

# Statistika SIR-a na izlazu sistema sa neregenerativnim relejem u prisustvu interferencije

Aleksandra M. Cvetković<sup>1</sup>, Jelena A. Anastasov<sup>2</sup>, Goran T. Đorđević<sup>3</sup>, Mihajlo Č. Stefanović<sup>4</sup>

**Sadržaj** - U ovom radu razmatrane su statističke karakteristike odnosa snage signala i interferencije na prijemom kraju linka sa dve deonice u prisustvu kanalne interferencije. Neregenerativni relejni terminal, čije je pojačanje zasnovano na informaciji o stanju kanala, kao i prijemni terminal su pod uticajem kanalne interferencije. Izvedeni su analitički izrazi za funkciju gustine verovatnoće i kumulativnu funkciju raspodele odnosa snage signala i interferencije. Numerički rezultati potvrđeni su Monte Karlo simulacijama.

**Ključne reči** – kanalna interferencija, neregenerativni relej, verovatnoća prekida, Rejljev feding.

## I UVOD

Tehnika prenosa signala preko više deonica sa relejnim terminalima ima brojne prednosti u odnosu na tradicionalne komunikacione mreže i koristi se često u bežičnim i *ad-hoc* komunikacionim sistemima. Kada su smetnje u kanalu direktnog linka velike, između izvornog i odredišnog terminala postavlja se još jedan terminal (relejni). Korišćenje linka sa dve deonice omogućava mnogo bolju komunikaciju čvorova i ne zahteva veliku snagu na predaji u cilju smanjivanja fedinga i efekta senke.

U zavisnosti od tipa i kompleksnosti relejnog terminala, postoje dva osnovna modela prenosa sa dve deonice: regenerativni i neregenerativni. Kod neregenerativnog prenosa signal se samo pojačava i ponovo šalje do narednog terminala. Nasuprot njemu, pri regenerativnom prenosu signal se dekoduje, pojačava i zatim ponovo šalje do sledećeg čvora [1-2]. Neregenerativni model prenosa se dodatno deli na dve podkategorije: sistemi sa relejem čije je pojačanje zasnovano na informaciji o trenutnom stanju kanala (CSI- channel state information) sa prethodne deonice i one sisteme u kojima relej ima fiksno pojačanje [3-4]. U prvoj potkategoriji relej koristi informaciju o

stanju kanala sa prve deonice u cilju kontrolisanja snage signala na drugoj deonici. S druge strane, kada se koristi relej sa fiksnim pojačanjem na izlazu sistema dobija se signal promenljive snage, ali praktična realizacija ovakvog prenosa je znatno jednostavnija od CSI baziranog prenosa [5-6].

U mnogim do sada objavljenim radovima cilj istraživanja je bio izračunavanje verovatnoće prekida bežičnih komunikacionih sistema sa dve deonice u sredini u kojoj je nivo šuma znatno veći od nivoa interferencije. Verovatnoća prekida, kao i verovatnoća greške kooperativnog sistema prilikom regenerativnog i neregenerativnog CSI prenosa u kanalima sa Rejljevom [5] i Nakagami-jevom fedingom [7] je takođe analizirana. Nadalje su istraživane performanse kooperativnog sistema pri prenosu signala kada relejni terminal ima fiksno pojačanje [2]. Analiziran je i prenos signala preko više deonica neregenerativnog releja sa fiksnim pojačanjem u kanalima sa Nakagami-n (Rajsovim), Nakagami-q (Hojtovim) i Nakagami-m fedingom [4]. Za razliku od navedenih radova, gde su razmatrani relejni sistemi samo u prisustvu Gausovog šuma, a uticaj interferencije je zanemaren, u radu [8] izvedene su formule u zatvorenom obliku za izračunavanje verovatnoće prekida neregenerativnog i regenerativnog releja u sredini u kojoj je nivo interferencije mnogo veći od nivoa šuma. U tom radu je razmatrana verovatnoća prekida za slučaj kada je samo odredišni terminal pod uticajem ko-kanalne interferencije, a na prvoj deonici je prisutan samo beli Gausov šum.

U ovom radu, razmatran je neregenerativni kooperativni sistem sa relejem čije je pojačanje zasnovano na informaciji o trenutnom stanju kanala i analiziran prenosni kanal sa Rejljevom fedingom u prisustvu kanalne interferencije. Prepostavili smo da je na svakoj deonici prisutan uticaj interferencije. Izvedene su formule u zatvorenom obliku za funkciju gustine verovatnoće i kumulativnu funkciju raspodele odnosa snage signala i interferencije na izlazu sistema. Numerički rezultati, dobijeni na osnovu analitičkog pristupa, potvrđeni su Monte Karlo simulacijama.

## II MODEL SISTEMA

Na slici 1 prikazan je model bežičnog komunikacionog kooperativnog sistema. Razmatrali smo bežični komunikacioni sistem u kome je prenos između izvornog  $S$  i odredišnog terminala  $D$  ostvaren preko neregenerativnog releja. Uticaj ko-kanalne interferencije i belog aditivnog Gausovog šuma je prisutan na mestima relejnog i

Ovaj rad je delom finansiran od strane Ministarstva nauke Republike Srbije u okviru projekta "Kompiuterska simulacija i 3-D modeliranje originalnih patenata Nikole Tesle" (evid.br.-12210).

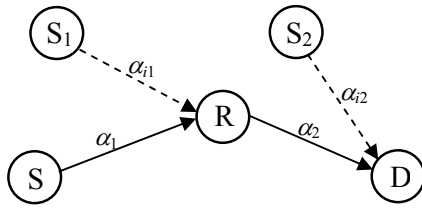
<sup>1</sup>Aleksandra M. Cvetkovic, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, e-mail: aleksandra.cvetkovic@elfak.ni.ac.rs

<sup>2</sup>Jelena A. Anastasov, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, e-mail: anastasovjelena@gmail.com

<sup>3</sup>Goran T. Đorđević, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, e-mail: goran@elfak.ni.ac.rs

<sup>4</sup>Mihajlo Č. Stefanović, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, e-mail: mihajlo.stefanovic@elfak.ni.ac.rs

određišnog terminala. Nivo kanalne inerferencije je znatno veći od nivoa termalnog šuma tako da se u takvoj sredini nivo šuma može zanemariti.



Sl. 1. Komunikacioni kanal sa dve deonice u prisustvu fedinga i interferencije

Uvodimo pretpostavku da terminal  $S$  emituje željeni signal  $r_s(t)$ , čija je srednja snaga  $\varepsilon_1$ , prema releju  $R$ , i da je na releju  $R$  prisutna ko-kanalna interferencija  $i_1(t)$ , čija je snaga  $\varepsilon_{i1}$ . Dolazni signal na ulazu terminala  $R$ , u sredini u kojoj se nivo šuma može zanemariti zbog dominantnijeg uticaja interferencije, može se zapisati u obliku

$$r_R(t) = \alpha_1 r_s(t) + \alpha_{i1} i_1(t) \quad (1)$$

gde je  $\alpha_1$  amplituda signala u prisustvu fedinga u kanalu između terminala  $S$  i  $R$ , a  $\alpha_{i1}$  amplituda kanalne interferencije u prisustvu fedinga na ulazu terminala  $R$ . U neregnerativnim prenosnim sistemima, signal  $r_R(t)$  se množi pojačanjem  $G$  terminala  $R$  i zatim šalje do terminala  $D$  gde je takođe prisutna kanalna interferencija  $i_2(t)$  od terminala  $S_2$  sa snagom  $\varepsilon_{i2}$ . Prijemni signal na ulazu u terminal  $D$  može predstaviti kao

$$r_D(t) = \alpha_2 G(\alpha_1 r_s(t) + \alpha_{i1} i_1(t)) + \alpha_{i2} i_2(t) \quad (2)$$

gde je  $\alpha_2$  amplituda fedinga u kanalu između terminala  $R$  i  $D$ ,  $\alpha_{i2}$  amplituda ko-kanalne interferencije u prisustvu fedinga na ulazu terminala  $D$ .

Na kraju, odnos signal-šum na prijemu je dat sledećim izrazom

$$s_{eq} = \frac{\alpha_1^2 \alpha_2^2 G^2 \varepsilon_0}{\alpha_2^2 \alpha_{i1}^2 G^2 \varepsilon_{i1} + \alpha_{i2}^2 \varepsilon_{i2}} = \frac{\frac{\alpha_1^2 \varepsilon_1}{\alpha_{i1}^2 \varepsilon_{i1}} \frac{\alpha_2^2 \varepsilon_2}{\alpha_{i2}^2 \varepsilon_{i2}}}{\frac{\alpha_2^2 \varepsilon_2}{\alpha_{i2}^2 \varepsilon_{i2}} + \frac{\varepsilon_2}{\alpha_{i1}^2 \varepsilon_{i1} G^2}} \quad (3)$$

gde je  $\varepsilon_2$  snaga signala na izlazu releja.

Kada je releju dostupna informacija o stanju kanala sa prve deonice, pojačanje se definiše kao

$$G_1^2 = \frac{\varepsilon_2}{\alpha_1^2 \varepsilon_1 + \alpha_{i1}^2 \varepsilon_{i1}} \quad (4)$$

Stoga se trenutna vrednost ekvivalentnog izlaznog SIR-a dobija smenom jednačine (4) u jednačinu (3) i ima oblik

$$s_{eq} = \frac{s_1 s_2}{s_1 + s_2 + 1} \quad (5)$$

gde je

$$s_1 = \frac{\alpha_1^2 \varepsilon_1}{\alpha_{i1}^2 \varepsilon_{i1}} \quad (6)$$

trenutna vrednost SIR-a na prvoj deonici i

$$s_2 = \frac{\alpha_2^2 \varepsilon_2}{\alpha_{i2}^2 \varepsilon_{i2}} \quad (7)$$

trenutna vrednost SIR-a na drugoj deonici. Kooperativni sistem sa relejem čije je pojačanje zasnovano na informaciji o trenutnom stanju kanala zahteva stalnu procenu amplitude signala u kanalu sa fedingom sa prve deonice kako bi invertovao uticaj fedinga i ograničio izlaznu snagu releja [5].

Pretpostavljamo da su obe deonice pod uticajem nezavisnog i ne nužno identično raspodeljenog Rejljevog fedinga. U tom slučaju, funkcija gustine verovatnoće amplitude signala u prisustvu fedinga je data izrazom:

$$p_{\alpha_k}(\alpha_k) = \frac{\alpha_k}{\sigma_{\alpha_k}^2} \exp\left(-\frac{\alpha_k^2}{2\sigma_{\alpha_k}^2}\right), k=1, 2 \quad (8)$$

Pod pretpostavkom da je kanalna interferencija u prisustvu fedinga modelovana Rejljevim slučajnim procesom, funkcija gustine verovatnoće amplitude  $\alpha_{i1}$  i  $\alpha_{i2}$  u prisustvu fedinga je data izrazom:

$$p_{\alpha_{ik}}(\alpha_{ik}) = \frac{\alpha_{ik}}{\sigma_{\alpha_{ik}}^2} \exp\left(-\frac{\alpha_{ik}^2}{2\sigma_{\alpha_{ik}}^2}\right), k=1, 2 \quad (9)$$

Funkcija gustine verovatnoće trenutnog SIR-a na ulazu u terminal  $R$  ( $k=1$ ) i terminal  $D$  ( $k=2$ ),  $s_k = \alpha_k^2 / \alpha_{ik}^2$ , se izračunava kao [9, jednačine (5-5) i (6-43)]

$$p_{s_k}(s_k) = \frac{1}{2\sqrt{s_k}} \int_0^\infty s_k p_{\alpha_k}(\alpha_k \sqrt{s_k}) p_{\alpha_{ik}}(\alpha_{ik}) d\alpha_{ik}, k=1, 2 \quad (10)$$

gde je  $\alpha_k$  ( $k=1, 2$ ) amplituda željenog signala jedne deonice, i  $\alpha_{ik}$  amplituda interferencije na ulazu odgovarajućeg terminala. Zamenom jednačinom (8) i (9) u (10) dobija se funkcija gustine verovatnoće trenutnog SIR-a na ulazu u terminal

$$p_{s_k}(s_k) = \frac{1}{\bar{s}_k} \frac{1}{(1 + s_k / \bar{s}_k)^2} \quad (11)$$

gde je  $\bar{s}_k = E[\alpha_k^2] / E[\alpha_{ik}^2] = \sigma_{\alpha_k}^2 / \sigma_{\alpha_{ik}}^2$  srednja vrednost SIR-a po deonici. Funkcija raspodele trenutnog SIR-a na ulazu u terminal  $R$  ili  $D$  se može izračunati pomoću izraza

$$P_{s_k}(s_k) = \int_0^q p_{s_k}(u) du = \frac{s_k}{s_k + \bar{s}_k}, k=1, 2 \quad (12)$$

### III STATISTIKA SIR-A NA KRAJU LINKA

U sistemima u kojima je nivo interferencije mnogo veći od nivoa šuma, kumulativna funkcija raspodele SIR-a na izlazu iz sistema definiše se kao verovatnoća da vrednost trenutnog ekvivalentnog SIR-a,  $s_{eq}$ , bude ispod određenog, unapred definisanog praga,  $s$ .

U ovom slučaju, kumulativna funkcija raspodele SIR-a može se odrediti kao

$$\begin{aligned}
P_{eq1}(s) &= \int_0^{\infty} P_{s_1} \left( \frac{s_1 s_2}{s_1 + s_2 + 1} \leq s | s_2 \right) p_{s_2}(s_2) ds_2 = \\
&= \int_0^s P_{s_1} \left( s_1 \geq \frac{s(s_2 + 1)}{s_2 - s} | s_2 \right) p_{s_2}(s_2) ds_2 + \\
&\int_s^{\infty} P_{s_1} \left( s_1 \leq \frac{s(s_2 + 1)}{s_2 - s} | s_2 \right) p_{s_2}(s_2) ds_2 = \\
&= I_1 + I_2
\end{aligned} \quad (13)$$

gde su

$$I_1 = \int_0^s p_{s_2}(s_2) ds_2 = \frac{s_2}{s_2 + \bar{s}_2} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= \int_s^{\infty} P_{s_1} \left( s_1 \leq \frac{s(s_2 + 1)}{s_2 - s} | s_2 \right) \frac{1}{\bar{s}_2} \frac{1}{(1 + s_2 / \bar{s}_2)^2} ds_2 = \\
&= \int_s^{\infty} \frac{s \bar{s}_2 (s_2 + 1)}{\bar{s}_1 (s_2 - s) + s(s_2 + 1)} \frac{1}{(\bar{s}_2 + s_2)^2} ds_2 = \\
&= \frac{s \bar{s}_2}{s + \bar{s}_2} \frac{1}{(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + s(\bar{s}_1 + \bar{s}_2 - 1))^2} \cdot \\
&\cdot ((\bar{s}_2 - 1)(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + s(\bar{s}_1 + \bar{s}_2 - 1)) + \\
&(s + 1) \bar{s}_1 (s + \bar{s}_2) \log \frac{(s + \bar{s}_1)(s + \bar{s}_2)}{s(s + 1)})
\end{aligned} \quad (15)$$

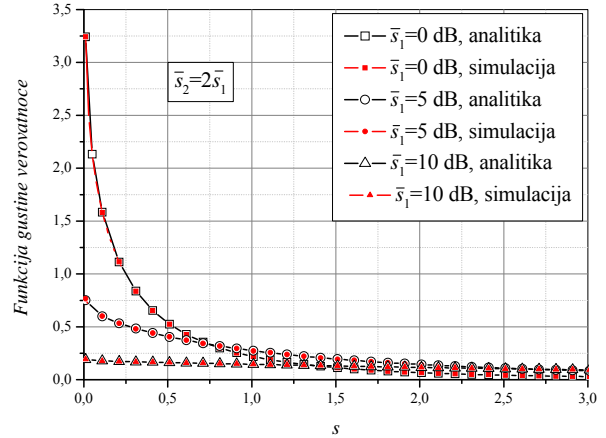
Zamenom jednačine (14) i (15) u (13) dobija se kumulativna funkcija raspodele u zatvorenom obliku trenutnog izlaznog SIR-a za sistem prikazan na slici 1 kada se koristi relej sa pojačanjem koje je zasnovano na informaciji o trenutnom stanju kanala

$$\begin{aligned}
P_{eq1}(s) &= \frac{s}{s + \bar{s}_2} + \frac{s \bar{s}_2}{s + \bar{s}_2} \frac{1}{(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + s(\bar{s}_1 + \bar{s}_2 - 1))^2} \cdot \\
&((\bar{s}_2 - 1)(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + s(\bar{s}_1 + \bar{s}_2 - 1)) + \\
&+ (s + 1) \bar{s}_1 (s + \bar{s}_2) \log \frac{(s + \bar{s}_1)(s + \bar{s}_2)}{s(s + 1)})
\end{aligned} \quad (16)$$

Funkcija gustine verovatnoće trenutnog SIR-a na izlazu definisanog kooperativnog linka može se izračunati diferenciranjem izraza (16) po  $s$  i dobija se izraz sledećeg oblika

$$\begin{aligned}
p_{eq1}(s) &= \frac{\bar{s}_1 \bar{s}_2}{(s + \bar{s}_2)(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + s(\bar{s}_1 + \bar{s}_2 - 1))^3} \cdot \\
&\cdot \left( \frac{s^2 \bar{s}_1 (\bar{s}_1 - 1)^2 + s \bar{s}_2 (\bar{s}_1 - 1)^2 (s + 2 \bar{s}_1)}{s + \bar{s}_1} + \right. \\
&+ \frac{\bar{s}_2^2 (\bar{s}_1 - 2)(s + \bar{s}_1)^2 + \bar{s}_2^3 (s + \bar{s}_1)^2}{s + \bar{s}_1} + \\
&+ (s + \bar{s}_2)(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + s(1 - \bar{s}_1 - \bar{s}_2 + 2 \bar{s}_1 \bar{s}_2)) \cdot \\
&\cdot \log \frac{(s + \bar{s}_1)(s + \bar{s}_2)}{s(s + 1)}
\end{aligned} \quad (17)$$

Na slici 2 prikazana je funkcija gustine verovatnoće trenutnog SIR-a na izlazu iz sistema sa dve deonice kada se koristi relej sa CSI baziranim pojačanjem za nekoliko vrednosti srednjeg SIR-a  $\bar{s}_1$ . Monte Karlo simulacije su prikazane na istoj slici. Simulacione vrednosti funkcije gustine verovatnoće određene su na osnovu  $10^7$  odmeraka. Očigledno je slaganje analitičkih i simulacionih rezultata.



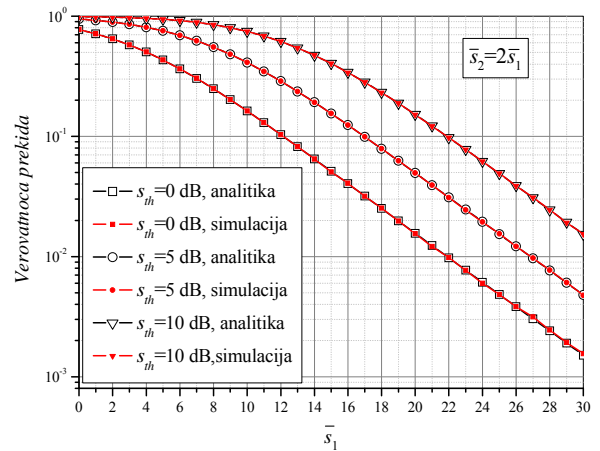
Sl. 2. Funkcija gustine verovatnoće SIR-a na izlazu iz posmatranog sistema

#### IV VEROVATNOĆA PREKIDA

Verovatnoća prekida  $P_{out}$  je jedna od mera performansi sistema u kanalu sa fadingom koja se takođe razmatra i u dizajniranju bežičnog komunikacionog sistema u prisustvu kanalne interferencije.

U sredini u kojoj je nivo šuma zanemarljiv,  $P_{out}$  se definiše kao verovatnoća pri kojoj nivo trenutnog SIR-a na izlazu pada ispod unapred definisanog praga. Iznad ovog praga smatra se da je kvalitet usluga zadovoljavajući. Verovatnoća prekida neregenerativnog CSI prenosa dobija se korišćenjem formule (13)

$$P_{out} = P_{eq1}(s_{th}) \quad (18)$$



Sl. 3. Verovatnoća prekida u funkciji srednjeg SIR-a na prvoj deonici za različite vrednosti praga  $s_{th}$

Verovatnoća prekida u funkciji srednjeg SIR-a prve deonice  $\bar{s}_1$  za različite vrednosti praga prikazane su na slici 3.

Numerički rezultati su potvrđeni Monte Karlo simulacijama. Simulacione vrednosti verovatnoće prekida su određene na osnovu  $10^7$  odmeraka. Vidljivo je potpuno poklapanje krivih sa simulacijama.

#### V ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatrana je statistika kooperativnog sistema sa neregnerativnim prenosom u prisustvu Rejljevog fedinga i kanalne interferencije. Izvedeni su analitički izrazi u zatvornom obliku za funkciju gustine verovatnoće i kumulativnu funkciju raspodele trenutnog SIR-a na izlazu linka sa dve deonice i relejem čije je pojačanje zasnovano na informaciji o trenutnom stanju kanala. Razmatran je uticaj interferencije na svakoj deonici. Prikazani numerički rezultati su potvrđeni Monte Karlo simulacijom.

#### LITERATURA

- [1] Mazen O. Hasna, Mohamed-Slim Alouini, "Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels", *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 5, May 2003, pp. 216-218
- [2] Mazen O. Hasna, Mohamed-Slim Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, November 2004, pp. 1963-1968
- [3] John Boyer, David D. Falconer, Halim Yanikomeroglu, "Multihop diversity in wireless relaying channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, October 2004, pp. 1820-1830
- [4] George K. Karagiannidis, "Performance bounds of multihop wireless communications with blind relays over generalized fading channels", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 3, March 2006, pp. 498-503
- [5] Mazen O. Hasna, Mohamed-Slim Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over

Rayleigh-fading channels", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 6, November 2003, pp. 1126-1131

- [6] T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis, P. T. Mathiopoulos, S. A. Kotsopoulos, "Nonregenerative Dual-Hop Cooperative Links with Selection Diversity", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2006.
- [7] Mazen O. Hasna, Mohamed-Slim Alouini, "Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 1, Januar 2004, pp. 130-135
- [8] Caijun Zhong; Shi Jin; Kai-Kit Wong, "Outage Probability of Dual-Hop Relay Channels in the Presence of Interference", *IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009, 26-29 April 2009, pp. 1-5
- [9] Papoulis A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd edition. McGraw-Hill: New York, 1991

#### VI ABSTRACT

This paper studies SIRs (signal-to-interference ratios) statistics of a dual-hop relay in the presence of co-channel interference. The nonregenerative relay based on channel state information (CSI) and the destination node are both corrupted by co-channel interference. New closed-form expressions for the probability density function (PDF) and cumulative distribution function (CDF) of the output SIR are derived. Numerical results are confirmed by Monte Carlo simulations.

### **OUTPUT SIR'S STATISTICS OF NONREGENERATIVE COOPERATIVE LINK IN THE PRESENCE OF INTERFERENCE**

Aleksandra M. Cvetković, Jelena A. Anastasov, Goran  
T. Đorđević, Mihajlo Č. Stefanović