

# POREĐENJE LH MIKROSTRIP LINIJA SA KOMPLEMENTARNIM PREKINUTIM PRSTENOVIMA I SPIRALOM

Vesna Crnojević-Bengin<sup>1</sup>, Vasa Radonić<sup>1</sup>, Branka Jakanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

<sup>2</sup>Institut IMTEL, Beograd

**Sadržaj** — U ovom radu prikazana su dva tipa Left-Handed (LH) mikrostrip linija, koje za dobijanje negativne permeabilnosti koriste komplementarne prekinute prstenove i spirale, respektivno. Dimenzije elemenata određene su tako da obe linije imaju približno istu centralnu učestanost LH opsega. Obe LH mikrostrip linije fabrikovane su u konvencionalnoj tehnologiji štampanih ploča i izvršeno je poređenje njihovih karakteristika.

## 1. UVOD

U poslednjih četiri godine revolucionarni rezultati pojavili su se u oblasti metamaterijala, veštačkih struktura koje pokazuju elektromagnetske osobine materijala kakve se ne mogu naći u prirodi, odnosno neuobičajene vrednosti relativne dielektrične permitivnosti i magnetske permeabilnosti. Kod materijala koji postoje u prirodi, ove vrednosti ograničene su na veoma uzak opseg, dok postojanje materijala sa ekstremnim vrednostima permitivnosti i permeabilnosti omogućava projektovanje novih uređaja sa poboljšanim performansama. Metamaterijali su periodične strukture kod kojih je perioda ponavljanja jedinične ćelije znatno manja od talasne dužine talasa koji se kroz njih prostire. Pošto talas ovakvu strukturu vidi kao homogenu, moguće je odrediti efektivne vrednosti permitivnosti i permeabilnosti. U zavisnosti od oblika jedinične ćelije i periode ponavljanja, ove vrednosti mogu se napraviti, uslovno rečeno, proizvoljno malim ili velikim.

U prirodi se samo pod specijalnim uslovima sreću materijali koji pokazuju negativnu permitivnost ili permeabilnost. Na primer, dobri provodnici na učestanostima reda THz pokazuju negativnu permitivnosti, dok feriti u optičkom opsegu pokazuju negativnu permeabilnost. Međutim, u slučajevima kada je samo jedan od ova dva parametra negativan, konstanta prostiranja postaje imaginarna te ovakav materijal ne podržava propagacioni mod.

Ruski fizičar Viktor Veselago objavio je 1967. godine rad u kome je analizirao ponašanje hipotetičkih duplo-negativnih materijala, odnosno materijala koji bi istovremeno imali i negativnu permitivnost i negativnu permeabilnost, [1]. Pokazao je da bi u tom slučaju konstanta prostiranja bila realna, odnosno da bi ovakvi materijali omogućili prostiranje talasa. Međutim, konstanta prostiranja bi istovremeno bila i negativna, što znači da bi. fazna brzina i grupna brzina imale suprotan smer, a talas se prostirao unazad. Kod ovakvog materijala, pri prostiranju talasa ne bi dolazilo do kašnjenja faze već do njenog prednjačenja. Vektori elektomagnethog polja više ne bi bili orijentisani po pravilu desne ruke, već po pravilu leve ruke (engl. *Left-Handed, LH*), odakle i potiče

naziv LH metamaterijali. Međutim, kako u prirodi ne postoje materijali koji istovremeno pokazuju negativnom permitivnost i permeabilnost, Veselago-ove ideje dugo nisu eksploatisane. Tek 1996. godine J. B. Pendry sa koautorima objavljuje rad o veštački napravljenom materijalu koji pokazuje negativnu permitivnost u mikrotalasnem opsegu učestanosti, [2]. Osnovna ideja bila je ta da se iskoristi inherentna osobina dobrih provodnika koji pokazuju negativnu permitivnost na učestanostima nižim od učestanosti plazmona (engl. *plasmon frequency*). Pendry je projektovao žičanu strukturu koje je imala učestanost plazmona na oko 8.5GHz i time napravio prvi tzv. single-negative metamaterijal na mikrotalasnim učestanostima. Tri godine kasnije Pendry predlaže prekinute prstenaste rezonatore, (engl. *Split Ring Resonator, SRR*) kao jedinične ćelije strukture koja pokazuje negativnu permeabilnost u uskom opsegu učestanosti, [3]. U istom radu Pendry predlaže i spirale kao moguću geometriju. Princip rada obe geometrije je isti: kada se materijal sačinjen od velikog broja periodično postavljenih SRR izloži normalnom magnetskom polju, u prstenvima se indukuju struje usled se čijeg proticanja procep u prstenu ponaša kao virtuelni kondenzator, a sam prsten kao induktor. Efektivna relativna permeabilnost ovakvog materijala je takođe rezonantne prirode, i iznad rezonantne učestanosti postoji uzan opseg u kom je ona negativna.

