

Uticaj kanala na performanse algoritma za automatsku klasifikaciju modulacija

Vladimir Orlić, *IMTEL Komunikacije A.D.* i Miroslav L. Dukić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj — Automatska klasifikacija modulacija predstavlja jedan od najaktuelnijih izazova u savremenim telekomunikacijama. Budući da degradacija kvaliteta signala do koje dolazi usled višestruke propagacije, izuzetno utiče na performanse telekomunikacionog sistema, ona se nužno odražava i na efikasnost primenjenog postupka automatske klasifikacije modulacija. U ovom radu analiziran je jedan novi algoritam automatske klasifikacije modulacija baziran na statistici višeg reda, u kontekstu realnih modela kanala sa višestrukom propagacijom. Algoritam je testiran tokom brojnih simulacija sa ciljem da se što preciznije ispita opravdanost njegove potencijalne primene u praksi.

Cljučne reči — Automatska klasifikacija modulacija, višestruka propagacija, kanali za prenos, modeli kanala.

I. UVOD

AUTOMATSKA klasifikacija modulacija (*Automatic Modulation Classification* – AMC) obično se analizira sa aspekta primene u kognitivnim radio-sistemima, kao i sistemima za nadzor i elektronski rat: mogućnost određivanja tipa modulacije bez ikakvih a priori informacija o impulsnom odzivu kanala i snazi signala, sa zadovoljavajućom pouzdanošću i uz mogućnost praćenja eventualnih promena oba ova parametra tokom vremena, neophodna je za uspešno funkcionisanje pomenutih telekomunikacionih sistema. Postoje različiti pristupi problematici AMC, među kojima se, zbog svoje jednostavnosti, naročito ističu tehnike „prepoznavanja obrazaca“ u signalu. Kod ovog pristupa vrši se najpre procena parametara od interesa, a potom se na osnovu vrednosti ovih parametara donosi odluka o primenjenom tipu modulacije na osnovu unapred formiranog kriterijuma. Kao parametri od interesa najčešće se analiziraju elementi statistike višeg reda – momenti i kumulanti.

U dosadašnjim naporima za pronalaženje AMC algoritama koji daju kvalitetne rezultate, uglavnom je analizirano dejstvo kanala sa aditivnim belim Gausovim šumom na performanse AMC, dok je znatno manja pažnja posvećena uticaju kanala sa izraženom višestrukoum propagacijom. Jedan novi algoritam, baziran na analizi kumulanata četvrtog reda kao parametrima od interesa, po

prvi put direktno uzima u obzir uticaj kanala na proces automatske klasifikacije modulacija, [1]. Predloženi metod ne zahteva precizno poznavanje impulsnog odziva kanala, i samim tim je interesantan za potencijalnu upotrebu u praksi. Budući da je zasnovan na statistici, ovaj algoritam je testiran putem simulacija koje su pokazale zadovoljavajuće rezultate. Međutim, model kanala upotrebljen tokom ovih testova ne može se smatrati u potpunosti realnim. Sa željom da se stvori jasnija slika o praktičnim mogućnostima predloženog metoda, sprovedena je dodatna analiza njegovog ponašanja na modelima kanala sa višestrukoum propagacijom koji odgovaraju realnim uslovima propagacije. U tekstu koji sledi opisan je posmatrani AMC algoritam zatim modeli kanala nad kojima je algoritam testiran, kao i dobijeni rezultati.

II. AMC ALGORITAM

Algoritam koji se analizira baziran je na određivanju vrednosti normalizovanih kumulanata četvrtog reda, za čije opisivanje se koristi 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 primenjenom modulacionom postupku, pri čemu tip modulacije i energija simbola nisu unapred poznati, $h(n), n=0,1,\dots,L-1$ predstavlja koeficijente impulsnog odziva prenosnog kanala dužine L , $y(n)$ je primljena sekvenca simbola i $g(n)$ predstavlja aditivni beli Gausov šum srednje vrednosti nula i varijanse σ_g^2 .

Ukoliko sa $E(\cdot)$ označimo matematičko očekivanje, kumulant četvrtog reda $C_{42,x}$ promenljive x , kumulant drugog reda $C_{21,x}$ i normalizovani kumulant četvrtog reda po istoj promenljivoj $\tilde{C}_{42,x}$ se, redom, definišu kao:

$$C_{42,x} = E(|x^4|) - |E(x^2)|^2 - 2E^2(|x^2|) \quad (2)$$

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

$$\tilde{C}_{42,x} = \frac{C_{42,x}}{C_{21,x}^2} \quad (4)$$

V. 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.bg.ac.yu).

Vrednosti normalizovanog kumulanta četvrtog reda za nekoliko uobičajenih modulacionih tehnika prikazane su u Tab. 1.

TAB. 1: TEORIJSKE VREDNOSTI NORMALIZOVANOG KUMULANTA ČETVRTOG REDA.

Modulacija	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
$\tilde{C}_{42,x}$	-2.000	-1.000	-0.680	-0.6191

Izračunate teorijske vrednosti normalizovanog kumulanta četvrtog reda treba dovesti u vezu sa signalom na prijemu $y(n)$, jer se određivanje primenjenog postupka modulacije obavlja upravo na osnovu primljenog signala. Imajući u vidu relacije (1), (2) i (3), moguće je odrediti kumulante drugog i četvrtog reda po promenljivoj y - $C_{21,y}$ i $C_{42,y}$, a zatim na osnovu ovih veličina i normalizovani kumulant četvrtog reda po promenljivoj x . Pokazuje se da važi sledeća relacija[1]:

$$\tilde{C}_{42,x} = \frac{1}{\beta} \frac{C_{42,y}}{(C_{21,y} - \sigma_g^2)^2} \quad (5)$$

gde je uticaj šuma iskazan kroz varijansu σ_g^2 , dok se uticaj kanala opisuje putem:

$$\beta = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} |h(k)|^4}{\left(\sum_{k=0}^{L-1} |h(k)|^2\right)^2} \quad (6)$$

Kao što se može uočiti iz izraza (5), uticaj kanala, manifestovan kroz faktor β , je od krucijalnog značaja za rad predloženog algoritma. Kako je za određivanje tačne vrednosti ovog faktora neophodno poznavanje odbiraka impulsnog odziva kanala $h(k)$, koji u praksi nisu poznati, predlaže se metod za estimaciju koeficijenta kanala pomoću momenata četvrtog reda:

$$m_4^y(\tau, \rho, \theta) = E\{y(n)y(n+\tau)y(n+\rho)y(n+\theta)\} \quad (7)$$

Može se pokazati da ukoliko se u gornjem izrazu uvrste vrednosti $\tau = \rho = L-1$ i $\theta = k$, za $k = 0, 1, \dots, L-1$, dobija se sledeća relacija:

$$m_4^y(L-1, L-1, k) = \gamma_x^4 h(0)h(L-1)h(L-1)h(k) \quad (8)$$

gde prvi faktor sa desne strane znaka jednakosti ima vrednost $\gamma_x^4 = E\{x(n)^4\}$. Ukoliko se dodatno odredi vrednost momenta četvrtog reda za $k=0$, dobija se:

$$m_4^y(L-1, L-1, 0) = \gamma_x^4 h(0)h(L-1)h(L-1)h(0) \quad (9)$$

pa deljenjem izraza (8) izrazom (9) dobijamo tzv. normalizovane koeficijente kanala $\tilde{h}(k)$:

$$\tilde{h}(k) = \frac{h(k)}{h(0)} = \frac{m_4^y(L-1, L-1, k)}{m_4^y(L-1, L-1, 0)}, \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (10)$$

Imajući u vidu desnu stranu prethodnog izraza i izraz (7), jasno je da se vrednosti $\tilde{h}(k)$ mogu određivati direktno na osnovu primljenog signala $y(n)$. Pomoću $\tilde{h}(k)$ može se dalje odrediti i faktor β . Uvidom u izraz (6) može se zaključiti da ukoliko se vrednosti $h(k)$ zamene sa $\tilde{h}(k)$, vrednost β ostaje nepromenjena. Za određivanje kumulanta $C_{21,y}$ i $C_{42,y}$ ponovo je dovoljno analizirati samo odbirke $y(n)$ (kao u izrazima (2) i (3)), pa je pri poznatoj vrednosti srednje snage prisutnog šuma σ_g^2 , moguće izračunati $\tilde{C}_{42,x}$ na način opisan relacijom (5). Naravno, statističko očekivanje različitih veličina se prilikom ovih proračuna estimira srednjom vrednošću na uzorcima od N članova primljenog niza. Prostim poređenjem izračunate vrednosti $\tilde{C}_{42,x}$ sa teorijskim vrednostima prikazanim u Tabeli 1 može se, doneti odluka o primenjenom modulacionom postupku.

III. MODEL KANALA

Prikazani algoritam je, prema do sada objavljenim rezultatima, testiran putem računarskih simulacija u dva osnovna slučaja: 1) kada se signal prenosi korišćenjem BPSK ili QPSK modulacionog postupka, sa jednakom verovatnoćom izbora jedne od ove dve tehnike modulacije, i 2) kada se signal prenosi sa QPSK/16-QAM/64-QAM, takođe sa jednakim verovatnoćama izbora jedne od tri navedene tehnike modulacije. Simulacije su izvedene za različite odnose signal/šum, u situacijama kada je kanal idealan, kao i kada kanal opisuje „višestruku propagaciju sa Rejljevom fadingom“, [1]. Odabrani model kanala kojim se simulira višestruka propagacija pobuđuje najviše pažnje: naime, koeficijenti kanala $h(k)$, $k = 0, \dots, L-1$ su generisani tako da vodeći koeficijent $h(0)$ uvek ima vrednost jedan, dok su ostali koeficijenti nezavisne kompleksne Gausove slučajne promenljive, srednje vrednosti nula i varijanse $\sigma_h^2 = 0.05$. Simulacije su potom ponovljene za različite vrednosti dužine impulsnog odziva kanala (broja putanja sa višestrukou propagacijom) L .

Ukoliko se ima u vidu tzv. Turinov model kanala, [2], koji je nastao kao rezultat velikog broja praktičnih eksperimenata i čiji zaključci u velikoj meri odgovaraju teorijskim i praktičnim razmatranjima na temu modelovanja kanala u bežičnim telekomunikacionim sistemima, može se uočiti da model sa „Rejljevom fadingom“ odabran prilikom testiranja predloženog AMC algoritma ne odgovara realnim uslovima propagacije. Ovo sledi direktno iz samog Turinovog modela kanala sa višestrukou propagacijom:

$$h(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k x(t-t_k) e^{i\theta_k} + n(t) \quad (11)$$

gde amplitude putanja višestruke propagacije a_k , u slučaju trasa relativno malih dimenzija (oko stotinu talasnih dužina) podležu Rejlijevoj ili Rajsovoj statistici, dok su na većim rastojanjima njihove vrednosti distribuirane po zakonu log-normalne raspodele. Ovaj izbor u potpunosti je konzistentan u slučaju komunikacija tipa tačka-tačka na velikim rastojanjima, gde se pokazuje da short-term fading ima Rejljevku ili Rajsovu raspodelu, dok long-term fading podleže log-normalnom zakonu raspodele, [3]. Iako Turinova istraživanja pokazuju da veličine a_k nisu u potpunosti nekorelisane, često se koristi uprošćeni model u kojem se ove vrednosti generišu kao međusobno nezavisne veličine, [4]. Ovaj pristup je zbog jednostavnosti primenjen i u ovom radu. Faze različitih putanja θ_k su međusobno nezavisne slučajne promenljive sa uniformnom raspodelom na intervalu $(0, 2\pi]$. Ukoliko se trenutak nailaska signala po direktnoj („Line Of Sight“) putanji označi sa t_0 , na osnovu eksperimenata se može tvrditi da relativna kašnjenja signala po različitim putanjama $\{t_0 - t_k\}_1^\infty$ približno podležu Poasonovoj raspodeli čiji se srednji intenzitet dolazaka određuje sa empirijskih krivih. U gornjem izrazu $n(t)$ predstavlja kompleksni beli Gausov šum.

Na osnovu iznetih karakteristika realnog kanala nije teško izvesti zaključke o nedostacima modela kanala koji je upotrebljen prilikom testiranja performansi predstavljenog AMC algoritma. Iako se za koeficijente kanala $h(k), k \neq 0$, generisane kao nezavisne kompleksne Gausove slučajne promenljive navedenih karakteristika, može konstatovati Rejljeva raspodela amplituda i približno uniformna raspodela faza, fiksiranjem vrednosti koeficijenta $h(0)=1$ se obe ove raspodele drastično narušavaju. Stoga naziv „Rejljev fading“ nije opravdan. Treba istaći da na osnovu izraza (10) vodeći koeficijent normalizovanih vrednosti koeficijenata kanala uvek uzima vrednost $\tilde{h}(0)=1$, pa je realno očekivati da rezultati simulacije kanalom sa $h(0)=1$ budu bolji od onih koji odgovaraju realnoj slici. Kao dodatak na sve već pomenuto, relativna kašnjenja različitih putanja su uzeta kao međusobno ekvidistantno pomešana u odnosu na $h(0)$, a različiti realni tipovi raspodela amplituda uopšte nisu razmatrani u zasebnim simulacijama.

Stoga je predstavljeni AMC algoritam simuliran sa realnim modelima kanala, po uzoru na Turinov model prikazan u ovom poglavlju. Simulacije su obavljene sa ciljem da se stekne pouzdanija slika o mogućnostima algoritma, pod identičnim uslovima kao prilikom testiranja opisanih u originalnom radu [1], i dobijeni rezultati su prikazani u nastavku ovog teksta.

IV. ANALIZA PERFORMANSI AMC ALGORITMA U REALNIM USLOVIMA

Opisani AMC algoritam testiran je putem Monte Karlo postupka, sa ciljem određivanja verovatnoće uspešne klasifikacije modulacija P_{CC} u zavisnosti od odnosa

signal/šum. Analizirana su sledeća dva scenarija: 1) kada kandidati za izbor modulacione tehnike pripadaju skupu {BPSK, QPSK}, i 2) kada pripadaju skupu {QPSK, 16-QAM, 64-QAM}. U svakom od scenarija izbor kandidata se vrši slučajno, sa međusobno jednakim verovatnoćama izbora.

Kanal je modelovan u četiri različite varijante za svaki od senarija: kao Turinov model kanala sa višestrukum propagacijom sa Rejljevom, Rajsovom i log-normalnom raspodelom, uporedo sa modelom kanala koji je korišćen prilikom originalnih testiranja. Simulacije su vršene pod identičnim uslovima za svaki od četiri modela kanala, kroz 2000 Monte-Karlo pokušaja, i nad uzorcima od N odbiraka signala za AMC u svakom eksperimentu. Originalni kanal je modelovan na način identičan onom opisanom ranije; Turinov kanal sa Rejljevom raspodelom formiran je po uzoru na „originalni“ model kanala – amplitude a_k su generisane kao amplitude kompleksnog Gausovog procesa čiji i realni i imaginarni deo poseduju srednje vrednosti nula i varijanse $\sigma_h^2 = 0.05$

($R \sim Rayleigh(\sigma_h)$, $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $X, Y \sim N(0, \sigma_h^2)$); amplitude a_k su kod modela kanala sa Rajsovom raspodelom generisane preko ortogonalnih Gausovih promenljivih sa varijansom $\sigma_h^2 = 0.05$, srednjih vrednosti odabranih tako da parametar Rajsove raspodele ν bude jednak 0.8 ($R \sim Rice(\sigma_h, \nu)$, $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $X \sim N(\nu \cos \theta, \sigma_h^2)$,

$Y \sim N(\nu \sin \theta, \sigma_h^2)$, $\nu = 0.8$, $\theta = \pi/6$, $\sigma_h^2 = 0.05$); dok su u slučaju log-normalne raspodele parametri odabrani tako da $20 \log_{10} a_k$ ima normalnu raspodelu sa srednjom vrednošću $\mu_h = 0$ i varijansom $\sigma_h^2 = 0.01$ ($X \sim N(\mu_h, \sigma_h^2)$, $\exp(X) \sim Log - N(\mu_h, \sigma_h^2)$). U svakom od Turiniovih modela kanala posebno su generisane faze θ_k kao međusobno nezavisne slučajne promenljive sa uniformnom raspodelom na intervalu $(0, 2\pi]$, dok su relativna kašnjenja pojedinačnih putanja formirane kao celobrojne nezavisne promenljive sa Poasonovom raspodelom, generisane po Knuth-ovom algoritmu [5], sa srednjim intenzitetom dolaska $\lambda_k = 3.55$, i kojih je tokom svake simulacije za kanal sa L koeficijenata formirano ukupno $2L$, ali tako da različitih vrednosti pomeraja, pa samim tim i koeficijenata kanala bude L . Precizirane vrednosti parametara su, gde god je to moguće, odabrane tako da odgovaraju rezultatima Turiniovih eksperimenata ([2,4]) dok su ostale vrednosti odabrane tako da budu poređive sa parametrima „originalnog“ modela kanala.

Na Sl. 1 prikazani su rezultati simulacije u slučaju scenarija sa dve modulacije (scenario 1)), sa kanalom dužine $L=4$, na osnovu uzorka od $N=250$ odbiraka za svaki od 2000 Monte-Karlo eksperimenata. Isti scenario ponovljen je za slučaj $L=10$, sa $N=500$ odbiraka, i rezultati su prikazani na Sl. 2. Scenario sa tri modulacije (scenario 2)) analiziran je, takođe, u slučaju kanala sa $L=4$ ($N=2000$) i u slučaju $L=10$ ($N=4000$) koeficijenata – ovi rezultati su prikazani na Sl. 3 i Sl. 4, redom.

V. ZAKLUČAK

Kao što se može uočiti sa prikazanih grafika, rezultati simulacija pokazuju da je teza o neophodnosti provjere rada algoritma za automatsku klasifikaciju modulacija putem realnih modela propagacionog kanala opravdana. Za veće vrednosti odnosa signal/šum verovatnoća uspešne klasifikacije za analizirane modele kanala ima vrlo bliske vrednosti, dok pri manjim odnosima signal/šum razlika u rezultatima kod „originalnog“ i realnih modela kanala je sasvim vidljiva. Kao što se moglo očekivati, specifični način formiranja koeficijenata kanala sa kojim je vršena inicijalna evaluacija prikazanog algoritma implicira rezultate bolje nego što realne mogućnosti ovog algoritma zaista jesu. Dodatno se još može potvrditi da su u slučaju scenarija 2) rezultati lošiji nego u scenariju 1), zbog drastično manjih rastojanja među očekivanim vrednostima $\tilde{C}_{42,x}$; takođe, kod kanala sa većom dužinom impulsnog odziva (većim brojem višestrukih putanja) performanse algoritma su lošije, i potreban je veći broj odbiraka (N) prilikom analize da bi se postigla željena pouzdanost prilikom procesa klasifikacije. Generalno govoreći, rezultati simulacija ostavljaju prostor za razmatranje rešenja kojim bi se ovaj algoritam mogao poboljšati. Jedno od njih bi se moglo pronaći u vidu efikasnije metode za estimaciju koeficijenata kanala.

LITERATURA

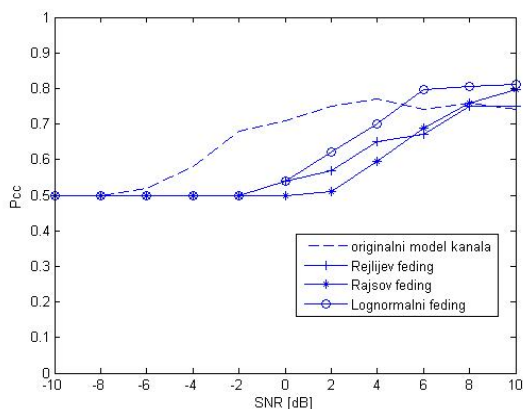
- [1] H.-C. Wu, M. Saquib and Z. Yun, “Novel Automatic Modulation Classification Using Cumulant Features for Communications via Multipath Channels”, *IEEE Trans. Wireless Communications.*, vol. 7, no. 8, August 2008., pp. 3098–3105.
- [2] G.L. Turin, F.D. Clapp, T.L. Johnston, S.B. Fine and D. Lavry “A Statistical Model of Urban Multipath Propagation”, *IEEE Trans. Vehicular Technology.*, vol. VT-21, no. 1, February 1972., pp. 1–9.
- [3] M.D. Yacoub, *Fundamentals of Mobile Radio Engineering*, CRC-Press, 1993.
- [4] G.L. Turin, W.S. Jewell and T.L. Johnston, “Simulation of Urban Vehicle-Monitoring Systems”, *IEEE Trans. Vehicular Technology.*, vol. VT-21, no. 1, February 1972., pp. 9–16.
- [5] D.E. Knuth, *The Art of Computer Programming, Volume II: Seminumerical algorithms*, Addison Wesley, 1969.

ABSTRACT

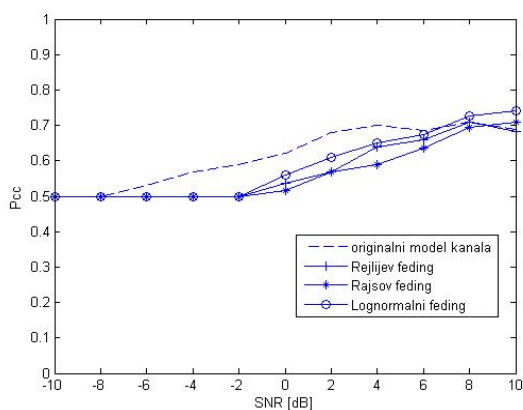
Automatic modulation classification represents one of the most up-to-date topics in modern telecommunications. Since signal distortion due to multipath propagation seriously reduces the communication system’s performance, it has influence on efficiency of applied classification algorithms. In this paper one novel automatic modulation classification method under the terms of realistic multipath propagation channel models is analyzed. This method has been tested through a number of simulations, with a goal to evaluate it’s ability to deal with real-world propagation conditions.

INFLUENCE OF CHANNEL ON PERFORMANCE OF ONE AUTOMATIC MODULATION CLASSIFICATION ALGORITHM

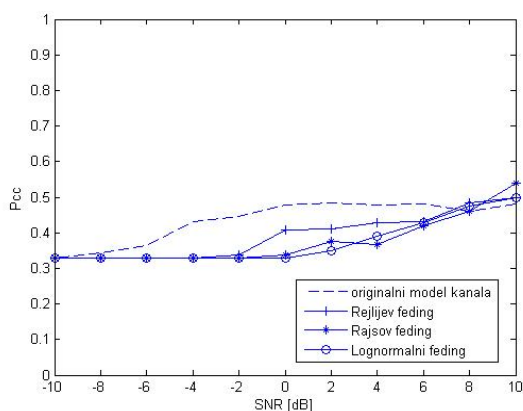
V. Orlić, M. L. Dukić



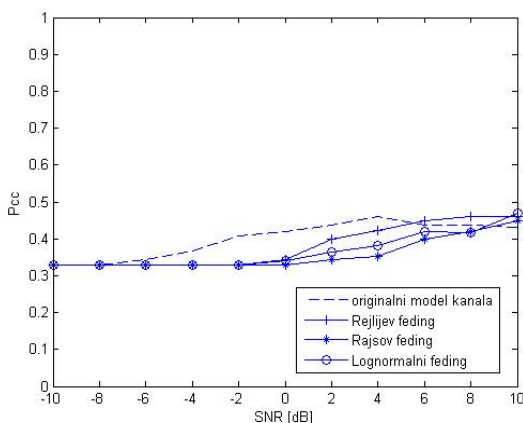
Sl. 1. Verovatnoća ispravne klasifikacije za scenario 1) (L=4, N=250)



Sl. 2. Verovatnoća ispravne klasifikacije za scenario 1) (L=10, N=500)



Sl. 3. Verovatnoća ispravne klasifikacije za scenario 2) (L=4, N=2000)



Sl. 4. Verovatnoća ispravne klasifikacije za scenario 2) (L=10, N=4000)