

# REZONANTNE UČESTANOSTI USAMLJENIH SPLIT-RING REZONATORA I SPREGNUTIH SA MIKROSTRIP VODOM U ZAVISNOSTI OD UGLA IZMEĐU PROCEPA

Vojislav Milošević, Institut za fiziku Beograd, vojislav@ipb.ac.rs

**Sadržaj** – U ovom radu je predložena jednostavna i efikasna metoda za izračunavanje rezonantnih učestanosti usamljenih i spregnutih sa mikrostrip vodom split-ring rezonatora u zavisnosti od ugla između procepa. Metoda se zasniva na korišćenju teorije vodova i može da se primeni na prstenove koji su jedan iznad drugog, ivično spregnuti, kao i za višestruke split-ring rezonatore. U radu su upoređene ovako dobijene rezonantne učestanosti s rezultatima 3D EM simulacije bazirane na metodi momenata. Pokazano je da split-ring rezonatori jedan iznad drugog imaju mnogo veći opseg promene rezonantne učestanosti sa promenom ugla – 53%, dok je u slučaju ivično spregnutih split-ring rezonatora promena učestanosti 25%. Metod može da se primeni i za split-ring rezonatore koji su spregnuti sa vodom.

## 1. UVOD

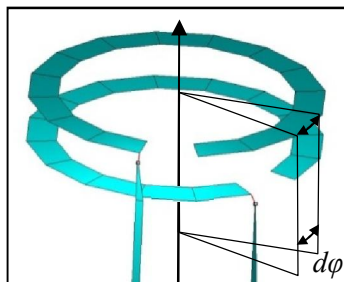
Split-ring rezonator predstavlja jedan od najčešće korišćenih elemenata za realizaciju metamaterijala. Pokazano je da se njihovim periodičnim ponavljanjem može dobiti materijal s negativnom efektivnom permeabilnošću u okolini rezonantne učestanosti [1], tzv. efekat magnetske plazme. Takođe, split-ring se može iskoristiti i kao rezonator u projektovanju mikrotalasnih filtara [2]. Za sve ove primene suštinski je važno poznavanje rezonantnih učestanosti split-ringa, pošto one u najvećoj meri određuju ponašanje celog sistema.

Pod split-ringom podrazumevamo dva koncentrična prstena, koji su spregnuti ivično ili širom stranom (edge-coupled ili broadside-coupled), pri čemu svaki prsten ima procep na određenom mestu. Tradicionalno su ti procepi pod međusobnim uglom od 180 stepeni, međutim, mi smo u našem prethodnom radu ispitivali uticaj koji položaj procepa ima na ponašanje cele strukture. Pokazali smo da je variranjem ugla između procepa moguće varirati rezonantnu učestanost split-ringa [3].

Na osnovu svega rečenog, zaključujemo da nam je potreban analitički model split-ringa, koji može da uračuna različite uglove između procepa, u cilju lakšeg projektovanja, optimizacije, kao i boljeg razumevanja ispitivanih struktura.

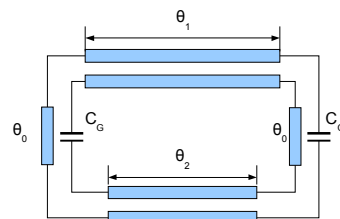
## 2. PREDLOŽENI MODEL

Na slici 1 dat je izgled broadside-coupled split-ring-a u programu WIPL-D, koji smo koristili za numeričku proveru rezultata. Zbog jednostavnosti, na slici je izostavljena provodna ravan koja se nalazi ispod.



Sl.1. Split-ring rezonator

Ako posmatramo segment koji odgovara elementarnom uglu  $d\phi$ , primetićemo da se on sastoji od dva provodnika i mase ispod, i prema tome je identičan segmentu dvoprovodničkog mikrostrip voda. Na osnovu toga zaključujemo da se ceo split-ring rezonator može predstaviti kao kolo koje se sastoji od dva odsečka dvoprovodničkog voda odgovarajućih parametara i električnih dužina  $\theta_1$  i  $\theta_2$  (koje zavise od ugla između procepa), kapacitivnosti koje modeluju procepe, i običnih vodova dužine  $\theta_0$  koji kompenzuju dužinu procepa na drugom prstenu (slika 2).



Sl.2. Ekvivalentno kolo

Prostriranje talasa na vodu u kvazistatičkoj aproksimaciji određeno je njegovim primarnim parametrima, što su u slučaju dvoprovodničkog voda bez gubitaka [L] i [C] matrice. Za proračun ovih vrednosti koristili smo program LINPAR. Dobijene vrednosti iskoristili smo za proračun kola sa slike 1b u programu Microwave Office. Treba napomenuti da je ovaj model, u suštini, analitički, jer se zasniva na poznatim izrazima za dvoprovodničke vodove, i po potrebi bi mogao biti obavljen i ručno.

Ograničenja modela proizilaze iz ograničenja kvazistatičkog pristupa analizi vodova. Naime, uzima se u obzir samo sprege koja postoji između susednih sekcija voda, drugim rečima, ne razmatra se uticaj jedne sekcije na drugu koja se nalazi, npr. na suprotnoj strani prstena. Ukoliko su dimenzije poprečnog preseka jedne sekcije, odnosno rastojanje između prstenova i visina iznad provodne ravni dovoljno mali u odnosu na poluprečnik, smatramo da je ovakva aproksimacija opravdana zato što će pomenute sprege između nesusednih elemenata biti zanemarljive.

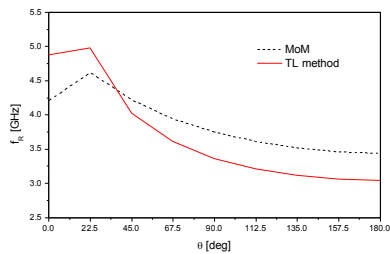
## 3. REZULTATI

Primenili smo model za određivanje rezonantne učestanosti split-ring-a u zavisnosti od ugla između procepa, u koracima od  $22,5^\circ$ . Rezultati su poređeni sa numeričkom simulacijom u programskom paketu WIPL-D.

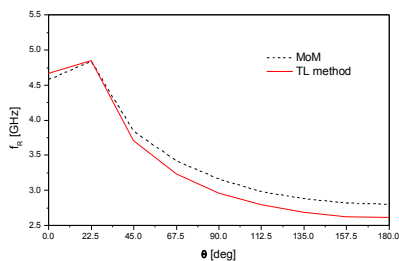
Počeli smo sa broadside-coupled split-ringom prečnika  $d=3,35\text{mm}$ , na dvoslojnom supstratu permitivnosti i debljine  $\epsilon_1=2,2$ ,  $h_1=1,5748\text{mm}$  i  $\epsilon_2=10,2$ ,  $h_2=0,635\text{mm}$  ( $h=h_1+h_2=2,21\text{mm}$ ). Ove vrednosti ne zadovoljavaju uslov male visine u odnosu na poluprečnik, ali odgovaraju parametrima korišćenim u našem prethodnom radu. Rezultati su prikazani na slici 3. Iako postoji značajno neslaganje, oblici krivih su slični, pa smo nastavili sa tanjim supstratom,

visine  $h_1=0,762\text{mm}$  i  $h_2=0,254\text{mm}$  ( $h=1,01\text{mm}$ ), prikazanim na slici 4. Vidimo da je slaganje drastično bolje, što podržava našu diskusiju o ograničenjima modela.

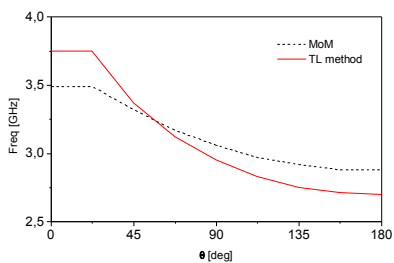
Takođe smo testirali naš model za edge-coupled split-ring, koristeći iste supstrate kao ranije, sa širinama provodnika  $w_1=w_2=0,3\text{mm}$  i međusobnim rastojanjem  $s=0,1\text{mm}$  (oba prstena su na gornjem sloju supstrata). Rezultati su prikazani na slikama 5 i 6. Za ovaj slučaj, slaganje se takođe poboljšava na tanjem supstratu, a generalno je bolje nego u prethodnom slučaju.



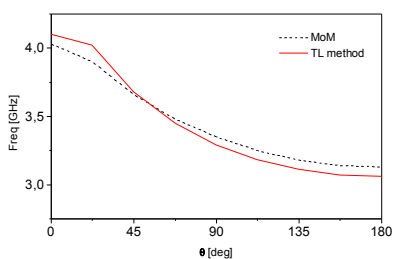
Sl.3. Broadside-coupled split-ring: deblji supstrat ( $h=2.21\text{mm}$ )



Sl.4. Broadside-coupled split-ring: tanji supstrat ( $h=1.01\text{mm}$ )



Sl.5. Edge-coupled split-ring: deblji supstrat ( $h=2.21\text{mm}$ )



Sl.6. Edge-coupled split-ring: tanji supstrat ( $h=1.01\text{mm}$ )

U tabelama 1 i 2 navodimo podužne parametre vodova koji su korišćeni u modelu u ova četiri slučaja. Vidimo da se u slučaju broadside-coupled prstenova sprega povećava sa smanjivanjem debljine supstrata, dok je kod edge-coupled situacija obrnuta, odnosno sprega se smanjuje.

Tabela 1. Podužne induktivnosti

	$L_1$ [nH/m]	$L_2$ [nH/m]	$L_M$ [nH/m]
BC $h=2,21\text{mm}$	743,4	674,7	351,3
BC $h=1,01\text{mm}$	589,0	532,6	354,4
EC $h=2,21\text{mm}$	782,0	782,0	513,2
EC $h=1,01\text{mm}$	627,8	627,8	360,8

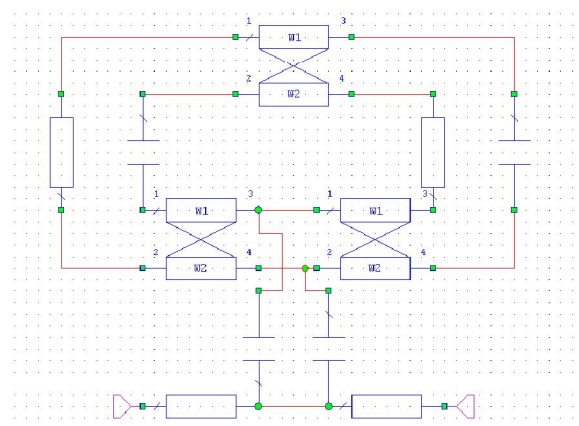
Tabela 2. Podužne kapacitivnosti

	$C_1$ [pF/m]	$C_2$ [pF/m]	$C_M$ [pF/m]
BC $h=2,21\text{mm}$	121,4	133,6	-95,44
BC $h=1,01\text{mm}$	214,6	238,0	-191,6
EC $h=2,21\text{mm}$	114,2	114,2	-85,01
EC $h=1,01\text{mm}$	108,9	108,9	-75,20

#### 4. SPLIT-RING REZONATORI SPREGNUTI SA VODOM

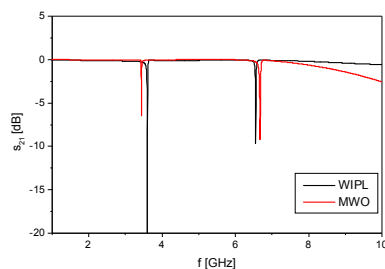
Do sada smo ispitivali slučaj kada je split-ring direktno pobuđivan, dok je u našem prethodnom radu[3] pobuda ostvarena pomoću mikrostrip voda s kojim je spregnut. Zbog toga nam je važno da pokušamo da uključimo i tu spregu u naš model i vidimo kako utiče na rezonantne učestanosti.

Smatramo da je u našem slučaju opravdano pretpostaviti da je dužina sekcije voda koja je u sprezi sa split-ringom električno mala. U tom slučaju spregu možemo modelovati kao kapacitivnu, odnosno pomoću kondenzatora. U tu svrhu, proračunate su statičke kapacitivnosti između odgovarajuće sekcije split-ringa i voda u programu ES3D, i one su uvrštene u naš model, kao i vod koji služi za napajanje strukture.



Sl.7. Izgled modela u programu Microwave office

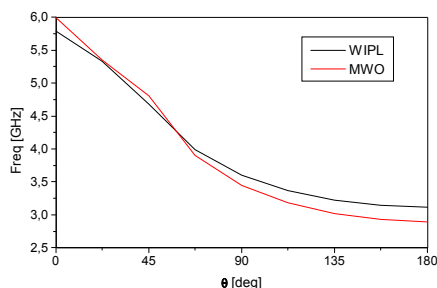
Na slici 7 dat je izgled modela u programu Microwave Office. Dvoprovodnički vodovi modeluju odgovarajuće sekcije split-ringa, i kada rotiramo neki od prstenova menjaju se jedino dužine tih sekcija. Kondenzatori modeluju sprege sa vodom i procepe.



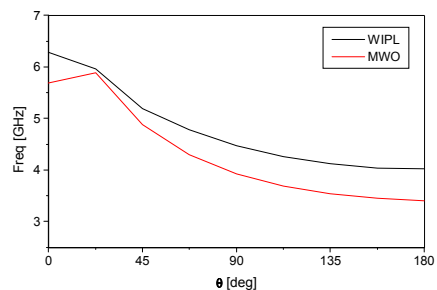
Sl.8. Poređenje  $s_{21}$  za model i simulaciju

Na slici 8 dato je poređenje  $s_{21}$  parametra za model i simulaciju, za slučaj split-ringa na tanjem supstratu pod uglom od 90 stepeni.

Vidimo da imamo jako dobro slaganje, osim na kraju opsega, kada model voda očigledno prestaje da važi.



Sl.9. Broadside-coupled split-ring napajan vodom: tanji supstrat ( $h=1.01\text{mm}$ )



Sl.10. Broadside-coupled split-ring napajan vodom: deblji supstrat ( $h=2.21\text{mm}$ )

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano ekvivalentno kolo split-ring rezonatora bazirano na dvoprovodničkim vodovima, koje smo primenili za određivanje rezonantnih učestanosti u

zavisnosti od ugla između procepa. Rezultati su upoređeni sa 3D elektromagnetskom simulacijom. Najbolje slaganje je za slučaj ivično spregnutog split-ringa na tanjem supstratu, u 3%. Što se tiče opsega promene rezonantne učestanosti, najbolji rezultati dobijeni su na tanjem supstratu, i to 53% za broadside-coupled i 25% za edge-coupled. Ovu razliku pripisujemo slabijoj sprezi u tom slučaju.

Što se tiče sprege sa vodom, smatramo da smo uspešno demonstrirali da se ona može modelovati pomoću kondenzatora. Pošto u praksi split-ring nikada ne može biti pobuđen direktno, ovaj rezultat nam je veoma značajan.

Prednosti našeg modela u odnosu na 3D elektromagnetsku simulaciju su u daleko bržem vremenu izračunavanja (rezultat se dobija praktično trenutno, dok je elektromagnetska simulacija numerički jako zahtevna i tipično se izvršava nekoliko sati pa čak i dana), kao i u mogućnosti da uspostavimo relaciju između primarnih parametara voda i rezonantnih učestanosti split-ringa, i na taj način olakšamo projektovanje struktura sa željenim odzivom.

## ZAHVALNICA

Zahvaljujem se dr Branki Jokanović na korisnim sugestijama i konsultacijama tokom ovoga istraživanja.

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete i nauke preko projekta tehnološkog razvoja TR-32024 projekta integralnih i interdisciplinarnih istraživanja III 45016.

## LITERATURA

- [1] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robins and W.J. Stuart, "Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 47, p. 2075, 1999.
- [2] A. Garcia-Lamperez and M. Salazar-Palma, "Dual band filter with split-ring resonators", *Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International*, 11-16 June 2006.
- [3] V. Milosevic, B. Jokanovic, B. Kolundzija, "Microwave Stereometamaterials and Parameter Extraction", *4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2010*, 13-16 October, Karlsruhe, pp. 537-539.

**Abstract** –A simple and efficient method for calculation of resonant frequencies of circular split-ring resonators in respect of angle between slits is presented. Method is based on transmission line approach, and can be applied to broadside- and edge-coupled, as well as multiple split-ring resonators. Results are compared with 3D EM simulation based on Method of Moments. It is shown that broadside-coupled rings have greater bandwidth of frequency change with changing angle – 53%, compared to the 25% in edge-coupled case. Method is also applicable on resonators coupled with microstrip line.

## RESONANT FREQUENCIES OF SINGLE SPLIT-RING RESONATORS AND COUPLED WITH MICROSTRIP LINE IN RESPECT OF ANGLE BETWEEN SLITS

Vojslav Milošević