

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14 · Поштански фах 73  
18000 Ниш · Србија  
Телефон 018 529 105 · Телефакс 018 588 399  
E-mail: [efinfo@elfak.ni.ac.rs](mailto:efinfo@elfak.ni.ac.rs); <http://www.elfak.ni.ac.rs>  
Текући рачун: 840-1721666-89; ПИБ: 100232259



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING

Aleksandra Medvedeva 14 · P.O. Box 73  
18000 Niš - Serbia  
Phone +381 18 529 105 · Fax +381 18 588 399  
E-mail: [efinfo@elfak.ni.ac.rs](mailto:efinfo@elfak.ni.ac.rs)  
<http://www.elfak.ni.ac.rs>

ДЕКАН  
03.02.2015.

О Б А В Е Ш Т Е Њ Е  
НАСТАВНИЦИМА И САРАДНИЦИМА ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Докторска дисертација кандидата  **mr Тијане Димитријевић** под насловом «Развој и примена компактног жичаног ТЛМ модела за ефикасније пројектовање и анализу микроталасних структура цилиндричне геометрије» и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације налазе се у Библиотеци Електронског факултета у Нишу и могу се погледати до **18.02.2015.** године.

Примедбе на наведени извештај достављају се декану Факултета у напред наведеном року.

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Декан  
Проф. др Драган Јанковић

## NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU ELEKTRONSKOG FAKULTETA U NIŠU

**Predmet:** Izveštaj Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Tijane Dimitrijević

Na sednici Nastavno-naučnog veća Elektronskog fakulteta u Nišu od 18.12.2014. godine, po odluci broj 07/03-035/14-004, imenovana je Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Tijane Dimitrijević, pod naslovom

### **"Razvoj i primena kompaktnog žičanog TLM modela za efikasnije projektovanje i analizu mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije"**

u sastavu:

1. dr Nebojša Dončov, redovni profesor, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
2. dr Vera Marković, redovni profesor, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
3. dr Branko Kolundžija, redovni profesor, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
4. dr Olivera Pronić-Rančić, redovni profesor, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
5. dr Nataša Maleš-Ilić, vanredni profesor, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu

Nakon pregleda navedene doktorske disertacije, Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću fakulteta sledeći

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ  
У НИШУ

Примљено	03.01.2015
Број	
07/03-008/15	

### **IZVEŠTAJ**

Doktorska disertacija kandidata mr Tijane Dimitrijević napisana je u skladu sa Odlukom o dostavljanju doktorskih disertacija repozitorijumu Univerziteta u Nišu, SNU broj 8/16-01-006/13-007 od 05.07.2013. godine. Izložena je na 199 strana i sadrži 98 slika i 7 tabela. Na početku disertacije, dat je kratak rezime na srpskom i engleskom jeziku, a zatim spisak slika i tabela. Disertacija je podeljena u 5 poglavlja: 1. Uvod; 2. Integralni cilindrični 3-D TLM metod; 3. Modelovanje i analiza rezonatora cilindrične geometrije; 4. Modelovanje i analiza mikrostrip antena kružnog oblika; 5. Zaključak. Na kraju disertacije, dat je spisak korišćene literature koji sadrži 85 bibliografskih jedinica, nakon čega sledi biografija autora.

U disertaciji je prezentovan postupak razvoja i implementacije kompaktnog žičanog modela u TLM (*Transmission Line-Matrix*) metod u cilindričnom koordinatnom sistemu za potrebe modelovanja mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije u prisustvu žičanih elemenata. Ovim pristupom, izbegнута је непrecizност прilikom aproksimativног modelovanja struktura kružног попреčног пресека применом правougлоне TLM мреже и prevaziđена су

ograničenja ove mreže, posebno izražena u prisustvu žičanih elemenata i opterećenja sa gubicima. Zahvaljujući ovom pristupu, realizovani su modeli koji zahtevaju manji broj TLM čvorova za opis struktura cilindrične geometrije u poređenju sa modelima u pravougaonim koordinatama, što doprinosi uštedi računarskih resursa i redukovanim vremenom trajanja simulacija.

