

Микроталасни филтри са квази-концентрисаним елементима

Одбрана докторска дисертације

Кандидат:

мр Дејан Миљановић

Ментор:

др Милка Потребих, ванр.проф.

Београд, 2015.



Предмет истраживања

Микроталасни филтри пропусници опсега учестаности реализовани помоћу квази-концентрисаних елемената, а имплементирани у вишеслојној штампаној техници

Актуелност теме

часописи

Издања IEEE Microwave Magazine:

- “Focus on Filters”, vol. 8, no. 2, April 2007.
- “All the World is a Filter”, vol. 8, no. 5, Oct. 2007.
- “Microwave Filter Synthesis”, vol. 12, no. 6, Oct. 2011.

АКТУЕЛНОСТ ТЕМЕ

монографије

- I. Hunter, *Theory and design of microwave filters*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- D. M. Pozar, *Microwave and RF wireless systems*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- J.-S. Hong, *Microstrip filters for RF/microwave applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- R. J. Cameron, C. M. Kudsia, R. R. Mansour, *Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- R. E. Collin, *Foundations for microwave engineering*. New York: McGraw-Hill, 1992; reprinted by John Wiley - IEEE Press, 2001.

Актуелност теме

релевентни библиографски извори

- D. G. Swanson, “**Narrow-band microwave filter design**”, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 105–114, 2007.
- Q.-X. Chu, H. Wang, “**A compact open-loop filter with mixed electric and magnetic coupling**”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 2, pp. 431–439, 2008.
- A. Djaiz, T. A. Denidni, “A new compact **microstrip two-layer bandpass filter** using aperture-coupled SIR-hairpin resonators with transmission zeros”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 5, pp. 1929–1936, 2006.
- S.-C. Lin, C.-H. Wang, C. H. Chen, “Novel **patch-via-spiral resonators** for the development of miniaturized bandpass filters with transmission zeros”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 1, pp. 137–146, 2007.

Актуелност теме

релевентни библиографски извори

- C.-H. Chen, C.-H. Huang, T.-S. Horng, S.-M. Wu, J.-Y. Li, C.-C. Chen, C.-T. Chiu, C.-P. Hung, “Very compact stacked **LC resonator-based bandpass filters** with a novel approach to tune the transmission zeros”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 293–295, 2009.
- H.-W. Liu, Y. Wang, X.-M. Wang, J.-H. Lei, W.-Y. Xu, Y.-L. Zhao, B.-P. Ren, X.-H. Guan, “Compact and high selectivity **tri-band bandpass filter** using multimode stepped-impedance resonator”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 536–538, 2013.
- Y.-F. Chen, S.-H. Huang, H.-W. Wu, H.-Y. Lee, “Design of compact **tri-band bandpass filter using multilayer substrate technique**”, in *Proceedings of the 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC '13)*, 5–8 November, 2013, Seoul, South Korea, pp. 527–529.
- C.-H. Chen, C.-H. Huang, T.-S. Horng, S.-M. Wu, “Highly miniaturized **multiband bandpass filter design based on a stacked spiral resonator** structure”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 5, pp. 1278–1286, 2012.

Циљ истраживања

- Приједлог новог метода реализације микроталасних филтара пропусника опсега учестаности са спрегнутим квази-концентрисаним резонаторима
- Развој новог алгоритма пројектовања филтара кориштењем еквивалентних шема.
- Експеримантална верификација фабрикованог филтра.

Значај истраживања

- Микроталасни филтри су неизоставни дио практично свих комуникационих система.
- Предвиђени опсег намјене: 1.6 GHz (GPS), 0.9 GHz, 1.8 GHz, 1.9 GHz, 2.1 GHz (GSM, UMTS, WCDMA), 2.4 GHz, 5.8 GHz (WiFi), 3.5 GHz (WiMax).
- Минијатуризација као основни захтјев

Примјене методе пројектовања микроталасних филтара

- Пројектовање микроталасних филтра са спрегнутим резонаторима помоћу Dishal-овог метода.
- Развој еквивалентних електричних шема резонатора и цијелог филтра.
- Пројектовање микроталасних филтра са спрегнутим резонаторима помоћу еквивалентних шема.
- Испитивање перформанси филтра на основу симулационог модела на нивоу микроталасног кола у софтверском алату.
- Симулација структуре филтра у софтверском алату за прецизну тродимензионалну електромагнетску симулацију.
- Оптимизација и подешавање симулационих модела филтра у циљу задовољења спецификација филтра.
- Експериментална верификација пројектованог филтра мјерењем на фабрикованом лабораторијском прототипу.

Остварени научни доприноси- нов метод пројектовања микроталасних филтара

- **Нов метод** пројектовања микроталасних филтара пропусника опсега учестаности помоћу еквивалентних шема.
- Пројектовани филтри имају **боље карактеристике** у односу на карактеристике објављене у доступној литератури, сходно критеријумима поређења

Остварени научни доприноси-

Нов алгоритам у циљу верификације предложеног метода

- Реализација резонатора и филтра помоћу еквивалентних електричних шема
- Успостављање везе између вриједности шеме и димензија елемента 3D ЕМ модела
- Пројектовање филтра помоћу еквивалентних електричних шема

Остварени научни доприноси- нов лабораторијски прототипи у циљу експерименталне верификације

- Реализација **новог резонатора**
- Реализација **филтра са једним пропусним опсегом**
- Реализација **филтра са три пропусна опсега**

Верификација научних доприноса

Рад у међународном часопису категорије М22

- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Design of microwave multibandpass filters with quasilumped resonators”, -*Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, article ID 647302, 14 pages, 2015, (IF₂₀₁₃=1.082) (DOI: 10.1155/2015/647302, Print ISSN: 1024-123X, Online ISSN: 1563-5147). [online]
<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/647302/cta>

Верификација научних доприноса

Рад у међународном часопису категорије М23

- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, Z. Stamenković, “Design of miniaturized bandpass filters using quasi-lumped multilayer resonators”, -*Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 23, no. 6, pp. (1450083) 1–21, 2014. (IF₂₀₁₃=0.330) (DOI: 10.1142/S0218126614500832, Print ISSN: 0218-1266, Online ISSN: 1793-6454), [online]
<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218126614500832>

Верификација научних доприноса

Рад у националном часопису категорије М52

- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Projektovanje filtra propusnika opsega učestanosti sa *kvazi*-koncentrisanim rezonatorima korišćenjem zamjenske šeme”, -*Tehnika*, vol. 69, no. 3, pp. 459–465, 2014. (ISSN: 0040-2176, UDC: 621.372.544). [online]
<http://www.sits.org.rs/include/data/docs1093.pdf>

Верификација научних доприноса

3 рада у зборnicима међународне конференције категорије МЗЗ

- S. Grković, D. Miljanović, S. Stefanovski, M. Potrebić, D. V. Tošić, “WIPL-D modelovanje višeslojnog filtra sa interdigitalno spregnutim uvodnicima”, -*Proc. 21st Telecommunications Forum (TELFOR 2013)*, Belgrade, Serbia, November 26–28, 2013, pp. 900–903. (DOI: 10.1109/TELFOR.2013.6716376, Print ISBN: 978-1-4799-1419-7 [online] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6716376&queryText%3D10.1109%2FTELFOR.2013.6716376>)
- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, Z. Stamenković, “Feeder realization for quasi-lumped multilayer resonators with low Q -factor”, -*Proc. 11th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing (CSECS '12)*, Montreux, Switzerland, December 29–31, 2012, pp. 63–68. (ISBN: 978-1-61804-146-3) [online] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2012/Montreux/ACSAM/ACSAM-09.pdf>
- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Faktor dobrote kvazi-koncentrisanog višeslojnog rezonatora sa induktivnim uvodnikom”, -*Proc. 20th Telecommunications forum (TELFOR 2012)*, Belgrade, Serbia, November 20–22, 2012, pp. 1139–1142. (DOI: 10.1109/TELFOR.2012.6419412, Print ISBN: 978-1-4673-2983-5) [online] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6419412&queryText%3D10.1109%2FTELFOR.2012.6419412>

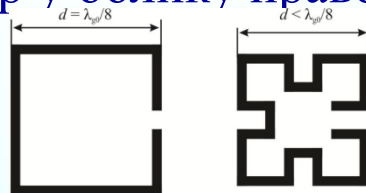
Верификација научних доприноса

4 рада у зборnicима националних конференција категорије M63

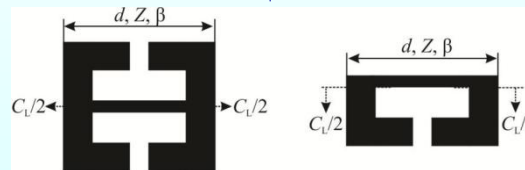
- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Zamjenske šeme spregnutih mikrotalasnih kvazi-koncentrisanih rezonatora”, -*Zbornik XIII međunarodnog naučno-stručnog simpozijuma INFOTEH-JAHORINA 2014*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, Mart 19–21, 2014, vol. 13, str. 471–475. (ISBN: 978-99955-763-3-2)[online] <http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2014/radovi/KST-3/KST-3-1.pdf>
- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Realizacije uvodnika za višeslojni rezonator sa širokim opsegom vrijednosti Q-faktora”, -*Zbornik 57. konf. ETRAN*, Zlatibor, Srbija, 3–6 jun, 2013, str. MT 3.5. 1–4. (ISBN: 978-86-80509-68-6) [online] <http://etran.etf.rs>
- D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Mikrotalasni filter realizovan u višeslojnoj tehnici sa kapacitivno spregnutim uvodnikom”, -*Zbornik XII međunarodnog naučno-stručnog simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2013*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, Mart 20–22, 2013, vol. 12, str. 434–438. (ISBN: 978-99955-763-1-8) [online] <http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2013/radovi/KST-3/KST-3-3.pdf>
- Đ. Mirković, D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, “Modelovanje mikrotalasnog filtra sa kvazi-koncentrisanim rezonatorima u softveru WIPL-D”, -*Zbornik 56. konf. ETRAN*, Zlatibor, Srbija, 11–14 jun, 2012, str. MT2.6. 1–4. (ISBN: 978-86-80509-67-9) [online] <http://etran.etf.rs>

Постојеће реализације резонатора и филтара ПО у планарној техници

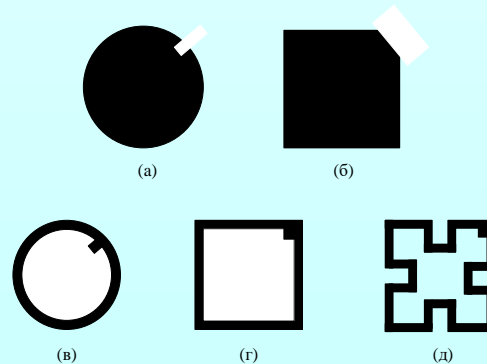
- Полуталасни резонатор у облику правоугаоника или укоснице (open-loop resonator)



- Резонатор реализован као капацитивно оптерећен вод (slow-wave resonator)

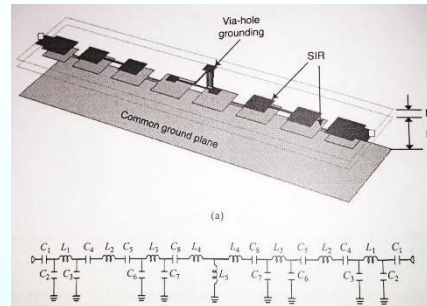


- Резонатор са двије резонантне учестаности (dual-mode resonator)

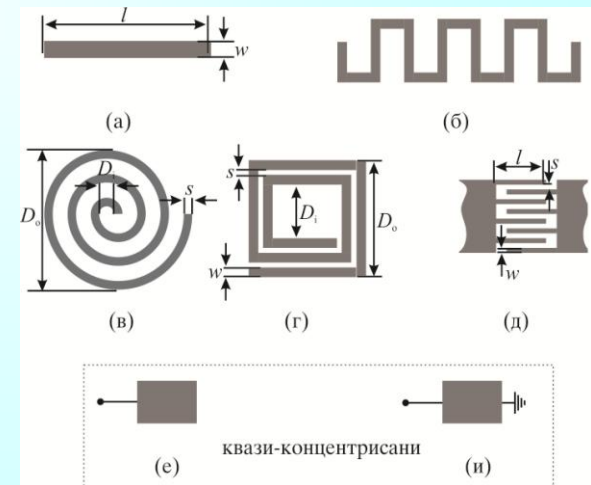


Постојеће реализације резонатора и филтара ПО у планарној техници

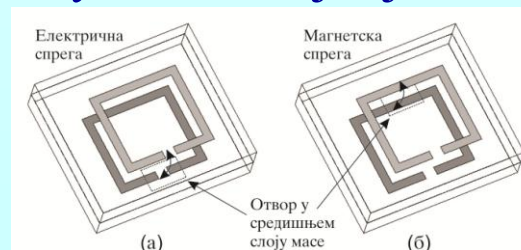
- Филтри реализовани каскадном секцијом водова (Stepped-impedance)



- Резонатори са концентрисаним и квази-концентрисаним елементима у микротракастој техници

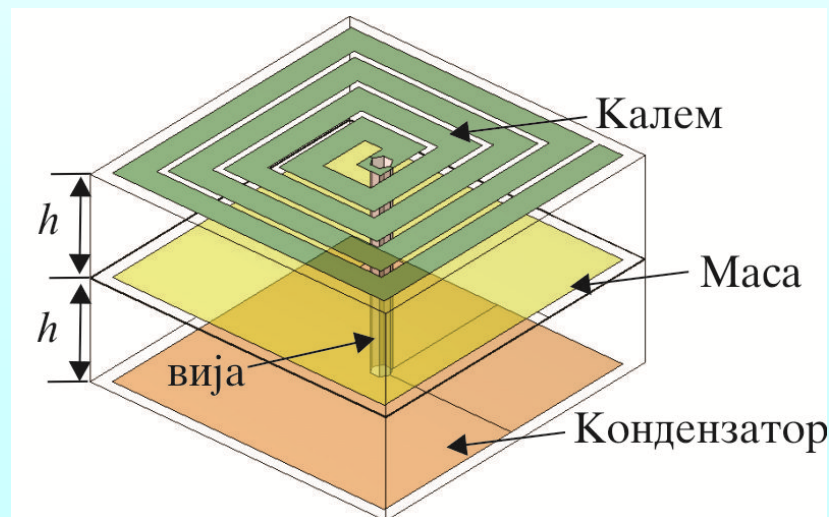


- Филтри реализовани у вишеслојној техници



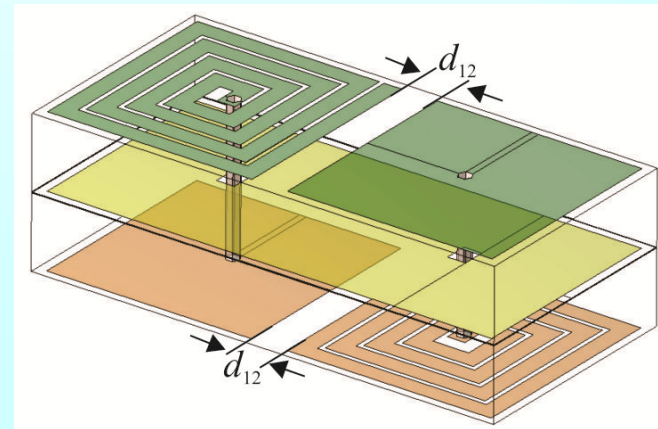
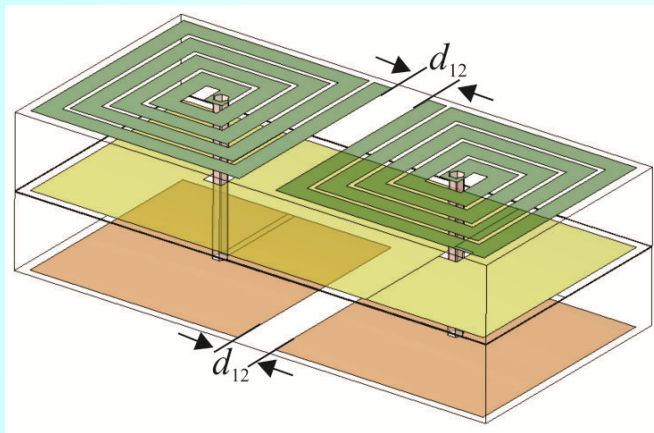
Примјењена техника реализације резонатора

- Планарна вишеслојна микротракаста техника.
- Елементи резонатора реализовани као квази-концентрисане компоненте.



Примјена техника реализације спреге резонатора

- Спрега између резонатора остварена електричном/магнетском спрегом елемената резонатора.



Примјењена метод синтезе филтра

- Dishal-ов метод синтезе филтара са спрегнутим резонаторима (релативно уским пропусним опсезима $<20\%$) [Dishal1951], [Dishal1965]
- Поступак синтезе омогућава да се нађу неопходне геометријске димензије филтра без обзира на циљну технологију реализације помоћу:

- коефицијената спреге два резонатора

$$k_{i,i+1} = \frac{B_{\Delta}}{\sqrt{g_i \cdot g_{i+1}}}, \quad i = 1 \dots (N-1)$$

- Q -фактора оптерећеног резонатора

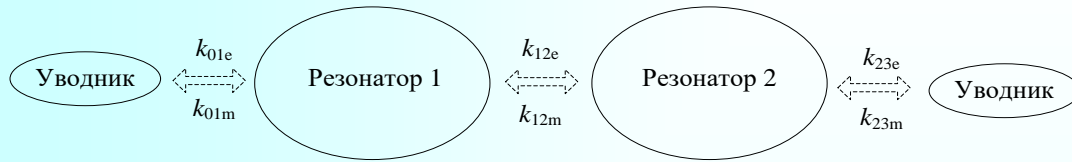
$$Q_{\text{ex1}} = \frac{g_0 \cdot g_1}{B_{\Delta}}$$

$$Q_{\text{exN}} = \frac{g_N \cdot g_{N+1}}{B_{\Delta}}$$

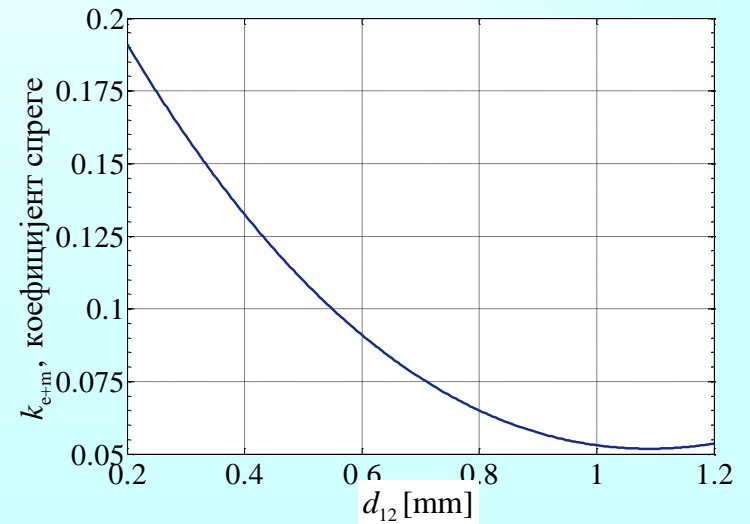
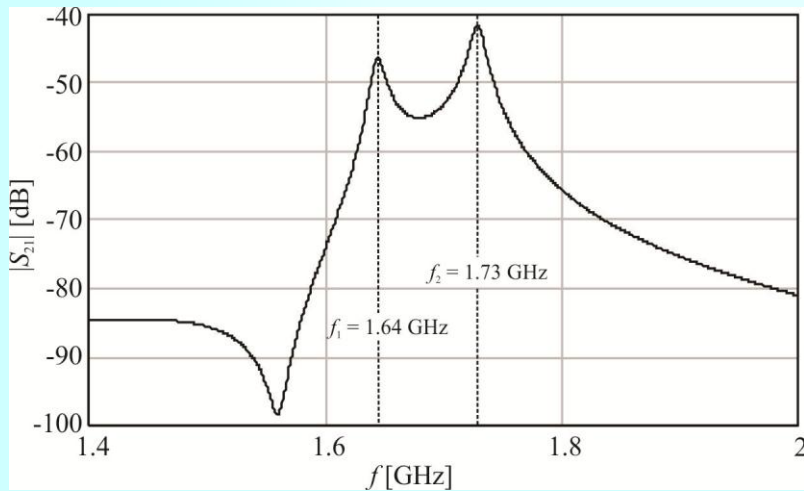
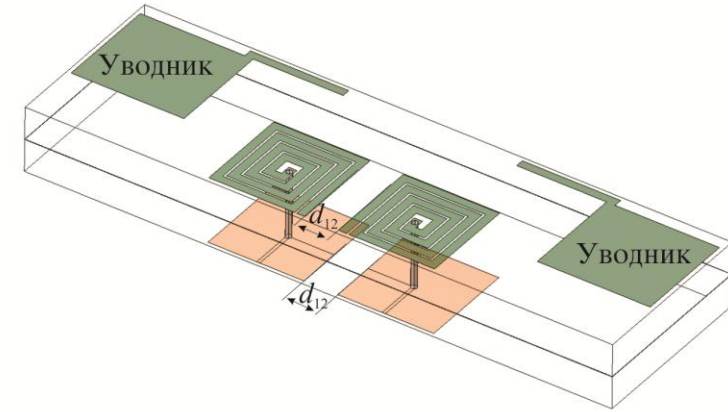
- слабљења на централној учестаности филтра

$$L_{f_0} = \frac{4.343}{B_{\Delta} Q_U} \sum_{i=1}^N g_i \text{ (dB)}$$

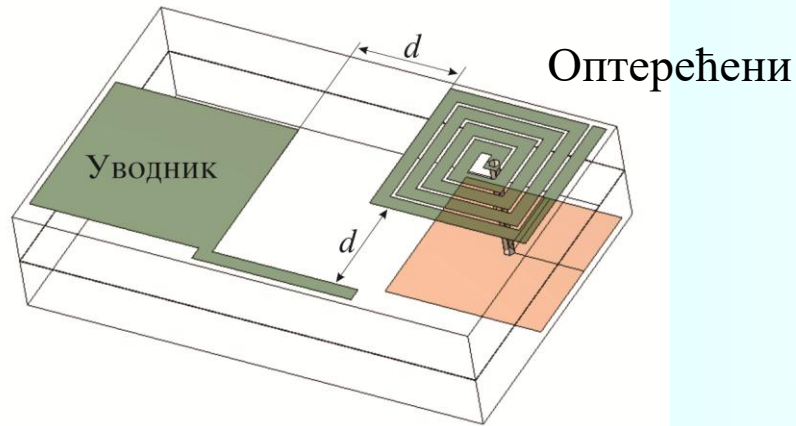
Одређивање коефицијента спреге два резонатора



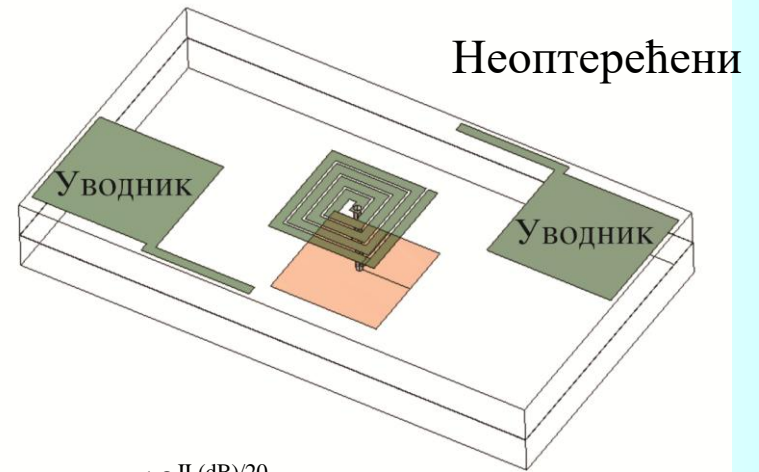
$$k_{e+m} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} = k_e + k_m$$



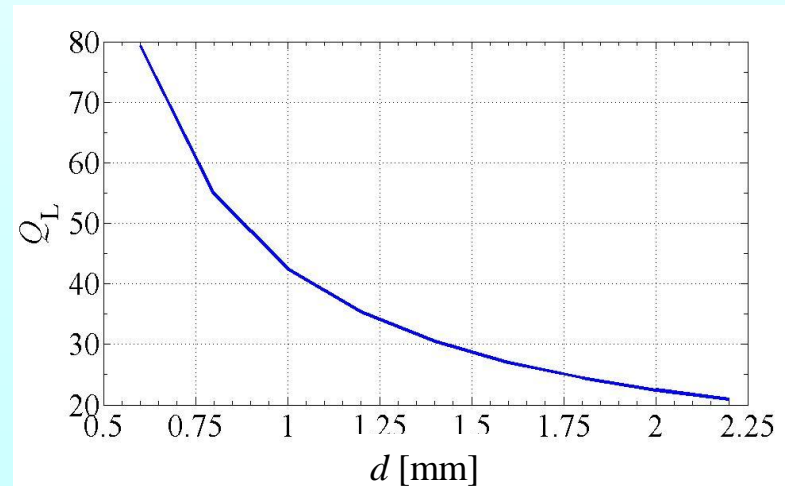
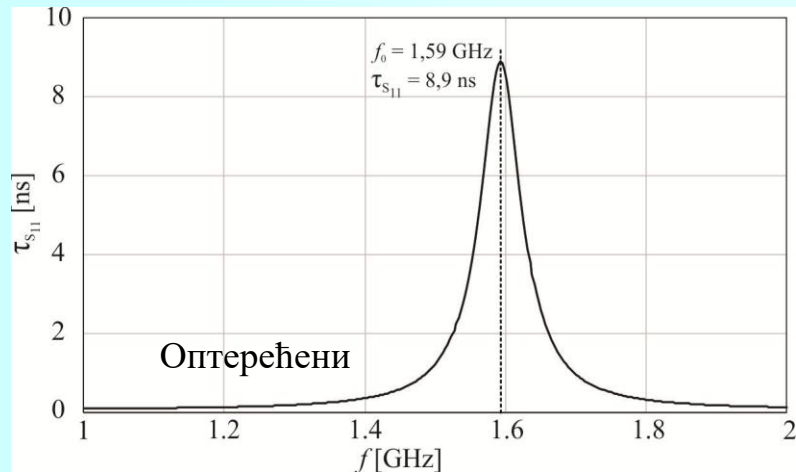
Одређивање Q -фактора оптерећеног/неоптерећеног резонатора



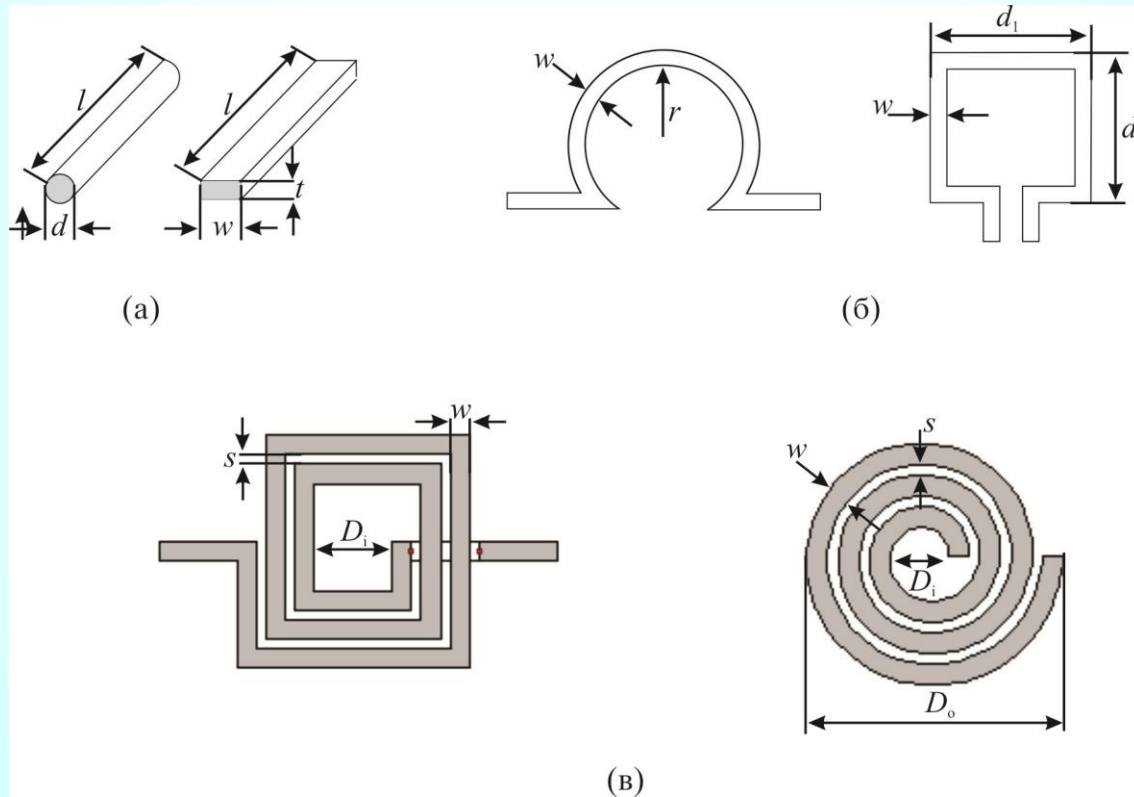
$$Q_L = \frac{\tau_{S_{11}}(\omega_0) \cdot \omega_0}{4}$$



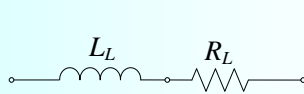
$$Q_U = \pi f_0 \tau_{S_{21}} \frac{10^{IL(dB)/20}}{10^{IL(dB)/20} - 1}$$



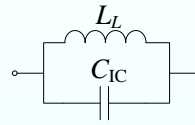
Реализације калема у микротракастој техници/еквивалентне шеме



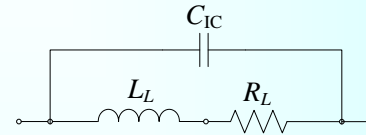
Реализације калема у микротракастој техници/еквивалентне шеме



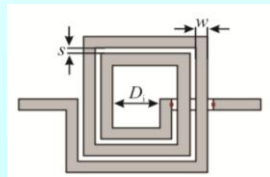
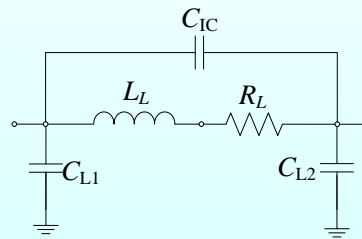
(a)



(б)



(B)

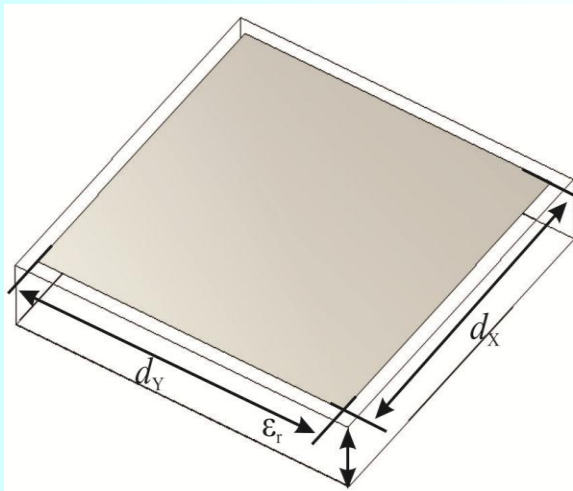


$$R_L (\Omega) = \frac{K I R_{sq}}{2(w+t)}$$

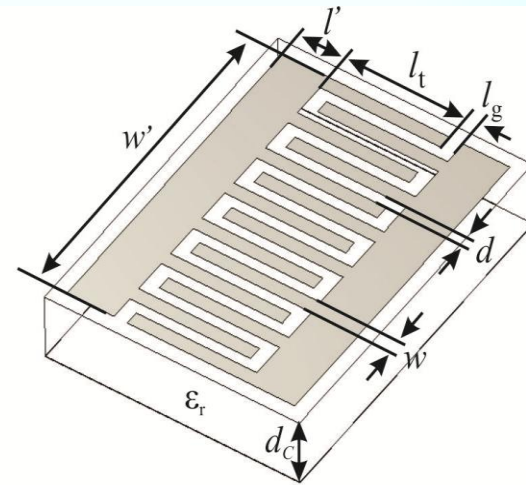
$$C_{IC} = \epsilon_{re} \frac{l t}{s}$$

$$L_L [\text{nH}] = \frac{1.27 \mu_0 N^2}{2} \left(\frac{D_o + D_i}{2} \right) \left(\ln \frac{2.07}{\rho} + 0.18 \rho + 0.13 \rho^2 \right) K_g$$

Реализације кондензатора у микротракастој техници/еквивалентне шеме

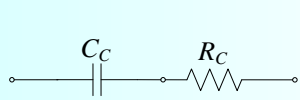


(а)
Одсјечак вода

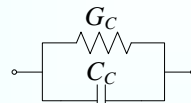


(б)
Интердигитални

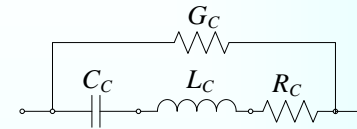
Реализације кондензатора у микротракастој техници/еквивалентне шеме



(a)

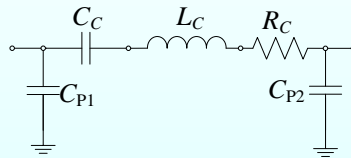


(б)



(в)

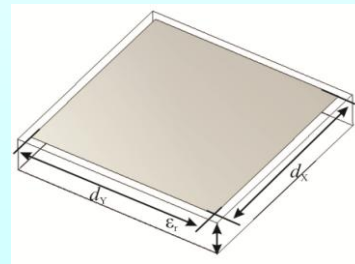
За одсјечак вода



(г)

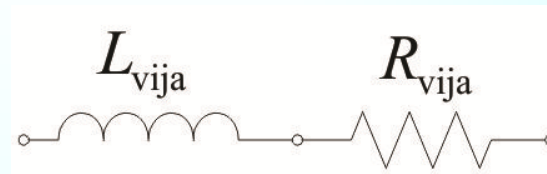
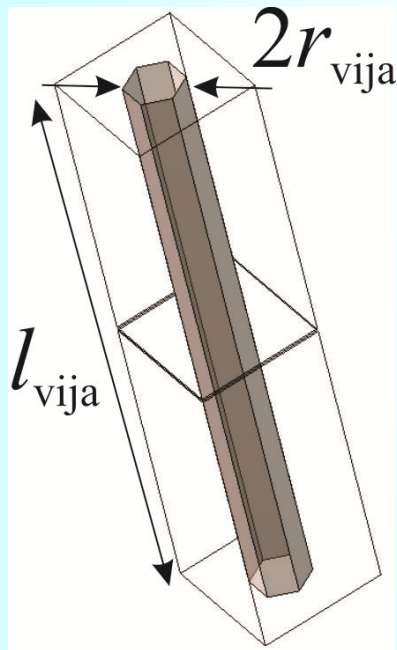
За интердигитални

$$C_C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d_X d_Y}{h}$$



$$C_C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d_X d_Y}{h} \left(1 + \frac{h}{\pi d_X} \left(1 + \ln \left(\frac{2\pi d_X}{h} \right) \right) \right) \cdot \left(1 + \frac{h}{\pi d_Y} \left(1 + \ln \left(\frac{2\pi d_Y}{h} \right) \right) \right)$$

Реализација вије у микротракастој техници/еквивалентна шема



$$L_{vija} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l_{vija} \ln \left(\frac{l_{vija} + \sqrt{r_{vija}^2 + l_{vija}^2}}{r_{vija}} \right) + \frac{3}{2} \left(r_{vija} - \sqrt{r_{vija}^2 + l_{vija}^2} \right) \right]$$

$$R_{vija} = R_{dc} \sqrt{1 + \frac{f}{f_\delta}} = \rho \frac{l_{vija}}{2\pi r_{vija} t} \sqrt{1 + f\pi\mu_0\sigma t^2}$$

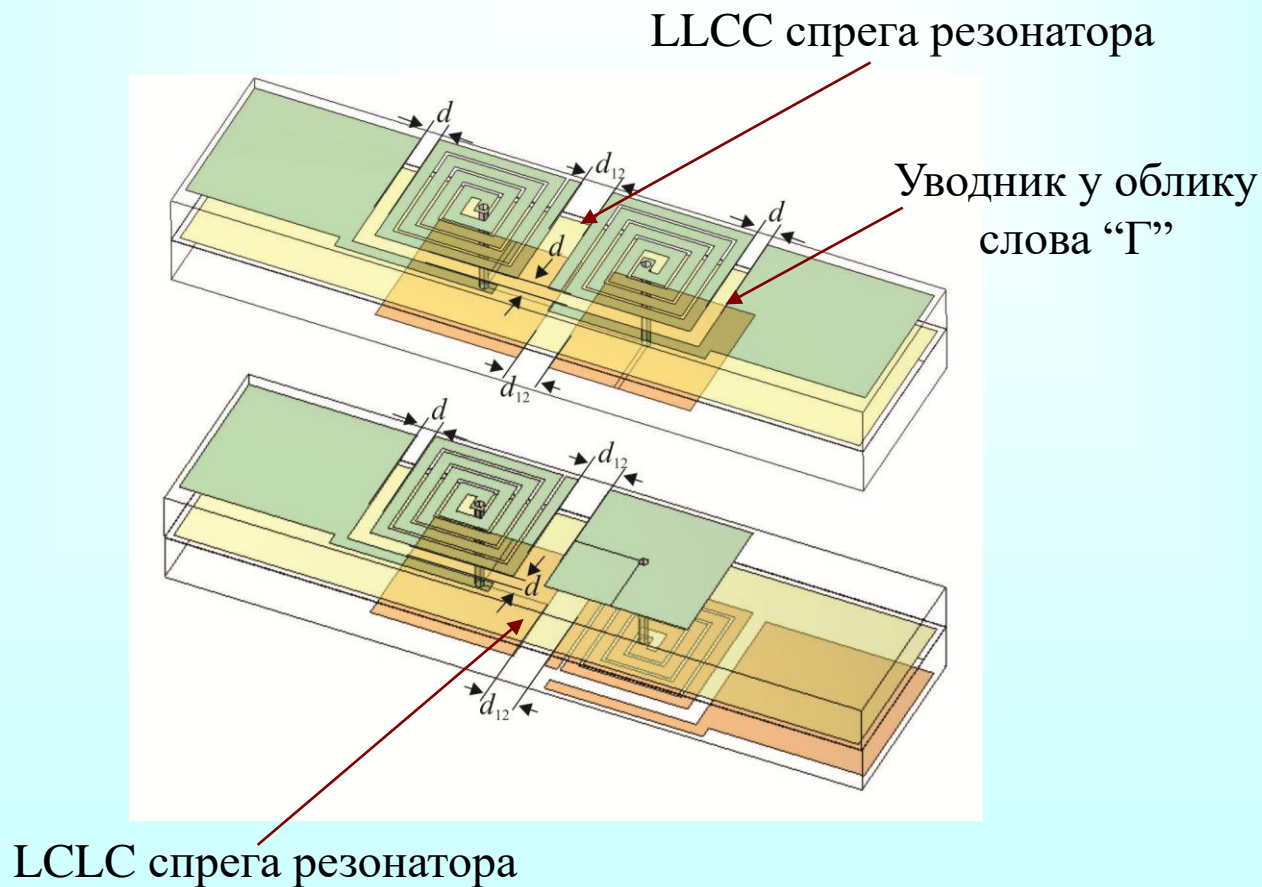
Реализација филтра пропусника опсега учестаности другог реда

- Филтар пропусник опсега учестаности другог реда са **капацитивном спрегом уводника и калема резонатора**
- Филтар пропусник опсега учестаности другог реда са **интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора**
- Филтар пропусник опсега учестаности другог реда са **интердигиталном спрегом уводника и кондензатора резонатора**
- Филтар пропусник **три опсега учестаности** (коришћењем еквивалентних електричних шема)

Подлога: RT/Duroid 5880;

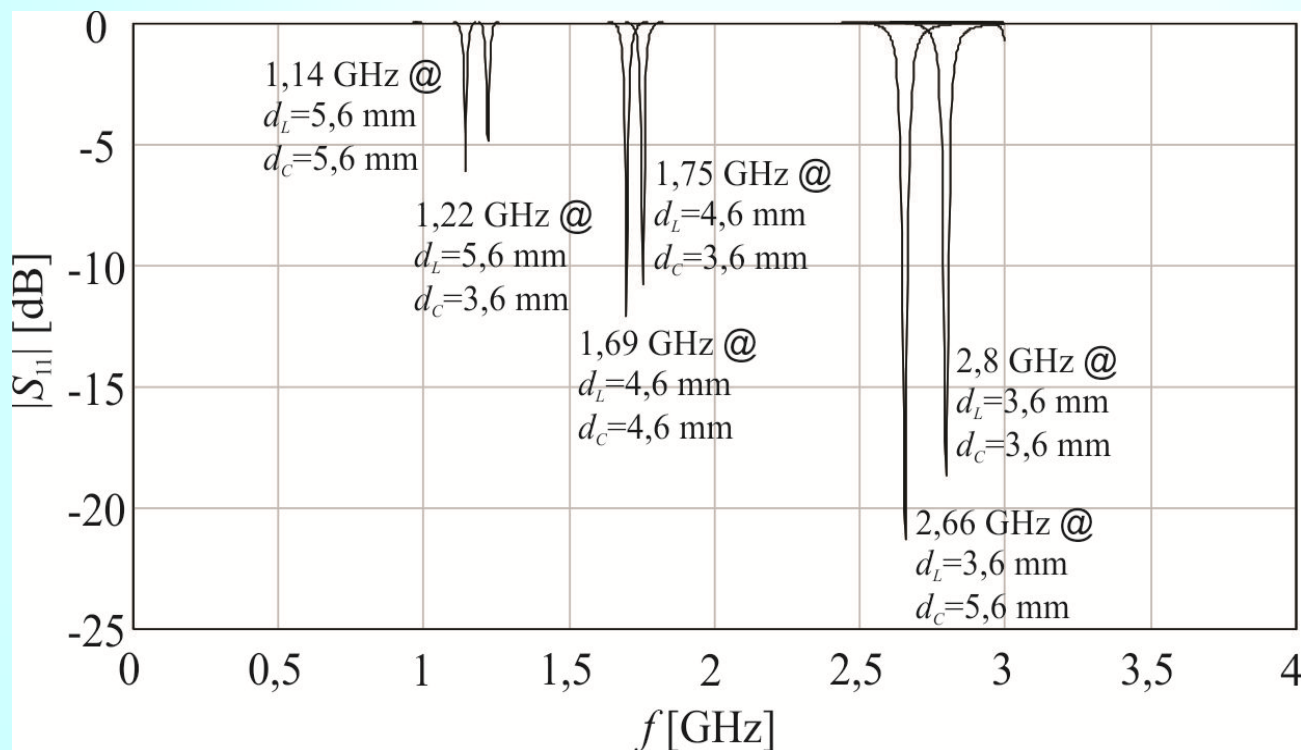
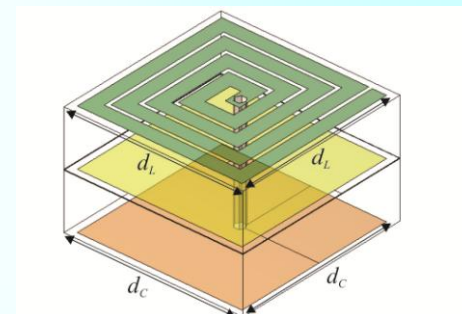
$\epsilon_r = 2,2$, $\text{tg}\delta = 0,001$, $h = 1,575 \text{ mm}$, $t = 18 \mu\text{m}$

Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора -два начина спреге резонатора

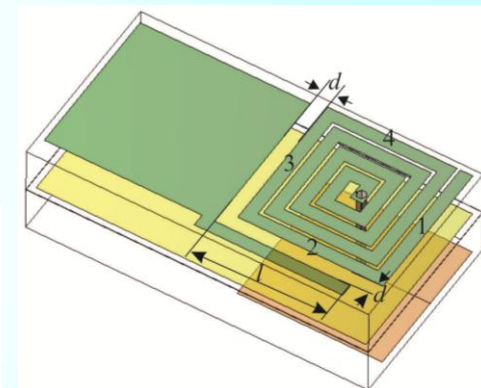
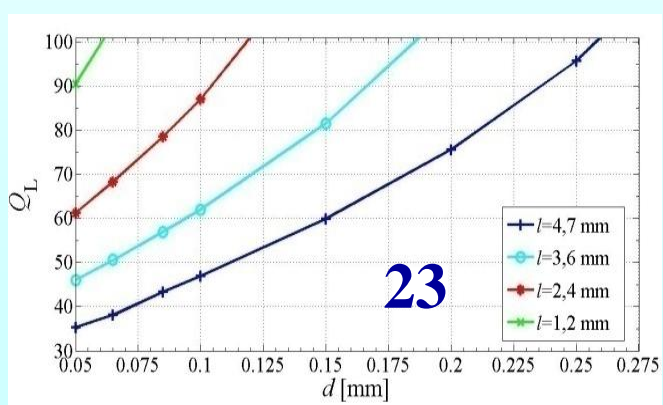
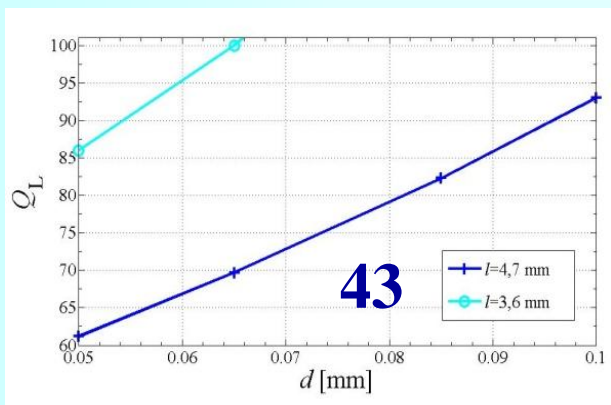
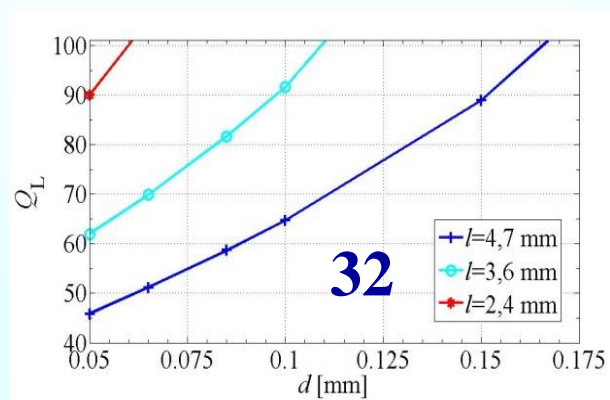
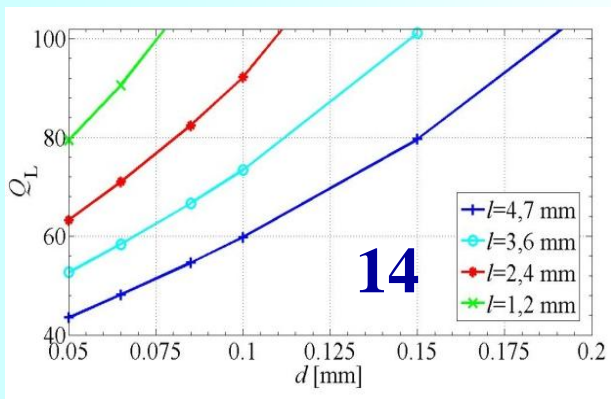


Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора -оствариви фреквенцијски опсег

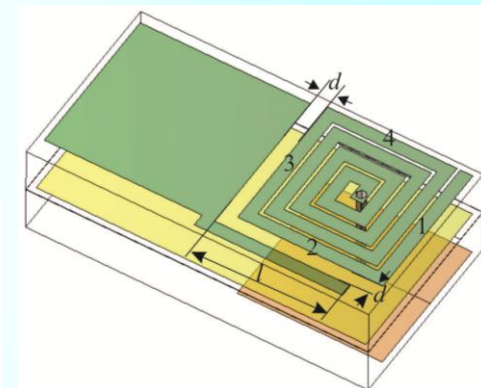
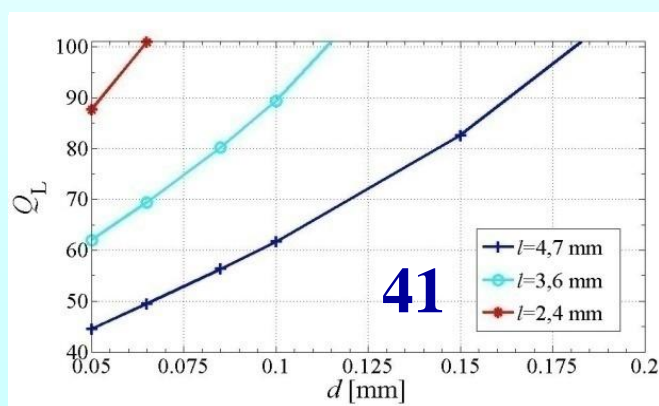
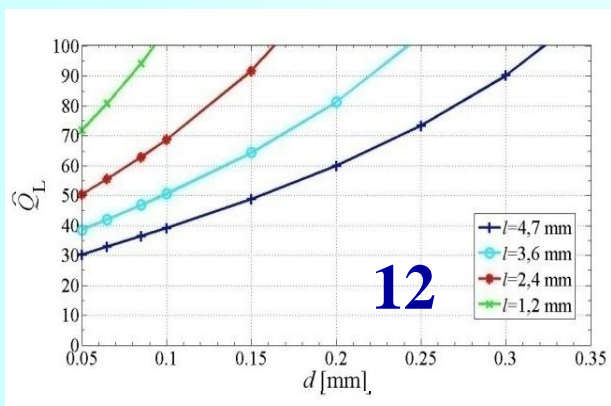
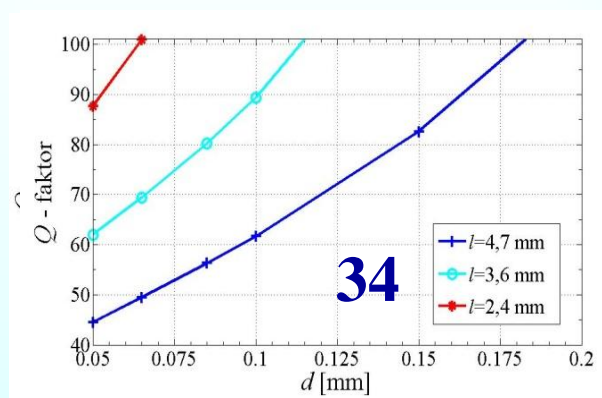
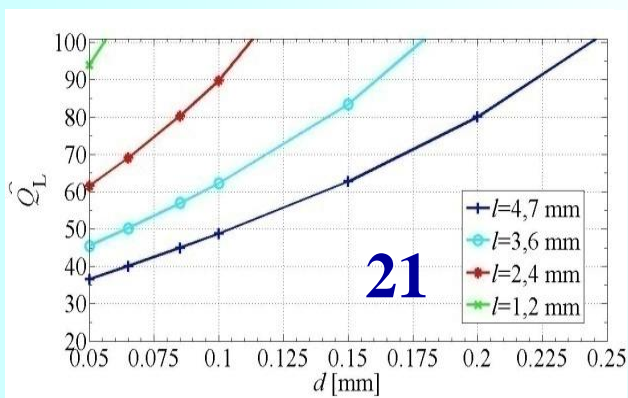
Промјена резонантне учестаности у функцији
димензија калема и кондензатора резонатора



Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора -фактор доброте оптерећеног резонатора

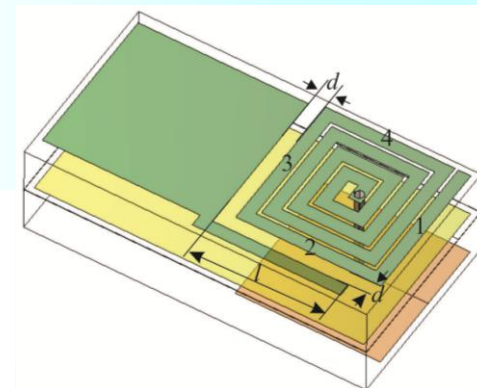
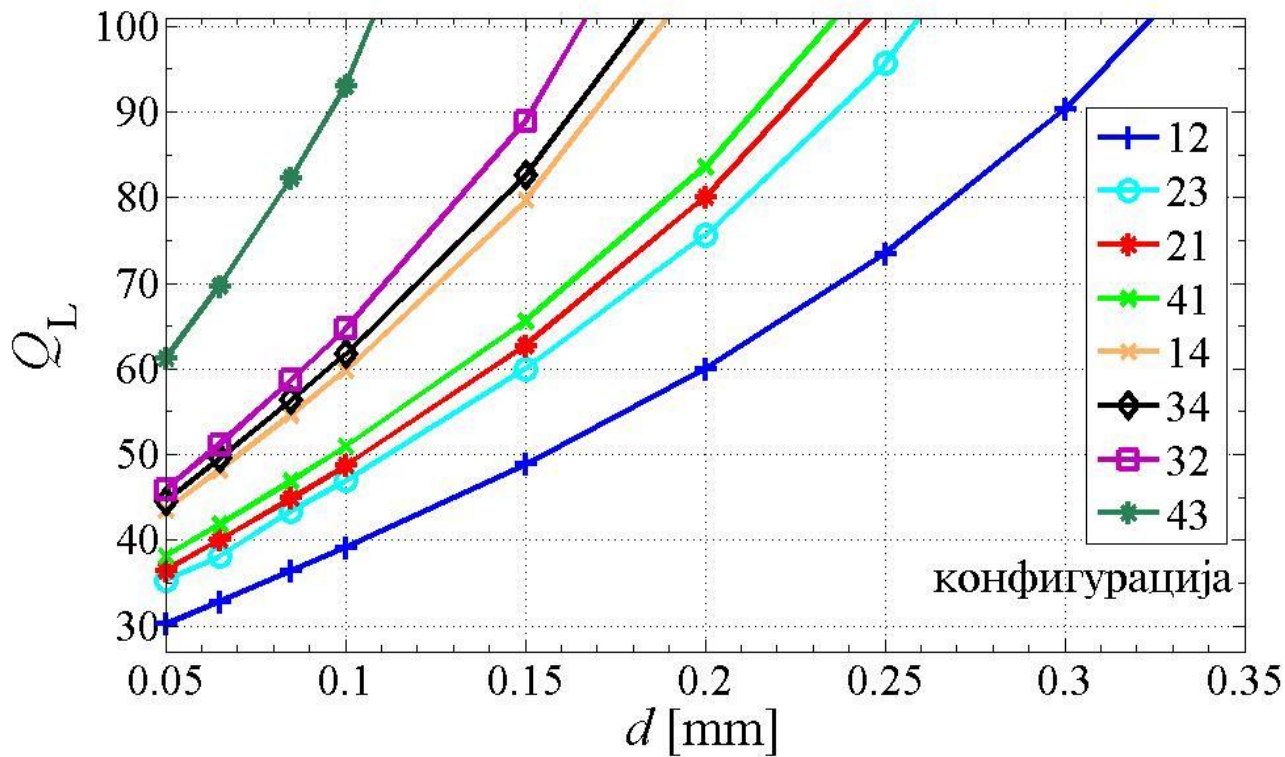


Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора -фактор доброте оптерећеног резонатора



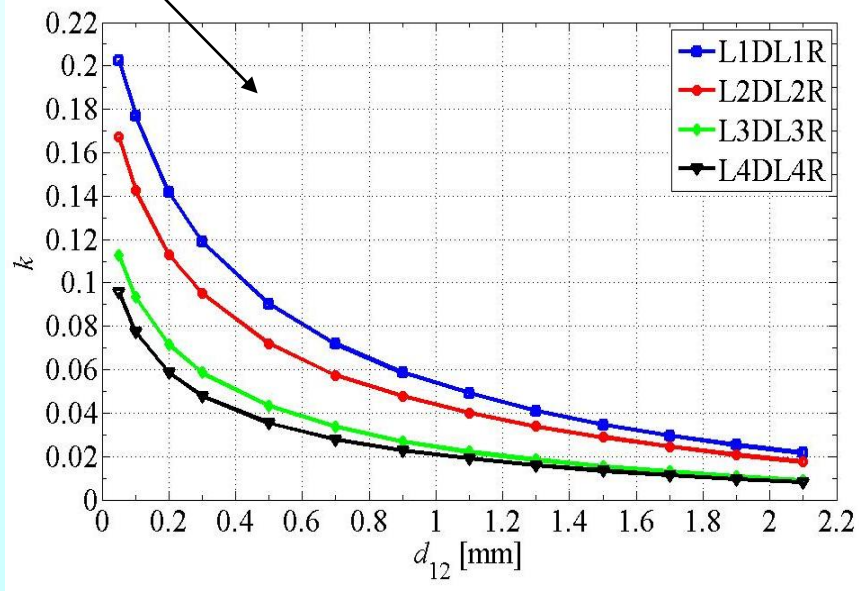
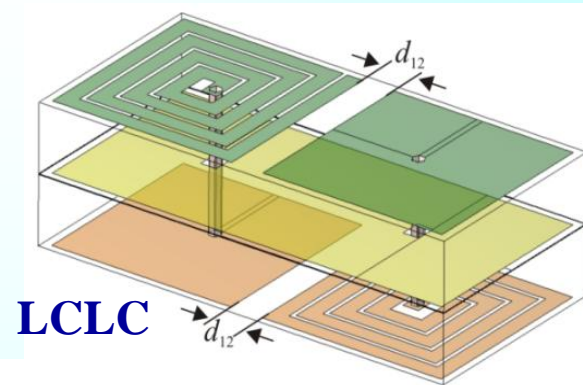
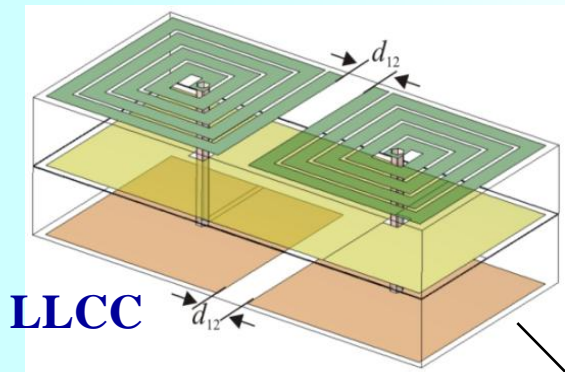
Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

-фактор доброте оптерећеног резонатора



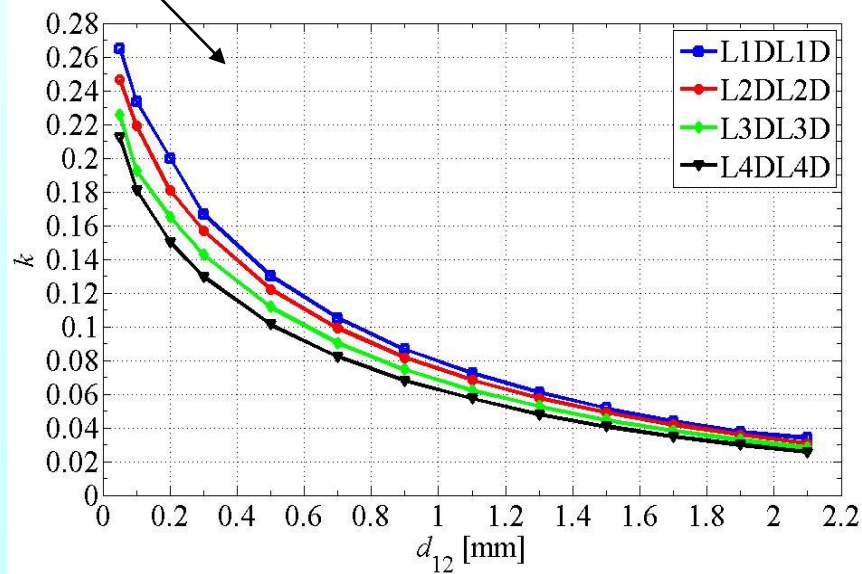
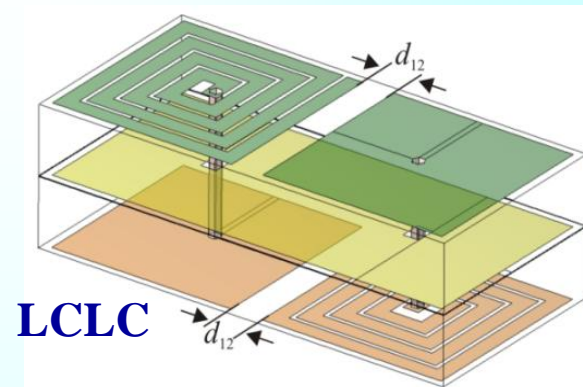
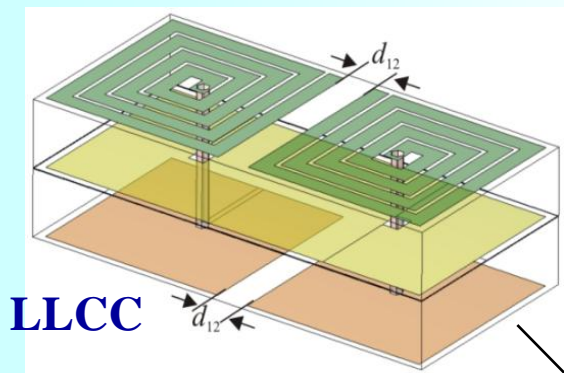
Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

-коэффициент спреге два резонатора



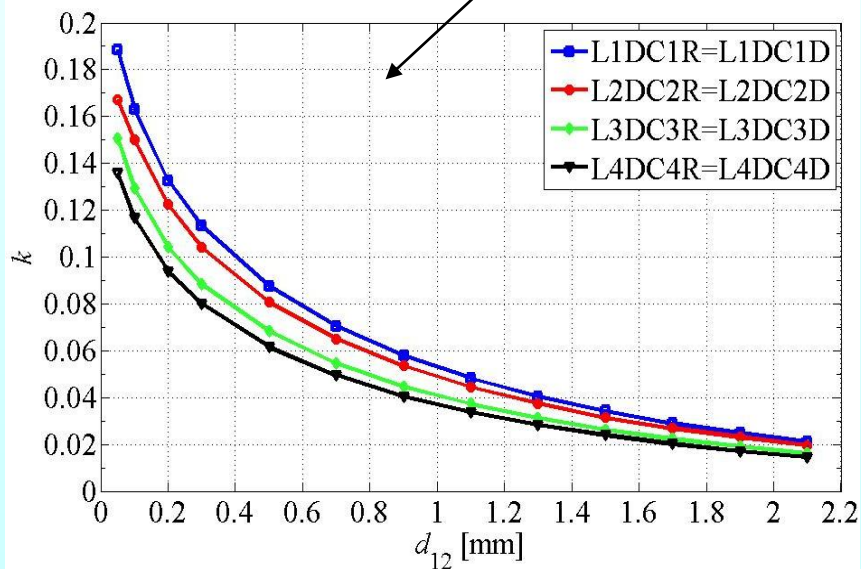
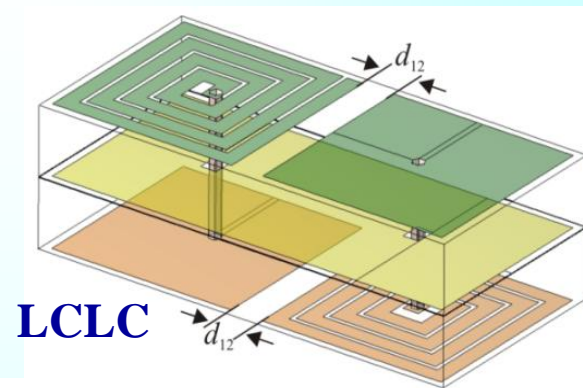
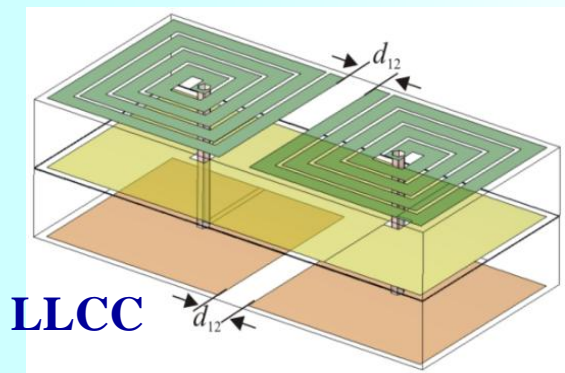
Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

-коэффициент спреге два резонатора



Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

-коэффициент спреге два резонатора



Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

-реализација филтра и експериментални резултати

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

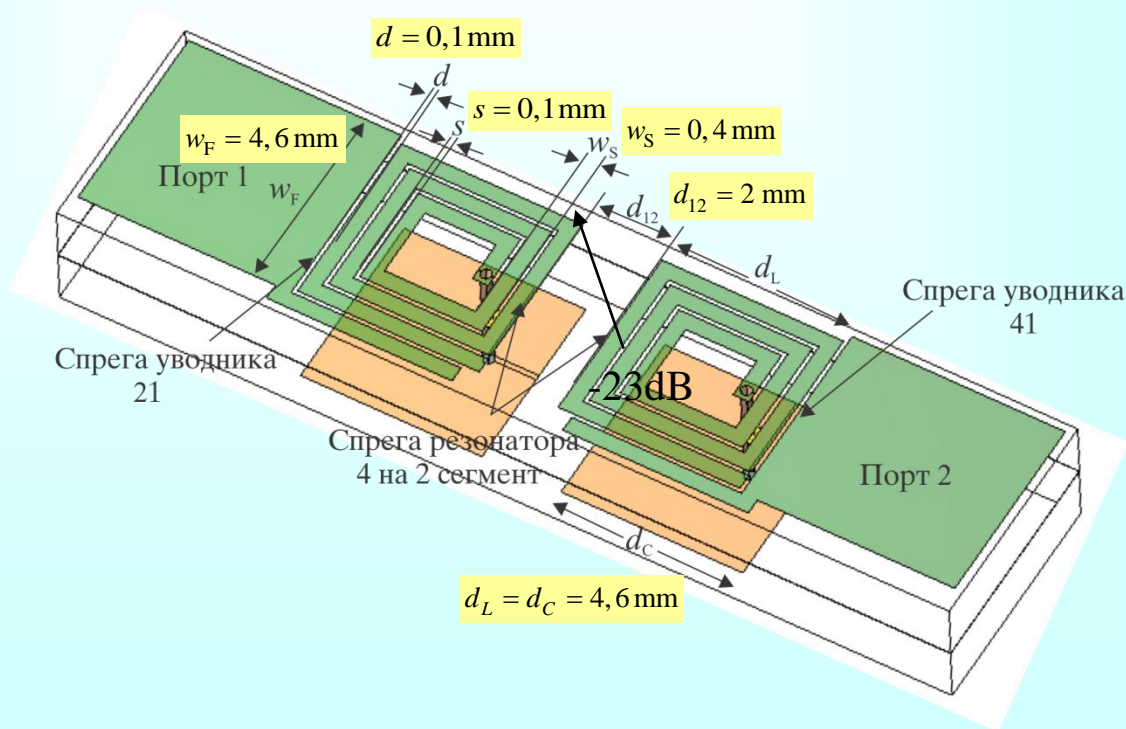
$f_0 = 1,7 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,04$

Dishal-ов метод:

$k = 0,028$

$Q_L = 50$



Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

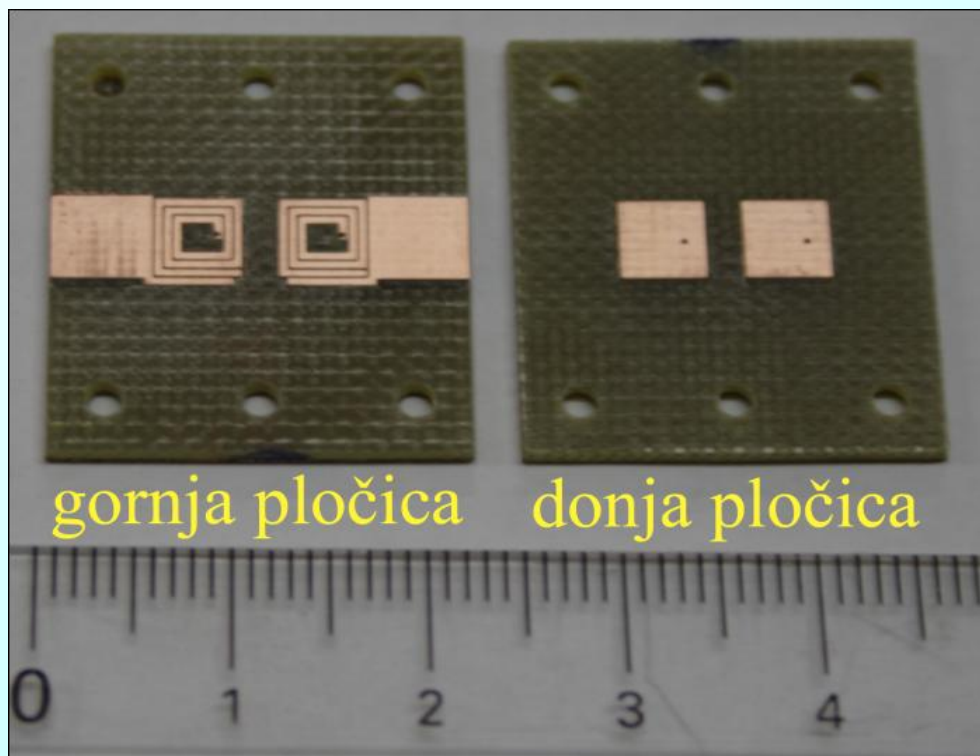
-реализација филтра и експериментални резултати

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

$f_0 = 1,7 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,04$



Филтар другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора

-реализација филтра и експериментални резултати

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

$f_0 = 1,7 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,04$

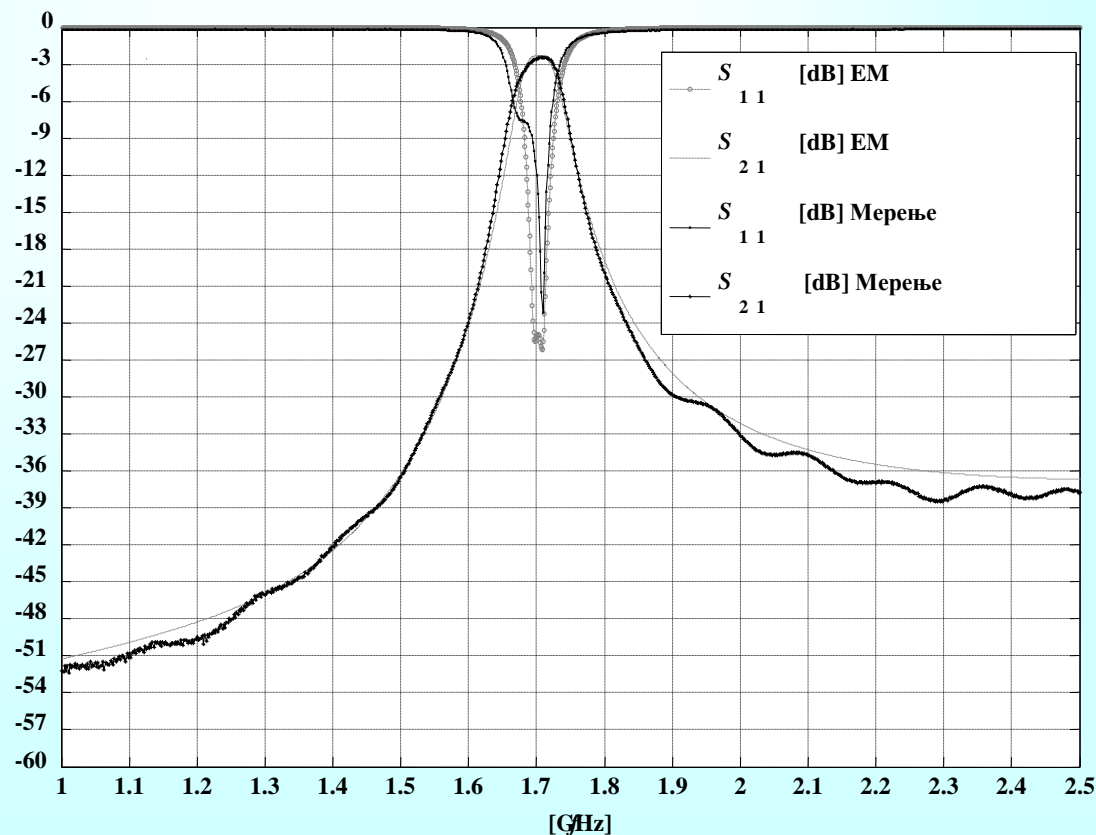
Остварени резултати:

$L_{f_0} = 2,45\text{dB}$ $f_0 = 1,7 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,04$

$11,2 \text{ mm} \times 4,6 \text{ mm}$

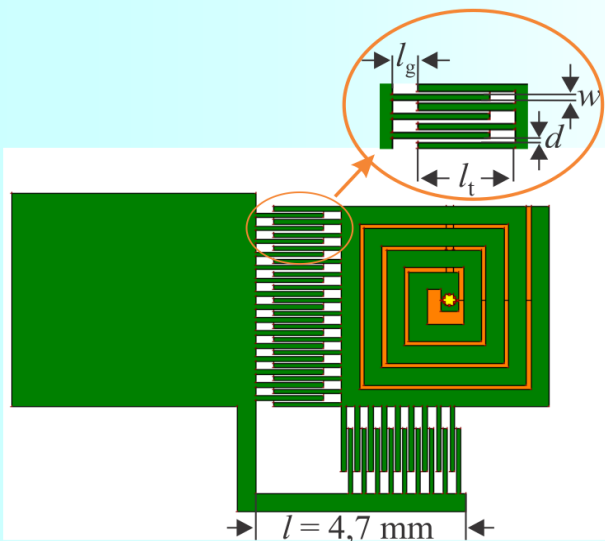
$0,087\lambda_g \times 0,036\lambda_g$



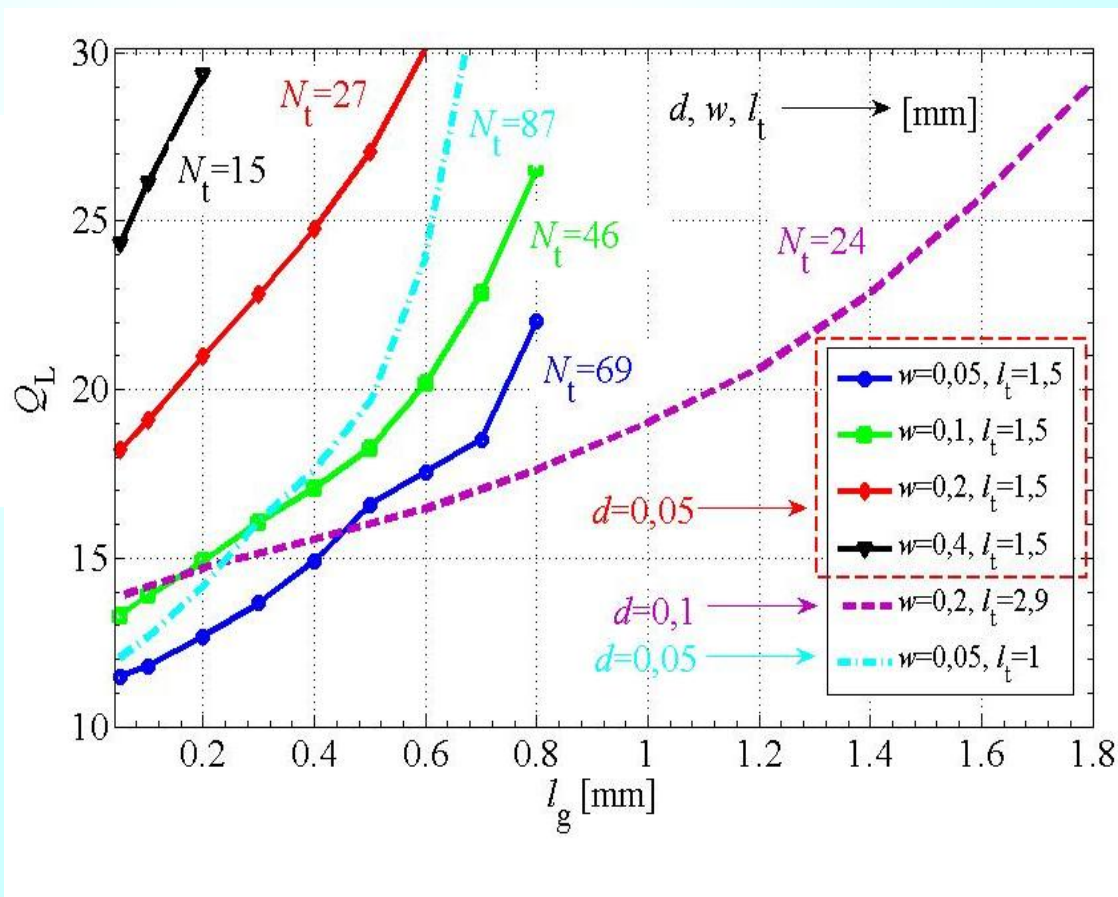
M. Potrebić, D. V. Tošić,

“A novel design of a compact multilayer resonator using double-sided microstrip”,
Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communication, vol. 6, no. 3–4, pp. 441–445, 2012.

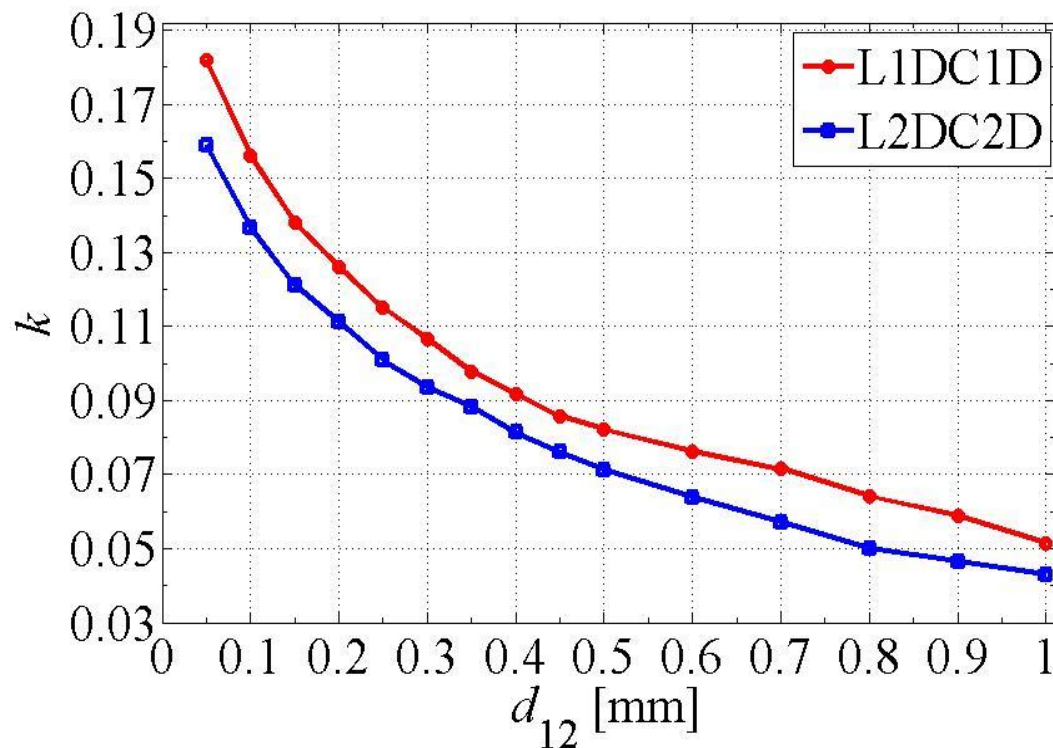
Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора -фактор доброте оптерећеног резонатора



Постигнуто је
смањење фактора
доброте



Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора -коэффицијент спреге два резонатора



Коефицијент спреге
није значајно
промијењен

Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора -реализација филтра и експериментални резултати

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

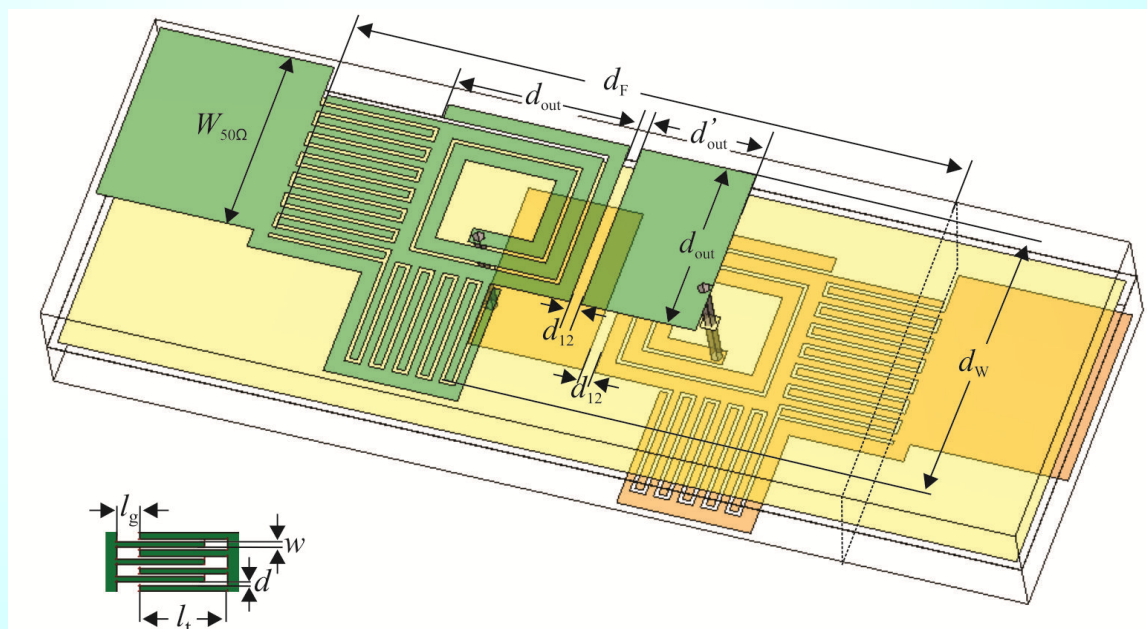
$f_0 = 1,6 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,11$

Dishal-ов метод:

$k = 0,1$

$Q_L = 14$



Варијанта	Резонатор				Филтар	Уводник				Заузеће		
	w_s	s	N	d_{out}	d'_{out}	d_{12}	w	d	l_g	l_t	N_t	$(d_F \times d_w) / \lambda_g$
1	0,4	0,1	2,56	4,6	2,9	0,2	0,05	0,05	0,05	1,0	87	$0,0836 \times 0,0411$
2	0,4	0,1	2,63	4,6	2,9	0,3	0,2	0,1	0,1	2,9	24	$0,1122 \times 0,0550$

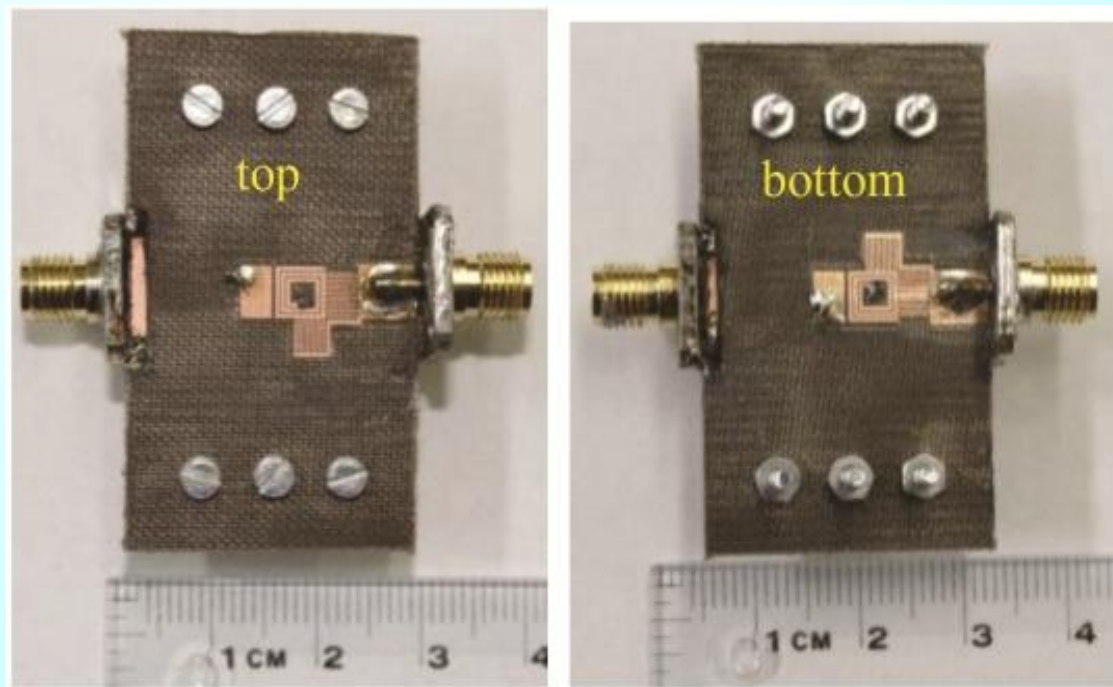
Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора -реализација филтра и експериментални резултати

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

$f_0 = 1,6 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,11$



Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора -реализација филтра и експериментални резултати

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

$f_0 = 1,6 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,11$

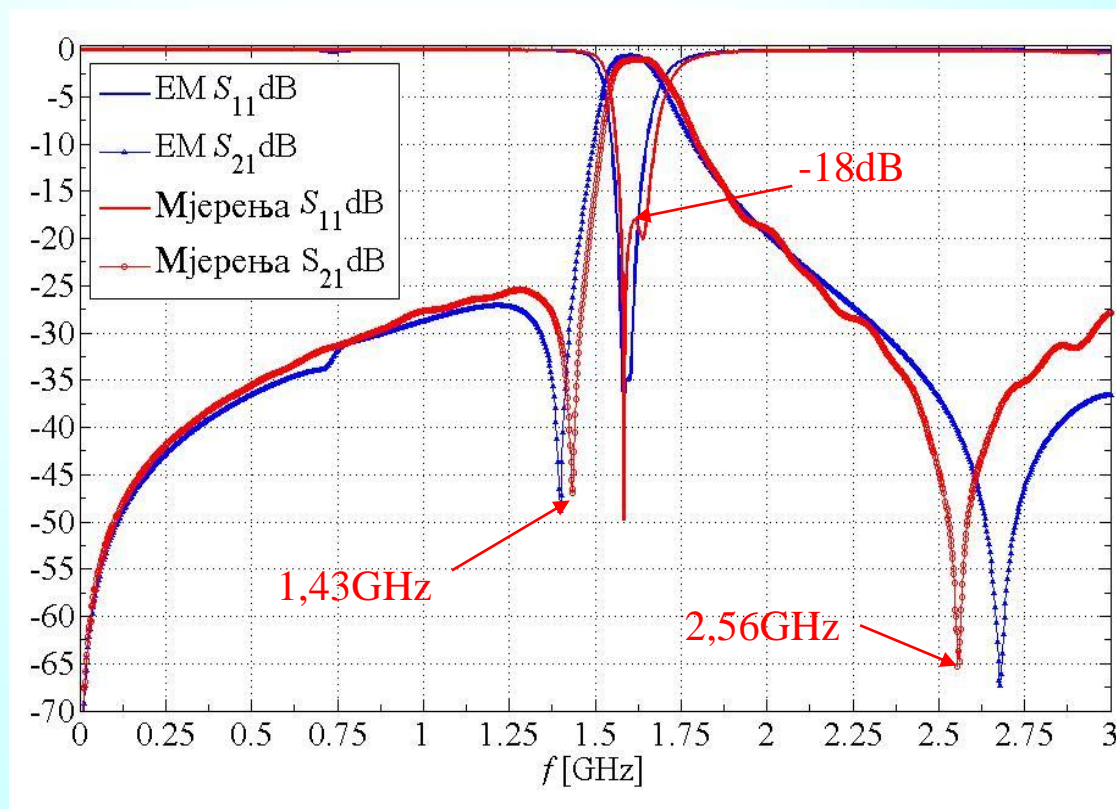
Остварени резултати:

$L_{f_0} = 1,5\text{dB}$ $f_0 = 1,6 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,11$

$15,3 \text{ mm} \times 7,5 \text{ mm}$

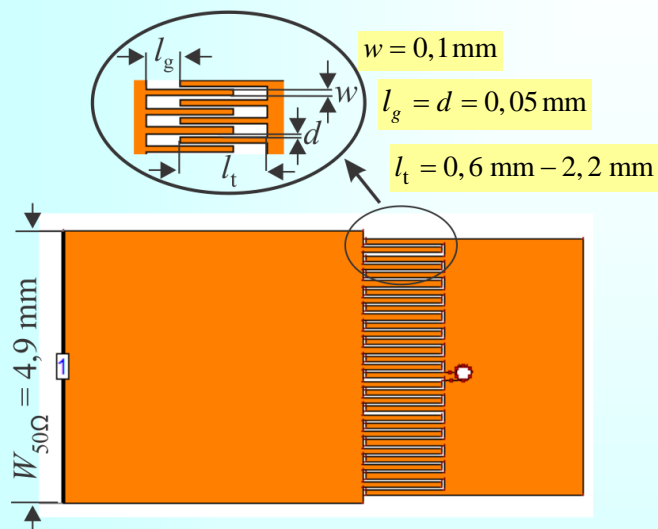
$0,112\lambda_g \times 0,055\lambda_g$



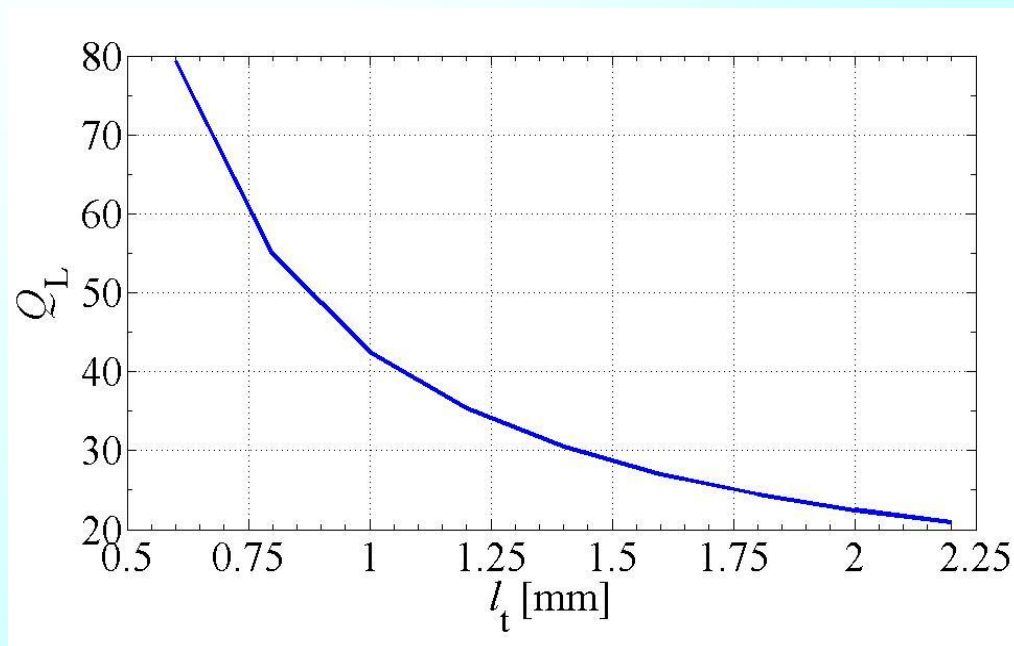
D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić, Z. Stamenković,

”Design of miniaturized bandpass filters using quasi-lumped multilayer resonators”,
Journal of Circuits, Systems and Computers, vol. 23, no. 6, pp. (1450083) 1–21, 2014.

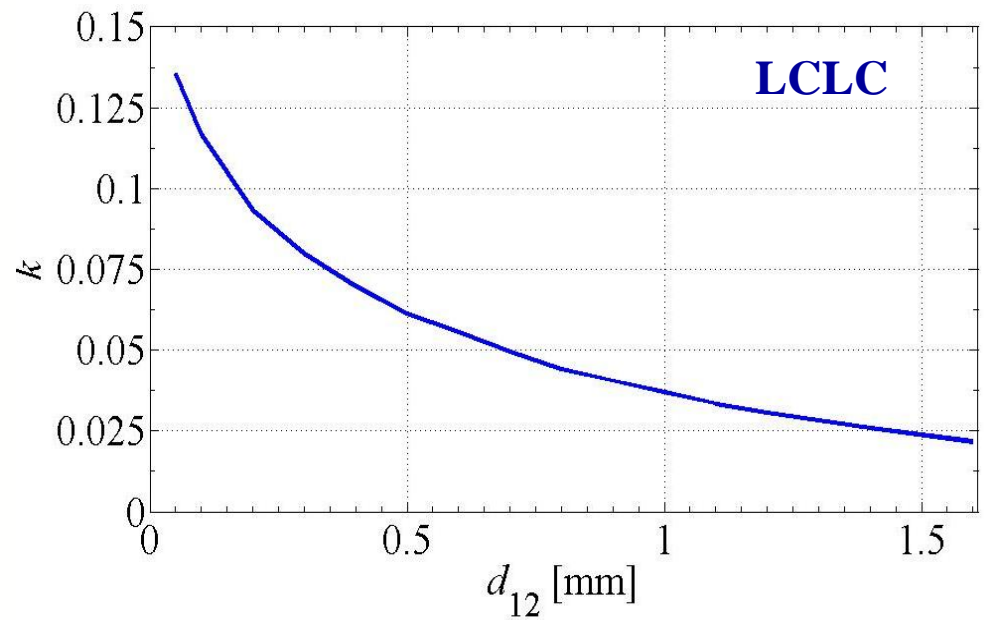
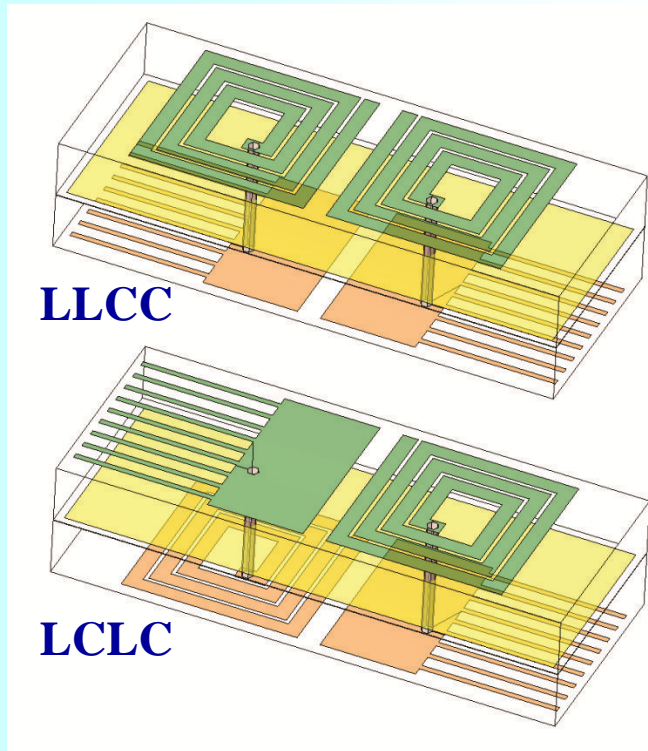
Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и кондензатора резонатора -фактор доброте оптерећеног резонатора



Вриједност фактора доброте између претходна два случаја



**Филтар другог реда са интердигиталном спрегом
уводника и кондензатора резонатора
-коэффицијент спреге два резонатора**



Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и кондензатора резонатора -реализација филтра

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

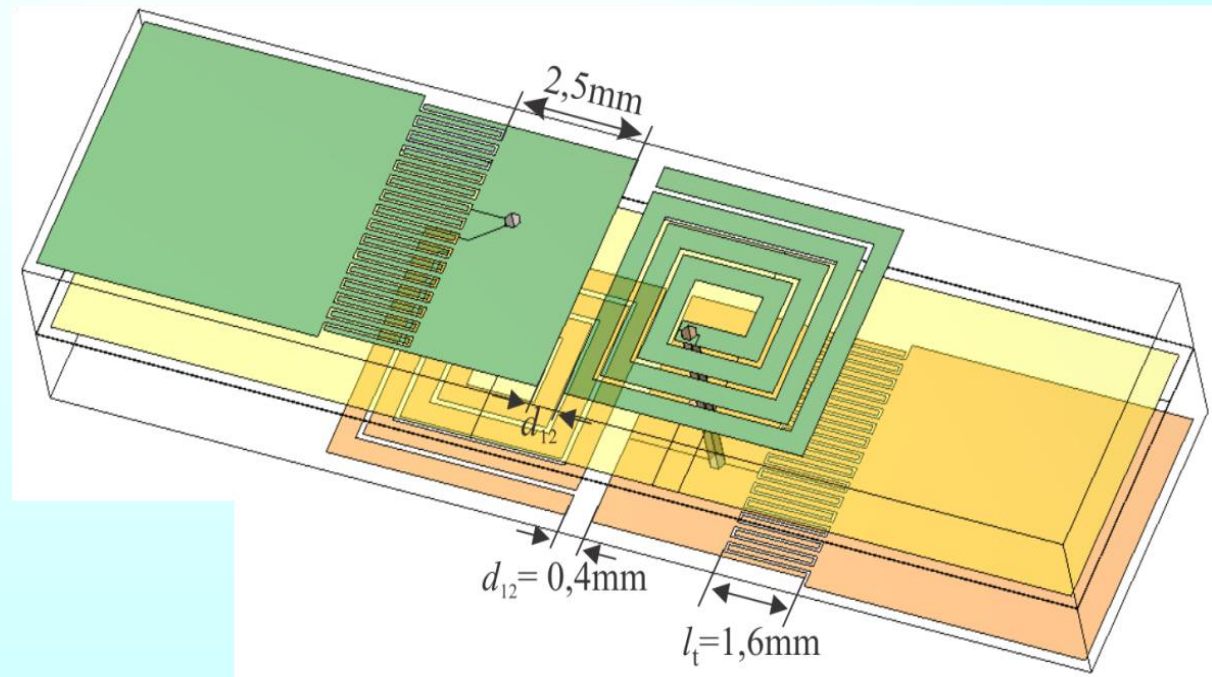
$f_0 = 1,6 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,07$

Dishal-ов метод:

$k = 0,06$

$Q_L = 25$



Филтар другог реда са интердигиталном спрегом уводника и кондензатора резонатора -реализација филтра

Спецификација филтра:

ред филтра = 2

$f_0 = 1,6 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,07$

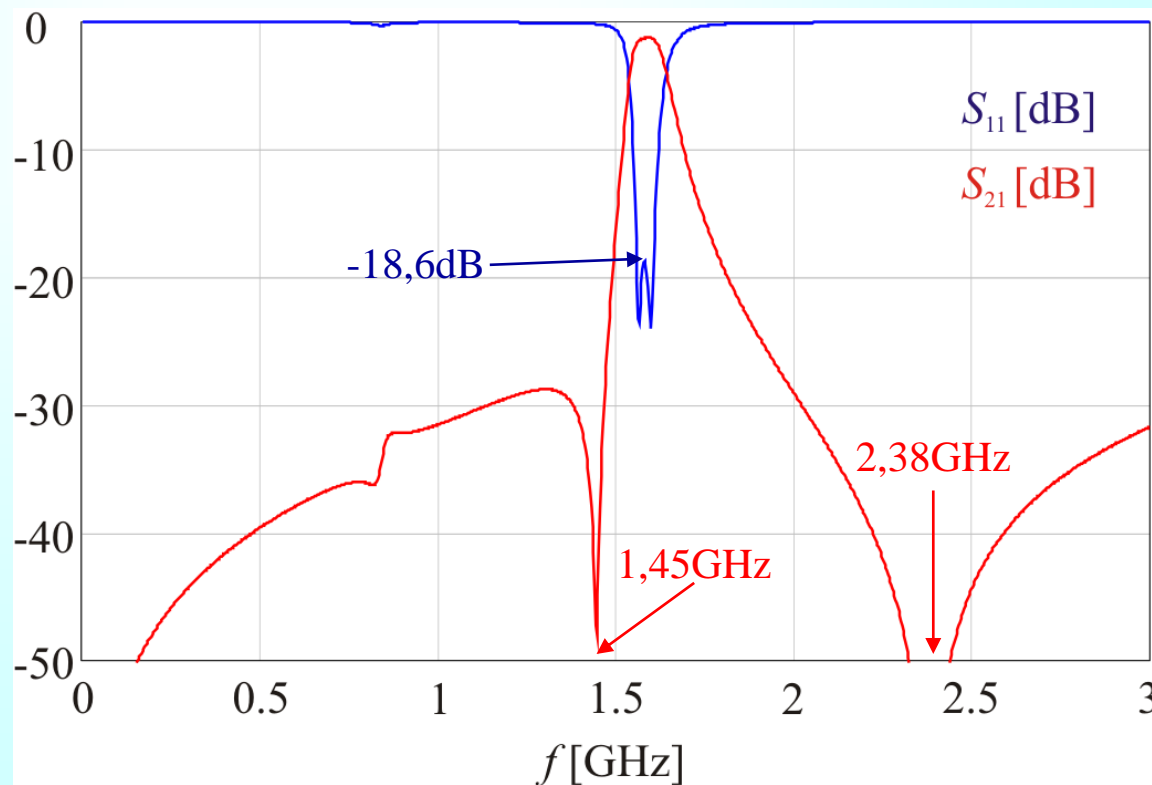
Остварени резултати:

$f_0 = 1,6 \text{ GHz}$ $L_{f_0} = 1,2\text{dB}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,068$

$9,1\text{mm} \times 4,6\text{mm}$

$0,071\lambda_g \times 0,036\lambda_g$



D. Miljanović, M. Potrebić, D. Tošić,

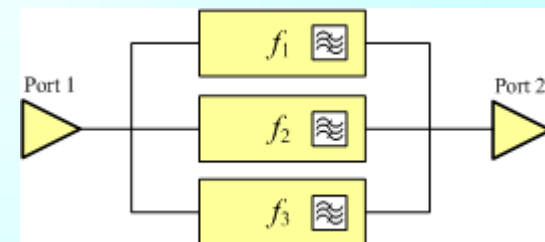
“Mikrotalasni filtar realizovan u višeslojnoj tehnici sa kapacitivno spregnutim uvodnikom”,
Zbornik XII međunarodnog naučno-stručnog simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2013,
Jahorina, Bosna i Hercegovina, Mart 20–22, 2013, vol. 12, str. 434–438.

Филтар пропусник три опсега учестаности

- Потреба за филтрима пропусницима више опсега учестаности

GSM, UMTS, WCDMA,
GPS, WiFi, WiMAX

- Реализација у форми “Паралелне везе” три филтра ПО једног опсега учестаности

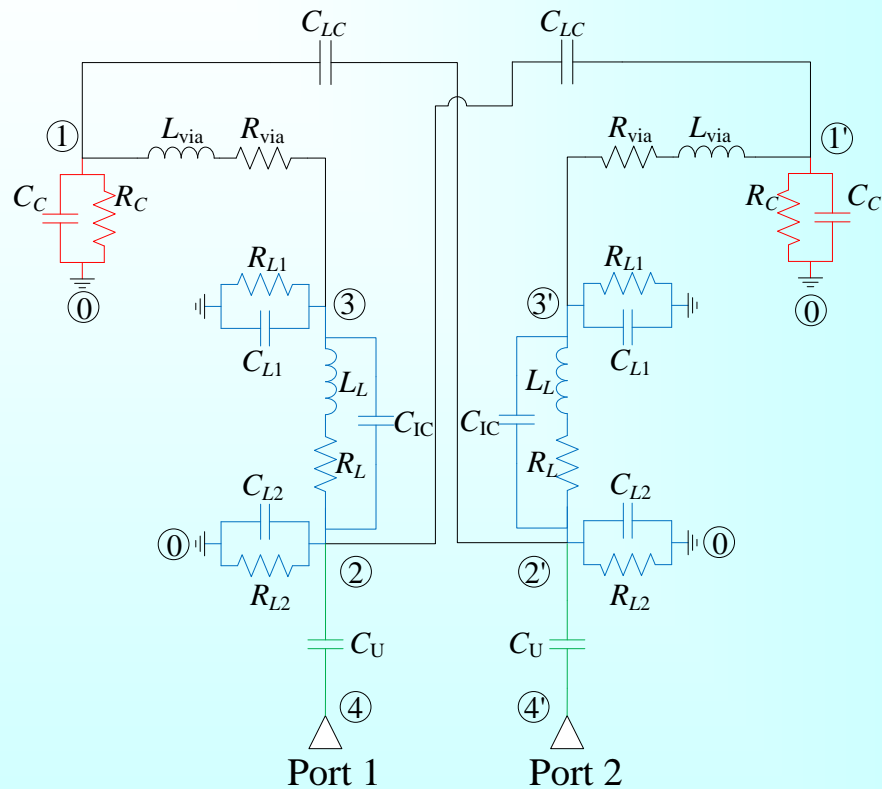
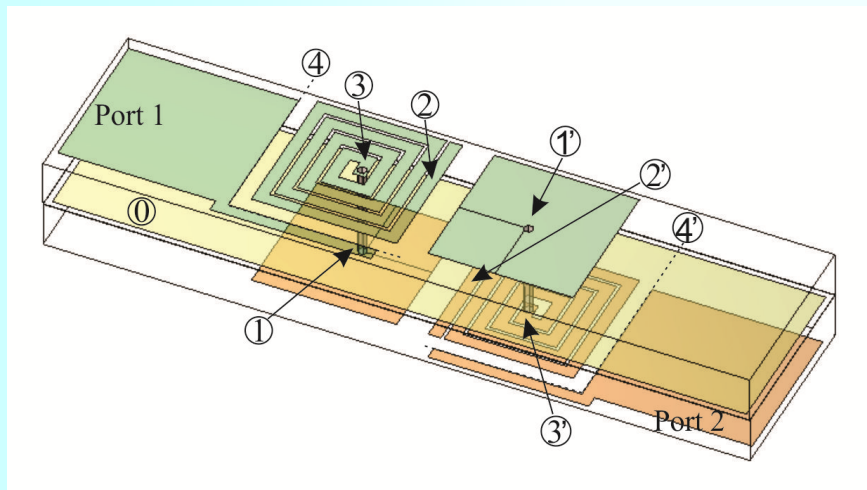


- Примјена другог начина пројектовања појединачних филтара - помоћу еквивалентних електричних шема

Филтар пропусник три опсега учестаности

-еквивалентна електрична шема једног филтра

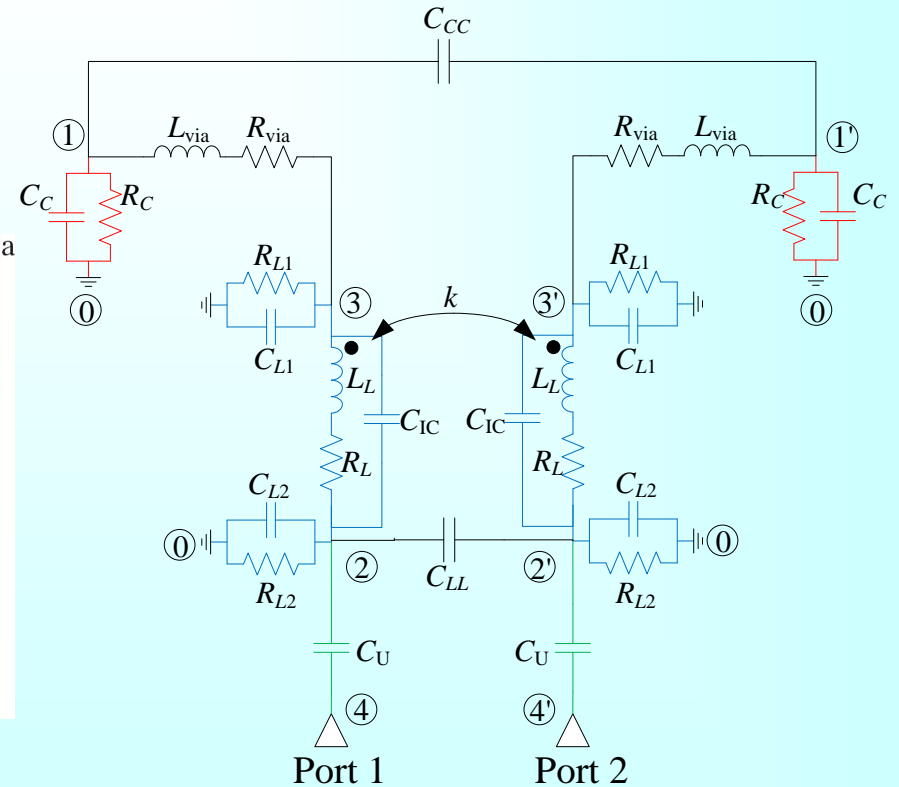
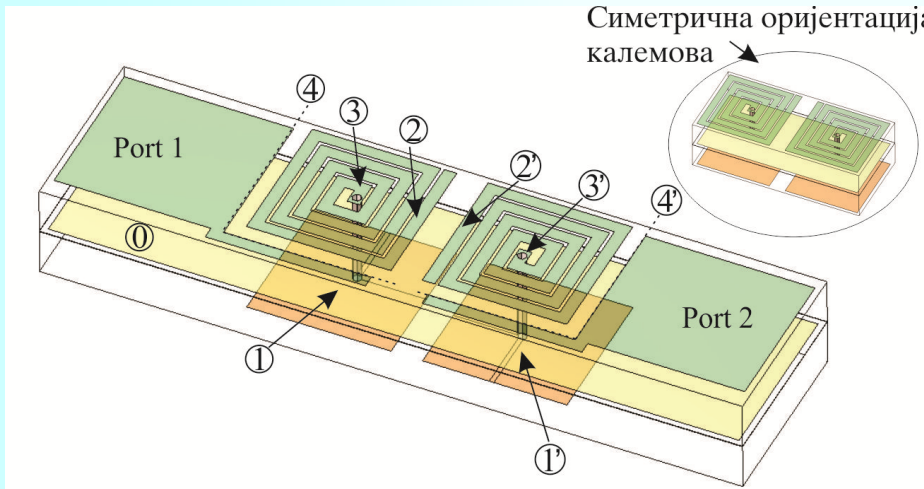
LCLC спрега



Филтар пропусник три опсега учестаности

-еквивалентна електрична шема једног филтра

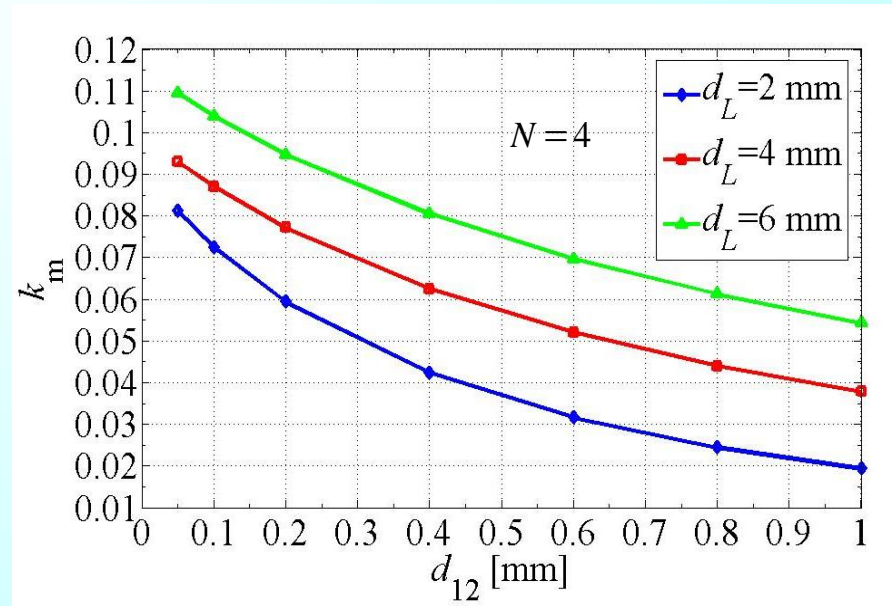
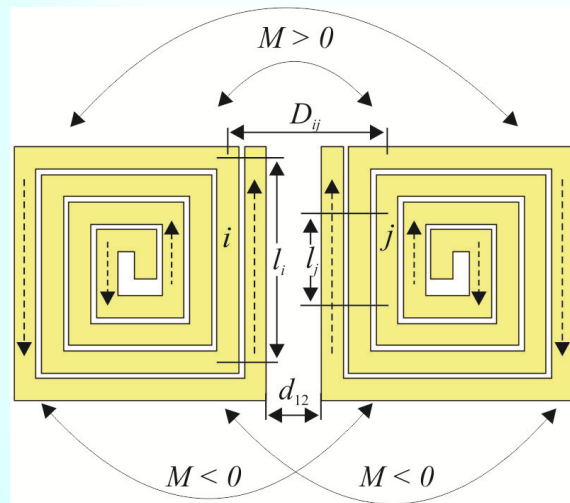
LLCC спрега



Филтар пропусник три опсега учестаности

-вриједности елемената еквивалентне електричне шеме

Међусобна индуктивност два спрегнута калема



$$M_{i,j} [\text{nH}] = 2 \cdot 10^{-4} l_e \left[\ln \left(\frac{l_e}{D_{ij}} + \left(1 + \frac{l_e^2}{D_{ij}^2} \right)^{1/2} \right) - \left(1 + \frac{D_{ij}^2}{l_e^2} \right)^{1/2} + \frac{D_{ij}}{l_e} \right]$$

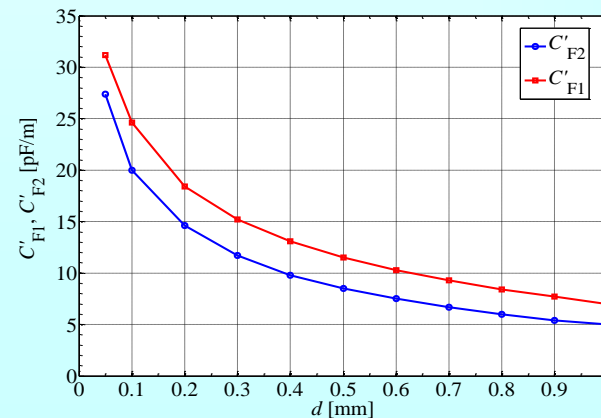
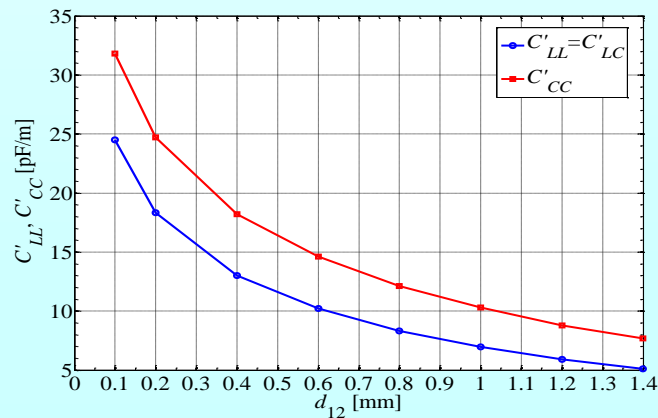
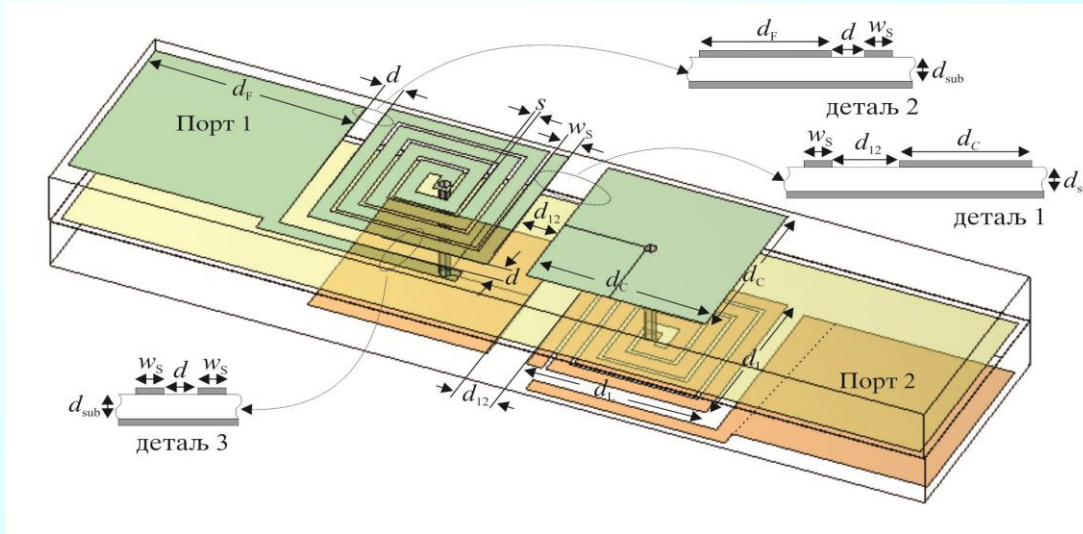
$$M_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{i,j} + \sum_{i=N+1}^{2N} \sum_{j=N+1}^{2N} M_{i,j} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^{2N} M_{i,j} - \sum_{i=N+1}^{2N} \sum_{j=1}^N M_{i,j} =$$

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{i,j} + \sum_{i=N+1}^{2N} \sum_{j=N+1}^{2N} M_{i,j} - 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^{2N} M_{i,j}$$

Филтар пропусник три опсега учестаности

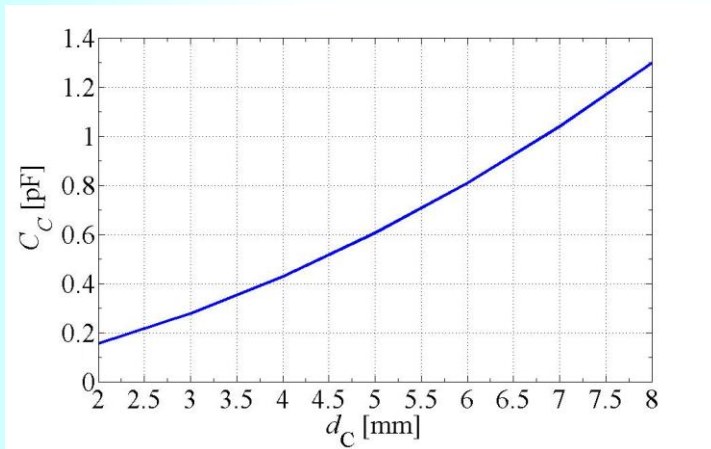
-вриједности елемената еквивалентне електричне шеме-наставак

Међусобна капацитивност елемената резонатора

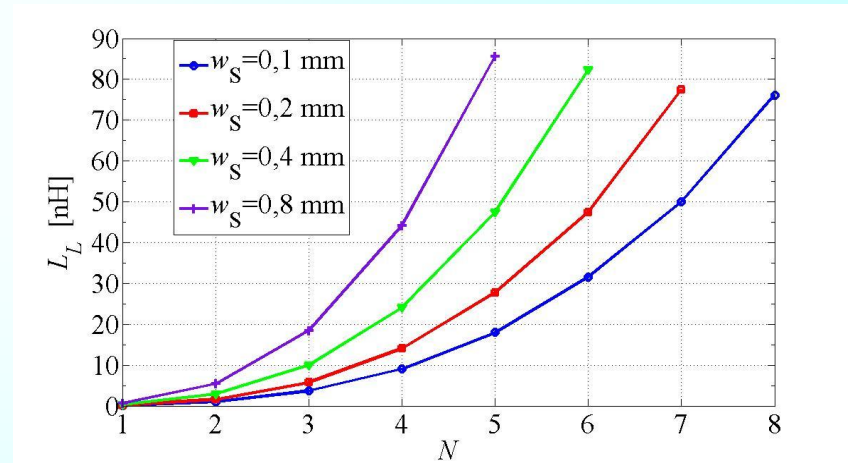


Филтар пропусник три опсега учестаности

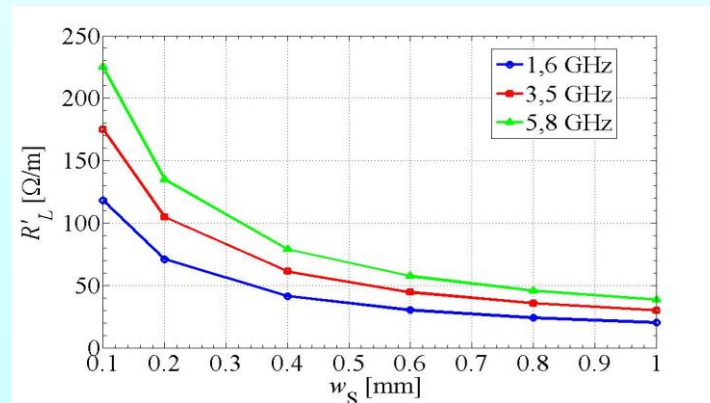
-вриједности елемената еквивалентне електричне шеме-наставак



Капацитивност плочастог кондензатора

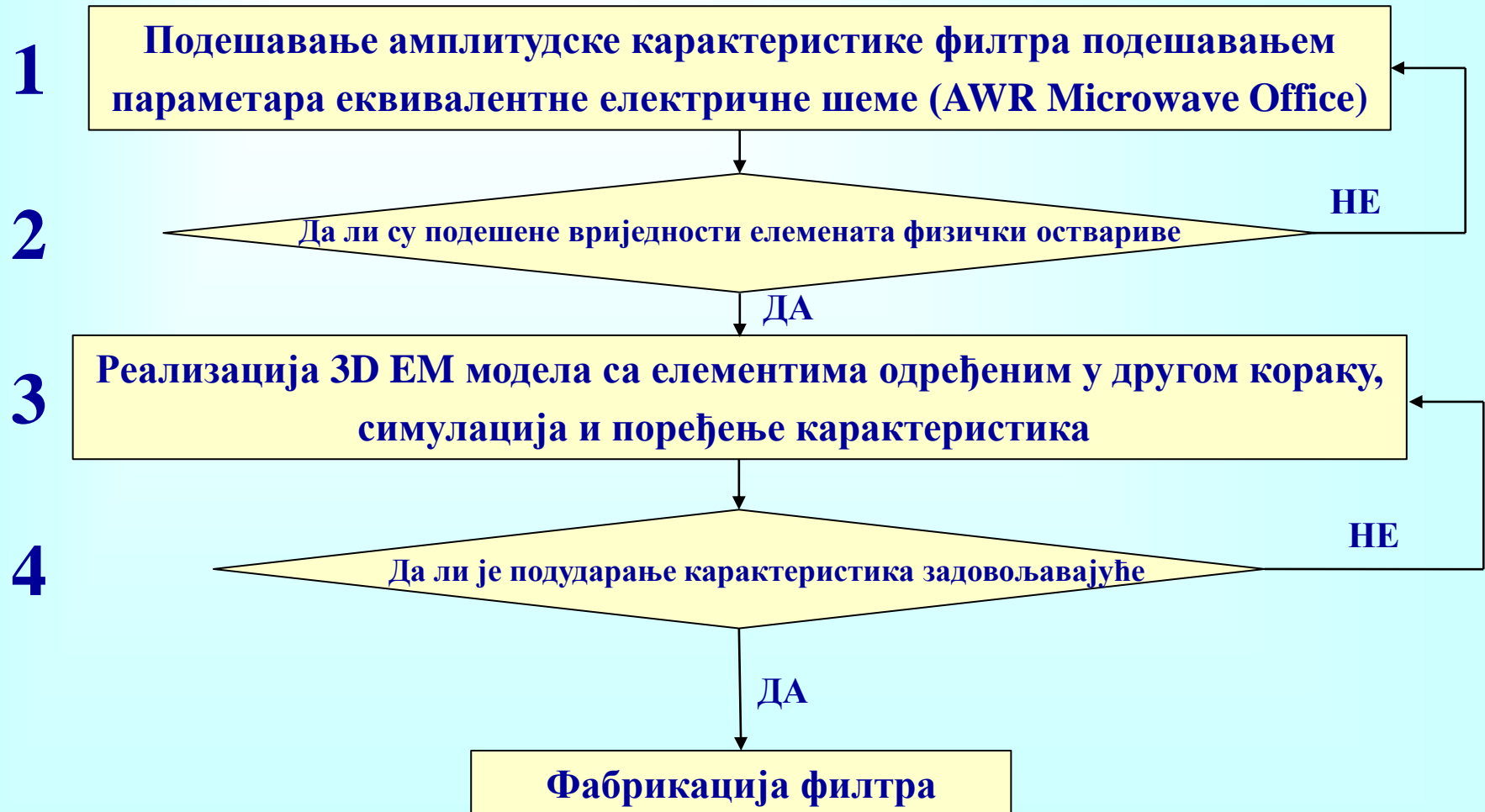


Индуктивност правоугаоног спиралног калема

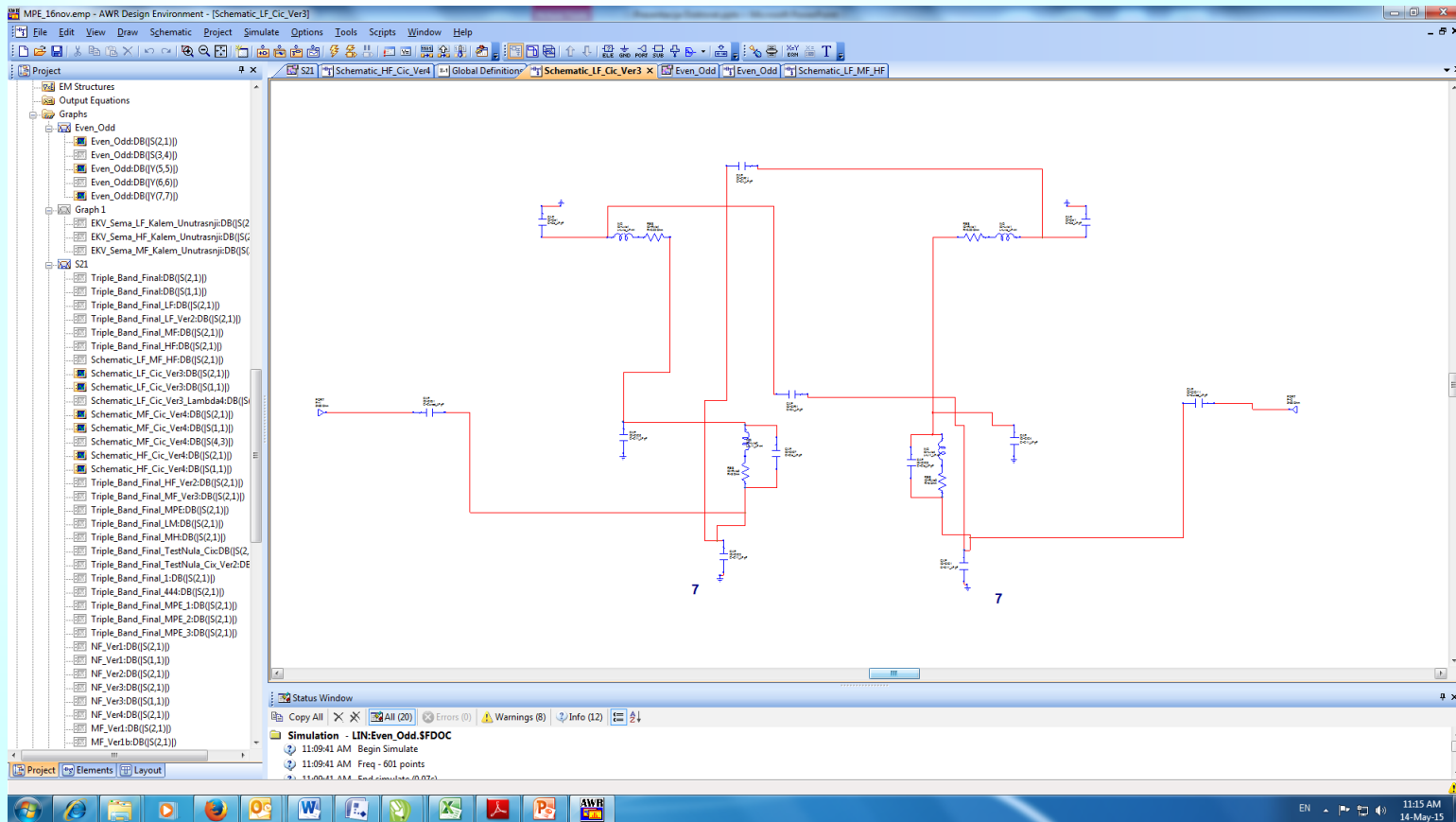


Подужна отпорност правоугаоног спиралног калема

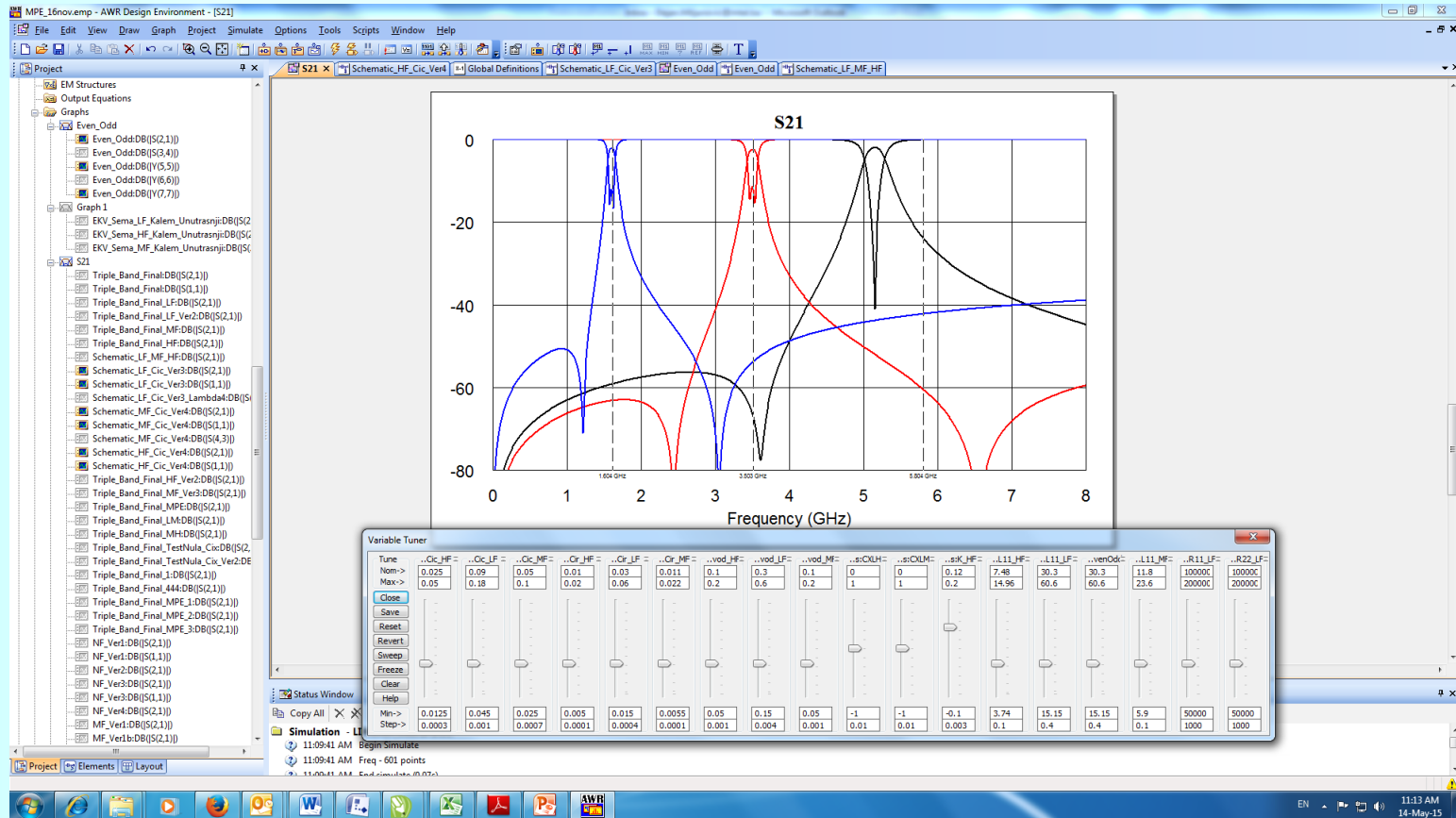
Алгоритам за пројектовање филтра пропусника опсега учестаности коришћењем еквивалентне електричне шеме



Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-електрична шема



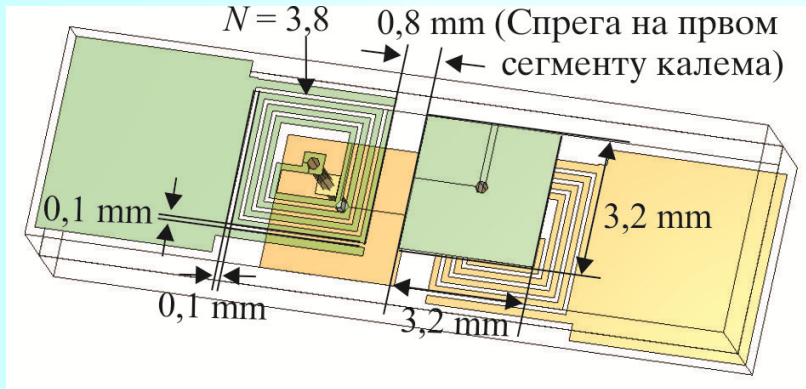
Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-подешавање амплитудске карактеристике



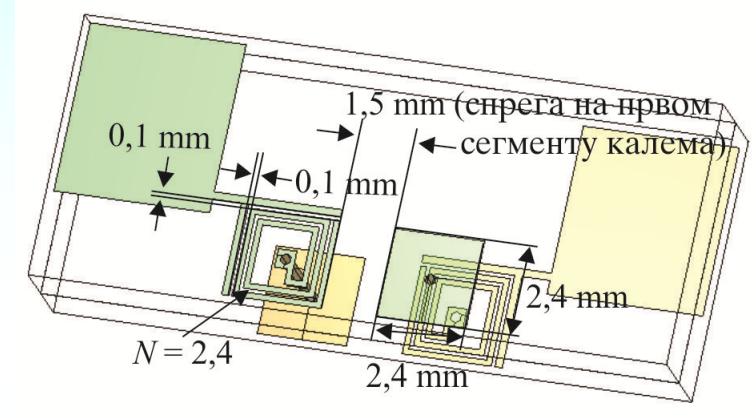
Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-**добијене** **вриједности шеме**

f_0 [GHz]	1,6 GHz	3,5 GHz	5,8 GHz
C_C [pF]	0,3	0,2	0,15
C_{L1}, C_{L2} [pF]	0,15	0,1	0,075
R_L [Ω]	3,5	2,4	1,7
C_{IC} [pF]	0,09	0,05	0,025
C_U [pF]	0,3	0,1	0,1
C_{LC} [pF]	0,03	0,01	0,01
L_L [nH]	49,5	16,5	8,8

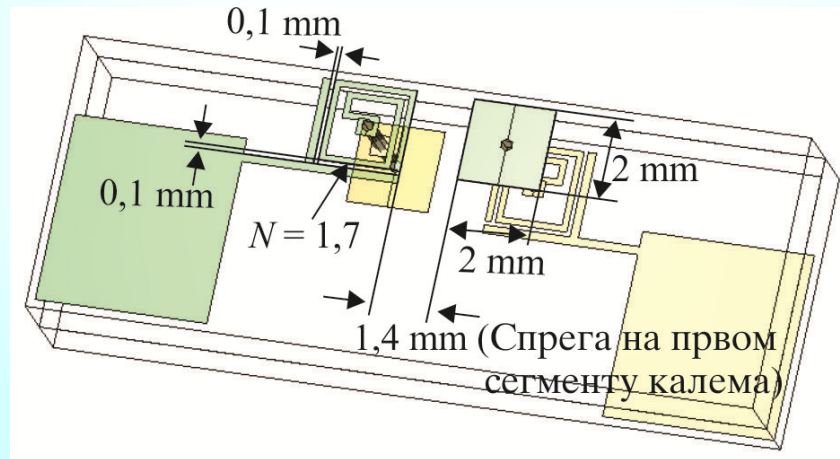
Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-3D EM модел након прве итерације



1,6 GHz

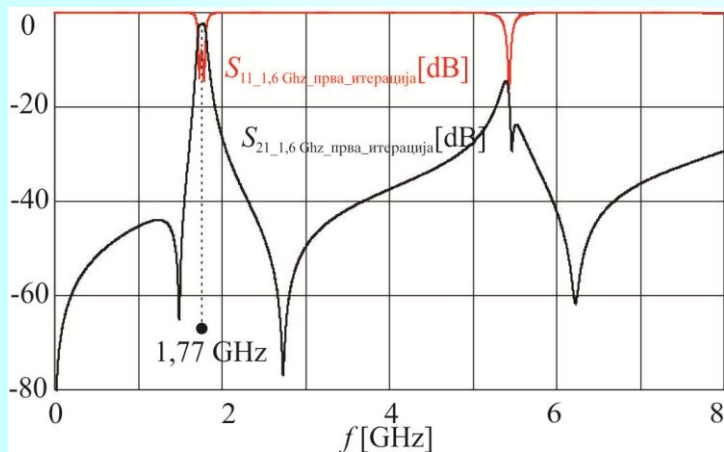


3,5 GHz

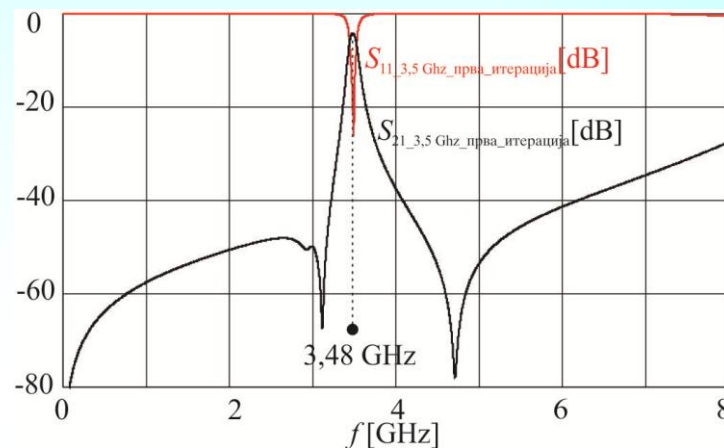


5,8 GHz

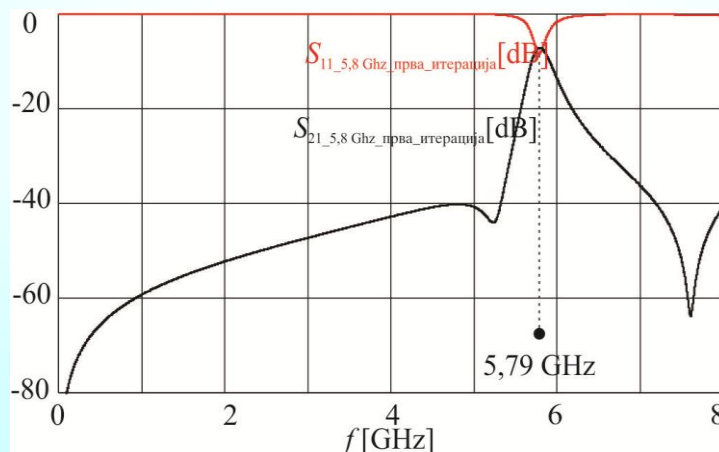
Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-резултати симулације након прве итерације



1,6 GHz

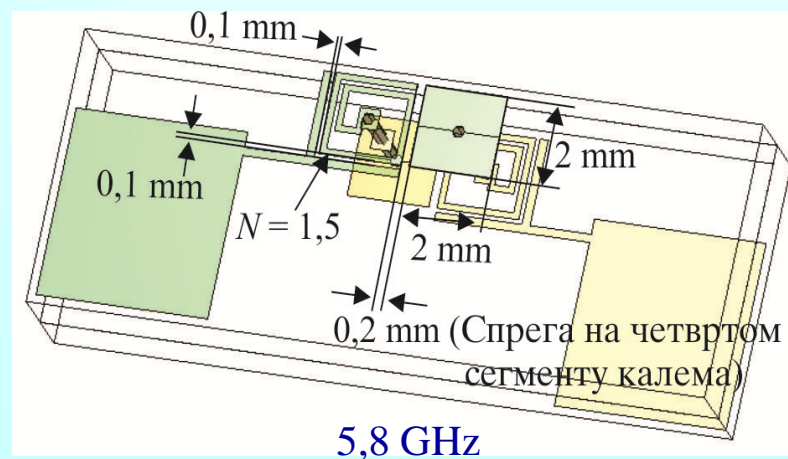
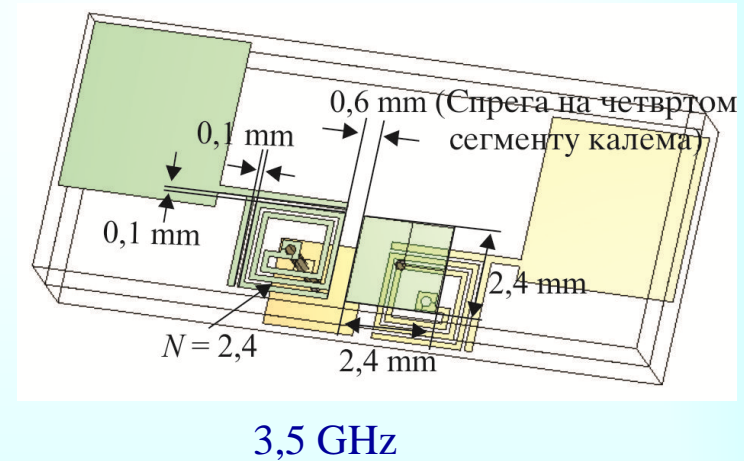
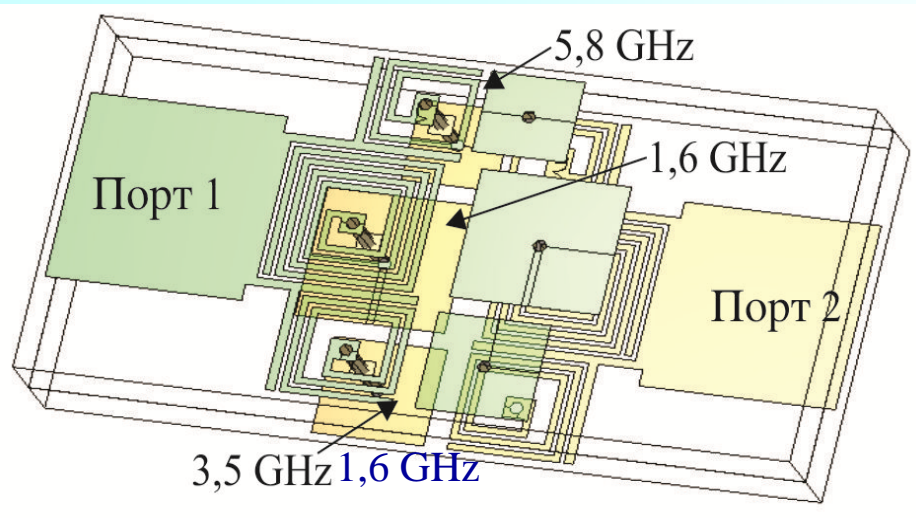


3,5 GHz

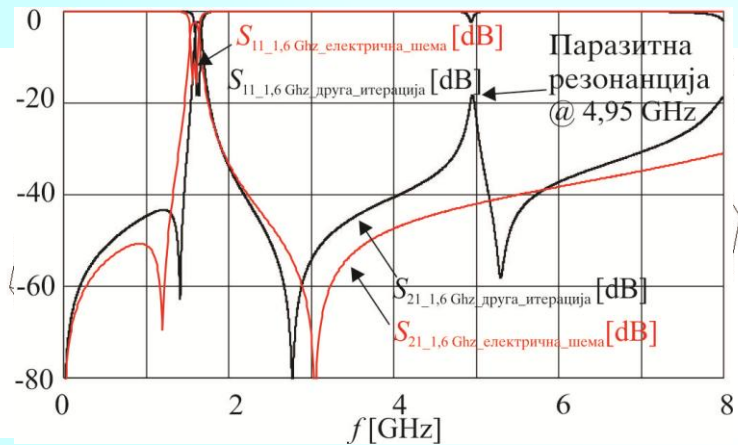


5,8 GHz

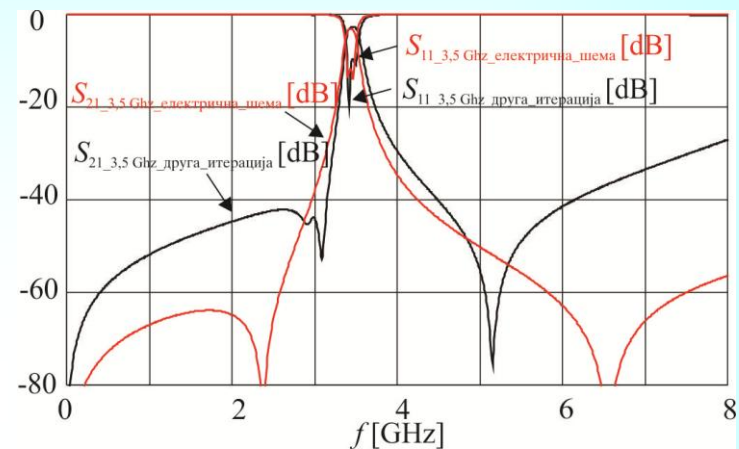
Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-3D ЕМ модел након друге итерације



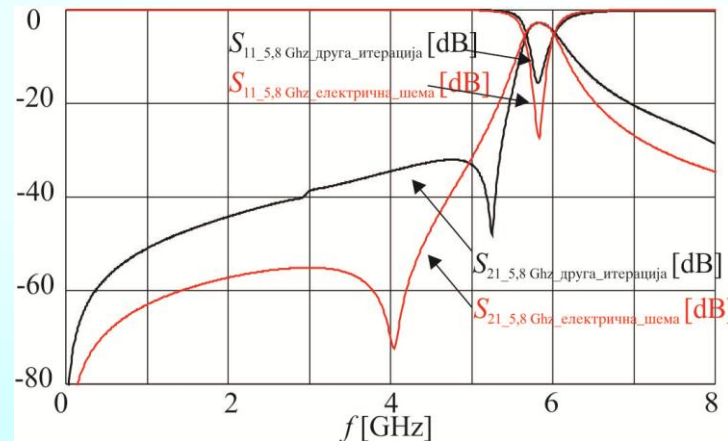
Пројектовање филтра коришћењем еквивалентне електричне шеме-резултати симулације након друге итерације



1,6 GHz

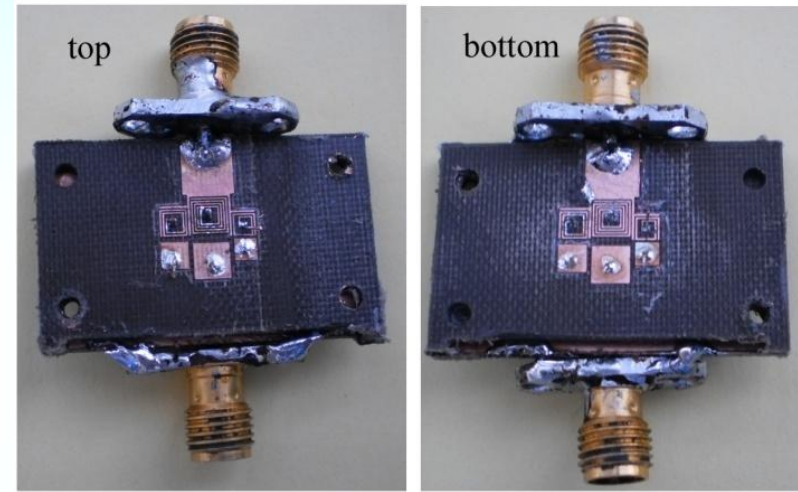
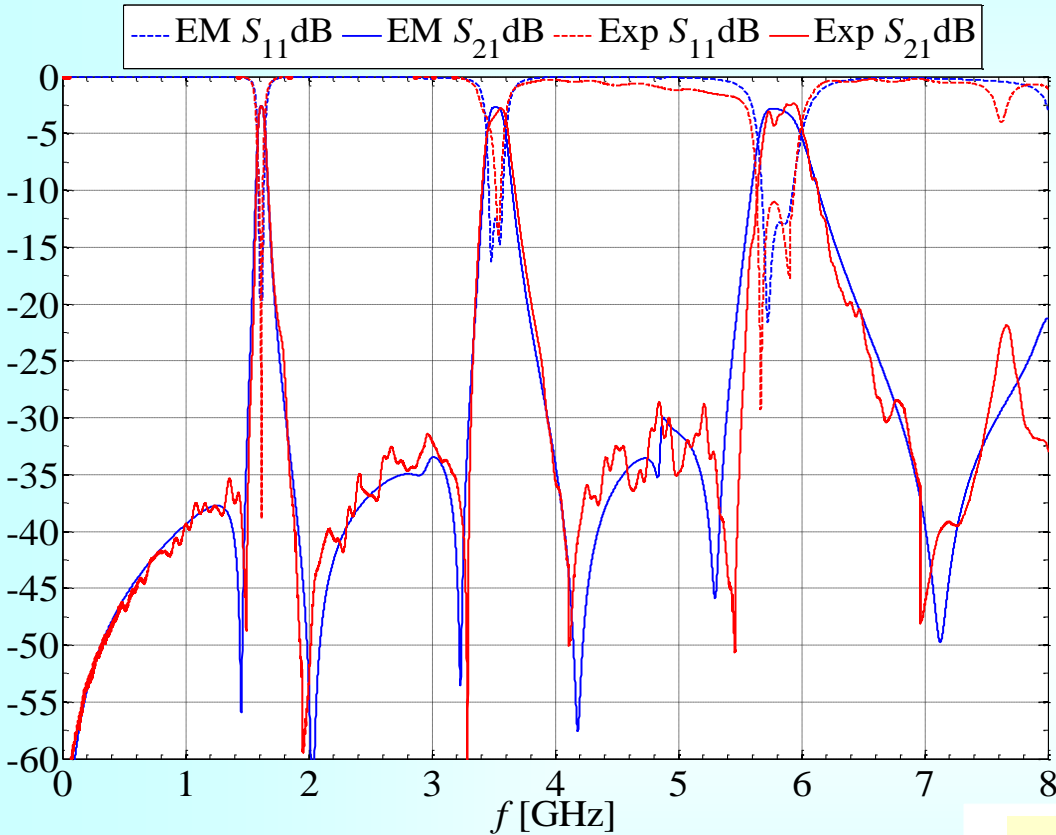


3,5 GHz



5,8 GHz

Пројектовање филтра три пропусна опсега -резултати симулације, фабрикација и мјерење



$0,053\lambda_g \times 0,062\lambda_g$

7,2 mm \times 8,4 mm

$f_1 = 1,6$ GHz

$f_2 = 3,5$ GHz

$f_3 = 5,8$ GHz

$L_{f_1} = 2,56$ dB

$L_{f_2} = 2,68$ dB

$L_{f_3} = 2,85$ dB

$|s_{11f_1}| = 15$ dB

$|s_{11f_2}| = 14$ dB

$|s_{11f_3}| = 12$ dB

$B_{\Delta}(f_1) = 4\%$

$B_{\Delta}(f_2) = 4,6\%$

$B_{\Delta}(f_3) = 7,5\%$

D. Miljanović, M. Potrebić, D. V. Tošić,

"Design of microwave multibandpass filters with quasi-lumped resonators",

Mathematical Problems in Engineering,

Hindawi Publishing Corporation, vol. 2015, article ID 647302

Закључак (1)

Предложен је нов метод реализације резонатора и микроталасних филтра са квази концентрисаним елементима

- малог заузећа штампане плочице
- велике флексибилности реализације филтра
- уског и средњег пропусног опсега
- реализације филтра са три пропусна опсега
- експериментална верификација мерењем на лабораторијским прототиповима анализираних реализација

Закључак (2)

Предложен је нов алгоритам пројектовања филтра са спрегнутим резонаторима, помоћу еквивалентних електричних шема, који убрзава анализу и пројектовање филтра

Закључак (3)

- Подручја примјене истраживачких резултата обухватају комуникационе персоналне системе и сервисе GSM, UMTS, WCDMA, GPS, WiFi, WiMax
- Крајњи домет минимизације, током овог истраживања, је расположива технологија за израду прототипа, односно **резолуција од 50 μm** , што ограничава минималну резолуцију штампе
- Друго ограничење предложене реализације је максимални фреквенцијски опсег (при коме елементи престају да буду квази-концентрисани постају елементи са расподјељеним параметрима)

Даљи правци развоја

- Употреба тањих подлога веће пермитивности у циљу даље минијатуризација
- Реализација филтра вишег реда у циљу боље селективности
- Реализација кондукционе спреге у циљу ширег пропусног опсега
- Употреба електрично контролисаног кондензатора у циљу реализације подесивог филтра
- Реализација филтра непропусника опсега учестаности

Микроталасни филтри са квази-концентрисаним елементима

Одбрана докторска дисертације

Кандидат:

мр Дејан Миљановић

Ментор:

др Милка Потребих, ванр.проф.

Београд, 2015.

