

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Николе Д. Стојковића**

Одлуком бр. 5004/16-3 од 20.05.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Николе Д. Стојковића** под насловом

“Систем за надгледање поморског саобраћаја применом мреже изахоризонтских радара”

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала, разговора са Кандидатом који је резултирао мањим променама у тексту дисертације, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- Дана 13.10.2016. године, кандидат је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Управљање процесима и обрада сигнала;
- 30.09. 2020. године, кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације;
- 06.10.2020. године, Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање;
- 23.10.2020. године, Наставно-научно веће је именовало комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука бр. 5004/16-1) у саставу: др. Жељко Ђуровић, редовни професор (Електротехнички факултет), др. Миљко Ерић, ванредни професор

(Електротехнички факултет) и др. Мирослав Перић, виши научни сарадник (Институт Влатаком);

- 13.11.2020. године, кандидат је полагао јавну усмену одбрану теме;
- 16.12.2020. године, Наставно-научно веће усвојило је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука бр. 5004/16-2);
- 28.01.2021. године, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (бр. 61206-4499/2-20);
- 15.04.2021. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену;
- 05.05.2021. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.
- 20.05.2021. године Наставно-научно веће Факултета, одлуком бр. 5004/16-3, именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: Др Жељко Ђуровић, редовни професор (Универзитет у Београду, Електротехнички факултет), Др Миљко Ерић, ванредни професор (Универзитет у Београду, Електротехнички факултет) и Др Мирослав Перић (виши научни сарадник, Институт Влатаком);

Поднета верзија тезе проверена је у складу са правилима плагијаризма и у извештају добијеном од Универзитетске библиотеке "Светозар Марковић" наведен је резултат од 2 % сличности. Нађене подударности потичу од личних имена, библиографских података о коришћеној литератури и тзв. општих места и података. У складу са тим, Комисија је заузела став да теза представља оригиналан научни рад кандидата Николе Д. Стојковића.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Техничке науке - Електротехника и рачунарство, а ужа научна област је Обрада сигнала и управљање системима, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

За ментора докторске дисертације именован је проф. др. Срђан Станковић, професор емеритус Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Проф. др. Срђан Станковић се дуги низ година бави научно-истраживачким радом у области обраде сигнала, стохастичких система као и алгоритмима праћења покретних циљева, што је документовано релевантним научним радовима.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Д. Стојковић рођен је 31.05.1978. у Београду, у Републици Србији. У периоду од 1993 до 1997. године похађао је средњу Електротехничку школу "Никола Тесла" у Београду. Уписао је основне студије на Електротехничком факултету 1997. године, које је завршио 2005. године на одсеку за електронику, са просечном оценом 8.24. Докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2016/2017. године на модулу Управљање системима и обрада сигнала. Положио је све планом предвиђене испите са просечном оценом 10.0 и добио сагласност за израду докторске дисертације под називом "Систем за надгледање поморског саобраћаја применом мреже изахоризонтских радара".

Запошљава се у Институту Михајло Пупин, у Београду, 2005. године, на позицији развојног инжењера. На тој позицији се бавио развојем микроконтролерског фирмвера за AVR индустријске микроконтролере. Током 2006. године, прелази у фирму "AP Company", Београд, на позицију инжењера електронике и бави се програмирањем и инсталацијом SCADA уређаја и сензора. Учествоје у пројекту мерења оптерећења бродске преводнице бране ХЕ "Тердап 2". Потом, 2007. године, прелази у Безбедносно-информативну агенцију, где, као софтверски инжењер проводи 8 година у раду на пројектима затвореног типа. 2015. године, придружује се Институту Влатаком, на пројекту изахоризонтски радар (HF-OTHR), првом такве врсте у Србији, као старији софтверски инжењер. У току рада на пројекту бавио се израдом алгоритама за праћење циљева овог радара, дигиталној обради радарских података, фузијом сензора и софтверским системом за интегрисано надгледање морске површине применом мреже ових радара. Поседује највише професионалне сертификате из области програмирања компаније Microsoft.

У току докторских студија написао је или учествовао као коаутор на 4 научна рада категорије М21 (на једном раду као први аутор), једном раду категорије М24, 8 конференцијских радова и 4 техничка решења, углавном из области изахоризонтских радара.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Николе Д. Стојковића под насловом "Систем за надгледање поморског саобраћаја применом мреже изахоризонтских радара" написана је на 125 страна. Организована је у 7 поглавља и садржи 75 слика, 9 табела и 115 референци, нааведених по редоследу цитирања. Наслови поглавља су 1. Увод, 2. HFSSW радар као сензор и специфичности праћења поморских циљева HFSSW радарима, 3. Хеуристичке методе за праћење циљева у окружењу изахоризонтских радара, 4. Редукција лажних трагова у алгоритмима праћења у окружењу изахоризонтских радара, 5. Дизајн система за праћење поморских циљева, 6. Закључак и 7. Литература.

