

# Inovirano rešenje Soft-DFE ekvalizatora sa dekorelatorom čiji koeficijenti „cure“

Vladimir R. Krstić, *Member, IEEE*, Miroslav L. Dukić, *Member, IEEE*

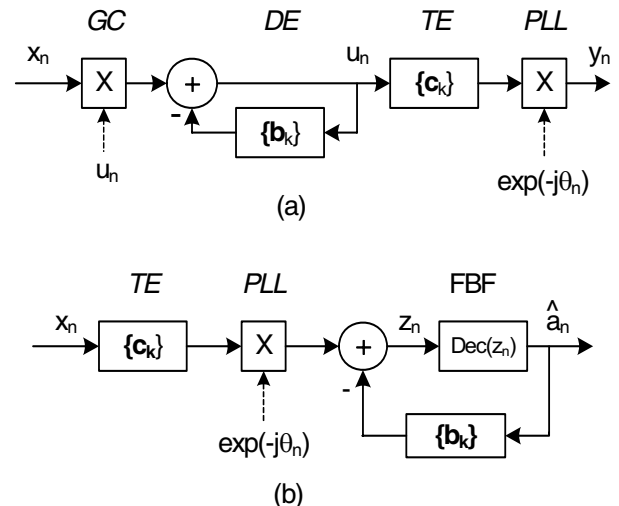
**Sadržaj** — U ovom radu predložen je modifikovan algoritam entropijskog tipa za dekorelaciju prijemnog signala u okviru decision feedback ekvalizatora (DFE) sa treningom „na slepo“. Novi algoritam vrši sistematsku kontrolu rasta modula koeficijenata *all-pole* rekurzivnog dekorelatora i na taj način obezbeđuje lokalnu stabilnost dekorelatora, a time i kompletnog ekvalizatora čija se adaptacija ostvaruje kroz tri faze. Robusnost predloženog dekorelatora čiji koeficijenti „cure“ proverena je simulacijom sistema sa 64-QAM signalom i frekvencijski selektivnim kanalima.

**Gljučne reči** — Adaptivna ekvalizacija na slepo, Soft-DFE ekvalizator, kriterijum maksimalne združene entropije.

## I. UVOD

OVAJ rad prikazuje najnovije rezultate istraživanja adaptivne ekvalizacije „na slepo“ linearnih vremenski-invarijantnih kanala sa veoma izraženom intersimbolskom interferencijom (ISI) korišćenjem *self-optimized decision feedback* (SO-DFE) šeme [1]-[4]. Kao što je poznato, ključni problem ekvalizacije na slepo pomoću DFE šeme sa klasičnom strukturom koja se sastoji od linearnog *feedforward* (FFF) i nelinearnog *feedback* (FBF) dela, je pojava efekta propagacije grešaka na samom početku procesa adaptacije ekvalizatora. Jedna od metoda za rešavanje ili ublažavanje ovog problema je primena SO-DFE šeme [4] koja adaptira i strukturu i kriterijum optimizacije u zavisnosti od uslova propagacije signala. Na slici 1 je ilustrovan princip funkcionisanja izvorne SO-DFE šeme sa dva režima rada: u fazi akvizicije prijemnog signala SO-DFE se transformiše u linearan ekvalizator koji se sastoji od kaskade nezavisnih adaptivnih transformatora signala (*blind* režim), a onda, kada uslovi za propagaciju grešaka nestanu, transformiše nazad u DFE sa klasičnom strukturom i kriterijumom optimizacije koji forsira minimalnu srednju kvadratnu grešku (MMSE) u *decision-directed* (DD) maniru (režim praćenja).

U [1]-[3] je pokazano da je „najslabija karika“ izvorne SO-DFE šeme [4] dekorelator DE pod kontrolom *extended least mean square* (ELMS) algoritma [5]. Naime, DE sa ELMS algoritmom nema sposobnost da kompenzira duboke nule u spektru prijemnog signala tako da se ovaj



Slika 1. Princip transformacije SO-DFE šeme: (a) linearan ekvalizator kao kaskada kola za automatsku regulaciju pojačanja (GC), dekorelatora (DE), transverzalnog ekvalizatora (TE) i kola za estimaciju faze nosioca (PLL) i (b) DFE ekvalizator kao kombinacija linearnog (TE + PLL) i nelinearnog (FBF) ekvalizatora.

nedostatak lančano prenosi kroz ostala kola u kaskadi i na taj način degradira efektivne performanse kompletnog ekvalizatora. Zbog toga je MMSE FBF ekvalizator sa „tvrđim“ detektorom simbola zamenjen sa „mekim“ FBF (SFBF) ekvalizatorom [6], [7]. Konkretno, SFBF je zasnovan na neuronu Bell-Sejnowski tipa [6] koji maksimizira združenu entropiju izlaza (*joint entropy maximization criterion* – JEM kriterijum). U okviru inovirane SO-DFE šeme, koja je označena kao Soft-DFE, SFBF funkcioniše tako što u blind režimu deluje kao dekorelator (filter za „beljenje“) prijemnog signala sa JEM-W algoritmom, a onda, posle transformacije strukture, kao nelinearan SFBF ekvalizator sa JEM-DD algoritam. U tabeli 1 je dat sumarni prikaz adaptacije strukture i algoritama Soft-DFE šeme kroz tri režima rada.

Soft-DFE, koji je u [1]-[3] razvijen za sistem prenosa sa 16-QAM odnosno 32-QAM, u ovom radu je razmatran u kontekstu 64-QAM sistema sa ciljem da se u ambijentu signala sa kompleksnijom konstalacijom poboljšaju performanse JEM-W i JEM-DD algoritama. Naime, brojni rezultati simulacija za sva tri slučaja (16-, 32-, 64-QAM) su pokazali da moduli koeficijenata dekorelatora DE sa JEM-W rastu u skladu sa entropijskom prirodom ovog algoritma tako da kompenziraju duboke nule u spektru prijemnog signala. Međutim, ovako dobijene vrednosti

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije: projekat broj TR 11040 i TR 11002.

V.R. Krstić, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (telefon: 381-11-2775460; email: vladak@kondor.imp.bg.ac.rs).

M.L. Dukić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (tel. 381-11-3370106, e-mail: dukic@etf.rs).

TABELA 1: SOFT-DFE ADAPTACIJA KROZ TRI REŽIMA RADA.

Struktura	Algoritam
<b>1. Blind režim</b>	
DE je realizovan kao <i>all-pole</i> rekurzivan filter	JEM algoritam za »beljenje« - JEM-W
TE je realizivan kao frakcioni ekvalizator – FSE	Algoritam sa konstantnim modulom [9]
<b>2. Mek prelazni režim</b>	
TE kao FSE	LMS-DD
FBF kao SFBF	JEM-DD
<b>3. Režim praćenja</b>	
Soft-DFE je klasičan DFE	MMSE-DFE, LMS-DD

modula koeficijenata u blind režimu u slučaju 64-QAM signala postaju neprihvatljivo velike u trenutku transformacije DE u SFBF. Ova neadekvatna podešenost (*setup*) koeficijenata rekurzivnog dela Soft-DFE u trenutku transformacije njegove strukture dovodi do usporavanja konvergencije ekvalizatora, a moguća je i pojava efekta propagacije grešaka koja se završava ispadom ekvalizatora. Kao efikasan metod za kontrolu rasta modula koeficijenata dekorelatora u ovom radu je predložena modifikovana varijanta JEM-W algoritma kod koje je po ugledu na *tap-leakage* varijantu LMS algoritma [8] dodat član koji obezbeđuje sistematsko smanjivanje (curenje) modula koeficijenata dekorelatora.

U sekciji II je dat sumarni prikaz prethodnih rezultata optimizacije statističkih parametara JEM-W i JEM-DD algoritama za 16-QAM i 32-QAM signale. U sekciji III je analiziran efekat rasta modula koeficijenata dekorelatora i način rešavanja ovog problema pomoću modifikovanog JEM-W algoritma sa curenjem koeficijenata. U sekciji IV su prikazani rezultati uporednog testa performansi Soft-DFE rešenja za dve varijante algoritma za dekorelaciju prijemnog signala.

## II. PRETHODNI REZULTATI

Kao što je već istaknuto, Soft-DFE rešenje karakteriše primena mekog SFBF ekvalizatora koji maksimizira entropiju izlaza u blind i mekom prelaznom režimu. U blind režimu SFBF se transformiše u *all-pole* rekurzivan filter definisan koeficijentima  $\{b_j\}$  koji u maniru adaptivnog prediktora vrši dekorelaciju prijemnog signala pod kontrolom JEM-W algoritma. Zatim, kad MSE dostigne unapred definisanu vrednost, tj. prag, SFBF se transformiše nazad u nelinearan SFBF ekvalizator koji nastavlja adaptaciju koeficijenata  $\{b_j\}$  pod kontrolom JEM-DD algoritma. U formalnom smislu optimizacija SFBF je opisana sledećim relacijama:

(a) Relacija  $J_{EM}(\mathbf{b}_n) = E\{\ln|\partial r_n / \partial z_n|\}$  definiše JEM kriterijum optimizacije SFBF ekvalizatora [7];  $J_{EM}(\mathbf{b}_n)$

je realna funkcija kompleksnih koeficijenata definisanih vektorom  $\mathbf{b}_n = [b_{1,n}, \dots, b_{N,n}]^T$ .

(b) Sekvenca slučajno promenljivih na izlazu SFBF je definisana sa  $r_n = g(z_n)$  gde je  $g(z) = z(1 + \beta|z|^2)$  kontinualno diferencijabilna kompleksna funkcija mapiranja i  $\beta$  je pozitivna konstanta koja definiše oblik (nagib) površine mapiranja; funkcija raspodele gustine verovatnoće sekvence  $z_n$  na ulazu u SFBF je nepoznata.

(c)  $b_{j,n+1} = b_{j,n} - \mu z_n (1 - \beta|z_n|^2) r_{n-j}^*$ ,  $j = 1, \dots, N$ , je osnovni algoritam JEM tipa za SFBF ekvalizator na osnovu koga su izvedeni JEM-W i JEM-DD algoritmi [1] koji su dati sa

$$b_{j,n+1} = b_{j,n} - \mu_W u_n (1 - \beta_W |u_n|^2) u_{n-j}^* \quad (1)$$

$$b_{j,n+1} = b_{j,n} - \mu_D z_n (1 - \beta_D |z_n|^2) \hat{a}_{n-j}^* \quad (2)$$

respektivno, gde su  $\mu_W$  i  $\mu_D$  koraci adaptacije,  $\beta_W$  i  $\beta_D$  su odgovarajuće statističke konstante i  $*$  označava konjugovano-kompleksnu transformaciju.

Najznačajniji rezultati analize uticaja statističkih parametara  $\beta = \{\beta_W, \beta_D\}$  na performanse algoritama JEM-W i JEM-DD mogu se sumirati na sledeći način:

(a) Pravilnim izborom ovih parametara mogu se optimizirati performanse JEM algoritama, tj. SFBF ekvalizatora u blind i mekom prelaznom režimu.

(b) Optimalne vrednosti ovih parametara ne zavise od primenjenog kanala već dominantno od statističkih karakteristika signala na predaji.

Kao mera uticaja parametra  $\beta_W$  na performanse dekorelatora razmatran je kurtosis signala na izlazu transverzalnog ekvalizatora TE, dok je kao mera uticaja parametra  $\beta_D$  razmatrana učestanost pogrešno detektovanih simbola na izlazu Soft-DFE u mekom prelaznom režimu. Metodom simulacija dobijene su optimalne vrednosti parametara  $\beta = \{\beta_W, \beta_D\}$  koje u statističkom smislu reprezentuju momente drugog i višeg reda signala primenjenog na predaji [2], [3]; za 16- i 32-QAM signale dobijene su sledeće vrednosti parametara  $\beta_{W,16,32} = 1.0$ ,  $\beta_{D,16} = 12.0$  i  $\beta_{D,32} = 10.0$ .

## III. JEM-LK ALGORITAM SA CURENJE KOFICIJENATA

Razmotrimo ukratko *tap-leakage* LMS (LMS-LK) algoritam [8] koji je izveden sa ciljem da se obezbedi stabilnost adaptacije digitalno implementiranih FSE ekvalizatora primenom aritmetike sa fiksnim zarezom. Za transverzalan FSE konačne dužine koji je definisan vektorom koeficijenata  $\mathbf{c}_n$  LMS-LK je opisan rekurzivnom relacijom

$$\mathbf{c}_{n+1} = \mathbf{c}_n - \gamma \mu_L \mathbf{c}_n - \mu_L e_n \mathbf{x}_n^* \quad (3)$$

gde je  $e_n = y_n - \hat{a}_n$  je tekuća greška izlaza,  $\gamma$  je mala pozitivna konstanta i  $\mu_L$  je korak adaptacije. U odnosu na konvencionalan LMS algoritam LMS-LK se razlikuje za član  $\gamma \mathbf{c}_n$  čiji je zadatak da u svakoj iteraciji smanji

vrednosti koeficijenata i na taj način ostvari sistematsku kontrolu stabilnosti ekvalizatora. Član  $\gamma c_n$  u relaciji (3) je rezultat stohastičko-gradijentne optimizacije MMSE FSE ekvalizatora kada se na njegov ulaz primeni veštački aditivni šum čija je srednja vrednost jednaka nuli i koji je statistički nezavistan u odnosu na koristan signal.

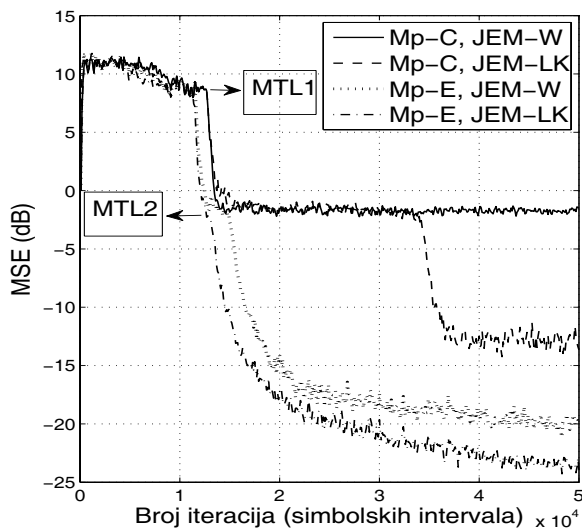
Ako koncept dodavanja veštačkog šuma na ulaz MMSE FSE proširimo na nelinearan SFBF ekvalizator onda kriterijumsku funkciju  $J_{EM}(\mathbf{b}_n)$  možemo modifikovati tako da obezbedimo eksplicitnu kontrolu modula koeficijenata  $\{b_j\}$ . U tom smislu, za isti model veštačkog šuma kao u slučaju LMS-LK, definisan je modifikovan JEM kriterijum dat sa

$$J'_{EM} = \gamma \sum_{j=0}^{N-1} |b_j|^2 + J_{EM}. \quad (4)$$

Konsekventno, odgovarajuća modifikovana varijanta stohastičko gradijentnog algoritma JEM-W sa curenjem modula koeficijenata (JEM-LK) data je sa

$$b_{j,n+1} = b_{j,n}(1-\gamma) - \mu_W u_n (1 - \beta_W |u_n|^2) u_{n-j}^* \quad (5)$$

gde je  $\gamma$  faktor curenja.



Slika 2. Konvergencija Soft-DFE za dva varijante dekorelatora u ambijentu 64-QAM sistema sa kanalima Mp-(C,E) i SNR=30 dB.

U tekstu koji sledi analizirani su efekti primene JEM-LK algoritma. Na slici 2 je prikazana konvergencija MSE Soft-DFE ekvalizatora za dva varijante dekorelatora DE reda  $N=5$ :  $\{DE, JEM-W\}$  i  $\{DE, JEM-LK\}$ ; opis parametara ekvalizatora i uslovi simulacije dati su u sekciji IV. Na prikazanoj slici se mogu jasno uočiti tri faze (režima) konvergencije ekvalizatora koje su odvojene pragovima  $MTL1=6.2$  (7.9 dB) (prag prelaza iz blind u mek prelazni režim) i  $MTL2=0.6$  (-2.2 dB) (prag prelaza iz mekog u režim praćenja). U toku trajanja blind i mekog prelaznog režima (do trenutka kada vrednost MSE postaje jednaka sa  $MTL2$ ) krive konvergencije Soft-DFE sa  $\{DE, JEM-W\}$  odnosno sa  $\{DE, JEM-LK\}$  za kanal Mp-E se praktično poklapaju, međutim, u fazi kada se ekvalizator transformiše u MMSE-DFE, tj. kada pređe u režim

praćenja, ove krive snažno divergiraju. Ova situacija je posebno drastična u slučaju kanala Mp-C s obzirom da Soft-DFE sa  $\{DE, JEM-W\}$  posle transformacije strukture prestaje da konvergira; ovo stanje je u tekstu označeno kao ispad ekvalizatora ili neuspešna aktivacija ekvalizatora.

Opisano ponašanje Soft-DFE sa JEM-W algoritmom jasno ukazuje da vektor koeficijenata dekorelatora na kraju blind režima nije onaj vektor koji SFBF očekuje u režimu praćenja u duhu osnovne ideje self-optimized ekvalizacije koja je elaborirana u [4]. S druge strane, kada se primeni JEM-LK algoritam imamo situaciju da je vektor koeficijenata dekorelatora podešen tako da obezbeđuje mek prelaz ekvalizatora iz blind režima u režim praćenja; ostvaren dobitak u smislu brže konvergencije i manje rezidualne greške u stacionarnom režimu je očigledan.

TABELA 2: MODULI KOEFICIJENATA DEKORELATORA ZA MP-E.

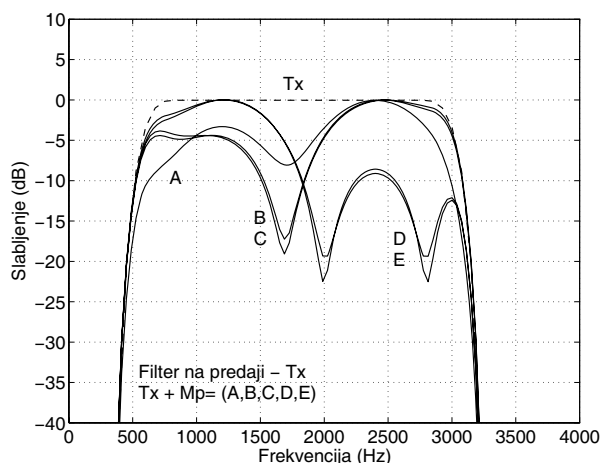
CJEM-	B1	B2	B3	B4	B5
W:setup 1	0.808	0.699	0.108	0.100	0.059
W:setup 2	0.738	0.645	0.143	0.107	0.097
LK:setup 1	0.615	0.422	0.197	0.054	0.051
LK:setup 2	0.547	0.352	0.244	0.079	0.101

Da bi dobili bolji uvid u stanje vektora  $\mathbf{b}_n$  tokom njegove konvergencije u tabeli 2 su date vrednosti modula koeficijenata u trenutku kada MSE dostigne prag  $MTL1$  (setup 1), odnosno u stacionarnom stanju na kraju adaptacije ekvalizatora koja traje 50000 simbolskih (T) intervala (setup 2). Dobijene vrednosti modula koeficijenata za dva rešenja DE pokazuju da su ove vrednosti za prva dva (dominantna) koeficijenta izrazito veće u slučaju  $\{DE, JEM-W\}$ . Takođe, može se uočiti da se neadekvatan setup dekorelatora ostvaren sa JEM-W ne može bitno popraviti u režimu praćenja (vidi primer Mp-E JEM-W na slici 2). S druge strane, u slučaju  $\{DE, JEM-LK\}$  imamo situaciju da JEM-LK algoritam sistematski smanjuje module koeficijenata dekorelatora i da onda ovako ostvaren setup obezbeđuje mek prelaz ekvalizatora iz blind u režim praćenja. Dodatnom analizom polova DE na kraju blind režima i u odsustvu šuma utvrđeno je da su polovi ovog all-pole rekurzivnog filtra bliži jediničnom krugu u  $z$  ravni kada se primeni JEM-W. Drugim rečima, ovakvo stanje polova dekorelatora na kraju blind režima ukazuje da se primenom JEM-LK algoritma povećava lokalna stabilnost dekorelatora, a onda i stabilnost kompletnog ekvalizatora. Konačno, treba istaći da se željeni efekti curenja modula koeficijenata mogu postići pravilnim izborom faktora  $\gamma$  u (5) uz zanemarljivo malu degradaciju minimalne MSE ekvalizatora.

#### IV. PEFORMANSE INOVIRANOG SOFT-DFE

U ovom delu su prikazane performanse Soft-DFE ekvalizatora date u formi uspešnosti njegove aktivacije u sistemu sa 64-QAM signalom koji karakteriše veoma oštra frekvencijska selektivnost kanala. Posebno je razmatrana efikasnost DE sa dve varijante algoritma: 1)  $\{DE, JEM-W\}$  i 2)  $\{DE, JEM-LK\}$ . Simulacije su izvršene za

pragove promene režima rada  $MTL1=7.9$  dB i  $MTL2=-2.2$  dB i kanale sa odnosom signal šum  $SNR=30$  dB. Model kanala sa tri snopa je integrisan u filter na predaji; slika 3 prikazuje slabljenje filter-kanal kombinacija Mp-(A,B,C,D,E) za različite parametre propagacije koji su selektovani tako da se ostvari postepeno povećavanje nivoa ISI. Dužine TE i FBF delova ekvalizatora su  $M=25$  i  $N=5$ , respektivno. Inicijalna vrednost vektora koeficijenata TE, koji je realizovan kao T/2-FSE, ima sve komponente jednake nuli osim centralnih koje iznose  $c_{1,r} = c_{2,r} = 1$ . Inicijalne vrednosti koeficijenata dekorelatora su jednake nuli, dok je vrednost faktora curenja  $\gamma = 2^{-12}$ . Vrednost statističke konstante  $\beta = \{\beta_W, \beta_D\}$  za 64-QAM određena je na sličan način kao u slučaju 16-QAM i 32-QAM i iznosi  $\beta = \{1.0, 2.0\}$ . Detaljan opis funkcionisanja Soft-DFE ekvalizatora i njegovih parametara zaintereson čitalac može naći u [3].



Slika 3. Karakteristike slabljenja Mp-(A,B,C,D,E) kanala.

Tabela 3: USPEŠNOST AKTIVACIJE Soft-DFE, [%].

Kanal Mp	A	B	C	D	E
Sa CJEM-W	99.9	96.9	74.8	83.0	66.6
Sa CJEM-LK	99.9	99.6	98.6	99.9	99.4

U tabeli 3 su prikazani rezultati uspešnosti aktivacije Soft-DFE koji su dobijeni na osnovu 1000 nezavisnih prolaza trajanja 50000 simbolskih intervala pri čemu je faza signala na predaji generisana kao slučajno promenljiva u opsegu od 0 do  $2\pi$ . Očigledno, uspešnost aktivacije u slučaju kanala Mp-A, koji karakteriše umerena ISI, jednaka je za obe varijante dekorelatora. S druge strane, kod Mp-(B,C,D,E) kanala uspešnost aktivacije u slučaju {DE, JEM-LK} je veća u odnosu na {DE, JEM-W}. Superiornost dekorelacije sa CJEM-LK u odnosu na dekorelaciju sa CJEM-W posebno je izražena kod Mp-(C,E) kanala koji su selektovani kao kanali sa ekstremnim vrednostima ISI. Takođe, treba zapaziti da uspešnost aktivacije Soft-DFE rešenja sa dekorelatorom {DE, JEM-LK} veoma malo varira u ambijentu selektovane klase kanala sa višestrukom propagacijom.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan deo rezultata istaživanja DFE ekvalizacije na slepo pomoću Soft-DFE šeme u sistemu sa 64-QAM signalom i frekvencijski selektivnim kanalima. Za ovaj sistem posebno je razmatran inoviran algoritam za dekorelaciju prijemnog signala. Primenjen je algoritam sa curenjem modula koeficijenata koji obezbeđuje sistematsku kontrolu stabilnosti dekorelatora u uslovima veoma izražene ISI, a onda i pouzdanu tranziciju ekvalizatora iz blind režima u režim praćenja. Robusnost modifikovanog rešenja dekorelatora odnosno kompletnog Soft-DFE verifikovana je velikim brojem simulacija koje su potvrdile da se dodavanjem jednostavnog člana za „curenje“ u originalni algoritam za dekorelaciju značajno poboljšavaju performanse ekvalizacije date u formi karakteristika konvergencije i uspešnosti aktivacije.

## REFERENCE

- [1] V. R. Krstić and Z. Petrović, "Complex-Valued Maximum Joint Entropy Algorithm for Blind Decision Feedback Equalizer", In *Proc. 8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (IEEE-TELSIKS 2007)*, Serbia, pp. 601-604, 2007.
- [2] V. R. Krstić and M. L. Dukić, "Blind DFE With Maximum-Entropy Feedback," *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 16, pp.26-29, Jan., 2009.
- [3] V. R. Krstić, Doktorska disertacija, "Adaptivna ekvalizacija telekomunikacionih kanala zasnovana na statističkim karakteristikama kanala", Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Jul 2009.
- [4] J. Labat, O. Macchi and C. Laot, "Adaptive Decision Feedback Equalization: Can You Skip the Training Period?," *IEEE Trans. Commun.* vol. 46, pp. 921-930, July, 1998.
- [5] O. Macchi, *Adaptive processing: the least mean squares approach with applications in transmissin*, John Wiley & Sons Ltd., 1995.
- [6] A. J. Bell and T. J. Sajnowski, "An information-maximisation approach to blind separation and blind deconvolution," *Neural Computation*, vol.7, pp.1129-1159, 1995.
- [7] Y. Kim and H. S. Shamsunder, "Adaptive Algorithms for Channel Equalization with Soft Decision Feedback," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 16, pp. 1660-1669, Dec., 1998.
- [8] R. D. Gitlin, H. C. Meadors and S. W. Weinstein, "The Tap-Leakage Algorithm: An Improved Digital Transversal Filter," *B.S.T.J.*, Vol. 60, pp. 1817-39, October 1982.
- [9] D. N. Godard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems," *IEEE Trans. Commun.* vol. COM-28, pp. 1867-1875, Nov., 1980.

## ABSTRACT

In this paper, a tap-leakage variant of the entropy-based decorrelation algorithm for the blind Soft-DFE equalization is proposed. This stochastic gradient algorithm systematically decreases the coefficient modules of the all-pole recursive decorrelator and in this way provides a local stability, and than also stability of the whole equalizer during three phase adaptation process. The robustness of the proposed algorithm is evaluated by simulations using the 64-QAM system with severe frequency selective channels.

## Improved Soft-DFE equalizer with tap-leakage decorrelator

Vladimir R. Krstić and Miroslav L. Dukić