

TLM kompaktni model žičanog spoja u cilindričnom koordinatnom sistemu

Tijana Dimitrijević, član ETRAN i Member IEEE, Aleksandar Atanasković, član ETRAN i Member IEEE, Jugoslav Joković, član ETRAN i Member IEEE, i Nebojša Dončov, član ETRAN i Senior Member IEEE

Apstrakt—Ovaj rad prikazuje razvoj kompaktnog modela žičanog spoja implementiranog u TLM solver u cilindričnom koordinatnom sistemu. Njegova primenljivost je ispitana na primeru rezonatora kružnog poprečnog preseka sa ugrađenom monopol antenom i antenom u obliku petlje za čiju realizaciju je korišćen model žičanog spoja. Postignuto je odlično slaganje između simuliranih S parametara dobijenih 3DTLMcyl solverom koji koristi cilindričnu mrežu i GGI-TLM solverom koji koristi pravougaonu mrežu TLM celija.

Ključne reči—TLM metod; žičani model; rezonator; antena u obliku petlje.

I. UVOD

KAKO se komunikacione i zdravstvene tehnologije ubrzano razvijaju poslednjih decenija, postoji velika potreba za pouzdanim alatima koji bi omogućili brzo i precizno predviđanje elektromagnetnog polja. Pored toga, procedure fabrikacije i eksperimentalna merenja ne samo da troše vreme i novac, nego mogu zahtevati i specifične uslove koje je teško postići, ali i održati konstantnim. Stoga se alat za simulaciju pojavljuje kao koristan instrument za ubrzavanje procesa istraživanja i smanjenje troškova, uz istovremeno pružanje zadovoljavajućih i pouzdanih rezultata.

Postoje brojne dostupne platforme za simulaciju elektromagnetnog fenomena koje su zasnovane na različitim numeričkim tehnikama. Među njima, numeričke metode u vremenskom domenu su najviše rasprostranjene, s obzirom da omogućavaju kompletan analizu elektromagnetskih problema, uključujući elektromagnetnu kompatibilnost (EMC), antene i dizajn mikrotalasnih struktura. Takvi metodi su, na primer, metod *Finite-Difference Time-Domain* [1] i metod *Transmission Line Modelling* (TLM) [2]. Izazov sa kojim su ove metode morale da se suoče vezan je za modelovanje žičanih struktura, pošto nije lako opisati tanke žičane elemente unutar velikog modelovanog prostora i precizno proračunati spregu između žičanih segmenata i elektromagnetnog polja.

Modelovanje tankih žičanih elemenata u TLM metodu omogućeno je razvojem 3-D kompaktnog žičanog modela

predloženog u [3], koji je zasnovan na posebnoj žičanoj mreži ugrađenoj u običnu mrežu TLM čvorova.

TLM metod se konvencionalno primenjuje na strukturiranu, pravougaonu mrežu sa čelijama u obliku kocke ili kvadra [2]. Međutim, zakriviljene površi zahtevaju da se, u procesu modelovanja, koriste aproksimacije u obliku stepenica koje mogu dovesti do neizbežne diskretizacione greške. Ova greška se može smanjiti korišćenjem mreže visoke rezolucije, mada se time, s druge strane smanjuje efikasnost i zahteva korišćenje većih memorijskih resursa i duže vreme trajanja simulacije. Stoga, kada je potrebno predstaviti zakriviljene granične površi efikasnije je koristiti nestrukturirane mreže kao što je mreža koja se temelji na primeni tetraedralnog čvora [4]. Međutim, u specifičnim problemima koji se sastoje samo od kružnih/cilindričnih geometrijskih površi, pogodnije je, ali i efikasnije koristiti ortogonalnu polarnu mrežu, odnosno cilindričnu mrežu [5]. U ovom slučaju, greška u diskretizaciji se redukuje, s obzirom da je takva mreža savršeno u skladu sa geometrijom modelovane strukture. Mogućnosti primene 3DTLMcyl solvera su se značajno povećale nakon implementacije adaptiranog kompaktnog modela žice u *in-house* TLM algoritam u cilindričnoj mreži [5]. To je omogućilo modelovanje rezonatora kružnog poprečnog preseka pobuđenog preko sonde postavljene duž radijalnog pravca [5,6], ali i modelovanje *patch* antena pobuđenih putem koaksijalne pobude [7-9].

U ovom radu, predstavljamo najnovije poboljšanje žičanog modela koje omogućava precizno modelovanje žičanih segmenata postavljenih duž ugaonog pravca u cilindričnoj mreži, ali i adaptaciju kompaktnog modela spajanja žičanih elemenata koji se protežu duž različitih pravaca putem tzv. TLM modela žičanog spoja. Primenljivost ovog modela je ispitana na primeru rezonatora kružnog poprečnog preseka sa ugrađenom monopol antenom i antenom u obliku petlje, koje se koriste kao pobudna i prijemna sonda. Tačnost metoda utvrđena je upoređivanjem koeficijenata refleksije i transmisije dobijenih GGI-TLM metodom koji koristi pravougaonu TLM mrežu [10].

II. ŽIČANI MODEL U TLM METODU

TLM metod je numerička tehnika u vremenskom domenu koja je primenljiva za simulaciju elektromagnetnog polja u različitim aplikacijama. Zasniva se na ekvivalentnosti između Maksvelovih jednačina i teorije transmisionih linija sa ciljem da se elektromagnetni problem prevede na ekvivalentni problem električne mreže [2]. Modelovani prostor je predstavljen mrežom transmisionih linija u cilju modelovanja 3-D elektromagnetnog polja, gde simetrični

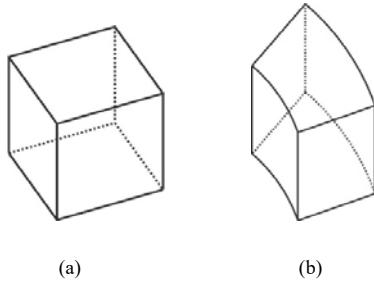
Tijana Dimitrijević – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: tijana.dimitrijevic@elfak.ni.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-9744-8287>)

Aleksandar Atanasković – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: aleksandar.atanaskovic@elfak.ni.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-9979-5995>)

Jugoslav Joković – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: jugoslav.jokovic@elfak.ni.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-4780-938X>)

Nebojša Dončov – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: nebojsa.doncov@elfak.ni.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-9057-6737>)

kondenzovani čvor (*Symmetrical Condensed Node* - SCN) predstavlja osnovnu čeliju [2] koja u strukturiranoj mreži može imati oblik kvadra ili kocke (sl.1a) u pravougaonoj mreži ili cilindričnog isečka (sl.1b) u cilindričnoj mreži. Kroz međusobno povezne čelije predstavljena su elektromagnetna svojstva medijuma, koji je generalno nehomogen.



Sl. 1. TLM čelija: (a) pravougaona, (b) cilindrična.

TLM algoritam se sastoji od dva osnovna procesa koji se iterativno ponavljaju za sve čvorove unutar modelovane oblasti. Jedan je *rasejanje*, gde se reflektujući naponi na svakom čvoru izračunavaju iz incidentnog napona, a drugi je *povezivanje* gde reflektovani impulsi postaju incidentni impulsi na susedne čvorove u sledećem vremenskom koraku. Ekvivalentne impedanse/admitanse svake čelije se izračunavaju u skladu sa definicijom geometrije problema, uključujući svojstva prostora, pri čemu se dielektrična svojstva prikazuju relativnom permitivnošću i tangensom ugla gubitaka. Kao izlaz simulacije, dobija se napon ili struja indukovana u žici koja se dalje koristi za proračun koeficijenata refleksije i transmisije.

Adaptacija i implementacija kompaktnog žičanog modela u cilindrični TLM metod [5] omogućila je modelovanje žica postavljenih duž radikaljnog pravca. Pri tome, moguće je modelovati žičane elemente prečnika dovoljno manjeg od veličine čelije. Korišćenjem posebne žičane mreže koja se sastoji od dodatnih linkova i stabova inkorporiranih unutar čelije, modeluje se propagacija signala i njegova interakcija sa elektromagnetskim poljem [3]. U cilindričnom sistemu, procedura povezivanja je morala biti adekvatno podešena u cilju opisivanja pravog žičanog segmenta koji se nalazi duž radikaljnog smera, kao što je opisano u [5-9]. U ovom radu, prikazana je dodatna adaptacija modela kako bi se omogućilo modelovanje žičanih elemenata postavljenih duž ugaonog pravca. Impedanse link linija, Z_{wk}^i , i stabova, Z_{ws}^i , koje su ugrađene u postojeću mrežu čelija za žičani segment postavljen duž odgovarajućeg pravca, računaju se na sledeći način

$$Z_{wk}^i = \frac{\Delta t}{\Delta r} \frac{1}{C_{wi}}, Z_{ws}^i = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{k_{ci}\Delta i_c}{r_w}\right) \frac{\Delta i}{\Delta t} - Z_{wi}^i \quad (1)$$

$$C_{wi} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{k_{ci}\Delta i_c}{r_w}\right)} \quad (2)$$

gde je $\Delta i = \{\Delta r, r\Delta\varphi, \Delta z\}$, r_w poluprečnik žice, k_{ci} i k_{Li} , $i = \{r, \varphi, z\}$ su faktori empirijski određeni korišćenjem poznatih karakteristika TLM mreže, a C_{wi} je kapacitivnost

link linije u i smeru. [3]. Usrednjena dimenzija poprečnog preseka čelije duž i smera, Δi_c , definiše se kao

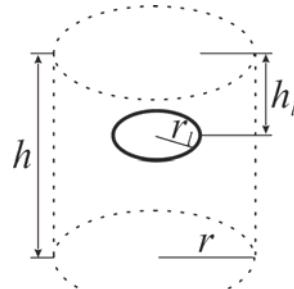
$$\Delta i_c = (\Delta k + \Delta j)/2, \quad (4)$$

gde su Δk i Δj dimenzije čelija u poprečnom preseku čelije duž i smera. Pri tome se mora uzeti u obzir da su admittante link linija i stabova različite za susedne čvorove u radikalnom pravcu [5], dok ostaju iste duž ostalih pravaca. U skadu s tim, dodatna procedura povezivanja za radikalni pravac je inkorporirana u algoritam kao što je opisano u [5].

Nakon omogućavanja modelovanja žičanih segmenta postavljenih duž bilo kog pravca, izvršena je implementacija modela žičanog spoja u cilindrični TLM solver u skladu sa procedurom opisanom u [3]. Ovaj model omogućava da šest pojedinačnih žica bude povezano. Sam model se sastoji od tri kola, po jedno za svaki pravac, pri čemu je svako povezano sa TLM čvorom preko idealnog transformatora.

III. NUMERIČKI REZULTATI

Za realizaciju modela antene u obliku petlje, koja sadrži spoj pravog žičanog segmenta duž z pravca i kružnog žičanog segmenta duž ugaonog pravca, korišćen je kompaktni model žičanog spoja implementiran u cilindrični TLM solver, 3DTLMcyl. Loop antenna je smeštena u modelovan prostor u obliku cilindra, poluprečnika osnove $r = 17$ cm visine $h = 25$ cm, uz definisanje apsorbujućih površi kao graničnih uslova proširenog modelovanog prostora [11], kao što je prikazano na sl. 2. Pri tome, simulacije su izvršene za različit poluprečnik petlje u opsegu $r_l = (2.25 \div 8.25)$ cm.

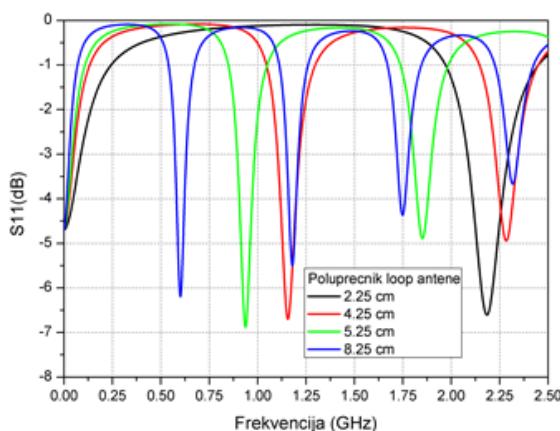


Sl. 2. Model antene u obliku petlje poluprečnika petlje r_l , u proširenom modelovanom prostoru u obliku cilindra poluprečnika osnove r i visine h .

Svi modeli su modelovani i pravougaonim TLM solverom uz korišćenje rezolucije mreže koja je duplo veća od cilindrične, kako bi se redukovale greške usled stepeničaste aproksimacije. Tako, da bi se postigla dimenzija čelije 0.5 mm u cilindričnoj mreži korišćen je broj čelija $N_\varphi \times N_r \times N_z = 36 \times 34 \times 50 = 61.200$, dok je za dimenziju čelija od 0.25 mm u pravougaonoj mreži bio potreban broj čelija $N_x \times N_y \times N_z = 134 \times 134 \times 100 = 1.795.600$, što je 30 puta više od broja čelija u cilindričnoj mreži.

Sl. 3. prikazuje koeficijent refleksije antene u obliku petlje za različite poluprečnike petlje, dobijene cilindričnom TLM mrežom, dok Tabela 1 upoređuje vrednosti rezonantne frekvencije antene u obliku petlje za različite poluprečnike petlje, dobijenih cilindričnom i pravougaonom mrežom, sa analitičkim vrednostima [12]. Analizom ovih vrednosti dolazimo do zaključka da bolje slaganje sa analitičkim

vrednostima daje cilindrična mreža, što je i za očekivati zbog skoro perfektnog modelovanja žičanog segmenta u obliku kruga, za razliku od pravougaonog modela koji koristi stepeničastu aproksimaciju, ali i zbog mogućnosti korišćenja korektnog poluprečnika petlje pravilnim izborom mreže, što je kod pravougaonog modela teško postići.



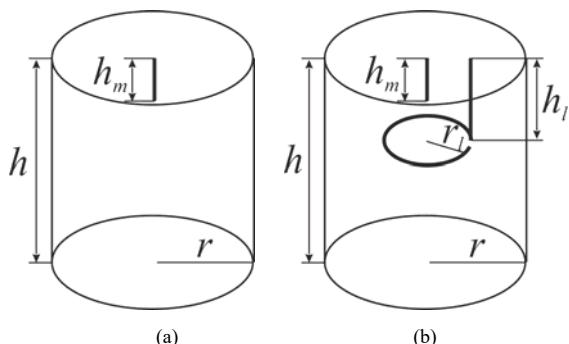
Sl. 3. Simulirani koeficijent refleksije antene u obliku petlje za različite poluprečnike petlje, dobijen cilindričnom TLM mrežom.

TABELA I

POREĐENJE REZONANTE FREKVENCije LOOP ANTENE ZA RAZLIČIT POLUPREČNIK PETLJE DOBJENE PRAVOUGAOНОM I CILINDRIЧNOM TLM MREŽOM SA ANALITIČKIM VREDNOSTIMA

Poluprečnik petlje (mm)	Rezonantna frekvencija (GHz)		
	Analička vrednost	Cilindrična TLM mreža	Pravougaona TLM mreža
2.25	2.20	2.18	2.34
4.25	1.15	1.15	1.23
5.25	0.92	0.93	0.97
8.25	0.58	0.60	0.63

Geometrija metalnog rezonatora kružnog poprečnog preseka u prisustvu monopol antene prikazana je na sl. 4a, dok sl. 4b prikazuje rezonator sa monopol antenom i antenom u obliku petlje. Dimenzije rezonatora su sledeće: visina $h = 25$ cm, poluprečnik osnove $r = 17$ cm. Monopol antena dužine $h_m = 3.25$ cm postavljena je u samom centru gornje osnove rezonatora, što je prikazano na sl. 4a. Antena u obliku petlje sastoji se od pravog žičanog segmenta dužine $h_l = 8.25$ cm i kružnog segmenta poluprečnika $r_l = 5.25$ cm, kao što je prikazano na sl. 4b.



Sl. 4. Metalni rezonator kružnog poprečnog preseka u prisustvu a) monopol antene, b) monopol antene i antene u obliku petlje.

Za realizaciju modela cilindričnog rezonatora sa ugrađenom monopol i loop antenom, zidovi rezonatora su predstavljeni savršenim metalom, a unutrašnjost rezonatora je ispunjena vazduhom. Za modelovanje monopol antene i antene u obliku petlje korišćen je kompaktni žičani model unapređen modelom žičanog spoja. Za pobudu se koristi naponski generator 1 V i unutrašnje otpornosti 50Ω koji je priključen za žičani port monopol antene.

U cilju validacije modela žičanog spoja realizovanog u cilindričnoj TLM mreži, pomenuta dva modela cilindričnog rezonatora su modelovana i simulirana korišćenjem GGI-TLM solvera koji se temelji na pravougaonoj mreži. Za poređenje rezultata simulacija, posmatrani su koeficijent refleksije i transmisije u frekvenčiskom opsegu do 3 GHz u oba slučaja.

U prvom slučaju, monopol antena se koristi i kao pobudna i kao prijemna antena, te je stoga posmatran samo S11 parametar, kao što je prikazano na sl. 5. Može se zapaziti da postoji odlično slaganje rezultata dobijenih dvema različitim mrežama.

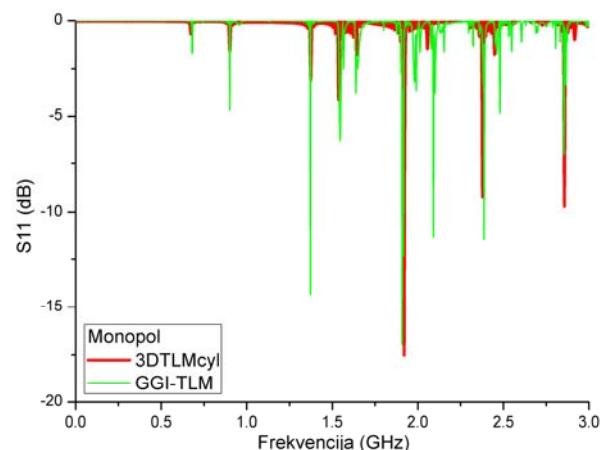


Fig.5. Poređenje koeficijenata refleksije cilindričnog rezonatora sa ugrađenom monopol antenom dobijenog simulacijama primenom 3DTLMcy i GGI-TLM solvera.

U drugom slučaju, kada su prisutne dve antene u rezonatoru, kao pobudna antena korišćena je monopol antena (port 1), dok je antena u obliku petlje korišćena kao prijemna (port 2), tako da su analizirani S11 i S21 parametri, što je prikazano na sl. 6. Ako posmatramo koeficijent refleksije primećuje se da postoje neznatna odstupanja između rezultata dobijenih cilindričnom i pravougaonom mrežom, dok koeficijent transmisije u pojedinim frekvenčiskim opsezima pokazuje značajnija odstupanja. Ova odstupanja su rezultat korišćenja stepeničaste aproksimacije prilikom modelovanja petlje u pravougaonoj mreži, imajući u vidu da raspodela elektromagnetskog polja oko žice ne može biti precizno uhvaćena, kao što je slučaj sa cilindričnom mrežom koja zbog savršenog prijanjanja modelovanoj strukturi omogućava precizno modelovanje i samim tim obezbeđuje pouzdajanje rezultata.

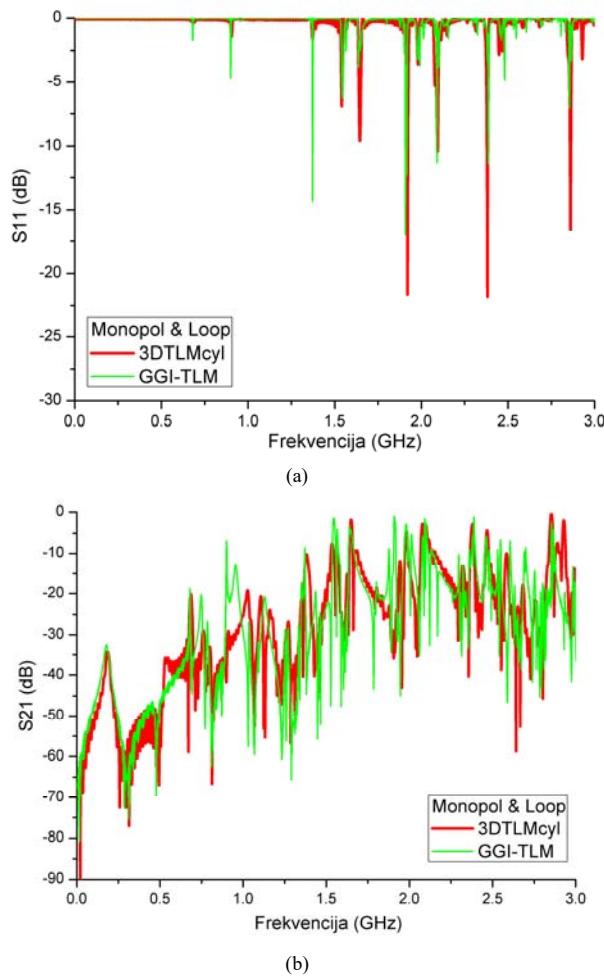


Fig.6. Poredjenje S parametara cilindričnog rezonatora sa ugrađenom monopol antenom dobijenih simulacijama primenom 3DTLMcyl i GGI-TLM solvera. a) S11, b) S21.

IV. ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja poboljšanje TLM metoda u cilindričnom koordinatnom sistemu u vidu adaptacije i implementacije kompaktnog modela žičanog spoja omogućavajući modelovanje spojenih žičanih elemenata koji su postavljeni u različitim pravcima. To je zahtevalo dodatna podešavanja kompaktnog žičanog modela da bi se omogućilo precizno opisivanje žica koje su postavljene duž ugaonog smera. Metod je validiran na primeru rezonatora kružnog poprečnog preseka sa monopol antenom i antenom u obliku petlje upoređivanjem simuliranih S parametara dobijenih primenom 3DTLMcyl solvera koji koristi cilindričnu mrežu i GGI-TLM solvera koji koristi pravougaonu mrežu.

Ovo poboljšanje će omogućiti precizno modelovanje antena u obliku petlje korišćenjem cilindrične TLM mreže, pa bi stoga ograničenja pravougaone mreže izazvana akroksimacijama modelovanja u obliku stepenica u određenim slučajevima mogla da se prevaziđu. Takođe, ovaj model će omogućiti modelovanje višestrukih kružnih kalemova koji će biti deo naših budućih istraživanja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (Grant No. 451-03-47/2023-14/ 200102), Fonda za nauku Republike Srbije (Grant No. 6394135) i Royal Society International Exchanges Grant IES\R1\201311.

LITERATURA

- [1] K.S. Kunz and R.J. Luebbers, *The finite difference time domain for electromagnetics*, CRC Press, 1993.
- [2] C. Christopoulos, *The transmission-line modelling method*, IEE/OUP Press, 1995.
- [3] V. Trenkic, A.J. Włodarczyk, and R. Scaramuzza, "Modelling of coupling between transient electromagnetic field and complex wire structures," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 12 (1999), 257-273.
- [4] P. Sewell, T. M. Benson, C. Christopoulos, D. W. P. Thomas, A. Vukovic and J. G. Wykes, "Transmission-line modeling (TLM) based upon unstructured tetrahedral meshes," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 6, pp. 1919-1928, June 2005.
- [5] T. Ž. Dimitrijević, J. J. Joković, B. D. Milovanović, N. S. Dončov, "TLM Modelling of a Probe-coupled Cylindrical Cavity based on Compact Wire Model in the Cylindrical Mesh," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, John Wiley & Sons Inc., Wiley InterScience Periodicals, Vol.22, No. 2, pp. 184-192, 2012.
- [6] J. Jokovic, T. Dimitrijevic, N. Doncov, B. Milovanovic, "Efficient Integral Cylindrical TLM Modelling of a Coaxially Loaded Probe-Coupled Cavity," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 9, No. 8, 05 June 2015, pp. 788 – 794.
- [7] T. Z. Dimitrijevic, J. J. Jokovic and N. S. Doncov, "Efficient Modeling of a Circular Patch-Ring Antenna Using the Cylindrical TLM Approach," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2070-2073, 2017.
- [8] T. Dimitrijevic, J. Jokovic, N. Doncov, "Frequency Adjustable Dual-Band Microstrip Gap-Ring-Slot Antenna Design using the Cylindrical TLM Method," *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Vol.34, No.5, May 2019, pp. 631-641, ISSN: 1054-4887.
- [9] J. Jokovic, T. Z. Dimitrijevic, N. S. Doncov, "Computational Analysis and Validation of the Cylindrical TLM Approach on IMCP Antennas," *Wireless Personal Communications*, March 2019, Print ISSN: 0929-6212, Online ISSN:1572-834X.
- [10] Open source TLM software: https://github.com/ggiemr/GGI_TLM.
- [11] V. Trenkic, "The Developments and Characterization of Advanced Nodes for TLM Method", PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 1995.
- [12] C.A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2012.

ABSTRACT

This paper presents development of the junction wire network model implemented into the TLM solver based on the cylindrical grid. A simple cylindrical cavity resonator with embedded monopole and loop antennas is used as a simulated structure. An excellent agreement between the simulated S parameters obtained by the 3DTLMcyl solver based on the cylindrical mesh and GGI-TLM solver based on the cubic mesh is achieved.

TLM Junction Wire Network Model in the Cylindrical Grid

Tijana Dimitrijević, Aleksandar Atanasković, Jugoslav Joković, Nebojša Dončov