

На 331. седници Наставно-научног већа одржаној у петак 22. 4. 2016. године, именовани смо за чланове комисије за преглед и оцену рукописа „Унапређивање SMT решавача коришћењем CSP технике и техника паралелизације“ кандидата Милана Банковића као докторске тезе. Комисија је предати рукопис пажљиво прочитала и подноси следећи

## Извештај

### 1 Биографија кандидата

Милан Банковић је рођен 3. маја 1982. године у Петровцу на Млави. Математички факултет, смер Рачунарство и информатика, уписао је октобра 2001. године. Дипломирао је децембра 2006. године са просечном оценом 9,93. Докторске студије на смеру Информатика на Математичком факултету уписао је 2007. године. До сада је положио све испите предвиђене планом студија са просечном оценом 10. У току рада на тези објавио је три самостална научна рада у часописима са SCI листе. Поред тога, похађао је и једну летњу школу из области SAT/SMT решавача, а учествовао је и у раду две водеће међународне конференције, где је у оквиру придружених радионица имао запажена излагања. Такође је учествовао у организацији више научних скупова у земљи које је организовала Арго група Математичког факултета, чији је члан од 2009. године. Научна интересовања су му пре свега у области SAT и SMT решавача, са акцентом на њиховом развоју, унапређивању и применама. Такође је заинтересован и за програмирање ограничења. До сада је у два циклуса био учесник научних пројеката које је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије. Од 2007. године ангажован је на Математичком факултету, најпре као сарадник у настави, а од 2010. године као асистент за научну област рачунарство и информатика.

### 2 Област рукописа

Рукопис „Унапређивање SMT решавача коришћењем CSP техника и техника паралелизације“ кандидата Милана Банковића припада широј области аутоматског резонувања и спаја уже области решавања проблема SMT (енгл. *satisfiability modulo theories*), решавања проблема задовољења ограничења (енгл. *constraint satisfaction problem, CSP*) и конструкције паралелних алгоритама.

Аутоматско резонување представља спој области математичке логике, вештачке интелигенције и алгоритмике. Оно је важна и широко распрострањена област којом се бави неколико хиљада истраживача у свету. Главне примене аутоматског резонувања су у верификацији софтвера, верификацији хардвера, аутоматском доказивању математичких теорема, решавању оптимизационих и комбинаторних проблема итд.

Проблем SMT је проблем испитивања да ли је дата формула задовољива у односу на једну или више теорија логике првог реда. Најчешће се разматрају универзално-квантификовани фрагменти одлучивих теорија каве су теорије реалне линеарне аритметике (LRA), целобројне линеарне аритметике (LIA), теорија једнакости са неинтерпретираним функцијским симболима (EUF), теорија аритметике над векторима битова (BVA), теорија низова и слично, али и неодлучивих теорија попут нелинеарне реалне аритметике (NIA). У новије време постоји све озбиљнија подршка за рад са квантификаторима. SMT решавачи су најчешће засновани на DPLL(T) архитектури у којој се комбинују ефикасни решавачи за наведене теорије са SAT решавачем чији је задатак да резонује о исказној структури формуле (задате у конјунктивној нормалној форми). Решавање проблема SMT има велике примене у областима верификације и синтезе софтвера, симболичког извршавања, аутоматског генерисања тест примера и слично.

Проблеми задовољења ограничења (CSP) су математички проблеми у којима је потребно пронаћи неки објекат или скуп објеката који задовољавају унапред дата ограничења. Једноставни примери ових проблема су логичке загонетке, попут проблема 8 дама, проблема бојења мапа, генерисања укрштеница, судоку проблема и слично, док се реални примери ових проблема проналазе пре свега у задацима распоређивања, планирања, алокације ресурса и слично. CSP проблеми су обично веома тешки комбинаторни проблеми чије успешно решавање захтева комбиновање егзактних алгоритама претраге и хеуристика. Решавање CSP проблема проучава се и у областима вештачке интелигенције и операционих истраживања.

Последњих година, фокус многих истраживача у области аутоматског резоновања премешта се ка развоју паралелних алгоритама, како би се искористиле могућности вишепроцесорских и вишејезгарних рачунара који су постали широко доступни. Паралелни алгоритми су они чији се поједини делови могу извршавати на различитим уређајима (најчешће конкурентно тј. истовремено), да би се добијени парцијални резултати на крају објединили у коначно решење полазног проблема. Паралелни алгоритми се примењују у свим областима рачунарства, при чему су неки проблеми такви да допуштају веома једноставну и природну конструкцију паралелних алгоритама, док су неки проблеми и методи инхерентно секвенцијални и веома је тешко, па чак и немогуће за њих конструисати ефикасне паралелне алгоритме.

### 3 Структура рукописа и кратак приказ

Рукопис има 210 страна и користи 105 библиографских јединица. Сачињен је од следећих глава:

1. Увод
2. Основе
  - 2.1. Проблеми SAT и SMT
  - 2.2. Проблем CSP
  - 2.3. Сажетак
3. Структура и дизајн SMT решавача *argosmt*
  - 3.1. Увод

- 3.2. Библиотека израза
- 3.3. Покретање решавача
- 3.4. КНФ трансформација
- 3.5. Нормализација
- 3.6. Пречишћавање
- 3.7. Интерфејс теоријског решавача
- 3.8. SAT решавач
- 3.9. Подржани теоријски решавачи
- 3.10. Комбинација теорија
- 3.11. Подршка паралелизацији
- 3.12. Сажетак
- 4. Унапређивање SMT решавача CSP техникама
  - 4.1. Увод
  - 4.2. CSP теорија
  - 4.3. CSP теоријски решавач
  - 4.4. Руковалац *alldifferent* ограничењем
  - 4.5. Руковалац линеарним ограничењем
  - 4.6. Закључак
- 5. Унапређивање SMT решавача техникама паралелизације
  - 5.1. Увод
  - 5.2. Симплекс алгоритам у SMT решавачима
  - 5.3. Паралелизација симплекс алгоритма
  - 5.4. Имплементација теоријског решавача
  - 5.5. Паралелни портфолио и хибридни приступ
  - 5.6. Експериментална евалуација
  - 5.7. Закључак
- 6. Закључци и даљи рад
  - 6.1. Закључци
  - 6.2. Даљи рад

У наставку је кратко описан садржај свих глава.

## 1. Увод.

У склопу уводне главе кандидат укратко описује области којој теза припада, набраја доприносе тезе и описује структуру текста који следи.

## 2. Основе.

У овој глави кандидат уводи основне појмове математичке логике и аутоматског резонување потребне за даље праћење тезе. Даје се формална дефиниција вишесортне логике првог реда, њене синтаксе и семантике. Дефинише се исказна логика и проблем SAT. Дефинишу се теорије првог реда и проблем SMT и описују се теорије изграђене као комбинација теорија првог реда. Након тога описују се SAT и SMT решавачи – програми који имплементирају процедуре одлучивања чијом се применом решавају проблеми SAT и SMT. Описује се DPLL(T) архитектура SMT решавача заснована на тзв. лењом приступу у којем се комбинује SAT решавач са процедурама одлучивања задовољности конјункција литерала одређених теорија првог реда. Описује се и SMT-LIB иницијатива чији је циљ стандардизација SMT решавача и описују се најзначајније SMT теорије.

У склопу ове главе описује се и проблем CSP и CSP решавачи. Уводе се нивои конзистентности проблема CSP (конзистентност лукова, конзистентност граница, конзистентност домена). Дефинишу се глобална ограничења која заузимају посебно место у овој тези и наводе се најзначајнији примери глобалних ограничења (пре свега ограничење *alldifferent* које осигурава да све променљиве из датог скупа променљивих у евентуалним моделима имају међусобно различите вредности).

## 3. Структура и дизајн SMT решавача *argosmt*.

Ово је једна од три централне главе тезе у којима се описују оригинални резултати кандидата. У њој се описује архитектура и C++ имплементација решавача *argosmt*. Једна од централних компоненти сваког SMT решавача је библиотека за имплементацију израза и логичких формула и кандидат је у склопу решавача *argosmt* имплементирао и касније у раду описао такву библиотеку која је усклађена са SMT-LIB 2 стандардом. Након тога описују се фазе претпроцесирања формуле (КНФ трансформација, нормализација и пречишћавање) које представљају припрему за примену алгоритма SMT претраге. У оквиру ове главе описује се и SAT решавач који је интегрисан у *argosmt*. Занимљива карактеристика архитектуре решавача *argosmt* је то што је, за разлику од традиционалног приступа, исказно резонување измештено из SAT решавача и организовано као посебан теоријски решавач. У наставку се описује интерфејс појединачних теоријских решавача и описују се подржани теоријски решавачи: исказни решавач, решавач за теорију једнакости са неинтерпретираним функцијским симболима (EUF) заснован на процедури Ниевенхуиса и Оливераса и решавач за реалну линеарну аритметику (LRA) заснован на алгоритму симплекс. Дефиниција теорије CSP и решавач за ту теорију представљају централни допринос тезе и описују се у наредном поглављу. Након описа појединачних решавача описује се и механизам комбиновања теорија имплементиран у оквиру решавача *argosmt*. На крају главе описује се подршка паралелизацији коју решавач *argosmt* пружа.

