

Kompaktni multi-band filter sa split-ring rezonatorima na FR4 supstratu za poboljšanu selektivnost u mikrotalasnim antenama

Luka Lazović
University of Montenegro
Faculty of Electrical Engineering
Podgorica, Montenegro
lukal@ucg.ac.me

Branka Jokanovic
University of Belgrade
Institute of Physics
Belgrade, Serbia
brankaj@ipb.ac.rs

Ana Jovanović
University of Montenegro
Faculty of Electrical Engineering
Podgorica, Montenegro
anaj@ucg.ac.me

Vesna Rubežić
University of Montenegro
Faculty of Electrical Engineering
Podgorica, Montenegro
vesnar@ucg.ac.me

Abstract— U ovom radu predstavljen je kompaktni multi-band filter zasnovan na split-ring rezonatorima (SRR), izrađen na FR4 supstratu. Filter je dizajniran za primjenu u mikrotalasnim antenama sa ciljem poboljšanja frekventne selektivnosti i smanjenja ukupnih dimenzija sistema. Poseban akcenat stavljen je na upotrebu jeftinog FR4 supstrata kako bi se omogućila integracija u low-cost mikrotalasne antene i uređaje. Korišćenjem SRR struktura postignuta je multi-band karakteristika sa jasno definisanim propusnim opsezima i visokom selektivnošću između njih. Filter je modelovan i optimizovan pomoću CST softvera. Dobijeni rezultati potvrđuju pogodnost predloženog rješenja za integraciju u kompaktnim i niskobudžetnim mikrotalasnim sistemima i antenama.

Cljučne reči— *Split-ring rezonatori, mikrotalasni filter, filtering antennas, FR4 supstrat*

I. UVOD

U savremenim bežičnim komunikacionim sistemima sve je izraženija potreba za komponentama koje omogućavaju rad u više frekvencijskih opsega. Ovaj trend zahtijeva dizajn multi-band uređaja koji mogu simultano obraditi više frekvencijskih opsega ili se prilagoditi različitim opsezima u realnom vremenu [1]. Korišćenje više frekvencijskih opsega u jednom sistemu omogućava optimizaciju resursa i povećanje efikasnosti, ali takođe donosi izazove u smislu veličine sistema, kompleksnosti dizajna i optimizacije performansi. Tradicionalni pristup dizajnu bežičnih sistema, gdje se pasivni elementi poput antena i filtera projektuju odvojeno i povezuju preko konektora, često vodi do povećanih dimenzija sistema, većih gubitaka i distorzije signala, posebno na ivicama opsega. U pokušaju rješavanja ovih problema, posljednjih godina pažnja istraživača fokusira se na integraciju filtera (često rekonfigurabilnih) i širokopojasnih antena u jedinstvenu cjelinu koja se naziva *filtering antennas* [1]. Korišćenjem integrisanih RF komponenti moguće je smanjiti fizičke dimenzije i poboljšati selektivnost, čime se postižu bolje performanse u multi-band komunikacijama.

Mikrotalasni filteri sa split-ring rezonatorima (SRR) su se pokazali kao veoma dobro rješenje za kombinaciju sa antenama zbog karakteristike da generišu nekoliko rezonantnih

frekvencija, a da budu relativno malih dimenzija. Iako postoje razne tehnike opisane u [2], [3] za implementaciju rekonfigurabilnih filtera, koje omogućavaju dinamičko podešavanje frekvencijskih opsega pomoću PIN dioda ili drugih elemenata, ovaj rad se fokusira na kompaktni multi-band filter bez opcije rekonfigurabilnosti. Cilj ovog rada je prilagođenje SRR rekonfigurabilnih filtera predstavljenih u [3] koji su dizajnirani za DiClad supstrat sa $\epsilon_r = 2.17$, $h = 0.787$ mm, $t = 0.017$ mm, na jeftini FR4 supstrat kako bi se isti koristili integrisano sa ultra-širokopojasnim antenama na istom FR4 supstratu. Korišćenje jeftinog FR4 supstrata omogućava integraciju filtera u niskobudžetne mikrotalasne antene i uređaje, čime se značajno smanjuju troškovi proizvodnje, a filteri postaju dostupni za široku primjenu u potrošačkoj elektronici, IoT i komercijalnim bežičnim sistemima. Sam SRR filter posjeduje multi-band karakteristike sa visokom selektivnošću između opsega, što je od ključne važnosti za poboljšanje performansi mikrotalasnih antena.

