

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Горана Б. Марковића.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 928/3 донетој на 770. седници одржаној 21.01.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Горана Б. Марковића под насловом

Кооперативна аутоматска класификација сигнала по типу модулације коришћењем мреже сензора

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је тему под насловом „*Кооперативна аутоматска класификација сигнала по типу модулације коришћењем мреже сензора*“ пријавио 01.10.2013. године. Научно-наставно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на 767. седници одржаној 08.10.2013. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Мирослав Л. Дукић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Предраг Н. Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Горан З. Марковић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет), др Миљко М. Ерић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), и др Дејан Д. Драјић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Извештај комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације је усвојен на 768. седници Наставно-научног већа ЕТФ одржаној 05.11.2013. године. Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предложену тему докторске дисертације на седници одржаној 18.11.2013. године.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 08.01.2014. године, а Наставно-научно веће ЕТФ је на 770. седници одржаној 21.01.2014. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Мирослав Л. Дукић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Предраг Н. Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Горан З. Марковић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет), др Миљко М. Ерић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), и др Дејан Д. Драјић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Кандидат је дана 15.12.2005. године одбранио магистарску тезу на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Техничких наука - електротехнике, а у ужем смислу научној области Телекомуникације. За ове области матичан је Електротехнички факултет. Именовани ментор дисертације је др Мирослав Л. Дукић, редовни професор на Електротехничком факултету Универзитета у Београду због значајних научних доприноса у области теме докторске дисертације, како у широј у области бежичних телекомуникационих система, тако и у специфичној области аутоматске класификације сигнала по типу модулације (*Automatic Modulation Classification*, АМС) којом се бави предметна дисертација.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Горан Б. Марковић рођен је у Неготину 10.08.1973. године, где је завршио Основну школу 1988. године, а Неготинску гимназију 1992. године. Основне студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 1992. године, и завршио их 1998. године на Одсеку ЕТА - смер ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ, са просечном оценом 9.21 током студија. Дипломски рад под називом „*Мерење широкопојасних карактеристика радио канала помоћу осцилоскопа HP54600A*“, који је оцењен највишом оценом, одбранио је 5.02.1998. године. Током студија је био стипендиста Министарства за науку и образовање Републике Србије. Постдипломске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 1999. године године на смеру ТЕЛЕОМУНИКАЦИЈЕ, и завршио их је 2005. године са просечном оценом 10.00 током студија. Магистарски рад „*Анализа алгоритама за аутоматску класификацију радио сигнала по типу модулације*“ одбранио је 15. децембра 2005. године и стекао звање магистра електротехничких наука за област телекомуникација.

У целокупном периоду након завршетка студија запослен је на Електротехничком факултету у Београду. У априлу 1998. године запослен је у звању стручног сарадника при Катедри за телекомуникације. За асистента-приправника на Катедри за телекомуникације изабран је у новембру 1998. године, док је у звање асистента на истој катедри изабран у септембру 2006. године. Од септембра 2000. године до јула 2001. године налазио се на одслужењу војног рока. Током свог ангажовања на Електротехничком факултету у Београду, учествовао је у извођењу наставе из великог броја предмета из области телекомуникација на основним и мастер студијама. Поред наставне активности, учествовао је као пројектант сарадник или одговорни пројектант у реализацији већег броја (више од 50) стручних и научних пројеката, студија, и других послова изведених на Електротехничком факултету.

Као сарадник је учествовао на пет пројеката технолошког развоја финансираних од стране Министарства Републике Србије надлежног за област науке и технолошког развоја у периоду од 2002. године до 2014. године. Тренутно је ангажован на два пројекта, и то: „Напредне технике ефикасног коришћења спектра у бежичним системима“ (ТР 32028, пројектом руководи Електротехнички факултет, Београд), и „Истраживање и развој робусних система за пренос података и њихова примена у корпоративним мрежама“ (ТР 32037, пројектом руководи Институт Михајло Пупин, Београд).

Горан Б. Марковић је првопотписани аутор једног рада у међународном часопису са импакт фактором. Такође је аутор или коаутор 9 радова у часописима националног значаја,

5 радова на конференцијама међународног значаја, као и 10 радова на конференцијама националног значаја. Кандидат је и коаутор два призната техничка решења.

Положио је стручни испит за дипломиране инжењере електротехнике за стручну област Телекомуникациони системи и мреже у јануару 2008. године, а у септембру 2009. године стекао је Лиценцу одговорног пројектанта за област Телекомуникационих система и мрежа при Инжењерској комори Србије. Члан је Друштва за телекомуникације, као и међународног удружења инжењера IEEE. Говори енглески језик. Ожењен је и има двоје деце.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 224 страна куцаног текста и садржи 143 слика, 11 табела и 209 библиографских референци. Дисертација садржи насловну страну, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, листе акронима, слика и табела, 7 поглавља, списак коришћене литературе и два додатка. Наслови поглавља докторске дисертације су:

1. Увод,
2. Преглед класичних АМС решења са пријемом сигнала коришћењем једног пријемника,
3. Класификација радио сигнала по типу модулације на основу кумуланта четвртог реда,
4. Кооперативна АМС решења на основу централизоване фузије,
5. Кооперативна АМС решења са применом двостепене хибридне фузије,
6. Могућност примене метода фузије у класичним решењима АМС на основу кумуланата,
7. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дисертације изложени су основни принципи аутоматске класификације сигнала по типу модулације, као и мотивација за развој, истраживање и примену решења у форми кооперативне АМС на основу коришћења мреже просторно дистрибуираних сензора. Описане су традиционалне области примене АМС, као и настанак нових области и модалитета примена као последице развоја модерних бежичних телекомуникационих система у складу са концептима софтверски дефинисаног радија и когнитивног радија, као и развоја и примене сензорских и других *ad-hoc* бежичних мрежа. Објашњени су основни концепти класичних решења за АМС са пријемом сигнала коришћењем једног сензора (пријемника), као и нови захтеви и проблеми који се јављају у овој области појавом нових генерација радио система. Дати су и основни разлози за даљи развој области АМС у правцу примене кооперативних АМС решења. На крају уводног поглавља дефинисани су циљеви истраживања, преглед структуре и очекиваних доприноса рада.

У другом поглављу дат је сажети преглед тренутног стања у области класичних решења за АМС са пријемом сигнала коришћењем једног сензора. Дефинисан је начин рада, модел система и делови извођења процеса АМС. Дата је класификација постојећих АМС поступака, уз сажети преглед до сада предложених АМС поступака по посебним класама, у складу са концептом извођења поступка класификације, параметара (обележја) сигнала на

основу којих се овај поступак изводи, као и начина спровођења поступка одлучивања. Основни циљ овог излагања био је да се укаже на постојећа решења у овој области, и то у погледу принципа рада, остваривих перформанси, основних предности, ограничења и недостатака посматраних решења, као и могућностима и евентуалним проблемима при њиховој примени у развоју решења за кооперативну АМС. При томе, посебно су наглашене предности које пружају АМС поступци засновани на примени кумуланата вишег реда, који су и усвојени као основа за развој и истраживање решења за кооперативну АМС у оквиру дисертације.

Детаљан опис поступка АМС на основу кумуланта четвртог реда, усвојеног као основе за развој решења за кооперативну АМС, приказан је у трећем поглављу. При томе, дати су описи поступка естимације вредности кумуланта, као и модалитета корекције ове процене коришћењем метода за естимацију параметара радио канала у којима се јавља фединг услед вишеструке пропагације (*Multipath Fading*, MPF) у оквиру самог АМС поступка. Како квалитет остварене процене кумуланта четвртог реда има пресудан утицај на перформансе АМС поступка, односно на могућност и успешност примене овог поступка у кооперативној АМС, извршена је естимација основних статистичких параметара ове процене, односно перформанси АМС поступка у коме се она користи. Овај поступак естимације извршен је емпиријским путем применом нумеричке анализе у форми Монте-Карло симулација са наменски развијеним симулационим моделима. При томе, дефинисани су статистички модели канала са MPF, са равним и фреквенцијски-селективним федингом, сам поступак естимације, као и параметри симулационог модела којима се описују утицаји пропагационог окружења и обраде сигнала у поступку класификације. Детаљно су приказани резултати естимације, са одговарајућом анализом утицаја свих параметара коришћених симулационих модела на квалитет процене кумуланта. Естимиране вредности статистичких параметара процене, тј. средња вредност и варијанса, као и АМС перформанси користе се у кооперативној АМС као референтне вредности при извођењу фузије, и битно утичу на квалитет самог решења за кооперативну АМС.