Текст дисертације садржи и: 1) насловне стране на српском и енглеском језику, 2) податке о ментору и члановима Комисије, 3) захвалницу, 4) посветни предговор, 5) резиме на српском и енглеском језику, 6) садржај, 7) биографију кандидата, 8) изјаву о ауторству, 9) изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторске дисертације и 10) изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација кандидата Николе Стојковића састоји се од уводног поглавља, једног прегледног поглавља, затим, три истраживачка поглавља, закључног поглавља и прегледа литературе.

У уводном поглављу кандидат Никола Стојковић прво указује на сложеност и актуелност проблема праћења поморских циљева изахоризонтским радарима. Кандидат описује елементе система за праћење циљева коришћењем ове врсте радара, под којима подразумева примену оваквих сензора у HF опсегу, заснованих на површинском таласу

(HFSW радари) и образлаже предмете истраживања дисертације, који се односе на алгоритме праћења поморских циљева и дизајн система за надзор мора заснованих на мрежама HFSW радара. Кандидат затим, образлаже мотивацију за писање дисертације, водећи се малим бројем научних радова из ове области, инфериорношћу примењених метода за праћење циљева и недостатку ефикасних практичних решења. При томе, излаже полазне хипотезе дисертације и специфицира методе које ће бити коришћене за њихово доказивање, а затим и очекиване научне доприносе дисертације. На крају увода дат је кратак преглед поглавља дисертације.

Садржај другог поглавља углавном је прегледног карактера. На почетку се успоставља оквир у коме се HFSW радари користе као сензори, излажу се њихови технички подаци и представља систем ових сензора, који је Институт Влатаком инсталирао у Нигерији, помоћу које ће се вршити истраживање у дисертацији, укључујући и AIS (*Automated Identification System*) сензоре, који су употребљени за потребе верификације резултата, као једина истинитосна референца на терену. Представљене су специфичности окружења за праћење циљева HFSW радарима. То се пре свега односи на више врста клатера (морски и јоносферски клатер) и ефекте смањења радарског одраза мета, услед промене радарске крос-секције мете. У оквиру овог поглавља изложен је кратак преглед физике морског клатера, који приближава читаоцу начин примене HFSW радара у процесу праћења циљева, уз демонстрације ефекта морског клатера при повећаној агитацији морске површине. Затим је извршен кратак преглед утицаја јоносферске интерференције на процес праћења циљева и указано је, демонстрацијом, на повећану густину клатера у погођеним зонама на излазу CFAR (*Constant False Alarm Rate*) блока за детекцију мета. Након упознавања са сензорима и проблемима праћења поморских циљева, објашњена је методологија којом су вршена истраживања. Описана је метрика за оцену општих и краткорочних перформанси праћења циљева и начин прикупљања података за статистичку анализу. Метрика се заснива на параметрима ToT (*Time on Target*) и FAR (*False Alarm Rate*). ToT параметар представља меру праћења мете HFSW радаром, потврђене AIS подацима, према укупном боравку мете у зони покривања радара. Са друге стране, све мете код којих не постоји поклапање AIS подацима, проглашавају се лажним, без обзира на могућност реалног постојања мете која не поседује AIS транспондер (тзв. некооперативни циљ), а FAR параметар представља укупно забележен број праћења лажних циљева у датом скупу скенирања радара, скалирано према површини зоне покривања сензора, одређеном опсегу растојања, углу у односу на радар итд. Овим параметрима оцењиване су перформансе праћења циљева HFSW радарима у доступним научним радовима. Након представљања метрике за оцену перформанси, извршен је детаљан преглед постојећих решења система за осматрање поморских циљева, публикованих у научним радовима, приликом којег је указано на поједине недостатке. То се пре свега, односи на непостојање детаљније разраде концепта интегрисаног осматрања мора, заснованог на HFSWR мрежама, непрактичних решења процедура праћења циљева, видних недостатака тих процедура и непостојања анализе перформанси праћења циљева у случајевима неповољних временских услова и појачане јоносферске интерференције.

Треће поглавље бави се оптималном конструкцијом процедуре за асоцијацију података, базираном на истраживањима особина окружења праћења поморских циљева, уз акценат на практичну применљивост алгоритама. За задати координатни систем, везан за положај HFSW радара и модел кретања циљева са приближно константном брзином и спорим маневрисањем, типичан за поморске циљеве, уз коришћење UKF (*Unscented Kalman Filter*) филтра, усвојена је структура процедуре асоцијације података, са применом просторног естиматора густине клатера, која за основу има JPDA (*Joint Probability Data Association*) алгоритам асоцијације података. Извршена су статистичка истраживања расподеле груписања асоцијација мерења и предикција трагова заснованог на густини, уз критеријум груписања (кластеризације) по Махаланобис растојању. Статистичка анализа је показала изразито висок проценат кластера мале величине, при знатно проширеној гејт граници, што показује добру изолацију кластера. Овим је омогућена формулација нове хеуристичке методе којом се асоцијације унутар

