

Poboljšanje BER performansi OFDM VG AF relay sistema kroz mapiranje podnosilaca

Enis Kočan, *Associate Member, IEEE*, Milica Pejanović-Đurišić, *Member, IEEE*, Zoran Veljović, *Member, IEEE*

Sadržaj — U radu su analizirane BER (*Bit Error Rate*) performanse BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) modulisanog OFDM pojačaj-i-prosljedi (AF - *Amplify-and-Forward*) relay sistema sa promjenljivim pojačanjem (VG - *Variable Gain*) koji primjenjuje mapiranje podnosilaca na relay stanici. Izvedeni su analitički izrazi u zatvorenoj formi za razmatrani relay system sa dva hopa, u slučajevima kada su primijenjene BTB SCM (*Best-to-Best Subcarrier Mapping*) i BTW SCM (*Best-to-Worst Subcarrier Mapping*) šeme mapiranja podnosilaca. Simulacionim putem je potvrđena validnost izvedenih analitičkih rezultata. Dobijeni rezultati pokazuju da se BTB SCM šemom poboljšavaju BER performanse analiziranog relay sistema u oblasti malih i srednjih vrijednosti odnosa signal/šum (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*), dok se za velike vrijednosti SNR-a primjenom BTW SCM ostvaruju BER rezultati neznatno bolji od sistema bez SCM-a.

Ključne reči — OFDM, pojačaj-i-prosljedi, relay, mapiranje podnosilaca.

I. UVOD

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) zasnovani relay sistemi su prepoznati kao rješenje koje može obezbijediti zahtijevani kvalitet servisa za sve korisnike u okviru ćelije, nezavisno od njihovog položaja u odnosu na baznu stanicu, u mobilnim celularnim mrežama označenim kao 4G, [1]. Primjenom relay sistema povećava se ukupni kapacitet ćelije i domet jedne bazne stanice, što u konačnom omogućuje postizanje većeg kvaliteta servisa. Zbog toga su ovakvi sistemi predmet intenzivnih istraživanja posljednjih godina, [1]-[7]. Relay stanica (R), koja učestvuje u komunikacionom procesu između izvora informacija (S - *Source*) i terminala kome je namijenjena informacija (D - *Destination*), obično obavlja jedan od dva osnovna tipa prosleđivanja signala: dekodiraj-i-prosljedi (DF - *Decode and Forward*) ili pojačaj-i-prosljedi (AF). DF tehnika prosleđivanja podataka podrazumijeva da se primljeni signal demoduliše, zatim

ponovo moduliše, i na kraju šalje prema D terminalu, dok je AF tehnika značajno jednostavnija i podrazumijava da se signal primljen na R stanici samo pojačava i zatim prosleđuje prema D. Pri tome, u zavisnosti od mogućnosti estimacije S-R kanala, kod AF prosleđivanja je moguće primijeniti fiksno pojačanje (FG - *Fixed Gain*) ili promjenljivo pojačanje (VG). AF tehnikom prosleđivanja se unosi i značajno manje kašnjenje pri prenosu signala u odnosu na DF. Predmet analize ovog rada su OFDM zasnovani AF relay sistemi sa promjenljivim pojačanjem (VG).