Четврто поглавље представља централни део дисертације, и у њему је дат детаљан приказ и анализа до сада предложених решења за кооперативну АМС, уз посебан нагласак на решења са централизованом фузијом која се посматрају као основни правац развоја у овој области. Осим тога, приказана је анализа услова и начина евалуације перформанси постојећих решења у доступној литератури. Указано је на одређене недостатке у процесу анализе и евалуације перформанси, услед којих се не могу уочити неки од проблема који се јављају у реалној примени, као што су коришћење у пракси недоступних идеализованих референтних вредности за потребе извођења фузије, делимичног занемаривања утицаја некооперативности извођења поступка АМС, као и недовољно детаљног посматрања утицаја пропагационог окружења и просторног распореда сензора. На основу резултата ове анализе дефинисани су основни параметри симулационог модела који је у оквиру дисертације коришћен за евалуацију перформанси постојећих и овде предложених решења за кооперативну АМС са централизованом фузијом. Посебно је наглашено испитивање утицаја неусклађених референтних вредности, који је неизбежан у пракси, и који изазива изузетно велике губитке перформанси код решења са централизованом фузијом. На основу закључака изведених при анализи постојећих метода фузије, заснованих претежно на концепту фузије 'тврдох' одлука (*hard decision fusion*, HDF), развијен је и дефинисан већи број оригиналних метода фузије на основу концепта фузије података (*data fusion*, DaF) и фузије 'меких' одлука (*soft decision fusion*, SDF). Приказани су основни резултати нумеричке анализе у циљу евалуације перформанси решења за кооперативну АМС на основу примене постојећих и овде предложених метода фузије, којом су верификовани значајни добици у смислу АМС перформанси које се могу остварити применом предложених решења метода фузије у односу на постојећа решења, како у идеализованим тако и у посматраним реалним сценаријима примене. У готово свим од анализираних сценарија примене, најбоље АМС

перформансе оствариване су применом неког од метода фузије предложених у дисертацији. У другом делу поглавља дат је предлог оригиналног метода здружене корекције процене кумуланата на основу прикупљених вредности из свих сензора мреже. Спроведеном нумеричком анализом показано је да се применом овог поступка могу остварити значајно побољшања АМС перформанси за одређене реалне сценарије примене кооперативне АМС у којима се јавља лош квалитет процене кумуланта у сензорима мреже услед неповољних утицаја окружења пропагације. Нарочито значајни добици приказани су за случај канала са MPF у којима се јавља фреквенцијски-селективан фединг са доминантном компонентом импулсног одзива, а којим се између осталог моделује случај неидеалне еквилизације канала у фази предобраде.

У циљу даљег смањивања утицаја ученог неповољног ефекта примене неусклађених референтних вредности у процесу фузије, у петом поглављу је предложен оригинални поступак двостепене хибридне фузије (*hybrid two-stage fusion*, HyTSF), који подразумева хијерархијску физичку или логичку организацију кооперативне мреже уз примену DaF, SDF и HDF у првом и HDF у другом кораку фузије. Дефинисани су основни сценарији примене оваквог решења у оквиру когнитивних радио мрежа и бежичних сензорских мрежа.

Додатно унапређење поступка класификације при пријему сигнала преко канала са MPF у којима се јавља равни фединг или фреквенцијски-селективан фединг без доминантне компоненте при простирању сигнала, дато је у шестом поглављу. Показано да се за ова два случаја канала повећањем дужине опсервације сигнала, тј. дужине узорка, не повећава квалитет процене кумуланта а самим тим ни успешност класификације. Стога је дат предлог оригиналног решења са сегментацијом узорка сигнала и примене метода фузије над проценама кумуланта добијених за поједине сегменте. Алтернативно је предложено слично решење са применом фузије за већи број узастопних опсервација. Приказани су и анализирани резултати извршене нумеричке анализе коришћењем развијених симулационих модела, и показано је да се применом предложених поступака значајно повећава успешност класификације у сензорима кооперативне мреже, што омогућава даље повећање укупних перформанси на нивоу мреже кроз поступак централизоване фузије одлука, и то у реалним условима примене.

У седмом поглављу дисертације изложени су најзначајнији закључци спроведеног поступка истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација се бави тренутно актуелном облашћу аутоматске класификације сигнала по типу модулације која се може изводити применом кооперативности у мрежама са инхерентним просторно дистрибуираним сензорима. Примери таквих мрежа су когнитивне радио мреже, бежичне сензорске мреже, *ad-hoc* бежичне телекомуникационе мреже, али и савремени системи за контролу и надгледање радио-фреквенцијског (РФ) спектра који се развијају у правцу примене великог броја РФ сензора као основе за детекцију, локализацију, идентификацију и класификацију извора електромагнетне емисије мале снаге. Основне нове примене класичне АМС, а нарочито кооперативне АМС, сагледавају се кроз даљи развој софтверски дефинисаног радија, а поготово когнитивног радија, у коме се применом ових поступака омогућава потпуна адаптивност поступка модулације, модалитета преноса и избора радио канала у циљу прилагођавања условима окружења и захтевима комуникације у сложенем мрежном окружењу. Област истраживања класичних АМС поступака значајно је проширена у

последњих неколико година, док су кооперативна АМС решења као могући даљи правац развоја области веома актуелна у тренутној литератури.

Докторска дисертација се бави применом метода централизоване фузије над независно генерисаним (некорелисаним) локалним одлукама, или проценама параметара (обележјима) сигнала на основу којих се обавља поступак класификације. Конкретни анализирани проблеми, као и повећан значај примене АМС, препознати су као релевантни у литератури током претходних неколико година. У прилог томе говори и чињеница да су до сада предложена решења била ограничена углавном на најједноставнији модел са фузијом одлука (HDF) при чему су предложена решења разматрана углавном за идеализоване сценарије примене, који су значајно једноставнији од оних који су посматрани у оквиру дисертације. У дисертацији је дат већи број оригиналних предлога метода фузије на бази концепта фузије података (DaF) и фузије ‘*меких*’ одлука (SDF), као и низ оригиналних метода за унапређење успешности класификације као што су здружена корекција процена кумуланата, хибридна двостепена фузија, односно примена сегментације и фузије при извођењу класификације у сензорима кооперативне мреже.

Додатно, у дисертацији је дата детаљна анализа утицаја коришћења неусклађених референтних вредности, који се практично не може избећи у реалној примени кооперативне АМС, што је од изузетног значаја. Наиме, целокупан процес фузије заправо се ослања на поузданост процене квалитета независно генерисаних локалних резултата у сензорима мреже, изражен управо кроз ове референтне вредности. Оваква анализа, као ни сагледавање овог проблема, нису били раније дати у доступној литератури.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је веома детаљно истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 209 библиографских референци. Наведена литература садржи најновије радове релевантне за проблематику истражену у дисертацији, при чему је кандидат Горан Б. Марковић аутор или коаутор 14 радова.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је анализирана постојећа литература у широј области аутоматске класификације сигнала по типу модулације. При томе, посебна пажња посвећена је анализи постојећих решења у области кооперативне АМС, а која је представљала недовољно истражену област на почетку израде дисертације;
- Извршена је детаљна анализа постојећих АМС поступака који су због својих карактеристика погодни за примену у кооперативној АМС, и као таква су и раније разматрана у литератури. При томе, посебна пажња је посвећена анализи АМС поступка на основу кумуланата вишег реда, који омогућавају једноставно и ефективно комбиновање при централизованој фузији података чија је анализа била један од основних циљева истраживања. Квалитет процене кумуланата у појединачним сензорима мреже представља основни чиниоц у смислу касније фузије ових процена или одлука донесених на основу њих, и тиме у највећој мери одређује перформансе добијених решења за кооперативну АМС. Извршена је детаљна анализа статистичких параметара ове процене, посматране као случајан процес који зависи од типа примењене модулације, информационог садржаја анализираног сигнала, статистичких модела канала са MPF, и

параметара обраде у сензору, као што су трајање опсервације и избор метода естимације параметара канала. На основу резултата и закључака ове анализе, посматрани су различити ефекти и објашњено је понашање постојећих и оригинално предложених решења при примени кооперативне АМС. Тиме је у значајној мери омогућен развој нових метода фузије за које је показано да постижу значајно боље перформансе у односу на постојећа решења. Поменута анализа изведена је применом Монте-Карло симулација, коришћењем наменски развијених симулационих модела.

- С обзиром на специфичност примене АМС поступака класификације заснованих на концепту препознавања облика (*pattern recognition*), тј. FB (*feature based*) концепта, а којем припада и посматрани АМС поступак на основу кумуланта четвртог реда, анализа перформанси посматраних решења извођена је искључиво применом нумеричке анализе засноване на коришћењу поступка Монте-Карло експеримената. У овом приступу класификацији овакав начин верификације теоријских тврдњи и евалуације перформанси предложених АМС поступака се традиционално и готово искључиво користи (уз веома ретке изузетке) из разлога немогућности обављања стриктне теоријске анализе. С обзиром на то да на процес естимације вредности кумуланта, а тиме и на сам процес извођења кооперативне АМС, утиче веома велики број случајних процеса или параметара посматраних као случајне променљиве, у поступку евалуације перформанси коришћен је сложени итеративни поступак који обезбеђује конвергенцију при естимацији посматраних случајних величина.
- На основу дефинисаног аналитичког модела система кооперативне АМС и уведених претпоставки о квалитету процене вредности кумуланата изражених преко статистичких модела, предложен је одређен број оригиналних метода фузије на бази фузије података. На исти начин дефинисан је и предлог здружене корекције процене кумуланата.
- За потребе нумеричке анализе извршен је развој независних Монте-Карло симулационих модела који омогућавају детаљну анализу утицаја свих уочених битних параметара и ефеката окружења, као и параметара обраде као што су: различити статистички модели канала са MPF са равним и фреквенцијски-селективним федингом, различити методи естимације канала са MPF, различити сценарији на основу просторног распореда сензора и вредности временске дисперзије, дужина периода опсервације сигнала и сл. Као посебан модалитет нумеричке анализе формиран су, као параметри симулационог модела, одређени сценарији примене на основу усклађености коришћених и стварних вредности референтних величина за потребе фузије. Ови сценарији примене омогућили су евалуацију перформанси у идеализованим условима, односно за случај идеалне еквилизације или естимације параметара канала са MPF, а којима се добијају максималне перформансе посматраних решења. Осим тога, формиран су и реални, неидеализовани, сценарији примене путем којих су одређене доње границе перформанси анализираних решења.
- На основу извршене евалуације перформанси за случај централизоване фузије, и на основу теоријског разматрања добијених резултата и извођења закључака са објашњењем свих запажених ефеката, извршен је развој одређених решења на бази хеуристика. Ова, у принципу субоптимална, решења предложена су у циљу побољшања АМС перформанси у односу на директну примену централизоване фузије. Решења хибридне двостепене фузије и сегментације узорка, намењена су решавању проблема који се јављају за одређене услове рада у случају канала са равним федингом или са фреквенцијским-селективним федингом када не

постоји доминантна компонента. Нумеричком анализом ових решења верификовано је очекивано понашање у складу са постављеном теоријским тврдњама и за услове рада за која су ова решења и предвиђена.

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научно-истраживачког рада и у сагласности је са циљевима дефинисаним на почетку израде дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати изведени у докторској дисертацији показују горње и доње границе АМС перформанси које се могу остварити применом анализираних решења за кооперативну АМС са централизованом фузијом или хибридном двостепеном фузијом, у идеализованим и реалним условима примене, респективно. При томе, посебна пажња током истраживања и нумеричке анализе постојећих и предложених решења била је усмерена на анализу утицаја који се јављају у реалној примени, као што су утицаји пропагационог окружења, различитих просторних распореда сензора, као и инхерентне некооперативности непознатог предајника чији се сигнал анализира у поступку класификације. Овако свеобухватна анализа, поготово разматрање проблема коришћења неусклађених референци који се увек јавља у практичној примени, није до сада дата у доступној литератури. Самим тим, кроз развијене симулационе моделе и извршену нумеричку анализу, дата је детаљна анализа услова примене постојећих и предложених решења у реалним условима примене, или бар значајно реалнијим од оних који су посматрани у постојећој литератури. Иако су предложена решења изведена на основу примене поступка АМС на основу кумуланта четвртог реда, сами предложени концепти и примењена методологија развоја дефинисаних решења уз одређена прилагођења се генерално могу применити на готово све постојеће АМС поступке.

Проблем коришћења неусклађених референтних вредности у поступцима фузије, а који се не може избећи у пракси, представља веома значајан извор погоршања перформанси класификације. Овај проблем први пут је свеобухватно анализиран у оквиру докторске дисертације, као и већ објављених публикација које су проистекле из истраживања кандидата при изради дисертације, и представља важан допринос у смислу сагледавања реалних могућности примене кооперативности у области АМС.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је приликом израде дисертације показао систематичност у раду, способност за препознавање отворених питања у научној литератури, као и зрелост при анализи и решавању проблема. При томе, треба истаћи да је тема докторске дисертације из области АМС, која је у последње време постала веома актуелна услед могуће примене у веома актуелним областима когнитивних радио-система и бежичних сензорских мрежа. Неки од добијених резултата представљају нова или унапређена решења за проблеме који су већ постојали у литератури. Дисертација обухвата и анализу проблема, посебно у смислу реалних услова примене, на које до сада није постојао осврт у доступној литератури. Доприноси дисертације у овој области су оригинални, савремени и потврђују способност кандидата за самосталан истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације огледа се у развоју већег броја различитих решења која омогућавају значајно повећавање успешности класификације при примени кооперативне аутоматске класификације коришћењем мреже сензора, поготово у случају реалних услова примене, као и одговарајућег симулационог модела за анализу перформанси ових решења који узима у обзир највећи број битних ефеката окружења при њиховој практичној примени. Конкретно научни доприноси остварени у дисертацији су следећи:

- Детаљна анализа могућности примене постојећих решења за кооперативну АМС заснованих на комбиновању *'тврдох'* одлука (*hard decision fusion*) у реалним условима и за различите сценарије примене, уз дефинисање проблема који се јављају при практичној примени ових решења.
- Развој и дефинисање новог концепта (фузије података) за потребе кооперативне АМС коришћењем мреже сензора са централизованом фузијом, заснованог на фузији (комбиновању) естимираних вредности кумуланата четвртог реда добијених независно у сензорима мреже. Овај нови концепт артикулисан је кроз предлог већег броја оригиналних метода фузије укључујући ту и решење на бази здруженог процеса одлучивања које под посматраним условима, представља оптималан метод централизоване фузије. Извршеном нумеричком анализом потврђено је побољшање АМС перформанси решења за кооперативну АМС на основу примене ових нових метода фузије у односу на постојеће методе, и то за све идеализоване и реалне сценарије примене у случају канала са фреквенцијски-селективним федингом.
- Развој и предлог оригиналног решења за централизовану фузијом у оквиру кооперативне АМС коришћењем мреже сензора, на бази фузије (комбиновања) *'меких'* одлука (*soft decision fusion*), тј. хибридног метода фузије на основу здружене примене фузије независно естимираних вредности кумуланата у сензорима и метода фузије *'тврдох'* одлука. Извршеном нумеричком анализом потврђено је изузетно добро понашање решења за кооперативну АМС на основу примене предложеног SDVDF метода фузије овог типа за све идеализоване и реалне сценарије примене у случају канала са фреквенцијски-селективним федингом, са перформансама које надмашују постојеће али и овде предложене DaF методе у условима у којима се јавља бољи квалитет процене кумуланата.
- Предложен је оригиналан поступак здружене корекције естимираних вредности кумуланата четвртог реда добијених независно у сензорима кооперативне мреже, уз детаљну анализу могућности примене овог метода у предложеним и постојећим решењима за кооперативну АМС. Сprovedеном нумеричком анализом верификовано је да се применом овог метода остварује значајно повећање АМС перформанси за реалне сценарије примене у случају канала са фреквенцијски-селективним федингом са појавом доминантне компоненте.
- Извршена је детаљна анализа утицаја коришћења неусклађених референтних величина у поступку централизоване фузије, при чему анализа овог ефекта није раније посматрана у доступној литератури. На основу спроведене анализе закључено је да се за разлику од идеализованих услова примене кооперативне АМС, посматране у претходним студијама, у реалном условима примене у којима се овај ефекат јавља остварују значајно лошије перформансе свих решења за кооперативну АМС. Применом нумеричке анализе одређене су перформансе свих посматраних решења за кооперативну АМС, за дефинисани најгори случај неусклађености ових референци, којима се могу описати доње границе перформанси.

- Предложена су оригинална решења, хибридна двостепена фузија и сегментација узорка сигнала при извођењу класификације у сензорима кооперативне мреже, намењена управо смањивању негативног ефекта коришћења неусклађених референтних величина у процесу фузије. При томе, показано је да се у складу са предвиђеном наменом и теоријским поставкама, применом ових решења значајно повећава успешност класификације за случај канала са равним федингом и канала са фреквенцијски-селективним федингом без доминантне компоненте, и то управо у условима рада када се централизованом фузијом постижу лошије перформансе.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у циљеве истраживања, усвојене полазне претпоставке и остварене резултате констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва значајна питања из проблематике која је анализирана у дисертацији. Предложена решења у области кооперативне АМС, и то у облику предлога оригиналних метода за потребе централизоване фузије, модалитета извођења кооперативне класификације на основу предложене хибридне двостепене фузије, и предлога нових решења са применом метода фузије у оквиру сензора кооперативне мреже, као и независно развијени рачунарски симулациони модели који омогућавају свеобухватну анализу решења за кооперативну АМС за велики број идеализованих и реалних сценарија примене, представљају значајан научни допринос у области аутоматске класификације сигнала по типу модулације. Анализом резултата истраживања приказаних у дисертацији констатујемо да су приказани оригинални и савремени резултати.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у области теме докторске дисертације кандидат Горан Б. Марковић објавио је један рад у међународним часописима са SCI листе, при чему је кандидат првопотписани аутор. Поред тога, из области теме докторске дисертације кандидат је у последње четири године презентовао пет радова на конференцијама од међународног значаја, и два рада на конференцијама од националног значаја. У претходном периоду, кандидат је одбранио магистарску тезу са темом из исте области, као и докторске дисертације, при чему је из ове области објавио два рада у домаћим научним часописима, као и два рада на конференцијама од националног значаја.

Категорија M23:

1. **Markovic, G. B.,** Dukic, M. L.: Cooperative modulation classification with data fusion for multipath fading channels, *Electronic Letters*, Vol. 49, No. 23, pp. 1494-1496, November 2013. (IF=1.038) (ISSN: 0013-5194) (DOI: 10.1049/el.2013.1028).

Категорија M33:

1. **Marković, G. B.,** Dukić M. L.: Cooperative AMC Schemes Using Cumulants with Hard and Soft Decision Fusion, *Proceedings of 20th Telecommunication forum - TELFOR 2012*, Belgrade, Serbia, November 20th-22nd, 2012, pp. 400-403. ISBN: 978-1-4673-2984-2.
2. **Marković G. B.,** Dukić, M. L.: Klasifikacija radio signala po tipu modulacije na bazi kumulanata sa više uzastopnih pokušaja, *Proceedings of 20th Telecommunication forum - TELFOR 2012*, Belgrade, Serbia, November 20th-22nd, 2012, pp. 424-427, ISBN: 978-1-4673-2984-2, in Serbian.

3. **Marković G. B.**, Dukić, M. L.: Decision Fusion Methods for Automatic Modulation Classification with Multiple Sensors in Multipath Fading Channels, *Proceedings of IEEE International Conference on Computer as a Tool – EUROCON 2013*, Zagreb, Croatia, July 1st-4th, 2013, pp. 105-112. ISBN: 978-1-4673-2231-7.
4. **Marković, G. B.**, Dukić, M. L.: The Applicability of Cooperative AMC with Multiple Sensors in Dispersive Fading Channels, *Proceedings of 21st Telecommunications Forum - TELFOR 2013*, Belgrade, Serbia, November 26th-28th, 2013, pp. 224-227. ISBN: 978-1-4799-1419-7.
5. **Marković, G. B.**, Dukić, M. L.: AMC Using Cumulants with Segmentation of Input Sequence for Dispersive Fading Channels, *Proceedings of 21st Telecommunications Forum - TELFOR 2013*, November 26th-28th, 2013, pp. 228-231. ISBN: 978-1-4799-1419-7.

Категорија M63:

1. **Marković, G. B.**, Dukić M. L.: Algoritam za klasifikaciju MPSK signala sa korekcijom fazne greške i frekvencijskog offset-a, *Zbornik radova 53. konferencije ETRAN 2009*, Vrnjačka banja, Srbija, 15-18 jun, 2009, TE2.1, str. 1-4, ISBN: 978-86-80509-64-8.
2. **Marković G. B.**, Dukić M. L.: Kooperativna automatska klasifikacija signala po tipu modulacije sa fuzijom odluka uz primenu kumulanata višeg reda, *Zbornik radova 56. konferencije ETRAN 2012*, Zlatibor, Srbija, 11-14 jun, 2012, CD ROM, TE3.4, str.1-4. ISBN: 978-86-80509-67-9.

Категорија M72:

1. **Marković G. B.**: *Analiza algoritama za automatsku klasifikaciju radio signala po tipu modulacije*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, 15. decembar 2005. godine, mentor prof. dr Miroslav L. Dukić.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Горана Б. Марковића под насловом „**Кооперативна аутоматска класификација сигнала по типу модулације коришћењем мреже сензора**“ у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају важећим Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду

У дисертацији је анализирана кооперативна АМС, при чему је разматрана примена централизоване фузије уз примену АМС поступка на основу кумуланата четвртог реда. Развијени су аналитички и симулациони модели на основу којег је извршена анализа постојећих и предлог већег броја оригиналних метода фузије на бази предложеног концепта фузије података. Применом развијеног симулационог модела извршена је детаљна анализа великог броја идеализованих и реалних сценарија примене. Разматран је утицај великог броја веома значајних параметара као што су: услови пропагационог окружења изражени кроз статистичке моделе канала са MPF и вредности временске дисперзије, примене различитих метода за естимацију параметара канала, различити просторни распоред сензора мреже и други утицаји. Посебно је разматран утицај примене неусклађених референтних вредности који се јавља при практичној примени метода фузије, и који изазова драстично погоршање перформанси за готово све методе фузије. Путем нумеричке анализе показано је да се неким од предложених метода фузије у сваком од анализираних идеализованих или реалних сценарија примене остварују боље перформансе у односу на оне остварене постојећим методима фузије. За одређене услове рада у којима је због лошијег квалитета процене кумуланата или утицаја примене неусклађених референтних вредности запажено значајно погоршање перформанси класификације, предложена су одговарајућа оригинална

решења, односно здружена корекција процене кумуланата, хибридна двостепена фузија или сегментација узорка сигнала у сензорима мреже, уз примену фузије за тако генерисане сегменте.

Резултате проистекле из истраживања спроведеном у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у међународном часопису са SCI листе и презентовао стручној јавности на конференцијама од међународног и националног значаја.

На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација „**Кооперативна аутоматска класификација сигнала по типу модулације коришћењем мреже сензора**“ кандидата мр Горана Б. Марковића садржи оригиналне научне доприносе.

На основу претходног, Комисија констатује да је кандидат мр Горан Б. Марковић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да се овај реферат прихвати, и у складу са законском процедуром упуту Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Мирослав Л. Дукић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Предраг Н. Иваниш, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Горан З. Марковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

др Миљко М. Ерић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Дејан Д. Драјић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет