

## ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

мр Зорана Голубичића

## I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

1. Датум и орган који је именовео комисију:

Решење Декана Факултета техничких наука у Новом Саду, број 012-72/16-2013/2 од 08.05.2014.

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:

Функција	Име, презиме и титула	научно звање	Назив уже научне области	Датум избора у научно звање	Назив факултета, установе
Председник	Др Владимир Ковачевић	проф. емеритус	рачунарска техника и рачунарске комуникације	24.01.2008.	ФТН, Нови Сад
Члан Ко-ментор	Др Алекса Зејак	научни саветник	дигитална обрада сигнала	20.06.2007.	Институт РТ-РК, Нови Сад,
Члан	Др Бојан Зрнић	ванредни професор	радарска техника – дигитална обрада сигнала	31.10.2012.	Војна Академија, Београд
Члан	Др Бранислав Тодоровић	виши научни сарадник	дигиталне телекомуникације	31.10.2013.	Институт РТ-РК, Нови Сад
Члан Ментор	Др Миодраг Темеринац	професор	рачунарска техника и рачунарске комуникације	07.04.1997.	ФТН, Нови Сад

## II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:

Зоран, Томислав, Голубичић

2. Датум рођења, општина, држава:

20.12.1957. године, Смедерево, Смедерево, Република Србија

3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив:

Електротехнички факултет у Београду - одсек Електроника , смер Електроника

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:

Кандидат брани докторску дисертацију након што је по старом програму стекао звање магистра електротехнике.

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране

Електротехнички факултет у Београду. „Оптимизација радиофреквенцијских ланаца код антена са електронским померањем снопа“ из научне области Телекомуникације, одбранио је 15.09.2010.године.

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

**III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ: „Пријемник мултистатичког радара са конформном антеном и више истовремених снопова формираних FPGA процесорима“**

#### IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Дисертација садржи насловну страну, кључне документацијске информације, садржај, списак свих табела и слика и укупно 180 страна основног текста са 4 табеле и 250 слика.

Списак свих слика, табела, скраћеница и променљивих дат је на почетку самог рада пре уводног поглавља. Основни текст дисертације је подељен у осам поглавља. Свако поглавље је посвећено једном сегменту истраживања у склопу активности при изради тезе. Садржај дисертације по поглављима је следећи:

- У првом, уводном, поглављу тезе изложена је основна идеја мултистатичког радарског система. Презентовани су разлози због којих ова идеја у прошлости није доживела ширу практичну примену и поред свих предности које овакви системи имају над класичним моностатичким радарима. Дат је приказ основних теоријских и технолошких достигнућа којима функционалност и реализација овог система постају реалне. Као изузетно значајан развој издвојен је развој кола високе интеграције намењених дигиталној обради сигнала, пре свега FPGA кола, која због своје реконфигурабилности и паралелизације обраде сигнала омогућавају решавање основних проблема функционисања мултистатичког радарског система.
- У другом поглављу су издвојени системски параметри бистатичког система, као основне компоненте мултистатичке конфигурације. Они представљају основу за процену потребних ресурса којима се реализују пријемне и предајне компоненте мултистатичког радарског система. Дати су изрази за резолуције система по даљини и брзини и приказани оптимални положаји циља у односу на предајник и пријемник.
- У трећем поглављу су изложене могуће конфигурације мултистатичког радарског система и одговарајућих пријемних антенских решетки. Предложена је ћелијска структура мултистатичке конфигурације. Дата је процена домета бистатичког радара и величине мултистатичке радаске ћелије. Одабрана је оптимална модулација радарског сигнала. Предложено је решење динамичке временске синхронизације предајника и пријемника. Применом FPGA кола ово решење је интегрисано у исти чип у коме се врши и обрада радарског сигнала.
- У четвртном поглављу су анализирана решења антенских решетки које се могу употребити за потребе предајника и пријемника у мултистатичким ћелијама. Приказана су решења са планарним и конформним антенским структурама. Пријемне антенске решетке су класификоване према томе да ли се снопови формирају у једној или две равни. Симулирани су дијаграми зрачења предложених решења и процењен број снопова потребан да би се покрио одређен простор. Симулацијом су добијена реална појачања антена како би се израчунао домет радара, односно величина мултистатичке ћелије.
- У петом поглављу је дат преглед радиофреквенцијских компоненти, односно њихових карактеристика, које су значајне за реализацију предајника и пријемника мултистатичког радарског система. Акцент је стављен на расположиве снаге и фреквенцијске опсеге рада појачавача снаге, али су анализирани и остале радиофреквенцијске компоненте предајника и пријемника. Приказане су могућности замене појединих делова аналогне обраде нумеричким процесирањем.
- Шесто поглавље представља основни допринос дисертације. Дефинисане су методе паралелног формирања више пријемних снопова. Извршено је поређење метода у зависности од конфигурације пријемне антенске решетки (планарне или конформне), броја пријемних елемената антенске решетки и броја снопова које треба формирати. Анализирана

је могућност паралелног формирања великог броја снопова једним FPGA колом. Извршена је процена потребних ресурса за паралелну обраду радарских сигнала примљених преко неколико десетина или стотина снопова. Анализа је узела у обзир спектралну ширину и временски облик радарског сигнала. Приликом процене потребних ресурса узимана су у обзир решења заснована на FPGA колима великих логичких капацитета и решења базирана на FPGA колима мањих и средњих логичких капацитета.

