

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Ђорђа Лукића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 2040/28 од 05.11.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Ђорђа Лукића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под називом „Ефикасне методе груписања корисника за вишеантенски пренос у мобилним мрежама будуће генерације” (на енглеском „*The Efficient User Grouping Methods for Multi-Antenna Transmission in Next Generation of Mobile Networks*”)

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Ђорђе Лукић је рођен 06.05.1992. године у Београду. Основну школу „Деспот Стефан Лазаревић” завршио је у Београду, као ђак генерације и носилац дипломе „Вук Караџић”. Након тога завршава Прву београдску гимназију, такође у Београду као носилац дипломе „Вук Караџић”. Током основног и средњег образовања, учествовао је на семинарима Истраживачке станице Петница, писао је радове из географије у оквиру Регионалног центра за таленте и освајао је награде на такмичењима из физике и хемије.

Основне академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписује 2011. године, и завршава их 2015. године са просечном оценом 9.87 током студија, на Одсеку за телекомуникације и информационе технологије, смер Радио комуникације. Завршни рад, под називом „Експериментална анализа фактора активности и предајних снага мобилног терминала у јавним мобилним системима”, одбранио је са оценом 10.00 (ментор је био проф. Александар Нешковић). Добитник је признања Електротехничког факултета Универзитета у Београду и награде „Проф. др Илија Стојановић“ Теленор фондације за најбољег дипломираног студента на модулу Телекомуникације и информационе технологије. Стручну праксу је обавио у Регулаторном телу за електронске комуникације и поштанске услуге (РАТЕЛ), а непосредно након завршетка основних академских студија



одлази на студентску размену у Оман где ради код националног мобилног оператора преко IAESTE (*International Association for the Exchange of Students for Technical Experience*) организације. Мастер академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписује 2015. године, на модулу Системско инжењерство и радио комуникације, које завршава наредне године са просечном оценом 10.00 током студија. Завршни (мастер) рад под називом „Експериментална анализа перформанси јавних мобилних мрежа” одбранио је са оценом 10.00 (ментор је био проф. Александар Нешковић). Стручну праксу обавља у компанији *Huawei Technologies* у оквиру *Seeds for the Future* програма као део делегације Електротехничког факултета у посети Народној Републици Кини. Током основних и мастер академских студија 2015. године и 2016. године, као члан тима Електротехничког факултета у Београду, освајао је прва места у појединачној категорији на такмичењима у дисциплини Телекомуникације на међународном сусрету студената електротехнике Електријада. У периоду 2015 – 2016 године је био стипендиста стипендије Доситеј од стране Фонда за младе таленте Републике Србије.

Докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписује 2016. године, на модулу Телекомуникације. У периоду 2022 - 2023 године добија стипендију и похађа две летње тренинг школе за студенте докторских студија у организацији COST (*European Cooperation in Science and Technology*) акције Европске уније из области мобилних радио комуникација.

Од 2016. године запослен је у компанијом *Aspire Technology* из Београда, која се бави дизајном и оптимизацијом мобилних мрежа. Прве три године ради у R&D сектору компаније на пројектима тестирања и одржавања софтвера *Ericsson* производа радио приступне мреже. Током 2019. године прелази у сектор исте компаније за професионалне сервисе где наредне три године ради на пројектима оптимизације целокупне радио приступне мреже коју чине *Ericsson* производи за мобилне операторе у оквиру *Digicel* групе. Од 2022. године ангажован је на позицији *Ericsson* системског инжењера надлежног за дизајн и стратегију развоја *Vodafone* радио приступне мреже у Великој Британији. Од школске 2022/2023 године ангажован је од стране Рачунарског факултета у Београду на позицији хонорарног асистента ради извођења наставе из више предмета, и то: Дигиталне комуникације, Кодовање и теорија информација, Компresiја података и Бежичне и мобилне комуникације.

Ђорђе Лукић је аутор 2 рада у међународним научним часописима са SCI листе, 6 радова на научним скуповима међународног значаја и 1 рада на научном скупу националног значаја.

