

**Наставно-научном већу
Математичког факултета
Универзитета у Београду**

Одлуком Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитета у Београду, донетом на седници одржаној 23.01.2015. именовани смо у Комисију за преглед и оцену докторске дисертације „Унапређење хибридикацијом метахеуристика интелигенције ројева за решавање проблема глобалне оптимизације“ кандидата Небојше Бачанин Џакуле. После прегледања поднетог рукописа подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Биографски подаци кандидата

Небојша Бачанин Џакула рођен је 13.01.1983. године у Београду. Основну школу и гимназију завршио је у Београду. Основне студије завршио је на Факултету за пословне студије Мегатренд универзитета у Београду са просечном оценом 9,38. Мастер студије на Факултету организационих наука Универзитета у Београду, смер Информациони системи, завршио је 2008. године са просечном оценом 10,00. На докторским студијама на Математичком факултету Универзитета у Београду, смер информатика, положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом са просечном оценом 10,00.

Кандидат је објавио преко 20 научних радова у водећим међународним часописима индексираним на SCI листи (Thompson Reuters ISI), Scopus-у и/или MathSciNet-у, као и на међународним конференцијама индексираним у Web of Science, Scopus и/или IEEE Xplore. Ангажован је на пројекту III-44006 из програма интегралних интердисциплираних истраживања који се финансира од стране Министарства за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије у периоду 01.01.2011 – 31.12.2015, под називом „Развој нових информационо-комуникационих технологија, коришћењем напредних математичких метода, са применама у медицини, енергетици, телекомуникацијама, е-управи и заштити националне баштине“, чији је руководиоца др Зоран Огњановић, Математички институт Српске Академије наука и уметности.

Радови кандидата

N. Bacanin, M. Tuba: Fireworks Algorithm Applied to Constrained Portfolio Optimization Problem, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), Sendai, Japan, May 25-28, 2015, ISBN: 978-1-4799-7491-7, 978-1-4799-7492-4/15, IEEE Part number: CFP15ICE-USB, pp. 1242-1249 **(M33)**

M. Tuba, N. Bacanin: Hybridized Bat Algorithm for Multi-objective Radio Frequency Identification (RFID) Network Planning, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), Sendai, Japan, May 25-28, 2015, ISBN: 978-1-4799-7491-7, 978-1-4799-7492-4/15, IEEE Part number: CFP15ICE-USB, pp. 499-506 **(M33)**

