

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ  
Мр БОШКА БОЖИЛОВИЋА

<b>I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију Решење Декана Факултета техничких наука у Новом Саду, број 012-72/27 – 2015 од 26.05.2016.</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>1) Др Срђан Станковић, професор емеритус; Електротехнички факултет, Београд; УНО: Сигнали, системи и управљање датум избора у звање: 13.02.2011. председник комисије</li><li>2) Др Драган Кукољ, редовни професор; Факултет техничких наука, Нови Сад; УНО: Рачунарска техника и рачунарске комуникације датум избора у звање: 19.09.2003. члан комисије</li><li>3) Др Бранислав Тодоровић, научни саветник и редовни професор; Истраживачко развојни институт РТ-РК, Нови Сад; УНО: Телекомуникације и обрада сигнала датум избора у звање: 25.03.2015. и 23.02.2012. члан комисије, коментор</li><li>4) Др Владо Делић, редовни професор; Факултет техничких наука, Нови Сад; УНО: Телекомуникације и обрада сигнала датум избора у звање: 28.03.2013. члан комисије</li><li>5) Др Мирослав Поповић, редовни професор; Факултет техничких наука, Нови Сад; УНО: Рачунарска техника и рачунарске комуникације датум избора у звање: 17.07.2002. члан комисије, ментор</li></ul>
<b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Бошко, Радмило, Божиловић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 09.08.1978. године, Савски Венац, Београд, Република Србија</p>

3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив  
Кандидат је стекао право на израду докторске дисертације након што је одбранио магистарску тезу.
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија  
Кандидат је стекао право на израду докторске дисертације након што је одбранио магистарску тезу.
5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:  
Електротехнички факултет, Београд, „Пренос слике и алфанумеричких података мрежом специјалне намене – ТЕТРА“, 11. септембар 2012. године.

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:  
Електротехника – Телекомуникације

### **III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

**„Биометријско обележје за препознавање говорника: дводимензионална информациона ентропија говорног сигнала“**

### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Дисертација садржи насловну страну и укупно 141 страну основног текста са 5 табела и 46 слика. На самом почетку текста, пре уводног поглавља, дати су: кључне документацијске информације на српском и енглеском језику, садржај, списак табела и слика, листа скраћеница као и резиме.

Основни текст дисертације је подељен у шест поглавља. Свако поглавље је посвећено једном сегменту истраживања у склопу активности при изради дисертације. Садржај појединих поглавља у оквиру дисертације је следећи:

1. Увод – У уводном делу дисертације је дато образложење теме, тако што су дефинисани предмет и циљ истраживања и описан научни допринос дисертације. На крају је приказана организациона структура дисертације.
2. Алгоритми за препознавање облика и њихова примена у биометрији – Непосредно пре описа новог биометријског обележја дат је теоријски увод о алгоритмима за препознавање облика, дата је класификација алгоритама, описани проблеми које они треба да реше. Потом је описана и њихова примена у биометрији. Дефинисан је појам биометрије и биометријских система уопште.
3. Говор као биометријско обележје – Дат је детаљан опис говора као биометријског обележја човека. Описан је говорни сигнал, како он настаје, како се репрезентује, обрађује, а дат је и опис досадашњих радова и преглед постојећих обележја за препознавање говорника. Дата је и категоризација обележја појединачног говорника и предложена модификација једне од категоризација. Поглавље обрађује и специфичну тематику препознавања говорника.
4. Дводимензионална информациона ентропија – Дефинисано је ново обележје за препознавање говорника независно од текста - дводимензионална информациона ентропија. Описан је и алгоритам за издвајање дводимензионалне информационе ентропије из говорног сигнала. Такође је дат опис реализованог симулатора и тестног окружења, како би могли да се изведу закључци о перформансама новог обележја.

5. Анализа перформанси алгоритма за препознавање говорника на бази дводимензионалне информационе ентропије – У овом поглављу су анализирани перформансе предложеног алгоритма за препознавање говорника на бази дводимензионалне информационе ентропије. Показано је да дводимензионална информациона ентропија задовољава захтеве за малу варијабилност унутар говорног сигнала једног говорника, а велику варијабилност између говорних сигнала различитих говорника. Извршена је анализа утицаја односа сигнал/шум и брзине узорковања на перформансе система за препознавање говорника који као обележје користи дводимензионалну информациону ентропију. У овом поглављу је извршено и поређење резултата који се добијају применом дводимензионалне информационе ентропије са резултатима који се добијају применом Мел-кепстралних коефицијената, а који тренутно представљају најчешће коришћено обележје за препознавање говорника. Израчуната је и рачунска сложеност овог алгоритма и дато поређење са сложенošћу алгоритма за издвајање Мел-кепстралних коефицијената.
6. Закључак – Изнета су запажања до којих се дошло током реализације ове дисертације, и дате су смернице будућим истраживачима у овој области.

Након основног текста дисертације дата је листа коришћене литературе са 274 библиографских наслова, која је адекватно употребљена.

## **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

У првом поглављу дата су уводна разматрања која имају за циљ да укажу на значај примене алгоритама за препознавање облика, а конкретно за идентификацију људи, у циљу унапређења опште безбедности. Издвојен је глас као биометријско обележје које комбинује физиолошке карактеристике и понашање појединца. Главни недостатак гласа као биометријског обележја је тај што је подложен многим утицајима који изазивају његову непостојаност, укључујући како намерну, тако и спонтану промену понашања особе. Такође говорни сигнал може да садржи обележја које људско уво не може да примети, али која су важна за аутоматско утврђивање идентитета појединца. Ове чињенице говоре да и даље постоји велики простор у области истраживања нових обележја говорног сигнала, њиховог издвајања и уопште у оптимизацији и унапређењу улазног степена система за препознавање. Основни научни допринос дисертације се односи на област препознавања говорника. Дисертација је резултовала дефинисањем новог биометријског обележја, које је независно од изговореног текста – дводимензионалне информационе ентропије говорног сигнала.

У другом и трећем поглављу је дат преглед литературе. Друго поглавље је теоретски увод о алгоритмима за препознавање облика, и описана је њихова примена у биометрији. Треће поглавље детаљно описује говор као биометријско обележје. Описана су два начина на који обележја говорног сигнала могу бити категоризована, а једна од категоризација је и модификована пошто се ново обележје не може директно сврстати нити у једну категорију према тој категоризацији.

Четврто поглавље дефинише ново биометријско обележје – дводимензионалну информациону ентропију, и даје детаљни опис алгоритма за издвајање овог обележја. Описан је начин како се из таласног облика говорног сигнала издвајају две маргиналне ентропије амплитудских и временских разлика. Сваки говорник се описује помоћу две вредности: средње вредности вектора обележја (координате центра кластера) и стандардне девијације тачака кластера која представља полупречник кластера. Затим су описани реализовани симулатор и тестно окружење који су коришћени за издвајање обележја и анализу перформанси дводимензионалне информационе ентропије.

У петом поглављу је дата анализа перформанси новог обележја на укупно по десет узорака говорног сигнала: три женска и три мушка говорника. На основу извршених испитивања и представљених резултата потврђено је да ново биометријско обележје – дводимензионална информациона ентропија, испуњава захтеве које свако биометријско обележје мора да испуни. Показано је да дводимензионалан информациона ентропија има малу варијабилност на узорцима једног говорника, а велику варијабилност на узорцима различитих говорника. Утврђено је да брзина узорковања утиче на ново обележје, па је у системима за препознавање говорника потребно да се узорковање врши увек истом брзином. У овом поглављу је обрађен и утицај шума на ново обележје. Показано је да шум утиче на дводимензионалну информациону ентропију. Са повећањем дужине временског прозора из кога се издваја обележје, побољшава се робусност обележја на шум.

Перформансе новог обележја су упоређене са перформансама Мел-кепстралних коефицијената, најчешће употребљаваним обележјем у системима за препознавање говорника. Над базом посматраних говорника утврђено је да је дводимензионалана информациона ентропија отпорнија на шум у односу на Мел-коефицијенте.

Рачунска сложеност алгорита за израчунавање дводимензионалне информационе ентропије је два реда величине мања од сложености алгорита за израчунавање Мел-кепстралних коефицијената.

У шестом поглављу извршена је дискусија и изведени закључци. Дата је рекапитулација добијених резултата и назначени су правци даљих истраживања.

## **VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ**

### **Рад објављен у међународном часопису са *SCI* листе:**

1. Božilović, B., Todorović, B.M. and Obradović, M. (2015) "Text-independent speaker recognition using two-dimensional information entropy", *Journal of Electrical Engineering - Elektrotechnický časopis*, ISSN 1335-3632, Vol. 66, No. 3, May-June 2015, pp. 169-173, DOI: 10.2478/jee-2015-0027.

### **Радови објављени на националним конференцијама:**

2. Mitić, I., Božilović, B. i Todorović, B.M. (2015). "Upoređenje dvodimenzionalne entropije i Mel-kepstralnih koeficijenata kao metoda za prepoznavanje govornika". Zbornik radova 59. Konferencije ETRAN, стр. AU1.2.1-6, Srebrno jezero, јуни 2015.
3. Božilović, B. i Todorović, B.M. (2016). "Uticaј brzine uzorkovanja na dvodimenzionalnu entropiju za prepoznavanje govornika". Zbornik radova 60. Konferencije ETRAN, стр. AU1.5.1-5, Zlatibor, јуни 2016.

## VII ZAKЉUČCI OДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру ове дисертације предложено је ново биометријско обележје за препознавање говорника, које не зависи од изговореног текста. Описан је алгоритам за његово издвајање и анализирани његове перформансе. Показано је како се из таласног облика говорног сигнала издвајају маргиналне ентропије временских и амплитудских разлика и како се добија вектор обележја дводимензионалне информационе ентропије.

Да би се извршила потребна мерења и извели експерименти испрограмиран је и одговарајући симулатор, чији је опис дат у овој дисертацији.

Такође су дате смернице за будућа истраживања.

На основу представљених резултата и извршених испитивања, потврђено је да ново биометријско обележје – дводимензионална информациона ентропија, испуњава захтеве које свако биометријско обележје мора да испуни.

Показано је да дводимензионална информациона ентропија има малу варијабилност на узорцима једног говорника, то јест да се обележје веома мало мења од узорка до узорка говорног сигнала једног говорника, ако су узорци снимљени у истим условима.

Такође је показано да дводимензионална информациона ентропија има велику варијабилност на узорцима различитих говорника. Обе варијабилности су представљене у зависности од дужине прозора из кога се обележје издваја, 10s, 20s и 30 s.

Закључак је да дводимензионална информациона ентропија носи довољно информативног садржаја за препознавање појединих говорника. У зависности од величине преклапања кластера различитих говорника дате су и смернице за даљу анализу начина моделовања самих говорника употребом Модела Гаусових мешавина уместо VQ модела.

Алгоритам за издвајање новог обележја који је изложен је једноставан што показује да је ново обележје лако издвојити и снимити, што је још један од захтева које једно обележје треба да испуни.

Ново обележје је дугорочно обележје и увек је присутно. Са повећањем дужине узорка обележје добија на информативности и све прецизније карактерише појединца.

Анализоран је и утицај брзине узорковања и односа сигнал/шум на ново обележје.

Утврђено је да брзина узорковања утиче на обележје и да се оно мења са променом брзине узорковања. Закључено да је у систему за препознавање говорника потребно да се узорковање увек врши истом брзином, како би ново обележје без додатних трансформација било директно употребљиво за препознавање говорника. Уочена је и генерална постојаност целог простора обележја, јер се међусобни однос кластера појединих говорника и њихова констелација не мења са променом брзине узорковања. Ово указује на могућност даљег истраживања те функције трансформације, тако да се имплементацијом те функције утицај брзине узорковања потпуно елиминише при препознавању говорника.

Отпорност на шум и дисторзију је једна од веома пожељних особина коју се очекује да поседује неко биометријско обележје за препознавање говорника. Ова дисертација је обрадила и утицај шума на дводимензионалну информациону ентропију. Показано је да шум утиче на њу, али да се са повећањем дужине прозора, робусност информационе ентропије повећава.

Резултати добијени применом дводимензионалне информационе ентропије су упоређени са резултатима добијеним применом најчешће употребљаваног обележја – Мел-кепстралним коефицијентима. Закључено је да се информациона ентропија понаша као и Мел-кепстрални коефицијенти: вектор обележја се мења са променом брзине узорковања. Показано је да је информациона ентропија при односима сигнал/шум реда величине 20 dB - 30 dB робуснија у односу на Мел-кепстралне коефицијенте.

Рачунска сложеност алгоритма за израчунавање димензионалне информационе ентропије је два реда величине мања од сложености алгоритма за израчунавање Мел-кепстралних коефицијената.

Циљ овог рада је био да се дефинише ново обележје и начин на који се оно може издвојити. Остављено је доста простора на пољима оптимизације новог обележја, оптималног моделовања говорника, утицаја старења и емотивног стања говорника на обележје, као и могућности комбиновања овог и неког другог обележја. Сва ова отворена питања би могли да обраде неки будући радови својим мерењима и симулацијама. Ове чињенице остављају ову област отвореном за даља истраживања.

#### **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Као резултат дисертације, дефинисано је ново биометријско обележја – димензионална ентропија говорног сигнала и реализован је алгоритам за издвајање овог биометријског обележја.

Показано је да ново обележје задовољава услове да има малу варијабилност унутар узорака сигнала једног говорника, а велику варијабилност међу узорцима сигнала различитих говорника. Посебан квалитет дисертације представља приказана анализа утицаја односа сигнал/шум на перформансе система за препознавање говорника који као обележје користи димензионалну информациону ентропију, јер добро обележје мора бити отпорно на шум.

Извршено је и упоређење утицаја шума и брзине узорковања на резултате који се добијају применом димензионалне информационе ентропије са резултатима који се добијају применом Мел-кепстралних коефицијената, а који тренутно представљају најчешће коришћено обележје за препознавање говорника.

Прорачун сложености новог алгоритма на временском интервалу од једног минута и поређење са сложености алгоритма за издвајање Мел-кепстралних коефицијената јасно указује да је нови алгоритам рачунски знатно једноставнији у односу на алгоритам за издвајање Мел-кепстралних коефицијената.

Издавање новог обележја и анализа његових перформанси су спроведени на тест узорцима. Ови тест узорци су карактеристични и добро изабрани јер обухватају узорке како више различитих говорника, тако и више узорака истог говорника, и над њима се може адекватно анализирати варијабилност новог обележја. На основу добијених резултата, адекватно је тумачена варијабилност новог обележја, као и утицаји шума и брзине узорковања на ново обележје.

Начин приказа и тумачења резултата у дисертацији су веома јасни.

#### **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме  
ДА

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе  
ДА

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Основни научни допринос дисертације се односи на област препознавања говорника. Ово истраживање је спровођено са циљем да се унапреде постојећи системи за препознавање говорника.

Дисертација је резултовала дефинисањем новог биометријског обележја за препознавање говорника, које је независно од текста – дводимензионалне информационе ентропије говорног сигнала.

Развијен је алгоритам за издвајање дводимензионалне информационе ентропије из говорног сигнала и показано је да дводимензионална информациона ентропија задовољава захтеве за малу варијабилност унутар говорног сигнала једног говорника, а велику варијабилност између говорних сигнала различитих говорника. Извршена је анализа утицаја односа сигнал/шум на перформансе система за препознавање говорника који као обележје користи дводимензионалну информациону ентропију, јер добро обележје мора бити отпорно на шум и дисторзију. Анализиран је и утицај брзине узорковања на перформансе система за препознавање говорника који као обележје користи дводимензионалну информациону ентропију.

Извршено је упоређење резултата који се добијају применом дводимензионалне информационе ентропије са резултатима који се добијају применом Мел-кепстралних коефицијената, а који тренутно представљају најчешће коришћено обележје за препознавање говорника.

Извршен је прорачун сложености алгоритма за издвајање на временском интервалу од једног минута. Показано је да је сложеност алгоритма за издвајање предложеног обележја за два реда величине мања од сложености алгоритма за издвајање Мел-кепстралних коефицијената.

Могућност примене новог обележја на основу добијених резултата је вишеструка и огледа се првенствено у могућности да се унапреди препознавање говорника у оквиру решења за проверу идентитета путника на граничним прелазима, система за приступ људи објектима, идентификација корисника банака на основу гласа, дигитална форензика.

Добијени резултати представљају добар основ за будућа истраживања у области препознавања говорника. Остављено је доста простора на пољима оптимизације новог обележја, оптималног моделовања говорника, утицаја старења и емотивног стања говорника на обележје, као и могућности комбиновања овог и неког другог обележја.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Дисертација је написана у складу са пријавом теме, чиме су искључени недостаци који би негативно утицали на резултате истраживања.

<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
<b>• да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана.</b>

У Новом Саду/Београду,

14.06.2016. године

ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

---

Др Срђан Станковић, професор емеритус  
Електротехнички факултет, Београд

---

Др Драган Кукољ, редовни професор  
Факултет техничких наука, Нови Сад,

---

Др Бранислав Тодоровић, научни саветник и редовни професор  
Истраживачко развојни институт РТ-РК, Нови Сад

---

Др Владо Делић, редовни професор  
Факултет техничких наука, Нови Сад,

---

Др Мирослав Поповић, редовни професор  
Факултет техничких наука, Нови Сад