

FILTRI NEPROPUSNICI OPSEGA UČESTANOSTI NA BAZI RAZLIČITIH JEDINIČNIH ČELIJA METAMATERIJALA

Vasa Radonić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad* vasarad@uns.ac.rs
Nikolina Janković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad* nikolina@uns.ac.rs
Vesna Crnojević-Bengin, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad* bengin@uns.ac.rs

Sadržaj – U ovom radu analizirani su različiti oblici jedinične ćelije na bazi prekinutih prstenastih rezonatora, kao i višestruke geometrije prekinutog prstenastog rezonatora, spiralnog rezonatora i rezonatora na bazi Sijerpinski fraktalne krive. U cilju poređenja, projektovani su filtri nepropusnici opsega učestanosti trećeg reda sa svim predloženim jediničnim ćelijama.

1. UVOD

Istraživanja u oblasti metamaterijala, veštačkih struktura koje pokazuju ekstremne vrednosti dielektrične permitivnosti i magnetske permeabilnosti, doživela su svoju ekspanziju u poslednjoj deceniji. Metamaterijali se formiraju periodičnim ponavljanjem osnovnog konstruktivnog elementa, jedinične ćelije, čije su dimenzije mnogo manje od talasne dužine talasa koji se prostire. Iako napravljeni od konvencionalnih podloga i uobičajenih provodnih materijala, metamaterijali zahvaljujući svojoj specifičnoj strukturi mogu da pokazuju čak i negativne vrednosti permitivnosti i permeabilnosti.

Za realizaciju metamaterijala koriste se različite geometrije jediničnih ćelija. Prvi veštački materijal koji pokazuje negativnu efektivnu permitivnost, [1], baziran je na periodičnom ponavljanju tankih metalnih žica, dok je prva struktura koja pokazuje negativnu efektivnu permeabilnost bazirana na periodičnom ponavljanju prekinutog prstenastog rezonatora (engl. *Split Ring Resonator*, SRR), [2]. U mikrostrip arhitekturi, negativna permeabilnost može se dobiti kada se provodni SRR postavi pored mikrostripa, [3]. Iako uskopojasne, ovakve konfiguracije našle su svoju primenu u projektovanju filtera za potiskivanje viših harmonika, [4]-[6]. Kako bi se smanjile dimenzije kola i/ili poboljšale karakteristike, do danas je predložen veliki broj različitih jediničnih ćelija, [7]-[9].

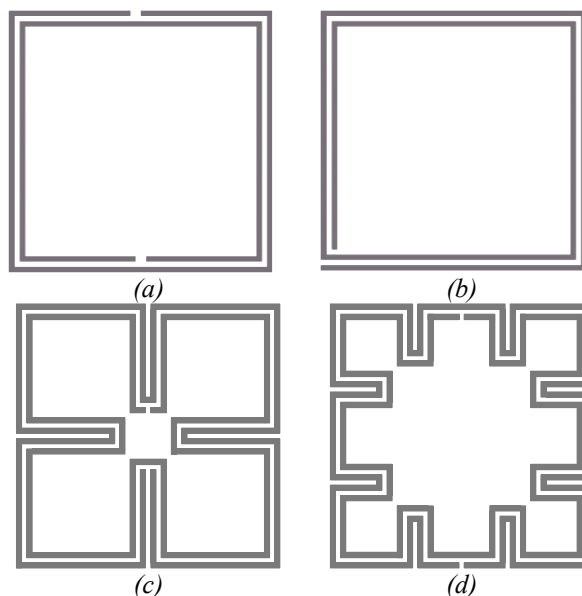
U ovom radu analizirana je mogućnost primene različitih oblika jedinične ćelije na bazi prekinutih prstenastih rezonatora kao i mogućnost korišćenja višestruke geometrije SRR, spiralnog rezonatora (SR) i rezonatora na bazi Sijerpinski fraktalne krive (SS-SRR). U cilju poređenja, projektovani su filtri nepropusnici opsega učestanosti trećeg reda sa svim predloženim jediničnim ćelijama.