кластера решавају жељеном оптималном МТТ (*Multi Target Tracking*) методом за утврђене критеријуме комплексности кластера, за коју је изабрана JPDA док се комплекснији кластери решавају субоптималним МТТ методама. За субоптималну методу изабран је Рокер-Филисов JPDA алгоритам. За дефинисане критеријуме максималног времена извршења појединачних кластера и максимално време извршавања процедуре праћења, анализирани су величине кластера према критеријуму максималног броја могућих асоцијација. Експериментална анализа је показала да се мање од 2 % свих кластера извршава субоптималним алгоритмом, омогућавајући за потврђене трагове, приближно оптималне вредности асоцијација у преко 95 % случајева. Такође, извршавање хеуристичке процедуре праћења далеко је испод задатих лимита, што се постиже на једноставнијим рачунарима. Затим, извршена је анализа локализационих могућности алгоритма, користећи AIS податке, која показује добру прецизност праћења, дубоко унутар резолуционе ћелије радара, по свакој мереној величини. Садржај овог поглавља највећим делом представља извод из објављених научних радова, а поглавље представља део научних доприноса ове дисертације.

Четврто поглавље такође представља део научних доприноса дисертације и описује проблеме које изазивају сложени метеоролошки услови, у виду појачаног морског и јоносферског кластера, чија су природа и манифестације анализирани у поглављу 2. Приказан је негативни ефекат ових појава у смислу формирања великог броја лажних трагова, који ометају процес праћења циљева, а затим је предложена метода за ублажавање ове појаве. Формулација методе заснива се на статистичкој анализи понашања лажних трагова у скупу узорака у којима се јављају сложени услови праћења циљева. На основу дефинисаног фактора квалитета трага показано је да се максималне вредности овог параметра групишу у околини главне осе зрачења радара, уз, у просеку, релативно низак животни век трага. На основу расподеле максимума фактора квалитета потврђених и непотврђених трагова у односу на растојање и угао у односу на осу зрачења радара, дефинисана је критеријумска функција промоције трага, која је придружена правилима менаџмента трагова, дефинисаним у поглављу 3. Ефекат методе анализиран је експериментално, при чему је мерено побољшање параметара перформанси праћења, дефинисаних у поглављу 2. Анализа је показала драстично побољшање краткорочних показатеља FAR параметра директним поређењем ситуација, омогућавајући континуиран квалитет праћења циљева. Опште перформансе анализирани су поређењем ситуације пре и након примене методе, при чему се уочава мали пад ТоТ параметра, наспрам вишеструког смањења FAR, како општег, тако и у односу на растојање и угао према оси зрачења радара. На основу ових истраживања, конципирана је метода за праћење циљева заснована на IPDA алгоритму, чији је циљ да, поред спречавања промоције лажних трагова, ублажи и утицај исчезавања мета, услед флукуација радарске крос-секције мете, за чију основу је изабран IPDA VMC алгоритам, са варијабилним НММ (*Hidden Markov Model*), уз приложену процедуру дизајна параметара алгоритма, а пре свега граничних вредности вероватноће постојања циља као мере квалитета трага. Затим је размотрена и употреба LM IPDA алгоритма са линеарном комплексношћу, са циљем повећања рачунске ефикасности процедуре праћења.

У петом поглављу изложен је поступак дизајна система за праћење поморских циљева, базираних на мрежи HFSW радара, ослоњен на дефинисане концепте интегрисаног поморског осматрања, који су изложени у поглављу 2. Предложен је базични концепт IoT (*Internet of Things*) архитектуре овог система, његова топологија, дефиниције елемената и архитектура. Затим је дат преглед реализованих функционалности и поступак изградње алармног система мреже. Поред праћења циљева појединачних HFSWR сензора, процесирање података подразумева и друге процесе, као што су фузија HFSWR података и њихова интеграција са другим морнаричким сензорима, кондиционирање података, селекција и коначно, реализација оних функционалности које разнородним оператерима, тј. корисницима система омогућава ефективну контролу ситуације у области покривања сензора и стања саме опреме која тај систем сачињава. Функционална синтеза свих сегмената у целину и њена софтверска

реализација представља велики изазов и инжењерски допринос кандидата, а дат је и опис имплементације система и начин функционисања апликативног софтвера за мониторинг и поморско извиђање. На крају поглавља, извршена је демонстрација реализованих функционалности, а коришћени су снимци са активног система за праћење циљева, инсталираног у Нигерији, у Африци.

Шесто поглавље представља свеобухватни закључак дисертације у коме је извршена кратка рекапитулација проблема који су били предмет истраживања и предложених решења, истакнути су научни доприноси дисертације и правци даљих истраживања.