Umesto jednostrukog SRR, Pendry je predložio korišćenje dva koncentrična prstena sa procepima na suprotnim stranama, postavljena na minimalno međusobno rastojanje. Na taj način kapacitivnost strukture je višestruko povećana jer je, umesto kapacitivnosti virtuelnog pločastog kondenzatora na krajevima prstena, jednaka podužnoj kapacitivnosti između dva prstena. Dodavanjem unutrašnjeg prstena takođe je značajno povećana i induktivnost strukture, što zajedno sa povećanom kapacitivnošću rezultuje smanjenjem rezonantne učestanosti.

Kombinujući dve Pendry-eve strukture mogu se dobiti LH metamaterijali koji u nekom opsegu učestanosti pokazuju istovremeno i negativnu permitivnost i negativnu permeabilnost. Iako uskopojasne prirode, ovakve konfiguracije privukle su veliku pažnju u poslednjih nekoliko godina, [4] i [5].

Usled oblika polja mikrostripa, negativna permeabilnost se dobija i kada se provodni SRR postavi pored mikrostripa. Međutim, ovakav geometrijski raspored često nije prikladan. Polazeći od Babinet-ovog principa, u [6] i [7] predložen je komplementarni SRR, (engl. *Complementary Split Ring Resonator, CSRR*), dualna struktura koja se umesto pored mikrostripa nalazi ispod njega, nagrizena u uzemljenom provodnom sloju. Prema Babinet-ovom principu, periodično ponavljanje CSRR daje negativnu permitivnosti. Sa druge

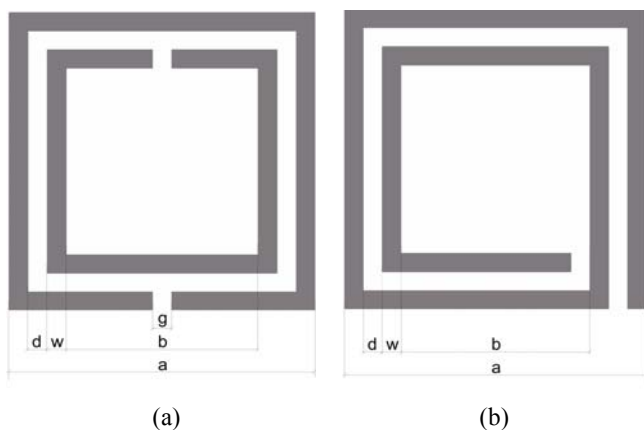
strane, pokazano je da periodično ponavljanje procepa u mikrostripu rezultuje negativnom permeabilnošću. Kombinovanjem ova dva elementa, CSRR i procepa, moguće je dobiti LH mikrostrip liniju, koja je po svojoj prirodi propusnik opsega.

U ovom radu projektovane su i fabrikovane mikrostrip linije koje koriste kvadratne CSRR i spirale. Obe linije projektovane su na istoj podlozi, a dimenzije kola optimizovane su tako da obe strukture imaju približno jednaku centralnu učestanost propusnog opsega. Dokazano je postojanje LH opsega učestanosti i upoređene su osobine ovih linija.

## 2. KONFIGURACIJE

U ovom radu, kružni prstenovi koje je predložio Pendry zamenjeni su kvadratnim zbog jednostavnije simulacije i fabrikacije kola. Ovo ne predstavlja značajnu promenu, jer ivični efekti na uglovima kvadratnog prstena vrlo malo remete performanse prekinutog prstena. Kvadratni CSRR prikazan je na slici 1a, gde  $a$  predstavlja spoljašnji prečnik,  $b$  unutrašnji prečnik,  $g$  širinu procepa,  $d$  rastojanje između prstenova, a  $w$  širinu linije od koje je CSRR načinjen.