Performanse OFDM zasnovanih relay sistema je moguće poboljšati ako R stanica poznaje stanje na svim podnosiocima na S-R linku i na R-D linku. Jedan od načina za unapređenje performansi je da se podnosioci sa S-R linka mapiraju na podnosiocima na R-D linku, u zavisnosti od trenutnog odnosa signal/šum (SNR) na svakom od njih, [2]-[7]. Tako je npr. utvrđeno da se kapacitet OFDM relay sistema maksimizuje, ako se podnosioci sa S-R linka sortiraju u rastućem redosledu u odnosu na njihov trenutni SNR, a zatim mapiraju na odgovarajuće podnosiocima na R-D linku, sortirane na isti način, [2], [3]. Ovakva šema mapiranja podnosilaca se označava kao BTB SCM. Sa druge strane, kada je vjerovatnoća greške po bitu (BER) performansa od interesa, primjenom teorije značajnosti došlo se do zaključka da se za OFDM AF relay sisteme BTB SCM šemom poboljšavaju performanse samo u oblasti malih SNR vrijednosti, [4]. Za veće vrijednosti SNR-a potrebno je podnosiocima sa S-R linka, koji su sortirani u rastućem redosledu u odnosu na njihove trenutne vrijednosti SNR-a, mapirati na odgovarajuće podnosiocima na R-D linku, koji su sortirani u opadajućem redosledu u odnosu na njihove trenutne vrijednosti SNR-a. Ovakva šema mapiranja podnosilaca se iznačava kao BTW SCM šema. Analitički dobijeni BER rezultati za DPSK i BPSK modulisanog OFDM AF sisteme sa fiksnim pojačanjem (FG) predstavljani u radovima [5] i [6], potvrđuju zaključke izvedene u radu [4]. Međutim, analiza BER performansi OFDM VG AF relay sistema, u slučaju primijenjene nekoherentne DPSK modulacije, predstavljena u radu [7], pokazuje da se BTW SCM mapiranjem ostvaruje vrlo malo poboljšanje performansi u oblasti srednjih i velikih SNR vrijednosti, u odnosu na sistem bez SCM-a.

Kako u literaturi do sada nisu analizirane BER performanse OFDM VG AF relay sistema sa SCM u slučaju primijenjenih koherentnih modulacionih

Enis Kočan, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (telefon: 382-20-245873, e-mail: enisk@ac.me)

Milica Pejanović-Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (telefon: 382-20-245873, e-mail: milica@ac.me)

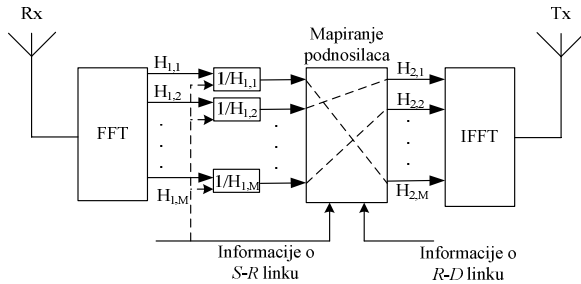
Zoran Veljović, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (telefon: 382-20-245873, e-mail: veljovic@ac.me)

postupaka, ovaj rad je posvećen upravo tom pitanju. Rad je organizovan na sledeći način: U drugom poglavlju je dat opis razmatranog sistema. Izvođenje BER izraza u slučaju primijenjene BPSK modulacije za razmatrani relay sistem sa BTB SCM i BTW SCM je predstavljeno u trećem poglavlju. U poglavlju IV su prikazani BER grafici dobijeni analitičkim putem, i, radi verifikacije njihove validnosti, predstavljani su i BER grafici dobijeni simulacionim putem. Na kraju su data zaključna razmatranja.

II. MODEL SISTEMA

Razmatran je idealno sinhronizovan OFDM VG AF relay sistem sa dva hopa, u kome tri komunikaciona terminala (S, R i D) opremljena sa po jednom antenom učestvuju u komunikacionom procesu. Pretpostavljeno je da ne postoji mogućnost direktne komunikacije između izvora S, i destinacije D, pa se kompletna razmjena informacija obavlja preko relay stanice R, koja funkcioniše u poludupleksu. Podrazumijevan je scenario sa Rayleigh-evom uskopojasnom feding statistikom na oba linka, što odgovara slučaju kada ne postoji direktna linija vidljivosti između komunikacionih terminala. Takođe je pretpostavljeno da R stanica idealno poznaje funkcije prenosa kanala svih podnosilaca na S-R i R-D linkovima, na osnovu čega unosi odgovarajuće pojačanje na svakom podnosiocu, i obavlja mapiranje podnosilaca sa prvog hopa na drugi hop. Da bi D terminal obavio ispravnu demodulaciju primljenog signala, podrazumijevano je da poznaje funkciju mapiranja podnosilaca koja je obavljena na R stanici.

Pojednostavljena blok šema OFDM VG AF relay stanice terminala je prikazana na Sl.1.



Sl. 1. Blok šema OFDM VG AF relay stanice sa mapiranjem podnosilaca

R terminal obavlja OFDM demodulaciju primljenog signala (FFT – *Fast Fourier Transformation*), a zatim se signali u paralelnim granama pojačavaju tako da se kompenzuju promjene koje unosi kanal svakog podnosioca, tj. pojačanje signala na i -toj paralelnoj grani je oblika:

$$G_i = 1/H_{1,i}, \quad i = 1, \dots, M, \quad (1)$$

gdje je sa $H_{1,i}$ označena funkcija prenosa kanala i -tog podnosioca na S-R linku, a M predstavlja ukupan broj podnosilaca OFDM sistema. Zatim se na R stanici obavlja mapiranje podnosilaca sa prvog hopa na odgovarajuće podnosioce na drugom hopu, u zavisnosti od vrijednosti SNR-a na svakom od njih. Nakon toga se vrši OFDM modulacija (IFFT – *Inverse Fast Fourier Transformation*)

i takav signal se emituje prema D terminalu.

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

$$Y_{R,i} = X_i H_{1,i} + N_{1,i}, \quad 1 \leq i \leq M, \quad (2)$$

gdje je X_i simbol podataka koji izvor emituje na i -tom podnosiocu. $N_{1,i}$ označava aditivni bijeli Gauss-ov šum na i -tom podnosiocu, čija je varijansa $\mathbf{E}(|N_{1,i}|^2) = N_{01}$, pri čemu $\mathbf{E}(\cdot)$ označava operator očekivanja. Pretpostavljajući da SCM funkcija $v(i)$ mapira i -ti podnosilac sa prvog hopa na k -ti podnosilac na drugom hopu, onda se signal na D u frekvencijskom domenu može zapisati kaos:

$$\begin{aligned} Y_{D,k} &= G_i H_{2,k} Y_{R,v(i)} + N_{2,k} \\ &= G_i H_{2,k} H_{1,i} X_i + G_i H_{2,k} N_{1,i} + N_{2,k}, \quad 1 \leq k \leq M, \end{aligned} \quad (3)$$

gdje je sa $H_{2,k}$ označena funkcija prenosa k -tog podnosioca na drugom hopu. $N_{2,k}$ je bijeli Gauss-ov šum na k -tom podnosiocu na destinaciji, čija je varijansa $\mathbf{E}(|N_{2,k}|^2) = N_{02}$.

Pretpostavljeno je da su fedinzi na S-R i R-D nezavisni i sa identičnom, Rayleigh-evom raspodjelom. U ovom slučaju PDF funkcija SNR-a na S-R linku se može zapisati u obliku $f_{SR}(x) = \lambda_{SR} \exp(-\lambda_{SR} x)$, dok je odgovarajuća funkcija na R-D linku $f_{RD}(x) = \lambda_{RD} \exp(-\lambda_{RD} x)$. $\lambda_{SR} = 1/\bar{\gamma}_{SR}$ i $\lambda_{RD} = 1/\bar{\gamma}_{RD}$ predstavljaju recipročne vrijednosti srednjih SNR-ova na S-R i R-D linkovima.

III. BER PERFORMANSE

U radu je primijenjen PDF pristup za analizu BER performansi sistema u slučaju kanala sa fedingom, predstavljen u [9], na osnovu koga se dobija BER k -tog podnosioca na prijemu u obliku:

$$P_{b,k} = \int_0^{\infty} P_{b|\gamma_k} f_{\gamma_k, \text{end}}(\gamma) d\gamma, \quad (4)$$

gdje je sa $P_{b|\gamma_k}$ označena uslovna vjerovatnoća greške po bitu, koja zavisi od tipa primijenjene modulacije. $f_{\gamma_k, \text{end}}$ predstavlja PDF funkciju SNR-a k -tog podnosioca na prijemu, koja je za razmatrani relay sistem u slučajevima primijenjenih BTW SCM i BTB SCM data u radu [7, jedn. (9) i (10)]. Uslovna vjerovatnoća greške po bitu $P_{b|\gamma_k}$ u slučaju BPSK modulacije je jednaka, [10]:

$$P_{b|\gamma_k} = 0,5 \operatorname{erfc}(\sqrt{2\gamma}). \quad (5)$$

gdje $\operatorname{erfc}(\cdot)$ označava komplementarnu funkciju greške, [10]. Da bi se integral u relaciji (4) mogao riješiti za slučaj BPSK mapiranja kod razmatranog OFDM VG relay sistema sa BTB SCM i BTW SCM, čije su PDF funkcije SNR-a izvedene u [7], korišćena je aproksimacija komplementarne funkcije greške predstavljene u radu [11]:

$$\operatorname{erfc}(x) \cong (1/6)e^{-x^2} + (1/2)e^{-4x^2/3}. \quad (6)$$

Uvrštavanjem predstavljene aproksimacije erfc funkcije date relacijom (6) u relaciju (4), uz korišćenje izraza za PDF funkciju SNR-a k -tog podnosioca na prijemu u slučaju BTB SCM mapiranja razmatranog sistema, [7, jedn. (10)], dobija se jednakost:

IV. REZULTATI

$$P_{b,k} = \frac{1}{2\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \alpha_j \alpha_i (\mathcal{I}_{1a} + \mathcal{I}_{2a} + \mathcal{I}_{3a} + \mathcal{I}_{4a}) \cdot (7)$$

Koeficijenti α_i su jednaki:

$$\alpha_i = (-1)^i M \binom{M-1}{k-1} \binom{k-1}{i}, \quad (8)$$

pri čemu (\cdot) predstavlja binomni koeficijent. Sa $\mathcal{I}_{1a}, \dots, \mathcal{I}_{4a}$ su označeni integrali koje je moguće riješiti u zatvorenoj formi svođenjem na integral oblika predstavljenog u [12, jedn. (6.621.3)], na osnovu čega se izračunava:

$$\mathcal{I}_{1a} = \frac{32}{9} \frac{I_{j,i}}{(1+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}})^3} {}_2F\left(3, \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{1+I_{j,i}-2\sqrt{A_{j,i}}}{1+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}}}\right), \quad (9)$$

$$\mathcal{I}_{2a} = \frac{32}{3} \frac{I_{j,i}}{(4/3+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}})^3} {}_2F\left(3, \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{4/3+I_{j,i}-2\sqrt{A_{j,i}}}{4/3+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}}}\right), \quad (10)$$

$$\mathcal{I}_{3a} = \frac{8}{9} \frac{1}{(1+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}})^2} {}_2F\left(2, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{1+I_{j,i}-2\sqrt{A_{j,i}}}{1+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}}}\right), \quad (11)$$

$$\mathcal{I}_{4a} = \frac{8}{3} \frac{1}{(4/3+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}})^2} {}_2F\left(2, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{4/3+I_{j,i}-2\sqrt{A_{j,i}}}{4/3+I_{j,i}+2\sqrt{A_{j,i}}}\right). \quad (12)$$

${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ označava Gauss-ovu hipergeometrijsku funkciju definisanu u [8, jedn. (9.100)], a uvedeni koeficijenti $A_{j,i}$ i $I_{j,i}$ imaju vrijednosti:

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

gdje je $\beta_i = i + M - k + 1$.

Primjenom istog postupka kao u slučaju izvođenja BER-a po podnosiocu za BTB SCM, uz uvrštavanje odgovarajuće PDF funkcije SNR-a, dobija se izraz za BER k -tog podnosioca na prijemu razmatranog OFDM VG AF relay sistema sa BTW SCM šemom mapiranja u obliku:

$$P_{b,k} = \frac{1}{2\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{M-k} \alpha_j \delta_i (\mathcal{I}_{1b} + \mathcal{I}_{2b} + \mathcal{I}_{3b} + \mathcal{I}_{4b}) \quad (14)$$

gdje je:

$$\delta_i = (-1)^i M \binom{M-1}{k-1} \binom{M-k}{i} \quad (15)$$

Rješenja integrala $\mathcal{I}_{1b}, \dots, \mathcal{I}_{4b}$ se takođe dobijaju svođenjem na integral [12, jedn. (6.621.3)], i mogu se zapisati kao:

$$\mathcal{I}_{1b} = \frac{32}{9} \frac{L_{j,i}}{(1+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}})^3} {}_2F\left(3, \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{1+L_{j,i}-2\sqrt{B_{j,i}}}{1+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}}}\right), \quad (16)$$

$$\mathcal{I}_{2b} = \frac{32}{3} \frac{L_{j,i}}{(4/3+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}})^3} {}_2F\left(3, \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{4/3+L_{j,i}-2\sqrt{B_{j,i}}}{4/3+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}}}\right) \quad (17)$$

$$\mathcal{I}_{3b} = \frac{8}{9} \frac{1}{(1+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}})^2} {}_2F\left(2, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{1+L_{j,i}-2\sqrt{B_{j,i}}}{1+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}}}\right), \quad (18)$$

$$\mathcal{I}_{4b} = \frac{8}{3} \frac{1}{(4/3+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}})^2} {}_2F\left(2, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{4/3+L_{j,i}-2\sqrt{B_{j,i}}}{4/3+L_{j,i}+2\sqrt{B_{j,i}}}\right), \quad (19)$$

gdje su uvedeni koeficijenti:

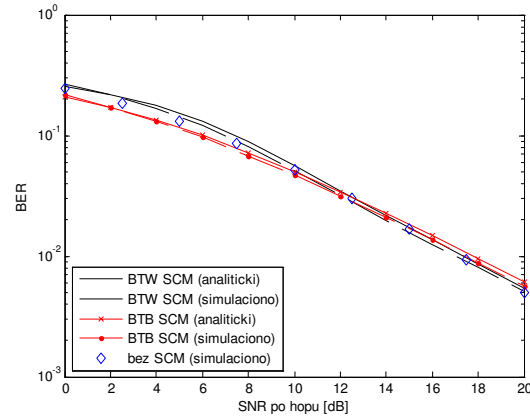
$$B_{j,i} = \beta_j \varepsilon_i / \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD} \quad \text{i} \quad L_{j,i} = \beta_j / \bar{\gamma}_{SR} + \varepsilon_i / \bar{\gamma}_{RD}, \quad (20)$$

a $\varepsilon_i = i + k$.

Srednja vrijednost BER-a za analizirane sisteme se dobija usrednjavanjem dobijenih BER vrijednosti za sve podnosiocce $P_b = (1/M) \sum_{k=1}^M P_{b,k}$.

Svi dobijeni analitički i simulacioni rezultati podrazumijevaju idealno sinhronizovani OFDM VG AF relay sistem sa primijenjenom SCM. Uzeto je da OFDM sistem ima $M=64$ podnosilaca, što u realnom scenariju može predstavljati 64 grupe podnosilaca, jer je u realnim sistemima potrebno grupisati susjedne podnosiocce u grupe podnosilaca radi smanjenja signalizacionog zaglavlja koje nosi informaciju o obavljenom mapiranju podnosilaca, [3]. Pretpostavljeno je da su varijanse šumova na ulazu u R i D jednake, tj. $N_{01}=N_{02}$. Simulacioni rezultati su dobijeni Monte Carlo simulacijom analiziranog sistema u frekvencijskom domenu, što je moguće zahvaljujući pretpostavci o idealno sinhronizovanom sistemu. Funkcije prenosa svakog od podnosilaca na S-R i R-D linkovima su generisane kao kompleksni zbrovi dvije nezavisne Gaussove promjenljive sa srednjom vrijednošću nula i varijansom 1/2, čime je ostvareno da je srednja snaga svakog podnosioca jednaka 1. U svakoj realizaciji kanala je prenošeno 10 OFDM simbola.

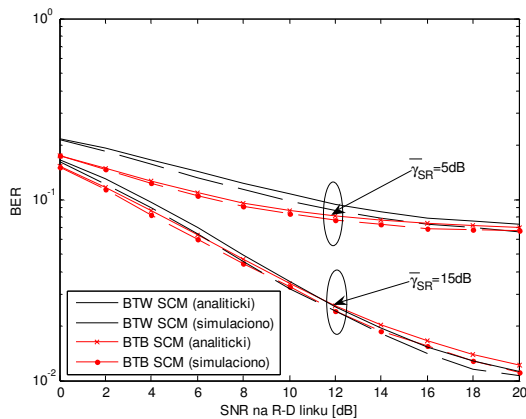
Grafici BER performansi BPSK modulisanog OFDM VG AF relay sistema, sa primijenjenim razmatranim šemama SCM mapiranja, i bez SCM-a, su prikazani na Sl. 2. Podrazumijevan je scenario u kojem su srednje vrijednosti SNR-a na oba linka jednake. Uočava se da BER rezultati dobijeni analitičkim putem neznatno odstupaju od BER vrijednosti dobijenih simulacionim putem, što potvrđuje validnost primijenjenog analitičkog postupka, kao i upotrebljivost rezultata u ocjeni BER performansi razmatranih sistema.



Sl. 2. BER performanse BPSK modulisanog OFDM VG AF relay sistema sa SCM, i bez SCM

Prikazani BER grafici pokazuju da za srednje vrijednosti SNR-a do 12dB razmatrani relay sistem sa BTB SCM mapiranjem ostvaruje najbolje BER performanse. Posebno treba istaći da se ovakvim sistemom značajnije poboljšavaju BER performanse u odnosu na sistem bez SCM-a u oblasti veoma malih SNR-ova. Pri tome treba imati na umu da se BTB SCM mapiranjem ostvaruje maksimalan kapacitet za sve vrijednosti SNR na linkovima, [2], [3], [6]. Za vrijednosti srednjeg SNR-a po hopu iznad 12dB, BTW SCM mapiranjem se minimizuju BER vrijednosti, ali je poboljšanje performansi

zanemarljivo u odnosu na sistem bez SCM-a, što znači da uvođenje ovakve SCM šeme kod OFDM AF relay ne može opravdati povećanje kompleksnosti sistema.



Sl. 3. BER performanse BPSK modulisanog OFDM VG AF relay sistema sa SCM ($\bar{\gamma}_{SR} = const$)

Do istog zaključka se može doći ako se posmatraju i grafici BER performansi prikazani na Sl. 3, koji odgovaraju scenariju sa infrastrukturnom relay stanicom, gdje se može smatrati da je srednji SNR na *downlink*-u između bazne i relay stanice konstantan. U slučaju kada je srednji SNR na S-R linku jednak 5dB, BTB SCM šemom se ostvaruju najbolje BER performanse za sve vrijednosti SNR-a od interesa na R-D linku. Za veće vrijednosti SNR-a na S-R linku (npr. 15dB na Sl.3) javlja se oblast velikih SNR vrijednosti na R-D linku, u okviru koje se BTW SCM šemom mapiranja ostvaruje malo unapređenje BER performansi u odnosu na sistem sa BTB SCM šemom. Međutim, ako se ima u vidu da su u ovoj oblasti BER performanse sistema bez SCM-a gotovo identične performansama sistema sa BTW SCM, onda je jasno da kod OFDM VG AF relay sistema, u cilju minimizacije BER-a, treba primjenjivati BTB SCM u oblasti malih i srednjih vrijednosti SNR-a na linkovima, dok za SNR velike vrijednosti treba preći na sistem bez SCM-a.

V. ZAKLJUČAK

U radu su analitičkim putem, kroz PDF pristup i korišćenjem aproksimacije komplementarne funkcije greške, izvedeni izrazi u zatvorenoj formi za BER performanse BPSK modulisanog OFDM VG AF relay sistema sa SCM. Poređenje analitički dobijenih BER rezultata sa simulacionim rezultatima pokazuje da postoji veoma mala razlika između ovih grafika, što govori da su dobijene veoma dobre aproksimacije stvarnih BER vrijednosti. Pokazano je da se u oblasti malih i srednjih SNR vrijednosti BER performanse razmatranog relay sistema poboljšavaju primjenom BTB SCM šeme mapiranja. Osim toga, na osnovu dobijenih BER rezultata može se zaključiti da nivo poboljšanja BER performansi ostvaren primjenom BTW SCM šeme u oblasti velikih SNR-ova, ne može opravdati povećanje kompleksnosti sistema u odnosu na sistem bez SCM-a.

LITERATURA

- [1] J. Sydir, R. Taori, "An Evolved Cellular System Architecture Incorporating Relay Stations," IEEE Comm. Magazine, pp. 115-121, June 2009.
- [2] A. Hottinen and T. Heikkinen, "Subchannel assignment in OFDM relay nodes", in Proc. of 40th Annual Conf. on Information Sciences and Systems, 2006.
- [3] M. Herdin, "A chunk based OFDM amplify-and-forward relaying scheme for 4G mobile radio systems", in Proc. of IEEE ICC 2006, Istanbul, Turkey, 2006.
- [4] C. K. Ho and A. Pandharipande, "BER minimization in relay-assisted OFDM systems by subcarrier permutation", in Proc. of IEEE VTC08, Singapore, 2008.
- [5] E. Kočan, M. Pejanović-Đurišić, Z. Veljović, "BER performanse OFDM amplify-and-forward relay sistema sa permutacijom podnosilaca", TELFOR, Beograd - novembar 2008. god
- [6] E. Kocan, M. Pejanovic-Djurisic, D. S. Michalopoulos, G. K. Karagiannidis, "Performance evaluation of OFDM Amplify-and-Forward Relay System with Subcarrier Permutation", IEICE Trans. on Commun., Vol.E93-B, no.05, pp. 1216-1223, May 2010.
- [7] E. Kočan, M. Pejanović-Đurišić, Z. Veljović, "Poređenje performansi OFDM amplify-and-forward relay sistema sa permutacijom podnosilaca", ETRAN, V. Banja - jun 2009. god.
- [8] M. Abramovitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 9th ed. New York: Dover, 1972.
- [9] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. New York: Wiley, 2005.
- [10] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw Hill Higher Education, 4th Edition, 2000.
- [11] M. Chiani, D. Dardari, and M. K. Simon, "New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 2, pp. 840-845, July 2003.
- [12] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 6th ed. New York: Academic, 2000.

ABSTRACT

In this paper, BER (*Bit Error Rate*) performance of BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) modulated OFDM variable gain (VG) amplify-and-forward (AF) relay system, implementing subcarrier mapping (SCM) at the relay station, is analyzed. Closed-form analytical results for the dual-hop assumed relay system with BTB SCM (*Best-to-Best Subcarrier Mapping*) and BTW SCM (*Best-to-Worst Subcarrier Mapping*) schemes, are derived. The analytically obtained BER results are verified through simulations. The obtained results show that BTB SCM improves BER performance in the region of small and medium signal-to-noise ratios (SNR), while for the high SNR values BTW SCM achieves slightly better BER results than the system without SCM.

BER PERFORMANCE IMPROVEMENT OF OFDM VG AF RELAY SYSTEM THROUGH SUBCARRIER MAPPING

Enis Kocan, Milica Pejanovic-Djurisic, Zoran Veljovic