

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата дипл. инж. електротехнике Jiane Jarrouj.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду донетој на 797. седници одржаној 22.03.2016. године (број одлуке 5047-11/3 од 29.03.2016. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Jiane Jarrouj под насловом

**„Анализа перформанси когнитивних телекомуникационих система са контролисаним нивоом интерференције и несавршеном проценом стања у каналу ”**

**„Performance analysis of cognitive telecommunication systems with controlled interference level and imperfect channel knowledge”**

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

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Jiana Jarrouj је школске 2011/2012 уписала докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Телекомуникације. Током студија положила је све испите са просечном оценом 9.9 и одрадила све обавезе везане за студијски истраживачки рад.

Кандидаткиња је тему под насловом „Анализа перформанси когнитивних телекомуникационих система са контролисаним нивоом интерференције и несавршеном проценом стања у каналу” („Performance analysis of cognitive telecommunication systems with controlled interference level and imperfect channel knowledge”) пријавила 19.11.2015. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на 794. седници одржаној 01.12.2015. године именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Предраг Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Весна Благојевић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Марија Малнар, доцент (Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет), др Ненад Цакић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Извештај комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације је усвојен на 795. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржаној 19.01.2016. године. Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предложену тему докторске дисертације на седници одржаној 08.02.2016. године (број одлуке 61206-533/2-16).

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 10.03.2016. године, а Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на 797. седници одржаној 22.03.2016. године (број одлуке 5047-11/3 од 29.03.2016. године) именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Предраг Иваниш, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Весна Благојевић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Марија Малнар, доцент (Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет), др Ненад Цакић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

### 1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Техничких наука - електротехнике, а у ужем смислу научној области Телекомуникације. За ове области матичан је Електротехнички факултет. Ментор дисертације је др Предраг Н. Иваниш, ванредни професор на Електротехничком факултету Универзитета у Београду због значајних научних доприноса у области теме докторске дисертације, посебно у области статистичке теорије телекомуникација.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Jiana Jarrouj рођена је 27.06.1987. године у Сирији. Основну школу и гимназију завршила је у Хомсу са одличним успехом. Електротехнички и телекомуникациони факултет Универзитета у Хомсу завршила је и дипломирала на Одсеку за електронику и телекомуникације 2009. године, са просечном оценом 73.89%.

Тренутно је студент докторских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Телекомуникације и информационе технологије. Радила је као IT супервизор за студенте четврте године на смеру математике и као IT наставник у средњој школи "Hotel Management". Волонтирала је у организацији "Faint and light" за људе са специјалним потребама. Матерњи језик је арапски, говори течно енглески и српски језик и има основно знање француског и немачког језика.

Jiana Jarrouj је аутор или коаутор 2 рада у међународним часописима са импакт фактором, оба у категорији M23. Такође је аутор или коаутор 1 рада у часопису националног значаја, 1 рада изложеног на конференцији међународног значаја и 1 рада изложеног на конференцији националног значаја.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 140 А4 страна куцаног текста и садржи 51 слику, 3 табеле и 153 библиографских референци. Дисертација садржи насловну страну, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, 7 глава и списак коришћене литературе. Наслови поглавља докторске дисертације су:

1. Увод,
2. Основе бежичних телекомуникационоих система и диверзити техника,
3. Статистичке карактеристике *spectrum sharing* система са ко-каналном интерференцијом,
4. *Spectrum sharing* системи са ко-каналном интерференцијом и примењеном MRC диверзити техником
5. Ергодиични капацитет когнитивног радио система са ко-каналном интерференцијом и примењеном MRC диверзити техником за неидеално познавање CSI,
6. Експериментални резултати за когнитивни радио базиран на OFDM
7. Закључак.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводној глави дисертације дата је дефиниција појма когнитивних радио система и описани су основни мотиви за њихову појаву. Објашњен је појам ослушкивања спектра и наведени су основни принципи дељења спектра између лиценцираних (примарних) и нелиценцираних (секундарних) корисника. У овој глави дат је и преглед могућих примена когнитивних радио система.

Друга глава представља детаљан преглед основних параметара бежичних комуникационих система, и у њој је описано како се функционисање појединих делова ових система може описати алатима статистичке теорије телекомуникација. Посебна пажња је посвећена моделирању канала, а нарочито опису фединга као случајног процеса. Уведен је појам информације о стању у каналу, као један од кључних елемената за анализу која ће бити дата у наредним главама. Дата је дефиниција капацитета система, са становишта теорије информација. Детаљно је описано какав ефекат на перформансе система може имати примена диверзити техника, а посебно је анализирано диверзити комбиновање са максималним односом (*Maximum Ratio Combining, MRC*). Размотрена је и могућност примене просторно временских кодова у циљу побољшања перформанси бежичних система.

Статистичке особине *spectrum sharing* система описане су у трећој глави. У овом делу рада дате су неопходне дефиниције и описан начин истовременог рада два бежична телекомуникациона система који раде у истом опсегу учестаности. Показано је да лиценцирани и когнитивни корисници могу да коегзистирају тако да рад лиценцираних корисника не буде ометан у значајној мери. Ово се може постићи адаптивном контролом снаге секундарних предајника, али је ову технику могуће успешно применити само ако је секундарном предајнику доступна прецизна информација о стању у каналу. Посебан нагласак стављен је на анализу перформанси оваквог система када ова информација није доступна са савршеном тачношћу већ је секундарном предајнику доступна само закашњена информација о стању у каналу.

У четвртој глави извршена статистичка карактеризација когнитивног система код кога је примењена MRC диверзити техника у циљу побољшања перформанси. Изрази за густину вероватноће, моменте произвољног реда и вероватноћу отказа дати су за случај савршеног познавања стања у каналу, а затим су одговарајући изрази изведени за случај када је секундарном предајнику доступна закашњена информација о стању у каналу. Изрази важе за било који број грана у диверзитију и било које параметре канала. Анализа је поновљена за случај када је уместо пријемног диверзитија примењен просторно временски кодер и одговарајући декодер. Коначно, анализа из претходне главе је проширена и на некооперативни сценарио, код кога секундарни предајник располаже само информацијом о статистичким параметрима канала и на основу њих обавља адаптацију снаге.

Изрази за ергодиични капацитет за претходно описане системе изведени су у петој глави дисертације. Сви изрази су дати за несавршено познавање стања у каналу, како за кооперативни тако и за некооперативни сценарио. Изрази у затвореној форми добијени су коришћењем теорије специјалних функција (посебно Мејерове функције), а дати су и прецизни апроксимативни изрази који су посебно нумерички ефикасни.

Циљ шесте главе је да се практичним експериментом утврди који ниво интерференције која потиче од секундарног предајника може бити толерисан на улазу пријемника а да се драстично не деградира квалитет сервиса на примарном линку. У овој глави приказани су експериментални резултати добијени на USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) платформама. Разматран је случај када и примарни и секундарни корисник примењују модулацију са већим бројем ортогоналних подносилаца (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*), а подразумева се да међу овим сигналимa постоји идеална временска и фреквенцијска синхронизација. Кроз практичну примену експеримента анализиран је утицај

интерференције од стране секундарног предајника на квалитет сигнала примарног пријемника и одређена је одговарајућа вероватноћа грешке по биту (Bit Error Rate, BER) за различите вредности односа снаге сигнала и снаге шума.

У шестој глави дисертације изложени су најзначајнији закључци.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација припада актуелној и значајној области бежичних телекомуникација. У ужем смислу, предмет истраживања ове докторске дисертације је анализа перформанси когнитивног система са адаптивном контролом снаге у условима изражене интерференције која потиче од лиценцираних радио система. У дисертацији су разматрани когнитивни радио системи код којих когнитивни (секундарни) корисници емитују сигнал истовремено са лиценцираним (примарним) корисницима, у истом тренутку и у истом опсегу учестаности. Код овог начина рада, који је у теорији когнитивних система познат као "*underlay*" концепт, параметри система се оптимизују тако да интерференција коју когнитивни корисници праве на улазу лиценцираних пријемника буду испод унапред прописане границе. Овај захев се обично постиже адаптивном контролом снаге когнитивних предајника, за чију имплементацију је потребно познавање стања у каналу на страни секундарног предајника. Иако се на овај начин постиже неометани рад лиценцираног система, при овој анализи по правилу се занемарује утицај сметње која потиче од лиценцираног система, а која дергадира перформансе когнитивног система.

У претходно објављеним истраживањима обично је подразумевано да је познавање стања у каналу идеално, што у пракси није могуће јер се тренутно појачање канала мења услед присуства фединга у каналу. Чак и ако је естимација идеално обављена, она ће секундарном предајнику (који на основу ње адаптира снагу) бити достављена са извесним закашњењем. Утицај кашњења при достављању информације о стању канала на перформансе система већ је анализиран у литератури, али је и у тим случајевима уведена идеалистичка претпоставка да је процена тренутног појачања идеална као и да се пренос процењене информације о стању канала до предајника обавља са савршеном тачношћу. Поред тога, обично се подразумева да постоји кооперација између лиценцираног и когнитивног корисника што у реалности веома често није случај.

Докторска дисертација је стога за циљ имала реалнију процену перформанси когнитивног радио система у коме информација о стању канала није савршено прецизно доступна секундарном предајнику. Притом је претпостављено да у каналу делује Накагамијев фединг и бели Гаусов шум, а посебно је размотрен утицај сметњи које лиценцирани и когнитивни корисник генеришу међусобно. Претпостављено је да је предајна снага примарних предајника константна, док се предајна снага секундарних корисника адаптира у складу са доступном информацијом о стању у каналу. Притом су размотрена два сценарија. У једном је подразумевано да постоји кооперација између лиценцираних и когнитивних корисника, па се сматра да је секундарном предајнику доступна закаснела информација о стању у каналу. У другом сценарију је подразумевано да ове кооперације нема, па се адаптација снаге обавља само на основу статистичких параметара канала, а не на основу процењене тренутне вредности појачања канала.

Осим тога, у дисертацији је дата и експериментална верификација коегзистенције примарног и секундарног корисника, при чему оба примењују сложену модулацију и мултиплексирање са већим бројем ортогоналних подносилаца. У овом случају показано је који ниво ко-каналне интерференције која потиче од секундарног корисника може бити толерисан на примарном линку.

### **3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу**

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 153 библиографске референце. Литература садржи најновије радове релевантне за проблематику истражену у дисертацији, при чему је Jiana Jarrouj аутор или коаутор 5 радова.

### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је анализирана постојећа литература у области когнитивних радио система. Посебна пажња је посвећена проучавању основних библиографских извора о когнитивним радио системима, посебно онима заснованим на контролисаном нивоу интерференције. Преглед математичких модела случајних процеса који се могу јавити у каналу - временске и спектралне карактеристике фединга, ко-каналне интерференције и шума.
- Применом алата статистичке теорије телекомуникација извршена је анализа когнитивних радио система са контролисаним нивоом итерференције. Показано је да се адаптирањем излазне снаге секундарног предајника може обезбедити неометана коегзистенција лиценцираног и нелиценцираног корисника у истом опсегу учестаности.
- На основу теорје случајних процеса показано је да се капацитет когнитивног радио система са контролисаним нивоом итерференције може значајно повећати применом диверзити технике засноване на комбиновању сигнала са максималним односим.
- Применом теорије специјалних функција, изведени су изрази у затвореној форми који омогућавају израчунавање израза за капацитет, вероватноћу прекида везе и вероватноћу грешке. Коришћењем математичких алата одређени су прецизни асимптотских израза и једноставних апроксимативни израза, којима се могу описати перформансе система у важним специјалним случајевима.
- Анализирани су поступци којима се обезбеђује делимично познавање стања у каналу и анализа могућности примене ове информације при адаптивној контроли снаге предајника.
- У случајевима када изразе у затвореној форми није било могуће добити примењен је аналитички метод процене перформанси који омогућава израчунавање компактних израза датих у интегралној форми.
- Развијен је независни Монте Карло симулациони модел помоћу кога је извршена процена перформанси когнитивних система са контролисаним нивоом интерференције, за различите услове пропагације и различит степен познавања информације.

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

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

У докторској дисертацији изведени су изрази у затвореној форми којима се прецизно могу описати перформансе когнитивних радио система са контролисаним нивоом интерференције. Показано је да лиценцирани и когнитивни корисници могу да коегзистирају истовремено и у истом опсегу учестаности, тако да рад лиценцираних корисника не буде ометан у значајној мери. Ово се може постићи адаптивном контролом снаге секундарних предајника, али је цена која се притом плаћа смањена брзина комуникација на секундарном

линку. Ова брзина се може повећати ако се примене вишеантенске технике, а на овај начин се могу побољшати и перформансе система. Да би когнитивни систем са адаптивном контролом снаге успешно функционисао, неопходно је да се секундарном предајнику достави прецизна информација о тренутном стању канала. Посебно је значајна информација о тренутном појачању у каналу у опсегу учестаности од значаја. У реалним условима, услед флукуација појачања, предајнику је могуће доставити само закаснелу процену тренутног појачања. У случају када између лиценцираних и когнитивних корисника не постоји сарадња (некооперативни режим рада), снага секундарног предајника могуће је подешавати само на основу статистичких параметара канала. При процени перформанси система од интереса су и кооперативни и некооперативни режим рада.

Изведени изрази се могу применити за прецизну процену вероватноће отказа, ергодишног капацитета и вероватноће грешке у когнитивним радио системима са контролисаним нивоом интерференције. Резултати су потврђени независним симулационим поступком и важе за широк спектар параметара система и различите пропагационе сценарије. Изведени изрази важе и за случај несавршене процене стања у каналу, како у случају када је секундарном предајнику доступна закашњена информација о стању у каналу, тако и за случај када су му доступни само статистички параметри канала.

### **3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад**

Кандидат је приликом израде дисертације показао систематичност, способност за препознавање отворених питања у научној литератури и зрелост при анализи и решавању проблема. Посебно треба истаћи да је област когнитивних радио система са контролисаним нивоом интерференције веома актуелна. Неки од добијених резултата представљају решење отворених проблема који су постојали у литератури или њихово унапређење, као и анализу проблема на које до сада није постојао осврт у доступној литератури. Доприноси дисертације у овој области су оригинални, савремени и потврђују способност кандидата за самосталан истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

Научни допринос докторске дисертације је процена перформанси когнитивних радио система са адаптивном контролом снаге у случају када лиценцирани и когнитивни корисник праве сметњу један другом и када прецизна информација о стању у каналу није доступна.

Конкретно, научни доприноси остварени у дисертацији су следећи:

- Основни допринос представља процена перформанси когнитивног радио система са контролисаним нивоом интерференције у разним пропагационим условима и то у случају како кооперативног, тако и некооперативног сценарија.
- У раду су изведени нови изрази за ергодишни капацитет, вероватноћу прекида везе и вероватноћу грешке. Изведени изрази су генерални, дати у затвореној форми и важе за разне пропагационе услове и разне нивое познавања стања у каналу. Такође су изведени једноставни асимптотски и апроксимативни изрази, који важе у специјалним случајевима. Сви изведени изрази су потврђени Монте Карло симулацијом.
- На основу изведених израза укратко је размотрено како се може урадити оптимизација параметара система са контролисаним нивоом интерференције. На доступној хардверској платформи за софтверски дефинисани радио процењене су перформансе система у неким једноставним случајевима, за случај када се и на линку лиценцираног корисника и на линку когнитивног корисника емитује сигнал добијен ортогоналним фреквенцијским мултиплексирањем.

## 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у циљеве истраживања, полазне претпоставке и остварене резултате констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва значајна питања из проблематике која је анализирана у дисертацији. Изведени су нови изрази којима су одређене перформансе когнитивних радио система са контролисаним нивоом интерференције. Анализом резултата приказаних у дисертацији констатујемо да су приказани оригинални и савремени резултати.

## 4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у области теме докторске дисертације Јана Jarrouj је као аутор или коаутор објавила два рада у међународним часописима са СЦИ листе (оба категорије М23), при чему је кандидаткиња првотпотписани аутор на оба рада. Поред тога, један рад је публикован у часописима националног значаја, један је презентован на конференцији међународног значаја и један на конференцији националног значаја.

Радови публиковани у часописима међународног значаја (М23):

[1] J. Jarrouj, V. Blagojevic, P. Ivanis, "Outage Probability of SINR for Underlay Cognitive Radio Systems in Nakagami Fading," *Frequenz*, vol. 68, iss. 11 – 12, pp. 563 – 572, November 2014. (ISSN online: 2191-6349, ISSN print: 0016-1136, DOI: 10.1515/freq-2014-0029, web: <http://www.degruyter.com/view/j/freq-2014.68.issue-11-12/freq-2014-0029/freq-2014-0029.xml?format=INT, IF=0.393>).

[2] J. Jarrouj, V. Blagojevic, P. Ivanis, "Outage Probability and Ergodic Capacity of Spectrum-Sharing Systems with MRC Diversity," *Frequenz*, vol. 70, iss. 3 – 4, pp. 157 – 171, March 2016. (ISSN online: 2191-6349, ISSN print: 0016-1136, DOI: 10.1515/freq-2015-0160, web: <http://www.degruyter.com/view/j/freq.2016.70.issue-3-4/freq-2015-0160/freq-2015-0160.xml?format=INT, IF=0.393>).

Радови публиковани у часописима домаћег значаја (М52):

[1] J. Jarrouj, V. Blagojević, P. Ivaniš, "Statistical Properties of SIR for Spectrum Sharing Systems in Nakagami Fading," *Telekomunikacije*, no. 12, pp. 102-110, Nov. 2013.

Радови саопштени на међународним научним скуповима (М33):

[1] J. Jarrouj, V. Blagojević, P. Ivaniš, "Analysis of SIR for spectrum sharing system with OSTBC in Nakagami fading," in *Proc. Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 287-290, Nov. 2013.

Радови саопштени на научним скуповима националног значаја (М63):

[1] J. Jarrouj, V. Blagojević, P. Ivaniš, "Outage probability of SIR for spectrum sharing system in Nakagami fading," in *Proc. ETRAN 2013*, N0.3, pp. 1-5, Jun 2013.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу чињеница изложених у овом реферату, Комисија је закључила да је докторска дисертација кандидата Јана Jarrouj под називом „Анализа перформанси когнитивних телекомуникационих система са контролисаним нивоом интерференције и несавршеном проценом стања у каналу” („Performance analysis of cognitive telecommunication systems with controlled interference level and imperfect channel knowledge”) у целини написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

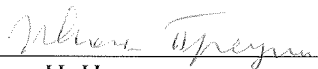
У дисертацији су изведени нови изрази за густину вероватноће, моменте, вероватноћу отказа и ергодични капацитет у когнитивним радио системима са контролисаним нивоом интерференције. Резултати су потврђени независним симулационим поступком и важе за широк спектар параметара система и различите пропагационе сценарије. Изведени изрази важе и за случај несавршене процене стања у каналу, како у случају кооперативног сценарија (када је секундарном предајнику доступна закашњена информација о стању у каналу), тако и за случај некооперативног сценарија (када су му доступни само статистички параметри канала). Резултате проистекле из истраживања спроведеном у оквиру докторске дисертације кандидаткиња је објавила у међународним часописима са СЦИ листе и часопису националног значаја, као и презентovala стручној јавности на конференцијама од међународног и националног значаја.

На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да дисертација **„Анализа перформанси когнитивних телекомуникационих система са контролисаним нивоом интерференције и несавршеном проценом стања у каналу”** („**Performance analysis of cognitive telecommunication systems with controlled interference level and imperfect channel knowledge**”) кандидата Jiane Jarrouj садржи оригиналне научне доприносе.


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

У Београду, 05.05.2016. године

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



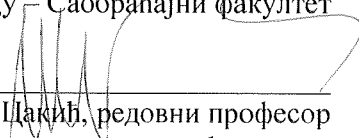
др Предраг Н. Иваниш, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Весна Благојевић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Марија Малнар, доцент  
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет



др Ненад Џакић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет