

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Ненада Вукмировића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5023/13-1 од 19.7.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Ненада Вукмировића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме

„Кохерентна директна локализација у дистрибуираним масивним вишеантенским системима”

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Ненад Вукмировић рођен је 04.10.1988. године у Београду. Основну школу и Математичку гимназију завршио је у Београду, са одличним успехом. Електротехнички факултет у Београду уписао је школске 2007/08. године. Дипломирао је на Одсеку за телекомуникације 2011. године, са просечном оценом 9,84. Дипломски рад под насловом “Веб сајт IEEE HPSR 2012”, одбранио је са оценом 10. Ментор дипломског рада била је проф. Александра Смиљанић. Мастер студије на истом факултету уписао је школске 2011/12 године и завршио их 2013. године са просечном оценом 10. Мастер рад под називом “Имплементација RSVP протокола на платформама отвореног кода” одбранио је са оценом 10. Ментор мастер рада био је проф. Зоран Чича.

Тренутно је студент докторских академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Телекомуникације. Од јула 2018. године 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. Завршио је курсеве енглеског језика закључно са конверзацијским на Институту за стране језике у Београду.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске академске студије уписао је школске 2013/2014. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Телекомуникације, где је положио све испите са највишом оценом и урадио све обавезе предвиђене планом и програмом докторских студија.

Списак положених испита:

1. Случајни процеси у телекомуникацијама (оцена: 10, 9 ЕСПБ)

2. Савремене технике контроле грешака у телекомуникацијама (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
3. Примењена статистика (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
4. Функционална анализа и примене (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
5. Комбинаторика и примене (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
6. Просторно - временска обрада сигнала (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
7. Теорија графова са применама у електротехници и рачунарству (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
8. Дигитална обрада сигнала (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
9. Мера и интеграција (оцена: 10, 9 ЕСПБ)
10. Увод у научни рад (оцена: 10, 6 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 локализационих/телекомуникационих система.

Конкретно, активности по предметима су следеће:

- Случајни процеси у телекомуникацијама: провера теоријског знања и израда семинарског рада из области вероватноће и статистике и теорије информација
- Савремене технике контроле грешака у телекомуникацијама: проучавање литературе, провера теоријског знања и израда семинарског рада о кодовима са ограничењима
- Примењена статистика: проучавање литературе, провера теоријског знања, израда семинарског рада о марковским ланцима и Монте-Карло симулацијама и израда програма за Монте-Карло симулације поменутих ланаца
- Функционална анализа и примене: проучавање литературе, провера теоријског знања и израда семинарског рада о Лебеговој теорему и применама у израчунавању интеграла са параметром
- Комбинаторика и примене: проучавање литературе, провера теоријског знања и израда семинарског рада о комбинаторној оптимизацији у мрежама, а у области теорије графова
- Просторно - временска обрада сигнала: проучавање литературе, израда програма у софтверском пакету Matlab за генерисање сигнала на антенском низу и њихову обраду за потребе процене смера доласка и усмеравања дијаграма зрачења, као и израда извештаја о извршеним симулацијама
- Теорија графова са применама у електротехници и рачунарству: проучавање литературе, провера теоријског знања, израда семинарског рада о разапињућим стаблима и базама циклуса у теорији графова и израда програма за проналажење минималног разапињућег стабла и одговарајуће базе циклуса у произвољном задатом графу
- Дигитална обрада сигнала: проучавање литературе, израда програма у софтверском пакету Matlab за симулацију преноса у *single-rate* и *multi-rate* системима и израда семинарског рада о поређењу поменутих система симулацијом и експерименталним мерењима
- Мера и интеграција: проучавање литературе, провера теоријског знања, израда семинарског рада о Лебег-Стилтесовом интегралу и конструисању једног специјалног случаја простора мере
- Увод у научни рад: проучавање начина за припрему рада за објављивање у научном часопису или конференцији. Припремање студента да оформи докторску тезу, припреми семинар о проблему који истражује и успешно комуницира са редакторима и рецензентима научних часописа.

Окосницу истраживачког рада у вези са докторском тезом чине анализа и формулисање алгоритама за локализацију радио предајника помоћу дистрибуираног масивног ММО система у просторно кохерентном сценарију. Истраживања из ове области до сада је публиковао у два часописа међународног значаја и на три конференције међународног значаја.

1.2.1. Објављени радови

Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

[1.1] **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)

Рад у међународном часопису (M23):

[1.2] 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: 1210-2512, IF=0.945)

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

[1.3] **N. Vukmirović**, M. Janjić, P. Ivaniš, "An error correcting technique for performance improvement of OFDM based secondary link", in *International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, Niš, Serbia, Oct. 14-17 2015.

[1.4] M. Erić, **N. Vukmirović**, M. Janjić, "Calibration of Local Oscillators Mismatch in a Multi-channel Receiving System", in *Proc. IcETRAN 2017*, Kladovo, Serbia, June 5-8, 2017, pp. 1-5. ISBN: 978-86-7466-692-0.

[1.5] **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.

Техничко решење категорије M83:

[1.5] 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:

[1.6] **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.

[1.7] 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.

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

[1.9] 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 Марија Стевановић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет
- др Марија Малнар, доцент, Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет.

Усмена одбрана је почела у 11 часова, а завршена је у 12 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 око 20 минута сажето изложио област, предмет, циљеве, полазне хипотезе и методе истраживања, те дао осврт на очекиване научне доприносе, значај и правце даљих истраживања. У краћем уводном излагању кандидат је изложио тренутно стање у области двокорачних и једнокорачних техника за локализацију и у том контексту навео да је фокус истраживања у дисертацији везан за директну локализацију у масивним МИМО системима у сценарију када је очувана просторна кохеренција ЛОС компоненти сигнала. Кандидат је укратко изложио до сада остварене и верификоване резултате истраживања. Презентирао је досадашње резултате истраживања који показују да се у просторно кохерентном сценарију теоријски може достићи тачност локализације која је за два до три реда величине боља од таласне дужине носиоца што постојеће двокорачне и једнокорачне технике за локализацију не омогућавају. Посебно је елаборирао проблем вишезначности процене позиције и назначио које начине се тај проблем може решавати. Изложио је предложени концепт хибридне архитектуре масивног МИМО система којом се може остварити захтевана тачност локализације и уједно решити проблем вишезначности процене локације. Такође је презентовао перформансе алгоритама за директну кохерентну и некохерентну локализацију који су предложени у досадашњим истраживањима и верификовани у истакнутом међународном часопису. На крају излагања кандидат је елаборирао значај и правце будућих истраживања.

Проф. Марија Стевановић поставила је кандидату питања из области електромагнетике. Проф. Предраг Иваниш поставио је питања везана за област теорије детекције. Доцент Марија Малнар поставила је питања из области радио комуникација. 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 Ненад Вукмировић 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 Ненада Вукмировића, 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 предложене теме докторске дисертације је директна (тј. једнокорачна) локализација у масивним МИМО (*Multiple-Input-Multiple-Output*) системима у *Millimeter-Wave* (mmWave) опсеру. Масивни МИМО системи и mmWave комуникације су револуционарне технологије чија се примена очекује у будућим ћелијским системима пете генерације (5G).

Због својих специфичности, оне представљају велики истраживачки изазов. На основу прегледног рада [2.1], један од битних праваца истраживања је локализација предајника са прецизношћу бољом од 10 cm. Главни предмет истраживања би била поменута локализација дистрибуираним масивним MIMO системом (са антенским поднизовима) у просторно кохерентном сценарију LoS (*Line-of-Sight*) компоненти. Овај просторно кохерентни сценарио је онај пропагациони сценарио у коме су у разликама фаза носиоца LoS компоненти на пријемним антенама задржане (нису изгубљене) информације о локацији датог предајника. Захваљујући тим додатним информацијама, поред оних које су садржане у анVELOпама сигнала, очекује се прецизност локализације за 2 до 3 реда величине боља од таласне дужине носиоца. Ово је знатно боље од 10 cm у mmWave опсегу. Овакву прецизност не достижу класичне двокорачне методе, као ни једнокорачна DPD (*Direct Position Determination*) техника предложена у [2.2] и [2.3]. Алгоритми који користе кохеренцију имају проблем вишезначности (*ambiguity problem*) због бочних лобова критеријумске функције, тако да ће се истраживање бавити и налажењем стратегије претраживања којом се овај проблем решава. Посматраће се једнокориснички и вишекориснички сценарио, једнострука (LoS) и вишеструка пропагација, као и алгоритми који користе (и знају) и који не користе послату секвенцу.