- M. Tuba, N. Bacanin, M. Beko: Multiobjective RFID Network Planning by Artificial Bee Colony Algorithm with Genetic Operators, Lecture Notes in Computer Science Volume 9140: Advances in Swarm and Computational Intelligence, ISBN: 978-3-319-20465-9, Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-20466-6_27, 2015, pp 247-254 **(M13)**
- M. Tuba, N. Bacanin, R. Jovanovic: Hierarchical Multiobjective RFID Network Planning Using Firefly Algorithm, ISBN 978-1-4799-8966-9/15, International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC2015), IEEE and Khalifa University, Abu Dhabi, United Arab Emirates, May 17-19, 2015, pp. 279-282 **(M33)**
- M. Tuba, N. Bacanin, Adis Alihodzic: Multilevel Image Thresholding by Fireworks Algorithm, 25th International Conference Radioelektronika 2015 (MAREW 2015), IEEE and University of Pardubice, ISBN 978-1-4799-8117-5, IEEE Catalog Number: CFP1585B-PRT, Pardubice, Czech Republic, April, 21-22, 2015, pp. 326-330 **(M33)**
- M. Tuba, N. Bacanin, M. Beko: Fireworks Algorithm for RFID Network Planning Problem, 25th International Conference Radioelektronika 2015 (MAREW 2015), IEEE and University of Pardubice, ISBN 978-1-4799-8117-5, IEEE Catalog Number: CFP1585B-PRT, Pardubice, Czech Republic, April, 21-22, 2015, pp. 440-444 **(M33)**
- N. Bacanin, M. Tuba and I. Strumberger: RFID Network Planning by ABC Algorithm Hybridized with Heuristic for Initial Number and Locations of Readers, UKSim-AMSS 17th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge University (Emmanuel College), Cambridge, United Kingdom 25-27 March 2015, IEEE Computer Society, ISBN 978-1-4799-8712-2, DOI 10.1109/UKSim.2015.83, pp. 39-44 **(M33)**
- M. Tuba, A. Alihodzic and N. Bacanin: Cuckoo Search and Bat Algorithm Applied to Training Feed-Forward Neural Networks, ISBN:978-3-319-13825-1, Recent Advances in Swarm Intelligence and Evolutionary Computation, Studies in Computational Intelligence, Vol. 585, Springer International Publishing Switzerland, DOI 10.1007/978-3-319-13826-8_8, 2015, pp. 139-162 **(M13)**
- N. Bacanin, M. Tuba: Hybridized Fireworks Algorithm for Global Optimization, 6th European Conference on Applied Mathematics and Informatics (AMATHI '15), Tenerife, Canary Islands, Spain, January 10-12, 2015, ISBN: 978-1-61804-281-1, ISSN: 2227-4588, Mathematics and Computers in Science and Engineering Series 41, Mathematical Methods and Systems in Science And Engineering, pp. 108-114 **(M33)**
- M. Tuba, N. Bacanin: Artificial bee colony algorithm hybridized with firefly metaheuristic for cardinality constrained mean-variance portfolio problem, Applied Mathematics & Information Sciences, Vol. 8, No. 6, Nov. 2014, ISSN: 2325-0399, pp. 2831-2844, doi: 10.12785/amis/080619, **IF(2013)=1.232 (M21)**
- N. Bacanin, M. Tuba: Firefly Algorithm for Cardinality Constrained Mean-Variance Portfolio Optimization Problem with Entropy Diversity Constraint, The Scientific World Journal, special issue Computational Intelligence and Metaheuristic Algorithms with Applications, ISSN: 1537-744X, Volume 2014 (2014), Article ID 721521, 16 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/721521>, **IF(2013)=1.219 (M21)**
- M. Tuba, N. Bacanin: Improved seeker optimization algorithm hybridized with firefly algorithm for constrained optimization problems, *Neurocomputing*, Vol. 143, ISSN: 0925-2312, 2014, doi:10.1016/j.neucom.2014.06.006, pp. 197-207, **IF(2013)=2.005 (M21)**
- M. Tuba, N. Bacanin: JPEG Quantization Tables Selection by the Firefly Algorithm, The 4th IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS'14), Marrakesh, Morocco, April 14-16, 2014. IEEE Catalog Number: CFP14050-CDR, ISBN: 978-1-4799-3823-0, DOI:10.1109/ICMCS.2014.6911315, pp. 153-158 **(M33)**

N. Bacanin: Implementation and performance of an object-oriented software system for cuckoo search algorithm, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 6, Issue 1, ISSN: 1998-0159, 2012, pp. 185-193 (M51)

N. Bacanin, M. Tuba: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Constrained Optimization Improved with Genetic Operators, *Studies in Informatics and Control*, Vol. 21, No. 2, 2012, ISSN: 1220-1766, pp. 137-146, IF(2011)=0.578 (M23)

Предмет и структура тезе

У последњих двадесетак година дошло је до развоја низа стохастичких популационих метахеуристика за решавање тешких оптимизационих проблема, како из области комбинаторне, тако и из области глобалне оптимизације. Алгоритми интелигенције ројева, инспирисани природним биолошким системима, нарочито колонијама инсеката, раде са популацијом самоорганизујућих индивида (агената) које интер-реагују међусобно на локалном нивоу, а такође и на глобалном, са својим окружењем. Иако не постоји централна компонента која контролише и усмерава понашање појединаца, локалне итерације између појединаца резултују настанком глобално координисаног понашања. Анализом постојећих имплементација метахеуристика интелигенције ројева, уочени су недостаци и слабости у механизмима претраге простора дозвољених решења. Недостаци се пре свега односе на слабости у самој једначини претраге и на неодговарајућу интензификацију и диверсификацију. Један од начина за имплементацију значајнијих промена у функционисању алгоритама ројева је мешање, тј. хибридизација различитих приступа. Хибридни алгоритми ројева не настају „случајном“ комбинацијом појединих функционалних елемената и процедура различитих алгоритама, већ су они утемељени на свеобухватном изучавању начина на који алгоритми који се хибридују функционишу. На тај начин се у хибридни алгоритам инкорпорирају предности једних, док се истовремено елиминишу недостаци других алгоритама. Хибридни алгоритми ројева често дају много боље резултате од основних имплементација, али се до таквих хибрида долази теоретским увидом и емпиријски, где су чести неуспеси који такођер могу бити евидентирани јер могу указивати на структурну некомпатибилност појединих елемената одређених алгоритама. Предмет ове докторске дисертације је свеобухватан преглед постојећих имплементација алгоритама интелигенције ројева за решавање проблема глобалне оптимизације, компаративна анализа и приказ снага и слабости једних алгоритама ројева у односу на друге, утврђивање узрока и анализа недостатака механизма претраге алгоритама интелигенције ројева и унапређење процеса претраге алгоритама интелигенције ројева путем хибридизација. Новодобијени алгоритми тестирају се на стандардним скуповима бенчмарк функција, као и на практичним проблемима и упоређују са постојећим решењима у литератури.

