

# Cross-layer optimizacija bežičnih mrežnih parametara u cilju zadovoljenja QoS-a

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

**Sadržaj** — Garantovanje kvaliteta usluga QoS (Quality of Service) u bežičnim komunikacionim sistemima je veoma izazovan problem. Efikasan način za rešenje ovog problema je zajednička optimizacija mrežnih parametara sa više ISO/OSI slojeva. Izbor optimizacionih parametara je veoma značajna aktivnost u dizajnu steka protokola bežičnih komunikacija koja može znatno pospešiti efikasnost predloženih algoritama. U ovom radu je prezentovan optimizacioni algoritam koji minimizira dugovremenu srednju vrednost protoka bežičnog jedno-korisničkog sistema. Optimizacioni problem je definisan kao MDP (Markov Decision Process) i predloženo je rešenje optimizacionog problema minimizacijom novoformirane cost funkcije. Rešavanjem MDP problema dobijene su optimalne transmissive politike za zadate kriterijume. Predloženo rešenje je testirano u simuliranom komunikacionom kanalu sa Rejljevom fadingom i prisutnim AWGN (Additive White Gaussian Noise) šumom. Razmatrani algoritam obezbeđuje adaptaciju mrežnih parametara i omogućava zadovoljenje širokog spektra QoS-a diktiranog multimedijalnim aplikacijama. Simulacijama je potvrđeno da su dobijena rešenja Pareto-optimalna, tako da se adaptacijom jednog mrežnog parametara utiče na ostale. Primena MDP-a u više-kriterijumskim optimizacionim problemima se pokazala opravdanom u cilju zadovoljavanja QoS-a.

**Gljučne reči** — Adaptacija mrežnih parametara, Cross-layer optimizacija, Markov Decision Process (MDP), Quality of Service (QoS).

## I. UVOD

SVEDOCI smo izuzetnog interesa korisnika za pristup bežičnim komunikacionim sistemima. Između ostalog, ovaj interes se može opravdati atraktivnim multimedijalnim servisima koje ove mreže podržavaju. Međutim, podrška bežičnih multimedijalnih servisa podrazumeva obezbeđivanje velikog mrežnog protoka kao i određeni nivo QoS-a (Quality of Service). Da bi se procenio kvalitet pružene mrežne usluge ITU-T je standardizovala ključne parametre QoS-a multimedijalnih aplikacija. Ne razmatrajući tehničke aspekte, specifikacijom G.1010 normirani su QoS parametri iz perspektive korisnika koji se odnose na *kašnjenje*, *varijaciju kašnjenja* i *gubitak informacije* [1]. Ovi parametri su svrstani u osam kategorija prema tipu aplikacija, a obuhvataju prenos govora, videa, slika i

teksta. Prema ovoj specifikaciji, za konverzacioni govor je dozvoljeno kašnjenje do *150 ms*, varijacija kašnjenja do *1 ms*, a može se tolerisati maksimalno *3%* izgubljenih paketa. Sa druge strane, prilikom preuzimanja Web stranica sa Interneta dozvoljeno je kašnjenje i do *4 s*, dok varijacija kašnjenja nije ni specificirana za ovu klasu aplikacija, dok je obavezan zahtev da svi paketi pristignu na određeno mesto. Iz prethodnog primera se jasno može zaključiti da različite multimedijalne aplikacije postavljaju različite QoS zahteve. Tako se prema QoS zahtevima multimedijalne aplikacije mogu svrstati u one *tolerantne* na kašnjenje - a zahtevne u pogledu gubitka paketa, pa sve do onih koje su tolerantne na gubljenje paketa - a *netolerantne* na kašnjenje.

Zadovoljenje QoS-a definisanog bežičnom aplikacijom zahteva združeno razmatranje više mrežnih ISO/OSI slojeva i optimizaciju raspoloživih bežičnih mrežnih resursa. Zajednička optimizacija mrežnih parametara više ISO/OSI slojeva se naziva *cross-layer* (CL) optimizacija [2]. Međutim, slojevita struktura steka komunikacionih protokola poseduje mehanizme samo za komunikaciju susednih slojeva. Iako je istorijski imala izuzetan uticaj na razvoj mrežnih komunikacija, slojevita struktura standardnog ISO/OSI steka protokola je limitirajući faktor u dizajnu optimalnih protokola u bežičnom okruženju. U [2] je opisano nekoliko rešenja u cilju prevazilaženja ovog nedostatka. U primeni su tri bazične arhitekture za nesmetani pristup mrežnim parametrima [3]: arhitektura sa direktnom komunikacijom između slojeva, arhitektura sa deljenom bazom podataka i modularna arhitektura CL dizajna. Za polje CL dizajna pokazuju interesovanje provajderi bežičnih usluga radi povećanja nivoa zadovoljstva svojih klijenata [4]. Osnova CL optimizacije koja će biti prikazana u nastavku rada je da se svakom tipu multimedijalne aplikacije obezbedi zahtevani QoS uz minimizaciju predajne snage. Kod bežičnih komunikacionih sistema pored standardnog skupa QoS-a definisanog u [1], veoma je važan zahtev za minimizacijom predajne snage. Minimizacija predajne snage uz zadovoljenje aplikativnog QoS-a, obezbeđuje efikasno korišćenje baterijskog napajanja mobilnih korisnika. Obzirom na ograničene radio resurse, dinamičku mrežnu strukturu, vremenski promenljive karakteristike komunikacionog medijuma, pojavu fadinga, kao i dinamiku mrežnog saobraćaja, zadovoljenje QoS-a u bežičnim komunikacionim sistemima nije jednostavan zadatak. U ovom radu se razmatra CL algoritam koji vrši adaptaciju mrežnih parametara u funkciji varijacije kvaliteta komunikacionog kanala (nivo fadinga), potpunosti predajnog bafera i tipa mrežnog saobraćaja

Zoran S. Veličković, Visoka tehnička škola strukovnih studija Niš, Aleksandra Medvedeva 14, Srbija (telefon: +381-18-588-211; faks: 381-18-588-211; e-mail: zoran.velickovic@vtsnis.edu.rs).

Miloško Jevtović, Jugoslovenska inženjerska akademija, Kneza Miloša 9, Beograd, Srbija; (telefon: +381 11 32-31-630, faks: + 381 11 32-43-652 e-mail: vladimijev@ptt.rs).

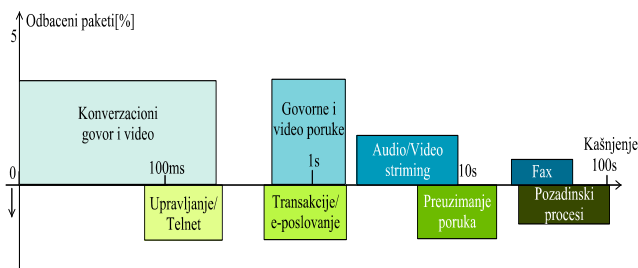
u mrežnom čvoru. Primenjen je matematički model koji optimizuje mrežne parametre u cilju zadovoljavanja QoS-a baziran na MDP-u (Markov Decision Process) [5]. Cilj ovog rada je maksimizacija dugoročnog srednjeg mrežnog protoka uz limitiranje srednje vrednosti transmisiona snage i minimizaciju kašnjenja paketa. U radu će biti korišćen model one-user bežičnog komunikacionog sistema koji je prikazan u prethodnim radovima [6], [7], [8]. Način izbora parametara za CL dizajn biće prikazan u sekciji II, dok će se uticaj SNR-a (Signal to Noise Ratio) na strukturu optimalne transmisiona politike analizirati u III sekciji. Prikaz dobijenih rezultata i zaključci biće izloženi u sekcijama IV i V respektivno

## II. IZBOR PARAMETARA OPTIMIZACIJE

Mapiranje multimedijalnih aplikacija u ravni odbačeni paketi-kašnjenje je prikazano na slici 1 [1]. Dimenzije polja pojedinih aplikacija odgovaraju ograničenjima u broju izgubljenih paketa, odnosno, dozvoljenog kašnjenja. Obzirom na činjenicu da stek protokola bežičnih komunikacija ima veliki broj parametara na svakom sloju, CL dizajn može potencijalno iskoristiti sve raspoložive parametre kako bi se zadovoljio QoS. Iako se potencijalno adaptacija parametara može obaviti na veoma velikom skupu, to često nije optimalno. Raspoloživi resursi za realizaciju CL algoritama ograničavaju broj mrežnih parametara koji mogu participirati u optimizaciji. Najčešće mrežni čvorovi ne raspoložuju dovoljno snažnim procesorskim, memorijskim i energetske resursima za realizaciju složenih CL algoritama. Iz prethodno izloženog se može zaključiti da je izbor CL optimizacionih parametara izuzetno značaj problem. Zbog toga se izbor optimizacionih parametara odvija kroz sledeća tri koraka [9]:

- *Apstrakcija parametara* specifičnih za dati sloj. Osnovno u ovom koraku je da se identifikuju parametri koji imaju značajan uticaj na željene karakteristike. Broj selektovanih mrežnih parametara treba svesti na meru koju dopušta primenjeni algoritam, odnosno, raspoloživi hardverski resursi.
- *Identifikacija parametara* koji optimizuju zadatu kriterijumsku funkciju. Tako se u ovom radu optimizuje mrežni protok za zadati nivo snage predajnika.
- *Rekonfiguracija sloja* podrazumeva distribuciju odabranih vrednosti mrežnih parametara svim slojevima koji učestvuju u optimizaciji. Odgovornost je na slojevima za aplikaciju dostavljenih parametara.

Ove korake treba ponavljati onom brzinom kojom zahteva konkretna aplikacija. Identifikacija mrežnih parametara koji imaju značajan uticaj na karakteristike sloja je ključni korak u dizajnu CL algoritama. Dakle, kroz proces apstrakcije se redukuje broj mrežnih parametara koji učestvuju u optimizaciji, što je veoma značajan aspekt prilikom praktične realizacije. Sa druge strane, apstrakcija sakriva tehničke detalje i dozvoljava dizajn generičkih CL algoritama koji se efikasno mogu aplikovati na više različitih sistema. Prema ulozi selektovanih mrežnih parametara, oni se mogu klasifikovati u četiri kategorije:



Slika 1. Mapiranje aplikacija prema željenom QoS-u u ravni Odbačeni paketi-Kašnjenje [1].

- *Direktno podešivi DT* (Directly Tunable) parametri. Ovi parametri su direktno dostupni CL algoritmu. Primer može biti broj OFDM nosioca u OFDM sistemima, ili izbor modulacione tehnike na PHY sloju kod celularnih mreža.
- *Indirektno podešivi IT* (Indirectly Tunable) parametri. Ove parametre CL algoritmi ne mogu menjati. Međutim, adaptacijom DT parametara se može imati uticaja na njih. Primer ovog tipa parametara je BER (Bit Error Rate) koji se ne može postaviti jer je direktno u funkciji izabrane modulacione šeme.
- *Deskriptivni parametri (D)*. Ovu vrstu mrežnih parametara CL algoritam može čitati, ali ih ne može podešavati. Primer ovih parametara može biti broj frejmova/s ili veličina slike u video strimingu.
- *Apstraktni parametri (A)*. Ovi parametri su apstrakcija prethodna sva tri tipa parametara korišćena u CL algoritmu.

CL algoritmima se mogu zajednički optimizovati parametri PHY sloja (snaga predajnika, tip modulacije, bitska brzina, BER), MAC-DLC sloja (pristupna šema, veličina i popunjenost predajnog bafera) i APP sloja (izvorno kodovanje i dozvoljeno kašnjenje). Najčešće se realizuju optimizacioni CL algoritmi koji razmatraju mrežne resurse sa PHY i MAC-DLC sloja [10]. U predloženom CL algoritmu se koriste parametri sa PHY, MAC-DLC i APP sloja kako bi se optimizovali mrežni parametri u cilju zadovoljenja QoS-a. Dva najniža sloja protokola su modelovana na bazi Markovljevog lanca i mogu se naći u prethodnim radovima [7], [8]. Mrežni saobraćaj na APP sloju je modelovan Poasonovom raspodelom čime se mogu simulirati različite klase multimedijalnih komunikacija. Adaptacija kodne i modulacione šeme na PHY sloju su osnovni parametri pomoću kojih se realizuje optimizacioni CL algoritam. Izbor optimizacionih mrežnih parametara se zasniva na informacijama i sa prvog i sa drugog sloja. Sa PHY sloja se razmatraju informacije o stanju kvaliteta komunikacionog kanala, dok se sa MAC-DLC sloja razmatraju informacije o stanju popunjenosti komunikacionog bafera. Savremeni protokoli nude niz kodnih i modulacionih šema kao mogućnost izbora CL algoritmima. U tabeli 1 prikazane su adaptivne mogućnosti na PHY sloju koje nudi 802.11a standard.  $R_c$  je brzina podataka,  $R_b$  kodna brzina a  $R_s$  je brzina simbola za pojedine tipove modulacija. Prvom kolonom je definisan tip modulacije, a zadnjom kolonom je definisan broj bitova po simbolu izabrane modulacione šeme.

Tip modulacije	R <sub>b</sub> [Mbps]	R <sub>c</sub> [Mbps]	R <sub>s</sub> [MSPS]	u 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.

### III. CL OPTIMIZACIONI PROBLEM

Minimalni nivo potrebne predajne snage  $P$  u komunikacionom kanalu sa AWGN šumom i prisutnim fedingom je dat izrazom (1) i odnosi se na sisteme sa MQAM modulatorom i idealnom koherentnom faznom detekcijom:

$$P(u, g, P_b) \geq -\frac{WN_o}{\gamma_g} \cdot \frac{\ln(5 \cdot P_b) \cdot (2^u - 1)}{1.5}. \quad (1)$$

$P_b$  je zahtevana verovatnoća greške po bitu BER, parametar  $W$  predstavlja širinu propusnog opsega kanala,  $\gamma_g$  pojačanje komunikacionog kanala sa fedingom u stanju  $g \in (0, 1, 2, \dots, K-1)$  [11],  $N_o$  gustina snage AWGN šuma, a  $u$  broj bitova po QAM simbolu (zadna kolona u Tabeli 1). Ovde se podrazumeva da su vrednosti parametara koji karakterišu komunikacioni kanal za vreme trajanja frejma nepromenljive. Evidentno je da za povećani nivo AWGN šuma  $N_o$ , treba obezbediti veći nivo predajne snage. Sa druge strane, bolji feding uslovi komunikacionog kanala zahtevaju manju predajnu snagu. Iz izraza (1) se može zaključiti da se adaptacija predajne snage uz fiksiranje brzine simbola i BER-a može obaviti varijacijom konstelacije simbola kod MQAM modulatora (parametar  $u$ ). Ako sa  $P_i$  označimo neophodnu predajnu snagu  $i$ -tog frejma, za bežične komunikacione sisteme je izuzetno značajno ograničiti maksimum dugoročne srednje vrednosti angažovane snage:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} P_i \right\} \leq \bar{P}. \quad (2)$$

Sa druge strane, važan QoS parametar kod multimedijalnih aplikacija je maksimum dozvoljenog kašnjenja paketa. Kašnjenje paketa se definiše kao (Little-ova teorema):

$$D_i = \frac{B_i}{\lambda}, \quad (3)$$

gde je  $\lambda$  srednja vrednost broja paketa pristiglih u bafer, a  $B_i$  broj paketa u baferu za vreme frejma  $i$ . Srednja vrednost maksimuma dugoročnog kašnjenja paketa se može definisati na sledeći način:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} D_i \right\} \leq \bar{D}. \quad (4)$$

Prethodnim izrazima (2) i (4) su definisani suprotstavljeni mrežni zahtevi u pogledu ograničenja dugoročne srednje vrednosti predajne snage odnosno kašnjenja paketa. Minimizacijom srednje vrednosti predaje snage se utiče na broj odbačenih paketa, odnosno na mrežni protok, kao i na kašnjenje paketa. Tako, nije moguće optimizovati funkciju po jednom parametru a da to nema uticaja na sve ostale. Konačno, maksimizacija mrežnog protoka se realizuje minimizacijom broja odbačenih paketa  $L_o$  sa zadatom srednjom vrednošću angažovane predajne snage  $\bar{P}$  i dozvoljenog kašnjenja paketa  $\bar{D}$ . Minimizacioni problem se može predstaviti na sledeći način:

$$\arg \min_{U_0, \dots, U_{T-1}} \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} (L_o(B_i, U_i)) \right\}, \quad (5)$$

$$U_i \in \{0, 1, 2, \dots, B_i\}, \quad \forall i = 0, 1, \dots, T-1, \quad (6)$$

pod uslovima:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} P_i \right\} \leq \bar{P} \quad (7)$$

i

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} D_i \right\} \leq \bar{D}, \quad (8)$$

gde je  $\bar{P}$  maksimalna dozvoljena srednja transmisiona snaga, dok je  $\bar{D}$  maksimalno dozvoljena srednja vrednost kašnjenja paketa. Parametar  $U_i$  predstavlja broj paketa kojim se prazni bafer za vreme trajanja frejma  $i$ . Jedno od rešenja ovog *multi-kriterijumskog* minimizacionog problema (5)-(8) je da se umesto originalnog problema minimizira *težinska funkcija* sva tri kriterijuma. Na ovaj način se problem minimizacije definiše kao *long-term average cost MDP*:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} C_I(B_i, G_i, U_i) \right\}, \quad (9)$$

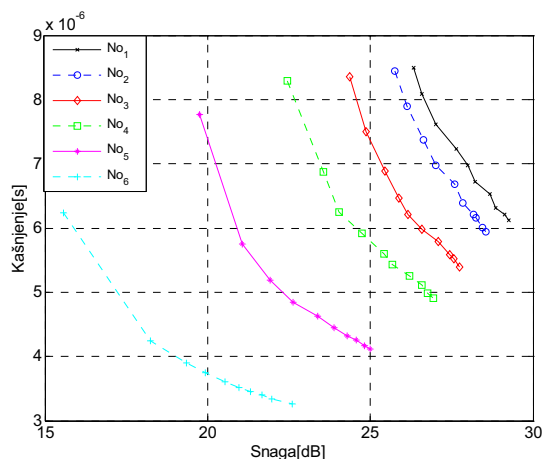
gde je  $C_I$  neposredan trošak koja se plaća u stanju komunikacionog sistema  $(b, g)$  primenom upravljačke akcije  $(u, P)$ :

$$C_I(b, g, u) = P(u, g, P_b) + \beta_1 \cdot L_o(b, u) + \beta_2 \cdot D(b). \quad (10)$$

Težinski koeficijenti  $\beta_1$  i  $\beta_2$  su pozitivni brojevi sa ulogom Lagrangeovih multiplikatora i određuju relativni odnos između kašnjenja paketa i broja odbačenih paketa [8].

### IV. REZULTATI SIMULACIJE

U ovoj sekciji su prezentovani dobijeni numerički rezultati primenom optimizacionog MDP algoritma prikazanog u prethodnom poglavlju. Simulacija je obavljena za sledeće vrednosti mrežnih parametara:  $\lambda=3000$  paketa/s,  $L=100$  bitova/paket, kapacitet bafera  $B=15$  paketa,  $P_b=10^{-6}$ , propusni opseg kanala  $W=100$  kHz, vreme trajanja simbola  $T_s=1/W$ , a frejm  $T_f$  je određen sa 100 simbola. U ovom radu je testirano ponašanje optimizacionog algoritma za različite nivoe AWGN šuma u komunikacionom kanalu. Kanal sa vremenski korelisanim Rejljevskim fedingom je modelovan sa osam stanja kao u [11]. Struktura optimalne politike za pojedine vrednosti parametara  $\beta_1$  i  $\beta_2$  je data u prethodnom radu [8], i [12].



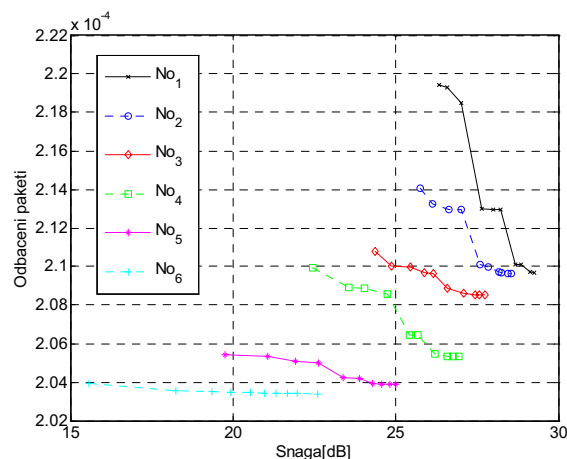
Slika 2. Srednja vrednost kašnjenja paketa u funkciji srednje vrednosti predajne snage za različite nivoe AWGN šuma u komunikacionom kanalu sa fedingom.

Na slici 2 prikazane su dobijene vrednosti kašnjenja paketa u funkciji predajne snage za različite nivoe AWGN šuma na prijemu. Najviši nivo AWGN šuma (najlošiji kvalitet kanala) je označen sa  $N_{o1}$ , a najniži sa  $N_{o6}$  (najbolji kvalitet kanala). Grafici su dobijeni za sledeće vrednosti parametra  $N_o = [100 \times 10^{-5} \ 80 \times 10^{-5} \ 50 \times 10^{-5} \ 30 \times 10^{-5} \ 10 \times 10^{-5} \ 2 \times 10^{-5}]$  W/Hz. Generalno, se sa slike može zaključiti da sa povećanjem srednje vrednosti predajne snage dolazi do smanjenja srednje vrednosti kašnjenja paketa. Ovaj trend je uočljiv za sve vrednosti parametra  $N_o$ . Međutim, za vrednost kašnjenja paketa od  $6 \mu s$ , kada je nivo šuma  $N_{o6}$ , zahteva se nivo predajne snage od oko  $\bar{P} = 16 dB$ . Sa druge strane, za istu vrednost kašnjenja kada je nivo šuma  $N_{o5}$  ( $N_{o5} > N_{o6}$ ) zahteva se nivo predajne snage od oko  $\bar{P} = 21 dB$ . Sa povećanjem nivoa AWGN šuma na prijemu, zahteva se sve veći nivo predajne snage kako bi se zadržala ista srednja vrednost kašnjenja paketa. Posmatranjem grafika sa slike 1, intuitivno se može zaključiti da pri velikoj vrednosti predajne snage, sve krive konvergiraju ka minimalnoj vrednosti kašnjenja. Treba napomenuti da svaka tačka na prikazanim krivama predstavlja ustvari jednu optimalnu transmisionu politiku za date uslove.

Na slici 3 su prikazani rezultati broja odbačenih paketa u funkciji predajne snage za iste kanalne uslove kao na slici 2. Sa povećanjem predajne snage, broj odbačenih paketa opada. Međutim, može se jasno uočiti da u komunikacionom kanalu sa velikim prisustvom AWGN šuma povećanje predajne snage ima veći uticaj nego u kanalima sa niskim nivoom AWGN šuma. I na ovim graficima svaka tačka predstavlja jednu optimalnu transmisionu politiku.

## V. ZAKLJUČAK

Adekvatan izbor i zajednička adaptacija mrežnih parametara na više ISO/OSI slojeva može doprineti zadovoljenju QoS-a multimedijalnih aplikacija u bežičnom okruženju. U zavisnosti od nivoa belog Gausovog šuma, fedinga i raspoložive transmisione snage adaptacijom kodne i modulacione šeme mogu se dostići strogi QoS zahtevi. Optimizacion MDP problem je rešen minimizacijom cost funkcije na efikasan način.



Slika 3. Srednja vrednost broja odbačenih paketa u funkciji srednje vrednosti predajne snage za različite nivoe AWGN šuma u komunikacionom kanalu sa fedingom.

## LITERATURA

- [1] ITU-T Recommendation G. 1010: End-user multimedia QoS categories – ITU-T, 2001.
- [2] V. Srivastana, M. Motani, "Cross-layer design: a survey and the road ahead," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 12, pp. 112–119, Dec. 2005.
- [3] Z. Veličković, M. Jevtović, "Podrška mrežnih simulatora arhitekturi protokola prepletenih slojeva", *Informacione tehnologije, IT – Žabljak*, 2010.
- [4] S. Thakolsri, S. Khan, E. Steinbach, W. Keller, "QoE-Driven Cross-Layer Optimization for High Speed Downlink Packet access," *Journal Of Communications*, vol. 4, no 9, pp. 669-680, Oct. 2009.
- [5] M. L. Puterman, *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*, New York, NY: John Wiley & Sons, 1994.
- [6] Z. Veličković, M. Jevtović, "Cross-layer dizajn optimalnog protokola u kanalu sa vremenski koreliranim fedingom", Vol. 9, Ref. B-I-3, pp. 135-139, Jahorina, *Infoteh* 2010.
- [7] Z. Veličković, M. Jevtović, "Adaptive cross-layer throughput optimization in wireless fading channel and limited buffer capacity", Ref. tst\_o\_II.3.pdf, p.p. 9-12, Ohrid, *ICEST* 2010.
- [8] Z. Veličković, M. Jevtović, "Adaptive Cross-layer Optimization in Wireless Block-Fading Channel for QoS provision", *WASET: ICCNMC 2010*, Venecija, Rad prihvaćen.
- [9] S. Khan, Y. Peng., E. Steinbach, M. Sgroi, W. Keller, "Application-Driven Cross-Layer Optimization for Video Streaming over Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 122-130, 2006.
- [10] P. Popovski, M. A. Ingram, C. B. Peel, S. Hara, S. Toumpis, Editors, "Cross-Layer Design for the Physical, MAC, and Link Layer in Wireless Systems", *EURASIP Jour. On Adv. In Sig. Proc.*, 2009.
- [11] H. S. Wang, N. Moayeri, "Finite-state markov channel—a useful model for radio communication channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, pp. 473–479, Feb. 1995.
- [12] A. K. Karmokar, D. V. Djonin, V. K. Bhargava, "Optimal and suboptimal packet scheduling over correlated time varying flat fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 446–457, Feb. 2006.

## ABSTRACT

In this paper it was shown that simultaneous optimization of network parameters with many ISO/OSI layers allows for satisfying the set QoS demands for multimedia wireless applications. The optimization problem is defined as Markov decision process (MDP).

## WIRELESS NETWORK PARAMETER CROSS-LAYER OPTIMIZATION FOR QoS PROVISION

Zoran Veličković, Miloško Jevtović