

## PRIMENA CILINDRIČNE TLM MREŽE ZA MODELOVANJE KRUŽNIH PATCH ANTENA SA USKIM SLOTOVIMA

Jugoslav Joković<sup>1</sup>, Tijana Dimitrijević<sup>1</sup>, Nebojša Dončov<sup>1</sup>, Bratislav Milovanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektronski fakultet Univerziteta u Nišu, jugoslav.jokovic@elfak.ni.ac.rs,

<sup>2</sup>Univerzitet Singidunum Beograd

**Sadržaj:** *U radu su prezentovane mogućnosti i prednosti primene cilindrične TLM mreže za modelovanje i analizu koaksijalno pobuđenih mikrostrip antena sa uskim radijalnim ili ugaonim slotovima u okviru zračeće površi. Na osnovu analize karakteristika mreža i rezolucija upotrebljenih za modelovanje različitih konfiguracija kružnih mikrostrip antena pokazano je da je cilindrični TLM solver značajno efikasniji od pravougaonog, da ima zadovoljavajuću tačnost, ali i da ima šire mogućnosti modelovanja, te je njime moguće prevazići neka ograničenja pravougaonog solvera.*

**Ključne reči:** *TLM metod, cilindrična mreža, kružna mikrostrip antena*

### 1. Uvod

Zbog rapidnog razvoja bežičnih komunikacionih sistema postavljaju se visoki standardi prilikom projektovanja uređaja za različite servise koji zahtevaju upotrebu minijaturnih antena, sa mogućnošću rada u većem broju opsega i sa željenim karakteristikama zračenja. Shodno tome, neizbežna je praktična primena najrazvijenijih, najefikasnijih i najtačnijih metodologija dizajna za nisko-profilne i kompaktne antene, što podrazumeva poboljšanje postojećih numeričkih tehnika, kao i stvaranje hibridnih ili nekih novih tehnika u kombinaciji sa razvojem komercijalnih ili nekomercijalnih solvera [1-3]. Imajući u vidu da su aproksimativne tehnike, kao što su *cavity model* ili *transmission line modelling*, primenljive samo kod mikrostrip antena jednostavne geometrije [1, 2], dobra polazna tačka u projektovanju antena jeste primena *fullwave* metoda koji omogućavaju modelovanje struktura složenije geometrije, uzimajući u obzir i nehomogenost materijala, žičane elemente i granične uslove [3-5]. Uprkos njihovoj fleksibilnosti i efikasnosti, numerički metodi suočavaju se sa mnogim problemima i ograničenjima kada se radi o modelovanju struktura koje sadrže krivolinijske površine. Zbog toga u dizajnu mikrostrip antena posebno treba voditi računa o usklađenosti mreže sa modelovanom strukturom, pošto se time utiče na proces modelovanja sa dva aspekta: jedan je zahtev da se precizno opisuju krivolinijske granice i površine materijala, a drugi je korišćenje raspoloživih računarskih resursa na najefikasniji način, kako u smislu trajanja simulacije, tako i sa stanovišta uštede memorijskih resursa.

*Transmission-Line Matrix* (TLM) metod je utemeljen numerički metod koji

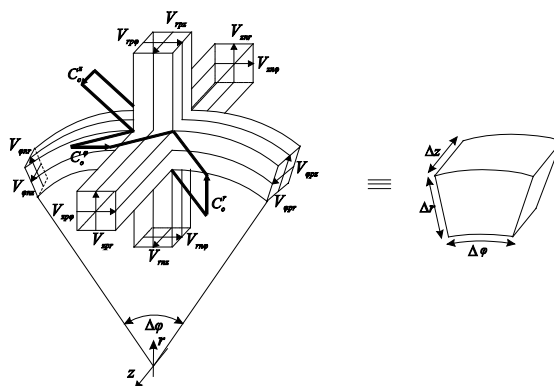
omogućava modelovanje i analizu složenih mikotalasnih struktura, među kojima su i mikrostrip antene [3]. Kako je karakteristika zračenja mikrostrip antene određena geometrijom zračne površi uporedo sa načinom pobude i karakteristikama supstrata, od posebne važnosti je opisati model na relevantan način, uključujući metalne slojeve, pobudu i supstrat, a uz sve to primeniti adekvatnu mrežu.

