

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду, на својој 737. седници, одржаној 11. октобра 2011. године, именovalo нас је за чланове Комисије за преглед и оцeну докторске дисертације кандидата *мр инж. Владимира Вуковића*, под насловом „*Ефикасни ARQ алгоритми базирани на мајоритетној логици*“. Ментор докторске дисертације је др Александра Смиљанић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Након увида у достављени материјал, извршили смо процену квалитета и научног доприноса поднете докторске дисертације, на основу које Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду подносимо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Кратка биографија

Мр Владимир Вуковић је рођен 1961. године у Обреновцу где је завршио основну школу и Гимназију природноматематичког смера. На Електротехнички факултет у Београду, одсек Електронике, уписао се 1981. године, а дипломирао је 1986. са дипломским радом под називом “Хардвер за брзу FFT”. Последипломске студије на Катедри за телекомуникације, смер Дигитални пренос информација, уписао је 1987. године. Магистарски рад под називом “5B6B кодер и декодер за пренос по светловодима дигиталног сигнала протока 140 Mb/s” одбранио је у јануару 1991. године под менторством професора др Гроздана Петровића.

Након дипломирања, запослио се као стручни сарадник на Катедри за телекомуникације Електротехничког факултета у Београду, где остаје до краја августа 1990. године радећи на пројектима факултета које су водили професори др Гроздан Петровић и др Душан Драјић. Од јануара 1991. године, па све до 2000. године, на истој Катедри је ангажован као спољни сарадник на следећим пројектима и радним задацима:

- пројектовање и реализација склопова синхроног мултиплекса за пренос дигиталног сигнала протока 2048, 1024, 512 и 256 kbps, синфазна петља на 20.480 MHz са децитаризатором, битска синхронизација, синхронизација оквира и сл.;
- симулација Rummel-овог модела канала са федингом на рачунару,
- пројектовање и реализација склопова за *on-line* надгледање грешака на линији коришћењем редувансе у мултиплексном каналу;

- пројектовање и реализација појединих склопова оптичког линијског терминала (5B6B кодер и декодер у ECL технологији) симулација рада 5B6B кодера и декодера на рачунару, синхронизација 5B6B декодера, синфазне петље на 139.264 MHz и 167.11MHz (Пројекат Републичке заједнице за науку – Оптички линијски терминал на 139 MHz)
- пројектовање и реализација 160 kbps синхроног мултиплекса до четири улазна канала и линијским интерфејсима за прикључивање рачунара, телефонског апарата, индукторског телефона и микротелефонске комбинације;
- пројектовање и реализација NT1 мрежног завршетка;
- пројектовање и реализација дигиталног кодног канала са униформном и псеудослучајном расподелом грешака;
- синтеза учестаности, фреквенцијско скакање;

Објавио је већи број радова из области предложене теме. Први коаутор је једног рада у престижном међународном часопису са IMPACT фактором (*IEEE Communications Letters*). Такође, први је коаутор једног рада у домаћем часопису међународног значаја (*Microwave Review*). Поред тога, кандидат је аутор или први коаутор још шест радова на домаћим конференцијама (*Telfor*, *Etran*, *Infoteh*).

1.2. Основни подаци о објављеним радовима из области дисетрације

Међународни часописи са IMPACT фактором:

- **V. Vuković**, G. Petrović, and Lj. Trajković, "Packet error probability in a three-branch diversity system with majority combining," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 7–9, January 2011.

Радови у домаћим часописима међународног значаја:

- **V. Vuković** and R. Vojinović, "On throughput analysis of an adaptive error – control scheme in satellite networks," *Microwave Review*, ISSN 14505835, vol. 14, no. 2, pp 8–11, december 2008.

Радови на домаћим конференцијама:

- **V. Vuković**, G. Petrović, and Lj. Trajković, "Simulation of multicopy go-back-n ARQ scheme with majority-logic decoding," *INFOTEH 2005*, Jahorina, vol. 4, ref. B-II-6, pp.113-116, Mar. 2005.
- **V. Vuković**, R. Vojinović, Z. Petrović, and G. Petrović, "Throughput analysis of adaptive two-mode GBN ARQ scheme with retransmission cycles," XLIX Konferencija ETRAN-a, Budva, 5.-10. juna 2005. godine.
- **V. Vuković**, G. Petrović, and Lj. Trajković, "Influence of majority decision on reducing block error rate in three-copy transmission," XIII Telekomunikacioni forum *TELFOR 2005*, Beograd, Sava Centar, 22.- 24.11.2005. godine.
- **V. Vuković**, "An analysis of five-copy transmission with majority combining", XV Telecommunication forum *TELFOR 2007*, Beograd, Sava Centar, 20.- 22.11.2007. godine.
- **V. Vuković**, R. Vojinović, and G. Petrović, "Propusnost adaptivne dvomodne GBN ARQ šeme sa majoritetnom logikom," LII Konferencija ETRAN-a, Palić, 8.-12. juna 2008. godine.
- **V. Vuković**, G. Petrović, and Lj. Trajković, "Packet error probability in transmission scheme with three-copy majority combining," LIII Konferencija ETRAN-a, Vrnjačka Banja, 15.-18. juna 2009. godine.

2. Опис дисертације

2.1. Структура и садржај дисертације

Дисертација је написана на 118 страна са једноструким проредом, садржи насловну страну, садржај, 5 поглавља, преглед реферисане литературе и 3 прилога. Подељена је на следећа поглавља: 1. Увод, 2. Вероватноћа ретрансмисије 3. Анализа пропусности, 4. Елементи имплементације, и 5. Закључак. Део материјала који је намењен бољем разумевању садржаја докторске дисертације, а представљао би малу дигресију у односу на основни ток излагања, организован је у виду прилога на крају дисертације: А. Опис програмског пакета, В. Рачунање прелазних вероватноћа, и С. Листа скраћеница. По својој форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединих поглавља

У уводном делу дисертације идентификоване су три основне технике за контролу грешака на линији: аутоматска ретрансмисија пакета (ARQ), корекција грешака унапред (FEC) и диверзити (*Diversity*). Комбинујући предности ARQ и FEC поступака у погледу реализације, ефикасности и поузданости преноса, у тези је предложена и анализирана комбинација диверзити преноса и мајоритетног одлучивање као најједноставнијег поступка заштитног кодовања. Ова једноставна техника за контролу грешака се реализује на другом слоју референтног модела као део хибридног ARQ протокола. Детекција и корекција грешака се врши применом методе комбинованог одлучивања (SC+MC) које се спроводи у два корака. У првом кораку, названом селективно комбиновање (SC) на бази CRC секвенце, се врши појединачно испитивање копија. Уколико се у неком од канала детектује копија без грешке, пренос се проглашава успешним. Други корак, назван мајоритетно комбиновање (MC) се активира уколико су све копије погрешне, односно уколико откаже SC процедура.

Друго поглавље тезе се бави извођењем израза за вероватноћу погрешног преноса пакета или вероватноћу ретрансмисије која представља битан параметар за анализу пропусности хибридних решења базираних на комбинованом одлучивању (SC+MC). Одређивање овог израза је прилично сложено када је у питању произвољан број независних путања са различитим каналним вероватноћама. Због тога је већина аутора, која је решавала овај проблем, усвајала нереалне претпоставке, да се пренос врши преко три независне путање и да су каналне вероватноће међусобно једнаке. За разлику од оваквог приступа, у тези су изведени егзактни изрази за вероватноћу погрешног преноса пакета за различите каналне вероватноће, најпре за три путање, затим, за пет путања, и на крају, за општи број путања. Добијени изрази су били прилично сложени и као такви нису могли послужити за једноставно сагледавање утицаја појединих каналних вероватноћа, броја канала и дужине оквира. Уводећи појам еквивалентне каналне вероватноће која је једнака геометријској средњој вредности појединих каналних вероватноћа, изведена су два апроксимативна израза од којих један представља поједностављену општу формулу са једнаким каналним вероватноћама, а други, тесну горњу границу. Користећи добијене изразе за вероватноћу ретрансмисије, анализиран је утицај различитих класа расејавања каналних вероватноћа, броја канала и дужине оквира.

У трећем поглављу је извршена анализа пропусности три карактеристична сценарија преноса пакета од којих два дају граничне вредности за пропусност. Први сценарио се заснива на просторном диверзитету и једновременом пријему копија, и други, који се заснива на временском диверзитету и секвенцијалном пријему копија које се меморишу у пријемном баферу. SC+MC процедура се примењује над сетом копија истог оквира које потичу из текуће емисије. Трећи сценарио комбинује копије истог оквира из текуће и претходне емисије под условом да су биле погрешне. Анализа је вршена на бази процене

средњег времена трајања ретрансмисионих циклуса који су моделовани помоћу Марковљевих ланаца код којих је прелаз између два стања описан вероватноћом прелаза и трајањем прелаза. За сваки од предложених сценарија, изведени су егзактни теоријски изрази за пропусност. Поред теоријске анализе, вршени су и симулациони експерименти који су потврдили исправност добијених теоријских резултата. На крају поглавља је дата компаративна анализа предложених сценарија у зависности од кључних параметара као што су број канала, дужина оквира и кружно кашњење.

У четвртном поглављу је дат пример једне хипотетичке сензорске мреже са имплементацијом SC+MC процедуре у одредишном чвору. Имајући у виду чињеницу да комерцијални примопредајници који се користе у пракси не подржавају мајоритетно комбиновање пакета, дат је предлог за модификацију примењеног стандарда који регулише размену података у бежичним сензорским мрежама. Предложено је да оквир садржи два посебна CRC поља која независно контролишу садржај MAC хедера и MSDU поља. SC+MC процедура се примењује над копијама оквира са истим адресама и истим секвенцијалним бројем, али само над MSDU пољем и CRC пољем у MAC футеру. На крају поглавља је дат предлог хардверске и софтверске реализације примопредајника и процесорског блока у одредишном чвору.

У петом поглављу је дат закључак који обухвата кратак преглед битних тематских целина, доприносе и правце даљег развоја.

На крају је дата литература и прилози са листинзима програма, комплетно извођење израза за прелазне вероватноће и листа скраћеница.

3. Оцена дисертације

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Диверзити техника у спрези са мајоритетном логиком представља једноставан алат за контролу грешака у бежичним телекомуникационим мрежама са вишеструким путањама и коперативним мрежама које користе линкове са једном или више предајних и пријемних антена. Типичан пример су бежичне сензорске мреже које користе комерцијалне примопредајнике направљене у складу са IEEE 802.15.4 и ZigBee стандардима. Ове мреже имају широку област примене, у индустрији, медицини, метеорологији, подводним истраживањима, и др. Масовна примена захтева ниску цену производње, а рад у понекад екстремно тешким условима, велику енергетску ефикасност која се постиже високом поузданошћу преноса, односно применом једноставних алгоритама за контролу грешака. Ови алгоритми се засновани на техникама тврдог комбиновања које се реализују на слоју везе као део хибридниh ARQ шема што је посебно истакнуто у радовима Elisabeth Uhlemann и Andreea Williga објављених после 2005. године.

Проблем одређивања вероватноће погрешног преноса пакета или користећи терминологију Carsona Lama, вероватноће ретрансмисије (Мастер теза, 1992.) као кључног параметра у анализи перформанси, је разматран последњих двадесет година од стране више аутора у различитим поставкама диверзити и ARQ модела преноса. Chakraborty са групом аутора је разматрао диверзити систем са три гране и мајоритетним комбиновањем пакета уз претпоставку да су све каналне вероватноће идентичне (2004. година). Добијени резултат за вероватноћу ретрансмисије је дат у отвореном облику у виду троструке суме. Сличан рад, истих аутора, само за два идентична канала и хог комбиновање пакета је презентован 2005. године. Резултат је такође дат у отвореном облику у виду двоструке суме. За разлику од поменутих аутора, Z. Zhou, Z. Peng и J. –H. Cui рачунајући енергетску ефикасност једне подводне сензорске мреже, дају аналитички израз за вероватноћу ретрансмисије узимајући у обзир произвољан број путања и различите вероватноће грешака (2008. година). Механизам за корекцију грешака је био заснован на мајоритетном комбиновању, међутим, резултат је дат више емпиријски, без доказа. Свакако највећу

пажњу рачунању вероватноће погрешног преноса пакета у случају диверзити преноса са произвољним бројем идентичних канала посветио је Carson Lam у својој мастер тези 1992. године анализирајући укупно шест различитих шема које се користе као део ARQ протокола.

Када је реч о оригиналности тезе, треба истаћи да је у доступној литератури било мало теоријских радова који се односе на рачунање вероватноће погрешног преноса у случају хибридниh ARQ шема заснованих на селективном и мајоритетном комбиновању пакета у условима диверзити преноса са произвољним бројем канала и различитим каналним вероватноћама. Поглавља два и три која обухватају истраживања везана за одређивање теоријских израза за вероватноћу погрешног преноса пакета и пропусност су у потпуности оригинална, док је у четвртном поглављу извршена модификација решења које су предложили Elisabeth Uhlemann и Andreas Willig.

Значај истраживања обављеног у овој дисертацији је вишеструк. Кандидат је дао јасан теоријски модел и методологију за рачунање вероватноће погрешног преноса полазећи од једноставнијих случаја за три и пет канала, да би дошао до општег израза. Такође, кандидат је увео појам еквивалентне каналне вероватноће која се може користити као добар репрезент канала са различитим вероватноћама грешака чији значај није само у поједностављењу сложених израза за вероватноћу погрешног преноса, већ и у једнодимензионалној графичкој представи. Кандидат је предложио три карактеристична сценарија преноса пакета од изворног до одредишног чвора и предложио методологију за одређивање пропусности система на бази процене средњег времена трајања ретрансмисионих циклуса. Такође, у делу који се односио на имплементацију, дат је предлог једне хипотетичке мреже и предлог модификације стандарда који се користи за размену података у бежичним сензорским мрежама.

Истраживања у тези су показала да се у пакетски оријентисаним мрежама са вишеструким путањама могу користити врло једноставна и економична решења за корекцију грешака базирана на селективном и мајоритетном комбиновању пакета.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература која је коришћена у дисертацији у потпуности задовољава све критеријуме доброг покривања области истраживања, адекватности и савремености анализе најновијих резултата и трендова развоја у области истраживања. У својој дисертацији, кандидат је детаљно претражио отворену литературу и коректно навео референце на радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је 50 библиографских записа, од чега 8 књига, 18 радова у часописима, 16 радова у конференцијским зборницима, по 1 докторска и 1 магистарска теза, 2 стандарда, и 4 упутства за коришћење комерцијалних кола. После 2000. године је објављено 35 референци, што потврђује актуелност коришћене литературе.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Имајући у виду целину и сложеност истраживања, у истраживачком поступку су примењене различите научне методе попут анализе, индукције, апстракције, моделовања и симулације. Постојеће методе су проучене, референциране и укратко поменуте. За спознају предмета истраживања у свим фазама истраживачког поступка су примењиване научне методе: дефиниција и класификација, дедукција и индукција, анализа и синтеза. Извршена је општа идентификација предмета истраживања и констатовани су чиниоци предмета анализе.

У циљу анализе предложених поступака, комбиноване су методе теоријске и симулационе анализе. Математичка анализа је вршена на бази теоријских модела узимајући у обзир извесна ограничења која подразумевају идеалну синхронизацију на нивоу бита и оквира, споропроменљиви канал у односу на дужину трајања оквира, познату дужину оквира и др.. Као помоћно средство приликом рачунања општег израза за вероватноћу погрешног преноса пакета у случају диверзити преноса са произвољним бројем путања коришћени су уџбеници из комбинаторике и то теорема укључивања и искључивања и мастер рад Carsona Lam-a. Техника симулације се намеће у поступку валидације и верификације теоријских резултата – математичких израза за вероватноћу погрешног преноса пакета и израза за пропусност добијених на основу теоријских модела. Симулације реалних модела су вршене у програмском алату MATLAB писањем програмског кода за функције појединих блокова.

Све коришћене методе су описане довољно детаљно да се истраживачки резултати могу једноставно репродуковати, односно верификовати.

3.4. Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Примена техника за контролу грешака на бази вишеструког преноса и мајоритетног комбиновања пакета представља једноставно и економично решење. Ове технике су посебно интересантне у пакетски оријентисаним мрежама са вишеструким путањама и кооперативним мрежама које раде са једном или више пријемних и предајних антена.. Типичан пример су бежичне сензорске мреже које врло често раде у екстремно отежаним условима преноса, при чему захтеви за поузданим преносом имају већи приоритет у односу на захтеве за рационалним коришћењем комуникационих капацитета. Извођење теоријских и апроксимативних израза за вероватноћу погрешног преноса пакета у случају произвољног броја канала са различитим вероватноћама грешака представља кључни параметар за процену енергетске ефикасности сензорског чвора.

3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Резултати досадашњег научноистраживачког рада мр Владимира Вуковића задовољавају све критеријуме Закона о високом образовању и јасно показују да кандидат поседује све услове за самосталан научни рад.

4. Остварени научни допринос

4.1. Приказ остварених научних доприноса

На основу претходних разматрања може се закључити да се оригинални научни допринос ове тезе односи на теоријску анализу и имплементацију алгоритама за контролу грешака базираних на техникама диверзити преноса и мајоритетног комбиновања пакета. У дисертацији су извршена значајна теоријска и практична истраживања која су резултирала следећим доприносима:

- Изведен је израз у затвореном облику за вероватноћу погрешног преноса пакета за три и пет канала, са различитим каналним вероватноћама; резултат за три канала је објављен у референци са импакт фактором;
- Изведен је израз за вероватноћу погрешног преноса пакета за произвољан број канала са различитим каналним вероватноћама; урађен је софтверски пакет у програмском алату MATLAB који на бази општег израза рачуна вероватноћу погрешног преноса пакета за раличите каналне вероватноће;

- Како су добијени изрази за вероватноћу погрешног преноса прилично сложени, развијени су погодни апроксимативни изрази који омогућују лакше сагледавање утицаја кључних параметара као што су број канала и дужина пакета, на вероватноћу погрешног преноса;
- Упоредна анализа је показала да додатна примена мајоритетног комбиновања пакета може значајно да смањи вероватноћу погрешног преноса у односу на селективно комбиновање;
- Уведен је појам еквивалентне каналне вероватноће која се може користити као добар репрезент канала са различитим вероватноћама грешака; значај еквивалентне каналне вероватноће, која се дефинише као геометријска средња вредност појединачних каналних вероватноћа, није само у поједностављивању сложених изрази за вероватноћу погрешног преноса, већ и у једнодимензионалној графичкој представи функције више променљивих; показано је да се вероватноћа погрешног преноса пакета релативно мало мења без обзира на велике односе појединих каналних вероватноћа;
- Развијени су модели три карактеристична сценарија преноса пакета од изворног до одредишног чвора, од тога, два гранична случаја, један који се односи на просторни диверзитети, и други, који се односи на временски диверзитети; изведени су изрази за пропусност на бази средњег времена трајања ретрансмисионих циклуса; на основу изведених изрази, извршена је анализа утицаја кључних параметара на пропусност, као што су број канала, дужина пакета и кружно кашњење;
- Дат је предлог модификације стандарда који регулише размену података у бежичним сензорским мрежама као и предлог модификације комерцијалних примопредајника који се користе у одредишном чвору. Предложено је да оквир садржи два посебна CRC поља, која независно контролишу садржај MAC хедера и MSDU поља. Дат је идејни предлог хардверске и софтверске реализације примопредајника и процесорског блока у одредишном чвору која омогућује имплементацију мајоритетног комбиновања пакета.

4.2. Подаци о објављеном научном раду у вези са дисертацијом

Кандидат је у току истраживања публиковао више радова из области дисертације. Кандидат је први коаутор рада *Packet error probability in a three-branch diversity system with majority combining* који је објављен у часопису *IEEE Communications Letters* у јануару 2011. године у броју 1, у тому 15, чији је IMPACT фактор 1.14. У раду је приказан теоријски оквир рачунања вероватноће погрешног преноса пакета у случају три независна канала са произвољним вероватноћама грешака у каналу и мајоритетним комбиновањем пакета. Израз за вероватноћу погрешног преноса пакета је дат у затвореном облику. Полазећи од егзактног изрази, дати су и апроксимативни изрази за вероватноћу погрешног преноса у случају селективног комбиновања пакета, као и у случају додатне примене мајоритетне логике. На крају рада је дата процена остварених перформанси.

4.3. Могућа даља истраживања

Докторска теза отвара читав низ могућности за даља теоријска и практична истраживања. У теоријском делу, примењена методологија за рачунање вероватноће погрешног преноса пакета и пропусности се може проширити и на друге поступке “тврдог” одлучивања или њихове комбинације. У практичним истраживањима има могућности да се истраже нове области примене, поготово у бежичним сензорским мрежама, као и да се детаљније размотре хардверске и софтверске компоненте које се користе у оквиру стандарда за размену података и прилагоде новим захтевима преноса.

5. Закључак и предлог

5.1. Кратак осврт на дисертацију у целини

Предмет истраживања докторске дисертације је теоријска анализа хибридне ARQ шеме засноване на селективном и мајоритетном комбиновању пакета у условима диверзити преноса са произвољним бројем канала и различитим каналским вероватноћама. Анализирана су три карактеристична сценарија, од којих два дају граничне случајеве, један који одговара чисто просторном диверзитију, и други, који одговара чисто временском диверзитију. Резултати су имплементирани у једној хипотетичкој сензорској мрежи.

Након пажљивог читања и детаљне анализе докторске дисертације мр Владимира Вуковића, насловљене „Ефикасни ARQ алгоритми базирани на мајоритетној логици“, Комисија је констатовала да она садржи све потребне формално-типографске целине и да је написана у складу са стандардима Електротехничког факултета и Универзитета у Београду. Изложени материјал је добро организован кроз поглавља и одељке. Циљеви тезе су јасно наведени и исказани, а предложене методе и истраживачки резултати изложени поступно, систематски и разумљиво. Наглашен је допринос аутора у области истраживања.

5.2. Предлог Комисије Наставно-научном већу

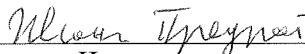
На основу свега изложеног, Комисија констатује да дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду. Комисија сматра да докторска дисертација мр Владимира Вуковића, под насловом „Ефикасни ARQ алгоритми базирани на мајоритетној логици“, садржи оригиналне научне доприносе, па има задовољство и част да предложи Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да ову дисертацију прихвати и одобри њену усмену јавну одбрану.

У Београду, 03.04.2012. године

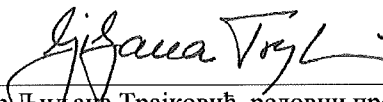
Чланови Комисије:



др Александра Смиљанић, ванредни професор (ментор)
Електротехнички факултет Универзитета у Београду



др Предраг Иваниш, доцент
Електротехнички факултет Универзитета у Београду



др Љиљана Трајковић, редовни професор
School of Engineering Science, Simon Fraser University,
Vancouver, British Columbia, Canada