

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију 29.06.2017. решењем Декана број 012-199/29-2015;</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> <ol style="list-style-type: none"> 1) др Владо Делић, редовни професор, Телекомуникације и обрада сигнала, 28.03.2013, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, председник; 2) др Владимир Црнојевић, редовни професор, Рачунарске науке, 15.02.2016, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду, члан; 3) др Жељен Трповски, ванредни професор, Телекомуникације и обрада сигнала, 11.06.2014, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, члан; 4) др Марко Јанев, научни сарадник, Математика, 27.06.2012, Математички институт САНУ, Београд, члан; 5) др Дејан Вукобратовић, ванредни професор, Телекомуникације и обрада сигнала, 01.04.2014, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, ментор.
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Бранко, Никола, Бркљач</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 10.01.1986, Звездара, Београд, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Енергетика, електроника и телекомуникације, Мастер инжењер електротехнике и рачунарства</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2010, Енергетика, електроника и телекомуникације</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: Кандидат није похађао магистарске студије. Следе подаци о мастер тези: Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, „Детекција људи на сликама применом LBP-HOG обележја и SVM класификатора“, Електротехника и рачунарство, 13.09.2010.</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: ---</p>
III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:
<p>Препознавање облика са ретком репрезентацијом коваријансних матрица и коваријансним дескрипторима</p> <p>Наслов на енглеском: Pattern recognition with sparse representation of covariance matrices and covariance descriptors</p>

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

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

Конструкција техничких система за препознавање облика подразумева развој модела којима се описују карактеристике облика или сигнала који карактеришу одређене процесе или појаве од интереса за препознавање. У том смислу може се говорити о методама за представу или репрезентацију сигнала чија решења поседују одређена специфична својства која их чине посебно погодним за реализацију таквих система. Препознавање облика у дигиталним сигнаlima говора и слике јесте део истраживања обухваћених садржајем ове дисертације, коју чини: 8 поглавља, 281 страна, 287 цитата, 6 табела, 10 слика, 2 графикана и 6 прилога.

У дисертацији је разматран проблем редукције сложености препознавања у системима за статистичко препознавање облика чија структура се заснива на Гаусовим смешама. На основу теоријске анализе постојећих решења којима се кроз апроксимативну представу Гаусових компоненти постиже смањење сложености, у раду је предложен нови модел за апроксимацију који се заснива на реткој апроксимацији/репрезентацији Гаусових компоненти. Тиме је направљен значајан помак у правцу ефикаснијег моделовања неодређености вредности обележја са којима се описује променљивост облика који припадају различитим категоријама/класама у системима за статистичко препознавање облика заснованим на Гаусовим смешама. С обзиром да у системима са таквом конструкцијом дискриминантних функција коваријансне матрице јесу кључне структуре које похрањују информације о присутним неодређеностима вредности обележја, исте представљају предмет моделовања са циљем апроксимације њиховог информационог садржаја, а услед потребе да се на такав начин умањи сложеност приликом евалуације појединачних упита које систем препознаје. Квалитативно боље апроксимације Гаусових компоненти у односу на постојећу фамилију модела постигнуте су коришћењем информационог критеријума који почива на принципу минимума дискриминативне информације, али који такође додатно подстиче ретку структуру конструисаних апроксимација. Наведено подразумева да се репрезентација или апроксимативна представа инверзних коваријансних матрица или матрица прецизности које фигуришу у систему за препознавање конструише као ретка линеарна комбинација симетричних матрица из наученог редундантног скупа, а чему одговара принцип ретке репрезентације према коме се приликом реконструкције сигнала тежи апроксимацији са релативно малим бројем активних градивних компоненти, односно истовременом: очувању информационог садржаја, са једне стране, и једноставности представе или репрезентације сигнала/облика, са друге. Веће смањење сложености коришћењем тако конструисаних ретких апроксимација Гаусових компоненти у односу на раније предложене приступе у литератури постиже се под условом да у систему за препознавање постоји велики број Гаусових компоненти, што најчешће јесте случај у системима са великим бројем категорија или сложеним расподелама вредности обележја. У нешто другачијем контексту у раду је разматран и проблем ретког кодовања коваријансних дескриптора, као наменских структура за ефикасну агрегацију вектора обележја у системима за препознавање. Главни ток излагања у оквиру дисертације одређен је следећим целинама или поглављима:

- 1) Уводна разматрања
- 2) Моделовање неодређености у препознавању облика
- 3) Коваријанса и класификатори
- 4) Коваријансни дескриптори
- 5) Учење речника и ретка репрезентација сигнала
- 6) Ретка репрезентација матрица прецизности у моделима за статистичко препознавање облика заснованим на Гаусовим смешама
- 7) Просторно-временски коваријансни дескриптори за даљинску детекцију
- 8) Закључак

Дисертација садржи и преглед слика, дијаграма и табела; списак скраћеница; кључну док. информацију и резиме на српском и енглеском језику. Наведени елементи имају засебну нумерацију, док списак библиографских јединица и прилози имају исту нумерацију као и основни део текста. Садржај прилога односи се на Поговља 4-7 и доприноси потпуности излагања. Дисертација у целини, као и њени појединачни делови, јесте добро организована и садржи дефиниције свих уведених појмова неопходних за разумевање даљег излагања. Рад је написан ћирилицом, коректно језички, стилски и технички обликован, са једнозначном нумерацијом слика, дијаграма, табела, једначина и израза. Електронска верзија дисертације поседује и унутрашње хиперлинкове ка претходно побројаним елементима на које се аутор

позива током излагања, што доприноси угоднијем читању. Сви резултати су јасно и прецизно формулисани. Поглавља 6 и 7 и Прилози 4 и 6 садрже најзначајније оригиналне резултате истраживања кандидата. Ови резултати су свеобухватно дискутовани кроз анализу принципа ретке репрезентације сигнала у Поглављу 5, улогу коваријансних матрица и коваријансних дескриптора у препознавању облика и процени параметара сигнала у Поглављима 3-4 и принципе и смернице за конструкцију ефектних и ефикасних система за препознавање облика у Поглављу 2. Преглед садржаја дисертације сажето је приказан у уводном поглављу.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Наслов докторске дисертације на погодан начин указује на садржај истраживања и истиче оба аспекта у којима је анализирана улога коваријансних матрица у конструкцији система за препознавање облика: као елементата унутрашње структуре класификатора, али и као ефикасног начина за агрегацију вектора обележја на нивоу неког домена од интереса. С обзиром да је у раду предложен нов начин за апроксимацију Гаусових компоненти у системима за статистичко препознавање облика који почивају на моделима Гаусових смеша, наслов такође указује и на природу предложеног модела за апроксимацију који се заснива на принципима ретке репрезентације сигнала.

У **уводном поглављу** јасно и сажето изложени су улога препознавања облика као техничке дисциплине, предмет истраживања докторске дисертације и оригинални резултати рада. На концизан начин дат је и преглед садржаја дисертације, како би се предложени модел за ретку апроксимацију Гаусових компоненти и предложене оптимизационе процедуре на адекватан начин поставили у контекст потребе за апроксимацијом инверзних коваријансних матрица (или матрица прецизности) које фигуришу у Гаусовим смешама, а са циљем смањења рачунске сложености коришћења таквих система. Посебно је истакнут мотив за конструкцију поменутих апроксимација у облику линеарне комбинације симетричних матрица из унапред дефинисаног скупа, с обзиром да такав приступ убрзање рада система за препознавање обезбеђује тако што се део израчунавања које је потребно за класификацију неког упита не понавља приликом евалуације сваке од Гаусових компоненти, већ се за сваки нови упит тај део израчунава унапред, на улазу у систем, независно од појединачних Гаусових компоненти. Такође је истакнуто и да се применом таквих апроксимација уместо оригиналних матрица додатно убрзање постиже и кроз редукцију неопходних израчунавања по свакој од појединачних компоненти, а што је последица мањег броја сабирака у линеарној комбинацији у односу на израчунавања без апроксимације. У том смислу предложени модел је дистанциран у односу на алтернативне моделе који апроксимације конструишу на исти начин, као линеарне комбинације симетричних матрица, али у потпростору уместо у редундантном речнику, односно на принципу редукције димензионалности, а не на принципу ретке репрезентације сигнала.

У оквиру **другог поглавља**, које се бави моделовањем неодређености у препознавању облика, систематично су разматрани начини за карактеризацију различитих модела или приступа за препознавање и њихов избор. Кроз анализу теоријских оквира за оцену модела за препознавање дискутован је проблем дефинисања капацитета, односно димензије модела. На оригиналан начин указано је на потребу за адекватним компромисом приликом практичне реализације система за препознавање, у смислу да се дескриптивни капацитет модела карактерише богатством простора хипотеза које модел одређене димензије може да генерише, где хипотезе дефинишу изводљиве регионе и границе одлучивања у неком простору обележја у коме се налазе прикупљене опсервације, али да се упркос томе приликом конструкције таквих система намеће потреба да се узму у обзир и практични аспекти обуке таквих модела. Тачније, поред димензије модела, капацитет модела у ужем смислу зависи и од успешности или осетљивости обуке модела спрам квалитета скупа за обуку. Јасно је истакнуто да већа димензија модела обезбеђује већи простор хипотеза, а тиме и веће шансе да се адекватном претрагом пронађе најбоље могуће правило одлучивања засновано на усвојеним обележјима, али шансе за успешну претрагу истовремено зависе и од поменутог квалитета скупа за обуку, под којим се најчешће подразумева разноликост и релативна бројност прикупљених опсервација у односу на димензију модела. У истом поглављу анализиран је и универзални принцип успешног препознавања, оличен у принципу минимума дискриминативне информације или минимума различитости информација, према коме је оптимално одлучивање оно коме одговара минимално информационо растојање између стварне расподеле вредности обележја опсервација које припадају некој категорији и конструисане процене дате расподеле на основу вишеструких опсервација истог облика. У датом контексту посебно је значајно темељно разматрање несиметричне KL (енгл. Kullback-Leibler) дивергенце, која је у каснијем делу рада коришћена као информациони критеријум

оптимальности конструисаних апроксимација Гаусових компоненти. Тако је као један од оригиналних резултата рада показано да креирана оптимизациона процедура за ретку репрезентацију инверзних коваријансних матрица (у оквиру предложеног модела за ретку апроксимацију Гаусових компоненти у системима за препознавање заснованим на Гаусовим смешама), захваљујући минимизацији KL дивергенце између нормалних расподела описаних са оригиналним матрицама и нормалних расподела којима одговарају конструисане апроксимације обезбеђује успешно очување оригиналног информационог садржаја Гаусових смеша приликом њихове апроксимације.

На крају, укратко је дискутована и историјска улога KL дивергенце у формулацији проблема процене параметара, са посебним освртом на Akaike-ов информациони критеријум који поред процене вредности параметара засноване на критеријуму максималне веродостојности истовремено тежи и селекцији једноставнијег параметарског модела. У излагању такође је јасно истакнуто и да за успешно препознавање и постизање минималног ризика одлучивања није од интереса само идеална процена или учење одговарајућих расподела које описују различите категорије, односно конструкција квалитетних статистика за што бољу процену њихових параметара, већ је од кључног значаја и начин на који се врши избор величина или обележја којима се те категорије описују, што директно утиче на облик и дискриминативност одговарајућих расподела, а на тај начин и на теоријску вредност доње границе ризика одлучивања коришћењем конструисаног система за препознавање.

Коваријансна матрица као статистичка структура сагледана је у **трећем поглављу**. Како би се у најопштијем смислу мотивисала улога Гаусове расподеле у статистичком препознавању облика на почетку је одмах указано на значај нормалне расподеле за апроксимацију других расподела, а који директно проистиче из централне граничне теореме теорије вероватноће. Затим је уопштавањем коваријансне функције на логичан начин уведена коваријансна матрица, као ефикасан начин за описивање интеракције случајних променљивих. На занимљив начин коваријанса је такође приказана и у светлу проблема оптималне линеарне предикције на основу различитих критеријума оптималности. Тиме је потврђена улога коваријансне матрице као кључне структуре за формирање модела који се заснивају на претпоставци о линеарности, пошто се под претпоставком о Гаусовој природи случајних величина оптималност линеарног регресионог модела, или најбољег линеарног предиктора, поклапа са оптималношћу процене дефинисане у Бајесовом смислу под претпоставком да је усвојени критеријум оптималности просечно квадратно одступање предикције у односу на стварне вредности. Линеарне трансформације промене базе и редукције димензионалности које проистичу из спектралне анализе коваријансне матрице такође су детаљно дискутоване. Истакнути аспект је изразито важан имајући у виду да референтна фамилија метода за апроксимацију Гаусових компоненти, са којом је у дисертацији упоређиван предложени модел, апроксимације матрица прецизности конструисане у векторском потпростору одговарајућег простора симетричних матрица, односно почива на сличним принципима којима се постиже и редукција димензионалности у случају анализе главних компоненти или сопствених вектора коваријансне матрице.

У наставку поглавља детаљно је представљена улога коваријансних матрица у конструкцији оптималних статистичких класификатора. У случају категорија са нормалном расподелом обележја ови модели минимизацију ризика одлучивања постижу претрагом простора хипотеза који чине квадратне дискриминантне функције. Приказана анализа структуре квадратних класификатора веома је значајна у контексту разумевања сложености Гаусових модела и јесте теоријска основа за каснија поређења предложеног модела за апроксимацију Гаусових смеша са алтернативним приступима. У оквиру поглавља такође је указано и на геометријску интерпретацију проблема оптималне детекције, према којој се тест статистика или оптимални пријемник заснива на пројекцији примљеног сигнала на скуп познатих прототипова. Као што је у раду истакнуто, детекција или препознавање случајних сигнала подразумева и истовремену процену непознатих параметара, па се као мере сличности које реализују пројекције могу дефинисати скаларни производи прилагођени спектралним карактеристикама случајних сигнала.

Из угла конструкције дискриминативних модела за препознавање разматране су линеарне дискриминанте, али и потреба за нелинеарним границама одлучивања. У том смислу детаљно су дискутоване могућности за проширивање модела за препознавање који генеришу линеарне хипотезе. Са једне стране, у случају дискриминативних модела указано је на приступе који почивају на теорији Хилбертових простора са репродукујућим језгрима, а са друге стране у случају генеративних модела, као што су квадратни класификатори који су по природи нелинеарни, указано је на приступе који почивају на моделима на бази коначних смеша. Као специјалан случај претходних представљене су Гаусове смеше и општи принцип стандардне

итеративне ЕМ (енгл. expectation-maximization) процедуре за процену њихових параметара. Наведени аспект излагања јесте од нарочитог значаја пошто се предложена итеративна оптимизациона процедура за ретку репрезентацију инверзних коваријансних матрица заснива на истом принципу наизменичне оптимизације као и ЕМ алгоритам, односно унутар сваког оптимизационог циклуса наизменично се коригују вредности тежинских коефицијената ретке апроксимације сваке од матрица прецизности, а затим елементи речника симетричних матрица које се користе приликом реконструкције оригиналних матрица у наредном циклусу оптимизације. Такође је показано да захваљујући ненегативној природи KL дивергенце наизменична ЕМ процедура у којој је ново решење М-корака барем мало боље од претходног сигурно гарантује неоппадајућу секвенцу веродостојности, чиме се обезбеђује конвергенција итеративне процене.

Четврто поглавље посвећено је појму коваријансних дескриптора. Тиме је оправдана раније истакнута двојака улога коваријансних матрица у конструкцији система за препознавање облика. Показано је да коваријансне матрице поред тога што дефинишу различите нормалне расподеле такође могу да се посматрају и као структурирана обележја облика, у смислу да је могуће дефинисати геодезијска растојања између различитих облика које придружене коваријансе описују. Полазећи од Риманове метрике, у којој за разлику од касније приказаних мера постоји еквиваленција растојања између пара коваријансних матрица и пара њихових инверзија (матрица прецизности), анализирани су и другачији начини конструкције мера растојања између симетричних, позитивно дефинитних матрица. Посебно су истакнути Log-еуклидска метрика и симетризована KL дивергенца Гаусових расподела. Тиме је показано да су информациона растојања погодан начин за дефинисање растојања између матричних дескриптора. На оригиналан начин и систематично демонстрирано је да међу приказаним мерама доминирају информациона растојања изведена као специјални случајеви Брегманове матричне дивергенце. Приказане су међусобне аналогије између векторских и матричних Брегманових дивергенци и кроз разматрање проблема векторске квантизације и информационог радијуса констелације тачака у простору обележја указано на везе са различитим фамилијама дивергенци које одговарају информационом растојањима. Тако је показано да Шенонова ентропијска функција индукује векторску Брегманову дивергенцу која одговара KL дивергенци између дискретних расподела. На истом принципу, према коме је релативна ентропија у основи једна врста Брегманове дивергенце, показано је и да Бургова ентропија сопствених вредности коваријансне матрице индукује Брегманову дивергенцу која се још означава и као LogDet или Бургова дивергенца, а која је једнака специјалном случају KL дивергенце између нормалних расподела са једнаким средњим вредностима. Наведена еквиваленција јесте од великог значаја за каснија поглавља у којима је KL дивергенца између нормалних расподела коришћена као информациони критеријум за дефинисање проблема оптималне процене параметара модела за апроксимацију Гаусових компоненти у Гаусовим смешама. Уведени појмови такође потврђују и да KL дивергенца као усмерена мера сличности укључује информације о структури коваријансних матрица и спектралним карактеристикама случајног процеса који такав дескриптор описује. Како би се сама формулација предложеног оптимизационог проблема за ретку апроксимацију Гаусових компоненти прецизно разграничила у односу на методе за ретко кодовање коваријансних дескриптора, у оквиру излагања такође је недвосмислено указано да Бургова дивергенца између коваријансних матрица, која је по природи несиметрична (односно KL дивергенца између оригиналне Гаусове расподеле и конструисане апроксимације), у предложеном методу није коришћена на директан начин приликом формулације циљне функције (у облику суме дивергенци), већ се до формулације одговарајућег оптимизационог проблема дошло максимизацијом циљне функције која има облик суме веродостојности параметара нормалних расподела. Наведени аспект детаљно је разматран у прилогу три и потврђује да се Бургова дивергенца ипак на индиректан начин налази и у основи формулације предложеног оптимизационог проблема за ретку репрезентацију матрица прецизности који је представљен у поглављу шест. У датом контексту и са истим циљем, у наставку четвртог поглавља детаљно је анализиран метод за ретко кодовање коваријансних дескриптора, код кога се до решења долази решавањем семи-дефинитног програма. Оваква концепција излагања омогућила је да се уоче суштинске разлике поменутог ретког кодовања у односу на предложени метод који ретке апроксимације Гаусових компоненти у Гаусовим смешама обезбеђује конструкцијом ретких апроксимација инверзних коваријансних матрица сваке од компоненти. У смислу поставке проблема ове разлике односе се на чињеницу да се у случају ретког кодовања коваријансних дескриптора апроксимира први аргумент израза за Бургову матричну дивергенцу, а у случају предложеног метода за ретку репрезентацију, апроксимира се инверзна матрица која одговара другом аргументу несиметричне дивергенце. Дати аспект посебно је детаљно дискутован у поглављу

седам. Међутим, иако имају принципијелно сличне поставке, решења поменутих метода значајно се разликују, имајући у виду да метод за ретко кодовање намеће додатна ограничења у погледу дефинитности градивних елемената или атома, као и тежинских коефицијената апроксимативне представе, док у предложеном методу таква ограничења не постоје. Такође, у раду је указано и да мотивација за оба метода проистиче из потреба које су оријентисане на потпуно другачије примене, иако је у оба случаја усвојен исти конструктивни принцип који фаворизује ретка решења.

Пето поглавље доноси преглед мотива и принципа на којима се заснива ретка репрезентација сигнала или њихова ретка реконструкција. Познати ставови у вези са начином формулације адекватних оптимizacionих процедура које воде ка ретким решењима тумачени су из перспективе минимизације енергијског функционала састављеног из два спрегнута дела који одговарају структурама које описују: а) очувани информациони садржај апроксимације или реконструкције у односу на оригинални сигнал, са једне стране, и б) једноставност постигнуте представе или репрезентације, са друге стране. Различити итеративни приступи решавању проблема ретке репрезентације сигнала који су анализирани допринели су јаснијем и детаљнијем сагледавању предложене процедуре за ретку апроксимацију матрица прецизности, изложене у поглављу шест. При томе се уочавају два главна правца дискусије: анализа метода за конструкцију итеративних градијентних метода намењених решавању неглатких конвексних оптимizacionих проблема ретког кодовања, а код којих се у свакој итерацији након ажурирања решења у правцу градијента подразумева експлицитно коришћење конструисаног оператора блискости који зависи од начина формулације полазног проблема; и са друге стране, као паралелни ток излагања, представљање метода заснованих на концепту скупа активних променљивих, а којима одговарају алгоритми потраге или селекције параметара модела. Предложена оптимizaciona процедура за ретку репрезентацију матрица прецизности на оригиналан начин обједињује елементе обе фамилије метода. У њеној основи, поред коришћења принципа активног или радног скупа, са којим се постиже итеративна селекција променљивих или атома речника који ће активно учествовати у конструкцији коначне апроксимације, односно чије вредности ће бити различите од нуле, такође јесте и критеријум за селекцију активних променљивих који почива на анализи услова оптималности субградијента циљне функције, а који у себи имплицитно садржи оператор сажимања-одсецања вредности тежинских коефицијената, као најчешћу варијанту оператора блискости коју индукује l_1 норма. Саставни део излагања јесте и концизна анализа начина за конструкцију редундантних речника намењених реткој репрезентацији сигнала.

Најзначајнији оригинални доприноси и резултати дисертације представљени су детаљно у **шестом поглављу**. Ослањајући се на претходни ток излагања и језгровит осврт на начин формулације и обуке алтернативних модела за апроксимацију Гаусових компоненти у Гаусовим смешама, у наставку излагања формулисан је нови модел за апроксимацију који исте формира на принципу ретке репрезентације сигнала у наученом редундантном речнику симетричних матрица. Особине новог модела детаљно су дискутоване кроз упоредну анализу са моделима који апроксимације матрица прецизности у циљу смањења сложености процеса препознавања формирају на принципу редукције димензионалности - конструкцијом апроксимација у посебно креираном потпростору симетричних матрица, а не у редундантном речнику. Поред формулације новог модела, детаљно су приказане и у дату сврху наменски конструисане оптимizacione процедуре. Пре свега оригинална процедура за одређивање тежинских коефицијената ретке репрезентације сваке од инверзних коваријансних матрица, односно ретко кодовање којим се свака оригинална матрица замењује апроксимативном представом у облику ретког вектора са релативно малим бројем компоненти различитих од нуле, али такође и процедура за учење редундантног речника симетричних матрица, која је за разлику од самог ретког кодовања сличнија раније коришћеним процедурама у литератури. Предложени поступци детаљно су дискутовани у контексту релевантне инстанце алтернативних модела са којом су упоређиване перформансе предложеног метода за апроксимацију и која је током излагања означавана као референтни модел. Експериментални резултати прегледно су приказани и дискутовани кроз упоредни преглед и анализу перформанси и карактеристика предложеног модела у односу на резултате апроксимација конструисаних коришћењем усвојеног референтног модела. Јасно су истакнуте предности и мане предложеног модела, као и услови под којима предложено решење постиже значајно бољи квалитет апроксимација у односу на приступ заснован на конструкцији апроксимација у потпростору. Детаљно је образложено и на адекватан начин дискутовано да се под квалитетнијом апроксимацијом коју омогућава предложени модел подразумева мања сложеност примене конструисаних ретких апроксимација Гаусових компоненти при истом губитку информација услед апроксимације као и у случају апроксимација креираних са референтним моделом, односно значајно веће очување информационог садржаја Гаусових

компоненти при истој сложености примене конструисаних ретких апроксимација као и у случају референтног модела. Нарочита пажња посвећена је и сличностима предложеног и референтног модела, у смислу да оба модела формулацију апроксимација заснивају на линеарној комбинацији симетричних матрица из унапред дефинисаног скупа (иако то чине на квалитативно другачије начине и применом другачијих алгоритама), као и да у основи обуке оба модела јесте оптимизација информационог критеријума заснованог на KL дивергенци нормалних расподела, односно LogDet или Бурговој матричној дивергенци између оригиналних коваријансних матрица и њихових апроксимација. При томе је истакнуто да се у оба случаја кроз процес оптимизације заправо конструишу апроксимације инверзних коваријансних матрица, с обзиром да се у коришћеним изразима за несиметричну дивергенцу апроксимација коваријансне матрице појављује као други, а не као први аргумент дивергенце, за разлику од ретког кодовања коваријансних дескриптора дискутованог у четвртом поглављу. Одређени технички детаљи описа предложеног метода који би оптерећивали основни ток излагања на прикладан начин су измештени у прилог четири. Приликом експерименталне провере тумачене су две различите групе експеримената како би се додатно потврдиле полазне претпоставке о предностима предложеног метода. Коришћени су експерименти са скуповима података преузетим из система за препознавање говора, као и експерименти са симулираним или синтетичким подацима који поседују циљано осмишљене карактеристике како би се са сигурношћу гарантовале усвојене позитивне претпоставке анализе. Процедура за генерисање синтетичких скупова коваријансних матрица са различитим карактеристикама од интереса за поређење референтног и предложеног модела формулисана је на оригиналан начин коришћењем теорије случајних матрица и показала се као ефектна за потребе изведених симулација.

У седмом поглављу приказана је нова примена коваријансних дескриптора у домену даљинске детекције. У том смислу предложена је конструкција временских коваријансних дескриптора за класификацију пиксела у временским серијама мултиспектралних сателитских снимака. Такође је предложено и проширење претходно представљене процедуре за ретку репрезентацију матрица прецизности као потенцијалног начина за ретко кодовање предложених дескриптора, односно њене примене у донекле измењеном облику у потпуно другачијем контексту од излагања у поглављу шест. Помоћни линеарни класификатор показао се као релативно успешан имајући у виду да је његова обука индиректна, као последица процедуре за учење речника намењеног ретком кодовању дескриптора, али такође самостално посматран и као слабије решење у односу на приступе описане у прилогу шест. Адекватно је дискутован уочени проблем мале временске резолуције мерења, као и изгледи за промену таквог стања. Додатно, приказана анализа указује на један од праваца будућег истраживања и ново поље примене предложеног модела за ретку репрезентацију.

У закључном разматрању на адекватан начин резимирани су мотиви истраживања проблема апроксимације Гаусових компоненти у системима за статистичко препознавање облика и домети предложеног приступа у контексту спроведене теоријске анализе и експерименталних резултата који су успешно потврдили теоријске претпоставке о ефикасности предложеног модела. Концизно су наглашене и предности паралелне имплементације предложене оптимизационе процедуре за ретку репрезентацију.

Литературни наводи су свеобухватни, корисни, занимљиви, и као такви прикладно изабрани.

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

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

Б.Бркљач, М.Јанев, Р.Обрадовић, Д.Рапаић, Н.Ралевић, В.Црнојевић, „Sparse representation of precision matrices used in GMMs”, *Applied Intelligence*, 41 (3): 956-973, ISSN: 0924-669X, Springer, doi: 10.1007/s10489-014-0581-6, 2014. [M21]

Б.Бркљач, В.Црнојевић, П.Лугоња, „Land cover classification based on sparse representation of temporal covariance descriptors”, *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics*, 3 (2S): 691-694, ISSN: 2241-1224, Aristotle University of Thessaloniki, 2014. [M53]

В.Црнојевић, П.Лугоња, Б.Бркљач, Б.Брунет, „Classification of small agricultural fields using combined Landsat-8 and RapidEye imagery - a case study of northern Serbia”, *Journal of Applied*

Remote Sensing, 8 (1): 083512: 1-18, ISSN: 1931-3195, SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers), doi: 10.1117/1.JRS.8.083512, 2014. [M23]

Б.Бркљач, М.Панић, Д.Ђулибрк, В.Црнојевић, Ј.Ачански, А.Бујић, „Automatic hoverfly species discrimination”, *1st International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, том 2, стр. 108-115, усмено излагање, SciTePress, PASCAL2, Association for the Advancement of Artificial Intelligence-AAAI, ISBN 978-989-8425-99-7, Vilamoura, Португалија, 2012. [M33]

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Предложени модел за ретку апроксимацију Гаусових компоненти у системима за статистичко препознавање облика представља природан искорак у правцу бољег моделовања матрица прецизности.

Конструкција ретких апроксимација, насупротив раније коришћених приступа који се заснивају на принципу редукције димензионалности, чему одговара тражење адекватних апроксимација у наменски конструисаном потпростору, слична је преласку са анализе главних компоненти, као метода за редукцију димензионалности који у основи представља анализу једне Гаусове функције, на методе засноване на унији потпростора, како обично интерпретирамо моделовање коришћењем ретке репрезентације сигнала. У том смислу, у дисертацији су истакнуте смернице и закључци како би требало приступати конструкцији ретких апроксимација Гаусових компоненти, односно када такав прилаз представља квалитетнији избор у односу на апроксимације матрица у потпростору.

Развијен је метод који поред формулације новог модела, који тежи ретким решењима, такође обезбеђује и успешну процену његових параметара. Експериментално потврђене теоријске претпоставке о ефикасности предложеног модела указују да је његова примена оправдана када су испуњени услови да је укупан број Гаусових компоненти у систему за препознавање релативно велики. На тај начин мали број активних тежинских коефицијената у конструисаним ретким апроксимацијама може да обезбеди значајно смањење неопходног броја рачунских операција, а да при томе компензује одређено повећање броја рачунских операција које постоји као последица чињенице да је научени речник редундантан, под чиме се подразумева да је његова димензија и до неколико пута већа од димензије оригиналног простора симетричних матрица. Полазна претпоставка такође јесте и да проблем препознавања мора да буде такав да информациони садржај матрица прецизности може да се очува са ретким апроксимацијама, а што значи да су у разматраном проблему од интереса коваријансне матрице погодне за ретку репрезентацију. Под датим претпоставкама предложени модел теоријски поседује повољније карактеристике, односно даје већи добитак у односу на алтернативне приступе, што је и експериментално потврђено. Добитак може бити мања сложеност примене креираних апроксимација уз исти ниво очуваности информационог садржаја као и у случају коришћења метода које не користе принцип ретке репрезентације, или већа очуваност информационог садржаја уз сличну сложеност примене конструисаних апроксимација. Закључак спроведених анализа јесте и да предложени оптимизациони проблем за ретку репрезентацију матрица прецизности јесте захтевнији за решавање, међутим у описаном сценарију примене тај аспект нема толику улогу пошто се конструкција апроксимација одвија ван радног режима система за препознавање.

Значајан резултат истраживања јесте и детаљна упоредна анализа основног метода за ретко кодовање коваријансних дескриптора у општем случају примене структурираних обележја и предложеног метода за ретку апроксимацију или ретко кодовање инверзних коваријансних матрица у системима за статистичко препознавање облика. Основни закључци спроведене анализе јесу да поменуте методе егзистирају у потпуно другачијим контекстима, у смислу њихове улоге или намене у конструкцији система за препознавање, али и да у крајњој формулацији оптимизационих проблема који у оба случаја теже конструкцији ретких решења постоје одређене сличности које се тичу коришћеног информационог критеријума који почива на принципу минимума различитости информација. Са друге стране, саме оптимизационе процедуре јесу суштински другачије, имајући у виду да предложени метод не уводи додатна ограничења у погледу дефинитности елемената речника и одговарајућих тежинских коефицијената, али и да њихово решавање почива на другачијим приступима, односно теоријским оквирима.

У дисертацији је предложена и нова примена коваријансних дескриптора у домену даљинске детекције, при чему је детаљније била разматрана само примена временских коваријансних дескриптора појединачних пиксела у временским серијама мултиспектралних сателитских снимака. Кроз анализу приказаних резултата који представљају проширивање поља примене предложеног метода за ретку репрезентацију на домен коваријансних

<p>дескриптора, а што је обухватило и модификацију оригиналног модела у циљу постизања веће дискриминативности решења, уочено је да раније занемарено питање брзине предложене процедуре за ретку репрезентацију матрица постаје актуелно, пошто се у новом контексту ретки вектори не генеришу ван радног режима система за препознавање, већ током рада система. У том смислу закључено је да добра карактеристика предложене процедуре јесте да њена структура на природан начин омогућава искоришћавање предности паралелне имплементације алгорита коришћењем архитектура као што су графички процесори опште намене. Закључак јесте и да предложена примена дескриптора представља један од могућих праваца будућег истраживања.</p>
<p>VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА</p> <p>Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.</p>
<p>Докторском дисертацијом су на коректан, свеобухватан и систематичан начин приказани оригинални резултати истраживања проблема ретке апроксимације матрица прецизности у системима за статистичко препознавање облика. Резултати истраживања изложени су на доследан и конзистентан начин, уз прецизне математичке формулације и доказе кључних тврђења која се односе на предложени метод за ретку апроксимацију Гаусових компоненти. Резултати су актуелни и подразумевају оригиналну формулацију новог модела за апроксимацију матрица прецизности, као и оригиналну оптимizacionу процедуру за његову обуку која гарантује очување позитивне дефинитности конструисаних решења. Излагање је на високом теоријском нивоу и упркос разноврсности разматраних тема омогућава јасан увид у суштину дефинисаног предмета истраживања. Разлози за дискусију појединачних сегмената приказаног истраживања коректно су мотивисани током излагања и доприносе укупном сагледавању разматране проблематике. Указано је на владајуће ставове у литератури и постојеће приступе за моделовање са којима је на детаљан начин теоријски и експериментално упоређиван предложени метод. Тумачење резултата је недвосмислено, прегледно и јасно. Назначени су могући правци даљег истраживања и развоја техничких система за препознавање облика.</p> <p>Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања.</p>
<p>IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:</p> <p>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:</p>
<p>1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме</p> <p>Докторска дисертација јесте у потпуности написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.</p>
<p>2. Да ли дисертација садржи све битне елементе</p> <p>Докторска дисертација садржи све битне елементе.</p>
<p>3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци</p> <p>У докторској дисертацији је пре свега предложен ефикасан модел за апроксимацију Гаусових компоненти у циљу убрзавања рада техничких система за статистичко препознавање облика који условне расподеле вероватноћа вредности обележја моделују коришћењем Гаусових смеша. Модел се заснива на реткој апроксимацији инверзних коваријансних матрица у наученом речнику симетричних матрица и по томе је јединствен у литератури. Примена оваквог модела под претпоставкама назначеним у раду омогућава значајне предности у квалитету постигнутих апроксимација у односу на постојеће моделе истог типа. У дисертацији је предложено и ново поље примене коваријансних дескриптора. Допринос рада представља и детаљна анализа начина формулације модела за ретку апроксимацију коваријансних матрица и матрица прецизности коришћењем информационог критеријума минимума различитости информација.</p>
<p>4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања</p> <p>Комисија сматра да дисертација нема недостатака и у складу са тим нема утицаја истих на резултате истраживања.</p>

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

- **Да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана.**

На основу претходно изнетих чињеница, Комисија предлаже да се докторска дисертација под називом „Препознавање облика са ретком репрезентацијом коваријансних матрица и коваријансним дескрипторима“ прихвати, а кандидату **Бранку Бркљачу** одобри одбрана.

У Новом Саду,
10.08.2017. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

др Владо Делић, редовни професор,
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, **председник**

др Владимир Црнојевић, редовни професор,
Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду, члан

др Жељен Трповски, ванредни професор,
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, члан

др Марко Јанев, научни сарадник,
Математички институт Српске академије наука и уметности, Београд, члан

др Дејан Вукобратовић, ванредни професор,
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, **ментор**