Седмо поглавље представља списак коришћених референци.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Један од разлога изузетне актуелности осматрања поморских области последњих година лежи у процвату организованог криминала, којим се угрожава сигуран проток робе и експлоатација ресурса у ексклузивним економским зонама (ЕЕЗ) поморских држава. Безбедносни аспект сигурног протока робе, пловидбе и живота учесника у поморском саобраћају условљава поморске нације да реше проблем мониторинга своје ЕЕЗ. Постоји неколико начина решавања овог проблема, поготово ако је циљ идентификација некооперативних пловила, која не користе AIS, иако су према међународним прописима обавезна. Један од приступа контроле ове зоне управо је употреба мрежа сензора базираних на изахоризонтским радарима. Концепти интегрисаног осматрања мора овим мрежама почели су свој развој у последњих 20 година, међутим, примера реализације који су барем делимично отворени за јавност је веома мало. Поред тога, постојећа литература не пружа довољан увид у примену модернијих технологија у архитектурама ових мрежа, као што су IoT концепти. Из тих разлога је развој нових решења у дизајну ових система за дистрибуирано мерење и управљање од великог значаја за унапређење знања о овим системима и побољшању њиховог функционисања. Важан аспект функционалности свакако је поуздан и непрекидан процес праћења циљева, који је у случају HFSW радара праћен феноменима слабљења одраза и ишчезавања мета, појавом фрагментираних трагова, формацијама лажних трагова насталих као последица повишене агитације морске површине и утицаја јоносферске интерференције. Излаз CFAR детектора радара типично је одликован изузетно великим локалним густинама клатера, поготово у претходно наведеним случајевима. Поред тога, постојећа публикована решења проблема праћења циљева нису пружила одговор на питање какав утицај имају атмосферске и метеоролошке појаве на комплетан процес праћења циљева, са становишта континуиране поузданости сензора, изузев појединих студија о утицају стања мора на праћење појединих класа бродова. Досадашња понуђена решења ослањала су се или на застареле технике праћења (на пример, α - β филтри) или су коришћене квалитетније процедуре праћења, базиране на JPDA методи, која није омогућавала ефикасну практичну употребу, због експоненцијалне комплексности алгоритма, без значајног осврта на саме особине окружења у којима су примењене.

Предмет истраживања кандидата управо је дизајн и поставка концепта система за интегрисано осматрање мора базираних на мрежама HFSW радара у складу са принципима IoT архитектура, са израженим нагласком на алгоритме праћења циљева појединачних HFSW радара. Изложен је концепт у коме је предложена звездаста топологија мреже, чиме се омогућује агрегациони мониторинг свих процеса из једног централног чвора, чиме се обезбеђује једноставна контрола и доступност мерних података, имајући у виду често лоше

комуникационе и инфраструктурне услове. Омогућен је даљински мониторинг свих аспеката мреже, уз диверзификацију приступних метода, преко Web сервиса и SNMP протокола. Затим је развијена нова метода која, применом кластеризације асоцијација мерења и предикција трага, ефикасно решава проблем праћења циљева, примењујући оптималне и субоптималне алгоритме праћења, конкретно JPDA и Рокер-Филисов алгоритам, чиме је постигнут услов извршавања процедуре праћења у реалном времену и на једноставном хардверу. Проблем појаве лажних трагова при лошим метеоролошким условима анализиран је експериментално, при чему је предложена метода за спречавање промоције ових трагова, омогућавајући драстичан пад FAR параметра радара, уз велико побољшање краткорочних перформанси праћења циљева, чиме је омогућен континуиран поуздан рад сензора при свим метеоролошким и атмосферским условима. Узимајући у обзир ова истраживања, предложена је и метода, заснована на IPDA VMC алгоритму, која применом варијабилних НММ модела третира вероватноћу постојања циља као главни услов конфирмације трагова, са циљем свеобухватног решења проблема слабљења одраза и појава лажних трагова, при чему је дизајн параметара конфирмације и брисања трага прилагођен експерименталним резултатима:

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак коришћене литературе броји 115 наслова и он се може, угрубо, поделити на 4 групе. Прву групу представља базична литература из више области. За потребе уводних и прегледних делова дисертације, у којима се објашњавао принцип рада изахоризонтских радара и указивало на феномене који прате процес праћења циљева, издвајају се следећи наслови: Н. Fabrizio, "High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles", 2013, М. Skolnik, "Radar handbook", 2008. Н. You, X. Jianjuan, G. Xin, "Radar Data Processing with Applications", 2016. Основне структуре система за праћење покретних циљева, проучаване крајем 20. века, заједно са проблемима асоцијације података, представљају следећу подгрупу базичне литературе, од којих су најважнији наслови: S. Blackman, and R. Popoli, "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", 1999 и Y. Bar Shalom and X. R. Li, "Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques", 1995. Тема интегрисаног осматрања морске површине и дизајн ових система актуелизована је у последњих 20 година, развијајући се и допуњајући савременим концептима умрежавања сензора и комуникације. У овој подгрупи базичних референци издвајају се: S. Greengard, "The Internet of Things", 2015, A. N. Ince, E. Topuz, E. Panayirci, C. Isik, "Principles of Integrated Maritime Surveillance Systems", Springer Science, 1998.

Другу групу референтних радова представљају радови из области праћења циљева из којих су директно проистекли резултати који се налазе у самој сржи ове дисертације. Развијена хеуристичка метода за праћење циљева ослања се на примену више различитих алгоритама за здружену асоцијацију података, а њену подлогу представљају наслови, на пример: Т. Fortmann, Y. Bar-Shalom, and M. Scheffe, "Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association", 1983, J. A. Roecker and G. L. Phillis, "Suboptimal joint probabilistic data association", 1993, D. Musicki and R. Evans, "Joint integrated probabilistic data association: JIPDA", 2002. У разматрањима примене IPDA класе алгоритама за решавање проблема лажних трагова, полазећи од основног научног рада D. Musicki, R. Evans, S. Stankovic, "Integrated probabilistic data association (IPDA)", 1994, конципирана је метода која користи вероватноћу детекције циља као критеријум егзистенције трага, при чему су, као основа послужили резултати приказани у научним радовима: X. Wang, D. Musicki, "Low elevation sea-surface target tracking using IPDA type filters," 2007, Ning Li, X. R. Li, "Tracker design based on target perceivability", 2001 и D. Musicki and B. La Scala, "Multi-target tracking in clutter without measurement assignment", 2008.

Трећу групу референтних радова представљају радови из домена IoT (Internet of Things) и дизајна система дистрибуираног управљања сензорима, који су послужили за израду и

реализацију IoT концепта система за интегрисано надгледање применом мреже изахоризонтских радара. Међу наслове који су утицали на реализацију и поставку овог концепта могу се издвојити: C. Buckl, S. Sommer, A. Scholz, A. Knoll, A. Kemper, J. Heuer, A. Schmitt "Services to the field: an approach for resource constrained sensor/actor networks", 2009 и P. Spiess, S. Karnouskos, D. Guinard, D. Savio, O. Baecker, L. Souza, V. Trifa "SOA-based integration of the internet of things in enterprise services", 2009.

Четврту групу референци представљају научни радови у којима су представљене реализације система за надзор поморског саобраћаја, у којима је вршено мерење перформанси праћења поморских циљева и који су коришћени од стране кандидата за поређење резултата. Овде је потребно истаћи и наслове који представљају основу концепта надгледања поморског саобраћаја применом мрежа изахоризонтских радара, као што је A. Ponsford, L. Sevgi, and H. C. Chan, "An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radars. 2. Operational status and system performance", 2001, а као најзначајније референце у којима су изложени примери праћења циљева и мерење перформанси ових процеса, могу се издвојити: A. Dzvонkovskaya, K.-W. Gurgel, H. Rohling, and T. Schlick, "Low power high frequency surface wave radar application for ship detection and tracking", 2010, P. Braca, S. Maresca, R. Grasso, K. Bryan and J. Horstmann, "Maritime surveillance with multiple over-the-horizon HFSW radars: An overview of recent experimentation", 2015 и S. Maresca, P. Braca, J. Horstmann, R. Grasso, "A network of HF surface wave radars for maritime surveillance: preliminary results in the German Bight", 2014.

Списак коришћене литературе је обиман и репрезентативан, а увидом у овај садржај стиче се утисак да је, радећи на својој докторској дисертацији, кандидат користио сву релевантну расположиву научну литературу, која је у директној вези са проблемима обрађиваним у дисертацији. Даље, прелиминарна анализа до сада постојећих резултата и алгоритама коју је кандидат извршио пре него што је демонстрирао своје резултате, указује на то да је Никола Стојковић у потпуности стекао увид у научну област, јасно сагледао доприносе и недостатке појединих решења, и тиме стекао право да на објективан начин пореди своје резултате са онима који су доступни у литератури.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања подразумевала је теоријско разматрање расположивих алгоритамских решења из области праћења циљева и истраживање постојећих решења везаних за дизајн мрежа HFSW радара, њихову примену у процесу праћења циљева и физичке проблеме везане за поменути процес. Из ових разматрања проистекло је формирање полазних хипотеза дисертације и формулација могућих решења уочених проблема. Улазећи у област праћења циљева HFSW радарима, дефинисана је методологија оцене краткорочних и општих перформанси праћења овим сензорима која се ослања на поређење добијених резултата са AIS подацима, као истинитом референцом. Применом ове методологије, кандидат се у свом истраживачком раду од научно-истраживачких метода првенствено ослањао на технике анализе, компарације, синтезе, експеримента и статистике.

Улазећи дубље у научну област праћења циљева HFSW радарима, кандидат је формулисао нову методу за праћење циљева у окружењу HFSW радара, која представља хеуристички приступ, применом метода кластеризације података по густини. Поступак формулације методе праћен је експерименталним и статистичким истраживањима над репрезентативним скупом узорака, ради потврде полазних хипотеза, уз изражен аналитички научно-истраживачки приступ, при чему су у експериментима мењани различити параметри, као што је гранична вредност гејта асоцијације, чиме је вршена компарација резултата према

променљивим параметрима и различитим HFSW сензорима у експерименталној мрежи HFSW радара.