## 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао 2016. године, на модулу Телекомуникације. Током докторских академских студија положио је све наставним планом предвиђене испите са просечном оценом 10.00, и испунио је све обавезе (укупно остварио 120 ЕСПБ), и то:

| Ред. бр. | Назив и шифра испита                                              | Оцена | ЕСПБ |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-------|------|
| 1        | Когнитивне радио мреже (13Д01КОГР)                                | 10    | 9    |
| 2        | Моделовање саобраћаја у М2М комуникационим системима (13Д031МСКС) | 10    | 9    |
| 3        | Случајни процеси у телекомуникацијама (13Д031СПТ)                 | 10    | 9    |
| 4        | Теорија телекомуникационог саобраћаја (13Д031ТТС)                 | 10    | 9    |
| 5        | Специјалне функције (13Д081СФ)                                    | 10    | 9    |
| 6        | Кооперативне технике у телекомуникацијама (13Д031КТТ)             | 10    | 9    |



|    |                                                                     |    |             |
|----|---------------------------------------------------------------------|----|-------------|
| 7  | Савремене технике контроле грешака у телекомуникацијама (13Д031СТК) | 10 | 9           |
| 8  | Функционална анализа и примене (13Д081ФАП)                          | 10 | 9           |
| 9  | Увод у научни рад (13Д091УНР)                                       | 10 | 6           |
| 10 | Дистрибуирани телекомуникациони системи (13Д031ДТС)                 | 10 | 9           |
|    | <b>Назив обавезе</b>                                                |    | <b>ЕСПБ</b> |
| 1  | Студијски истраживачки рад I                                        |    | 15          |
| 2  | Студијски истраживачки рад II                                       |    | 15          |
| 3  | Научно стручни рад                                                  |    | 3           |

Током прве две године докторских академских студија, стекао је основна знања из области вишеантенских тј. ММО (енг. *Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*) комуникација, а у наредном периоду своје истраживање усмерава на анализу стратегија груписања корисника, као и испитивање ефикасности њихове примене у комбинацији са дигиталним *beamforming* техникама (техникама прекодовања) у *downlink* смеру преноса у оквиру вишекорисничких ММО система, који представљају тему докторске дисертације. Иницијални резултати истраживања су објављени у једном раду у часопису од међународног значаја, у три рада на међународним научним скуповима, као и једном раду на научном скупу националног значаја.

У току свог досадашњег научно-истраживачко рада кандидат је као аутор или коаутор објавио 2 рада у међународним научним часописима са SCI листе (један рад категорије M21 и један рад категорије M22), 6 радова у зборницима научних скупова међународног значаја (катеорија M33) и 1 рад на научном скупу националног значаја (катеорија M63), при чему је списак (библиографија) објављених радова кандидата дата у наставку.

У оквиру летње тренинг школе за студенте докторских студија у организацији COST (*European Cooperation in Science and Technology*) акције Европске уније из области мобилних радио комуникација, освојио је прво место на такмичењу за најиновативнију тему докторске дисертације. У оквиру исте COST акције 2024. године изабран је за копредседавајућег радне групе која се бави организацијом конференција, тренинг школа и краткорочних научних мисија.

Списак објављених радова кандидата Ђорђа Лукића:

#### **Категорија M20 – Радови објављени у научним часописима међународног значаја**

- [1] **Dj. B. Lukic**, G. B. Markovic, and D. D. Drajić, "Two-Stage Precoding Based on Overlapping User Grouping Approach in IoT-Oriented 5G MU-MIMO Systems," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, no. 1, pp. 1-13, January 2021. ISSN: 1530-8677, IF<sub>2021</sub>: 2.146, doi: 10.1155/2021/8887445. (M22)
- [2] I. Novkovic, G. B. Markovic, **Dj. Lukic**, S. Dragicevic, M. Milosevic, S. Djurdjic, I. Samardzic, T. Lezaic, and M. Tadic, "GIS-Based Forest Fire Susceptibility Zonation with IoT Sensor Network Support, Case Study-Nature Park Golija, Serbia," *Sensors*, vol. 21, no. 1, pp. 6520-6549, September 2021. ISSN: 1424-8220, IF<sub>2021</sub>: 3.847, doi: 10.3390/s21196520. (M21)

#### **Категорија M30 – Радови објављени у зборницима међународних научних скупова**

- [1] **Đ. Lukić**, M. Koprivica, N. Nešković, and A. Nešković, "Experimental performance analysis of the 2G/3G/4G public mobile network," in *Proceedings of the 24<sup>th</sup> Telecommunications Forum TELFOR 2016*, pp. 1-4, Belgrade, Serbia, 22-23 November 2016, doi: 10.1109/TELFOR.2016.7818767. (M33)



