

Memristivni filter sa više propusnih opsega

Ana Tatović
Univerzitet u Kragujevcu
Fakultet tehničkih nauka
Čačak, Srbija

ana.tatovic@ftn.kg.ac.rs
<https://orcid.org/0000-0001-5653-0850>

Stefan Radovanović
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

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

Milka Potrebić Ivaniš
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

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

Apstrakt—U radu je prikazana mogućnost realizacije filtera propusnika opsega učestanosti koji ne reflektuju signale u nepropusnom opsegu već ih apsorbuju. Apsorpcija neželjenih RF signala se realizuje sa širokopojasnim prilagođenjem pomoću četvrttalasnih ogranaka i memristorom. Prilagođenje se realizuje na ulazu filtera. Prikazana je i mogućnost podele propusnog opsega filtra na više podopsega, što omogućava veću fleksibilnost pri projektovanju. Kao primer realizacije prikazan je filter sa pet propusnih opsega u mikrotrakastoj tehnici.

Ključne reči—apsorpcija, filter propusnik opsega učestanosti, filter sa više propusnih opsega, memristor, mikrotrakasta tehnika.

I. UVOD

Filteri propusnici opsega učestanosti predstavljaju jedne od osnovnih komponenti u mikrotalasnim primopredajnicima. Na strani predaje, ograničavaju frekvencijski opseg signala, potiskujući signale van definisanog frekvencijskog opsega kao i produkte intermodulacije, koji prvenstveno potiču od nelinearnih aktivnih komponenti. Sa druge strane, u prijemniku filteri reflektuju signale izvan definisanog propusnog opsega kao i šum. U dostupnoj literaturi postoji veliki broj realizacija mikrotalasnih filtera propusnika opsega učestanosti za različite tehnologije (npr. [1]-[2]), ali se uglavnom baziraju na slabljenju signala tako što ih reflektuju u nepropusnom opsegu. To znači da se signali iz propusnog opsega prenose na izlaz, dok se signali iz nepropusnog opsega slabe reflektovanjem i vraćaju na ulaz.

Reflektovana snaga signala iz nepropusnog opsega može dovesti do neželjenih efekata pri radu susednih aktivnih komponenti sistema, kao što su pojačavači [3], [4].

Reflektovana snaga signala iz nepropusnog opsega može biti posledica intermodulacionih proizvoda i harmonika lokalnog oscilatora. Snaga se reflektuje od filtra koji se postavlja neposredno posle miksera što može dovesti do pojave neželjenih signala i njihovog mešanja sa korisnim signalima. Produkt mešanja signala može upasti u radni opseg filtra, što rezultuje smanjenjem dinamičkog opsega ukupnog mikrotalasnog sistema.

Pored toga neželjene refleksije signala mogu da uzrokuju nestabilnost mikrotalasnih pojačavača. Svi ovi negativni efekti mogu dovesti do problema u funkcionisanju čitavog mikrotalasnog sistema. Ovo pitanje postaje još važnije kada se uzima u obzir veliki broj aktivnih komponenti koje se mogu naći kod današnjih RF primopredajnika [5].

Potiskivanje reflektovane snage u RF primopredajnicima se može ostvariti korišćenjem različitih metoda. Najčešće se koriste izolatori koji se dodaju između aktivnog elementa i filtra propusnika opsega učestanosti, tako da se reflektovana snaga filtra ne vraća u sistem. Ipak, feritni izolatori su glomazni i teški za integraciju, dok izolatori realizovani od neregipročnih

aktivnih elemenata zahtevaju napajanje [6]. Step atenuator se takođe može koristiti, ali on unosi značajne gubitke u prenosu signala što degradira odnos signal-šum. Slabljenje se može kompenzovati dodatnim pojačavačem, ali će biti potrebno dodatno jednosmerno napajanje. Kao treća mogućnost, mogu se koristiti cirkulatori, višestepeni duplekseri, itd. [7]. Sve navedene realizacije imaju neki od nedostataka kao što su gabaritne dimenzije, osetljivost pri radu ili su uskopojasne.

Jedan od efikasnijih postupaka za smanjenje neželjenih refleksija signala u nepropusnom opsegu podrazumeva korišćenje mikrotalasnih filtera propusnika opsega učestanosti koji apsorbuju signale, umesto da ih reflektuju u nepropusnom opsegu. Filteri propusnici opsega koji apsorbuju snagu signala iz nepropusnog opsega, umesto da je reflektuju, su mreže sa gubicima [8]. Korišćenjem navedenih filtera, baziranih na apsorpciji signala iz nepropusnog opsega, u RF primopredajnicima može se značajno smanjiti problem refleksije bez dodavanja novih elemenata u sistem.

U ovom radu je analizira realizacija filtera sa više propusnih opsega učestanosti koji apsorbuju signale iz nepropusnog opsega. U cilju realizacije prilagođenja, u širem opsegu učestanosti, korišćena je redna veza četvrttalasnih sekcija vodova [9] i memristora. Memristor ima funkciju podesivog otpornika na mikrotalasnim učestanostima [10]. U II poglavlju prikazana je realizacija filtra sa pet propusnih opsega učestanosti sa memristorom. Rezultati realizacije filtra u mikrotrakastoj tehnici prikazani su u III poglavlju. Na kraju su dati zaključci istraživanja u poglavlju IV.

II. FILTER SA VIŠE PROPUSNIH OPSEGA UČESTANOSTI

U ovom poglavlju prikazano je projektovanje filtra sa pet propusnih opsega učestanosti. Filter je realizovan sa dva paralelno vezana odsečka voda različite električne dužine ($\theta_1 \neq \theta_2$), ali istih karakterističnih impedansi. U cilju realizacije apsorpcionog filtra, na ulazu filtra je projektovano širokopojasno prilagođenje koje je redno vezano sa memristorom. Memristor ima ulogu podesivog otpornika na mikrotalasnim učestanostima, što je navedeno za MoS₂ naslednik memristora [11]. Širokopojasno prilagođenje je realizovano kaskadnom vezom četvrttalasnih odsečaka vodova. Prilagođenje po snazi na ulazu i izlazu filtra je ostvareno dodavanjem po jednog četvrttalasnog odsečka voda sa svake strane, karakterističnih impedansi Z_{m1} i Z_{m2} .

Realizacija filtra pomoću idealnih odsečaka vodova prikazana je na s Sl. 1. Električne dužine paralelno vezanih odsečaka vodova su [12]-[13]

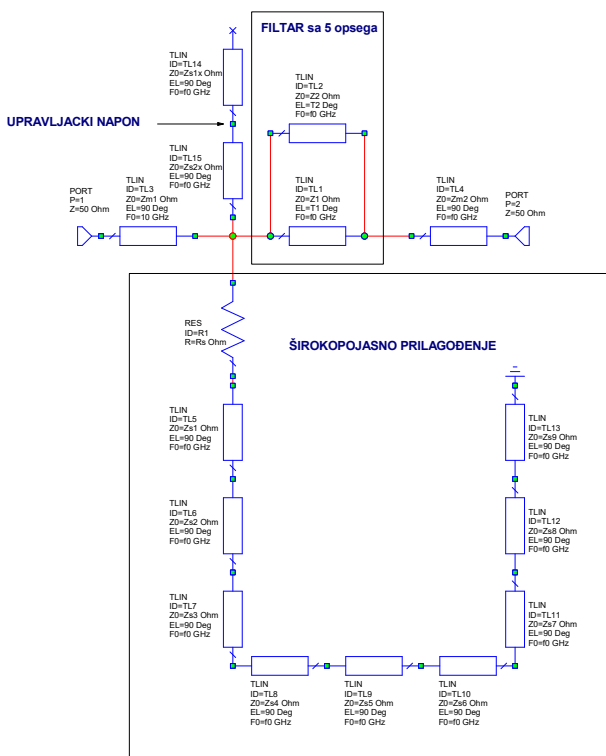
$$\theta_1(f_0) = 90^\circ, \quad (1)$$

$$\theta_2(f_0) = 630^\circ + N \times 180^\circ, \quad (2)$$

gde je N broj prilagođenih propusnih opsega filtra. Centralne učestanosti propusnih opsega su [12]-[13]

$$2(k+1)f_0/(N+3), k=1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

gde je f_0 centralna učestanost opsega $[0, 2f_0]$ na kome treba realizovati N propusnih podopsega učestanosti. Vrednosti karakterističnih impedansi paralelno postavljenih vodova se biraju tako da bude zadovoljen kriterijum $1/Z_1+1/Z_2=1/Z_0$. Za realizaciju prilagođenja na ulazu filtra potrebno je $N+3$ (tj. 8) četvrttalasna odsečka voda sa rednim otpornikom (R_s). Poslednji odsečak voda je otvoren. U našem slučaju otpornik je realizovan memristorom. Za podešavanje memristanse memristor je potrebno jednim krajem vezati na masu, a drugim za upravljački napon. U tu svrhu četvrttalasnim odsečcima prilagođenja je dodat još jedan četvrttalasni vod koji je vezan na masu, pa sad postoji devet odsečaka vodova. Karakteristične impedanse odsečaka vodova za realizaciju širokopojasnog prilagođenja označene su sa Z_{sk} , gde je $k=1, 2, \dots, 9$. Upravljački napon za podešavanje memristanse dodat je u šemu preko dvostrukih četvrttalasnih otvorenih ogranaka karakterističnih impedansi Z_{s1x} i Z_{s2x} , koji su vezani na ulaz filtra.



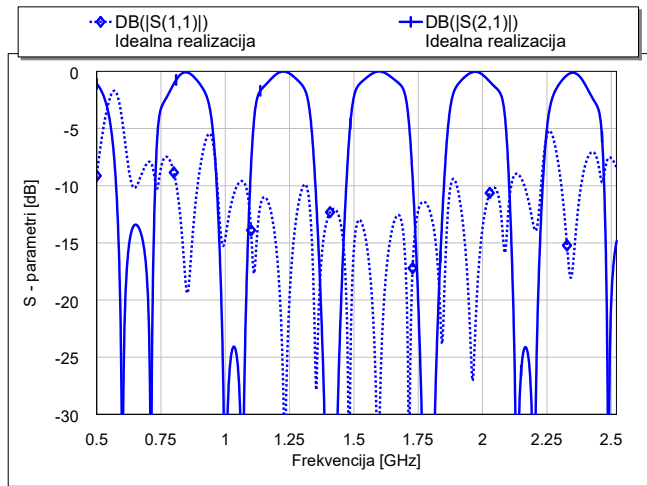
Sl. 1 Filtar sa pet opsega učestanosti realizovan sa idealnim odsečcima vodova.

TABELA I. PAREMAETRI FILTRA SA PET OPSEGA UČESTANOSTI SA SL. 1. JEDINICE SU Ω .

Z_1	Z_2	Z_{m1}	Z_{m2}	Z_{s1x}	Z_{s2x}	Z_{s1}	Z_{s2}
100	100	45	49.5	15	150	57	86
Z_{s3}	Z_{s4}	Z_{s5}	Z_{s6}	Z_{s7}	Z_{s8}	Z_{s9}	R_s
126	128.5	95	57	33.9	25	89	30.5

Parametri filtra sa Sl.1 su prikazani u tabeli I. Električne dužine svih vodova su 90° , osim voda karakteristične

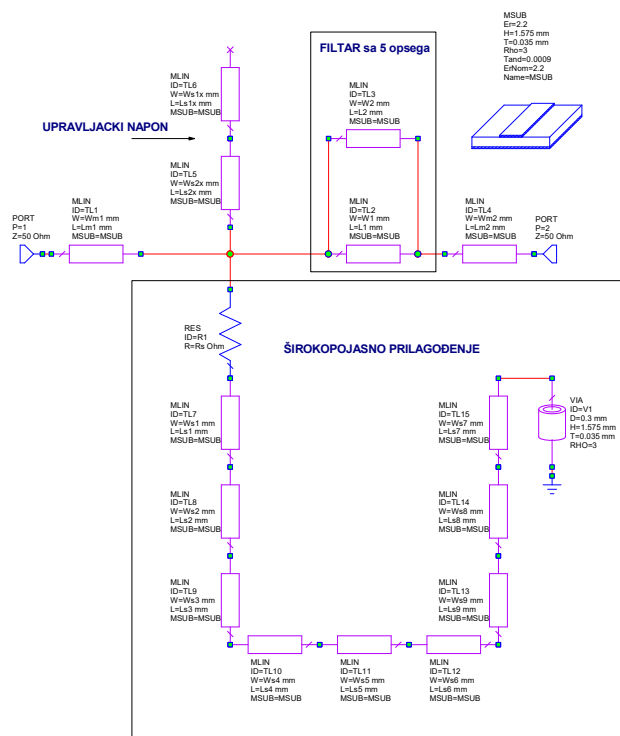
impedanse Z_2 čija je električna dužina 1530° . Izabrana je centralna učestanost f_0 od 1.6 GHz. Opseg $[0, 2f_0]$ treba podeliti na pet podopsega. Frekvencijski odziv filtra sa Sl. 1 prikazan je na Sl. 2. Dobijene centralne učestanosti pet propusnih opsega su 0.84 GHz, 1.22 GHz, 1.6 GHz, 1.97 GHz, 2.35 GHz, dok su širine propusnih opsega redom: 185 MHz, 207 MHz, 212 MHz, 207 MHz, 182 MHz.



Sl. 2. Frekvencijski odziv filtra sa Sl. 1.

III. REALIZACIJA FILTRA SA PET PROPUSNIH OPSEGA UČESTANOSTI U MIKROTRAKASTOJ TEHNICI

Na Sl. 3 prikazana je realizacija filtra sa pet propusnih opsega ($N=5$). U cilju realizacije apsorpcionog filtra na ulaz je vezano širokopojasno prilagođenje sa redno vezanim memristorom. Memristor je ekvivalentno predstavljen otpornikom. Uzeta je centralna učestanost $f_0=1.6$ GHz za posmatrani opseg $[0, 2f_0]$.



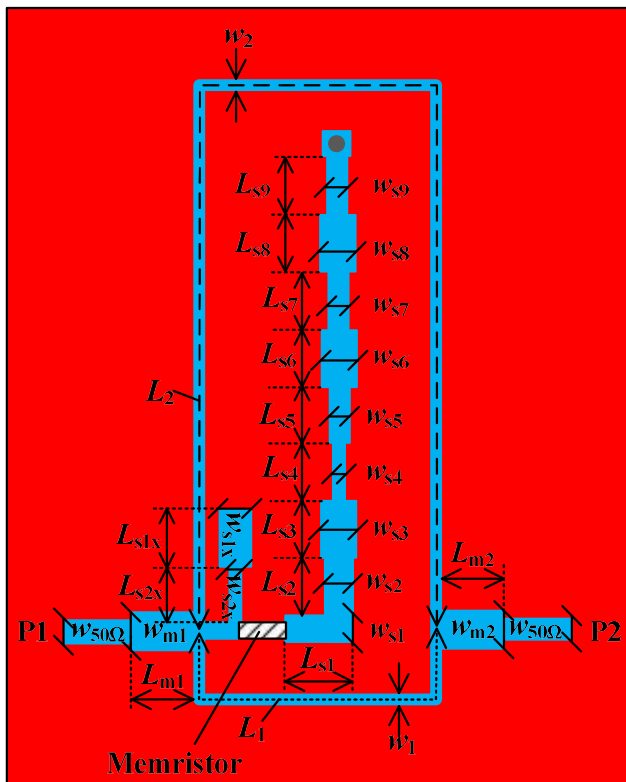
Sl. 3. Filtar sa pet opsega učestanosti realizovan u mikrotrakastoj tehnici.

Za realizaciju filtra korišćena je podloga RT/Duroid 5880 sa sledećim karakteristikama: $\epsilon_r = 2.2$, $h = 1.575$ mm, $t = 35$ μm , $\tan\delta = 0.0009$. Filtar je realizovan u alatu Cadence AWR Microwave Office [14] (Sl. 3).

Dimenzije filtra sa Sl. 3 prikazane su u tabeli II, dok je veličina samog memristora $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ [11]. Vrednost memristansa je podešena na 30.5Ω (R_s). Cilindrična vija ima prečnik od 0.3 mm, dok je njena dužina jednaka visini podloge 1.575 mm, a debljina metalizacije je 0.035 mm. Izgled štampane pločice filtra prikazan je na Sl. 4.

TABELA II. DIMEZNIJE FILTRA SA PET OPSEGA UČESTANOSTI SA SL. 2. JEDINICE SU MM.

W_1	W_2	W_{m1}	W_{m2}	W_{s1x}	W_{s2x}	W_{s1}	W_{s2}
1.36	1.36	5.62	4.88	22.67	0.43	3.92	1.88
L_1	L_2	L_{m1}	L_{m2}	L_{s1x}	L_{s2x}	L_{s1}	L_{s2}
35.32	600	33.94	43.09	32.58	36	34.32	35.05
W_{s3}	W_{s4}	W_{s5}	W_{s6}	W_{s7}	W_{s8}	W_{s9}	
0.75	0.71	1.52	3.92	8.32	12.31	1.75	
L_{s3}	L_{s4}	L_{s5}	L_{s6}	L_{s7}	L_{s8}	L_{s9}	
35.71	35.74	35.22	34.32	33.52	33.12	35.11	

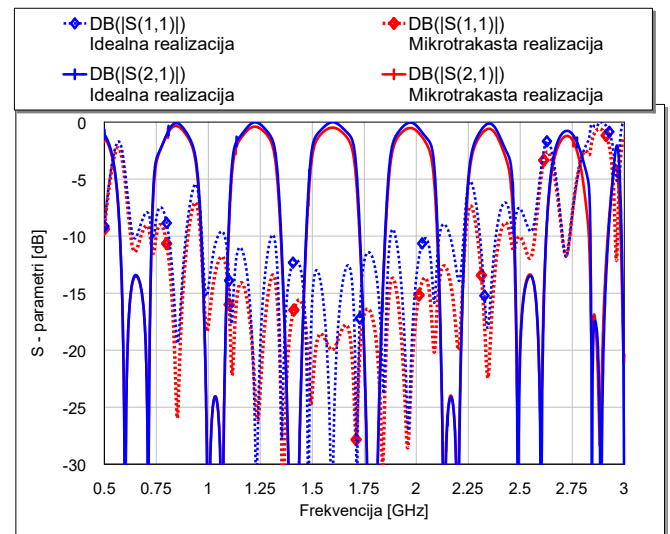


Sl. 4. Izgled štampane pločice filtra sa pet opsega učestanosti sa Sl. 3.

Na Sl. 5 je prikazano poređenje frekventijskih odziva filtra sa pet opsega u slučaju realizacije u mikrotrakastoj tehnici i realizacije sa idealnim odsečkima vodova. Zbog gubitaka u metalu i dielektriku, uočava se da je prilagođenje bolje u slučaju implementacije u mikrotrakastoj tehnici u odnosu na

filtrar sa idealnim odsečkima vodova. Parametar S_{21} je približno isti u oba slučaja.

U tabeli III su date centralne učestanosti svih pet propusnih opsega, njihove širine (B) i slabljenje na centralnoj učestanosti svakog opsega.



Sl. 5. Frekventijski odziv filtra sa Sl. 3.

TABELA III. PARAMETRI FILTRA SA PET OPSEGA UČESTANOSTI U MIKROTRAKASTOJ TEHNICI.

i	f_0 [GHz]	B [MHz]	$S_{21}(f_0)$ [dB]
1	0.84	184	0.33
2	1.22	201	0.39
3	1.6	206	0.48
4	1.97	199	0.51
5	2.35	176	0.58

IV. ZAKLJUČAK

Rad prikazuje realizaciju filtra sa više propusnih opsega koji ne reflektuju signale u nepropusnom osegu. Apsorpcija neželjenih signala je ostvarena korišćenjem širokopojasnog prilagođenja sa četvrttalasnim ograncima i memristorom. Prilagođenje je realizovano na ulazu filtra. Kao primer, realizovan je filter sa pet propusnih opsega u mikrotrakastoj tehnici. Filtar se sastoji od dva paralelno vezana odsečka voda različite električne dužine. Memristor ima ulogu podesivog otpornika. Prilagođenje po snazi na ulazu i izlazu filtra je ostvareno dodavanjem sa svake strane jedne četvrttalasne sekcije voda.

Prvo je realizovan filter pomoću idealnih odsečaka vodova, a potom u mikrotrakastoj tehnici. Na osnovu poređenja obe realizacije filtra, uočava se dobro poklapanje frekventijskih karakteristika. Kao posledica gubitaka korišćenog supstrata, dobija se nešto bolje prilagođenje u mikrotrakastoj implementaciji filtra. Susedne centralne učestanosti opsega pomerene su za oko 400 MHz, a centralna učestanost prvog opsega je 840 MHz. Širine propusnih opsega, u obe realizacije, su između oko 190 MHz i 210 MHz.

Na osnovu dostupne literature uočava se aktuelnost i značaj realizacije apsorpcionih filtra kod savremenih sistema na mikrotalasnim učestanostima. Stoga, predložena realizacija

ima dalji potencijal u istraživanju i razvoju filtera koji problem refleksije u nepropusnom opsegu rešavaju apsorpcijom u širem opsegu učestanosti. Sa druge strane, ostaje da se ispita uticaj parametara memristora na ograničenja filtra po pitanju maskimalne snage, temperaturnog koeficijenta itd.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] I. C. Hunter, *Theory and Design of Microwave Filters*, London, U.K.: IEE Press, 2001.
- [2] J.-S. Hong, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, 2nd ed., New York, NY, USA: Wiley, 2011.
- [3] Mini-Circuits, Brooklyn, N.Y., "Reflectionless filters improve linearity and dynamic range," *Microw. J.*, vol. 58, no. 8, pp. 42-50, Aug. 2015.
- [4] M. A. Morgan, "Think outside the band: Design and miniaturization of absorptive filters," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 19, no. 7, pp. 54-62, Nov.-Dec. 2019.
- [5] R. Gómez-García, J.-P. Magalhães, J.-M. Muñoz-Ferreras, J. M. N. Vieira, N. B. Carvalho, and J. Pawlan, "Filling the spectral holes: Novel/future wireless communications and radar receiver architectures," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 15, no. 2, pp. 45-56, Mar.-Apr. 2014.
- [6] J. D. Adam, "Mitigate the interference: Nonlinear frequency selective ferrite devices," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 15, no. 6, pp. 45-56, Sep.-Oct. 2014.
- [7] M. Katanbaf, K.-D. Chu, T. Zhang, C. Su, and J. C. Rudell, "Two-way traffic ahead: RF/analog selfinterference cancellation techniques and the challenges for future integrated full-duplex transceivers," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 20, no. 2, pp. 22-35, Feb. 2019.
- [8] M. A. Morgan, *Reflectionless Filters*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2017.
- [9] V. V. Petrović, D. V. Tošić, A. R. Đorđević, *Mikrotalasna pasivna kola*, Beograd: Elektrotehnički fakultet, elektronsko izdanje, 2010.
- [10] M. Potrebić, D. Tošić, *Projektovanje mikrotalasnih filtera*, Beograd: Akademska misao, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, 2019.
- [11] M. Kim, R. Ge, X. Wu, X. Lan, J. Tice, J. C. Lee, D. Akinwande, "Zero-static power radio-frequency switches based on MoS₂ atomristors," *Nature Communications*, vol. 9, 2524, pp. 1-7, 2018.
- [12] Roberto Gómez-García, Li Yang, José-María Muñoz-Ferreras, "Low-Reflection Signal-Interference Single- and Multipassband Filters With Shunted Lossy Stubs," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 4, 2020.
- [13] Roberto Gómez-García, Dimitra Psychogiou, José-María Muñoz-Ferreras, Li Yang, "Avoiding RF Isolators: Reflectionless Microwave Bandpass Filtering Components for Advanced RF Front-Ends," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 21, no. 12, 2020.
- [14] Cadence AWR Microwave Office, [online] https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html

ABSTRACT

The paper shows the possibility of bandpass filter realization which does not reflect out-of-band signals but absorb them. Absorption of unwanted RF signals is achieved using broadband impedance matching networks using quarter-wavelength branches and a memristor. The matching is realized at the filter input. The possibility of dividing the filter bandwidth into several sub-bands is also shown, which allows greater flexibility during design. As an implementation example, a microstrip filter with five passbands is presented.

Memristive multiband bandpass filter

Ana Tatović, Stefan Radovanović, Milka Potrebić Ivaniš