

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
КОСОВСКА МИТРОВИЦА

ПРИМЉЕНО 28. 01. 2019		
ОРГ ЈЕДИН		ВРЕДНОСТ
	52/1	

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА
У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ**

Предмет: Извештај Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Бранка Гвоздића

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Косовској Митровици, број 1349/3-5, одржане 28.11.2018. године, именована је Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Бранка Гвоздића, под насловом: „ОПТИМИЗАЦИЈА ИЗВОРА И САВРШЕНО АПСОРБУЈУЋИХ СЛОЈЕВИТИХ ГРАНИЧНИХ УСЛОВА У МЕТОДИ КОНАЧНИХ РАЗЛИКА У ВРЕМЕНСКОМ ДОМЕНУ“, у саставу:

1. др Петар Спалевић, ред.проф. на Факултету техничких наука у К. Митровици–председник
2. др Душан Ђурђевић, ванр.проф. на Факултету техничких наука у К. Митровици – ментор,
3. др Небојша Раичевић, ванр.проф. на Електронском факултету и Нишу – члан.

На основу увида и анализе приложене документације, Комисија подноси Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

1.1 Кратка биографија кандидата

Бранко Гвоздић, диплинж., (мастер), рођен је 30.12.1985. године у Косовској Митровици, где и сада живи. Средњу техничку школу „Михајло Петровић Алас“, смер електротехничар енергетике, завршио је 2004. године у Косовској Митровици. Исте године уписује Факултет техничких наука на Универзитету у Приштини са седиштем у Косовској Митровици на студијском програму електротехничког и рачунарског инжењерства, модул електроника и телекомуникације. Основне и дипломске академске студије завршио је 2010.

године са укупном просечном оценом 8,08. Докторске студије на Студијском програму електротехничког и рачунарског инжењерства Факултета техничких наука у Косовској Митровици уписао је 15.02.2011. године, на којем је положио све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9,8. У периоду 2007.-2010. године био је студент-члан Наставно-научног већа Факултета техничких наука, потпредседник Студентског парламента Факултета техничких наука и представник Факултета техничких наука на међународном скупу студената технике „*Board of European Students of Technology*“. У периоду од 2011. до 2012. ради као инжењер одговоран за банкарски информациони систем у Југобанци-Југбанци са седиштем у Косовској Митровици, стекавши тако знатно искуство из информационих технологија.

1.2 Стручна делатност

Марта 2012. године изабран је на место асистента за ужу научну област Теоријска електротехника и електрична мерења и од тада обавља лабораторијске и нумеричке вежбе на предметима: Основи електротехнике 1, Основи електротехнике 2, Лабораторијске вежбе из основа електротехнике, Теорија електричних кола, Електромагнетика, Електротехника са електроником, Микроталасна техника, Антене и простирање електромагнетских таласа, Фотоника и Електромагнетска компатибилност. Учесник је једног међународног *Erasmus+* пројекта.

Области интересовања Бранка Гвоздића су: теоријска електротехника, нумеричке методе у електромагнетици, моделовање простирања електромагнетског поља, фотоника.

Аутор је 5 научних радова чија је тематика директно везана за докторску дисертацију, од којих су 2 рада у часописима категорије М23 и М24, а 3 рада у зборницима међународних конференција категорије М33. Такође, коаутор је 3 научна рада у зборницима међународних конференција категорије М33, који нису у директној вези са дисертацијом.

2. Основни подаци о дисертацији

Докторска дисертација под насловом: „Оптимизација извора и савршено апсорбујућих слојевитих граничних услова у методи коначних разлика у временском домену“, садржи 152 нумерисаних страница текста, као и додатне странице са неопходним подацима. Текст дисертације је илустрован са 50 слика, садржи 2 табеле и 206 једначина. У попису коришћене литературе кандидат је навео 91 референцу. По форми и структури одговара општим правилима за писање и обликовање докторске дисертације у складу са Статутом Универзитета, Правилником о докторским студијама на Универзитету и Правилником о докторским студијама на Факултету техничких наука. Текст докторске дисертације подељен је на седам поглавља: 1. Увод, 2. Метода коначних разлика у временском домену, 3. Извори у методи коначних разлика у временском домену, 4. Гранични услови у методи коначних разлика у временском домену, 5. Аналитички модели дискретизације, 6. Нумерички резултати и 7. Закључак. На крају је дат преглед коришћене литературе (91 библиографске референце), као и биографија кандидата.

У уводу, прво поглавље, дат је преглед истраживане области и садржај докторске дисертације, на основу којег читалац може да стекне увид у материју којом се кандидат бави у докторској дисертацији. Представљен је план и структура докторске дисертације и

дефинисани су циљеви и предмети истраживања. На основу датог прегледа литературе, постављене су хипотезе и описана метода која је коришћена у научно-истраживачком раду.

Друго поглавље представља теоријску основу нумеричке методе коначних разлика у временском домену (*Finite Difference Time Domain Method* – FDTD метода). Наведене су предности и недостаци FDTD методе, а дато је и поређење са другим методама нумеричке електромагнетике. Полазећи од Максвелових једначина у временском домену изведене су диференцијалне једначине и уведен *Yee*-ов алгоритам, на којима је заснована FDTD метода. Изведене су приближне формуле за апроксимацију првог извода коначним разликама, са тачношћу другог реда, и изведен је CFL (*Courant–Friedrichs–Lewy*) услов нумеричке стабилности. Такође, набројани су и објашњени главни узроци дисперзије у нумеричком алгоритму FDTD методе.

У трећем поглављу уведени су извори електромагнетског поља који се највише користе у нумеричким симулацијама електромагнетског поља у FDTD методи. Дефинисани су у временском и фреквенцијском домену Гаусов импулс, Рикеров импулс и хармонијски извор синусног облика. Дат је и концепт на ком је заснована TF/SF (*Total Field/Scattered Field*) техника генерисања равних електромагнетских таласа.

У четвртном поглављу дефинисани су апсорбујући гранични услови и објашњен је начин њихове примене у FDTD методи. Изведени су Мурови аналитички гранични услови другог реда и дефинисани су савршено апсорбујући слојевити гранични услови (*perfectly matched layer* - PML). Из PML граничних услова изведени су униаксијални (*uniaxial* PML - UPML) и конволуциони (*convolutional* PML - CPML) савршено апсорбујући слојевити гранични услови, чија је оптимизација и циљ истраживања у овој дисертацији.

У петом поглављу изведени су модели дискретизације извора и граничних услова који су коришћени у истраживању. Предложени су начини FDTD дискретизације и оптимизације Гаусовог, Рикеровог и хармонијског извора, као и посебан случај имплементације TF/SF равних таласа у дводимензиони (2Д) и тродимензиони (3Д) FDTD домен који се изводи коришћењем једнодимензионе (1Д) помоћне решетке. Предложен је и облик Рикеровог импулса, као и модификованог Гаусовог импулса (диференцирани Гаусов импулс), чијим се коришћењем може смањити штетан ефекат акумулације фиктивних (нефизичких) наелектрисања у току симулације електромагнетског поља, а која се неминовно јављају као последица нумеричке дискретизације простора и времена у FDTD методи. У овом поглављу приказани су начини имплементације UPML и CPML граничних услова у програмски FDTD код. При одређивању оптималних корелација коришћено је градирање CPML коефицијената помоћу полинома.

У шестом поглављу презентовани су и дискутовани резултати нумеричких 2Д и 3Д FDTD симулација простирања и расејања електромагнетског поља. Упоредени су нумерички резултати добијени за случај побуде поља Рикеровим и Гаусовим импулсом. Нумеричке симулације поља урађене су за случај простирања електромагнетског поља у слободном простору и за случај простирања поља кроз нехомогену средину сачињену од два хомогена диелектрична полупростора. Урађене су FDTD симулације поља са TF/SF генерисаним равним таласима и испитане су предности ове технике у односу на импулсне изворе и то за случај 2Д и 3Д слободног простора са савршено проводним (*Perfect Electric Conductor* – PEC)

цилиндром, односно PEC сфером. Такође, презентовани су нумерички резултати FDTD симулације простирања TF/SF равних таласа у 2Д нумеричком домену сачињеног од два хомогена диелектрична полупростора: слободног простора и слоја са губицима. 3Д FDTD симулација простирања поља у слободном простору, где је као извор поља коришћен диференцирани Гаусов импулс, послужила је за добијање оптималних корелација између CPML параметара и побољшање апсорпционих карактеристика PML, UPML и CPML граничних услова. Поређење апсорпционих карактеристика CPML и UPML граничних услова урађено је и у 3Д FDTD симулацијама поља два додатна електромагнетска проблема. Први проблем је простирање електромагнетског поља диференцираног Гаусовог импулса у слободном простору. Други проблем је простирање и расејање електромагнетског поља диференцираног Гаусовог импулса у присуству PEC сфере, у слободном простору. Нумерички резултати симулације простирања и расејања електромагнетског поља су, за оба проблема, приказани графички, а за различите тренутке времена. На тај начин су испитане перформансе два типа граничних услова коришћених у овој дисертацији, а у случају сложене геометрије средине. Такође, презентовани су и резултати анализе примене различитих типова граничних услова у FDTD симулацијама поља, а у функцији различитих дебљина савршено апсорбујућих слојева. На основу приказаних резултата и урађене дискусије резултата, предложене су смернице за даљи рад.

У закључку су сумирани сви резултати и представљен је план за будуће истраживање. Након закључка приказан је списак литературе коришћен у научно-истраживачком раду, кратка биографија кандидата и пратеће изјаве које су предвиђене прописаном формом дисертације.

3. Оцена докторске дисертације

3.1 Предмет и циљ дисертације

Основни циљ првог тематског дела ове дисертације је добијање модела оптималног извора електромагнетског поља за примену у FDTD методи. Испитане су и упоређене особине импулсних извора и TF/SF технике генерисања равних таласа, са аспекта њихове имплементације у FDTD методи. Посебна пажња посвећена је неутрализацији фиктивних, нефизичких (нумеричких) статичких наелектрисања, која се неминовно јављају у FDTD нумеричком домену, као директна последица дискретизације времена и простора у FDTD алгоритму. Генерисање ових нежељених фиктивних наелектрисања доводи до појаве нефизичке рефлексије, нумеричке дисперзије и до нетачних резултата симулације поља. Сви познати покушаји уклањања, у доступној литератури, ове нежељене DC компоненте су јако комплексни са аспекта моделовања, те у значајној мери усложњавају израду FDTD алгоритма и програмског кода. Једна од хипотеза ове дисертације је да се утицај нежељених фиктивних наелектрисања може значајно смањити применом оптимизованих облика импулсних извора, конкретно Рикеровог импулса, а да се при томе избегну у литератури предложене компликоване процедуре. Такође, циљ истраживања је и да се покаже да је примена TF/SF технике генерисања равних таласа, у случајевима када је то могуће, бољи избор у односу на импулсне изворе.

Оптимизација нумеричких CPML граничних услова имплементираних у FDTD методи, основни је циљ другог тематског дела ове дисертације. Доступна литература обилује јасним примерима да је сваки покушај израде FDTD алгоритма са повећаном тачношћу праћен директним изразитим повећањем аналитичке комплексности CPML граничних услова и, последично, тежом имплементацијом истих у FDTD алгоритам и програмски код. Хипотеза у овом делу дисертације је да се код FDTD симулација електромагнетског поља нумеричка дисперзија може значајно умањити, чак и елиминисати у неким случајевима, само оптимизацијом одговарајућих CPML коефицијената. CPML гранични услови су оптимизовани, по критеријуму минимизације апсорпције електромагнетских таласа, проналажењем адекватних бројних вредности и корелација између CPML коефицијената и њиховом имплементацијом у FDTD алгоритам и програмски код. Нумерички резултати добијени у бројним FDTD симулацијама електромагнетског поља, урађених за неколико различитих електромагнетских проблема, а за широк спектар параметара средине и геометрије проблема, потврђују у потпуности заснованост и валидност хипотезе. Добијене су оптималне вредности и корелације CPML коефицијената, и упоређене су апсорпционе карактеристике PML, UMPL и CPML граничних услова за различите скупове параметара.

