

# UNAPREĐENJE SISTEMA PRENOSA BAZIRANIH NA ADAPTIVNOJ OFDM MODULACIJI

Predrag Okiljević, Nebojša Nakić i Desimir Vučić

**Sadržaj** — Cilj ovog rada je da se simulacijom prikažu različite mogućnosti poboljšanja prenosa u sistemima korišćenjem adaptivne i MIMO OFDM modulacije, tj. adaptacijom parametara podnosilaca (modulacione šeme i energije) na kanalni feding, u odnosu na one sisteme gde se koristi konvencionalna OFDM modulacija. Simulirani kanali su sa Rajsovim, Rejljevim, Nakagami i Vajbulovim fedingom u prisustvu aditivnog belog Gausovog šuma (AWGN).

**Ključne reči** — adaptivna, MIMO, OFDM.

## I. UVOD

ADAPTIVNA OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulacija (adaptivna modulacija) je tehnika kojom se omogućava maksimizacija protoka podataka na podnosiocima koji su alocirani za odgovarajuće korisnike. Podrazumeva procenu SNR (Signal to Noise Ratio) za svaki od podnosilaca u prenosu, a na osnovu toga dalje se bira odgovarajuća modulaciona šema, tako da se zadrži prihvatljivi BER (Bit Error Rate). Ova tehnika se primenjuje kako kod bežičnog tako i kod žičnog prenosa.

Većina OFDM sistema koristi fiksirane modulacione šeme preko svih podnosilaca (konvencionalna OFDM). U zavisnosti od uslova u kanalu, svaki od podnosilaca u višekorisničkom OFDM sistemu može imati drugačije modulacione šeme (svaka koherentna ili diferencijalna, fazna ili amplitudska modulacija se može koristiti u te svrhe). Šeme sa većom spektralnom efikasnošću imaju takođe i veći BER. Zato se bira šema koja zadovoljava odgovarajući BER uz najveću spektralnu efikasnost.

U uslovima višestruke propagacije radio kanalom, frekvencijski selektivni feding može prouzrokovati velike varijacije u primljenoj snazi svakog od podnosilaca. Ovaj selektivni feding, kako i samo ime kaže, deluje na pojedine podnosiocce. Pošto je kod OFDM sistema prenos podeljen u više manjih propusnih opsega, tada frekvencijski selektivni feding poništava signale samo na nekim frekvencijama i signal se lako može rekonstruisati.

P. Okiljević. Autor, Vojnotehnički institut MO RS, Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, Srbija; (telefon: +381 11 2051 407; e-mail: predrag.okiljevic@gmail.com).

N.Nakić. VP6834 Beograd, Srbija; (e-mail: nakichnebojsa@gmail.com).

D.Vučić. Računarski fakultet, Knez Mihajlova 6, 11000 Beograd, Srbija; (e-mail: dvucic@raf.edu.rs).

Za kanale bez direktne putanje, varijacije u primljenoj snazi svakog od podnosilaca mogu biti i do 30 dB, za slične varijacije SNR. Mora se napomenuti da interferencija susednih ćelija može usloviti promene SNR preko propusnog opsega sistema. Kako bismo savladali ove velike varijacije SNR, primenjuju se adekvatne modulacione šeme.

Dakle, osnovna ideja adaptivne modulacije je da BER ostane konstantan menjanjem nivoa predajne snage, količine protoka simbola, veličine konstelacije, kodne šeme, ili bilo koje kombinacije ovih parametara. Stoga, sa odgovarajućim BER, ove šeme omogućavaju veću srednju spektralnu efikasnost, prenoseći podatke većim brzinama u povoljnim uslovima kanala, odnosno smanjujući protok kada su uslovi kanala lošiji.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) sistem se može predstaviti kao proizvoljan bežični komunikacioni sistem čiji su predajni i prijemni podsistemi opremljeni nizom antenskih elemenata. Ideja koja se krije iza koncepta MIMO sistema je da se signal na predajnim i prijemnim antenama „kombinuje“ na poseban način radi smanjenja BER-a ili povećanja brzine prenosa podataka za svakog korisnika MIMO sistema. Kod MIMO sistema kanal se definiše definisanjem podkanala od svake predajne do svake prijemne antene. Ako pretpostavimo da su signali na antenama nekorelisani, geometrija antenskog niza postaje nebitna.

Korišćenje adaptivne modulacije ima nekoliko važnih prednosti u odnosu na konvencionalnu. U sistemima sa konvencionalnom modulacionom šemom, modulacija podnosilaca mora biti usklađena na odgovarajući BER, bez obzira na uslove prenosa (dimenzionišu se za najgori slučaj). Iz tog razloga, većina sistema koristi BPSK ili QPSK modulacione šeme (relativno niskih spektralnih efikasnosti, 1 – 2 b/s/Hz).

Primenjujući adaptivnu modulaciju udaljene stanice mogu koristiti modulacione šeme sa mnogo većom spektralnom efikasnošću kada je kanal dobrih karakteristika. Kada se prenosne stanice približavaju baznoj stanici spektralna efikasnost se može relativno povećati (16QAM, 64QAM, ...), čime se uvećava spektralna efikasnost čitavog sistema.

Upotrebom adaptivne modulacije možemo efektivno kontrolisati BER prenosa iz razloga što podnosioci koji imaju nizak odnos signal/šum (SNR – Signal to Noise Ratio) mogu koristiti robusne modulacione šeme kao što je

BPSK, pre nego da uzrokuju velike greške u prenosu, koje su moguće kod konvencionalnih sistema sa fiksnom modulacionom šemom.

Najznačajnije prednosti koje dobijamo uvođenjem MIMO tehnike su povećan kapacitet kanala, dobitak usled multipleksiranja (Multiplexing Gain) i dobitak usled diverzitija (Diversity Gain) kojeg kreiraju nezavisne grane antena na predaji i prijemu (sa malim stepenom korelacije).

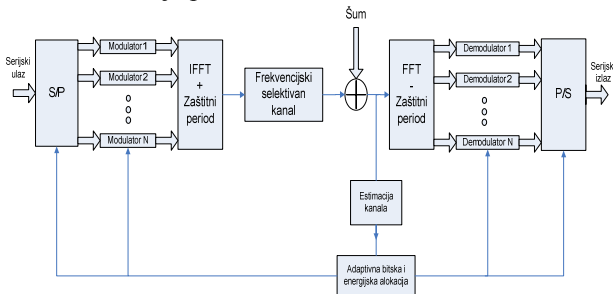
Adaptivna OFDM modulacija nije idealna tehnika i u okviru nje imamo nekoliko ograničenja. Pre svega, postoje dodatne informacije koje se moraju preneti kao što je npr. vrsta modulacije iz razloga što to mora biti poznato prijemniku. Takođe, kako se mobilnost prenosivih stanica povećava, adaptivna modulacija zahteva češće ažuriranje. Ono se uglavnom izvodi dodatnim slanjem pilot sekvenci (šalju se umesto korisnih simbola) što dovodi do smanjenja efektivnog protoka.

Broj modulacionih šema je ograničen distorzijom, pomerajem frekvencije i vrednošću maksimalne dozvoljene snage između korisnika. Intermodulaciono izobličenje (IMD – InterModulation Distorsion) dolazi od bilo koje nelinearne komponente u prenosu i uzrokuje viši nivo interferencije u propusnom opsegu.

## II. PARAMETRI SIMULACIJE

### A. Blok-šema

Simulacija je realizovana pomoću programskog paketa MATLAB a blok-šema simuliranog adaptivnog MIMO-OFDM sistema je prikazana na Sl. 1.



Sl. 1. Blok-šema adaptivnog MIMO-OFDM sistema.

### B. Frekvencijski selektivni kanal

U ovom radu za simulaciju su izabrani osnovni modeli kanala koje karakteriše ravni feding: Rejljev, Rajsov, Nakagami i Vejbulov; svi u prisustvu aditivnog belog Gausovog šuma (AWGN) [1].

Kada ne postoji direktna optička vidljivost između predajnika i prijemnika, najčešće u urbanim sredinama, kao i za troposferske i jonosferske tipove komunikacija koristi se Rejljev stohastički model fedinga. Za njegovo modelovanje korišćena je funkcija gustina verovatnoće (FGV) Rejljevog procesa:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

u kojoj je  $E\{x^2\} = 2\sigma^2$  i  $x \geq 0$ .

Ako između predajnika i prijemnika postoji direktna optička vidljivost (sa dominantnom direktnom komponentom signala – komunikacija u međugradskim,

prigradskim i ruralnim sredinama), koristi se Rajsov stohastički model fedinga. Anvelopa prijemnog signala u ovom slučaju ima Rajsovu FGV:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+v^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right)$$

u kojoj je  $I_0(\cdot)$  modifikovana Beselova funkcija prve vrste nultog reda,  $v^2$  je snaga direktne komponente signala. Rajsov faktor  $K=v^2/(2\sigma^2)$  predstavlja odnos snage direktne i snage Rejljevih komponenti signala. Ako je  $v=0$ , Rajsova FGV prelazi u Rejljevu.

Nakagami ili Nakagami-m model je prvobitno razvijen empirijski, zasnovan na merenjima, kao jedinstven model za opis Rejljevog i Rajsovog fedinga. Nakagami-m slučajni proces je definisan kao anvelopa zbira  $2m$  nezavisnih Gausovih slučajnih procesa i njegova FGV je:

$$p(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{2\sigma^2}\right)^m \cdot x^{2m-1} \cdot e^{-\frac{mx^2}{2\sigma^2}}$$

u kojoj je  $\Gamma(\cdot)$  Gama funkcija, a  $m$  Nakagami feding parametar ( $m \geq 1/2$ ). Za  $m=1$  Nakagami feding je identičan Rejljevom fedingu.

Vejbulov model predstavlja generalizaciju Rejljevog modela i pokazao se efikasnim u urbanim sredinama, pogotovo u slučajevima kada Rejljev model ne daje zadovoljavajuće rezultate. Koristi se za indoor i outdoor okruženja i u radarskim sistemima. FGV anvelope prijemnog signala  $x$  kod Vejbulovog fedinga data je jednačinom:

$$p(x) = \frac{kx^{k-1}}{2\sigma^2} \cdot e^{-\left(\frac{x}{2\sigma^2}\right)^k}$$

u kojoj je  $k$  parametar fedinga. Za  $k=2$  Vejbulova FGV prelazi u Rejljevu.

### C. Adaptivni algoritmi

Prenosne funkcije kanala promenjene su usled prisutnog fedinga u kanalu i njihovom tačnom procenom invertuje se efekat neselektivnog fedinga na svaki od podnosilaca. U ovom radu podrazumeva se da je procena kanala izvršena potpuno i da je, kao takva, poznata i predajniku i prijemniku. Sada, kada predajnik i prijemnik imaju informaciju o stanju kanala na svakom podnosiocu OFDM sistema, moguće je pomoću adaptivnih algoritama proceniti najoptimalniju bitsku i energijsku raspodelu.

Algoritmi za bitsku i energijsku raspodelu su detaljno opisani u literaturi [2]. Oni obezbeđuju optimalnu (ili približno optimalnu) raspodelu bita i energije po podnosiocima, zadržavajući konstantnim ukupan broj bita koji se šalju u OFDM ramu.

Korišćeni algoritmi: *Chow's* (pojedinačna energijska i bitska raspodela); *Campello's* (poboljšanje prethodnog algoritma, radi dobijanja što optimalnije raspodele trenutnim uslovima u kanala) i *Resolve last bit* (jedinstvena optimalna bitska raspodela za poslednji bit).

Estimacija kanala je izvršena rastavljanjem njegove prenosne funkcije ( $H_i$ ) na SVD (Singular Value Decomposition) komponente, koristeći jednakost:

$$H_i = U_i * S_i * V_i^T$$

Gde su :  $H_i$  – prenosna funkcija kanala;  
 $U_i$  i  $V_i$  – sopstvene matrice sistema i  
 $S_i$  – dijagonalna matrica sopstvenih vrednosti.

Ako na predaji koristimo filtar za prekodovanje za matricu  $V_i$ , a na prijemu filtar za oblikovanje za  $U_i$ , kanal će se rastaviti na više paralelnih podkanala. Broj tih podkanala ( $N$ ) će biti jednak broju nenultih sopstvenih vrednosti od  $H_i$ . Matematički aparat za estimaciju parametara kanala njegovim rastavljanjem na  $SVD$  komponente neće biti dodatno opisan zbog njegove složenosti, već se može naći u literaturi [3].

#### D. Sistemski parametri

Korišćeni sistemski parametri dati su u tabeli 1.

TABELA 1: SISTEMSKI PARAMETRI.

Broj podnosilaca	64
Trajanje OFDM simbola	64 simbola
Zaštitni period	16 simbola
Raspoloživi M-QAM ( $M=2^k$ )	$k = 1,2,4,6,8$
Varijansa šuma	$10^3$
Broj <i>Monte Carlo</i> iteracija	80

Modulator koristi QAM modulacionu šemu (6 tipova MQAM) i Grejov kod za detekciju grešaka. Demodulacija je, radi jednostavnosti, izvršena *zero forcing* metodom, (metodom energetske detekcije). Ona se sastoji u poređenju trenutne vrednosti amplitude i faze prijemnog signala sa predefinisanim fiksnim pragovima, nakon čega se donosi odluka o prisljenom simbolu.

Ukupan broj bita po ramu je 128. Za fiksnu OFDM na svakom podnosiocu korišćena je 4QAM; 2QAM je realizovana kao BPSK modulacija; fiksna energijska alokacija realizovana je tako da bude fiksna samo tokom trajanja OFDM simbola, da bi za sledeći simbol uzela neku drugu vrednost (u zavisnosti od trenutnog stanja kanala) i u simulaciji su isključeni “pulse-shaped” i prilagođeni filtri radi njene jednostavnosti.

### III. REZULTATI SIMULACIJE

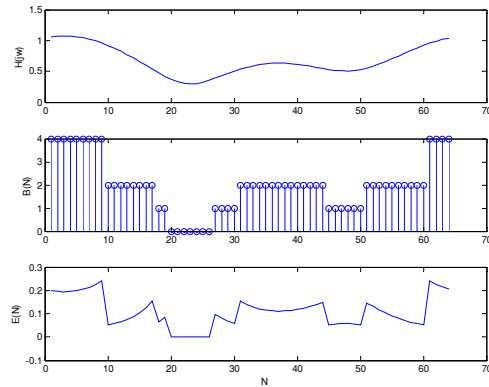
Bitska i energijska raspodela po podnosiocima za adaptivnu OFDM/QAM modulaciju izvršena pomoću adaptivnih algoritama prikazana je na Sl. 2-5.

Kako je kanal vremenski promenljiv, da bi se pokazala efikasnost algoritma u adaptaciji na trenutne uslove kanala prikazane su raspodele bita ( $B(N)$ ) i energije ( $E(N)$ ) u četiri različita trenutka ( $t1$ ,  $t2$ ,  $t3$  i  $t4$ ). Sa Sl. 2-5. se može zaključiti da je algoritam uspeo da isprati promenu uslova u kanalu i približno optimalno izvrši preraspodelu bita i energije po podnosiocima, na koje selektivni frekvencijski feding ima manje uticaja.

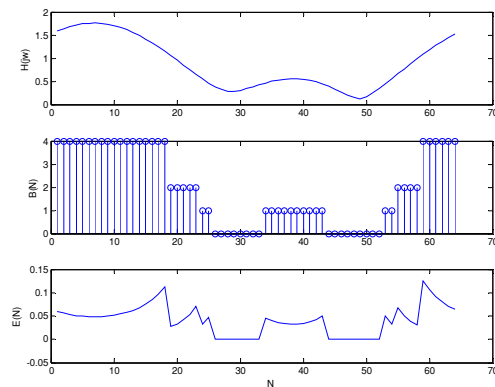
Na Sl. 6-9. pokazan je BER u funkciji odnosa  $E_b/N_o$  (energije po bitu) za adaptivnu, konvencionalnu i MIMO (2x2, 4x4, 8x8) OFDM/QAM modulaciju u različitim tipovima kanala.

Radi poređenja, kroz kanal sa fedingom i AWGN,

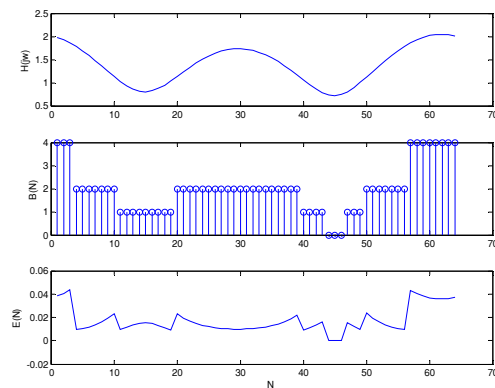
poslato je 11 ramova OFDM signala po 144 bita (128+16).



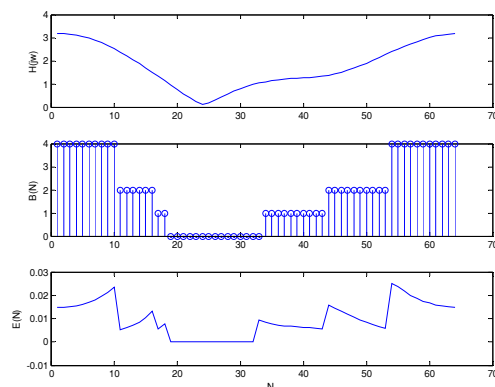
Sl. 2. Adaptivna bitska i energijska raspodela ( $t1$ ).



Sl. 3. Adaptivna bitska i energijska raspodela ( $t2$ ).

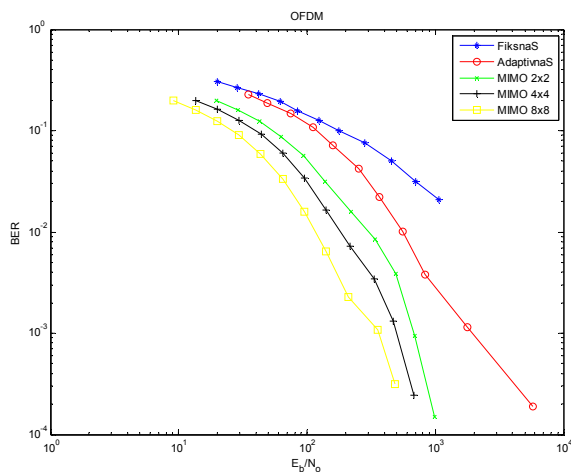


Sl. 4. Adaptivna bitska i energijska raspodela ( $t3$ ).

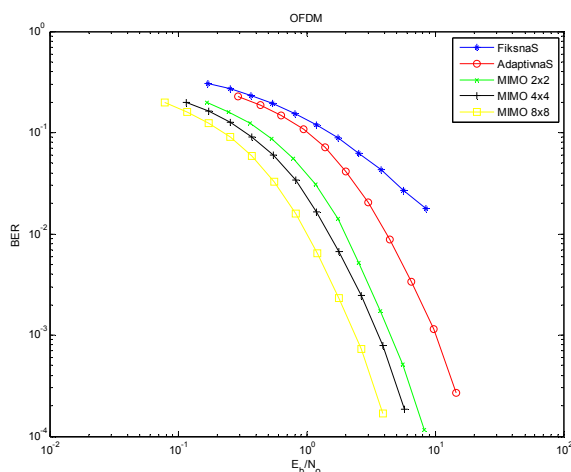


Sl. 5. Adaptivna bitska i energijska raspodela ( $t4$ ). Povećanjem broja ponavljanja i usrednjavanjem

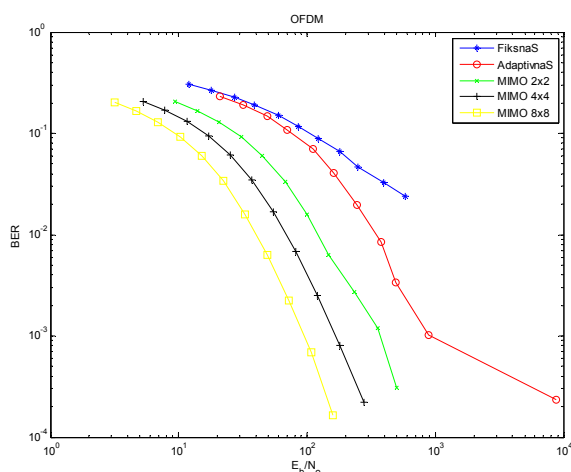
rezultata (više Monte Carlo iteracija) dobile bi se ravnije BER krive od prikazanih.



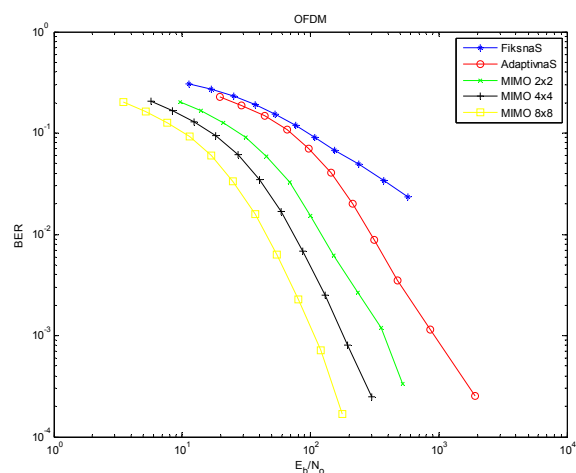
Sl. 6. BER u funkciji  $E_b/N_0$  u kanalu sa Rejljevom fadingom.



Sl. 7. BER u funkciji  $E_b/N_0$  u kanalu sa Rajsovim fadingom ( $\nu=3$ ).



Sl. 8. BER u funkciji  $E_b/N_0$  u kanalu sa Nakagami fadingom ( $m=0.5$ ).



Sl. 9. BER u funkciji  $E_b/N_0$  u kanalu sa Wejbulovim fadingom ( $k=1.5$ ).

Sa prethodnih slika jasno se vidi da za bilo koju vrednost BER adaptivna modulaciona tehnika i algoritmi primenjeni u ovom radu pružaju bolje performanse od konvencionalne u bilo kom tipu kanala. Isto važi i za korišćenje MIMO tehnike (sa adaptivnim algoritmima) i povećanje broja antena na predaji/prijemu.

#### IV. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se primenom adaptivne modulacione i MIMO tehnike povećava spektralna efikasnost sistema i postižu željene vrednosti BER pri manjem odnosu  $E_b/N_0$  nego u slučaju primene konvencionalne OFDM tehnike, na račun povećanja složenosti i slanja dodatnih informacija i pilot sekvenci kroz kanal.

#### LITERATURA

- [1] F. Belloni, "Fading Models", S-88 Signal Processing Laboratory, HUT.
- [2] P. Bansal, A. Brzezinski, "Adaptive Loading In MIMO/OFDM Systems", Stanford, Dec. 2001.
- [3] G. Lebrun, J. Gao, M. Faulkner "MIMO Transmission over a time-varying channel using SVD", *IEEE Trans. On Wireless Communication*, Vol. 4, No. 2, pp. 757-764, Mar. 2005.

#### ABSTRACT

The primary goal of this paper is to show the various possibilities of transfer improvement in systems with adaptive and MIMO OFDM modulation, i.e. with adaptation of subcarriers (modulation patterns and energy) on channel fading, relating to the systems in which the conventional OFDM modulation is used. Simulated channels are with Rice, Rayleigh, Nakagami and Weibull fading all affected by additive white Gaussian noise (ABGN).

### IMPROVEMENTS OF TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON ADAPTIVE OFDM MODULATION

Predrag Okiljevic, Nebojsa Nakic and Desimir Vucic