

Štampana dipol antena zasnovana na modifikovanom Sierpinski fraktalu

Luka Lazović, Vesna Rubežić i Ana Jovanović

Apstrakt—U ovom radu je prikazana štampana dipol antena zasnovana na modifikaciji Sierpinski trougaonog fraktala. Korišćenje fraktalnih geometrija za projektovanje antena omogućava projektovanje električno malih antena koje rade na više rezonantnih učestanosti. Korišćenje ove fraktalne geometrije ima za cilj podešavanje rezonantnih frekvencija fraktalne antene na visokim učestanostima promjenom toka struje po površini antene. Simulacijama su analizirani parametri rasijanja, raspodjela struje i dijagram zračenja. Eksperimentalnim mjerenjima parametara rasijanja potvrđeni su simulacioni rezultati.

Pokazano je da se upotrebom fraktalnih geometrija mogu projektovati male antene koje zrače iste dijagrame zračenja na više različitih frekvencija uz očuvanje željenih karakteristika.

Ključne reči—Dipol, antena, fraktal

I. UVOD

Ekspanzija u razvoju informaciono komunikacionih tehnologija, enormno povećan broj korisnika i sve veći zahtjev za velikom brzinom protoka dovela je do ubrzanog istraživanja pete generacije mobilnih komunikacija. Budući 5G mobilni operator mora ponuditi kombinaciju 2G, 3G 3.5G i 4G, Wi-Fi (uključujući buduću Li-Fi) dok im ciljani korisnici mogu koristiti mobilnu telefoniju, internet pretraživanja, video streaming, IoT (Internet of Things), virtuelnu realnost (VR), M2M (machine-to-machine) komunikacije, V2V (vehicle-to-vehicle) komunikacije, V2M (vehicle-to-machine) komunikacije i masivne „machine type“ komunikacije (pametna kuća, kancelarija ili pametan grad)[1], [2]. Sve ovo sačinjava 5G „ekosistem“.

Tehnike kandidovane za 5G sisteme su u fazi ubrzanog istraživanja u cilju utvrđivanja i standardizacije telekomunikacionih protokola, modulacija, propusnih opsega i frekvencija na kojima će se vršiti komunikacija, kao i projektovanja antene i antenskog sistema koji može da podrži zahtjeve 5G sistema. Na osnovu zahtjeva stavljenih pred projektante antena izdvojila su se tri pravca razvoja antena: smanjenje veličine, širokopojasnost i rad na više frekvencija i pametni antenski nizovi malih dimenzija[1]. Ovi zahtjevi su kontradiktorni[2].

Luka Lazović, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e mail: lukal@ac.me).

Vesna Rubežić, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e mail: vesnar@ac.me).

Ana Jovanović, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e mail: anaj@ac.me).

Rad sa milimetarskim talasima donosi određene specifičnosti pri dizajnu antene kao što su: komplikovana izrada, preciznost mjerenja, neophodnost veoma preciznog poznavanja dielektričnih svojstava materijala i njegovog uticaja na performanse antene, što kod antena koje rade na nižim učestanostima nije slučaj. Dizajniranje električno male antene je „umjetnost“. One imaju malu otpornost zračenja, veliku reaktansu i uzak propusni opseg (cilj je da budu električno male a da imaju veliki propusni opseg)[2]. U tom pogledu, potrebne su dodatne komponente za prilagođenje i za smanjenje reaktanse.

Sa povećanjem integracije dolazi do potrebe za smanjenjem i broja antena na uređaju, odnosno korišćenja jedne antene za sve potrebne kanale. Ovo se može postići upotrebom frekvencijski nezavisnih antena, ali ponovo vodeći računa o dimenzijama i potrebi da budu električno male. Širina frekvencijskog opsega i njihov broj je limitiran impedansom i gubitkom.

Fraktalne antene predstavljaju grupu električno malih antena, sa širokim propusnim opsegom i više rezonantnih frekvencija. Kao takve, fraktalne antene, koje se veoma intenzivno izučavaju, predstavljaju rješenje za izazovne zahtjeve modernih bežičnih komunikacija naredne generacije. Prednosti fraktalnih antena su: male dimenzije, veoma dobro prilagođenje ulazne impedanse, jedna antena je dovoljna za više frekventnih opsega kako uskopojasnih tako i širokopojasnih, pruža iste performanse na velikom opsegu frekvencija (smatraju se frekvencijski nezavisnim antenama). Fraktalne antene zrače na više ne-harmonijskih frekvencija, a na višim frekvencijama su prirodno širokopojasne. Da bi antena zračila na više frekvencija mora zadovoljiti dva kriterijuma: mora biti simetrična u odnosu na jednu tačku i mora biti samo slična, tj. mora imati isti oblik u svim iteracijama. Ovo su osobine fraktala. Ipak, podešavanje rezonantnih učestanosti nije lak zadatak.

Fraktalne antene su rezultat spajanja dvije discipline, teorije elektromagnetike i fraktalne geometrije. Počevši od log periodnih i spiralnih antena, preko radova Benoit Mandelbrot-a [3] u oblasti fraktalne geometrije, razvoj fraktalnih antena je prirodan slijed događaja. Sedamdesetih godina je intenzivno izučavana fraktalna geometrija, dok su devedesetih godina istraživači uočili da se ova geometrija može koristiti u dizajnu frekvencijski selektivnih površina i širokopojasnih antena [7]. Prvi antenski element zasnovan na fraktalnoj geometriji predložio je Cohen 1997. godine [4]. On je pokazao da koncept fraktalnih antena može biti korišćen za smanjenje veličine antene bez narušavanja performansi antene, odnosno da fraktalne antene predstavljaju grupu

električno malih antena [5], [6].

Radovi Puente-a iz 1998. godine [8] pokazuju da fraktalne antene imaju širokopojasne karakteristike. Novija istraživanja predlažu upotrebu fraktalnih geometrija u oblasti teraherc frekvencija u „Terahertz sensing“ aplikacijama [9],[3].

Najpoznatiju fraktalnu strukturu razvio je 1916. godine matematičar Waclaw Sierpinski [3]. Puente [8] koristi Sierpinski fraktal kao geometriju zračećeg elementa antene. U svom radu pokazuje da Sierpinski monopol antena ima višekanalne karakteristike, tj. ima više rezonantnih frekvencija sa istim dijagramom zračenja. Modifikacije Sierpinski fraktalne antene su aktuelne u brojnim radovima novijeg datuma [3]-[8].

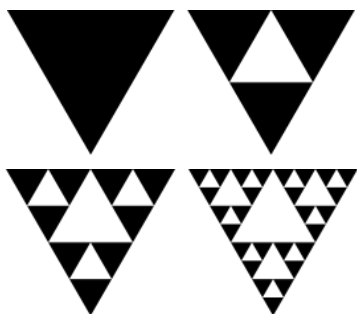
U radu je prikazana modifikacija Sierpinski fraktala iz [9] koji je iskorišćen kao zračeća struktura za štampanu dipol antenu. Cilj ove implementacija je analiza performansi i uticaj fraktalne geometrije na rezonantne učestanosti i raspodjelu struje po površini antene. Sve ovo ima za cilj istraživanje mogućnosti podešavanja rezonantnih frekvencija fraktalne antene na visokim učestanostima.

II. GEOMETRIJA PREDLOŽENE ANTENE

Antena čiji je oblik zasnovan na fraktalnoj geometriji je električno mala antena koja zrači na više učestanosti istovremeno. Prednost upotrebe fraktalnih antena je dobijanje istih dijagrama zračenja na svim rezonantnim učestanostima bez degradiranja karakteristike dijagrama zračenja.

Sierpinski fraktalna antena je najviše proučavana antena iz ove grupe koja je i danas izazovna i aktuelna za proučavanje iako je prvi put predstavljena 1998 godine[10]. Teorijski, Sierpinski dipol može imati beskonačno mnogo iteracija i isto toliko rezonantnih učestanosti. Broj iteracija određuje broj rezonantnih učestanosti [11]. U realnosti, usred ograničenja u tehnologiji izrade, ove antene imaju najviše šest rezonantnih frekvencija, tj. šest iteracija [12]. Jedan od načina povećanja broj rezonantnih frekvencija je i korišćenjem rekonfigurabilnih antena [13].

U ovom radu je kao osnovni fraktalni oblik uzet Sierpinski trougao. Konstrukcija fraktala počinje sa jednakokraničnim trouglom. Odrede se tačke polovljenja stranica pa se od početnog trougla oduzme trougao koji je nastao spajanjem tačaka polovljenja. tako nastaju tri jednakokranična trougla dvostruko manjih dužina stranica. Ovo je prva iteracija fraktala. Sledeće iteracije nastaju ponavljanjem ovog postupka. Na Sl. 1 je prikazan metod formiranja Sierpinski trougaonog fraktala.



Sl. 1. Formiranje Sierpinski fraktala.

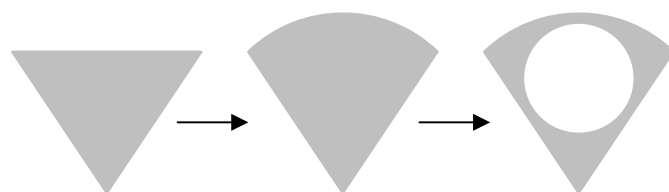
Fraktalna dimenzija ovog Sierpinski trougaonog fraktala je:

$$d = \frac{\log 3}{\log 2} = 1.585 \quad (1)$$

Promjenom broja iteracija i promjenom dimenzija same antene mijenjaju se rezonantne učestanosti. Kako je dimenzija antene veoma bitan uslov prilikom projektovanja antene, trend je smanjenje dimenzije, pa se ovaj parametar ne može mijenjati. Povećanje iteracija ne daje dovoljno mogućnosti. Zbog ovih razloga se pribjegava modifikacijama osnovne fraktalne geometrije. Modifikacije osnovnih fraktalnih geometrija su jako zastupljene u literaturi[3]–[8].

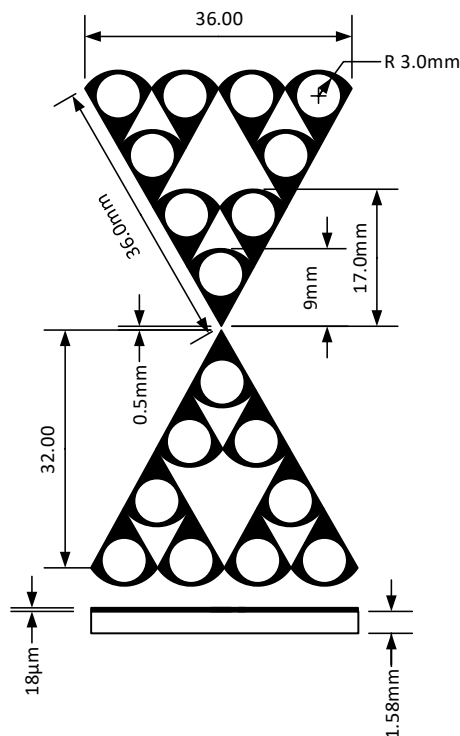
U ovom radu je predložena upotreba modifikovanog Sierpinski trougla za projektovanje štampane dipol antene.

Ideja za ovu modifikaciju proističe iz [9] u kojem se koristi niz od dvije peč fraktalne antene zasnovane na modifikaciji Sierpinskog trougla. Predložena modifikacija Sierpinski trougla prikazana je na Sl. 2.



Sl. 2. Modifikacija fraktalne geometrije Sierpinski trougla [9].

Na Sl. 3 je prikazana predložena dipol antena i njene dimenzije. Fraktal koji je korišćen kao zračeći element ima tri iteracije.



Sl. 3. Predložena monopol antena zasnovana na modifikovanom Sierpinski fraktalu.

Antena se napaja koaksijalnim kablom impedanse 50Ω . Zračeći element antene je bakarna metalizacija debljine $18\ \mu\text{m}$ na PCB ploči od vitroplasta debljine 1.58mm , relativne dielektrične konstante $\epsilon_r=4.4$.

Izgled fabrikovane antene je prikazan na Sl. 4.

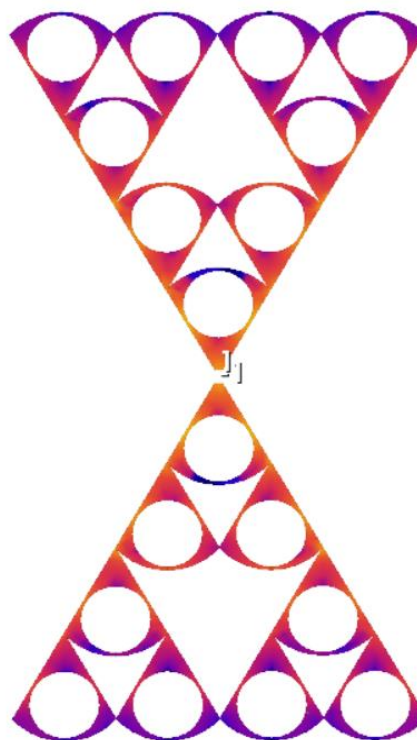


Sl. 4. Fotografija izrađene antene.

III. REZULTATI SIMULACIJA I MJERENJA

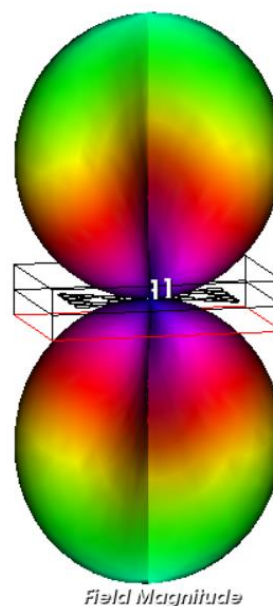
Za potrebe analiziranja parametara rasijanja S_{11} realizovan je simulacioni model u softverskom paketu AWR. Simulirana je i raspodjela struje i dijagram zračenja, dok su eksperimentalno potvrđeni samo parametri rasijanja.

Raspodjela struje po površini štampane antene određuje njen dijagram zračenja. Shodno tome, prave se različite modifikacije kako bi se usmjerio tok struje i time dobili željeni oblici dijagrama zračenja, a istovremeno smanjili nepotrebni gubici snage. Simulacioni rezultati raspodjele struje predložene antene na rezonantnoj frekvenciji $f=1.4\ \text{GHz}$ su prikazani na Sl. 5.



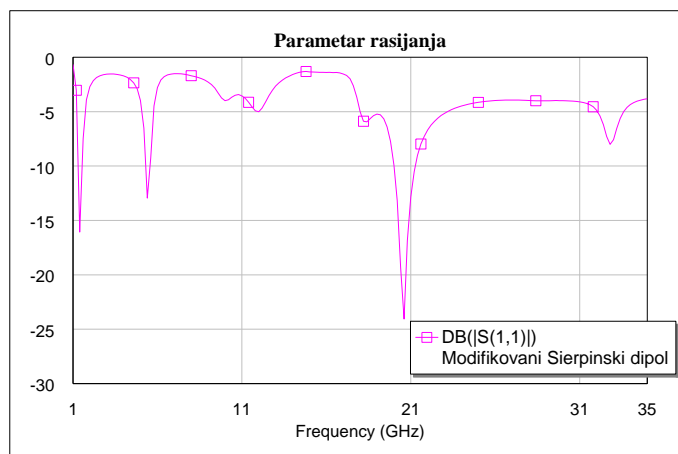
Sl. 5. Raspodjela struje po površini antene na frekvenciji $f=1.4\ \text{GHz}$.

Dijagram zračenja na rezonantnoj učestanosti $1.4\ \text{GHz}$ je prikazan na Sl. 6.



Sl. 6. Dijagram zračenja antene na rezonantnoj učestanosti $f=1.4\ \text{GHz}$.

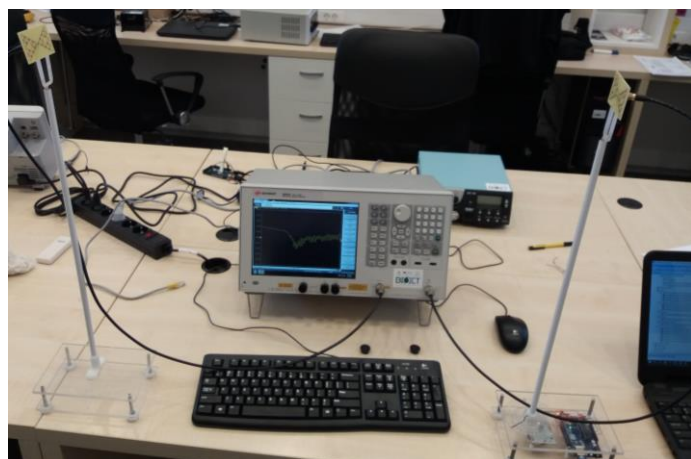
Nakon dovoljnog broja simulacija u kojima su mijenjane dimenzije osnovnog trougla kao i poluprečnik kruga, zaključeno je da najbolje rezultate daje antena sa dimenzijama stranice jednakostraničnog trougla 36mm (Sl. 3). Simulirani parametar rasijanja S_{11} za antenu date dimenzije je prikazan na Sl. 7.



Sl. 7. Parametri rasijanja u opsegu 1GHz – 35GHz.

Simulacioni rezultati pokazuju da antena ima više rezonantnih učestanosti, što potvrđuje teorijska razmatranja.

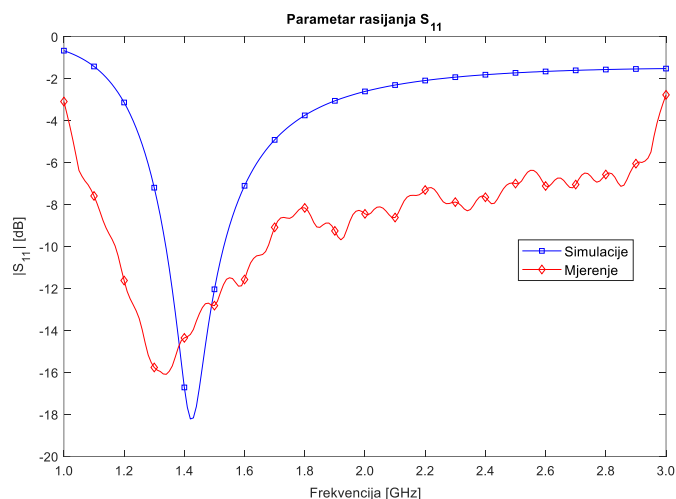
Eksperimentalna verifikacija rezultata dobijenih simulacijom izvršena je u opsegu učestanosti od 1 GHz do 3 GHz. Eksperimentalna postavka za mjerenje S_{11} parametara je prikazana na Sl. 8.



Sl. 8. Eksperimentalna postavka za mjerenje parametara rasijanja.

Mjerenje je izvršeno pomoću Network Analizatora Keysight E5061B-3L5.

Rezultati mjerenja parametara rasijanja su prikazani na Sl. 9.



Sl. 9. Usporedni rezultati mjerenja i simulacija.

Sa Sl. 9 može se vidjeti da mjereni rezultati prate trend simulacije. Rezonantna učestanost dobijena mjerenjem je blago pomjerena i po učestanosti i po nivou. Fabrikacija kvalitetne antene i mjerenje sa velikom tačnošću je prilično skupo. Međutim, na račun kvaliteta izrade antene i preciznosti mjerenja cijena se može znatno smanjiti, što će rezultirati određenim razlikama u rezultatima simulacija i mjerenja.

IV. ZAKLJUČAK

Istraživanja u oblasti fraktalne elektromagnetike dovela su do razvoja novih antena smanjenih dimenzija i poboljšanih širokopojasnih karakteristika. Razvoj modernih komunikacionih sistema uslovio je ubrzani razvoj novih geometrija antena i istraživanja u ovoj oblasti stavilo u prvi plan. Fraktalne antene su jedan od pravaca istraživanja koje omogućavaju rad na više frekvencija, širokopojasnost i smanjene dimenzije. Cilj rada je analiza performansi ove fraktalne geometrije primijenjene na dipol antene, kao i analiza uticaja dimenzije antene na raspodjelu struje i rezonantne učestanosti.

U ovom radu se predlaže štampana dipol antena zasnovana na modifikovanom Sierpinski fraktalu. Izvršene su simulacije predložene antene i eksperimentalna verifikacija parametara rasijanja. Analizirana je i raspodjela struje po površini antene. Eksperimentalna mjerenja su potvrdila simulacione rezultate i teorijska razmatranja.

LITERATURA

- [1] A. N. and K. C. Staff, "Everything You Need to Know About 5G," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, 27-Jan-2017.
- [2] W. Fan *et al.*, "A Step Toward 5G in 2020: Low-cost OTA performance evaluation of massive MIMO base stations.," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 1, pp. 38–47, Feb. 2017.
- [3] P. Maraghechi and A. Y. Elezzabi, "Fractal Structures for THz Radiation Emitters," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 8400310–8400310, Jan. 2013.
- [4] M. Waqas, Z. Ahmed, and M. B. Ihsan, "Multiband Sierpinski fractal antenna," 2009, pp. 1–6.

- [5] S. Singhal and A. K. Singh, "CPW-fed hexagonal Sierpinski super wideband fractal antenna," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 10, no. 15, pp. 1701–1707, Dec. 2016.
- [6] M. Wei, S. Gong, H. Liu, and Y. Liu, "Dual-broadband dielectric resonator antenna based on modified Sierpinski fractal geometry," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 11, pp. 806–808, May 2015.
- [7] M. M. A. Kumar, A. Patnaik, and C. G. Christodoulou, "Design and Testing of a Multifrequency Antenna With a Reconfigurable Feed," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 730–733, 2014.
- [8] Y. K. Choukiker and S. K. Behera, "Modified Sierpinski square fractal antenna covering ultra-wide band application with band notch characteristics," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 8, no. 7, pp. 506–512, May 2014.
- [9] Y. K. Choukiker, S. K. Behera, and S. K. Sharma, "Two and four-element wideband Sectoral fractal array antennas with omni-directional radiation patterns," in *Applied electromagnetics conference (AEMC), 2013 IEEE*, 2013, pp. 1–2.
- [10] C. Puente-Baliarda, J. Romeu, R. Pous, and A. Cardama, "On the behavior of the Sierpinski multiband fractal antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, no. 4, pp. 517–524, Apr. 1998.
- [11] J. Romeu and J. Soler, "Generalized Sierpinski fractal multiband antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 8, pp. 1237–1239, Aug. 2001.
- [12] D. E. Anagnostou *et al.*, "Design, Fabrication, and Measurements of an RF-MEMS-Based Self-Similar Reconfigurable Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 422–432, Feb. 2006.
- [13] A. Patnaik, D. Anagnostou, C. G. Christodoulou, and J. C. Lyke, "Neurocomputational analysis of a multiband reconfigurable planar antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 11, pp. 3453–3458, Nov. 2005.

ABSTRACT

A printed dipole antenna based on a modification of the Sierpinski triangle fractal, is presented in this paper. Using fractal geometry for antenna design allows design of electrically small antenna with multiple resonant frequency. The goal of using this fractal geometry is to adjust resonant frequencies by changing the current flow across the surface of the antenna. Scattering parameters, current distribution and the radiation pattern, are analyzed in simulations. Results of scattering parameters simulations are confirmed by the experimental measurements

It has been shown that with the use of this fractal geometry, small antennas, that radiate the same radiation diagrams at different frequencies while preserving desired characteristics, can be designed.

Printed dipole antenna based on modification of the Sierpinski fractal

Luka Lazović, Vesna Rubežić i Ana Jovanović