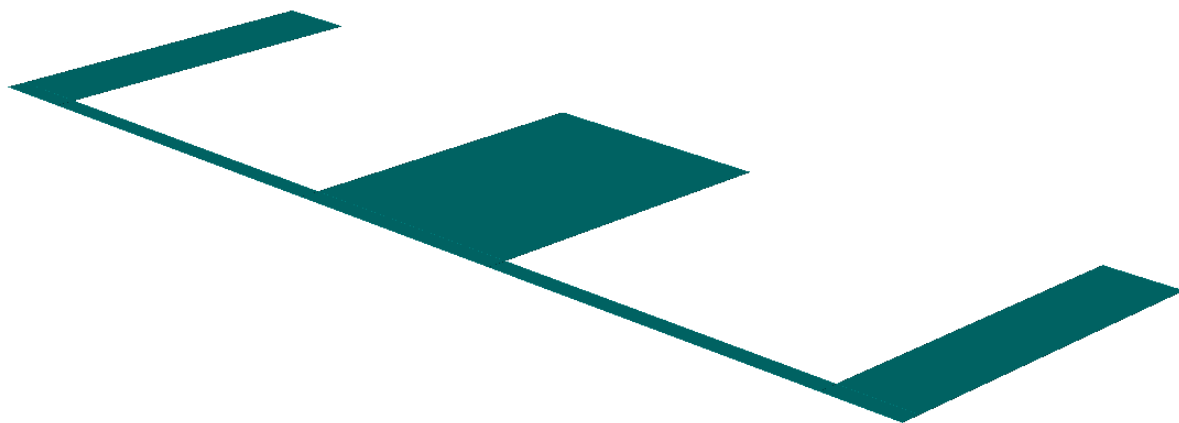
Slika 10. Šema mikrostrip NF filtra sa fizičkim dimenzijama vodova



Slika 11. Simulacija odziva mikrostrip NF filtra sa slike 10.



(a)



(b)

Slika 12. *Layout* NF filtara (a) 2D i (b) 3D (nije obavezno)