

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мастер инж. електротехнике и рачунарства Милоша Јањића.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 5082/11-3 донетој на 852. седници одржаној 09.09.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милоша Јањића под насловом

Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем

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

Милош Јањић је школске 2011/2012 уписао докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Телекомуникације. Током студија положио је све испите са просечном оценом 10 и одрадио све обавезе везане за студијски истраживачки рад.

Кандидат је тему под насловом „*Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем*“ пријавио 28.06.2018. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на 830. седници одржаној 19.07.2018. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Предраг Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Александра Костић-Љубисављевић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет), др Лазар Сарановац, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Извештај комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације је усвојен на 832. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржаној 09.10.2018. године. Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предложену тему докторске дисертације на седници одржаној 29.10.2018. године.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 09.07.2020. године, а Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на 852. седници одржаној 09.09.2020. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Миљко Ерић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Предраг Иваниш, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Петар Ђурић, Distinguished Professor, Department of Electrical and Computer Engineering Stony Brook University, NY, USA, др Лазар Сарановац, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички

факултет), др Александра Костић-Љубисављевић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет).

На основу одлуке Наставно–научног већа бр. 545/2 од 13.3.2012. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2011/2012, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду–Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Техничких наука - електротехнике, у ужем смислу научној области Телекомуникације. За ове области матичан је Електротехнички факултет. Ментор дисертације је др Миљко М. Ерић, ванредни професор на Електротехничком факултету Универзитета у Београду због научних доприноса у области теме докторске дисертације, посебно у области обраде сигнала са антенских низова.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милош Јањић рођен је 08.07.1986. године у Билећи, Босна и Херцеговина. Основну школу завршио је у Билећи са просечном оценом 5. Десету гимназију “Михајло Пупин” у Београду завршио је са просечном оценом 5. Електротехнички факултет у Београду уписао је школске 2005/06. године. Дипломирао је на Одсеку за телекомуникације 2009. године, са просечном оценом 8,91. Дипломски рад под насловом “Софтверска симулација рутирања у АD НОС мрежама” одбранио је са оценом 10. Ментор дипломског рада био је др Александар Нешковић. Мастер студије на истом факултету уписао је школске 2009/10. године и завршио их 2011. године са просечном оценом 10. Мастер рад под називом “Компаративна анализа и симулација статичких техника за фреквенцијско планирање у LTE” одбранио је са оценом 10. Ментор мастер рада био је др Александар Нешковић. Докторске студије уписао је школске 2011/2012. године на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Телекомуникације, где је положио све испите са оценом 10. Аутор/коаутор је 3 рада публикована у часописима са SCI листе, 3 рада у часописима националног значаја, 7 радова на међународним конференцијама, једног рада на националној конференцији и 6 техничких решења. Течно говори енглески и шпански језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 100 страна куцаног текста и садржи 54 слике, 1 табелу и 49 библиографских референци и један додаток. Дисертација садржи насловну страну, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, 5 поглавља и списак коришћене литературе. Наслови поглавља докторске дисертације су:

1. Увод,
2. Модел сигнала,
3. Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем,
4. Здружена процјена TDOA, фреквенцијског и фазног помака узимајући у обзир фазу носиоца пристиглог сигнала,
5. Закључак и правци даљих истраживања.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводној глави дисертације истакнуте су предности дистрибуираних пријемних/предајних антенских низова у односу на централизоване, могући начини за формирање дистрибуираних антенских низова, као и могући начини за постизање временске, фреквенцијске и фазне синхронизације пријемних/предајних канала. Дат је осврт на постојећа решења и технике у литератури за постизање наведених типова синхронизације (време, фреквенција, фаза) бежичним путем, коришћењем радио сигнала. Највећи број публикованих радова се бави синхронизацијом у контексту предајног дистрибуираног *beamforming*-а, и то на *master-slave* принципу. Наведене су разлике процедуре за калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система предложене у дисертацији у односу на горе поменуте методе. Поред тога, дат је преглед техника из литературе за процену константног временског, фреквенцијског и почетног фазног помака у двоканалном пријемном систему. У литератури су разматране некохерентне технике за процену константног временског, фреквенцијског и почетног фазног помака, где је послати сигнал случајан и детерминистички, који може бити познат или непознат пријемном систему, и кохерентне технике за процену константног временског помака. Некохерентне технике не користе информацију о фазама носилаца пристиглих сигнала (*Carrier Phase of Arrival* - СРоА) при процени временског помака и њихова прецизност сразмерна је инверзној вредности ширине пропусног опсега сигнала. Са друге стране, кохерентне технике из литературе користе СРоА и под одређеним условима имају прецизност сразмерну инверзној вредности фреквенције носиоца. Наведене су предности методе за здружену процену временског, фреквенцијског и фазног помака у двоканалном пријемном систему коришћењем СРоА предложене у дисертацији у односу на горе поменуте методе.

У другој глави дисертације изложен је и образложен модел сигнала у основном опсегу у дистрибуираном двоканалном пријемном систему који је несинхронизован по времену, фази и фреквенцији, и који, за разлику од већине публикованих у литератури, експлицитно моделира СРоА. Прво је приказан модел аналогних сигнала у квадратурним предајницима и пријемницима. Након тога, показано је да се сигнали у њима могу једноставније представити коришћењем комплексних бројева. Затим су моделирани временски, фреквенцијски и фазни помаци у сигналу при емитовању, пропагацији и пријему. Након тога је показано како се прелази из континуалног (аналогног) у дискретни модел сигнала. Извршена је нормализација величина и домена функција и уведена конвенција за њихово означавање. Дат је и матрични дискретни модел сигнала. Предложени модел омогућава моделовање временских и фреквенцијских помака који нису целобројни умношци интервала одабирања и резолуције DFT-а (*Discrete Fourier Transform*), респективно. Дефинисан је појам просторно кохерентног сценарија, у ком је могуће применити кохерентне алгоритме за процену временског помака. У дисертацији се претпоставља да је сценарио просторно кохерентан и да је LoS (*Line of Sight*) компонента сигнала доминантна.

У трећој глави предложена је процедура за калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем у циљу омогућавања пријемног дигиталног *beamforming*-а и/или локализације извора радио сигнала. Претпоставља се да између пријемних канала постоје константни временски помаци, променљиви фреквенцијски помаци и почетни фазни помаци. У случају локализације, процедура обухвата здружену естимацију и компензацију временског помака и тренутног фазног помака између пријемних канала. Пријемни систем врши естимацију помака на основу широкопојасног пилот сигнала и ускопојасног пилот сигнала које шаље калибрациони предајник (*beacon*). У случају *beamforming*-а, процедура обухвата здружену естимацију и компензацију временског помака и тренутног фазног помака између примљених корисних сигнала – етапа 1, и, опционо, еквализацију корисних сигнала – етапа 2. Свака етапа садржи 4 корака. Корак 1 грубо поравнава сигнале у времену, корак 2 отклања временски променљиву компоненту фазног помака (фреквенцијски помак) на *sample-by-sample* принципу, корак 3 врши фино поравнање сигнала у времену, док корак 4 отклања преостали константни

фазни помак. Описани су алгоритми који се користе у корацима процедуре. Формулисан је нови адаптивни алгоритам за процену тренутног фазног помака (пошто је фреквенцијски помак променљив, не процењује се експлицитно, већ се процењује тренутни фазни помак). У циљу евалуације предложене процедуре и алгоритама, вршене су Монте-Карло симулације у *Matlab*-у, као и експерименти са софтверски дефинисаним радио-уређајима (*USRP*). Описана је хардверско-софтверска платформа коришћена за експерименталну верификацију предложене процедуре. Резултати експеримената показали су добро слагање са резултатима симулација, чиме је потврђена исправност претпоставки коришћеног математичког модела и могућност коришћења предложене процедуре у реалним условима. Добијене прецизности показују да су предложена процедура и алгоритми погодни за пријемни *beamforming* и некохерентну/полукохерентну локализацију. Ако се фреквенцијски помак међа довољно споро, могућа је и примена за предајни *beamforming*.

У четвртој глави анализиран је утицај коришћења СРоА на здружену процену TDoA (*Time Difference of Arrival*), фреквенцијског и почетног фазног помака у дистрибуираном двоканалном пријемном систему. Претпостављено је да су временски и фреквенцијски помаци константни. У зависности од тога који параметри су непознати, три Случаја су анализирана - Случај 1: TDoA, фреквенцијски и фазни помаци непознати; Случај 2: фреквенцијски и фазни помаци непознати, TDoA познат; Случај 3: фреквенцијски и фазни помаци познати, TDoA непознат. Извршена је теоријска анализа тачности процене непознатих параметара и то: за познату оригиналну секвенцу, дата је Фишерава информациона матрица у затвореној форми за Случај 1 и изрази за Крамер-Раову границу за Случајеве 2 и 3. Формулисана су два кохерентна алгоритма ML (*Maximum-Likelihood*) типа, један за сценарио са познатом секвенцом и други за сценарио са непознатом секвенцом. Монте-Карло симулације, вршене у *Matlab*-у, показале су да су алгоритми статистички ефикасни (варијанса грешке је блиска одговарајућој Крамер-Раовој граници) у широком опсегу односа сигнал-шум, и да за ниже односе сигнал-шум алгоритам са познатом секвенцом има боље перформансе од алгоритма са непознатом секвенцом. Анализа базирана на Крамер-Раовој граници и симулацијама показала је да коришћење СРоА не даје побољшања при процени фреквенцијског и фазног помака ни у једном од Случајева. Што се тиче процене временског помака, у Случају 1 нема побољшања услед коришћења СРоА, корен средње квадратне вредности грешке сличан је као код некохерентних метода, тј. 1-3 реда величине испод инверзне вредности пропусног опсега сигнала. У Случају 3, када је решен проблем вишезначности, добија се драматично побољшање прецизности процене услед коришћења СРоА, корен средње квадратне вредности грешке је 1-3 реда величине испод инверзне вредности фреквенције носиоца. Проблем вишезначности својствен је кохерентној процени временског помака на СРоА принципу и огледа се у појави високих периодичних бочних лобова у критеријумској функцији алгоритма. Детаљно је анализирана расподела грешке процене у Случају 3 у зависности од тога да ли је проблем вишезначности решен. Дате су смернице за решавање проблема вишезначности. Анализа у овој глави је показала који услови морају бити задовољени да би се достигла прецизност процене TDoA која је довољно добра да буде коришћена за дистрибуирани *beamforming*. За ову примену вишезначност не представља проблем. Прецизност кохерентне процене временског помака може се искористити за електронско мерење растојања између фазних центара антена у сврху прецизног позиционирања антена у антенским низовима.

У петој глави дати су најважнији закључци дисертације и правци могућих даљих истраживања, као што су генерализација на вишеканални пријемни систем, моделовање и естимација променљивих временских помака, сценарио са нестационарним примопредајницима, услови под којима се могу достићи прецизности синхронизације неопходне за кохерентну локализацију, за део тезе изложен у глави 3, односно проширење на вишеканални пријемни систем, даља нумеричка оптимизација алгоритама, нови начини за решавање проблема вишезначности, за део тезе изложен у глави 4.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација припада области обраде сигнала са антенских низова. У ужем смислу, предмет истраживања првог дела ове докторске дисертације је временска, фреквенцијска и фазна синхронизација дистрибуираних вишеканалних пријемних система бежичним путем у циљу омогућавања дигиталног *beamforming*-а и локализације извора радио сигнала коришћењем датог система. У протеклих 15-ак година велики број радова је указао на предности коришћења дистрибуираних антенских система у односу на централизоване, првенствено у области *beamforming*-а (побољшана усмереност, а тиме повећана енергетска и/или спектрална ефикасност), локализације извора радио сигнала (повећана прецизност), МИМО система (поспешује се ортогоналност између канала). Поред тога, омогућавањем употребе једноставних једноантенских предајника као делова виртуелног низа, ублажавају се ограничења везана за број антена у низу и отвор низа, која су карактеристична за централизоване антенске низове. Међутим, релативно мали број радова је анализирао начине за постизање синхронизације између канала у дистрибуираном низу, која је неопходна за кохерентни пријем сигнала антенским низом. Још је мањи број радова који је разматрао постизање синхронизације бежичним путем (*over-the-air*). У већини ових радова проблем је решаван строго у контексту предајног *beamforming*-а, са акцентом на протоколима, а не коришћеним алгоритмима, или је решавана само (тренутна) фазна синхронизација, али обично са неком врстом предикције. У тези је проблем решаван у контексту пријемног *beamforming*-а и локализације извора радио сигнала тако што је предложена оригинална процедура, уз непрекидно праћење и компензацију тренутног фазног помака између пријемних канала на *sample-by-sample* принципу, за шта је формулисан нови адаптивни алгоритам, као и компензацију константног временског помака, са акцентом на коришћеним алгоритмима и достигнутим прецизностима.

У другом делу дисертације анализиран је двоканални дистрибуирани пријемни систем, који је временски синхронизован, док између канала постоји почетни фазни помак и константни фреквенцијски помак. Овај систем представља специјални случај система из првог дела тезе. Фокус анализе је на утицају СРоА на здружену процену ТДоА, фреквенцијског и почетног фазног помака. Процена синхронизационих параметара у двоканалном пријемном систему је предмет истраживања већ деценијама. Само неколико радова у литератури се бавило могућим бенефитима кохерентне естимације (користи се СРоА) временског помака. У тези је продубљена ова анализа тако што је дефинисан просторно кохерентни сценарио у којем је могућ добитак услед коришћења СРоА, дефинисани су различити Случајеви у зависности од тога који од параметара (време, фреквенција, фаза) су непознати и анализиран је утицај коришћења СРоА на њихову процену (на основу Крамер-Раове границе и резултата симулација са формулисаним МЛ алгоритмима), детаљно је анализиран утицај вишезначности на грешку естимације и дате су смернице за решавање проблема вишезначности. Анализа у овом делу тезе је показала који услови морају бити задовољени да би се добила прецизност процене ТДоА која је довољно добра да буде коришћена за дистрибуирани *beamforming*.

Предложена тема докторске дисертације припада актуелној и значајној области обраде сигнала са антенских низова, нарочито у 5G, о чему говори значајан број радова публикованих у најзначајнијим часописима у протеклих неколико година. Резултати изложени у тези су применљиви у кохерентним дистрибуираним МИМО системима. Према литератури, очекује се да ће ови системи бити једна од носећих технологија у 6G, што резултате из тезе чини вома актуелним и савременим.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео радове из области који су по његовој процени кључни за тему дисертације. Наведено је укупно 49 библиографских референци. Литература садржи најновије радове релевантне за проблематику истражену у дисертацији, при чему је Милош Јањић аутор или коаутор 7 радова.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је анализирана постојећа литература на тему *over-the-air* синхронизације дистрибуираних пријемника/предајника. Прегледом доступне литературе идентификовани су отворени проблеми који постоје у овој области и тичу се пре свега синхронизације у контексту пријемног дигиталног *beamforming*-а и локализације, као и процедуре и алгоритама за здружену естимацију и компензацију временског помака и тренутног фазног помака. Анализирана је литература везана за процену временског, фреквенцијског и фазног помака у двоканалном дистрибуираном систему, са посебним освртом на моделовање СРоА и његово коришћење у алгоритмима, где је уочен простор за напредак.
- Формулисан је модел сигнала на дистрибуираном временски, фазно и фреквенцијски несинхронизованом антенском низу који, за разлику од већине модела у литератури, експлицитно садржи фазу носиоца (СРоА) LoS компоненти у пријемним каналима. Овим се моделује додатна количина информација о времену пропагације/локацији извора радио таласа и омогућује формулисање и симулација алгоритама који је користе. Предложени модел омогућава моделовање временских и фреквенцијских помака који нису целобројни умношци интервала одабирања и резолуције DFT-а, респективно.
- Анализирана је зависност је Крамер-Раове границе прецизности процене TDoA, фреквенцијског и фазног помака у временски синхронизованом дистрибуираном двоканалном пријемном систему, за познату оригиналну секвенцу од системских параметара (однос сигнал-шум, дужина периоде секвенце), са посебним освртом на зависност од фреквенције носиоца сигнала.
- Формулисана су два кохерентна (користе СРоА) ML алгоритма, један за познату секвенцу и други за непознату секвенцу, за здружену естимацију временског, фазног и фреквенцијског помака када су они константни. Развијени су симулатори у *Matlab*-у којима су добијени резултати Монте-Карло симулација, чиме су анализирани перформансе предложених алгоритама за Случај сва 3 непозната параметра, Случај непознатог фазног и фреквенцијског помака (TDoA познат), и Случај непознатог TDoA (фазни и фреквенцијски помаци познати).
- Предложена је процедура за временску, фреквенцијску и фазну калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем у контексту пријемног *beamforming*-а и локализације извора радио сигнала. У оквиру процедуре формулисан је нови адаптивни алгоритам за процену тренутног фазног помака. Развијени су симулатори у *Matlab*-у којима су добијени резултати Монте-Карло симулација, чиме су анализирани перформансе коришћених алгоритама и процедуре. Такође су извршени експерименти у урбаном окружењу коришћењем софтверски дефинисаних радио платформи којима је проверена исправност предложене процедуре и претпоставки математичког модела.

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

Процедура за калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем која је предложена у дисертацији има примену у пријемном *beamforming*-у, и некохерентној (не користи се СРоА уопште) и полукохерентној (користи се СРоА за обраду сигнала примљених у оквиру истог антенског подниза) локализацији извора радио сигнала. Ако се фреквенцијски помак међа довољно споро, примена у предајном *beamforming*-у је такође могућа. Адаптивни алгоритам за процену тренутног фазног помака може се користити и за фазну и фреквенцијску синхронизацију предајника са пријемником.

Кохерентна процена TDoA добијена у другом делу тезе може се искористити за рачунање коефицијената дистрибуираног *beamformer*-а усмереног ка извору сигнала који се користи за естимацију. Процена временског помака са добијеном прецизношћу, која је 1-3 реда величине испод инверзне вредности фреквенције носиоца, може се искористити за прецизно електронско мерење растојања између фазних центара антена, односно за прецизно позиционирање антена, у колоцираним и дистрибуираним антенским низовима.

Такође, остварени резултати су примењиви за *over-the-air* синхронизацију у кохерентним дистрибуираним МИМО системима за које се, према литератури, очекује да ће бити једна од носећих технологија у 6G.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је приликом израде дисертације показао систематичност, способност за препознавање отворених питања у научној литератури, зрелост при анализи и решавању проблема, као и способност за тимски рад у оквиру истраживања. Област бежичне синхронизације је изузетно актуелна јер омогућује рад дистрибуираних антенских низова, чије је употреба виђена у најновијим телекомуникационим системима, као што је пета генерација мобилне телефоније, а очекује се и примена у шестој генерацији. Кандидат је у дисертацији предложио оригиналну процедуру за бежичну калибрацију дистрибуираног двоканалног пријемног система која се може генерализовати и на вишеканални дистрибуирани пријемни систем. Предложио је методе ML типа за здружену процену временског, фреквенцијског и фазног помака у двоканалном дистрибуираном пријемном систему које су статистички ефикасне. Анализирао је утицај СРоА на перформансе ових метода у зависности од тога који од наведених помака су непознати. Поред теоријских резултата, дисертација садржи и експерименталне резултате који потврђују теоријске резултате из тезе. Доприноси дисертације у овој области су оригинални, савремени и потврђују способност кандидата за самосталан, као и тимски научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације огледа се у дефинисању процедуре за бежичну калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система, формулисању алгоритама који су у њој коришћени, анализи утицаја СРоА на квалитет процене TDoA, фреквенцијског и фазног помака у временски синхронизованом дистрибуираном двоканалном пријемном систему, формулисању коришћених алгоритама и модела сигнала који експлицитно садржи СРоА, симулационој анализи перформанси и експерименталној провери предложене процедуре за калибрацију. Конкретно научни доприноси остварени у дисертацији су следећи:

- Формулисан је матрични модел сигнала у основном опсегу на дистрибуираном пријемном систему који, поред временских, фреквенцијских и фазних помака у предајнику и пријемнику, као и временског помака анвелопе сигнала услед

пропагације, експлицитно садржи и CPOA, тј. фазни помак сигнала носиоца (*carrier-a*) услед пропагације. Предложени модел омогућава моделовање временских и фреквенцијских помака који нису целобројни умношци интервала одабирања и резолуције DFT-а, респективно.

- Анализирана је теоријска Крамер-Раова граница тачности процене непознатих параметара модела сигнала дистрибуираног пријемног система, и то: зависност Фишерове информационе матрице за Случај 1 (непознати TDoA, фреквенцијски и фазни помаци), Крамер-Раове границе прецизности процене за Случај 2 (TDoA познат, фреквенцијски и фазни помаци непознати) и за Случај 3 (TDoA непознат, фреквенцијски и фазни помаци познати) за познату оригиналну секвенцу у зависности од системских параметара (однос сигнал-шум, дужина периоде секвенце), са посебним освртом на зависност од фреквенције носиоца сигнала.
- Формулисана су два кохерентна алгоритма ML типа за здружену процену временског, фреквенцијског и фазног помака у дистрибуираном двоканалном пријемном систему, један за сценарио са познатом секвенцом и други за сценарио са непознатом секвенцом. Алгоритми су нумерички оптимизовани.
- На основу теоријске Крамер-Раове границе и Монте-Карло симулација извршена је анализа утицаја CPOA на прецизност процене TDoA, фреквенцијског и фазног помака у временски синхронизованом дистрибуираном двоканалном пријемном систему за три различита Случаја – Случај 1: TDoA, фреквенцијски и фазни помаци непознати; Случај 2: фреквенцијски и фазни помаци непознати, TDoA познат; Случај 3: фреквенцијски и фазни помаци познати, TDoA непознат. Показано је да, када су фреквенцијски и фазни помаци познати, тачност процене непознатог TDoA се драматично (до 3 реда величине) побољшава у односу на некохерентну процену TDoA, код које се не узима у обзир CPOA.
- Монте-Карло симулацијама анализирани су перформансе предложених кохерентних алгоритама, као и њихових некохерентних варијанти. Показано је да су предложени кохерентни алгоритми статистички ефикасни у широком опсегу вредности односа сигнал-шум. Детаљно је анализирана расподела грешке у Случају 3 у зависности од тога да ли је решен проблем вишезначности, и дати су могући правци за решавање овог проблема.
- Предложена је процедура за калибрацију дистрибуираног двоканалног пријемног система бежичним путем у циљу омогућавања пријемног дигиталног *beamforming*-а и/или локализације датим системом. У случају локализације, процедура обухвата здружену естимацију и компензацију временског помака и тренутног фазног помака између пријемних канала. У случају *beamforming*-а, процедура обухвата здружену естимацију и компензацију временског помака и тренутног фазног помака између примљених корисних сигнала – етапа 1, и, опционо, еквилизацију корисних сигнала – етапа 2. Свака етапа садржи 4 корака, у којима се одвијају редом груба временска синхронизација, елиминисање променљиве компоненте фазног помака (фреквенцијски помак), фина временска синхронизација, и елиминисање преосталог константног фазног помака. Процедура је модуларна, у смислу да у датом кораку постојећи алгоритам може да се замени другим алгоритмом истог типа (али, на пример, различите нумеричке комплексности или да буде за познату уместо за непознату секвенцу), што омогућава оптимизацију перформанси целокупног процеса калибрације.
- Формулисан је нови адаптивни алгоритам LMS (*Least Mean Square*) типа за процену тренутног фазног помака, који се користи у кораку 2 процедуре. Алгоритам има способност праћења наглих промена фреквенцијског помака.

- Монте-Карло симулацијама анализирани су перформансе предложене процедуре као целине, и појединачних коришћених алгоритама.
- Експериментално је проверена исправност претпоставки математичког модела, као и способност предложене процедуре да функционише у реалним условима простирања.

Треба напоменути да дисертација представља заокружену целину јер обухвата модел система, модел сигнала, теоријске границе прецизности, методе, резултате симулација и експерименталне резултате.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у циљеве истраживања, полазне претпоставке и остварене резултате констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва значајна питања из проблематике која је анализирана у дисертацији. Предложена процедура за калибрацију дистрибуираног вишечаналног пријемног система бежичним путем, анализа утицаја фазе носиоца пристиглих сигнала на прецизност процене временског, фреквенцијског и фазног помака у двоканалном пријемном систему, и предложене методе за процену временског, фреквенцијског и (тренутног) фазног помака представљају значајан научни допринос у области синхронизације дистрибуираних антенских система, а тиме и остварења њиховог потенцијала у пракси. Анализом резултата 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 Милош Јањић је као аутор или коаутор објавио три рада у међународним часописима са SCI листе (у часописима категорије M21, M22 и M23). Поред тога, резултате истраживања кандидат је објавио у три рада у часописима националног значаја, седам радова на конференцијама међународног значаја, и једном раду на конференцији националног значаја.

