

Ag. 12. 2.

05. 7. 2011.

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU

IZVEŠTAJ O URAĐENOJ DOKTORSKOJ DISERTACIJI

1. UVOD

A. Naslov i obim disertacije

Doktorska disertacija Vladimira D. Orlića, dipl.inž., pod naslovom “**Automatska klasifikacija modulacija na osnovu vrednosti kumulanta šestog reda**”, sadrži 200 strana i obuhvata 35 slika, 7 tabela i 149 referenci.

B. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

Nastavno-Naučno veće ETF i Stručno veće Univerziteta u Beogradu prihvatili su temu doktorske disertacije Vladimira D. Orlića 29.3.2011. i 9.5.2011. godine, respektivno. Nastavno-Naučno veće ETF imenovalo je 14.6.2011. godine komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije u sastavu: prof. dr Miroslav L. Dukić, doc. dr Predrag Ivaniš, prof. dr Vladanka Aćimović Raspopović, doc. dr Miljko Erić i prof. dr Nenad Cakić.

C. Mesto disertacije u odgovarajućoj naučnoj oblasti

Automatska klasifikacija modulacija (*Automatic Modulation Classification* - AMC) predstavlja aktuelnu problematiku u oblasti telekomunikacija, sa značajnim primenama u komercijalnim i vojnim telekomunikacionim sistemima, kao što su kognitivni radio-sistemi, sistemi za nadzor radio-spektra, ili sistemi za elektronski rat. U protekle tri decenije razvijeno je više algoritama za automatsku klasifikaciju modulacija, među kojima se zbog svoje jednostavnosti, kao naročito pogodni za praktičnu implementaciju, ističu algoritmi zasnovani na tzv. „prepoznavanju obrazaca“ u signalu (tzv. *Feature Based* – FB algoritmi). Među FB algoritmima kao trend nameću se rešenja zasnovana na analizi elemenata statistike višeg reda kao parametara od interesa, pri čemu analiza vrednosti kumulanata višeg reda primljenog signala ima niz praktičnih prednosti u odnosu na druga rešenja. Razvoj algoritama pomenutog tipa namenjenih primeni u realnim uslovima propagacije, u kanalu nepoznatog impulsnog odziva, počeo je tek u poslednje dve godine. Zbog toga razvoj novih AMC algoritama koji po svojim karakteristikama pružaju mogućnost efikasne implementacije i, u isto vreme, pokazuju sposobnost da odgovore na kompleksne izazove realnih uslova propagacije, predstavlja temu koja je vrlo aktuelna i čiji je značaj u savremenim telekomunikacionim sistemima nesporan.

D. Biografski podaci o kandidatu

Vladimir D. Orlić rođen je 1983. godine u Beogradu. Studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu započeo je 2002. godine, a diplomirao je 2007. godine na Odseku za elektroniku, telekomunikacije i automatiku – Smer za telekomunikacije. Diplomski rad na temu „Realizacija kompresije impulsa pomoću kartice HERON-IO2“ odbranio je 29.03.2007. godine, i stekao zvanje diplomiranog inženjera elektrotehnike. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu, Odsek za telekomunikacije i informacione tehnologije, upisao je 2007/2008. godine.

Od jula do decembra 2007. godine Vladimir D. Orlić zaposlen je u „IMTEL Mikro opt“ D.D. na poziciji inženjera za istraživanja i razvoj. Od januara do oktobra 2008. godine zaposlen je u Institutu „IMTEL Komunikacije“ A.D., na poziciji inženjera za istraživanja i razvoj, gde od novembra 2008. do danas obavlja dužnost rukovodioca Odeljenja za digitalnu obradu signala.

U toku dosadašnjeg rada Vladimir D. Orlić je autor više tehničkih rešenja u okviru projekata Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja, niza radova na konferencijama od nacionalnog i od međunarodnog značaja, kao i u časopisima od nacionalnog i od međunarodnog značaja. Iz oblasti na koju se odnosi doktorska disertacija V. D. Orlić objavio je 2 rada u vodećim međunarodnim časopisima sa SCI liste.

2. OPIS DISERTACIJE

A. Struktura i sadržaj disertacije

Disertacija sadrži rezime na srpskom i engleskom jeziku, sadržaj, spisak slika i tabela, spisak skraćenica, sedam poglavlja, spisak korišćene literature i prilog.

B. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

Prvo poglavlje je uvodno i sadrži opis uloge i značaja AMC problematike u teoriji i praksi savremenih telekomunikacionih sistema. U ovom poglavlju su objašnjene osnovne razlike između globalnih pravaca razvoja AMC algoritama u stručnoj literaturi, i naglašene su prednosti FB algoritama u odnosu na druge klase algoritama. Diskutovani su glavni izvori degradacije signala tokom propagacije, sa posebnim naglaskom na pojavu višestruke propagacije kao faktora koji presudno utiče na performanse AMC algoritama. Predstavljena je struktura disertacije i date su opšte informacije o samom radu.

Nakon uvodnih razmatranja, u drugom poglavlju dat je detaljan opis modela sistema koji se posmatra, uz opis modulacionih postupaka koji su analizirani u nastavku teksta. Skup modulacionih postupaka od interesa je, u skladu sa praksom prisutnom u literaturi, redukovano na sledeće tipove modulacija: ASK, QAM, PSK i FSK. Nakon generalne analize pomenutih modulacionih postupaka, definisani su parametri metrike performansi AMC algoritama. Definisana je veličina verovatnoće uspešne klasifikacije, a potom su navedene poželjne osobine AMC algoritma sa aspekta praktične primenljivosti.

U trećem poglavlju je dat pregled postojećih AMC algoritama, objavljenih rezultata u ovoj oblasti, uz pregled korišćene literature. Prikazana je podela AMC algoritama na *Likelihood-Based* (LB) i *Feature-Based* (FB) algoritme, a potom je izvršena rekapitulacija najznačajnijih rešenja iz svake od pomenutih klasa algoritama, publikovanih u stručnoj literaturi. Prikazane su sličnosti i razlike između pojedinačnih algoritama i navedene su prednosti i nedostaci predstavljenih rešenja. Detaljno su prikazani parametri modela sistema na kojima su zasnovana analizirana rešenja: kako tipovi nepoznatih parametara u sistemu, tako i pretpostavljeni modeli kanala. Diskutovana je primenljivost u praksi prikazanih rešenja na osnovu pretpostavljenih modela sistema, ali i na osnovu drugih karakteristika algoritama. Prikazane su generalne prednosti FB AMC algoritama nad LB algoritmima, i ukazano je na važnost upotrebe realnog modela kanala sa aspekta praktične primenljivosti teorijski razvijenih algoritama.

U četvrtom poglavlju opisani su elementi statistike posmatranih telekomunikacionih signala, koji su od posebnog interesa za AMC problematiku, i na kojima se zasniva predloženi algoritam klasifikacije na bazi vrednosti kumulanata šestog reda primljenog signala. Definisan je pojam slučajnih procesa i slučajnih promenljivih, zatim osnovne veličine kojima se opisuju statističke osobine slučajnih promenljivih; diskutovani su specijalni slučajevi stacionarnih i ciklostacionarnih procesa; definisani su osnovni elementi statistike višeg reda: momenti i kumulanti. Prikazane su matematičke osobine momenata i kumulanata višeg reda, i na osnovu njih izvedeni zaključci o pogodnosti upotrebe ovih veličina u AMC problematici, kao i prednosti upotrebe kumulanata nad upotrebom momenata višeg reda. Predstavljene su konverzije formule koje usko povezuju momente i kumulante, i pružaju mogućnost numeričkog određivanja vrednosti ovih veličina različitog reda.

U petom poglavlju opisan je novi algoritam za AMC na bazi vrednosti kumulanata šestog reda, kako u teorijski idealnim uslovima, tako u kanalu sa aditivnim belim Gausovim šumom i u kanalu sa višestrukoum propagacijom. Uporedo sa predloženim algoritmom analiziran je i algoritam istog nivoa primenljivosti, koji je zasnovan na određivanju vrednosti kumulanata nižeg (četvrtog) reda. Teorijski su izvedeni izrazi za parametre kojima se opisuju očekivani kvalitet klasifikacije ostvaren pomoću predloženog algoritma, i prikazane su numeričke vrednosti ovih parametara. Teorijski je objašnjena i simulacijama verifikovana pojava ofseta u vrednosti normalizovanog kumulanata šestog reda BPSK signala u kanalu sa višestrukoum propagacijom, specifična za prikazani novi AMC algoritam. U ovom poglavlju razmatran je i problem modelovanja realnog kanala sa višestrukoum propagacijom kao i problem estimacije uticaja kanala sa višestrukoum propagacijom nepoznatog impulsnog odziva na proces klasifikacije. Realni modeli kanala su formirani po Turinovu modelu kanala sa višestrukoum propagacijom, za više pojedinačnih modela kanala sa različitim statističkim odlikama. Prikazani su rezultati simulacija predloženog algoritma, uporedo sa simulacijama algoritma zasnovanog na određivanju vrednosti kumulanata nižeg reda; na ovaj način je izvršena verifikacija teorijski izvedenih rezultata za sve posmatrane modele kanala: od kanala sa aditivnim belim Gausovim šumom, preko kanala sa šumom i višestrukoum propagacijom poznatog impulsnog odziva, do kanala sa šumom i višestrukoum propagacijom nepoznatog impulsnog odziva. U svim posmatranim modelima kanala potvrđena je prednost novopredloženog algoritma u poređenju sa algoritmom na bazi vrednosti kumulanata nižeg reda, približno istog stepena praktične primenljivosti.

U šestom poglavlju su diskutovani različiti aspekti primene predloženog algoritma. Pre svega, mogućnosti poboljšanja performansi algoritma u nekim specifičnim uslovima propagacije (kakvi se najčešće posmatraju u literaturi), na osnovu primene poznatih statističkih metoda za smanjenje varijanse veličine prilikom estimacije. Prikazan je novi metod estimacije uticaja kanala sa višestrukom propagacijom nepoznatog impulsnog odziva na prikazani algoritam, i demonstrirana je njegova prednost u odnosu na metode estimacije nepoznatih koeficijenata kanala posmatrane u literaturi. Analizirana je i otpornost predloženog algoritma na pojavu interferencije, i objašnjena njegova prednost u odnosu na postojeća rešenja i u ovom kontekstu. Svi predloženi zaključci su potvrđeni brojnim simulacijama.

U okviru sedmog poglavlja data su zaključna razmatranja, izvršena je rekapitulacija prikazanih odlika predloženog AMC algoritma, a potom su diskutovani mogući pravci daljih istraživanja u oblasti automatske klasifikacije modulacija na osnovu vrednosti kumulanata višeg reda.

3. OCENA DISERTACIJE

A. Savremenost, originalnost i značaj

Predmet istraživanja u okviru predložene doktorske disertacije je primena elemenata statistike višeg reda – normalizovanih kumulanata šestog reda, u problemima automatske klasifikacije modulacija. Prikazan je novi AMC algoritam zasnovan na eksploataciji karakterističnih osobina kumulanata višeg reda, koje ih čine naročito pogodnim za primenu u problemima automatske klasifikacije modulacija, sa posebnim akcentom na realnim uslovima propagacije u posmatranom modelu telekomunikacionog sistema. Postojeći algoritmi za automatsku klasifikaciju modulacija uglavnom su razvijeni za idealizovane modele sistema, u kojima se kao primarni izvor degradacije signala posmatraju: aditivni beli Gausov šum, ravni fading, ili (retko) pojava višestruke propagacije u kanalu čiji je impulsni odziv poznat. Razvoj algoritama koji su namenjeni primeni kako u svim pomenutim uslovima, tako i u uslovima višestruke propagacije u kanalu nepoznatog impulsnog odziva, počeo je tek u poslednje dve godine. Predloženi algoritam odnosi se i na ovaj, najkompleksniji problem. U prikazanim istraživanjima je pokazano da primena predloženog AMC algoritma kao rezultat ima uspešnost klasifikacije modulacionih postupaka (u smislu vrednosti verovatnoće uspešne klasifikacije) koja je veća nego kod poznatih algoritama za klasifikaciju modulacija, podjednako podobnih za praktičnu implementaciju i namenjenih primeni u istim radnim uslovima. Pri tom, u prikazanim istraživanjima su verifikacije performansi AMC algoritama putem simulacija po prvi put realizovane na realnim modelima kanala, koji verno odgovaraju praktičnim uslovima propagacije.

B. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U izradi doktorske disertacije korišćena je literatura koja se odnosi na pregled postojećih metoda za automatsku klasifikaciju modulacija, pri čemu je naročita pažnja posvećena FB AMC algoritmima, kao algoritmima posebno interesantnim sa aspekta jednostavnosti i efikasnosti prilikom praktične implementacije. Značajna pažnja je posvećena i literaturi koja se odnosi na adekvatan matematički tretman veličina statistike višeg reda, koje imaju centralnu ulogu u predloženom novom algoritmu klasifikacije modulacija. Takođe, korišćena literatura obuhvata i više bibliografskih jedinica koje se odnose na problematiku realnog modelovanja kanala, po uzoru na modele kanala formirane na osnovu rezultata eksperimentalnih merenja, sprovedenih u uslovima koji odgovaraju svakodnevnoj praksi. Pored pomenute, korišćena je i literatura posvećena problematici generisanja statističkih veličina pomoću računara.

C. Analiza primenjenih naučnih metoda i njihova adekvatnost za sprovedeno istraživanje

Osnovni cilj istraživanja u okviru ove disertacije bilo je koncipiranje i analiza performansi metoda za automatsku klasifikaciju modulacija koji demonstrira sposobnost da odgovori realnim uslovima propagacije. Sa tim u vezi, najpre je izvršena analiza postojećih metoda za automatsku klasifikaciju modulacija, sa posebnim osvrtom na metode zasnovane na „prepoznavanju obrazaca“ u signalu. Definisan je novi algoritam klasifikacije na bazi vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda primljenog signala i teorijski su određene vrednosti statističkih parametara za opisivanje očekivanog nivoa uspešnosti klasifikacije. Potom je komparativnom analizom izvršeno međusobno poređenje očekivane uspešnosti algoritama za klasifikaciju modulacija zasnovanih na vrednostima kumulanata višeg reda. Definisana je i teorijski evaluirana nova metoda za estimaciju uticaja kanala na proces klasifikacije, a potom je izvršeno međusobno poređenje predložene i već postojeće metode za estimaciju uticaja kanala na proces

klasifikacije. Pomoću računarskih simulacija su proverene performanse predloženog algoritma za automatsku klasifikaciju modulacija u različitim scenarijima. Izvršena je teorijska analiza metoda za poboljšanje performansi predloženog algoritma u različitim uslovima okruženja, a zatim je izvršena i provera performansi pomoću računarskih simulacija. Na kraju, prikazana je i teorijska analiza robusnosti predloženog algoritma na uticaj interferencije, uz odgovarajuću proveru performansi pomoću računarskih simulacija.

D. Ocena primenljivosti i verifikacije ostvarenih rezultata

Rezultati teorijskih razmatranja i simulacionih provera pomoću računara, prezentovani u okviru ove disertacije i objavljenih radova koji prate disertaciju, pokazuju da:

- zahvaljujući dobrim statističkim odlikama i pojavi ofseta u vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda BPSK signala u kanalu sa višestrukom propagacijom, karakterističnoj za prikazani novi AMC algoritam, izdvajanje BPSK signala od kompleksnih modulacionih postupaka se primenom predloženog algoritma obavlja značajno efikasnije, u poređenju sa AMC algoritmima istog tipa i sličnog nivoa praktične primenljivosti, u svim posmatranim uslovima kanala;
- primena novopredloženog algoritma za estimaciju vrednosti nepoznatih koeficijenata kanala sa višestrukom propagacijom, u prisustvu dominantne putanje signala, u okviru prikazanog AMC algoritma rezultuje značajno uspešnijom klasifikacijom kompleksnih modulacionih postupaka, u poređenju sa AMC algoritmima istog tipa i sličnog nivoa praktične primenljivosti, u najzahtevnijim uslovima kanala – sa višestrukom propagacijom, nepoznatog impulsnog odziva;
- primena predloženih statističkih metoda za dodatno unapređenje performansi predloženog AMC algoritma primetno doprinosi povećanju vrednosti verovatnoće uspešne klasifikacije, u različitim specifičnim uslovima kanala;
- predloženi AMC algoritam demonstrira veću robusnost na pojavu interferencije, u poređenju sa AMC algoritmima istog tipa i sličnog nivoa praktične primenljivosti, u uslovima višestruke propagacije nepoznatog impulsnog odziva i pri realnim modelima kanala.

Na osnovu ovoga može se konstatovati da su predložena rešenja u teorijskom i praktičnom smislu u potpunosti verifikovana sa stanovišta njihove primene.

E. Ocena sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Rezultati dosadašnjeg naučno-istraživačkog rada Vladimira D. Orlića zadovoljavaju sve kriterijume Zakona o visokom obrazovanju. Kandidat poseduje sve uslove za samostalan naučni rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

A. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Originalni doprinos AMC problematici u predloženoj disertaciji sadržan je u detaljnoj analizi mogućnosti upotrebe kumulanata šestog reda kao statističkog parametra od interesa za postupak klasifikacije. Izvedeni zaključci su simulacionom metodom testirani u praktičnim uslovima propagacije, tj. – pri realnim modelima kanala sa višestrukom propagacijom. Predloženo je i originalno rešenje za estimaciju uticaja višestruke propagacije na proces automatske klasifikacije modulacija. Združenom primenom estimacije uticaja kanala i određivanja vrednosti kumulanata šestog reda primljenog signala postiže se uspešna klasifikacija signala po primenjenom tipu modulacije u realnim uslovima propagacije. Takođe, predložena su i druga rešenja za poboljšanje performansi predloženog AMC algoritma, u različitim specifičnim uslovima propagacije.

Algoritam za automatsku klasifikaciju modulacija predložen u ovoj doktorskoj disertaciji pokazuje prednosti u odnosu na poznate AMC algoritme kroz ostvarenje više različitih zahteva koji su od posebne važnosti za praktičnu implementaciju:

- da omogućava visoku verovatnoću uspešne klasifikacije u kratkom intervalu opservacije dolaznog signala i što širem opsegu vrednosti odnosa signal-šum;
- da poseduje mogućnost prepoznavanja više različitih formata modulacije u raznolikim uslovima propagacije;

- da bude robustan na promene uslova propagacije tokom vremena;
- da funkcioniše u realnom vremenu, i
- da bude praćen što je moguće nižom numeričkom kompleksnošću i što jednostavnijim zahtevima za implementaciju.

B. Kritička analiza rezultata istraživanja

U okviru ove doktorske disertacije predložen je novi AMC algoritam i izvršeno je poređenje performansi ovog algoritma i algoritma koji poseduje sličan nivo numeričke složenosti, primenljivosti u za praksu najkompleksnijim uslovima višestruke propagacije nepoznatog impulsnog odziva i pogodnosti za implementaciju u realnom vremenu. Poređenje je izvršeno pri različitim uslovima propagacije i prikazani rezultati nedvosmisleno pokazuju da predloženi algoritam karakteriše postizanje veće vrednosti verovatnoće uspešne klasifikacije, u širokom opsegu vrednosti odnosa Signal/Šum. Konstatovani su nedostaci metoda za estimaciju nepoznatih vrednosti koeficijenata kanala korišćenog u dostupnoj literaturi, predložen je novi metod estimacije u kom su prevaziđeni problemi numeričke nestabilnosti, a potom je izvršeno testiranje performansi na bazi računarskih simulacija koje pokazuju da predloženi metod estimacije u prikazanom AMC algoritmu rezultuje značajno efikasnijom klasifikacijom modulacionih postupaka. Integracija novog metoda estimacije koeficijenata kanala u predloženi algoritam ne samo da omogućava postizanje boljih performansi, već predstavlja i rešenje fundamentalnog problema dostizanja prihvatljivo visoke verovatnoće uspešnosti klasifikacije kompleksnih signala u kanalima sa višestrukom propagacijom nepoznatog impulsnog odziva. Opšta numerička složenost predloženog AMC algoritma je na vrlo niskom nivou, u poređenju sa većinom poznatih algoritama, a sposobnost algoritma da funkcioniše „na slepo“ – bez ikakvih a priori saznanja o stanju kanala – je uspešno potvrđena brojnim simulacijama.

C. Očekivana primena rezultata u praksi

Primena rezultata disertacije može se najpre očekivati u bežičnim telekomunikacionim sistemima u kojima postoji realna potreba za identifikacijom primenjenog modulacionog postupka, kako bi se omogućila dalja ekstrakcija korisnih informacija: kako u komercijalnim, tako i u vojnim primenama. Činjenica da se u predloženom AMC algoritmu odlučivanje uvek vrši na osnovu samo jedne veličine, koja se određuje na jedinstven način, nezavisno od primenjenog modulacionog postupka, uz skromne zahteve za memorijskim i procesorskim resursima potrebnim za implementaciju ovog algoritma, čini predloženi algoritam veoma pogodnim za praktičnu implementaciju na savremenom reprogramabilnom hardveru (poput mikrokontrolerskih i FPGA platformi). Stoga se uslovi za praktičnu primenu predloženog algoritma mogu smatrati zadovoljenim i u aktuelnom trenutku, dok ubrzani razvoj novih sistema čija se funkcionalnost zasniva na uspešnoj automatskoj klasifikaciji modulacija upućuje na zaključak da aktuelnost prikazanog rešenja nije samo trenutna.

Lista radova iz oblasti na koju se odnosi doktorska disertacija:

1. V. D. Orlić i M. L. Dukić, „Uticaj kanala na performanse algoritma za automatsku klasifikaciju modulacija,“ *TELFOR 2008*, Beograd 2008.
2. V. D. Orlić and M. L. Dukić, “Properties of an Algorithm for Automatic Modulation Classification Based on Sixth-Order Cumulants,” *ICEST 2009*, Veliko Trnovo 2009.
3. V. D. Orlić and M. L. Dukić, “Algorithm for Automatic Modulation Classification in Multipath Channel Based on Sixth-Order Cumulants,” *TELSIKS 2009*, Niš 2009.
4. V. D. Orlić and M. L. Dukić, „Automatic modulation classification algorithm using higher-order cumulants under real-world channel conditions,” *IEEE Communications Letters*, Volume 13, Issue 12, pp. 917 – 919, December 2009. SCI, IF=1.14, DOI: 10.1109/LCOMM.2009.12.091711.
5. V. D. Orlić and M. L. Dukić, “Multipath channel estimation algorithm for automatic modulation classification using sixth-order cumulants,” *Electronics Letters*, Volume 46, Issue 19, pp. 1348-1349, September 2010. SCI, IF=1.01, DOI: 10.1049/el.2010.1893.
6. V. D. Orlić i M. L. Dukić, “Metode za poboljšanje klasifikacije kompleksnih signala na bazi vrednosti kumulanta šestog reda,” *TELFOR 2010*, Beograd 2010.
7. V. D. Orlić i M. L. Dukić, „Analiza performansi AMC algoritma na bazi vrednosti kumulanta šestog reda u uslovima interferencije,“ *ETRAN 2011*, Banja Vrućica 2011.

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

U predloženoj disertaciji je detaljno prikazan algoritam za klasifikaciju modulacija na bazi vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda signala nepoznatog modulacionog formata. Pri tome je definisan normalizovani kumulant šestog reda kao parametar od interesa u postupku klasifikacije modulacija, teorijski su izvedene formule za opisivanje samog algoritma, numeričke vrednosti ove veličine koje odgovaraju posmatranim modulacionim postupcima su izračunate, a potom su izvedeni i teorijski izrazi kojima se opisuju vrednosti statističkih parametara za opisivanje očekivanog nivoa uspešnosti klasifikacije. Ove vrednosti su, takođe, određene i numerički za posmatrane tipove modulacionih postupaka. U disertaciji je predlažen i novi kriterijum za međusobno poređenje očekivane uspešnosti algoritama za klasifikaciju modulacija zasnovanih na vrednostima kumulanata višeg reda; zaključci izvedeni primenom predloženog kriterijuma verifikovani su i putem Monte-Karlo simulacija.

Teorijski je objašnjena pojava ofseta vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda u slučaju primene predloženog algoritma na BPSK signal u kanalu sa višestrukom propagacijom, koja doprinosi uspešnosti procesa klasifikacije i predstavlja specifičnu pojavu, nepoznatu u postojećim algoritmima ovog tipa. Teorijska objašnjenja su, za konkretne modele kanala, verifikovana numeričkim rezultatima dobijenim putem Monte-Karlo simulacije. Takođe, uticaj koji ova pojava ostvaruje na sam proces klasifikacije demonstriran je i verifikovan na isti način.

Ukazano je da glavni razlog za pojavu skromnih rezultata klasifikacije u scenarijima koji podrazumevaju isključivo kompleksne modulacione postupke, u algoritmima ovog tipa, leži u postojećim pod-algoritmima za estimaciju uticaja kanala nepoznatog impulsnog odziva. Predložen je novi algoritam za estimaciju uticaja kanala, teorijski objašnjena njegova prednost nad postojećim rešenjima, a potom su izvedeni zaključci potvrđeni putem Monte-Karlo simulacija.

Takođe, ukazano je na nedostatke matematičkih modela kanala koji se u literaturi najčešće posmatraju prilikom evaluacije algoritama za automatsku klasifikaciju modulacija na bazi računarskih simulacija. Predloženi su modeli kanala koji odgovaraju realnim uslovima propagacije, i sa njima je izvršena procena rada kako predloženog, tako i postojećih algoritama za klasifikaciju modulacija.

Na kraju, uporedo sa predloženim rešenjem za unapređenje procesa klasifikacije u realnim uslovima rada, predložen je i niz rešenja za poboljšanje procesa klasifikacije pod uslovima kakvi se najčešće posmatraju u literaturi. Takođe, diskutovana je i robusnosti predloženog algoritma na pojavu interferencije, koja je rezultat uočenih specifičnih odlika ovog algoritma.

Osnovni doprinosi kandidata, izloženi u ovoj doktorskoj disertaciji, su sledeći:

1. Razvoj novog AMC algoritma, sposobnog da odgovori na realne uslove propagacije signala. Za razliku od većine poznatih AMC algoritama, projektovan je tako da odgovarajuća funkcionalnost bude postignuta kako u uslovima degradacije signala usled dejstva aditivnog belog Gausovog šuma, tako i u uslovima višestruke propagacije, kao i interferencije. Prikazani algoritam ne podrazumeva nikave dodatne zahteve u vidu perioda prilagođenja uslovima kanala (tzv. trening režima), niti a priori saznanja o stanju kanala. Svo procesiranje se obavlja „na slepo“ – samo na osnovu vrednosti odbiraka signala na prijemu. Ne podrazumeva se primena ni jednog metoda ekvalizacije signala tokom pred-procesiranja za uspešno funkcionisanje AMC algoritma, što dodatno pojednostavljuje sam algoritam, bez narušavanja očekivanih performansi. Primenom metoda statistike višeg reda, jednovremeno sa procesom klasifikacije, vrši se i estimacija uticaja propagacionog kanala, čak i u vremenski promenljivim kanalima nepoznatog impulsnog odziva;
2. Razvoj novog metoda za estimaciju koeficijenata kanala, koji u sprezi sa AMC algoritmom na bazi vrednosti normalizovanih kumulanata šestog reda omogućava uspešnu klasifikaciju kako elementarnih (BPSK, QPSK), tako i složenih modulacionih postupaka (npr. poput 64-QAM). Integracija novog metoda estimacije koeficijenata kanala u predloženi algoritam ne samo da omogućava postizanje boljih performansi, u odnosu na poznate algoritme ovog tipa, već predstavlja i rešenje fundamentalnog problema dostizanja prihvatljivo visoke verovatnoće uspešnosti klasifikacije kompleksnih signala u kanalima sa višestrukom propagacijom nepoznatog impulsnog odziva;
3. Generisanje simulacionih modela kanala koji, za razliku od dosadašnje prakse, pružaju maksimalno verodostojne prikaze performansi AMC algoritama prilikom testiranja pomoću računara. Za razliku od strogo teorijskih, pojednostavljenih modela kanala koji su korišćeni u dostupnoj literaturi, po prvi put su u simulacijama kanali

modelovani na realan način, na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata koji verno oslikavaju situaciju prisutnu u praksi.

Rezultati prikazani u ovoj disertaciji predstavljeni su u radovima na domaćim i međunarodnim konferencijama, kao i u dva vodeća međunarodna časopisa na kojima je kandidat prvi autor (reference broj 4 i 5).

Na osnovu izloženog, članovi Komisije sa zadovoljstvom predlažu Nastavno-naučnom veću ETF u Beogradu da rad Vladimira D. Orlića, pod naslovom **“Automatska klasifikacija modulacija na osnovu vrednosti kumulanta šestog reda”** prihvati kao doktorsku disertaciju i da kandidatu odobri javnu usmenu odbranu rada.

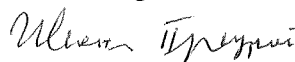
U Beogradu, 25.6.2011.

Komisija za pregled i ocenu rada:

Prof. dr Miroslav L. Dukić,



Doc. dr Predrag Ivaniš



Prof. dr Vladanka Aćimović Raspopović

Doc. dr Miljko Erić



Prof. dr Nenad Cakić

