

Rekonfigurabilni memristivni filter sa dva propusna opsega korišćenjem četvrttalasnih rezonatora

Stefan Radovanović
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

rs225041p@student.etf.bg.ac.rs
<https://orcid.org/0009-0008-8673-553X>

Milica Dotlić
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

dm233474m@student.etf.bg.ac.rs
<https://orcid.org/0009-0003-6706-8958>

Milka Potrebić Ivaniš
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

milka_potrebic@etf.bg.ac.rs
<https://orcid.org/0000-0002-4866-6608>

Apstrakt— Predložen je novi metod projektovanja filtra sa dva propusna opsega učestanosti u planarnoj tehnici, korišćenjem polutalasnih i četvrttalasnih rezonatora. Prvi 3 dB propusni opseg je od 2.34 GHz do 2.44 GHz, a drugi propusni opseg je od 4.9 GHz do 5.17 GHz. Korišćenjem RF memristora u ON stanju, omogućeno je potiskivanje gornjeg propusnog opsega za više od 25 dB. Kad je RF memristor u OFF stanju, odziv filtra je identičan odzivu originalnog filtra bez memristora.

Ključne reči—četvrttalasni rezonator, filter propusnik opsega učestanosti, memristor, polutalasni rezonator, rekonfigurabilnost, sprengnuti rezonatori

I. UVOD

Pored osnovna tri elementa teorije električnih kola, realizovan je i četvrti element nazvan memristor. Konstituisao ga je profesor Leon Chua [1]. Memristor je našao primenu u analognim kolima [2], gde je moguće u toku samog rada aktivnog filtra automatizovano programirati centralne učestanosti propusnog opsega filtra. Memristor se može upotrebiti umesto digitalnog potenciometra u električnim kolima [3], a našao je primenu i kod digitalnih pomerača faze [4].

U [5] je prikazana mogućnost primene memristora kao RF prekidača za projektovanje rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti. U slučaju da je memristor u ON stanju, filter ima samo donji propusni opseg učestanosti, a kad je memristor u OFF stanju filter ima oba propusna opsega učestanosti.

Memristivni prekidač se može modelovati uz pomoć linearnog kondenzatora kapacitivnosti $C_{OFF} = 1.37$ fF za OFF stanje memristora i linearnog otpornika otpornosti $R_{ON} = 3.6$ Ω za ON stanje memristora [6].

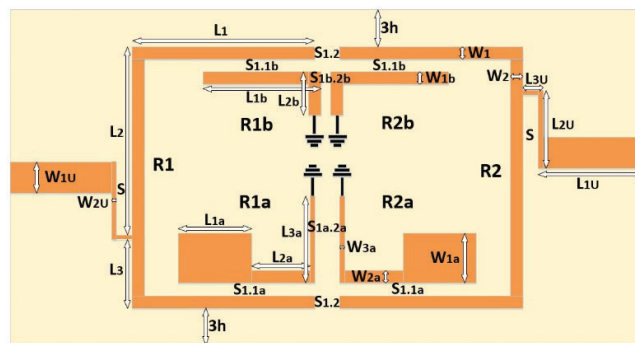
U radu će biti prikazan novi postupak projektovanja rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti u planarnoj tehnici. Prikazan je postupak modifikacije filtra sa dva propusna opsega učestanosti prikazana u [7], [8]. Rekonfigurabilni filter je projektovan u softverskom alatu za analizu mikrotalasnih kola Cadence AWR Microwave Office (MWO) [9]. Za 3D elektromagnetsku verifikaciju korišćen je softverski alat WIPL-D Pro CAD [10].

Rad je organizovan u četiri poglavlja. U II poglavlju prikazana je realizacija filtra na mikrotrakastoj podlozi, dok je u glavi III realizovan rekonfigurabilni filter sa memristivnim prekidačem. Izvedeni zaključci dati su u poglavlju IV.

II. PLANARNI FILTER SA DVA PROPUSNA OPSEGA UČESTANOSTI

Polazna realizacija filtra sa dva propusna opsega učestanosti je prikazana na slici 1. Filter se sastoji od polutalasnog rezonatora R1, koji je opterećen uvodnikom, i od četvrttalasnih rezonatora R1a i R1b. Rezonator R2 je identičan rezonatoru R1, a R2a i R2b su identični kao R1a i R1b, respektivno. Identični rezonatori su simetrično postavljeni jedan u odnosu na drugi.

