

# POVEĆANJE KAPACITETA OFDM AF RELAY SISTEMA SA PROMJENLJIVIM POJAČANJEM

Enis Kočan\*, Milica Pejanović-Đurišić\*\*

*Ključne riječi: OFDM, relay sistemi, pojačaj-i-prosljedi, permutacija podnosilaca, kapacitet*

**Sažetak:** U radu su prikazane performanse OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) pojačaj-i-prosljedi (AF - *Amplify-and-Forward*) relay sistema sa promjenljivim pojačanjem i permutacijom podnosilaca na relay stanici, sa stanovišta ostvarivog kapaciteta. Analiziran je sistem sa tri komunikaciona terminala, u kome se na relay stanici primjenjuje šema permutacije podnosilaca (SCP) označena kao BTB SCP, jer je poznato da se njom maksimizuje ostvarivi kapacitet kod OFDM zasnovanih relay sistema. Najprije je izvedena funkcija gustine vjerovatnoće (PDF) odnosa signal/šum (SNR) na prijemu za razmatrani OFDM AF relay sistem sa dva hopa, a na osnovu toga, analitičkim putem je izveden izraz za gornju granicu ostvarivog kapaciteta u scenariju sa Rayleigh-evom uskopojasnom fading statistikom na oba hopa. Validnost sprovedenog analitičkog postupka je verifikovana kroz poređenje analitički dobijenih rezultata sa simulacionim rezultatima. Dobijene vrijednosti kapaciteta OFDM AF relay sistema sa promjenljivim pojačanjem i primjenjenom BTB SCP šemom pokazuju da se ovom šemom ostvaruje značajno unapređenje performansi u oblasti malih SNR vrijednosti, dok se sa porastom SNR-a smanjuje razlika u ostvarivom kapacitetu između razmatranog OFDM AF relay sistema i sistema bez SCP-a.

## 1. UVOD

Relay sistemi su postali predmet intenzivnog interesovanja istraživača poslednjih godina zbog njihove mogućnosti da povećaju domet i/ili kapacitet bežičnih komunikacionih sistema. Posebnu pažnju su izazvali OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

---

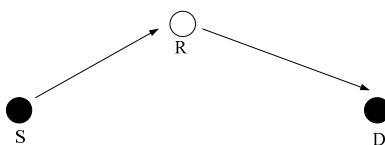
\* Dr Enis Kočan, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Džordža Vašingtona b.b. 81000 Podgorica.

\*\* Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Džordža Vašingtona b.b. 81000 Podgorica.

Rezultati publikovani u ovom radu produkt su aktivnosti na aktuelnom projektu "Analiza performansi OFDM relay i OFDM kooperativnih diversity sistema" koji finansira Ministarstvo nauke Republike Crne Gore.

zasnovani relay sistemi, jer se OFDM već dokazao kao modulaciona i tehnika višestrukog pristupa, koja omogućava postizanje velikih brzina prenosa podataka, čak i u uslovima izražene frekvencijske selektivnosti na mobilnom radio-kanalu, [1]-[8]. Zato su OFDM relay sistemi uključeni u usvojeni IEEE 802.16j standard za WiMAX sisteme, a biće dio i mobilnih celularnih sistema naredne generacije, definisanih LTE-Advanced i WirelessMAN-Advanced standardima, [9], [10].

U relay sistemima, komunikacioni proces između izvora informacija (S – *Source*) i destinacionog terminala (D – *Destination*) kome je namijenjena informacija, se odvija posredstvom jedne ili više relay stanica (R – *Relay*). Najprostiji sistem ove vrste je dual-hop relay sistem, sa tri komunikaciona terminala (Slika 1), kod koga se čitav komunikacioni proces između izvora informacija S i destinacionog terminala D, obavlja uz pomoć jedne relay stanice R. U cilju ostvarivanja ortogonalnosti između S-R i R-D linka, komunikacioni proces se obično dijeli na dva podintervala. U prvom podintervalu S emituje informacije prema stanici R, koja primljenu informaciju obrađuje, a zatim, u drugom komunikacionom podintervalu, tu informaciju prosleđuje prema D. Najčešće primjenjivane tehnike obrade signala na R stanici su pojačaj i prosljedi (AF – *Amplify-and-Forward*) i dekodiraj i prosljedi (DF – *Decode-and-Forward*). AF tehnika podrazumijeva da R stanica primljeni signal samo pojačava i zatim prosleđuje prema destinaciji. Pri tome, u zavisnosti od mogućnosti estimacije S-R kanala, R stanica može primjenjivati fiksno pojačanje (FG – *Fixed Gain*) ili promjenljivo pojačanje (VG – *Variable Gain*). Nešto složenija tehnika obrade signala je DF, koja podrazumijeva da R stanica primljeni signal najprije dekodira, a zatim ponovo kodira prije prosleđivanja prema D. U ovom radu je razmatran OFDM AF relay sistem koji primjenjuje promjenljivo pojačanje (VG) na R stanici.



Slika 1. Dual-hop relay sistem

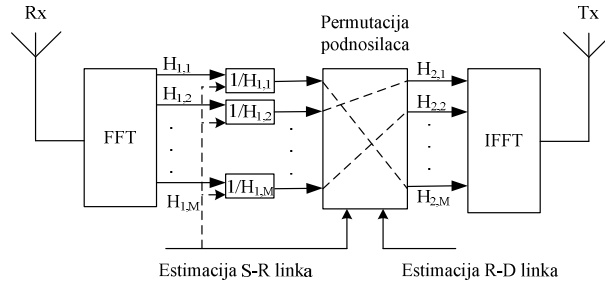
Kod OFDM relay sistema, ako R stanica može da estimira S-R kanal, kao i da dobije od D terminala informacije o R-D kanalu, onda je moguće iskoristiti prednosti koje nudi prenos podataka putem ortogonalnih podnosilaca. Naime, dokazano je da se kapacitet OFDM relay sistema maksimizuje ako se na R stanici obavi permutacija podnosilaca (SCP – *Subcarrier Permutation*), odnosno mapiranje podnosilaca sa prvog hopa (S-R linka) na podnosioce na drugom hopu (R-D link), u skladu sa njihovim trenutnim vrijednostima odnosa signal/šum (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*), [1]-[5]. Pri tome, potrebno je podnosilac sa najvećim odnosom signal/šum sa prvog hopa mapirati na podnosilac sa najvećim odnosom signal/šum na drugom hopu, zatim podnosilac sa drugim najvećim odnosom signal/šum sa prvog hopa se mapira na podnosilac sa drugim najvećim odnosom signal/šum na drugom hopu, i tako redom. Ovakva šema permutacije podnosilaca se označava kao BTB SCP (*Best-to-Best Subcarrier Permutation*).

Ideja o permutaciji podnosilaca kod OFDM zasnovanih relay sistema je prvi put predstavljena u radu [1], a nešto kasnije je nezavisno analizirana u radovima [2] i [3]. U svim ovim radovima autori su razmatrali AF procesiranje signala na R stanici. U radu [4] je dat generalni dokaz da se kod OFDM AF relay sistema ostvaruje najveći kapacitet ako se primijeni BTB SCP šema. Analitički rezultati koji su potvrdili prethodne zaključke su prvi put predstavljeni u radu [5], gdje su izvedeni izrazi za gornju granicu ostvarivog kapaciteta dual-hop OFDM AF relay sistema sa fiksnim pojačanjem (FG). Interesantno je pomenuti da BTB SCP šema permutacije podnosilaca ne ostvaruje i najbolje performanse sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu (BER – *Bit Error Rate*), za sve vrijednosti SNR-a na hopovima. Naime, u radu [6] je pokazano da u cilju minimizacije BER-a, u oblasti srednjih i velikih SNR-ova po hopovima treba primijeniti šemu permutacije podnosilaca označenu kao BTW SCP (*Best-to-Worst Subcarrier Permutation*), koja podrazumijeva da se podnosilac sa najvećim SNR-om sa prvog hopa mapira na podnosilac sa najmanjim SNR-om na drugom hopu, i tako redom. Kroz izvođenje analitičkih izraza u zatvorenoj formi za BER performanse DPSK i BPSK moduliranih OFDM AF relay sistema sa permutacijom podnosilaca koji primjenjuju fiksno pojačanje [7], odnosno promjenljivo pojačanje [8], potvrđeno je da je u cilju poboljšanja BER performansi neophodno prelaziti sa BTB SCP šeme na BTW SCP šemu, u zavisnosti od vrijednosti SNR-a na hopovima.

U ovom radu su ispitane performanse OFDM VG AF relay sistema sa BTB SCP šemom permutacije podnosilaca, sa stanovišta ostvarivog kapaciteta, u cilju utvrđivanja nivoa poboljšanja u odnosu na sistem bez SCP-a. Rad je organizovan na sledeći način: u drugoj glavi je opisan model analiziranog sistema. Glava 3 sadrži izvođenje izraza za gornju granicu ostvarivog kapaciteta OFDM VG AF relay sistema sa BTB SCP šemom. Analitički dobijeni rezultati, kao i njihovo poređenje sa simulacionim rezultatima, su predstavljeni u Glavi 4. Glava 5 sadrži zaključna razmatranja.

## 2. MODEL SISTEMA

U radu je razmatran OFDM VG AF relay sistem sa dva hopa, koji čine izvor informacija S, polu-dupleksna relay stanica R i destinacioni terminal D. Svi uređaji su opremljeni sa po jednom antenom. Pretpostavljeno je da R idealno poznaje funkcije prenosa svih podnosilaca na prvom i drugom hopu. R terminal obavlja OFDM demodulaciju primljenog signala (FFT – *Fast Fourier Transformation*), a zatim se signali u paralelnim granama pojačavaju tako da pojačanje za signal u  $i$ -toj paralelnoj grani iznosi  $G_i=1/H_{1,i}$ , pri čemu  $H_{1,i}$  označava funkciju prenosa kanala  $i$ -tog podnosioca na prvom hopu. Nakon toga se obavlja permutacija podnosilaca (SCP) u zavisnosti od vrijednosti SNR-a na svakom od njih i na kraju se signali podataka OFDM modulišu (IFFT – *Inverse Fast Fourier Transformation*). Blok šema relay terminala sa VG je prikazana na slici 2. Da bi D terminal mogao da obavi demodulaciju primljenog signala, neophodno je da zna funkciju permutacije podnosilaca koja je obavljena na R stanici.



Slika 2. Blok šema OFDM relay stanice sa promjenljivim pojačanjem i permutacijom podnosilaca

Signal na R stanici sistema sa VG, na  $i$ -tom podnosiocu nakon FFT bloka, može se predstaviti u obliku:

$$Y_{R,i} = X_i H_{1,i} + N_{1,i}, \quad 1 \leq i \leq M, \quad (1)$$

gdje  $M$  predstavlja broj podnosilaca, a  $X_i$  je simbol podataka koji S emituje na  $i$ -tom podnosiocu.  $N_{1,i}$  označava aditivni bijeli Gauss-ov šum na  $i$ -tom podnosiocu, čija je varijansa  $\mathbf{E}(N_{1,i}^2) = \mathcal{N}_{01}$ , pri čemu  $\mathbf{E}(\cdot)$  označava operator očekivanja. Pretpostavljajući da SCP funkcija  $v(i)$  mapira  $i$ -ti podnosilac sa prvog hopa na  $k$ -ti podnosilac na drugom hopu, signal na D u frekvencijskom domenu se može zapisati u obliku:

$$\begin{aligned} Y_{D,k} &= G_i H_{2,k} Y_{R,v(i)} + N_{2,k} \\ &= G_i H_{2,k} H_{1,i} X_i + G_i H_{2,k} N_{1,i} + N_{2,k}, \quad 1 \leq k \leq M. \end{aligned} \quad (2)$$

gdje je sa  $H_{2,k}$  označena funkcija prenosa kanala  $k$ -tog podnosioca na drugom hopu.  $N_{2,k}$  je bijeli Gauss-ov šum na  $k$ -tom podnosiocu na destinaciji, čija je varijansa  $\mathbf{E}(N_{2,k}^2) = \mathcal{N}_{02}$ . Pretpostavljeno je da su fedinzi na S-R i R-D nezavisni i sa identičnom, Rayleigh-evom raspodjelom. U ovom slučaju funkcije gustine vjerovatnoće (PDF – *Probability Density Function*) SNR-a na S-R i R-D linkovima se mogu zapisati u obliku  $f_{SR}(x) = \lambda_{SR} \exp(-\lambda_{SR} x)$  i  $f_{RD}(x) = \lambda_{RD} \exp(-\lambda_{RD} x)$ , respektivno. Sa

$$\lambda_{SR} = 1/\bar{\gamma}_{SR} \quad \text{i} \quad \lambda_{RD} = 1/\bar{\gamma}_{RD} \quad (3)$$

su označene recipročne vrijednosti srednjih SNR-ova na S-R i R-D linkovima. Iz relacije (2), trenutni SNR na  $k$ -tom podnosiocu D terminala je oblika:

$$\gamma_{k,end} = \frac{G_i^2 \mathbf{E}\{|X_i|^2\} |H_{1,i}|^2 |H_{2,k}|^2}{\mathcal{N}_{02} + G_i^2 |H_{2,k}|^2 \mathcal{N}_{01}} = \frac{\gamma_{i,SR} \gamma_{k,RD}}{\gamma_{i,SR} + \gamma_{k,RD}} \quad (4)$$

### 3. ERGODIČNI KAPACITET

U cilju izvođenja izraza u zatvorenoj analitičkoj formi za ostvarivi kapacitet OFDM VG AF relay sistema sa SCP-om, neophodno je poznavati funkciju gustine vjerovatnoće (PDF) SNR-a na prijemu. Ako se uzme u obzir način ostvarivanja BTB SCP mapiranja podnosilaca, kao i relacija (4) za vrijednost SNR-a na  $k$ -tom podnosiocu na prijemu, onda je jasno da je neophodno poznavati statistiku redosleda slučajnih promjenljivih sa eksponencijalnom raspodjelom, da bi se u pretpostavljenom scenariju mogla izvesti funkcija za PDF SNR-a na prijemu.

#### 3.1 STATISTIKA REDOSLEDA SLUČAJNIH PROMJENLJIVIH

U radu [7] je predstavljeno izvođenje izraza za PDF  $k$ -tog “najslabijeg podnosioca”, u smislu da on ima  $k$ -ti najmanji SNR od svih  $M$  podnosilaca. Polazi se od pretpostavke da su podnosioci sa prvog hopa složeni u rastućem redosledu u odnosu na njihove trenutne vrijednosti SNR-a, i primijenjena je statistika redosleda slučajnih promjenljivih, na osnovu koje je:

$$f_{k,SR}^w(x) = M \binom{M-1}{k-1} f_{SR}(x) (F_{SR}(x))^{k-1} (1 - F_{SR}(x))^{M-k} . \quad (5)$$

( $\cdot$ ) u prethodnoj relaciji označava binomni koeficijent, a  $F_{SR}(\cdot)$  predstavlja funkciju kumulativne raspodjele. Za scenario sa Rayleigh-evom uskopojasnom statistikom fedinga na podnosiocima, PDF  $k$ -tog “najslabijeg podnosioca” postaje:

$$f_{k,SR}^w(x) = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda_{SR} \alpha_i e^{-\beta_i \lambda_{SR} x} , \quad (6)$$

gdje koeficijenti  $\alpha_i$  i  $\beta_i$  i imaju vrijednosti:

$$\alpha_i = (-1)^i M \binom{M-1}{k-1} \binom{k-1}{i} \quad (7)$$

$$\beta_i = i + M - k + 1 . \quad (8)$$

Kako BTB SCP šema podrazumijeva da i podnosioci na R-D linku moraju biti složeni u rastućem redosledu u odnosu na njihov trenutni SNR, onda je PDF SNR-a  $k$ -tog podnosioca i na R-D linku istog oblika kao i onaj dat relacijom (6), uz uvrštavanje faktora  $\lambda_{RD}$  umjesto  $\lambda_{SR}$ .

### 3.2 PDF SNR-A NA PRIJEMU

Do izraza za PDF SNR-a na prijemu može se doći korišćenjem statistike redosleda slučajnih promjenljivih, kao i veze između relacije za harmonijsku srednju vrijednost dvije slučajne promjenljive i relacije za vrijednost SNR-a  $k$ -tog podnosioca na prijemu. Pod pretpostavkom da se funkcijom permutacije podnosilaca mapira  $i$ -ti podnosilac sa prvog hopa na  $k$ -ti podnosilac na drugom hopu, harmonijska srednja vrijednost SNR-ova na ovim podnosiocima se može zapisati kao:

$$\mu_H(\gamma_{i,SR}, \gamma_{k,RD}) = \frac{2}{\frac{1}{\gamma_{i,SR}} + \frac{1}{\gamma_{k,RD}}} = \frac{2\gamma_{i,SR}\gamma_{k,RD}}{\gamma_{i,SR} + \gamma_{k,RD}} = 2\gamma_{k,end} \quad (9)$$

Na osnovu prethodne relacije može se izvesti i veza između PDF funkcije SNR-a na prijemu i PDF-a harmonijske srednje vrijednosti dvije slučajne promjenljive koje odgovaraju SNR-ovima na podnosiocima:

$$f_{\gamma_{k,end}}^{BTB}(x) = 2f_a(2x) \quad (10)$$

Koristeći isti pristup kao i onaj dat u radu [11], gdje je izveden PDF SNR-a kod dual-hop single-carrier sistema, dobijen je izraz za PDF SNR-a  $k$ -tog podnosioca na prijemu kod OFDM VG AF relay sistema:

$$f_{\gamma_{k,end}}^{BTB}(x) = 2 \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\alpha_j \alpha_i}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}} x e^{-x I_{j,i}} \left[ \frac{I_{j,i}}{\sqrt{A_{j,i}}} K_1(2x\sqrt{A_{j,i}}) + 2K_0(2x\sqrt{A_{j,i}}) \right] \quad (11)$$

gdje su sa  $K_0(\cdot)$  i  $K_1(\cdot)$  označene modifikovane Bessel-ove funkcije druge vrste, nultog i prvog reda, definisane u [12, jed. (9.6.21), (9.6.22)], respektivno.  $\bar{\gamma}_{SR}$  i  $\bar{\gamma}_{RD}$  označavaju srednje vrijednosti SNR-a na S-R i R-D linku, respektivno. Radi preglednijeg zapisa, uvedeni su koeficijenti  $I_{j,i}$  i  $A_{j,i}$ , koji su jednaki:

$$I_{j,i} = \beta_j / \bar{\gamma}_{SR} + \beta_i / \bar{\gamma}_{RD} \quad (12)$$

$$A_{j,i} = \beta_j \beta_i / \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD} \quad (13)$$

Na osnovu izvedenog izraza za PDF SNR-a  $k$ -tog podnosioca na prijemu, moguće je analizirati ostvarivi kapacitet razmatranog sistema.

### 3.3 ERGODIČNI KAPACITET

Ergodični kapacitet  $k$ -tog podnosioca na prijemu, normalizovan u odnosu na širinu opsega kanala, u razmatranom OFDM VG AF relay sistemu sa BTB SCP šemom permutacije podnosilaca može se odrediti kao:

$$C_k = \frac{1}{2} \mathbf{E}(\log_2(1 + \gamma_k)) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_k, \text{end}}^{BTB}(\gamma) d\gamma. \quad (14)$$

Koeficijent 1/2 figurira uslijed transmisije podataka u toku dva vremenska slota. Integral u relaciji (14) nije moguće riješiti u zatvorenoj formi, zbog oblika PDF funkcije SNR-a za BTB SCP, koji uključuju modifikovane Bessel-ove funkcije druge vrste. Međutim, imajući u vidu da je logaritamska funkcija konkavna, kao i Jensen-ovu nejednakost, moguće je odrediti gornju granicu ostvarivog kapaciteta:

$$C_k \leq \frac{1}{2} \log_2(1 + \mathbf{E}(\gamma)). \quad (15)$$

Očekivanje odnosa signal šum se prema definiciji računa kao:

$$\mathbf{E}(\gamma) = \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma_k, \text{end}}^{BTB}(\gamma) d\gamma = \frac{2}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{M-k} \alpha_j \delta_i (\mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2), \quad (16)$$

gdje su sa  $\mathcal{I}_1$  i  $\mathcal{I}_2$  označeni integrali oblika:

$$\mathcal{I}_1 = \frac{I_{j,i}}{\sqrt{A_{j,i}}} \int_0^{\infty} \gamma^2 e^{-\gamma I_{j,i}} K_1(2\gamma \sqrt{A_{j,i}}) d\gamma, \quad (17)$$

$$\mathcal{I}_2 = 2 \int_0^{\infty} \gamma^2 e^{-0.5\gamma I_{j,i}} K_0(2\gamma \sqrt{A_{j,i}}) d\gamma. \quad (18)$$

Integrali predstavljeni relacijama (17) i (87) se mogu riješiti u zatvorenoj formi uz pomoć integrala datog u [13, (6.621.3)], na osnovu čega se dobija izraz za očekivanje trenutnog odnosa signal/šum  $k$ -tog podnosioca na prijemu:

$$\mathbf{E}(\gamma) = \frac{128}{15\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\alpha_j \alpha_i}{\left(I_{j,i} + 2\sqrt{A_{j,i}}\right)^3} \left[ \frac{3I_{j,i}}{I_{j,i} + 2\sqrt{A_{j,i}}} \right. \\ \left. {}_2F_1\left(4, \frac{3}{2}; \frac{7}{2}; \frac{I_{j,i} - 2\sqrt{A_{j,i}}}{I_{j,i} + 2\sqrt{A_{j,i}}}\right) + {}_2F_1\left(3, \frac{1}{2}; \frac{7}{2}; \frac{I_{j,i} - 2\sqrt{A_{j,i}}}{I_{j,i} + 2\sqrt{A_{j,i}}}\right) \right]. \quad (19)$$

Sa  ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$  je označena Gauss-ova hipergeometrijska funkcija, definisana u [12, (9.100)]. Uvrštavanjem relacije (19) u izraz (15) dobija se gornja granica ostvarivog ergodičnog kapaciteta  $k$ -tog podnosioca na prijemu za razmatrani sistem. Ukupni kapacitet OFDM VG AF relay sistema sa BTB SCP šemom permutacije podnosilaca se dobija sumiranjem kapaciteta svih  $M$  podnosilaca:

$$C = \sum_{k=1}^M C_k \quad (20)$$

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

Analitički dobijeni rezultati za gornju granicu ostvarivog kapaciteta OFDM VG AF relay sistema sa BTB SCP šemom su radi verifikacije upoređeni sa simulacionim rezultatima. Osim toga, radi sticanja uvida u nivo povećanja kapaciteta koji se ostvaruje primjenom BTB SCP-a, rezultati su upoređeni i sa vrijednostima kapaciteta sistema koji ne primjenjuje SCP.

### 4.1 OPIS SIMULACIONOG MODELA

Simulacioni rezultati su dobijeni korišćenjem Monte Carlo simulacije, pri čemu je simuliran samo dio OFDM sistema u frekvencijskom domenu, što je moguće zbog usvojene pretpostavke o idealnoj vremenskoj i frekvencijskoj sinhronizaciji sistema. U simulacijama su generisane nezavisne funkcije prenosa sa Rayleigh-evom raspodjelom fedinga za svaki podnosilac na S-R ( $H_{1,k}^{(n)}$ ) i R-D linkovima ( $H_{2,k}^{(n)}$ ), pri svakoj realizaciji kanala, gdje je sa  $n$  označena  $n$ -ta realizacija kanala i  $1 \leq n \leq n_{tot}$ . Kanal sa Rayleigh-evim fedingom je modelovan tako što su funkcije prenosa podnosioca (grupe podnosilaca) generisane kao kompleksni zbir dvije nezavisne Gauss-ove promjenljive sa srednjom vrijednošću jednakom nuli i varijansom  $1/2$ , čime se dobija da je srednja snaga svakog podnosioca jednaka jedinici. Između podnosioca generisanih na ovaj način na postoji nikakva



korelacija. Kroz svaki generisani kanal se prenosi deset OFDM simbola. Trenutna vrijednost ergodičnog kapaciteta  $k$ -tog podnosioca na prijemu je određivana kao:

$$C_k^{(n)} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{(G^{(n)})^2 |H_{1,k}^{(n)} H_{2,k}^{(n)} X_k^{(n)}|^2}{(G^{(n)})^2 |H_{2,k}^{(n)}|^2 \mathcal{N}_{0_1} + \mathcal{N}_{0_2}} \right). \quad (21)$$

Ergodični kapacitet  $k$ -tog podnosioca na prijemu je odredjen usrednjavanjem ergodičnih kapaciteta dobijenih pri svakoj realizaciji kanala:

$$C_k = \sum_{n=1}^{n_{tot}} C_k^{(n)}, \quad (22)$$

dok je ukupan ergodični kapacitet sistema dobijen sabiranjem ergodičnih kapaciteta svih podnosilaca.

## 4.2 REZULTATI

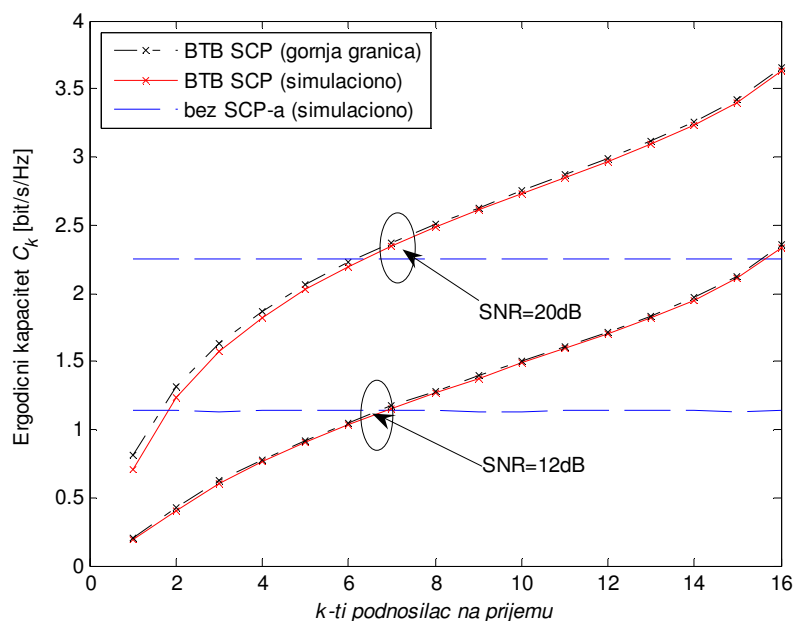
Na slici 3 su prikazani grafici ergodičnog kapaciteta na nivou podnosilaca za OFDM VG AF relay sistem sa BTB SCP šemom dobijeni analitičkim putem, kao i rezultati dobijeni simulacionim putem. Radi poređenja, prikazani su i grafici ergodičnog kapaciteta na nivou podnosilaca za OFDM VG relay sistem bez SCP-a. Pretpostavljen je scenario u kojem su jednake srednje vrijednosti SNR-a na oba hopa, a prikazani su rezultati za srednje vrijednosti SNR-a po hopu od 12dB i 20dB. Razmatrani sistem ima  $M=16$  podnosilaca, što u realnim uslovima može odgovarati sistemu sa 16 grupa podnosilaca, jer je u [3] predloženo da se permutacija ne obavlja na nivou podnosilaca, već na nivou grupe susjednih podnosilaca, u cilju smanjenja veličine signalizacionog zaglavlja.

Kao što se može vidjeti sa grafika prikazanih na slici 3, dobijeni rezultati za gornju granicu ostvarivog kapaciteta predstavljaju veoma dobru aproksimaciju stvarnih vrijednosti ergodičnog kapaciteta razmatranog sistema. Takođe, uočava se da kod razmatranog relay sistema sa BTB SCP šemom, sa porastom reda podnosioca raste i ostvarivi kapacitet, što je i očekivano, jer npr. 16-ti podnosilac na prijemu odgovara podnosiocu sa najvećim SNR-om sa prvog hopa i podnosiocu sa najvećim SNR-om na drugom hopu. Kod sistema bez SCP-a, svi podnosioci imaju približno istu vrijednost ostvarenog kapaciteta. Radi lakšeg sticanja uvida u odnos vrijednosti kapaciteta ostvarenih u relay sistemu sa primjenom BTB SCP šemom, i u sistemu bez SCP-a, treba posmatrati grafike srednjeg ergodičnog kapaciteta po podnosiocu, prikazane u zavisnosti od srednjeg SNR-a po hopovima (Slika 4).

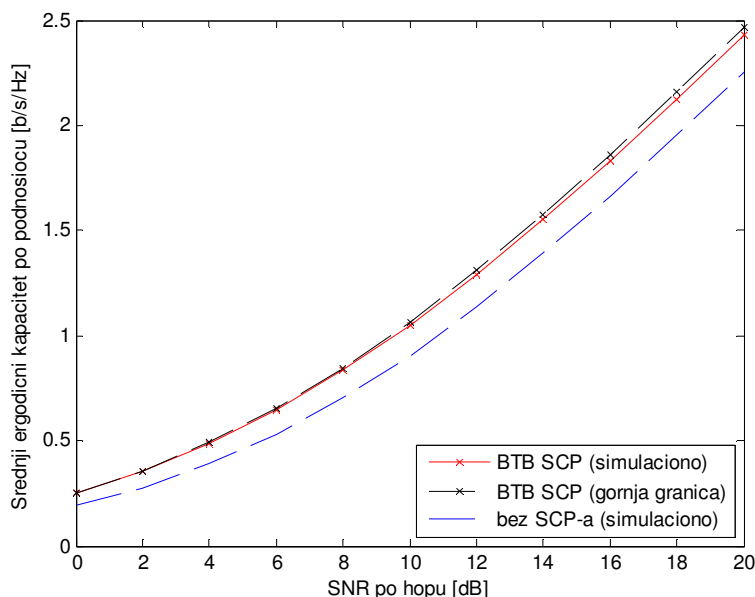
Grafici srednjih ergodičnih kapaciteta po podnosiocu prikazani na slici 4 pokazuju da se primjenom BTB SCP šeme najveće poboljšanje performansi sa stanovišta ostvarivog kapaciteta ostvaruje u oblasti malih SNR vrijednosti na hopovima. Ovo je posebno značajno, jer podrazumijeva da će prednosti primjene BTB SCP šeme kod razmatranih

OFDM VG AF relay sistema biti najveće u slučajevima kada su loši uslovi na kanalima na oba linka. To znači da u scenariju sa malim SNR vrijednostima na linkovima, kada je vrlo vjerovatno da sistem bez SCP-a na bi mogao zadovoljiti zahtjeve korisnika, OFDM VG AF relay sistem sa SCP-om može biti rješenje. Ako se uporede vrijednosti kapaciteta dobijene simulacionim putem, podaci prikazani u Tabeli 1 pokazuju da se za vrijednosti SNR-a na hopovima od 0dB ostvaruje povećanje kapaciteta od 30%, pri srednjoj vrijednosti SNR-a na hopovima od 12dB povećanje od 13,5%, i pri srednjoj vrijednosti SNR-a od 20dB povećanje od 7,5%, u odnosu na sistem bez SCP-a.

Podaci prikazani u Tabeli 1 takođe pokazuju da su analitički dobijene vrijednosti kapaciteta samo 1,45% veće od simulaciono dobijenih rezultata, što potvrđuje da se izračunate vrijednosti gornje granice ostvarivog kapaciteta u potpunosti mogu iskoristiti za analizu kapaciteta OFDM VG AF relay sistema sa BTB SCP šemom.



Slika 3. Ergodični kapacitet na nivou podnosilaca OFDM VG AF relay sistema sa i bez SCP-a



Slika 4. Srednji ergodični kapacitet OFDM VG AF relay sistema sa i bez SCP-a

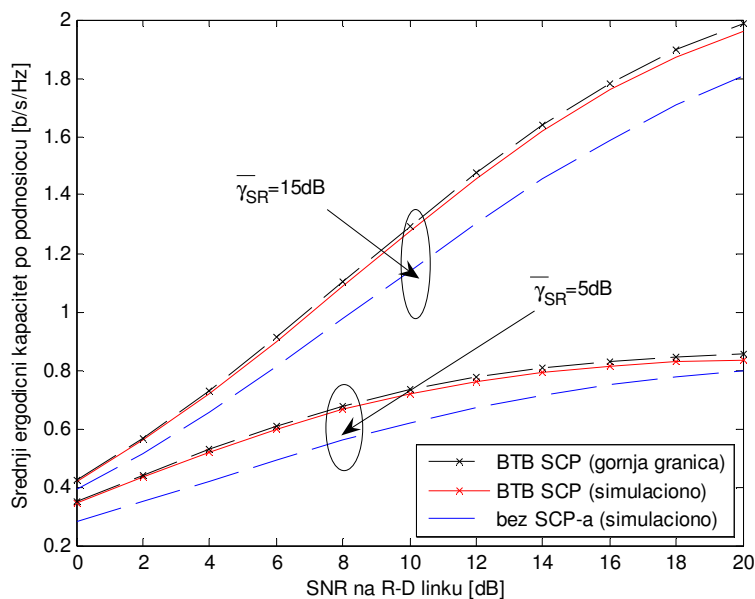
Tabela 1: Srednji ergodični kapacitet po podnosiocu za OFDM VG AF relay sistem

	SNR=0dB		SNR=12dB		SNR=20dB	
	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.
BTB SCP	0,250	0,254	1,292	1,310	2,429	2,463
Bez SCP-a	0,191		1,136		2,253	

U mobilnim celularnim sistemima naredne generacije operatori će primjenjivati infrastrukturne relay stanice, čija će jedina uloga biti da prosleđuje informacije između bazne stanice (S) i mobilnog terminala (D). U takvom scenariju realna je pretpostavka da se vrijednost SNR-a između bazne i relay stanice (S-R link) neće mnogo mijenjati. Grafici koji prikazuju vrijednosti ergodičnog kapaciteta OFDM VG AF relay sistema sa i bez SCP-a, u zavisnosti od vrijednosti SNR-a na R-D linku, pri srednjim vrijednostima SNR-a na S-R linku od 5dB i 15dB, su dati na slici 5.

Grafici prikazani na slici 5 potvrđuju prethodne zaključke da se najveće prednosti primjene BTB SCP šeme ogledaju upravo u oblasti malih SNR vrijednosti. Za srednji SNR na S-R linku od 5dB, povećanje kapaciteta koje se ostvaruje primjenom BTB SCP šeme iznosi 23% pri vrijednosti SNR-a na R-D linku od 0dB u odnosu na sistem bez SCP-a, dok

u slučaju kada je srednji SNR na S-R linku jednak 15dB povećanja kapaciteta iznosi oko 8% za istu srednju vrijednost SNR-a na R-D linku od 0dB.



Slika 5. Srednji ergodični kapacitet OFDM VG AF relay sistema sa i bez SCP-a

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je izveden analitički izraz za gornju granicu ostvarivog kapaciteta dual-hop OFDM VG AF relay sistema koji primjenjuje BTB SCP šemu permutacije podnosilaca. Uporednom analizom dobijenih analitičkih rezultata sa simulacionim rezultatima je pokazano da se oni mogu u potpunosti primijeniti za analizu performansi razmatranog sistema sa stanovišta ostvarivog kapaciteta, jer odstupaju samo za 1,45% od rezultata dobijenih simulacionim putem.

Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da primjena BTB SCP šeme omogućava značajno povećanje kapaciteta OFDM VG AF relay sistema, a naročito u slučajevima kada su male srednje vrijednosti SNR-a na hopovima. Ovakav rezultat je od posebnog značaja, jer pokazuje da će razmatrani sistem sa BTB SCP šemom moći da ispuni zahtjeve korisnika za kapacitetom u slučajevima kada su loši uslovi na oba hopa. Tako npr. u scenariju kada je srednji SNR na oba hopa jednak nuli, povećanje kapaciteta koje se ostvaruje primjenom BTB SCP šeme iznosi čak 30% u odnosu na sistem bez SCP-a. Imajući u vidu ove rezultate može se zaključiti da permutacija podnosilaca na R stanici svakako predstavlja atraktivno rješenje koje se može primijeniti kod OFDM relay sistema u narednoj generaciji mobilnih celularnih sistema u cilju povećanja kapaciteta sistema.

**LITERATURA**

- [1] A. Hottinen and T. Heikkinen, "Subchannel assignment in OFDM relay nodes", in *Proc. of the 40<sup>th</sup> Annual Conf. on Information Sciences and Systems*, 2006.
- [2] I. Hammerstrom and A. Wittneb, "Joint power allocation for non-regenerative MIMO-OFDM relay links", in *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, May 2006.
- [3] M. Herdin, "A chunk based OFDM amplify-and-forward relaying scheme for 4G mobile radio systems", in *Proc. of the IEEE ICC 2006*, Istanbul, Turkey, 2006.
- [4] A. Hottinen and T. Heikkinen, "Optimal subchannel assignment in a two-hop OFDM relay", in *Proc. of the IEEE 8th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2007.
- [5] E. Kocan, M. Pejanovic-Djurisic, D. S. Michalopoulos and G. K. Karagiannidis, "Performance Evaluation of OFDM Amplify-and-Forward Relay System with Subcarrier Permutation", *IEICE Trans. on Communications*, vol. E93-B, no. 5, pp. 1216-1223, May 2010.
- [6] C. K. Ho and A. Pandharipande, "BER minimization in relay-assisted OFDM systems by subcarrier permutation", in *Proc. of the IEEE VTC08*, Singapore, 2008.
- [7] E. Kocan, M. Pejanovic-Djurisic, D. S. Michalopoulos and G. K. Karagiannidis, "BER Performance of OFDM Amplify-and-Forward Relaying System with Subcarrier Permutation", in *Proc. of the Wireless VITAE 09 Conference*, pp. 252-256, Aalborg, May 09.
- [8] E. Kocan, M. Pejanovic-Djurisic, Z. Veljovic, "On the Optimal OFDM Amplify-and-Forward Relay System with Subcarrier Permutation", in *Proceedings of WPMC 2009 Conference*, Sendai, Japan, Sept. 2009.
- [9] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, *Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems; Amendment 1: Multihop Relay Specification*, IEEE Std 802.16j, 12. June 2009.
- [10] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, G. Mao, "Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems", *IEEE Comm. Magazine*, pp. 100-105, October 2009.
- [11] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh fading channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, pp. 1126.1131, Nov. 2003.
- [12] M. Abramovitz and I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables", 9<sup>th</sup> ed. New York: Dover, 1972.
- [13] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, "Table of Integrals, Series, and Products", 6<sup>th</sup> ed. New York: Academic, 2000.