Затим је формулисана метода за елиминацију лажних трагова при повишеној агитацији морске површине и израженом утицају јоносферске интерференције, где је критеријумска функција конфирмације и брисања трага одређена експерименталним и статистичким методама примењених над прикупљеним узорцима у којима се манифестују проблематичне појаве, при чему су углавном употребљене аналитичке и методе компарације у овој фази истраживања. Овај део истраживања карактерише и научни метод синтезе, јер се добијена метода фузионише са осталим правилима менаџмента трагова, формирајући здружену целину. Такође, у овој фази истраживања је конципирана и метода за интегративни приступ проблему праћења, базирана на IPDA класи алгоритама, добијена као резултат теоријских разматрања и која се ослања на експерименталне резултате.

Развијен је и концепт HFSW мрежа, заснован на IoT принципима, а који је резултат истраживања и анализе досадашњих решења. Реализоване апликације из апликативног слоја архитектуре система за надгледање послужиле су и за додатну евалуацију резултата примене метода, омогућавајући додатни елемент критичког осврта на постигнуте резултате.

Коначно, добијени резултати су документовани, уз дискусију и свеобухватан критички осврт на успешност предложених решења.

3.4. Применљивост остварених резултата

Генерално, применљивост резултата дисертације односи на процес праћења циљева HFSW радарима и дизајн мрежа за интегрисано осматрање мора, заснованих на овим сензорима. Истраживања и развој нових метода за праћење циљева HFSW радарима су директно евалуирана на основу података добијених са инсталиране мреже ових сензора у Нигерији у Африци, коју је извео Институт Влатаком. У поменутом систему извршена је имплементација изложеног концепта HFSWR мрежа и свих метода, чиме је постигнута и практична потврда резултата, што је више пута и истакнуто у дисертацији. Узимајући у обзир величину инжењерског подухвата, какав несумњиво представљају пројекти овог типа и успех који је тиме постигнут у смислу испуњења циљева и очекивања у својој употреби, утолико је значајнији и инжењерски и истраживачки допринос кандидата, који је представљен у овој дисертацији.

Вршена истраживања особина окружења приликом праћења циљева изахоризонтским радарима у условима неповољних услова извиђања, дошло се до закључака који важе за феномене који се јављају код изахоризонтских радара са применом емитујућег таласа у HF опсегу, па је и практична применљивост изведене методе за ублажавање појаве лажних трагова ограничена на овај тип сензора. Изведена метода за праћење циљева, заснована на груписању података има вишеструку применљивост. Поред примене у сценарију праћења изахоризонтским радарима, метода има велики потенцијал примене у случајевима потребе решавања проблема праћења циљева у окружењима сличних карактеристика, уз одговарајуће модификације модела кретања или узимајући у обзир неке специфичности других коришћених сензора.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Увидом у приложену докторску дисертацију, као и на основу контаката и разговора које су чланови Комисије имали са кандидатом током израде његове докторске дисертације,

Комисија је стекла несумњиви утисак да је кандидат у стању да самостално уочава проблеме, да из доступне литературе препознаје елементе који су од веће или мање важности за њихово решавање, да у реалним инжењерским пројектима препознаје простор у коме се теоријски резултати могу искористити у циљу побољшања постојећих решења, а истовремено има и знање и ентузијазам да таква решења имплементира на доступне хардверске платформе. Такође је, што је нарочито важно, кандидат стекао могућност да критички анализира постојећа решења. Током времена, напредујући кроз рад, испољио је захтевану научну зрелост и оспособљен је за даљи успешан научно-истраживачи рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Током истраживања и рада на докторској дисертацији кандидат је остварио врло значајне резултате који се могу исказати кроз следеће доприносе:

1. На основу исцрпних истраживања систематизоване су особине окружења за праћење поморских циљева, у којима је показано да расподеле асоцијација мерења и предикција трагова формирају добро изоловане кластере малих димензија а по критеријуму груписања Махаланобис растојања мерења и предикције трага.
2. Истраживањем порекла и особина лажних трагова у неповољним метеоролошким условима, установљено је да формирану лажни трагови поседују, поред, кратког времена трајања, и ниже усвојене показатеље квалитета трага од потврђених истинитих трагова, у зависности од растојања и угла према HFSW радару, са критичним вредностима концентрисаним у околини главне осе зрачења радара. Овај научни допринос има изузетну употребну вредност у применама система за праћење циљева коришћењем изахоризонтских радара.
3. Формулисана је субоптимална хеуристичка метода за решавање проблема праћења у реалном времену у окружењу изахоризонтских радара, заснована на истраживањима особина окружења за праћење поморских циљева, користећи методе кластеризације података.
4. Формулисан је предлог методе за ублажавање појава лажних трагова узрокованих штетним рефлексијама од морске површине и јоносферских слојева у забележеним случајевима великих агитација морске површине и јоносферских повраћаја, базиран на истраживањима особина лажних трагова.
5. Конципиран је метод базиран на варијантама IPDA алгорита, којим је установљена вероватноћа егзистенције трага, као једини прави фактор за оцену квалитета трага, чији дизајн граничних вредности конфирмације и елиминације трага прати резултате истраживања у смислу прилагођења условима праћења циљева у окружењу изахоризонтских радара.
6. Извршена је анализа побољшања генералних и краткорочних перформанси праћења изахоризонтских радара у најгорим метеоролошким условима, која је показала драстично побољшање краткорочних перформанси радара у најгорим метеоролошким условима при примени методе ублажавања појаве лажних трагова, док су мерене генералне перформансе показале вишеструко смањење фактора лажних аларма
7. Извршена је анализа прецизности, тј. локализационих својстава процедуре праћења истинитих трагова у односу на референтне AIS податке, која је показала добру прецизност процедуре праћења, са одступањима по свакој мереној величини дубоко унутар резолуционе ћелије радара.
8. Изложен је концепт система за интегрисано осматрање мора применом HFSWR мрежа и специфичности које се односе на њену имплементацију. Предложен је концепт и реализација решења које обезбеђује свеукупну контролу и мониторинг не само појединачних процеса за

обраду података, већ и секундарних сензора и контролабилних хардверских елемената, као и диверзификацију начина приступа систему. Извршена је и софтверска реализација овог концепта, а која представља, како научни, тако и инжењерски допринос аутора.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У фокусу истраживања у оквиру ове дисертације била је конструкција оптималне процедуре праћења циљева за окружење HFSW радара, са циљем ублажавања ефеката ишчезавања мета и елиминације лажних трагова узрокованих неповољним метеоролошким условима, чија алгоритамска ефикасност омогућава употребу у реалном времену. Коначан облик ове процедуре праћења, резултат је истраживања особина окружења у коме ови сензори раде, које је довело до формулације методе за асоцијацију података, која на приближно оптималан начин решава проблем асоцијације података, уз ефикасно извршавање алгоритма. Посебном, експериментално развијеном методом драстично је ублажен утицај лоших метеоролошких и атмосферских услова на процес праћења циљева, а која са претходном методом чини комплетну целину. Дат је и концепт методе, који се заснива на претходним истраживањима и употреби вероватноће постојања циља, као оцене веродостојности трага, базиран на варијабилном НММ моделу стања трага. Предложене методе унапређују перформансе праћења циљева, што је показано извршеним анализама. На крају, предложен је и концепт HFSWR мрежа, заснован на IoT принципима, којим је обухваћен мониторинг како главних, тако и секундарних сензора у мрежи, уз софтверску имплементацију IoT архитектуре система, чија је демонстрација рада такође приложена. Предложене методе и имплементирана архитектура такође имају своју примену и потврду у пракси. На овом месту треба навести и ограничења која приказани концепт и решење показују. Прво ограничење јесте везано за тип сензора који се користи у систему праћења, а у овом случају је то мрежа изахоризонтских радара. Треба напоменути да је приказани концепт испројектован за такву врсту радара као сензора и да би употреба било којих других мерних уређаја захтевала додатну модификацију или концепта или параметара у оквиру блокова за менаџмент и асоцијацију трагова опсервацијама, или оба. Са друге стране, предложено решење је тестирано на карактеристичном подручју отвореног мора и вероватно је, имплицитно, географско окружење утицало на поједине изборе у току пројектовања. Другим речима, неки другачији геоморфолошки амбијент приобаља би, сигурно, захтевао прилагођење и модификацију система конкретним условима окружења.

4.3. Верификација научних доприноса

У циљу верификације научних доприноса, наводимо списак радова, које је кандидат Никола Стојковић публиковао, радећи на изради своје дисертације:

Категорија M21:

1. **N. Stojkovic**, D. Nikolic, S. Puzović, "Density Based Clustering Data Association Procedure for Real-Time HFSWRs Tracking at OTH Distances" in IEEE Access, vol. 8, pp. 39907-39919, 2020, ISSN / eISSN: 2169-3536, doi: 0.1109/ACCESS.2020.2976481 (IF = 3.745)
2. M.a.R.M. Mostafa, M. Vucetic, **N. Stojkovic**, N. Lekic, A. Makarov, "Fuzzy Functional Dependencies as a Method of Choice for Fusion of AIS and OTHR Data", Smart Sensors and Devices in Artificial Intelligence – Sensors, 19(23), 2019, 5166. ISSN / eISSN:1424-8220, doi:10.3390/s19235166 (IF = 3.275)

3. D. Nikolić, **N. Stojković**, Z. Popović, N. Tosić, N. Lekić, Z. Stanković, N. Doncov, "Maritime Over the Horizon Sensor Integration: HFSWR Data Fusion Algorithm", *Remote Sensing*, 11(7), 2019, ISSN / eISSN: 2072-4292, doi:10.3390/rs11070852, doi:10.3390/rs11070852 (IF=4.509)
4. D. Nikolic, **N. Stojkovic**, N. Lekic, "Maritime over the horizon sensor integration: High frequency surface wave radar and automatic identification system data integration algorithm," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1147, 2018. doi: 10.3390/s18041147, ISSN / eISSN:1424-8220, (IF = 3.275)

Категорија М24:

1. D. Nikolić, **N. Stojković**, P. Petrović, N. Tosić, N. Lekić, Z. Stanković, N. Doncov, "The high frequency surface wave radar solution for vessel tracking beyond the horizon", *Facta Universitatis: Series Electronics and Energetics*, Vol. 33, No 1, March 2019, pp. 37-59 ISSN/eISSN: 0353-3670/2217-5997

Категорија М33:

1. **N. Stojković**, D. Nikolić, B. Džolić, N. Tošić, V. Orlić, N. Lekić, and B. M. Todorović, "An implementation of tracking algorithm for over-the-horizon surface wave radar," in *Proc. 24th Telecommun. Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, Nov. 2016, pp. 1–4
2. **N. Stojković**, D. Nikolić, V. Orlić, B. Džolić and N. Lekić, "Implementation of the Monitoring System for HFSWR-based Maritime Surveillance Networks", *Proc. of IcETRAN*, Sept. 2020, pp 163-168
3. **N. Stojkovic**, V. Orlic, M. Peric, D. Drajić, A. Rakic "Concept of System for Surveillance and Monitoring of IoT HFSWR Network", *Proc. of IcETRAN*, Sept. 2020, pp 157-162
4. **N. Stojkovic**, D. Nikolic, P. Petrovic et al. "An Implementation of DBF and CFAR Models in OTHR Signal Processing," in *Proc. CSPA 2019*, Penang, Malaysia, March 2019, pp.7-11
5. D. Nikolic, **N. Stojkovic**, N. Lekic, V. Orlic, B. Todorovic, "Integration of AIS data and HF—OTHR tracks in unfavorable environment at OTH Distances", In *Proceedings of the IcETRAN 2016*, Zlatibor, Serbia, 13–16 June 2016
6. D. Nikolic, Z. Popovic, M. Borenovic, **N. Stojkovic**, V. Orlic, A. Dzvонkovskaya, B. Todorovic, "Multi-Radar Multi-Target Tracking Algorithm for Maritime Surveillance at OTH Distances". In *Proceedings of the 2016 17th International Radar Symposium (IRS)*, Krakow, Poland, 11–15 May 2016, pp 153-159
7. P. Petrović, N. Grbić, **N. Stojković**, D. Nikolić, N. Lekić, "Implementation of algorithm for excision of point targets from distributed radar detections", In *Proc. of 6th IcETRAN 2019*, Srebrno Jezero, Serbia, 3 - 6 June 2019, pp. 1000–1004
8. N. Grbić, P. Petrović, D. Nikolić, **N. Stojković**, V. Orlić, "Analysis of different window function effects on DBF in HFSWR signal processing", In *Proc. of 6th IcETRAN 2019*, Srebrno Jezero, Serbia, 3 - 6 June 2019, pp 1005-1009

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Николе Стојковића под називом "Систем за надгледање поморског саобраћаја применом мреже изахоризонтских радара" која је написана на српском језику, је у целини написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији се на квалитетан, доследан и исцрпан начин анализира проблем пројектовања система за праћења покретних циљева применом мреже изохоризонтских радара, јасно се формулишу проблеми са којима се овакви системи срећу а који нису на адекватан начин решени у савременој и доступној научној и стручној литератури, дефинишу се основни елементи и принципи пројектовања таквог система, и на врло уверљив начин илуструје значај таквог система који би функционисао у реалном времену. Полазећи од јасно дефинисане формулације проблема решавања утицаја агилне површине воде и интензивног јониферског зрачења, конципиран је метод базиран на варијантама IPDA алгорита, којим је установљена вероватноћа егзистенције трага као једини прави фактор за оцену квалитета трага. Даље је у докторској дисертацији изложен концепт система за интегрисано осматрање мора применом HFSS мрежа и специфичности које се односе на њену имплементацију. Предложен је концепт и реализација решења које обезбеђује свеукупну контролу и мониторинг не само појединачних процеса за обраду података, већ и секундарних сензора и контролабилних хардверских елемената, као и диверзификацију начина приступа систему.

Кандидат Никола Стојковић је показао способност за самостални научни рад, што потврђује и чињеница је објавио неколико научних радова који су проистекли из истраживања приказаних у оквиру ове тезе, а у којима се појављује као први коаутор. Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирани и решавани проблем актуелан и савремен, као и да садржи научне доприносе, Комисија констатује да је кандидат Никола Стојковић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Имајући у виду напред наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом “Систем за надгледање поморског саобраћаја применом мреже изохоризонтских радара” кандидата Николе Стојковића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 27.05.2021.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Жељко Ђуровић, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Миљко Ерић, ванредни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Мирослав Перић, виши научни сарадник,

Институт Влатаком