

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14 · Поштански фах 73  
18000 Ниш · Србија  
Телефон 018 529 105 · Телефакс 018 588 399  
E-mail: [efinfo@elfak.ni.ac.rs](mailto:efinfo@elfak.ni.ac.rs); <http://www.elfak.ni.ac.rs>  
Текући рачун: 840-1721666-89; ПИБ: 100232259



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING

Aleksandra Medvedeva 14 · P.O. Box 73  
18000 Niš - Serbia  
Phone +381 18 529 105 · Fax +381 18 588 399  
E-mail: [efinfo@elfak.ni.ac.rs](mailto:efinfo@elfak.ni.ac.rs)  
<http://www.elfak.ni.ac.rs>

ДЕКАН

02.12.2022. године

О Б А В Е Ш Т Е Њ Е  
НАСТАВНИЦИМА И САРАДНИЦИМА ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Докторска дисертација кандидата мастер инж. Бојана Денића под насловом „Пројектовање квантизера за примену у обради сигнала и неуронским мрежама“ и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације доступни су на увид јавности у електронској верзији на званичној интернет страници Факултета и налазе се у штампаном облику у Библиотеци Електронског факултета у Нишу, и могу се погледати до **01.01.2023. године**.

Примедбе на наведени извештај достављају се декану Електронског факултета у Нишу у напред наведеном року.

Председник Наставно-научног већа  
ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА У НИШУ

Декан  
Проф. др Драган Манчић

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља и име	Денић Душан Бојан
Датум и место рођења	03.09.1986. Врбештица, Штрпце
<b>Основне студије</b>	
Универзитет	Универзитет у Приштини
Факултет	Факултет техничких наука
Студијски програм	Електроника и телекомуникације
Звање	Инжењер електротехнике и рачунарства
Година уписа	2007.
Година завршетка	2010.
Просечна оцена	9.58

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ  
У НИШУ

Примљено 02.12.2022
Број
07/03-013/22-004

### Магистарске студије, магистарске студије

Универзитет	Универзитет у Приштини
Факултет	Факултет техничких наука
Студијски програм	Електроника и телекомуникације
Звање	Магистар инжењер електротехнике и рачунарства
Година уписа	2010.
Година завршетка	2012.
Просечна оцена	9.89
Научна област	Телекомуникације
Наслов завршног рада	Анализа утицаја дисперзије и термичког шума оптичког пријемника на пренос сигнала у оптичкој WDM мрежи

### Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Електронски факултет у Нишу
Студијски програм	Електротехника и рачунарство
Година уписа	2018.
Остварен број ЕСПБ бодова	222
Просечна оцена	9.67

### НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	Пројектовање квантизера за примену у обради сигнала и неуронским мрежама
Име и презиме ментора, звање	Зоран Перић, редовни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	8/20-01-004/21-018, 07.06.2021.

### ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	153
Број поглавља	7
Број слика (шема, графикона)	79
Број табела	20
Број прилога	/

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА  
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Z. Perić, B. Denić, V. Despotović, “Novel two-bit adaptive delta modulation algorithms”, <i>Informatica</i>, 2019, vol. 30, pp. 117–134.</p> <p>У раду су предложена два нова алгорита на бази двобитне адаптивне делта модулације (ADM), где се процесирање сигнала врши фрејм по фрејт. Алгоритми заправо представљају модификацију основне ADM конфигурације са бинарном квантизацијом, при чему је задржано основно својство делта модулације да се квантовани сигнал на излазу добија додавањем или одузимањем корака од предикованог сигнала. Тестирање је извршено на реалном говорном сигналу који је одмераваан на 22.05 kHz, а резултати су показали да предложени ADM алгоритми обезбеђују значајно боље перформансе (већи квалитет реконструисаног сигнала и шири динамички опсег) у односу на постојећа ADM решења сличне комплексности.</p>	M21
2	<p>Z. Perić, M. Savić, N. Simić, B. Denić, V. Despotović, “Design of a 2-bit neural network quantizer for Laplacian source”, 2021, <i>Entropy</i>, vol. 28, no.3, Article ID 933.</p> <p>У овом раду разматрано је пројектовање двобитног униформног скаларног квантизера за Лапласов извор а затим је извршена адаптација у циљу ефикасног процесирања параметара неуронске мреже. Адаптивни квантизер је примењен на тежине обучене MLP и CNN неуронске мреже које се користе за класификацију слика (користи се MNIST база података), а показано је да у том случају квантована MLP и квантована CNN мрежа остварују значајно боље перформансе него када се користе постојећи двобитни (униформни и неуниформни) квантизери. Такође, примењена је јако мала деградација у перформансама у односу на MLP и CNN моделе пуне прецизности.</p>	M22
3	<p>Z. Perić, B. Denić, V. Despotović, “Gaussian source coding based on variance-mismatched three-level scalar quantization using Q-function approximations”, <i>IET Communications</i>, 2020, vol. 14, pp. 594–602.</p> <p>У овом раду је разматран скаларни квантизер са три нивоа са Хафмановим кодом, који се може применити за компресију сигнала са Гаусовом расподелом. Квантизер је анализиран за случајеве када прилагођење на варијансу улазног сигнала постоји или не, при чему су изведени изрази у затвореном облику за процену перформанси (SQNR и R), користећи одговарајуће апроксимације Гаусове Q-функције. Резултати су показали да изведени изрази омогућавају тачнију процену перформанси у односу на изразе који се могу срести у литератури.</p>	M22
4	<p>Z. Perić, B. Denić, V. Despotović, “Algorithm based on 2-bit adaptive delta modulation and fractional linear prediction for Gaussian source coding”, <i>IET Signal Processing</i>, 2021, vol. 15, Issue 6, pp. 410–423.</p> <p>У овом раду разматран је двобитни ADM алгоритам заснован на фрејм по фрејм анализи и процесирању сигнала са Гаусовом расподелом. Алгоритам се заснива на примени двобитног униформног квантизера који је пројектован применом апроксимација Q-функције и фракционог линеарног предиктора са меморијом од два одмерка који се користи уместо класичног линеарног предиктора. Тестирање је урађено на реалном говорном сигналу (фреквенција одмеравања је 8 kHz), а показано је да је предложени ADM алгоритам доста ефикаснији у односу на до сада предложене двобитне ADM алгоритме.</p>	M23
5	<p>Z. Perić, B. Denić, M. Dinčić, J. Nikolić, “Robust 2-bit quantization of weights in neural network modeled by Laplacian distribution”, <i>Advances in Electrical and Computer Engineering</i>, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 3–10.</p> <p>У овом раду предложен је робусни двобитни неуниформни квантизер за Лапласов извор који је реализован помоћу компанинг технике. Извршена је детаљна теоријска анализа овог модела квантизера користећи тачне и апроксимативне формуле а урађена је и додатна оптимизација параметара чиме су додатно поправљене перформансе (робусност) у широком опсегу варијанси. На основу примене овог модела квантизера (пројектованог уз помоћ тачних формула) у процесирању тежина обучене MLP неуронске мреже уочено је добро слагање између теоријских и експериментално добијених резултата за SQNR. Такође, указана је и предност у односу на униформни квантизер који се доминантно користи у компресији неуронских мрежа.</p>	M23
6	<p>Z. Perić, B. Denić, V. Despotović, “An efficient two-digit adaptive delta modulation for Laplacian source coding”, <i>International Journal of Electronics</i>, 2019, vol. 106, pp. 1085–1100.</p> <p>У овом раду предложен је нови дводигитни ADM алгоритам за кодовање и компресију сигнала који користи фрејм по фрејм логику процесирања. Алгоритам користи адаптивни линеарни предиктор првог реда и адаптивни неуниформни квантизер са шест нивоа (квантизер је симетричан и пројектован је за Лапласов извор у складу са два критеријума) чији се излази кодују променљивом дужином кодних речи (један дигит се користи за знак а други за представљање вредности сигнала грејске предикције). На основу анализе на реалном говорном сигналу (фреквенција одмеравања је 22.05 kHz), закључено је да је предложена ADM конфигурација супериорнија у односу на добро позната ADM решења (CFDM и CVSDM) као и на постојећа решења из класе дводигитне ADM.</p>	M23
7	<p>Z. Perić, J. Nikolić, B. Denić, V. Despotović, “Forward adaptive dual-mode quantizer based on the first-degree spline approximation and embedded G.711 codec”, <i>Radioengineering</i>, 2019, vol. 28, pp. 729–739.</p> <p>У овом раду је предложен двомодни (dual-mode) квантизер са адаптацијом унапред који користи два компанинг квантизера са истим бројем нивоа али различитим шириницама грануларног региона (ограничен и неограничен квантизер), а заснива се на фрејм/подфрејм логици процесирања Лапласовог сигнала. Компанинг квантизери се заснивају на spline функцији првог реда која се користи за апроксимацију нелинеарне компресорске функције, а као неограничени квантизер користи се G. 711 квантизер. Идеја се састоји у томе да се у оквиру двомодног квантизера обезбеди што чешићи избор ограниченог квантизера (што се постиже његовим правилним пројектовањем), јер се на тај начин остварује добитак у SQNR-у у односу на случај када се користи само G. 711 квантизер.</p>	M23
8	<p>B. Denić, Z. Perić, N. Vučić, V. Despotović, “Forward adaptive Laplacian source coding based on restricted quantization”, <i>Information Technology and Control</i>, 2018, vol. 47, pp. 209–219.</p>	M23

	<p>У овом раду је предложен нови двоходни квантизер са адаптацијом унапред и променљивом дужином кодних речи (Хафманов код), који користи два скаларна квантизера са три нивоа који имају неједнаке ширине грануларног региона, а чије је пројектовање извршено за ограничену Лапласову расподелу. Предложени модел квантизера може представљати ефикасно решење за компресију сигнала код којих су мале тренутне вредности сигнала вероватније од великих вредности (нпр. говор). Анализом на говорном сигналу утврђено је добро слагање између теоријских и експерименталних резултата за SQNR а указано је и на предност у односу на Лојд-Макс квантизере са 2 и 4 нивоа.</p>	
9	<p><b>Z. Perić, B. Denić, V. Despotović, “Multilevel delta modulation with switched first-order prediction for wideband speech coding”, <i>Elektronika IR Elektrotehnika</i>, 2018, vol. 24, pp. 46–51.</b></p> <p>У овом раду је разматрано ADM решење за широкопојасни говорни сигнал, које за разлику од основне ADM конфигурације уместо бинарног примењује вишенивоовски квантизер, на отуда и назив вишенивоовска делта модулација. У предложеној конфигурацији имплементиран је добро познати G.711 квантизер, а линеарни предиктор првог реда замењен је прекидачким линеарним предиктором првог реда. Анализа перформанси је урађена у теоријском и експерименталном домену где је уочено добро слагање између резултата за SQNR а уочен је и значајан добитак у односу на стандардизовани G.711 квантизер.</p>	M23
10	<p><b>Z. Perić, B. Denić, V. Despotović, “Three-level delta modulation with second-order prediction for Gaussian source coding”, <i>Advances in Electrical and Computer Engineering</i>, 2018, vol.18, pp. 95–102.</b></p> <p>У раду је предложена надградња основне шеме ADM-а за кодовање Гаусовог извора, где је бинарни квантизер замењен квантизером са три нивоа који користи Хафманов код а фиксни предиктор првог реда замењен је прекидачким предиктором другог реда. Показано је да је предложена ADM шема ефикаснија у кодовању говора (излазна брзина од 22.05 kbps) у односу на добро познате модификације основне ADM шеме (CFDM и CVSDM) али и двобитне ADM алгоритме који су доступни у литератури.</p>	M23
11	<p><b>B. Denić, Z. Perić, V. Despotović, “Three-level delta modulation for Laplacian source coding”, <i>Advances in Electrical and Computer Engineering</i>, 2017, vol. 17, pp. 95–102.</b></p> <p>У овом раду предложено је ADM решење које заправо представља надградњу основне ADM шеме, где је бинарни квантизер замењен са неуниформним квантизером са три нивоа (пројектован је за Лапласов извор) чији се нивои кодују променљивом дужином кодних речи. На основу анализе на реалном говорном сигналу (фреквенција одмеравања је 16 kHz), показано је да предложена ADM шема у значајној мери поправља перформансе (SNR) базичне ADM шеме. Такође, поређење перформанси извршено је и употребом хибридних мера (PESQ).</p>	M23
12	<p><b>B. Denić, Z. Perić, V. Despotović, “Forward adaptive speech coding with low bit rates and variable word length”, <i>Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics</i>, 2016, vol. 15, pp. 125–136.</b></p> <p>У овом раду предложена су два адаптивна решења за кодовање/компресију говорног сигнала при малим битским брзинама, која се базирају на примени скаларних квантизера са пет нивоа и променљивом дужином кодних речи: неуниформног Лојд-Макс квантизера и униформног квантизера са мртвом зоном. Теоријско пројектовање квантизера извршено је за Лапласов извор, а униформни квантизер са мртвом зоном је пројектован у складу са два критеријума. У теоријском домену указано је на предност предложених решења у односу на друге моделе са истим бројем нивоа односно са истом битском брзином. У циљу верификације теоријских резултата урађен је експеримент на реалном говорном сигналу.</p>	M24
13	<p><b>Z. Perić, B. Denić, M. Savić, V. Despotović, “Design and analysis of binary scalar quantizer of Laplacian source with applications”, <i>Information</i>, 2020, vol. 11, 18 pages.</b></p> <p>У овом раду дата је детаљна анализа два типа бинарног скаларног квантизера за Лапласов извор а разматрана је и њихова примена у компресији различитих типова сигнала као што је говор, слика и параметари неуронске мреже.</p>	M51
14	<p><b>L. Velimirović, Z. Perić, B. Denić, “Design and analysis of the two-level scalar quantizer with extended Huffman coding”, <i>The First National Conference Information Theory and Complex Systems</i>, Belgrade, 2013.</b></p> <p>У овом раду је разматран бинарни скаларни квантизер са проширеним Хафмановим кодом за Гаусов извор. Показано је да примена проширеног Хафмановог кода омогућава додатну редукацију битске брзине (испод једног бита) што је изузетно значајно за апликације где се захтева велика компресија сигнала.</p>	M63

**НАПОМЕНА:** уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

### ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.	ДА	НЕ
На основу услова превиђених Законом о високом образовању, Статутом Универзитета, Правилником о поступку припреме и условима за одбрану докторске дисертације и Статутом Електронског факултета у Нишу, Комисија константује да кандидат мастер инж. Бојан Денић испуњава све предвиђене услове за одбрану докторске дисертације.		

### ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

Докторска дисертација кандидата мастер инж. Бојана Денића изложена је на 153 странице А4 формата, садржи 7 поглавља, 79 слика и 20 табела.

У дисертацији се предлаже већи број решења за кодовање и компресију два типа сигнала, заснованих на примени фиксних и адаптивних скаларних квантизера са малим и великим бројем нивоа, при чему се користе кодови са променљивом и са фиксном дужином кодних речи. Приказане су и образложене методе пројектовања различитих модела квантизера за потребе кодовања говора (представник телекомуникационих сигнала) као и за потребе компресије параметара неуронских мрежа.

У уводном поглављу дати су резултати претходних истраживања везано за области од интереса, указано је на значај теме докторске дисертације и укратко су истакнути доприноси дисертације а такође је укратко описана и садржина поглавља која се налазе у дисертацији.

У другом поглављу представљене су теоријске основе скаларне квантизације, односно дефинисани су скаларни квантизер и евалуационе метрике, типови расподела за које се квантизер пројектује и критеријуми а дата је и општа подела скаларних квантизера.

Треће поглавље дисертације намењено је пројектовању и анализи нискорезолуционих квантизера са променљивом дужином кодних речи за Гаусов извор. Предложене су нове методе за пројектовање које су рачунски мање интензивне од постојећих метода, а неке од њих користе и апроксимације  $Q$ -функције.

У четвртном поглављу дисертације анализирана је PCM техника кодовања говора, где је предложено више нових решења за мале и велике битске брзине. Изложен је поступак пројектовања различитих типова квантизера који чине основу развијених PCM енкодера. Поред квантизера за неограничен извор, пројектовани су и квантизери за ограничен извор а разматрани су и двомодни квантизери који алтернативно користе квантизер за ограничен и неограничен извор односно квантизере за ограничен извор. Предложена решења пружају боље перформансе у односу на доступна решења сличне комплексности али и од неких стандардизованих решења (нпр. G.711 енкодер).

Пето поглавље посвећено је даљем унапређењу технике адаптивне делта модулације (ADM) за говорни сигнал. Развијено је више нових ADM алгоритама заснованих на примени новог начина адаптације (адаптација на нивоу фрејма) и нових модела квантизера и предиктора. Наиме, у зависности од статистичког модела фрејма (Лапласова или Гаусова расподела) извршено је пројектовање већег броја квантизера а осим нових линеарних предиктора по први пут је у оквиру ADM-а имплементиран и фракциони линеарни предиктор. Предложеним ADM алгоритмима је могуће постићи значајно веће перформансе (већи квалитет реконструисаног сигнала и шири динамички опсег) у односу на напреднија ADM решења сличне комплексности.

У шестом поглављу приказана су решења на бази скаларних квантизера за компресију неуронских мрежа. Представљено је неколико решења (адаптивних и неадаптивних) за *post-trening* квантизацију тежина неуронске мреже која се базирају на нискорезолуционој квантизацији. Развијени квантизери се заснивају на статистици тежина, а показало се да је Лапласова расподела погодан статистички модел за тежине. Предложеним решењима је могуће остварити добар компромис између величине и перформанси неуронске мреже, а показало се да су доста ефикаснија од доступних решења квантизера са истим бројем нивоа односно истом битском брзином.

Закључак је дат у седмом поглављу дисертације, где су сумирани научни резултати и истакнути доприноси.

На крају дисертације дати су литература, списак објављених радова, биографија и изјаве аутора, респективно.

## ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Увидом у Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата мастер инж. Бојана Денића, Комисија закључује да су постављени циљевии успешно остварени.

У дисертацији је предложен већи број нових решења како за кодовање и компресију говорног сигнала тако и за компресију неуронских мрежа, а која се базирају на пројектовању и имплементацији различитих модела квантизера. Представљени су нови енкодери таласног облика (PCM и ADM енкодери) за мале и велике битске брзине за говорни сигнал, који се карактеришу малом комплексношћу. Предложени енкодери користе нове моделе скаларних квантизера (користе како кодове са фиксном дужином кодних речи тако и кодове са променљивом дужином кодних речи) који су ефикаснији од стандардно коришћених модела у погледу комплексности и времена процесирања. Приказани су поступци пројектовања квантизера за неограничен и ограничен извор, а предложени су и двомодни квантизери који се заснивају на неизменичном коришћењу квантизера пројектованог за ограничен и неограничен извор односно квантизера пројектованих за ограничен извор. Поред тога, извршено је пројектовање квантизера за компресију параметара неуронске мреже, који могу бити адаптивни и неадаптивни. Сви пројектовани модели базирају се на статистици параметара који се квантују.

Анализом свих предложених решења на одговарајућим реалним тест сигналима показано је да остварују добитак у поређењу са другим постојећим решењима за кодовање/компресију сигнала.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Према оцени Комисије, најзначајнији доприноси дисертације мастер инж. Бојана Денића су:

- Развој нових метода пројектовања нискорезолуционих квантизера за Гаусов извор који су рачунски мање захтевни у односу на стандардно коришћене методе.
- Развој и пројектовање адаптивних квантизера за примену у енкодерима таласног облика за кодовање и компресију говорног сигнала.
- Развој PCM енкодера (класа енкодера таласног облика) за говорни сигнал заснованог на примени двомодног скаларног квантизера који комбинује квантизер за ограничен и квантизер за неограничен извор односно два квантизера за ограничен извор.
- Развој ADM енкодера (класа енкодера таласног облика) коришћењем нових модела нискорезолуционих односно вискорезолуционих квантизера и нових модела предиктора.
- Развој нових решења за *post-trening* квантизацију неуронских мрежа, коришћењем адаптивних и неадаптивних скаларних квантизера чије се пројектовање заснива на статистици (расподели) параметара неуронске мреже који се квантују.

Процена перформанси односно анализа развијених решења на бази скаларних квантизера је извршена коришћењем објективних мера и то у теоријском и експерименталном домену.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидат мастер инж. Бојан Денић је показао висок ниво посвећености и самосталности током научно-истраживачког рада али и током израде докторске дисертације. У прилог томе говоре и објављени радови на којима је кандидат првопотписани аутор, и то: два рада у часописима категорије М23 и један рад у часопису Универзитета.






### ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

Прегледом докторске дисертације кандидата мастер инж. Бојана Денића, утврђено је да дисертација садржи низ оригиналних научних доприноса како из области кодовања/компресије телекомуникационих сигнала (говора) тако и из изузетно атрактивне области компресије неуронских мрежа. Резултати истраживања су приказани на примерима говора и параметара неуронске мреже, а публиковани су у реномираним научним часописима и излагани на конференцијама. Комисија закључује да су испуњени услови према којима је докторска дисертација подобна за јавну одбрану. Према томе, предлажемо Наставно-научном већу Електронског факултета, Универзитета у Нишу, да се кандидату Бојану Денићу одобри јавна одбрана докторске дисертације под насловом “Пројектовање квантизера за примену у обради сигнала и неуронским мрежама”.

### КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовану Комисије 8/20-01-007/22-027

Датум именовања Комисије 31.10.2022.

Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис	
1.	др Дејан Ћирић, редовни професор		
	Телекомуникације		Председник
	(Научна област)		Електронски факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)
2.	др Зоран Перић, редовни професор		
	Телекомуникације		члан (ментор)
	(Научна област)		Електронски факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)
3.	др Жељко Ђуровић, редовни професор		
	Аутоматика		члан
	(Научна област)		Електротехнички факултет Универзитета у Београду (Установа у којој је запослен)
4.	др Зоран Огњановић, научни саветник		
	Математика		члан
	(Научна област)		Математички институт САНУ, Београд (Установа у којој је запослен)
5.	др Александра Јовановић, ванредни професор		
	Телекомуникације		члан
	(Научна област)		Електронски факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)

Датум и место:

25.11.2022. године