

Performanse MIMO-OFDM sistema u uslovima Rice-ovog fedinga

Uglješa Urošević, Zoran Veljović, Enis Kočan

Sadržaj — U ovom radu su simulacionim putem analizirane performanse MIMO-OFDM sistema u pogledu vjerovatnoće greške po bitu, u uslovima Rice-ovog frekvencijski selektivnog fedinga. Razmatrani sistem koristi prostorno-vremenski blok kod primijenjen na dvije, tri i četiri predajne antene i proizvoljan broj prijemnih antena. Kanal je estimiran implementacijom pilot tonova na svakoj predajnoj anteni. Simulacioni rezultati pokazuju smanjenje vjerovatnoće greške po bitu sa povećanjem reda prostornog diversity-ja, što je naročito izraženo pri većim odnosima signal/šum.

Ključne reči — MIMO, OFDM, Rice-ov feding.

I. UVOD

Uпотреба više antena na predajnoj i prijemnoj strani u bežičnim komunikacijama, odnosno upotreba MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehnologije, je zahvaljujući sposobnosti za značajnim poboljšanjem performansi sistema postala veoma popularna tokom poslednje decenije. Dobici od MIMO tehnologije koji doprinose značajnom poboljšanju performansi u odnosu na sisteme sa jednom predajnom i jednom prijemnom antenom (SISO - *Single Input Single Output*) su: dobitak prostornog diversity-ja, dobitak prostornog multipleksa i redukcija ili eliminisanje interferencije, [1], [2].

Ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) je veoma efikasna tehnika koja se koristi za smanjenje uticaja frekvencijski selektivnog fedinga na kvalitet ostvarene mobilne radio veze. Sa OFDM modulacionom tehnikom se ostvaruju velike brzine prenosa podataka čak i u uslovima frekvencijski selektivnih kanala, pri čemu se veoma efikasno koristi raspoloživi frekvencijski opseg zahvaljujući međusobnoj ortogonalnosti podnosilaca. Pored toga, OFDM je efikasan i u pogledu eliminisanja intersimbolske interferencije (ISI) kao posledice širenja impulsa na mjestu prijema uzrokovanog *multipath* propagacijom (*delay spread*), [3].

Uglješa Urošević, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (telefon: 382-67-303216, e-mail: ugljesa@ac.me)

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

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

Kombinacija MIMO tehnike i OFDM-a je već implementirana u mnogim radiokomunikacionim standardima, kao što su: IEEE 802.11n (WLAN), IEEE 802.16e (WiMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), 3GPP Release 8 i 9 (LTE - *Long Term Evolution*). MIMO-OFDM će biti sastavni dio standarda 3GPP Release 10 (LTE Advanced) i IEEE 802.16m (WiMAX), [4].

Diversity tehnika predstavlja efikasan metod za suzbijanje uticaja *multipath* fedinga, obezbjeđujući višestruki prijem signala posredstvom međusobno nekoreliranih grana. MIMO kanal sa M_t predajnih antena i M_r prijemnih antena može potencijalno ponuditi $M_t M_r$ nezavisnih linkova, i red prostornog diversity-ja od $M_t M_r$. U analiziranom sistemu se koristi prostorno-vremenski blok kodiranje, kod koga ne postoji potreba za poznavanjem kanala na predajnoj strani. Ovi kodovi predstavljaju jednostavnu realizaciju prostornog diversity-ja u MIMO sistemima.

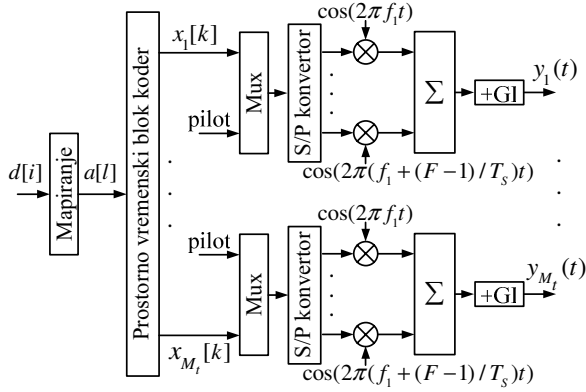
Cilj rada je da se pokaže kako korišćenje prostorno-vremenskih blok kodova u kombinaciju sa OFDM-om utiče na poboljšanje pouzdanosti prenosa podataka u uslovima Rice-ovog fedinga, i to u slučajevima kada se frekvencijski ofset može zanemariti i kada se uzima u obzir frekvencijski ofset, koji se javlja kao posledica Doppler-ovog pomjeraja. Pri tome se za estimaciju MIMO kanala koriste pilot tonovi implementirani na svakoj predajnoj anteni. Na mjestu prijema nije korišćeno kombinovanje u cilju povraćaja ortogonalnosti podnosilaca. Dobijeni rezultati omogućavaju da se analizirani sistem uporedi sa rješenjima predloženim u [5] i [6]. Simulacioni model je realizovan u programskom paketu MATLAB, verzije 7.0.

Rad je organizovan na sledeći način: U drugom poglavlju je dat opis analiziranog MIMO-OFDM sistema. U trećem poglavlju je opisan originalno razvijeni simulacioni model, dok su rezultati simulacije dati u četvrtom poglavlju. Na kraju je dat zaključak.

II. MODEL SISTEMA

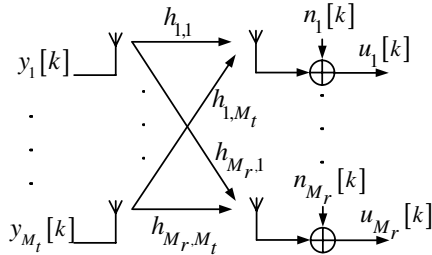
Blok šema predajnika razmatranog MIMO-OFDM sistema je data na slici 1. Informacioni biti, $d[i]$, koji dolaze na ulaz predajnika se prvo mapiraju u skladu sa odgovarajućom modulacionom šemom. Tako mapirani simboli, $a[l]$, dolaze do sklopa za prostorno-vremenski blok kodiranje. Ovaj sklop od N uzastopnih ulaznih simbola kreira ukupno M_t vektora dužine L ,

$$\mathbf{x}[k] = [x_1[k] \cdots x_{M_t}[k]]^T, \quad 0 \leq k < L,$$
 pri čemu je kodni odnos $R_c = N/L$.



Sl. 1. Blok šema predajnika

Pilot tonovi se implementiraju na svakom od izlaza prostorno-vremenskog blok koder, a zatim se obavlja ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje, pri čemu se koristi F paralelnih grana. Time se postiže da je protok u svakoj od paralelnih grana F puta manji u odnosu na protok simbola na izlazu iz prostorno-vremenskog blok koder. Odgovarajućim izborom parametra F se može obezbjeđiti da opseg prenošenog signala bude manji od koherentnog opsega mobilnog radio kanala, tj. da fading u pojedinim paralelnim granama bude frekvencijski ravan. Separacija između podnosilaca je $1/FT=1/T_s$, pri čemu je T trajanje mapiranog simbola, dok je T_s efektivno trajanje OFDM simbola. Nakon toga se formiranom simbolu u svakoj grani dodaje *guard interval*, čije je trajanje jednako maksimalnoj vrijednosti *delay spread*-a, pa se može smatrati da ISI u sistemu ne postoji. OFDM simboli iz svake grane prostorno-vremenskog blok koder se emituju posredstvom odgovarajuće predajne antene. To znači da je broj predajnih antena M_t jednak broju grana korišćenog koder. Model MIMO kanala je prikazan na slici 2, [7].



Sl. 2. Model MIMO kanala

h_{ij} predstavlja SISO koeficijent kanala između i -te prijemne i j -te predajne antene, $n_i[k]$ predstavlja odbirak bijelog Gauss-ovog šuma na ulazu u i -tu prijemnu antenu, $y_j[k]$ je simbol poslat sa j -te predajne antene, dok je $u_i[k]$ odbirak prijemnog signala na i -toj prijemnoj anteni.

Na prijemnoj strani se izdvajaju pojedini OFDM simboli iz primljenog *burst*-a, odbacuje se ciklički prefiks i obavlja OFDM demodulacija. Nakon toga se izdvajaju pilot tonovi na osnovu kojih se vrši izračunavanje matrice koeficijenata kanala \mathbf{H} i obavlja prostorno-vremensko dekodiranje, demapiranje primljenih simbola i odlučivanje.

III. SIMULACIONI MODEL

A. Simulacija predajnika

Na početku programa se generiše slučajni niz informacionih bita koji se prenose, i obavlja mapiranje istih u QPSK signalnu konstelaciju.

Simboli se dalje kodiraju prostorno-vremenskim blok kodom u odgovarajućem koderu. Realizacija ovog koder zavisi od broja predajnih antena. Sledeća tri izraza opisuju formiranje kodne matrice za slučajeve sa dvije, tri i četiri predajne antene [8]:

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2^* \\ a_2 & a_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 & a_1^* & -a_2^* & -a_3^* & -a_4^* \\ a_2 & a_1 & a_4 & -a_3 & a_2^* & a_1^* & a_4^* & -a_3^* \\ a_3 & -a_4 & a_1 & a_2 & a_3^* & -a_4^* & a_1^* & a_2^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 & a_1^* & -a_2^* & -a_3^* & -a_4^* \\ a_2 & a_1 & a_4 & -a_3 & a_2^* & a_1^* & a_4^* & -a_3^* \\ a_3 & -a_4 & a_1 & a_2 & a_3^* & -a_4^* & a_1^* & a_2^* \\ a_4 & a_3 & -a_2 & a_1 & a_4^* & a_3^* & -a_2^* & a_1^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

pri čemu su a_i ulazni simboli u odgovarajućim prostorno-vremenskim blok koder. U relacijama (1)-(3) vrste predstavljaju simbole koji se šalju sa pojedinih antena, dok kolone čine simbole koji se šalju u određenim signalizacionim intervalima. Pilot tonovi su implementirani u svakoj izlaznoj grani prostorno-vremenskog blok koder, i multipleksirani su sa QPSK simbolima. Odnos snage pilota i QPSK simbola je 10. Smatra se da je tokom trajanja jedne kodne riječi kanal nepromjenljiv. Realizacija ortogonalnih podnosilaca je ostvarena upotrebom inverzne brze Fourier-ove transformacije (IFFT).

Prostorno-vremenski blok kod \mathbf{X}_2 ima kodni odnos 1, dok kodovi \mathbf{X}_3 i \mathbf{X}_4 imaju kodni odnos 1/2. Da bi se postigla veća spektralna efikasnost u sistemima sa tri i četiri predajne antene mogu se koristiti i kodovi sa kodnim odnosom 3/4, [8]. Kodne matrice za sisteme sa tri odnosno četiri antene i kodnim odnosom 3/4 su date sledećim izrazima:

$$\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 2a_1 & -2a_2^* & \sqrt{2}a_3^* & \sqrt{2}a_3^* \\ 2a_2 & 2a_1^* & \sqrt{2}a_3^* & -\sqrt{2}a_3^* \\ \sqrt{2}a_3 & \sqrt{2}a_3 & -a_1 - a_1^* + a_2 - a_2^* & a_1 - a_1^* + a_2 + a_2^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

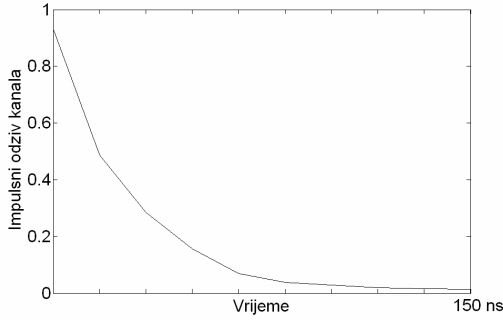
$$\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} 2a_1 & -2a_2^* & \sqrt{2}a_3^* & \sqrt{2}a_3^* \\ 2a_2 & 2a_1^* & \sqrt{2}a_3^* & -\sqrt{2}a_3^* \\ \sqrt{2}a_3 & \sqrt{2}a_3 & -a_1 - a_1^* + a_2 - a_2^* & a_1 - a_1^* + a_2 + a_2^* \\ \sqrt{2}a_3 & -\sqrt{2}a_3 & a_1 - a_1^* - a_2 - a_2^* & -(a_1 + a_1^* + a_2 - a_2^*) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Da bi se ostvarila fer komparacija u pogledu predajne snage potrebno je izvršiti određeno skaliranje, tj. množenje sa $1/\sqrt{2}$ koda \mathbf{X}_2 , sa $1/\sqrt{6}$ koda \mathbf{X}_3 , sa $1/\sqrt{8}$ koda \mathbf{X}_4 , dok su skalirajući faktori za kodove \mathbf{T}_3 i \mathbf{T}_4 $1/\sqrt{12}$, odnosno 1/4.

B. Simulacija mobilnog radio kanala

Performanse datog MIMO-OFDM sistema su

razmatrane u uslovima mobilnog radio kanala sa Rice-ovim fadingom. Signal na i -toj prijemnoj anteni koji potiče od signala sa j -te predajne antene se nalazi konvolucijom impulsnog odziva mobilnog radio kanala (SISO kanal između i -te predajne i j -te prijemne antene) i signala sa j -te predajne antene. Impulсни odziv mobilnog radio kanala je određen posebnim funkcijskim programom i za Rice-ov parametar $K_{dB}=4dB$ je prikazan na slici 3. Nakon što se funkcijskim programom definiše mobilno radio okruženje, onda se signalima na svakoj prijemnoj anteni dodaje bijeli Gausov šum.



Sl. 3. Impulсни odziv Rice-ovog mobilnog radio kanala za $K_{dB}=4dB$

C. Simulacija prijemnika

Na prijemnim antenama se na svakoj paralelnoj grani nakon prijema onoliko simbola koliko iznosi dužina kodne riječi obavlja niz operacija u cilju realizacije odlučivanja simbol po simbol, [8]. Nakon tih operacija se sabiraju signali sa svih prijemnih antena i dobija se vektor \mathbf{r} :

$$\mathbf{r} = \sum_{\mu=1}^{M_r} (|h_{\mu,1}|^2 + |h_{\mu,2}|^2) \mathbf{a} + \mathbf{H}^H [\mathbf{X}_2] \mathbf{n} \quad (6)$$

$$\mathbf{r} = \sum_{\mu=1}^{M_r} (|h_{\mu,1}|^2 + |h_{\mu,2}|^2 + |h_{\mu,3}|^2) \mathbf{a} + \mathbf{H}^H [\mathbf{X}_3] \mathbf{n} \quad (7)$$

$$\mathbf{r} = \sum_{\mu=1}^{M_r} (|h_{\mu,1}|^2 + |h_{\mu,2}|^2 + |h_{\mu,3}|^2 + |h_{\mu,4}|^2) \mathbf{a} + \mathbf{H}^H [\mathbf{X}_4] \mathbf{n} \quad (8)$$

na osnovu kojih se donosi odluka o poslatim simbolima. Izrazima (6), (7) i (8) su dati vektori za odlučivanje za sisteme sa dvije, tri i četiri predajne antene, respektivno, gdje \mathbf{a} predstavlja vektor poslatih simbola, \mathbf{n} je vektor šuma, dok $\mathbf{H}^H[\mathbf{X}_2]$, $\mathbf{H}^H[\mathbf{X}_3]$ i $\mathbf{H}^H[\mathbf{X}_4]$ predstavljaju transponovano konjugovane ekvivalentne matrice kanala za kodove \mathbf{X}_2 , \mathbf{X}_3 , \mathbf{X}_4 , respektivno, dobijene estimacijom kanala na osnovu pilot tonova. Nakon odlučivanja u svakoj paralelnoj grani o poslatim QPSK simbolima, obavlja se konverzija paralele u seriju, a zatim slijedi QPSK demodulacija i izračunavanje vjerovatnoće greške.

IV. REZULTATI SIMULACIJE

U ovom dijelu su prikazani rezultati simulacije MIMO-OFDM sistema u uslovima Rice-ovog fadinga, pri čemu su simulacioni parametri dati u tabeli 1.

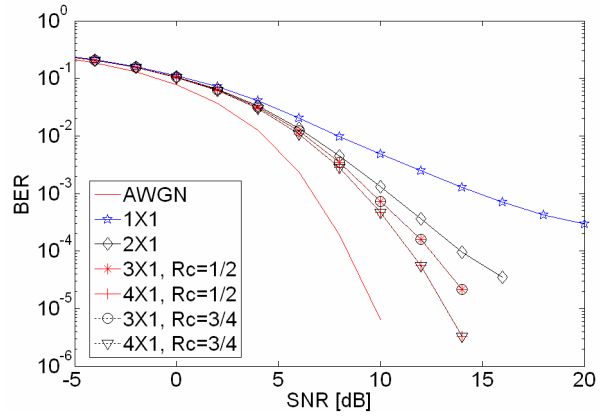
TABELA 1: SIMULACIONI PARAMETRI.

Modulacija	QPSK
Kapacitet sistema	50 Mb/s
Broj podnosilaca (F)	128
Separacija između podnosilaca	$1/T_5$

Rice-ov parametar K_{dB}	4 dB
T_{max}	150 ns
T_{rms}	150/7 ns
T_s/T_{guard}	5

Parametar T_{max} predstavlja maksimalnu vrijednost vremenskog širenja simbola na mjestu prijema, T_{rms} je srednja kvadratna vrijednost ovog širenja, T_s je efektivno trajanje OFDM simbola dok je T_{guard} trajanje zaštitnog intervala.

Na slici 4 su prikazani grafici za vjerovatnoće greške po bitu u sistemu sa $M_r=1$ prijemnom antenom i $M_t=1$, $M_t=2$, $M_t=3$ i $M_t=4$ predajne antene, u zavisnosti od srednjeg odnosa signal/šum po bitu (SNR). Srednji odnos signal/šum predstavlja srednju vrijednost odnosa energije primljenog bita (E_b) i jednostrane spektralne gustine srednje snage bijelog Gauss-ovog šuma (N_0). Rezultati na sl. 4 su dobijeni uz pretpostavku da nema Doppler-ovog pomjeraja.



Sl. 4. Vjerovatnoća greške u funkciji SNR-a za sisteme sa $M_r=1$ prijemnom antenom

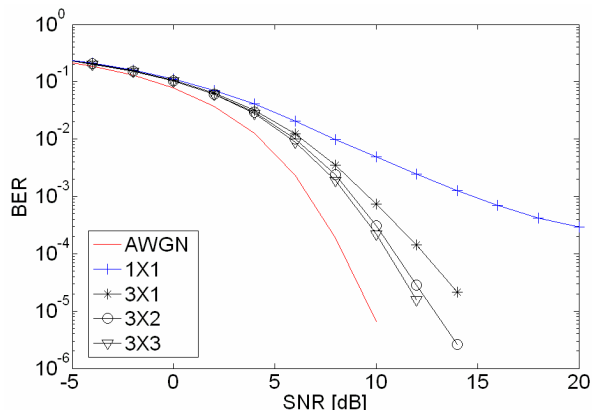
Sa prethodne slike se uočava dobitak koji se postiže upotrebom više predajnih antena i prostorno-vremenskih blok kodova u odnosu na SISO sisteme. Sa slike se još uočava da se pomenuti dobitak smanjuje sa povećanjem reda diversity-ja. Kao što je bilo i očekivano vidi se poklapanje krivih za kodove \mathbf{X}_2 i \mathbf{T}_2 , kao i za kodove \mathbf{X}_3 i \mathbf{T}_3 . Za komparaciju datih kodova uz istu spektralnu efikasnost moraju se koristiti različite modulacione šeme.

Na slici 5 je prikazana vjerovatnoća greške po bitu za MIMO-OFDM sistem sa $M_t=3$ predajne antene i $M_r=1$, $M_r=2$ i $M_r=3$ prijemne antene (pri čemu je korišćen kod \mathbf{X}_3), dok je na slici 6 prikazana vjerovatnoća greške za MIMO-OFDM sistem sa $M_t=4$ predajne antene i $M_r=1$, $M_r=2$, $M_r=3$ i $M_r=4$ prijemne antene (pri čemu je korišćen je kod \mathbf{X}_4). Rezultati na slikama 5 i 6 su dobijeni uz pretpostavku da nema Doppler-ovog pomjeraja.

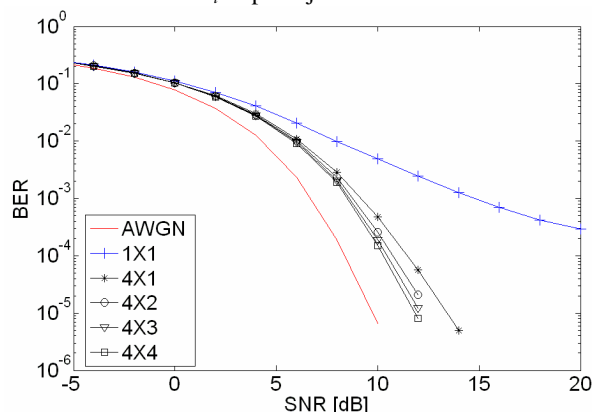
Analizirani SU (*Single User*) MIMO-OFDM sistem u uslovima Rice-ovog fadinga u odsustvu Doppler-ovog pomjeraja, bez tehnika kombinovanja za povraćaj ortogonalnosti podnosilaca na mjestu prijema, pokazuje slične performanse kao i sistemi predloženi u [5] i [6] kada se isti koriste kao SU.

Na slici 7 su dati rezultati simulacije uz pretpostavku da postoji Doppler-ov pomjeraj. Simuliran je sistem sa $M_r=1$

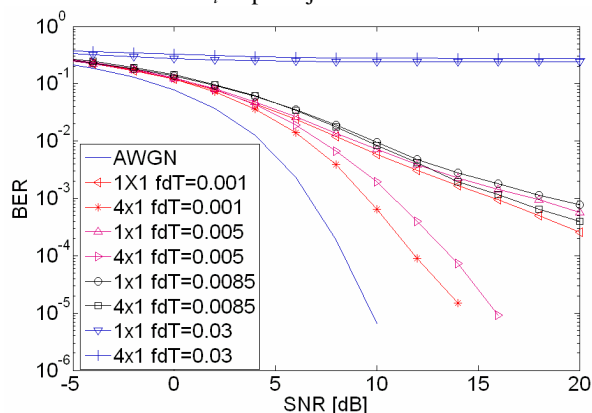
prijemnom antenom i $M_r=1$ i $M_r=4$ (pri čemu je korišćen kod X_4) predajne antene. Uz različite vrijednosti parametra $f_d T$, koji predstavlja normalizovanu maksimalnu vrijednost Doppler-ovog pomjeraja, prikazana su poboljšanja koja se ostvaruju u odnosu na SISO sisteme, kada je vrijednost parametra $f_d T$ manja od 0.0085. Za vrijednosti parametra $f_d T$ iznad 0.0085 dominantan uzrok grešaka je frekvencijski ofset, pa nema poboljšanja upotrebom prostornog diversity-ja. U ovim uslovima analizirani sistem ima performanse slične sistemu predloženom u [5], kada se isti koristi kao SU.



Sl. 5. Vjerovatnoća greške u funkciji SNR-a za sisteme sa $M_t=3$ predajne antene



Sl. 6. Vjerovatnoća greške u funkciji SNR-a za sisteme sa $M_t=4$ predajne antene



Sl. 7. Vjerovatnoća greške u funkciji SNR-a za sisteme sa $M_r=1$ prijemnom antenom i $M_t=1$ i $M_t=4$ predajne antene, u prisustvu Doppler-ovog pomjeraja

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirane performanse MIMO-OFDM sistema sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu na mjestu prijema u uslovima Rice-ovog frekvencijski selektivnog fedinga. Vjerovatnoća greške je dobijena korišćenjem originalno razvijenog simulacionog modela. Iz dobijenih rezultata se jasno uočava poboljšanje koje se ostvaruje upotrebom više predajnih i prijemnih antena, odnosno prostorno-vremenskih blok kodova, u odnosu na konvencionalne SISO sisteme. Dati su rezultati za sisteme kod kojih se zanemaruje Doppler-ov pomjeraj i za sisteme kod kojih se uzima u obzir frekvencijski ofset, kao i maksimalna vrijednost frekvencijskog ofseta do kojeg se upotrebom prostorno-vremenskih blok kodova može ostvariti manja vjerovatnoća greške u odnosu na SISO sisteme. Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima iz literature koji se ostvaruju u sistemima bez MIMO-a, korišćenjem odgovarajućih tehnika kombinovanja na mjestu prijema u SU modu.

LITERATURA

- [1] M. Jankiraman, Space-Time Codes and MIMO Systems, Artech House, 2004.
- [2] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, H. V. Poor, MIMO Wireless Communications, Cambridge University Press, 2007.
- [3] R. Prasad, OFDM for Wireless Communications Systems, Artech House, 2004.
- [4] J. Miyahara, "IMT-Advanced: Objectives and Challenges", in Proceed. of CISC'09, pp.1-4, Greensboro, Oct. 2009.
- [5] T. Sao and F. Adachi, "Pilot-aided threshold detection combining for OFDM-CDMA downlink transmission in a frequency selective fading channel", IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, No.12, pp. 2816-2826, Dec.2002.
- [6] Z. Veljovic, M Pejanovic and I Radusinovic, "Performance analysis of a new OFDM-CDMA system with pilot tone for multimedia communications", IEICE Trans. Commun., vol. E88-B, No.8, pp. 3480-3483, August.2005.
- [7] A. Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005, p. 300.
- [8] V. Kühn, Wireless Communications over MIMO Channels-Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems, Wiley, 2006, pp. 283-290.

ABSTRACT

In this paper BER (*Bit Error Rate*) performance of MIMO-OFDM system, in case of Ricean frequency selective fading, is analyzed. The assumed system uses space-time block coding applied to two, three and four transmit antennas and has arbitrary number of receive antennas. Channel estimation is performed by implementing pilot tones on each transmit antenna. Simulation results show significant BER values decrease with the increase of diversity order, especially in the region of the medium and high SNRs.

BER PERFORMANCE OF MIMO-OFDM SYSTEM IN RICEAN FADING CHANNEL

Ugljesa Urosevic, Zoran Veljovic, Enis Kocan