Disertacija je koncipirana kroz teorijski i aplikativni deo, pri čemu su ostvareni doprinosi prisutni u svakom od ovih delova.

U uvodnom delu doktorske disertacije istaknut je značaj i aktuelnost numeričkog modelovanja u procesu rešavanja elektromagnetskih problema. Obrazložena je svrsishodnost realizacije TLM metoda u cilindričnom koordinatnom sistemu i, posebno, razvoja i implementacije kompaktnog žičanog modela. Na kraju je data organizacija disertacije.

U drugom poglavlju, koje predstavlja teorijski deo disertacije, nakon pregleda razvoja numeričkog TLM metoda, dati su osnovni principi modelovanja pomoću ovog metoda u cilindričnom koordinatnom sistemu. Izведен je osnovni sistem jednačina za određivanje parametara TLM mreže u cilindričnom koordinatnom sistemu, zasnovan na generalnom simetričnom kondenzovanom čvoru i, posebno, na hibridnom simetričnom kondenzovanom čvoru. Pored detaljnog opisa procedura rasejanja i povezivanja u cilindričnoj TLM mreži, prezentovan je postupak modifikacije procedure povezivanja za međusobno susedne čvorove duž radijalnog pravca, kao i za povezivanje prvih i poslednjih čvorova duž ugaonog pravca. Takođe, opisan je postupak modelovanja sredina sa gubicima, spoljašnjih i unutrašnjih graničnih površi okarakterisanih preko koeficijenta refleksije, kao i način definisanja pobude u TLM mreži. Značajan deo je posvećen razvoju i modifikaciji integralnog tro-dimenzionalnog TLM žičanog modela za opis žičanih struktura kod mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije, koji je, od strane kandidata, softverski implementiran u TLM metod u cilindričnom koordinatnom sistemu. Zbog strukture cilindričnog koordinatnog sistema i empirijske prirode kompaktnog modela, postupkom implementacije žičanog modela trebalo je obuhvatiti promenu parametara žičanih elemenata uslovljenu promenljivim poprečnim presekom TLM ćelija, kroz koje se prostire radijalno postavljen žičani segment. U tom cilju, realizovan je dodatni algoritam povezivanja žičanih segmenata koji pripadaju TLM čvorovima različitih parametara žičane mreže, koji je opisan u okviru ove glave. Na kraju glave, detaljno su opisane karakteristike programskog paketa, pod nazivom *3DTLMcyl\_cw*, koji se zasniva na TLM metodu u cilindričnim koordinatama sa implementiranim kompaktnim žičanim modelom. Realizacijom ovog paketa omogućeno je adekvatno modelovanje mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije, kod kojih se elektromagnetna sprega ostvaruje preko žičanih provodnika, kao i generisanje želenog tipa odziva uz definisanje odgovarajuće pobude.

U okviru drugog, aplikativnog dela disertacije, na većem broju primera su prikazani rezultati istraživanja mogućnosti, efikasnosti i tačnosti integralnog cilindričnog TLM metoda i na njemu temeljenog koda *3DTLMcyl\_cw*, koji se mogu podeliti u dve grupe. Jednoj grupi pripadaju cilindrični rezonatori, koji predstavljaju zatvorene strukture (poglavlje 3), dok drugu

grupu čine kružne mikrostrip *patch* antene kao primeri modelovanja otvorenih problema (poglavlje 4).

U trećem poglavlju disertacije, razmatrane su mogućnosti *3DTLMcyl\_cw* programa za modelovanje metalnog rezonatora kružnog poprečnog preseka ispunjenog vazduhom, kao i delimično opterećenog dielektričnim uzorkom proizvoljnih geometrijskih i elektromagnetskih parametara. U slučaju neopterećenog rezonatora, prikazane su mogućnosti TLM metoda sa stanovišta načina pobuđivanja elektromagnetnog polja u rezonatoru i istaknuta važnost uključivanja žičanih elemenata u TLM model. Prednosti korišćenog TLM pristupa razmatrane su u odnosu na konvencionalni TLM pristup u pravougaonim koordinatama, koji je generalno prisutan u komercijalnim softverima. Pokazano je da primena cilindrične TLM mreže obezbeđuje dobijanje rezultata zadovoljavajuće preciznosti korišćenjem manjeg broja čvorova kojima se realizuje numerički model, što doprinosi većoj efikasnosti, u pogledu potrebnog vremena i računarskih resursa, u odnosu na pristup u pravougaonim koordinatama. Pored toga, na osnovu istraživanja rezonatora sa priključenim žičanim elementima različitog poluprečnika utvrđeno je da integralni cilindrični TLM metod omogućava modelovanje sondi većeg poluprečnika. Još jedna prednost korišćenja prezentovanog TLM solvera istaknuta je na primeru modelovanja cilindričnog rezonatora sa žičanim sondama postavljenim u radijalnom pravcu pod uglom različitim od celobrojnog umnoška od  $90^\circ$ , gde TLM pristup u pravougaonim koordinatama nije jednostavno primeniti. U slučaju delimično opterećenog, cilindričnog rezonatora, u prisustvu dveju radijalno priključenih žičanih sondi, razmatrana su dva tipa opterećenja. Kod prvog tipa, koji predstavlja planparalelnu postavljenu slojeve dielektrika, pokazano je odlično slaganje simuliranih rezultata ostvarenih primenom cilindrične i pravougaone TLM mreže, pri čemu je manji broj čvorova zahteva primena cilindrične mreže. Drugi analizirani tip opterećenja cilindričnog rezonatora predstavlja dielektrik u vidu koaksijalno postavljenog cilindra. Pokazano je da, u ovom slučaju, TLM pristup u pravougaonim koordinatama ima ograničene mogućnosti koje su posledica primene aproksimativnog modelovanja kružnih i cilindričnih graničnih površi, ali i dodatnog povećanja rezolucije mreže u cilju adekvatnog modelovanja dielektrika. Problem modelovanja koaksijalno opterećenog cilindričnog rezonatora pravougaonom TLM mrežom posebno je izražen kada su analizom obuhvaćeni žičani elementi, a kao opterećenje se koristi dielektrik velike relativne permitivnosti. Istraživanjem je utvrđeno da pravougaonom TLM mrežom, izabranom u cilju što preciznijeg predstavljanja kružnih graničnih površi, nije moguće modelovati sonde poluprečnika uobičajenih u praksi, dok bi primena pravougaone mreže manje rezolucije rezultovala smanjivanjem maksimalne frekvencije do koje se dobijeni rezultati mogu smatrati validnim. Nasuprot tome, na primeru cilindričnog rezonatora sa spregnutim sondama i koaksijalnim opterećenjem velike permitivnosti pokazano je da se integralnim cilindričnim TLM metodom mogu prevazići pomenuta ograničenja pravougaone mreže. Analizom procedure modelovanja u cilindričnoj TLM mreži istaknuto je da vrsta opterećenja, a samim tim i rezolucija primenjena na njegovo modelovanje, nema uticaja na vrednost poluprečnika žičanih elemenata. Na svim primerima razmatranim u ovom poglavlju, uključujući neopterećen i delimično opterećen cilindrični

rezonator, izvršena je eksperimentalna verifikacija prezentovanog TLM pristupa. Zaključeno je da su numeričkim putem dobijene karakteristike refleksije i transmisije svih razmatranih struktura u odličnoj saglasnosti sa merenim karakteristikama dobijenim na osnovu eksperimentalnog modela rezonatora realizovanog u okviru Laboratorije za mikrotalasnu tehniku i bežične komunikacije Elektronskog fakulteta u Nišu. Rezultati istraživanja opisani u trećem poglavlju mogu biti od značaja pri projektovanju i primeni cilindričnih rezonatora u brojnim mikrotalasnim industrijskim aplikacijama, kao i u procesu termičke obrade materijala.