Kvadratni CSRR poreden je sa spiralnom strukturom sa dva zavojka prikazanom na slici 1b, jednakih dimenzija  $a$ ,  $b$ ,  $d$ , i  $w$ . Ovakva spirala ima približno istu ukupnu dužinu linije kao i kvadratni SRR i zauzima identičnu površinu.



Sl. 1. Analizirane strukture: (a) kvadratni CSRR, (b) spirala. Belom bojom predstavljen je metal, a sivom nagriženi oblik.

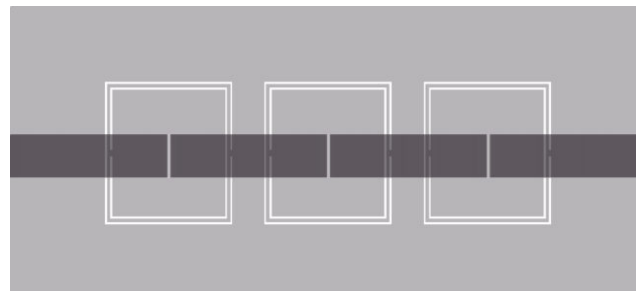
Spoljašnji prečnik obe strukture jednak je  $a=5\text{mm}$ . Kako bi se maksimizovala njihova induktivnost, širina linija od kojih su načinjene je minimalna ostvariva u standardnoj PCB tehnologiji i iznosi  $w=100\mu\text{m}$ . Takođe, u cilju maksimizacije kapacitivnosti struktura, rastojanje susednih provodnih segmenata je minimalno moguće i iznosi  $d=100\mu\text{m}$ . Procep  $g$  u slučaju kvadratnog CSRR iznosi  $200\mu\text{m}$ .

Jedinična ćelija LH mikrostrip linije sastoji se od kvadratnog CSRR (ili spirale) nagriženog u donjem provodnom sloju i 50-omskog mikrostripa sa procepom širine  $100\mu\text{m}$  u gornjem provodnom sloju. Kako bi se ostvarila maksimalna sprega, procep je postavljen tačno iznad CSRR (odnosno spirale).

Periodičnim ponavljanjem  $N$  ovakvih jediničnih ćelija dobijene su LH mikrostrip linije. Perioda ponavljanja u

slučaju obe linije jednaka je  $6\text{mm}$ . Obe linije realizovane su na Taconic CER-10 podlozi debljine  $1.27\text{mm}$ , relativne permitivnosti  $\epsilon_r=9.8$  i faktora gubitaka jednakog  $0.0025$ .

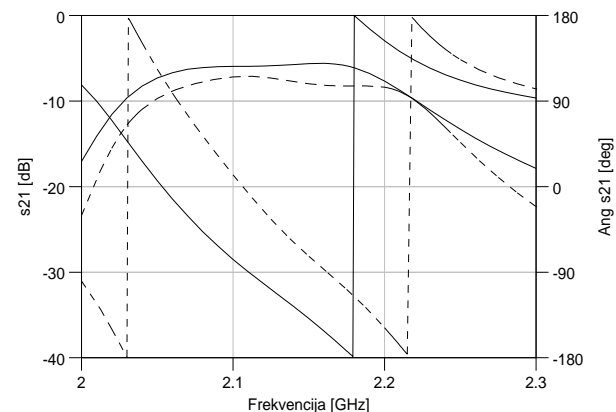
Izgled LH mikrostrip linije sa kvadrantom CSRR prikazan je na slici 2 za slučaj  $N=3$ . Vidljiva su oba provodna sloja: gornji (tamno sivi) i donji (svetlo sivi).



Sl. 2. LH mikrostrip linija sa kvadratnim CSRR

## 3. LH OPSEG UČESTANOSTI

U ovoj sekciji pokazano je da je linija sa slike 2 zaista LH prirode. Ovo se lako može utvrditi simulacijama dve linije sa različitim brojem jediničnih ćelija  $N$ . Naime, kod konvencionalnih (RH) linija, povećanje dužine linije rezultuje i kašnjenjem faze. Usled prostiranja unazad karakterističnog samo za LH medium, povećanje dužine rezultovaoće prednjačenjem faze. Ovo je ilustrovan na slici 3 koja prikazuje argument i fazu  $s_{21}$  koeficijenta za LH mikrostrip liniju sa kvadratnim CSRR načinjenu od  $N=3$  i  $N=4$  jediničnih ćelija. Poređenjem grafika vidi se da u propusnom opsegu prednjači faza duže linije, čime se direktno dokazuje njihova LH priroda.



Sl. 3. Poređenje faza LH mikrostrip linija sa kvadratnim CSRR sa  $N=4$  (isprekidana linija) i  $N=3$  (puna linija) jedinične ćelije.

## 4. SIMULACIONI I MERENI REZULTATI

Karakteristike LH mikrostrip linija sa  $N=3$  jedinične ćelije određene su korišćenjem *EMSiht-a*, EM simulatora u *Microwave Office*-u. Poređenje simulacionih rezultata za slučaj sa gubicima prikazano je Tabeli I, gde  $f_c$  označava centralnu učestanost LH opsega,  $BW$  njegovu širinu,  $s_{210}$  uneseno slabljenje, a *Att.* slabljenje u nepropusnom opsegu.

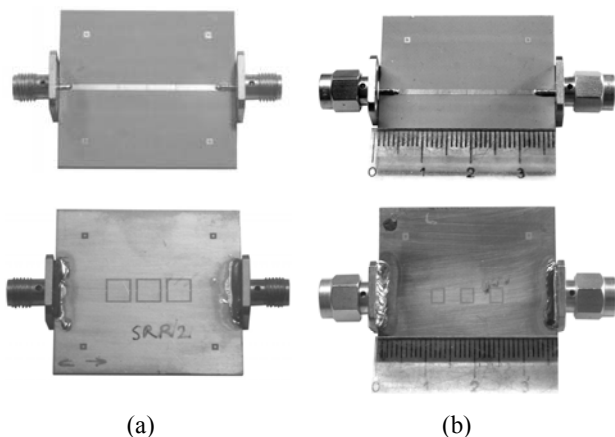
Spoljašnji prečnik spirale optimizovan je tako da obe linije imaju približno iste centralne učestanosti LH opsega, i iznosi 2.9mm.

Tabela 1. Rezultati simulacija za LH mikrostrip linije podešene na približno istu centralnu učestanost

	Spiral	CSRR
fc [GHz]	2.01	2.12
s <sub>21 0</sub> [dB]	-13.3	-5.6
BW [MHz]	61.15	185
Att. [dB]	-45	-35

Iako omogućava smanjenje dimenzija elementa u donjem provodnom sloju za oko 40%, spiralna geometrija unosi daleko veća slabljenja od kvadratnog CSRR, i pokazuje značajno užu propusnog opsega.

U cilju verifikacije simulacionih rezultata, obe LH mikrostrip linije fabrikovane u standardnoj tehnologiji štampanih ploča. Fotografije gornjeg i donjeg sloja obe fabrikovane strukture prikazane su na slici 4.

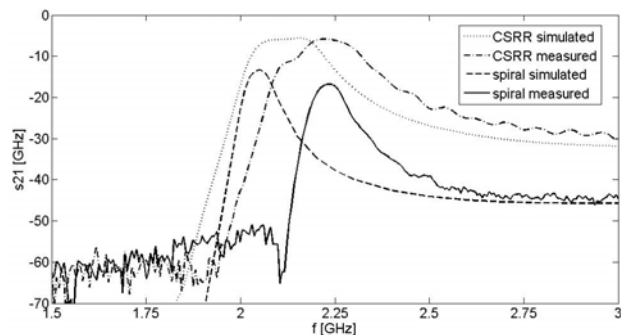


Sl. 4. Gornja i donja strana fabrikovanih LH mikrostrip linije: (a) kvadratni CSRR, (b) spirala.

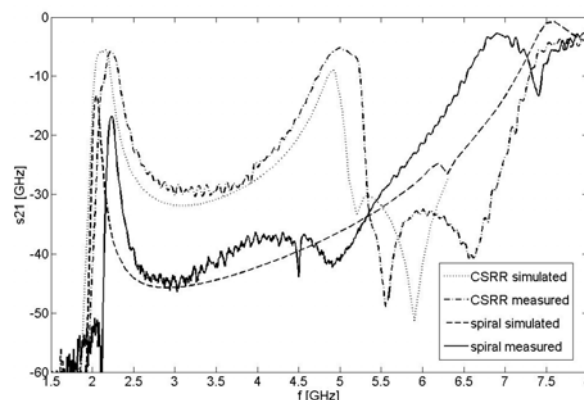
Rezultati simulacija i merenja obe LH mikrostrip linije prikazani su na slici 5. Dobro slaganje simulacionih rezultata sa merenjima dobijeno je za kvadratni CSRR dok su kod spiralne geometrije ova odstupanja značajnija. Odstupanja u centralnoj učestanosti mogu se objasniti razlikom stvarne i simulirane vrednosti dielektrične konstante korišćene podloge, pošto je po specifikacijama proizvođača tolerancija  $\epsilon_r$  u opsegu od +/- 0.5.

Izmereno uneseno slabljenje podudara se dobro sa vrednostima dobijenim simulacijom za CSRR geometriju, dok je u slučaju spirale povećano.

Na slici 6. prikazani su rezultati za obe strukture u opsegu do 8GHz. Uočava se da konfiguracija koja koristi spiralnu strukturu pokazuje značajno veće potiskivanje u nepropusnom opsegu. Štaviše, u slučaju spirale drugi harmonik nalazi se tek na oko 3fr, dok se za CSRR geometriju on nalazi nešto više od 2fr.



Sl. 5. Poređenje simulirani i izmerenih odziva LH mikrostrip linija sa kvadratnim CSRR i spiralom.



Sl. 6. Poređenje simulirani i izmerenih odziva LH mikrostrip linija sa kvadratnim CSRR i spiralom. u širem opsegu učestanosti

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazane su LH mikrostrip linije koje koriste procepe u gornjem, i kvadratne CSRR i spirale u donjem (uzemljenom) provodnom sloju. Nakon što je dokazana njihova LH priroda, upoređene su performanse obe linije. Fabrikacija i merenja pokazali su da korišćenje spiralne geometrije smanjuje ukupne dimenzije elementa u donjem provodnom sloju za oko 40% za fiksne vrednosti svih ostalih geometrijskih parametara. Međutim, konfiguracija koja koristi spirale pokazuje i veće uneseno slabljenje i užu propusnim opseg od one sa CSRR.

Merenja u širem opsegu učestanosti pokazala su da se spiralna struktura daje značajno širi nepropusni opseg sa višim nivoom potiskivanja, obzirom da je u tom slučaju drugi harmonik sa 2fr, tipičnih za CSRR geometriju, pomeren na 3fr.

## LITERATURA

- [1] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 92, no. 3, pp. 517--526, 1967.
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," *Physical Review Letters*, vol. 76, num. 25, pp. 4773-4776, 17 June 1996

- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Transactions on microwave theory and technique*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, November 1999.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] F. Falcone, T. Lopetegi, M.A.G. Laso, J.D. Baena, J. Bonache, R. Marqués, F. Martín, M. Sorolla, "Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, p 197401, November 2004.
- [7] R. Marques, J. D. Baena, M. Beruete, F. Falcone, T. Lopetegi, M. Sorolla, F. Martín and J. Garcia, "Ab initio analysis of frequency selective surfaces based on conventional and complementary split ring resonators", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 7 (2005) S38–S43 January 2005

**Abstract** —*In this paper two types of left-handed microstrip lines are shown, that achieve negative permeability by using: complementary split rings and spirals, respectively. Dimensions of line's elements are optimized to achieve same central frequency of the LH band for both structures. Both LH microstrip lines are fabricated in PCB technology and their characteristics are compared.*

## **COMPARISON OF LH MICROSTRIP LINES USING COMPLEMENTARY SPLIT RINGS AND SPIRALS**

Vesna Crnojević-Bengin, Vasa Radonić, Branka Jokanović

