

BER performanse OFDM amplify-and-forward relay sistema sa permutacijom podnosilaca

Enis Kočan, Milica-Pejanović Đurišić, Zoran Veljović

Sadržaj — U radu su analizirane performanse OFDM Amplify-and-Forward (AF) relay sistema sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu (BER – *Bit Error Rate*), za dvije različite metode permutacije podnosilaca na relay stanici. Izvedeni su izrazi za PDF (*Probability Density Function*) i MGF (*Moment Generating Function*) odnosa signal/šum (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*) na prijemu za scenarije permutacije podnosilaca označene kao BTB SCP (*Best-to-Best Subcarrier Permutation*) i BTW SCP (*Best-to-Worst Subcarrier Permutation*). MGF pristupom ispitane su BER performanse analiziranog sistema u slučaju primijenjene diferencijalne fazne modulacije. Dobljeni rezultati pokazuju da BTB SCP metoda ima bolje BER performanse za male vrijednosti SNR-a, dok za srednje i velike vrijednosti SNR-a, BTW SCP šema ostvaruje manje vrijednosti BER-a. Na osnovu toga, predložen je hibridni OFDM AF relay sistem sa SCP, koji odabira odgovarajuću metodu permutacije podnosilaca u zavisnosti od SNR-a, u cilju ostvarivanja optimalnih BER performansi.

Ključne reči — OFDM, amplify-and-forward, permutacija podnosilaca, relay sistemi.

I. UVOD

RELAY sistemi su predmet intenzivnih istraživanja poslednjih godina, zbog njihove mogućnosti da povećaju kapacitet i domet bežičnih sistema. U osnovnoj realizaciji relay sistema sa dva hopa, relay terminal, R (Relay) prosleđuje informacije od izvornog terminala, S (*Source*) prema destinaciji, D (*Destination*), obavljajući jednu od dvije najčešće primjenjivane tehnike: pojačaj-i-proslijedi (AF – *Amplify-and-Forward*) ili dekodiraj-i-proslijedi (DF – *Decode-and-Forward*). Kod AF tehnike, R terminal može pojačati signal primljen od izvora konstantnim pojačanjem, ili promjenljivim pojačanjem, u zavisnosti od mogućnosti estimacije funkcije prenosa na S-R linku. DF je nešto složenija od AF tehnike, jer podrazumijeva da R vrši dekodiranje primljenog signala, a zatim ponovno kodiranje prije prosleđivanja prema destinaciji, [1].

Kao rješenje za povećanje kapaciteta i dometa u celularnim bežičnim sistemima četvrte generacije (4G), kao i za buduće WLAN (*Wireless Local Area Network*)

mreže, razmatra se primjena relay sistema, pri čemu bi se kao tehnika prenosa koristilo ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [2], [3]. OFDM omogućava ostvarivanje velikih brzina prenosa i u frekvencijski selektivnim bežičnim kanalima, pa je zbog toga već našla primjenu u mnogim standardizovanim bežičnim sistemima, [4]. Kao tehnika prenosa u relay sistemima, OFDM omogućava donošenje odluka o načinu prosleđivanja na R stanici na nivou podnosilaca, u zavisnosti od stanja na pojedinim podkanalima. Tako npr., u šemi predloženoj za 4G bežične sisteme [3], vrši se permutacija podnosilaca na relay stanici u skladu sa njihovim odnosom signal/šum (SNR), a sve u cilju povećanja ukupnog kapaciteta sistema. Dokazano je da OFDM AF relay sistem ostvaruje maksimalan kapacitet ako se podnosilac sa najvećim SNR-om sa S-R linka mapira na podnosilac sa najvećim SNR-om na R-D linku, drugi najbolji podnosilac sa prvog hopa na drugi najbolji podnosilac na drugom hopu, itd. Ova šema je označena kao BTB SCP (*Best-to-Best Subcarrier Permutation*). Istovremeno, kada su u pitanju performanse OFDM AF relay sistema, sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu (BER – *Bit Error Rate*), ispostavlja se da opisana šema permutacije podnosilaca minimizuje vrijednost BER-a samo za male vrijednosti SNR-a. U radu [5], autori su korišćenjem teorije značajnosti iz oblasti nejednakosti, dokazali da za srednje i velike vrijednosti SNR-a, podnosiocima na relay stanici treba permutovati na suprotan način od BTB SCP metode da bi se dobila optimalna vrijednost BER-a. Kod ovakvog načina permutacije, označenog kao BTW SCP (*Best-to-Worst Subcarrier Permutation*), podnosilac sa najvećim SNR-om sa S-R linka se mapira na podnosilac sa najmanjim SNR-om na R-D linku, itd.

Kako ni u jednom do sada objavljenom radu ne postoji analiza BER performansi OFDM AF relay sistema sa permutacijom podnosilaca, ovaj rad je posvećen upravo tom pitanju. Izvedeni su izrazi za PDF (*Probability Density Function*) i MGF (*Moment Generating Function*) SNR-a, što je poslužilo za dobijanje relacije za BER u slučaju primijenjene diferencijalne fazne modulacije (DPSK – *Differential Phase Shift Keying*). Svi analitički rezultati su u potpunosti potvrđeni simulacionim putem.

Rad je organizovan na sledeći način: U drugom poglavlju dat je opis analiziranog sistema. U trećem poglavlju predstavljeno je izvođenje PDF-a i MGF-a SNR-a za obje razmatrane šeme permutacije podnosilaca. Dobljeni BER rezultati u slučaju primijenjene DPSK

Enis Kočan, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (telefon: +38220245873; e-mail: enisk@ac.me)

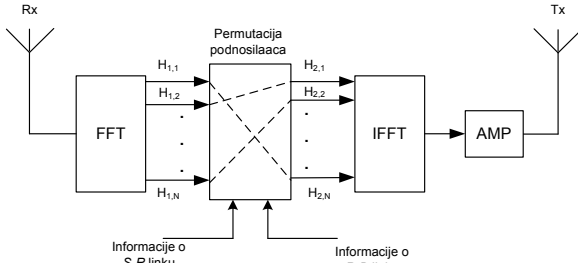
Milica Pejano-Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Podgorici (telefon: +38220245873; e-mail: milica@ac.me)

Zoran Veljović, Elektrotehnički fakultet u Podgorici (telefon: +38220245873; e-mail: veljovic@ac.me)

modulacije su dati u četvrtom poglavlju. Peto poglavlje sadrži zaključna razmatranja.

II. OPIS SISTEMA

Analiziran je OFDM AF sistem sa dva hopa, kod koga relay R, prosleđuje informacije od izvora S, prema destinaciji D, unoseći konstantno pojačanje G . Svi uređaji su opremljeni sa po jednom antenom. Relay terminal obavlja OFDM demodulaciju (FFT – *Fast Fourier Transformation*) signala primljenog od izvora, zatim vrši permutaciju podnosilaca u skladu sa funkcijama prenosa na podkanalima, i tako dobijeni signal ponovo OFDM moduliše (IFFT – *Inverse Fast Fourier Transformation*). Prije prosleđivanja prema destinaciji, signal se pojačava u bloku koji unosi konstantno pojačanje (Sl.1). Pretpostavljeno je da R idealno poznaje funkcije prenosa podnosilaca na S-R i R-D kanalima, kao i da D terminal zna funkciju permutacije koja je izvršena na R stanici.



Sl. 1. Blok dijagram relay terminala

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

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

gdje M predstavlja ukupan broj podnosilaca, $H_{1,i}$ funkciju prenosa i -tog podnosioca, a X_i je simbol podataka koji S emituje na i -tom podnosiocu. $N_{1,i}$ označava bijeli Gauss-ov šum na i -tom podnosiocu, čija je varijansa $\mathbf{E}(|N_{1,i}|^2) = N_{01}$, gdje je sa $\mathbf{E}(\cdot)$ predstavljen operator očekivanja. Pretpostavljajući da SCP funkcija $\nu(i)$ na R stanici mapira i -ti podnosilac sa S-R linka na k -ti podnosilac na R-D linku, onda se signal na destinaciji, u frekventnom domenu, može zapisati kao:

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

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

Pretpostavljeno je da su fedinzi na svim podnosiocima na S-R i R-D linkovima međusobno nezavisni i sa istom, Rayleigh-ovom raspodjelom. U ovom slučaju PDF i CDF (*Cumulative Distribution Function*) funkcije SNR-a na S-R linku se mogu zapisati u obliku $f_{SR}(x) = \lambda_{SR} \exp(-\lambda_{SR}x)$ i $F_{SR}(x) = 1 - \exp(-\lambda_{SR}x)$, dok su odgovarajuće funkcije na R-D linku $f_{RD}(x) = \lambda_{RD} \exp(-\lambda_{RD}x)$ i $F_{RD}(x) = 1 - \exp(-\lambda_{RD}x)$, respektivno. $\lambda_{SR} = 1/\bar{\gamma}_{SR}$ i $\lambda_{RD} = 1/\bar{\gamma}_{RD}$ predstavljaju recipročne vrijednosti srednjih SNR-ova na S-R i R-D linkovima. Iz relacije (2), trenutni SNR na k -tom podnosiocu D terminala se može zapisati kao [6]:

$$\gamma_{k,end} = \frac{\epsilon_S |H_{1,i}|^2 |H_{2,k}|^2}{\frac{N_{01}}{|H_{2,k}|^2} + \frac{N_{02}}{G^2 N_{01}}} = \frac{\gamma_{k,SR} \gamma_{k,RD}}{\gamma_{k,RD} + C} \quad (3)$$

gdje je C konstanta koja zavisi od pojačanja R stanice, $C = \epsilon_R / (G^2 N_{01})$. Sa ϵ_S i ϵ_R su označene srednje snage simbola podataka koje na jednom podnosiocu emituju S i R stanica, respektivno.

III. ODREĐIVANJE STATISTIKE SNR-A

A. Statistika redosleda slučajnih promjenljivih

Iz relacije (3) se vidi da je potrebno znati statistiku redosleda slučajnih promjenljivih da bi se odredio PDF SNR-a na prijemu. Neka $f_{k,SR}^w(\cdot)$ označava PDF SNR-a k -tog "najslabijeg" nosioca, u smislu da on ima k -ti najmanji SNR od ukupno M podnosilaca. Koristeći primjer za statistiku redosleda slučajnih promjenljivih dat u [7], $f_{k,SR}^w(\cdot)$ se može predstaviti kao:

$$f_{k,SR}^w(x) = M \binom{M-1}{k-1} f_{SR}(x) (F_{SR}(x))^{k-1} (1 - F_{SR}(x))^{M-k} \quad (4)$$

gdje (\cdot) predstavlja binomne koeficijente. Za analizirani scenario sa podnosiocima koji imaju nezavisne fedinge sa Rayleigh-evom raspodjelom, $f_{k,SR}^w(\cdot)$ je oblika:

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

Nakon primjene binomnog razvoja:

$$(1 - e^{-\lambda_{SR}x})^{k-1} = \sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i \binom{k-1}{i} e^{-\lambda_{SR}xi} \quad (6)$$

relacija (5) se svodi na:

$$f_{k,SR}^w(x) = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda_{SR} \alpha_i e^{-\beta_i \lambda_{SR}x} \quad (7)$$

gdje su koeficijenti α_i i β_i dati kao:

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

$$\beta_i = i + M - k + 1 \quad (9)$$

Koristeći sličan pristup kao u [7] može se izvesti PDF slučajnih promjenljivih sa opadajućim redosledom. Kao rezultat dobija se da je PDF k -tog "najboljeg" podnosioca, u smislu da on ima k -ti najveći SNR od M podnosilaca, oblika:

$$f_{k,RD}^s(x) = M \binom{M-1}{k-1} f_{RD}(x) (F_{RD}(x))^{M-k} (1 - F_{RD}(x))^{k-1} \quad (10)$$

Nakon uvrštavanja odgovarajućih PDF i CDF funkcija, $f_{k,RD}^s(x)$ se može zapisati kao:

$$f_{k,RD}^s(x) = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda_{SR} \alpha_i e^{-\beta_i \lambda_{SR}x} \quad (11)$$

pri čemu koeficijenti δ_i i ϵ_i imaju sledeće vrijednosti:

$$\delta_i = (-1)^i M \binom{M-1}{k-1} \binom{M-k}{i} \quad (12)$$

$$\epsilon_i = i + k \quad (13)$$

B. PDF i MGF SNR-a za BTW SCP

PDF SNR-a za BTW SCP šemu se može izvesti pretpostavljajući da su podnosioci na S-R linku poređani u rastućem redosledu u odnosu na njihove SNR-ove, a da su podnosioci na R-D linku poređani u opadajućem redosledu. Trenutni SNR na izlazu FFT bloka D terminala se može predstaviti kao:

$$\gamma_{k,end} = \frac{\gamma_{k,SR}\gamma_{k,RD}}{\gamma_{k,RD} + C} = \frac{\gamma_{k,SR}}{1 + Cz_k} \quad (14)$$

gdje je $z_k=1/\gamma_{k,RD}$. PDF nove promjenljive z_k se dobija u obliku $f_{z_k}(z_k) = (1/z_k^2)f_{k,RD}^s(1/z_k)$. Koristeći transformaciju $y_k=1+Cz_k$, izveden je PDF imenioca iz relacije (14):

$$f_{y_k}(y_k) = C \frac{U_{\{y_k-1\}}}{(y_k-1)^2} \sum_{i=0}^{N-k} \lambda_{RD} \delta_i e^{-\epsilon_i \lambda_{RD} \frac{C}{y_k-1}} \quad (15)$$

pri čemu je sa $U_{\{y_k-1\}}$ označena jedinična odskočna funkcija, za koju važi da je $U_{\{y_k-1\}} = 1$ za $y_k \geq 1$, a za ostale vrijednosti je jednaka nuli. PDF SNR-a se dalje računa kao u [7]:

$$f_{\gamma_{k,end}^{BTW}}(x) = \int_0^\infty y_k f_{\gamma_{SR},y_k}(xy_k, y_k) dy_k \quad (16)$$

gdje $f_{\gamma_{SR},y}(xy_k, y_k) = f_{k,SR}^w(xy_k) f_{y_k}(y_k)$ predstavlja združeni PDF nezavisnih promjenljivih γ_{SR} i y_k , a $f_{k,SR}^w(xy_k)$ je dato relacijom (7). Iz ovoga sledi:

$$f_{\gamma_{k,end}^{BTW}}(x) = \int_0^\infty y_k f_{k,SR}^w(xy_k) f_{y_k}(y_k) dy_k = \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{N-1} \lambda_{SR} \lambda_{RD} \times \alpha_j \delta_i C \int_1^\infty \frac{\exp(-\lambda_{SR} \beta_j x y_k - \lambda_{RD} \epsilon_i \frac{C}{y_k-1})}{(y_k-1)^2} dy_k \quad (17)$$

Primjenom smjene $t=1/(y_k-1)$, kao i integrala [8, (3.471.12)], relacija (17) se svodi na:

$$f_{\gamma_{k,end}^{BTW}}(x) = \frac{2}{\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{M-k} \alpha_j \delta_i e^{-\beta_j \frac{x}{\bar{\gamma}_{SR}}} \left[\sqrt{\frac{C \beta_j x}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}} \right] \times K_1 \left(2 \sqrt{\frac{C \beta_j \epsilon_i x}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}} \right) + \frac{C}{\bar{\gamma}_{RD}} K_0 \left(2 \sqrt{\frac{C \beta_j \epsilon_i x}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}} \right) \quad (18)$$

gdje $K_0(\cdot)$ i $K_1(\cdot)$ označavaju modifikovane Bessel-ove funkcije druge vrste nultog i prvog reda, definisane u [9, (9.6.21), (9.6.22)].

MGF SNR-a za BTW SCP se može dobiti korišćenjem izvedenog izraza (18) za PDF SNR-a:

$$\mathcal{M}_{\gamma_{k,end}}(s) = \mathbf{E}(e^{-s\gamma}) = \int_0^\infty f_{\gamma_{k,end}^{BTW}}(\gamma) e^{-s\gamma} d\gamma \quad (19)$$

Nakon primjene nekih osnovnih matematičkih transformacija i integrala datih u [8, (6.614.4), (6.5.19)] može se naći rješenje integrala iz relacije (19). Dobijeno rješenje, koje sadrži članove sa Whittaker-ovom funkcijom se može predstaviti preko eksponencijalne integralne funkcije, pomoću jednakosti datih u [9, (13.6.28), (13.6.30), (6.5.19)]:

$$\mathcal{M}_{\gamma_{k,end}}(s) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{M-k} \frac{\alpha_j \delta_i}{B_j(s)} \left[\frac{1}{\epsilon_i} + e^{\frac{T_{j,i}}{B_j(s)}} \right] \times E_1 \left(\frac{T_{j,i}}{B_j(s)} \right) \left(\frac{C}{\bar{\gamma}_{RD}} - \frac{T_{j,i}}{\epsilon_i B_j(s)} \right) \quad (20)$$

gdje je $B_j(s) = s + \beta_j / \bar{\gamma}_{SR}$, $T_{j,i} = C \beta_j \epsilon_i / \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}$, a $E_1(\cdot)$ je eksponencijalna integralna funkcija definisana u [9, (5.1.1)].

C. PDF i MGF SNR-a za BTB SCP

Pretpostavljajući da su podnosioci na S-R i na R-D linku poređani u rastućem redosledu u odnosu na trenutne vrijednosti SNR-a, što znači da su njihovi PDF-ovi dati relacijom (7), i prateći iste korake kao u slučaju izvođenja PDF SNR-a za BTW SCP, PDF SNR-a za BTB SCP se dobija u obliku:

$$f_{\gamma_{k,end}^{BTB}}(x) = \frac{2}{\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \alpha_j \alpha_i e^{-\beta_j \frac{x}{\bar{\gamma}_{SR}}} \left[\sqrt{\frac{C \beta_j x}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}} \right] \times K_1 \left(2 \sqrt{\frac{C \beta_j \beta_i x}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}} \right) + \frac{C}{\bar{\gamma}_{RD}} K_0 \left(2 \sqrt{\frac{C \beta_j \beta_i x}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}} \right) \quad (21)$$

MFG SNR-a za slučaj BTB SCP se dobija na isti način kao i MGF u slučaju BTW SCP, uz primjenu odgovarajuće PDF funkcije date relacijom (21). Dobijeni izraz za MGF SNR-a za BTB SCP se može predstaviti kao:

$$\mathcal{M}_{\gamma_{k,end}}(s) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\alpha_j \alpha_i}{B_j(s)} \left[\frac{1}{\beta_i} + e^{\frac{A_{j,i}}{B_j(s)}} \right] \times E_1 \left(\frac{A_{j,i}}{B_j(s)} \right) \left(\frac{C}{\bar{\gamma}_{RD}} - \frac{A_{j,i}}{\beta_i B_j(s)} \right) \quad (22)$$

pri čemu je $A_{j,i} = C \beta_j \beta_i / \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}$

IV. NUMERIČKI REZULTATI

A. Opis parametara sistema

Svi dobijeni analitički i simulacioni rezultati podrazumijevaju idealno sinhronizovani OFDM AF relay sistem sa primijenjenom SCP. Uzeto je da OFDM sistem ima $M=16$ podnosilaca. U realnom sistemu ovo može biti shvaćeno kao 16 grupa podnosilaca, jer se susjedni podnosioci grupišu, pošto bi u sistemu koji bi vršio permutaciju na nivou podnosilaca bilo potrebno koristiti suviše veliko signalizaciono zaglavlje [2]. Pretpostavljeno je da S i R emituju istom snagom, tj. $\epsilon_S = \epsilon_R$, kao i da su varijanse šumova na ulazu u R i D jednake, $N_{01}=N_{02}$. Iz ova dva uslova proizilazi da su srednje vrijednosti SNR-ova na S-R i R-D linku iste, $\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}_{RD}$. Konstantno pojačanje G koje unosi R je računato uzimajući u obzir da R poznaje stanje na S-R i R-D kanalima, kao i da snaga koju emituje R iznosi ϵ_R :

$$G^2 = \mathbf{E} \left[\frac{\epsilon_R}{\epsilon_S |H_{1,k}|^2 + N_{01}} \right] \quad (23)$$

odakle se dobija, [6]:

$$G^2 = \frac{\epsilon_R}{\epsilon_S \Omega_1} e^{1/\bar{\gamma}_{SR}} E_1 \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \right) \quad (24)$$

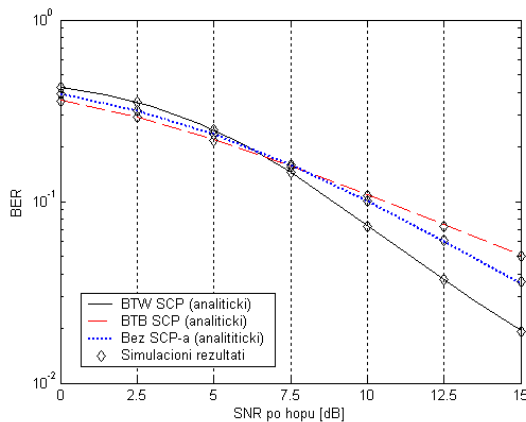
gdje je $\Omega_1 = \mathbf{E}[|H_{1,k}|^2]$.

Simulacioni rezultati su dobijeni Monte Carlo simulacijom analiziranog sistema u frekventijskom domenu, pošto je pretpostavljeno da je sistem idealno sinhronizovan. 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.

B. BER performanse

Koristeći izvedene MGF SNR-ova za analizirane SCP šeme, kao i MGF pristup za analizu BER performansi dat u [10], moguće je ispitati BER performanse za različite digitalne modulacione postupke u slučaju bežičnih kanala sa fadingom. Tako npr. za DPSK modulaciju BER za k -ti par podnosilaca je jednak $P_{b,k} = 0,5M_{\gamma_k, end}(1)$, dok je srednja vrijednost BER-a za OFDM AF sistem sa SCP jednaka srednjoj vrijednosti BER-ova na svim parovima podnosilaca, $P_b = (1/M) \sum_{k=1}^M P_{b,k}$.



Sl. 1. BER performanse DPSK OFDM AF sistema sa SCP

Na Sl.1 su prikazani BER grafici DPSK modulisanog OFDM AF relay sistema sa primijenjenim BTW SCP i BTB SCP šemama. Radi poređenja, predstavljen je i BER grafik OFDM AF sistema kod kojeg nije primijenjena permutacija podnosilaca. Analitička vrijednost BER-a za AF sistem bez permutacije podnosilaca je dobijena korišćenjem MGF SNR-a izvedenog u radu [6]. Svi dobijeni rezultati su potvrđeni simulacionim putem. Kao što se može vidjeti, za male vrijednosti SNR-a (do vrijednosti od 6,5dB), BTB SCP šema ostvaruje najbolje BER performanse. Za vrijednosti SNR-a iznad 6,5dB BTW SCP šema ima najmanje vrijednosti BER-a, i njena prednost u BER performansama se značajno uvećava sa porastom SNR-a. Tako npr. za BER vrijednost od 10^{-1} BTW SCP šema ostvaruje ostvaruje SNR dobitak veći od 1dB u odnosu na sistem bez permutacije podnosilaca, odnosno skoro 2dB SNR dobitka u odnosu na BTB SCP šemu. Ako se posmatraju ostvarene BER vrijednosti za SNR=15 dB, onda se uočava da BTW SCP šema ima BER približno jednak $2 \cdot 10^{-2}$, što je 2,5 puta manje od BER-a BTB SCP šeme, koja ostvaruje BER vrijednost od $5 \cdot 10^{-2}$.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da u cilju optimizacije BER performansi, kombinacija analiziranih metoda permutacije podnosilaca predstavlja najbolje rješenje.

V. ZAKLJUČAK

Analizirane su BER performanse OFDM AF relay sistema sa konstantnim pojačanjem za BTW SCP i BTB SCP šeme, u slučaju kada je primijenjena DPSK modulacija. Poznato je da BTB SCP šema maksimizira kapacitet OFDM AF sistema. Međutim, dobijeni rezultati pokazuju da, kada su u pitanju BER performanse, ovakav metod permutacije podnosilaca daje optimalne rezultate samo za male vrijednosti SNR-a. Za srednje i velike vrijednosti SNR-a BTW SCP šema ostvaruje najbolje BER rezultate. Zato je, u cilju minimizacije BER-a, predložen hibridni model OFDM AF relay sistema sa SCP kod koga bi se vršila BTB SCP ili BTW SCP u zavisnosti od vrijednosti SNR-a na prijemu.

LITERATURA

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, Dec. 2004.
- [2] M. Herdin, "A chunk based OFDM amplify-and-forward relaying scheme for 4G mobile radio systems," in *Proc of IEEE International Conf. on Comm. (ICC 2006)*, Istanbul, Turkey, 2006.
- [3] http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm
- [4] R. Prasad, "OFDM for Wireless Communications Systems," 1st ed. Boston, MA: Artech House Inc., 2004.
- [5] C. K. Ho and A. Pandharipande, "BER minimization in relay-assisted OFDM systems by subcarrier permutation," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC 2008)*, Singapore, 2008.
- [6] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, pp. 1963-1968, Nov. 2004.
- [7] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd ed. McGraw-Hill, 1991.
- [8] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 6th ed. New York: Academic, 2000.
- [9] M. Abramovitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 9th ed. New York: Dover, 1972.
- [10] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. New York: Wiley, 2005.

ABSTRACT

The BER performances of OFDM amplify-and-forward (AF) relay system for two subcarrier permutation (SCP) schemes are analyzed. The PDFs and MGFs of the receive SNR for the best-to-best (BTB) SCP and best-to-worst (BTW) SCP scenarios are derived. Then, the BER results for the differential phase shift keying modulation are evaluated. The obtained results show that the BTB SCP scheme achieves better BER performance for the small SNRs, while the BTW SCP prevails in the medium and high SNR regime. Thus, hybrid OFDM AF relaying system, which may switch from the BTB SCP to BTW SCP to achieve optimum BER performance, is proposed.

BER PERFORMANCES OF OFDM AMPLIFY-AND-FORWARD RELAY SYSTEM WITH SUBCARRIER PERMUTATION

Enis Kocan, Milica Pejanovic-Djurisic, Zoran Veljovic