

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Милоша Јањића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5082/11-1 од 19.7.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милоша Јањића, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме

„Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем“

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Милош Јањић рођен је 08.07.1986. године у Билећи, Босна и Херцеговина. Основну школу завршио је у Билећи, а гимназију у Београду, са одличним успехом.

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 *Ad hoc* мрежама“, одбранио је са оценом 10. Ментор дипломског рада био је проф. 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 проф. Александар Нешковић.

Тренутно је студент докторских академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Телекомуникације. Од 2013. запослен је у Иновационом центру Електротехничког факултета у Београду где је ангажован у звању истраживач сарадник на пројекту Министарства за просвету, науку и технолошки развој, ТР32028 – „Напредне технике ефикасног коришћења спектра у бежичним системима“. Одлично се служи енглеским језиком.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је докторске академске студије уписао школске 2012. године на Универзитету у Београду - Електротехнички факултет, на модулу Телекомуникације. Положио је све испите са највишом оценом и урадио све обавезе предвиђене планом и програмом докторских академских студија.

Списак положених испита:

1. Дигитална обрада сигнала (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
2. Когнитивне радио мреже (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
3. Обрада сигнала са микрофонских низова (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
4. Системи мобилних радио-веза (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
5. Савремене радио-технологије (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
6. Нумеричка анализа (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
7. Просторно-временска обрада сигнала (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
8. Случајни процеси у телекомуникацијама (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
9. Савремене технике контроле грешака у телекомуникацијама (оцена: 10, 6 ЕСПБ)
10. Увод у научни рад (оцена: 10, 9 ЕСПБ)

У оквиру предмета на докторским студијама урадио је задатке који покривају различите области телекомуникација, а који подразумевају проучавање литературе, познавање теорије, израду програма којима су имплементирани разни алгоритми битни за функционисање телекомуникационих система.

Конкретно, активности по предметима су следеће:

Дигитална обрада сигнала – Проучавање литературе везане за дигиталну обраду сигнала, имплементација LMS (*Least Mean Square*) филтра за еквализацију канала у програмском језику Матлаб у оквиру практичне реализације коегзистенције OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) и FH (*Frequency Hopping*) сигнала на принципу когнитивног радија коришћењем USRP платформи, и израда семинарског рада у којем је описана поменута имплементација.

Когнитивне радио мреже – Проучавање литературе везане за когнитивни радио, практичне реализација коегзистенције OFDM и FH сигнала на принципу когнитивног радија коришћењем USRP платформи.

Обрада сигнала са микрофонских низова – Проучавање сигнала на антенским низовима кроз рад на пројекту министарства под називом: “Напредне технике ефикасног коришћења спектра у бежичним”, евиденциони број ТР32028, као и писање радова и техничких решења.

Системи мобилних радио-веза – Проучавање литературе везане за моделовање МИМО (*Multiple Input Multiple Output*) канала и писање семинарског рада на поменутом тему.

Савремене радио-технологије – Проучавање литературе везане за OFDM сигнале, са посебним освртом на анализу PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) ових сигнала, у циљу његовог смањења, коришћењем симулација у Матлаб програмском пакету. Написан је семинарски рад на ову тему.

Просторно-временска обрада сигнала – Проучавање литературе везане за обраду сигнала са антенских низова. Израда програма у програмском пакету Матлаб за моделирање сигнала на антенском низу, формирање просторног филтра, процену смера доласка сигнала на антенски низ. Израда семинарског рада кроз који су описане наведене имплементације у Матлаб-у.

Случајни процеси у телекомуникацијама – Проучавање литературе везане за случајне процесе у телекомуникацијама, са посебним освртом на когнитивне радио системе. Примена знања на реализацију коегзистенције OFDM и FH сигнала на принципу когнитивног радија коришћењем USRP платформи.

Увод у научни рад – Проучавање начина за припрему рада за објављивање у научном часопису и приказ истраживања на научним конференцијама. Припремање студента да оформи докторску тезу, припреми семинар о проблему који истражује, успешно комуницира са редакторима и рецензентима научних часописа.

Окосницу истраживачког рада у вези са докторском тезом чини калибрација дистрибуираних антенских система бежичним путем са применом у дистрибуираним антенским низовима за дистрибуирани *beamforming* и локализацију извора радио сигнала. Истраживања из ове области до сада је публикувао у два часописа међународног значаја, три часописа националног значаја, као и на већем броју конференција међународног и националног значаја. Учествовао је и у изради шест техничких решења.

1.2.1. Објављени радови

Радови публиковани у међународним часописима (M20):

[1.1] **M. Janjić**, N. Vukmirović, 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: 1805-9600, IF=0.945. (M23)

[1.2] N. Vukmirović, **M. Janjić**, P. M. Djurić, 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, pp. 1-17, June 2018. DOI: 10.1186/s13634-018-0553-9, ISSN: 1687-6180, IF=1.639. (M22)

Радови публиковани у домаћим часописима (M53):

[1.3] **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.

[1.4] **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.

[1.5] **M. Janjić** and 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.

Радови саопштени на међународним научним скуповима (M33):

[1.6] **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.

[1.7] **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.

[1.8] 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

[1.9] 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.

[1.10] 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.

[1.11] 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.

[1.12] 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.

Радови саопштени на домаћим научним скуповима (M63):

[1.13] 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. (rad po pozivu).

Техничко решење категорије M83:

[1.14] 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 категорије M85:

[1.15] **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.

[1.16] **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.

[1.17] 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.

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

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

1.2.2. Извештај са јавне усмене одбране предложене теме докторске дисертације

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације одржана је 07.09.2018. године на Електротехничком факултету у Београду, пред комисијом 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.

Усмена одбрана је почела у 10:00 часова, а завршена је у 11:00 часова.

На усменој одбрани су били присутни сви чланови Комисије.

Одбрану је отворио председник Комисије проф. др Предраг Иваниш упознавши присутне са хронологијом пријаве теме, одлуком Наставно-научног већа, основним подацима о кандидату и основним подацима о пријављеној теми докторске дисертације.

Кандидат је у трајању од 25 минута сажето изложио област и предмет истраживања, актуелност истраживања, постојећа решења са критичким освртом, као и своје предлоге за калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем. У ту сврху, анализирани су алгоритми за процену, у општем случају променљивих, временских, фреквенцијских и фазних помераја (офсета) у пријемним каналима, са посебним освртом на случај када су помераји константни у току изабраног опсервационог интервала.

Проф. Предраг Иваниш поставио је кандидату питања из области теорије вишеантенских система. Проф. Александра Костић-Љубисављевић поставила је питања везана за примену предложене теме у савременим телекомуникационим системима. Проф. Лазар Сарановац је поставио питања из области дигиталне обраде сигнала. Кандидат је успешно одговорио на сва питања која су му чланови Комисије поставили.

По завршеној одбрани, Комисија се повукла на већање и једногласно донела следећи закључак:

Комисија је закључила да је кандидат Милош Јањић на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно“. Комисија предлаже да ментор докторске дисертације буде др Миљко Ерић, доцент Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада и оствареног искуства кандидата Милоша Јањића, Комисија је стекла увид у способност кандидата за научно-истраживачки рад, као и његове могућности да током израде предложене докторске дисертације оствари резултате који могу бити верификовани од стране како домаће тако и међународне научне заједнице. Комисија такође констатује да је део резултата већ верификован.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања докторске тезе је калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем (*over-the-air*). Дистрибуирани пријемници имају независне локалне осцилаторе (ЛО). Под *over-the-air* калибрацијом се подразумева процена и компензовање фазног (почетна фаза), фреквенцијског и временског офсета (помераја, помака) између ових осцилатора на основу RF сигнала послатог од стране калибрационог предајника на непознатој локацији. Ако су пријемни канали међусобно синхронизовани временски помак је једнак разлици пређених путева сигнала од предајника до појединачних пријемних канала (*Time Difference of Arrival* - TDOA), а уколико пријемни канали нису

синхронизовани временски помак између канала је једнак збиру TDOA и раздешености временских оса у пријемним каналима. Пријемници су повезани кабловима (дигиталним линковима) са фузионим центром. Посматра се сценарио у ком је LOS (*Line Of Sight*) компонента доминантна и важи просторна кохеренција. Пријемници и предајник су статични за време опсервационог интервала (TDOA константан), тако да су фреквенцијски офсети искључиво последица раздешености локалних осцилатора, дакле не постоји Доплеров помак. Фреквенцијски помак може имати произвољну вредност, обично мању од резолуције DFT (*Discrete Fourier Transform*). Временски помаци не морају бити целобројни умношци периоде одабирања. У општем случају офсети су променљиви у току трајања опсервационог интервала. A/D конвертори у каналима немају исти такт (фреквенцију одабирања), што се рефлектује као променљиво временско кашњење. Укупан временски помак између канала је збир кашњења 1) услед раздешености опсервационих интервала и тактова (променљиво у времену), и 2) кашњења услед пропагације (TDOA) (константно у времену јер предајници и пријемници мирују). Од интереса је тренутни фазни помак који је једнак збиру почетног фазног офсета у датом каналу и фазе намотане услед фреквенцијског офсета у том каналу. Разматран је и једноставнији случај када су офсети константни у току трајања опсервационог интервала и пријемни канали временски синхронизовани. У том случају биће анализирана здружена процена фазног и фреквенцијског офсета, и релативних времена пропагације између пријемника, TDOA.

Циљ истраживања је дефинисање метода за *over-the-air* калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система и анализа перформанси предложених метода. Калибрација се састоји од естимације непознатих параметара (офсета) на основу RF сигнала калибрационог предајника. Фокус ће бити на развоју алгоритама за естимацију, те њиховој анализи коришћењем *Monte Carlo* симулација и експеримената.

У случају константних офсета, биће анализиран утицај коришћења информације садржане у фази носиоца (*Carrier Phase Of Arrival* - CPOA) на прецизност процене наведених параметара у просторно кохерентном сценарију сигнала. Биће предложена 2 алгорита ML (*Maximum Likelihood*) типа, један за сценарио са познатом секвенцом, други за сценарио са непознатом секвенцом.

У зависности од тога који од параметара су познати, три случаја ће бити анализирана:

- 1) фазни офсети, фреквенцијски офсети и TDOA-е између парова канала непознати, што одговара *over-the-air* калибрацији пријемног система коришћењем предајника на непознатој локацији, или TDOA естимацији коришћењем фазно и фреквенцијски несинхронизованих канала.
- 2) фазни офсети и фреквенцијски офсети непознати, TDOA-е познате, што одговара предајнику на познатој локацији коришћеном за калибрисање пријемног система (*over-the-air* калибрација сензора на мастер-славе принципу у системима за дистрибуирани *beamforming* (DB)).
- 3) фазни офсети и фреквенцијски офсети познати, TDOA-е непознате, што одговара TDOA естимацији коришћењем потпуно калибрисаног пријемног система (дистрибуирани пријемни систем калибрисан коришћењем предајника на познатој локацији као у случају 2, или систем са колоцираним пријемницима повезаним калибрисаним коаксијалним кабловима или *Radio Frequency over Fiber* (RFoF линковима са дистрибуираним антенама).

За случај када офсети нису константни у току трајања опсервационог интервала, за процену тренутног временског и фазног помака између канала биће предложени адаптивни алгоритми. Предајник за калибрацију, у општем случају са непознате локације шаље два пилот сигнала међусобно померена у спектру. Први пилот сигнал је широкопојасни и

користи га адаптивни алгоритам за процену временског помака. Не захтева се да пилот секвенца буде позната пријемном систему. Други пилот сигнал је ускопојасни (синусоида) и користи га адаптивни алгоритам за процену тренутног фазног офсета између парова пријемних канала. Фреквенција синусоиде не мора бити позната пријемном систему. Након пристизања сигнала, прво се примењује алгоритам за процену тренутног временског офсета, јер сигнали морају бити временски поравнати пре употребе алгоритма за процену тренутног фазног офсета. Иако је циљ временска калибрација пријемних канала, немогуће је раздвојити временски помак услед раздешености пријемника од временског помака који је последица различитих времена пропагације сигнала од калибрационог предајника до појединачних канала ако је локација предајника калибрационог сигнала непозната. Због тога пријемни систем процењује и компензује укупан временски помак између канала. На овај начин пријемни систем формира *beamformer* ка предајнику калибрационог сигнала. Ако се истовремено прима сигнал од предајника корисног сигнала, који је на различитој локацији, одговарајући TDOA може да се искористи за израчунавање коефицијената *beamformer* -а усмереног ка предајнику корисног сигнала. Пошто су сви променљиви параметри процењени коришћењем калибрационог пријемника, овај TDOA је константан и његова процена одговара горе наведеном случају 3 за процену константних офсета (процена константног TDOA коришћењем калибрисаног пријемног система). Уколико је локација калибрационог предајника позната са великом тачношћу, могуће је одредити локацију корисног предајника. Перформансе наведених алгоритама ће бити експериментално тестиране тако што ће исти бити коришћени за калибрацију USRP (*Universal Software Radio Periferal*) платформи коришћених за DB и директну локализацију.

Адаптивни алгоритам за процену тренутног фазног офсета се такође може користити за процену и компензацију тренутног фазног офсета између предајника и једног пријемника. Поред корисног сигнала, предајник истовремено, у другом делу спектра, шаље и ускопојасни пилот сигнал, на основу којег пријемник процењује тренутни фазни офсет у односу на предајник, тако што пореди примљени калибрациони сигнал са локално генерисаним калибрационим сигналом који је идентичан оном који је предајник послао. Овај алгоритам је експериментално верификован тако што је искоришћен за фазну синхронизацију предајника и пријемника у решењу за коегзистенцију OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) и FH (*Frequency Hopping*) сигнала на принципима когнитивног радија, коришћењем USRP платформи.

Побољшање прецизности процене фазног офсета, фреквенцијског офсета и TDOA коришћењем информације из фазе носиоца RF сигнала није систематски проучавано у литератури, иако то може бити веома корисно за системе који користе DB и дистрибуирани вишекориснички МИМО (*Distributed Multiuser Multiple Input Multiple Output* - DM МИМО) [2.1]-[2.6]. *Over-the-air* синхронизација је наведена у [2.7] као један од најважнијих захтева за локализацију у будућим 5G системима.

Проблем естимације константних фазних, фреквенцијских и временских помераја се проучава већ деценијама [2.8]-[2.11]. Естиматор за TDOA, фазне и дискретне Доплерове фреквенцијске помераје коришћењем случајних Гаусових сигнала предложен је у [2.8]. Сигнал модел са TDOA, произвољним Доплеровим померајима и случајном фазом, и коришћењем непознатих детерминистичких сигнала, анализиран је у [2.9]. У овим радовима, као и у већем броју радова везаних за TDOA/FDOA (*Frequency Difference Of Arrival* - FDOA) локализацију, као на пример у [2.10], фаза носиоца надолazeћег таласа моделира се као део непознатог или случајног фазног члана или комплексног слабљења. Због тога је прецизност процене временског помака у овим класичним методама обрнуто пропорционална *bandwidth*-у примљеног сигнала.

За разлику од тога, у тези се посматра потпуно кохерентни сценарио пропагације (просторна кохеренција), тј. СРОА сигнала услед пропагације од предајника до пријемника моделира се као линеарна функција фреквенције носиоца и времена пропагације. Пошто се фаза носиоца мери по модулу 2π , овај модел има неодређеност (*ambiguity*). Другим ријечима, фаза носиоца

је иста за $\pi/3$ као за $10\pi+\pi/3$, а овим фазама одговарају различите вредности времена пропагације. Weiss и Weinstein су у [2.11] анализирали TDOA естимацију аналогних *bandpass* сигнала, чиме се имплицитно узима у обзир СРОА. За разлику од њих, у тези се TDOA процењује на основу дигиталне верзије сигнала у *baseband*-у. Могућа решења за *ambiguity* проблем су анализирана у [2.12] и [2.13].

DB и DM МИМО су архитектуре којима се бавио веома велики број радова у последњој деценији. Подразумевају организовање већег броја дистрибуираних пријемника/предајника тако да делују као велики класични антенски систем (низ) у циљу фокусирања енергије ка локацији једног пријемника, односно подешавања за пријем сигнала са локације једног предајника (једним именом *beamforming*). Оне обећавају драматично повећање капацитета система, енергетске ефикасности, и/или спектралне ефикасности. За правилан рад, неопходно је обезбедити временску, фреквенцијску и фазну синхронизацију пријемника/предајника. У већини радова из литературе у којима се прогнозирају поменути добици сматра се да су пријемници/предајници синхронизовани. Обезбеђивање синхронизације није једноставно за пријемнике/предајнике који нису колоцирани, дакле користе независне локалне осцилаторе, и то је Рогалин [2.1] навео као једну од две највеће препреке за практичну реализацију ових система. Једна могућност је да се пријемници/предајници колоцирају (добиају исту референцу) и повежу са дистрибуираним антенама користећи коаксијалне каблове или RFoF линкове. Уколико су пријемници/предајници такође дистрибуирани, референтни сигнали за синхронизацију им се могу доставити помоћу оптичких каблова. Ове варијанте са развођењем каблова су скупе и нису погодне за мобилне уређаје. Друго решење је *over-the-air* калибрација. Обично један уређај (*master*) шаље пилот сигнал који преостали уређаји (*slaves*) користе да се синхронизују са предајником пилот сигнала. Синхронизација се врши у аналогном домену закључавањем PLL (*Phase Locked Loop*) петље на фазу и фреквенцију пристиглог сигнала, или у дигиталном домену тако што се процењују фазни и фреквенцијски офсети у односу на пристигли сигнал, па се врши компензација. Дигиталне методе имају већу прецизност [2.6] и њима се бави докторска дисертација. У последњих десетак година неколико група аутора се бавило *over-the-air* синхронизацијом на *master-slave* принципу, у дигиталном домену. У њиховим радовима акценат је на протоколима и имплементацији система за *over-the-air* калибрацију. За имплементацију DB толеришу фазне грешке и од неколико десетина степени [2.5]. Рогалин је у [2.1], између осталог, предложио протокол за *over-the-air* калибрацију у DM МИМО и ML естиматор за здружену процену временског и фреквенцијског офсета. Балан је у [2.2] имплементирао *AirSinc*, шему која у реалном времену обезбеђује временску и фазну синхронизацију са довољном тачношћу (грешка процене фазе износи неколико степени) да се обезбеди функционисање једног OFDM DM МИМО система. Не процењује се фреквенција него тренутни фазни офсет на почетку сваког OFDM фрејма, па се предвиђа вредност офсета за време трајања фрејма. Рахман је у [2.3] имплементирао шему за потпуно бежични DB, укључујући *over-the-air* синхронизацију, коришћењем стандардних *open platform* уређаја, без икаквих хардверских модификација. Протокол за синхронизацију у првом кораку обавља фреквенцијску синхронизацију, а у другом фазну. Рахул је у [2.4] имплементирао *Joint Multiuser Beamforming* (JMB) систем. Пре слања сваког информационог пакета, процењује се тренутни фазни офсет између канала у DB OFDM систему, и та процена се користи за компензацију за време трајања пакета.

[2.1] R. Rogalin, O. Bursalioglu, H. Papadopoulos, G. Caire, A. Molisch, A. Michaloliakos, V. Balan, and K. Psounis, "Scalable synchronization and reciprocity calibration for distributed multiuser MIMO," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 4, pp. 1815–1831, Apr. 2014.

- [2.2] H. V. Balan, R. Rogalin, A. Michaloliakos, K. Psounis, and G. Caire, "AirSync: Enabling distributed multiuser MIMO with wull spatial multiplexing," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 21, no. 6, 1681–1695, Jan. 2013.
- [2.3] M. M. Rahman, H. E. Baidoo-Williams, R. Mudumbai, and S. Dasgupta, "Fully wireless implementation of distributed beamforming on a softwaredefined radio platform," in *Proc. 11th Int. Conf. Inf. Process. Sensor Netw. (IPSN)*, Apr. 2012, pp. 305–316.
- [2.4] H. S. Rahul, S. Kumar, and D. Katabi, "JMB: scaling wireless capacity with user demands," in *Proc. ACM SIGCOMM*, Aug. 2012, pp. 235–246.
- [2.5] R. Mudumbai, D. R. Brown III, U. Madhow, and H. V. Poor, "Distributed transmit beamforming: Challenges and recent progress," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 102–110, Feb. 2009.
- [2.6] D. R. Brown III, Y. Liao, N. Fox, "Low-complexity real-time single-tone phase and frequency estimation," *IEEE Military Commun.*, San Jose, CA, USA, Oct./Nov. 2010.
- [2.7] J. A. Peral-Rosado, G. Seco-Granados, R. Raulefs, et al., "Whitepaper on New Localization Methods for 5G Wireless Systems and the Internet-of-Things," *COST Action CA15104, Technical Report*, Apr. 2018.
- [2.8] M. Wax, "The joint estimation of differential delay, Doppler, and phase," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 28, no. 5, pp. 817–820, Sept. 1982.
- [2.9] A. Yeredor, E. Angel, "Joint TDOA and FDOA estimation: A conditional bound and its use for optimally weighted localization," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 4, pp. 1612–1623, Apr. 2011.
- [2.10] A. Yeredor, "On passive TDOA and FDOA localization using two sensors with no time or frequency synchronization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process.*, Vancouver, Canada, May 2013, pp. 4066–4070.
- [2.11] A. Weiss and E. Weinstein, "Fundamental limitations in passive time delay estimation – Part I: Narrow-band systems," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 31, no. 2, pp. 472–486, Apr. 1983.
- [2.12] M. Scherhäufl, M. Pichler, E. Schimbäck, D. J. Müller, A. Ziroff, and A. Stelzer, "Indoor localization of passive UHF RFID tags based on phase-of arrival evaluation," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 12, pp. 4724–4729, Dec. 2013.
- [2.13] K. Kastella, R. Mudumbai, and T. Stevens, "Frequency estimation in the presence of cycle slips: Filter banks and error bounds for phase unwrapping," *2012 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP)*, Aug. 2012, pp. 277–280.

3. Полазне хипотезе

У овом истраживању полази се од следећих претпоставки (хипотеза):

- 1) У сценарију са променљивим офсетима, пријемни канали који су несинхронизовани временски, фреквенцијски и фазно, могу подесити коефицијенте за *beamforming* ка предајнику корисног сигнала коришћењем његовог сигнала и сигнала који емитује калибрациони предајник (оба на непознатој локацији).

Применом алгоритама за *over-the-air* калибрацију дистрибуираног вишеканалног пријемног система омогућује се употреба јефтиних, потпуно несинхронизованих уређаја у масивним МИМО и DB системима.

- 2) У сценарију са константним офсетима, под условом да важи просторна кохеренција сигнала, тј. фаза носиоца се предвидиво мења по простору тако што је линеарна функција времена пропагације, тј. пређеног пута таласа, и где је LOS компонента доминантна, информација садржана у фази носиоца се може искористити за побољшање прецизности естимације TDOA у вишеканалном пријемном систему. Уместо средње квадратне грешке која је 1-3 реда величине мања од инверзне вриједности *bandwidth*-а сигнала, која се добија када се не користи информација садржана у фази носиоца (користи се само комплексна анvelopа сигнала), може се добити вредност која је 1-3 реда величине мања од инверзне вредности фреквенције носиоца, за рационалан однос сигнал-шум и трајање опсервационог интервала.
- 3) Овако прецизна процена TDOA се може искористити за рачунање коефицијената *beamformer*-а усмереног ка предајнику сигнала на основу којег је израчунат TDOA. Поред тога, може бити искоришћена за прецизно позиционирање антена, које је неопходно за кохерентну локализацију која даје процену локације са грешком 2-3 реда величине испод таласне дужине носиоца RF сигнала.
- 4) Познавање емитоване секвенце омогућује већу прецизност естимације при нижим односима SNR.

4. Научне методе истраживања

У тези ће бити коришћене следеће методе истраживања:

- 1) Аналитичко извођење ML алгоритама са познатом и непознатом секвенцом за здружену естимацију фазног офсета, фреквенцијског офсета, и TDOA (за случај када су ови помераји константни) у вишеканалном дистрибуираном пријемном систему коришћењем предложеног модела сигнала који експлицитно садржи фазу носиоца. Формулисање адаптивних алгоритама за естимацију тренутног временског и фазног офсета (за случај када помераји нису константни) у наведеном систему.
- 2) Теоријска анализа граница за тачност естимације када су офсети константни за предложени модел сигнала извођењем CRB (*Cramer-Rao Bound*) за 3 наведена случаја, који се разликују по томе који параметри (помераји) су непознати.
- 3) *Monte Carlo* симулације коришћењем Матлаб програма за одређивање статистичких перформанси предложених алгоритама за здружену процену параметара математичког модела сигнала.
- 4) Експериментална верификација алгоритама за процену тренутног временског и фазног помака коришћењем USRP платформи.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да докторска дисертација има следећи научни допринос:

- 1) У дисертацији ће бити извршена теоријска анализа утицаја коришћења информације смештене у фази носиоца примљеног сигнала на перформансе здружене естимације TDOA, фазног и фреквенцијског офсета (константни офсети) у дистрибуираном

временски синхронизованом вишеканалном пријемном систему са независним локалним осцилаторима, у кохерентном просторном сценарију и изведена теоријска граница варијансе грешке при здруженој процени параметара.