Уводно поглавље описује класификације проблема оптимизације према типу варијабли, према ограничењима и броју функција циља као и таксономију оптимизационих алгоритама. Посебан је осврт на управљање ограничењима и стандардне скупове функција на којима се стохастички оптимизациони алгоритми тестирају.

У другом поглављу аутор даје преглед оптимизационих метахеуристика као што су табу претрага, диференцијална еволуција, генетски алгоритми, симулирано каљење и интелигенција ројева. Наведени су категоризација и основне особине ових алгоритама.

У трећем поглављу, обзиром да је то тема дисертације, детаљније се анализирају метахеуристике интелигенције ројева. Уз основне принципе по којима ови алгоритми функционишу, дају се специфичности значајнијих представника ове класе алгоритама. Детаљније се описују оптимизација мрављим колонијама, оптимизација ројевима честица, оптимизација претрагом кукавица, оптимизација јатом планктона и имунолошки алгоритама.

У четвртном поглављу аутор разматра хибридне алгоритме. Анализом функционисања метахеуристичких алгоритама интелигенције ројева утврђују се њихове слабости и могућности превазилажења тих слабости хибридизацијом. Описују се класификације хибридних алгоритама према улози појединих компоненти (са истом сврхом или са различитим сврхама), према подели посла (колаборативни или интегративни), као и комбинације са примерима.

У прва четири поглавља аутор даје прегледе, врши систематизацију и анализу. Пето поглавље кључно је поглавље ове дисертације у којем се дају најзначајнији доприноси аутора унапређењу метахеуристичке интелигенције ројева хибридизацијом. Детаљно се разматрају пет алгоритама интелигенције ројева: алгоритам вештачке колоније пчела, колонијама, алгоритам оптимизације претрагом свитаца, алгоритам људског трагача, алгоритам ватромета и алгоритам слепог миша. За сваки од наведених алгоритама анализирано је понашање током процеса оптимизације, размотрена интензификација и диверсификација, механизми којима се они остварују, као и њихов однос. Уочени су карактеристични проблеми ових алгоритама при решавању одређених класа проблема, утврђени узроци и анализом других оптимизационих алгоритама пронађене одговарајуће хибридизације које би уочене недостатке отклониле. Оваква су решења имплементирана, тестирана и упоређена са познатим добрим решењима из литературе. За наведених пет алгоритама изведене су успешне хибридизације које су дале боље резултате од познатих алгоритама, што је верификовано објављивањем у водећим часописима и на водећим конференцијама из ове области.

Остварени научни допринос истраживања

Рукопис даје преглед, систематизацију и анализу области хибридизације алгоритама интелигенције ројева за глобалну оптимизацију. Главни научни допринос представља верификовано побољшање постојећих алгоритама хибридизацијом.

Након анализе алгоритма вештачке колоније пчела, идентификован је проблем да процес експлоатације није довољно интензиван и да алгоритам конвергира превише споро ка оптималном региону простора претраге. Након великог броја циклуса извршавања алгоритма, када је оптимум скоро пронађен, овај недостатак је још израженији. Такође, у оригиналној АВС имплементацији, у раним циклусима пчела извиђач изводи диверсификацију која је неопходна да би се пронашао прави домен простора претраге. У каснијим циклусима, уз претпоставку да је претрага конвергирала ка оптималном региону простора претраге, снажнија интензификација је потребна. Основна једначина претраге АВС алгоритма базира се на оператору мутације, без експлицитне примене оператора укрштања, а процес селекције се врши на основу подобности индивидуа. Ново решење генерише се простом мутацијом

варијабле тренутног решења. Дакле, интензификација која се изводи без примене оператора укрштања утиче на спору конвергенцију ABC алгоритма. С друге стране, ABC метахеуристика је ефикасна у извођењу процеса диверсификације и зато се ретко дешава да се алгоритам заглави у субоптималним регионима. Успешно је дефинисана хибридизација елементима генетског алгоритма чиме је постигнут бољи баланс експлоатације и експлорације што је довело до бољих решења на стандардном скупу тест функција. Овај резултат објављен је као рад:

N. Bacanin, M. Tuba: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Constrained Optimization Improved with Genetic Operators, *Studies in Informatics and Control*, Vol. 21, No. 2, 2012, ISSN: 1220-1766, pp. 137-146, **IF(2011)=0.578 (M23)**.

Добијени хибридни алгоритам затим је успешно примењен на важан практични проблем оптимизације RFID мреже:

M. Tuba, N. Bacanin, M. Beko: Multiobjective RFID Network Planning by Artificial Bee Colony Algorithm with Genetic Operators, *Lecture Notes in Computer Science Volume 9140: Advances in Swarm and Computational Intelligence*, ISBN: 978-3-319-20465-9, Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-20466-6_27, 2015, pp 247-254 (**M13**)

За овај практичан проблем урађена је и додатна хибридизација хеуристиком за одређивање почетне локације читача у RFID мрежи:

N. Bacanin, M. Tuba and I. Strumberger: RFID Network Planning by ABC Algorithm Hybridized with Heuristic for Initial Number and Locations of Readers, *UKSim-AMSS 17th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Cambridge University (Emmanuel College), Cambridge, United Kingdom 25-27 March 2015, IEEE Computer Society, ISBN 978-1-4799-8712-2, DOI 10.1109/UKSim.2015.83, pp. 39-44 (**M33**)

Анализа алгоритма претраге свитаца показује да основни алгоритам даје добре резултате за проблеме глобалне оптимизације без ограничења. Међутим, када се примени на проблеме са ограничењима, овај алгоритам постиже лошије резултате на неким проблемима. Алгоритам свитаца нема јасно наглашену једначину диверсификације, а обзиром да ограничења значајно сужавају простор претраге, често се дешава да се у ранијим циклусима алгоритам заглави у субоптималном домену простора претраге. За проблеме са ограничењима, интензитет диверсификације у ранијим итерацијама није довољан. Овај недостатак успешно је отклоњен хибридизацијом. Механизам пчеле извиђача ABC алгоритма, који изводи процес експлорације, показао се и у експерименталним и у практичним имплементацијама као веома ефикасан механизам за проналажење правог дела простора претраге. Инкорпорирањем овог механизма у FA метахеуристику, снага диверсификације значајно је побољшана. Успешност хибридизације тестирана је на стандардним тест функцијама у раду који је на рецензији и на практичном проблему оптимизације портфолиа:

M. Tuba, N. Bacanin: Artificial bee colony algorithm hybridized with firefly metaheuristic for cardinality constrained mean-variance portfolio problem, *Applied &*

Information Sciences, Vol. 8, No. 6, Nov. 2014, ISSN: 2325-0399, pp. 2831-2844, doi: 10.12785/amis/080619, **IF(2013)=1.232 (M21)**

N. Bacanin, M. Tuba: Firefly Algorithm for Cardinality Constrained Mean-Variance Portfolio Optimization Problem with Entropy Diversity Constraint, The Scientific World Journal, special issue Computational Intelligence and Metaheuristic Algorithms with Applications, ISSN: 1537-744X, Volume 2014 (2014), Article ID 721521, 16 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/721521>, **IF(2013)=1.219 (M21)**

Испитивањем алгоритма ватромета је утврђено да алгоритам конвергира споро ка оптимуму због недовољно јаког процеса интензификације. С друге стране, утврђено је да се за класу проблема без ограничења алгоритам ретко заглављује у субоптималним доменима и због тога јака диверсификација која се изводи механизмом Гаусових варница није потребна. У основном FWA приступу не постоји експлицитна контрола над балансом између интензификације и диверсификације. У почетним итерацијама, диверсификација би требала да буде јача, а касније би требала да се смањује у корист интензификације. Међутим, у FWA приступу се током целог извршавања алгоритма процеси интензификације и диверсификације извршавају равномерно. У предложеном хибридном приступу, FWA-FS, уместо механизма Гаусове варнице, користи се FA једначина претраге. На тај начин је диверсификација смањена, а интензификација је значајно појачана. Тестирање на стандардним тест функцијама без ограничења показала су успешност овог хибрида:

N. Bacanin, M. Tuba: Hybridized Fireworks Algorithm for Global Optimization, 6th European Conference on Applied Mathematics and Informatics (AMATHI '15), Tenerife, Canary Islands, Spain, January 10-12, 2015, ISBN: 978-1-61804-281-1, ISSN: 2227-4588, Mathematics and Computers in Science and Engineering Series 41, Mathematical Methods and Systems in Science And Engineering, pp. 108-114 (**M33**)

