

Нов алгоритам: Развој новог алгоритма за пројектовање вишеслојних микроталасних филтара са минималном имплементационом површином

Руководилац пројекта: Антоније Ђорђевић

Одговорно лице: Дејан Тошић

Аутори: Милка Потребих, Дејан Тошић, Антоније Ђорђевић, Бранко Колунџија, Милан Илић, Драган Олћан

Развијено: у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-11021

Година: 2008-10.

Примена: 01. 09. 2010.

Кратак опис

Развој новог алгоритма за пројектовање једне класе микроталасних филтара са оптималним резонаторима облика укоснице (hairpin) штампаним у више слојева, који имају малу површину заузећа (footprint) и занемарљиве спреге између несуседних проводника.

Техничке карактеристике:

Развијен је нов алгоритам за пројектовање једне класе микроталасних филтара који се реализују у вишеслојној планарној техници. Алгоритам је основа за пројектовање и реализацију филтра уског пропусног опсега, селективне амплитудске карактеристике, локализованог импулсног одзива у времену и минималне површине заузећа на штампаној плочици.

Техничке могућности:

Алгоритам омогућава пројектовање и реализацију филтра са спрегнутим резонаторима, штампаним у више слојева, на основу пројектованог филтра реализованог у микротракастој техници.

Реализатор:

Електротехнички факултет у Београду

Корисници:

WIPL-D као основни корисник који укључује резултат у своју комерцијалну понуду консалтинга и дизајна микроталасних кола и антена.

Подтип решења:

Нов алгоритам (M85)

Стање у свету

Пројектовање микроталасних филтара је још увек актуелна област савремене микроталасне технике, што показују и два посебна издања реномираног стручног часописа [1], [2] посвећена микроталасним филтрима и једна скорашња монографија о напредном пројектовању микроталасних филтара [3]. Микроталасни филтри постоје у практично свим сложенијим уређајима комуникационих и радарских система. У расположивој литератури није нађен ниједан предлог алгоритма за пројектовање микроталасног филтра, реализованог у вишеслојној планарној техници, који истовремено узима у обзир селективност амплитудске карактеристике и локализованост импулсног одзива.

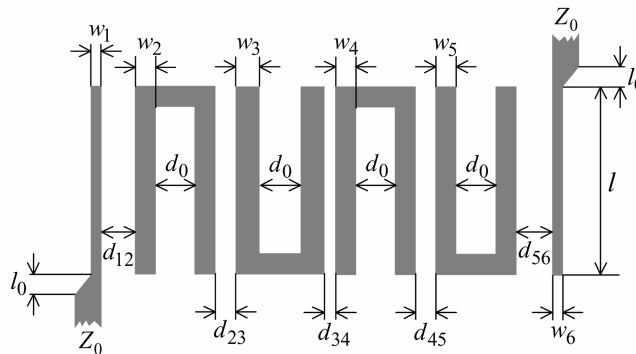
Опис

Један од захтева при пројектовању савремених филтара подразумева задовољење карактеристика и у фреквенцијском, и у временском домену. Код система код којих је потребно раздвојити фреквенцијски блиске сигнале, јавља се потреба за филтрима са ужим пропусним опсезима и великом селективношћу, што може проузроковати изобличење одзива у временском домену. За такве примене је од интереса да импулсни одзив буде локализован у времену, што омогућава квалитетнију детекцију улазних сигнала

пријемника. Општа тенденција за смањивањем димензија преносивих и других комуникационих уређаја имплицира потребу за смањивањем величине RF и микроталасних подсистема. То значи да је потребно минијатуризovati и поједине склопове ових подсистема, као што су микроталасни филтри.

Као резултат наставка истраживања започетих у претходним фазама пројекта [4], у којима је разматран класичан микротракасти филтар са резонаторима-укосницама, у овом техничком решењу се разматра нови алгоритам за пројектовање микроталасног филтра који се реализује у вишеслојној техници. Алгоритам је утемељен на методи изложеној у техничком решењу [5]. Алгоритам ће бити изложен корак-по-корак у наредним одељцима.

Изглед филтра разматраног у претходним фазама приказан је на слици 1. Сви резонатори-укоснице су у истој равни, а филтар се реализује на једнослојној подлози. Са друге стране подлоге је проводна фолија (маса). Краци резонатора су размакнута за троструку дебљину супстрата да би се смањила (нежељена) спрега између њих, али та спрега није потпуно занемарљива и мора се узети у обзир код пројектовања филтра. Филтар реализован у техничком решењу претходних фаза [4] ћемо звати *микротракасти филтар са укосницама*.

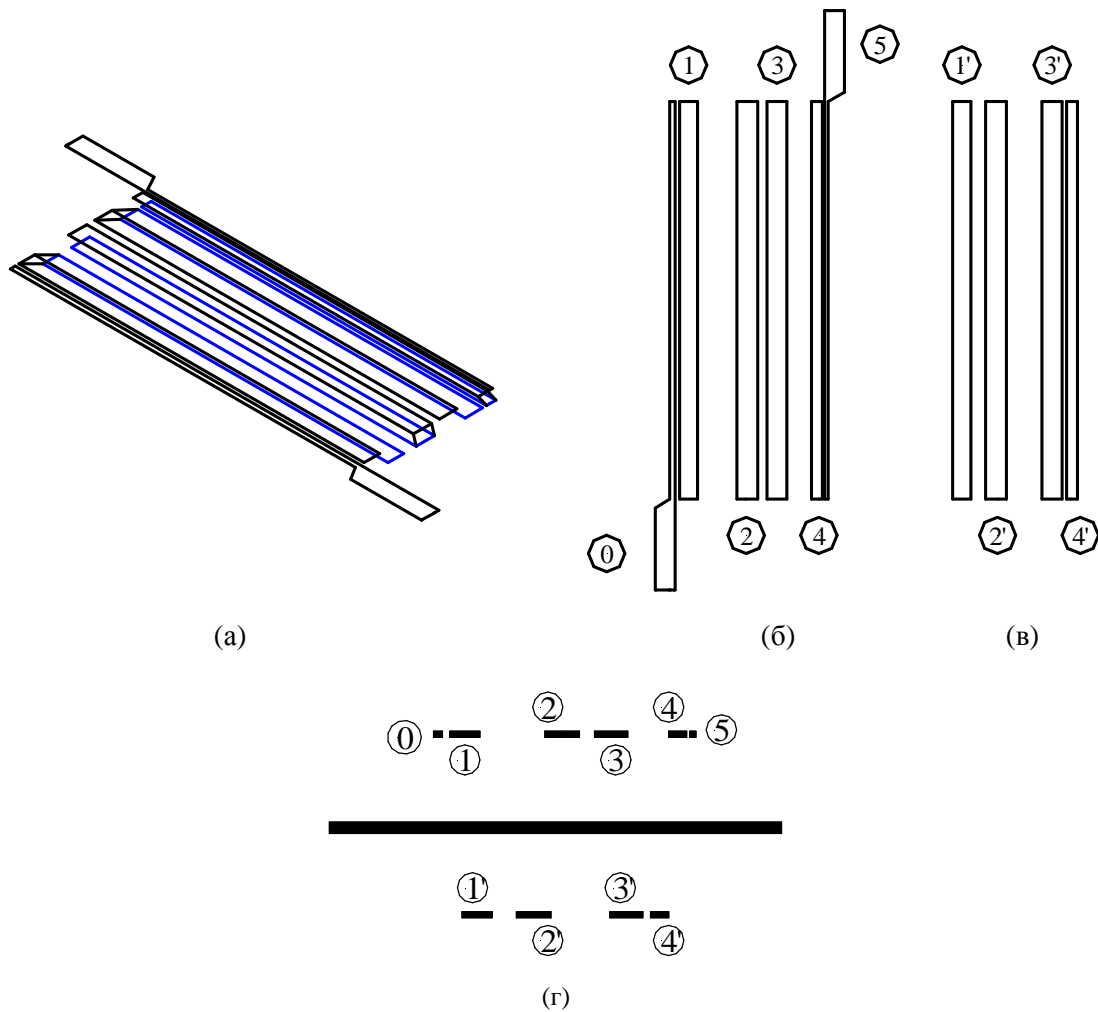


Слика 1. Скица горње стране штампане плочице микротракастог филтра четвртог реда са укосницама (hairpin) и уводницима који су постављени паралелно резонаторима. Дебљина диелектрика је h .

У циљу минијатуризације филтра, у овом истраживању предложили смо модификацију резонатора са слике 1 и увођење вишеслојне подлоге [5]. Предложена структура се састоји од два диелектрична слоја која су раздвојена металном (проводном) равни – масом, слика 2. Претпоставља се да је супстрат исти и за полазну микрострип структуру и за предложену пресавијену структуру. На диелектричним слојевима се штампају краци резонатора који се спајају вијама, слика 3. Растојање између кракова предложене реализације је око $2h$, а спрега између кракова резонатора је елиминисана постављањем масе у центар структуре. Предложени резонатор ћемо звати *пресавијени резонатор-укосница*. Краци сваког резонатора су смакнута један у односу на други. Спрезање се остварује ивичном спрегом (на секцији дужине $l < \lambda_g/4$) између кракова једног пара суседних резонатора који су са једне стране централне проводне равни. Смањивањем се међусобно удаљавају краци посматраних резонатора са друге стране проводне равни, чиме се смањује паразитна спрега која постоји између тих кракова.



Слика 2. Вишеслојна структура за реализацију филтра (скица попречног пресека у коме нису учтане вије). Предложени филтар има резонаторе који се добијају модификовањем резонатора-укоснице, тако што се трака штампа у више слојева. Структуру филтра чини проводна плоча у сендвичу између две диелектричне плоче, а на диелектричним плочама се штампају траке резонатора.



Слика 3. Скица проводника (резонатора са уводницима). (а) тродимензионални приказ без средишњег проводног слоја, (б) поглед одозго – горњи проводници, (в) поглед одозго – доњи проводници, (г) попречни пресек у коме је приказан и средишњи проводни слој (вије нису приказане). Бројевима 1, 2, 3 и 4 су назначени краци резонатора. Бројеви 0 и 5 означавају уводнике. Трака сваког резонатора је пресавијена око проводне равни, односно има облик модификоване укоснице. Резонатори су међусобно ивично спрегнути. Краци резонатора се спајају вијама које пролазе кроз металну плочу, али нису у контакту са њом.

Метода изложена у техничком решењу [5] може се сажето формулисати на следећи начин:

- (1) прво пројектовати оптималан једнослојни филтар, као на слици 1, реализован као микротракаста структура са поклопцем,
- (2) пресавијањем резонатора реализовати вишеслојни филтар као структуру са поклопцима на обе стране,
- (3) при модификацији једнослојног филтра у вишеслојни очувавају се дужине кракова, ширине кракова и ширине процепа, а редирајнира се спој кракова.

У циљу јасног и једнозначног референцирања на различите структуре филтара, у овом истраживању користимо следеће називе:

- микротракасти филтар са укосницама* – филтар реализован у техничком решењу [4],
- једнослојни поклопљени филтар са укосницама* – полазни једнослојни филтар,
- савијени вишеслојни поклопљени филтар* – циљни вишеслојни филтар.

Спецификација

Алгоритам пројектовања микроталасног филтра, који се предлаже у овом техничком решењу, биће илустрован на конкретном примеру филтра чија спецификација следи.

Ред филтра: $N = 4$.

Апроксимација: Rhodes-ова [6].

Централна учестаност: $f_0 = 2 \text{ GHz}$.

Релативна ширина пропусног опсега 3 dB: $b = 0,05$; 5%. (Ширина пропусног опсега: $\Delta f = 100 \text{ MHz}$.)

Номиналне импедансе приступа: $Z_0 = 50 \Omega$.

Највеће унето слабљење: $A_0 = 3,5 \text{ dB}$.

Најмање прилагођење у пропусном опсегу: 12 dB.

Подлога (супстрат): Rogers RO4003C.

За потребе симулације, подлога је описана следећим параметрима:

релативна пермитивност диелектрика $\epsilon_r = 3,6$,

дебљина супстрата $h = 0,508 \text{ mm}$,

тангенс угла губитака $\text{tg } \delta = 0,0021$ (на $f = 2,5 \text{ GHz}$),

дебљина металације бакарних проводника $t = 36 \mu\text{m}$,

мера површинских неравнина $h_{\text{RMS}} = 2,4 \mu\text{m}$,

проводност бабра $\sigma_{\text{Cu}} = 14 \text{ MS/m}$ да би се у обзир узели и губици услед површинских неравнина.

Висина поклопа подлоге, рачуната од површи диелектрика, је $h_u = 0,75 \text{ mm}$.

Уводници се постављају паралелно резонаторима ради компактности реализације.

Прототип

На основу спецификације, према поступку описаном у [6], синтетизован је прототип филтра (слика 4). Параметри прототипа су следећи:

$R_{\text{proto},0} = 1 \Omega$, отпорност генератора,

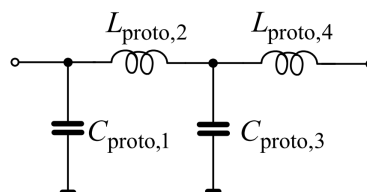
$C_{\text{proto},1} = 1,49701380932865 \text{ F}$,

$L_{\text{proto},2} = 1,63230549991762 \text{ H}$,

$C_{\text{proto},3} = 0,62417080957926 \text{ F}$,

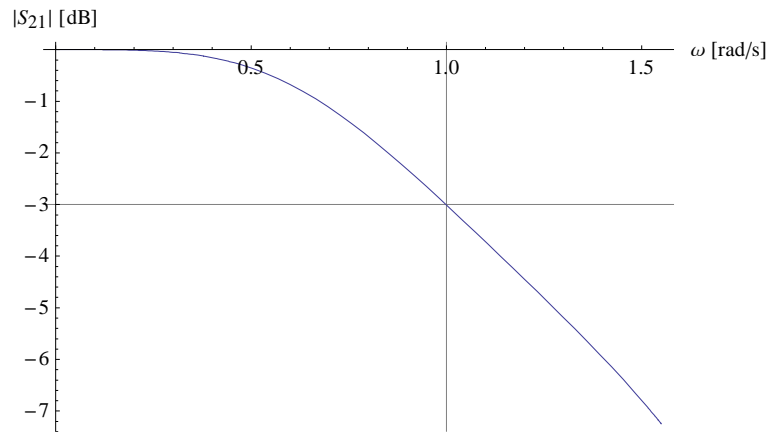
$L_{\text{proto},4} = 0,48887911899031 \text{ H}$,

$R_{\text{proto},5} = 1 \Omega$, отпорност потрошача.



Слика 4. Прототип филтра четвртог реда.

Фреквенцијски одзив, модул преносног параметра расејања, приказан је на слици 5.



Слика 5. Модул преносног параметра расејања прототипа са слике 4.

На основу спецификације и прототипа са слике 4 одређује се LC-филтар пропусник опсега учестаности [7, стр. 300]. Шема филтра је приказана на слици 6, а параметри су

$R_0 = 50 \Omega$, отпорност генератора,

$L_1 = 132,894 \text{ pH}$, $C_1 = 47,6514 \text{ pF}$,

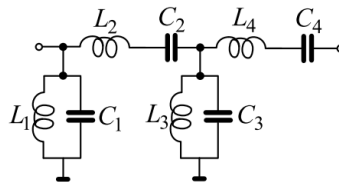
$L_2 = 129,895 \text{ nH}$, $C_2 = 48,7516 \text{ pF}$,

$L_3 = 318,733 \text{ pH}$, $C_3 = 19,868 \text{ pF}$,

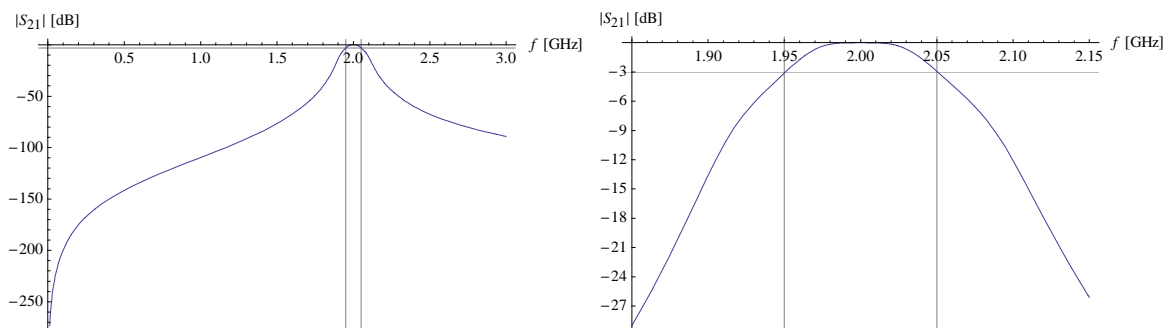
$L_4 = 38,9038 \text{ nH}$, $C_4 = 162,775 \text{ pF}$,

$R_5 = 50 \Omega$, отпорност потрошача.

Фреквенцијски одзив, модул преносног параметра расејања, приказан је на слици 7.



Слика 6. LC-филтар пропусник опсега учестаности.



Слика 7. Модул преносног параметра расејања LC-филтра пропусника опсега учестаности са слике 6.

Коефицијенти спреге

На основу спецификације и прототипа одређују се коефицијенти спреге између суседних резонатора реализације филтра пропусника опсега са спрегнутим резонаторима [8, једн. (2)].

$$K_{i,i+1} = \frac{b}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}, \quad (i=1,2,\dots,N-1), \quad \text{где је } b = \frac{\Delta f}{f_0} = 0,05 \text{ релативна ширина пропусног опсега, } g_0 = 1,$$

$$g_1 = 1,49701380932865, \quad g_2 = 1,63230549991762, \quad g_3 = 0,62417080957926, \quad g_4 = 0,48887911899031, \quad g_5 = 1,$$

су нормализовани параметри прототипа, а $N = 4$ је ред филтра.

$$\text{Добија се } K_{1,2} = 0,0319857, \quad K_{2,3} = 0,0495356, \quad K_{3,4} = 0,0905144.$$

Фактори доброте оптерећених резонатора

На основу спецификације и прототипа одређују се фактори доброте оптерећених резонатора (везаних за приступе) реализације филтра пропусника опсега са спрегнутим резонаторима [8, једн. (3),(4)].

$$Q_{ex1} = \frac{g_0 g_1}{b} = 29,9403 \text{ за први приступ.}$$

$$Q_{ex4} = \frac{g_4 g_5}{b} = 9,77758 \text{ за други приступ.}$$

Парна и непарна импеданса

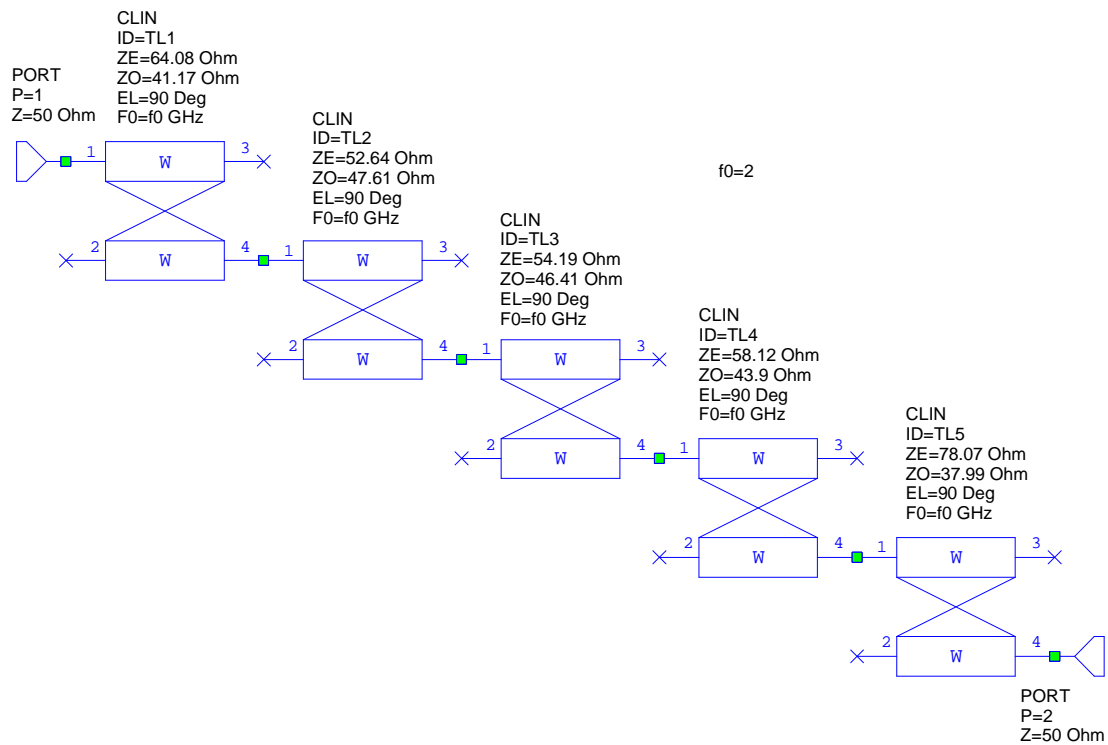
На основу спецификације и прототипа одређују се парна и непарна импеданса реализације филтра пропусника опсега учестаности са идеалним симетричним спрегнутим водовима [7, стр. 323-324].

$$k_{0,1} = \sqrt{\frac{\pi b}{2}} \frac{1}{\sqrt{g_0 g_1}}, \quad k_{i,i+1} = \frac{\pi b}{2} \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}, \quad (i=1,2,\dots,N-1), \quad k_{N,N+1} = \sqrt{\frac{\pi b}{2}} \frac{1}{\sqrt{g_N g_{N+1}}}.$$

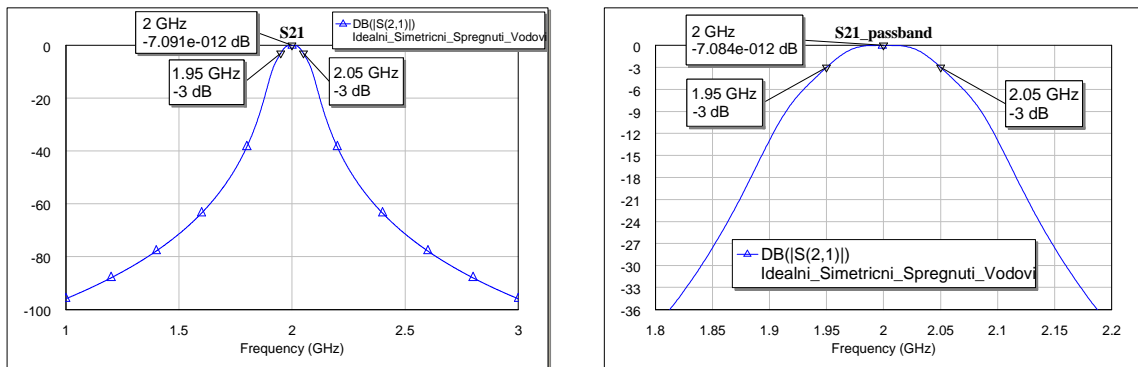
$Z_{ev,i,i+1} = Z_0(1 + k_{i,i+1} + k_{i,i+1}^2)$, $Z_{od,i,i+1} = Z_0(1 - k_{i,i+1} + k_{i,i+1}^2)$, $(i=0,2,\dots,N)$, где је Z_0 номинална импеданса приступа једнака импеданси потрошача и импеданси генератора, $Z_0 = R_0 = R_5 = 50 \Omega$. Z_{ev} је парна импеданса, а Z_{od} непарна импеданса симетричног спрегнутог вода.

i	$Z_{ev} [\Omega]$	$Z_{od} [\Omega]$
0	64,0758	41,1707
1	52,6384	47,6141
2	54,1932	46,4122
3	58,1197	43,9018
4	78,0734	37,9919

Шема филтра са идеалним симетричним спрегнутим водовима је приказана на слици 8, а фреквенцијски одзив на слици 9.



Слика 8. Реализација филтра пропусника опсега учестаности са идеалним симетричним спрегнутим водовима.



Слика 9. Модул преносног параметра расејања филтра са слике 8.

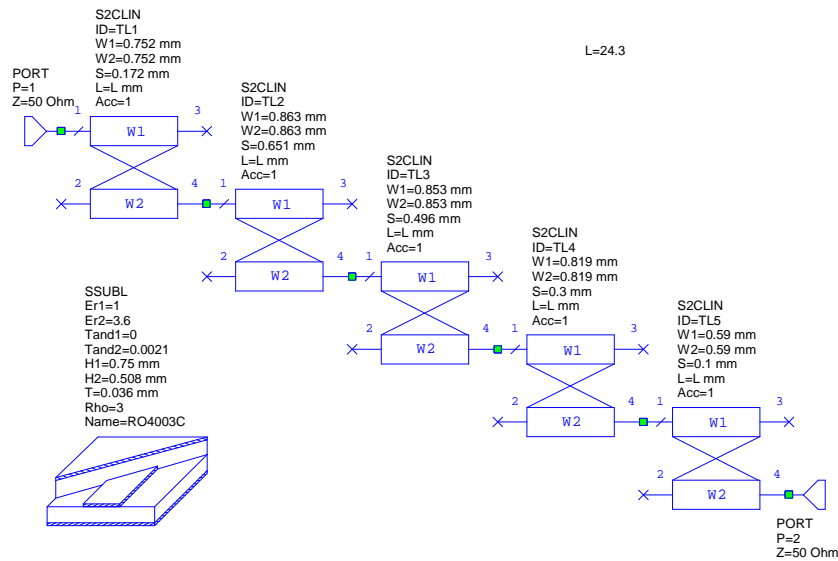
Ширине трака и процепа

Из спецификације (супстрата) и парне и непарне импедансе одређују се програмом LINPAR [9] ширине трака (w) и величина процепа (s) симетричних спрегнутих водова реализованих као поклопљена микротракаста структура (слике 10 и 11). Из ових података се добија процена опсега ширина трака резонатора и величина процепа између резонатора полазне једнослојне реализације. Усвајају се следећи опсежи:

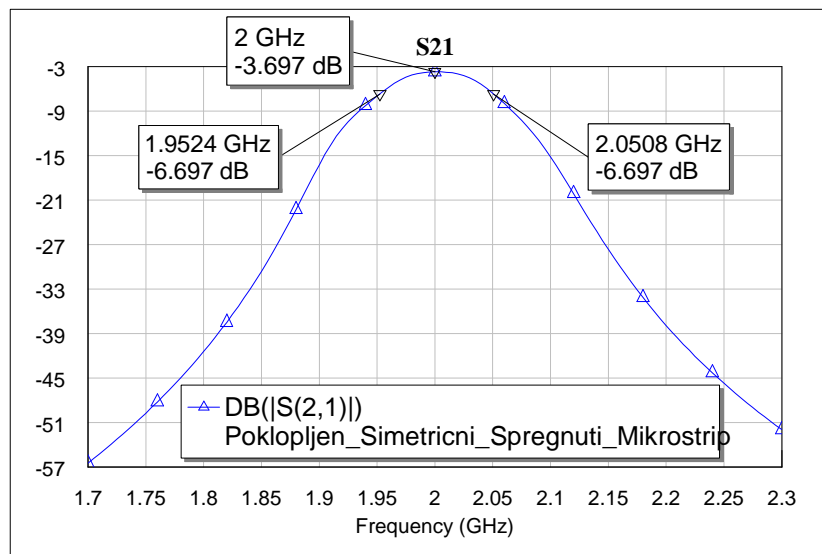
$$0,3 \text{ mm} < w < 1,3 \text{ mm}$$

$$0,1 \text{ mm} < s < 0,8 \text{ mm}$$

i	Z_{ev} [Ω]	Z_{od} [Ω]	w [mm]	s [mm]
0	64,0758	41,1707	0,752	0,172
1	52,6384	47,6141	0,863	0,651
2	54,1932	46,4122	0,853	0,496
3	58,1197	43,9018	0,819	0,3
4	78,0734	37,9919	0,59	0,1

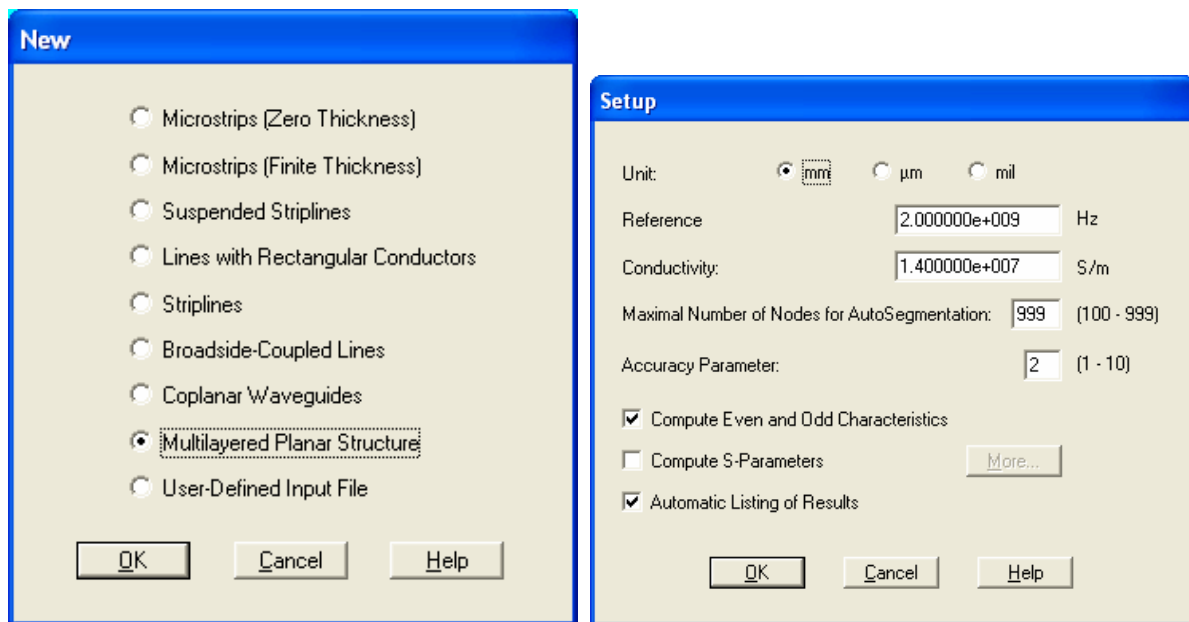


Слика 10. Реализација филтра пропусника опсега учестаности са симетричним спрегнутим поклопљеним микротракастим водовима. Дужина свих водова је иста, а подешавањем је одређена дужина 24,3 mm.

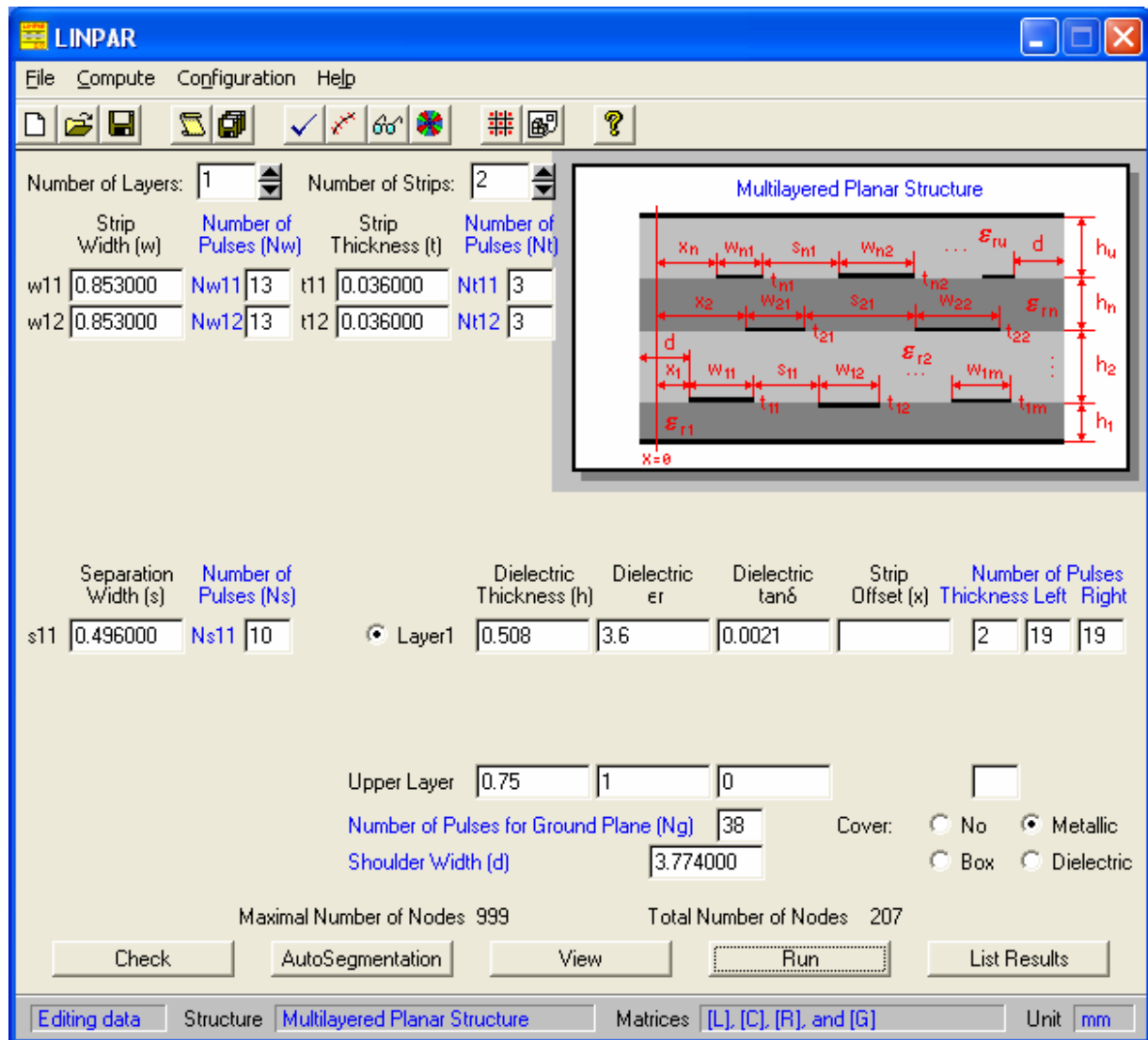


Слика 11. Модул преносног параметра расејања филтра са слике 10.

Почетна дужина одсечака спрегнутих водова је одређена програмом LINPAR (слике 12-14).



Слика 12. Радни параметри програма LINPAR.



Слика 13. Опис структуре. Посматра се централни одсечак спрегнутих водова са слике 10.

```

Characteristic impedance matrix (Ω)

( 5.033E+01,-1.483E-01) ( 3.917E+00, 1.475E-03)
( 3.917E+00, 1.475E-03) ( 5.033E+01,-1.483E-01)

Modal propagation coefficients (1/m)

( 3.127E-01, 6.412E+01) ( 2.882E-01, 6.542E+01)

Modal phase velocities (m/s) and effective permittivities

1.960E+08 ( 2.340E+00) 1.921E+08 ( 2.436E+00)

Modal voltage matrix (V)

( 7.071E-01, 0.000E+00) ( 7.071E-01, 1.890E-07)
(-7.071E-01,-1.863E-07) ( 7.071E-01, 7.600E-16)

Modal current matrix (A)

( 1.524E-02, 4.917E-05) ( 1.303E-02, 3.529E-05)
(-1.524E-02,-4.917E-05) ( 1.303E-02, 3.528E-05)

Characteristic impedance (Ω) ( 5.425E+01,-1.468E-01) ( 4.641E+01,-1.498E-01)
Effective permittivity 2.436E+00 2.340E+00
Attenuation (dB/m) 2.504E+00 2.716E+00

```

Слика 14. Део резултата анализе структуре са слике 13. Четвртина средње вредности таласне дужине парног и непарног мода је 24,25 mm. Прво је усвојено да су дужине спрегнутих водова са слике 10 24,25 mm, а онда је финим подешавањем коригована дужина водова на 24,3 mm и тиме подешена централна учестаност на специфицирану вредност.

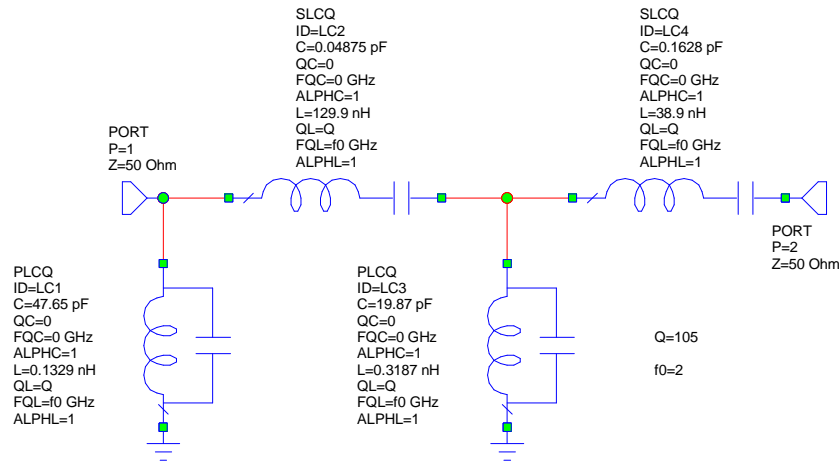
Фактор добре коресподентан задатом унетом слабљењу

На основу спецификације и прототипа одређују се фактор добре коресподентан специфицираном унетом слабљењу [8, једн. (1)].

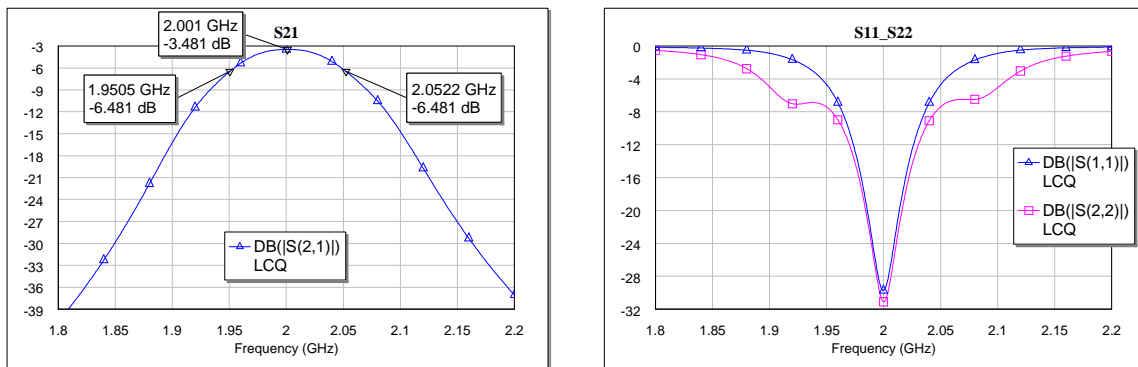
$$Q_{A_0} = \frac{4,343 f_0}{A_0 \Delta f} \sum_{i=1}^N g_i = 105,283; \text{ где је } A_0 = 3,5 \text{ dB унето слабљење на централној учестаности}$$

$f_0 = 2 \text{ GHz}$, а $\Delta f = 100 \text{ MHz}$ је ширина пропусног опсега 3 dB.

LC-филтар пропусник опсега учестаности (слика 6) се може модификовати увођењем губитака у резонаторе, тако да унето слабљење на централној учестаности буде једнако специфицираном (слике 15-16). Одзив овог филтра служи за упоређивање одзива добијеног симулацијом и мереног одзива на лабораторијском прототипу.



Слика 15. LC-филтар пропусник опсега учестаности са резонаторима коначног фактора доброте 105, који одговара унетом слабљењу од $-3,5$ dB на учестаности 2 GHz.

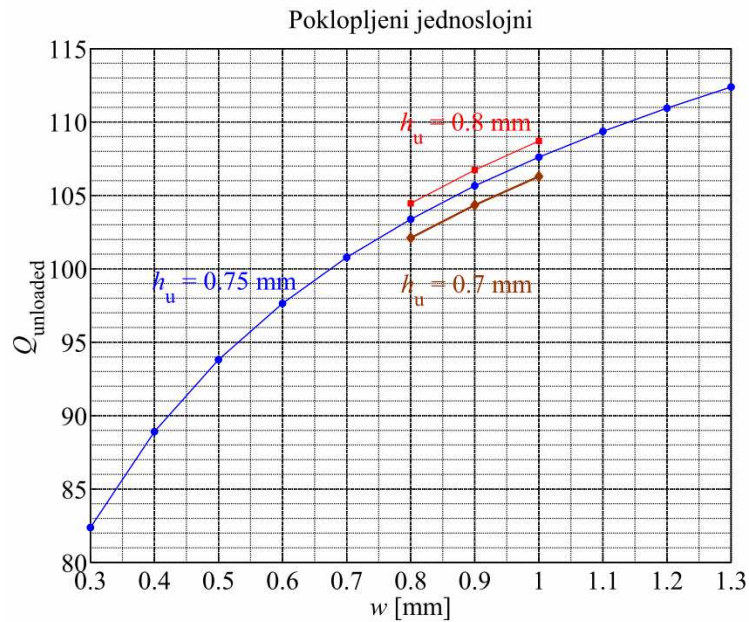


Слика 16. Параметри расејања LC-филтра пропусника опсега учестаности са резонаторима коначног фактора доброте.

Фактор доброте неоптерећеног полуталасног резонатора-траке

За низ ширина трака полуталасног резонатора, из интервала $0,3 \text{ mm} < w < 1,3 \text{ mm}$, одређује се фактор доброте резонатора програмом LINPAR. Прво се израчунава коефицијент простирања $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$, па се онда израчунава фактор доброте неоптерећеног полуталасног резонатора као $Q_0 = \frac{\beta}{2\alpha}$. Да би се испитала осетљивост криве на промену висине поклопца, анализирани су случајеви када се висина поклопца (h_u) мења за $+50 \mu\text{m}$ и $-50 \mu\text{m}$ (слика 17).

Зависност фактора доброте неоптерећеног полуталасног резонатора, у односу на ширину траке резонатора, приказана је на слици 17. Одговарајући аналитички израз, добијен фитовањем, је облика $w(Q) = 10.4126Q - 0.475722Q^2 + 0.00794543Q^3 - 0.0000534323Q^4 + 6.74256Q^5 \cdot 10^{-8} + 5.06849Q^6 \cdot 10^{-10}$, где је дужине у mm. Ширина траке за фактор доброте коресподентан специфицираном унетом слабљењу је $w(105) = 0,88 \text{ mm}$.



Слика 17. Фактор доброте неоптерећеног полуталасног резонатора-траке.

Са слике 17 се очитава почетна процена ширине траке полуталасног резонатора која одговара фактору доброте $Q_{A_0} \approx 105$. Усваја се да је почетна ширина траке резонатора $w_0 = 0,88 \text{ mm}$. Претходно одређене ширине трака се емпиријски коригују на следећи начин: (1) ако се ширина траке разликује више од 25% од процене, ширина траке се не мења, (2) у осталим случајевима се узима процена ширине траке.

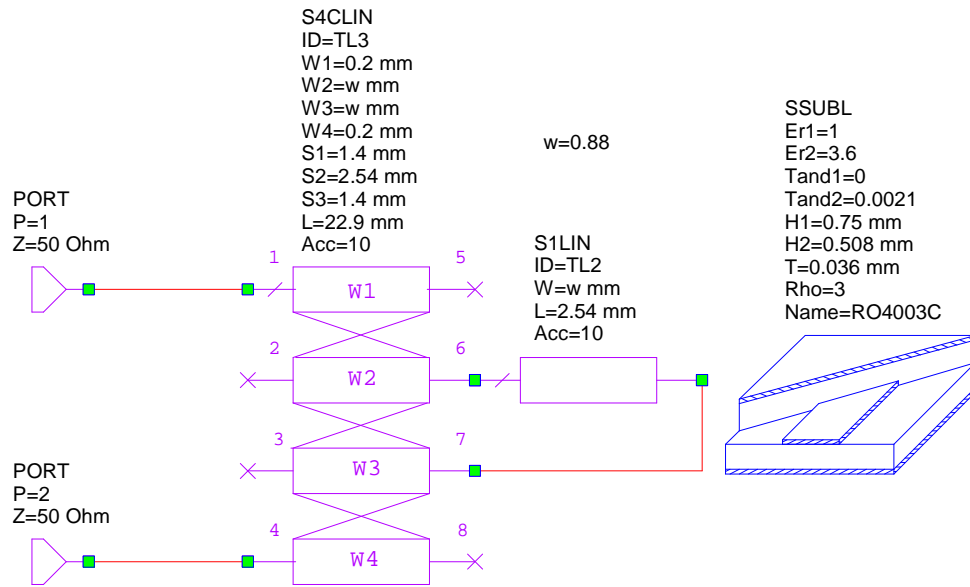
i	w [mm]	w_{kor} [mm]
0	0,752	0,88
1	0,863	0,88
2	0,853	0,88
3	0,819	0,88
4	0,59	0,59

Дужина крака резонатора-укоснице

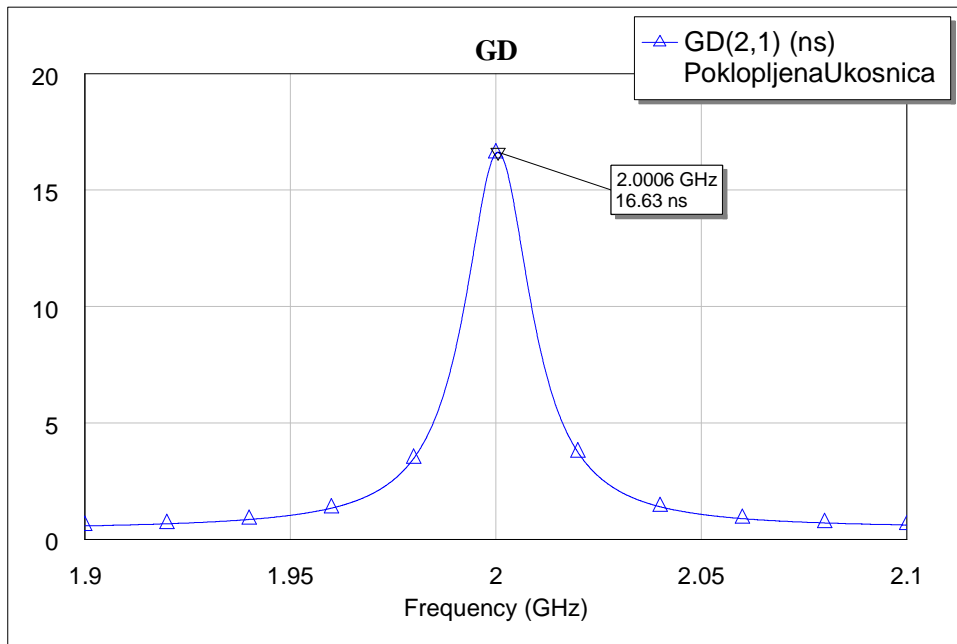
Полуталасни резонатор-трака се савија у укосницу чији су краци једнаке дужине, а размак између њих је $d_0 = 5h = 2,54 \text{ mm}$, где је $h = 0,508 \text{ mm}$ дебљина супстрата. Дужина се дотерује финим подешавањем (тјуновањем) тако да резонантна учестаност укоснице буде једнака централној учестаности филтра $f_0 = 2 \text{ GHz}$.

За почетну ширину траке од $0,88 \text{ mm}$ добија се дужина крака укоснице $22,9 \text{ mm}$.

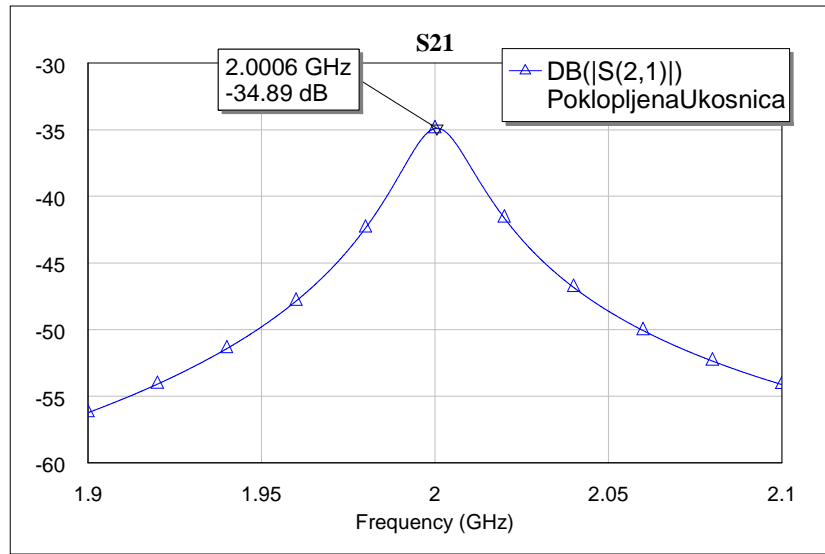
На сликама 18, 19 и 20 је приказан поступак подешавања дужине крака резонатора-укоснице.



Слика 18. Микроталасна мрежа за одређивање дужине крака резонатора-укоснице.



Слика 19. Крива за одређивање дужине крака резонатора-укоснице. Дужина се подешава док максимум криве не буде на централној учестаности филтра.



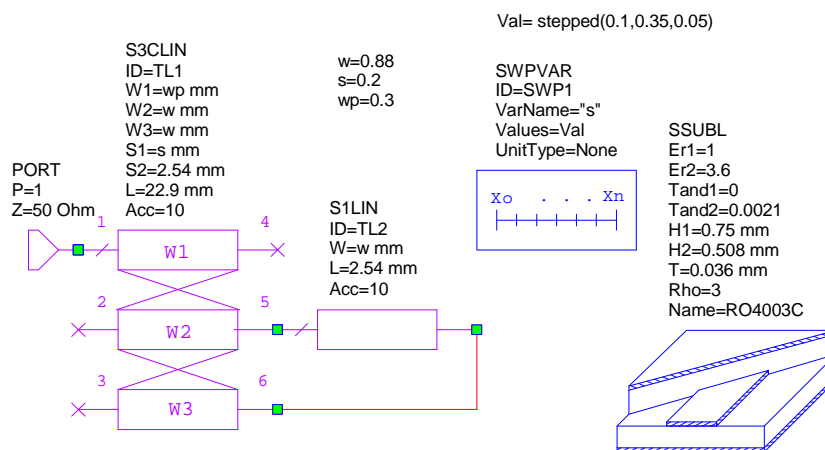
Слика 20. Крива за одређивање дужине резонатора-укоснице. Максимум треба да је у интервалу од -40 dB до -30 dB.

Ширина и процеп уводника

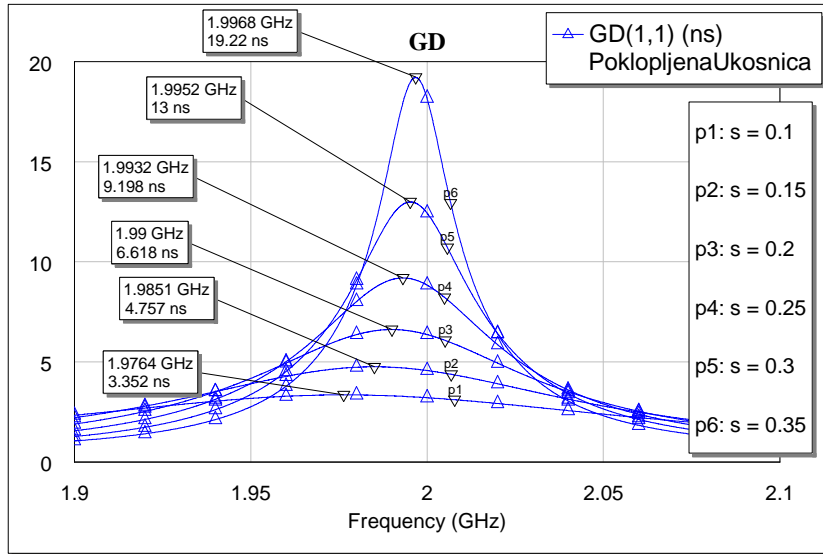
На основу фактора добре оптерећених резонатора, прорачунавају се ширине и процепи уводника на основу радних табела и кривих. За низ вредности ширина уводника (w_p) и величине процепа (s) уводника праве се радне табеле и криве.

На сликама 21 и 22 је приказан поступак прављења табела. Радне криве и табеле су приказане на сликама 23-26.

Фактор добре се одређује из максимума групног кашњења (τ_d) и централне учестаности филтра (f_0) као $Q = \pi f_0 \tau_d / 2$.

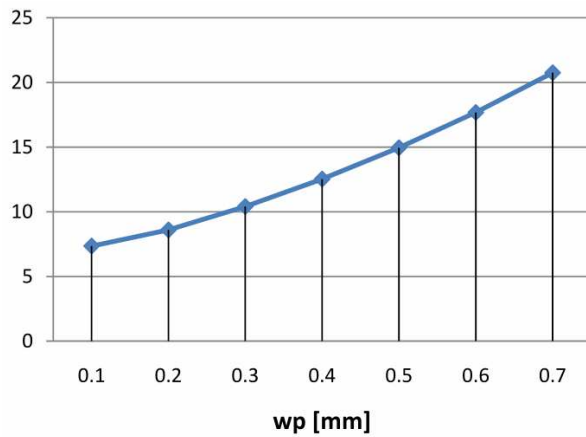


Слика 21. Микроталасна мрежа за одређивање ширине и процепа уводника.



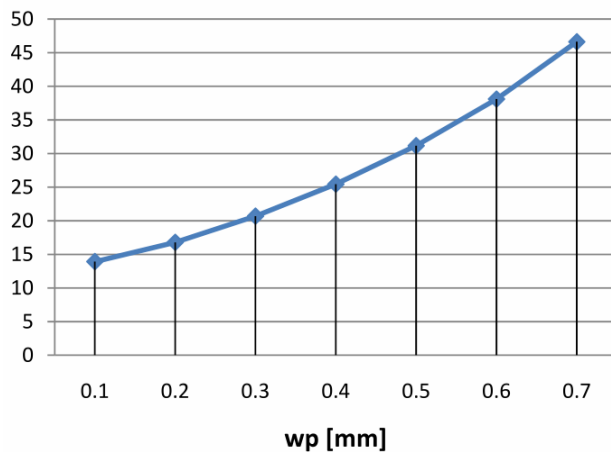
Слика 22. Крива за одређивање фактора доброте из максимума групног кашњења.

w=0.88 mm, s=0.1 mm			
w _p [mm]	f ₀ [GHz]	t _d [ns]	Q _{loaded}
0.1	1.9148	2.445	7.353975
0.2	1.9576	2.797	8.60075
0.3	1.9764	3.352	10.40636
0.4	1.9856	4.017	12.52892
0.5	1.991	4.781	14.95236
0.6	1.9944	5.644	17.6815
0.7	1.9965	6.617	20.75154



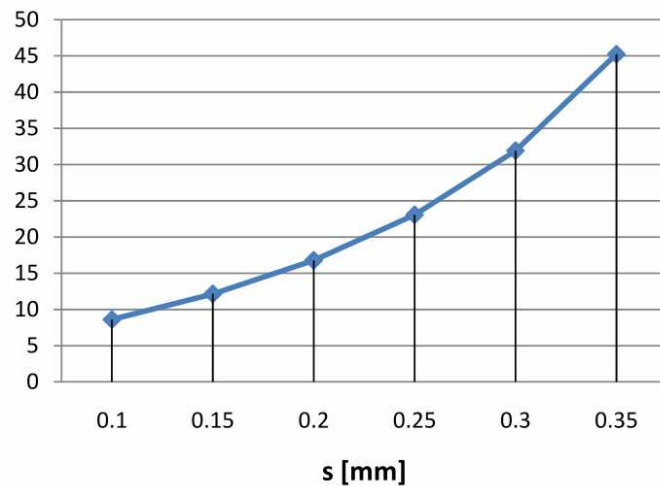
Слика 23. Фактор доброте укоснице као функција ширине уводника.

w=0.88 mm, s=0.2 mm			
w _p [mm]	f ₀ [GHz]	t _d [ns]	Q _{loaded}
0.1	1.9667	4.507	13.92341
0.2	1.9827	5.39	16.78671
0.3	1.99	6.618	20.6871
0.4	1.994	8.124	25.44573
0.5	1.9965	9.939	31.16965
0.6	1.9981	12.14	38.1027
0.7	1.9992	14.85	46.63399



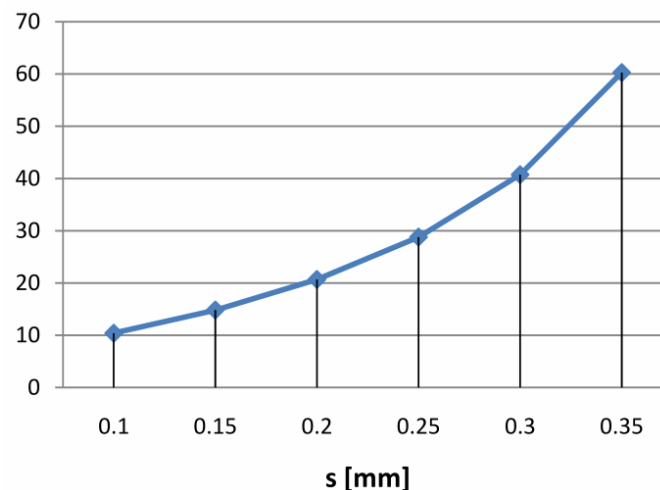
Слика 24. Фактор доброте укоснице као функција ширине уводника.

w=0.88 mm, wp=0.2 mm			
s [mm]	f0 [GHz]	td [ns]	Qloaded
0.1	1.9576	2.797	8.60075
0.15	1.9736	3.918	12.14628
0.2	1.9827	5.39	16.78671
0.25	1.9882	7.384	23.06065
0.3	1.9917	10.2	31.91126
0.35	1.9941	14.44	45.23077



Слика 25. Фактор добротe укoснице као функцију величине процeпа уводника.

w=0.88 mm, wp=0.3 mm			
s [mm]	f0 [GHz]	td [ns]	Qloaded
0.1	1.9764	3.352	10.40636
0.15	1.9851	4.757	14.83322
0.2	1.99	6.618	20.6871
0.25	1.9932	9.198	28.79812
0.3	1.9952	13	40.74269
0.35	1.9968	19.22	60.2848



Слика 26. Фактор добротe укoснице као функцију величине процeпа уводника.

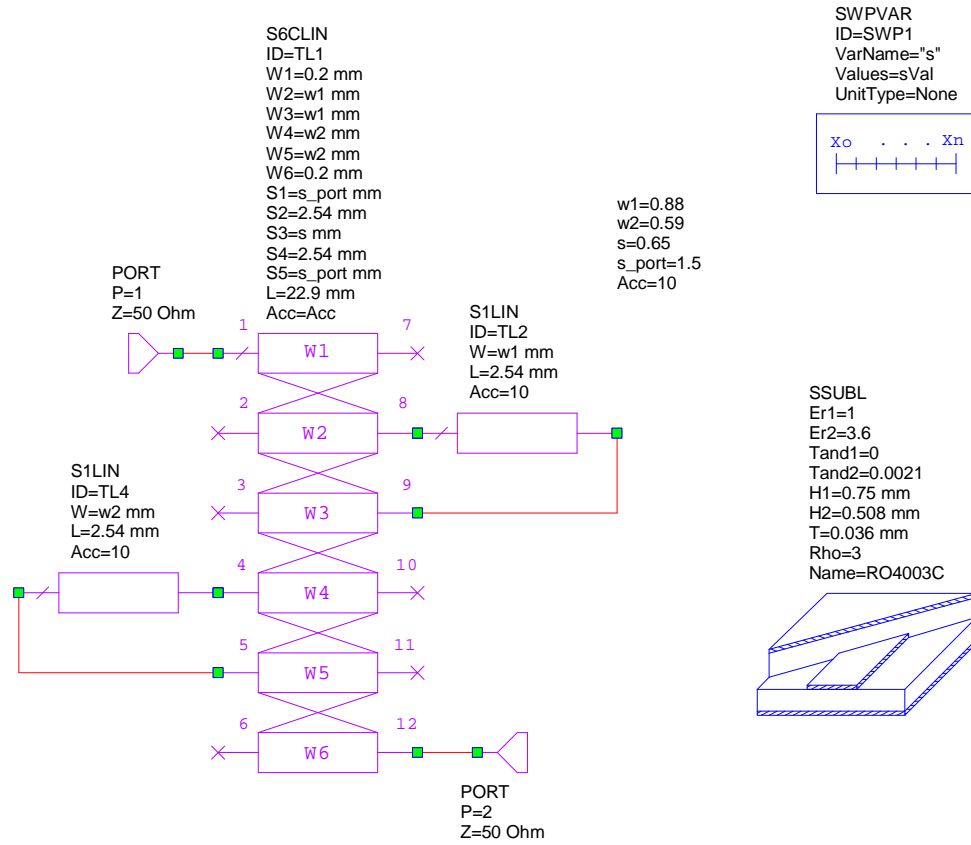
Из претходних табела и графика се усвајају ширине 0,3 mm и 0,2 mm, и процeпи 0,25 mm и 0,125 mm, за приступе 1 и 2 респективно, односно факторе добротe 30 и 9,8. Параметри уводника су представљени у табели.

	Први приступ	Други приступ
Ширина уводника	0,3 mm	0,2 mm
Процeп између уводника и резонатора	0,25 mm	0,125 mm
Фактор добротe оптерећеног резонатора	30	9,8

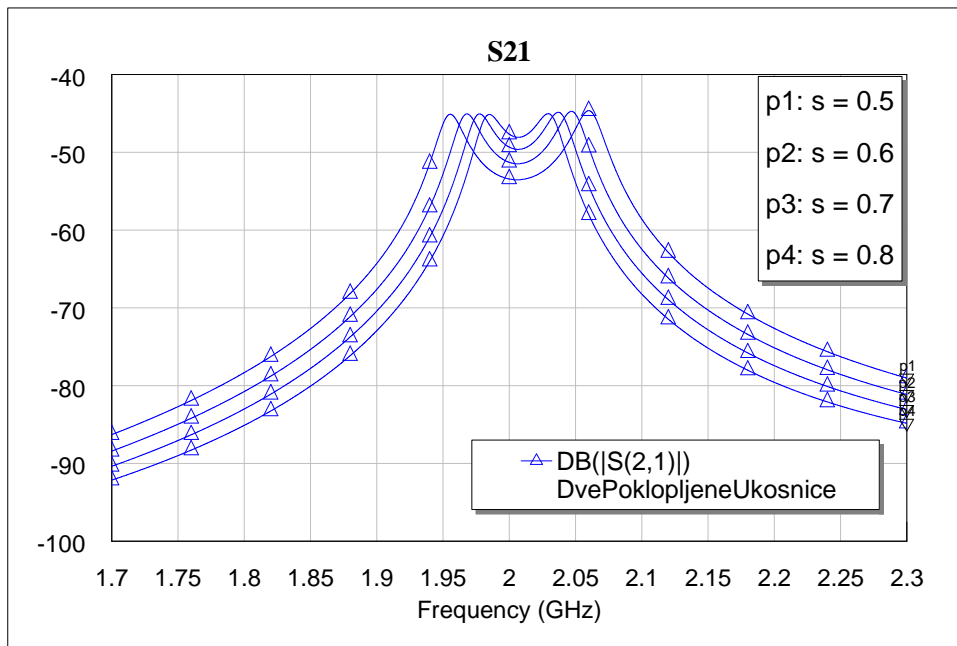
Кoефицијенте спрeга две укoснице

Процeп између две укoснице се одређује из радних кривих или табела. Разликујемо случај (1) када су укoснице исте и (2) када су им различите ширине трака.

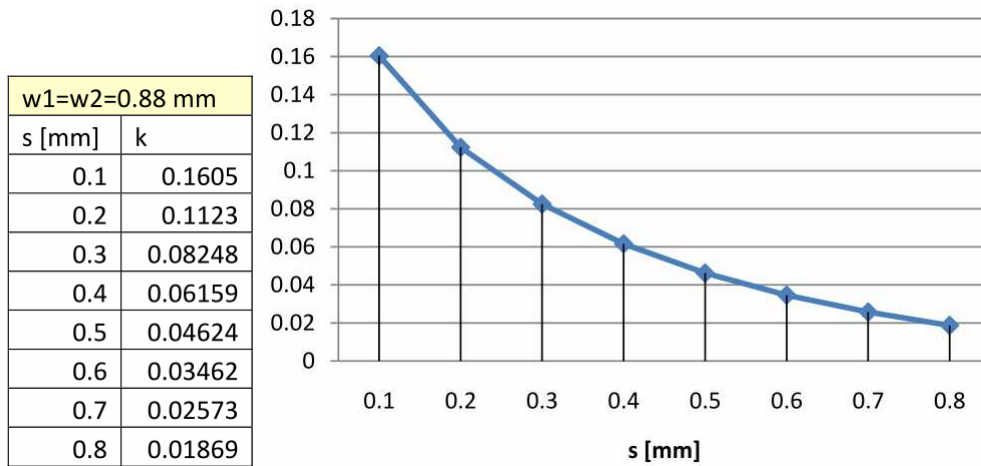
На сликама 27, и 28 је приказан поступак прављења табела. Одговарајуће радне криве су на сликама 29 и 30.



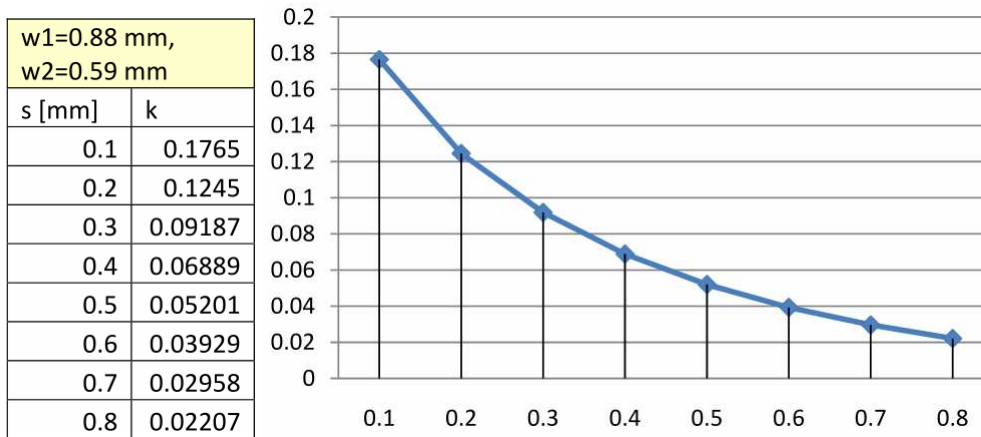
Слика 27. Микроталасна мрежа за одређивање коефицијента спреге између две укоснице.



Слика 28. Крива за одређивање коефицијента спреге између две укоснице.



Слика 29. Коефицијента спреге између две укоснице исте ширине као функција процепа.



Слика 30. Коефицијента спреге између две укоснице различите ширине као функција процепа.

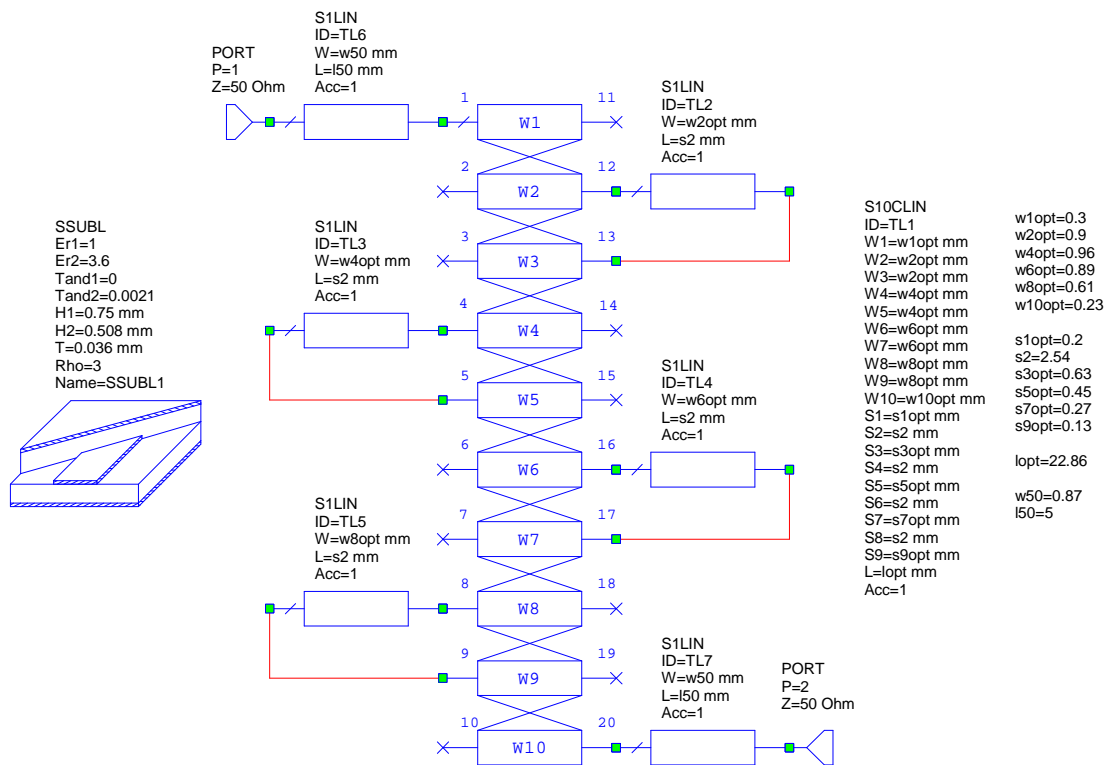
Из табела и графика се усвајају процепи 0,63 mm, 0,45 mm, и 0,3 mm, који одговарају коефицијентима спреге $K_{1,2} = 0,0319857$, $K_{2,3} = 0,0495356$, $K_{3,4} = 0,0905144$, респективно.

Оптимални једнослојни поклопљени филтар са укосницама

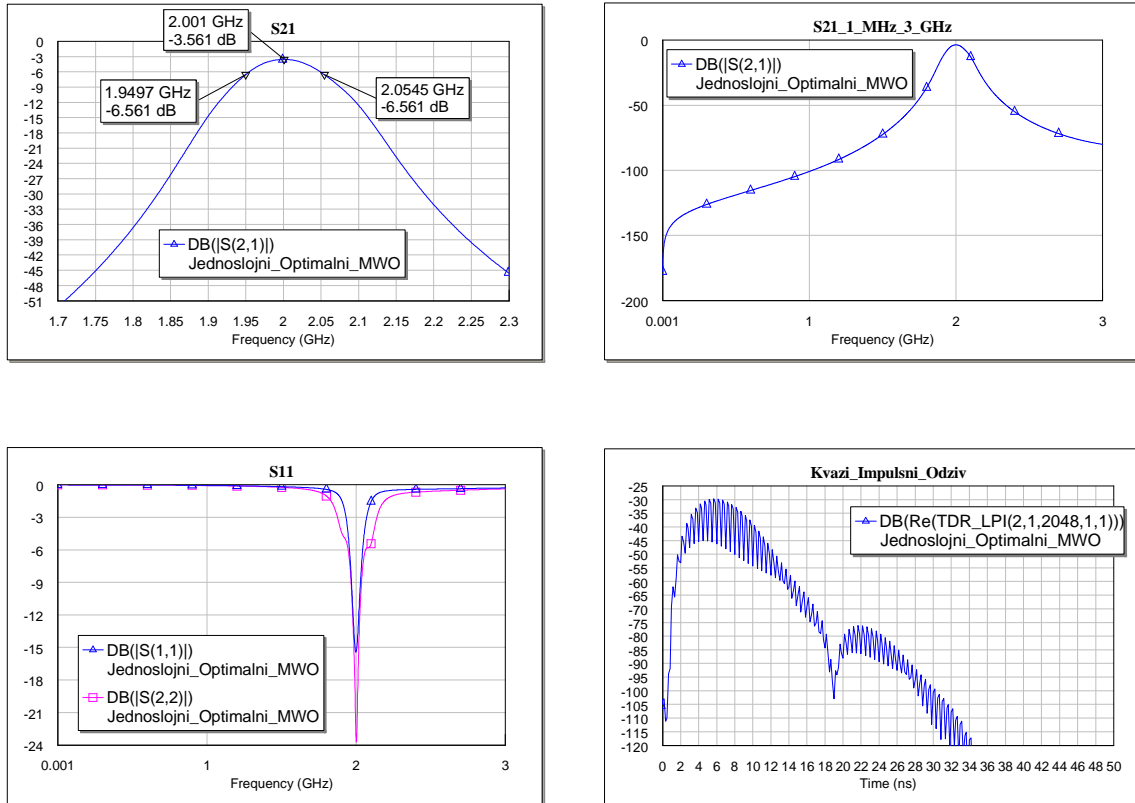
На основу претходних радних кривих и табела одређене су почетне вредности димензија једнослојног поклопљеног филтра са укосницама, а онда су оптимизацијом добијене вредности приказане на слици 31. Карактеристике филтра су приказане на слици 32. Циљеви оптимизације су приказани на слици 33.

Величина	Почетна	Оптимална
W1 [mm]	0,3	0,3
W2 [mm]	0,88	0,9
W3 [mm]	0,88	0,9
W4 [mm]	0,88	0,96
W5 [mm]	0,88	0,96
W6 [mm]	0,88	0,89
W7 [mm]	0,88	0,89
W8 [mm]	0,59	0,61
W9 [mm]	0,59	0,61
W10 [mm]	0,2	0,23

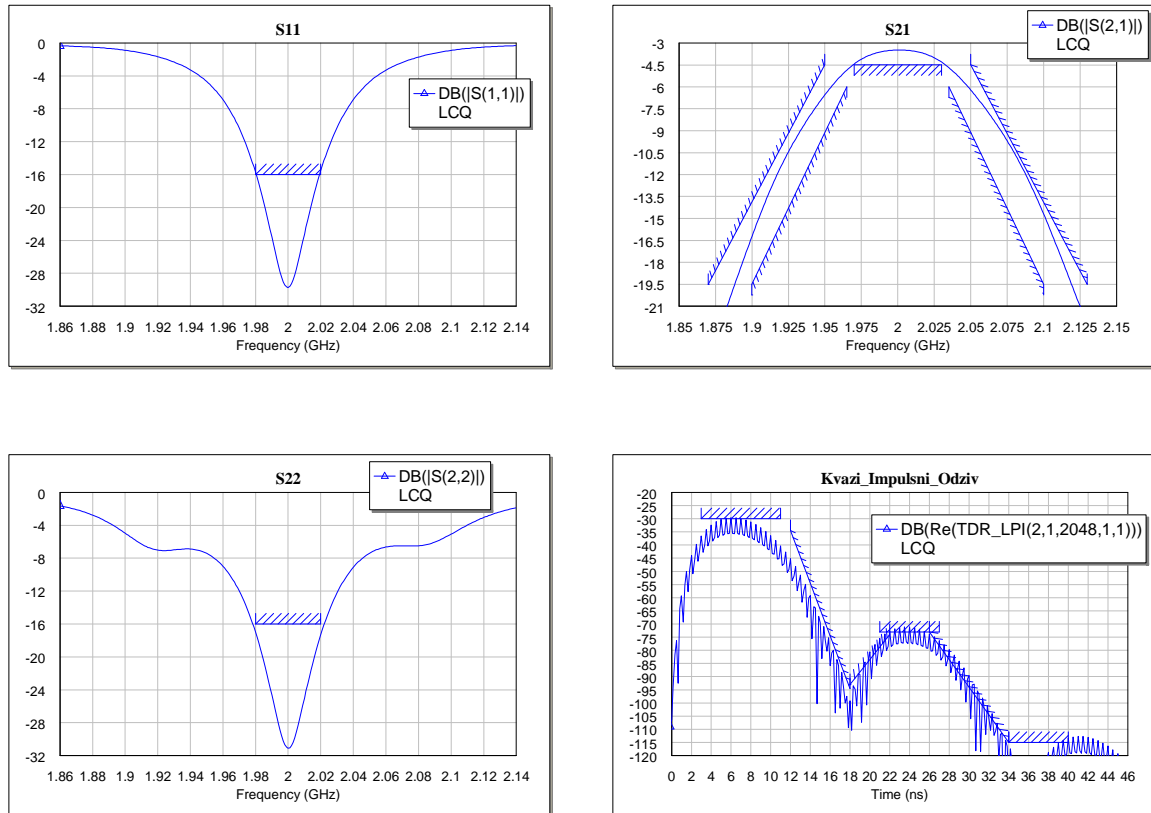
S1 [mm]	0,25	0,2
S2 [mm]	2,54	2,54
S3 [mm]	0,63	0,63
S4 [mm]	2,54	2,54
S5 [mm]	0,45	0,45
S6 [mm]	2,54	2,54
S7 [mm]	0,3	0,27
S8 [mm]	2,54	2,54
S9 [mm]	0,125	0,13
L [mm]	22,9	22,86
W23 [mm]	0,88	0,9
L23 [mm]	2,54	2,54
W45 [mm]	0,88	0,96
L45 [mm]	2,54	2,54
W67 [mm]	0,88	0,89
L67 [mm]	2,54	2,54
W89 [mm]	0,59	0,61
L89 [mm]	2,54	2,54
Wport1 [mm]	0,87	0,87
Lport1 [mm]	5	5
Wport2 [mm]	0,87	0,87
Lport2 [mm]	5	5



Слика 31. Оптимални једнослојни поклопљени филтар са укосницама.



Слика 32. Карактеристике оптималног једнослојног поклопљеног филтра са укосницама.



Слика 33. Циљеви (критеријуми) оптимизације једнослојног поклопљеног филтра са укосницама.

Савијени вишеслојни поклопљени филтар

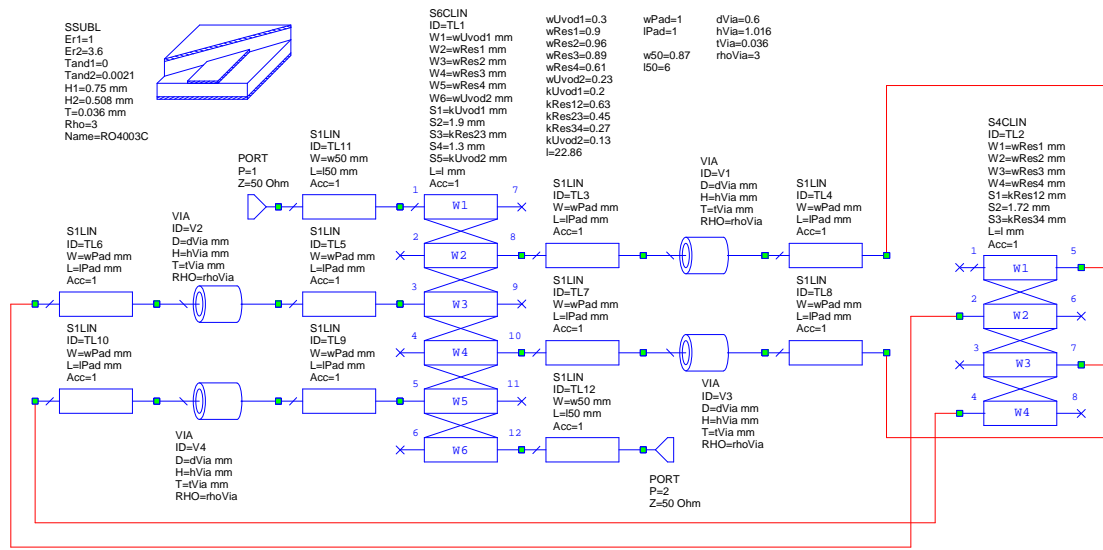
На основу оптималног једнослојног поклопљеног филтра са укосницама добијене су димензије савијеног вишеслојног поклопљеног филтра, који је приказан на слици 34. Карактеристике филтра су приказане на слици 35. Растојање кракова несуседних резонатора је бирано да буде највеће могуће.

На слици 36 су приказане, ради поређења, карактеристике савијеног вишеслојног поклопљеног филтра и LC-филтра пропусника опсега учестаности са резонаторима коначног фактора добротe.

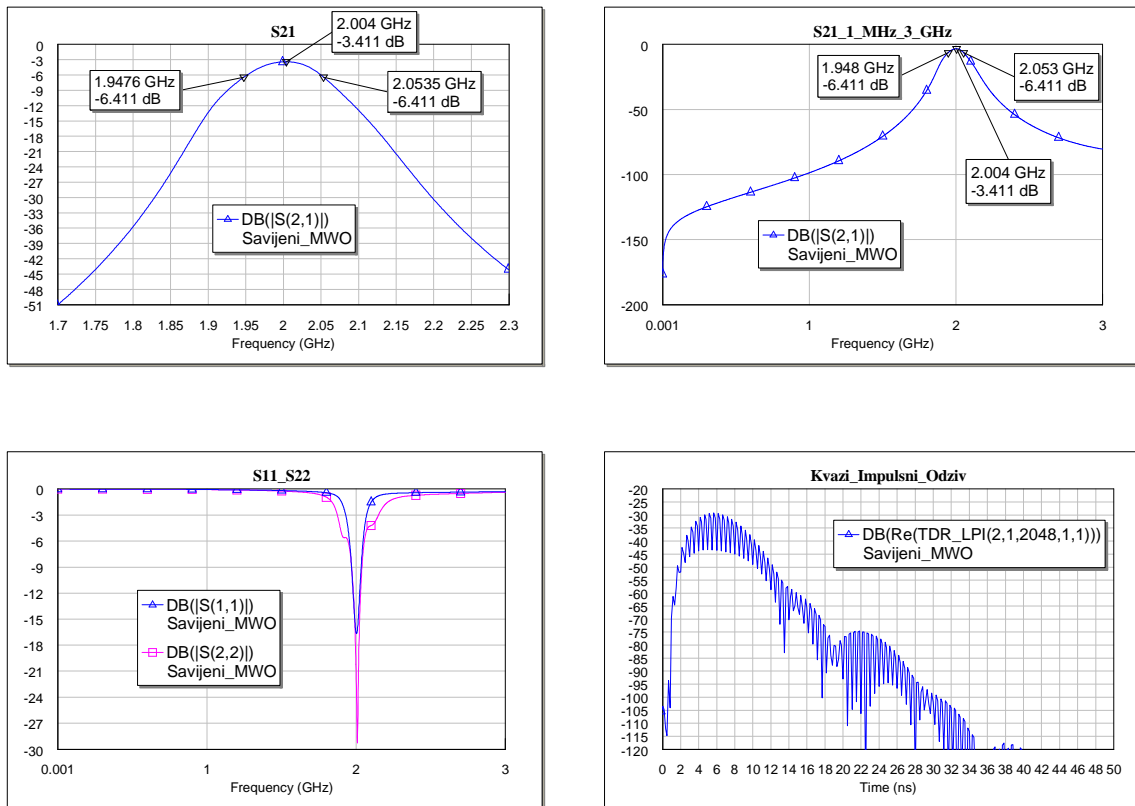
Филтар се реализује као оклопљена структура, па је потребно проценити доњу међу резонантне

учестаности кутије-оклопа. На основу израза $f_r = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}$, ако је $a = 27,5$ mm

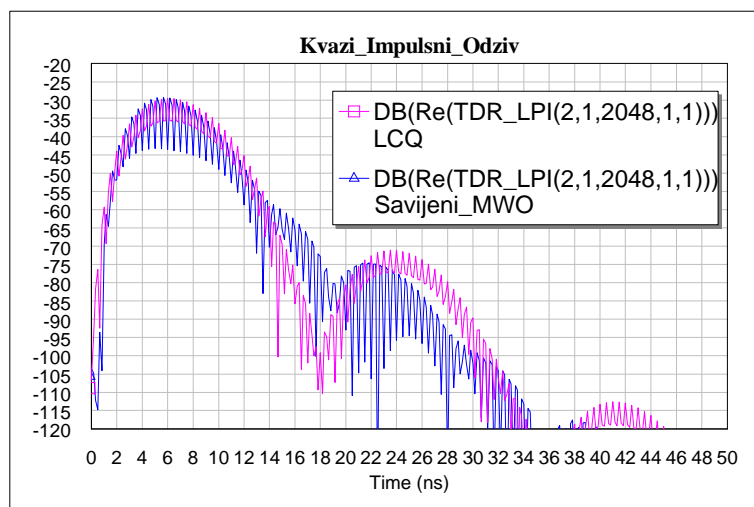
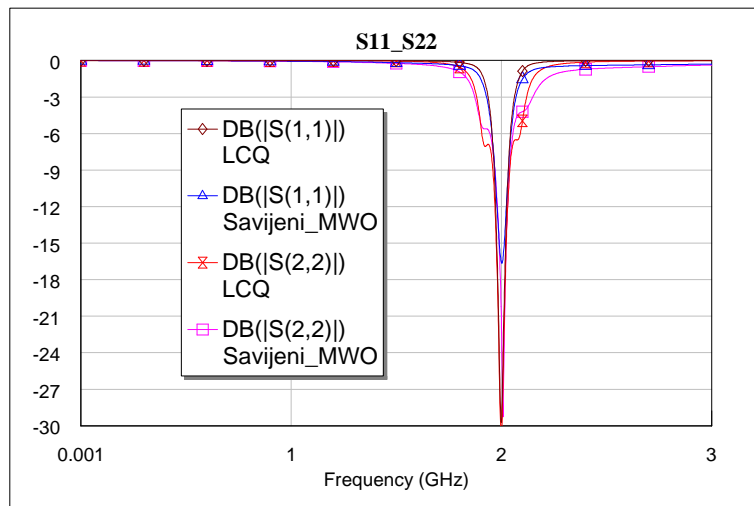
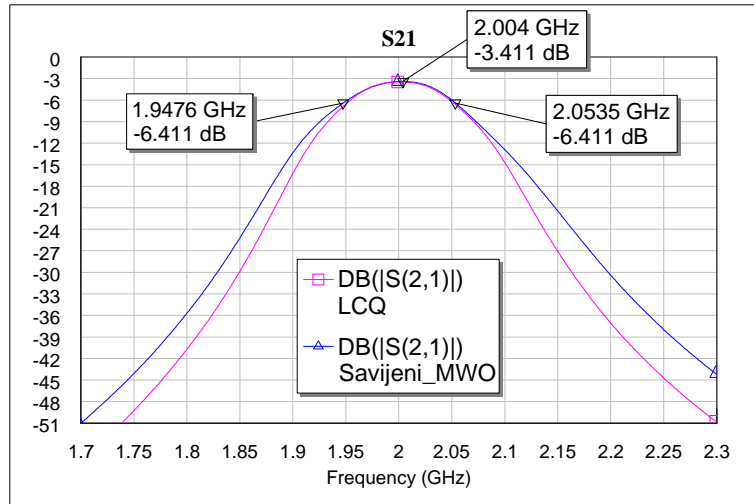
ширина кутије, $b = (0,75 + 0,508)$ mm висина кутије, $l = 33$ mm дужина кутије, $\epsilon_r = 3,6$ mm релативна пермитивност диелектрика који испуњава целу кутију, $m = 1$, $n = 0$ и $p = 1$, добија се $f_r = 3,74$ GHz. Добијена учестаност је ван опсега $0 < f < 3$ GHz који је од интереса у овом истраживању.



Слика 34. Савијени вишеслојни поклопљени филтар.



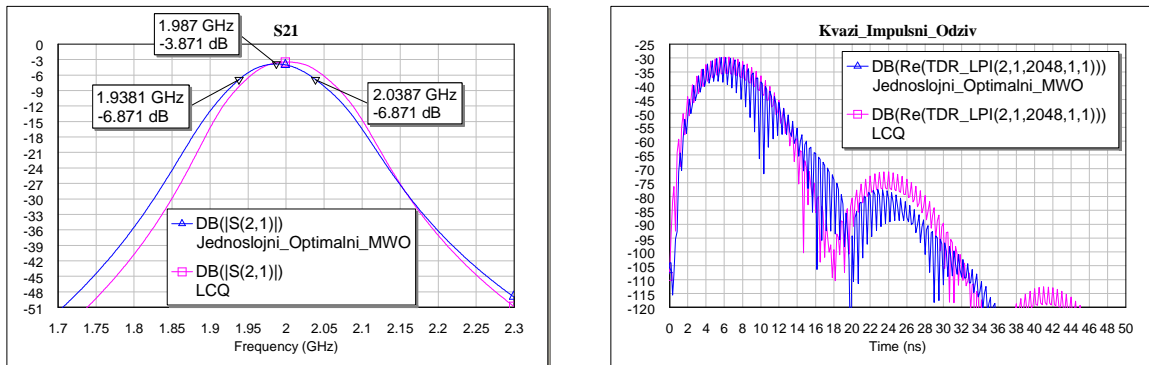
Слика 35. Карактеристике савијеног вишеслојног поклопљеног филтра.



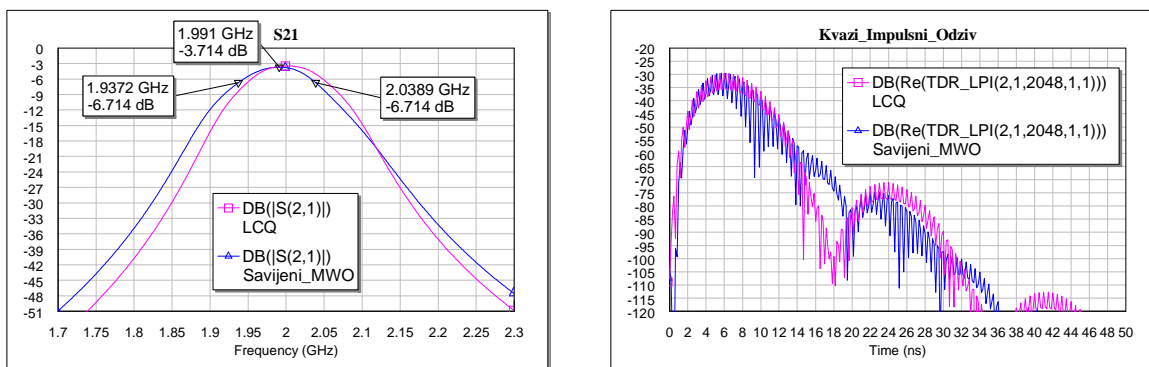
Слика 36. Поређење карактеристика савијеног вишеслојног и LC-филтра пропусника опсега учестаност.

Утицај дебљине метализације на карактеристике филтра

У спецификацији филтра је дебљина метализације бакарних проводника $t = 36 \mu\text{m}$ и за ову вредност су израчунате димензије реализације. На сликама 37 и 38 су приказане карактеристике филтра када је металација два пута тања.



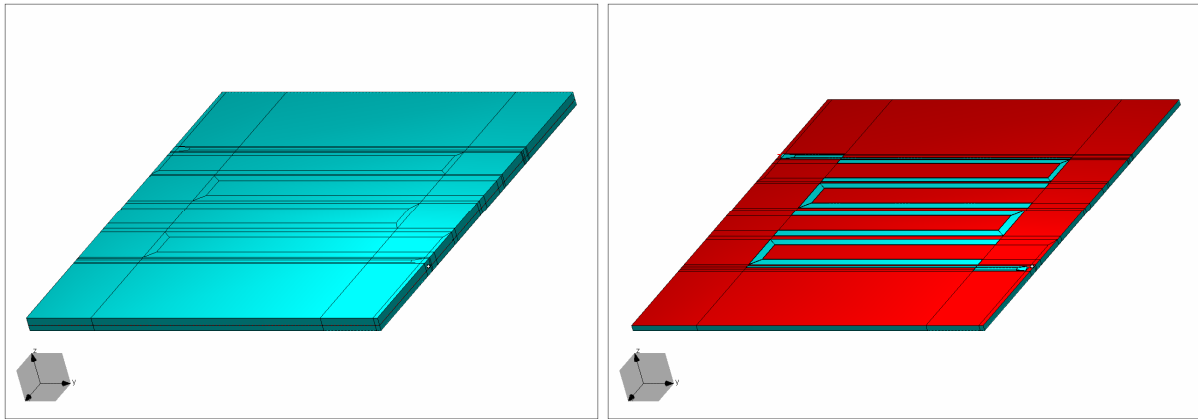
Слика 37. Карактеристике оптималног једнослојног поклопљеног филтра са укосницама када је металација бакарних проводника $t = 18 \mu\text{m}$.



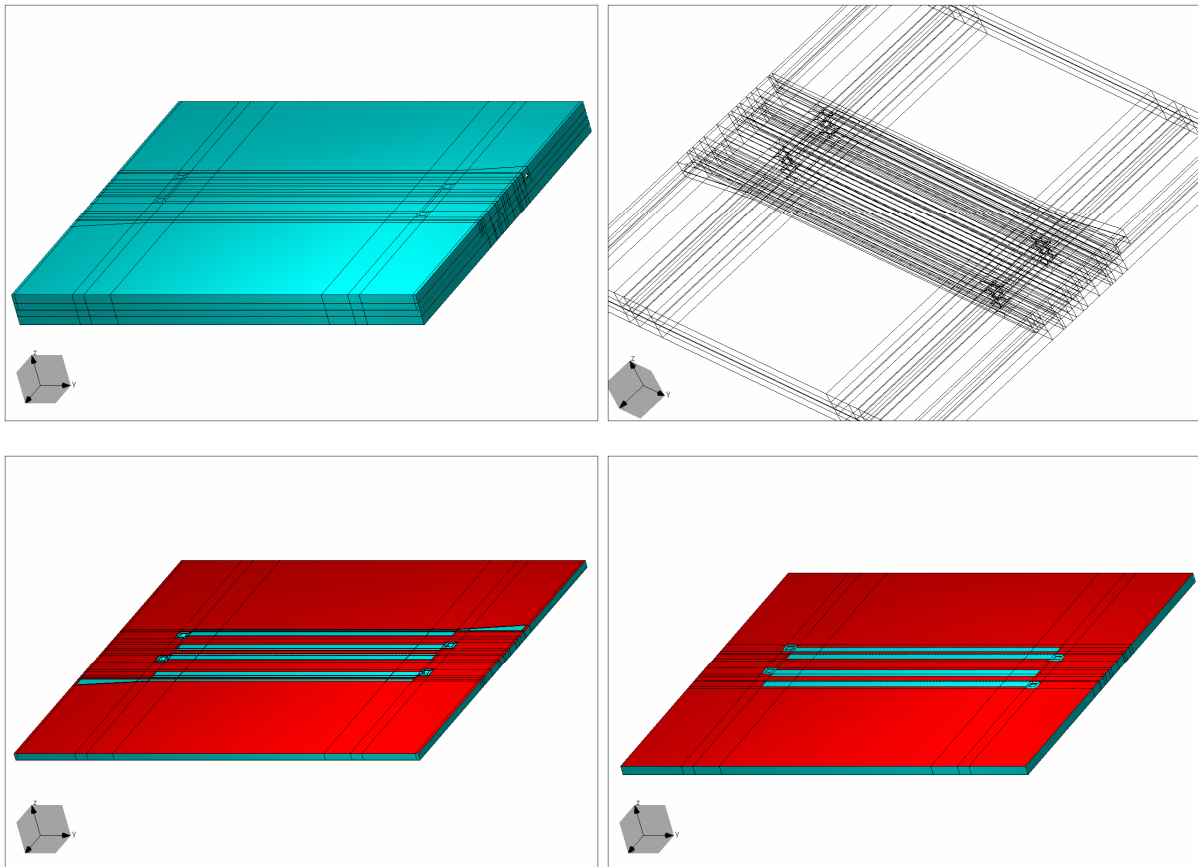
Слика 38. Карактеристике савијеног вишеслојног поклопљеног филтра када је металација бакарних проводника $t = 18 \mu\text{m}$.

Тродимензионални електромагнетски модел и симулација

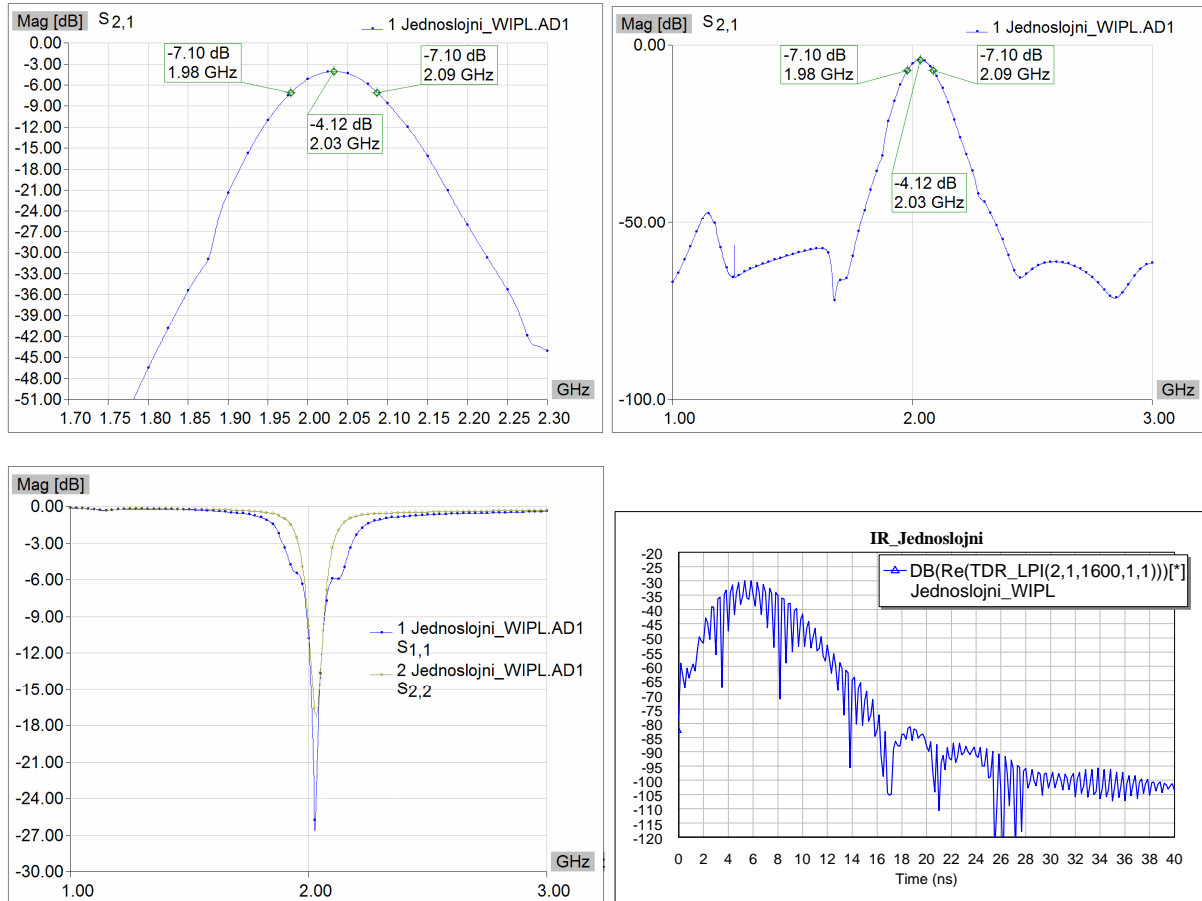
Тродимензионални електромагнетски модели оптималног једнослојног поклопљеног филтра са укосницама и савијеног вишеслојног поклопљеног филтра су приказани на сликама 39 и 40. Карактеристике филтара су приказане на сликама 41 и 42.



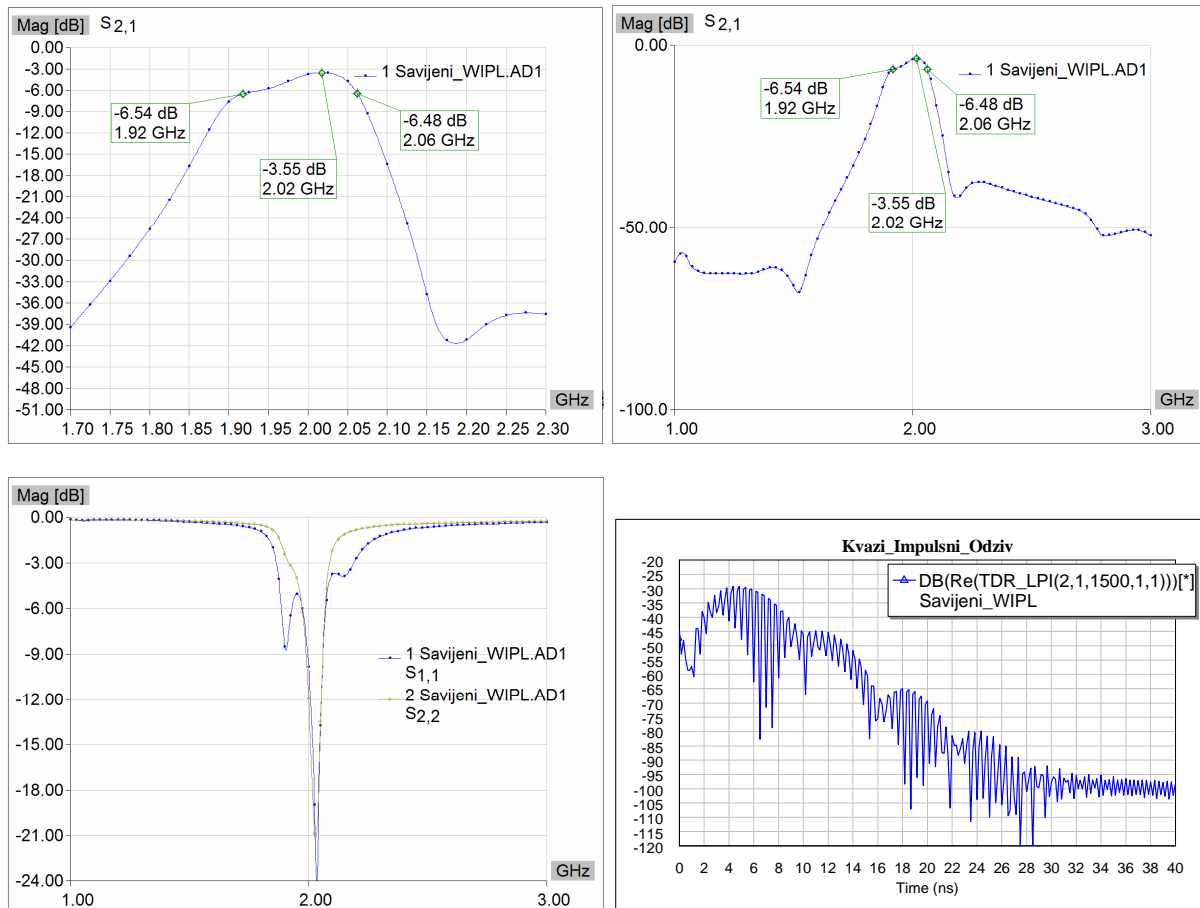
Слика 39. Модел оптималног једнослојног поклопљеног филтра са укосницама за 3Д ЕМ симулацију програмом WIPL-D Pro v8.0.



Слика 40. Модел савијеног вишеслојног поклопљеног филтра за 3Д ЕМ симулацију програмом WIPL-D Pro v8.0.



Слика 41. Карактеристике оптималног једнослојног поклопљеног филтра са укосницама добијене 3Д ЕМ симулацијом програмом WIPL-D Pro v8.0.



Слика 42. Карактеристике савијеног вишеслојног поклопљеног филтра добијене 3Д ЕМ симулацијом програмом WIPL-D Pro v8.0.

Литература

- [1] “Focus on Filters”, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 2, April 2007.
- [2] “All the World is a Filter”, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, Oct. 2007.
- [3] P. Jarry and J. Beneat, *Advanced Design Techniques and Realizations of Microwave and RF Filters*, Wiley, 2008.
- [4] М. Потребих, А. Ђорђевић, Д. Тошић, „Лабораторијски прототип микроталасног филтара”, техничко решење, фаза 6, активност 23, пројекат ТР-11021, 2009.
- [5] М. Потребих, Д. Тошић, А. Ђорђевић, Б. Колунџија, В. Петровић, М. Николић, „Развој нове методе за пројектовање вишеслојних микроталасних филтара са минималном имплементационом површином”, техничко решење, фаза 9, активност 31, пројекат ТР-11021, 2010.
- [6] J. D. Rhodes, “Prototype filters with a maximally flat impulse response”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 17, no. 4, pp. 421–427, 1989.
- [7] В. В. Петровић, Д. В. Тошић, А. Р. Ђорђевић, *Микроталасна пасивна кола*, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Београд, 2010, http://www.etf.rs/etf_files/udzbenici/MPK_2010.pdf.
- [8] D. G. Swanson, Jr., “Narrow-band microwave filter design”, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 105–114, Oct. 2007.
- [9] A. R. Djordjević, M. B. Baždar, R. F. Harrington, Tapan K. Sarkar, *LINPAR for Windows 2.0, Matrix Parameters for Multiconductor Transmission Lines*, Software and User’s Manual, Artech House, 1999.

Алгоритам је развијен на Електротехничком факултету у Београду у оквиру текућег пројекта бр. ТР-11021 код Министарства за науку и технолошки развој

Штампано децембра 2010.