

# Elektromagnetsko modelovanje filtra sa spregnutim rezonatorima za UHF frekvencijski opseg

Milica Mrdaković, *Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu*

**Sadržaj** — U radu je prikazano trodimenzionalno (3D) elektromagnetsko (EM) modelovanje filtra sa spregnutim rezonatorima za UHF frekvencijski opseg (470–860 MHz), koji se upotrebljava kao deo multipleksera u prenosu televizijskog UHF analognog signala. Cilj rada je bio napraviti što jednostavniji 3D EM model složenog filtra koji ima karakteristike vrlo bliske realnom filtru. U simulacionom modelu nije uzeta u obzir debljina zidova, a sferni i cilindrični delovi su modelovani osmougaonim geometrijskim strukturama. I pored ovih aproksimacija na simulacionom modelu je moguće ispitati fino podešavanje realnog filtra.

**Ključne reči** — filter, koeficijent sprege, rezonator, rezonantna frekvencija

## I. UVOD

Mikrotalasni filtri se veoma često koriste kao deo složenijih uređaja, a njihovo projektovanje je posebna oblast RF/mikrotalasne tehnike. Primenuju se u uređajima komunikacionih, radarskih i satelitskih sistema, merne opreme, sistema automatskog upravljanja, medicinske opreme, računarske infrastrukture, bežičnog interneta itd. [1].

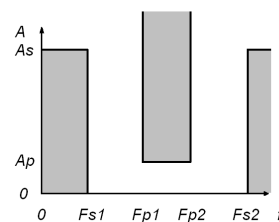
Mikrotalasni filter je dvoportna (nekad i višeportna) mreža koja omogućava propuštanje frekvencija unutar propusnog opsega odnosno veliko slabljenje frekvencija unutar nepropusnog opsega. Posmatrani filter je filter propusnik opsega, kod koga su tokom modelovanja posmatrani parametri rasejanja ( $S$ -parametri). Ovi parametri se najčešće koriste za opisivanje dvoportnih mreža.

Prenosna funkcija mikrotalasnih filtera,  $S_{21}(s)$ , je funkcija kompleksne učestanosti  $s = \sigma + j\omega$  u domenu Laplasove (Laplace) transformacije. Pošto se posmatra filter kao dvoportna recipročna mreža, važi da je  $S_{21}(s) = S_{12}(s)$ . Ova funkcija je racionalna po  $s$  sa realnim koeficijentima [1]. Posmatrana na osi učestanosti, ona predstavlja frekvencijski odziv ( $S_{21}(j\omega)$ ), čiji se grafik (amplitudska karakteristika) najčešće prikazuje u dB.

Pošto se ovaj rad bavi modelovanjem filtra koji, po

uzoru na postojeći realni filter, mora da zadovolji određene uslove, potrebno je obratiti pažnju na tražene specifikacije. Jedna od osnovnih se odnosi na amplitudski odziv. Zadaje se oblast u kojoj treba da je smeštena amplitudska karakteristika, a granice ove oblasti predstavljaju gabarit.

Za filter propusnik opsega gabarit je određen graničnim frekvencijama  $F_{p1}$  i  $F_{p2}$ , dok maksimalno slabljenje u propusnom opsegu treba da je  $A_p$ . Nepropusni opseg određuju granične frekvencije  $F_{s1}$  i  $F_{s2}$ . Svaka frekvencijska komponenta mora da bude oslabljena najmanje sa  $A_s$  (sl. 1) [1].



Sl. 1. Gabarit filtra propusnika opsega.

Specifikacija može da zadaje centralnu učestanost i širinu propusnog opsega ili relativnu širinu propusnog opsega. Takođe se može iskazati preko strmine karakteristike u prelaznoj oblasti, a moguće je da se zahteva i izrazito slabljenje na nekim učestanostima. U specifikaciji mikrotalasnog filtra najčešće se zadaje gabarit za parametre rasejanja  $S_{21}(j\omega)$  i  $S_{11}(j\omega)$ . Za nesimetričan filter specificira se i  $S_{22}(j\omega)$ . Obično se zahteva da neprilagođenje, koje se računa kao  $-20 \log_{10} |S_{11}(j\omega)|$  odnosno  $-20 \log_{10} |S_{22}(j\omega)|$ , bude što veće.

Filter sa spregnutim rezonatorima [2], [3], [4] može se realizovati kao blisko postavljeni rezonatori u vodu sekcija oklopljenih vodova, gde su susedni rezonatori spregnuti preko procepa i provodne konture. Sprega između nesusednih rezonatora se može zanemariti. Koeficijent sprege spregnutih RF/mikrotalasnih rezonatora, koji mogu biti različite strukture i različitih rezonantnih frekvencija, može biti definisan kao

$$k = \frac{\iiint \epsilon E_1 \cdot E_2 dv}{\sqrt{\iiint \epsilon |E_1|^2 dv} \sqrt{\iiint \epsilon |E_2|^2 dv}} + \frac{\iiint \mu H_1 \cdot H_2 dv}{\sqrt{\iiint \mu |H_1|^2 dv} \sqrt{\iiint \mu |H_2|^2 dv}} \quad (1)$$

Milica Mrdaković, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: +381-60-4140686, e-mail: [mrdakovic.milica@gmail.com](mailto:mrdakovic.milica@gmail.com))

gde  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{H}$  predstavljaju vektore električnog i magnetskog polja jednog odnosno drugog rezonatora [3]. Električna i magnetska polja su definisana u domenu permitivnosti  $\epsilon$  i permeabilnosti  $\mu$ . Skalarni proizvod vektora električnog polja predstavlja električnu spregu, a skalarni proizvod vektora magnetskog polja magnetsku spregu. Pozitivan predznak ovih proizvoda pokazuje da sprega povećava energiju jednog rezonatora, dok negativan predznak ukazuje na to da sprega smanjuje energiju prethodno nespregnutog rezonatora. Procena vrednosti koeficijenta sprege direktno iz jednačine (1) zahteva poznavanje raspodele polja i rešavanja trojnih integrala. Ovo nije lak zadatak osim ako postoje analitički izrazi za električno i magnetsko polje.

Zato je mnogo lakše, koristeći se elektromagnetskom simulacijom, naći neke karakteristične frekvencije koje su povezane sa spregom spregnutih RF/mikrotalasnih rezonatora. Koeficijent sprege može biti određen nezavisno od fizičke strukture rezonatora, ako je ustanovljena veza između ovog koeficijenta i karakterističnih frekvencija.

U slučaju rezonatora sa različitim rezonantnim frekvencijama formula za koeficijent sprege je

$$k_{12} = \pm \frac{1}{2} \left( \frac{f_{02} + f_{01}}{f_{01} f_{02}} \right) \sqrt{\left( \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \right)^2 - \left( \frac{f_{02}^2 - f_{01}^2}{f_{02}^2 + f_{01}^2} \right)^2} \quad (2)$$

gde je  $f_{0i} = \omega_{0i}/(2\pi)$  sopstvena rezonantna frekvencija rezonatora, a  $f_i = \omega_i/2\pi$  ( $i=1,2$ ) je jedna od rezonantnih frekvencija dva spregnuta rezonatora.

Ovakav način određivanja koeficijenta sprege praktično je nezamenjiv kod rezonatora analiziranih u ovom radu. U ovom slučaju moguće je jedino odrediti  $S$ -parametre (eksperimentalno ili simulacijom), a zatim pomoću njih posredno naći koeficijent sprege.

## II. TRODIMENZIONALNO ELEKTROMAGNETSKO MODELOVANJE FILTRA

U ovom delu rada je predstavljeno modelovanje filtra propusnika opsega, maksimalne snage 500 W, koji se sastoji od tri spregnuta rezonatora (sl. 2).



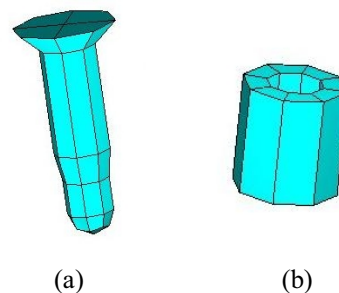
Sl. 2. Unutrašnjost filtra sa spregnutim rezonatorima za UHF opseg.

Gabarit i konstrukcija filtra pružaju mogućnost da se

propuštaju kanali iz televizijskog UHF opsega (470–860 MHz, odnosno od 21. do 69. kanala). UHF opseg je podeljen na podopsege od 8 MHz, a u okviru podopsega filter treba da propusti nosilac tona i nosilac slike. Opseg širine 8 MHz počinje 1,25 MHz niže u odnosu na frekvenciju nosioca slike. Isto toliko treba od frekvencije nosioca tona do kraja opsega kako bi filter sigurno propustio ova dva nosioca.

U televizijskom prijemu se nalazi lokalni oscilator na frekvenciji koja je za određenu međufrekvenciju viša od frekvencije kanala koji treba primiti. Mešanjem frekvencije na kojoj se nalazi nosilac slike sa frekvencijom oscilatora (demodulacijom televizijskog kanala), željeni opseg se spušta u opseg od 33,4 do 38,9 MHz. Sledeći međufrekventni stepeni još spuštaju frekvenciju kanala do osnovnog video opsega širine 5,5 MHz uz nosilac tona.

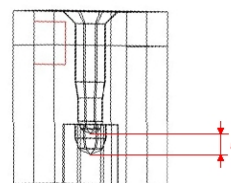
Modelovanje filtra je rađeno u programskom paketu WIPL-D [5]. Pomoću nonijusa izmerene su sve dimenzije realnog filtra, gde je zanemarena debljina zidova, pošto su zidovi relativno tanki ( $\approx 2$  mm). Da bi se u ploče uključili i gubici, sve ploče u modelu sadrže karakteristiku bakra, specifične provodnosti  $\sigma = 56$  MS/m. Svaki rezonator u unutrašnjosti ima pokretni element i nepokretni element, tzv. 'čša' (slika 3).



Sl. 3. (a) Pokretni element (b) nepokretni element – 'čša'.

Koji kanal će biti propušten a koji oslabljen zavisi od položaja pokretnih elemenata rezonatora i sprega između rezonatora. Pokretni element je moguće podizati i spuštati, čime se menja rezonantna frekvencija odgovarajućeg rezonatora.

Pošto svaki rezonator ponaosob daje uzan propusni opseg, uži od željenih 8 MHz, sprežu se tri rezonatora kako bi se u frekvencijskoj karakteristici dobio dovoljno širok propusni opseg. Spuštanjem pokretnog elementa, tj. približavanjem tog elementa 'čša' (sl. 4), rezonantna frekvencija se smanjuje.

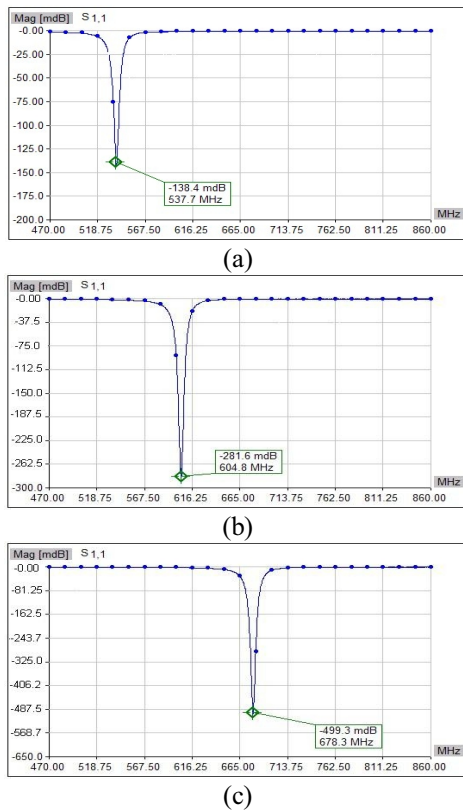


Sl. 4. Model jednog rezonatora. Pokretni element i 'čša' su na međusobnom vertikalnom rastojanju  $D$ .

Približavanjem ova dva elementa kapacitivnost u rezonantnom kolu se povećava. Zato se rezonantna učestanost ovog rezonatora smanjuje što se vidi iz jednačine za rezonantnu učestanost LC-kola kapacitivnosti  $C$  i induktivnosti  $L$ ,

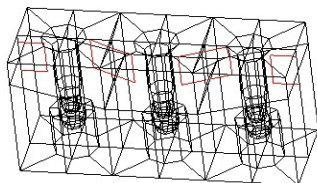
$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

a grafički je ilustrovano rezultatima simulacije na sl. 5.



Sl. 5. Promena rezonantne frekvencije u zavisnosti od rastojanja  $D$  između nepokretnog i pokretnog elementa u unutrašnjosti rezonatora (a)  $D=11$  mm (b)  $D=14$  mm, (c)  $D=17$  mm.

Pristupi filtra (ulaz i izlaz) su nominalne impedanse  $50 \Omega$ . Sprege između rezonatora su realizovane pomoću metalnih kontura (prečnika provodnika  $d = 4$  mm) koje se mogu videti na sl. 2 i sl. 6.



Sl. 6. Jedan od mogućih položaja metalnih kontura.

U zavisnosti od položaja ovih kontura, sprege će biti jača odnosno slabija. Jača sprege unutar propusnog opsega popravljaju prilagođenje (smanjuje se  $|S_{11}|$ ), ali i sužava propusni opseg. Finim ručnim podešavanjem se

dobija dovoljno širok opseg da propusti oba nosioca (slika i ton), a da ne bude ni preširok da ulazi u opseg susednog kanala. Ukoliko je sprege odgovarajuća za jedan kanal, taj isti položaj kontura ne mora da odgovara nekom drugom kanalu. Ovo znači da pomeranje pokretnih elemenata u rezonatorima mora da prati i menjanje položaja sprežnih kontura. Na realnom modelu filtra jednom podešen položaj pokretnih i sprežnih elemenata za željeni kanal se mehanički fiksira maticama.

### III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

#### A. Rezultati merenja

Karakteristika realnog filtra je posmatrana na analizatoru mreža. Na sl. 7 se vidi da prenosna karakteristika propušta opseg širine oko 8 MHz, tj. približno 702–710 MHz jer je filter podešen na 59. televizijski kanal. U propusnom opsegu su vidljiva oba nosioca (slika i ton), a uneto slabljenje dostiže 0,3 dB. Prilagođenje je ispod  $-23$  dB u propusnom opsegu filtra, što je odlika filtera snage do 500 W.



Sl. 7. Merenje realnog filtra pomoću analizatora mreža. Markeri pokazuju poziciju nosioca slike i nosioca tona.

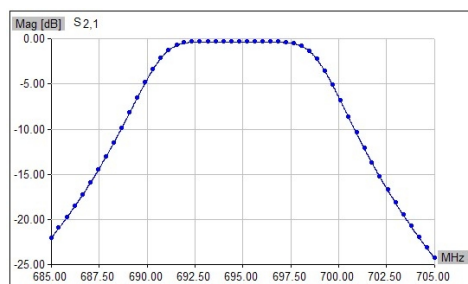
Poželjno je da se na karakteristici prilagođenja vidi rezonantna kriva (odnosno minimum) svakog rezonatora, tj. ukoliko tri rezonatora čine filter, kao u ovom slučaju, idealno je da se vide tri rezonantne krive. Ukoliko nije tako, moguće je da neka sprege nije dovoljno dobro podešena ili da se javio previsok napon. Usled visokih napona i velikih struja dolazi do preteranog grejanja uređaja. Komponente filtra izložene visokoj temperaturi imaju sve slabije karakteristike i kvare funkcionisanje filtra, a to može dovesti do kvara pomenutog uređaja.

#### B. Rezultati simulacije

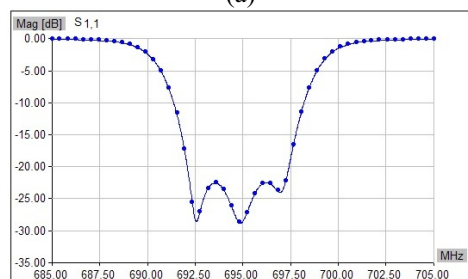
Simulacioni model filtra (u programskom paketu WIPL-D) je podešavan ručno, menjanjem rastojanja  $D$  između nepokretnog i pokretnog elementa u unutrašnjosti svakog rezonatora i menjanjem uglova pod kojim su postavljene konture u odnosu na zidove rezonatora. Dobijeni su rezultati (sl. 8) sa vrlo dobrom prenosnom karakteristikom ( $S_{21}$ ) i karakteristikom prilagođenja ( $S_{11}$ ).

Kada su spregnuti, rezonatori čine filtar propusnik opsega. Taj propusni opseg je određen centralnom frekvencijom i širinom propusnog opsega. Međutim, kada rezonatori nisu spregnuti oni nemaju istu centralnu (rezonantnu) frekvenciju. Unutrašnji rezonator ima nešto višu rezonantnu frekvenciju od spoljnih, dok oba spoljna imaju istu rezonantnu frekvenciju. Ovakvim podešavanjem se dobija veoma dobra prenosna karakteristika filtra.

Treba istaći da je korišćenjem programskog paketa WIPL-D trajanje svake simulacije za dobijanje karakteristika na 50 frekvencija (kao na sl. 7) oko 15 minuta (na PC računaru prosečnih karakteristika). Promenom rastojanja  $D$  između nepokretnog i pokretnog elementa u unutrašnjosti rezonatora za 0,001 mm vidljivo se menja prenosna karakteristika, odnosno karakteristika prilagođenja. Posmatrajući ugao koji sprežne konture zaklapaju sa zidovima rezonatora, vidljive promene na pomenutim karakteristikama se javljaju pomerajima od 0,01 rad. Sve ovo govori o velikoj osetljivosti cele strukture i kompleksnosti dobijanja krajnjih karakteristika.



(a)



(b)

Sl. 8. Karakteristike dobijene ručnim podešavanjem  
(a)  $S_{21}$  (b)  $S_{11}$ .

Upoređujući dobijene rezultate u WIPL-D programskom paketu sa karakteristikama realno merenog filtra, dobija se veoma slična karakteristika sa 3 dB-skim opsegom širine 8 MHz i prilagođenjem koja je u propusnom opsegu bolje od 22 dB.

#### IV. ZAKLJUČAK

Rezultati dobijeni podešavanjem simulacionog modela filtra su praktično identični rezultatima dobijenim podešavanjem i merenjem stvarnog filtra. Pored svih aproksimacija, simulacioni model i primenjen programski paket su omogućili vrlo verno modelovanje karakteristika filtra.

Analizirani filtar se koristi za analogne TV signale. Za digitalne TV signale filtri istog tipa i konstrukcije su takođe nezaobilazni deo emisionog lanca, a od filtara za analogne signale se razlikuju samo po tome što imaju veću selektivnost, a time i veći broj rezonatora. Prema tome, prikazano EM modelovanje može se direktno primeniti i na ove filtre.

#### ZAHVALNICA

Posebnu zahvalnost dugujem dipl.inž. Radiši Petroviću, tehničkom direktoru preduzeća „Emisiona tehnika i veze RTS“, kao i dipl.inž. Slađanu Stankoviću, iz istog preduzeća, koji se direktno angažovao i pružio dragocena objašnjenja u vezi sa funkcionisanjem i praktičnim podešavanjem analiziranog filtra.

#### LITERATURA

- [1] Vladimir V. Petrović, Dejan V. Tošić, Antonije R. Đorđević, *Mikrotalasna pasivna kola*, elektronsko web izdanje, Beograd 2010.
- [2] Milka Potrebic, *Mikrotalasni filtri sa lokalizovanim impulsnim odzivom u tehnici mikrotrakastih vodova – Doktorska teza*, Beograd 2009.
- [3] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons Inc, New York 2001.
- [4] George L. Matthaei, Leo Young, E.M.T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-matching Networks and Coupling Structures*, New York: McGraw-Hill, 1964.
- [5] WIPL-D Microwave, Artech House, MA, USA

#### ABSTRACT

Three-dimensional modeling of coupled resonators filter for UHF frequency band (470 – 860 MHz) is shown in this paper. This filter is used as a part of multiplexer for transmission of analog television signal. The aim of this study was to make (in WIPL-D software) the simplest 3D EM model of a complex filter, which has characteristics very similar to characteristics of the existing filter. In the simulation model filter's walls are infinitely thin and spherical and cylindrical parts of the filter are modeled like octagonal geometrical structures. Beside these approximations, it's possible to look into precise adjustment of the exciting filter using the simulation model.

**Electromagnetic modeling of coupled resonators filter for UHF frequency band**  
Milica Mrdaković