

Adaptivna ekvalizacija telekomunikacionog kanala zasnovana na statističkim karakteristikama primenjenog signala

**Jedno rešenje blind DFE ekvalizatora: filterska struktura,
kriterijumi optimizacije, algoritmi, ostvareni rezultati i
primena.**

Dr Vladimir Krstić

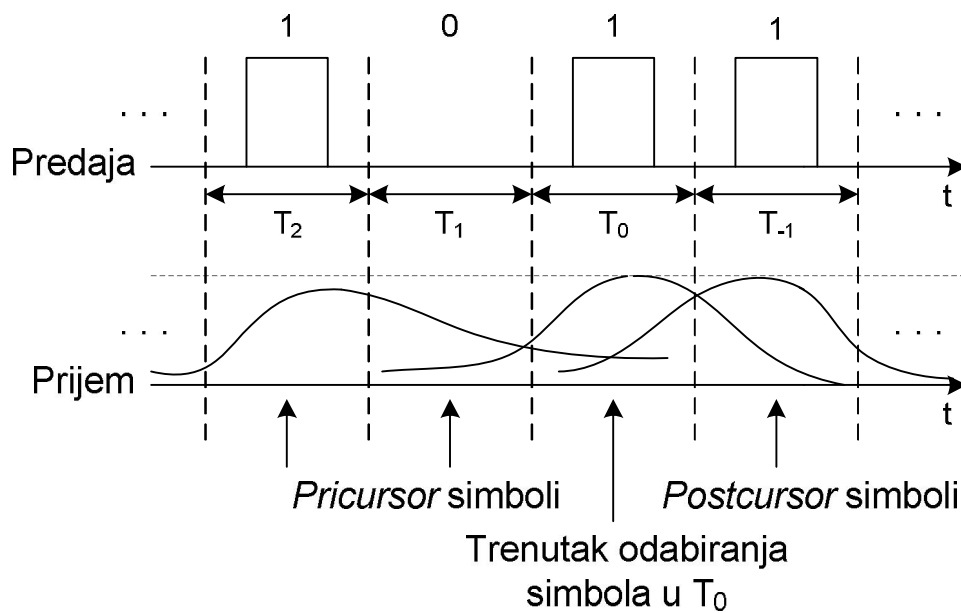
**Institut “Mihajlo Pupin”, Beograd
Seminar Naučnog veća, 28.03.2017**

**Prikazani rezultati su deo projekta TR 32037, 2011-2016,
Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja**

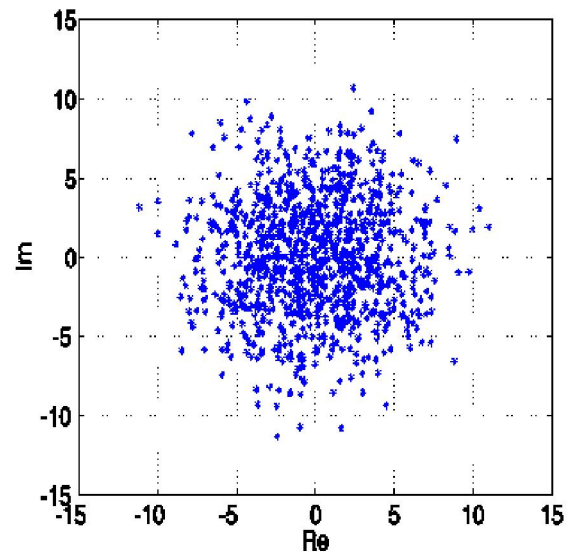
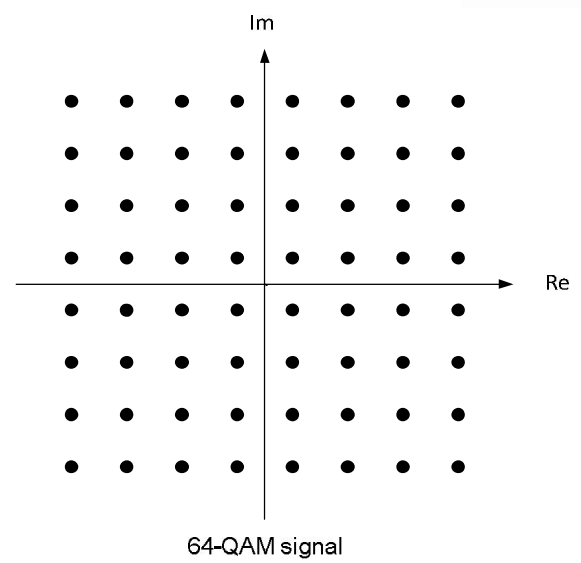
Sadržaj prezentacije:

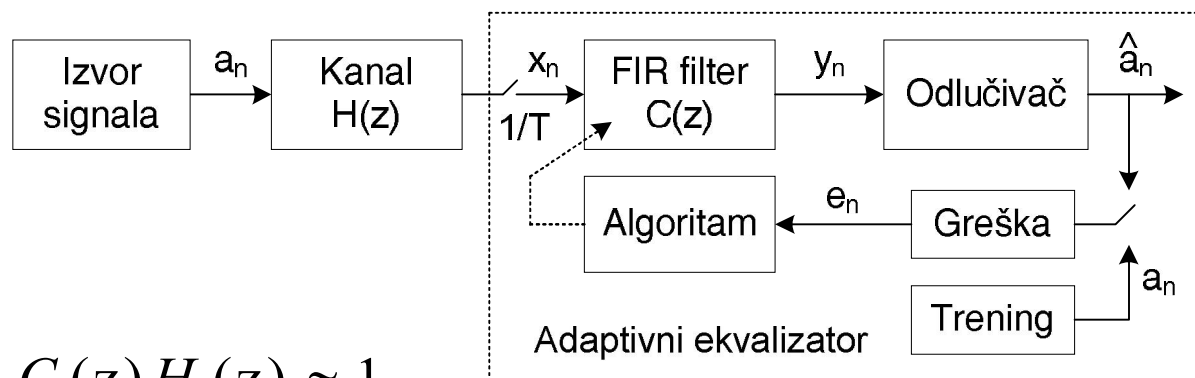
- Intresimbolska interferencija kao limitirajući faktor u frekvencijski efikasnom prenosu signala podataka i eliminacija iste primenom metoda adaptivne ekvalizacija kanala.
- Koncept ekvalizacije bez primene trening sekvence (blind ili unsupervised equalization)
- Decision Feedback Equalizer koji istovremeno optimizira i strukturu i kriterijumsku funkciju sa ciljem da eliminiše primenu trening sekvence i efekte propagacije grešaka
- Soft-DFE: rešenje blind DFE ekvalizatora koje optimizira strukturu i u tri kriterijumske funkcije kroz tri režima rada: blind režim, Joint Entropy Maximization (JEM) i Constant Modulus kriterijum, meki prelazni režim, JEM i MMSE kriterijum, i režim praćenja, MMSE kriterijum.
- Analiza performansi Soft-DFE u slučaju prenosa (16-,32-,64)-QAM signala: četiri rezultata ostvarena kroz nekoliko unapređenja JEM algoritma.
- Preliminarna komparacija brzine konvergencije linearnog ekvalizatora sa treningom i blind Soft-DFE rešenja

Zaključak sa komentarom: Problemi šire primene blind adaptivne ekvalizacije u savremenim telekomunikacionim sistemima



Ilustracija efekata intersimbolske interferencije: 64-QAM signal na ulazu u ekvalizator posle konvolucije sa kanalom koji unosi dubok frekvencijski selektivan fading.





$$C(z)H(z) \approx 1$$

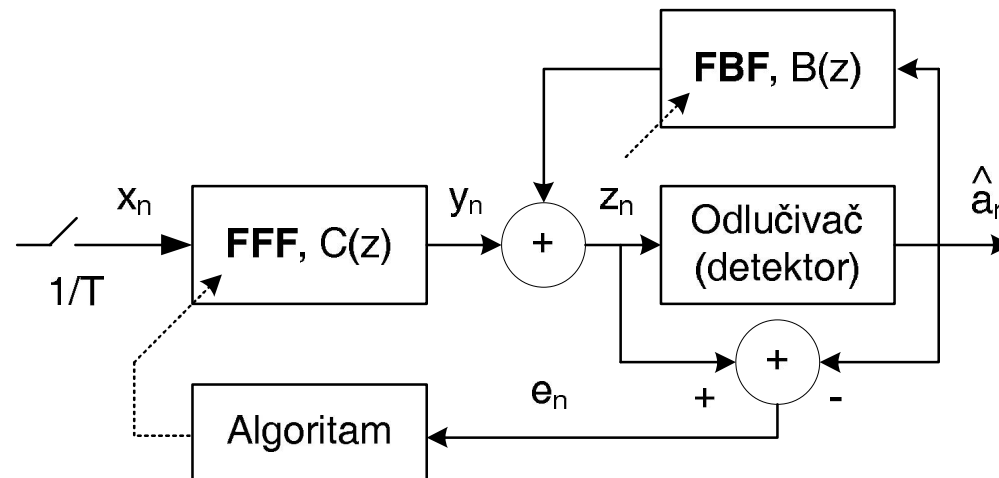
$$C(z) = 1 / H(z)$$

$$|f| \leq 1/2T$$

Model adaptivnog linearnog ekvalizatora u osnovnom opsegu.

Linearni ekvalizator (LE) se uobičajeno realizuje primenom transverzalnog filtra sa konačnom dužinom impulsnog odziva (FIR). Konvencionalna adaptacija pomoću trening sekvence.

[1] Lucky R. W., "Automatic Equalization for Digital Communication", *Bell Systems Tech. J.*, vol. 44, pp. 547-588, April, 1965.



Decision feedback equalizer (DFE):

FFF – feedforward filter

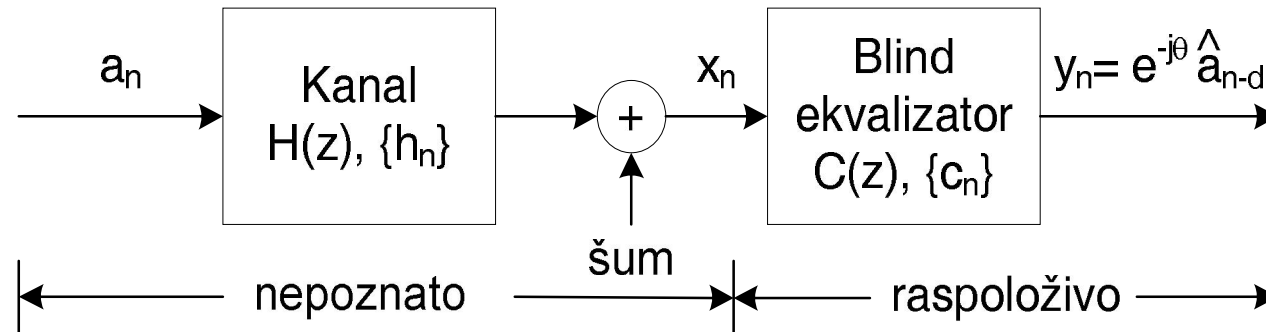
FBF – feedback filter

DFE prednosti i nedostaci:

-Pod pretpostavkom da su simboli podataka koretno detektovani DFE je efikasniji od LE.

-U slučaju pogrešne detekcije preti pojava efekata propagacije grešaka i ispad ekvalizatora.

[2] Mosen P., "Feedback Equalization for Feding Dispersive Channels," *IEEE Trans. Infor. Theory*, pp. 56-64, Jan. 1971.



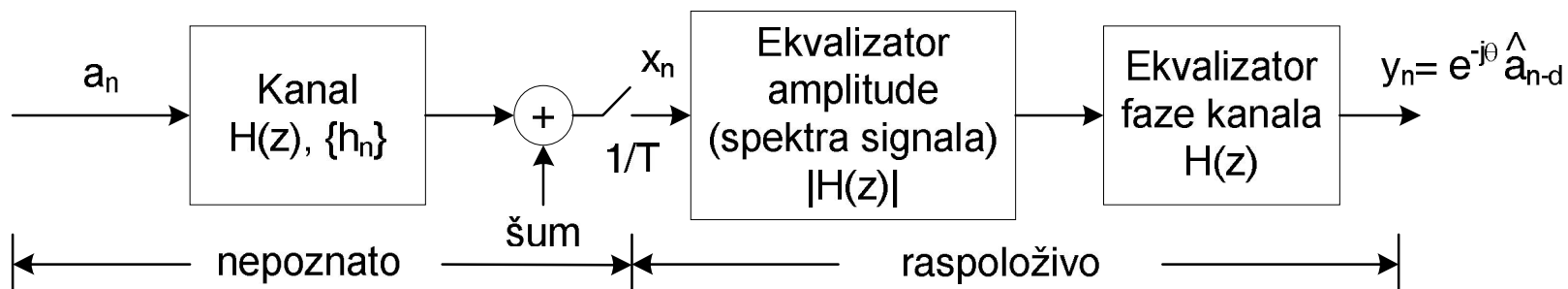
Model telekomunikacionog sistema sa blind (unsupervised) ekvalizatorom:

1. Izvor simbola podataka na predaji generiše stacionarnu i.i.d. sekvencu sa ne-Gaussovom raspodelom.
2. Nepoznat kanal sa neminimalnom fazom je linearan vremenski-invarijantan filter čiji impulsni odziv ima konačnu energiju.

Blind ekvalizacija je proces izjednačavanja funkcija raspodele gustine verovatnoće izvora simbola na predaji i estimiranih simbola na izlazu sistema (ekvalizatora), Benveniste et al. (1980).

[3] Sato Y., "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude – Modulation Systems", *IEEE Trans. Commun.* vol. COM-23, pp.679-682, June, 1975.

[4] Benveniste A., M. Goursat, G. Ruget, "Robust Identification of a Nonminimum Phase System: Blind Adjustment of a Linear Equalizer in Data Communications," *IEEE Trans. Automat. Control.*, vol. AC-25, pp.385-399, June 1980.

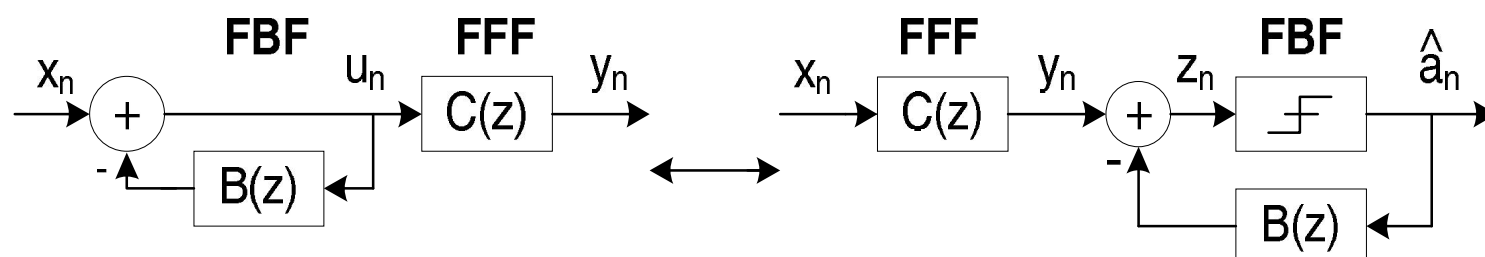


Potreban i dovoljan islov za blind dekonvoluciju signala:

Obnoviti statistiku četvrtog reda (kurtosis) pod pretpostavkom da je poznata statistika drugog reda, tj. varijansa signala primenjenog na predaji.

Praktično, ova teorema obezbeđuje teorijske uslove za blind ekvalizaciju u dva koraka ili, drugim rečima, za podelu zadatka blind ekvalizacije na dva nezavisna zadatka koji se sukcesivno izvršavaju: ekvalizacija amplitude i ekvalizacija faze nepoznatog sistema (kanala).

[5] Shalvi O, and Weinstein E., "New Criteria for Blind Deconvolution of Nonminimum Phase Systems (Channels)", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 36, pp. 312-321, March, 1990

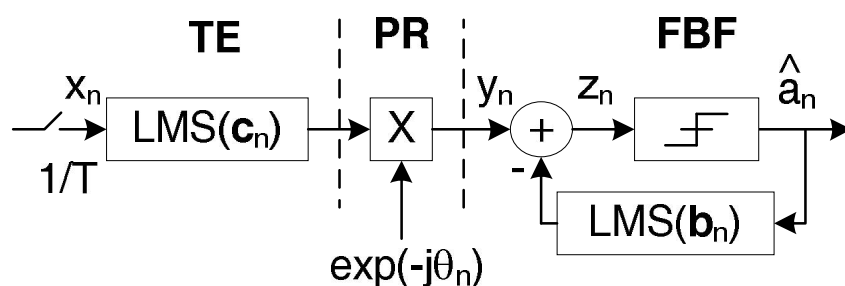
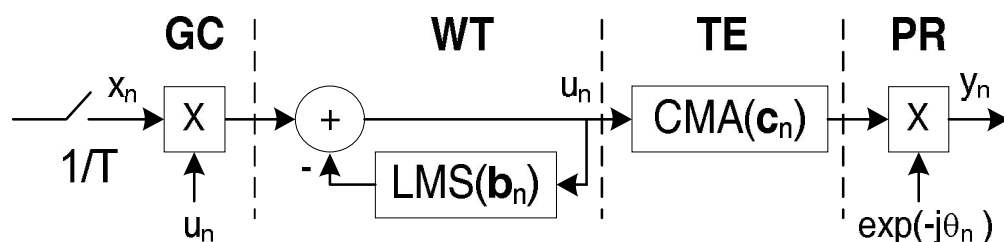


Kako preskočiti trening i zaobići fenomen propagacije grešaka u slučaju adaptacije DFE?

***Self-Optimized* blind DFE istovremeno adaptira i strukturu i kriterijum optimizacije u skladu sa stanjem konvergencije ili kvaliteta signala:**

- u blind režimu DFE se transformiše u kastadno strukturiran LE a zatim, kad dovoljno otvori signal,
- transformiše se nazad u DFE.

[6] Labat, J., Macchi, O. and Laot, C. „Adaptive Decision Feedback Equalization: Can You Skip the Training Period? *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 7, pp. 921-930, 1998.



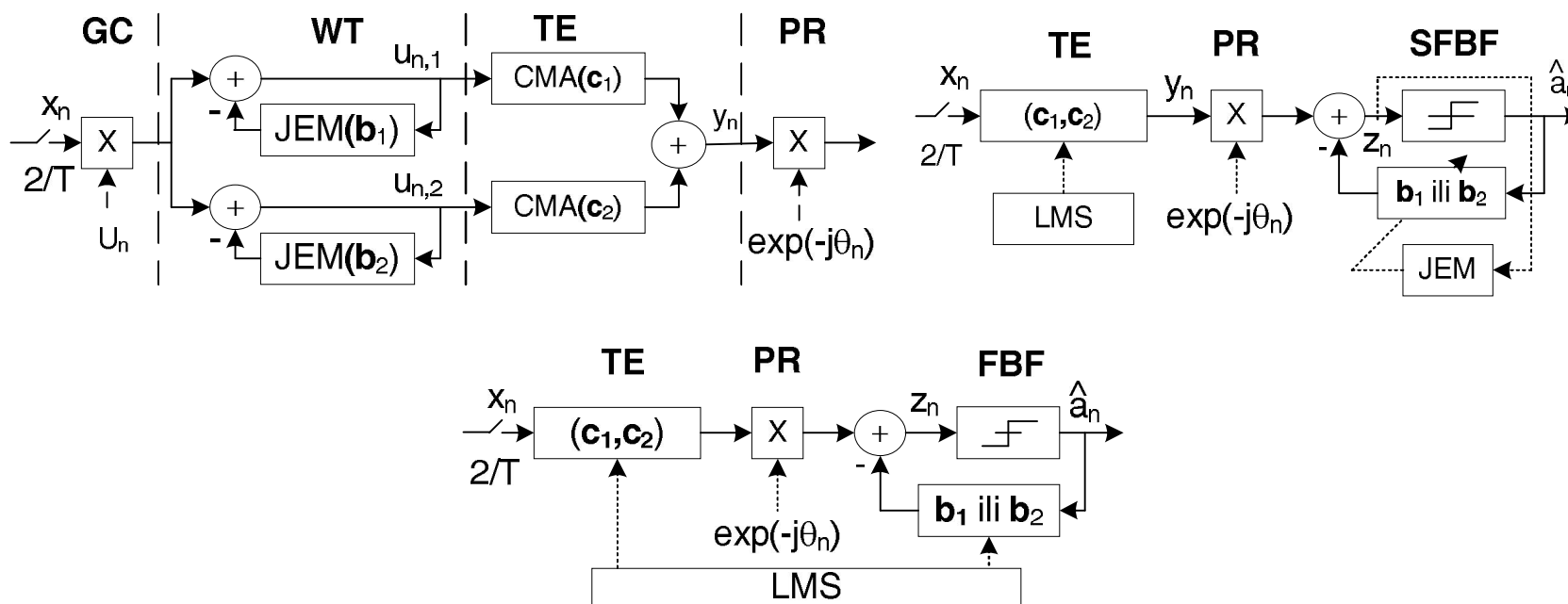
GC – gain control (regulacija pojačanja)
WT – dekorelator (whitener) prijemnog signala
TE – symbol-spaced equalizer
PR – phase rotator (estimator faze nosioca)

Kompletna *Self-Optimized DFE (SO-DFE)* šema:

- u **blind režimu SO-DFE** koristiti **MMSE (ELMS)** i **Constant Modulus (CMA)** kriterijum.
- u **decision-directed (tracking) režimu SO-DFE** je **MMSE DFE (DD-LMS)**.

[7] Godard, D. N. „Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems“, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 1867-1875, 1980.

[8] Treichler, J. R., Agee B. G., "A New Approach to Multipath Correction of Constant Modulus Signals," *IEEE Trans. Acoust., Speech., Signal Processing*, VOL. ASSP-31, pp.459-471, Apr. 1983.



Soft-DFE: unapređena varijanta SO-DFE šeme. Šta je novo u odnosu na SO-DFE?

- FFF ekvalizator je fractionally-spaced equalizer (T/2-FSE),
- Joint Entropy Maximization criterion (JEM algoritmi) za adaptaciju FBF filtra
- Adaptacija kroz tri režima rada: a) blind, b) meki prelazni i c) praćenje.

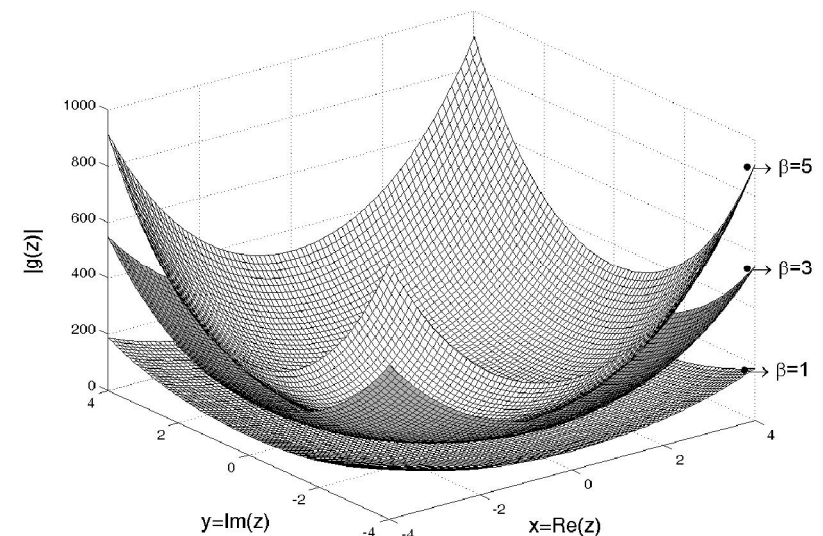
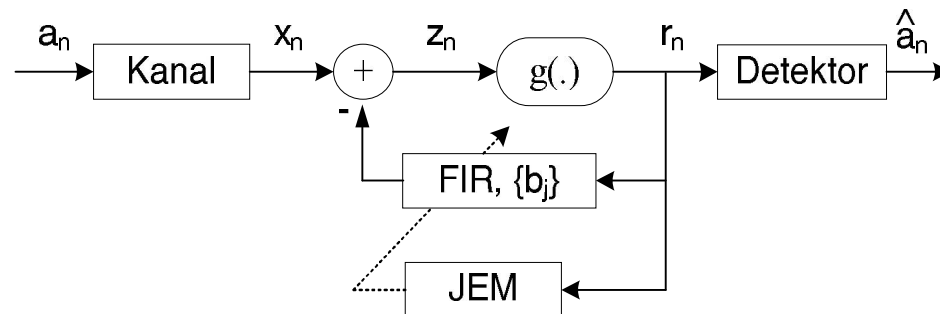
[9] Krstić V. R. and Petrović Z., "A New Algorithm For T/2-Soft Decision Feedback Blind Equalizer", *WSEAS Transactions on Communications*, ISSN 1109-2742, pp. 203-208, vol. 2, Apr.-July 2003.

[10] Krstić V. R. and Dukić M. L. „Blind DFE With Maximum-Entropy Feedback”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 26-29, Jan. 2009.

$$J_{JEM}(\mathbf{b}_n) = E \left[\ln \left| \frac{\partial r_n}{\partial z_n} \right| \right] \rightarrow J_{JEM}(\mathbf{b}_n) = \ln \left| \frac{\partial r_n}{\partial z_n} \right|, \quad g(z_n) = r_n,$$

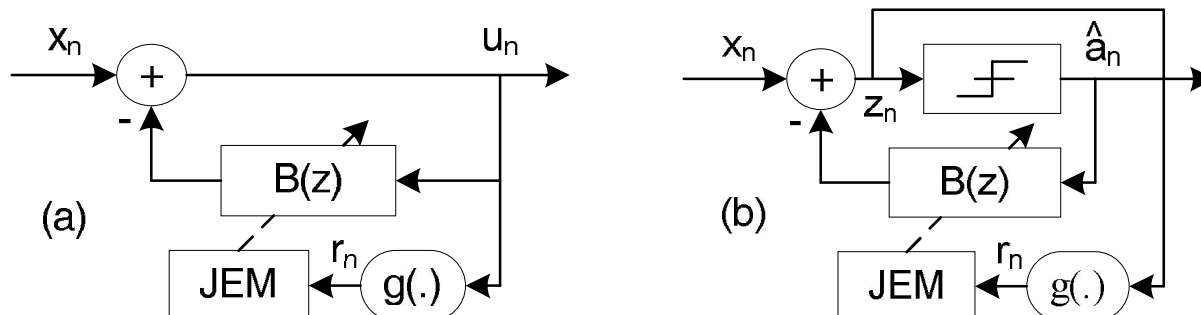
$$\nabla_{b_j} J_{JEM} = \frac{\partial J_{EM}}{\partial b_{R,j}} + i \frac{\partial J_{EM}}{\partial b_{I,j}}, \quad j = 1, \dots, N,$$

$$g(z) = z(1 + \beta |z|^2), \quad \beta = \{1, 3, 5\}.$$



Osnovni model JEM-FBF filtra zasnovan na neuronu Bell-Sejnowski klase (1995) i Joint Entropy Maximization (JEM) kriterijumskoj funkciju, Kim-Shamsunder (1998). Moduo funkcije mapiranja $G(z)$ koja transformiše PDF funkciju ulaznog procesa u slučaju Soft-DFE.

[11] Bell, A. J., & Sejnowski, T. J. (1995). An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Computation*, vol. 7, no. 6, (pp. 1129-1159).



$$\text{JEM: } b_{j,n+1} = b_{j,n} + \alpha \cdot \nabla_{b_{n,j}} J_{EM}, \quad j = 1, \dots, N,$$

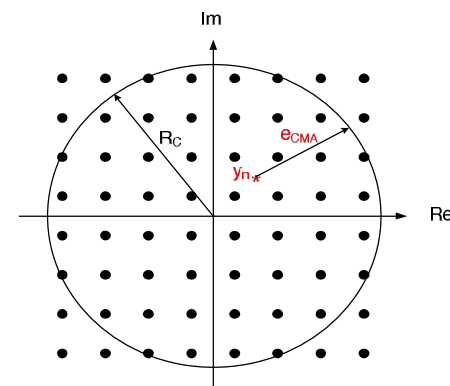
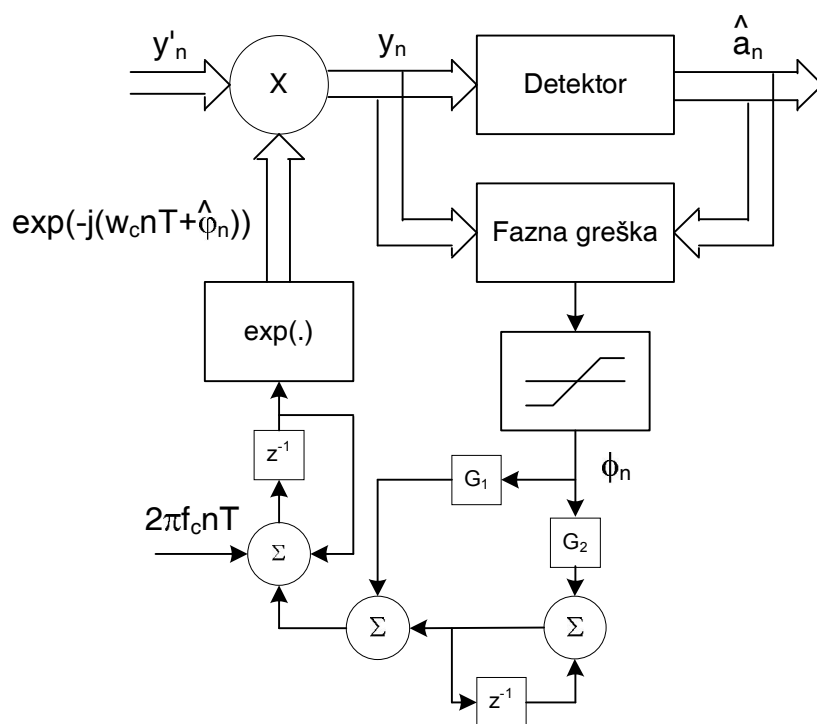
$$b_{j,n+1} = b_{j,n} - \mu z_n \left(1 - \beta |z_n|^2 \right) r_{n-j}^*$$

$$\text{JEM-W: } b_{j,n+1} = b_{j,n} - \mu_W u_n \left(1 - \beta_W |u_n|^2 \right) u_{n-j}^* \quad (\text{a})$$

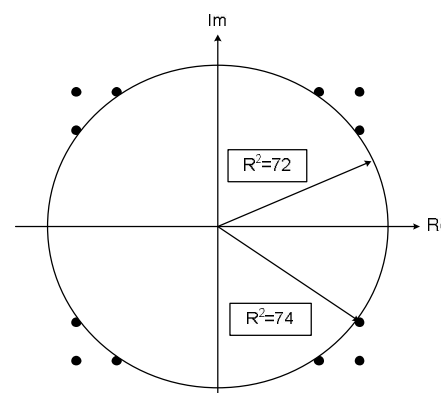
$$\text{JEM-D: } b_{j,n+1} = b_{j,n} - \mu_D z_n \left(1 - \beta_D |z_n|^2 \right) \hat{a}_{n-j}^* \quad (\text{b})$$

$$\text{CMA: } c_{k,n+1} = c_{k,n} - \mu_C x_n^* y_n \left(|y_n|^2 - R_C^2 \right), \quad k = 1, \dots, 2L$$

Dve varijante Joint Entropy Maximization algoritma dobijene kao rezultat heurističkog proširenja osnovnog JEM-DFE modela na (a) linearizovan all-pole rekurzivni filter sa JEM-W algoritmom i (b) decision-directed soft-FBF ekvalizator sa DD-JEM algoritmom.



64-QAM konstalacija sa konstantnim modulom R_c



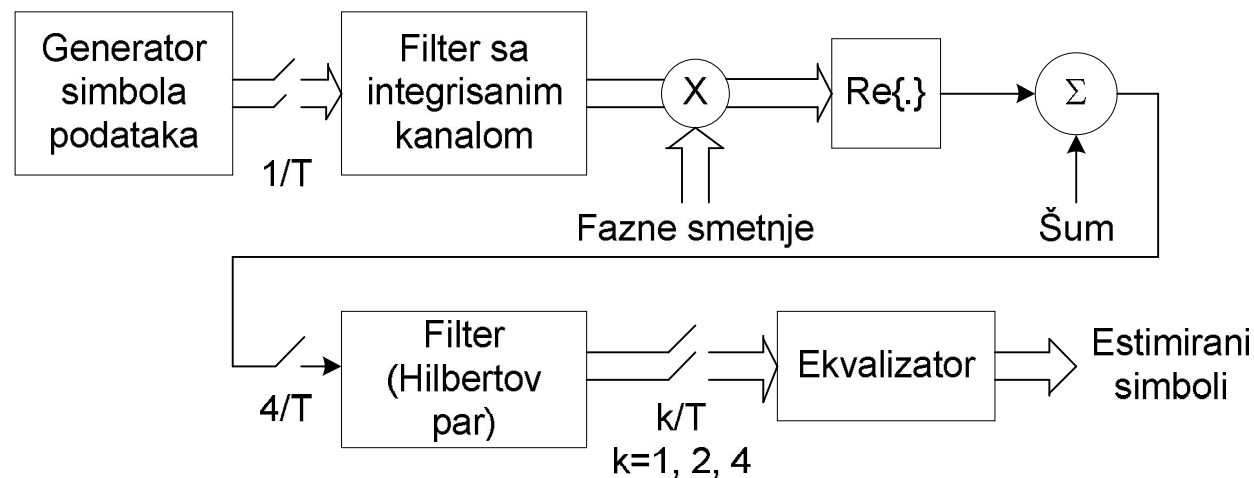
Redukovana 64-QAM konstalacija

Estimator faze nosioca primenjen u Soft-DFE:

Osnovni model decision-directed fazne petlja drugog reda (PLL).

U slučaju potrebe u PLL se može integrisati adaptivni prediktor faznog džitera (rešenje realizovano u V.32 modemu). PLL u inicijalnoj fazi adaptacije, u slučaju 64-QAM, računa faznu grešku u odnosu na redukovanu konstalaciju signala koja obuhvata 12 simbola sa max. energijom.

[12] V. R. Krstić, "Optimalna ekvalizacija kanala i estimacija faze nosioca u sitemu za prenos podataka", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1990.



Blok šema softveskog simulatora koji je korišćen u istraživanju. Osnovne karakteristike:

- Predajnik: generator skremblovanih podataka sa m-QAM modulatorom (m=4,16,32,64,128),
- Filtri na predaji i prijemu dele transver funkciju podignutog kosinusa sa faktorom zaobljenja 0.12.
- Kanal za višestrukom propagaciom (MP-kanal) je integrisan u filter na predaji.
- Dva izvora smetnji, fazne (frekvencijski ofset i fazni džiter) i aditivni beli šum.

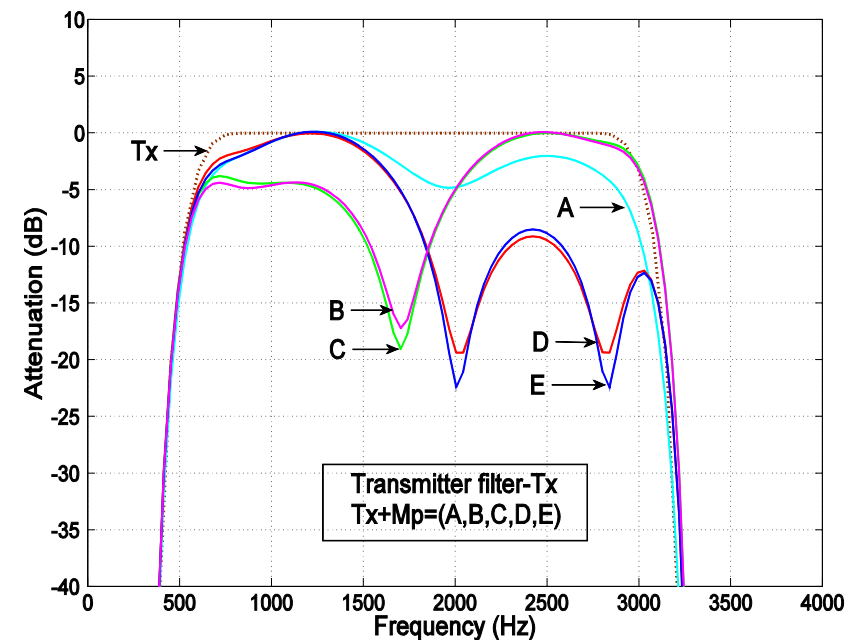
Napomena: Kao osnova za izgradnju simulatora za blind ekvalizaciju iskorišćen se simulator razvijen za potrebe razvoja V.32 voice-band modema, Krstić (1987-1991).

$$h(t) = p(t)W(t) + a_1p(t - d_1)W(t - d_1) + a_2p(t - d_2)W(t - d_2)$$

$p(t)$ – Tx filter, (a_i, d_i) – parametri propagacije

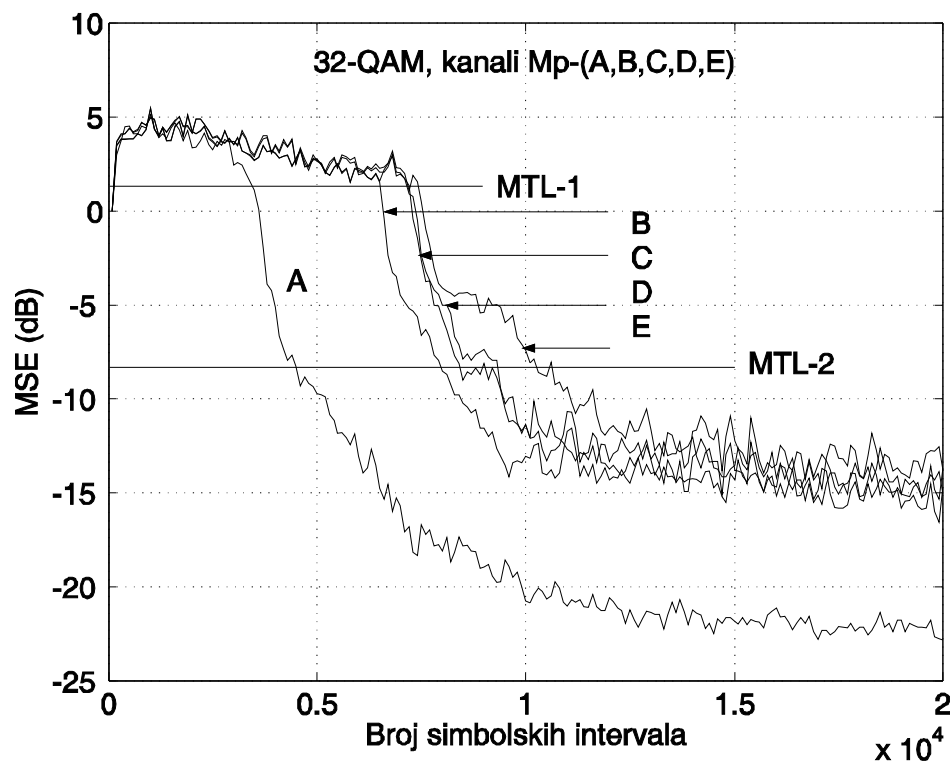
$W(t)$ – pravougaoni prozor $\{-16T, 16T\}$

Kanal	Slabljenje		Kašnjenje	
	a_1	a_2	d_1	d_2
Mp-A	0.90	0.35	1	8
Mp-B	0.90	0.40	3	8
Mp-C	0.90	0.35	3	8
Mp-D	0.80	0.35	2	8
Mp-E	0.80	0.40	2	8



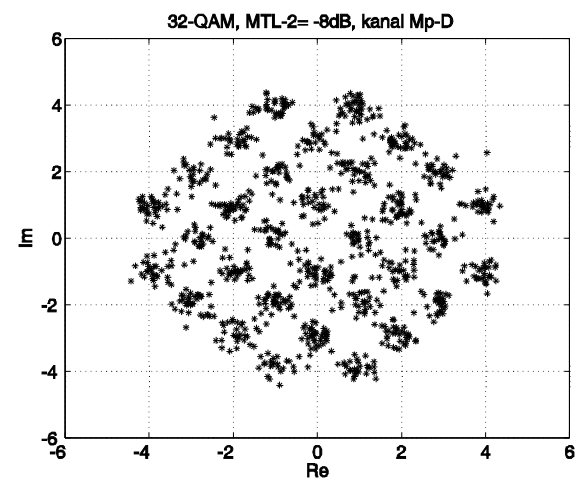
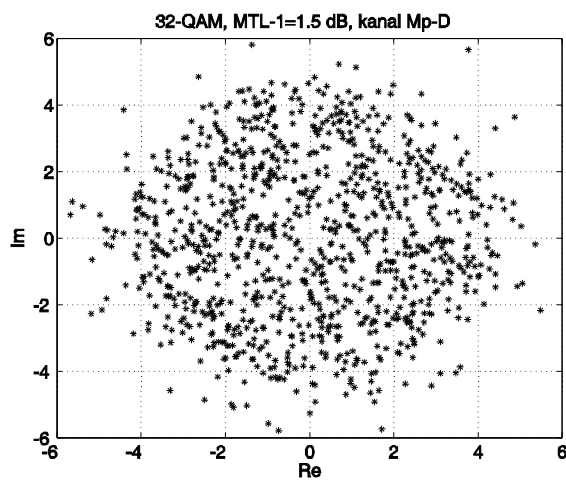
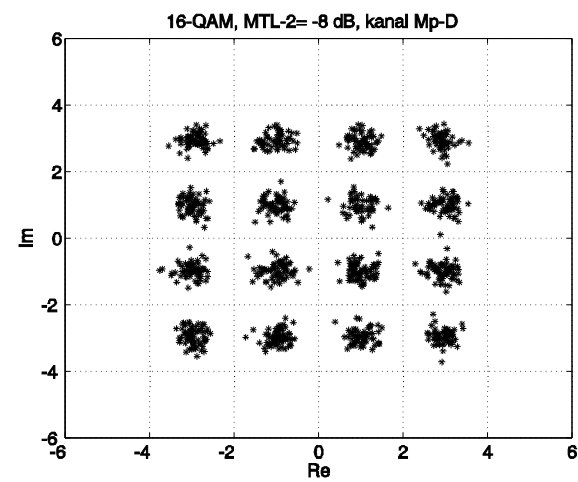
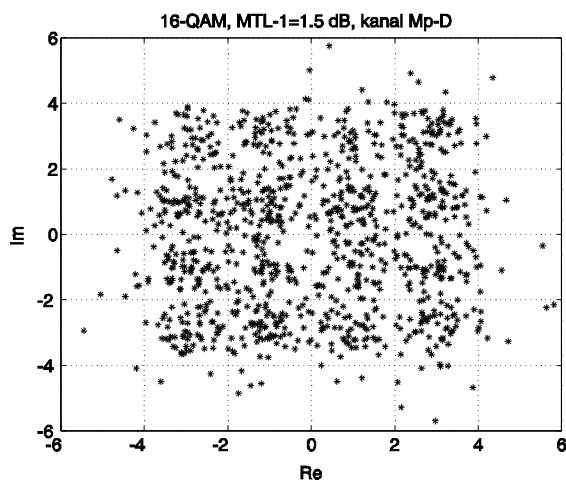
Normalizovane aplitudske karakteristike multipath kanala (Mp) realizovanih sa tri impulsna odziva: osnovnim i dva skalirana i zakašnjena. Karakteristika Tx odgovara osnovnom impulsu (kvadratni koren podignutog kosinusa).

Rezultat 1 [13]: Analiza uticaja nekoliko najznačajnijih parametara na performanse ekvalizatora.

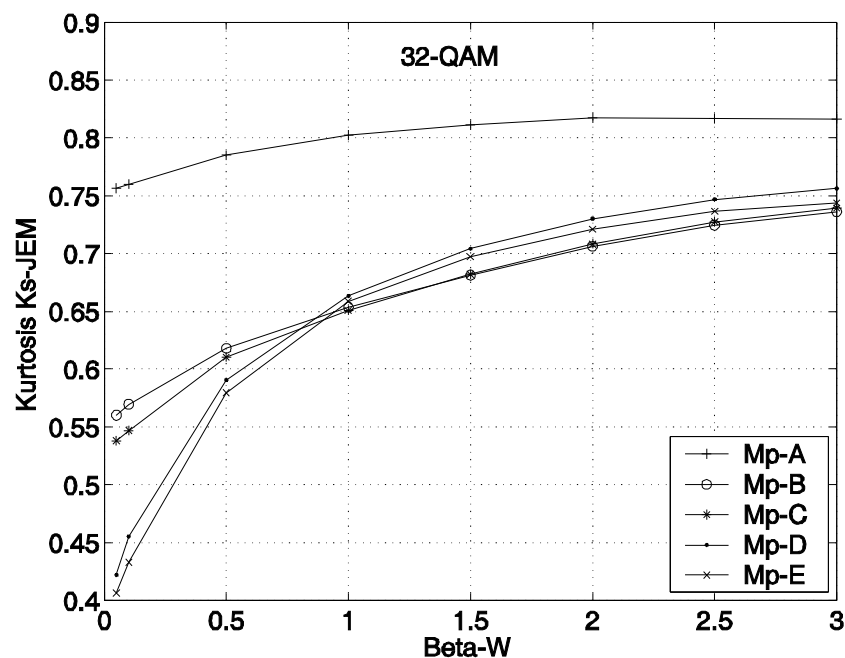
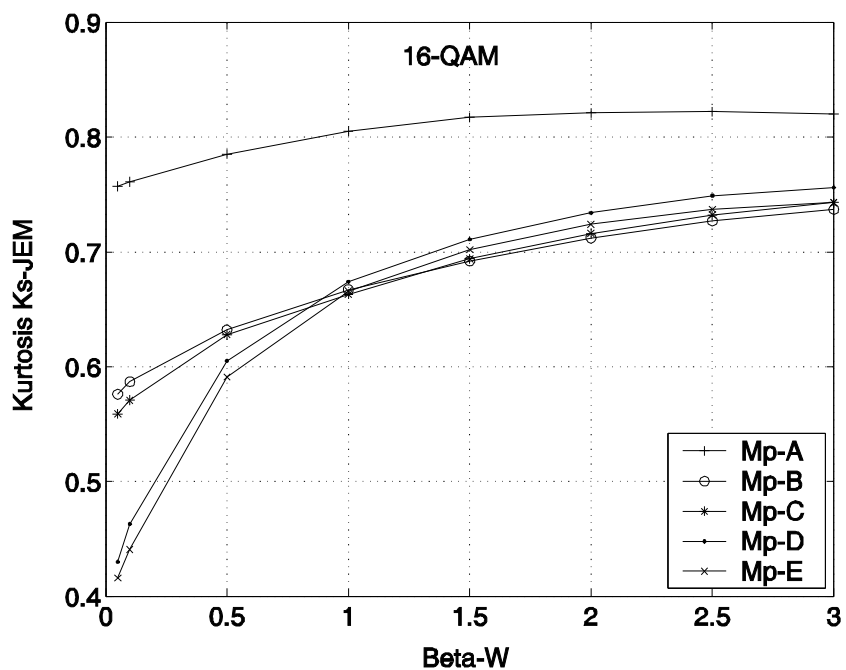


Test 1. Analiza uticaja pragova MTL1 i MTL2 na performanse ekvalizatora, 32-QAM, SNR=25 dB.
Približne vrednosti za: 16-QAM {MTL1=1.4 (1.5 dB), MTL2=0.165 (-7.8 dB)}, 32-QAM {MT1=1.5 (1.76 dB), MTL2=0.260 (-6.0 dB)}.

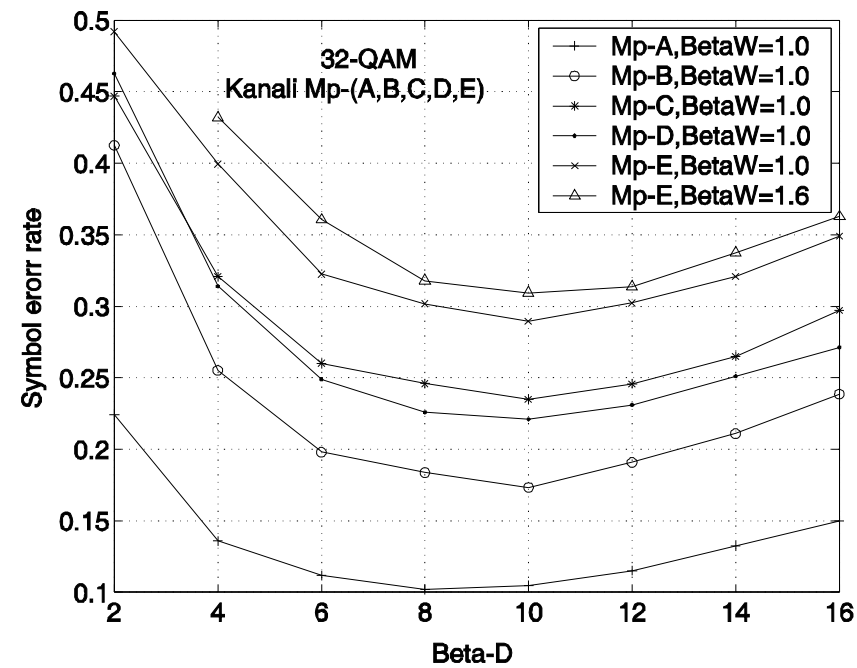
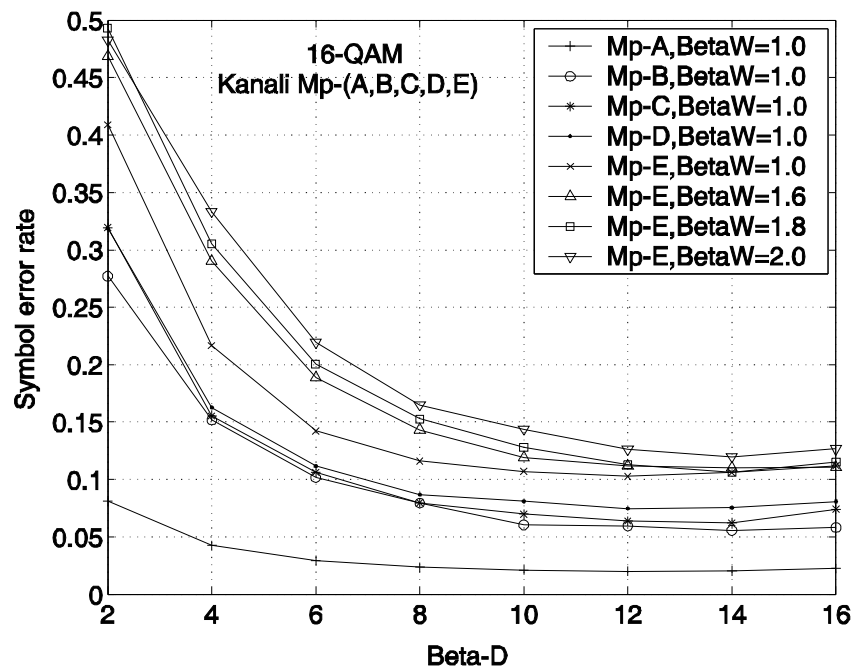
[13] V. R. Krstić, "Novi algoritmi za adaptivnu ekvalizaciju telekomunikacionih kanala na osnovu statističkih karakteristika signala" Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 10. 07. 2009.



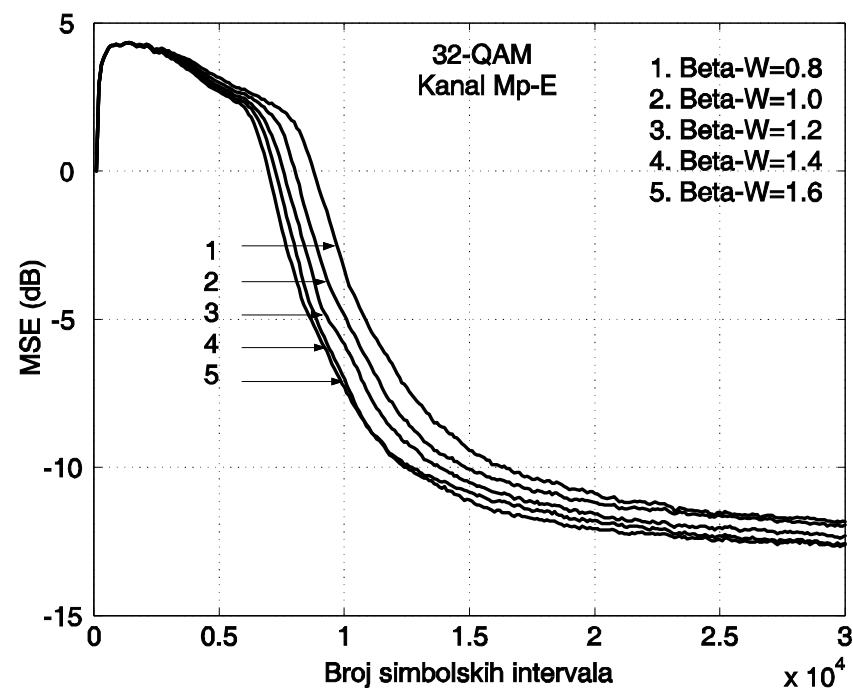
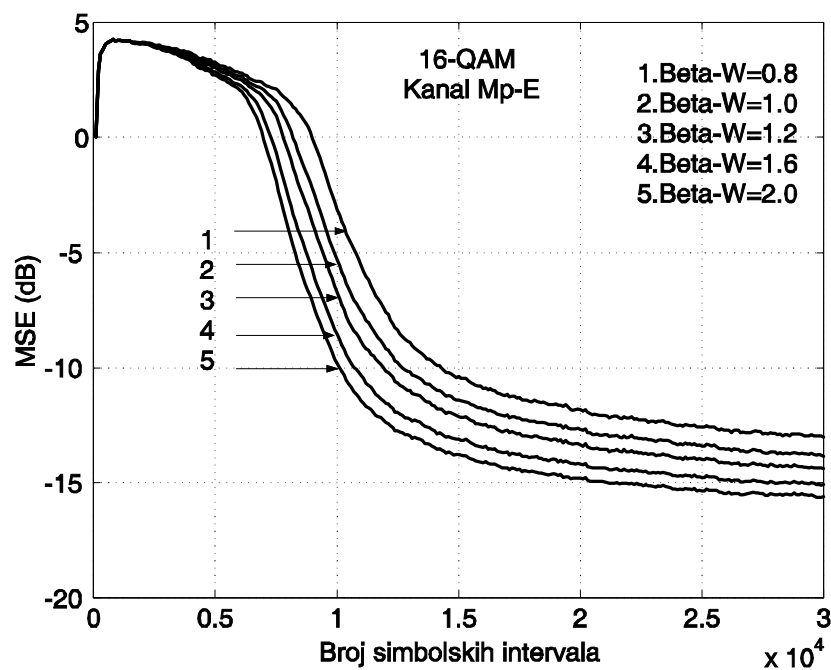
Konstalacije 16-QAM i 32-QAM signala u stanju promene režima rada: prozor trajanja 1000 T intervala centriran oko pragova MTL1 (kraj blind režima) i MTL2 (kraj mekog prelaznog režima), kanal Mp-D, SNR=25 dB.



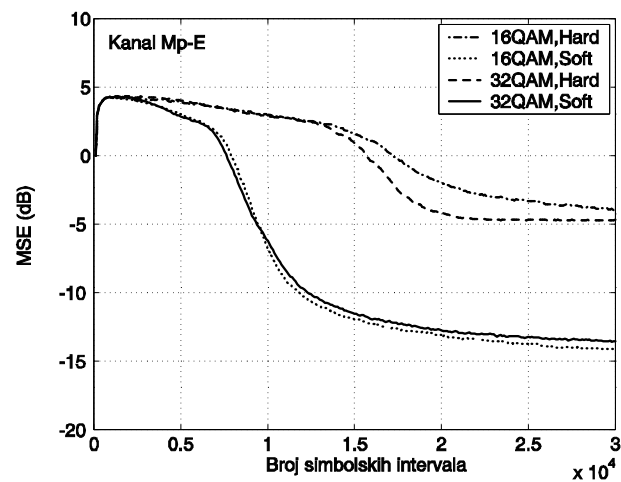
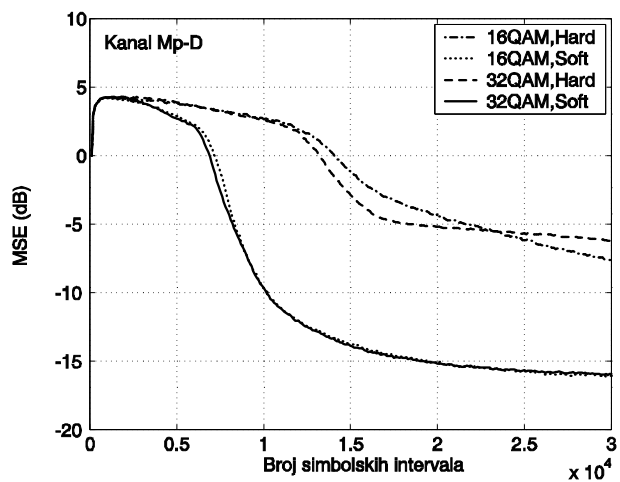
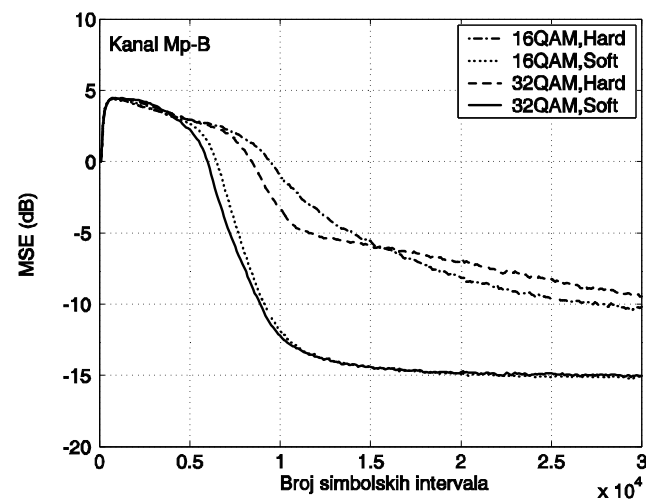
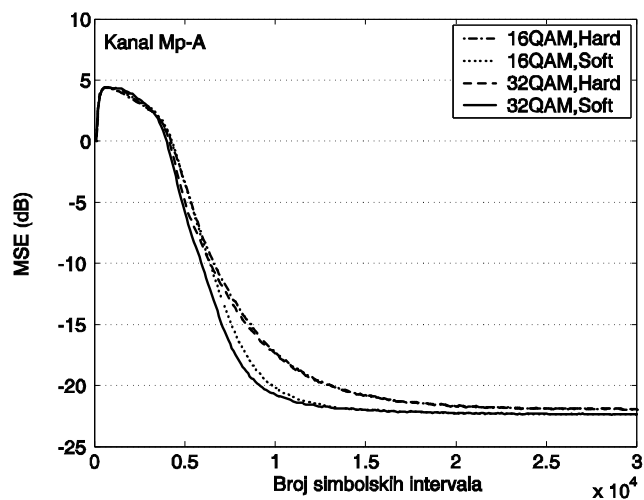
Test 2. 16-QAM i 32-QAM: analiza utica nagiba Beta-W na normalizovan kurtosis meren na izlazu TE na kraju blind režima, SNR=25 dB. Određeni opsezu vrednosti nagiba od interesa: za 16-QAM (1.0-2.0) i za 32-QAM (0.8-1.6).



Test 3. Analiza uticaja nagiba Beta-D na symbol-error-rate za različite vrednosti nagoba Beta-W, SNR=25 dB. Određene tačne vrednosti nagiba: za 16-QAM Beta-D=12 i za 32-QAM Beta-D=10.



Test 4: Analiza uticaja nagiba Beta-W na brzinu MSE konvergencije Soft-DFE fiksno Beta-D: kanal Mp-E, SNR=25 dB, Beta-D=12.0 za 16-QAM i Beta-D=10.0 za 32-QAM.

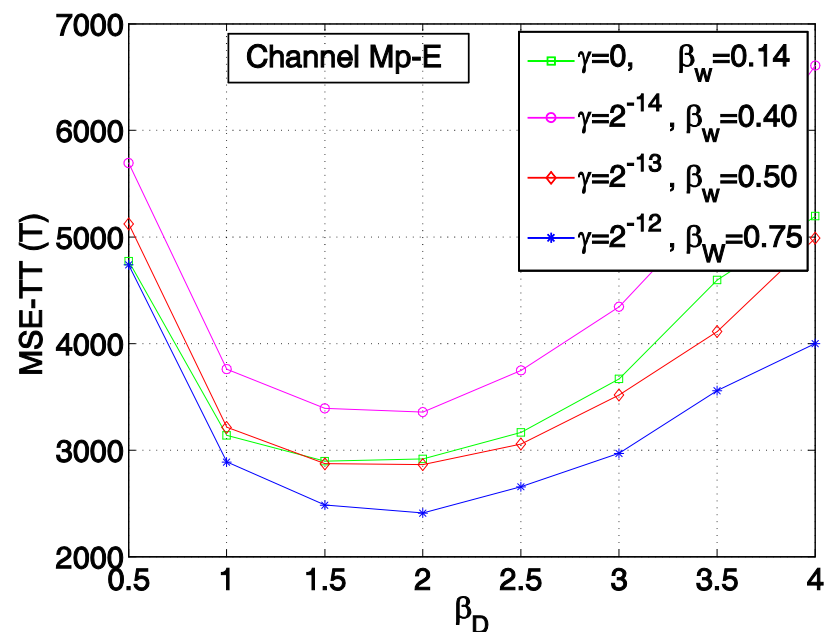
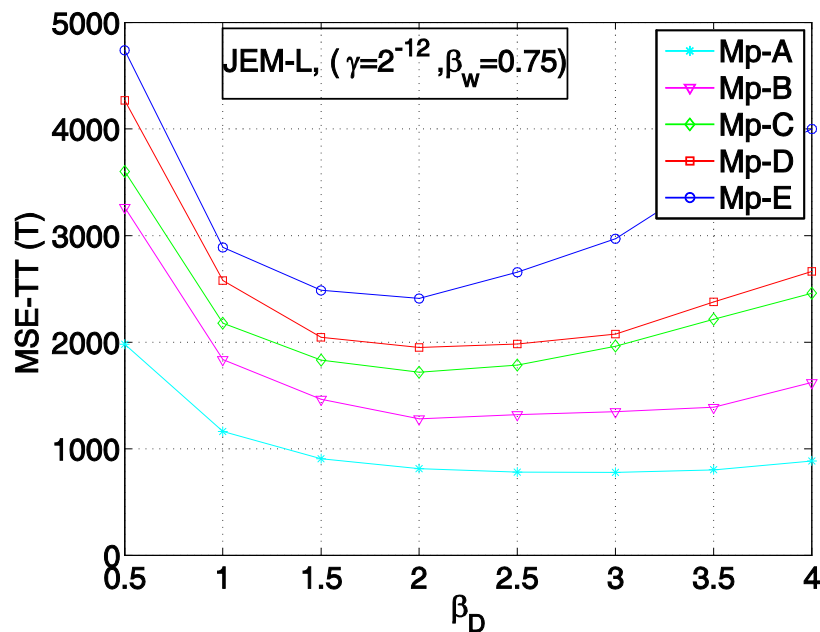


Test 5 : Uporedni test MSE konvergencije Soft-DFE i Hard-DFE rešenja sa 16-,32-QAM: Beta-W=1.0 i Beta-D={12.0, 10.0}, SNR=25 dB. Hard-DFE je SO-DFE realizovan sa T/2-FSE.

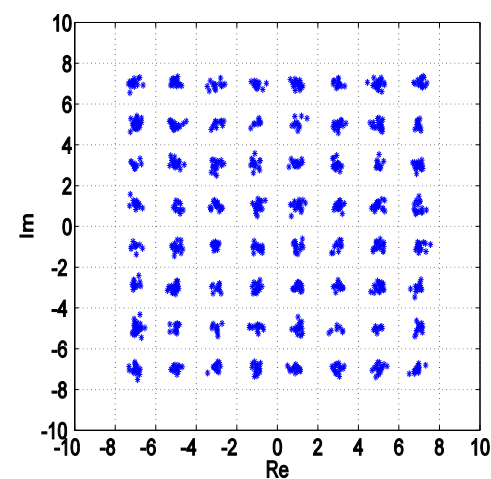
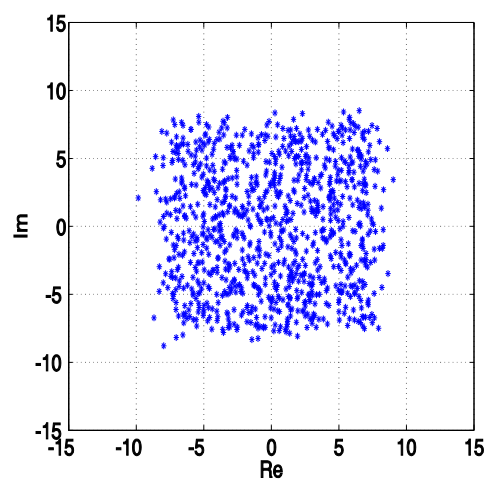
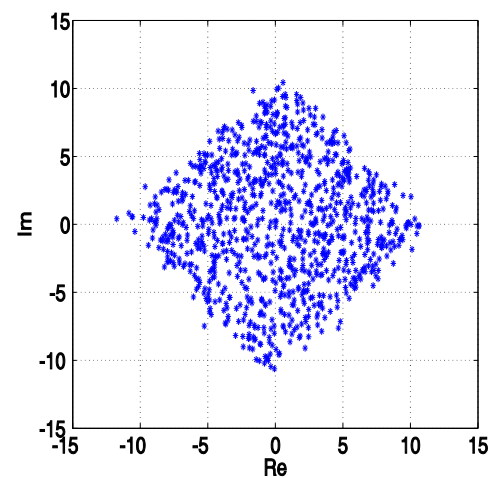
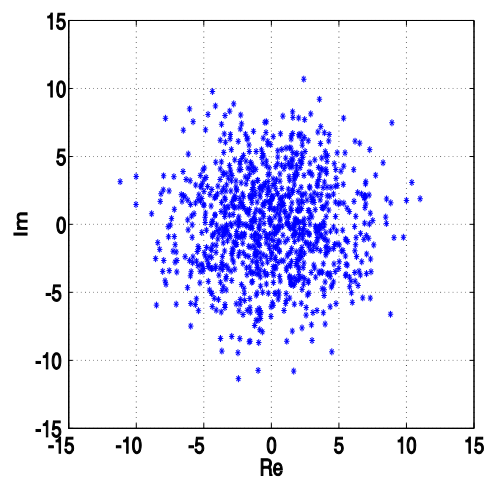
Rezultat 2: Soft-DFE za 64-QAM sa beliteljem koji koristi JEM-W sa leaky regulaciom. JEM kriterijum sa leaky regulaciom rasta norma koeficijenata.

$$J_{JEM-L}(\mathbf{b}_B) = J_{JEM}(\mathbf{b}_B) - \gamma \|\mathbf{b}_B\|^2 \quad \gamma \|\mathbf{b}_B\|^2 \ll J_{JEM}(\mathbf{b}_B)$$

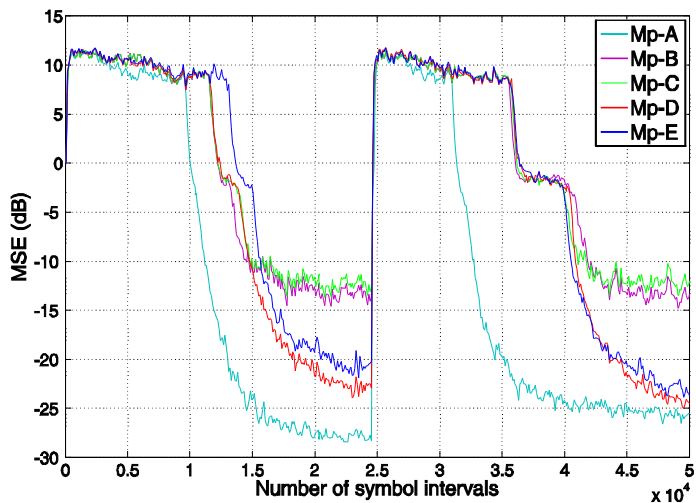
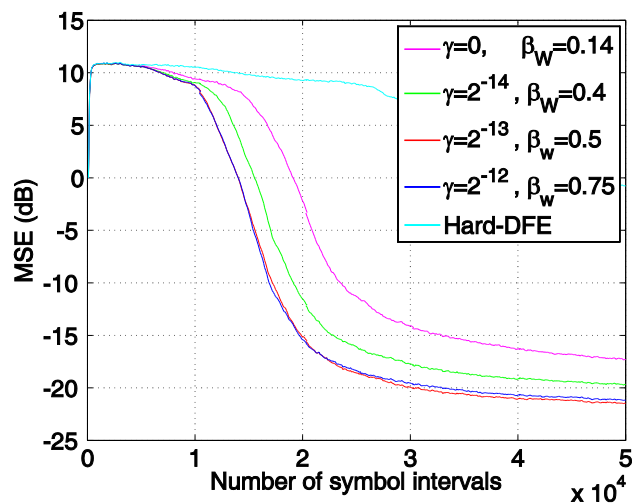
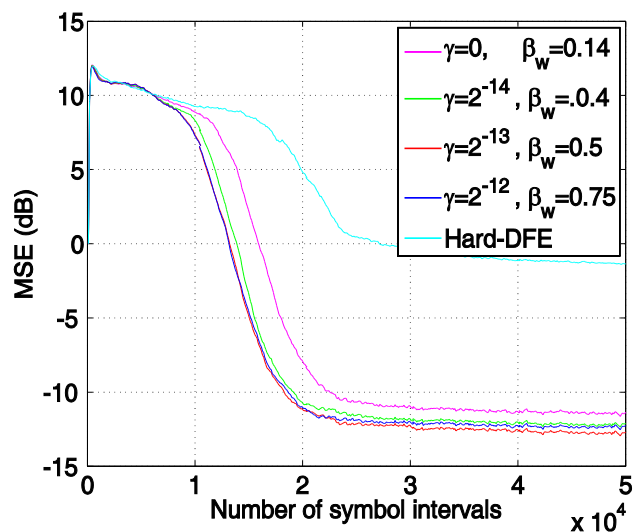
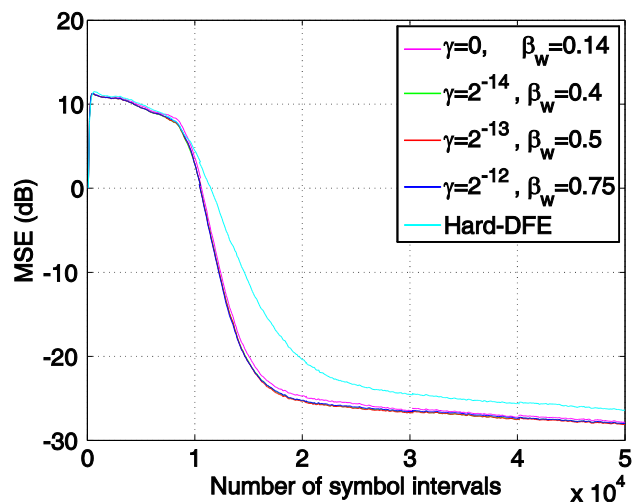
$$b_{j,n+1} = b_{j,n} - \gamma b_{j,n} - \mu_W u_n \left(1 - \beta_W |u_n|^2\right) u_{n-j}^*$$



MSE-TT: trajanje mekog prelaznog režima (između pragova MTL1 i MTL2) kao mera trajanja oporavka ekvalizatora iz stanja propagacije grešaka. Estimirana vrednost nagiba Beta-D=1.95.



64-QAM signal na izlazu Soft-DFE u vremenskom prozoru trajanja 1000 T u karakterističnim fazama konvergencije, Mp-C, SNR=30 dB: (a) početak blind mode, (b) kraj blind moda, MTL1=8 dB, (c) kraj prelaznog režima, MTL2= -2.1 dB, (d) stacionarno stanje u režimu praćenja.



**Finalni test za Soft-DFE sa 64-QAM: provera uticaja nagiba Beta-W na brzimu konvergencije i rezidualnu MSE i komparacija Soft-DFE sa Hard-DFE, Mp-(A,C,E), SNR=30 dB.
Ponašanje Soft-DFE u slučaju pojave destruktivnog faznog džitera trajanja 500 T, kanal Mp-E.**

Rezultat 3: belitelj spektra sa adaptivnim faktorom curenja, adaptacija zasnovana na "punish/award" heuristici.

$$\mathbf{b}_{n+1} = \mathbf{b}_n - \gamma_n \mathbf{b}_n - \mu_W u_n (1 - \beta_W |u_n|^2) u_{n-j}^*$$

$$\tilde{u}_n = x_n - \mathbf{b}_{n+1}^T \mathbf{u}_n$$

$$e_n^{VL} = \tilde{u}_n (1 - \beta_W |\tilde{u}_n|^2) \text{ a posteriori error for } \gamma > 0$$

$$e_n^W = \tilde{u}_n (1 - \beta_W |\tilde{u}_n|^2) \text{ a posteriori error for } \gamma = 0$$

if $e_n^{VL} > e_n^W$ than

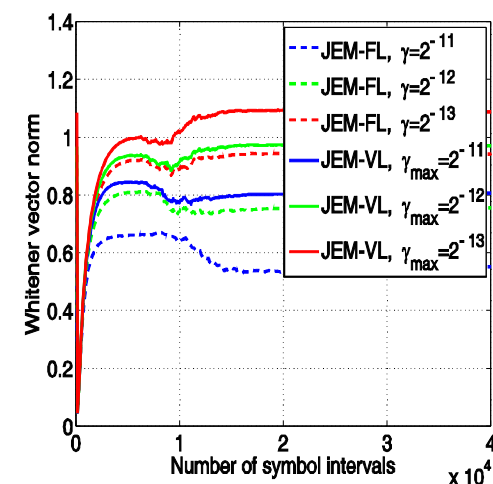
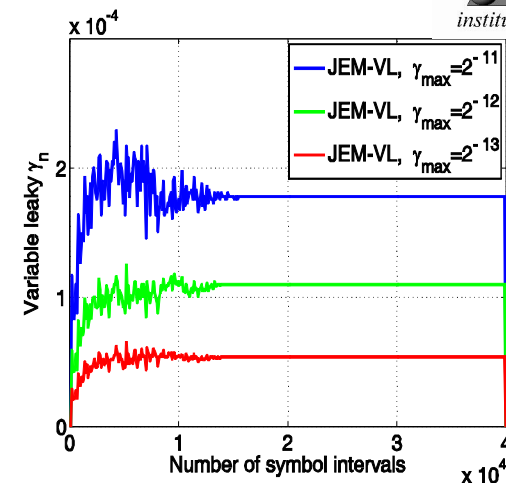
$$\text{set } m_{n+1} = \max(m_n - l_d, 0)$$

else

$$\text{set } m_{n+1} = \min(m_n + l_u, M)$$

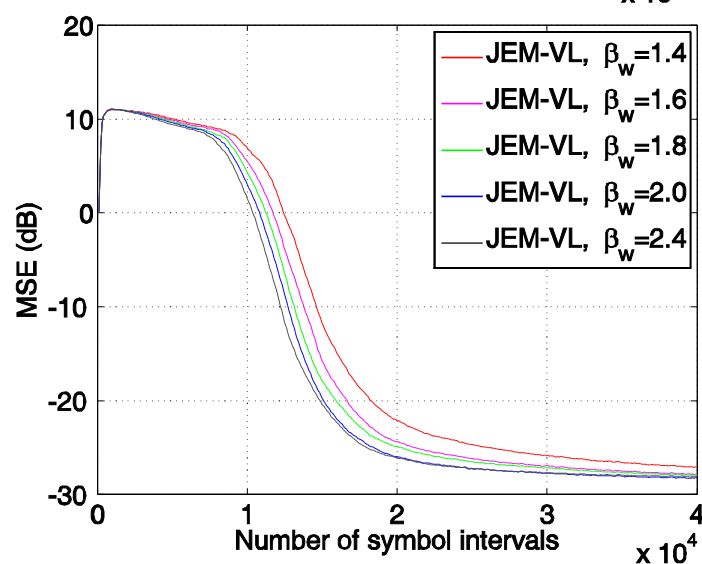
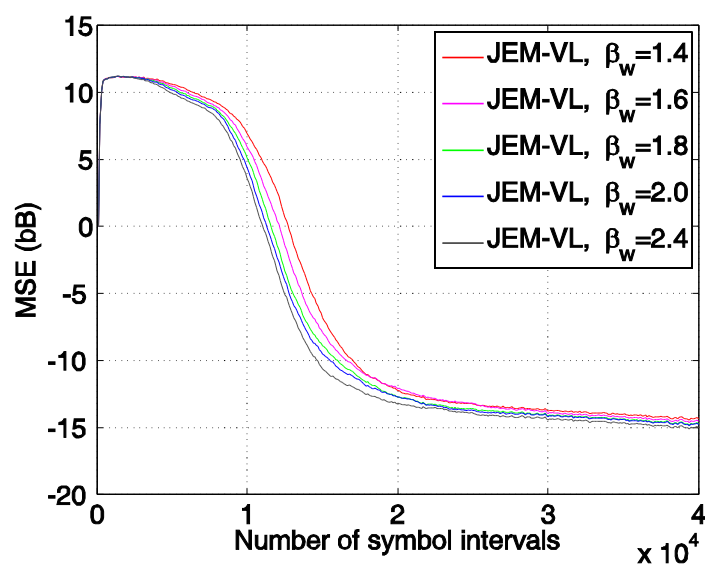
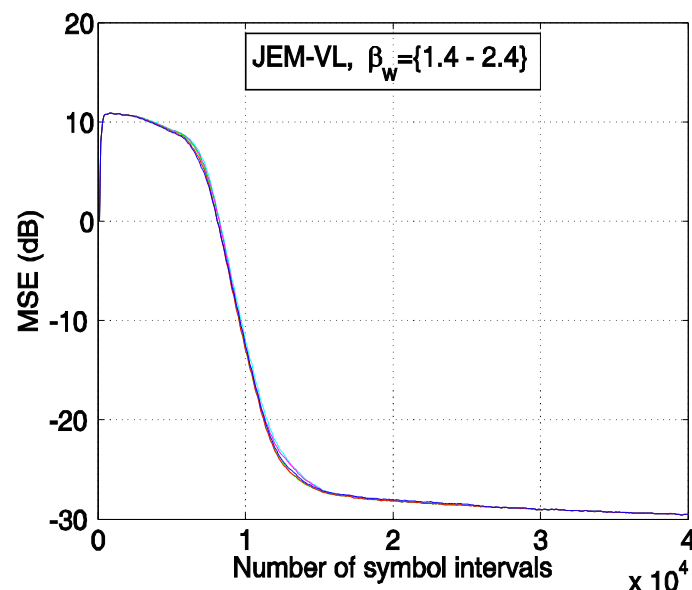
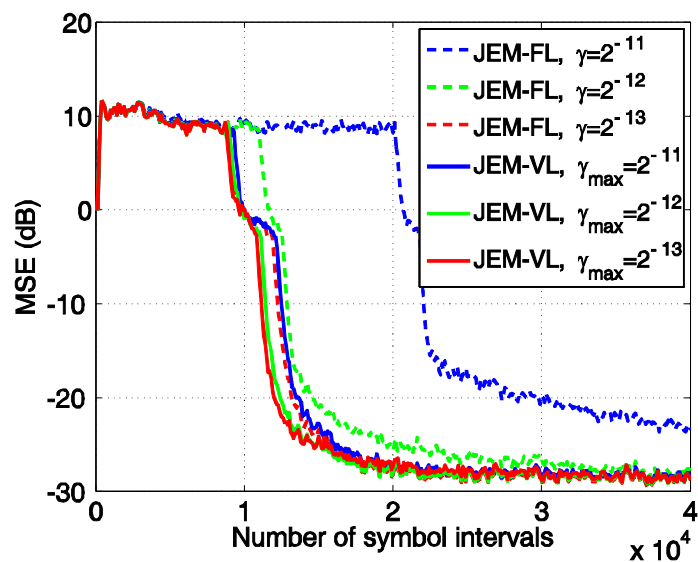
end if

$$\gamma_n = f(m_n) = \gamma_{\max} (m_n / M)$$

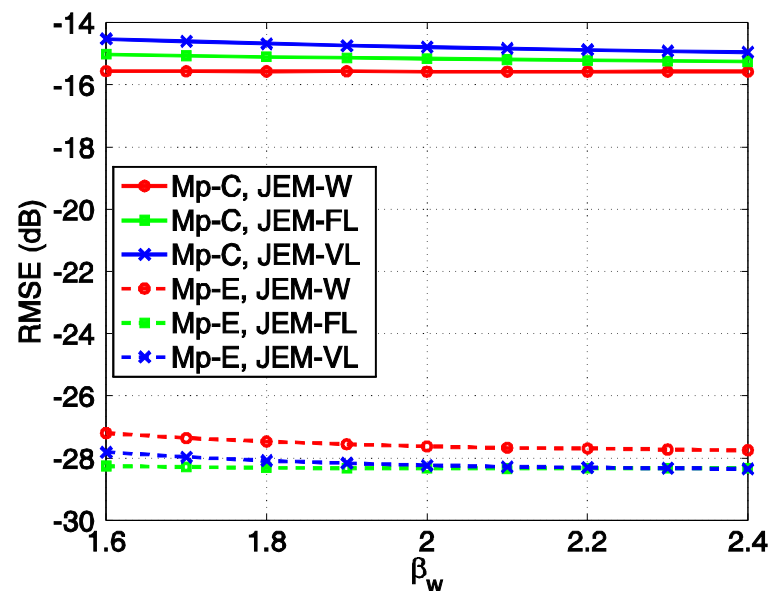
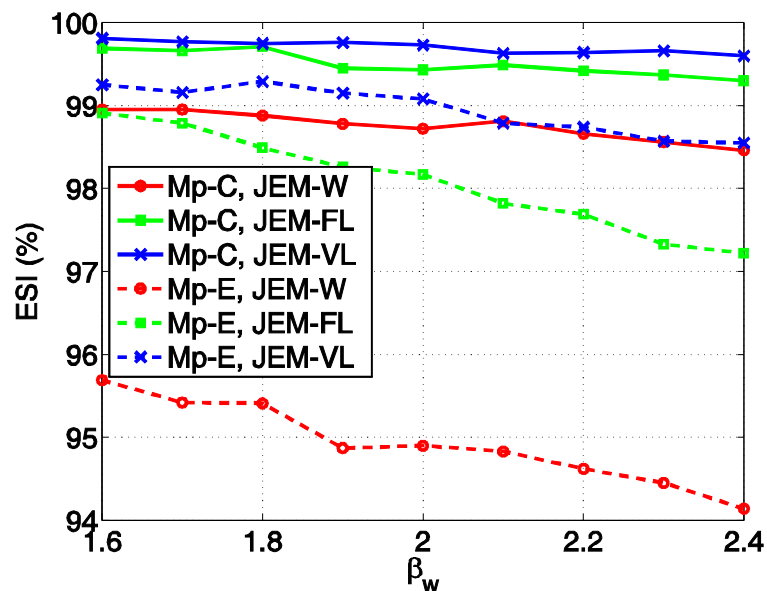


Varijacija faktora curenja u odnosu na njegovu maksimalnu vrednost i uticaj istog na norm belitelja, 64-QAM, Mp-E, SNR=30 dB.

[14] Kamenetsky, M., & Widrow, B. (2004). "A Variable Leaky LMS Adaptive Algorithm", in *Proc. Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers*, vol.1, (pp. 125-126).



Komparacija uticaja JEM-FL (fixed leaky) i JEM-VL (variable leaky) belitelja na MSE konvergenciju. Analiza uticaja nagiba Beta-W na konvergenciju u slucaju JEM-VL sa Gama-max=2E(-11).

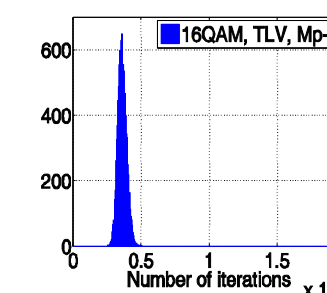
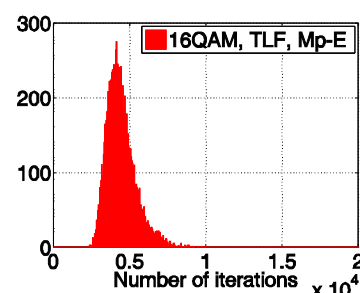
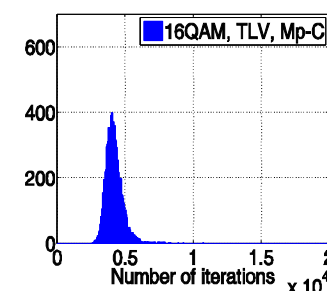
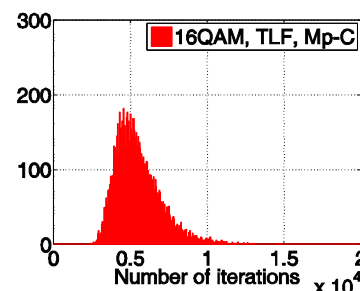
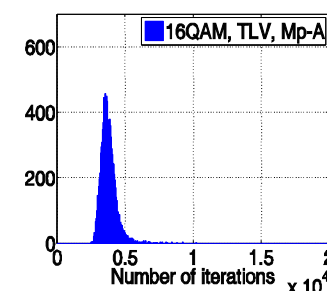
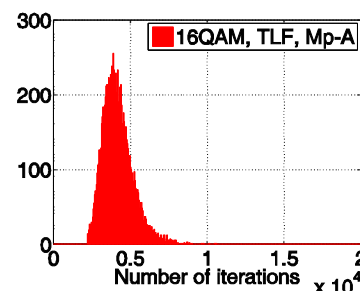
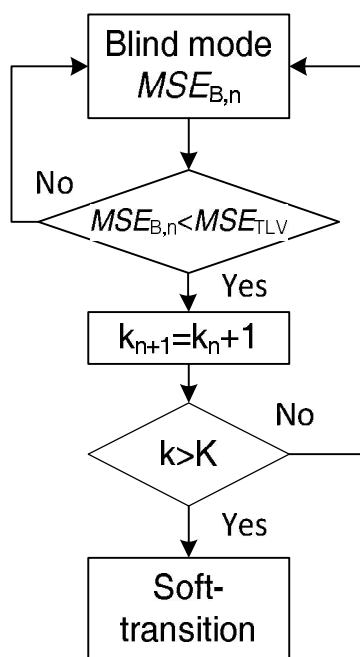


Rezultati mernja uspešnosti ekvalizacije (ESI) i rezidualne MSE (RMSE) u stacionarnom režimu za tri tipa belitelja, JEM-W (no leaky), JEM-FL (fixed leaky) i JEM-VL (variable leaky), u zavisnosti od nagiba Beta-W; Monte Karlo testovi sa 10000 trčanja za 64-QAM, Mp-(A,C,E), SNR=30 dB.

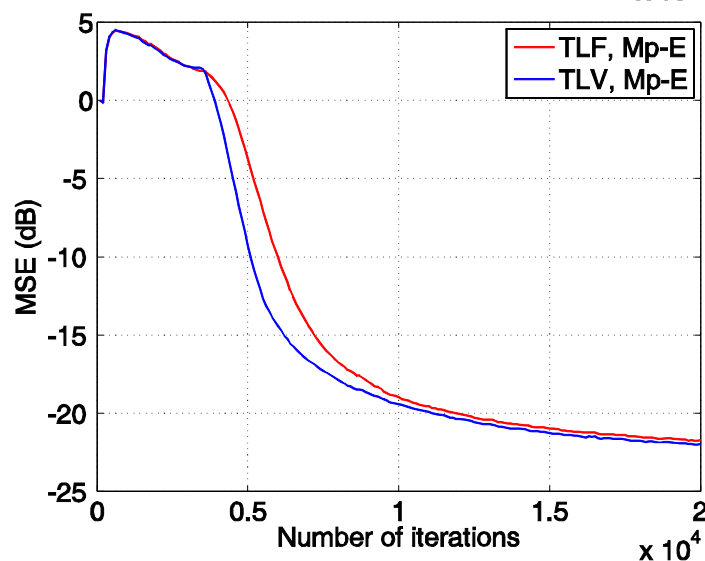
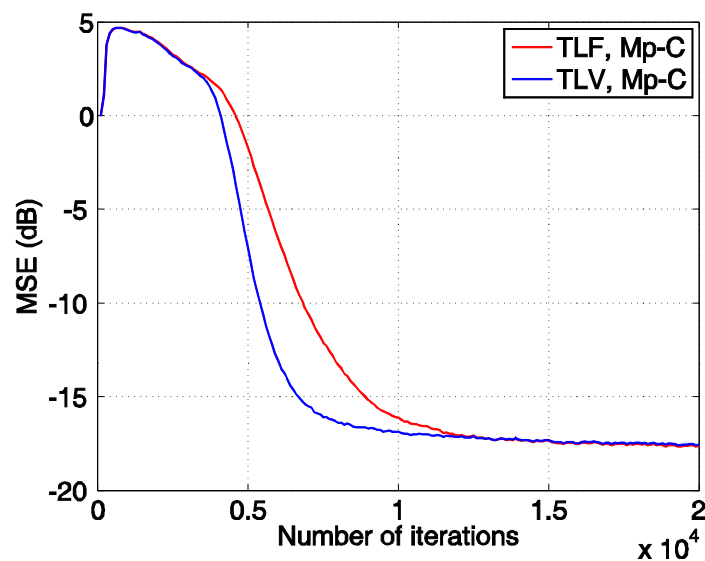
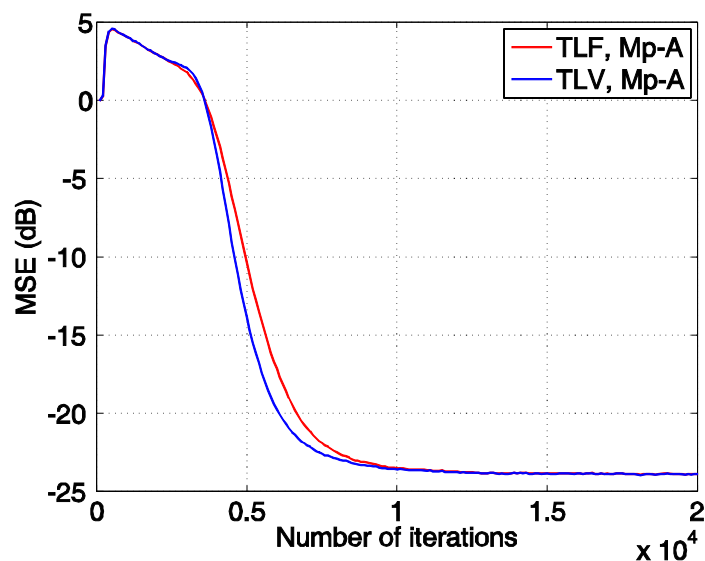
Rezultat 4: Kontrola adaptacije strukture i kriterijuma optimizacije Soft-DFE zasnovana na promenljivom pragu MTL1.

$$MSE_{B,n} = \lambda \cdot MSE_{B,n-1} + (1 - \lambda) \left(|y_n| - \sqrt{R_C} \right)^2$$

$$MSE_{TLV} = MSE_{TL} - S(e_{1,n+1}^{VL} + e_{2,n+1}^{VL})$$

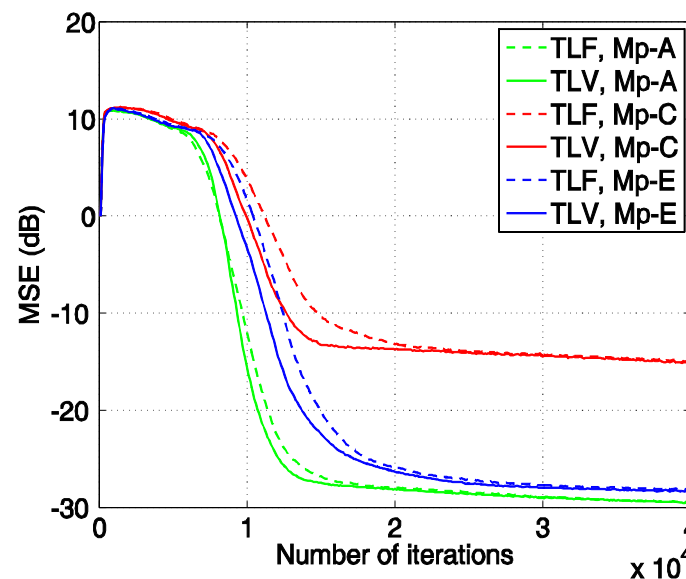
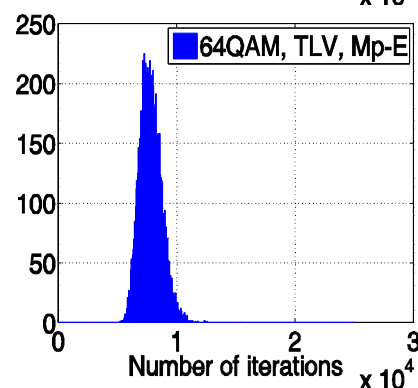
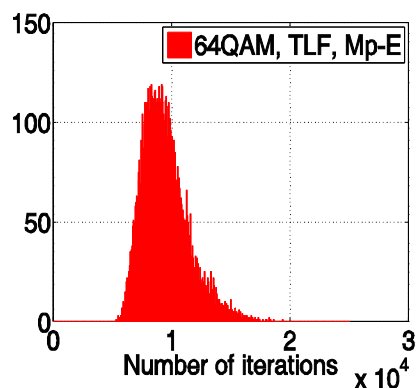
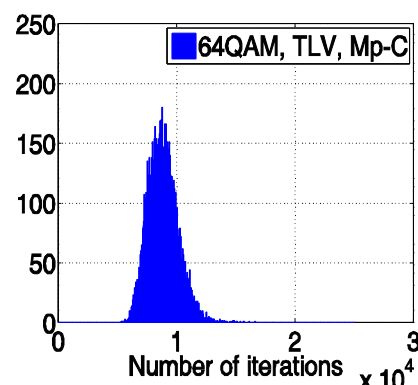
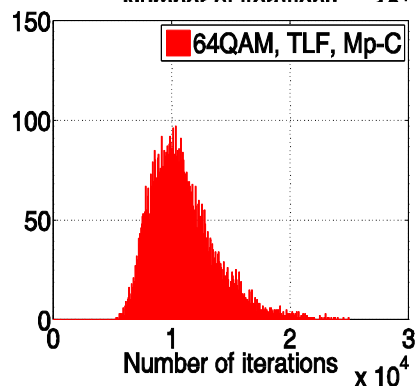
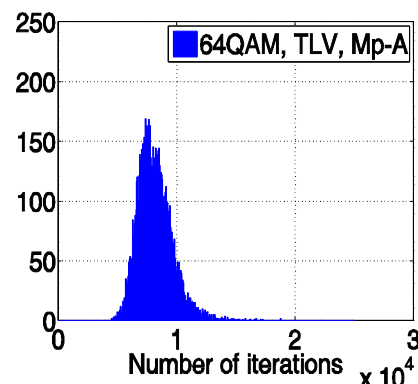
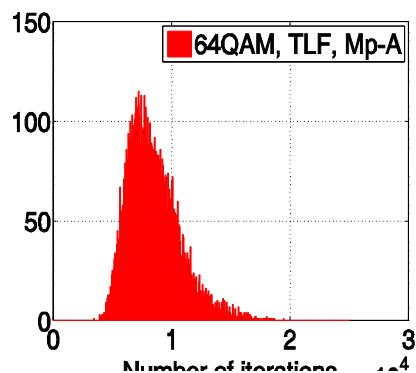


Histogram raspodele gustine verovatnoće trajanja blind režima : za konstantan (TLF) i promenljiv (TLV) prag transformacije Soft-DFE iz blind u soft režim rada; 16-QAM, Mp-(A,C,E), SNR=25 dB.



Channel	Mp-A	Mp-C	Mp-E
ESI : TLF	99.92	99.87	98.94
ESI: TLV	99.94	99.90	99.20
STD: TLF	984	1456	951
Mean: TLF	4179	5487	4441
STD: TLV	573	633	324
Mean: TLV	3773	4193	3605

Poređenje brzine konvergencije Soft-DFE sa fiksnim (TLF) i promenljivim (TLV) pragom prelaza iz blind u soft režim rada; 16-QAM, Mp-(A,C,E), SNR=25 dB.

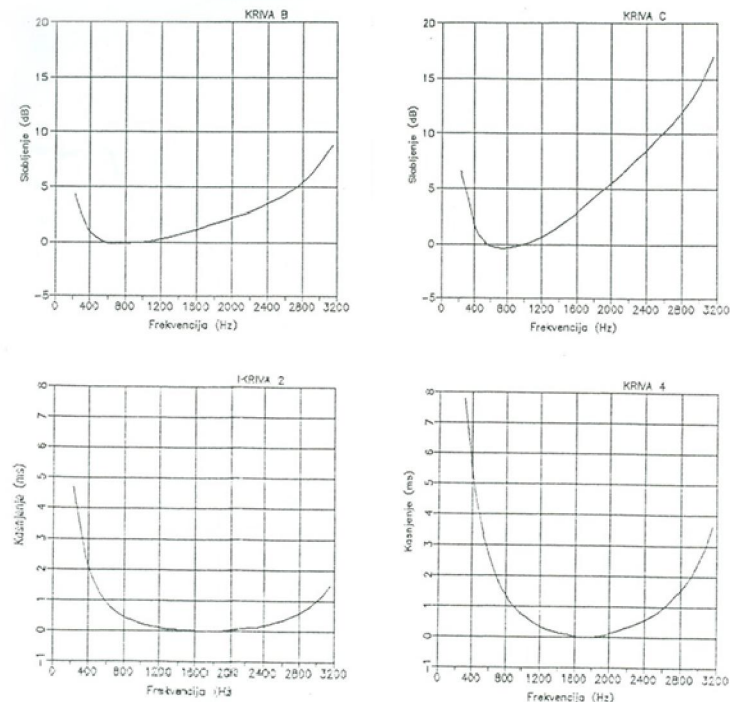
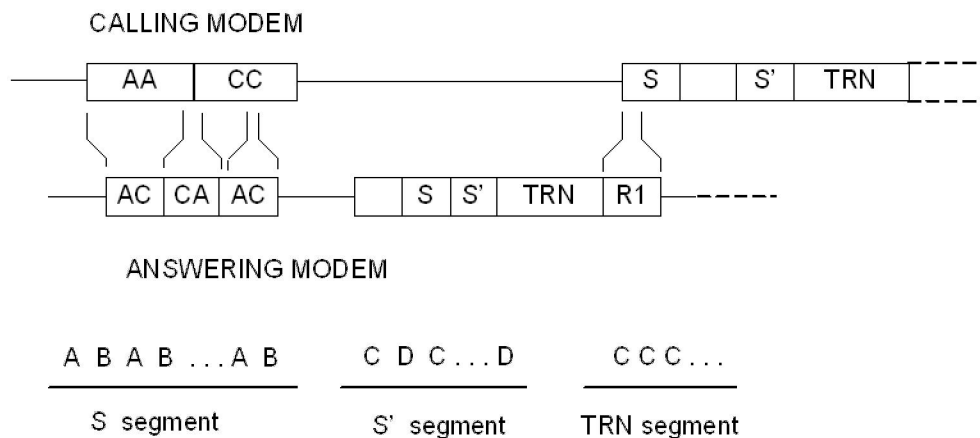


Channel	Mp-A	Mp-C	Mp-E
ESI : TLF	100	99.50	98.40
ESI: TLV	100	99.66	98.10
STD: TLF	2229	2731	1934
Mean: TLF	8495	1093	9441
STD: TLV	1469	1286	920
Mean: TLV	8161	8854	7804

Poređenje brzine konvergencije Soft-DFE sa fiksnim (TLF) i promenljivim (TLV) pragom prelaza iz blind u soft režim rada; 64-QAM, Mp-(A,C,E), SNR=30 dB.

Preliminarna komparacija brzine konvergencije linearnog T/2-FSE ekvalizatora sa treningom (rešenje primenjeno u modemu V.32) i blind Soft-DFE: koliko smo blizu praktičnoj primeni blind ekvalizacije?

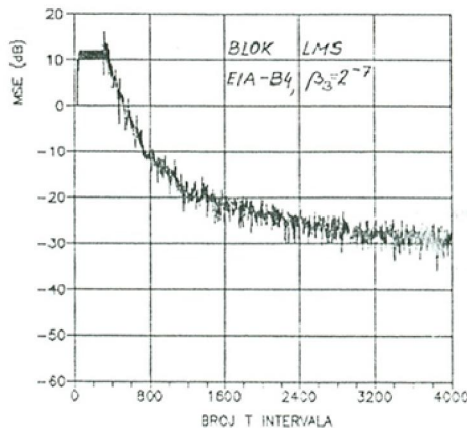
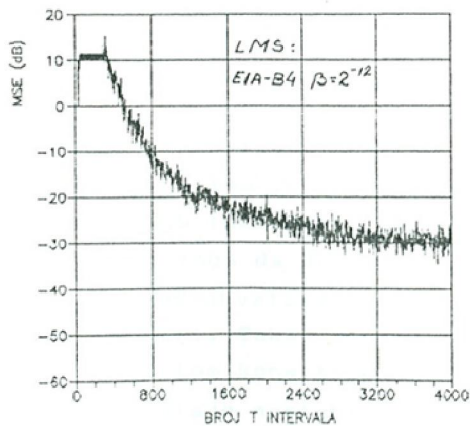
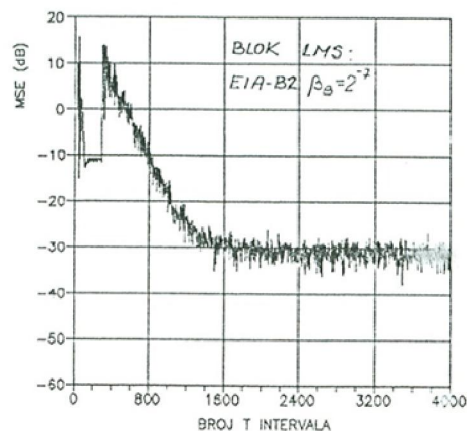
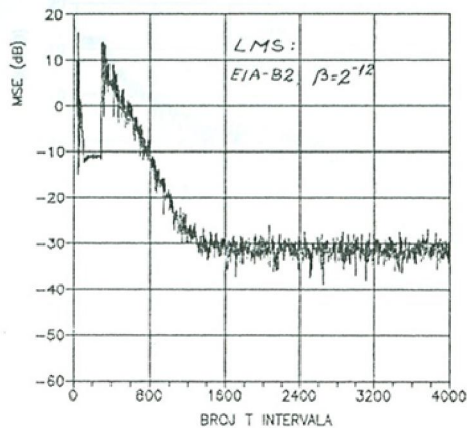
V.32 ekvalizator je LE T/2-FSE sa rasponom 24 T i estimatorom faze nosioca koji je sličan sa rešenjem koje je primenjeno u Soft-DFE. Predviđeno trajanje TRN sekvence za trening LE T/2-FSE ekvalizatora i kola za poništavanje signala eha iznosi od 1280 do 8912 T intervala. Karakteristike slabljenja i grupnog kašnjenja voice-band kanala primenjene u simulatoru V.32 modema.



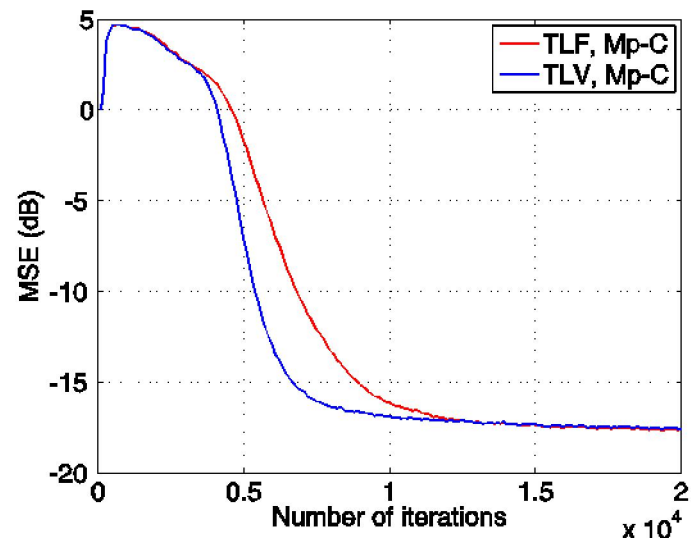
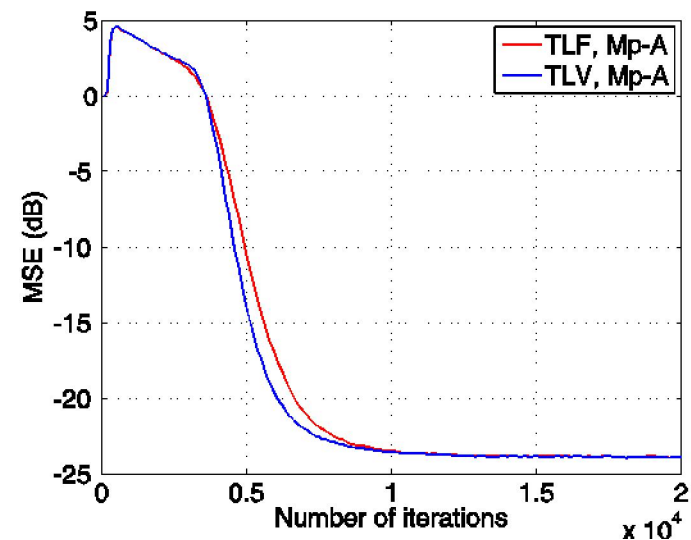
S1.4.2-Karakteristike kanala [7]

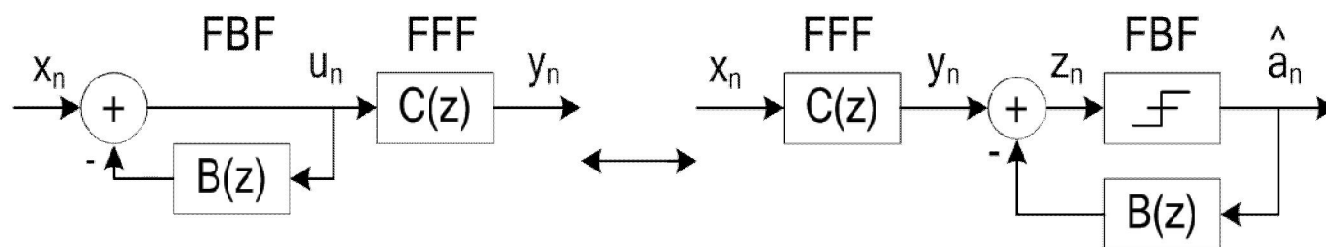
Komparacija brzine konvergencije V.32 ekvalizatora i blind Soft-DFE za 16-QAM:

- V32: T/2-FSE, LMS algoritam, kanal EIA-B2
- Soft-DFE: Rezultat 4.



S1.4.3-Eksperiment A





Zaključak sa komentarom o problemima praktične primene blind ekvalizacije:

1. Osnovni nedostatak Self-Optimized DFE šeme proističe iz činjenice da je utemeljena na teoriji po kojoj beskonačno dugački MMSE-LE i MMSE-DFE ekvalizatori dele iste komponente koje, u frekvencijskom domenu, mogu biti faktorizovane na all-pole ekvalizator amplitude i ekvalizator faze pri čemu prvi kompenzira deo transfer funkcije kanala sa minimalnom a drugi sa maksimalnom fazom. U slučaju praktičnog DFE ekvalizatora, sa filtrima konačne dužine, ova teorija se ne može primeniti u potpunosti zato što između linearnog all-pole filtra (belitelja spektra) koji deluje u blind režimu i nelinearnog FBF filtra (ekvalizatora) koji deluje u decision-directed režimu postoji strukturna neusklađenost u smislu da poslednji, generalno, nije filter sa minimalnom fazom.

Na osnovu izvršenih istraživanja i uporedne analize performansi originalnog SO-DFE (Labat et al. (1998)) i inoviranog Soft-DFE rešenja (Krstić (2009-2016)) može se zaključiti sledeće:

- Soft-DFE je robusniji od SO-DFE u odnosu na neusklađenost koja postoji između vektora koeficijenata belitelja ostvarenog u blind modu i vektora koeficijenata koji FBF filter očekuje na početku rada u decision-directed modu pod kontrolom MMSE kriterijuma.
- Robustnost Soft-DFE šeme je rezultat primene JEM algoritma koji u blind režimu efikasno estimira nule u spektru prijemnog signala a zatim, u prelaznom režimu, obezbeđuje meku konvergenciju vektora koeficijenata u pravcu MMSE rešenja eliminišući pri tome propagaciju grešaka.

2. Kometa: problemi u primeni blind ekvalizacije i nekoliko realizacija

- nedovoljno razumevanje značaja blind ekvalizacije
 - nedovoljna istraženost publikovanih rešenja (kriterijumske funkcije/ algoritmi) u pogledu stabilnosti konvergencije kao i značajna kompleksnost njihove implementacije
 - neadekvatna brzina konvergencije u odnosu na vremensku varijaciju statističkih parametara kanala
-
- High-definition television (HDTV), Grand Alliance (1993), FCC-standard realizovan sa blind DFE-CMA, HDTV je postala raspoloživa u USA 1998.
 - SO-DFE, DSP implementacija, rešenje razvijeno za podvodnu akustičku komunikaciju, Francuska 1998.
 - Pokušaji da definiše standard za xDSL prenos po bakarnoj parici (T1: 1.544 Mbit/s) sa blind ekvalizatorom, primena u oblasti point-to-multipoint prenosa/ broadcast servisi, 2002.
 - Primena u oblasti vojnih komunikacija je uvek aktuelna.

[15] V. R. Krstić, M. Stojanović, "Digital Subscriber Line Technology: Network Architecture, Deployment Problems and Technical Solutions", invited paper, Proceedings TELFOR 2000, Beograd, Serbia, str. 38-45, Nov. 2000.