- У седмом поглављу представљено је практично решење једне пријемне антенске решетке. Реализована решетка се може посматрати као део конформне антенске структуре. Реализовани су и тестирани сви битни делови предајника и пријемника, потребни за формирање снопова и обраду сигнала, као и делови система потребни за њихову синхронизацију. Тест функционисања радарског система извршен је детекцијом реалног циља (путничког авиона који се налазио између предајника и пријемника).

У осмом поглављу су представљени закључци истраживања.

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

- У првом, уводном поглављу, прво су презентовани проблеми због којих раније није било могуће ефикасно реализовати мултистатичке радарске системе. Затим су наведена достигнућа у области полупроводничке технологије као и теоријска достигнућа у обради радарских сигнала и методама симулације и нумеричке анализе. Као кључни напредак за ефикасну реализацију мултистатичког радарског система издвојени су напредак у области полупроводничких појачавача снаге и дигиталних кола високе интеграције. Аутор је уочио да су полупроводнички појачавачи снаге коришћени у базним станицама мобилних комуникација (због потребе рада у изузетно линеарном режиму) достигли максималне средње снаге радара великог домета на фреквенцијама VHF, UHF, L и S опсега. Како домет радара зависи од примљене енергије рефлектоване од циља а не од импулсне снаге потребно је адекватно искористити континуалну снагу полупроводничких појачавача да би се добио радар већег домета. Аутор је као ефикасно средство овако сложене обраде сигнала одабрао FPGA платформу. Да би решио проблеме генерисања много пријемних снопова и избегао просторну синхронизацију предајника и пријемника, издвајања сигнала из шума и временске синхронизације предајника са пријемника аутор је предложио коришћење могућности паралелне обраде сигнала које пружа FPGA платформа. У уводном делу аутор је презентовао и напредак у другим областима полупроводничких компоненти као што су малешумни појачавачи, фреквенцијски конвертори, филтри, А/D конвертори, као и у симулаторима дијаграма зрачења антена, алгоритама за брза израчунавања спектра итд који нису директно важни за принципе мултистатичког радара али су важни за ефикасну реализацију његових компоненти као што су пријемне антенске решетке и низови и аналогни делови пријемника и предајника.
- У другој глави израчунати су могући домети бистатичког радарског система на основу реалних параметара пријемника и предајника. Тиме је направљен најважнији корак у процени величине мултистатичке ћелије. Дати су изрази за израчунавање резолуције по расторјању и фреквенцији. Такође су презентовани алгоритми за нумеричко рачунање резолуције, обзиром да су изрази за израчунавање резолуције у затвореној форми код бистатичког радара врло сложени или уопште и не постоје. Приказана је крива константног односа сигнал шум у зависности од позиције циља чиме је наглашено да ове криве не коинцидирају са једнаким збировима растојања предајник-циљ-пријемник. Процењене су максималне дужине секвенци које не доводе до вишезначности у одређивању позиције циља а при томе нису осетљиве (немају велике губитке у поступку компресије). Поред снаге предајника и величине пријемне антене ово је трећи по важност фактор који одређује домет бистатичког радара односно

величину мултистатичке радарске ћелије. Временски облик радарског сигнала и његова спектрална ширина одређују и комплексност и логичку снагу процесора сигнала те се и тај фактор морао узети у обзир. У овом поглављу приказане су зависности радарских рефлексних површина од позиције циља у односу на позиције предајника и пријемника. Како је радарска рефлексна површина, за циљ сложеног облика, статистичка величина врло је тешко дати егзактне изразе у функцији координата циља, предајника, пријемника и саме оријентације циља у односу на предајник и пријемник. Установљено је да, у принципу, циљеви имају највећу рефлексну површину када се налазе у позицији моностатичког радара или када пројекција њихове позиције на земљу приближно лежи на правој предајник-пријемник. Такође су приказани резултати који показују да је дозвољено одступање од линије предајник-пријемник веће уколико се примењују ниже фреквенције радарског сигнала.

- У трећем поглављу дате су конфигурације пријемних и предајних станица мултистатичког система у циљу оптимизације односа сигнал/шум у радарском пријемнику. У одређивању распореда предајника и пријемника тежи се да растојања између њих буду приближно исто и да оријентација антена буде таква да оне својим дијаграмима зрачења обезбеде константан однос сигнал/шум. На основу остваривих односа сигнал/шум и позиција предајника и пријемника на којима се остварују максималне резолуције мултистатичке конфигурације одређује се дужина предајне секвенце и њена спектрална ширина. Да би се остварио рад радара са максималном ефикасношћу израчене енергије предложена је употреба радарских сигнала са константном амплитудом - BPSK и линеарне FWCW модулације. Положај пријемних антена (станица) омогућава да увек постоји комбинација предајник-пријемник која осветљава циљ и прима сигнал у позицијама квазимоностатичког радара или бистатичког радара са рефлексном унапред. То су позиције максималне радарске рефлексне површине. Позиције предајника и пријемника су анализирани за случајеве када пријемник истовремено формира више снопова у једној или две равни. Први случај је применљив код једнодимензионих антенских низова (пример је низ на телу ракете) или осматрање простора у једној равни (радар за осматрање бојишта). Предложене су решења у којима се мултистатички радар користи у кооперацији са класичним моностатичким радарима, који се налазе ван домета непријатељских средстава за њихово уништавање. Такође је приказана могућност употребе мреже мултистатичких ћелија за самозаштиту од пројектила.
- У четвртном поглављу дати су резултати симулација појединих антенских елемената и антенских решетки. Као предајни елемент се користи квазиомнидирекциони радијатор, који је осветљавао хемисферу, док се на пријемној страни користила антенска решетка којом је остварено појачање пријемне антене и целог примопредајног система радара. Недостатак појачања предајне антене надокнађен је дугим временом интеграције сигнала (малим ефективним пропусним опсегом система), дугачким предајним секвенцама и ниским фреквенцијама рада радара. Ниске фреквенције рада радара повећавају укупне димензије пријемне антене, али не и број пријемних антенских елемената, чиме се не повећавају захтеви за логичким потенцијалима процесора (FPGA кола). Остале две методе компензације појачања пријемне антене повећавају захтеве за логичком снагом FPGA кола. Главни допринос овог рада је доказ да је, оптимизацијом ресурса FPGA кола, ова компензација могућа. Да би се смањили захтеви за логичким ресурсима FPGA кола пошло се од симулације релативно малих планарних антенских низова, реда неколико десетина пријемних елемената. Добијени резултати су показали да је овакав приступ ефикасан само при фреквенцијама VHF и UHF опсега, где су (због велике таласне дужине и великих предајних снага) довољна појачања пријемне антене реда 15 dB до 20 dB. На вишим фреквенцијама (L и S опсега) појачања могу достићи вредности од 20 dB до 30 dB, али уз употребу неколико стотина елемената. При томе се домет система не повећава због слабљења у слободном простору услед мањих таласних дужина. Симулирани су дијаграми зрачења планарних и конформних

антена на нижим фреквенцијским опсезима, док је на X опсегу симулирана само планарна антена са формирањем снопа у једној равни. Симулација је показала да број снопова који би био потребан за покривање хемисфере уз појачања реда 30 dB превазилази могућности модерних FPGA кола.

- У петом поглављу је дат преглед радиофреквенцијских компоненти битних за ефикасну реализацију мултистатичког радарског система. Дате су карактеристике типичних појачавача снаге коришћених у радиодифузним предајницима и предајницима базних станица мобилних комуникација. Утврђено је да максималне снаге у континуалном режиму рада износе између 100 W и 1 KW. Пропусни опсези рада су реда од 10 MHz до неколико стотина MHz, што има за последицу моностатичку резолуцију радара по даљини између 15 m до 1 m. Тиме је потврђено да ове компоненте нису више уско грло у реализацији мултистатичког система. Као важне компоненте за реализацију антена са истовременим формирањем више снопова, издвојени су дигитални конвертори фреквенција, који све функције трансформације фреквенције, синхронизације локалних осцилатора и синхронизације одабирања сигнала обављају на нумеричком нивоу чиме се избегавају интермодулациони производи настали аналогним процесирањем сигнала. За потребе реализације мултиканалног мултистатичког система (једна пријемна антена прима сигнале са више предајника - аутор је навео своје радове усмерене ка минимизацији димензија филтара ) тако да се сигнали са једног зрачећег елемента могу независно водити на више система за формирање снопова. Показан је начин ефикасне синхронизације фреквенција предајника и пријемника без кварења фазног шума. Без обзира што референтни сигнал предајника трпи изобличења на путу до пријемника, пријемник лако регенерише сигнал исте фреквенције али не деградираног нивоа фазног шума. Ова регенерација и синхронизација није битна само за локалне осцилаторе аналогног дела пријемне антене већ и за основни такт кола за обраду сигнала (FPGA кола).
- У шестој глави је дат основни допринос овог рада. Најпре су установљене две методе формирања снопова. Прва метода је базирана на томе да је фреквенција рада множача вишеструко већа од фреквенције одабирања сигнала - бар онолико пута колико елемената учествује у формирању једног снопа. Сигнали са сваког елемента који формира сноп се секвенцијално множе тежинским коефицијентима у једном комплексном множачу и акумулирају. На крају процеса акумулације појављују се квадратурне компоненте (одбирци) снопа. Уколико је максимална брзина множење у FPGA колу мања од производа брзине одабирања и броја елемената који формирају сноп, тај број се дели на неколико подскупова и над сваким подгрупом се обавља иста процедура (серијског множења и акумулације). Акумулирани одбирци се на крају процеса акумулације просто сабирају како би се добили ортогонални производи примљени са тог снопа. За сваки сноп се користи један (или неколико) комплексних множача. Тиме је искоришћена основна предност обраде сигнала FPGA колима а то је могућност комбиновања паралелне и серијске обраде. У другој методи одбирци са сваког елемента се множе серијски тежинским коефицијентима сваког снопа у коме они учествују. Измножени одбирци се тренутно воде на сабирач са чијег се излаза добијају ортогоналне компоненте одређеног снопа. Оваква конфигурација је могућа само ако је број снопова мањи од количника максималне фреквенције множења и фреквенције одабирања сигнала. Уколико то није могуће одабрани сигнал са једног пријемног елемента се води на више паралелних множача на којима се серијски множи са мањим бројем коефицијената. Производи са првих множача сваког елемента се сабирају у први збир са других у други и тако даље. Са излаза сваког сабирача се серијски добијају ортогонални одбирци више снопова. Према томе и овде је коришћена комбинација серијске и паралелне обраде омогућена FPGA колом. Прорачунима је показано да су ова два метода потпуно равноправна у погледу потребних нумеричких ресурса у сличају да се примењују на планарним антенама. Међутим први метод показује значајну предност када се користи код

конформних антена. Наиме, у формирању снопа конформних антена не учествују сви пријемни елементи па је број MAC- ова значајно мањи укупног броја елемената. У поглављу је дат пример формирања 400 снопова са једним FPPA kolom Stratix V. Други метод има своје предности због једноставности хардвера јер не захтева сложено мултиплексирање сигнала и не захтева акумуляцију одбирака. Излазни подаци из сабирача се могу директно уводити у компресоре сигнала. Његова највећа мана је неефикасно трошење чипова. Следећи корак у обради радарских сигнала примљених са различитих снопова представља компресија импулса. Коко је компресор у ствари један FIR филтер и како су методи реализације мултиканалних FIR познати они су искоришћени за реализацију мултиканалних компресора. У том случају сабирач са улаза филтера премештен је на његов улаз. Тиме је омогућена компресија свих генерисаних снопова. Основни проблем остала је меморија за смештање великог броја података како се у њу могу сместити подаци са свих снопова, У ту сврху се морају употребити брзе екстерне меморикрнтипа SRAM те оне морају бити уграђене директно на плоче или конектоване преко екстерних конектора. Решавањем проблема адресирања и манупалације са меморијом једини преостали проблем временски период за који FFT процесор може обрадити податке са свих снопова и из свих резолуционих ћелија по даљини и доплероом померају. Захваљујући могућности паралелног инстанцирања великог проја FFT процесора фреквенцијска анализа се може извршити у неколико стотина снопова. Као последњи задатак FPGA процесору остаје селекција циљева чија амплитуда прелази праг одличивања (као и одређивање тог прага - CFAR).

- У седмој глави дата је практична потврда појединих метода предложених у претходним поглављима. Најважније потврде односе се на оствариви домет бистатичког радара, односно потребну енергију зрачења предајника снаге, потребано и довољно појачање (дијаграм зрачења) предајне антене, потребан дијаграм зрачења пријемне антене, систем синхронизације фреквенције и фазе, могућност пријема и синхронизације више снопова и обраде сигнала истовремено примљених снопова. Реализован је део модела конформне антене са 50 елемената где су сваких 10 елемената поседовали свој FPGA чип којим је формиран део снопа на бази 10 елемената. Формирано је 24 истовремена снопа који су се серијски сабирали и чији су збирови вођени на мултиканални FIR филтер -компресор. Компривани сигнали су смештани у алтернативне SRAM меморије редоследом погодним за FFT анализу. Доказано је да је цела обрада, заједно са формирањем 24 сигнала могућа у чиповима средњих нумеричких капацитета. Исти FPGA чип је употребљен за генерисање синхронизационих сигнала између предајника и пријемника чија је дужина за ред величине (више од 10 пута) краћа од самог сигнала тако да је осигурана прецизност у одређивању кашњења предајног сигнала до пријемника. Оваква прецизност је омогућена високим тактом функционисања FPGA кола. Ради провере оправданости претпоставки, израчунатог домета бистатичког радара и података о радарској рефлексној површини циља предајник са квазиомнидирекционом антенном и пријемник са антенском решетком су постављени тако да је линија предајник-пријемник била ортогонална на пројекцију трајекторије авиона на земљу. У експерименту који је извршен најпре су калибрисани тежински коефицијенти снопова и снопови усмерени на очекивани пут авиона. Резултати су добијани за сваки од 24 снопа. Чак и примена једноставног CFAR алгоритма дала је здовољавајуће резултате у погледу налажења и праћења циља.

Осмо поглавље представља закључак и указује на правце даљег развоја како би се проблем ослободио компонената проблематичне набављивости.

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

Радови објављени у часопису међународног значаја (са ISI листе)

1. **Zoran Golubičić, Slobodan Simić, Aleksa J. Zejak**, "Design and FPGA implementation of

digital pulse compression for band-pass radar signals”, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 64, No. 3, 2013, 191–195, DOI: 10.2478/jee-2013-0028, ISSN 1335-3632

2. Slobodan Simić, Aleksa J. Zejak, **Zoran Golubičić**, “Hardware implementation of DIRLS mismatched compressor applied to a pulse-Doppler radar system”, *Microprocessors and Microsystems* vol. 37 (2013) 381–393, <http://dx.doi.org/10.1016/j.micpro.2013.04.001>
3. Georganopoulos, N., Farnham, T., Schöler, T., Burgess, R., Warr, P., **Golubicic, Z.**, and Sessler J.: “Terminalcentric view of software reconfigurable system architecture and enabling components and technologies”. *IEEE communications magazine*, May, 2003., pp.100-110.
4. **Z. Golubicic**, S. Dragas, Z. Cvetkovic, “K and Ka band Phased Array Antenna” *Microwave Journal*, issue January 2004.vol1, pp 16-21

#### Радови објављени у часопису међународног значаја

1. Philippe du Reau, David Redmill, Eiman Mohyeldin, **Zoran Golubicic**, Robert Hirschfeld, Michael Fahrmaier, Chris Salzmann, Peter Dornbusch: “Description and Specification of the SCOUT hardware validators and SCOUT Middleware Demonstrator”, pp. 1-100, Information Society Technologies, [www4.informatik.tu-muenchen.de/publ/papers/2003-SCOUTD4.3.1.pdf](http://www4.informatik.tu-muenchen.de/publ/papers/2003-SCOUTD4.3.1.pdf)
2. M. Holzbock<sup>1</sup>, A. Jahn, J. Alonso<sup>2</sup>, **Z. Golubicic**, V. Schena, F. Ceprani<sup>3</sup>, J. Torres, M. Memar, “SUITED Demonstration Results of a Mobile Terminal for Heterogeneous Satellite-Terrestrial IP Network Access”, <http://newton.ee.auth.gr/summit2002/papers/SessionM4/2502107.pdf>

#### Радови у зборницима међународних конференција штампани у целини

1. N. Mohottige , Dj. Budimir, **Z. Golubicic**, M. Potrebic ” Electromagnetic modelling of dielectric-filled waveguide filters for diplexer application” : *Antenna and Propagation Society International Symposium APSURSI* pp.873-875, 2011, DOI:10.1109/APS.2011.5966414
2. **Z. Golubicic**: “Injection Locked DRO Synchronized by Multitone Signal”, Proceedings of 19th European Microwave Conference London, September 1989.vol.1 pp. 334-338
3. **Z. Golubicic**, V. Stoiljkovic: “New Type of VCDRO”, Proceedings of 18th European Microwave Conference, Stockholm, September 1988. vol.1 pp487-491
4. 4 Aleksa J. Zejak, M. L. Dukić, V. J. Smiljaković, **Z. T. Golubičić**, “Optimisation neural networks by mismatched filter model”, in Proc. ICNN 96. The 1996 IEEE International Conference on Neural Networks, Washington DC, June 1996, pp.577-582.
5. Aleksa J. Zejak, Igor S. Simić, **Z. T. Golubičić**, V. Smiljaković, “Designing complementary radar signals with low sidelobe level of matched filter response”, in. *Proc ICSPAT 96*, Boston, MA, October 1996, pp. 1337-1341.
6. Igor S. Simić, Aleksa J. Zejak, **Z. T. Golubičić**, Andrija Petrović, “Improved Radar Range Resolution Achieved by Mismatched Filter”, *Proc. of IEEE “9th Mediterranean Electrotechnical Conference” MELECON '98*, Tel-Aviv, 18-20. May 1998, pp. 435-438.
7. Aleksa J. Zejak, Igor Simić, **Zoran Golubičić**, Andrija Petrović, “Mismatched compression filter for improved radar range resolution, *Proceedings of ICECS '99. 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Pofos, Cyprus, 1999, Vol. 2, pp. 733-736.
8. S. Dragas, P. Janković, L. Gonzalez, **Z. Golubičić**, L. Salghetti Drioli, “Multi Satellite Tracking Antenna for Navigation System.” 29th ESA Workshop on Multiple Beam and Reconfigurable Antennas 18-20April 2007 Nordwijk, Netherland pp.302-305
9. S. Dragas, M. Lopez, M. Gutierrez, S. Ruiz, Z. Cvetkovic, L. Gonzalez, **Z. Golubicic**, “Phased-Array Antenna with Polarization Tracking Capability at K-band.” 29th ESA Workshop on Multiple Beam and Reconfigurable Antennas 18-20April 2007 Nordwijk, Netherland pp.296-299
10. Smiljaković V, **Golubičić Z**, Manojlović P, Živanović Z, *Microwave Autonomous Angular Position Finding System for Middle Range Unmanned Aerial Vehicle*, Proceedings of XXXVIII ICEST, Sofia, 16-18 October 2003.vol1 298-302.
11. Slobodan Simić, Aleksa Zejak, **Zoran Golubičić**, “Range Sidelobe Reduction in the Portable

- Battlefield Surveillance Radar”, *Proc. of 10th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services* vol1.pp234-237 – TELSIKS, Niš, Serbia, October 2011.
12. Slobodan Simić, **Zoran Golubičić**, Aleksa Zejak, “Design of High Resolution, Coded, Portable Battlefield Surveillance Radar PR-15”, *Proc. of 4th International Scientific Conference on Defensive Technologies* – OTEH, Belgrade, Serbia, October, 2011.
  13. Slobodan Simić, **Zoran Golubičić**, Aleksa Zejak, “The Analogue Platform of Digital Defined Radar in X Band”, *Proc. of 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies* – OTEH, Belgrade, Serbia, September, 2012.
  14. **Zoran Golubičić**, Slobodan Simić, Aleksa Zejak, “Pedestrian Radar with One Dimensional Electronic Beam Steering”, *Proc. of 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies* – OTEH, Belgrade, Serbia, September, 2012.
  15. S. Dragaš, **Z. Golubičić**, A. Vicario, M. González, C. Lavín, J. Alonso, M. Zečević, C. Méndez, Z. Cvetković, É. Méndez, L. Pérez, N. Fernández, F. De Arriba, A. Arribas, "KU band building blocks phased array cost effective concept for aeronautical applications", *34th ESA Antenna Workshop and 2nd Evolutions in Satellite Telecommunication Ground Segments Workshop on Satcom User Terminal Antennas*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands; 10/2012.vol1.pp234-237
  16. S. Dragaš, **Z. Golubičić**, M. Zečević, V. Fernandez, Z. Cvetković, J. Shanbhag, Y. Fernandez, C. Mendez, M. Gonzalez, E. Obiols, J. Perlas, L. Salghetti - Drioli, "Digital beam forming multisatellite antenna: an alternative for next MEOLUTs. Basic Module development and testing" *33rd ESA Antenna Workshop on Challenges for Space Antenna Systems*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands; 10/2011 vol1.pp238-242
  17. D. Regidor, A. Arriaga, J. Calvo, A. Ibarra, I. Kirpichev, P. Méndez, J. Molla, A. Salom, M. Weber, P.Y. Beauvais, M. Desmons, A. Mosnier, D. Vandeplassche, P. Cara, J.M. Forteza, J.M. González, C.R. Isnardi, Z. Cvetkovic, **Z. Golubicic**, C. Méndez, J. de la Cruz, S.J. Ceballos, M. Abs, B. Nactergal, "IFMIF-EVEDA RF POWER SYSTEM", *MOPC135 Proceedings of IPAC2011*, pp 205-209 San Sebastián, Spain
  18. Janković U., Mohottige N., **Golubičić Z.**, Petrović V., Budimir Đ.: "Electromagnetic Modelling of Dielectric filled Waveguide Antenna Filters" *20 ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНИ ФОРУМ* Telfor Beograd, 2012 vol1 pp.213-216

#### Радови објављени у зборницима националних конференција

1. Алекса Ј. Зејак, М.Л. Дукић, **З. Голубичић**, “Методологија поређења реализација неуронских мрежа и дигиталних филтера”, *Зборник симпозијума ТЕЛФОР '95*, Београд, новембар 1995, стр. 538-541.
2. **Зоран Т. Голубичић**, А. Алекса Ј. Зејак, “Микроталасни синтезатор радарских сигнала са минимизованим фазним шумом”, *Зборнику симпозијума ТЕЛФОР '96*, стр. 428-431, Београд, новембар 1996.
3. Трајић, М. Обрадовић, Б. Бојовић, **З. Голубичић**, В. Смиљаковић: “Разделник сигнала и обртач фазе контролног подсистема радиофреквентног система циклотрона Vinci”, *Зборник радова XLIII конференције за ЕТРАН (Златибор, 1999)* стр. I.95- I.98
4. В. Дрндаревић, М. Обрадовић, Б. Самарџић, М. Ђурић, Б. Бојовић, И. Трајић, **З. Голубичић**, В. Смиљаковић: “реализација појачавача снаге, контролног и сигурносног подсистема радиофреквентног система циклотрона винцу”, *Зборник радова XL конференције за ЕТРАН (Будва, 1996)* стр.. 23-26
5. Смиљаковић В, **Голубичић З**, Манојловић П. и Поповић Н., “Мултифункционални систем вођења мале беспилотне летилице”, *Зборник радова 49. конференције ЕТРАН*, том 2, стр. 361-364, Будва 2005.
6. В. Смиљаковић, **З. Голубичић**, П. Манојловић, Д. Обрадовић, Н. Поповић, А. Нешић, “Телекомуникациони сегмент комплекса мале беспилотне летилице “ *Зборнику симпозијума ТЕЛФОР 2006*, стр. 332-335, Београд, новембар 2005.



7. **Зоран Т. Голубичић**, Боро Релјић, “Примопредајник радара на 24GHz ISM опсегу за заштиту аутомобила од судара”, у зборнику симпозијума *ТЕЛФОР 2006*, стр. 437-440, Београд, новембар 2006.
8. **Зоран Т. Голубичић**, Милка Марјановић, “Методe спајања РФ компоненти у радио релeјним линковима на милиметарском таласном подручју”, у зборнику симпозијума *ТЕЛФОР 2006*, стр. 440-445, Београд, новембар 2006.
9. Зејак, А., Симић, С., **Голубичић, З.**, Антонић, М., Вујчић, С., “Функционални модел преносног радара ПР-15”, у зборнику симпозијума *ОТЕХ 2009*, Београд, октобар 2009.
10. Slobodan Simić, *Zoran Golubičić*, Aleksa Zejak, “Design of High Resolution, Coded, Portable Battlefield Surveillance Radar PR-15”, *Proc. of 4th International Scientific Conference on Defensive Technologies – ОТЕН*, Belgrade, Serbia, October, 2011.
11. Slobodan Simić, *Zoran Golubičić*, Aleksa Zejak, “The Analogue Platform of Digital Defined Radar in X Band”, *Proc. of 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies – ОТЕН*, Belgrade, Serbia, September, 2012.
12. **Zoran Golubičić**, Slobodan Simić, Aleksa Zejak, “Pedestrian Radar with One Dimensional Electronic Beam Steering”, *Proc. of 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies – ОТЕН*, Belgrade, Serbia, September, 2012.

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Полазећи од постављеног циља и узимајући у обзир приказане резултате, може се закључити следеће:

У раду је истражена могућност реализације пријемника мултистатичког радара са истовременим формирањем више десетина или стотина пријемних снопова.

Аутор је установио да то јесте оствариво уколико се истовремено примењују паралелне и серијске обраде примљених сигнала у FPGA колима.

Аутор је формирао два метода дигиталног формирања снопова – серијску и паралелну. У првом, снап се формира серијским одабирањем сигнала с више пријемних елемената антенске решетке уз множење одбирака тежинским коефицијентима и акумулацију производа. У другом, сваки одбирак са сваког пријемног елемента антенске решетке серијски се множи у току периоде одабирања тежинским коефицијентима различитих снопова. Помножени одбирци се серијски (како су и множени) сабирају на нивоу комплетне антенске решетке.

У циљу адекватне примене првог или другог метода, аутор је раздвојио две структуре антенске решетке. У првој сви елементи антенске решетке учествују у формирању свих снопова које треба формирати (пример планарне антенске решетке), док у другој одређени подскупови скупа свих пријемних елемената учествују у формирању појединих снопова (примери ваљкасте или лоптасте структуре антенске решетке – када правци свих снопова нису “видљиви“ од стране свих елемената). Аутор је утврдио да код прве структуре антенске решетке ниједан од наведених метода формирања снопа нема предности над другим. Међутим, код друге структуре антенске решетке серијски метод има значајне предности над паралелном. Као пример показана је могућност формирања 400 снопова (формираних од одбирака из подскупова од 100 пријемних елемената) на антенској решетки од 500 елемената, с једним FPGA колом.

Предност серијског метода је изразитија код конформних структура (ваљкастих, лоптастих, елипсоидних итд.) уколико је број пријемних елемената решетке већи. Такође је уочљивија уколико се снопови формирају FPGA колима већих логичких капацитета. Предност постаје све мања уколико је број елемената решетке мањи и уколико се, уместо малог броја FPGA кола великих логичких капацитета, користи већи број FPGA кола мањих логичких капацитета.

Када се примењује серијски метод, за број формираних снопова код планарних антена, с малим бројем пријемних елемената, битан је број комплексних множача, док је за број формираних снопова код паралелног метода битна брзина којом множачи раде.

Као метод за временску синхронизацију предајника и пријемника у мултистатичком систему аутор је предложио везу базирану на ултраширокопојасном комуникационом систему код кога је трајање импулса за ред величине краће од трајања подимпулса основног радарског система. Тиме

је аутор обезбедио потребну тачност и резолуцију у одређивању времена доласка синхро-сигнала од предајника до пријемника. Такође је предложио дигитално генерисање ултраширокопојасног сигнала, директно из FPGA кола. Сигнал нема једносмерну компоненту и погодан је за директан улаз на појачавач снаге. Зато се у ултраширокопојасном комуникационом систему не морају уграђивати остале компоненте аналогне обраде сигнала осим малощумног појачавача и појачавача снаге.

Аутор је предложио да се као радарски предајник користи омнидирекциони предајник којим би се осветљавао простор полусфере. Како и пријемник својим сноповима покрива простор полусфере, сваки циљ који се нађе у том простору биће детектован у периоду интеграције радарског сигнала. Мало појачања предајне антене се надокнађује великим временом интеграције рефлектованог сигнала (остваривим због примене FPGA процесора у радарском пријемнику) или радом на нижем фреквенцијском опсегу. Рад на нижем фреквенцијском опсегу повећава димензије пријемне антене (уколико је број зрачећих елемената непромењен) али не повећава сложеност обраде јер је број елемената исти а слабљење кроз слободни простор је мање. Генерални закључак је да се време интеграције предложеног система мора повећати у односу на време интеграције моностатичког радара, онолико пута колико је пута смањено појачање предајне антене.

Просторно раздвајање предајника од пријемника омогућава функционисање радара с континуалним радарским сигналом, чиме је избегнута потреба за предајницима велике вршне снаге, то јест, за потребе предајника могуће је користити компоненте стандардних предајника базних станица мобилне телефоније, телевизије, радија и осталих радиодифузних служби. Код мултистатичког радарског система позиција циља одређује се методом триангулације тако да се систем може реализовати на нижим фреквенцијама, где су снаге расположивих предајника веће и где су и методи за постизање „невидљивости“ циљева мање успешни. Како би се избегли губици у функцији неодређености, проблем с једнозначношћу мора се решавати применом секвенци различитих дужина или променом тежинских коефицијената у времену.

Аутор је предложио структурисање мултистатичког радарског система базирано на шестоугаоним ћелијама (по принципима примењеним у мобилној телефонији). Користећи податке о реалним снагама предајника и реалним појачањима антенских решетки, аутор је израчунао димензије ћелија у којима би таква структура мултистатичког система могла функционисати. Резултати показују да су оствариве ћелије пречника око 30 km.

Како су код бистатичког радара највеће радарске рефлексне површине при позицији циља у правцу линије предајник–пријемник (између њих као распршивач у правцу и смеру или с једне стране од њих као квазимоностатички циљ) то је увек могуће наћи такву комбинацију предајника и пријемника да се добије просторна резолуција слична оној која би се добила применом мреже моностатичких радара.

Овакав радарски систем је отпоран на антирадарске пројектиле. Да би се моностатички радар уништио, ваља га детектовати, а то је лако кад се узме у обзир велика израчена електромагнетска енергија. У мултистатичкој мрежи су предајни и пријемни подсистеми раздвојени тако да се пријемни подсистем не може детектовати на основу израчене електромагнетске енергије. Детекцију предајног система је немогуће избећи, па се његова отпорност на уништавање базира на малим димензијама и на мобилности. Карактеристике су му и једноставност, ниска цена и набављивост компонената. Због овога је погодан и за масовну производњу. Овакав систем је остварив с јевтиним компонентима.

Предложена су два принципа функционисања мултистатичког система. Према основном принципу, један предајник зрачи радарски сигнал у полусферу (слично радиодифузним предајницима) а пријемници примају сигнал помоћу пријемних снопова великог појачања и одређују позицију циља триангулацијом. Међутим, зависно од расположивости и цена компонената могуће је и инвертовати систем где један пријемник прима рефлектоване радарске сигнале од истог циља, а који су генерисани у више предајника. Ово захтева мањи број пријемних станица али веће процесорске ресурсе.

Уколико нису на располагању FPGA кола с великим логичким капацитетима, аутор предлаже да се реализују пријемници с ограниченим бројем снопова (помоћу FPGA кола мањих логичких капацитета) који би генерисали мањи број снопова с електронским померањем у времену. У том случају део снопова се може употребити за осматрачке функције (у почетку сви снопови док се не открије циљ) а други део за функције праћења циља и функције нишанског радарског система.

Током рада је анализирана потршња појединих ресурса FPGA кола. Највећи потрошач блокова дигиталне обраде сигнала у FPGA колима (хардверских множача или DSP *Slice*-ова) јесте сам блок за формирање снопова. С друге стране, он троши мало меморијских ресурса. Како се као

радарски сигнал користи континуални модулисани сигнал дугачке секвенце, главни потрошач меморијских ресурса је компресор сигнала. Смештање компримованих одбирака у меморију могуће је обавити помоћу екстерне меморије (SRAM или DDRAM). Део кола који не узима велике ресурсе је FFT процесор.

Претходни закључци су тестирани на реалном моделу бистатичког радара на опсегу 1500 MHz. Како је реализован само део антенске решетке, употребљени су FPGA процесори мале снаге за које постоји и web верзија развојног софтвера. Формирана су 24 истовремена снопа спектралне ширине 10 MHz. Овакав сценарио пробе је био условљен расположивим А/D конверторима (максималне брзине одабирања до 20 Msample/sec) и расположивим FPGA процесорима (Cyclon III и Cyclon IV). Коришћена је екстерна SRAM меморија од 144 Mbit-a.

У случајевима када на располагању стоје предајници мањих снага и када је неопходно реализовати два предајника са усмереним антенама – један за потребе осматрачког радара којим се (механички) претражује простор и други за потребе нишанског радара и радара праћења циља – део снопова се може синхронизовати са осматрачким предајником а део с нишанским. Стога је потребно увести у анализу могућност синхронизације снопова предајника са сноповима пријемника. Оваква анализа је значајна за мултистатичке система код којих би се користили предајници малих снага. Пример би био замена једног омнидирекционог предајника снаге 200 W (базна станица) с два мања предајника снага по 2 W (мобилни телефон) и антенама с појачањем од 20 dB.

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

У дисертацији су приказани резултати истраживања формирања више антенских снопова радарског пријемника помоћу FPGA процесора као и независне обраде примљених сигнала комбинацијом паралелне и серијске обраде сигнала FPGA процесорима. Тиме је омогућен пријем сигнала рефлектованих од циљева осветљених од стране квазиомнидирекционог предајника у целој хемисфери. Теоријски закључци су примењени и потврђени на конкретном моделу конформне антене.

На основу напред изложеног, Комисија позитивно оцењује поднету дисертацију.

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

- Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?  
Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.
- Да ли дисертација садржи све битне елементе?  
Дисертација садржи све битне елементе.
- По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Основни допринос дисертације је утврђивање метода намењених формирању више стотина пријемних антенских снопова на дигиталном нивоу. Тиме се покрива цела хемисфера односно сви правци из којих може доћи сигнал до антене. При томе се максимално користе могућности истовремене паралелне и серијске дигиталне обраде сигнала FPGA колима. Број снопова и ширина спектра сигнала који се обрађују је једино ограничена бројем FPGA кола односно њиховом ценом.

Допринос дисертације представља резултат којим се доказује да је употреба конформних антена (у формирању снопова који покривају хемисферу) знатно ефикаснија од примене планарних антенских низова како у погледу одржавања појачања антене тако и у погледу оптимизације коришћених ресурса FPGA кола.

Дисертацијом је показано да мултистатички метод откривања циљева дозвољава рад са предајником мале вршне снаге и малих димензија. Тиме је омогућена мобилност предајника у току рада и већа могућност преживљавања у реалним условима. Зависно од расположивости компонената предајника и пријемника ситем може радити инверзно – са једним пријемником и више предајника.

Дисертацијом је показано да се комбинације предајних ипријемних станица могу тако распоредити да се радарска рефлексна површина циља максимизира.

Да би се поједноставио процес временске синхронизације између предајне референце и

пријемника уведена је веза ултраширокопојасним линком чији су сигнали директно генерисани из FPGA кола. Развијеним методом генерисања (уз помоћ LVDS серијализације) избегнута је примена аналогне обраде сигнала (осим појачавача снаге, малошумних појачавача и антенских елемената). Овим је остварена идеја о потпуно "софтверском" радију (која је применљива и за генерисање радарских сигнала али са знатно моћнијим и скупљим FPGA колима).

Изложени методи не ограничавају формирање броја пријемних снопова на покривање целе хемисфере, они се могу применити за формирање снопова којима се покрива део хемисфере, а тај део се може мењати у времену.

- 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.

## **X ПРЕДЛОГ:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

**Да се докторска дисертација кандидата мр Зорана Голубичића, под насловом „Пријемник мултистатичког радара са конформном антенном и више истовремених снопова формираних FPGA процесорима“ прихвати, а кандидату одобри одбрана.**

### ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Датум: 09. 05. 2014. године

председник Др Владимир Ковачевић, проф. емеритус, ФТН, Нови Сад

члан, ко-ментор Др Алекса Зејак, научни саветник, Институт РТ-РК, Нови Сад

члан Др Бојан Зрнић, ванредни професор, Војна академија, Београд

члан Др Бранислав Тодоровић, виши научни сарадник, Институт РТ-РК, Нови Сад

члан, ментор Др Миодраг Темеринац, професор, ФТН, Нови Сад

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.