Za realizaciju filtra korišćena je mikrotrakasta podloga PTFE teflon ZYF300CA-P sa sledećim parametrima: relativna permitivnost $\epsilon_r = 3$, debljina podloge $h = 0.508$ mm, debljina bakarne folije $t = 17$ μ m i $tg\delta = 0.0018$.



Sli. 1 Filter sa dva propusna opsega učestanosti realizovan na mikrotrakastoj podlozi (Original).

Filter ima dva propusna opsega sa centralnim učestanostima 2.39 GHz i 5.08 GHz sa apsolutnim širinama propusnih opsega od 100 MHz i 260 MHz, respektivno. Dimenzije filtra, sa slike 1, su date u Tabeli I.

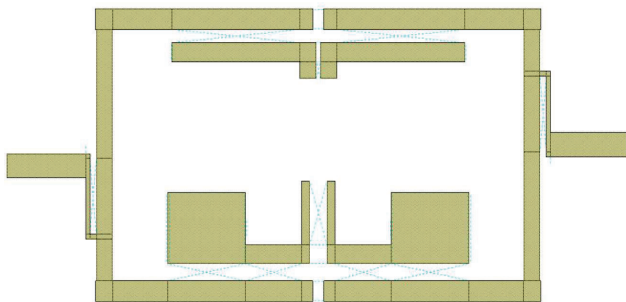
Dimenzije filtra (Original) su 39.3 mm \times 18.5 mm ($0.313 \lambda_g \times 0.147 \lambda_g$) uključujući uvodnike. λ_g je vodena talasna dužina za 50 Ω uvodnike na centralnoj učestanosti za niži propusni opseg filtra.

Za filter sa dva propusna opsega učestanosti (sa slike 1), projektovan u softverskom alatu Cadence AWR Microwave Office (MWO) [9], izgled štampane pločice (layout) je prikazan na slici 2. Layout filtra sa slike 1, koji je projektovan u 3D elektromagnetskom softveru WIPL-D Pro CAD [10], dat je na slici 3.

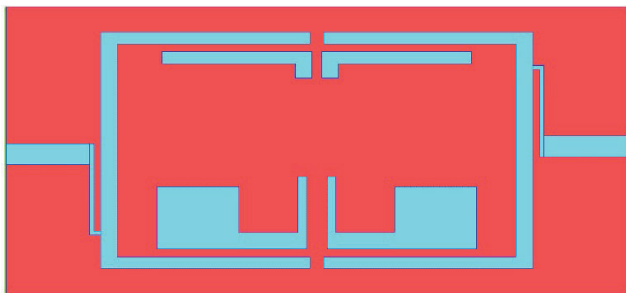
Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije po ugovoru broj: 451-03-65/2024-03/200103.

TABELA I. DIMENZIJE FILTRA SA DVA PROPUSNA OPSEGA UČESTANOSTI (ORIGINAL). DIMENZIJE SU DATE U MM.

R1	W ₁	W ₂	L ₁	L ₂	L ₃	
MWO	1.1	1	13.7	11.9	3.3	
WIPL-D	1.1	1	13.65	14	2	
R1b	W _{1b}	L _{1b}	L _{2b}			
MWO	1	9.1	1.875			
WIPL-D	1	9	1.875			
R1a	W _{1a}	W _{2a}	W _{3a}	L _{1a}	L _{2a}	L _{3a}
MWO	3.75	1	0.5	5	3.55	4.35
WIPL-D	3.75	1	0.5	4.9	3.55	4.35
Procep	S _{1,2}	S _{1,1b}	S _{1b,2b}	S _{1,1a}	S _{1a,2a}	S
MWO	0.7	0.7	0.3	0.7	1.1	0.4
WIPL-D	0.7	1	0.4	0.6	1.1	0.4
UVODNIK	W _{1U}	W _{2U}	L _{1U}	L _{2U}	L _{3U}	
MWO	1.25	0.25	5.25	5	0.65	
WIPL-D	1.25	0.25	5.25	5.5	0.65	



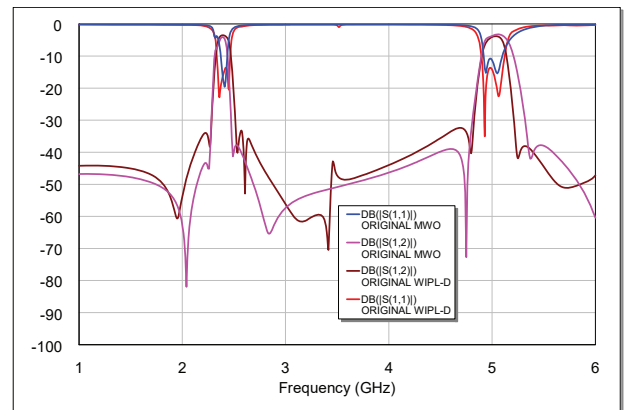
Sl. 2 Layout originalnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti (Original) projektovan u Cadence AWR Microwave Office (MWO).



Sl. 3 Layout originalnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti (Original) projektovan u WIPL-D Pro CAD.

U cilju verifikacije rezultata, na slici 4 su prikazani odzivi filtera sa slike 1 u oba softverska alata [9], [10]. U softverskom alatu Cadence AWR Microwave Office (MWO) centralne učestanosti filtera sa dva propusna opsega su od 2.39 GHz i 5.08 GHz sa relativnim širinama propusnih opsega od 100 MHz i 260 MHz, respektivno. U softverskom alatu WIPL-D Pro CAD, za 3D elektromagnetsko modelovanje, centralne učestanosti filtera sa dva propusna opsega su 2.39 GHz i

5.02 GHz sa apsolutnim širinama propusnih opsega od 110 MHz i 200 MHz, respektivno.



Sl. 4 Odziv originalnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti u Cadence AWR Microwave Office (MWO) i WIPL-D Pro.

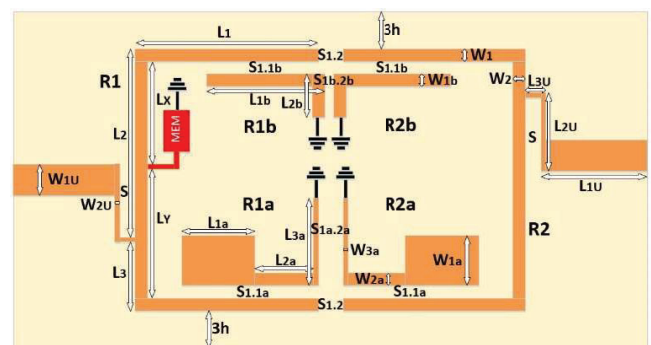
III. REKONFIGURABILNI PLANARNI FILTAR SA DVA PROPUSNA OPSEGA UČESTANOSTI

Rekonfigurabilni filter sa dva propusna opsega je dobijen modifikacijom filtera sa slike 1. Kao prekidački element korišćen je memristor (pogledati sliku 5). Centralne učestanosti i širine propusnih opsega, filtera sa slike 5, ostale su identične u poređenju sa filtrom sa slike 1. Dimenzije filtera, sa slike 5, date u Tabeli II.

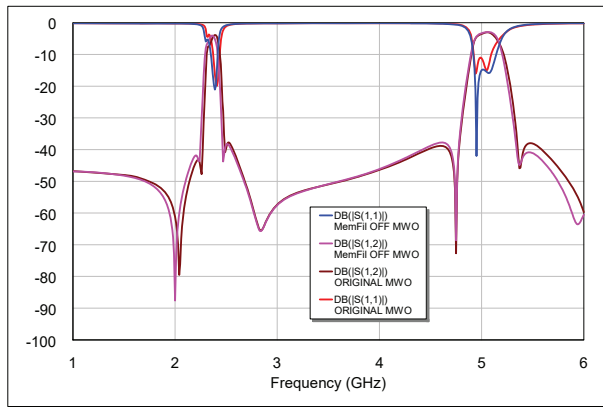
U slučaju kad je memristor u OFF stanju, filter ima dva propusna opsega (slika 6). U tom slučaju, memristor se ekvivalentno predstavlja linearnim kondenzatorom.

Kada je memristor u ON stanju, memristor se modeluje linearnim otpornikom. Tada filter ima samo niži propusni opseg (slika 7), dok je viši propusni opseg potisnut.

Za oba stanja memristora filter je modelovan na nivou mikrotalasnog kola u Cadence AWR Microwave Office (MWO).



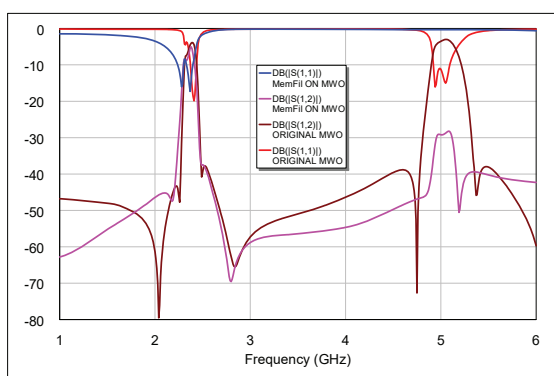
Sl. 5 Rekonfigurabilni filter sa dva propusna opsega učestanosti sa memristivnim prekidačem realizovan na mikrotrakastoj podlozi (MemFil).



Sl. 6 Odziv filtra sa dva propusna opsega učestanosti modelovan u Cadence AWR Microwave Office (MWO): Original filter bez memristora, MemFil OFF – filter sa memristorom u OFF stanju.

TABELA II. DIMENZIJE REKONFIGURABILNOG FILTRA SA DVA PROPUSNA OPSEGA UČESTANOSTI SA MEMRISTOROM (MEMFIL). DIMENZIJE SU DATE U MM.

R1	W ₁	W ₂	L ₁	L ₂	L ₃	L _x	L _y
MWO	1.1	1	13.7	12.4	3.3	6	7.5
WIPL-D	1.1	1	13.65	14	2	6.88	6.87
R1b	W _{1b}	L _{1b}	L _{2b}				
MWO	1	9.1	1.875				
WIPL-D	1	9	1.875				
R1a	W _{1a}	W _{2a}	W _{3a}	L _{1a}	L _{2a}	L _{3a}	
MWO	3.75	1	0.5	5.1	3.55	4.35	
WIPL-D	3.75	1	0.5	4.9	3.55	4.35	
Procep	S _{1,2}	S _{1,1b}	S _{1b,2b}	S _{1,1a}	S _{1a,2a}	S	
MWO	0.7	0.7	0.3	0.7	1.1	0.4	
WIPL-D	0.7	1	0.4	0.6	1.1	0.4	
UVODNIK	W _{1U}	W _{2U}	L _{1U}	L _{2U}	L _{3U}		
MWO	1.25	0.25	5.25	4.5	0.65		
WIPL-D	1.25	0.25	5.25	5.5	0.65		

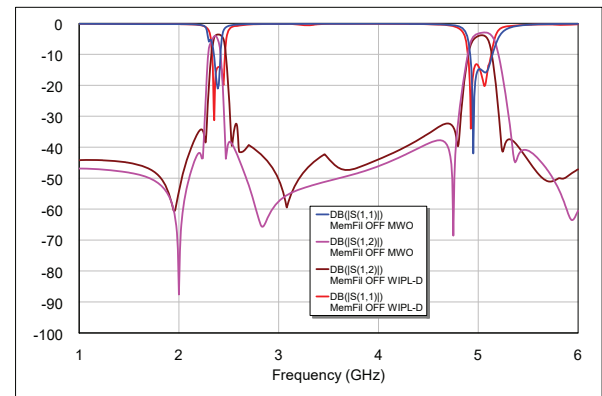


Sl. 7 Odziv filtra sa dva propusna opsega učestanosti modelovan u Cadence AWR Microwave Office (MWO): Original filter bez memristora, MemFil ON – filter sa memristorom u ON stanju.

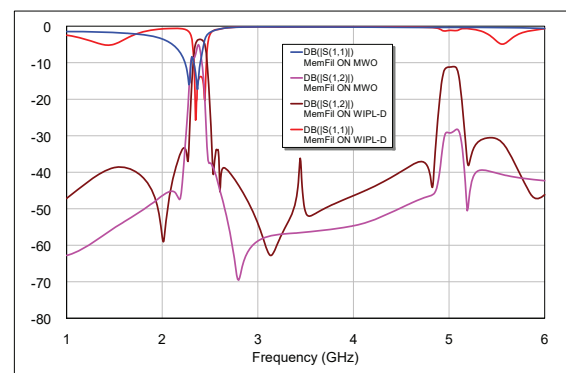
Dimenzije filtra (MemFil) su $39.3 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ ($0.309 \lambda_g \times 0.149 \lambda_g$) uključujući uvodnike. λ_g je vođena talasna dužina za 50Ω uvodnike na centralnoj učestanosti za donji propusni opseg filtra.

Odziv rekonfigurabilnog filtra (MemFil) za memristor u OFF stanju prikazani su na slici 8. U cilju verifikacije rezultata analiza je izvršena u oba softverska alata [9], [10]. U tom slučaju, filter ima oba propusna opsega (videti slika 8). U Cadence AWR Microwave Office (MWO) centralne učestanosti filtra sa dva propusna opsega su 2.36 GHz i 5.04 GHz, a širine propusnih opsega su 110 MHz i 240 MHz, respektivno. U WIPL-D Pro CAD centralne učestanosti filtra sa dva propusna opsega su 2.4 GHz i 5.02 GHz, a širine propusnih opsega su 120 MHz i 200 MHz, respektivno. Kada je memristor u ON stanju postoji samo niži propusni opseg, a gornji propusni opseg je potisnut za više od 25 dB na osnovu simulacije u Cadence AWR Microwave Office (MWO), dok je u slučaju WIPL-D Pro CAD simulacije potiskivanje više od 10 dB (slika 9).

