

# Metode za poboljšanje klasifikacije kompleksnih signala na bazi vrednosti kumulanta šestog reda

Vladimir D. Orlić, *Member, IEEE*, i Miroslav L. Dukić, *Member, IEEE*

**Sadržaj** — U ovom radu izloženi su rezultati analize metoda za automatsku klasifikaciju modulacija na bazi vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda. Razmatrani su različiti uslovi propagacije signala: kanal sa belim Gausovim šumom, kanal sa šumom i višestrukom propagacijom poznatog impulsnog odziva, kao i kanal sa šumom i višestrukom propagacijom čiji je impulсни odziv nepoznat. Za svaki od pomenutih uslova propagacije predloženo je odgovarajuće rešenje za unapređenje procesa klasifikacije modulacija. Rešenja su verifikovana pomoću Monte Karlo simulacija.

**Ključne reči** — Automatska klasifikacija modulacija, kumulanti, statistika, multipath, estimacija kanala.

## I. UVOD

AUTOMATSKA klasifikacija modulacija (*Automatic Modulation Classification* – AMC) je aktuelna tema u kognitivnim radio-sistemima, kao i sistemima za nadzor radio-spektra i elektronski rat. Mogućnost određivanja tipa modulacije neophodna je za uspešno funkcionisanje pomenutih telekomunikacionih sistema i predstavlja ozbiljan zadatak. Postoje različiti pristupi problematici AMC, među kojima se zbog svoje jednostavnosti naročito ističu tehnike „prepoznavanja obrazaca“ u signalu, gde se najpre vrši procena parametara od interesa, a potom se na osnovu vrednosti ovih parametara donosi odluka o primjenenom tipu modulacije. Kao parametri od interesa najčešće se analiziraju elementi statistike višeg reda – momenti i kumulanti.

U [1] je predstavljen AMC algoritam baziran na određivanju vrednosti kumulanta šestog reda, kao parametrima od interesa. Teorijskim analizama i simulacijama rada ovog algoritma pokazano je da se njime postižu bolji rezultati u razdvajanju BPSK od kompleksnih signala, u odnosu na poznate AMC algoritme na bazi vrednosti kumulanta nižeg reda, [2]. U radu [3] je pomenuti algoritam analiziran u kanalu sa aditivnim belim Gausovim šumom (AWGN), a u [4] je posmatran rad algoritma u kanalu sa višestrukom propagacijom poznatog impulsnog odziva. Algoritam je testiran i na modelu kanala

sa višestrukom propagacijom nepoznatog impulsnog odziva [1], i njegova efikasnost u odnosu na postojeća rešenja je potvrđena i u tom kontekstu.

Istovremeno je uočeno da klasifikacija čisto kompleksnih signala ne daje najbolje rezultate, iako su oni vrlo približni rezultatima koje daju drugi algoritmi. U ovom radu predložene su metode za proširenje i unapređenje AMC algoritma sa ciljem da se postigne napredak u klasifikaciji signala ovog tipa.

## II. METODE ZA UNAPREĐENJE AMC ALGORITMA

Posmatra se standardni model telekomunikacionog sistema:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{L-1} h(k)x(n-k) + g(n) \quad (1)$$

gde  $x(n)$  predstavlja simbole emitovanog signala koji odgovaraju primenjenoj modulacionoj shemi, pri čemu tip modulacije i energija simbola nisu unapred poznati.  $h(n), n = 0, 1, \dots, L-1$  su koeficijenti impulsnog odziva kanala, dužine  $L$ , dok  $y(n)$  predstavlja primljenu sekvencu simbola.  $g(n)$  predstavlja AWGN srednje vrednosti nula i varijanse  $\sigma_g^2$ .

Kumulant šestog reda  $C_{63,x}$  promenljive  $x$ , i kumulant drugog reda  $C_{21,x}$  dati su izrazima,

$$C_{63,x} = E(|x|^6) - 9E(|x|^4)E(|x|^2) + 12|E(x^2)|^2 E(|x|^2) + 12E^3(|x|^2) \quad (2)$$

$$C_{21,x} = E(|x|^2) \quad (3)$$

pri čemu je normalizovani kumulant šestog reda,

$$\tilde{C}_{63,x} = \frac{C_{63,x}}{C_{21,x}^3} \quad (4)$$

Vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda za nekoliko uobičajenih modulacionih tehnika prikazane su u Tab.1. Izračunate teorijske vrednosti normalizovanog kumulanta šestog reda treba dovesti u vezu sa signalom na prijemu  $y(n)$ , jer se prepoznavanje primenjene metode modulacije obavlja upravo na osnovu primljenog signala. U tački prijema neophodno je odrediti vrednosti kumulanta po promenljivoj  $y$ , a zatim na osnovu ovih veličina i normalizovani kumulant šestog reda po promenljivoj  $x$ . Pokazuje se da važi sledeća relacija, [1]:

V.D. Orlić, IMTEL Komunikacije A.D., Bul. M. Pupina 165B, 11070 Novi Beograd, Srbija (telefon: 381-64-8236530; e-mail: cheggy@insimtel.com).

M.L. Dukić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: dukic@etf.rs).

$$\tilde{C}_{63,x} = \frac{1}{\beta} \frac{C_{63,y}}{(C_{21,y} - \sigma_g^2)^3} \quad (5)$$

gde je uticaj šuma iskazan kroz varijansu  $\sigma_g^2$ , dok se uticaj kanala opisuje izrazom,

$$\beta = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} |h(k)|^6}{\left(\sum_{k=0}^{L-1} |h(k)|^2\right)^3} \quad (6)$$

TAB.1: TEORIJSKE VREDNOSTI NORMALIZOVANOG KUMULANTA ŠESTOG REDA.

Modulacija	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
$\tilde{C}_{63,x}$	16.00	4.00	2.08	1.797

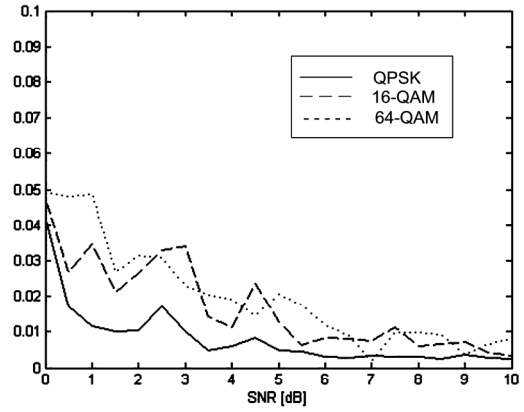
### A. Kanal sa aditivnim belim Gausovim šumom

Ukoliko se posmatra kanal u kom je prisutan samo AWGN varijanse  $\sigma_g^2$ , bez disperzije usled višestruke propagacije ( $L=1$ ,  $h(0)=1$ ), faktor  $\beta$  u izrazu (5) ima vrednost 1 i procedura izračunavanja  $\tilde{C}_{63,x}$  se može uprostiti za određivanje uticaja kanala.

Saglasno [5] poznato je da se usrednjavanjem nad  $k$  uzoraka slučajne promenljive koja ima normalnu raspodelu dobija promenljivu iste srednje vrednosti i  $k$  puta manje vrednosti varijanse. Brojne prethodno izvedene simulacije korišćenog AMC algoritma upućuju da je raspodela  $\tilde{C}_{63,x}$  u posmatranim tipovima modulacija (Tab.1) Gausovskog tipa [3], [4]. Stoga, ukoliko se estimacija  $\tilde{C}_{63,x}$  odredi  $k$  puta nad signalom (iste modulacije), pa potom izračuna srednja vrednost po ansamblu dobijenih rezultata, realno je očekivati dobitak u vidu smanjenja varijanse. Prethodno je od interesa uveriti se u centriranost vrednosti  $\tilde{C}_{63,x}$  u prisustvu šuma, budući da je ona neophodan preduslov za primenu procedure usrednjavanja. Sa tim ciljem izvršene su simulacije rada AMC algoritma za svaku od posmatranih kompleksnih modulacionih shema (QPSK, 16-QAM i 64-QAM), nad  $N=2000$  simbola emitovanog signala  $x(n)$ , za različite vrednosti odnosa signal-šum (SNR). Pri svakoj posmatranoj vrednosti SNR određena je vrednost tzv. „prosečnog normalizovanog apsolutnog

ofseta estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$ “, u oznaci  $\left| \frac{E(\hat{C}_{63,x}) - \tilde{C}_{63,x}}{\tilde{C}_{63,x}} \right|$ , gde

$\hat{C}_{63,x}$  predstavlja estimaciju normalizovanog kumulanta šestog reda određenog u skladu sa izrazom (5), pri čemu su odgovarajuća matematička očekivanja (izrazi (2) i (3)) određena kao srednje vrednosti po ansamblu, a  $\tilde{C}_{63,x}$  uzima vrednosti prikazane u Tab.1. Dobijene vrednosti prosečnog normalizovanog apsolutnog ofseta estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$  u zavisnosti od vrednosti SNR, za posmatrane tipove modulacija, prikazane su na Sl.1.



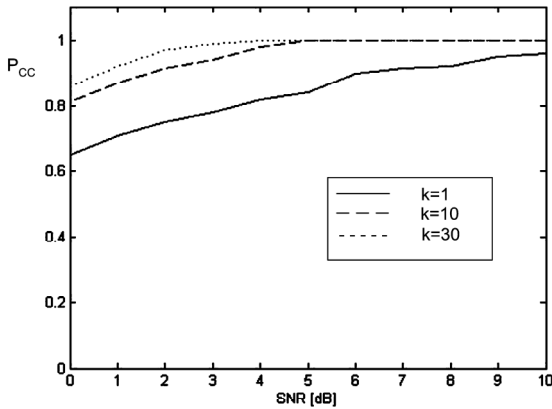
Sl.1. Normalizovani apsolutni ofset  $\tilde{C}_{63,x}$  u zavisnosti od SNR,  $N=2000$ , kanal sa AWGN.

Sa Sl.1 se može uočiti da vrednost normalizovanog apsolutnog ofseta estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$  raste sa smanjenjem vrednosti SNR, ali je za sve posmatrane kompleksne signale ona manja od 5%, u čitavom opsegu vrednosti SNR od 10dB do 0dB. Stoga možemo zaključiti da je estimacija  $\tilde{C}_{63,x}$  kompleksnih signala u posmatranom AMC algoritmu centrirana, za sve vrednosti SNR od interesa. Dakle, primena metode usrednjavanja nad ovom veličinom se može smatrati opravdanom.

Opisani AMC algoritam testiran je putem Monte Karlo eksperimenata, sa ciljem određivanja verovatnoće uspešne klasifikacije modulacija  $P_{CC}$  u zavisnosti od odnosa SNR, u scenariju kada kandidati za izbor modulacione tehnike pripadaju skupu {QPSK, 16-QAM, 64-QAM}. Izbor kandidata se vrši slučajno, sa međusobno jednakim verovatnoćama izbora. Simulacije su vršene pod identičnim uslovima kanala sa AWGN, kroz 2000 Monte-Karlo pokušaja, nad uzorcima od  $N=2000$  odbiraka signala za AMC u svakom eksperimentu. Zasebno su posmatrani slučajevi: 1) kada se estimacija  $\tilde{C}_{63,x}$  određuje kao srednja vrednost po ansamblu u  $k=30$  nezavisnih iteracija primene AMC algoritma, 2) kada se estimacija  $\tilde{C}_{63,x}$  određuje kao srednja vrednost po ansamblu u  $k=10$  nezavisnih iteracija primene AMC algoritma, i 3) kada se usrednjavanje ne primenjuje ( $k=1$ ). Dobijene vrednosti  $P_{CC}$  u zavisnosti od SNR za sve pomenute slučajeve grafički su prikazane na Sl. 2.

Rezultati prikazani na Sl.2 pokazuju da se očekivano povećanje vrednosti verovatnoće uspešne klasifikacije primenom tehnike usrednjavanja zaista postiže. Primenom samo  $k=10$  iteracija rezultati su, u poređenju sa situacijom kada se usrednjavanje ne primenjuje ( $k=1$ ), evidentno bolji: klasifikacija modulacija se sa  $k=10$  obavlja bez greške do vrednosti SNR od oko 4.5dB, i za sve niže vrednosti SNR vrednost  $P_{CC}$  je minimalno 15% veća nego u slučaju  $k=1$ . Takođe, povećanje broja  $k$  vodi ka daljem povećanju efikasnosti klasifikacije: za  $k=30$  klasifikacija se obavlja bez greške do vrednosti SNR od oko 3dB, i za sve niže vrednosti SNR vrednost  $P_{CC}$  je minimalno 5% veća

nego u slučaju  $k=10$ , tj. minimalno 20% veća nego u slučaju  $k=1$ .



SI.2. Verovatnoća ispravne klasifikacije za različite vrednosti  $k$ ,  $N=2000$ , kanal sa AWGN.

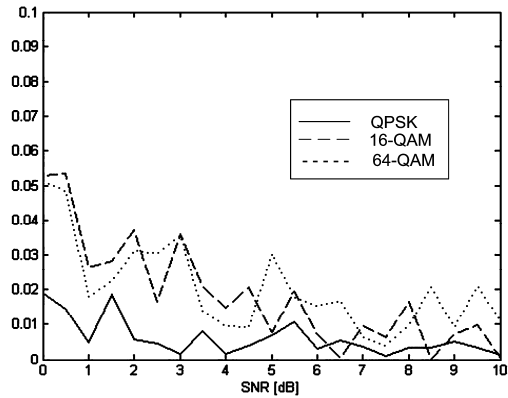
### B. Kanal sa višestrukom propagacijom poznatog impulsnog odziva

U slučaju kanala u kom pored AWGN snage  $\sigma_g^2$  dolazi i do pojave višestruke propagacije ( $L > 1$ ), faktor  $\beta$  u izrazu (5) (u opštem slučaju) može imati proizvoljnu vrednost. Ukoliko su vrednosti  $h(n), n = 0, 1, \dots, L-1$  a priori poznate na tački prijema, direktnom primenom vrednosti koeficijenata kanala u izrazu (6) određuje se tačna vrednost faktora  $\beta$ .

U radu [4] pokazano je da primena opisane procedure na QPSK, 16-QAM i 64-QAM signale rezultuje približno centriranim vrednostima  $\tilde{C}_{63,x}$ , koje odgovaraju veličinama prikazanim u Tab.1. Polazeći od ovih rezultata, može se zaključiti da i u slučaju kanala sa višestrukom propagacijom poznatog impulsnog odziva ima smisla očekivati poboljšanje uspešnosti klasifikacije kompleksnih signala, ukoliko se primeni tehnika usrednjavanja. Kao i u prethodno razmatranom modelu kanala, od interesa je najpre proveriti centriranost vrednosti  $\tilde{C}_{63,x}$  kada se u posmatrani scenario uvede i uticaj šuma. Sa tim ciljem izvršene su simulacije rada AMC algoritma za svaku od posmatranih kompleksnih modulacionih shema, i određena je vrednost prosečnog normalizovanog apsolutnog ofseta estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$  za različite vrednosti SNR. Kanal je generisan po ugledu na eksperimente izvršene u [4]:  $L=2$ ,  $h_0 = 1 - i * 0.5$ ,  $h_1 = 0.6 + i * 0.3$ ; vrednosti koeficijenata kanala su poznate prijemniku. Dobijene vrednosti prosečnog normalizovanog apsolutnog ofseta estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$  u zavisnosti od vrednosti SNR prikazane su na SI. 3.

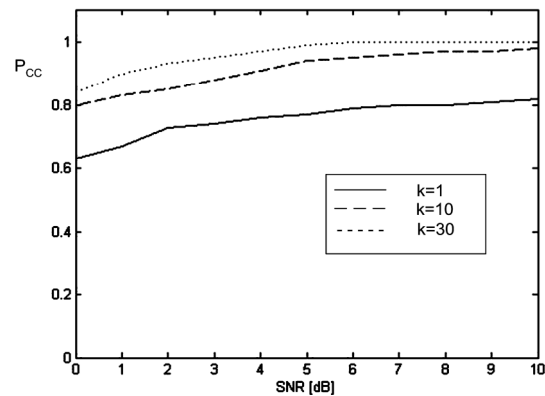
Sa SI.3 se može uočiti da je vrednost normalizovanog apsolutnog ofseta estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$ , za sve posmatrane kompleksne signale, u ovakvom scenariju manja od 5.5% u čitavom opsegu vrednosti SNR od 10dB do 0dB. Stoga se može zaključiti da je estimacija  $\tilde{C}_{63,x}$  kompleksnih signala i u slučaju kanala poznatog impulsnog odziva

centrirana za sve vrednosti SNR od interesa. Primena metode usrednjavanja nad ovom veličinom se ponovo može smatrati opravdanom.



SI.3. Normalizovani apsolutni ofset  $\tilde{C}_{63,x}$  u zavisnosti od SNR,  $N=2000$ , kanal sa AWGN i višestrukom propagacijom, poznatog impulsnog odziva.

Putem Monte Karlo eksperimenata (pod identičnim uslovima kao u Sekciji A)) analizirana je verovatnoća uspešne klasifikacije signala iz skupa {QPSK, 16-QAM, 64-QAM}, u posmatranom modelu kanala. Rezultati dobijeni bez primene tehnike usrednjavanja posmatrani su uporedo sa rezultatima dobijenim usrednjavanjem za  $k=10$  i  $k=30$ . Vrednosti  $P_{CC}$  u zavisnosti od SNR za sve pomenute slučajeve grafički su prikazane na SI.4.



SI.4. Verovatnoća ispravne klasifikacije za različite vrednosti  $k$ ,  $N=2000$ , kanal sa AWGN i višestrukom propagacijom, poznatog impulsnog odziva.

Rezultati prikazani na SI.4 pokazuju da se povećanje vrednosti  $P_{CC}$  primenom tehnike usrednjavanja postiže i u ovom slučaju: za  $k=10$  vrednost  $P_{CC}$  je 12-17% veća nego u slučaju  $k=1$ , a za  $k=30$  klasifikacija se obavlja bez greške zaključno sa  $\text{SNR}=4.5\text{dB}$  i vrednost  $P_{CC}$  je za sve niže vrednosti SNR oko 5% veća nego u slučaju  $k=10$ .

### C. Kanal sa višestrukom propagacijom nepoznatog impulsnog odziva

Služaj kada u kanalu, pored prisustva AWGN, dolazi i do pojave višestruke propagacije, a ne postoje nikakva a priori saznanja o stanju kanala (tj. o vrednostima  $h(n), n = 0, 1, \dots, L-1$ ) najvernije oslikava situaciju u

praksi. Tada vrednosti faktora  $\beta$  ne mogu biti određene u skladu sa izrazom (6), već je neophodno najpre izvršiti estimaciju koeficijenata kanala. U [2] je predložen sledeći metod: određuju se normalizovane estimacije koeficijenata kanala

$$\tilde{h}(k) = \frac{h(k)}{h(0)} = \frac{m_4^y(0, L-1, L-1, k)}{m_4^y(0, L-1, L-1, 0)}, \quad k = 0, 1, \dots, L-1, \quad (7)$$

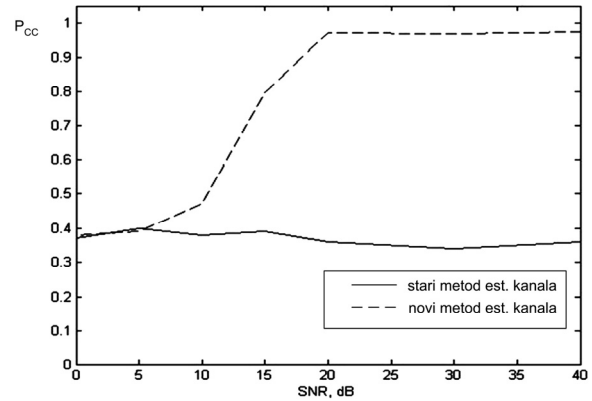
gde je  $m_4^y(0, \tau, \rho, \theta) = E\{y(n)y(n+\tau)y(n+\rho)y(n+\theta)\}$  moment četvrtog reda primljenog signala  $y(n)$ . Potom se dobijene vrednosti  $\tilde{h}(k)$  koriste umesto  $h(k)$  u izrazu (6), i na taj način dobijena vrednost  $\beta$  se koristi dalje u izrazu (5). U [1] je pokazano da klasifikacija čisto kompleksnih signala na opisani način ne daje naročito dobre rezultate. Kako simulacije pokazuju, estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$  dobijene opisanom procedurom nisu centrirane, pa primena metode usrednjavanja u ovom slučaju ne donosi nikakva poboljšanja.

U najnovijim istraživanjima [6] pokazano je da razlog lošim rezultatima u primeni pomenute metode leži u numeričkoj nestabilnosti izraza (7). Umesto njega, predlažemo da se estimacija koeficijenata kanala vrši preko momenata četvrtog reda primljenog signala sa fiksnim pomerajem  $f$ :

$$\hat{h}_n(k) = \frac{m_4^y(f, f, f, k)}{m_4^y(f, f, f, f)}, \quad k = 0, \dots, L-1. \quad (8)$$

Određivanje normalizovanih estimacija koeficijenata kanala  $\hat{h}_n(k)$  se obavlja  $L$  puta, za vrednosti  $f = 0, \dots, L-1$  nezavisno, i za svaku od ovih vrednosti se izračunati  $\hat{h}_n(k)$  koriste umesto  $h(k)$  u izrazu (6). Na kraju se estimacije  $\tilde{C}_{63,x}$  dobijene u ovih  $L$  koraka međusobno porede, i uzima se ona vrednost  $f$  za koju vrednost izračunatih estimacija  $\tilde{C}_{63,x}$  najmanje odstupa od teorijskih. U [6] je pokazano da se, u slučajevima kanala sa snažnom direktnom komponentom, numerička nestabilnost starog metoda estimacije (izraz (7)) uspešno otklanja primenom novog metoda estimacije koeficijenata kanala (izraz (8)).

Sa ciljem da se potvrdi očekivano poboljšanje performansi AMC algoritma u posmatranom tipu kanala usled primene novog metoda estimacije kanala, izvedeni su Monte Karlo eksperimenti (pod identičnim uslovima kao u prethodnim sekcijama), i posmatrana je vrednost  $P_{cc}$  u zavisnosti od SNR u problemu klasifikacije modulacija iz skupa {QPSK, 16-QAM, 64-QAM}. Kanal (nepoznatog impulsnog odziva) modelovan je na sledeći način:  $L=3$ ,  $h(0)=10$ , dok su ostali koeficijenti generisani kao nezavisne kompleksne Gausovske promenljive srednje vrednosti nula i varijanse  $\sigma_h^2 = 0.05$ . Rezultati dobijeni primenom starog metoda estimacije kanala posmatrani su uporedo sa rezultatima dobijenim primenom novog metoda estimacije kanala. Dobijene vrednosti  $P_{cc}$  u zavisnosti od SNR grafički su prikazane na Sl.5.



Sl.5. Verovatnoća ispravne klasifikacije kompleksnih signala,  $N=2000$ , kanal sa AWGN i višestrukum propagacijom, nepoznatog impulsnog odziva.

Rezultati prikazani na Sl. 5 nedvosmisleno potvrđuju veću efikasnost AMC sa novim metodom estimacije kanala. Kao i u slučaju primene metoda usrednjavanja (u prethodno analiziranim modelima kanala), cena koja se plaća za postignuta poboljšanja ogleda se u povećanju složenosti algoritma, većem zauzeću numeričkih resursa i vremenu potrebnom za procesiranje signala.

#### LITERATURA

- [1] V.D. Orlic and M.L. Dukic, "Automatic Modulation Classification Algorithm Using Higher-Order Cumulants Under Real-World Channel Conditions" *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 12, pp. 917–919, Dec. 2009.
- [2] H.-C. Wu, M. Saquib and Z. Yun, "Novel Automatic Modulation Classification Using Cumulant Features for Communications via Multipath Channels", *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 7, no. 8, pp. 3098–3105, August 2008.
- [3] V.D. Orlic and M.L. Dukic, "Properties of an Algorithm for Automatic Modulation Classification Based on Sixth-Order Cumulants", *Proc. of ICESS 2009 Conference*, Veliko Tarnovo, Bulgaria, 2009.
- [4] V.D. Orlic and M.L. Dukic, "Algorithm for automatic modulation classification in multipath channel based on sixth-order cumulants", *Proc. of TELSIS 2009 Conference*, Nis, Serbia, 2009.
- [5] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [6] V.D. Orlic and M.L. Dukic, "Multipath channel estimation algorithm for automatic modulation classification using sixth-order cumulants", *IET Electronics Letters*, vol. 46, no. 19, pp. 1348–1349, Sep. 2010.

#### ABSTRACT

In this paper some methods are presented for achieving more efficient classification of complex signals based on normalized sixth-order cumulants. Channel conditions with white noise only, with known and with unknown multipath propagation are considered separately, and solutions for improvement are offered in each case. Analysis is verified via Monte Carlo simulations.

#### METHODS FOR IMPROVING CLASSIFICATION OF COMPLEX SIGNALS BASED ON SIXTH-ORDER CUMULANTS

Vladimir D. Orlic and Miroslav L. Dukic