

OPTIMIZACIJA MEKE PETLJE ZA BLIND EKVALIZATOR SA POVRATNOM SPREGOM

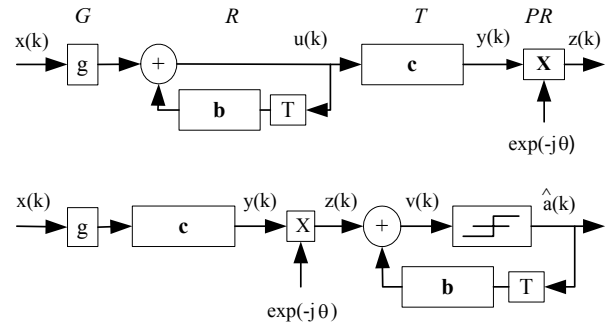
Vladimir R. Krstić, *Institut »Mihajlo Pupin« u Beogradu*
 Zoran Petrović, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj – Predmet ovog rada je nova meka petlja za »blind« ekvalizator sa povratnom spregom (decision feedback equalizer-DFE) zasnovana na kriterijumu maksimalne entropije izlazne sekvence (Joint Entropy Maximization-JEM). Optimizacija parametara petlje, preko kojih se mogu varirati performanse stohastičko gradijentnih algoritama JEM tipa, izvršena je primenom kurtosis metoda predloženog u ovom radu. Rezultati Monte Karlo simulacija su pokazali da se pravilnim izborom »smoothing« parametara JEM algoritama mogu ubrzati početna konvergencija ekvalizatora i ublažiti efekti propagacije grešaka kod kanala sa veoma velikim linearnim izobličenjima.

1. UVOD

Predmet ovog rada je DFE ekvalizator čija se aktivacija ostvaruje u takozvanom »blind« ili »unsupervised« režimu na osnovu poznatih statističkih karakteristika signala na predaji. S obzirom da ne postoji poznata trening sekvenca koja omogućava pouzdanu i robusnu početnu konvergenciju, kao što je to slučaj kod konvencionalnih ekvalizatora, osnovni nedostatak DFE blind rešenja je pojava efekata propagacije grešaka [1]. Ovaj fenomen je posebno izražen kod kanala sa vrlo velikim izobličenjima gde se javlja enormni broj grešaka na startu ekvalizacije. Jedan od načina da se ovaj nedostatak izbegne ili ublaži je da se aktivacija ostvari u režimu linearne ekvalizacije, primenom nekog od opšte prihvaćenih blind algoritama, a da se zatim proces adaptacije nastavi sa DFE strukturom na osnovu detektovanih simbola (decision directed mode - D.D) [2]. Ovakav pristup omogućava da se i dalje koriste jednostavni algoritmi i tehnike blind ekvalizacije, koji su originalno razvijeni za linearne FIR filtre, kao i da se sačuvaju dobro poznate prednosti DFE u odnosu na linearnu ekvalizaciju [1].

Na slici 1 je prikazana blok šema DFE rešenja sa promenljivom strukturom. Na startu, u početnoj fazi ekvalizacije, komponente DFE formiraju kaskadu međusobno nezavisnih linearnih transformatora **G-R-T-PR**, koja u celini predstavlja linearni ekvalizator sa forsiranjem nula (zero forcing - ZF). Kada srednja kvadratna greška (MSE) izlaza dostigne unapred postavljen prag $MSE = MSE_{TL-1}$, kaskada se rekonfiguriše u poznatu DFE strukturu tako što koeficijenti rekurzivne grane dekorelatora **R** postaju koeficijenti povratne sprege DFE [2]. Ključna pretpostavka ovog rešenja je da podešenost koeficijenata rekurzivne grane, ostvarena u blind režimu, obezbeđuje željenu podešenost povratne sprege DFE koja treba da garantuje dalji tok estimacije kanala bez pojave efekata propagacije grešaka. Ovaj cilj se može ostvariti ako dekorelator **R** (all-pole whitening filter -WF) izvrši ekvalizaciju amplitudske karakteristike kanala a ekvalizaciju faznih izobličenja, koja unose kanal i WF zajedno, preuzme linearni blind ekvalizator **T** (Godard/ Constant Modulus Algorithm -CMA) [3].



Sl.1. Blok šema blind DFE sa promenljivom strukturom
 a) dekomponovan DFE: **G**-kolo za automatsku regulaciju pojačanja, **R**-dekorelator, **T**-blind ekvalizator, **PR**-kolo za estimaciju faza nosioca, b) konvencionalan DFE (dole)

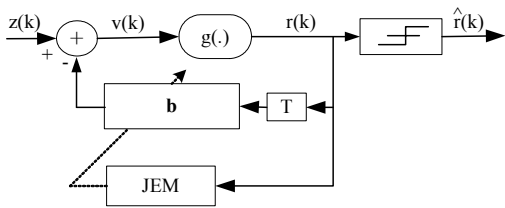
Rešenje Soft DFE, prezentirano u radu [4], predstavlja inovaciju odgovarajućeg Hard DFE blind ekvalizatora predloženog u [2], kod koga su postojeći dekorelator **R** i konvencionalna petlja sa tvrdim odlučivačem (hard decision – HD) zamenjeni novim, mekim petljama, čija je optimizacija zasnovana na JEM kriterijumu [5]. Cilj izvršenih modifikacija je bio da se ostvari brža i robusnija aktivacija, kao i mekši prelaz iz blind u D.D režim rada u trenutku promene strukture. Naime, testiranja Hard DFE rešenja pomoću softverskog simulatora su pokazala da postojeći dekorelator, koji minimizira varijansu izlaza, ne ostvaruje očekivane performanse što ima za posledicu da izlaz CMA ne dostigne uvek prag promene strukture MSE_{TL-1} , tj., pokušaj aktivacije ekvalizatora je neuspešan.

2. PROBLEM OPTIMIZACIJE MEKE PETLJE

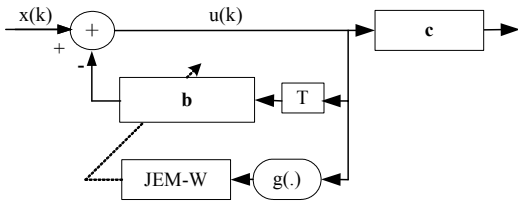
Osnovni model meke petlje je prikazan na slici 2a gde je klasično HD kolo zamenjeno odlučivačem koji je realizovan primenom monotone nelinearne funkcije bez memorije $g(\cdot)$. Optimizacija vektora koeficijenata petlje $\mathbf{b} = (b_1 b_2 b_3 \dots b_N)$ ostvarena je na osnovu pretpostavke da maksimiranje združene entropije sekvence na izlazu smanjuje međusobnu zavisnost simbola što rezultira poništavanjem intersimbolske interferencije. Na osnovu ovako definisanog kriterijuma optimizacije petlje, kod koje je primenjen meki odlučivač $g(v(k)) = \alpha \tanh(\beta v(k))$, Y.Kim i S.Shamsunder [5] su izveli osnovni stohastičko gradijentni algoritam JEM-1 za blind optimizaciju meke petlje za slučaj realne ulazne sekvence

$$b_i(k+1) = b_i(k) - \mu r(k) r(k-i) \quad (1)$$

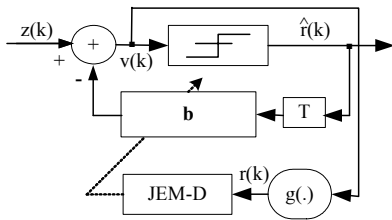
gde je μ korak adaptacije, $i = 1 \dots N$.



Sl.2a. Osnovni model meke DFE petlje



Sl.2b. Dekorelator sa mekom petljom



Sl.2c. Meka DFE petlja

S obzirom da je realizacija JEM-1 algoritma na osnovu direktne primene relacije (1) kompleksna potrebno je izvršiti određene aproksimacije pomoću kojih se dobijaju varijantna rešenja meke petlje čija se optimizacija ostvaruje pomoću jednostavnih stohastičko gradijentnih algoritama JEM tipa. Tako na primer, ako se funkcija tangens hiperbolički razvije u Tejlorov red

$$r(k) = \alpha \cdot \tanh[\beta \cdot v(k)] = \alpha\beta v(k) - \frac{\alpha\beta}{3} v^3(k) + \dots \quad (2)$$

i član $r(k)r(k-i)$ u (1) zameni sa

$$r(k)r(k-i) \approx \left[\alpha\beta v(k) - \frac{\alpha\beta}{3} v^3(k) \right] \cdot \alpha\beta v(k-i) \quad (3)$$

dobija se novi algoritam JEM-W,

$$b_i(k+1) = b_i(k) - \mu_w v(k) \cdot [1 - \beta_1 v^2(k)] \cdot v(k-i) \quad (4)$$

gde je $\mu_w = \mu\alpha^2\beta^2$ korak adaptacije, i $\beta_1 = \beta^2/3$ je »smoothing« parametar JEM-W petlje. Dobijen algoritam primenjen na signal $u(k)$ odgovara mekoj petlji na slici 2b koja predstavlja novi dekokrelator R (WF filter).

Drugo rešenje meke petlje je izvedeno tako što je gornja aproksimacija primenjena samo na izlaz $r(k)$ a na ulaz povratne sprege se i dalje dovodi izlaz konvencionalnog HD odlučivača. Rezultat ove aproksimacije je JEM-D algoritam

$$b_i(k+1) = b_i(k) - \mu_D v(k) \cdot [1 - \beta_2 v^2(k)] \cdot \hat{r}(k-i) \quad (5)$$

gde je $\mu_D = \mu\alpha\beta$ korak adaptacije, i $\beta_2 = \beta^2/3$ je »smoothing« parametar JEM-D petlje. Aproksimacija izvršena na ovaj način modifikuje konvencionalnu HD petlju u meku DFE petlju prikazanu na slici 2c. HD kolo, koje je u ovom slučaju vraćeno u petlju, ne predstavlja više kritičnu komponentu kao u slučaju konvencionalnog DFE ekvalizatora zahvaljujući scenariju primenjenom kod Soft DFE. Naime, JEM-D petlja se aktivira posle uspešno ostvarene blind ekvalizacije pomoću $G-R-T$ kaskade, tj., u trenutku kada se više ne očekuje pojava enormnog broja grešaka detekcije. Funkcionisanje JEM-D petlje je ograničeno na prelazni režim koji se dešava između blind i D.D režima.

Kao što se vidi na osnovu (4) i (5) karakteristike algoritama JEM-W odnosno JEM-D mogu se varirati promenom konstanti α i β koje određuju zakrivljenost primenjene nelinearnosti $g(\cdot)$. S obzirom da konstanta α utiče samo na korake adaptacije ona se može isključiti iz daljeg razmatranja, tj., može se uzeti da je $\alpha=1$. S druge strane, parametri β_1 i β_2 direktno utiču na formiranje gradijenta algoritma JEM-W odnosno JEM-D. U tom smislu posebno je značajan parametar β_1 zbog toga što dekokrelator kondicionira korelacionu matricu filtra T . Drugim rečima JEM-W petlja u kombinaciji sa kanalom utiče na formiranje funkcije površine greške CMA ekvalizatora čiji »smoothing« olakšava da vektor koeficijenata pobegne iz stanja lokalnih minimuma koja se mogu pojaviti kod algoritama CMA tipa [3], [6]. Pravilnim izborom parametra β_1 ovaj hendikep blind konvergencije se može značajno ublažiti.

Osnovni problem realizacije algoritama JEM-W i JEM-D je problem selekcije parametra β_1 odnosno β_2 . U tekstu koji sledi pokazano je da se na osnovu kurtosis vrednosti izlaza pojedinih komponenti kaskade može utvrditi kako ovi parametri utiču na performanse ekvalizatora i istovremeno definisati strategija njihovog izbora.

3. STRATEGIJA IZBORA PARAMETARA β_1 i β_2

Linearizovan DFE u stacionarnom stanju predstavlja ZF ekvalizator [2] koji zajedno sa kanalom formira linearni vremenski invarijantni sistem za koji su O.Shalvi i E.Weinstein [7] izveli potreban i dovoljan uslov ekvalizacije. U skladu sa S.-W. teoremom optimalni ZF ekvalizator izjednačuje druge i četvrte momenat ulazno-izlaznih sekvenci, tj., $E\{|z(k)|^2\} = E\{|a(k)|^2\}$ i $E\{|z(k)|^4\} = E\{|a(k)|^4\}$, gde su $a(k)$ i $z(k)$ ulazna, odnosno izlazna sekvenca sistema. Istovremeno, ova teorema kao kriterijum ZF ekvalizacije sugerise maksimiranje kurtosis izlaza $z(k)$ pod uslovom da je $E\{|z(k)|^2\} = E\{|a(k)|^2\}$. Drugim rečima, ako se normalizovani kurtosis izrazi na sledeći način,

$$K(z(k)) = K(a(k)) \left[\frac{\|s\|_4}{\|s\|_2} \right]^4, \quad \|s\|_p = \left[\sum_i |s_i|^p \right]^{1/p} \quad (5)$$

onda je uslov ekvalizacije ekvivalentan sa maksimiranjem funkcije $F(s) = \left[\frac{\|s\|_4}{\|s\|_2} \right]^4$ gde je s impulsni odziv sistema (kanal + ekvalizator). Imajući u vidu ranije definisan problem, gde je naš isključivi interes optimizacija funkcije $F(s)$ u odnosu na impulsni odziv c ekvalizatora CMA,

potrebno je istaći da između stacionarnih tačaka u \mathbf{s} i \mathbf{c} domenu postoji jedan-prema-jedan korespondencija zato što su vektori \mathbf{s} i \mathbf{c} povezani linearnim transformacijama pod uslovom da transfer funkcija kanala nema nula na jediničnom krugu [8].

Podsećanje na teorijski okvir u kome se ostvaruje blind optimizacija Soft/Hard DFE ekvalizatora imalo je za cilj da se pokaže da se performanse CMA ekvalizatora mogu pratiti na osnovu normalizovanog kurtosis izlaza određenog pomoću impulsnog odziva ekvalizatora, $\mathbf{c} = \{c_1 c_2 c_3 \dots c_M\}$. S obzirom da nas interesuje uticaj dekorelatora, tj., kako parametar β_1 deluje na performanse CMA ekvalizatora, ovde su definisani normalizovani kurtosis izlaza za \mathbf{R} odnosno \mathbf{T} ,

$$K_R(u_s) = [\|\mathbf{b}\|_4 / \|\mathbf{b}\|_2]^4 \quad (6)$$

$$K_T(z_s) = [\|\mathbf{c}\|_4 / \|\mathbf{c}\|_2]^4 \quad (7)$$

gde su $u_s = u(k_s)$ i $z_s = z(k_s)$ izlazi dekorelatora odnosno CMA ekvalizatora u trenutku prelaza ekvalizatora iz blind u meki DFE režim rada.

Izračunavanje $K_R(u_s)$ i $K_T(z_s)$ u zavisnosti od parametra β_1 izvršeno je pomoću softverskog simulatora Soft/Hard DFE ekvalizatora na sledeći način:

- 1) za svaku aktivaciju ekvalizatora u okviru pojedinačnih Monte Karlo prolaza određene su $K_{Rj}(u_s)$ i $K_{Tj}(z_s)$ vrednosti u trenutku koji odgovara MSE_{TL-1} ,
- 2) na kraju Monte Karlo testa izvršeno je usrednjavanje u skladu sa relacijama

$$K_R(u_s) = 1/N_{RUN} \cdot \sum_j K_{Rj}(u_s) \quad (8)$$

$$K_T(z_s) = 1/N_{RUN} \cdot \sum_j K_{Tj}(z_s) \quad (9)$$

Računanje srednjih vrednosti $K_R(u_s)$ i $K_T(z_s)$ vrši se na osnovu ukupnog broja prolaza N_{RUN} , nezavisno od toga da li je ili ne dostignut prag MSE_{TL-1} . To znači da dobijene kurtosis vrednosti odražavaju ostvaren nivo ekvalizacije momenata izlaza $u(k)$ odnosno $z(k)$ u odnosu na parametar β_1 , ali isto tako i robusnost Soft DFE da dostigne MSE_{TL-1} .

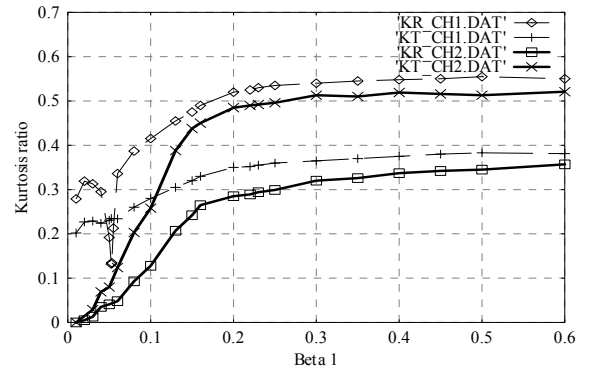
4. SIMULACIJE I ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U delu koji sledi prikazani su rezultati simulacija koji su dobijeni primenom 32-QAM signala za dva različita kanala sa veoma velikim izobličenjima amplitude i odnosom signal-šum $SNR=30$ dB na ulazu u prijemni filter. Kanal 1 predstavlja okruženje sa višeputnom propagacijom čiji je impulsnog odziv dat sa $h_1(t) = e(t)W(t) + 0.8e(t-0.25T)W(t-0.25T) + 0.4e(t-2T)W(t-2T)$ [6], gde je $e(t)$ kosinus podignut impuls sa faktorom zaobljenja 0.12 i $W(t)$ je pravougaoni prozor širine $[-16T, 16T]$. Kanal 2 karakteriše frekvencijski selektivan fading i realizovan je primenom impulsnog odziva $\mathbf{h}_2 = [0.8264, -0.1653, 0.8512, 0.1636, 0.81]$, [2]. Soft/Hard DFE je realizovan pomoću frakcinih FIR filtara sa kašnjenjem $T/2$, gde je T simbolički interval, pri čemu \mathbf{R} ima ukupno 12 a \mathbf{T} 42 koeficijenta. Sam dekorelator je realizovan sa dva paralelna WF filtra, svaki sa po 6 koeficijenata. U trenutku promene strukture koeficijenti jednog od dva WF filtra postaju koeficijenti povratne sprege DFE. Prag promene

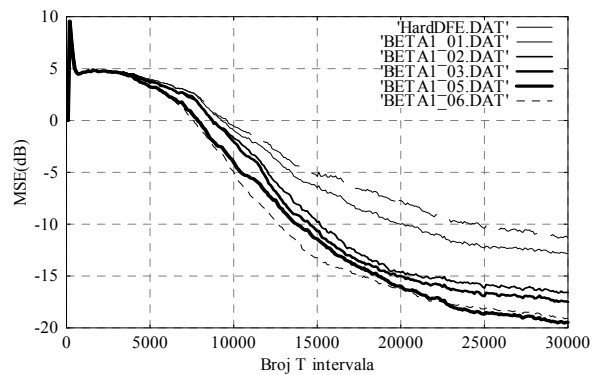
strukture postavljen je relativno nisko, $MSE_{TL-1} = 1.14$ dB, što odgovara zatvorenom dijagramu oka. Ovakav izbor praga ima za cilj da istakne veću robusnost Soft DFE rešenja u blind režimu u odnosu na Hard DFE rešenje. Drugi prag, za koji se JEM-D petlja transformiše u konvencionalnu HD petlju, ima vrednost $MSE_{TL-2} = -8.24$ dB i odgovara stanju relativno dobro otvorenog dijagrama oka gde se ne očekuje pojava efekata propagacije grešaka. Svi koeficijenti FIR filtara imaju nulte početne vrednosti osim centralnog koeficijenta CMA ekvalizatora čija je inicijalizacija, kao što je poznato, od izuzetnog značaja za uspešnu konvergenciju [3], [6]. Vrednosti centralnog koeficijenta su određene eksperimentalno i predstavljaju kompromis između maksimalne brzine konvergencije, sa jedne strane, i rizika da proces adaptacije uđe u »overflow« stanje, sa druge strane. Na ovaj način je za Kanal 1 određena početna vrednost $c_{22}(0)=3.2$, a za Kanal 2 $c_{22}(0)=3.6$.

Na slici 3 su prikazane kurtosis krive u zavisnosti od β_1 dobijene sa $N_{RUN} = 50$ prolaza trajanja $30000 T$ intervala. Na osnovu prikazanih rezultata može se konstatovati sledeće:

1. Promene kurtosis vrednosti na izlazu CMA ekvalizatora veoma dobro prate kurtosis promene na izlazu dekorelatora, što potvrđuje dominantan uticaj dekorelatora na performanse CMA blind ekvalizacije.
2. Vrednosti parametra β_1 za koje kurtosis na izlazu CMA pokazuje blagi porast, odnosno postiže maksimalne vrednosti (na primer $\beta_1 > 0.2$) je opseg u kome treba očekivati željeni uticaj dekorelatora na performanse ekvalizatora.



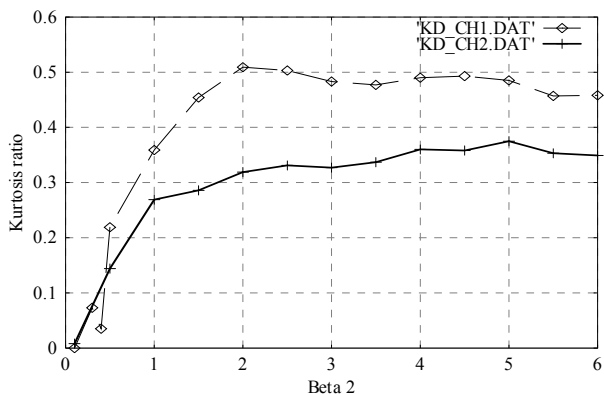
Slika 3. Kurtosis izlaza dekorelatora i CMA u zavisnosti od parametra β_1 : Kanal 1 $K_R = KR_CH1$, $K_T = KT_CH1$, i Kanal 2 $K_R = KR_CH2$, $K_T = KT_CH2$



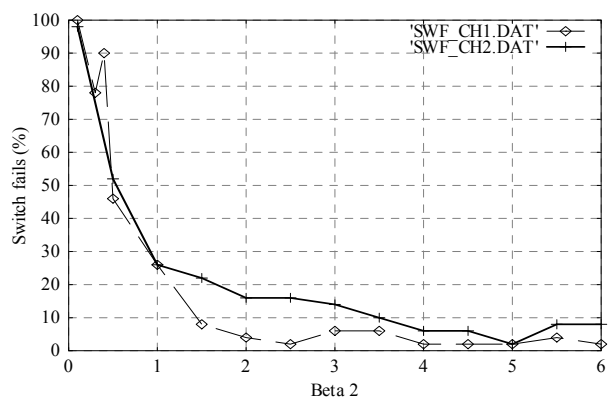
Slika 4. Aktivacija Soft/Hard DFE na Kanalu 1, 32-QAM, $SNR=30$ dB: Hard DFE i Soft DFE za $\beta_1=0.1$ (01), $\beta_1=0.2$ (02), $\beta_1=0.3$ (03), $\beta_1=0.5$ (05), $\beta_1=0.6$ (06), $\beta_2=2.6$.

Uticaoj β_1 na MSE performanse Soft DFE ilustrovan je na slici 4 gde su prikazane krive konvergencije za nekoliko različitih vrednosti β_1 , kao i za Hard DFE, ostvarene na Kanalu 1. Krive dobijene u ovom slučaju pokazuju da novi dekorrelator bitno utiče na brzinu konvrgncije CMA ekvalizatora, tj. da brzina konvergencije raste sa porastom β_1 . Istovremeno, može se zapaziti da povećanje β_1 preko neke određene vrednosti (u ovom slučaju za $\beta_1 > 0.5$) dovodi do degradacije MSE što ukazuje da maksimiranje kurtosis vrednosti u linearnom režimu ne optimizira Soft DFE u pogledu minimalne MSE. Opisan način delovanja parametra β_1 na performanse ekvalizatora upućuje na zaključak da se prilikom njegovog izbora mora praviti kompromis između brzine konvergencije i minimalne MSE u stacionarnom režimu.

Mada se kod Soft DFE u režimu sa JEM-D petljom ne može dosledno primeniti model ZF optimizacije i S.-W. teorema, problem izbora parametra β_2 je i u ovom slučaju razmatran na osnovu ponašanja kurtosis izlaza. Ovaj pristup je problematičan zbog toga što je u pitanju prelazni režim ekvalizatora u kome se optimizacija T filtra ostvaruje na konvencionalan način u MSE D.D režimu, dok je optimizacija JEM-D petlje zasnovana na JEM kriterijumu. Na slici 5 je prikazan krtosis izlaza JEM-D petlje u zavisnosti od β_2 koji je računat na osnovu relacija (6) i (8) u trenutku $MSE=MSE_{TL-2}$. Istovremeno sa merenjem kurtosis vrednosti testirana je i robusnost Soft/Hard DFE rešenja u odnosu efekte propagacije grešaka. Na slici 6 je prikazana neuspešnost ekvalizatora da dostigne prag MSE_{TL-2} pri čemu se pretpostavlja da je neuspeh posledica propagacije grešaka. Kao što se vidi u slučaju Kanala 1 JEM-D petlja pokazuje optimalnu podešenost za vrednosti β_2 u okolini 2.5, a u slučaju Kanala 2 za vrednosti β_2 u okolini 5.5. Ovi rezultati ukazuju da je parametar β_2 proporcionalan sa stepenom izobličenja kanala. Istovremeno, značajno je istaći da se kao i u slučaju parametra β_1 i ovde može odrediti kompromisna vrednost β_2 za koju će Soft DFE ostvarivati bolje performanse u odnosu na Hard DFE na različitim kanalima u okviru posmatranog sistema prenosa. Na kraju, na osnovu slike 5 i 6 može se konstatovati visok stepen korelacije između promene kurtosis vrednosti i neuspešnosti prolaza praga MSE_{TL-2} , tj. robusnost Soft DFE rešenja u odnosu na propagaciju grešaka.



Sli.5. Kurtosis izlaza feedback dela DFE u zavisnosti od parametra β_2 za $\beta_1=0.4$: za Kanal 1 KD_CH1, i za Kanal 2 KD_CH2



Sli.6. Neuspešnost prolaza praga MSE_{TL-2} u zavisnosti od β_2 za $\beta_1=0.4$ na Kanalu 1 SWF_CH1, i Kanalu 2 SWF_CH2 Odgovarajuće vrednosti nuspešnog prolaza za Hard DFE rešenje su: 26% za Kanal 1 i 4% za Kanal 2

LITERATURA

- [1] S.U.H.Qureshi, "Adaptive Equalization," Proc. IEEE, vol. 53, pp. 1349-1387, Sep. 1985.
- [2] J.Labat, O.Macchi, C.Laot, "Adaptive Decision Feedback Equalization: Can You Skip the Training Period?," IEEE Trans. Commun. Vol.46, No.7, 1998.
- [3] D.Godard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication System," IEEE Trans. Commun., Vol.28, pp.1867-1875, Nov.1980.
- [4] V.R.Krstic, Z.Petrovic, "A New Algorithm for T/2- soft decision feedback blind equalizer," Wseas Trans. on Commun. Vol. 2, ISSN 1109-2742, April 2003. pp.203-208
- [5] Y.H.Kim, S.Shamsunder, "Adaptive Algorithms for Channel Equalization with Soft Decision Feedback," IEEE JSAC. Vol.16, No.9, 1998.
- [6] Y. Li, Z. Ding, "Global Convergence of Fractionally Spaced Godard (CMA) Adaptive Equalizers," IEEE Trans. Commun. Apr. 1996. pp.818-826
- [7] O.Shalvi, E.Weinstein, "New Criteria for Blind Deconvolution of Nonminimum Phase Systems (Channels)," IEEE Trans. Inf.Theory, March 1990.
- [8] G.J. Foschini, »Equalizing without Altering or Detecting Data,« AT&T Technical Journal, Vol.64, Oct. 1985. pp. 1885-1911.

Abstract – This paper addresses the selection problem of smoothing parameters for joint entropy maximization algorithms and corresponding soft feedbacks developed for decision feedback blind equalizers. Using the kurtosis method, proposed in this paper, we have defined the selection strategy of these parameters for channels that suffer from severe linear distortions.

SOFT FEEDBACKS OPTIMIZATION FOR DECISION FEEDBACK BLIND EQUALIZER

Vladimir R. Krstic, Zoran Petrovic