

# Spektralna efikasnost jednočelijskog MC/DS CDMA sistema u prisustvu Rajsovog fedinga

Mihajlo Č. Stefanović, Dragana S. Krstić, Stefan R. Panić, Aleksandar V. Mosić, Jelena A. Anastasov

**Sadržaj** — Predstavljeni rad analizira spektralnu efikasnost jednočelijskog sistema u prisustvu Rajsovog fedinga, za slučaj korišćenja prenosa posredstvom višestrukih nosioca tehnikom direktno sekvence kodnog multipleksa, sa aspekta teorijski dostižne granice kapacitivnosti kanala u Šenonovom smislu. Razmatran je uticaj različitih parametara datog sistema, poput broja korišćenih pod-nosioca pri prenosu, kao i jačine dominantne komponente fedinga.

**Ključne reči** — Spektralna efikasnost kanala, Rajsov feding, kodni multipleks, tehnika direktno sekvence, višestruki nosioci.

## I. UVOD

SVAKODNEVNA ekspanzija bežičnih komunikacionih sistema nameće potrebu za mobilnim radio sistemima što većeg kapaciteta. Javljuju se zahtevi za omogućavanjem prenosa velikih protoka podataka kroz bežične mreže, čak i reda veličina protoka koji se postižu u žičanim mrežama (50-100 Mbs) [1]. Pošto je radio-frekvencijski spektar ograničen prirodni resurs, potrebno je postići višestruko iskorišćenje raspoloživog spektra, kako bi se omogućio kvalitetan servis velikom broju korisnika. Razlikuju se tri osnovna koncepta višestrukog pristupa, kojima se omogućava istovremeno korišćenje raspoloživog spektra od strane više korisnika: frekvencijski FDMA (FDMA-Frequency Division Multiple Access), vremenski TDMA (TDMA- Time Division Multiple Access) i kodni multipleks CDMA (CDMA - Code Division Multiple Access). Od ovih koncepta u višekorisničkoj mreži mobilne telefonije sa aspekta iskorišćenja performansi CDMA tehnika pokazuje najbolje performanse [2].

Kod CDMA tehnike, svi korisnici simultano pristupaju celokupnom raspoloživom opsegu i koriste ga kontinualno u vremenu, a međusobno su razdvojeni jedinstvenim

Ovaj rad je delom finansiran od strane Ministarstva nauke Republike Srbije u okviru projekta "Razvoj i realizacija nove generacije softvera, hardvera i usluga na bazi softverskog radija za namenske aplikacije" (evid.br. 11030).

M. Č. Stefanović, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529-424; e-mail: misa@elfak.ni.ac.rs).

D. S. Krstić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529-225; e-mail: dragana@elfak.ni.ac.rs).

S. R. Panić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-63-470-649; e-mail: stefanpnc@yahoo.com).

A. V. Mosić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-63-8855-448; e-mail: mosaicaca@yahoo.com).

J. A. Anastasov, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529-304; e-mail: anastasovjelena@gmail.com).

pseudo-slučajnim PN (PN - PseudoNoise) sekvencama (kodovima). CDMA prenos u proširenom opsegu SS (SS - spread spectrum) se može realizovati na dva načina: tehnikom direktno sekvence DS (DS - direct sequence) i tehnikom frekvencijskog skakanja FH (FH - frequency hopping). DS CDMA tehnika se realizuje množenjem originalnog digitalnog signala PN sekvencom, da bi se na prijemu signal takođe množio kodnom sekvencom i filtrirao u cilju izdvajanja željenog signala. Kodna sekvenca je jedinstvena za svakog korisnika i ortogonalna na sekvence drugih korisnika, kako bi se izbegao efekat interferencije od drugih korisnika. Na taj način se signali ostalih korisnika tretiraju kao šum na prijemu. Spektar izlaznog signala biva proširen onoliko puta, koliko puta je trajanje simbola modulišućeg signala veće od trajanja čipova kodne sekvence [3].

Ispitivanjem tehnika prenosa posredstvom višestrukih nosioca MC (MC - Multicarrier), došlo se do zaključka da se kombinacija MC modulacija i DS-CDMA tehnike nameće kao efikasno rešenje za relizaciju višestrukog pristupa kod 3G i 4G širokopoljnih multimedijalnih bežičnih sistema.

U takvom MC/DS CDMA sistemu, sekvenca podataka, koja se multiplicira sekvencom za proširenje, moduliše set  $N$  ortogonalnih frekvencijskih nosioca umesto jednog nosioca, kao što je u slučaju konvencionalnog DS-CDMA. Prednosti ovakvog sistema su sledeće: 1) posedovanje visoke robusnosti nivoa signala pod dejstvom višeputajnog fedinga; 2) efekat uskopojasnog potiskivanja interferencije; 3) potreba za manjim bitskim protokom usled paralelne obrade signala [4]. Suštinski MC/DS CDMA tehnike se mogu kategorizovati u dve klase: 1) ortogonalnu (Orthogonal MC/DS CDMA), koja predstavlja kombinaciju ortogonalnog frekvencijskog (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) i kodnog multipleksiranja i 2) multitonu (Multitone DS CDMA), koja predstavlja oblik paralelnog prenosa uskopojasne DS u frekvencijskom domenu [5].

Procena spektralna efikasnosti (SE - Spectral Efficiency) sistema ima veliki značaj kod dizajniranja modernih bežičnih komunikacionih sistema. Definiše se kao protok podataka po jedinici propusnog opsega kanala za određenu srednju emitovanu snagu i fiksnu vrednost verovatnoće greške BER (BER - Bit Error Rate). Prema tome, maksimalne spektralna efikasnost komunikacionog kanala propusnog opsega  $W$  biće jednaka  $C/W$ , gde  $C$  označava Šenonov kapacitet ovog kanala. SE ostvarena bilo kojim višestruko-pristupnim komunikacionim

sistemom zavisi od fizičkog modela feding radio okruženja, odnosno od toga šta je poznato o pojedinačnim feding kanalima. Na primer, ako ništa nije poznato za feding statistiku kanala tada će njegova ukupna kapacitivnost (u bits/s) biti diktirana minimalnim odnosom signal-šum (SNR),  $\gamma_{\min}$ , i tada će, dakle, težiti nuli kada  $\gamma_{\min} \rightarrow 0$ . Sa druge strane, ako je feding statistika poznata, tada usrednjena formula za kapacitivnost može biti izvedena nakon raspodele fedinga SNR  $\gamma$  za konstantnu brzinu prenosa [6].

Performanse MC/DS CDMA sistema u prisustvu različitih vrsta fedinga su razmatrane u [7-9]. Rad [6] proučava SE jedno-čelijskog MC/DS CDMA sistema u prisustvu Rejljevog fedinga. SE i BER kriterijumi MC/DS CDMA sistema su razmatrani u [7], dok je analiza uticaja Nakagami- $m$  fedinga na BER performance sistema data u [8]. Takođe razmatrana je i analiza uticaja Vejbulovog fedinga [9].

U ovom radu razmotrili smo funkcionisanje jedno-čelijskog MC/DS CDMA sistema u Rajsovom feding okruženju i izračunali smo njegovu SE u funkciji od teoretski prihvatljivog kapaciteta kanala (u Šenonovom smislu) po korisniku. Predstavljena analiza se odnosi na prenos ka prijemu (downlink) širokopojsnog kanala za konstantan broj  $L$  simultanih korisnika. Kanalna kapacitivnost je analizirana za slučaj jednako raspodeljenih snaga, podrazumevajući da svi korisnici primaju podjednaku srednju snagu signala, preko primene odgovarajuće šeme za kontrolu snage, u kombinaciji sa diverzitetom po putanjama ostvarenim RAKE prijemnikom sa konvencionalnim koherentnim kombinovanjem maksimalnog odnosa MRC (MRC - Maximal Ratio Combining) i frekvencijskim multipleksiranjem na skupu ortogonalnih nosioca. Ovaj pristup se ne suočava sa problemom regiona kapacitivnosti, odnosno skupom informacionih brzina u kojima je istovremena realna komunikacija svake poruke korisnika moguća. Razmatran je usrednjeni kapacitet kanla po korisniku uzimajući uticaj različitih parametara datog sistema u prisustvu Rajsovog fedinga, poput broja korišćenih pod-nosioca pri prenosu i jačine dominantne komponente fedinga. Izvedeni analiza za spektralnu efikasnost ne indicira maksimalnu vrednost sistema u (bits/s/Hz), ali predstavlja optimističnu gornju granicu, u usrednjenom smislu, za pojedinačnu modulaciju i šeme kodovanja.

## II. OPIS SISTEMA U RAJSOVOM FEDING OKRUŽENJU

U MC/DS CDMA, svaki simbol podataka korisnika je multipliciran sekvencom za proširenje jedinstvenom za svakog korisnika i prenesen paralelno preko  $N$  ortogonalnih nosećih frekvencija (pod-nosioci). Realan prenos signala svakog korisnika preko svakog od  $N$  pod-nosioca jasno zavisi od nivoa kooperacije između  $L$  korisnika sistema, odnosno snage višestruko-pristupne interferencije MAI (MAI - multiple-access-interference), dok je interferencija između nosioca ICI (ICI - inter-carrier-interference) minimalno razmatrana.

Kapacitet kanala po korisniku,  $C_{i,n}$ , (za svakog

pojedinačnog korisnička  $i$ ,  $1 \leq i \leq L$ ), preko  $n$ -tog pod-nosioca, ( $1 \leq n \leq N$ ), u okruženju bez uticaja višeputajnog fedinga, biće određen na osnovu Shannon-Hartley-eve teoreme, pomoću:

$$C_{i,n} = W_{mc/ds} \log_2 (1 + \gamma_{i,n}), \quad 1 \leq i \leq L, \quad 1 \leq n \leq N, \quad (1)$$

gde je trenutna vrednosti odnosa signal/interferencija (SNR-signal to noise ratio) signala proširenog opsega data sa:

$$\gamma_{i,n} = \frac{P_{i,n}}{n_0 W_{mc/ds} + P_{n,MAI}} \quad (2)$$

u prethodnom izrazu je  $n_0$  spektralna raspodela snage šuma,  $W_{mc/ds}$  predstavlja širinu propusnog opsega kodnih čip sekvenci,  $P_{i,n}$  srednja snaga na prijemu preko razmatranog  $n$ -tog kanala i

$$P_{n,MAI} = \sum_{j \neq i}^L P_{j,n} = (L-1)P_{i,n} \quad (3)$$

je Gausova raspodela MAI snage (za  $P_{i,n}=P$ ,  $1 \leq i \leq L$ ,  $1 \leq n \leq N$ ) preko ovog kanala. Zatim razmatrajući sve  $N$  pod-nosioca preko kojih su preneti informacioni podaci korisnika  $i$ , zaključujemo da će ukupan kapacitet kanala MC/DS CDMA sistema po svakom korisniku  $i$  biti

$$C_{i,MC/DS} = \sum_{n=1}^N C_{i,n} = N W_{mc/ds} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{i,n}}{n_0 W_{mc/ds} + (L-1)P_{i,n}} \right). \quad (4)$$

Kako se svaki simbol podataka korisnika prenosi paralelno preko  $N$  ortogonalnih nosećih frekvencija (pod-nosioci), ukupni propusni opseg MC/DS CDMA je dat sa  $W_{MC/DS} = N W_{mc/ds}$ .

Razmatrajmo jednočelijski MC/DS CDMA sistem u Rajsovom okruženju, pod pretpostavkom da je širina opsega svakog od  $N$  ortogonalnih pod-nosioca  $W_{mc/ds}$ , veća od koherentnog opsega Rajsovog feding kanala  $W_{coh}$ . Prenos posredstvom višestrukih nosioca odgovara prijemu pomoću diverziteti tehnika, zbog paralelnog prenosa svakog pojedinačnog simbola podatka, putem različitih nosioca. Tehnika prijema, zasnovana na upotrebi višestrukih antena u prijemniku, kod koje se vrši sabiranje odnosa snaga signala i šuma sa ulaznih grana se naziva MRC (Maximal-Ratio Combining) tehnika prijema. Kako je  $W_{mc/ds} > W_{coh}$ , feding utiče na svaki od  $N$  ortogonalnih pod-nosioca. Na taj način je MC/DS-CDMA sistem ekvivalentan diverziteti sistemu sa više grana, odnosno MRC RAKE prijemniku. Gustina verovatnoće trenutne vrednosti odnosa SNR signala proširenog opsega se može predstaviti pomoću [10]:

$$p(\gamma_{i,n}) = \frac{K+1}{\Gamma_{i,n}} \exp \left( -KN - \frac{(K+1)\gamma_{i,n}}{\Gamma_{i,n}} \right) \left( \frac{(K+1)\gamma_{i,n}}{KN\Gamma_{i,n}} \right)^{\frac{N-1}{2}} \times I_{N-1} \left( 2 \sqrt{\frac{KN(K+1)\gamma_{i,n}}{\Gamma_{i,n}}} \right) \quad (6)$$

$K$  predstavlja Rajsov faktor, definisan kao odnos snage dominantne i rasejanih komponenti, a  $\Gamma_{i,n} = \langle \gamma_{i,n} \rangle$  ukupnu srednju primljenu vrednost SNR svih  $L$  korisnika  $n$ -tog pod-nosioca. Kako se diverziteti prijem pomoću MRC RAKE prijemnika, odvija za svaki od  $N$  pod-nosioca MC/DS CDMA sistema postiže se dodatni diverziteti prijem,

a ukupna srednja primljena vrednost SNR sada je jednaka [6]:

$$\Gamma_{t,n,pt} = M_{mc/ds} \Gamma_{t,n} = M_{mc/ds} \langle \gamma_m \rangle \quad (7)$$

gde  $M_{mc/ds}$  predstavlja maksimalan broj nekorelisanih razrešivih putanja MRC RAKE prijemnika, dat pomoću:

$$M_{mc/ds} = \left\lceil \frac{W}{W_{coh}} \right\rceil + 1 = \left\lceil W_{mc/ds} \Delta \right\rceil + 1 \quad (8)$$

$SE_{MC/DS, Rice}$  MC/DS CDMA sistema u prisustvu Rajsovog fedinga se dobija usrednjavanjem SE, koja zapravo predstavlja teorijski dostižan kanalsku kapacitivnost po  $i$ -tom pojedinačnom korisniku u Šenonovom smislu za celokupan propusni opseg sistema  $W_{MC/DS}$ , po gustini verovatnoće trenutne vrednosti odnosa SNR MRC RAKE prijemnika:

$$SE_{MC/DS, Rice} = \frac{\langle C_{i,MC/DS} \rangle_{Rice}}{W_{MC/DS}} = \int_0^{\infty} \log_2(1+\gamma_{t,n}) p(\gamma_{t,n}) d\gamma_{t,n} \quad i=1, \dots, L \quad (9)$$

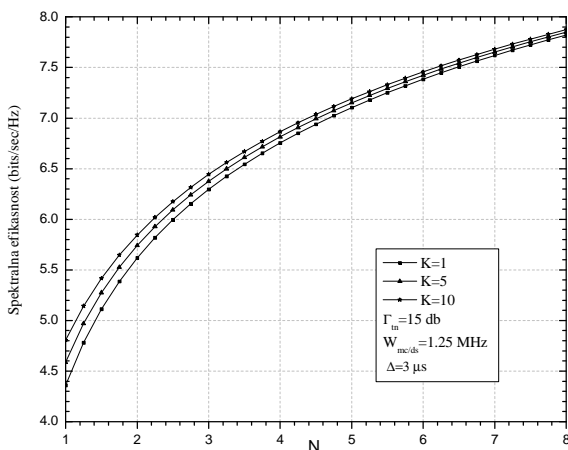
Nakon zamene (6) i (7) u (9) dobija se:

$$SE_{MC/DS, Rice} = \frac{\langle C_{i,MC/DS} \rangle_{Rice}}{W_{MC/DS}} = \int_0^{\infty} \log_2(1+\gamma_{t,n}) \frac{K+1}{M_{mc/ds} \Gamma_{t,n}} \times \exp\left(-KN \frac{(K+1)\gamma_{t,n}}{M_{mc/ds} \Gamma_{t,n}}\right) \left(\frac{(K+1)\gamma_{t,n}}{KNM_{mc/ds} \Gamma_{t,n}}\right)^{N-1} I_{N-1}\left(2\sqrt{\frac{KN(K+1)\gamma_{t,n}}{M_{mc/ds} \Gamma_{t,n}}}\right) d\gamma_{t,n} \quad (10)$$

Prethodni integral se lako može numerički izračunati upotrebom programskog paketa *Mathematica*.

### III. NUMERIČKI REZULTATI

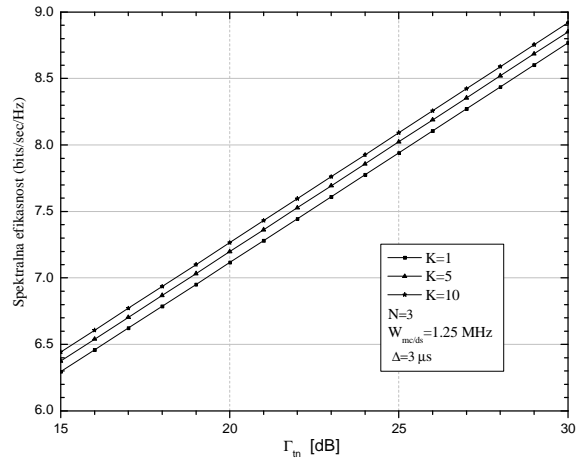
Spektralne efikasnosti jednočelijskog MC/DS CDMA sistema u prisustvu Rajsovog fedinga su prikazane na slikama 1. i 2. Na slici 1. je prikazana zavisnost SE od broja pod-nosioca  $N$ . Očito je da se sa porastom broja pod-nosioca popravlja SE sistema..



Slika 1. Spektralna efikasnost jednočelijskog MC/DS CDMA sistema u prisustvu Rajsovog fedinga na prijemu u funkciji broja  $N$  pod-nosioca za različite vrednosti Rajsovog  $K$  faktora

Međutim porast broja pod-nosioca dovodi do povećanja kompleksnosti sistema, pa je potrebno napraviti kompromis između ovih dveju karakteristika sistema. Takođe očito je da porast  $K$  faktora Rajsovog fedinga

dovodi do povećanja SE sistema, što je bilo i očekivano, jer porast jačine dominantne komponente signala na prijemu može samo poboljšati performanse prenosa ka prijemu. Slika 2 potvrđuje pretpostavku da veće vrednosti ukupne srednje vrednosti SNR na prijemu kao imaksimalanog broja nekorelisanih razrešivih putanja MRC RAKE prijemnika dovode do povećanja SE sistema



Slika 2. Spektralna efikasnost jednočelijskog MC/DS CDMA sistema u prisustvu Rajsovog fedinga na prijemu u funkciji ukupne srednje vrednosti SNR za različite vrednosti  $K$  faktora

### IV. ZAKLJUČAK

Analizirana je spektralna efikasnost korisniku MC/DS CDMA sistema uzimajući uticaj različitih parametara datog sistema u prisustvu Rajsovog fedinga, poput broja pod-nosioca sistema i jačine dominantne komponente fedinga. Numerički dobijeni rezultati su grafički prikazani i diskutovani sa aspekta poboljšanja performansi sistema.

### LITERATURA

- [1] H. Frank, P. Fitzek M. Katz, "Cognitive wireless networks," Ed. Netherlands: Springer, 2007.
- [2] M. Schwartz, "Mobile wireless communications," Ed. London, UK: Cambridge university press, 2005.
- [3] F. Swartz, P. Royen, I. Oppermann, M. Lotter, "CDMA techniques for third generation mobile systems," Ed. USA: Kluwer academic press, 1999.
- [4] S. Kondo, L. Milstein "Performance of Multicarrier DS CDMA systems," in *IEEE Trans. on Comm.*, vol.44, no.2 pp.238-246, Feb. 1996.
- [5] S. Sener, I. Develi, N. Karaboga, "Further performance analysis of the generalised MC-CDMA system in Nakagami-m fading channels," *Computers and Elec. Eng.*, vol 35, pp. 1-8, 2009.
- [6] P. Varzakas, G. S. Tombras, "Spectral efficiency of a single-cell multi-carrier DS-CDMA system in Rayleigh fading," *Journal of the Franklin Institute*, vol 343, pp. 295-300, 2006.
- [7] M. De-shan, L. Deo-ben "A novel MC DS-CDMA system scheme with high spectral efficiency," *The Journal of China universities of posts and telecommunications*, vol 13, no 3, pp. 11-15, 2006.
- [8] Y. Lie-Liang, H. Lajos, "Performance of generalized multicarrier DS-CDMA over Nakagami-m fading channels," *IEEE Trans. on Comm*, vol 50, no 6, pp. 956-966, 2002.
- [9] N. C. Sagias, P. Varzakas, G. S. Tombras, G. K. Karagiannidis, "Spectral efficiency for selection combining Rake receivers over Weibull fading channels," *Journal of the Franklin Institute*, vol 342, pp. 7-13, 2005.
- [10] J. Zhang, V. Aalo, "Effect of macrodiversity on average-error probabilities in Rician fading channels with correlated lognormal shadowing," *IEEE Trans. on Comm*, vol 49, no 1, pp. 14-18, 2001.

#### ABSTRACT

In this paper an approach to the spectral efficiency analysis of a single-cell MC/DS-CDMA system in the presence of Ricean fading was presented, considering the theoretically achievable channel capacity in the Shannon sense. The influence of various system parameters, like the number of used sub-carriers and the fading severity was investigated.

#### **SPECTRAL EFFICIENCY OF A SINGLE-CELL MULTI-CARRIER DS-CDMA SYSTEM IN THE PRESENCE OF RICEAN FADING**

Mihajlo Č. Stefanović, Dragana S. Krstić, Stefan R. Panić, Aleksandar V. Mosić, Jelena A. Anastasov