Cilj ovog rada je da se modeluje i optimizuje dizajn filtera pomoću CST softverskog alata, sa posebnim akcentom na postizanje što kompaktnijih dimenzija bez kompromisa u pogledu selektivnosti i efikasnosti i implementacija jednog takvog filtra sa mikrotrakastom ultra-širokopojasnom antenom. U radu su prilagođeni ranije razvijeni filteri za FR4 supstrat i optimizovane su njegove dimenzije. Ovaj dizajn može biti osnov za dalja istraživanja u oblasti integrisanih RF sistema i filtrirajućih antena, kao i za budući razvoj rekonfigurabilnih filtera, koji mogu koristiti PIN diode ili druge tehnologije za dinamičko podešavanje rezonantnih frekvencija.

II. SPLIT RING REZONATORI

Split-ring rezonator je metalna struktura u obliku jednog ili više koncentričnih prstenova sa uskim prerezom (split) na jednom mjestu svakog prstena. Zbog svojih jedinstvenih elektromagnetskih svojstava koriste se u projektovanju filtera, antena i drugih RF komponenti. SRR se najčešće izrađuju u mikrotrakastoj tehnici, što ih čini pogodnim za integraciju sa standardnim planarnim elementima. Ključni parametri koji određuju rezonantne karakteristike SRR-a uključuju prečnik

prstena, širinu metalne trake, veličinu proreza i razmak između prstenova.

Princip rada SRR-a može se objasniti pomoću ekvivalentnog LC kola, gdje induktivnost proizilazi iz metalnog prstena, a kapacitivnost nastaje usled prisustva proreza i međusobne sprege između prstenova. Rezonantna frekvencija SRR-a približno se može izračunati pomoću formule za LC rezonantni krug, gdje se vrijednosti induktivnosti i kapacitivnosti određuju na osnovu geometrijskih parametara strukture.

Zahvaljujući svojim jedinstvenim svojstvima, posebno sposobnosti da ostvaruju negativnu permitivnost i permeabilnost, SRR nalaze primjenu u brojnim oblastima tehnologije. U mikrotalasnoj tehnici, SRR se najčešće koriste za izradu filtara sa specifičnim frekvencijskim karakteristikama. Koriste se za poboljšanje performansi antena, omogućavajući smanjenje dimenzija, proširenje radnog opsega ili poboljšanje usmjerenosti zračenja. SRR se često integrišu u antene kako bi se postigle specifične karakteristike koje su potrebne u modernim komunikacionim sistemima.

Na tačno definisanim frekvencijama, koje zavise od geometrije SRR elemenata i električnih karakteristika podloge, dolazi do pojave rezonance. Ova rezonanca može uzrokovati pojavu propusnih opsega u frekventnom odzivu filtera, u zavisnosti od načina sprežanja sa linijom. Kombinovanjem više SRR elemenata različitih dimenzija, moguće je ostvariti multi band filtere, gdje svaki rezonator generiše jednu rezonantnu frekvenciju.

U praksi se najčešće koriste sledeće konfiguracije: Neposredno spregnuti SRR filteri - gde su rezonatorski elementi direktno spojeni na mikrotrakaste vodove; Magnetno spregnuti SRR filteri - gde interakcija između vodova i rezonatora ostvaruje se preko magnetske sprege; Kaskadne SRR strukture - višestepeni filteri formirani serijskim povezivanjem više SRR jedinica [4]–[9].

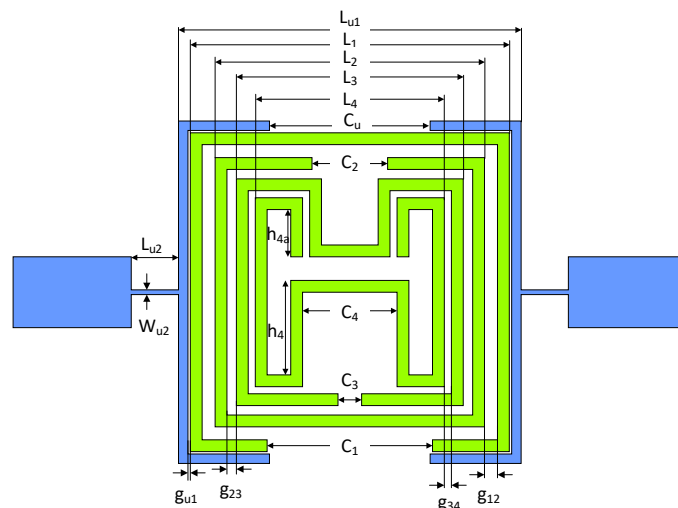
Prednosti mikrotrakastih SRR filtera su višestruke. Prvo, dimenzije ovakvih filtera mogu biti izuzetno kompaktne, jer SRR rezonatori mogu rezonovati na frekvencijama koje su znatno veće od onih koje odgovaraju njihovim dimenzijama. Drugo, dizajn ovih filtera je izuzetno fleksibilan — jednostavnom promjenom dimenzija rezonatora moguće je precizno podešavati položaj rezonantnih frekvencija. Treće, tehnologija izrade je jednostavna i jeftina, jer se koristi standardna PCB tehnologija, što ih čini pogodnim za serijsku proizvodnju i komercijalnu primjenu.

Međutim, mikrotrakasti SRR filteri imaju i određena ograničenja. Na primjer, kod upotrebe FR4 supstrata dolazi do povećanih dielektričnih gubitaka, naročito pri višim frekvencijama. Takođe, u multi-band konfiguracijama, interakcije između više SRR elemenata mogu otežati precizno podešavanje opsega i zahtijevaju pažljivu elektromagnetnu optimizaciju. Bez dodatnih aktivnih komponenti, kao što su PIN diode, ovakvi filteri su fiksni i ne mogu mijenjati svoj odziv u realnom vremenu, što ih ograničava u dinamičkim sistemima.

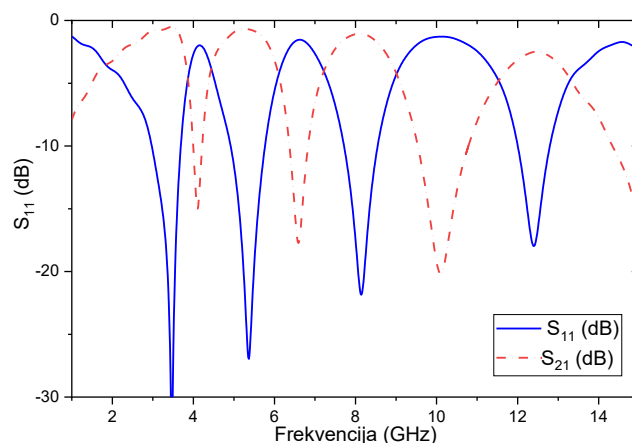
III. FILTER SA ČETIRI SRR-A

Na sl. 1 je prikazan izled predloženog filtera sa SRR. Filtar iz [3] je optimizovan i realizovan na FR4 supstratu, za razliku od originalnog koji je realizovan na DiClad supstratu. Na slici 1 se može vidjeti da su sa strane uvodnici, širine L_{u1} , dok su kod dva

susjedna rezonatora procijepi (širine C) postavljeni na suprotnim stranama. Na ovaj način se formira filtara sa četiri propusna opsega. S parametri ovog filtera su prikazani na slici 2. Sa slike se može vidjeti da susjedni propusni opsezi razdvojeni transmissionim nulama čime je povećana selektivnost datog filtera. Rezonatori su međusobno spregnuti, tako da su na propusnim opsezima uvijek pobuđena dva ili tri rezonatora. Dimenzije filtera prikazanog na slici 1 su $C_1=7\text{mm}$; $C_2=3.2\text{mm}$; $C_3=1\text{mm}$; $C_4=4\text{mm}$; $C_u=6.8\text{mm}$; $L_1=13.5\text{mm}$; $L_2=11.4\text{mm}$; $L_3=9.6\text{mm}$; $L_4=8\text{mm}$; $L_{u1}=14.5\text{mm}$; $L_{u2}=2\text{mm}$; $g_{12}=0.7\text{mm}$; $g_{23}=0.4\text{mm}$; $g_{34}=0.3\text{mm}$; $g_{u1}=0.1\text{mm}$; $h_4=3\text{mm}$; $h_{4b}=3\text{mm}$; $w=0.5\text{mm}$; $w_{u2}=0.2\text{mm}$. Debljina metalizacije je $0.017\mu\text{m}$ a debljina FR4 supstrata je 1.58 mm .



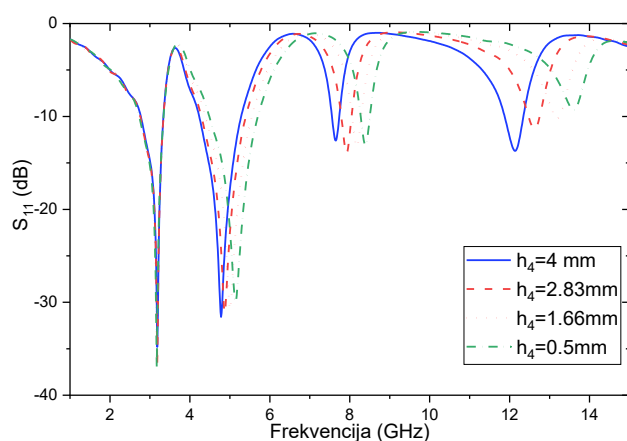
Sl. 1 Izgled filtera sa SRR.



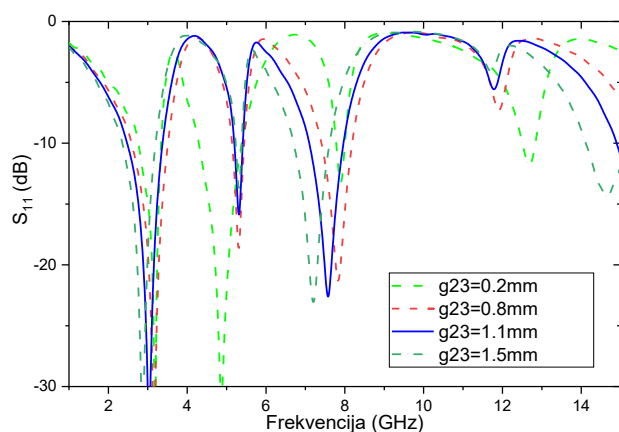
Sl. 2 S parametri predloženog filtera sa slike 1

Očigledno je da se promjenom dimenzija filtera značajno utiče na položaj propusnih opsega. U cilju određivanja optimalnih dimenzija za postizanje željenih propusnih opsega, podešavanje parametara filtera je postignuto parametarskom optimizacijom.

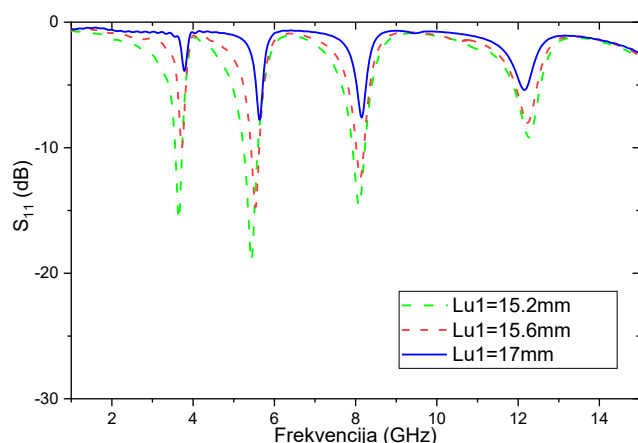
Na slici 3 je prikazan uticaj parametra h_4 na položaj rezonantnih učestanosti. Može se vidjeti da ovaj parametar dominantno utiče na položaj druge, treće i četvrte rezonantne učestanosti. Svi ostali parametri filtera u ovoj parametarskoj analizi su ostali isti.

Sl. 3 Uticaj parametra h_4 na položaje rezonantnih učestanosti

Uticaj parametra g_{23} je prikazan na slici 4. Parametar g_{23} predstavlja rastojanje drugog i trećeg prstena. Na osnovu rezultata može se vidjeti ovaj parametar ima značajan uticaj na četvrtu rezonantnu učestanost. Povećanjem ove udaljenosti jasno je da se smanjuje sprega između ovih rezonatora.

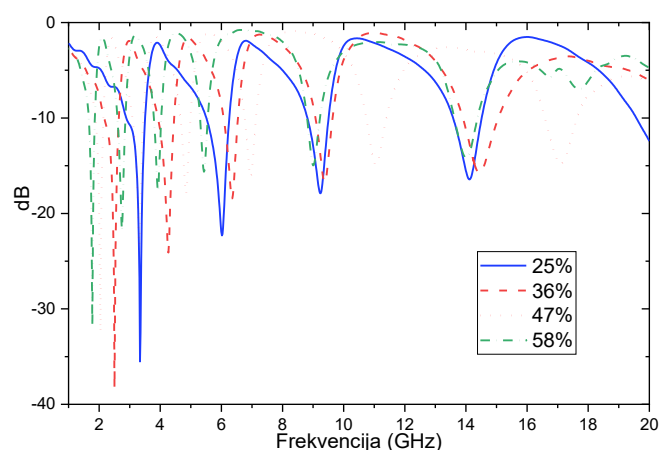
Sl. 4 Uticaj rastojanja g_{23} na položaje rezonantnih učestanosti

Uticaj dimenzije uvodnika L_{u1} na rezonantne učestanosti je prikazan na slici 5.

Sl. 5 Uticaj dimenzije uvodnika L_{u1} na položaje rezonantnih učestanosti

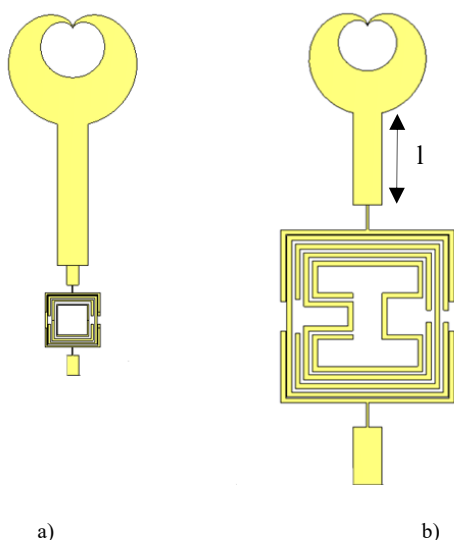
Može se vidjeti da prevelikim udaljavanjem uvodnika od rezonatora značajno smanjuje sprega i filter uopšte ne radi. Takođe se može vidjeti da dimenzija uvodnika ne utiče na položaje rezonantnih učestanosti već samo na vrijednost S_{11} parametra. Sa druge strane, može se vidjeti, na osnovu rezultata sa slike 4 da povećanje rastojanja između rezonatora ne utiče značajno na širinu propusnog opsega.

Jedna od veoma bitnih karakteristika filtra je njegova skalabilnost, tj. zadržavanje karakteristika prilikom smanjenja dimenzija. S obzirom na ideju da filter treba da bude robustan, tj. stabilnih karakteristika i prilikom grešaka u izradi, analizirane su njegove karakteristike kada se dimenzije skaliraju za određeni procenat. Na slici 6 su prikazani S_{11} parametri kada se cjelokupan filter skalira za 25%, 36%, 47% i 58%. Naravno, debljina metalizacije i supstrata se ne skalira. Sa slike 6 možemo vidjeti da se prva rezonantna učestanost pomjera udesno kako se smanjuje filter. Na ovaj način možemo jednostavno prilagoditi radni opseg filtra bez dodatnih finih podešavanja. Kao što je u uvodu naglašeno da je cilj bio dizajnirati robustan filter čije performanse ne zavise od preciznosti izrade, ovdje se može vidjeti da je se skaliranje zadržavaju dobre karakteristike tj neće doći do gubitka frekvencijskih karakteristika kada se dimenzije promijene čak i za 10 %.



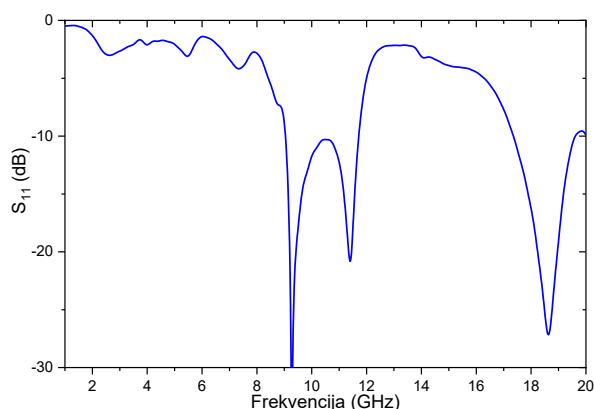
Sl. 6 S parametri predloženog filtra za različita uvećanja dimenzija filtra

Ovaj filter je prvenstveno dizajniran za korišćenje u *filtering antennas* aplikacijama [1]. U tu svrhu, integrisan je sa ultraširokopojasnom antenom iz [10]. Ova antena radi u opsegu od 4 GHz do 30 GHz. Antena pripada grupi električno malih antena dimenzija samo 18.5 mm x 25mm, 1.6 mm, sa efikasnošću do 80% i pojačanjem 5 dBi. Da bi se postigle *notched* karakteristike, tj. da antena radi samo na određenim učestanosti u napojni vod antene je integrisan predloženi SRR filter sa četiri propusna opsega. Na slici 7 su prikazane dvije verzije filtra za postizanje različitih frekvencijskih karakteristika. Propusni opsezi su kontrolisani dimenzijama filtra i pozicijom povezivanja filtra i napojnog voda antene.



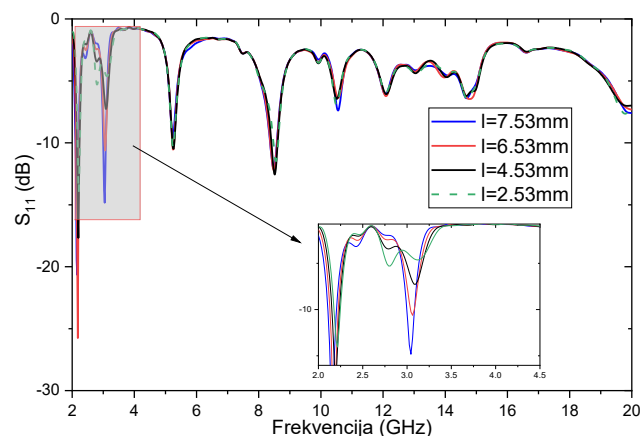
Sl. 7 Izgled *filtering antenna*-e u dvije različite konfiguracije

S_{11} parametar antene sa filtrom sa slike 7 a) je prikazan na slici 8. Vidi se da se podešavanjem dimenzija filtra mogu izbacivati neželjeni opsezi ove širokopojasne antene [1][5]. Postignuti propusni opsezi su od 9 GHz do 12 GHz i od 17 GHz do 19.5 GHz.



Sl. 8 S parametri predložene antene sa slike 7 a)

Pozicija povezivanja filtra i antene utiče na propusne opsege i njihovu širinu. Na slici 9 je prikazana jedna uporedna analiza gdje se mijenjala dužina linije za napajanje monopol antene od $l=2.53$ mm do $l=7.53$ mm, slika 7 b). U ovom slučaju, korišćen je filter sa drugačijim dimenzijama prilagođen za tri uska propusna opsega. Možemo vidjeti da promjena ove pozicije može uticati na postojanje drugog propusnog opsega, kao i na širinu prvog propusnog opsega. Naravno, detaljnom optimizacijom se mogu postići preciznija podešavanja.



Sl. 9 Uticaj pozicije spajanje filtra i antene sa slike 7 b) na položaje rezonantnih učestanosti

Na osnovu rezultata simulacija se jasno može vidjeti da se dodavanjem filtera može uticati na kontrolu propusnih opsega ultra-širokopojasne antene. Pravac daljeg istraživanja je razvijanje rekonfigurabilne *filtering antenna*-e na jeftinom FR4 supstratu.

ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je dizajn i optimizacija kompaktnog multi-band mikrotalasnog filtra zasnovanog na split-ring rezonatorima (SRR), implementiranog na jeftinom FR4 supstratu. Predloženi filter pokazuje jasno definisane rezonantne frekvencije i visoku selektivnost između propusnih opsega, što ga čini pogodnim za integraciju u mikrotalasne antene i niskobudžetne bežične sisteme. Korišćenjem četiri SRR elementa postignuto je više propusnih opsega sa visokom selektivnošću između njih, što je od ključne važnosti za unapređenje performansi mikrotalasnih antena. Parametarska analiza je pokazala da su određeni geometrijski parametri od suštinskog značaja za podešavanje rezonantnih frekvencija i efikasnost rada filtra.

Predloženi filter pokazuje robusne karakteristike, zadržavajući funkcionalnost čak i pri skaliranju dimenzija, što ga čini pogodnim za implementaciju u kompaktnim i niskobudžetnim RF sistemima. Integracija filtra sa ultra-širokopojasnom antenom demonstrirala je mogućnost selektivnog oblikovanja propusnih opsega, čime se direktno utiče na poboljšanje performansi antene kroz koncept tzv. *filtering antennas*. Dobijeni rezultati ukazuju na mogućnost dalje minijaturizacije i razvoj rekonfigurabilnih varijanti pomoću aktivnih elemenata, što predstavlja pravac budućih istraživanja.

REFERENCE

- [1] C. X. Mao, Y. Zhang, X. Y. Zhang, P. Xiao, Y. Wang, and S. Gao, "Filtering Antennas: Design Methods and Recent Developments," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 22, no. 11, pp. 52–63, Nov. 2021, doi: 10.1109/MMM.2021.3102199.
- [2] M. Ninic, B. Jokanovic, and P. Meyer, "Reconfigurable Multi-State Composite Split-Ring Resonators," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 26, no. 4, pp. 267–269, Apr. 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2537790.
- [3] N. Marko and B. Jokanovic, "Minijaturan prekidacki multi-band filter sa split-ring rezonatorima" Zbornik radova Konferencije ETRAN 2016, Zlatibor, Srbija, 13-16. jun, 2017.

- [4] D. Sarkar, K. V. Srivastava, and K. Saurav, "A Compact Microstrip-Fed Triple Band-Notched UWB Monopole Antenna," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 396–399, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2014.2306812.
- [5] I. B. Vendik, A. Rusakov, K. Kanjanasit, J. Hong, and D. Filonov, "Ultrawideband (UWB) Planar Antenna with Single-, Dual-, and Triple-Band Notched Characteristic Based on Electric Ring Resonator," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, no. c, pp. 1597–1600, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2652978.
- [6] I. B. Vendik and A. S. Rusakov, "Multimode electric ring resonator (ERR) for ultra-wideband (UWB) antenna with multi-notch band," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1461, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1461/1/012183.
- [7] J. Y. Siddiqui, C. Saha, and Y. M. M. Antar, "Compact SRR loaded UWB circular monopole antenna with frequency notch characteristics," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 8, pp. 4015–4020, 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2327124.
- [8] A. A. Chandran and S. Thankachan, "Triple Frequency Notch in UWB Antenna with Single Ring SRR Loading," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 93, no. September, pp. 94–100, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.07.187.
- [9] N. Jaglan, S. D. Gupta, B. K. Kanaujia, S. Srivastava, and E. Thakur, "Triple band notched DG-CEBG structure based UWB MIMO/diversity antenna," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 80, no. December 2017, pp. 21–37, 2018, doi: 10.2528/pierc17090702.
- [10] L. Lazović, B. Jokanovic, V. Rubežić, and A. Jovanović, "Printed Ultra-Wideband Cardioid Monopole Antenna for Energy Harvesting Application," in *TELSIKS 2019: 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS) : proceedings of papers : Serbia, Niš, October 23-25, 2019*, 2019, pp. 0–4.

ABSTRACT

This paper presents a compact multi-band filter based on split-ring resonators (SRRs), fabricated on an FR4 substrate. The filter is designed for use in microwave antennas with the aim of improving frequency selectivity and reducing the overall system dimensions. Special emphasis is placed on the use of low-cost FR4 substrate to enable integration into affordable microwave antennas and devices. By utilizing SRR structures, a multi-band characteristic is achieved with clearly defined passbands and high selectivity between them. The filter is modeled and optimized using CST software. The obtained results confirm the suitability of the proposed solution for integration into compact and low-cost microwave systems and antennas.

Compact Multi-Band Filter with Split-Ring Resonators on FR4 Substrate for Enhanced Selectivity in Microwave Antennas

Luka Lazović, Branka Jokanovic, Ana Jovanović and Vesna Rubežić