

**VEĆU DEPARTMANA ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE
UNIVERZITETA SINGIDUNUM**

Beograd
Danijelova 32

Odlukom Veća Departmana za poslediplomske studije i međunarodnu saradnju Univerziteta Singidunum, broj 4-106/2022 od 30.06.2022.godine, određeni smo za članove Komisije za pregled, ocenu i usmenu odbranu doktorske disertacije Marka Pajića, pod nazivom: “*Unapređenje automatske klasifikacije modulacije zasnovane na kumulantu šestog reda za QAM signale*”.

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

Marko Pajić je upisao doktorske studije na Singidunum univerzitetu školske 2018/2019. godine. Položio je svih 12 ispita, sa srednjom ocenom 10. Zahtev za odobravanje teme za izradu doktorske disertacije podneo je 2022. godine. Odlukom Veća Departmana za poslediplomske studije Univerziteta Singidunum, broj 4-106/2022 od 30.06.2022. godine, formirana je Komisija u sastavu:

1. dr Mladen Veinović, redovni profesor, Univerzitet Singidunum, Beograd
2. dr Milan Milosavljević, redovni profesor, Univerzitet Singidunum, Beograd
3. dr Vladimir Orlić, naučni saradnik, Institut Vlatacom, Beograd

za ocenu teme i podobnosti kandidata za izradu doktorske disertacije pod nazivom: “*Unapređenje automatske klasifikacije modulacije zasnovane na kumulantu šestog reda za QAM signale*”. Na osnovu pozitivnog izveštaja Komisije Senat Univerziteta Singidunum je 2022. godine odobrio rad na izradi doktorske disertacije. Za mentora je imenovan prof. dr Mladen Veinović.

1.2. Naučna oblast disertacije

Tema disertacije kandidata je u oblasti elektrotehnike, za koju je Tehnički fakultet Univerziteta Singidunum matičan.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Marko Pajić, master inženjer elektrotehnike, rođen je 01.11.1981. god. u Beogradu. U Beogradu je završio osnovnu školu (OŠ Janko Veselinović), a nakon nje i V beogradsku gimnaziju prirodno matematičkog smera. Nakon završetka srednje škole upisao je Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu 2000. god. Diplomirao je na katedri za radio sisteme 2007. god. sa prosečnom ocenom 7.43. Diplomski rad "Arhitekture povezivanja UMTS i WLAN bežičnih

mreža" uspešno je odbranio sa ocenom 10. Nakon osnovnih studija završio je master akademske studije, drugog stepena, na studijskom programu Elektrotehnika i računarstvo, 2010. god. sa prosečnom ocenom 8.50. Master rad „Razvoj bežične telekomunikacione mreže za video nadzor i kontrolu saobraćaja“ uspešno je odbranio sa ocenom 10.

Od 2008. do danas zaposlen je u Institutu Vlatacom. Od 2008. do 2010. radio je na poziciji radio-telekomunikacionog inženjera za TETRA radio sistem u Srbiji, od 2010. do 2014. na poziciji sistem inženjera i zamenika regionalnog menadžera za APCO P25 radio sistem u Iraku, od 2014. do 2017. na poziciji sistem inženjera za radarski sistem nadzora morske obale u Nigeriji, a od 2017. do danas radi na poziciji senior sistem inženjera za radarske sisteme i DMR radio sisteme. 2019. godine je izabran u zvanje istraživač pripravnik.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacijapod naslovom: *“Unapređenje automatske klasifikacije modulacije zasnovane na kumulantu šestog reda za QAM signale”* ima ukupno 96 strana. Disertacija ima šest poglavlja i spisak literature. Poglavlja su:

1. Uvod, 6 strana,
2. Elementi statistike signala i kumulanti višeg reda, 12 strana,
3. Modulacioni postupci, 27 strana,
4. Algoritmi za AKM zasnovani na kumulantima višeg reda, 10 strana,
5. Unapređenje algoritama AKM na bazi kumulanta šestog reda, 20 strana,
6. Zaključak, 4 strane.

U disertaciji ima ukupno 46 slika i 3 tabele. Literatura sadrži 47 bibliografskih jedinica.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U uvodu je ukratko izložen problem koji se razmatrao u ovoj disertaciji. Pored toga, opisano je i trenutno stanje razvoja oblasti od interesa evidentirano u postojećoj literaturi, obrazložen je metodološki pristup i data struktura.

U okviru drugog poglavlja predstavljene se teorijske osnove elemenata statistike signala i kumulanata višeg reda.

Treće poglavlje sadrži pregled modulacionih postupaka koji se primenjuju u telekomunikacionim sistemima, a čiji rezultat predstavlja predmet obrade i ulaz za algoritam opisan u ovoj disertaciji.

U četvrtom poglavlju dat je opis postojećih algoritama automatske klasifikacije modulacije sa posebnim osvrtom na algoritme na bazi kumulanata višeg reda.

Peto poglavlje sadrži novopredloženo unapređenje automatske klasifikacije modulacije zasnovane na kumulantu šestog reda, opisujući novi algoritam sa dodatnom metodom redukcije metoda modulacije (MOR), kao i rekurzivni algoritam redukcije reda modulacije. U okviru ovog

poglavlja prikazane su i računarske simulacije za poređenje rezultata klasifikacije ostvarenih sa i bez primene ovog metoda.

Na kraju disertacije iznet je zaključak sa mogućim pravcima razvoja u ovoj oblasti, kao i spisak referentne literature.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Predmet istraživanja ove disertacije je novi pristup unapređenju algoritma automatske klasifikacije modulacije na bazi vrednosti kumulanta šestog reda, uvodeći novi metod redukcije reda modulacije (eng. Modulation Order Reduction – MOR) primljenog signala. Predloženi metod redukcije reda modulacije može unaprediti standardni AMC algoritam i obezbediti efikasniju i tačniju klasifikaciju QAM signala.

Kao poseban deo nove metode redukcije reda modulacije, u disertaciji je predstavljeno i potencijalno unapređenje ove metode uvođenjem principa rekurzivnosti, čime je moguće obezbediti uspešnu klasifikacija većeg broja QAM modulacija.

Opisana poboljšanja unose povećanu kompleksnost algoritma u smislu povećanog broja računskih operacija, ali čak i to uzimajući u obzir, ovaj AMC algoritam i dalje ostaje za nekoliko redova veličine jednostavniji od AMC algoritama zasnovanih na drugim svojstvima primljenog signala. U isto vreme, predloženi MOR metod je veoma atraktivan i za dalja istraživanja i potencijalna dodatna poboljšanja performansi u zahtevnijim uslovima propagacije, npr. uz prisutan multipath fading ili interferenciju.

U ovom kontekstu, kandidat je svoju originalnost potvrdio na korektan i uverljiv način-objavlivanjem radova u međunarodnim naučnim časopisima (1 rad u časopisu sa impakt faktorom), u domaćim naučnim časopisima (1 rad) i u zbornicima sa međunarodnih naučnih konferencija (2 rada).

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U izradi disertacije korišćena je obimna literatura iz oblasti automatske klasifikacije modulacije i statistike signala baziranog na komulantu višeg reda, pa sve do najnovijih radova u vrhunskim međunarodnim naučnim časopisima uključujući i sopstvene reference. Na osnovu tih referenci, originalni naučni rezultati do kojih je kandidat došao u disertaciji su stavljeni u korektan kontekst.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Kandidat je u toku naučnog i istraživačkog rada upotrebio različite metode kako bi bili zadovoljeni osnovni metodološki zahtevi – objektivnost, pouzdanost, opštost i sistematičnost.

U skladu sa izabranom problematikom, definisanim ciljevima istraživanja i postavljenim naučnim hipotezama radi definisanja naučnih i stručnih zaključaka i iznalaženja mogućih rešenja upotrebljena je teorijska analiza uz korišćenje rezultata istraživanja iz međunarodne naučne

literature, odnosno saznanja naučnika i drugih autora koji su istraživali problematiku kojom se bavi i ovaj rad. U disertaciji se predstavljaju naučno-teorijska saznanja, relevantna literatura i originalni predlozi korišćenjem većeg broja metoda, i to: istorijske metode, metode kompleksnog posmatranja i analize sadržaja, metode analize i sinteze, metode dokazivanja, kao i eksperimentalne metode.

Primenom istorijskog metoda pribavljeni su rezultati istraživanja drugih autora koji su se bavili problematikom vezanom za tematiku od interesa. Pribavljeni podaci potiču uglavnom iz eminentnih naučnih radova i istraživanja u ovoj oblasti.

Metoda kompleksnog posmatranja i analiza sadržaja primenjena je prilikom obrade rezultata preuzetih iz istraživanja drugih istraživača. Rezultati su upotrebljeni u cilju definisanja nedostataka postojećih algoritama automatske klasifikacije modulacije i utvrđivanja pravca za potencijalna unapređenja.

Proučavanjem dostignuća i postavki primenjenih u postojećim istraživanjima uočena je mogućnost poboljšanja dosadašnjih i primene unapređenih postavki koristeći nove metoda u algoritmima za automatsku klasifikaciju modulacije. Na ovaj način primenjene su metoda analize i sinteze.

U cilju provere efektivnosti i efikasnosti predloženih rešenja, izvršene su simulacije koje su potvrdile inicijalne hipoteze disertacije, što predstavlja implementaciju eksperimentalnog metoda.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Rezultati do kojih je kandidat došao u svojoj disertaciji mogu imati neposrednu primenu u oblasti automatske klasifikacije modulacije. Naime, novopredloženi metod redukcije reda modulacije i novi rekursivni algoritam testirani su pomoću računarskih simulacija i pokazano je da nasumnjivo daju odlične rezultate klasifikacije, slične ili bolje u odnosu na postojeće, ali mnogo kompleksnije, referentne algoritme iz literature. Stoga se predloženi pristup može uspešno primeniti.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat je u svom dosadašnjem radu pokazao kvalitete presudne za uspešan istraživački rad: sposobnost uočavanja problema i postavljanje korektnog cilja istraživanja, shvatanje i proširivanje teorijskih koncepata, originalnost, sposobnost da teorijske metode pretoči u algoritme, kao i da kritički analizira dobijene rezultate.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Originalni naučni doprinosi disertacije se mogu formulisati na sledeći način:

- Novopredloženi metod redukcije reda modulacije daje nepomerena rešenja i čuva statističke osobine zašumljenih komponenti signala, pored samog redukovanja reda

modulacije. Na taj način predloženi metod predstavlja prvo rešenje svoje vrste koje je javno publikovano u dostupnoj literaturi.

- Pored glavnog rezultata vezanog za novi algoritam koji uključuje redukciju reda modulacije, vrednosti kumulanaata višeg reda za više kompleksnih konstelacija su u ovoj disertaciji predstavljene po prvi put.
- Predložen je i novi rekurzivan algoritam automatske klasifikacije modulacije koji iterativno vrši redukciju reda modulacije i usmeren je ka klasifikaciji signala relativno visokog reda modulacije, a uz pomoć računarskih simulacija je dokazano da daje bolje rezultate klasifikacije modulacije u odnosu na postojeće referentne algoritme.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

U prvoj fazi kandidat je razmatrajući raspoloživu literaturu u oblasti teme disertacije izvršio kritičku analizu dostupnih informacija i korektno definisao cilj istraživanja.

Tokom istraživačkog rada koristio je mogućnost kritičkog preispitivanja i pogodne načine unapređenja postojećih rešenja dodajući svoj doprinos kroz nove ideje.

Predloženi model rešenja postavljenog problema je praktično implementiran i eksperimentalno su dobijeni rezultati modelovanja sa odgovarajućim referentnim vrednostima (rezultatima računarskih simulacija).

Uočene su i prikazane prednosti i nedostaci predloženog pristupa i ukazano na smernice mogućih daljih istraživanja.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Naučni doprinosi disertacije verifikovani su sledećim radovima kandidata:

Kategorija M21

1. **M. Pajic**, M. Veinovic, M. Peric, V. Orlic, "Modulation Order Reduction Method for Improving the Performance of AMC Algorithm Based on Sixth-Order Cumulants", IEEE Access, ISSN 2169-3536, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000358

Kategorija M33

1. **M. Pajić**, B.Džolić, M.Perić, M.Veinović, "Energy and Communication Requirements for Network of E-band Radars as Sensors", Sinteza 2019, doi:10.15308/Sinteza-2019-575-580
2. **M. Pajić**, M. Simic, R. Todorovic, M.Peric, M.Veinovic "TETRA Based Secure Voice Communication Solution in Non-Developed Regions", Telfor 2019, Beograd

Kategorija M52

1. **Pajić M.**, Veinović M., Orlić V., "Complex Signal Constellations in Cumulants-Based AMC: Statistics and Performance", TELFOR Journal, Vol. 13, No. 2, 2021, p. 63-68, DOI: 10.5937/telfor2102063P.

5. MIŠLJENJE KOMISIJE I PREDLOG

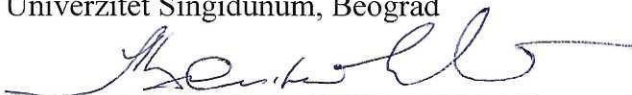
Na osnovu izloženog, komisija konstatuje da doktorska disertacija Marka Pajića, master inženjera elektrotehnike, pod naslovom “Unapređenje automatske klasifikacije modulacije zasnovane na kumulantu šestog reda za QAM signale” ispunjava sve formalne i suštinske uslove predviđene Zakonom o visokom obrazovanju, kao i propisima univerziteta Singidunum u Beogradu. Doktorska disertacija Marka Pajića sadrži naučne doprinose koji se sastoje u definisanju novih algoritama za automatsku klasifikaciju modulacije sa metodom redukcije reda modulacije.

Tokom celokupne izrade doktorske disertacije, kandidat je pokazao nesumnjivu sposobnost za samostalni naučnoistraživački rad. Stoga članovi Komisije sa zadovoljstvom predlažu Veću departmana za posle diplomске studije da se doktorska disertacija pod naslovom “Unapređenje automatske klasifikacije modulacije zasnovane na kumulantu šestog reda za QAM signale” kandidata Marka Pajića, mastera u oblasti elektrotehnike prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Senatu univerziteta Singidunuma u Beogradu.

Beograd, 24. 10. 2022. godine

Članovi komisije:

dr Mladen Veinović, redovni profesor,
Univerzitet Singidunum, Beograd



dr Milan Milosavljević, redovni profesor,
Univerzitet Singidunum, Beograd



dr Vladimir Orlić, naučni saradnik,
Institut Vlatacom, Beograd