- 2) Биће предложена два нова алгоритма ML типа за здружену процену параметара (један за познату, други за непознату секвенцу). Ова анализа ће показати колики добици у прецизности естимације могу бити добијени коришћењем СРОА у зависности од тога који од наведених параметара су непознати, односно који услови морају бити задовољени да би се достигла прецизност процене TDOA која је довољно добра да буде коришћена за *beamforming* у дистрибуираним антенским низовима.
- 3) Биће предложени нови адаптивни алгоритми за процену тренутног временског и фазног офсета (променљиви офсети) у дистрибуираном вишеканалном пријемном систему. Биће испитане перформансе и могућности примене алгоритама. Перформансе алгоритама за процену тренутног временског и фазног офсета ће бити експериментално верификоване њиховим коришћењем за синхронизацију USRP платформи, како за имплементацију дистрибуираног *beamformer*-а и директне локализације, тако и у решењу за коегзистенцију OFDM и FH сигнала на принципу когнитивног радија.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања докторске дисертације може се поделити на неколико корака:

- 1) Преглед литературе везане за *over-the-air* синхронизацију у контексту DB и DM МИМО система.
- 2) Преглед литературе везане за естимацију временских, фазних и фреквенцијских помераја у вишеканалном пријемном систему.
- 3) Формулисање новог модела сигнала који експлицитно садржи фазу носиоца.
- 4) Развој алгоритама за здружену естимацију TDOA, фазног и фреквенцијског помака када су они константни, који користи информацију о фази носиоца RF сигнала и анализа њихових перформанси за случај сва 3 непозната параметра, случај непознате фазног и фреквенцијског помака (TDOA познат), и случај непознатог TDOA (фазни и фреквенцијски офсети познати).
- 5) Развој адаптивних алгоритама за процену тренутног временског и фазног офсета у случају променљивих офсета и анализа перформанси, те верификација ових алгоритама коришћењем USRP платформи, како за имплементацију дистрибуираног *beamformer*-а и локализације, тако и у решењу за коегзистенцију OFDM и FH сигнала на принципу когнитивног радија.
- 6) Дефинисање даљих праваца истраживања.

Структура предложене тезе пратиће наведени план истраживања.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, непосредног увида у научни рад и положеног испита о подобности теме и кандидата, Комисија је закључила да кандидат Милош Јањић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све законске, формалне и суштинске услове као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом оцене подобности теме и кандидата на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Тема дисертације је актуелна и делови истраживања су већ верификовани у међународној јавности.

Комисија констатује да тема припада научној области Електротехника и рачунарство, а ужа научна област је Телекомуникације, за коју је Електротехнички факултет у Београду матичан. Комисија за ментора докторске дисертације предлаже др Миљка Ерића, доцента, запосленог на Електротехничком факултету у Београду.

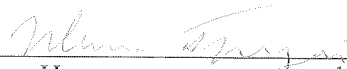
Комисија има задовољство и част да предложи Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Милошу Јањићу одобри израду докторске дисертације под насловом „Калибрација дистрибуираног вишеканалног пријемног система бежичним путем“.

У Београду, 10.9.2018. године

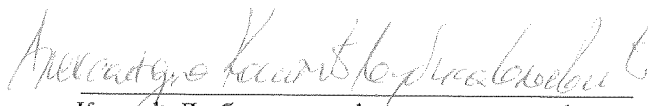
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



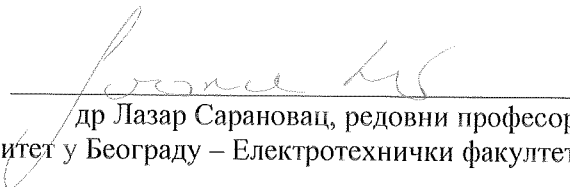
др Миљко Ерић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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