- [2] **Đ. Lukić**, and D. Drajić, "Comparative analysis of communication standards for Smart City deployment," in *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Information Society and Technology (ICIST2017)*, pp. 320-324, Kopaonik, Serbia, 12-15 March 2017. doi: 10.3390/s21196520. (M33)
- [3] **Đ. Lukić**, G. Marković, and D. Drajić, "Zero-forcing beamforming user grouping algorithms in massive MIMO systems," in *Proc. Of 25<sup>th</sup> Telecommunications Forum TELFOR 2017*, pp. 1-4, Belgrade, Serbia, 21-22 November 2017, doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249320. (M33)
- [4] **Đ. Lukić**, and B. Lukić, "Application of wireless sensor networks in flood detection and river pollution monitoring," in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Geographical Research and Cross-Border Cooperation*, pp. 118-122, Craiova, Romania, 6-9 September 2018, doi: 10.5775/fg.2018.097.d. (M33)
- [5] I. Tomić, **Đ. Lukić**, M. Davidović, D. Drajić, and P. Ivaniš, "Statistical analysis of CQI reporting and MIMO utilization for downlink scheduling in live LTE mobile network," in *Proceedings of the 27<sup>th</sup> Telecommunications Forum TELFOR 2019*, pp. 8-12, Belgrade, Serbia, 26-27 November 2019, doi: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971296. (M33)
- [6] **Dj. B. Lukic**, G. B. Markovic, and D. D. Drajić, "Correlation-based Overlapping User Grouping with Two-stage Precoding in IoT Oriented 5G MU-MIMO Systems," in *Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications TELSIKS*, pp. 291-294, Niš, Serbia, 20-22 October 2021, doi: 10.1109/TELSIKS52058.2021.9606422. (M33)

#### **Категорија М60 – Радови објављени у зборницима скупова националног значаја**

- [1] R. Dabetić, L. Mitrović, **Đ. Lukić**, G. Marković, and D. Drajić, "Performance analysis of digital precoding techniques for mMIMO systems in different application conditions," *Zbornik radova LXVIII konferencije ETRAN 2024*, pp. 277-281, Niš, Srbija, 3-6 June 2024, doi: 10.69994/68E24048 (M63)

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације кандидата Ђорђа Лукића, одржана је дана 28. новембра 2024. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, пред комисијом у саставу: др Весна Благојевић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, др Драган Олћан, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, и др Марија Малнар, ванредни професор, Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет. Комисија је закључила да кандидат задовољава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, и оценила испит оценом „задовољно“.

#### **1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми**

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада и оствареног искуства кандидата Ђорђа Лукића, Комисија је стекла увид у способности и досадашњи научно-истраживачки рад кандидата, на основу чега констатује да је кандидат:

- положио све испите и извршио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом докторских академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, и тиме остварио 120 ЕСПБ бодова;
- одбранио предложену тему докторске дисертације на јавној усменој одбрани одржаној дана 28. новембра 2024. године пред комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, и добио оцену „задовољава“;
- објавио више радова у међународним научним часописима (1 x M21 и 1 x M22), односно у зборницима међународних научних скупова (6 x M33) и научних скупова националног



значаја (1 x M63) из уже научне области Телекомуникације, којој припада предложена тема докторске дисертације, од чега се један рад у међународном научном часопису, три рада на међународним научним скуповима, као и један рад на научном скупу од националног значаја (1 x M63) директно односе на предмет истраживања предложене теме докторске дисертације;

- остварио практично искуство у области на коју се односи предложена тема докторске дисертације.

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада и оствареног искуства кандидата, Комисија закључује да кандидат Ђорђе Лукић поседује потребно знање и истраживачко искуство, односно да испуњава све услове за израду предложене теме докторске дисертације.

## 2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања предложене докторске дисертације представља развој и верификација ефикасних метода груписања корисника у оквиру вишекорисничких ММО система. Њиховом применом би требало да се омогући гаранција квалитета сервиса корисницима система и уз здружену примену техника прекодовања смањи утицај међукорисничке интерференције у овим системима, у циљу повећања максимално остваривог капацитета вишекорисничког ММО система. При томе, целокупна проблематика која се разматра у оквиру предложене докторске дисертације посматра се у смислу примене у мобилним мрежама пете генерације (5G) и будућим мрежама шесте генерације (6G).

Дизајн постојећих мобилних мрежа пете генерације (5G) и будућих мрежа шесте генерације (6G), између осталог, одликује то да поред класичних говорних сервиса, мултимедијалних сервиса и сервиса преноса података, ове мреже подржавају и тзв. „паметне” сервисе који се реализују помоћу изузетно великог броја крајњих уређаја повезаних на мрежу, а који међусобно комуницирају путем Интернета, тј. на бази примене IoT (енг. *Internet of Things*) концепта, [1]-[2]. Како би се ово остварило, потребно је интегрисати IoT концепт рада са бежичном комуникационом технологијом која на физичком слоју мреже може да обезбеди умрежавање тако великог броја крајњих корисничких уређаја. Вишекориснички ММО пренос представља једну од основних технологија примењених у оквиру 5G стандарда у циљу омогућавања да базна станица BS (енг. *Base Station*), која је опремљена великим бројем антенских елемената, опслужује више корисника коришћењем истих ресурса у временском и фреквенцијском домену, [3]. У оквиру наведеног приступа се применом технике просторног мултиплексирања постиже повећање капацитета система, па стога комбинација IoT концепта и вишекорисничке ММО технологије преноса представља перспективни приступ за испуњење различитих захтева mMTC (енг. *massive Machine Type Communication*) класе сервиса у мобилним мрежама пете генерације (5G). Наравно, поред крајњих IoT уређаја, односно корисника mMTC класе сервиса, у 5G мобилним мрежама је потребно истовремено опслужити и кориснике eMBB (енг. *enhanced Mobile Broadband*) и URLLC (енг. *Ultra-Reliable Low Latency Communications*) класе сервиса.

Перформансе вишекорисничких ММО система у великој мери зависе од примењене стратегије груписања корисника, [4]. Претрага свих могућих комбинација за избор корисника у процесу груписања, у складу са дефинисаним критеријумом оптимизације, представља оптималну методу, али је одликује изузетно велика рачунска сложеност, која се веома брзо повећава са порастом броја корисника и/или броја антенских елемената у BS, и стога је неизводљива у практичном сценарију примене, [4]. Из наведеног разлога, како би се смањила рачунска сложеност метода груписања уз очување перформанси ових система, потребне су подоптималне, али рачунски ефикасне методе груписања корисника. У литератури се истичу два приступа за потребе развоја метода груписања корисника, при чему је циљ првог



приступа максимизација укупног капацитета система (енг. *capacity-based*), [5], док је циљ другог приступа минимизација корелације између канала корисника (енг. *correlation-based*), [6]. За случај када у систему постоји већи број истовремених корисника од броја антена у BS предложено је тзв. груписање корисника са преклапањем (енг. *overlapping user grouping*), при чему се у већ формиране подгрупе корисника које нису у потпуности попуњене (тј. у којима је број корисника мањи од броја антенских елемената у BS), додају корисници из других претходно формираних подгрупа корисника, [7]-[8].

У *downlink* смеру преноса у оквиру вишекорисничких ММО система се за потребе преноса података ка различитим корисницима користе исти радио ресурси, те је у циљу потискивања међукорисничке интерференције на страни BS потребно извршити и процедуру прекодовања (енг. *precoding*) сигнала који су им намењени. Технике прекодовања могу бити линеарне, [9], и нелинеарне, [10], у зависности од типа операције која се врши над матрицом канала (енг. *channel matrix*) датог ММО система. Примену нелинеарних метода прекодовања одликују боље перформансе у погледу потискивања међукорисничке интерференције у оквиру вишекорисничких ММО система, али је њихова рачунска сложеност изузетно велика, док линеарне методе прекодовања одликује мања рачунска сложеност, али се њиховом применом не може савршено ортогонализовати пренос сигнала корисника у случају када су њихови канали изразито корелирани. Један могући компромис између две наведене класе техника прекодовања, представља тзв. двофазно прекодовање (енг. *two-stage precoding*) код кога се у првој фази врши линеарно прекодовање између различитих подгрупа корисника, док се у другој фази унутар сваке подгрупе примењује нелинеарно прекодовање, [11]-[12].

Предмет истраживања предложене докторске дисертације је систематска анализа стратегија груписања корисника, као и испитивање ефикасности њихове примене у вишекорисничким ММО системима у комбинацији са одговарајућим техникама прекодовања, укључујући двофазно прекодовање. Потенцијал наведеног приступа огледа се у томе да је у до сада доступној литератури најчешће вршена само упоредна анализа постојећих и предложених стратегија груписања корисника независно од избора техника прекодовања. Такође, као метрика за поређење различитих решења коришћен је укупан остварени капацитет система без разматрања појединачних захтева корисника за капацитетом, односно нису узимани у обзир реални захтеви корисника. На основу претходног, следи да је потребно применити холистички приступ узимајући у обзир интеракцију између слојева мреже приликом анализе перформанси различитих метода груписања корисника и то у реалном сценарију примене и са конкретним захтевима корисника везаних за коришћење расположивог капацитета вишекорисничког ММО система при расподели радио ресурса.

Циљ истраживања у оквиру предложене докторске дисертације је развој ефикасних метода груписања корисника чијом применом се гарантује квалитет сервиса корисницима и заједно са применом одговарајућих техника прекодовања успешно смањује утицај међукорисничке интерференције, чиме се повећава максимално остварив капацитет вишекорисничког ММО система. При том, наводи се да ће предложене методе биће имплементирани и верификовани путем рачунарских симулација у програмском пакету *Matlab*.

Као основни допринос предложеног истраживања наводи се унапређење ефикасности рада тзв. распоређивача (енг. *scheduler*) радио ресурса у оквиру BS код постојећих 5G и будућих 6G мобилних мрежа, које одликује вишеантенски пренос коришћењем mMIMO (енг. *massive MIMO*), [13], и gMIMO (енг. *gigantic MIMO*), [14], бежичних комуникационих технологија, респективно. Поред поменутог доприноса, значај истраживања би требао да се огледа и у систематском и свеобухватном приказу прегледа литературе која се бави стратегијама груписања корисника и техникама прекодовања у вишекорисничким ММО системима, као и у испитивању сложености и перформанси предложених метода у односу на конвенционалне.



## Литература

- [1] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619-3647, 2018.
- [2] D. C. Nguyen, M. Ding, P. N. Pathirana, A. Seneviratne, J. Li, D. Niyato, O. Dobre, and H. V. Poor, "6G internet of things: A comprehensive survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 359-386, 2022.
- [3] J. Fan, Z. Xu, and G. Y. Li, "Performance analysis of MU-MIMO in downlink cellular networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 223-226, Feb. 2015.
- [4] E. Castaneda, A. Silva, A. Gameiro, and M. Kountouris, "An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 239-284, 2017.
- [5] S. Huang, H. Yin, J. Wu, and V. Leung, "User Selection for Multiuser MIMO Downlink with Zero-Forcing Beamforming," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 3084-3097, Sept. 2013.
- [6] M. Hu, Y. Chang, Y. Xiong and T. Zeng, "Low-complexity user selection method in 3D MU-MIMO systems," *Electronics Letters*, vol. 54, no. 20, pp. 1176-1178, Oct. 2018.
- [7] R. Tian, Y. Liang, X. Tan and T. Li, "Overlapping user grouping in IoT oriented massive MIMO systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14177-14186, 2017.
- [8] Y. Xiong, Y. Chang, M. Hu and J. Li, "Packet-Size Based Overlapping User Grouping in MU-MIMO Systems," in *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Morocco, 15-18 April 2019.
- [9] L. Sanguinetti, E. Bjornson, M. Debbah, and A. L. Moustakas, "Optimal linear precoding in multi-user MIMO systems: A large system analysis," in *Proceedings of IEEE Global Communications Conference*, USA, 8-12 Dec. 2014.
- [10] R.-F. Trifan and C. Paleologu, "Non-linear Precoding Performance in Spatio-temporally Correlated MU-MIMO Channels," in *Proceedings of International Conference on Communications*, Romania, 14-16 June 2018.
- [11] S. Zarei, W. Gerstacker, and R. Schober, "Low complexity hybrid linear/Tomlinson-Harashima precoding for downlink large-scale MU-MIMO systems," in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops*, USA, 4-8 Dec. 2016.
- [12] M. A. Albreem, A. H. A. Habbash, A. M. Abu-Hudrouss, and S. S. Ikki, "Overview of precoding techniques for massive MIMO," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 60764-60801, 2021.
- [13] R. M. Dreifuerst and R. W. Heath, "Massive MIMO in 5G: How beamforming, codebooks, and feedback enable larger arrays," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 12, pp. 18-23, Dec. 2023.
- [14] E. Bjornson, F. Kara, N. Kolomvakis, A. Kosasih, P. Ramezani and M. B. Salman, "Enabling 6G performance in the upper mid-band through gigantic MIMO," *IEEE Wireless Communications* 2024, submitted.

## 3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе за истраживање у предложеној докторској дисертацији су:

- Дизајн распоређивача радио ресурса није експлицитно дефинисан 3GPP (енг. *Third Generation Partnership Project*) стандардом, већ је конкретна имплементација његових



функција остављена произвођачу опреме. То даје могућност предлога нових метода груписања корисника ради ефикаснијег и одрживијег функционисања система.

- У оквиру постојеће литературе упоредна анализа стратегија груписања корисника се посматра независно од примене различитих техника прекодовања, и обратно. Додатно, оптимизација стратегија груписања корисника се најчешће спроводи путем коришћења најједноставније ZF (енг. *zero-forcing*) технике линеарног прекодовања, док се у случају поређења модификованих техника прекодовања само груписање корисника уопште не разматра или се сматра да је случајно. Ипак, у циљу веродостојне процене ефикасности расподеле радио ресурса потребно је здружено анализирати ова два поступка уз изабране алгоритме расподеле снаге сигнала корисника и естимације радио канала.
- Главна метрика за поређење перформанси претходно помињаних метода у литератури је укупан остварени капацитет система (енг. *sum rate*), при чему појединачни захтеви корисника нису експлицитно разматрани. Како би верификација предложених метода груписања корисника била извршена за што реалније сценарије примене, потребно је поред ове метрике увести и додатне метрике које одражавају корисничко искуство (енг. *user experience*), а односе се на разлику између остваривог (енг. *achievable*) и захтеваног (енг. *requested*) коришћења расположивог капацитета вишекорисничког MIMO система.

#### 4. Научне методе истраживања

У предлогу докторске дисертације предлаже се примена следећих метода истраживања:

- Теоријска анализа научно-стручне литературе из области груписања корисника, као и експериментална анализа у форми рачунарских симулација у програмском пакету *Matlab*, у циљу дефинисања предности и недостатака постојећих метода расподеле радио ресурса у вишекорисничким MIMO системима,
- Теоријска анализа научно-стручне литературе из области техника прекодовања у вишекорисничким MIMO системима, односно експериментална упоредна анализа ових техника применом рачунарских симулација у програмском пакету *Matlab*,
- Експериментална анализа у форми рачунарских симулација у програмском пакету *Matlab* у циљу развоја и верификације ефикасних метода груписања корисника за вишеантенски пренос у мобилним мрежама будуће генерације,
- Анализа података добијених током верификације предложених стратегија груписања корисника у комбинацији са одговарајућим техникама прекодовања, а све у циљу испитивања њихових перформанси и рачунске сложености.

#### 5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси предложене докторске дисертације су следећи:

- Систематски преглед литературе и објављених резултата истраживања из области груписања корисника, као и техника прекодовања у вишекорисничким MIMO системима.
- Имплементација постојећих метода груписања корисника у програмском пакету *Matlab* у циљу поређења перформанси и указивања на њихове недостатке за изабране алгоритме расподеле снаге сигнала корисника и естимације радио канала.
- Унапређење и оптимизација постојећих и предлог нових метода груписања корисника за вишеантенски пренос у мобилним мрежама будуће генерације.



- Имплементација предложених метода груписања корисника у програмском пакету *Matlab* у циљу верификације и валидације побољшања перформанси и смањења рачунске сложености посматраног вишекорисничког MIMO система.

## 6. План истраживања и структура рада

У складу са предлогом докторске дисертације, истраживање треба да буде спроведено у неколико фаза:

- Прва фаза – проучавање научно-стручне литературе из области груписања корисника и техника прекодовања у вишекорисничким MIMO системима. Преглед ће бити започет постојећим методама груписања корисника на бази максимизације капацитета (енг. *capacity based*) и минимизације корелације између канала корисника (енг. *correlation-based*), као и њиховим верзијама са преклапањем. Потом ће бити разматране и описане најбитније линеарне и нелинеарне технике прекодовања које се користе за вишеантенски пренос укључујући и шеме двофазног прекодовања. На крају, биће извршена упоредна анализа перформанси и комплексности алгоритама који комбинују поменуте методе груписања са одговарајућим техникама прекодовања.
- Друга фаза – имплементација постојећих стратегија груписања корисника путем развоја и примене симулационог модела у програмском пакету *Matlab*. За моделовање радио канала у овој фази би требало да буде коришћен самостално развијен 2D стохастички модел вишекорисничког MIMO система, за потребе почетне анализе, односно напредни 3D стохастички модел MIMO канала заснован на геометрији под називом QuaDRiGa (енг. *Quasi Deterministic Radio Channel Generator*) који представља унапређење 3GPP тродимензионалних модела за MIMO канале. На почетку ће бити разматрани само IoT уређаји који користе један сервис, и то у случају идеалне естимације канала, док ће касније анализа бити проширена на више класа сервиса, као и на случај мобилних корисника, када постоји грешка приликом MMSE (енг. *Minimum Mean-Squared Error*) естимације канала. За расподелу снаге сигнала корисника користиће се тзв. *water-filling* алгоритам. Такође, биће указано на недостатке оваквих стратегија за изабране алгоритме расподеле снаге сигнала корисника и естимације радио канала.
- Трећа фаза – оптимизација постојећих и предлог нових стратегија груписања корисника за вишеантенски пренос у мобилним мрежама будуће генерације. У овој фази основни део истраживања представља модификација стратегија имплементираних у претходној фази и предлог нових метода груписања корисника које гарантују квалитет сервиса и у комбинацији са одговарајућим техникама прекодовања потискују међукорисничку интерференцију максимизирајући укупан капацитет MIMO система.
- Четврта фаза – имплементација предложених стратегија груписања корисника путем развоја симулационих модела у програмском пакету *Matlab*. Биће извршено поређење перформанси и рачунске сложености предложених метода у односу на постојеће приступе груписања корисника комбиноване са техникама прекодовања у симулационом окружењу са истим параметрима који су дефинисани и описани у другој фази. Циљ ове фазе истраживања представља развој ефикасних стратегија груписања корисника које су према дефинисаним критеријумима супериорне у односу на конвенционалне.
- Пета фаза – Приказ, анализа и сумирање добијених резултата, као и дефинисање даљих праваца истраживања везаних за методе груписања корисника у вишекорисничким MIMO системима и мобилним мрежама будуће генерације.



## 7. Закључак и предлог

На основу целокупне приложене документације, увида у досадашњи научно-истраживачки рад кандидата Ђорђа Лукића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, и целокупног стеченог увида о теми предложене докторске дисертације током јавне усмене одбране, Комисија је дошла до следећих закључака:

- Кандидат поседује потребна знања и вештине неопходне за научноистраживачки рад, односно испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације под називом „Ефикасне методе груписања корисника за вишеантенски пренос у мобилним мрежама будуће генерације”;
- Предложена тема докторске дисертације је актуелна и научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом дисертације, у складу са дефинисаним предлогом, представљају потенцијално значајан и оригиналан допринос у предметној области истраживања, односно задовољава све услове подобности за докторску дисертацију.

Комисија констатује да је предложена тема докторске дисертације у оквиру уже научне области Телекомуникације, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

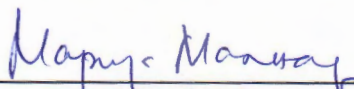
На основу свега претходно изложеног, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду, да кандидату Ђорђу Лукићу одобри израду докторске дисертације под насловом „Ефикасне методе груписања корисника за вишеантенски пренос у мобилним мрежама будуће генерације” (енг. „*The Efficient User Grouping Methods for Multi-Antenna Transmission in Next Generation of Mobile Networks*”), и за менторе докторске дисертације предлаже др Горана Марковића, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду, и др Дејана Драјића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 3. децембра 2024. године

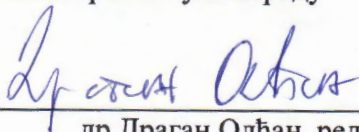
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Весна Благојевић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Марија Малнар, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет



др Драган Олћан, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет