

CROSS-LAYER DIZAJN OPTIMALNOG PROTOKOLA U KANALU SA VREMENSKI KORELISANIM FADINGOM

A CROSS-LAYER DESIGN OF OPTIMAL PROTOCOL IN TIME-CORRELATED FADING CHANNEL

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

Sadržaj – Realizacija QoS-a koje zahtevaju pojedine mobilne multimedijalne aplikacije nije moguća u standardnoj ISO/OSI slojevitoj mrežnoj organizaciji. Zajednička optimizacija mrežnih parametara više ISO/OSI slojeva može pružiti zadovoljavajuće rešenje. Primenom cross-layer optimizacionog algoritma baziranog na MDP-u optimizovan je broj odbačenih paketa uz uslov da srednja vrednost angažovane snage ne bude veća od zadate, dok je BER održavan konstantnim. Optimalna optimizaciona politika obezbeđuje izbor mrežnih parametara iz skupa pareto-optimalnih vrednosti.

Abstract – QoS realization which requires the multimedia applications is not possible in standard layered ISO/OSI network organization. The joint network parameters optimization of several ISO/OSI layers can give satisfied solution. A number of dropped packets with averaged transmit power constraints are optimized by cross-layer optimization algorithm based on MDP with constant BER. The optimal transmit policy provide the selection of the network parameters from pareto-optimal set.

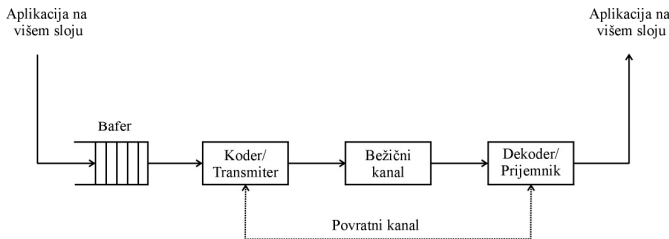
1. UVOD

Standardni ISO/OSI model organizacije steka komunikacionih protokola zasnovan je na višeslojnoj apstraktnoj organizaciji. Slojevita organizacija steka protokola je proizašla iz potrebe za standardizacijom servisa mrežnih usluga. U osnovi standardnog mrežnog modela leži potreba za dekompozicijom složenog mrežnog procesa na niz jednostavnih mrežnih akcija koje se realizuju po principu steka. Pojedini mrežnim slojevima su dodeljeni karakteristični poslovi, a dozvoljena je komunikacija samo između susednih slojeva. Svaki mrežni sloj prihvata usluge nižeg sloja, a sam pruža usluge višem sloju uz nezavisnu optimizaciju sopstvenih mrežnih parametara. Ovaj princip omogućava jasno razgraničenje između slojeva čime se održavanje steka protokola pojednostavljuje. Značajna prednost slojevite arhitekture leži u činjenici da se na ovaj način omogućava fokusiranje smo na sloj na kome se implementira algoritam bez potrebe da se brine o ostatku steka protokola.

Međutim, iako je višeslojni dizajn komunikacionih protokola izuzetno doprineo razvoju mrežnih komunikacija, sam je postao ograničavajući faktor kod primene u mobilnim komunikacionim sistemima [1]. U prvom redu zbog toga što specifični aspekti bežičnih komunikacija nisu uzeti u obzir prilikom dizajna standardnog ISO/OSI steka protokola. Neke od važnih karakteristika mobilnih komunikacija, a koje nisu razmatrane prilikom dizajna klasičnog steka protokola su: vremenski promenljive karakteristike komunikacionog kanala, mobilnost mrežnih čvorova i mogućnost dinamičkog ulaska, odnosno, izlaska terminala iz zone pokrivenosti. Uvođenje savremenih servisa bežičnih komunikacija značajno utiče i na razvoj novih tipova mreža. Bežične mreže po pravilu nemaju centralizovano upravljanje svojim

resursima. Primer novih tipova bežičnih mreža koje ne poseduju fiksnu infrastrukturu su *ad-hoc*, *mesh* i *senzorske mreže*. Analiza faktora koji utiču na otpornost *ad-hoc* mreža na smetnje data je u radu [2]. Obzirom na ograničene predajne resurse mobilnih mrežnih čvorova, komunikacija između čvorova koji nisu u dometu odvija se posredstvom susednih čvorova (engl. *multihop*). U zavisnosti od željene komunikacije, pojedini mrežni čvorovi mogu biti izvorišni, odredišni ili prolazni. Tako, optimalna predajna politika može imati za cilj minimizaciju broja transmisija između mrežnih čvorova ili minimizaciju srednje predajne snage mrežnih čvorova. Kod senzorskih mreža, koje po pravilu čini veliki broj mrežnih čvorova, nametnuta su ograničenja u pogledu cene koštanja, životnog veka baterijskog napajanja, računске snage procesora kao i memorijskog kapaciteta.

Pored tradicionalnih mrežnih usluga, savremene bežične mreže moraju da obezbede i transfer multimedijalnih sadržaja. Najznačajnije aplikacije koje treba da budu podržane su prenos govora preko Internet protokola (VoIP) kao i tokovi podataka muzičkog i video sadržaja. U zavisnosti od podržane aplikacije, ITU-T je standardizovao ključne faktore koji definišu kvalitet pruženog servisa (engl. Quality of Service QoS) iz perspektive korisnika [3]. Ključni faktori definisani preporukom G.1010 su: *kašnjenje*, *varijacija kašnjenja* i *gubitak informacija*. Tako, aplikacije koje podržavaju konverzionu govor mogu imati kašnjenje u jednom smeru do 150ms, dok se za aplikacije zasnovane na Web pretraživaču dozvoljava kašnjenje i do 2s. Da bi se zadovoljio zahtevani QoS u bežičnom okruženju, neophodno je izvršiti optimizaciju raspoloživih mrežnih resursa. Optimizacija mrežnih parametara najčešće mora obuhvatiti više mrežnih ISO/OSI slojeva u cilju zadovoljavanja postavljenih QoS zahteva.



Slika 1. Bežični komunikacioni sistem sa jednim korisnikom i povratnim kanalom za upravljane predajom.

Zajednička optimizacija mrežnih parametara više ISO/OSI slojeva naziva se *dizajn prepletenih slojeva* (engl. cross-layer design) [1]. Realizacija optimalnog transmissionog protokola mrežnog čvora zasnovanog na dizajnu prepletenih mrežnih slojeva, podrazumeva dostupnost svim mrežnim parametrima na svim mrežnim slojevima u steku protokola. Dakle, osnovni preduslov za realizaciju optimalnih mrežnih algoritama u bežičnom mrežnom okruženju je obezbeđenje komunikacije između svih slojeva steka protokola. Međutim, standardna organizacija steka protokola, ne podržava razmenu poruka (parametara) između više slojeva. Generalno, u zavisnosti od cilja optimizacije, optimizacione metode se mogu podeliti na *korisnički orijentisane* (engl. user-centric), odnosno *mrežno orijentisane* (engl. network centric). Tako, ciljevi optimizacije se mogu iskazati kroz minimizaciju kašnjenja ili kroz maksimizaciju propusnog opsega mreže. U literaturi su uglavnom prikazana „ad-hoc“ cross-layer rešenja za postavljene ciljeve optimizacije. Većina radova iz ove oblasti optimizuje mrežne parametre samo na jednom sloju, koristeći informacije susednih. Nekoliko arhitektura cross-layer dizajna prikazano je u [4]. U [5] su prezentovane teorijske osnove za zajedničku optimizaciju mrežnih parametara kroz više slojeva, a da se pri tome ne remeti standardna slojevitna mrežna arhitektura.

U ovom radu je razmatrana cross-layer optimizacija parametara bežične arhitekture prikazane na slici 1. Optimizacija predajnog protokola bežičnog mrežnog čvora je analizirana preko podataka sa prvog (PHY) i drugog (MAC-LLC) sloja. Razmatran je uticaj bežičnog komunikacionog kanala sa fedingom, veličina kapaciteta bafera u mrežnom čvoru kao i statističke karakteristike paketskog saobraćaja. Karakteristike komunikacionog kanala sa fedingom su modelovane Markovljevim nizom na PHY sloju slično kao u [6]. Bafer bežičnog komunikacionog kanala ograničenog kapaciteta paketa je takođe modelovan odgovarajućim Markovljevim nizom [7]. Na ovaj način, optimizacija čitavog komunikacionog sistema (sl. 1) je zasnovana na kompozitnom Markovljevom procesu odlučivanja (engl. Markov decision process MDP). U sekciji 2 je prikazan model komunikacionog kanala sa fedingom, definisan je prostor stanja modela i određena je njegova tranziciona matrica. Prostor stanja je određen koristeći vrednost SNR-a na prijemnoj strani. Za realizaciju cross-layer algoritma, trenutno stanje komunikacionog kanala mora biti poznato i predajniku, te se ovaj parametar izračunat na prijemnoj strani šalje predajniku povratnim kanalom (sl. 1). U ovom radu je pretpostavljeno da ova informacija pristiže na predajnik bez grešaka. U sekciji 3 je dat model bafera komunikacionog čvora ograničenog kapaciteta. Razmatranje uticaja stanja predajnog bafera u komunikacionom čvoru na transmissionu politiku se može pripisati MAC-LLC sloju. Određen je prostor stanja za komunikacioni bafer i definisane su

tranzicione matrice ovog Markovljevog niza. Dolazni saobraćaj je modelovan Poasonovom raspodelom, dok je izlazni saobraćaj iz bafera adaptibilan i realizovan amplitudskom kodnom modulacijom sa promenljivim parametrima. Brzina pražnjenja paketa iz bafera zavisi od odabranog koda i tipa modulacije. U sekciji 4 je prikazan optimizacioni model baziran na prostoru stanja koje je definisano za čitav komunikacioni sistem. Naravno, stanje komunikacionog sistema je određeno stanjima i tranzicionim matricama PHY i MAC sloja. Rezultati optimizacionog algoritma zasnovanog na MDP-u su prikazani u sekciji 5. Dobijeni rezultati optimalnog transmissionog protokola ilustrovani su na priloženim graficima.

2. MODEL KOMUNIKACIONOG KANALA SA VREMENSKI KORELISANIM FEDINGOM

U bežičnom okruženju sa puno propagacionih puteva, trenutna vrednost amplitude prijemnog signala je modelovana Rejljevom raspodelom. U ovom radu se razmatra upravo Rejljev kanal sa fedingom korelisanim u vremenu. Najčešće primenjivan model komunikacionog kanala sa fedingom se bazira na Markovljevom nizu koji aproksimira kanal sa konačnim brojem stanja (engl. Finite State Markov Channel FSMC) [8]. Ova aproksimacija izvršena je diskretizacijom kontinualnog kanala sa fedingom na konačni broj stanja preko kojih se kanal može posmatrati separatno. Samo sporo promenljiv Rejljev kanal se može modelovati Markovljevim nizom [9]. U literaturi je prikazano nekoliko različitih kriterijuma za segmentaciju kanala (engl. Channel Partition Method CPM) sa fedingom u cilju dobijanja zadovoljavajućeg FSMC modela. Tako, u [10] je izvršena CPM prema nivou srednje paketske greške (eng. Packet Error Rate PER). Kriterijum za CPM takođe može biti veličina SNR-a na prijemnoj strani [9]. Deljenjem opsega prijemnog SNR-a na konačan broj nepreklopljenih opsega, formiran je FSCM model za Rejljev feding kanal. U radu [11] je analizirana optimalna predajna politika u funkciji različitih kriterijuma za modelovanje FSCM-a na fizičkom sloju.

U ovom radu je korišćen FSCM model kod koga se izbor prostora stanja komunikacionog kanala vrši prema vrednosti SNR-a na prijemnoj strani [9]. Dakle, komunikacioni kanal sa fedingom je predstavljen Markovljevim nizom od K stanja. Svako stanje predstavlja određeni opseg niva fedinga na prijemnoj strani. Pretpostavlja se da su stanja stacionarna i da je proces ergodičan (nezavisan od vremena). Za Rejljev kanal sa fedingom funkcija gustine raspodele verovatnoće (engl. probability density function PDF) može se predstaviti sledeći način:

$$p_{\Gamma}(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), & \gamma > 0 \\ 0, & \gamma < 0 \end{cases} \quad (1)$$

gde je $\bar{\gamma}$ srednja, a γ trenutna vrednost pojačanja kanala (engl. channel gain). Pojačanje kanala je podeljeno na K sekcija korišćenjem $K+1$ nivoa na sledeći način:

$$0 = \gamma_0 < \gamma_1 < \dots < \gamma_{K-1} < \gamma_K \rightarrow \infty. \quad (2)$$

Komunikacioni kanal se nalazi u stanju g , $g \in \{0, 1, \dots, K-1\}$, ako je $\gamma_k \leq \gamma \leq \gamma_{k+1}$. Ako sa G_i označimo stanje komunikacionog kanala za vreme frejma i , onda se

verovatnoća tranzicije iz stanje g u g' , $p^{(G)}(g, g')$, može definisati na sledeći način:

$$p^{(G)}(g, g') = \Pr\{G_i = g' | G_{i-1} = g\}. \quad (3)$$

Verovatnoća da se komunikacioni kanal nađe u stabilnom stanju (engl. steady state probability) g se određuje na sledeći način:

$$p^{(G)}(g) = \exp\left(-\frac{\gamma_g}{\bar{\gamma}}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_{g+1}}{\bar{\gamma}}\right). \quad (4)$$

Za određivanje tranzicionih verovatnoća za model sa K stanja izrazi (7)-(11), treba odrediti broj preseka u jednoj sekundi (N_g) γ i γ_g :

$$N_g = \sqrt{\frac{2\pi\gamma_g}{\bar{\gamma}}} f_D \exp\left(-\frac{\gamma_g}{\bar{\gamma}}\right), \quad g \in \{0, 1, \dots, K-1\}, \quad (5)$$

gde je f_D maksimum Doplerove frekvencije kanala. Nivo γ_g u odnosu na koji se određuje broj preseka, zavisi od posmatranog stanja kanala. Maksimalna Doplerova frekvencija za datu brzinu kretanja terminala v [m/s] i noseće frekvencije f je određena:

$$f_D = f \frac{v}{c}, \quad (6)$$

gde je c [m/s] brzina svetlosti [9]. Podrazumevajući da je feding dovoljno spor da kanal ostaje nepromenjen za vreme trajanja vremenskog frejma (T_f), a da se tranzicija stanja obavlja posle svakog frejma, i to samo između susednih stanja, verovatnoća tranzicije stanja za kanal sa K stanja se može napisati:

$$p^{(G)}(g, g-1) = \frac{N_g T_f}{p^{(G)}(g)}, \quad g \in \{1, \dots, K-1\} \quad (7)$$

$$p^{(G)}(g, g+1) = \frac{N_{g+1} T_f}{p^{(G)}(g)}, \quad g \in \{0, 1, \dots, K-2\} \quad (8)$$

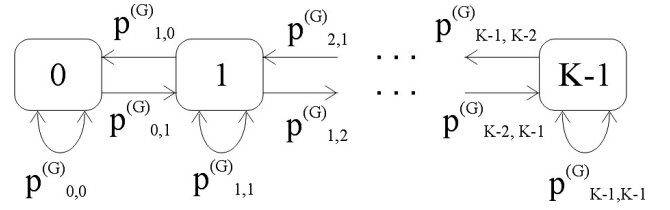
$$p^{(G)}(g, g) = 1 - p^{(G)}(g, g-1) - p^{(G)}(g, g+1), \quad g \in \{1, \dots, K-2\} \quad (9)$$

$$p^{(G)}(0, 0) = 1 - p^{(G)}(0, 1), \quad (10)$$

$$p^{(G)}(K-1, K-1) = 1 - p^{(G)}(K-1, K-2). \quad (11)$$

Tranziciona matrica komunikacionog kanala sa fedingom za slučaj od K stanja, P_G , se formira na osnovu izraza (7)-(11). Model Markovljevog niza za kanal sa sa fedingom je predstavljen na slici 2. Tranziciona matrica ovog modela ima kvadratnu strukturu kako je to prikazano u (12). Radi pojednostavljenja: $p^{(G)}(g, g-1) = p_{g, g-1}^{(G)}$.

$$P_G = \begin{bmatrix} p_{0,0}^{(G)} & p_{0,1}^{(G)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ p_{1,0}^{(G)} & p_{1,1}^{(G)} & p_{1,2}^{(G)} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & p_{K-1, K-3}^{(G)} & p_{K-1, K-2}^{(G)} & p_{K-1, K-1}^{(G)} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & p_{K-1, K-2}^{(G)} & p_{K-1, K-1}^{(G)} \end{bmatrix} \quad (12)$$



Slika 2. Markovljev model Rejljevog komunikacionog kanala sa K stanja. Stanja su definisana na bazi nivoa fedinga a verovatnoća tranzicije stanja izrazima (7)-(11).

3. MODEL BAFERA OGRANIČENOG KAPACITETA

Bafer ograničenog kapaciteta komunikacionog čvora može biti značajan izvor gubljenja paketa. Dinamika pristizanja paketa u bafer je modelovana Poasonovom raspodelom, tako da svaki paket koji pristigne u bafer kad je ovaj popunjen biće odbačen. Punjenje, odnosno praznjenje bafera, se odvija u jednakim diskretizovanim vremenskim frejmovima (T_f). Brzina slanja paketa iz bafera ima direktni uticaj na verovatnoću odbacivanja paketa. Tako, ako se praznjenje 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 povećanja brzine slanja paketa izborom modulacione šeme sa većim brojem konstelacionih stanja. Detaljna analiza bafera ograničenog kapaciteta je data u prethodnim radovima [7]. Prostor stanja Markovljevog niza kojim je opisan bafer kapaciteta B paketa je određen brojem paketa u njemu:

$$B = \{b_0, b_1, \dots, b_B\}. \quad (13)$$

Da bi se potpuno definisao Markovljev niz, potrebno je odrediti verovatnoću tranzicije $p^{(B)}(i, j)$ iz stanja i u stanje j . Tranzicione verovatnoće se izračunavaju izrazom:

$$p^{(B)}(i, j) = \begin{cases} A_{j-i+u_i}, & i-u_i \leq j < b_B \\ 1 - \sum_{k=0}^{b_B+i+u_i-1} A_k, & j = b_B \\ 0, & \text{drugde} \end{cases}, \quad (14)$$

gde je A_k verovatnoća da k paketa pristigne u bafer za vreme trajanja frejma a u_i broj paketa koji se šalju za vreme i -tog frejma. Kako je već napomenuto, proces pristizanja paketa u bafer je modeliran Poasonovom raspodelom:

$$A_k = \frac{1}{k!} \exp(-\lambda T_f) \cdot (\lambda T_f)^k. \quad (15)$$

Radi pojednostavljenja $p^{(B)}(i, j) = p_{i,j}^{(B)}$. Tranziciona matrica verovatnoća Markovljevog procesa koji modeluje bafer konačne dužine P_B za jednu vrednost parametra u ima sledeću kvadratnu strukturu:

$$P_B = \begin{bmatrix} p_{0,0}^{(B)} & p_{0,1}^{(B)} & p_{0,2}^{(B)} & \dots & p_{0,B}^{(B)} \\ 0 & p_{1,1}^{(B)} & p_{1,2}^{(B)} & \dots & p_{1,B}^{(B)} \\ 0 & 0 & p_{2,2}^{(B)} & \dots & p_{2,B}^{(B)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{B,B}^{(B)} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

4. MODEL KOMUNIKACIONOG SISTEMA

Blok šema razmatranog bežičnog komunikacionog sistema sa jednim korisnikom prikazana je na slici 1. Sistem je analiziran kroz sukcesivne vremenske frejmove jednakog trajanja T_f , tako da 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 pristižu u bafer. Tek po isteku vremenskog frejma i na postojeće stanje bafera se dodaje broj prispelih paketa. Srednja vrednost broja paketa koji pristignu u bafer je $\lambda = E\{A_i\}$, gde je $E\{\bullet\}$ operator matematičkog očekivanja. Pretpostavljeno je da su svi paketi jednake dužine L bitova. Gubljenje paketa u razmatranom komunikacionom sistemu je posledica komunikacionog kanala sa fedingom i ograničenog kapaciteta bafera u komunikacionom čvoru. Pražnjenje bafera komunikacionog čvora se odvija adaptibilnom brzinom koja je u funkciji broja pristiglih paketa, zahtevanih uslova optimizacije i trenutnog stanja komunikacionog sistema. Adaptacija brzine pražnjenja paketa iz bafera se realizuje promenom konstelacione veličine M , kvadraturne amplitudske modulacije (MQAM) uz fiksiranje brzine simbola [7], [10].

Razmatran optimalni transmisioni protokol treba da minimizira srednju vrednost odbačenih paketa uz minimalnu raspoloživu snagu. Istovremeno vrednost BER-a (P_b) je fiksirana, kao to zahtevaju neki komunikacioni protokoli. Matematička reprezentacija ovog optimizacionog problema [12] može se predstaviti na sledeći način:

$$\arg \min_{U_0, \dots, U_{T-1}} \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} (L_o(B_i, U_i)) \right\}, \quad (17)$$

pod sledećim uslovima:

$$U_i \in \{0, 1, 2, \dots, B_i\}, \quad \forall i = 0, 1, \dots, T-1, \quad (18)$$

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} (P(B_i, U_i, P_b)) \right\} \leq \bar{P}. \quad (19)$$

Dakle, treba minimizirati srednju vrednost broja odbačenih paketa (L_o) uz angažovanje srednje vrednosti predajne snage koja nije veća od \bar{P} . Algoritmu za optimizaciju stoji na raspolaganju promena parametara na fizičkom sloju što podrazumeva podešavanje predajne snage i broja izlaznih paketa za svaki frejm. Komunikacioni sistem koji obuhvata oba izvora gubljenja paketa, može se predstaviti kompozitnim stanjem komunikacionog sistema. Dakle, stanje komunikacionog sistema za frejm i , S_i , je određeno dvema komponentama: stanjem bafera (b) i stanjem komunikacionog kanala (g), odnosno $S_i(b, g) = s$. Na osnovu ovih parametara, odnosno stanja sistema, formira se optimizaciona politika koja treba da zadovolji postavljene kriterijume u (18) i (19). Sa druge strane, za realizaciju optimizacione politike stoje na raspolaganju samo dva parametra i to na fizičkom sloju. Radi se o mogućnosti izbora brzine pražnjenja paketa iz bafera (U_i), odnosno angažovanje odgovarajuće srednje snage transmisionog podsistema (\bar{P}). Da bi se komunikacioni sistem potpuno opisao Markovljevim nizom, pored određivanja prostora stanja sistema treba odrediti i tranzicionu matricu verovatnoća sistema P_S na sledeći način:

$$P_S(s, s') = P_r \{ S_{i+1} = s' | S_i = s, U_i = u \} \quad (20)$$

$$P_S(s, s') = P_G(g, g') \cdot P_B(b, b'). \quad (21)$$

Rešenje optimizacionog problema (17) se zamenjuje rešenjem sledećeg optimizacionog problema:

$$J_{avr} = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} C_I(B_i, U_i, P_b) \right\}, \quad (22)$$

gde je

$$C_I(b, g, u) = P(u, g, P_b) + \beta \cdot L_o(b, u). \quad (23)$$

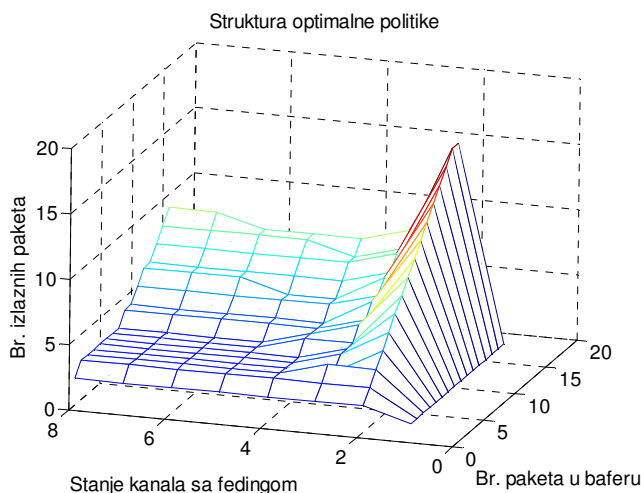
Funkcija $C_I(b, g, u)$ predstavlja „trošak“ koji zahteva komunikacioni sistem kada se nalazi u stanju $S_i(b, g)$ a zahteva se slanje u paketa. Pozitivnim težinskim faktorom β se podešava uticaj (udeo) pojedinih komponenti u zbiru (23). Za pojedine vrednosti parametra β , rešavanjem optimizacionog problema (17) se određuju optimalne vrednosti L_o i \bar{P} . Dobijene vrednosti za L_o i \bar{P} se nazivaju *pareto-optimalne* vrednosti, jer se promenom vrednosti jednog parametra direktno utiče na vrednost drugog. Dakle, nije moguće popraviti performanse sistema povećanjem jednog parametra, a da ih vrednost drugog parametra ne pokvari. Tako, optimalna vrednost se izračunavaju za zadatu vrednost parametra L_o (ili \bar{P}), dok se optimalna vrednost parametra \bar{P} (ili L_o) očitava sa grafika pareto-optimalnih vrednosti (za odgovarajuću vrednost parametra β). Minimizacija srednje vrednosti troškova može se ostvariti primenom Markovljevog procesa odlučivanja (engl. Markov decision process MDP) [11], [12]. Skup akcija u ovom MDP modelu predstavlja mogućnost izbora broja paketa za slanje. U prethodnim sekcijama su dati Markovljevi modeli procesa na prvom i drugom sloju ISO/OSI modela, čime je definisan kompozitni MDP. Uz definisanu funkciju troškova (23), model MDP-a je kompletan. Optimalna transmisiona politika π^* se dobija minimizacijom sledećeg optimizacionog problema:

$$\pi^* = \arg \min_{\pi} J_{avr}(\pi). \quad (23)$$

Rešenje ovog problema se može prikazati sledećom notacijom $U_i = \pi^*(B_i, G_i)$, gde je π^* optimalna stacionarna politika. Dakle, optimizaciona politika se donosi za svaki frejm i na osnovu stanja komunikacionog sistema koje je u funkciji popunjenosti komunikacionog bafera ograničenog kapaciteta i stanja komunikacionog kanala sa fedingom. Rešavanjem optimalnog problema (23) dobija se broj paketa koje treba poslati iz bafera za vreme trajanja frejma i . Na osnovu zahtevanog broja paketa određuje se potreban nivo predajne snage za svaki frejm ponaosob. Optimizacioni algoritam minimizira srednju vrednost snage predajnika uz zadovoljenje zahtevanog BER-a. Sredstvo kojim se adaptira broj izlaznih paketa je MQAM.

5. NUMERIČKI REZULTATI

U ovoj sekciji su prezentovani dobijeni numerički rezultati primenom optimizacionog algoritma baziranog na MDP-u. Simulacioni rezultati su dobijeni za pristizanje paketa u bafer prema Poasonovoj raspodeli sa srednjom brzinom $\lambda = 1000$ paketa/ sekundi, svi paketi su jednake

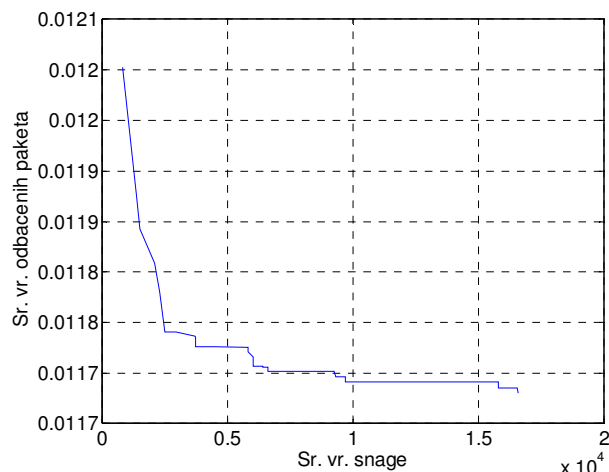


Slika 3. Struktura optimalne politike u funkciji stanja komunikacionog sistema koje je određeno brojem paketa u baferu i stanja bežičnog kanala sa fedingom.

dužine $L=100$ bitova, a kapacitet bafer je $B=15$ paketa, dok je zahtevani BER, $P_b=0.001$. Ostali uslovi simulacije odgovaraju onim datim u [7] i [12]. Grafik na slici 3 je izrađen za bežični kanal sa Rejljevim fedingom i kapacitetom bafera od 15 paketa u komunikacionom čvoru. Broj izlaznih paketa predstavlja rešenje optimizacionog problema, a minimum potrebne snage se izračunava na osnovu broja izlaznih paketa određenih optimalnom politikom. Sa grafika se može jasno uočiti da sa povećanjem broja paketa u baferu treba povećati i broj izlaznih paketa. Međutim, sa porastom kvaliteta bežičnog kanala ne dolazi obavezno do povećanja broja izlaznih paketa. Na slici 4 prikazan je grafik koji predstavlja pareto-optimalna rešenja međusobne zavisnosti srednje vrednosti odbačenih paketa i srednje vrednosti angažovane snage. Dakle, za zadatu srednju vrednost angažovane snage, sa grafika se očitava pareto-optimalna srednja vrednost odbačenih paketa.

5. ZAKLJUČAK

Savremeni komunikacioni sistemi pružaju atraktivne multimedijalne servise i u bežičnom okruženju. Međutim, realizacija QoS-a koje zahtevaju pojedine multimedijalne aplikacije nije moguća u standardnoj ISO/OSI slojevitoj mrežnoj organizaciji. Komunikacioni sistemi koji poseduju mogućnost adaptacije kodne i modulacione šeme, mogu uspešno izvršiti optimizaciju mrežnih parametara i obezbediti zahtevani QoS. Optimizacioni algoritmi najčešće zahtevaju zajedničku optimizaciju parametre više ISO/OSI slojeva. Za primenu optimizacionih metoda neophodno je izvršiti modelovanje bežičnog komunikacionog sistema. Modelovanjem PHY i MAC-LLC sloja Markovljevim nizovima, dobijen je kompozitni Markovljev niz koji predstavlja model bežičnog komunikacionog sistema. Ako se pored tranzicione matrice i prostora stanja sistema definiše i prostor stanja akcija, može se kao optimizacioni matematički aparat upotrebiti MDP. Uvođenjem funkcije koja predstavlja trošak dobijen prilikom tranzicije sistema iz jednog stanja u drugo, kompletiran je MDP sistem. Primenom MDP-a na model bežičnog komunikacionog sistema sa jednim korisnikom optimizovan je broj odbačenih paketa uz uslov da srednja vrednost angažovane snage ne bude veća od zadate, a vrednost BER-a je održavana konstantnom. MDP je matematički aparat koji minimizira funkciju troškova pod



Slika 4. Grafik pareto-optimalnih rešenja srednje vrednosti odbačenih paketa i srednje vrednosti angažovane snage.

zadatim uslovima. Tako, MDP omogućava rešavanje optimizacionih problema koji poseduju više kriterijumskih funkcija. U prikazanom primeru, minimizirana je srednja vrednost odbačenih paketa uz ograničenje angažovane srednje snage. Optimalna politika je realizovana primenom adaptivne modulacione šeme promenom brzine praznjenja bafera za svako stanje komunikacionog sistema definisano stanjem komunikacionog kanala i brojem paketa u baferu.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] M. Jevtović, Z. Veličković, "Ad hoc mobile networks survivability and cross-layer protocol design", *UNITECH 09*, 2009.
- [3] ITU-T, "Recommendation G. 1010: End-user multimedia QoS categories", 2001.
- [4] B. Daňobetia-Paul at all, "Cross-layer architectre design in wirelsss networks", pp. 305-312, *JITEL 2008*.
- [5] F. Fu, M. Schaar, "A new theoretic foundation for cross-layer optimization", *UCLA Technical Report*, 2007.
- [6] R. Berry, R. Gallager, "Communication over fading channels with delay constraints", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 5, pp. 1135–1149, 2002.
- [7] Z. Veličković, M. Jevtović, "Model bafera u sistemu sa adaptivnom modulacijom i kodiranjem primenjen na bežični kanal", rad u pripremi, *INFOTEH 2010*.
- [8] P. Sadeghi, R. Kennedy, P. Rapajic, R. Shams, "Finite-State Markov Modeling Of Fading Channels", *IEEE Sig. Process. Mag.*, vol. 25, no. 5, pp. 57–80, Sept. 2008.
- [9] H. 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.
- [10] Q. Liu, S. Zhou, G. Giannakis, "Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, No. 5, pp. 1746–1755, 2004.
- [11] X. Bai, A. Shami, "Two dimensional cross-layer optimization for packet transmission over fading channel", *IEEE trans. Wireless Comm.*, vol 7, no. 10, pp. 3813-3822, 2008.
- [12] 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.