U Cadence AWR Microwave Office (MWO) centralna učestanost donjeg propusnog opsega je 2.38 GHz, a širina propusnog opsega je 75 MHz. U WIPL-D Pro CAD centralna učestanost donjeg propusnog opsega je 2.4 GHz, a širina propusnog opsega je 120 MHz.



Sl. 8 Odziv rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti sa memristorom u OFF stanju u Cadence AWR Microwave Office (MWO) i WIPL-D Pro CAD.



Sl. 9 Odziv rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti sa memristorom u ON stanju u Cadence AWR Microwave Office (MWO) i WIPL-D Pro CAD.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je novi metod za projektovanje filtra sa dva propusna opsega učestanosti koristeći polutalasne i četvrttalasne rezonatore. U cilju postizanja rekonfigurabilnosti filtra korišćen je RF memristivni prekidač. Rekonfigurabilni planarni filter sa dva propusna opsega učestanosti ima skoro identičan odziv kao originalni planarni filter sa dva propusna opsega učestanosti ako je memristor u OFF stanju. Kad je memristor u ON stanju, gornji propusni opseg filtra je potisnut za više od 25 dB, što je takođe bio cilj uvođenja memristora u realizaciju filtra.

Naredni korak u istraživanju bio bi minijaturizacija filtra sa dva propusna opsega učestanosti u višeslojnoj tehnici sa i bez memristivnog prekidača. Još jedan način minijaturizacije bi bio meandriranje polutalasnog rezonatora.

LITERATURA

- [1] Chua LO. "Everything you wish to know about memristors but are afraid to ask". *Radioengineering* 2015; 24(2):319–368.
- [2] I. Marković, M. Potrebić Ivaniš, D. Tošić, "The Dynamic Tunability of Memristor-Based Active Filters", *Micromachines*, Vol. 14, No. 11, pp. 1–13, 2023.
- [3] I. Marković, M. Potrebić, D. Tošić, Memristors as candidates for replacing digital potentiometers in electric circuits, *Electronics*, Vol. 10, No. 2, pp. 1–18, 2021.
- [4] I. Marković, M. Potrebić, D. Tošić, "Main-line memristor mounted type loaded-line phase shifter realization", *Microelectron Eng*; pp. 185–186: 48–54, 2018.
- [5] M. Potrebić, D. Tošić, D. Biolk, "RF/microwave applications of memristors", In: Vaidyanathan S, Volos C, editors. *Advances in Memristors, Memristive Devices and Systems*, Cham, Switzerland: Springer; pp. 159–185, chapter 7, 2017.
- [6] S. Pi, M. Ghadiri-Sadrabadi, J. C. Bardin, Q. Xia, "Nanoscale memristive radiofrequency switches", *Nat Commun* vol. 6, pp. 1–9, 2015.
- [7] S. Radovanović, M. Potrebić Ivaniš, "Memristivni planarni rekonfigurabilni filtri sa dva propusna opsega učestanosti", LXVII ETRAN konferencija 2023, pp. 1–5, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 2023.
- [8] S. Radovanović, M. Potrebić Ivaniš, D. Tošić, "Memristive Multi-Layer Reconfigurable Dual-Band Bandpass Filter", 33rd IEEE International Conference on Microelectronics (MIEL 2023), Niš, Serbia, 2023.
- [9] Cadence AWR Microwave Office, [online] https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html
- [10] WIPL-D Pro CAD, WIPL-D d.o.o., Belgrade, Serbia, [online] <https://wipl-d.com/products/wipl-d-pro-cad/>.

ABSTRACT

A new method of designing a filter with two frequency bandwidths in the planar technique, using half-wave and quarter-wave resonators, is proposed. The first 3 dB bandwidth is from 2.34 GHz to 2.44 GHz and the second bandwidth is from 4.9 GHz to 5.17 GHz. By using the RF memristor in the ON state, it is possible to suppress the upper bandwidth by more than 25 dB. When the RF memristor is in the OFF state, the response of the filter is identical to the response of the original filter without the memristor.

Reconfigurable memristive dual-band bandpass filter using quarter-wave resonators

Stefan Radovanović, Milica Dotlić i Milka Potrebić Ivaniš