## 4. Унапређивање SMT решавача CSP техникама.

Након увода у којем се даје преглед резултата релевантних за област решавања CSP проблема уводи се CSP теорија као теорија логике првог реда намењена за уградњу подршке за решавање CSP проблема помоћу технологије SMT решавања. Ова теорија омогућава изражавање CSP проблема директним коришћењем подржаних глобалних ограничења, без свођења ових ограничења на језик линеарне аритметике, чиме би се изгубила природна структура проблема. Описује се синтакса и семантика теорије CSP, описује се њен универзално-квантификовани фрагмент и дају се примери представљања CSP проблема у оквиру те теорије. Након тога се описује и структура и општи принцип рада решавача за теорију CSP који се заснива на постојећим алгоритмима филтрирања за одговарајућа глобална ограничења, али адаптираним тако да се могу уклопити у постојеће SMT окружење. Посебна пажња посвећена је и проблему комуникације између глобалних ограничења. Теорија CSP подржава задавање аритметичких ограничења и ограничења *alldifferent* и опис алгоритама провере задовољности над тако дефинисаним ограничењима представља централни оригинални допринос ове тезе.

У наставку текста описује се руковацац ограничењем *alldifferent*. Даје се преглед релевантних техника, укључујући и Регинов алгоритам филтрирања који представља основу руковацаца ограничењем *alldifferent*. Описује се процедура испитивања конзистентности тог ограничења и процедура за успостављање конзистентности домена. Централни изазов за интеграцију алгоритма за руковање *alldifferent* ограничењима у SMT решаваче је дизајн ефикасне процедуре за објашњавање пронађених неконзистентности и објашњавање пропагација насталих филтрирањем домена. Кандидат описује свој оригинални MOS (енгл. *minimal obstacle set*) алгоритам и врши његово поређење са алтернативним алгоритмима описаним у литератури (Катсирелосовим алгоритмом и алгоритмом заснованим на проточним мрежама). Поред описа алгоритама описују се и детаљи њихове имплементације, даје се доказ коректности алгоритма MOS и приказују се резултати опсежне експерименталне евалуације која је показала предност алгоритма MOS у односу на све раније описане алгоритме.

У наставку текста описује се руковацац линеарним ограничењима чија је главна карактеристика то што се приликом филтрирања узима у обзир постојања једног или више ограничења *alldifferent* над неким променљивим које истовремено учествују и линеарном ограничењу. Овакав приступ често омогућава израчунавање јачих граница за променљиве, што доводи до додатног сужавања простора претраге и брже конвергенције ка решењу. На почетку се прво описује стандардни алгоритам филтрирања за линеарна ограничења који су описали Шулта и Стаки. Након тога прелази се на опис побољшаног алгоритма који узима у обзир и ограничења *alldifferent*. Прво се описује алгоритам у једноставном случају у којем су сви коефицијенти у линеарном ограничењу истог знака, а након тога се описује и општи случај, када је знак коефицијената произвољан. Након описа алгоритма врши се анализа његове сложености, анализа нивоа конзистентности који се алгоритмом постиже и даје се доказ коректности алгоритма. У склопу експерименталне евалуације врши се поређење са стандардним алгоритмом филтрирања који не узима у обзир

ограничења *alldifferent* и са алгоритмом који су предложили Белдицеану и коаутори. Основна разлика предложеног у односу на тај алгоритам је то што предложени алгоритам постиже нижи степен конзистентности да би могао да покрије општији случај ограничења (пре свега, допуштени су произвољни коефицијенти у ограничењима и допуштена су вишеструка *alldifferent* ограничења која се могу само делимично преклапати са променљивама линеарног ограничења). Експериментална евалуација је показала да узимање у обзир ограничења *alldifferent* значајно убрзава поступак решавања, као и да је предложени алгоритам упоредив са алгоритмом који су предложили Белдицеану и други у ситуацијама када се могу применити оба алгоритма, а да је много шире применљив од њега.

#### 5. Унапређивање SMT решавача техникама паралелизације.

У овој глави анализиран је ефекат различитих приступа паралелизацији SMT решавача, када је у питању решавање проблема у теорији реалне линеарне аритметике. Кандидат описује три могућа приступа. Први приступ је паралелизација алгоритма симплекс на коме су засноване процедуре одлучивања за испитивање задовољности конјункције линеарних аритметичких ограничења у оквиру SMT решавача. Ово је једна од најсложенијих процедура у модерним SMT решавачима, па њена паралелизација може значајно да утиче на перформансе решавача. Други приступ је покретање паралелног портфолија решавача који користе различита семена за генерисање случајних бројева у хеуристикама гранања. Трећи приступ је хибридизација претходна два: сваком од решавача у портфолију се дају додатни процесори које он може искористити за паралелизацију симплекса.

Извршена је опсежна експериментална евалуација која је потврдила потенцијал приступа заснованог на паралелизацији симплекса за неке класе инстанци. Општи закључак је да ефективност симплекс паралелизације непосредно зависи од удела времена извршавања које је проведено у паралелизованим деловима симплекс алгоритма и од тога да ли се у имплементацији мора користити хардверски подржана аритметика или аритметика произвољне прецизности. Резултати такође показују да паралелни портфолио у просеку даје боље резултате од паралелизације симплекс алгоритма (услед теоријских ограничења убрзања симплекс паралелизације, у складу са Амдаловим законом), али детерминистичко извршавање и предвидиво понашање симплекс паралелизације чини овај приступ знатно поузданијим од паралелног портфолија.

#### 6. Закључци и даљи рад.

У овој глави кандидат резимира основне закључке своје тезе и даје смернице за даљи рад.

## 4 Анализа рукописа и оригиналних доприноса

У склопу тезе, кандидат је дао одличан преглед области решавања SMT проблема и решавања CSP проблема, што указује на његову способност да систематизује и прикаже знање из једне актуелне истраживачке области. Поред тога, рукопис доноси неколико оригиналних научних

резултата.

- У оквиру рада на тези развијен је SMT решавач *argosmt* отвореног кода и флексибилног дизајна, што омогућава једноставно прилагођавање потребама, како текућих, тако и будућих истраживања у области развоја и примене SMT технологија. Отвореност кода решавача може бити од значаја и за ширу заједницу. Колико нам је познато, ово је први домаћи SMT решавач заснован на DPLL(T) архитектури, а његово постојање и јавна доступност свакако може охрабрити нове потенцијалне домаће истраживаче у области SMT решавача.
- Формулисана је нова SMT теорија која је погодна за изражавање CSP проблема у оквиру SMT решавача. За тако дефинисану теорију развијена је процедура одлучивања заснована на техникама позајмљеним из традиционалних CSP решавача. Ове технике су адаптиране тако да ефикасно функционишу у оквиру SMT решавача. Ту се пре свега мисли на ефикасну комуникацију између алгоритама филтрирања који резонују о појединачним глобалним ограничењима.
- Развијен је нови алгоритам за генерисање објашњења пропагација и конфликта код ограничења *alldifferent*. Алгоритми за генерисање објашњења су неопходни за потребе анализе конфликта, а њихов развој и прилагођавање SMT окружењу је управо највећи изазов при уградњи CSP алгоритама филтрирања за глобална ограничења у SMT решаваче. Развијени алгоритам је детаљно упоређен са другим релевантним приступима, а дата је и експериментална евалуација.
- Развијен је нови алгоритам филтрирања за линеарна ограничења који узима у обзир постојање ограничења *alldifferent* у датом проблему и користи те информације за израчунавање јачих граница променљивих, чиме се додатно сужава простор претраге. Алгоритам је детаљно упоређен са другим релевантним приступима, уз адекватну експерименталну евалуацију.
- Имплементирана је паралелизација симплекс алгоритма, уграђена је подршка за паралелни портфолио, као и за хибридизацију ова два приступа. Урађена је и опсежна експериментална евалуација поменутих техника паралелизације на великом скупу како индустријских, тако и случајно генерисаних проблема.
- Теза садржи велики број формално исказаних и доказаних тврђења који су такође оригинални допринос тезе.

Из рада на овој тези проистекли су следећи радови (сва три самостална, два објављена у часописима категорије M22 и један објављен у часопису категорије M23).

1. Milan Banković, Extending SMT solvers with support for finite domain *alldifferent* constraint. *Constraints*, volume 21, number 4, Springer, 2016. DOI: 10.1007/s10601-015-9232-8
2. Milan Banković, Parallelizing simplex within SMT solvers. *Artificial Intelligence Review*. 2016. DOI: 10.1007/s10462-016-9495-5
3. Milan Banković, Solving finite-domain linear constraints in presence of the *alldifferent*. *Logical Methods in Computer Science*, volume 3, 2016. DOI: 10.2168/LMCS-12(3:5)2016

Као чланови комисије пратили смо писање овог рукописа и током рада и након читања првих верзија дали смо аутору низ захтева и сугестија које је он обрадио и усвојио у завршној верзији рукописа.

## 5 Закључак

Рукопис „Унапређивање SMT решавача коришћењем CSP техника и техника паралелизације“ кандидата Милана Банковића садржи одличан приказ савремених техника SMT решавања, али и опис неколико оригиналних техника побољшавања SMT решавања заснованих на техникама решавања CSP проблема и техникама паралелизације.

У склопу тезе развијен је нови SMT решавач *argosmt* отвореног кода и флексибилног дизајна, заснован на DPLL(T) архитектури. Неке од значајних карактеристика решавача *argosmt* су ефикасна имплементација израза, лењо увођење дељених једнакости код комбинације теорија, подршка за паралелизацију, измештање исказног резоновања измештено из SAT решавача у посебан теоријски решавач и слично.

У тези су развијене технике које омогућавају да се прошири домен примене SMT решавача и да се они примене и на решавање CSP проблема. Најпре је дефинисана нова SMT теорија (названа CSP теорија), која представља логички оквир који је погодан за изражавање CSP проблема на SMT језику. За тако дефинисану теорију развијен је теоријски решавач заснован на постојећим техникама позајмљеним из традиционалних CSP решавача које су адаптиране тако да могу да функционишу у оквиру SMT решавача. Разматрана је подршка за два типа ограничења: ограничење *alldifferent* и линеарно-аритметичка ограничења. Решавач за ограничење *alldifferent* захтевао је развој алгорита за генерисање објашњења конфликта и пропација и алгорита који је развије показао се као најефикаснији од неколико сличних алгорита описаних у литератури. За ограничења линеарне аритметике развијен је оригиналан алгоритам филтрирања који узима у обзир постојање ограничења *alldifferent* датом проблему, што му омогућава да израчуна јаче границе променљивих, чиме се додатно сужава простор претраге. За све предложене технике извршена је анализа сложености, дати су докази коректности и опсежном експерименталном евалуацијом показано је да алгоритми достижу или надмашују сва алтернативна решења раније описана у литератури.

Када су у питању технике паралелизације, најзначајнији допринос је имплементација паралелизације симплекс алгорита у теоријском решавачу за линеарну аритметику. Такође, уграђена је и подршка за паралелни портфолио, а омогућена је и хибридикација ова два приступа. Веома значајан допринос овог дела тезе је и опсежна експериментална евалуација наведених техника паралелизације, као и анализа добијених резултата

Својим радом на рукопису, на имплементацији решавача *argosmt* кандидат Милан Банковић је показао висок степен истраживачке зрелости и могућност веома успешног рада на решавању теоријских и практичних проблема из области аутоматског резоновања. Делови тезе досада су објављени у три научна рада, од којих сва три самостална и сва три су објављена у водећим научним часописима са SCI листе. Поред овога кандидат је своје резултате саопштио на неколико конференција и радних скупова уско специјализованих за област којом се кандидат бави.



На основу свега наведеног, како су испуњени и сви формални услови, предлажемо да се рукопис:

*“Унајређивање SMT решавача коришћењем CSP шехника и шехника паралелизације”*

Милана Банковића

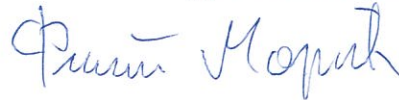
прихвати као докторска дисертација из рачунарства и да се закаже његова јавна одбрана.

У Београду,

28. 10. 2016.

*Комисија:*

ванр. проф. Математичког факултета Универзитета у Београду,  
др Филип Марић, ментор



ред. проф. Математичког факултета Универзитета у Београду,  
др Миодраг Живковић

ред. проф. Математичког факултета Универзитета у Београду,  
др Предраг Јаничић

научни саветник Математичког института у Београду,  
др Зоран Огњановић