Inicijalno je TLM metod razvijen u pravougaonom koordinatnom sistemu sa osnovnom ćelijom u obliku kocke, odnosno kvadra [3]. Iako je potvrđeno da je ovakav metod efikasan u različitim slučajevima modelovanja realnih parametara, kao što su svojstva materijala, granični uslovi i ekscitacija, postoje, međutim, slučajevi gde korišćenje stepenaste aproksimacije za opis krivolinijskih površina dovodi do povećanja trajanja simulacije, potrebe za većom memorijom i ponekad do numeričkih grešaka [6]. Nedavno razvijen UTLM (*Unstructured TLM*), koji se temelji na nestrukturiranim mrežama (pr. trougaona, tetraedalna) omogućava bolju usklađenost mreže sa modelom, ali može biti zahtevniji u pogledu proračuna i računarskih resursa [7, 8]. Takođe, pri primeni ovih mreža, možemo se suočiti sa poteškoćama kao kod pravougaonih mreža koje se tiču modelovanja žičanih elemenata. Upravo zbog ovih razloga, određene strukture je najpogodnije i najefikasnije modelovati u odgovarajućem koordinatnom sistemu. Na primer, za opis struktura cilindrične/kružne geometrije, kao što je kružna mikrostrip antena, najefikasnije je koristiti ortogonalnu polarnu mrežu [9]. Realizacija solvera baziranog na TLM metodu u cilindričnom koordinatnom sistemu sa ugrađenim žičanim modelom (*3DTLM<sub>cyl\_cw</sub>*) opisan je u [10]. Iako su njegove mogućnosti ograničene na strukture koje sadrže cilindrične/kružne površine, upravo u ovim slučajevima rezultati se mogu postići na najefikasniji način. Ova prednost je naročito naglašena u konkretnim slučajevima gde treba opisati uske slotove, zbog savršenog prilagođavanja mreže prema razmatranoj strukturi.

Cilj ovog rada jeste prezentovanje prednosti cilindrične TLM mreže u odnosu na pravougaonu kada je u pitanju modelovanje mikrostrip antena cilindrične/kružne geometrije koje u okviru svoje zračne površi (*patch-a*) poseduju uske proreze u obliku prstena ili ugaonog isečka, koji se koriste za poboljšanje performansi antena u smislu proširenja frekvencijskog opsega ili rada u tzv. *dual band* režimu. Nasuprot cilindričnoj mreži, kojom se pomenute strukture mogu opisati direktno i precizno, stepeničaste aproksimacije moraju se primeniti u pravougaonoj mreži što dovodi do nepreciznosti i ograničenja u modelovanju. Na primerima nekoliko različitih konfiguracija antena kružne geometrije sa uskim radijalnim i ugaonim slotovima, biće pokazano da je solver koji se bazira na korišćenju cilindrične mreže precizniji i znatno efikasniji od pravougaonog solvera, pošto zahteva korišćenje znatno manjeg broja čvorova za modelovanje datih struktura.

## 2. TLM metod u cilindričnom koordinatnom sistemu

Za modelovanje cilindričnih struktura može se koristiti ortogonalna polarna mreža, koja se temelji na  $(\varphi, r, z)$  koordinatnom sistemu. Osnovna ćelija TLM mreže u cilindričnom solveru je hibridni simetrični kondenzovani čvor čija je struktura u cilindričnim koordinatama zajedno sa oznakama portova prikazana na Slici 1. Prikazana struktura sadrži 6 međusobno ukrštenih link linija, koje odgovaraju komponentama EM polja, ali se na svaki čvor dodaju 3 kratkospojena staba u cilju efikasnije simulacije.



Slika 1. Hibridni simetrični kondenzovani čvor u cilindričnom koordinatnom sistemu

Osnovni TLM algoritam se sastoji iz četiri koraka. Nakon definisanja problema i početnih uslova, na osnovu incidentnih naponskih impulsa i prethodno izračunatih impedansi i admitansi vodova i stabova vrši se proračun ekvivalentnih napona i struja za svaki čvor. Koristeći relevantne analogije, u ovom koraku je moguće odrediti željenu komponentu EM polja. Zatim slede procedura rasejanja i procedura povezivanja, koje predstavljaju srž TLM algoritma. U okviru procedure rasejanja, proračunavaju se reflektovani naponski impulsi na osnovu incidentnih naponskih impulsa, dok se u proceduri povezivanja određuju novi incidentni naponski impulsi koji predstavljaju reflektovane naponske impulse u prethodnom vremenskom trenutku [3]. Za potrebe modelovanja interakcije EM polja sa prisutnim dielektrikom ili žičanim elementima, kao i za potrebe definisanja graničnih uslova, osnovni algoritam je dopunjen mogućnostima modelovanja nehomogenog medijuma, žičanih struktura i graničnih površi. U cilju modelovanja žičanih struktura, TLM žičani model, kojim se modeluje prostiranje signala duž žice i interakcija sa EM poljem, prilagođen je cilindričnom koordinatnom sistemu i implementiran u odgovarajući kod [10].

