

ESTIMACIJA KANALA U OFDM SISTEMU SA PRIJEMNIM PROSTORNO-VREMENSKIM DIVERSITY-JEM

Enis Kočan, Maja Ilić, Milica Pejanović-Đurišić, *Elektrotehnički fakultet u Podgorici*

Sadržaj - U ovom radu predložene su, i upoređene, dvije tehnike estimacije kanala u OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing) sistemu sa prijemnim prostorno-vremenskim diversity-jem i kombinovanjem u frekvencijskom domenu. Poređenje je urađeno na osnovu rezultata za vjerovatnoću greške po bitu (BER - Bit Error Rate), dobijenih samostalno razvijenim simulacionim modelom. Primijenjena je least-square (LS) estimacija na lokacijama pilot tonova, dok je za estimaciju ostalih podkanala u jednom slučaju korišćen Lagrange-ov interpolacioni metod, a u drugom slučaju procesiranje u transformisanom domenu. Pokazano je da, uz pravilan izbor broja pilot tonova, estimacija zasnovana na Lagrange-ovom interpolacionom metodu daje neznatno lošije rezultate, uz prednost koja se postiže njenom značajno jednostavnijom implementacijom.

1. UVOD

Ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje – OFDM, predstavlja modulacionu tehniku kojom se ostvaruje prenos podataka preko više paralelnih grana upotrebom međusobno ortogonalnih podnosilaca. Na taj način se ostvaruje veoma dobro iskorišćenje raspoloživog frekvencijskog opsega. Pored toga, pokazuje se da OFDM sistemi efikasno umanjuju štetne efekte multipath prostiranja u radiokomunikacionim sistemima [1]. Zbog svojih dobrih osobina OFDM je našao primjenu kod više standardizovanih žičnih (ADSL – *Asymmetric Digital Subscriber Line*) i bežičnih (IEEE 802.11a, 802.11g, HiperLAN) komunikacionih sistema koji obazbeđuju prenos podataka velikim brzinama. Danas su posebno aktuelna istraživanja o mogućnosti primjene OFDM sistema u sledećim generacijama širokopoljanskih bežičnih mreža.

Radio veze na frekvencijskim opsezima predloženim za sledeće generacije širokopoljanskih bežičnih mreža karakteriše izražen frekvencijski selektivan fading. Usled toga dolazi do destrukcije ortogonalnosti OFDM podnosilaca i do pojave interferencije između pojedinih korisnika. Jedan od načina za poboljšanje performansi OFDM sistema u tim uslovima je implementacija diversity tehnika, kako na strani predaje, tako i na strani prijema [2]. Međutim, o efikasnom uspostavljanju narušene ortogonalnosti OFDM podnosilaca nije moguće govoriti ukoliko se u sistemu ne primijeni adekvatna estimacija karakteristika bežičnog radio kanala.

U ovom radu se na primjeru OFDM sistema sa prijemnim prostorno-vremenskim diversity-jem i kombinovanjem u frekvencijskom domenu razmatra uticaj primijenjene tehnike estimacije kanala. Predložene su i upoređene dvije različite metode estimacije kanala sa pilot tonovima. Pri tome je, u oba razmatrana slučaja, primijenjena least-square (LS) estimacija podkanala na lokacijama pilot tonova. Za estimaciju ostalih podkanala predložena su dva različita načina. Prvi, jednostavniji, je zasnovan na primjeni Lagrange-ovog interpolacionog polinoma (LIP – *Lagrange Interpolating Polynomial*), dok drugi obuhvata primjenu procesiranja u transformisanom domenu (TDP – *Transform*

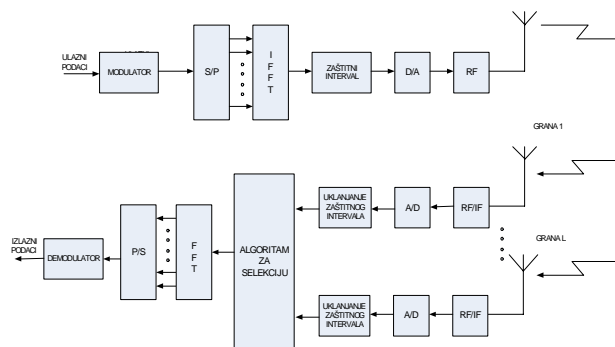
Domain Processing). Rezultati dobijeni u postupku simulacije analiziranog OFDM sistema pokazuju da se primjenom TDP metoda ostvaruju bolje performanse, koje se skoro u potpunosti poklapaju sa slučajem kada se idealno poznaje prenosna funkcija kanala (PCE – *Perfect Channel Estimation*).

Rad je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju opisane su, i upoređene, vrste OFDM prijemnih diversity sistema. U trećem poglavlju dat je detaljan opis razvijenog simulacionog modela, sa proračunom svih parametara. U četvrtoj glavi, predstavljeni su dobijeni rezultati za performanse sistema sa primijenjenim predloženim metodama estimacije, i to za slučajeve kanala sa Rice-ovim i kanala sa Rayleigh-ovim fadingom. Peto poglavlje sadrži zaključna razmatranja.

2. VRSTE OFDM SISTEMA SA PRIJEMNIM DIVERSITY-JEM

U slučaju implementacije prijemnog diversity-ja kod OFDM sistema, izlazni signal se formira adekvatnim kombinovanjem signala dobijenih preko više nezavisnih prenosnih putanja. Pri tome se kombinovanje primljenih signala može obaviti u vremenskom domenu (prije bloka koji vrši FFT – *Fast Fourier Transformation*) ili u frekvencijskom domenu (poslije bloka koji vrši FFT).

Na slici 1 je prikazana blok šema OFDM sistema sa prijemnim prostornim diversity-jem kod koga je upotrijebljeno kombinovanje sa selekcijom (SC- *Selection Combining*) u vremenskom domenu (TDSC-OFDM).

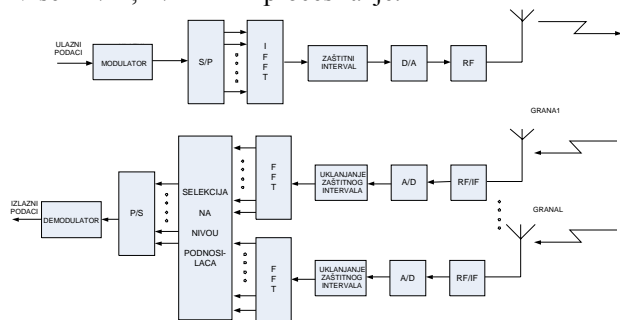


Slika 1. Prijemni prostorni OFDM diversity sistem sa L grana i kombinovanjem u vremenskom domenu

Na strani prijema nalazi se L prijemnih antena za koje je pretpostavljeno da su dovoljno razmaknute, kako bi se ostvario potreban uslov međusobne nezavisnosti putanja signala. Primljenim signalima se nakon RF/IF i A/D konverzije uklanjaju zaštitni intervali, a zatim se dovode na sklop koji vrši izbor optimalnog signala. Kriterijum za izbor optimalnog signala bi trebao da bude trenutni odnos signal/šum (SNR – *Signal to Noise Ratio*), ali je to najčešće trenutna snaga signala jer je vrlo teško estimirati odnos SNR u svakom trenutku. Prednosti ovakve tehnike kombinovanja su jednostavnost i kratko vrijeme procesiranja prijemnog signala. Međutim, na ovaj način se ostvaruje mali diversity

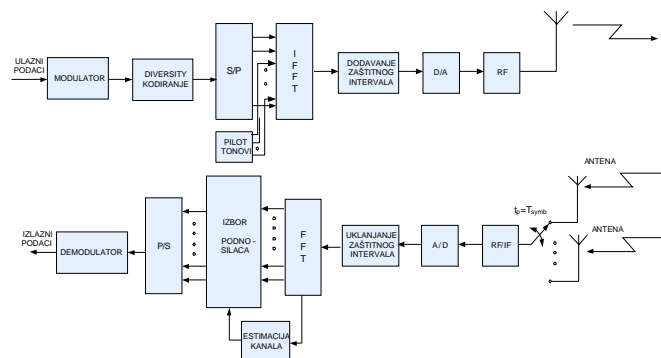
dobitak jer se ne koriste dobre frekvencijske karakteristike OFDM sistema. Postoji vjerovatnoća da će, usled frekvencijske selektivnosti kanala, neki podnosioci demodulisanog OFDM simbola imati manje amplitude od odgovarajućih podnosioca na drugim prijemnim antenama. Rezultati za BER u slučaju TDSC-OFDM sistema pokazuju da nije opravdano uvoditi ovakvu tehniku kombinovanja za poboljšanje performansi OFDM sistema, jer je ostvareni diversity dobitak manji od 2 dB u odnosu na slučaj kada nije primijenjen diversity [3].

Na slici 2 prikazana je šema OFDM sistema sa prijemnim prostornim diversity-jem i kombinovanjem sa selekcijom u frekvencijskom domenu (FDSC-OFDM). Nakon vraćanja signala u frekvencijski domen vrši se selekcija odgovarajućih podnosioca (iz skupa od L podnosioca) sa najvećim trenutnim SNR-om. Na ovaj način se dobija optimalan signal, s obzirom da je mala vjerovatnoća da se u slučaju frekvencijski selektivnog fadinga javi velika slabljenja na istim podnosiocima, u istom trenutku na svakoj od L nezavisnih putanja. Očigledno je da se to postiže na račun složenosti modela. Naime, ovaj sistem je znatno složeniji od TDSC-OFDM sistema jer se koristi L blokova koji vrše RF/IF, A/D i FFT procesiranje.



Slika 2. Prijemni prostorni OFDM diversity sistem sa L grana i kombinovanjem u frekvencijskom domenu

Primjenom jedne vrste vremensko-prostornog diversity-a moguće je smanjiti kompleksnost FDSC-OFDM diversity sistema na način prikazan na slici 3. U tom slučaju, u predajniku se vrši diversity kodiranje modulisanog ulaznog niza bita. Ovo kodiranje predstavlja u najjednostavnijem slučaju kopiranje ulaznih podataka svakog OFDM simbola onoliko puta koliki je broj prijemnih diversity antena. Istovremeno se može izvršiti i operacija interleaving-a, ako postoji vjerovatnoća pojavljivanja više uzastopnih pogrešnih bita. Nakon svakog perioda trajanja OFDM simbola, signal sa druge prijemne antene se dovodi na RF/IF i A/D konvertor. To znači da je potrebna samo jedna prijemna grana, kao u slučaju kada nije primijenjen diversity, ali uz korišćenje više prijemnih antena. Na osnovu urađene estimacije za svaku granu posebno, biraju se odgovarajući podnosioci koji su najmanje oslabljeni. Tako dobijena šema za izbor podnosilaca se koristi sve do trenutka kada se šalju novi pilot tonovi i ponovo vrši estimacija kanala. Smanjenje kompleksnosti ovakvog diversity sistema postignuto je na račun manjeg ostvarenog digitalnog protoka, odnosno manje spektralne efikasnosti sistema. Digitalni protok se smanjuje proporcionalno broju prijemnih diversity antena, pa je zato opravdano koristiti ovakav sistem samo za manji broj prijemnih antena.



Slika 3. Prijemni prostorno-vremenski OFDM diversity sistem sa L grana i kombinovanjem u frekvencijskom domenu

Glavne karakteristike opisanog sistema su njegova jednostavnost u odnosu na prostorni OFDM prijemni diversity sistem kod kojeg se primjenjuje ista metoda kombinovanja. Pored toga, ostvaruju se i mnogo bolje performanse u odnosu na prostorni prijemni diversity sistem sa kombinovanjem u vremenskom domenu. Sličan model sistema predložen je u [3] gdje su analizirane njegove performanse samo u slučaju idealnog poznavanja karakteristika kanala. U ovom radu su, za uslove realnog prenosa signala, predložene dvije metode estimacije kanala. Za svaku od njih su simulirane i upoređene performanse razmatranog sistema.

3. OPIS SIMULACIONOG MODELA

Za analizu performansi opisanog OFDM sistema sa prijemnim prostorno-vremenskim diversity-jem sa SC kombinovanjem u frekvencijskom domenu, korišćen je sopstveno razvijeni simulacioni model. U simulaciji su korišćeni parametri koji karakterišu kanal u opsegu 17 GHz, koji se razmatra za buduće indoor širokopolasne bežične mreže [4]. Root-mean-square delay spread (τ_{rms}) ima vrijednost od 20 ns, a maksimalna vrijednost delay spread-a ne prelazi 200 ns. Uskopojasna fading statistika je takva da se, za manja rastojanja između predajnika i prijemnika (oko 10 m) karakteriše Rice-ovom raspodjelom, a sa porastom rastojanja Rayleigh-ovom raspodjelom, čak i kada postoji linija direktne vidljivosti. Ovo se objašnjava time što na ovim učestanostima direktni talas veoma brzo slabi sa porastom rastojanja između predajnika i prijemnika, dok se snaga reflektovanih talasa može smatrati približno konstantnom. Usled toga, odnos snage između direktne i reflektovanih komponenti opada sa porastom rastojanja, što vodi Rayleigh-ovoj raspodjeli. Za opisivanje sistema u slučaju manjih rastojanja između predajnika i prijemnika uzeta je vrijednost Rice-ovog faktora $K=8$. Za pretpostavljeni ekvivalentni binarni protok od 50 Mb/s na linku, stvarna ostvarena brzina prenosa informacija je $50/L$ Mb/s, gdje je sa L označen broj prijemnih diversity antena. Pri upotrijebljenoj QPSK modulaciji potrebno je 128 podnosilaca za ostvarivanje date brzine prenosa. Vrijednosti ostalih primijenjenih parametara su: $T_g=1,024 \mu s$, $T=5,12 \mu s$ i $T_{sym}=6,144 \mu s$, gdje je sa T_g označeno trajanje zaštitnog intervala, T je efektivno trajanje OFDM simbola bez zaštitnog intervala, a T_{sym} je ukupno trajanje OFDM simbola. T_g je odabrano tako da je onemogućena pojava intersimbolske interferencije.

Za određivanje optimalnog broja pilot tonova koji se koriste za estimaciju kanala, potrebno je izračunati širinu koherentnog opsega B_c :

$$B_c = 1/\beta \cdot \tau_{rms} = 50 / \beta \text{ MHz} \quad (1)$$

β predstavlja konstantu čija vrijednost zavisi od stepena korelacije komponenti u okviru koherentnog opsega. Ukoliko se želi da stepen korelacije komponenti u okviru koherentnog opsega ima vrijednost veću od 0,9, onda za β treba uzeti vrijednost 50 [5]. Pošto je rastojanje između podnosilaca $\Delta f = 1/T = 195,3$ kHz, uzimajući da je $\beta = 50$, dobija se broj podnosilaca koji su međusobno korelisani stepenom korelacije većim od 0,9:

$$P \leq B_c / \Delta f = 5,12 \quad (2)$$

To znači da se 5 susjednih podkanala može estimirati jednim pilot tonom. U simulaciji su pilot tonovi smješteni na svakom četvrtom podkanalu, čime se dobija da je ukupan broj pilota 32. Stavljanjem pilota na svaki četvrti podkanal, umjesto na svaki peti, osigurava se bolja estimacija i postiže se da svaki pilot ton estimira isti broj podkanala.

Razmatrani kanal za indoor okruženje u opsegu 17 GHz, u uslovima male mobilnosti korisnika, predstavlja vremenski sporopromjenljivi kanal. To se lako može dokazati ako se uporedi trajanje jednog OFDM simbola sa koherentnim vremenom kanala. Ukoliko se pretpostavi brzina kretanja korisnika od 1m/s, i najgori mogući slučaj, kada se predajnik i prijemnik kreću u istom pravcu, ali različitim smjerovima, dobija se maksimalna frekvencija Doppler-ovog pomjeraja (f_D) od 117 Hz [4]. Veza između koherentnog vremena (t_c) i maksimalne frekvencije Doppler-ovog pomjeraja je data uslovom $f_D t_c \ll 1$. Može se smatrati da je prethodni uslov zadovoljen ako se uzme da je $f_D t_c$ 10 puta manje od 1. Tako se dobija da je trajanje koherentnog vremena, u toku kojeg se karakteristike kanala značajnije ne mijenjaju:

$$t_c = \frac{1}{10 \cdot f_D} = 877 \mu s \quad (3)$$

Broj OFDM simbola koji se mogu prenijeti, a da ne dođe do značajnijih promjena karakteristika kanala, se dobija kao odnos trajanja koherentnog vremena i ukupnog vremena trajanja OFDM simbola:

$$\frac{t_c}{T_{sym}} = \frac{t_c}{T + T_g} \cong 142 \quad (4)$$

U simulaciji je uzeto da se karakteristike kanala ne mijenjaju u toku prenosa 40 OFDM simbola. Pošto je razmatran sistem sa dvije prijemne antene, a na strani predajnika se vrši slanje jednog OFDM simbola u 2 uzastopna intervala, to znači da svaka prijemna antena primi 20 OFDM simbola prije nego što se generiše kanal sa novim karakteristikama.

Estimacija podkanala na lokacijama pilot tonova rađena je least-square (LS) metodom, kako se sistem ne bi dodatno usložnjavao. Ako je X_{mn} simbol podatka u osnovnom opsegu u n-tom vremenskom intervalu, na m-tom podkanalu, a H_{mn} funkcija prenosa m-tog podkanala u n-tom vremenskom intervalu, onda se signal na prijemu nakon odrađene FFT može zapisati u obliku:

$$Y_{mn} = H_{mn} \cdot X_{mn} + N_{mn} \quad (5)$$

N_{mn} predstavlja bijeli Gaussov šum u posmatranom podkanalu. LS metodom estimira se funkcija prenosa na lokacijama pilot tonova na sledeći način:

$$\hat{H}_{mn} = \frac{Y_{mn}}{X_{mn}} = H_{mn} + \frac{N_{mn}}{X_{mn}} = H_{mn} + V_{mn} \quad (6)$$

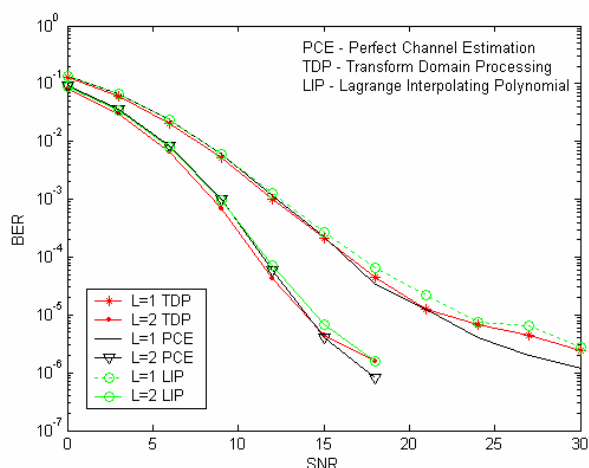
gdje je sa V_{mn} označena greška estimacije, usled prisustva šuma. Na osnovu estimirane vrijednosti funkcije prenosa podkanala na učestanostima pilot tonova, vrši se estimacija funkcije prenosa čitavog kanala.

U ovom istraživanju predložena su, i razmatrana, dva različita načina za kompletiranje estimacije cjelokupnog kanala. Prvi, jednostavniji način, je zasnovan na interpolaciji funkcije prenosa na osnovu prethodno estimiranih vrijednosti na pozicijama pilot tonova. Pri tome je korišćen Lagrange-ov interpolacioni metod (LIP). Drugi, složeniji metod estimacije funkcije prenosa kanala ostvaruje se upotrebom Transform Domain (TDP) procesiranja. Ovom metodom može se smanjiti uticaj bijelog Gauss-ovog šuma i interferencije između podnosioca. Dobijeni estimat funkcije prenosa na učestanostima pilot tonova se iz frekvencijskog domena transformiše u vremenski domen (IDFT). Zatim se obavlja filtriranje tako dobijenog signala propuštanjem kroz filter propusnik niskih učestanosti, čime se umanjuju komponente šuma. Sledeći korak je dodavanje nula i vraćanje u frekvencijski domen (DFT). Kao rezultat dobija se funkcija koja dobro aproksimira funkciju prenosa kanala, jer je smanjen nivo šuma na podnosiocima.

U simulaciji je smatrano je da je ostvarena idealna sinhronizacija između predajnika i prijemnika tako da uticaj frekvencijskog ofseta nije razmatran.

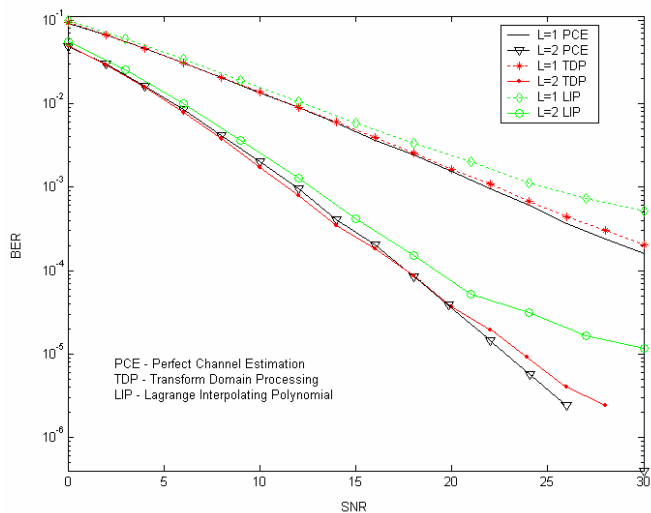
5. REZULTATI

Primjenom opisanog simulacionog modela dobijene su vrijednosti za vjerovatnoću greške po bitu (BER) u funkciji trenutnog odnosa signal/šum (SNR), ilustrovani na slici 4. Za kanal sa Rice-ovim fedingom ($K=8$), dati su grafici koji se odnose na primijenjene TDP i LIP metode estimacije, kao i rezultati za slučaj idealnog poznavanja karakteristika kanala (PCE). Pilot tonovi su postavljeni na svakom četvrtom podnosiocu ($N=4$) svakog dvadesetog OFDM simbola koji stiže na jednu od prijemnih antena. Uočava se da se i jednom i drugom predloženom metodom estimacije dobijaju približno identični rezultati, koji neznatno odstupaju od slučaja kada se potpuno poznaju karakteristike kanala (PCE). U takvim uslovima, prednost LIP metode je u njenoj jednostavnoj implementaciji. Ostvareni diversity dobici, u odnosu na slučaj kada postoji samo jedna prijemna grana, su kod obje metode približno isti i iznose oko 3,5 dB za BER od 10^{-3} , oko 5,5 dB za BER od 10^{-4} , oko 9 dB za BER od 10^{-5} itd.



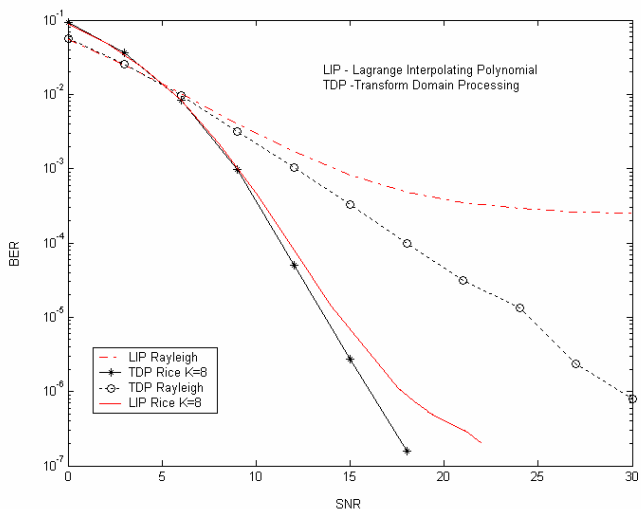
Slika 4. BER za kanal sa Rice-ovim fedingom, $K=8$, $N=4$

Na slici 5 dati su dobijeni grafici BER-a u funkciji trenutnog SNR-a za slučaj kanala sa Rayleigh-ovim fedingom. I u ovom slučaju TDP metodom estimacije se dobijaju približno isti rezultati kao i u slučaju PCE, dok se LIP metodom dobijaju nešto lošiji rezultati. Ostvareni diversity dobici u slučaju kanala sa Rayleigh-ovim fedingom su znatno veći nego u slučaju kanala sa Rice-ovim fedingom, jer ne postoji dominantna komponenta primljenog signala. Već pri vrijednosti BER-a od 10^{-2} ostvareni diversity dobitak, u odnosu na slučaj kada nije primijenjen diversity sistem, iznosi 5 dB, a pri BER-u od 10^{-3} dobitak iznosi 11 dB.



Slika 5. BER za kanal sa Rayleigh-ovim fedingom, $N=4$

Na slici 6 prikazani su grafici BER-a za opisani diversity sistem dobijeni za slučaj kada su pilot tonovi smješteni na svakom osmom podnosiocu ($N=8$) svakog dvadesetog OFDM simbola koji stiže na jednu od prijemnih antena. Dati su rezultati za TDP i LIP metodu estimacije, za kanal sa Rayleigh-ovim i kanal sa Rice-ovim fedingom ($K=8$). Broj prijemnih grana je $L=2$. U ovim uslovima mnogo bolji rezultati se dobijaju TDP metodom estimacije i oni su vrlo približni slučaju idealnog poznavanja karakteristika kanala. Pri LIP metodi estimacije javlja se prag vjerovatnoće greške za slučaj kanala sa Rayleigh-ovim fedingom, dok su kod kanala sa Rice-ovim fedingom lošije performanse sistema uočljive za vrijednosti SNR-a veće od 15 dB.



Slika 6. BER za kanal sa Rice-ovim fedingom, $K=8$, $N=8$, i za kanal sa Rayleigh-ovim fedingom, $N=8$

6. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane performanse OFDM prijemnog vremenski-prostornog diversity sistema, sa stanovišta BER-a, pri različitim predloženim metodama estimacije kanala. Dobijeni rezultati za sistem sa dvije prijemne grane pokazuju da LIP metoda estimacije daje neznatno lošije rezultate od TDP metode, koja je znatno složenija. Pod uslovom da se pravilno odabere broj pilot tonova, ovakav zaključak važi kako za slučaj kanala sa Rayleigh-ovim fedingom, tako i za slučaj kanala sa Rice-ovim fedingom. Istovremeno, primjena LIP metode estimacije omogućava očuvanje najbolje karakteristike razmatranog OFDM sistema – njegove jednostavnosti. Pokazano je da bolje performanse TDP metode estimacije dolaze do izražaja kada se jednim pilot tonom estimira širi opseg (više podkanala OFDM sistema), u okviru koga su komponente korelisane stepenom korelacije nižim od 0,9.

LITERATURA

- [1] Shinsuke Hara, Ramjee Prasad, *Multicarrier techniques for 4G mobile communications*, Artech House 2003.
- [2] Klaus Witrisal, *OFDM Air-Interface Design for Multimedia Communications*, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology
- [3] Won Gi Jeon, Hyeok Koo Jung, and Yong Soo Cho, *A Frequency-Domain Selection Combining Technique for an OFDM System*, The Seventh International Symposium on WPMC, Abano Terme, Italy September 2004.
- [4] Manuel Lobeira Rubio, Ana Garcia-Armada, Rafael P. Torres, Jose Luis Garcia, *Channel Modeling and Characterization at 17 GHz for Indoor Broadband WLAN*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, April 2002.
- [5] Wichai Pongwilai, Ryuji Kohno, Sawasd Tantarata, *A New Joint Estimation of Channels and the Number of Transmit Antennas for OFDM Systems with Antenna Diversity Employing Walsh Hadamard Codes*, IEICE Trans. on Commun., February 2004.

Abstract: In this paper we propose, and compare, two channel estimation methods for OFDM space-time diversity system. Frequency-domain selection combining is performed in the receiver. BER performance of this diversity system are obtained using simulation model with parameters characterizing 17 GHz bandwidth. Least-square estimation technique is used for evaluating the subchannel characteristics at pilot tone locations. Other subchannels are estimated using two proposed methods. First, less complex, method is Lagrange interpolating polynomial (LIP) and second is Transform domain processing (TDP). It is shown that LIP method, while keeping the overall simplicity of the system, gives BER values slightly greater compared with TDP method.

CHANNEL ESTIMATION IN OFDM SYSTEM WITH RECEIVER SPACE-TIME DIVERSITY

Enis Kočan, Maja Ilić, Milica Pejanović-Đurišić