3.2 Применљивост остварених резултата

У првом тематском делу ове дисертације потврђена је хипотеза да је за извор електромагнетског поља у FDTD симулацијама боље користити Рикеров импулс него Гаусов импулс, јер Рикеров импулс има занемарљиво малу нефизичку DC компоненту (нумерички генерисана статичка наелектрисања). Резултати нумеричких симулација поља доказују оправданост оваквог избора извора поља, а њиме се омогућава применљивост FDTD симулација на значајно већи опсег параметара средине геометрије електромагнетских проблема. За случај када присуство самог извора електромагнетског поља унутар нумеричког домена није приоритет, показано је да је примена технике генерисања TF/SF равних таласа у нумеричким симулацијама поља ефикасније од коришћења импулсних извора. То посебно важи за случајеве када је потребна анализа простирања електромагнетског поља у једном правцу нумеричког домена. Нумерички резултати указују на недостатке Гаусовог импулса као најчешће коришћеног извора поља и упућују на разматрање и употребу алтернативне изворне функције. Закључак је да је правилан избор модела извора електромагнетског поља у FDTD симулацијама од круцијалног значаја са аспекта ефикасности и применљивости FDTD програмског

У другом тематском делу ове дисертације потврђена је хипотеза да се нумеричка дисперзија код FDTD симулација електромагнетског поља може значајно умањити само оптимизацијом одговарајућих CPML коефицијената, а без значајног усложњавања модела граничних услова FDTD домена. Нумерички резултати бројних FDTD симулација поља за широк скуп коришћених параметара, омогућили су добијање вредности оптималних CPML коефицијената и корелација CPML коефицијената. Нумерички резултати 3Д FDTD симулација простирања и расејања електромагнетског поља доказују да CPML гранични условим имају боље перформансе у односу на PML и UPML граничне услове. Оптимизовани CPML гранични услови, на начин како је то урађено у овој дисертацији, могу се препоручити за израду комерцијалних и *open-source* софтвера, у којима се FDTD метода користи за дизајн антена и микроталасних склопова, у фотоници, али и у биомедицини, геофизици и акустици.

На основу анализе остварених постављених циљева и презентованих нумеричких резултата, Комисија је мишљења да су у потпуности потврђене постављене хипотезе у дисертацији. Такође, Комисија оцењује да је област обрађена у овој дисертацији веома актуелна, да су резултати FDTD симулација простирања и расејања електромагнетског поља презентовани у овој дисертацији оригинални, и да су добијени на основу оригинално написаног програмског кода. Сви резултати приказани у дисертацији су верификовани у научној јавности објављивањем у часописима категорије M23 и M24, и саопштењима на међународним конференцијама категорије M33. На основу свега изнесеног, Комисија сматра да презентовани резултати, као и објављени радови у часописима и на конференцијама, потврђују способност кандидата за научно-истраживачки рад.

4. Остварени научни допринос

4.1 Приказ остварених научних доприноса

По оцени чланова Комисије, најзначајнији научни доприноси докторске дисертације кандидата Бранка Гвоздића су:

- показано је да се правилним избором модела извора у FDTD симулацијама електромагнетског поља (диференцирани Гаусов импулс и Рикеров импулс) може знатно умањити утицај нежељене фиктивне нумеричке DC компоненте, при чему је потврђено да је у случају избора Рикеровог импулса за изворну функцију, утицај тих нефизичких компоненти занемарљиво мали,
- показано је да је примена технике генерисања TF/SF равних таласа, као модела извора електромагнетског поља, бољи избор од примене импулсних извора у FDTD симулацијама поља у случајевима када присуство извора поља унутар нумеричког домена није приоритет,
- показано је да се битно побољшава ефикасност FDTD алгоритма применом CPML граничних услова, при чему је апсорпција електромагнетских таласа оптимизованим CPML граничним условима, знатно боља од апсорпције PML и UPML граничних услова,
- показано је да апсорпција електромагнетских таласа оптимизованим CPML граничним условима, и самим тим њихова ефикасност, у функцији од корелације између CPML коефицијената, а мање зависи од њихове вредности,
- показано је да су у случајевима FDTD симулација поља која стварају импулсни извори на високим фреквенцијама, оптимизоване вредности CPML коефицијената функција коефицијента специфичне проводности слојева граничних услова и коефицијента померања комплексне фреквенције,

- показано је да се нумеричка дисперзија код CPML граничних услова може битно смањити, ако се оптимизација граничних услова изведе смањивањем вредности коефицијента проширења координата.

4.1 Верификација научних доприноса

Кандидат је на основу резултата истраживања у оквиру рада на докторској дисертацији до сада објавио следеће радове:

1. **B.D. Gvozdić, D.Z. Djurdjević.** "Performance advantages of CPML over UPML absorbing boundary conditions in FDTD algorithm." *Journal of Electrical Engineering* 68.1 (2017): 47-53. DOI: 10.1515/jee-2017-0006; (M23)
2. **B.D. Gvozdić, D.Z. Djurdjević, N. Raičević.** "CPML parameter optimization in FDTD modeling of impulsive source." *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics* 16.3 (2018): 229-240, DOI: 10.22190/FUACR1703229G; (M24)
3. **B.D. Gvozdić, D.Z. Djurdjević.,** "FDTD simulations of TF/SF plane waves in the presence of PEC scatterers", ERK 2014, Portorož - Slovenia, Vol. A, pp. 163-166, ISSN: 1581-4572; (M33)
4. **B.D. Gvozdić, D.Z. Djurdjević,** "Prednosti korišćenja Rikerovog u odnosu na Gausov impuls u FDTD simulacijama", INFOTEH 2014, Jahorina - Bosna i Hercegovina, Vol. 13., pp. 382-387, Mart 2014, ISBN 978-99955-763-3-2; (M33)
5. **B.D. Gvozdić, D.Z. Djurdjević,** "Primena TF/SF eksitacije kod računarskih FDTD simulacija elektromagnetskih polja", SINTEZA 2014, Beograd - Srbija, pp. 948-952, April 2014, ISBN: 978-86-7912-539-2; (M33)

ЗАКЉУЧАК

На основу извршеног увида у докторску дисертацију кандидата Бранка Гвоздића, Комисија је мишљења да дисертација садржи низ оригиналних доприноса у погледу нумеричког моделовања и оптимизације импулсних извора електромагнетског поља и савршено апсорбујућих слојевитих граничних услова у нумеричкој методи коначних разлика у временском домену (FDTD). Кандидат је успешно спровео оптимизацију модела извора поља и модела граничних услова нумеричког домена, формирао ефикасан, у суштини експлицитни FDTD алгоритам, на основу кога је написао оригиналан FDTD програмски код, а затим бројним симулацијама зрачења, простирања и расејања електромагнетског поља добио резултате које потврђују ефикасност предложеног оптимизованог FDTD модела.

Показано је да се избором Рикеровог импулса за модел извора поља битно минимизује утицај нежељених ефеката дискретизације. Такође је показано да је, са аспекта ефикасности FDTD симулација, техника TF/SF генерисања равних таласа први избор у случајевима када се извор поља не налази у унутрашњости нумеричког FDTD домена. Оптимизовани су гранични услови FDTD домена и показано је да је варијанта PML граничних услова, позната као CPML гранични услови, најефикаснија по питању апсорпције електромагнетских таласа. Сви резултати приказани у дисертацији верификовани су у научној јавности објављивањем у часописима категорије M23 и M24, као и на међународним конференцијама категорије M33.

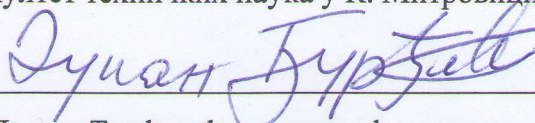
Имајући у виду остварене научне резултате и велику актуелност у нумеричкој електромагнетици за проблеме оптимизације алгоритама нумеричких метода коришћених у овој дисертацији, чланови Комисије предлажу Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици да се докторска дисертација под насловом ОПТИМИЗАЦИЈА ИЗВОРА И САВРШЕНО АПСОРБУЈУЋИХ СЛОЈЕВИТИХ ГРАНИЧНИХ УСЛОВА У МЕТОДИ КОНАЧНИХ РАЗЛИКА У ВРЕМЕНСКОМ ДОМЕНУ прихвати и да се кандидату Бранку Гвоздићу одобри усмена одбрана.

У Косовској Митровици,
14.01.2019. године

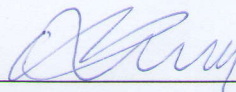
Комисија:



др Петар Спалевић, ред. проф. - председник
Факултет техничких наука у К. Митровици



др Душан Ђурђевић, ванр. проф. - ментор
Факултет техничких наука у К. Митровици



др Небојша Раичевић, ванр. проф. - члан
Електронски факултет и Нишу