Рад у врхунском међународном часопису (M21):

[1] N. Vukmirović, M. Erić, M. Janjić, and P. M. Djurić, "Direct wideband coherent localization by distributed antenna arrays", *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4582, Oct. 2019. (DOI: 10.3390/s19204582, ISSN: 1424-8220, IF=3.275)

Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

[1] N. Vukmirović, M. Janjić, P. M. Djurić, and M. Erić, "Position estimation with a millimeter-wave massive MIMO system based on distributed steerable phased antenna arrays", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Special Issue on Network Localization*, vol. 2018, no. 1, p. 33, June 2018. (DOI: 10.1186/s13634-018-0553-9, ISSN: 1687-6180, IF=1.961)

Рад у међународном часопису (M23):

[1] M. Janjić, N. Vukmirović, and M. Erić, "TDOA, Frequency and Phase Offsets Estimation Taking Into Account Carrier Phase of Arrival", *Radioengineering*, vol. 26, no. 4, pp. 1143-1150, Dec. 2017. (DOI: 10.13164/re.2017.1143, ISSN: 1210-2512, IF=0.945)

Часописи националног значаја (M50):

[1] M. Janjić, M. Brković, M. Erić, "Development of OFDM based secondary link: Some experimental results on USRP N210 platform," *Telfor Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 30-35, Nov. 2014. ISSN: 1821-3251. (M53)

[2] M. Janjić, N. Nešković, "A comparative analysis of techniques for PAPR reduction of OFDM signals," *Telfor Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 12 - 17, Nov. 2014. ISSN: 1821-3251. (M53)

[3] M. Janjić, M. Erić, "A cognitive radio based solution to coexistence of FH and OFDM signals implemented on USRP N210 platform," *Telfor Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 20-25, Nov. 2017. ISSN: 1821-3251. (M53)

Међународне конференције (M33):

[1] M. Janjić, M. Brković, M. Erić, "Development of OFDM based secondary link: Some experimental results on USRP N210 platform," In *Proceedings of 21st Telecommunications Forum TELFOR 2013*, Belgrade, Serbia, 26-28 Nov. 2013 , pp. 216-219. ISBN: 978-1-4799-1419-7. (M33)

[2] M. Janjić, N. Nešković, "Uporedna analiza tehnika za redukciju PAPR OFDM signala," In *Proceedings of 21st Telecommunications Forum TELFOR 2013*, Belgrade, Serbia, 26-28 Nov. 2013, pp. 256-259. ISBN: 978-1-4799-1419-7. (M33)

[3] M. Erić, M. Janjić, "A solution to coexistence of OFDM and FH signals based on principles of cognitive radio implemented on USRP N210 platform ," In *Proceedings of 22nd Telecommunications Forum TELFOR 2014*, Belgrade, Serbia, 22-25 Nov. 2014, pp. 276 – 279. ISBN: 978-1-4799-6192-4. (M33)

[4] M. Erić, D. Vujić, D. Vučić, M. Janjić, "Integration of joint spatio-temporal spectrum sensing in cellular wireless systems," In *Proceedings of 22nd Telecommunications Forum TELFOR 2014*, Belgrade, Serbia, 22-25 Nov. 2014, pp. 226-229. ISBN: 978-1-4799-6192-4. (M33)

[5] M. Erić, N. Vukmirović, M. Janjić, "Calibration of Local Oscillators Mismatch in a Multi-channel Receiving System," *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, Kladovo, Serbia, 5-8 June 2017 , pp. 1-5. ISBN: 978-86-7466-692-0. (M33)

[6] N. Vukmirović, M. Janjić, M. Erić, "TOA/TDOA estimation based on carrier phase of arrival," *5th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2018)*, Palić, Serbia, 11-14 June 2018. (M33)

[7] N. Vukmirović, M. Janjić, P. Ivaniš "An Error Correcting Technique for Performance Improvement of OFDM Based Secondary Link," In *Proceedings of IEEE 12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (Telsiks 2015)*, Niš, Serbia, 14-17 Oct. 2015 , pp. 35-38. ISBN: 9788661251481. (M33)

Националне конференције (M60):

[1] Predrag Ivaniš, Miljko Erić, Srđan Brkić, Miloš Janjić, "Tehnike za efikasno korišćenje spektra: prikaz nekih rezultata istraživanja", *Zbornik XXXI Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju (POSTEL 2013)*, Beograd, 3-4. decembra 2013, str. 233-242. ISBN 978-86-7395-314-4. (M61)

Техничко решење (M83):

[1] M. Erić, N. Vukmirović, L. Saranovac, M. Janjić, I. Radovanović, "Laboratorijski model senzorske mreže za združeni prostorno-vremenski spectrum sensing na bazi metode za direktnu lokalizaciju formirane u okviru tehnološkog demonstratora kognitivnog radija korišćenjem USRP SDR platformi," ETF, 2015.

Техничко решење (M85):

[1] M. Janjić, M. Erić, "A solution to coexistence of secondary user OFDM and primary user FH signals based on principles of cognitive radio," ETF, 2014.

[2] M. Janjić, M. Erić, N. Vukmirović, "A software package for solution to coexistence of secondary user OFDM and primary user FH signals based on principles of cognitive radio," ETF, 2015.

[3] N. Vukmirović, M. Manojlović, M. Erić, M. Janjić, "Softver za upravljanje senzorskom mrežom za združeno prostorno-vremenski spectrum sensing realizovane na bazi USRP platformi i obradu dobijenih rezultata," ETF, 2015.

[4] M. Erić, N. Vukmirović, M. Janjić, D. Vučić, "New algorithm for calibration of local oscillators mismatch in a multi-channel receiving system," ETF, 2015.

[5] M. Erić, N. Vukmirović, M. Janjić, D. Vučić, "Novi postupak za merenje zauzetosti radio-frekvencijskog spektra u kontekstu kognitivnog radija," ETF, 2015.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација дипл. инж. Милоша Јањића под насловом „*Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем*“ у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији је формулисан матрични модел сигнала у основном опсегу у просторно кохерентном сценарију на дистрибуираном временски, фазно и фреквенцијски несинхронизованом пријемном систему. Предложена је процедура за калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем у контексту пријемног дигиталног *beamforming*-а и локализације извора радио сигнала. У оквиру процедуре предложен је адаптивни алгоритам за процену тренутног фазног помака. Усвојене претпоставке математичког модела и процедура експериментално су верификовани. Анализиран је утицај коришћења фазе носиоца примљених сигнала на прецизност процене TDoA, фреквенцијског и фазног помака у двоканалном пријемном систему, и показано под којим условима се може добити прецизност временског помака 1-3 реда величине испод инверзне вредности фреквенције носиоца. У ту сврху формулисана су два статистички ефикасна кохерентна алгоритма ML типа, један са познатом секвенцом и други са непознатом секвенцом. Детаљно је анализиран утицај вишезначности на расподелу грешке кохерентне процене временског помака.

Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у три рада публикована у међународним часописима са SCI листе и презентовао стручној јавности на међународним конференцијама и домаћим часописима из шире области електротехнике.

На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација „Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем“ дипл. инж. Милоша Јањића садржи оригиналне научне доприносе.

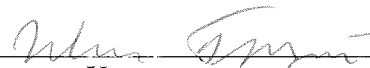
На основу претходног Комисија констатује да је Милош Јањић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном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

У Београду, 30.09.2020. године

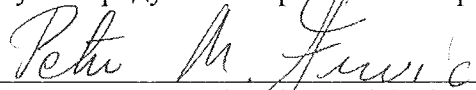
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



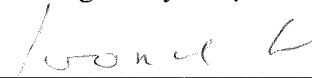
др Миљко Ерић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Предраг Иваниш, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Петар Ђурић, Distinguished Professor,
Department of Electrical and Computer Engineering Stony Brook University, NY, USA



др Лазар Сарановац, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Александра Костић-Љубисављевић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет