

Ekvivalentna šema mikrostrip voda opterećenog split-ring rezonatorom sa različitim položajem procepa

Radovan Bojanić, Vojislav Milošević, Francisco Medina Mena, Francisco Mesa, Branka Jakanović

Sadržaj— U radu je prikazano modelovanje ekvivalentnih šema jediničnih ćelija metamaterijala sa split-ring rezonatorima (SRR) koji se pobuđuju mikrostrip vodom. Ovaj rad se bavi jednostrukim split-ring rezonatorima koji se spežu sa mikrostrip vodom u istoj ravni i za koje do sada nisu postojale adekvatne ekvivalentne električne šeme. Razmatrani su SRR kod kojih je procep paralelan sa mikrostrip vodom u slučaju kada je bliže, odnosno dalje od voda. Rezultati merenja i elektromagnetske 3D analize su upoređeni sa rezultatima koje daje ekvivalentna šema i dobijeno je veoma dobro slaganje.

Ključne reči— Metamaterijali, ekvivalentna električna šema, split-ring rezonator (SRR), mikrostrip vod, S -parametri.

I. UVOD

METAMATERIJALI bazirani na strukturama pobuđenim vodom predstavljaju oblast koja je u poslednjih desetak godina veoma zastupljena i istraživana. Uglavnom su to bili vodovi opterećene paralelnim induktivnim ili rednim kapacitivnim elementom, mada se sve više koristi SRR i komplementarni split-ring rezonator (CSRR). Vodovi opterećeni rezonantnim strukturama kao što su split-ring rezonatori imaju veliku primenu u raznim vrstama filtara (propusnika i nepropusnika opsega), u komponentama za rad u više opsega i za primene u raznim antenskim sistemima. Jedna od pogodnosti SRR-a, kojima sa bavimo već neko vreme, je što se njegove karakteristike mogu značajno menjati samo ako se pomera položaj procepa [1],[2].

Elektromagnetske strukture se mogu modelovati pomoću ekvivalentnih šema koje se sastoje od elemenata sa koncentrisanim parametrima, što nam omogućava bolje razumevanje faktora koji utiču na krajnje karakteristike, kao i lakše projektovanje i optimizaciju. Iz ovih razloga, određivanje ekvivalentne šeme je u prednosti u odnosu na postupak ekstrakcije parametara koji se obično koristi u proučavanju metamaterijala. Iako je modelovanje ćelija metamaterijala pomoću ekvivalentnih šema veoma aktuelno poslednjih nekoliko godina, niko nije analizirao mikrostrip

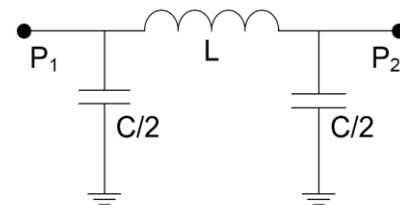
vod opterećen samo jednim SRR-om, pri čemu su vod i SRR u istoj ravni. Hong [3] je analizirao međusobnu spregu između samih SRR-ova i dao ekvivalentne šeme za slučaj magnetske i električne sprege koje su i nama bile od velike pomoći.

Prve ekvivalentne električne šeme vodova opterećenih SRR-ovima su modelovane u [4] i [5], pri čemu su kao vodovi korišćeni koplarni talasovodi (CPW). Što se tiče mikrostrip voda on je najčešće sprezan sa CSRR-ovima [6] ili fraktalnim i višestrukim CSRR-ovima [7] koji se nalaze u masi, tačno ispod mikrostrip voda, tako da se pobuđuju električnim poljem koje je normalno na ravan CSRR-a. Od planarnih struktura razmatrana su sprežanja dva ili više SRR-ova pri čemu su pristupi postavljeni na samim SRR-ovima [8].

U ovom radu su analizirana dva modela jednostrukih split-ring rezonatora kvadratnog oblika koji su spregnuti sa mikrostrip vodom u istoj ravni. Procepi na SRR-u su postavljeni paralelno mikrostrip vodu, pri čemu je u jednom slučaju procep bliže vodu, a u drugom slučaju dalje od voda. Veoma dobra tačnost modelovanih ekvivalentnih električnih šema je potvrđena poređenjem sa S -parametrima koji su dobijeni merenjem laboratorijskih modela i pomoću 3D elektromagnetske analize.

II. APROKSIMACIJA MIKROSTRIP VODA POMOĆU LC SEKCIJA

Sekcija voda male električne dužine može se modelovati pomoću LC mreže (Sl. 1). Ukoliko sekcija voda ima veću dužinu, možemo je aproksimirati sa nekoliko LC sekcija. Idealni 50-ohmski vod ima veoma dobro prilagođenje u celom opsegu u kome se posmatra. Međutim, kada vod modelujemo LC mrežom, on ima idelno prilagođenja samo na jednoj frekvenciji, pri čemu je koeficijent refleksije mali pre te učestanosti, ali se iznad nje naglo povećava.



Slika 1. Sekcija voda predstavljena preko lestvičaste LC mreže.

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja preko projekata TR32024, III 45016 i projekta bilateralne saradnje Republike Srbije i Kraljevine Španije PRI-AIBSE-2011-1119.

Radovan Bojanić, Vojislav Milošević i Branka Jakanović su iz Instituta za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Pregrevica 118, 11080 Beograd, Srbija.

Francisco Medina Mena i Francisco Mesa su iz Department of Electronics and Electromagnetism, Faculty of Physics, University of Seville, Seville, Spain.

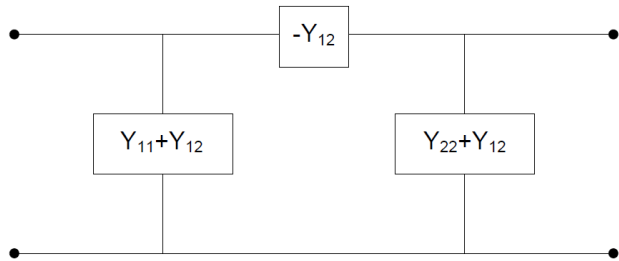
Da bismo odredili podužne parametre voda, koristili smo rezultate 3D elektromagnetske simulacije sekcije mikrostrip voda odgovarajuće geometrije, proračunate u softverskom paketu CST Studio Suite [9]. Dobijene S -parametre smo

konvertovali u Y -parametre i na osnovu ekvivalentnog Π kola na Sl. 2. smo izračunali odgovarajuću rednu induktivnost i paralelnu kapacitivnost, koje su zatim normalizovane sa dužinom posmatrane sekcije voda:

$$L = j \frac{1}{\omega Y_{12}}, \quad (1)$$

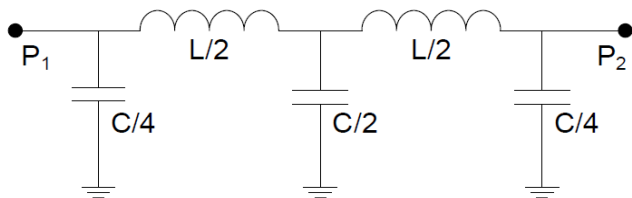
$$C = 2 \frac{Y_{11} + Y_{12}}{j\omega} = 2 \frac{Y_{22} + Y_{21}}{j\omega}.$$

Dobijene vrednosti za L i C su: $L = 1.33\text{nH}$ i $C = 0.625\text{pF}$. Treba napomenuti da smo u prvoj aproksimaciji zanemarili gubitke na vodu.



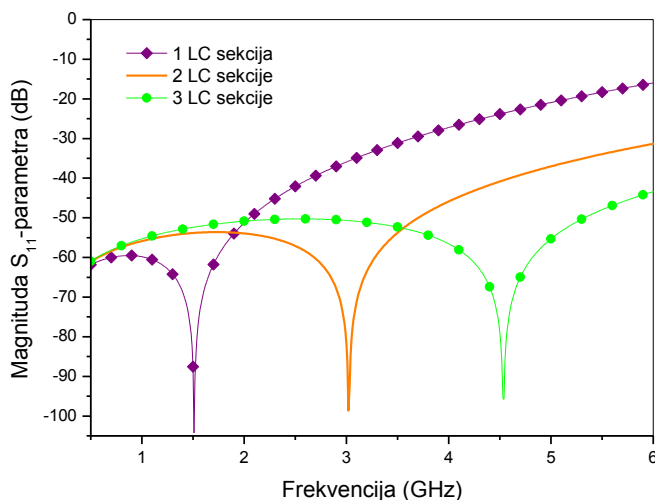
Slika 2. Π ćelija voda predstavljena preko Y -parametara.

Ukoliko vod predstavimo sa većim brojem LC sekcija kao na Sl. 3. vidimo da se povećava i učestanost na kojoj je najbolje prilagođenje (minimum S_{11}), kao što je pokazano na Sl. 4.



Slika 3. Sekcija voda predstavljena preko dve lestvičaste LC mreže.

Modelovanje voda pomoću LC sekcija ima manu što se pojavljuje sopstvena rezonansa LC mreže na nižim

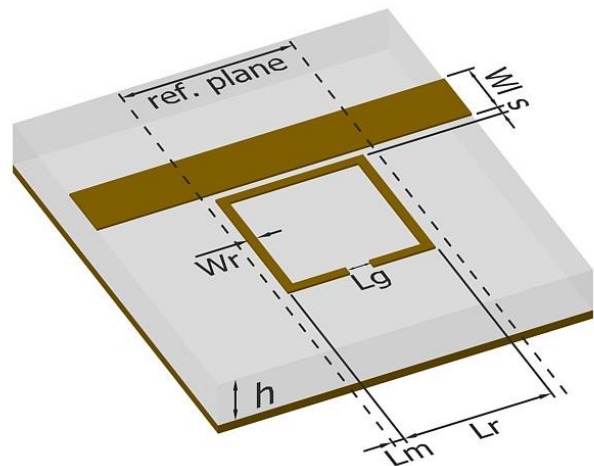


Slika 4. Koeficijent refleksije S_{11} za vod aproksimiran: jednom, dve ili tri LC ćelije.

učestanostima, koja se povećava sa povećanjem broja LC sekcija voda. Dodavanjem SRR-a parazitna rezonansa se vrlo često pojavljuje u opsegu oko rezonanse SRR-a, što ne odgovara realnom slučaju. Da bismo to izbegli trebalo bi vod modelovati pomoću većeg broja LC ćelija i na taj način pomeriti parazitnu rezonansu ka višim učestanostima, iznad opsega od interesa. Kako pri modelovanju ekvivalentnih šema treba voditi računa o jednostavnosti, ipak se ne preporučuje korišćenje velikog broj LC sekcija, osim ako za to nema potrebe, o čemu će nešto kasnije biti više reči.

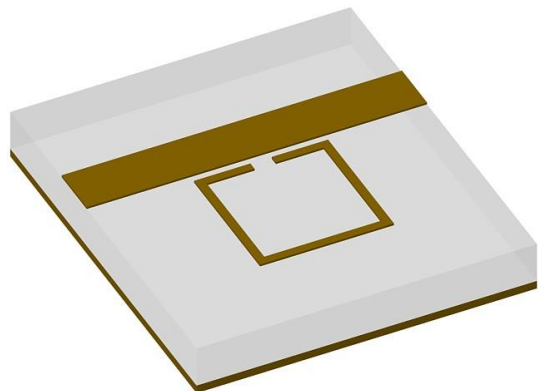
III. EKVIVALENTNA ŠEMA MIKROSTRIP VODA SA SPLIT-RING REZONATOROM

U ovom radu su analizirana dva modela jednostrukih SRR-a, koji su postavljeni tako da su im procepi paralelni mikrostrip vodu. Postoje su SRR-ovi kvadratnog oblika u jednom slučaju je procep na bližoj, a u drugom na daljoj stranici SRR-a. Na Sl. 5. je prikazan izgled i relevantne dimenzije SRR sa procepom koji je postavljen dalje od voda.



Slika 5. Dimenzije modela koji se analizira: $h=1.27\text{mm}$, $L_r=3\text{mm}$, $L_m=0.25\text{mm}$, $L_g=0.5\text{mm}$, $W_r=0.2\text{mm}$, $W_l=1.2\text{mm}$, $S=0.1\text{mm}$, pri čemu je debljina metalizacije $t=17\mu\text{m}$, a dielektrična konstanta dielektrika $\epsilon_r=10.2$.

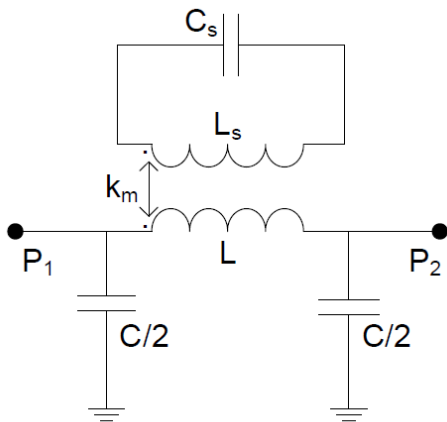
A. Split-ring rezonator sa procepom bliže mikrostrip vodu



Slika 6. Izgled mikrostrip voda opterećenog SRR-om sa paralelnim procepom bliže vodu.

Na slici 6. je prikazan SRR kod koga je procep postavljen paralelno i bliže mikrostrip vodu. Pošto je procep paralelan

mikrostrip vodu, ne postoji kapacitivna sprema između voda i SRR-a, pa su na Sl. 7, koja predstavlja modelovanu ekvivalentnu električnu šemu, samo tri veličine nepoznate: kapacitivnost C_s , induktivnost SRR-a L_s i induktivna sprema k_m , koja se javlja između SRR-a i mikrostrip voda.



Slika 7. Ekvivalentna šema sa jednom LC sekcijom voda za slučaj mikrostrip voda opterećenog SRR-om sa paralelnim procepom bliže i dalje od voda.

Druga aproksimacija koju smo učinili u ovom radu je da je induktivnost SRR-a, L_s , izjednačena sa induktivnošću mikrostrip voda čija je dužina jednaka srednjoj dužini SRR-a. Ovu vrednost, kao i vrednost međusobne sprege mikrostrip voda sa SRR-om, k_m , možemo da izračunamo u softverskom paketu LINPAR [10], a dobijene vrednosti su: $L_s=8.12\text{nH}$, $k_m=0.135$.

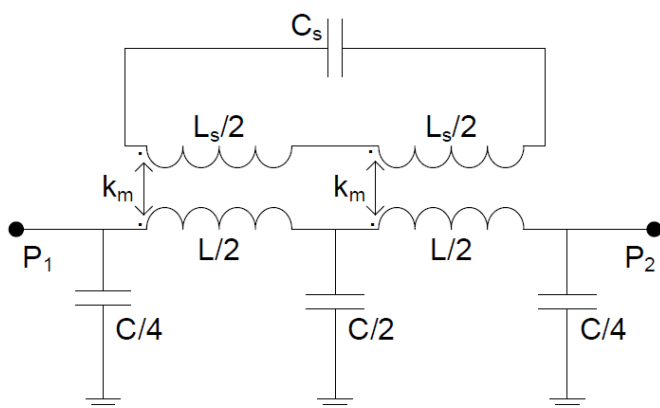
Pomoću S-parametara dobijenih 3D elektromagnetskom analizom možemo da odredimo i rezonantnu frekvenciju SRR koja iznosi $f_r=5.47\text{GHz}$, a koja zavisi od parametara SRR-a

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}, \quad (2)$$

na osnovu koje dobijamo vrednost za kapacitivnost split-ring rezonatora, $C_s=0.104\text{pF}$.

Modelovanje strukture pomoću jedne LC sekcije voda

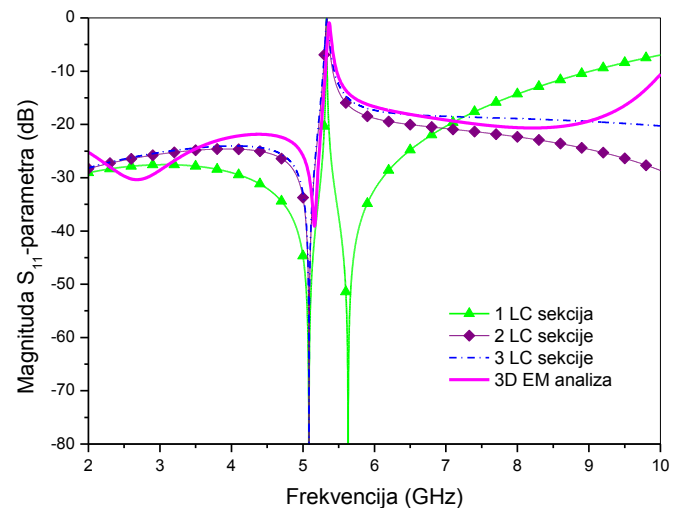
Na osnovu izračunatih parametara split-ring rezonatora pokušali smo da ekvivalentnu šemu za strukturu sa Sl. 6



Slika 8. Ekvivalentna šema sa dve LC sekcije voda za modele mikrostrip voda opterećenog SRR-om sa paralelnim procepom bliže i dalje od voda.

modelujemo pomoću jedne LC sekcije voda (Sl. 7). Međutim, minimum u S_{11} -parametru sa Sl. 4, koji se nalazi na 1.5GHz , pri sprezanju voda sa SRR-om se pomera na višu učestanost od 5.63GHz i upada u opseg oko rezonanse SRR-a, pa ne možemo da ostvarimo dobro poklapanja sa 3D elektromagnetskom analizom.

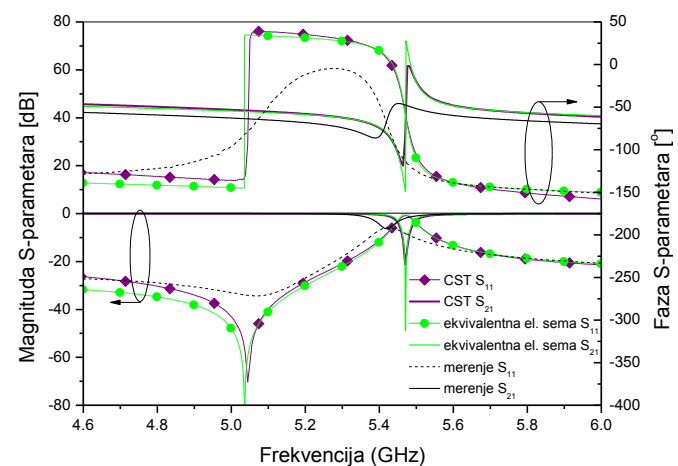
Prednosti rada na nižim učestanostima su što se minimum parametra S_{11} ne nalazi u zoni od interesa i može da se koristi znatno uprošćena ekvivalentna šema (Sl. 7), dok je u našem slučaju jedino rešenje povećanje broja LC sekcija voda (Sl. 8) da bismo minimum u S_{11} -parametru što više udaljili od rezonanse SRR-a (Sl. 9). Kompromis je nađen da se pri modelovanju koriste dve LC sekcije, pri čemu se minimum S_{11} dovoljno udalji od rezonanse SRR-a, a pri tome se ekvivalentna električna šema mnogo ne zakomplikuje.



Slika 9. Poređenje magnituda S_{11} -parametra za model mikrostrip voda opterećenog SRR-om sa paralelnim procepom bliže vodu u slučaju kada se vod aproksimira sa jednom, dve i tri LC sekcije i rezultata dobijenih elektromagnetskom analizom.

Modelovanje strukture pomoću dve LC sekcije voda

Ekvivalentna šema za model na Sl. 6 kada mikrostrip vod aproksimiramo pomoću dve LC sekcije je prikazana na Sl. 8.

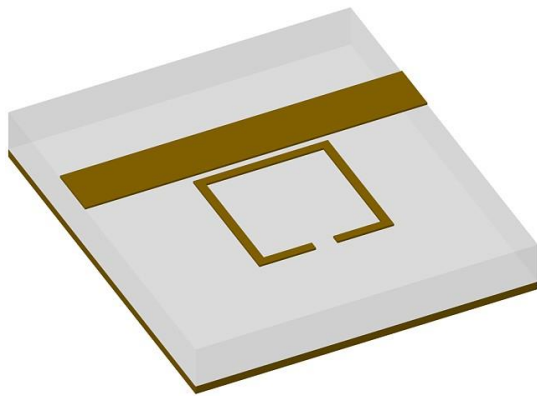


Slika 10. Poređenje magnituda i faze S-parametara dobijenih merenjem modela, elektromagnetskom simulacijom i pomoću ekvivalentne električne šeme za model mikrostrip voda opterećenog split-ring rezonatorom sa procepom bliže vodu.

Parametri mikrostrip voda i SRR-a se ne menjaju sa promenom broja LC sekcija kojom se mikrostrip voda aproksimira, pa ih nije potrebno ponovo proračunavati.

Dobijeni S -parametri imaju dobro slaganje sa rezultatima elektromagnetske 3D simulacije i merenja kao što se može videti na Sl. 10, posebno kada je u pitanju rezonansa SRR-a, pri čemu postoji blago odstupanje u minimumu S_{11} -parametra, koje može da se poboljša optimizacijom parametara mikrostrip voda u uskom opsegu oko proračunatih vrednosti. Međutim, te vrednosti nismo menjali, mada se pokazalo da optimizovane vrednosti za model sa procepom bliže vodu nisu bile optimalne i za model sa procepom dalje vodu, iako se u oba slučaja radi o istom mikrostrip vodu.

B. Split-ring rezonator sa procepom dalje od voda

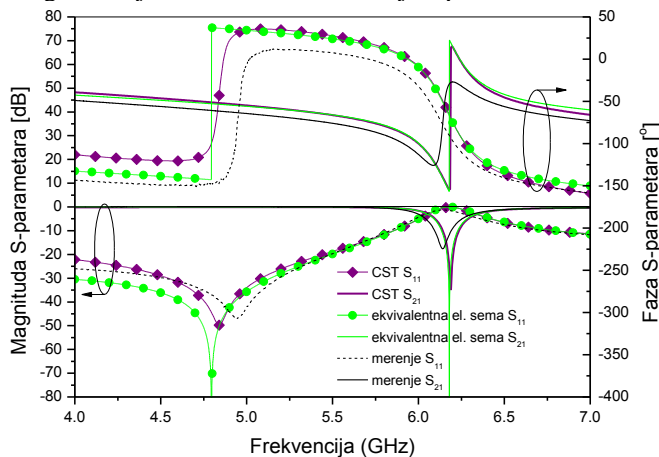


Slika 11. Mikrostrip vod spregnut sa SRR-om čiji je procep dalje od voda.

Od prethodnog modela ovaj model se razlikuje po položaju procepa na SRR-u, koji se nalazi dalje od voda (Sl. 11).

Kao i u prethodnom slučaju i ovde je procep paralelan mikrostrip vodu, pa je jedina sprega koja postoji magnetskog tipa. To nam dalje govori da se ekvivalentna električna šema neće promeniti u odnosu na šemu sa Sl. 8, već da se menjaju samo parametri SRR-a, kao i sprega između voda i split-ring rezonatora.

Na isti način kao i za prethodni model računamo parametre SRR-a i sprege. Induktivnost SRR ostaje ista $L_S=8.12\text{nH}$, jer se geometrijski oblik SRR-a nije promenio, dok se



Slika 12. Poređenje magnitude i faze S -parametara proračunatih iz 3D elektromagnetske simulacije, sa ekvivalentne električne šeme i rezultata merenja za model mikrostrip voda opterećenog SRR-om sa procepom dalje od voda.

kapacitivnost menja, jer raspodela naelektrisanja na SRR-u zavisi od položaja i udaljenosti u odnosu na naelektrisanja na mikrostrip vodu. Imajući u vidu relaciju (2) kao i da se kapacitivnost menja rotiranjem SRR-a, dolazimo do zaključka da se rotacijom SRR-a menja i rezonantna frekvencija, što se može videti poređenjem S -parametara na Sl. 10. i Sl. 12. Rezonansa SRR-a sa procepom bliže vodu je bila na 5.47GHz, dok je za model sa procepom dalje od voda na 6.19GHz, što na osnovu relacije (2) govori da se kapacitivnost SRR-a smanjila u odnosu na prethodni slučaj i sada iznosi $C_S=0.081\text{pF}$.

Sprega je u ovom slučaju znatno veća nego u prethodnom, jer nema procepa na delu SRR-a sa kojim se mikrostrip vod najviše spreže i ona iznosi $k_m=0.275$.

Rezultati 3D elektromagnetske simulacije, merenja i rezultati dobijeni na osnovu ekvivalentne električne šeme i u ovom slučaju imaju dobro slaganje, pri čemu je slaganje nešto lošije kako se pomeramo ka nižim frekvencijama i u blizini minimuma refleksije S_{11} (Sl. 12).

TABELA I
VREDNOSTI PARAMETARA SA EKVIVALENTNE ELEKTRIČNE ŠEME

	SRR sa procepom bliže mikrostrip vodu	SRR sa procepom dalje od mikrostrip voda
$L(\text{nH})$	1.33	1.33
$C(\text{pF})$	0.625	0.625
k_m	0.135	0.275
$L_S(\text{nH})$	8.12	8.12
$C_S(\text{pF})$	0.104	0.081

Kao što možemo da vidimo iz Tabele I, parametri koji ne zavise od položaja procepa na SRR-u su parametri mikrostrip voda L , C i induktivnost SRR-a L_S . Vidimo da se sprega k_m i kapacitivnost SRR-a C_S menjaju, naročito sprega, koja je duplo veća u slučaju kada je procep na SRR-u dalje od voda.

IV. ZAKLJUČAK

U radu su date ekvivalentne šeme mikrostrip voda koji je opterećen split-ring rezonatorom u zavisnosti od njegove orijentacije, tj. kada je procep bliže ili dalje od mikrostrip voda. Definisali smo način na koji se mogu proračunati parametri mikrostrip voda i SRR-a, kao i način na koji se neki od njih mogu menjati. Parametri koji se menjaju u zavisnosti od orijentacije SRR-a su magnetska sprega k_m i kapacitivnost SRR-a C_S , dok su ostali parametri nepromenjeni. Pokazano je dobro slaganje izmerenih S -parametara, parametara dobijenih 3D elektromagnetskom analizom i rezultata dobijenih na osnovu predloženih ekvivalentnih električnih šema.

LITERATURA

- [1] V. Milošević, B. Jokanović and B. Kolundžija, "Microwave stereometamaterials and parameter extraction," in *Proc. Of Metamaterials'2010*, Karlsruhe, Germany, September 2010, pp. 474-477.
- [2] R. Bojanic, B. Jokanović and V. Milošević, "On the orientation of split-ring resonators excited by guided waves," in *Proc. Of Metamaterials'2012*, St. Petersburg, Russia, September 2012.
- [3] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Coupled Resonator Circuits," in *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, ch. 8, sec. 2, pp. 244-258, New York, USA, 2001.

- [4] F. Martin, F. Falcone, J. Bonache, R. Marques and M. Sorolla, "Miniaturized Coplanar Waveguide Stop Band Filters Based on Multiple Tuned Split Ring Resonators," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol 13, no. 12, pp. 511-513, Dec 2003.
- [5] F. Martin, J. Bonache, F. Falcone, M. Sorolla and R. Marques, "Split ring resonator-based left-handed coplanar waveguide" *Applied Physics Letters*, vol 83, no. 22, pp. 4652-4654, Dec 2003.
- [6] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. Marques, F. Falcone, T. Lepetegi, M. Laso, J. Garcia-Garcia, I. Gil, M. F. Portillo and M. Sorolla "Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol 53, no. 4, pp. 1451-1461, Apr 2005.
- [7] V. Crnojevic-Bengin, V. Radovic and B. Jokanovic, "Fractal Geometries of Complementary Split-Ring Resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol 56, no. 10, pp. 2312-2321, Oct 2008.
- [8] J.S. Hong and M.J. Lancaster, "Couplings of Microstrip Square Open-Loop Resonators for Cross-Coupled Planar Microwave Filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol 44, no. 12, pp. 2099-2109, Dec 1996.
- [9] www.cst.com
- [10] A. R. Đorđević, "LINPAR and MULTILIN for Windows: a New Generation of Powerful Tools for the Analysis of Multiconductor Transmission Lines," Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade.

ABSTRACT

In this paper we present the equivalent circuit modeling of metamaterial unit cell with split-ring resonator (SRR) that is excited by microstrip line. This paper is dealing with the single split-ring resonator that is coupled with microstrip line at the same layer and for which there is no developed equivalent circuit model. We considered split-ring resonators with gaps parallel and near to the microstrip line and far from the line. Measured results, as well as the results obtained using 3D electromagnetic analysis are compared with those obtained by the extracted equivalent circuit models. Very good agreement is obtained for all three approaches.

Equivalent circuit models of microstrip line loaded with split-ring resonator with different positions of gap

Radovan Bojanic, Vojislav Milosevic, Francisco Medina
Mena, Francisco Mesa, Branka Jokanovic