Једначина претрага алгоритма слепог миша не користи експлицитно оператор укрштања, али се то надомешћује применом мутације, чији се интензитет мења током извршавања алгоритма. Међутим, једначина претраге, која је оријентисана ка најбољим решењима у популацији, понекад изазива проблеме. У ранијим итерацијама оваква претрага може да доведе до проблема преурађене конвергенције и алгоритам показује лошије просечне резултате. Због овога се такође дешава да алгоритам у ранијим итерацијама не успева да пронађе оптимални регион. Наведени проблеми могу да се исправе појачањем диверсификације, или применом метода који претрагу не оријентише ка тренутно најбољој јединки у популацији. Урађена је хибридизација са ABC алгоритмом кориштењем механизма пчела посматрача, чиме се оријентисана претрага ка најбољем решењу балансира са пробабилистичким процесом селекције на основу подобности индивидуа. Хибрид је тестиран на стандардним тест функцијама без ограничења, а затим на практичној примени планирања РФИД мреже:

M. Tuba, N. Bacanin: Hybridized Bat Algorithm for Multi-objective Radio Frequency Identification (RFID) Network Planning, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), Sendai, Japan, May 25-28, 2015, ISBN: 978-1-4799-7491-7, 978-1-4799-7492-4/15, IEEE Part number: CFP15ICE-USB, pp. 499-506 (**M33**)

На основу прегледа литературе може да се закључи да је алгоритам људског трагача углавном тестиран на специфичним проблемима, за које је алгоритам адаптиран. У тим посебним случајевима SOA постиже задовољавајуће перформансе зато што су контролни параметри алгоритма fino оптимизовани према специфичним потребама. Међутим, ефикасност овог алгоритма није довољно валидирана на скупу општих проблема глобалне оптимизације са ограничењима. Испитивањем је утврђено је да алгоритам нема довољно наглашен механизам интензификације који се усмерава само методом фази-закључивања. Чак и за релативно лак оптимизациони проблем, као што је тест функција G1, овај алгоритам не успева да пронађе оптимум, а просечне вредности су значајно лошије од резултата других метахеуристика. Такође, процес диверсификације који се изводи заменом потпуних решења између подпопулација даје резултате у ранијим итерацијама, али у каснијим циклусима овај механизам доноси више штете него користи, зато што би тада претрагу требало преусмерити на fino истраживање у околини најбољих решења. Утврђено је да овакав механизам понекада доводи до проблема преурањене конвергенције између подпопулација. Пошто је утврђено да FA метахеуристика има напредни механизам интензификације, наведени недостаци SOA исправљени су хибридизацијом са овим приступом. Тестирање на стандардним функцијама потврдило је квалитет овог приступа:

M. Tuba, N. Bacanin: Improved seeker optimization algorithm hybridized with firefly algorithm for constrained optimization problems, *Neurocomputing*, Vol. 143, ISSN: 0925-2312, 2014, doi:10.1016/j.neucom.2014.06.006, pp. 197-207, **IF(2013)=2.005 (M21)**

Закључак

У рукопису „Унапређење хибридизацијом метахеуристика интелигенције ројева за решавање проблема глобалне оптимизације“ кандидат Небојша Бачанин Џакула показао је систематично познавање области и проблема глобалне оптимизације алгоритмима интелигенције ројева и посебно, побољшања ових алгоритама хибридизацијом. Анализирани су постојећи и развијени нови алгоритми који дају боље резултате од досада познатих. Ови су резултати објављени у водећим часописима и водећим конференцијама из ове области и цитирани 220 пута према GoogleScholar-у, 105 пута према Scopus-у, 16 пута према Thomson-Reuters WoS-у, што сведочи о оствареном импакту и верификацији овог истраживања.

С обзиром на изложено, може се констатовати да су испуњени сви циљеви истраживања наведени приликом предлагања теме. Сматрамо да научно истраживање приказано у овом раду даје допринос у области глобалне оптимизације алгоритмима интелигенције ројева и побољшања ових алгоритама хибридизацијом. **Стога предлагемо Наставно-научном већу Математичког факултета Универитета у Београду да поменути рукопис прихвати као докторску дисертацију и одреди комисију за јавну одбрану.**

У Београду, 11. јуна 2015.

Чланови комисије:

др Милан Туба, ментор
ванредни професор, Математички факултет у Београду

др Миораг Живковић
редовни професор, Математички факултет у Београду

др Ђорђе Дугошија
редовни професор, Математички факултет у Београду

др Xin-She Yang
професор Middlesex универзитета у Лондону