2. ANALIZA JEDINIČNE ČELIJA

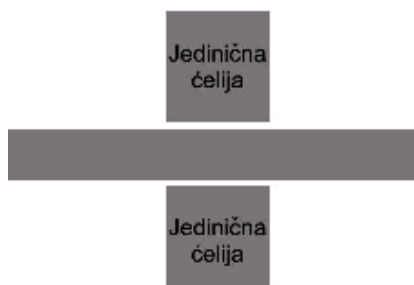
Analizirane su karakteristike tri različite jedinične ćelije: SRR, SR i SS-SRR sa dva koncentrična prstena sa procepima na suprotnim stranama. Da bi se ispitala karakteristike fraktalne

geometrije realizovan je i meandrirani SRR (M-SRR) sa obimom prstenova istih kao i SS-SRR. Predložene jedinične ćelije prikazane su na Sl. 1.

Sve jedinične ćelije su realizovane sa dva prstena i spoljašnjim dimenzijama 3.5x3.5mm, sa širinom procepa od 100 μ m, rastojanjem između prstenova od 100 μ m i širinom provodne linije prstena od 100 μ m. Čelije su postavljene pored mikrostrip linije na rastojanju od 100 μ m, kako bi se ostvarila maksimalna sprega. Sve strukture realizovane su na Taconic CER-10 podlozi debljine 1.27mm sa dielektričnom konstantom od 9.8 i tangensom ugla gubitaka od 0.0025. Širina 50 Ω -ske linije za korišćenu podlogu iznosi 1.4mm. Mikrostrip linija opterećena je sa jediničnim ćelijama postavljenim simetrično u odnosu na mikrostrip, slika 2. U odnosu na opterećenje sa jednom jediničnom ćelijom, u ovakvoj konfiguraciji dolazi do neznatnog smanjenja rezonantne učestanosti i do povećanja unesenog slabljenja. Ovakve konfiguracije ponašaju se kao filter nepropusnik opsega učestanosti u okolini rezonantne učestanosti jedinične ćelije, f_{s1} . Strukture su okarakterisane učestanostima prvog i drugog harmonika, f_{s1} i f_{s2} , procentualnom širinom 3dB opsega FBW , odnosom prva dva harmonika R , i unesenim slabljenjem u nepropusnom opsegu s_{21_0} . U Tabeli 1 prikazani su rezultati simulacija dobijeni korišćenjem programskog paketa Microwave Office, gde Δf_s predstavlja postignuto sniženje rezonantne učestanosti u odnosu na SRR.



Sl. 1. Analizirane jedinične ćelije: (a) SRR, (b) SR, (c) SS-SRR, (d) M-SRR



Sl. 2. Mikrostrip linija simetrično opterećena jediničnim ćelijama

Tabela 1. Rezultati simulacija mikrostripa opterećenog sa SRR, SR, SS-SRR i M-SRR

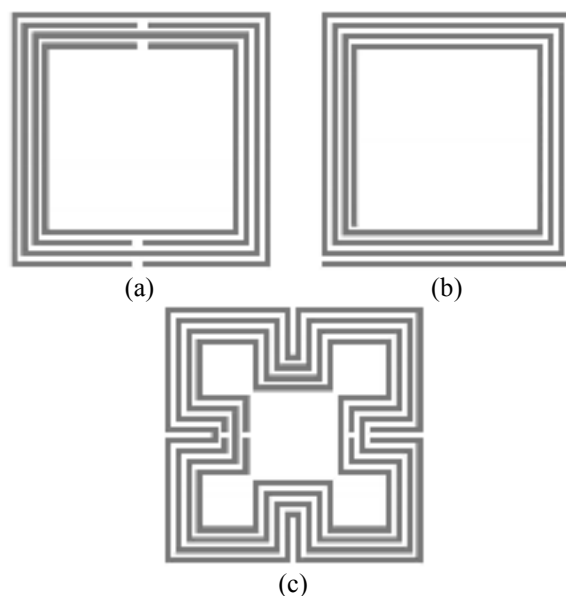
	SRR	SR	SS-SRR	M-SRR
f_{s1} [GHz]	3.36	1.72	2.49	2.86
Δf_s [%]	na	-48.8	-25.9	-14.9
f_{s2} [GHz]	6.6	5.05	4.45	5.12
R	1.96	2.93	1.79	1.79
FBW [%]	5.4	2	1.8	2.4
$s_{21,0}$ [dB]	-20.02	-18.5	-18.01	-19.88

Može se primetiti da u odnosu na SRR sve strukture pokazuju značajan potencijal za minimizaciju, jer zahvaljujući svojoj geometriji ostvaruju veću induktivnost od SRR, a ujedno i veću kapacitivnost između prstenova. SR i SS-SRR daju najniže rezonantne učestanosti, ali i uži propusni opseg i nešto manje uneseno slabljenje u odnosu SRR. M-SRR iako istog obima kao i SS-SRR, pokazuje višu rezonantnu učestanost, što potvrđuje činjenicu da fraktalna geometrija sa originalnim dimenzijama i odnosom fraktala pokazuje izuzetan potencijal za minimizaciju.

3. VIŠESTRUKGE GEOMETRIJE JEDINIČNE ĆELIJE

Već je pokazano da se korišćenjem višestrukog SRR i SR značajno snižava njegova rezonantna učestanost, [7], [8], usled povećanja sopstvene induktivnosti i kapacitivnosti jedinične ćelije. Stoga su u ovom radu poređene višestruke geometrije SRR, SR i SS-SRR, odnosno uticaj dodavanja više od dva koncentrična prstena, Sl. 3.

Povećavan je broj prstenova (zavojaka u slučaju SR) od 2 do 4 ubacivanjem po jednog koncentričnog prstena unutar slobodnog prostora, dok su ostali parametri (širina provodne linije, rastojanje između prstenova i veličina procepa) ostali nepromenjeni. Procepi prstenova su postavljeni naizmenično i širine su 100 μ m. Rezultati simulacija svih predloženih višestrukih konfiguracija prikazani su u Tabeli 2, Tabeli 3 i Tabeli 4. Kod SS-SRR ubacivanje svakog novog prstena zahteva određene modifikacije segmenata fraktala, jer je neophodno modifikovati dužinu unutrašnjih segmenata.



Sl. 3. Višestruke konfiguracije jedinične ćelije sa 4 prstena (zavojka) (a) SRR, (b) SR, (c) SS-SRR

Tabela 2. Simulacioni rezultati za mikrostrip liniju opterećenu SRR-om sa N prstenova

N	2	3	4
f_{s1} [GHz]	3.36	3.14	3.055
Δf_s [%]	na	-6.5	-8.33
f_{s2} [GHz]	7.2	6.34	5.99
R	2.14	2.02	1.96
FBW [%]	5.4	2.4	2.32
$s_{21,0}$ [dB]	-20.02	-19.56	-19.46

Tabela 3. Simulacioni rezultati za mikrostrip liniju opterećenu SR sa N zavojaka

N	2	3	4
f_{s1} [GHz]	1.72	1.22	1.01
Δf_s [%]	na	-29.1	-41.2
f_{s2} [GHz]	5.05	3.32	2.6
R	2.93	2.72	2.45
FBW [%]	2	2.25	1.35
$s_{21,0}$ [dB]	-18.5	-15.83	-14.5

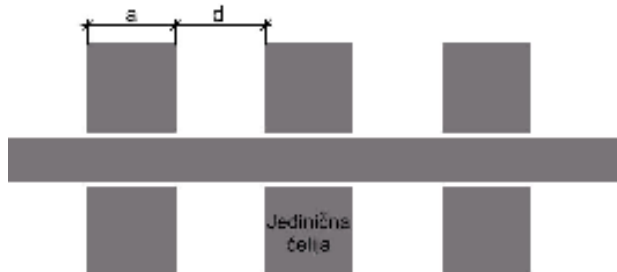
Tabela 4. Simulacioni rezultati za mikrostrip opterećen sa SS-SRR sa N prstenova

N	2	3	4
f_{s1} [GHz]	2.49	2.69	3.02
Δf_s [%]	na	8	21.3
f_{s2} [GHz]	4.45	4.18	4.73
R	1.79	1.55	1.57
FBW [%]	1.8	2.1	2.7
$s_{21,0}$ [dB]	-18.01	-19	-20.87

Kod svih konfiguracija, rezonantna učestanost opada sa povećanjem broja prstenova (zavojaka), ali dolazi i do smanjenja odnosa dva harmonika, R . Takođe, dolazi do sužavanja nepropusnog opsega. Ako se uporede dobijeni rezultati višestrukog SRR sa višestrukim SR može se primetiti da spirala generalno daje znatno nižu rezonantnu učestanost ali i da su promena performansi sa promenom broja zavojaka izraženije. Izuzetak je SS-SRR ćelija, koja zbog modifikacije segmenata, nema trend smanjenja rezonantne učestanosti sa povećanjem broja prstenova. Kod SR ili SRR ubacivanjem novih prstenova (zavojaka) ne utiče se na postojeće, što nije slučaj kod SS-SRR, što za posledicu ima činjenicu da fraktalna kriva sa malim brojem prstenova obezbeđuje najbolje performanse.

4. FILTARSKE KONFIGURACIJE

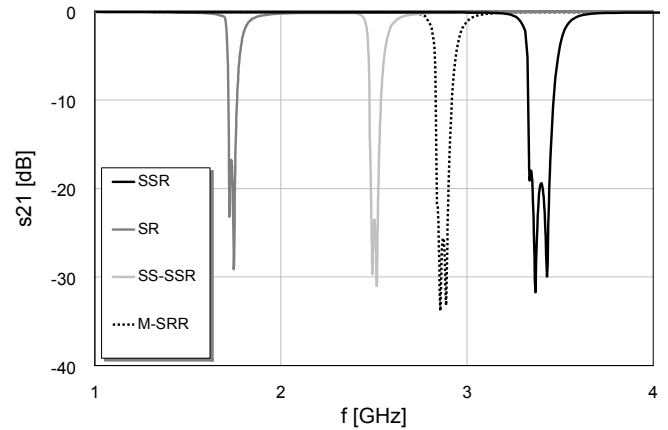
U realizaciji filtara nepropusnika opsega na bazi SRR, kao i primenama za potiskivanje viših harmonika, u cilju postizanja optimalne širine opsega do sad je korišćena tehnika promene dimenzija prekinutih prstenova, [4]. Sem veoma komplikovane i dugotrajne optimizacije, ova tehnika rezultuje filterima koji su veoma osetljivi na tolerancije pri fabricaciji. U cilju prevazilaženja ovih nedostataka, u ovom radu optimizacija je ostvarena promenom sprege između jediničnih ćelija, tj. promenom rastojanja d . Realizovani su filteri nepropusnici opsega učestanosti trećeg reda sa periodom ponavljanja jedinične ćelije od 5.5mm. Ćelije dimenzija axa (3.5x3.5mm) postavljene su na rastojanju $d=2$ mm. Realizovana konfiguracija filtra prikazana je na Sl. 4, a dobijeni odzivi na Sl. 5.



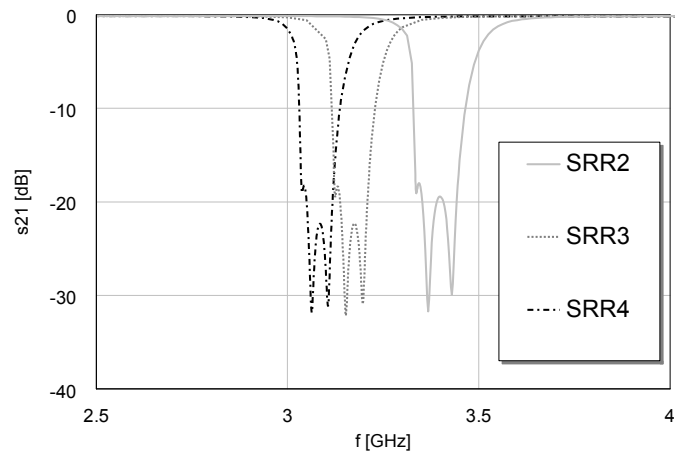
Sl. 4. Konfiguracija filtra nepropusnika opsega učestanosti trećeg reda

Dobijeni nepropusni opsezi za SRR, SR, SS-SRR i M-SRR su na 3.4, 1.73, 2.5 i 2.87GHz sa 10dB širinom opsega od 4, 2.8, 2.48 i 3.4%, respektivno. Promenom geometrije utiče se na poziciju nepropusnog opsega, ali i na njegovu širinu. Promena sprege između ćelija za različite konfiguracije utiče na širinu nepropusnog opsega i uneseno slabljenje.

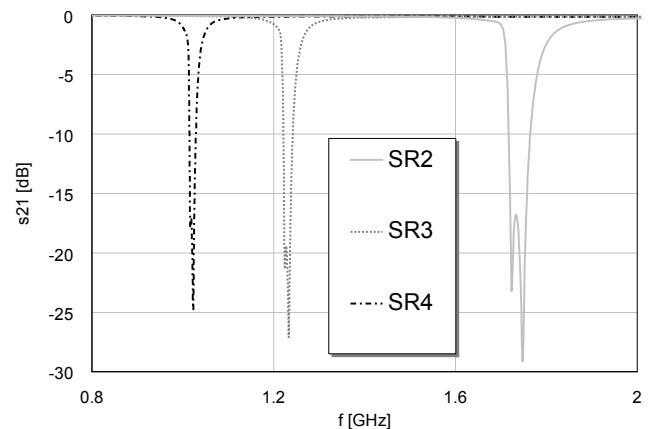
Za višestruke konfiguracije jediničnih ćelija SRR, SR i SS-SRR analiziran je uticaj promene broja prstenova (zavojaka). Simulacioni rezultati za pomenute konfiguracije sa dva, tri i četiri prstena prikazani su na Sl. 6, Sl. 7, i Sl. 8, respektivno. U Tabeli 5. prikazani su sumirani rezultati za pojedine filtere gde f_s označava učestanost nepropusnog opsega, FBW je relativna širina 10dB opsega, a s_{21} vrednost unesenog slabljenja u nepropusnom opsegu.



Sl. 5. Rezultati simulacija filtra nepropusnika opsega trećeg reda realizovanog sa jediničnim ćelijama sa slike 1.



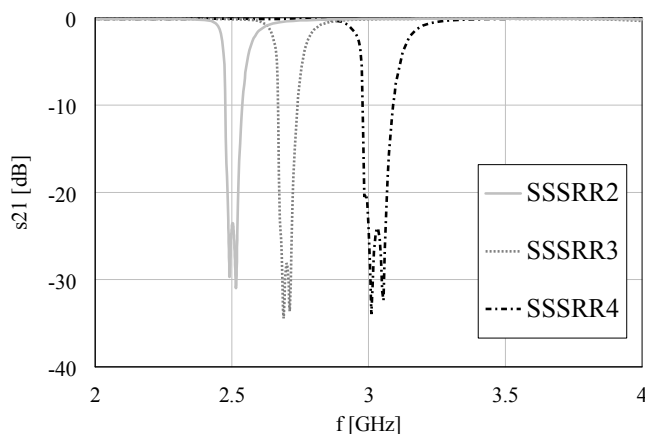
Sl. 6. Simulacioni rezultati za filtere nepropusnike opsega trećeg reda realizovane sa višestrukim jediničnim ćelijama SRR



Sl. 7. Simulacioni rezultati za filtere nepropusnike opsega trećeg reda realizovane sa višestrukim jediničnim ćelijama SR

Tabela 5. Simulacioni rezultati za filtre trećeg reda sa višestrukim geometrijama jediničnih ćelija SRR, SR, SS-SRR i M-SRR.

N	SRR			SR			SS-SRR			M-SRR
	2	3	4	2	3	4	2	3	4	
f_c [GHz]	3.4	3.15	3.07	1.73	1.23	1.02	2.5	2.7	3.03	2.87
FBW [%]	4	3.59	3.45	2.8	1.7	1.38	2.48	2.63	3.7	3.4
S_{21} [dB]	-18	-18.3	18.3	-16.8	-19.4	-17.3	-23.5	-28.2	-20.5	-25.6



Sl. 8. Simulacioni rezultati za filtre nepropusnike opsega trećeg reda realizovane sa višestrukim jediničnim ćelijama SS-SRR

Analizom dobijenih rezultata može se primetiti da se sa povećanjem broja prstenova (zavojaka) smanjuje učestanost, ali i širina propusnog opsega. Usled povećanja induktivnosti i kapacitivnosti jediničnih ćelija dolazi do pojave jače sprege između susednih ćelija, kao i između ćelija i mikrostripa što utiče na suženje opsega. Povećanjem rastojanja između susednih ćelija ne može se dalje uticati na proširenje opsega.

6. ZAKLJUČAK

Analizom različitih oblika jedinične ćelije bazirane na prekinutim i višestrukim prekinutim prstenastim rezonatorima pokazan je uticaj pojedinih geometrija na karakteristike. Određena je optimalna perioda ponavljanja jediničnih ćelija i realizovani su filtri nepropusnici opsega učestanosti trećeg reda. Pokazano je da povećanje broja prstenova (zavojaka) smanjuje rezonantnu učestanost, ali i širinu propusnog opsega. Usled povećanja induktivnosti i kapacitivnosti jedinične ćelije dolazi do pojave jače sprege između susednih ćelija, kao i između ćelija i mikrostripa što utiče na suženje opsega. Dodatnom optimizacijom dimenzija pojedinih jediničnih ćelija u filtru moguće je povećati uneseno slabljenje i širinu nepropusnog opsega pojedinih filtara.

LITERATURA

[1] J. B. Pendry, A. J. Hoden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," *Physical Review Lett.*, vol. 76, num. 25, pp. 4773-4776, 17 June 1996,

[2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, November 1999,

[3] V. Radonić, V. Crnojević-Bengin and B. Jokanović: „Different Approaches to the Design of Metamaterials,” *Microwave review*, Vol.13, No.2, pp 2-7, December 2007

[4] J. García-García, F. Martín, F. Falcone, J. Bonache, J. D. Baena, I. Gil, E. Amat, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, J. A. Iturmendi, M. Sorolla and R. Marques: „Microwave Filters With Improved Stopband Based on Sub-Wavelength Resonators,” *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, No. 6, June 2005.

[5] R. Marqués, J. Martel, F. Mesa, and F. Medina, "Left handed media simulation and transmission of EM waves in sub-wavelength SRR-loaded metallic waveguides", *Phys. Rev. Lett.*, vol 89, pp. 183901-03, 2002.

[6] F. Martín, F. Falcone, J. Bonache, R. Marqués, and M. Sorolla, "Miniaturized coplanar waveguide stop band filters based on multiple tuned split ring resonators", *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 13, pp. 511-513, December 2003.

[7] V. Crnojevic-Bengin, V. Radonic and B. Jokanovic: "Left-handed microstrip lines with multiple complementary splitting and spiral resonators," *Microwave and Optical Technology Letters* , Vol. 49. No. 6. pp. 1391-1395. June 2007.

[8] V. Crnojevic-Bengin, V. Radonic, and B. Jokanovic: "Fractal Geometries of Split-Ring Resonators", *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, No. 10, pp. 2312-2321, October 2008.

[9] V. Radonic, V. Crnojevic-Bengin, B. Jokanovic: "Analysis of Metamaterial Unit Cells Based on Grounded Patch," *Microwave review*, No. 2, Vol. 14, pp. 12-15, December 2008.

Abstract – In this paper, different shapes of unit cell based on split rings resonator, multiple geometry of split rings resonator, spiral resonators and resonator based on Sierpinski fractal curve are analyzed. With the aim of comparison, stopband filters of the third order realized using proposed unit cells are designed.

STOPBAND FILTERS BASED ON DIFFERENT METAMATERIAL UNIT CELLS

Vasa Radonić, Nikolina Janković, Vesna Crnojević-Bengin