Za adekvatnu realizaciju modela kružne mikrostrip antene primenom TLM metoda neophodno je uzeti u obzir da antena predstavlja tzv. otvoreni problem, zbog čega modelovani prostor oko antene treba proširiti za najmanje 30% od najveće dimenzije antene. Pri tome se spoljašnje granice modela predstavljaju apsorbujućim graničnim površima definisanim odgovarajućim koeficijentom refleksije. Uzemljena metalna podloga i kružna zračeća površ, ukoliko se mogu smatrati savršeno provodnim, modeluju se unutrašnjim graničnim površima, koje predstavljaju električni zid.

Imajući u vidu da se mikrostrip antena pobuđuje preko unutrašnjeg provodnika koaksijalnog kabla, koji povezuje uzemljenu metalnu podlogu i zračeću površ, za modelovanje žičanog elementa se primenjuje kompaktni žičani model. Odgovarajući portovi krajnjih čvorova žice, koji se završavaju na metalnim površima, opisuju se preko koeficijenta refleksije  $-1$ , dok je žičani provodnik, preko tzv. žičanog porta, povezan sa naponskim generatorom  $V_g = 1V$  unutrašnje otpornosti  $R_g = 50\Omega$ .

Nakon definisanja modela antene, potrebno je odabrati odgovarajuću rezoluciju TLM mreže čvorova u koordinatnim pravcima primenjenog koordinatnog sistema, tako da se omogući očuvanje vremenskog sinhronizma u procesu rasejanja. To znači da

dimenzija TLM ćelija, kojima se modeluje supstrat, treba da bude  $\sqrt{\epsilon_r}$  puta manja od TLM ćelija primenjenih na modelovanje dela ispunjenog vazduhom. Izbor adekvatne rezolucije mreže posebno je delikatan kada se model antene predstavlja pravougaonom TLM mrežom. Naime, za razliku od cilindrične TLM mreže, koja omogućava precizno modelovanje kružnih površi nezavisno od primenjene rezolucije, kod pravougaone mreže treba posebno voditi računa o takvim površima, imajući u vidu da je za njihovo modelovanje potrebno koristiti aproksimaciju. Iz tog razloga, neophodno je primeniti odgovarajuću rezoluciju mreže kojom bi se smanjila numerička greška uzrokovana aproksimativnim modelovanjem kružnih površi i obezbedilo dobijanje pouzdanih rezultata.

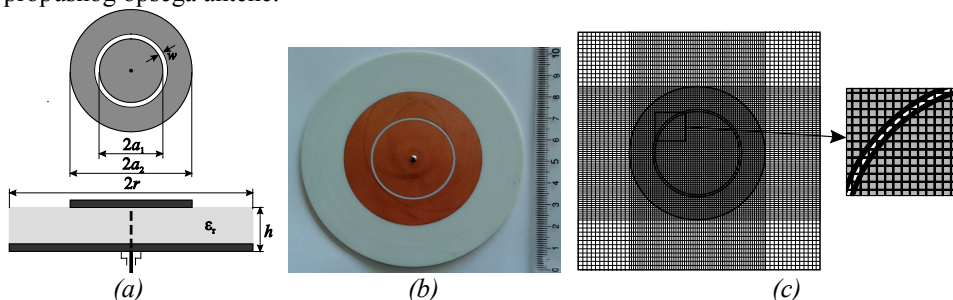
### 3. Rezultati i analiza rezultata

Prednosti primene cilindrične TLM mreže za realizaciju modela mikrostrip *patch* antene kružnog oblika, koja u okviru svoje zračeće površi sadrži uske slotove duž radialnog ili ugaonog pravca, biće prezentovane na nekoliko različitih primera antena.

#### A) *Patch-Ring* antena

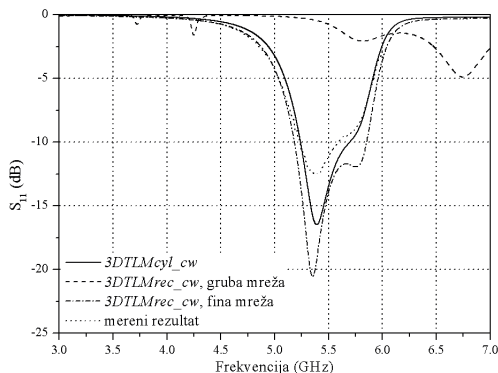
Kružna antena sa prstenastim slotom u okviru zračeće površi (*patch-ring* antena) realizovana je dodavanjem parazitnog prstena oko kružne zračeće površi poluprečnika  $a_1 = 18$  mm, sa ciljem da se postigne veći propusni opseg u odnosu na klasičnu kružnu antenu istog poluprečnika. Simulacijom klasične antene primenom cilindrične TLM mreže, odnosno *3DTLMcyl\_cw* solverom, utvrđeno je da klasična kružna antena ima propusni opseg koji iznosi 107 MHz (na osnovu  $S_{11} < -10$  dB), od 5.155 GHz do 5.262 GHz (odnosno, 2.05 %) [11].

Dimenzije kružne antene sa slotom u obliku otvorenog prstena u okviru zračeće površi, prikazane na Slici 2, su:  $a_1 = 18$  mm and  $r = 50$  mm,  $w = 1$  mm i  $a_2 = 31$  mm. Antena je realizovana na supstratu Ro4003 sledećih karakteristika: relativna permitivnost  $\epsilon_r = 3.38$ , tangens ugla gubitaka  $\tan \delta = 0.0022$  i visina  $h = 1.524$  mm, dok je za pobudu korišćena koaksijalna pobuda postavljena tako da povezuje centar zračeće površi antene i uzemljenu metalizaciju. Ovakva konfiguracija doprinosi pobuđivanju dva bliska rezonantna moda, koji odgovaraju  $TM_{02}$  modu, i samim tim se postiže povećanje propusnog opsega antene.



Slika 2. *Patch-ring* antena: (a) geometrija antene, (b) eksperimentalni model, (c) primenjena pravougaona mreža u  $x$ - $y$  ravni

U konkretnom slučaju, ostvaren je četiri puta veći propusni opseg u odnosu na klasičnu kružnu antenu koji iznosi 455 MHz (od 5.24 GHz do 5.695 GHz), odnosno 8.3 %. Fabrički realizovana antena ima propusni opseg 400 MHz, od 5.2 GHz do 5.6 GHz (7.14 %).



Slika 3. Numerički i mereni rezultati koeficijenta refleksije patch-ring antene

U cilju dobijanja i poređenja simuliranih rezultata sa stanovišta efikasnosti primene TLM mreže, napravljeni su odgovarajući modeli u solverima *3DTLMcyl\_cw* i *3DTLMrec\_cw*, bazirani na cilindričnoj i pravougaonoj TLM mreži, respektivno. Odgovarajući rezultati simulacije upoređeni su sa merenim rezultatima na Slici 3. Tabela 1. prikazuje rezoluciju mreže sa konkretnim dimenzijama ćelija, kao i ukupan broj TLM ćelija korišćen za modelovanje date strukture.

Tabela 1. Poređenje broja čvorova u pravougaonoj i cilindričnoj mreži primenjenoj za modelovanje patch-ring antene

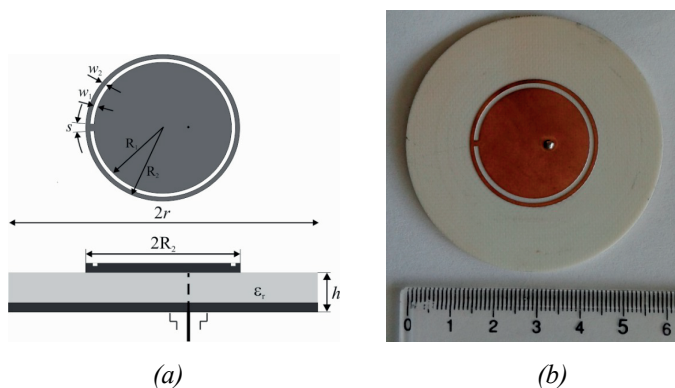
Solver	Veličina ćvorova	Rezolucija mreže	Broj ćvorova
<b>3DTLMcyl_cw</b>	$\Delta\varphi = 10^\circ$ $\Delta r_{diel} = 1.0\text{mm}, \Delta r_{air} = 1.818\text{mm}$ $\Delta z_{diel} = 0.762\text{mm}, \Delta z_{air} = 1.379\text{mm}$	$36 \times 72 \times 60$	155.520
<b>3DTLMrec_cw (gruba mreža)</b>	$\Delta x_{diel} = \Delta y_{diel} = 1.0\text{mm},$ $\Delta x_{air} = \Delta y_{air} = 1.818\text{mm}$ $\Delta z_{diel} = 0.762\text{mm}, \Delta z_{air} = 1.379\text{mm}$	$144 \times 144 \times 60$	1.244.160
<b>3DTLMrec_cw (fina mreža)</b>	$\Delta x_{diel} = \Delta y_{diel} = 0.5\text{mm},$ $\Delta x_{air} = \Delta y_{air} = 0.909\text{mm}$ $\Delta z_{diel} = 0.381\text{mm}, \Delta z_{air} = 0.686\text{mm}$	$288 \times 288 \times 120$	9.953.280

Kada je u pitanju pravougaona mreža, sa prvobitno primenjenom rezolucijom (isprekidana linija na Slici 3), koja inače daje dobre rezultate za modelovanje klasične kružne antene, dobijen je rezultat koji znatno odstupa od merenog rezultata, kao i od rezultata postignutog primenom cilindrične mreže u kojoj je korišćena slična dimenzija ćelija. To je posledica neadekvatnog modelovanja uskih prstenastih slotova, koje zavisi od rezolucije pravougaone mreže, što kod primene cilindrične mreže nije slučaj. Analizom prikaza mreže na Slici 2c, zapaža se da mreža grublje rezolucije zapravo degradira izgled uskog proreza, pa samim tim i njegov fizički uticaj na koeficijent refleksije. U konkretnom slučaju, bilo je neohodno primeniti mrežu čije su ćelije duplo

manjih dimenzija u odnosu na prvobitno primenjenu mrežu. Na osnovu komparativne analize date u Tabeli 1, može se zaključiti da je potrebno primeniti više od 50 puta veći broj TLM ćelija u pravougaonoj nego u cilindričnoj mreži.

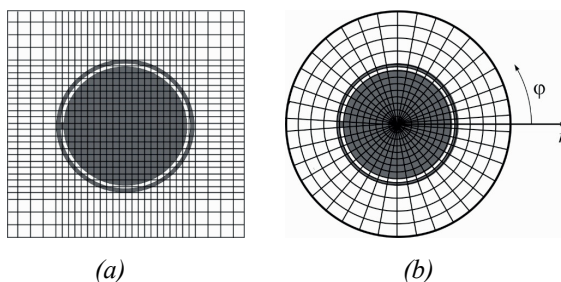
### B) *Open-ring-slot antenna*

Geometrija i eksperimentalni model antene (*open-ring-slot antenna*) sa mogućnošću rada u dva frekventijska opsega prikazani su na Slici 4. Antena je realizovana na supstratu Rogers 4003 relativne permitivnosti  $\epsilon_r = 3.38$  i visine  $h = 1.524$  mm. Mogućnost rada na dve frekvencije postignuta je generisanjem uskog proreza ( $w_1 = 1$  mm) u obliku prstena sa otvorom pod uglom od  $s = 6^\circ$  u okviru kružne zračee površi poluprečnika  $R_2 = 15$  mm. Rastojanje proreza od ivice zračee površi iznosi  $w_2 = 1$  mm. Sa  $R_1$  i  $R_2$  označeni su poluprečnici kružnih površi koje doprinose pobuđivanju dveju rezonantnih frekvencija, pri čemu obe odgovaraju  $TM_{11}$  modu.



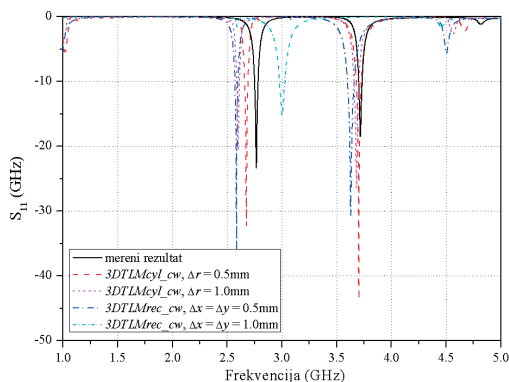
Slika 4. *Open-ring-slot antenna*: (a) geometrija antene, (b) eksperimentalni model

Prilikom modelovanja klasične kružne antene poluprečnika 15 mm i koaksijalnom pobudom na rastojanju  $\rho = 3.5$  mm od centra, zadovoljavajući rezultati su dobijeni korišćenjem TLM ćelija dimenzija 1 mm duž  $x$ - i  $y$ -osa u pravougaonom, kao i duž  $r$ -ose u cilindričnom sistemu. Međutim, u slučaju razmatrane antene, pravougaona mreža sa ovakvom rezolucijom ne daje dobre rezultate, tako da je neophodno koristiti duplo veću rezoluciju (Slika 5).



Slika 5. Mreža za modelovanje *open-ring-slot antene*: (a) pravougaona u  $x$ - $y$  ravni, (b) cilindrična u  $\phi$ - $r$  ravni

Rezultati simulacija dobijeni primenom različitih rezolucija pravougaone i cilindrične TLM mreže prikazani su na Slici 6. zajedno sa merenim rezultatima. Primećuju se dva pobuđena moda na frekvencijama 2.77 GHz i 3.72 GHz. Tabela 2. daje sumirani prikaz dimenzija ćelija i broja ćelija u cilindričnom i pravougonom solveru, odakle se vidi da je solver koji koristi cilindričnu mrežu efikasniji, jer koristi značajno manji broj ćelija za modelovanje. Takođe, može se primetiti da se slična tačnost postiže za veličinu ćelije  $\Delta x = \Delta y = 0.5$  mm u pravougaonoj mreži i  $\Delta r = 1$  mm u cilindričnoj mreži, dok je tačnost  $<5\%$  za obe frekvencije postignuta jedino u slučaju cilindrične mreže sa ćelijom dimenzije  $\Delta r = 1$  mm. Konačno, pravougaona mreža sa dimenzijom ćelija 1.0 mm u odgovarajućim pravcima ne daje validne rezultate.



Slika 6. Numerički i mereni rezultati koeficijenta refleksije open-ring-slot antene

Tabela 2. Poređenje broja čvorova u pravougaonoj i cilindričnoj mreži primenjenoj za modelovanje open-ring-slot antene

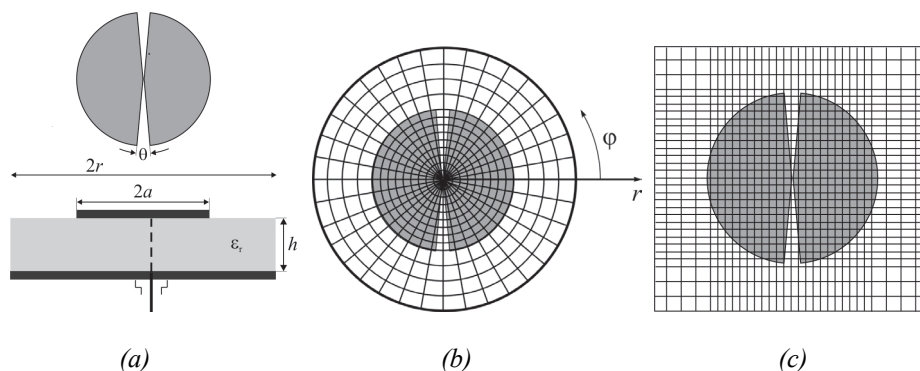
Solver	$\Delta x = \Delta y = \Delta r$ (mm)	Rezolucija mreže	Broj čvorova	Greška (%)	
				I mod	II mod
3DTLMrec_cw	1.0	86×85×69	498.525	Nevalidni rezultati	
	0.5	184×185×69	2.348.760	6.5	2.4
3DTLMcyl_cw	1.0	60×46×67	184.920	6.1	1.0
	0.5	60×92×67	369.840	3.6	0.5

### C) Patch antena sa kružnim isečcima

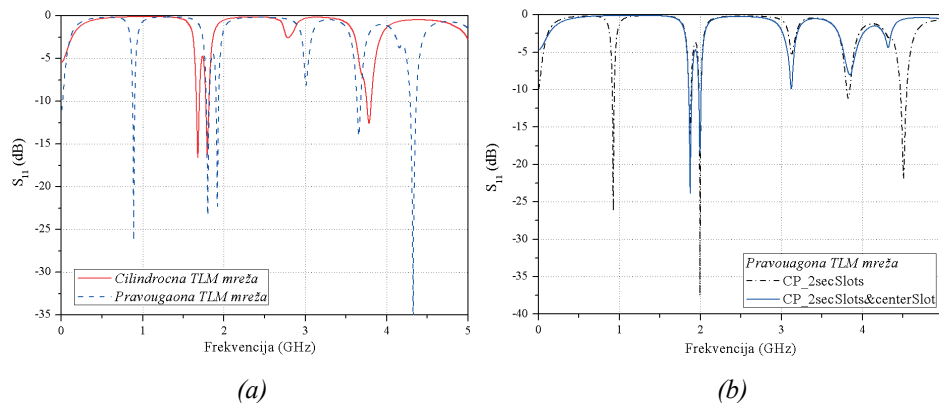
Za poboljšanje karakteristika antena kružnog oblika moguće je otkloniti delove zračeće površi u obliku kružnih isečaka, kao što je prikazano na primeru antene na Slici 7a. Data antena je realizovana na supstratu FR4 visine  $h = 1.5$  mm, poluprečnik patch-a je 23 mm, dok je poluprečnik uzemljene metalizacije 30 mm. Ugao proreza u obliku kružnog isečka iznosi  $\theta = 6^\circ$ . Antena je pobuđena koaksijalnom pobudom i dizajnirana je da radi na 1.8/1.9 GHz [12].

Primenom cilindričnog TLM solvera, korišćena je mreža rezolucije 60×90×83 čvorova, dok rezolucija primenjene pravougaone mreže iznosi 181×181×83 čvorova, što predstavlja 448.200 nasuprot 2.719.163 čvorova. Imajući u vidu da su dimenzije ćelija

duž odgovarajućih pravaca u obema mrežama ( $x, y, r$ ) iste i iznose 0.5 mm, zaključuje se da cilindrična mreža koristi 6 puta veći broj čvorova nego pravougaona. Detaljan prikaz mreža primenjenih na datu strukturu ilustrovan je na Slici 7b i c. Odgovarajući koeficijenti refleksije dobijeni simulacijama prikazani su na Slici 8a. Zapažaju se dva bliska rezonantna moda oko 1.9 GHz, što se i očekuje kao rezultat prisustva dva ugaona preseza, ali se takođe zapažaju dva dodatna moda na frekvencijama 0.89 GHz i 4.3 GHz u rezultatu dobijenom primenom pravougaonog solvera. Postojanje ovih parazitnih modova u rezultatima simulacija posledica je primene neadekvatne pravougaone mreže. Da bismo to dokazali, izvršena je dodatna simulacija antene, ali je dodat mali prerez u samom centru antene kako bi se zračice površi fizički odvojile. Slika 8b. prikazuje dobijen rezultat uporedo sa prethodnim rezultatom, odakle se vidi da parazitnih modova nema i da koeficijent refleksije odgovara koeficijentu refleksije koji je dobijen cilindričnim solverom.



Slika 7. Kružna patch antena sa kružnim isečcima: (a) geometrija antene, (b) cilindrična mreža u  $\varphi$ - $r$  ravni, (c) pravougaona mreža u  $x$ - $y$  ravni



Slika 8. Numerički koeficijent refleksije kružne patch antene sa kružnim isečcima: (a) poređenje rezultata cilindričnog i pravougaonog solvera, (b) poređenje rezultata pravougaonog solvera sa i bez modifikacije fizičkog izgleda antene



#### 4. Zaključak

Prilikom projektovanja antena, jedan od osnovnih zadataka koji se nameće jeste poboljšanje njenih performansi u smislu veće efikasnosti, šireg frekventijskog opsega ili rada u više opsega. Pri tome je značajno odabrati *fullwave* metod koji daje rezultate zadovoljavajuće preciznosti uz uštedu računarskih resursa, kao i uloženog vremena. U tom kontekstu, odabir adekvatne rezolucije mreže za opis zadate strukture u odgovarajućem koordinatnom sistemu je od izuzetne važnosti.

U ovom radu su istaknute prednosti i razmatrane mogućnosti TLM metoda u cilindričnom koordinatnom sistemu za modelovanje kružnih mikrostrip antena sa koaksijalnom pobudom, koje podrazumevaju prisustvo uskih proreza u obliku prstena ili ugaonog isečka na zračećoj površi. Na nekoliko različitih konfiguracija antena pokazano je da je cilindrični TLM solver značajno efikasniji od pravougaonog solvera, jer zahteva primenu znatno manjeg broja TLM ćelija za opis razmatranih struktura. Takođe je pokazano da primenjen metod pruža zadovoljavajuću tačnost, imajući u vidu da se dobijeni rezultati odlično slažu sa merenim rezultatima.

#### Literatura

- [1]. C.A.Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, John Wiley & Sons, New York, 2012.
- [2]. R.Garg, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, 2001.
- [3]. C.Christopoulos, *The transmission-line modelling method: TLM*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [4]. A.Z.Elsherbeni, V.Demir, *The Finite-Difference Time-Domain Method for electromagnetics with MATLAB Simulations*, 2nd Edition (ACES Series on Computational Electromagnetics and Engineering). Edison, NJ: SciTech Publishing, an Imprint of the IET, 2015.
- [5]. J. R. Brauer, *Finite-Element Method*, Magnetic Actuators and Sensors, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [6]. T.Dimitrijevic, J.Joković, N.Doncov, "TLM modeling of an annular ring coupled to a circular patch with a shorting pin," *Proc. TELSIKS 2015*, Nis, Serbia, 200-204, Oct. 2015.
- [7]. P.Sewell, T. M.Benson, C.Christopoulos, D.W.P.Thomas, A.Vukovic, J.G.Wykes, "Transmission-line modeling (TLM) based upon unstructured tetrahedral meshes," *IEEE Trans. Microw Theory Tech.*, vol. 53, no.6, 1919-1928, June 2005.
- [8]. P.Sewell, T.M.Benson, A.Vukovic, S.Cole, "Mesh optimisation methods for unstructured transmission-line modelling," *IET Sci Meas Technol.*, vol. 7, no.1, 32-40, 2013.
- [9]. H.Meliani, D.De Cogan, P.B.Johns, "The use of orthogonal curvilinear meshes in TLM models," *Int J Numer Model Electron Netw Devices Fields*, vol.1, no.4, 221-238, Dec. 1988.
- [10]. T.Dimitrijević, J.Joković, B.Milovanović Doncov N., "TLM modeling of a probe-coupled cylindrical cavity based on compact wire model in the cylindrical mesh," *Int JRF Microw Comput-Aided Eng.*, vol.22, no.2, 184-192, Mar. 2012.

- [11]. T. Z. Dimitrijević, J. J. Joković, N. S. Dončov, "Efficient Modeling of a Circular Patch-Ring Antenna Using the Cylindrical TLM Approach," *IEEE Antenn Wirel Pr.*, vol. 16, pp. 2070-2073, Apr. 2017.
- [12]. T. Dimitrijević, J. Joković, N. Dončov, "Advantages of Cylindrical TLM Meshing for Circular Patch Antenna with Sectoral Slots," 2018 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina (Republic of Srpska), November 1-3, 2018.

**Zahvalnica:** Istraživanja prikazana u ovom radu podržana su od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja u okviru projekata III43012 i III44009.

**Abstract:** *This paper presents possibilities and advantages of the cylindrical TLM mesh applied on modeling and analysis of coax-fed circular patch antennas containing radial or angular narrow slots. Based on analysis of network characteristics and resolutions used for modeling different configurations of circular microstrip antennas, it has been shown that the cylindrical TLM solver is significantly more efficient than rectangular, has a satisfactory accuracy, but also has wider modeling possibilities, hence it is possible to overcome some limitations of the rectangular solver.*

**Keywords:** *TLM method, cylindrical mesh, circular microstrip antenna*

## **CYLINDRICAL TLM MESHING OF CIRCULAR PATCH ANTENNA CONTAINING NARROW SLOTS**

Jugoslav Joković<sup>1</sup>, Tijana Dimitrijević<sup>1</sup>, Nebojša Dončov<sup>1</sup>, Bratislav Milovanović<sup>2</sup>