Циљ истраживања је формулисање модела сигнала за просторно кохерентни сценарио и извођење Крамер-Раове границе за грешку локализације у таквом моделу. Следећи корак је да се предложи архитектура дистрибуираног масивног MIMO система са фазираним антенским решеткама којом ће се вршити локализација. Затим треба развити нове (кохерентне) алгоритме. Потом треба предложити вишеетапну стратегију претраживања за дату архитектуру којом се решава проблем вишезначности кохерентних алгоритама, а да се притом достигне прецизност за 2 до 3 реда величине боља од таласне дужине носиоца. На крају се очекује симулациона анализа перформанси предложених алгоритама.

Значај истраживања је у обезбеђивању локализације са грешком процене позиције која је за неколико редова величине мања од оне у класичним вишекорачним и једнокорачним техникама које не користе фазе носиоца са дистрибуираних антена. Поред самог добијања прецизних података о локацији, овај резултат би могао да се примени тако што би се подешавали коефицијенти којима се множе сигнали на антенама у дистрибуираном антенском низу базне станице (DB - *Distributed Beamforming*) тако да се енергија послатих *downlink* сигнала концентрише на месту корисничког терминала. Слично, на *uplink*-у би се повећала осетљивост антенског низа тако да терминал може мањом снагом да предаје. Овим би се смањила међукорисничка интерференција и били би повећани капацитет система и спектрална и енергетска ефикасност, што се захтева од будућих генерација ћелијских система.

Предложена тема припада значајној области, што се види на основу великог броја објављених радова, од којих су неки дати у даљем тексту. Тема је и актуелна, што се види из радова објављених у последњих неколико година.

[2.1] K. Witrisal, C. Haro (editors), and 44 authors, "Whitepaper on new localization methods for 5G wireless systems and the Internet-of-Things", COST CA15104 (IRACON), Apr. 2018.

[2.2] A. Weiss, "Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 513–516, May 2004.

[2.3] A. Weiss and A. Amar, "Direct position determination of multiple radio signals", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2005, no. 1, pp. 37–49, Jan. 2005.

[2.4] A. Weiss and E. Weinstein, "Fundamental limitations in passive time delay estimation – Part I: Narrow-band systems", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 31, no. 2, pp. 472–486, Apr. 1983.

- [2.5] M. Scherhäufl, M. Pichler, and A. Stelzer, "UHF RFID localization based on phase evaluation of passive tag arrays", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 14, pp. 913–922, Apr. 2015.
- [2.6] M. Oispuu and U. Nickel, "3D passive source localization by a multiarray network: Noncoherent vs. coherent processing", In *International ITG Workshop on Smart Antennas, WSA 2010*, Bremen, Germany, Feb. 2010, pp. 300–305.
- [2.7] N. Hadaschik, B. Sackenreuter, M. Schäfer, and M. Faßbinder, "Direct positioning with multiple antenna arrays", In *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Banff, AB, Canada, Oct. 2015, pp. 1–10.
- [2.8] H. Godrich, A. Haimovich, and R. Blum, "Target localization accuracy gain in MIMO radar-based systems", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 6, pp. 2783–2803, June 2010.
- [2.9] H. Xu, V. Kukshya, and T. Rappaport, "Spatial and temporal characterization of 60 GHz indoor channels", In *Fall 2000 IEEE Vehicular Technology Conference*, Boston, MA, USA, Sep. 2000, pp. 620–630.
- [2.10] T. Marzetta, E. Larsson, H. Yang, and H. Ngo, *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- [2.11] T. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [2.12] V. Venkateswaran and A. J. van der Veen, "Analog beamforming in MIMO communications with phase shift networks and online channel estimation", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 8, pp. 4131–4143, Aug. 2010.
- [2.13] R. Di Taranto, S. Muppirisetty, R. Raulefs, D. Slock, T. Svensson, and H. Wymeersch, "Location-aware communications for 5G networks: How location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 102–112, Nov. 2014.

Аутори су у [2.2] и [2.3] показали да техника директне локализације DPD по перформансама надмашује класичне двокорачне технике, као на пример оне које процењују углове доласка сигнала (*Angle of Arrival*) или ToA (*Time-of-Arrival*) параметре на свакој базној станици посебно, па онда у другом кораку здружују те међупроцене у процену локације предајника, иако користи исте сирове податке (примљене сигнале) као и те класичне технике. Пошто су разматране базне станице на међусобном растојању реда километра, није рачунато на постојање просторне кохеренције између њих, па је грешка локализације била реда величине 10 m или 100 m.

Аутори [2.4] су показали да се при одговарајућим условима може добити знатно прецизнија процена временског помака између две примљене реплике сигнала, ако се искористи фаза носиоца. Такође је показано да, при коришћењу те фазе, критеријумска функција може да има изражене бочне лобове, у зависности од системских параметара, што доводи до вишезначности процене. Посматрају се аналогни *bandpass* сигнали и рад има теоријски допринос. Тема рада [2.4] представља увод у локализацију на TDoA (*Time-Difference-of-Arrival*) принципу.

Радови [2.5], [2.6], [2.7] и [2.8] се баве локализацијом која у мањој или већој мери користи кохеренцију између сигнала примљених међусобно размакнутим антенама. Аутори [2.5] су се

бавили локализацијом RFID (*Radio Frequency IDentification*) tag-ова у затвореном простору на основу разлика фаза носиоца у пријемним каналима. Користили су ускопојасне сигнале са носиоцем испод 1 GHz и експериментално показали да се може достићи прецизност од неколико процената таласне дужине носиоца.

У [2.6] је коришћен дистрибуирани антенски низ који се састоји од поднизова (са антенама на малим растојањима унутар једног подниза) за пасивно лоцирање предајника. Извршено је поређење прецизности између некохерентне и кохерентне локализације користећи сигнале који су ускопојасни и планарни унутар поднизова. Примећено је знатно побољшање код кохерентне локализације у случајевима у којима кохеренција између различитих поднизова уопште постоји.

Рад [2.7] се бави локализацијом предајника ускопојасног сигнала уз помоћ 4 дистрибуирана подниза у окружењу са вишеструким простирањем. Између поднизова су анализирани различити нивои кохеренције. Симулацијама и експериментално је показано осетно побољшање у односу на класичне AoA методе, упркос вишеструком простирању.

Аутори [2.8] су анализирали перформансе локализације рефлектујуће мете помоћу МИМО-радарског система, који се састоји из већег броја дистрибуираних пријемника и предајника. Показали су да се коришћењем фазе носиоца може остварити добитак у прецизности једнак количнику фреквенције носиоца и ширине спектра сигнала. Ипак, код њих су предајници део система за локализацију и фино су синхронизовани са пријемницима, па би се могло рећи да је њихова локализација на ТоА принципу. Са друге стране, у комерцијалним хелијским системима би било скупо или неизводљиво фино временски, фреквенцијски и фазно синхронизовати предајнике корисничких терминала са пријемним системом базе станице (или више њих). У овој примени (којом би се бавила дисертација) би се могло рачунати на синхронизацију између пријемних канала, тако да би локализација могла да буде на TDoA принципу. У [2.8] је предложено да се, због нумеричке комплексности кохерентног алгорита, прво некохерентним алгоритмом направи груба процена локације, чиме би се сузио домен претраге кохерентног. Ова идеја се може искористити и у пасивној локализацији у хелијским системима.

У [2.9] је експериментално показано да је у затвореном простору на 60 GHz снага NLoS компоненти бар за 10 dB испод снаге LoS компоненте. Ово отвара врата локализацији која се ослања на просторну кохеренцију у затвореном простору и у складу је са настојањем да се у будућим генерацијама хелијских система користе опсежи на вишим фреквенцијама, где је лакше остварити веће битске протоке.

Аутор у [2.10] детаљно објашњава особине (предности) масивних МИМО система. Корелисаност преносних карактеристика између различитих предајних и пријемних антена није проблем за просторно мултиплексирање. Терминали су једноставни и не захтева се од њих скупа обрада сигнала за потребе комуникације, као ни познавање стања пропагационог канала (CSI - *Channel State Information*). Базна станица уз малу редундансу сазнаје CSI и скалабилна је по питању броја антена у свом низу. Такође се остварује равномерно добар квалитет сервиса по хелији. У [2.11] је показано да са повећањем броја антена на базној станици негативни ефекти шума и брзог фединга постају занемарљиви, а енергетска ефикасност се знатно побољшава. Све поменуте особине масивних МИМО система их чине привлачним за примену, јер се од система који би био анализиран у дисертацији не очекује да служи само за локализацију, него и за комуникацију.

Аутори су у [2.12] показали да би у масивним МИМО системима било непрактично имати по један RF (*Radio Frequency*) ланац (A/D конвертор и придружена електроника) за сваку антену базе станице. Хардвер би био прескуп, тешко би га било интегрисати и био би енергетски прескуп, поготово ако би A/D конвертори имали већи број квантизационих нивоа. Уместо тога предлажу да се уз велики број антена користи мали број RF ланца између којих је аналогна мрежа за линеарно комбиновање RF сигнала. Показују да се, упркос ограничењима које такав

хардвер намеће, могу остварити велике уштеде уз незнатно погоршање перформанси. Из ових разлога би у дисертацији био коришћен овај приступ.

Аутори у [2.13] показују како се информација о локацији корисничког терминала може употребити за побољшање квалитета сервиса. Један од приступа је *Coordinated Coordinated Multipoint transmission*. Овај рад представља мотивацију за истраживање у области локализације.

3. Полазне хипотезе

Кључне хипотезе истраживања су следеће:

1. Да се, у условима просторне кохеренције *LoS* компоненти сигнала коришћењем калибрисаног дистрибуираног масивног МИМО система за реалистичне вредности системских параметара (као што је однос сигнал-шум, број антена, број узорака сигнала) може локализовати предајник са прецизношћу за 2 до 3 реда величине бољом од таласне дужине носиоца.
2. Да се, у истим условима, коришћењем калибрисаног хибридног масивног МИМО система предложеног од стране кандидата, може уједно локализовати предајник са датом прецизношћу и решити проблем вишезначности, који је инхерентан код техника за кохерентну локализацију

Поред наведених, постављене су и следеће хипотезе истраживања:

- 1) Ако се локализација врши на основу познате секвенце (пилот сигнала познатог пријемнику), очекује се да би прецизност локализације могла бити додатно побољшана, поготово при ниским односима сигнал-шум. Ово намеће додатан хардверски услов - да унутар сваког пријемника/предајника локални носилац и такт буду спрегнути по фази (што би било обезбеђено неким аналогним склопом или грешка процењена, па компензована у дигиталном домену). Ако би корисницима у датој ћелији биле додељене међусобно ортогоналне секвенце, претпоставка је да се иста алгоритмика може применити и у мултикорисничком сценарију, у коме се корисници преклапају и у времену и у спектру.
- 2) Претпоставка је да се коришћењем просторне кохеренције само између антена које припадају истом поднизу (полукохерентни алгоритам), може локализовати предајник довољно прецизно да процена припада главном лобу критеријумске функције кохерентног алгоритма. Тиме би се драстично сузио домен претраживања за тај кохерентни алгоритам и био би решен његов проблем вишезначности процене.
- 3) Хипотеза је да се може формулисати поменути полукохерентни алгоритам тако да даје одговарајућу процену упркос томе што нема приступ сигнаlima са свих антена, него само приступ малом броју линеарних комбинација тих сигнала на сваком од поднизова (по 1 или 2 по поднизу).
- 4) У случају вишеструког простирања са односом снаге *LoS* и *NLoS* компоненти од бар 10 dB, хипотеза је да ће поменути алгоритми и даље успешно да функционишу.

4. Научне методе истраживања

У тези ће бити коришћене следеће методе истраживања:

1. Математичко моделовање сигнала у дистрибуираном масивном МИМО систему у просторно кохерентном сценарију сигнала.
2. Извођење теоријске Крамер-Раове границе за грешку естимације позиције предајника за претпостављен математички модел сигнала.

3. Монте-Карло симулације за анализу перформанси предложених полукохерентних и кохерентних алгоритама са локализацију, укључујући и вишезначност процена.
4. Експериментална провера претпоставки математичког модела и перформанси предложених алгоритама за локализацију.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да докторска дисертација има следеће научне доприносе:

1. Полазећи од математичког модела сигнала у дистрибуираним Масивним МИМО системима у условима просторне кохеренције LOS компоненти, у дисертацији ће бити изведена теоријска CRB граница варијансе грешке 3Д локализације у таквом сценарију.
2. Биће изведени нови алгоритми ML типа за кохерентну и некохерентну локализацију у претпостављеном моделу дистрибуираног масивног МИМО система, и истражена статистичка ефикасност предложених алгоритама и њихове перформансе у условима вишеструког простирања (*multipath-a*).
3. Биће предложена иновативна хибридна архитектура масивног МИМО система која се заснива на коришћењу дистрибуираних фазних антенских решетки и формулисана вишестепена стратегија претраживања/скенирања у хибридној архитектури којом се у милиметарском опсегу (*mmWave*) остварује велика прецизност локализације (за два реда величине боља од таласне дужине носиоца) и уједно решава проблем вишезначности при локализацији.
4. Биће предложени и развијени нови полукохерентни и кохерентни алгоритама за широкопојасну директну локализацију у хибридној архитектури дистрибуираног масивног МИМО система и истражене перформансе њихове перформансе у LOS и *multipath* сценарију сигнала у милиметарском опсегу (*mmWave*).

6. План истраживања и структура рада

План истраживања докторске дисертације може се поделити на неколико корака:

- 1) Проучавање литературе везане за директну локализацију радио предајника која не користи фазу носиоца за процену.
- 2) Проучавање литературе у којој се за процену локације/кашњења на један или други начин користи фаза носиоца, као и литературе о масивним МИМО системима.
- 3) Увођење новог математичког модела који детерминистички моделује фазу носиоца у демодулисаном (и дискретизованом) сигналу.
- 4) Извођење теоријске границе за грешку локализације предајника широкопојасног сигнала дистрибуираним калибрисаним антенским низом у просторно кохерентном сценарију LoS компоненти сигнала.
- 5) Извођење алгоритама за локализацију, од којих се неки ослањају на познавање корисничке секвенце, а неки не, неки у већој, а неки у мањој мери користе фазне односе између сигнала са различитих пријемних антена.
- 6) Симулација локализације коришћењем предложених алгоритама и њихова упоредна анализа.
- 7) Дефинисање даљих праваца истраживања везаних за локализацију у поменутом или проширеном сценарију.

Структура предложене дисертације 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 Ненад Вукмировић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све законске, формалне и суштинске услове као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом оцене подобности 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.

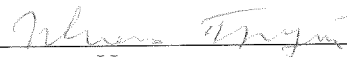
Комисија има задовољство и част да предложи Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да одобри израду докторске дисертације кандидату Ненаду Вукмировићу под насловом „Кохерентна директна локализација у дистрибуираним масивним вишеантенским системима”.

У Београду, 10.9.2018. године

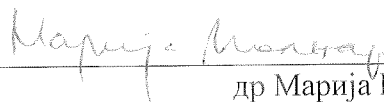
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Миљко Ерић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



др Марија Малнар, доцент
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет



др Марија Стевановић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет