

MODEL BAFERA U SISTEMU SA ADAPTIVNOM MODULACIJOM I KODIRANJEM PRIMENJEN NA BEŽIČNI KANAL

A BUFFER MODEL OF SYTEM WITH ADAPTIVE MODULATION AND CODING APPLIED IN WIRELESS CHANNEL

Zoran Veličković, *Visoka tehnička škola Niš*
Milojko Jevtović, *Jugoslovenska inženjerska akademija*

Sadržaj – Optimizacija performansi bežičnih komunikacionim sistemima zahteva zajedničko razmatranje mrežnih parametara svih ISO/OSI slojeva. Za primenu MDP optimizacionih algoritama, modeliran je bafer ograničenog kapaciteta zasnovan na Markovljevom nizu. Određena je tranziciona matrica za paketski saobraćaj modeliran Poasonovom raspodelom. Testiranje modela bafera u simulacionom okruženju pokazuje dobro slaganje sa teorijskim pretpostavkama.

Abstract – A performance optimization of the communication systems requires common consideration of the network parameters for all ISO/OSI layers. The buffer of limited capacity is modeled as Markov chain to support application of the MDP optimization algorithms. The transition matrix for Poisson's packet traffic distribution is determined. In the simulation environments the model of the buffer is tested and the results shows good agree with theoretic assumption.

1. UVOD

Savremeni servisi mobilnih komunikacija zahtevaju optimizaciju mrežnih resursa kako bi se zadovoljili strogi zahtevi kvaliteta usluga QoS (engl. Quality of Service). Zadovoljenje QoS-a kod mobilnih multimedijalnih komunikacije je izazovan zadatak obzirom na vremenski promenljive transmisionne karakteristika bežičnog komunikacionog medijuma. ITU-T preporukom G.1010 su definisani ključni faktori koji utiču na QoS iz perspektive korisnika [1]. Ovom preporukom su obuhvaćene aplikacije koje sadrže video, govor, statične slike, podatke i tekst. Na ovaj način, ITU-T je standardizovao veliki skup klasa QoS kategorija različitih aplikacija u odnosu na krajnjeg korisnika. Osnovni problem koji treba rešiti kod mobilnih multimedijalnih aplikacija je kako u promenljivim uslovima komunikacionog kanala garantovati QoS korisniku? Ključni faktori koji utiču na ocenu kvaliteta usluga koje definiše preporuka G.1010 su: *kašnjenje*, *varijacija kašnjenja* i *gubitak informacija*. Kašnjenje uključuje vreme potrebno za uspostavljanje usluge, vreme potrebno za prenos podataka preko mreže i vreme obrade podataka u terminalu. Kašnjenje ima direktan uticaj na subjektivni osećaj korisnika datom uslugom [2]. Varijacija kašnjenja nastaje kao posledica promenljivog vremena dolaska pojedinačnih paketa na odredište. Servisi koji ne tolerišu varijaciju kašnjenja moraju imati ugrađene mehanizme za otklanjanje varijacije kašnjenja. Gubitak informacije ima direktan uticaj na kvalitet prenete poruke. Ovaj faktor ima uticaja na sve medije i uključuje gubljenje paketa, pakete sa greškama i efekte nastale usled kodovanja sa gubicima. Veličina bafera u komunikacionom čvoru ima značajan uticaj na broj odbačenih paketa. Takođe, tip frejma, odnosno dinamika

sadržaja mogu značajno uticati na broj odbačenih paketa. U ovom radu je razmatran model bafera u komunikacionom čvoru koji se puni paketima sa određenom dinamikom, a istovremeno omogućava dinamičko upravljanje njegovim pražnjenjem. Zajedničkim razmatranjem kvaliteta komunikacionog kanala na prvom-fizičkom sloju i stanja bafera na drugom sloju, adaptiraju se mrežni parametri u cilju povećanja propusnog opsega bežičnog kanala. Jasno je da stroge QoS zahteve mobilnih multimedijalnih aplikacija ne može da zadovolji klasična slojevita organizacija ISO/OSI steka protokola [3]. Kod klasične mrežne organizacije steka protokola, svaki mrežni sloj prima usluge nižeg sloja, a sam pruža usluge višem sloju. Svaki sloj nezavisno optimizuje sopstvene mrežne parametre. Razmena usluga i podataka se obavlja samo između susednih slojeva, što u standardnoj međuslojnoj organizaciji predstavlja ograničavajući faktor pri realizaciju optimalnih multimedijalnih mobilnih komunikacija. Ovo je razlog što se u standardnom bežičnom mrežnom okruženju mogu realizovati samo sub-optimalni mrežni algoritmi. Optimalna transmisiona politika podrazumeva dostupnost svim parametrima na svim mrežnim slojevima u steku protokola. Dakle, osnovni preduslov za realizaciju optimalnih mrežnih algoritama u bežičnom mrežnom okruženju je obezbeđivanje proizvoljne međuslojne komunikacije. Združeno optimizovanje mrežnih parametara svih mrežnih slojeva naziva se cross-layer dizajn (dizajn prepletenih slojeva). U literaturi je prikazano nekoliko mogućih rešenja cross-layer dizajna, a većina njih se nalazi u eksperimentalnoj fazi [4], [5]. Jedno rešenje bazirano na arhitekturi sa deljenom bazom podataka između mrežnih slojeva prikazano je u [6].

U literaturi su predloženi metodi za analizu i optimizaciju mrežnih parametara od dna prema vrhu (bottom-

up) i od vrha prema dnu (top-down) steka protokola [3]. Optimizacione metode se u osnovi mogu svrstati u dve kategorije: *korisnički orijentisane* (engl. user-centric) i *mrežno orijentisane* (engl. network centric). Za realizaciju optimizacionih metoda koje su orijentisane prema korisniku najčešće se koristi Markovljev proces odlučivanja (engl. Markov decision process MDP) [7]. Generalizacija matematičkog aparata za jednu klasu mrežno orijentisanih optimizacionih algoritama dat je u radu [8] i bazira se na konveksnoj optimizaciji (engl. convex optimization) [9]. Najčešće se kao kriterijumi za optimizaciju postavljaju QoS zahtevi (kašnjenje, varijacija kašnjenja i gubitak informacija). Pored uobičajenih QoS zahteva, kod mobilnih komunikacionih sistema se postavlja još jedan izuzetno važan u ovim sistemima. Ovaj zahtev se odnosi na minimizaciju potrošnje energije. Za realizaciju standardnih QoS zahteva kojima je pridružen zahtev za minimizaciju potrošnje energije koriste se algoritmi sa prepletenim mrežnim slojevima.

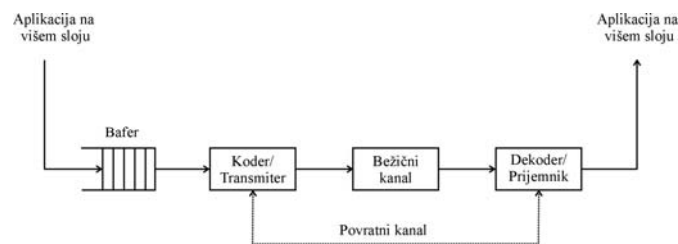
U ovom radu se posebno razmatra efekat gubljenja paketa usled ograničenog bafera u mobilnom čvoru. Model bafera konačne dužine u komunikacionom čvoru je samo deo modela kompletnog komunikacionog sistema (sl. 1). Modelovanje Markovljevimi nizovima komunikacionog kanala na fizičkom (PHY) sloju i bafera na drugom (MAC-LLC) sloju, omogućava se primena kompozitne optimizacione MDP metode. U sekciji 2 je prikazan model komunikacionog sistema koji obuhvata dva ISO/OSI sloja. Razmatrana je interakcija fizičkog (PHY) sloja i sloja voda podataka (MAC-LLC), kao i transmisioni modovi koji stoje na raspolaganju. U sekciji 3 je prikazan Markovljev model bafera komunikacionog čvora. Specifičnost ovog modela je da se bafer puni paketima prema Poasonovoj raspodeli, a da se prazni adaptibilnom brzinom koristeći MQAM modulaciju. Ovo je glavni rezultat ovog rada jer omogućava primenu optimizacionih algoritama baziranih na MDP-u. Rezultati simulacije modela bafera komunikacionog kanala prikazani su u sekciji 4. Ilustrovani su dobijeni rezultati gubljenja paketa za različite kapacitete bafera usled prekoračenja kapaciteta.

2. MODEL KOMUNIKACIONOG SISTEMA

Sistem sa jednim mobilnim korisnikom, prikazan na slici 1, je razmatran u ovom radu. Analiza rada prikazanog sistema je razmatrana kroz sukcesivne vremenske sekvence jednakog trajanja (engl. frame) T_f . Frejm i obuhvata vremenski period od $[i \cdot T_f, (i+1) \cdot T_f]$ i za njega se specificira broj paketa A_i koji su pristigli u bafer. Tek po isteku vremenskog frejma i na postojeće stanje bafera se dodaje broj prispelih paketa (A_i). Indeks i se može izostaviti za slučaj nezavisne i identične raspodele (engl. independet and identically distributed - iid). Statistička raspodela broja paketa koji pristižu u bafer za vreme trajanja frejma je poznata. Srednja vrednost broja paketa koji pristignu u bafer je označena sa λ , odnosno

$$\lambda = E\{A_i\}, \quad (1)$$

gde je $E\{\bullet\}$ operator matematičkog očekivanja. Pretpostavljeno je da su svi paketi jednake dužine L bitova. Bafer je ograničenog kapaciteta i može primiti samo B paketa.



Slika 1. Bežični komunikacioni sistem sa jednim korisnikom i ograničenim kapacitetom bafera. Povratni kanal obezbeđuje komunikaciju predajne i prijemne strane.

Svi paketi koji pristignu u trenutku kada je bafer potpuno popunjen biće odbačeni i smatraće se izgubljenim. U slučaju kada bafer nije potpuno popunjen, dopunjuje se do maksimuma (B) pristiglim paketima, a preostali paketi se odbacuju i smatraju se izgubljenim. Uticaj komunikacionog kanala na optimalnu transmisionu politiku je vrlo značajan. Analiza uticaja kanala sa fedingom na određivanje optimalne transmisionne politike se bazira na Markovljevimi nizovima sa konačnim brojem stanja [10]. U ovom radu se ne razmatra uticaj kvaliteta komunikacionog kanala, već se analizira uticaj konačne dužine bafera na odbacivanje paketa u komunikacionom čvoru. Združeno razmatranje uticaja PHY sloja i MAC(LLC) sloja na optimalnu politiku biće analizirano u narednim radovima.

Punjenje bafera komunikacionog kanala je modelovano Poasonovom raspodelom a sa srednjom brzinom punjenja od λ paketa u sekundi. Pražnjenje bafera komunikacionog čvora se odvija adaptibilnom brzinom koja je u funkciji broja pristiglih paketa i zahtevanih uslova optimizacije. Adaptacija brzine pražnjenja paketa iz bafera se realizuje promenom konstelacione veličine M , kvadraturene amplitudske modulacije (QAM) uz fiksiranje brzine simbola. Ova funkcija se ostvaruje u bloku koder-transmitter (sl. 1). Standardom IEEE 802.11a definisani su modovi rada na fizičkom sloju koji omogućavaju adaptaciju transmisionne politike. U tabeli 1 date su raspoložive kodno-modulacione šeme prema IEEE 802.11a standardu. Međutim, ovim standardom nisu definisani kriterijumi primene pojedinih modulacionih šema. Algoritmi primene adaptivnih modulacionih šema realizuju korisnici prema svojim zahtevima. Modelovanje komunikacionog bafera omogućava analizu i određivanje optimalne transmisionne strategije u komunikacionom sistemu. Razmatrana optimalna transmisiona politika treba da minimizira srednju vrednost odbačenih paketa koji potiču usled prepunjavanja bafera. Maksimizacija propusne moći komunikacionog sistema sa fiksiranim BER-om je ekvivalentna minimizaciji odbačenih paketa usled prepunjavanja bafera [10].

3. MODEL BAFERA KONAČNE DUŽINE

Bafer komunikacionog čvora konačne dužine se popunjava paketima koji pristižu sa viših slojeva steka protokola (sl. 1). Dinamika pristizanje paketa u bafer je modelovana Poasonovom raspodelom. Punjenje, odnosno pražnjenje bafera, se odvija u jednakim diskretizovanim vremenskim okvirima (frejmovima). Ako u trenutku pristizanja paketa bafer nije ispunjen do kraja, pristigli paket se smešta po principu steka. Međutim, ako je u trenutku pristizanja paketa, bafer pun, dolazi do odbacivanja paketa, odnosno njegovog uklanjanja iz komunikacionog sistema.

Tip modulacije	R_b [Mbps]	R_c [Mbps]	R_s [Mpsps]	b/sim
BPSK	6	12	12	1
BPSK	9	12	12	1
QPSK	12	24	12	2
QPSK	18	24	12	2
16QAM	24	48	12	4
16QAM	36	48	12	4
64QAM	48	72	12	6
64QAM	54	72	12	6

Tabela 1. Transmisioni modovi rada definisani prema standardu IEEE 802.11a. R_c je brzina podataka, R_b kodna brzina a R_s je brzina simbola. Zadnjom kolonom je definisan broj bitova po simbolu.

Maksimalni broj odbačenih paketa je najčešće postavljani QoS za većinu multimedijalnih servisa [1]. Jedan od načina za maksimizaciju propusnog opsega komunikacionog kanala je zapravo minimizacija broja odbačenih paketa. Algoritmi prepletenih slojeva zahtevaju upravljanje stanjem bafera te ono treba da bude poznato i predajnoj i prijemnoj strani. Stanje bafera kao i kvalitet komunikacionog kanala prenose se povratnim komunikacionim kanalom (slika 1). Zbog čestih izmena stanja komunikacionog kanala i popunjenosti bafera, neophodna je intezivna komunikacija po povratnom kanalu. Brzina slanja paketa ima direktni uticaj na verovatnoću odbacivanja paketa. Tako, ako se pražnjenje paketa iz bafera odvija većom brzinom, to će se bafer brže prazniti, odnosno, verovatnoća popunjenosti bafera i odbacivanje paketa se snižava. U ovom radu je iskorišćena mogućnost povećanje brzine slanja paketa izborom modulacione šeme sa većim brojem konstelacionih stanja.

Broj paketa u baferu predstavlja prostor stanja sistema kojim se opisuje bafer. Bafer se modeluje Markovljevim lancem, kod koga su stabilna stanja određena brojem paketa u baferu. Tako, ako sa b_j označimo j paketa u baferu, prostor stanja bafera B se može predstaviti na sledeći način:

$$B = \{b_0, b_1, \dots, b_B\}. \quad (2)$$

Stanje bafera u sledećem frejmu b_{n+1} zavisi od stanja bafera u prethodnom frejmu b_n , brzine kojim se paketi šalju kroz komunikacioni kanal u_n i broja paketa koji su pristigli u bafer A_n :

$$b_{n+1} = b_n + A_n - u_n. \quad (3)$$

Modifikovana formula stanja bafera koja opisuje slučajevne odbacivanja paketa i odustajanja od transmisije je:

$$b_{n+1} = \min\{\max(b_0, b_n + A_n - u_n), b_B\}. \quad (4)$$

Slučaj odbacivanja paketa se dešava kada je:

$$b_B - b_n + u_n < A_n. \quad (5)$$

Slučaj odustajanja od transmisije se dešava kada u baferu nema dovoljno bitova da se formira modulacioni simbol:

$$b_n < u_n. \quad (6)$$

Da bi se potpuno definisao Markovljev niz, potrebno je odrediti verovatnoću tranzicije p_{ij} iz stanja i u stanje j . Tranziciona matrica P_{ij} Markovljevog niza definisana je izrazom:

$$P_{ij} = \begin{cases} A_{j-i+u_i}, & i-u_i \leq j < b_B \\ 1 - \sum_{k=0}^{b_B+i+u_i-1} A_k, & j = b_B \\ 0, & \text{drugde} \end{cases}, \quad (7)$$

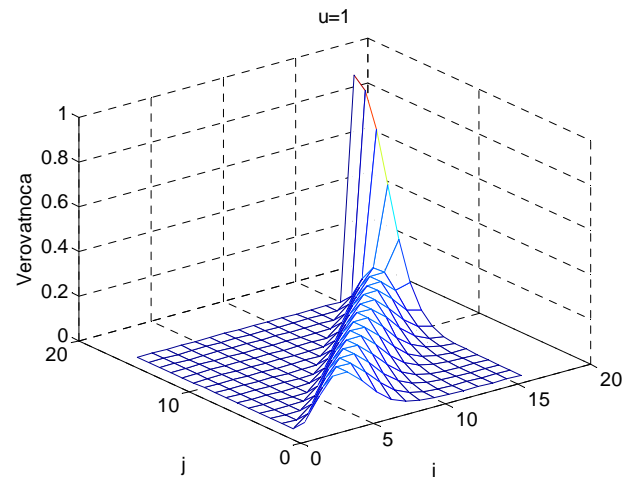
gde je A_k verovatnoća da k paketa pristigne u bafer za vreme trajanja frejma. Kako je već napomenuto, proces pristizanja paketa u bafer je modeliran Poasonovom raspodelom:

$$A_k = \frac{1}{k!} \exp(-\lambda T_f) (\lambda T_f)^k. \quad (8)$$

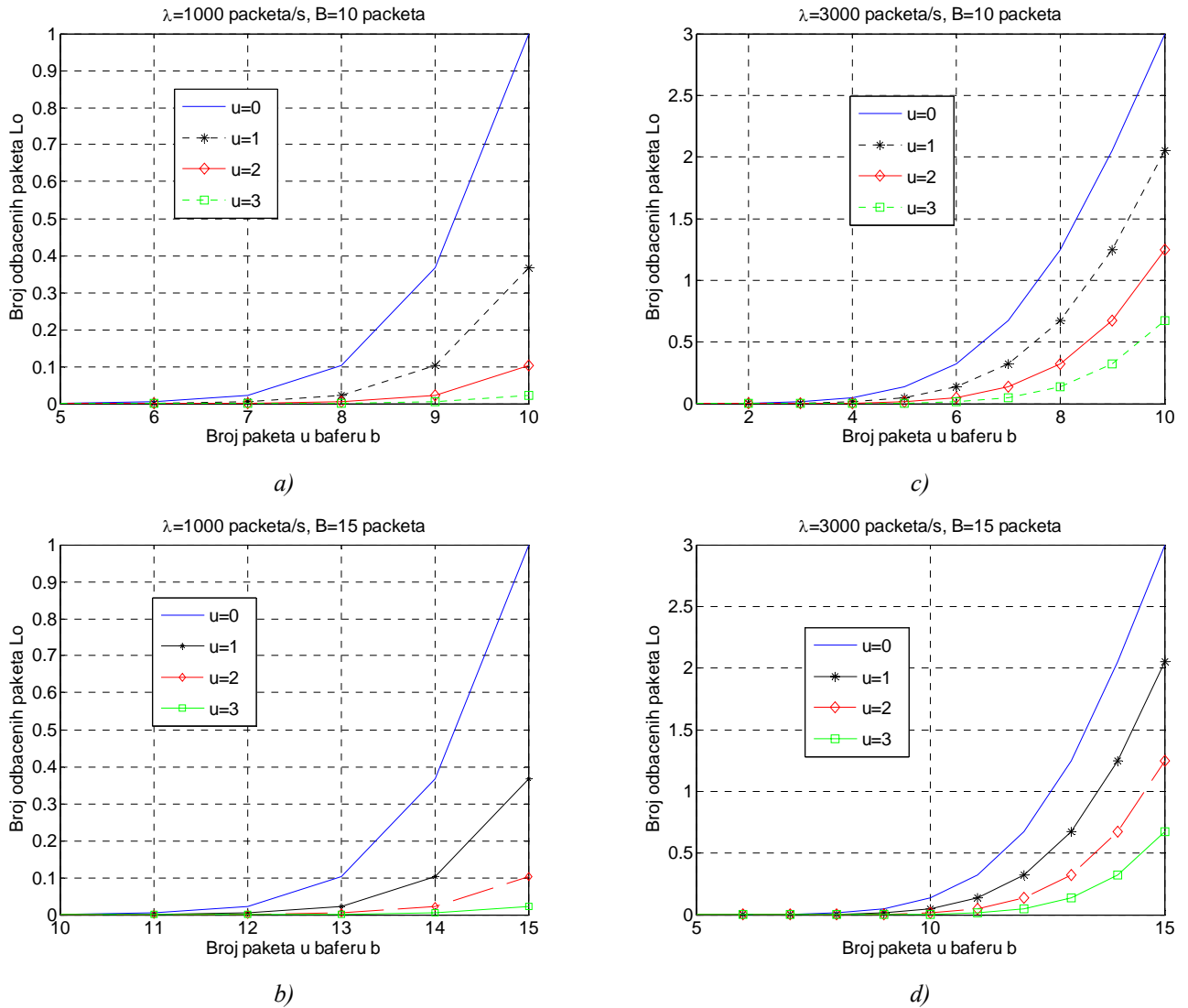
Tranziciona matrica verovatnoća Markovljevog procesa koji modeluje bafer konačne dužine P_{ij} za jednu vrednost parametra u ima sledeću strukturu:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots & P_{0B} \\ 0 & P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1B} \\ 0 & 0 & P_{22} & \dots & P_{2B} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{BB} \end{bmatrix}.$$

Prikazana kvadratna struktura matrice se formira za svaku vrednost parametra u . Kompletan sistem je opisan 3D matricom čije dimenzije zavise od veličine bafera i broja transmisionih modova. Grafik koji predstavlja tranzicionu matricu stanja Markovljevog niza koji opisuje bafer konačne dužine za $u=1$ prikazana je na slici 2.



Slika 2. Grafički prikaz tranzicione matrice verovatnoća prelaza za bafer kapaciteta $B=15$. Punjenje bafera je modelovano Poasonovom raspodelom a bafer se prazni sa $u=1$ paketom/frejmu.



Slika 3. Broj odbačenih paketa (L_o) prikazan u funkciji broja paketa u baferu (b) za slučaj kada je srednja brzina pristizanja paketa u bafer a) $\lambda = 1000$ paketa/s a kapacitet bafera $B=10$ paketa, b) $\lambda = 1000$ paketa/s a kapacitet bafera $B=15$, c) $\lambda = 3000$ paketa/s a kapacitet bafera $B=10$ i d) $\lambda = 3000$ paketa/s a kapacitet bafera $B=15$ paketa.

Za srednju vrednost brzine pristizanja paketa u bafer (λ), kapaciteta bafera (B), dati broj paketa u baferu (b), definisano praznjenje bafera paketa po frejmu (u), očekivan broj paketa koji će biti odbačeni usled prepunjavanja bafera (L_o) za jedan frejm je dat izrazom:

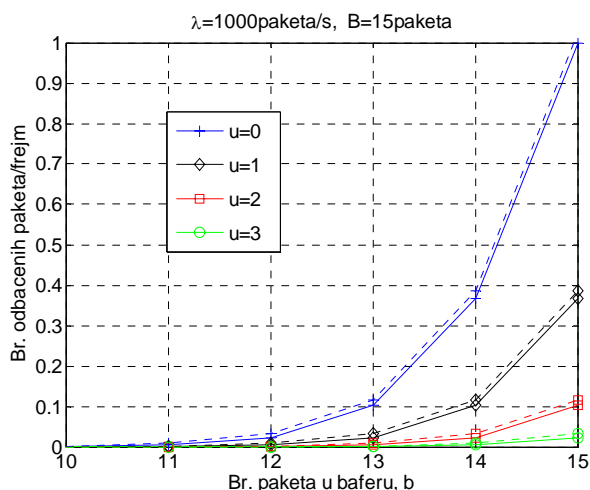
$$L_o(b, u) = (\lambda T_f) \cdot \left(1 - \sum_{k=0}^{B-b+u-1} A_k \right) - (B-b+u) \cdot \left(1 - \sum_{k=0}^{B-b+u} A_k \right). \quad (9)$$

Prvi sabirak u izrazu (9) se odnosi na broj paketa koji su odbačeni usled prispeća većeg broja paketa nego što je kapaciteta bafera. Drugi sabirak u izrazu (9) odgovara broju paketa koji su odbačeni posle dopunjavanja bafera do maksimalnog kapaciteta.

4. NUMERIČKI REZULTATI

U ovoj sekciji su prezentovani numerički rezultati dobijeni na bazi modela bafera ograničenog kapaciteta opisanog u sekciji 3. Glavni rezultat koji treba potvrditi kroz

simulaciju bafera konačne dužine je srednja vrednost broja odbačenih paketa. Kvalitetan model bafera konačne dužine je veoma važan deo modela razmatranog komunikacionog sistema (sl. 1). Simulacioni rezultati su dobijeni za pristizanje paketa u bafer prema Poasonovoj raspodeli sa srednjom brzinom $\lambda = 1000$ paketa/ sekundi, odnosno $\lambda = 3000$ paketa/ sekundi. Svi paketi su jednake dužine $L = 100$ bitova, a razmatran je kapacitet bafer takođe za dve vrednosti, naime $B = 10$ paketa, odnosno $B = 15$ paketa. Trajanja simbola u MQAM modulatoru je fiksirano i iznosi $T_s = 1/W$, gde je W širina propusnog opseg kanala i ima vrednost $W = 100$ kHz. Varijacijom numeričke vrednosti konstelacije signala u modulatoru obezbeđuje se varijacija brzine praznjenja bafera. Adaptacija brzine se odvija u svakom frejmu a svaki frejm se sastoji od F moduliranih simbola, $T_f = F \cdot T_s$. Postavkom $F = L = 100$ obezbeđuje se slanje u paketa sa konstelacionom veličinom $M = 2^u$ za vreme trajanja jednog frejma. Kod ove simulacije pretpostavljeno je da modulator raspolaže transmissionim modovima za $u = \{0, 1, 2, 3\}$.



Slika 4. Srednja vrednost broja odbačenih paketa kao posledica prekoračenja bafera u funkciji popunjenosti bafera. Punom linijom su predstavljene teorijske vrednosti, dok su isprekidanim linijama prikazani rezultati dobijeni simulacijom.

Na slici 3 je prikazan broj odbačenih paketa u funkciji popunjenosti bafera. Rezultati su dobijeni za različite vrednosti kapaciteta bafera B , odnosno, za različite vrednosti parametra u . Parametar u predstavlja broj paketa kojima se bafer prazni u jednom frejmu, a prikazani su grafici za $u = \{0, 1, 2, 3\}$. Sa svih grafika se može jasno uočiti da srednja vrednost broja odbačenih paketa raste sa povećanjem popunjenosti bafera. Tako, sa grafika 3b se može uočiti da srednja vrednost broj odbačenih paketa za popunjenost bafera $b=14$ iznosi 0.1, a za $b=15$ iznosi 0.35. Istovremeno, ako se brzina pražnjenja bafera povećava, broj odbačenih paketa se smanjuje. Sa sl. 3b se može uočiti da srednja vrednost broja odbačenih paketa za popunjenost bafera $b=14$ iznosi 0.1 odnosno 0.03 za vrednost parametra $u=1$, odnosno $u=2$ respektivno. Poredeći grafike sa slika 3a i 3b može se uočiti smanjenje srednje vrednosti odbačenih paketa sa porastom kapaciteta bafera. Na slici 3a kapacitet kanala je $B=10$ paketa, dok su na slici 3b prikazani rezultati dobijeni za kapacitet kanala $B=15$ paketa. Broj odbačenih paketa u prvom slučaju je približno nula sve do 6 paketa u baferu. Sa druge strane, u drugom slučaju broj odbačenih paketa je približno nula sve do 11 paketa u baferu. Na slikama 3c i 3d dati su slični grafici, ali ovog puta sa srednjom vrednosti pristizanja paketa $\lambda = 3000$ paketa/s. Srednja vrednost pristizanja paketa u ovom slučaju je tri puta veća nego u odnosu slučaj prikazan na slikama 3a i 3b. Sa ovih grafika se može uočiti znatno povećanje srednje vrednosti odbačenih paketa u odnosu na slučaj koji je prikazan na slikama 3a i 3b. Naravno, dobijeni rezultati su očekivani i dobro se slažu sa teorijskim postavkama. Simulacija bafera konačnog kapaciteta izvršena je u Matlabu 7.0. Za vrednost parametara koji su dati na početku ove sekcije, dobijeni rezultati su prikazani na slici 4. Punom linijom predstavljene su teorijske vrednosti, dok su isprekidanim linijama predstavljene vrednosti dobijene simulacijom. Kako se to može uočiti sa grafika, dobijeni rezultati se veoma dobro slažu sa teorijskom postavkom. Srednja vrednost broja odbačenih paketa dobijena je na uzorku od $N=1000$ frejmova. Sa porastom broja simulacionih frejmova, odnosno, $N \rightarrow \infty$, razlika između teorijske i simulacione vrednosti teži nuli.

5. ZAKLJUČAK

Telekomunikacioni sistemi sa adaptivnom modulacijom i kodiranjem obezbeđuju mogućnost prilagođenja komunikacionog sistema na dinamičke promene bežičnih kanala. Standardni komunikacioni protokoli najčešće adaptiraju mrežne parametre samo jednog ISO/OSI sloja. Obezbeđivanje zahtevanog QoS-a je najznačajniji aplikativni zahtev postavljen pred mreže koje podržavaju multimedijalne komunikacije. Da bi se multimedijalnim aplikacijama obezbedio zahtevani QoS, (zahtevani propusni opseg ili minimalno kašnjenje) potrebno je minimizirati broj odbačenih paketa. U ovom radu je razmatran uticaj i izvršeno je modelovanje komunikacionog bafera ograničenog kapaciteta. U cilju detaljne analize i minimizacije broja odbačenih paketa u sistemu izvršeno je modelovanje bafera ograničenog kapaciteta. Predloženi model se bazira na Markovljevom nizu čija stanja su predstavljena brojem paketa u baferu. Modeliran je bafera konačnog kapaciteta koji se puni paketima koji pristizu po Poasonovoj raspodeli. Sa druge strane, brzina pražnjenja bafera je adaptibilna, tako da se u jednom frejmu može poslati više paketa. Adaptibilnost se ostvaruje primenom MQAM šema koje su raspoložive kod novih komunikacionih protokola. U simulacionom okruženju je pokazano da se model bafera ograničenog kapaciteta dobro slaže sa teorijskim pretpostavkama. Kombinujući model komunikacionog kanala na fizičkom sloju i model bafera sa ograničenim kapacitetom na drugom sloju mogu se optimizovati transmissione politike koje zadovoljavaju stroge multimedijalne QoS zahteve. Cross-layer dizajn je novi pristup u optimizaciji parametara komunikacionih mreža koji zahteva intervenciju algoritama na više OSI slojeva.

LITERATURA

- [1] ITU-T, "Recommendation G. 1010: End-user multimedia QoS categories", 2001.
- [2] M. Jevtović, "Multimedijalne telekomunikacije", Grafožig, Beograd, 2004.
- [3] S. Khan, Y. Peng, E. Steinbach, "Application-Driven Cross-Layer Optimization for Video Streaming over Wireless Networks", *IEEE Comm. Magazine*, 2006.
- [4] B. Daňobetia-Paul at all, "Cross-layer architectre design in wirelrss networks", pp. 305-312, *JITEL*, 2008.
- [5] Q. Wang, M. A. Abu-Rgheff, "Cross-layer signalling for next-generation wireless systems", *IEEE Wireless Commun. and Net. Conf.*, New Orleans, LA, Mar. 2003.
- [6] MobileMan project, „Architecture, Protocols and Services“, <http://cnd.iit.cnr.it/mobile-MAN>.
- [7] R. A. Berry, R. G. Gallager, "Communication over fading channels with delay constraints," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 5, pp. 1135–1149, May 2002.
- [8] X. Zheng, Y. Xia, Y. Fang, "A class of Cross-layer optimization algorithms for performance and complexity trade-offs in wireless networks", *IEEE Transactions Parallel and Distributed Systems*, vol 20, no. 10, 2009.
- [9] S. Boyd, L. Vandenberghe, "Convex Optimization", *Cambridge Univ. Press*, 2004.
- [10] A. T. Hoang, M. Motani, "Cross-layer adaptive transmission: optimal strategies in fading channels", *IEEE Trans. Comm.* vol. 56, no. 5, pp. 799-807, 2008.