Mogućnosti *3DTLMcyl\_cw* softvera u pogledu adekvatnog i preciznog modelovanja mikrotalasnih struktura koje se realizuju u mikrostrip tehnici istražene su u okviru četvrtog poglavlja disertacije. U ovom poglavlju su najpre opisane osnovne karakteristike mikrostrip antena, kao i princip aproksimativnog *cavity model-a*, a zatim su prezentovani rezultati analize nekoliko različitih konfiguracija *patch* antene kružne geometrije. Posebno su opisani svi potrebni parametri za verodostojno predstavljanje TLM modela antene: proširenje modelovanog prostora sa apsorbujućim graničnim površima, prisustvo unutrašnjih metalizacija opisanih primenom električnog zida, kao i prisustvo dielektrika i koaksijalne pobude. Na primerima klasične kružne *patch* antene i tzv. invertovane antene sa metalnim oklopom, kojom se u praksi postižu bolje performanse antene, dati su simulirani rezultati koji predstavljaju magnitudu  $S_{11}$  parametra, KST, i ulaznu impedansu razmatranih antena u bliskoj oblasti oko rezonantne frekvencije. U cilju poređenja, korišćeni su rezultati dobijeni primenom TLM pristupa u pravougaonim koordinatama i rezultati dobijeni MATLAB kodom temeljenim na aproksimativnom *cavity model-u*. Mogućnosti *3DTLMcyl\_cw* softvera dodatno su istražene na primerima složenijih konfiguracija antena kod kojih provodna površ sadrži uzane prorene duž radijalnog ili ugaonog pravca koji se u praksi koriste u cilju postizanja šireg propusnog opsega ili rada na dve frekvencije. Pokazano je da je ovakve strukture jednostavnije modelovati cilindričnom TLM mrežom, zahvaljujući podešavanju koraka diskretizacije u radijalnom i ugaonom pravcu u skladu sa dimenzijama proreza, dok pravougaona mreža zahteva korišćenje znatno većeg broja čvorova. Pored toga, uočeno je da pravougaoni TLM modeli za analizu mikrostrip struktura imaju ograničenja u smislu nedovoljno preciznog modelovanja kružnih provodnih površi, što za posledicu može imati odstupanje TLM rezultata od očekivanih vrednosti. Ovu grešku modelovanja moguće je korigovati korišćenjem veće rezolucije TLM mreže na račun povećanja dužine trajanja simulacije, pri čemu je rezolucija mreže ograničena dimenzijama i položajem pobudnog elementa. Nasuprot tome, cilindrična TLM mreža pruža više slobode po pitanju izbora dimenzija TLM celija, jer je, za bilo koju rezoluciju, obezbeđeno precizno modelovanje kružnih površi, tako da su dimenzije TLM celija ograničene jedino dimenzijama koaksijalne pobude i njenim položajem. Istaknuta je važnost modelovanja realnih uslova pobuđivanja čime se omogućava precizno određivanje rezonantnih frekvencija i ulazne impedanse koje kod *patch* antene pobuđene koaksijalnim putem upravo zavise od pozicije i dimenzija žičanog provodnika. U cilju eksperimentalne verifikacije integralnog cilindričnog TLM metoda, modeli mikrostrip *patch* antena praktično su realizovani u okviru laboratorije *RF and Microwave Research Laboratory, Technische Universitaet Ilmenau* u Nemačkoj, gde su izvršena i odgovarajuća

merenja. Eksperimentalna verifikacija i poređenje sa rezultatima zasnovanim na TLM pristupu u pravougaonim koordinatama, potvrđuju da se prezentovani softverski paket može smatrati pouzdanim alatom i u slučaju rešavanja problema elektromagnetskog prostiranja kod mikrostrip antena i da njegova primena rezultuje visokom tačnošću u određivanju vrednosti rezonantnih frekvencija antena na osnovu karakteristike refleksije. Rezultati prikazani u četvrtom poglavlju mogu biti od značaja u procesu projektovanja mikrostrip antena koje se primenjuju u različitim sistemima mobilnih komunikacija.

Peto poglavlje sadrži zaključke o ostvarenim rezultatima i pregled najznačajnijih doprinosa disertacije. Posebno su istaknute prednosti i nedostaci prezentovanog metoda, kao i smernice za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Po oceni članova Komisije, najznačajnije doprinose doktorske disertacije mr Tijane Dimitrijević, predstavljaju:

- razvoj žičanog TLM modela u cilindričnom koordinatnom sistemu uz modifikaciju algoritma povezivanja i generisanje programskog koda *3DTLMcyl\_cw* u okviru Laboratorije za mikrotalasnu tehniku i bežične komunikacije Elektronskog fakulteta u Nišu,
- primena generisanog TLM solvera u cilindričnom koordinatnom sistemu na zatvorene strukture sa manjim brojem TLM celija u poređenju sa odgovarajućim modelom u pravougaonom koordinatnom sistemu i sa mogućnošću modelovanja žičanih elemenata većeg poluprečnika,
- prevazilaženje ograničenja mogućnosti primene konvencionalnog TLM pristupa u pravougaonim koordinatama, koja se odnose na modelovanje cilindričnih rezonatora sa žičanim elementima postavljenih u radijalnom pravcu sa proizvoljnim uglom između pravaca sondi,
- prednost primene unapređenog TLM softvera, u slučaju modelovanja cilindričnog rezonatora sa koaksijalno postavljenim opterećenjem i radijalno postavljenim žičanim elementima, naročito u slučaju dielektrika velike relativne permitivnosti,
- efikasna primena realizovanog TLM softvera za analizu mikrostrip antena kružnog oblika pobuđenih preko koaksijalnog provodnika, gde se njegova prednost u odnosu na primenu pravougaone mreže vidi u preciznom modelovanju kružnih metalnih površi uz korišćenje značajno manjeg broja TLM celija,
- verifikacija integralnog cilindričnog TLM metoda poređenjem numeričkih rezultata sa eksperimentalnim rezultatima, na gotovo svim primerima koji su bili predmet istraživanja disertacije.

Disertacija je zasnovana na originalnim naučnim rezultatima, publikovanim u časopisima sa SCI liste i izloženim na većem broju konferencija u zemlji i inostranstvu.

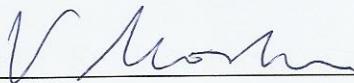
## ZAKLJUČAK

Na osnovu uvida u doktorsku disertaciju kandidata mr Tijane Dimitrijević, Komisija je donela zaključak da disertacija sadrži niz originalnih naučnih doprinosa u oblasti numeričkog modelovanja mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije u prisustvu opterećenja i žičanih elemenata. Imajući u vidu aktuelnost teme i ostvarene naučne rezultate kandidata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Elektronskog fakulteta u Nišu da se doktorska disertacija pod naslovom "**Razvoj i primena kompaktnog žičanog TLM modela za efikasnije projektovanje i analizu mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije**" prihvati i da se kandidatu mr Tijane Dimitrijević odobri usmena obrana ove disertacije.

### KOMISIJA:



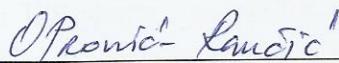
1. dr Nebojša Dončov, redovni profesor  
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu



2. dr Vera Marković, redovni profesor  
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu



3. dr Branko Kolundžija, redovni profesor  
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu



4. dr Olivera Pronić-Rančić, redovni profesor  
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu



5. dr Nataša Maleš-Ilić, vanredni profesor  
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu