

## ANALIZA UTICAJA DUGOROČNE PREDIKCIJE NA PERFORMANSE ADAPTIVNIH PROSTORNO-VREMENSKIH KODOVA

Predrag Ivaniš, Dušan Drajić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

**Sadržaj** – U radu je izložen algoritam koji kombinuje adaptivno prostorno vremensko kodovanje i dugoročnu predikciju. Dve malo poznate tehnike kombinovane su za slučaj MIMO sistema višeg reda i to za parametre koji odgovaraju realnim bežičnim sistemima zasnovanim na 3G standardu. Performanse rešenja su proverene Monte Karlo simulacijom. Pokazano je da se na ovaj način može znatno ublažiti poguban uticaj kašnjenja povratnog kanala.

### 1. UVOD

Tehnike prostorno vremenskog kodovanja (*Space-Time Coding* - STC) predstavljaju jedan od najelegantnijih načina za povećanje kapaciteta i poboljšanje performansi MIMO sistema. Poznato je [1] da ove tehnike karakteriše jednostavnost realizacije i implementacije odlučivanja na bazi maksimalne verodostojnosti.

Međutim, Teorija informacija pokazuje da se znatno bolje performanse mogu postići ako, pored prijemnika, i predajnik poseduje informaciju o stanju kanala (*Channel State Information* - CSI), naročito u slučaju asimetričnih sistema. U slučaju kada je potpuna CSI dostupna i predajniku i prijemniku, optimalno rešenje predstavlja tehnika zasnovana na dekompoziciji po singularnim vrednostima (*Singular Value Decomposition* - SVD) [2]. Primenom ove tehnike može se maksimizirati kapacitet sistema (*water-filling*) ili minimizirati verovatnoća greške (*beamforming*). U realnim sistemima stanje kanala obično nije poznato sa savršenom tačnošću pa performanse sistema mogu biti i znatno lošije nego kada se primenjuju samo prostorno vremenski kodovi.

Stoga bi bilo zgodno konstruisati novu klasu kodova, adaptivnu po prostoru i vremenu, koja bi koristila i delimičnu informaciju o stanju kanala i na taj način omogućila dostizanje teorijskih granica za kapacitet i performanse MIMO sistema u praksi.

### 2. ADAPTIVNI PROSTORNO VREMENSKI KODOVI

Ideja izložena u ovom delu rada prvi put je predložena u [3] i zasniva se na kombinovanju klasičnog prostorno vremenskog koda  $C$  sa linearnom transformacijom  $W$  pa je signal na ulazu u prijemnik dat izrazom:

$$x = Hc + e = HW\bar{c} + e \quad (1)$$

Prostorno vremenski koder u principu može biti bilo kog tipa ali se zbog jednostavnosti analize ograničavamo na ortogonalne blok kodove (OSTBC), kodnih reči dužine  $L$  simbola. Koder preslikava pristiglu sekvencu simbola u skup paralelnih kodnih reči, čime se unosi prostorna i vremenska redundansa. Vremenski promenljiva linearna transformacija uključuje raspoloživu informaciju o stanju kanala da bi se, kao rezultat, formirao novi skup paralelnih sekvenci simbola. Dekodovanje se obavlja po principu maksimalne verodostojnosti (*Maximum Likelihood* - ML), tj. bira se kodna reč  $C \in \{C_1, \dots, C_k\}$ , koja minimizira izraz:

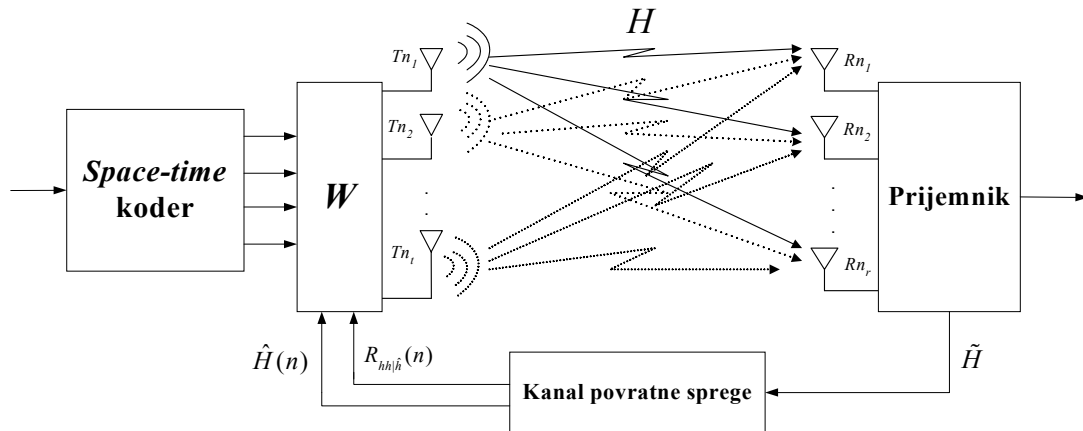
$$\hat{C} = \arg \min_{C \in \mathcal{C}} \|X - HC\|_F^2, \quad X=x(1:L) \quad (2)$$

Jedan od mogućih pristupa za dizajniranje kodnih reči je minimiziranje maksimuma kriterijuma učinka nad svim parovima kodnih reči ( $C_k, C_l$ ). Za slučaj kada se ekvivalentni kod dobija modifikacijom unapred definisanog OSTBC može se pisati  $A(C_k, C_l) = \mu_{kl} I_{n_r}, \forall k \neq l$ .

Tada važi linearna transformacija  $C_k = W\bar{C}_k$  pa kriterijum učinka  $I(C_k, C_l)$ , postaje:

$$I(C_k, C_l) = m_{hh}^* R_{hh}^{-1} \Psi (WW^*, \mu_{kl})^{-1} R_{hh}^{-1} m_{hh} - \log \det(\Psi (WW^*, \mu_{kl})) \quad (3)$$

$$\Psi (C_k, C_l) = (I_N \otimes WW^*) \mu_{kl} / 4\sigma^2 + R_{hh}^{-1}$$



Slika 1: Kombinacija prostorno-vremenskog kodera i SVD

Pritom je sa  $R_{\hat{h}|\hat{h}}$  označena kovarijansa kanala uslovljena sporednom informacijom, koja opisuje preostalu nesigurnost kad je informacija o stanju kanala poznata. Pritom  $\hat{H}$  predstavlja procenu  $H$  koja je raspoloživa predajniku, a  $h$  i  $\hat{h}$  su njihove vektorisane kopije. Tada rešenje za optimalnu linearnu transformaciju ima oblik  $W_{opt} = \hat{V}\Lambda^{1/2}$  pri čemu je  $\hat{V}$  sopstveni vektor dobijen dekompozicijom procenjene kanalne matrice  $\hat{H}$  a  $\Lambda$  se određuje kompleksnim postupkom numeričke optimizacije. Lako se može pokazati da se u slučaju kada u slučaju kada ne postoji sporedna informacija ( $R_{\hat{h}|\hat{h}}^{-1} \rightarrow 0$ ) ili je odnos signal/šum vrlo veliki ( $\sigma \rightarrow 0$ ), dizajn koda svodi na kriterijum determinante, pogodan za sistem sa otvorenom petljom:

$$I(C_k, C_l) = \frac{1}{\det A(C_k, C_l)} \quad (4)$$

Sa druge strane, ako je poznavanje stanja kanala idealno linearna transformacija ima oblik sopstvenog vektora koji odgovara najvećoj sopstvenoj vrednosti kanalne matrice i sistem postaje ekvivalentan *beamforming*-u. Sličan rezultat se dobija ako je novo šuma u kanalu veoma veliki.

U specijalnom slučaju, kada su antene i na prijemnoj i na predajnoj strani dovoljno prostorno udaljene i ako je propagacija Rejljeva (slučaj kada ne postoji optička vidljivost), analiza se može pojednostaviti. Tada se svaki procenjeni kanalni koeficijent  $\hat{h}_{ij}$  smatra korelisanim sa odgovarajućim koeficijentom realnog kanala  $h_{ij}$  i nekorelisan sa svim ostalim. Da bi opisali stepen korelacije uvodimo normalizovani koeficijent korelacije  $\rho = E[h_{ij}\hat{h}_{ij}^*]/\sigma_h^2$ . Savršeno poznavanje kanala sada odgovara slučaju  $\rho \rightarrow 1$ ,  $\rho$  se može koristiti kao nova mera kvaliteta procene kanala:

$$R_{hh} = \sigma_h^2 I_{MN}, R_{h\hat{h}} = \sigma_h^2 \rho I_{MN}, R_{\hat{h}\hat{h}} = \sigma_h^2 I_{MN} \quad (5)$$

$$m_{\hat{h}|\hat{h}} = \rho \hat{h}, R_{\hat{h}|\hat{h}} = \sigma_h^2 (1 - |\rho|^2) I_{MN}$$

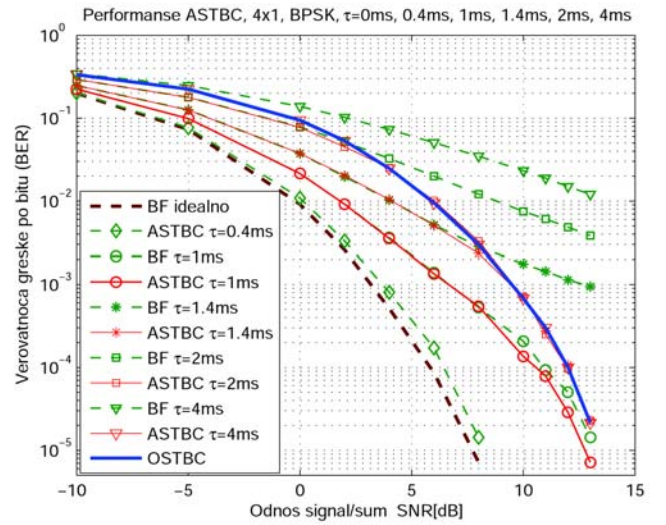
Za specijalni slučaj kada je broj antena bilo na strani predaje bilo na strani prijema dve ili manje, algoritam određivanja  $W_{opt}$  se znatno pojednostavljuje jer se vektor  $\Lambda$  može odrediti jednostavnim iterativnim postupkom koji zavisi od sopstvenih vrednosti matrice  $\hat{H}$ , koeficijenta  $\rho$ , odnosa signal/šum SNR i minimalnog skalirajućeg faktora primenjenog prostorno-vremenskog koda  $\mu_{min} = \min(\mu_{kl})$  [3].

Budući da izlaganje kompletnog algoritma prevazilazi okvire rada, u nastavku će biti izloženi rezultati Monte Karlo simulacije sistema na koji je ova procedura implementirana. Posmatran je sistem sa četiri predajne i jednom prijemnom antenom, modulacija je BPSK a polazni prostorno vremenski kod za koji je  $\mu_{min} = 4$ , opisan je generišućom matricom (6).

$$G = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 \\ -x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Analiza postojećih sistema pokazuje da kašnjenje povratnog kanala predstavlja ograničavajući faktor pri dizajnu adaptivnih sistema. U daljoj analizi posmatrani su slučajevi kada je kašnjenje  $\tau = 0.4ms, 1ms, 2ms$ . Simulacija je izvedena na 5000 realizacija kanalne matrice, pri čemu je svaki koeficijent modeliran nezavisno na osnovu Džeksovog simulacionog modela [4]. Smatra se da je propagacija Rejljeva, prostorna korelacija ne postoji a estimacija na strani predaje je idealna.

Rezultati, prikazani na slici 2, jasno pokazuju da tehnika adaptivnih prostorno vremenskih kodova objedinjuje dobre osobina *beamforming*-a i klasičnih prostorno-vremenskih blok kodova. Već za brzinu kretanja od  $v=60$  km/h i  $\tau = 2ms$  ( $\rho=0.65$ ) poznavanje povratne informacije ne doprinosi poboljšanju performansi jer je korelacija stvarnog stanja kanala i procene dostupne predajniku veoma slaba. U takvoj situaciji, javlja se potreba za preciznom predikcijom koeficijenata kanala i do nekoliko stotina simbolskih intervala unapred.



Slika 2: Performanse ASTC,  $f_D=100Hz$

### 3. ADAPTIVNA DUGOROČNA PREDIKCIJA

Poznato da je pod određenim uslovima moguće proceniti buduću realizaciju fedinga u kanalu ako je poznat dovoljan broj prethodnih realizacija. Jedan od najjednostavnijih načina ove procene jeste predikcija na bazi minimalne srednje kvadratne greške (*minimum mean square error* – MMSE) u kojoj se kanal posmatra kao autoregresivni model u kome se odbirak fedinga predstavlja kao linearna kombinacija prethodnih  $p$  odbiraka:

$$\hat{h}_n = \sum_{j=1}^p c_j h_{n-j} \quad (7)$$

gde je  $p$  red AR modela a optimalni koeficijenti  $c_j$  su određeni principom ortogonalnosti  $c = R^{-1}r$  gde je  $R_{p \times p}$  autokorelaciona matrica a  $r_{p \times 1}$  autokorelacioni vektor:

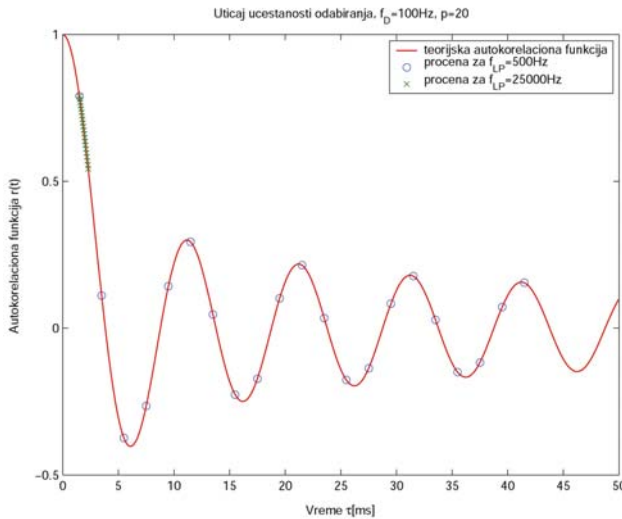
$$R_{ij} = E[h_{n-i}h_{n-j}^*], r_j = E[h_n h_{n-j}^*] \quad (8)$$

Ovaj princip se može uopštiti tako da se na osnovu prethodnih  $p$  odbiraka fedinga procenjuje odbirak u "daljoj budućnosti" (*long-range prediction* - LRP).

Koeficijenti  $c_j$  se mogu odrediti i bez inverzije autokorelacione matrice, i to primenom bilo kog adaptivnog algoritma koji minimizuje srednju kvadratnu grešku.

$$c_{n+1} = c_n + \mu e_n h_n^* \quad (9)$$

Pritom je  $h_n$  vektor od  $p$  prethodnih realizacija posmatranog koeficijenta  $H$ ,  $e_n = h_n - \hat{h}_n$  a  $\mu$  veličina koraka u LMS algoritmu. Pri praktičnoj realizaciji ostaje otvoreno još jedno pitanje – kojom brzinom treba vršiti odabiranje signala kako bi se postigli optimalni rezultati? Mana standardnih metoda linearne predikcije je upravo u tome što su odbirci uzimani brzinom signaliziranja što je onemogućilo predikciju u dužim vremenskim intervalima. Pokazuje se [5] da se najbolji rezultati za standardne opsege postižu ukoliko se ova brzina spusti na 2-3 vrednosti Nikvistove brzine, tj. na oko  $5f_{Dm}$ . Ovim se postiže bolje ispitivanje bočnih lukova autokorelacione funkcije, kao što je prikazano na slici 3. U istom radu je pokazano da za umerene brzine signaliziranja dužina transverzalnog filtra od  $p=20$  čelija predstavlja dobro rešenje



Slika 3: Opseg predikcije

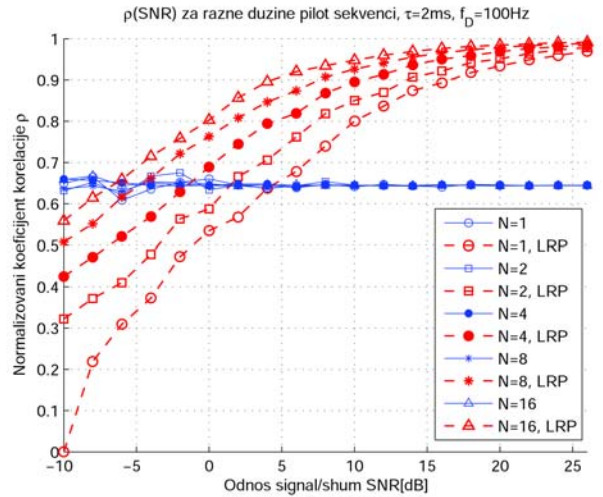
U daljem radu razmatra se slučaj koji se javlja u realizaciji 3G sistema [6]. Dužina jednog slota je standardna i iznosi 0.667 ms a procena stanja kanala se vrši jednom po slotu, tj. učestanošću 1500 Hz. Brzina signaliziranja u principu zavisi od namene i iznosi 120-480 ks/s (u HSDPA 120ks/s). U cilju procene stanja kanala u okviru svakog rama šalje se nekoliko pilot simbola pomoću kojih se obavlja estimacija stanja kanala na strani prijema.

U slučaju MIMO sistema, pilot sekvence poslate sa raznih predajnih antena moraju biti ortogonalne. Tada se relativno lako određuju koeficijenti kanalne matrice, tj. vrednosti fedinga po svim putanjama koje povezuju predajne i prijemne antene. Pokazuje se da je dužina pilot sekvence faktor od koga bitno zavisi tačnost estimiranog signala pa i performanse sistema.

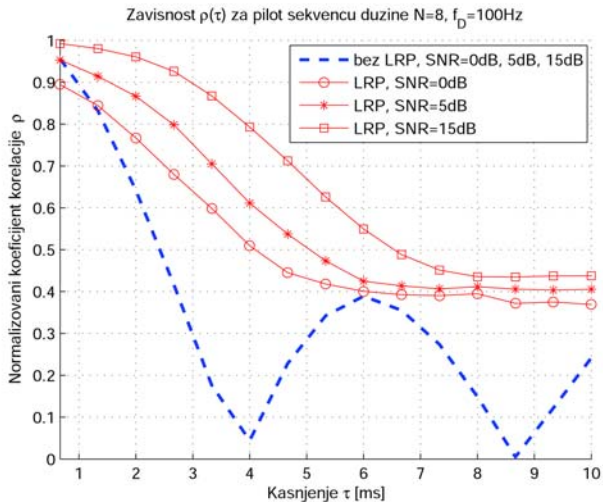
Performanse sistema u kome je predajniku dostupna neprecizna procena stanja kanala, performanse određuje stepen korelacije matrica  $\hat{H}$  i  $H$ . U kome je primenjen postupak adaptivne predikcije, normalizovani koeficijent korelacije zavisi od dužine pilot sekvence, kao što je prikazano na slici 4. već za dužinu  $N=8$  simbola ostvaruju sasvim dobri rezultati, uz neznatnu degradaciju spektralne efikasnosti.

Polazeći od predhodno navedenih pretpostavki a na osnovu originalno razvijenog softvera izvršena je analiza MIMO sistema sa predikcijom. Rezultati pokazuju da koeficijent korelacije sistema bez predikcije ne zavisi bitno od dužine pilot sekvence i odnosa signal/šum, čak i za relativno lošu procenu kanala. Objašnjenje ove pojave je veoma jednostavno – procena je veoma slična zakašnjenju kopiji stvarnog stanja kanala pa korelacija približno ima oblik autokorelacione funkcije fedinga.

Ovo se jasno može videti sa slike 5, gde je prikazan slučaj  $f_D=100\text{Hz}$  ( $v=54\text{ km/h}$ ,  $f_0=2\text{ GHz}$ ). U slučaju predikcije, pri proceni stanja kanala greška se akumulira pa je procena znatno bolja za veće vrednosti SNR. Ipak za relativno veliki opseg predikcije, korelacija  $\hat{H}$  i  $H$  dostiže minimum koji je za veće vrednosti kašnjenja praktično fiksiran i ima znatno veću vrednost nego vrednosti korelacije nepredikovanog sistema.



Slika 4: Zavisnost korelacije od SNR i  $N$ ,  $\tau = 2\text{ms}$ ,  $f_D = 100\text{Hz}$



Slika 5: Zavisnost korelacije od kašnjenja,  $N=8$ ,  $f_D=100\text{Hz}$

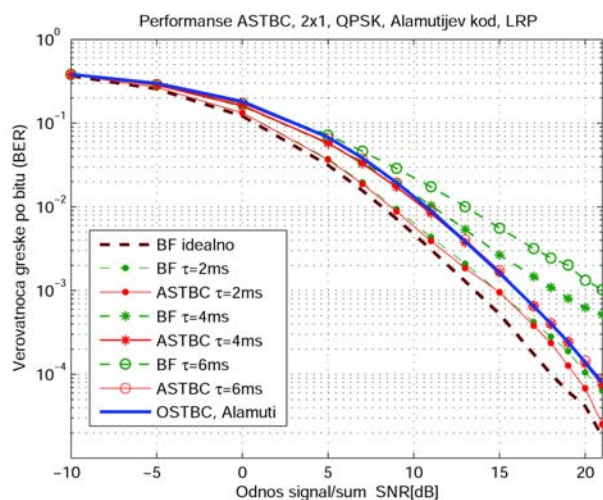
#### 4. PRIMENA DUGOROČNE PREDIKCIJE NA ASTC

Da bi se proverili prethodno dobijeni rezultati izvedena je Monte Karlo simulacija sistema sa slike 1. Pritom je sistem modifikovan tako što je na prijemnoj strani sistema izvršena estimacija na osnovu pilot sekvence a zatim je na osnovu procenjenog signala realizovana adaptivna predikcija.

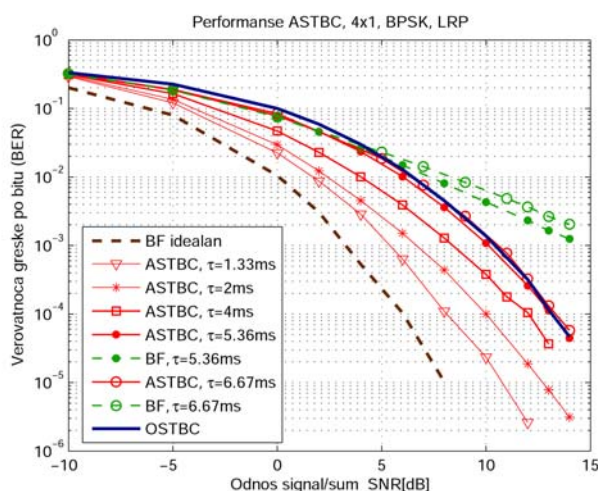


Usvojene su iste pretpostavke kao pri prethodnoj simulaciji ASTC, ali se sada smatra da poslati signal odgovara osnovnim standardima 3G sistema. Koeficijenti kanalne matrice se generišu simboličkom brzinom (usvojeno je 150ks/s), estimacija se vrši pomoću pilot sekvence dužine 8 simbola i to na svakih 0.667ms. Predikcija se obavlja sa istom učestanošću (1500Hz) što odgovara vrednosti  $15f_{Dm}$ .

Posmatrana su dva tipična slučaja. U prvom, sistem ima dve predajne i jednu prijemnu antenu, modulacija je QPSK a kao polazni prostorno-vremenski kod poslužila je Alamutijeva šema. Ovaj slučaj odgovara novijim predlozima za MIMO HSDPA i ovakva šema već je eksperimentano implementirana u I-METRA projektu [7]. Zbog relativno malog reda sistema, razlike u performansama između *beamforming*-a i Alamutijeve šeme nisu velike pa se može reći da je i sistem bez predikcije relativno uspešan. Predikcijom se rezultati poboljšavaju ali je razlika приметna tek za umerena kašnjenja (2-4ms).



Slika 6: ASTBC sa LRP, 2x1 sistem, QPSK



Slika 7: ASTBC sa LRP, 4x1 sistem, BPSK

U drugom slučaju sistem ima četiri predajne i jednu prijemnu antenu, modulacija je BPSK a polazni OSTBC ima generišuću matricu datu izrazom (6). Usled većeg reda sistema razlike u performansama *beamforming* šeme i ortogonalnog STBC znatno veće.

Pošto su asimetrični sistemi naročito pogodni za realizaciju, a novija istraživanja razmatraju primenu MIMO sistema reda do 4x4, ova šema je daleko perspektivnija od prethodno analizirane. Rezultati pokazuju da se primenom adaptivne predikcije performanse adaptivnog prostorno vremenskog koda dramatično poboljšavaju. Dobitak usled delimičnog poznavanja CSI uočljiv je čak i za kašnjenja do 6ms (8 slotova).

Zanimljivo je da u oba slučaja dobitak usled predikcije nije veliki za kašnjenja do  $\tau=1ms$ , jer je tada i originalni signal dovoljno korelisan. Ako se uzme u obzir da kašnjenja u adaptivnim bežičnim sistemima najčešće nisu veća od trajanja nekoliko transmisionih slotova (2-3ms), postaje jasniji značaj dobijenih rezultata.

## 5. ZAKLJUČAK

Analiza sprovedena u ovom radu pokazuje da se performanse adaptivnih prostorno vremenskih kodova mogu bitno poboljšati primenom adaptivne predikcije. Rezultati izvršenih simulacija pokazuju da je poboljšanje naročito izraženo kod sistema višeg reda.

Ovim je omogućeno objedinjavanje dobrih osobina klasičnih prostorno-vremenskih kodova i *beamforming* tehnike, čak i u sistemima u kojima postoji relativno veliko kašnjenje povratne sprege.

## 6. LITERATURA

- [1] B. Vucetic, J. Yuan, "Space-time coding", John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2003A.E. Bryson and Y.C. Ho, *Applied Optimal Control*, New York: Wiley, 1975.
- [2] P. Ivaniš, D. Drajić, "Combined optimal power allocation and adaptive modulation for MIMO systems with imperfect CSI", TELSIKS 2003, Niš, 2003, pp. 167-170.
- [3] G. Jongren, M. Skoglund, B. Ottersten, "Combining Beamforming and Orthogonal Space-Time Block Coding", IEEE Transactions of Information Theory, vol. 48, no. 3, March 2002., pp 611-626.
- [4] W.C. Jakes, "Microwave Mobile Communications", 2<sup>nd</sup> ed., IEEE Press, New York, 1993.
- [5] A. Duel-Hallen, S. Hu, H. Hallen, "Long Range Prediction of Fading Signals: Enabling Adaptive Transmission for Mobile Radio Channels" IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 17, No. 3, (an invited paper)., May 2000, pp. 62-75
- [6] 3GPP TS 25.214 V5.0.0 (2002-03), technical specification, 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer procedures, Overall description (Release 5)
- [7] J. Fonollosa, "I-METRA project. An overview", 7th Concertation Meeting of Mobile/ Wireless/ Satellite IST projects, Adaptive Antenna Cluster, 9-10 April 2002, Brussels.

**Abstract** – This paper presents combination of adaptive space-time coding and adaptive long range prediction. These techniques are applied to MIMO system with 3G system parameters. Proposed system performances are analyzed with Monte Carlo simulation. It is shown that backward link delay influence can be highly reduced this way.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF ADAPTIVE SPACE TIME CODES WITH LONG RANGE PREDICTION

Predrag Ivaniš, Dušan Drajić