

Primena finog odlučivanja kod dekodovanja MTR kodova na kanalima za magnetski zapis

Nikola Đurić, član, IEEE, Vojin Šenk, član, IEEE

Sadržaj - U radu su predstavljene dve novorazvijene tehnike dekodovanja *maximum transition run* (MTR) kodova principom finog odlučivanja. Analizirane su performanse pojedinih tehnika u kombinaciji MTR koda sa zaštitnim *low-density parity-check* (LDPC) kodom, na kanalima za magnetsko memorisanje informacija, sa posebnim osvrtom na model kanala sa dve staze za zapisivanje i dve glave za čitanje. U modelu je korišćena idealna E²PR4 ekvalizacija staza, adekvatna za sisteme sa visokom gustinom magnetskog zapisa.

Keywords — MTR kodovi, LDPC kodovi, modulaciono kodovanje, sistemi magnetskog zapisa sa više staza, dekodovanje finim odlučivanjem.

I. UVOD

PARALELNO sa razvojem digitalnih računarskih sistema, javila se i potreba, moglo bi se reći neutojiva, za sistemima sa digitalnim memorisanjem informacija. Prve arhitekture računarskih sistema ranih 50-tih godina 20. veka, bile su okrenute u to vreme postojećim oblicima tehnologija za memorisanje informacija, kao što su bušene kartice i magnetsko memorisanje razvijeno za audio zapis.

U narednom periodu dolazi do razvoja novih tehnologija za smeštanje podataka kao što su: brze poluprovodničke memorije razvijene za sam procesor, magnetski čvrsti disk (*hard-disc drive*) koji obezbeđuje brz pristup velikoj količini podataka, optički i magnetski disk kao ulazno-izlazni uređaj računara i magnetske trake razvijene za potrebe arhiviranja podataka.

Uređaji sa tehnologijom magnetskog memorisanja, odnosno magnetskim zapisom, mogu se sresti svakodnevno i na svakom koraku. Korisnici svoje zabavne i privatne sadržaje čuvaju u digitalnom formatu, pri čemu neprestano raste interesovanje za uređajima sa povećanim memorijskim prostorom. Ovim se stvara realna pretpostavka da će u narednih 5 do 10 godina prosečno domaćinstvo sadržati 10 do 20 magnetskih diskova u različitim primenama [1].

Analitičari koji prate oblast magnetskog zapisa procenili su da će magnetski diskovi namenjeni potrošačkoj elektronici u 2008. godini, dostići 40% svih isporuka magnetskih diskova [1], što je izuzetan rast u odnosu na 15% ostvaren u 2004. godini. U odnosu na magnetske diskove namenjene personalnim računarima, gde su im performanse ključne, diskovi namenjeni potrošačkoj elektronici kao osnovni zahtev imaju veoma visok kapacitet smeštanja podataka.

N. Đurić je sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, Srbija (e-mail: ndjuric@uns.ac.rs, telefon: +381 21 485 2579).

V. Šenk je sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, Srbija (e-mail: ram_senk@uns.ac.rs).

Moderni sistemi za magnetsko memorisanje sastoje se od magnetskog medijuma na koji se vrši zapis informacija, induktivne glave za zapisivanje i sve prisutnijeg magnetorezistivnog senzora za detekciju zapisa.

U sistemima za magnetsko memorisanje uvodi se pojam *magnetskog kanala*, sa ciljem da se egzaktno opiše proces zapisivanja i čitanja informacija sa magnetskog medijuma. Operacije koje se obavljaju u kanalu uključuju: sinhronizaciju, ekvalizaciju, detekciju podataka, modulaciono kodovanje/dekodovanje, kao i kontrolu grešaka.

Kako tehnologija magnetskog zapisa sve više sazreva, modeli kanala postaju sve složeniji i unapređeniji, dostižući tačku gde koriste skoro iste ili čak i komplikovanije algoritme za obradu signala, kodovanja i modulaciju, kao i bilo koji drugi telekomunikacioni kanal.

Kao svoj osnovni doprinos, ovaj rad predstavlja poboljšanja u tehnikama modulacionog kodovanja, prvenstveno dekodovanja *maximum transition run* (MTR) kodova [2], principom finog odlučivanja, u arhitekturi sistema za magnetski zapis naredne generacije koji koriste više staza za zapisivanje i više glava za čitanje podataka [3].

U radu su predstavljene dve potpuno nove tehnike dekodovanja MTR kodova: prva, MAP algoritam, u okviru kog su razvijene i dve podvarijante [4], i druga, princip finog odlučivanja u logičkim funkcijama, implementiran u okviru realizacije MTR dekodera upotrebom logičkih kola [5].

Obe tehnike su bazirane na principu finog odlučivanja [6] i otvaraju mogućnosti kombinovanja MTR kodova sa drugim kodovima, pogotovo zaštitnim kodovima, kako u jednostavnim tako i u iterativnim šemama dekodovanja.

Kratak istorijat magnetskog zapisa, počevši od ranih radova Oberlin Smitha iz 1878. godine, preko entuzijazma Valdemara Poulsena, pa sve do današnjih dana i modernih sistema, predstavljen je u odeljku II i III. Modeli magnetskog kanala, kao i analiza njihovog kvadratnog euklidskog rastojanja, predstavljeni su u odeljku IV. Detalji pojedinih tehnika dekodovanja MTR kodova dati su u odeljku V, da bi se u VI analizirale njihove performanse u jednostavnoj serijskoj vezi LDPC – MTR kodova. Rezultati simulacija dati su u odeljku VII, a zaključak rada u odeljku VIII.

II. KRATAK ISTORIJAT MAGNETSKOG ZAPISA

Tehnologija magnetskog zapisa pojavljuje se u vremenu velikih tehnoloških otkrića. U toku 1877. godine, Thomas Edison predstavlja zvučni fonograf (*phonograph*), uređaj namenjen snimanju i reprodukciji zvuka.

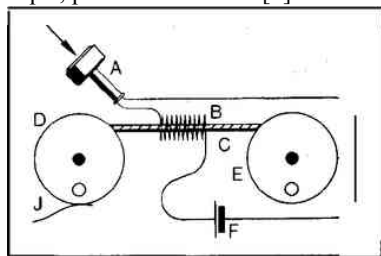
Prvobitni fonograf je konstruisan tako da se vibracije ocrtavaju na valjku obloženom tankom metalnom folijom.

Da bi se zvuk zabeležio operater bi izgovarao rečenicu u levak i istovremeno okretao ručicu. Zvučne vibracije su se prenosile preko membrane i igle na tanku metalnu foliju.

Oberlin Smith je bio zaokupljen problemom zašumljenog signala koji je proizvodio fonograf i hteo je da izbegne mehaničke izvore šuma i distorzije. Želeo je da pronađe novi medijum za snimanje, kao i novi način snimanja.

On je u svojim eksperimentima zaključio da namotaj žice u obliku kalema može da izvršiti magnetizaciju magnetskog medijuma, kao što je na primer čelična žica, tako da magnetski uzorci duž medijuma imitiraju zvučne vibracije izgovorenih reči. Snimljeni uzorci bi se mogli reprodukovati koristeći isti kalem koji bi se kretao iznad medijuma i indukovao napon na svojim krajevima. Napon bi se kasnije iskoristio da se proizvede zvuk.

U toku 1878. godine, Smith objavljuje memorandum iznoseći svoje prve ideje o magnetskom zapisu, da bi 1888. godine u časopisu *Electrical World* opisao sistem za magnetski zapis, prikazan na slici 1 [7].



Slika 1. Originalni crtež Oberlina Smitha iz 1888. godine

Izgovorene reči bi se preko mikrofona transformisale u odgovarajući električni signal (A) i preko kalema (B) snimale u formi magnetizacije na nosač zvuka (C), čeličnu žicu ili neki drugi magnetski medijum, smešten na transportne točkove (D i E). Nažalost, Smith nikada nije uspeo da komercijalizuje ovu ideju, koja će se pokazati kao prelomna u tehnologiji zvučnog zapisa.

U toku 1898. godine, Valdemar Poulsen je uspeo tamo gde Smith nije. Poulsen je konstruisao prvi funkcionalni uređaj sa magnetskim zapisom, nazvan telegrafon. Laboratorijski prototip se sastojao od čelične žice, razapete između klinova, na koju su snimane zvučne vibracije koristeći elektromagnetsku glavu sa magnetskim jezgrom. Kasnije, kao medijum za snimanje se koristila žica namotana u spiralu.

Nažalost, Poulsenov telegrafon nije bio predodređen za komercijalni uspeh, iako je njegov prototip bio zvezda Pariskog salona 1900. godine. Tada je privukao mnogo pažnje, ali je izostao željeni komercijalni uspeh.

Godine prvih komercijalnih uspeha magnetskog zapisa bile su praćene upotrebom magnetskog medijuma u obliku čelične žice, a kasnije i traka od čelika, koje su imale određeni nivo mehaničke otpornosti na uvijanje da bi se očuvao kvalitet snimljenog zvuka.

Fritz Pflumer, austrijski inženjer, u toku 1928. godine razvija novi tip medijuma za snimanje koji će napraviti revoluciju u procesu magnetskog zapisa. Njegov pionirski rad se sastojao u oblaganju papira vrlo tankim slojem metalnog praha i primene ovog procesa u proizvodnji magnetskih traka. Gvožđe je bilo prvi upotrebljeni magnetski

materijal na papirnoj osnovi.

Magnetske memorijske trake su dominirale dugi niz godina, pri tome su omogućavale smeštanje podataka pogodno samo za grupnu obradu (*batch processing*). Ovaj način je bio nezgrapčan, ograničavajući i usporavajući mnoge željene aplikacije za trenutnu obradu podataka.

U potrazi za odgovarajućim medijumom za magnetsko memorisanje, dizajnerski tim Reynolda Johnsona iz IBM-ove eksperimentalne laboratorije, zaključio je da magnetske trake ne mogu da obezbede željeno vreme pristupa i odlučio se za jedan potpuno inovativan pristup - *rotirajući magnetski disk*.

Odluka je doneta uprkos činjenici da je neophodan značajan razvoj i mnoštvo novih otkrića da bi se ideja pretvorila u proizvod. Zaključak tima je bio da će rotirajući magnetski disk biti znatno ekonomičniji u pogledu dostupne površine i da će omogućiti brz pristup bilo kom delu.

IBM model 350 čvrsti disk obelodanjen je 1956. godine a sa isporukama se počelo u toku 1957. godine, kao čvrsti disk 305 RAMAC sistema. Dimenzija kao frižider, sa težinom od 227kg i sa ukupnim kapacitetom od svega 5MB, Model 350 čvrsti disk, bio je prvi komercijalno dostupni čvrsti disk. Minijaturno po sadašnjim standardima kapaciteta, u to vreme je bio dovoljno velik da napravi i demonstrira značajnu razliku u brzini kojom se podaci obrađuju.

Rastom popularnosti personalnih računara, pojavljuje se potreba za diskovima malih dimenzija. U toku 1979. godine, IBM predstavlja model 3310, sa diskom prečnika od 20,32 cm (8 in.), da bi 1980. godine Seagate Technology, isporučila model ST506, sa diskom prečnika od 13,335 cm (5.25 in.). Nedugo zatim, 1983. godine kompanija Rodime predstavlja čvrsti disk prečnika 8,89 cm (3.5 in.), a 1988. godine kompanija Prairietek disk prečnika od 6,35 cm (2.5 in.), koji je bio neophodan za tržište notebook računara.

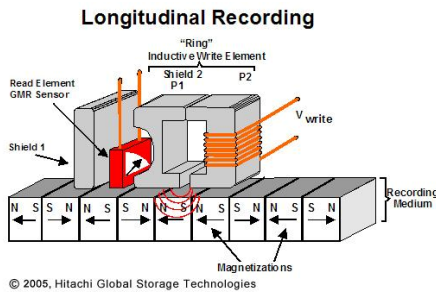
Kompanija Integral, 1992. godine predstavlja disk uređaj prečnika 4,572 cm (1.8 in.), a 1998. godine, IBM svoj čuveni Microdrive, sa diskom prečnika čitavih 2,54 cm (1 in.) i sa početnim kapacitetom od 170MB, a koji sada dostiže i 8GB [8]. Ovi uređaji pronalaze svoje mesto u potrošačkoj elektronici, kao što su video kamere i palm PC-jevi.

III. TIPOVI MAGNETSKOG ZAPISA

U industriji magnetskog zapisa uočava se trend smanjenja dimenzija magnetskih diskova, uz obavezno povećanje memorijskog kapaciteta, odnosno gustine zapisa. Većina skokova u povećanju gustine zapisa ostvarena je zahvaljujući smanjenju veličine osnovnih komponenti u sistemu za magnetski zapis, otkrivanju novih magnetskih materijala i boljem poznavanju fizičkih zakona u samom procesu magnetskog zapisa, kao i mogućnost njihovog boljeg modelovanja. Pored toga razvijaju se i nove tehnike zapisa.

A) Longitudinalni magnetski zapis

Do nedavno je u većini komercijalno dostupnih čvrstih diskova bila zastupljena tehnologija longitudinalnog magnetskog zapisa, gde je magnetizacija elementarnih domena paralelna ravni medijuma, kao što je prikazano na slici 2 (slika je preuzeta u neizmenjenom obliku iz [9]).



Slika 2. Princip longitudinalnog magnetskog zapisa

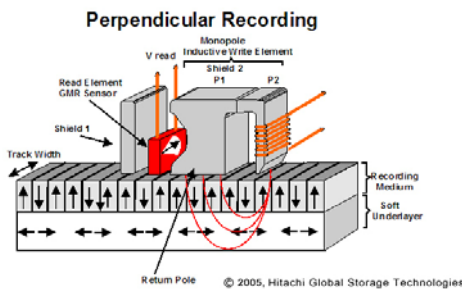
Induktivna glava za magnetski zapis predstavlja magnetsko kolo torusnog oblika. Ovaj tip magnetske glave je patentirao Eduard Schuller iz nemačke kompanije AEG, još davne 1933. godine, i od tada je ona korišćena za pisanje/čitanje u većini sistema sa magnetskim zapisom.

Osnovni princip rada i dizajn glave su se zadržali, ali se vremenom radilo na unapređivanju materijala od kojih je jezgro glave napravljeno. Paralelno se radilo na smanjenju dimenzija glave, što je bilo neophodno za visoke gustine zapisa. Nažalost, postoje naznake da će se rast gustine zapisa usporiti u narednom periodu, pogotovo u tehnologiji longitudinalnog zapisa, pošto smanjenjem veličine domena koji se magnetišu dolazi do pojave takozvanog *superparamagnetskog* efekta [10]. Smanjenje veličine domena, radi povećanja gustine zapisa, nije moguće do u beskonačnost, pošto domeni mogu spontano da izgube magnetizaciju, čak i pri maloj promeni sobne temperature.

B) Perpendikularni magnetski zapis

Teoretski, tehnologija perpendikularnog zapisa nudi povećanje jačine magnetskog polja za zapisivanje sa faktorom 2, u odnosu na longitudinalni zapis [11] i kandidat je za postizanje gustina od 1Tbit/in^2 [12].

Svojsvenost ove tehnologije je sama magnetizacija elementarnih magnetskih domena koja je normalna na površinu medijuma, kao što prikazano na slici 3 (slika je preuzeta u neizmenjenom obliku iz [9]).



Slika 3. Princip perpendikularnog magnetskog zapisa

Normalna magnetizacija medijuma postignuta je zahvaljujući dodatnom sloju, takozvanom *soft magnetic underlayer* (SUL) sloju, postavljenom ispod sloja na kom se vrši zapisivanje i koji u suštini predstavlja povratnu putanju za magnetski fluks glave za zapisivanje.

Na ovaj način je obezbeđeno da se magnetski medijum efektivno nalazi u tankom procepu između pola magnetske glave i SUL sloja, što nije bilo moguće kod longitudinal-

nog zapisa. Ovom konstrukcijom magnetsko polje koje vrši magnetizaciju medijuma je znatno većeg intenziteta, čime tehnologija perpendikularni zapis omogućava veće površinske gustine magnetskog zapisa.

IV. MODELOVANJE MAGNETSKOG KANALA

Sistem za magnetski zapis se može smatrati komunikacionim kanalom, gde se podaci zapisuju na magnetski medijum da bi se čitali u nekom kasnijem vremenskom periodu. U sistemu za magnetski zapis podataka, pojam kanala obuhvata fizičke elemente za memorisanje podataka, kao što su glave za čitanje i pisanje, potom propratnu elektroniku i mehaniku za pozicioniranje glava, sam medijum za zapisivanje i fizičko okruženje u kom oni postoje.

Thapar i Patel su pokazali da se za širok opseg linijske gustine logitudinalnog zapisa, koji je predmet istraživanja ovog rada, karakteristike magnetskog kanala mogu uspešno modelovati klasom *partial response* (PR) kanala definisanih prenosnim polinomom oblika

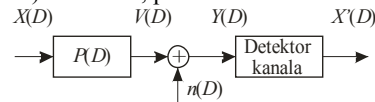
$$P(D) = (1 - D)(1 + D)^N, \quad (1)$$

gde je N nenegativan ceo broj [13]. PR modeli su široko usvojeni za opisivanje srednjih i visokih gustina zapisa, u kojima je *intersimbolska interferencija* (ISI) glavni ometajući faktor prilikom detekcije snimljene sekvence podataka

Povećanje površinske gustine magnetskog zapisa moguće je ostvariti povećanjem linijske gustine zapisa ili povećanjem radijalne gustine zapisa.

A) OTOH model kanala

U tradicionalnim sistemima za magnetsko memorisanje informacija uobičajeno je da se podaci zapisuju duž jedne staze a čitaju pomoću jedne glave za čitanje, pri čemu se takav zapis analitički modeluje takozvanim *one-track one-head* (OTOH) modelom, prikazanim na slici 4.

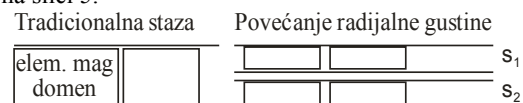


Slika 4. OTOH model kanala

Na slici je prikazan samo osnovni deo sistema koji modeluje magnetski kanal, pri čemu su sve sekvence podataka date u diskretnom D -transformacionom domenu.

B) TTH model kanala

Dodatni način za povećanje površinske gustine magnetskog zapisa jeste i deljenje klasičnih staza na više manjih [3], [14]-[15]. Time se na medijumu povećava broj staza, duž kojih je moguće zapisivati podatke, kao što je prikazano na slici 5.

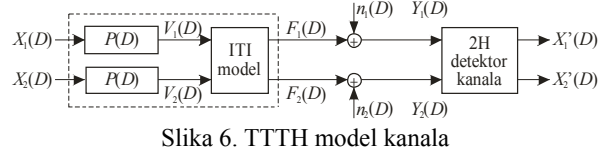


Slika 5. Povećanje radijalne gustine zapisa

Nažalost, u ovom modelu dolazi do indukovanja dodatnog signala, usled magnetskih tranzicija u domenima su-

sednih staza. Ovaj signal predstavlja neželjeni signal na izlazu senzora za čitanje, a poznat je i kao efekat interferencije između staza (*inter-track interference* – ITI).

U radu je razmatran sistem sa dve staze za zapisivanje i dve glave za čitanje, opisan takozvanim *two-tracks two-heads* (TTTH) modelom kanala. Pretpostavka je da je prisutna aditivna, linearna i simetrična interferencija između susednih staza [14]-[17], u modelu prikazanom na slici 6.



Slika 6. TTTH model kanala

Veoma važan pokazatelj performansi sistema sa treliš detektorom jeste i *minimalno kvadratno euklidsko rastojanje* (*m.e.r.*), koje predstavlja meru različitosti između dve ulazne sekvence čije zašumljene verzije detektor može veoma lako pomešati.

C) Kvadratno euklidsko rastojanje OTOH kanala

Pretpostavimo da su sekvence $\underline{x}_1 = \{x_{1i} \in [-1,+1]\}$ i $\underline{x}_2 = \{x_{2i} \in [-1,+1]\}$, gde je $-\infty < i < \infty$, dve proizvoljne sekvence na ulazu u kanal. Definišimo u D -transformacionom domenu ulaznu sekvencu greške kao

$$e_x(D) = \frac{1}{2}[X_1(D) - X_2(D)] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} e_{xi} D^i, \quad (2)$$

pri čemu e_{xi} uzima vrednosti iz skupa $[-1, 0, +1]$. Izlazna, odnosno filtrirana, sekvencu greške iz kanala je sada

$$e_v(D) = \frac{1}{2}[V_1(D) - V_2(D)] = P(D) \cdot e_x(D) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} e_{vi} D^i. \quad (3)$$

Performanse detektora kanala u velikoj meri su određene ulaznim sekvencama grešaka e_x , koje rezultuju malim kvadratnim euklidskim rastojanjem kanala datim kao [18]

$$d^2(e_x) = \|e_v(D)\|^2 = \sum_{i=-\infty}^{\infty} (e_x(D)P(D))_i^2 = \sum_{i=-\infty}^{\infty} (e_{vi})^2, \quad (4)$$

a naročito sa

$$d_{\min}^2 = \min_{e_x \neq 0} (d^2(e_x)), \quad (5)$$

takozvanim *m.e.r.* kanala.

U radu je analiziran slučaj kanala opisanog polinomom (1), za koji je $N = 3$, poznat i kao E²PR4 kanala. Može se videti da za ovaj kanal *m.e.r.* iznosi 6, a uzorak greške koji je odgovoran za to je $\pm[+1-1+1]$ [18].

D) Kvadratno euklidsko rastojanje TTTH kanala

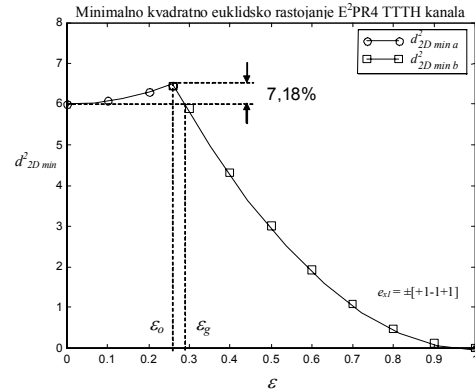
Kvadratno euklidsko rastojanje TTTH modela magnetnog kanala dato je izrazom

$$d_{2D}^2(e_{x1}, e_{x2}) = (1 + \varepsilon^2) [d_1^2(e_{x1}) + d_2^2(e_{x2})] + 4\varepsilon \sum_{i=-\infty}^{\infty} e_{v1i} e_{v2i}, \quad (6)$$

gde je na osnovu izraza (4), $d_k^2(e_{xk})$ kvadratno euklidsko rastojanje prouzrokovano ulaznom sekvencom greške e_{xk} , u odgovarajućoj stazi k [15], [19].

Detaljna analiza kvadratno euklidsko rastojanje TTTH

kanala, datog izrazom (6), može se pronaći u [15] i [19], a njihovi najvažniji rezultati predstavljeni su na slici 7.



Slika 7. *m.e.r.* E²PR4 TTTH kanala u zavisnosti od ITI

Verovatnoća greške detektora TTTH kanala određena je sa dva regiona krive *m.e.r.* u zavisnosti od ITI [15], pri čemu u regionu $0 < \varepsilon < \varepsilon_0 = 0,268$, postoji monotoni rast *m.e.r.*, sa porastom nivoa ITI, dok u regionu $\varepsilon > \varepsilon_0$ dolazi do znatne degradacije. Povećanje nivoa interferencije između staza kanala omogućava kontinualni rast *m.e.r.* u prvom regionu, čime se dobija 7,18% veće kvadratno euklidsko rastojanje za vrednosti ITI $\varepsilon = \varepsilon_0$, u odnosu na slučaj kada nema ITI.

Prisustvo, u opštem slučaju, neželjene ITI kompenzira se rastom *m.e.r.* TTTH kanala za vrednosti ITI $0 < \varepsilon < \varepsilon_g = 0,293$. U navedenom opsegu ITI, detektor TTTH kanala funkcioniše skoro isto kao i da nema interferencije između staza. Na ovaj način upotrebom TTTH kanala uticaj susedne staze na detekciju se eliminiše do određene mere, a uz to se znatno povećava i površinska gustina zapisa.

V. MTR KODOVI I TEHNIKE ZA NJIHOVO DEKODOVANJE

Maximum transition runlength (MTR) kodovi predstavljaju modulacione kodove koji unose ograničenja u sekvence podataka, da bi se poboljšale karakteristike kvadratnog euklidskog rastojanja magnetskog kanala [20].

MTR kodovi su dizajnirani za magnetske kanale visoke gustine, opisane E²PR4 modelom, u kojima eliminišu dominantni uzorak greške $\pm[+1-1+1]$, odnosno barem jednu od dve informacione sekvence koje ovu grešku izazivaju.

Do sada se dekodovanje MTR kodova baziralo na principu takozvanog grubog odlučivanja, gde se dobijala samo informacija da li je bit 0 ili 1. U modernim tehnikama dekodovanja poželjno je da dekodirer pored grube odluke daje i informaciju o pouzdanosti same odluke. Ovaj vid dekodovanja naziva se još i dekodovanje na bazi finog odlučivanja i izuzetno je važan u takozvanom iterativnom procesu, gde dva dekodera međusobno razmenjuju informacije i gde mala pouzdanost odluke dekodireru dodatno ukazuje na moguću grešku u prethodnom koraku.

Neka slučajna promenljiva x_i uzima vrednost $[-1, +1]$ sa određenim verovatnoćama $p(x_i = +1)$ i $p(x_i = -1)$, i definišimo tada *log-likelihood* odnos (LLR) kao

$$L(x_i) = \ln \frac{p(x_i = +1)}{p(x_i = -1)}. \quad (7)$$

$L(x_i)$ se naziva i *fina vrednost (soft-value)* binarne slučajne promenljive x_i , pri čemu njen znak predstavlja grubu odluku o vrednosti promenljive, dok njena apsolutna vrednost $|L(x_i)|$ predstavlja pouzdanost odluke.

A) Dekodovanje na bazi grubog odlučivanja

U osnovi, MTR kodovi mapiraju jedan skup sekvenci u neki drugi skup [2]. Da bi se ovo mapiranje obavilo neophodno je da na početku MTR dekodera dobije informaciju da li je određeni bit 0 ili 1, bez obzira koliko da je ta informacija pouzdana. Na osnovu finih vrednosti pojedinih bita, dobijenih od detektora kanala, formira se ulazna informacija bita za MTR dekodera na sledeći način

$$[L(x_i) < 0 \Rightarrow x_i = -1] \wedge [L(x_i) > 0 \Rightarrow x_i = +1], \quad (8)$$

na osnovu koji MTR dekodera vrši dekodovanje informacione sekvence, koristeći tabelu dekodera [2].

Ovaj način dekodovanja MTR kodova naziva se dekodovanje na bazi grubog odlučivanja i u velikoj meri se oslanja na pouzdanost odlučivanja prethodnog detektora.

Zbog ovog razloga, dekodovanje na bazi grubog odlučivanja postaje ograničavajući faktor primene MTR kodova, tako da i pored sjajnih modulacionih karakteristika ovi kodovi ne nalaze svoje pravo mesto u modernim sistemima sa magnetskim zapisom, baziranim na finom odlučivanju.

B) MAP algoritam sa finim odlučivanjem

Maximum a posteriori (MAP) algoritam za dekodovanje MTR kodova principom finog odlučivanja, računa *a posteriori* fine vrednosti bita na osnovu MTR kodnih reči i finih vrednosti dobijenih od detektora kanala [4].

A priori informacije algoritma su fine vrednosti na izlazu detektora kanala $L_{in}(i)$ definisane kao (7), gde $i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$, pri čemu je N dužina kodne reči MTR koda. Na osnovu njih MAP algoritam daje *a posteriori* informacije $L_{out}(k)$, gde $k \in \{0, 1, \dots, M-1\}$, pri čemu je M dužina izlazne reči MTR dekodera.

Osnovna verzija MAP algoritma radi sa *a priori* verovatnoćama $q_0(i)$ i $q_1(i)$ dobijenim na osnovu (7) kao

$$q_b(i) = p(n_i = b) = \frac{e^{(-1)^b L_{in}(i)/2}}{e^{L_{in}(i)/2} + e^{-L_{in}(i)/2}}. \quad (9)$$

gde b predstavlja vrednost određenog bita, $b \in \{0, 1\}$.

Da bi pojednostavili matematičko izvođenje MAP algoritma definišimo skupove

$$N_{set} = \{\underline{n} = (n_0 n_1 \dots n_{N-1}) \in Z_2^N \mid n_i \in (0,1)\}, \quad (10)$$

za kodne reči implementiranog MTR koda i

$$M_{set} = \{\underline{m} = (m_0 m_1 \dots m_{M-1}) \in Z_2^M \mid m_k \in (0,1)\}, \quad (11)$$

koji predstavlja sekvence na izlazu MTR dekodera. Proces dekodovanja MTR koda svodi se na jednostavno mapiranje između sekvenci i može se opisati kao funkcija MTR^{-1}

$$MTR^{-1} : \underline{n} \in N_{set} \rightarrow \underline{m} \in M_{set}. \quad (12)$$

Dodatno, definišimo i podskup

$$N_{\{b,k\} subset} = \{\underline{n} \in N_{set} \mid \underline{m} = MTR^{-1}(\underline{n}) \wedge m_k = b\}, \quad (13)$$

$b \in \{0, 1\}$, a sam podskup sadrži one kodne reči za koje MTR^{-1} mapiranje daje u izlaznoj sekvenci MTR dekodera,

na određenom mestu k , da je bit m_k jednak vrednosti b .

Ova dva podskupa, na primeru $k = 2$, su prikazana su u tabeli 1 [4].

$N_1(k=2)_{subset}$		$N_0(k=2)_{subset}$	
$n_0 n_1 n_2 n_3 n_4$	$m_0 m_1 m_2 m_3$	$n_0 n_1 n_2 n_3 n_4$	$m_0 m_1 m_2 m_3$
0 0 0 1 0	0 0 1 0	1 0 0 0 0	0 0 0 0
1 0 0 0 1	0 0 1 1	0 0 0 0 1	0 0 0 1
0 0 1 1 0	0 1 1 0	0 0 1 0 0	0 1 0 0
1 0 1 1 0	0 1 1 1	0 0 1 0 1	0 1 0 1
0 1 0 1 0	1 0 1 0	0 1 0 0 0	1 0 0 0
1 0 0 1 0	1 0 1 1	0 1 0 0 1	1 0 0 1
1 0 1 0 0	1 1 1 0	0 1 1 0 0	1 1 0 0
1 0 1 0 1	1 1 1 1	0 1 1 0 1	1 1 0 1

Tabela 1. Primer podskupova za MAP dekodovanje

A posteriori verovatnoća bita, na poziciji k , u izlaznoj sekvenci MTR dekodera se može dobiti kao

$$q_{out b}(k) = p(m_k = b) = \sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\} subset}} \prod_{i=0}^{N-1} p(n_i = b) = \sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\} subset}} \prod_{i=0}^{N-1} q_b(i), \quad (14)$$

gde $b \in \{0, 1\}$. Izraz (14) podrazumeva da su biti statistički nezavisni, što se ne može smatrati u potpunosti tačnim. Nažalost, ova pretpostavka je neophodna da bi se uopšte dobio upotrebljiv algoritam dekodovanja.

A posteriori log-likelihood vrednosti $L_{out}(k)$ računaju se kao

$$L_{out}(k) = \ln(q_{out 1}(k)/q_{out 0}(k)) = \ln q_{out 1}(k) - \ln q_{out 0}(k). \quad (15)$$

U ovom trenutku treba skrenuti pažnju da bit na proizvoljnoj poziciji k , u izlaznoj sekvenci MTR dekodera poseduje finu vrednost $L_{out}(k)$, pri čemu njen znak predstavlja grubu odluku o bitu, a moduo $|L_{out}(k)|$ predstavlja pouzdanost same odluke. Na taj način MAP algoritam omogućava dekodovanje finim odlučivanjem.

B) log MAP varijanta MAP algoritma

A priori verovatnoće bita (9) mogu se izraziti i kao

$$q_b(i) = \left(e^{(-1)^{b+1} L_{in}(i)/2} \right) / F(i), \quad (16)$$

gde $b \in \{0, 1\}$, pri čemu je $F(i) = e^{L_{in}(i)/2} + e^{-L_{in}(i)/2}$.

Zamenom izraza (16) u (14) dobija se

$$q_{out b}(k) = \sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\} subset}} \prod_{i=0}^{N-1} \frac{e^{(-1)^{b+1} L_{in}(i)/2}}{F(i)}. \quad (17)$$

Imenilac izraza (17) ne zavisi od kodnih reči u podskupu $N_{\{b,k\} subset}$, pošto se dobija na osnovu *a priori* informacija dobijenih od detektora kanala. Zato se može izvući ispred sume čime se dobija

$$q_{out b}(k) = \left(\sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\} subset}} \prod_{i=0}^{N-1} e^{(-1)^{b+1} L_{in}(i)/2} \right) / \prod_{i=0}^{N-1} F(i). \quad (18)$$

Dodatno, imenilac ne zavisi ni od bita na poziciji k , u izlaznoj sekvenci MTR dekodera, i ima istu vrednost bez obzira da li se računa verovatnoća 0 ili 1 izlaznog bita.

A posteriori verovatnoće bita $q_{out\ 1}(k)$ i $q_{out\ 0}(k)$ pojavljuju se samo u izrazu (15) i to kao razlika dva logaritma, tako da se mogu zameniti izrazom

$$\begin{aligned} r_b(k) &= \sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\}, subset}} \prod_{i=0}^{N-1} e^{(-1)^{b+1} L_{in}(i)/2} \\ &= \sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\}, subset}} e^{\sum_{i=0}^{N-1} (-1)^{b+1} L_{in}(i)/2}, \end{aligned} \quad (19)$$

bez promene a posteriori log-likelihood vrednosti $L_{out}(k)$.

U ovom momentu $L_{out}(k)$ se može izračunati kao

$$L_{out}(k) = \ln(r_1(k)/r_0(k)) = \ln r_1(k) - \ln r_0(k). \quad (20)$$

Pored log MAP verzije algoritma razvijena je i jednostavnija suboptimalna verzija, nazvana max-log MAP [4].

C) max-log MAP varijanta MAP algoritma

Za razvoj max-log MAP verzije algoritma koristi se log-sum-exponential (lsexp) operator [4], [21], definisan kao

$$lsexp(a_1, a_2, \dots, a_p) = \ln \left(\sum_{i=1}^p e^{a_i} \right). \quad (21)$$

Time se a posteriori verovatnoće MTR dekodera (19) mogu izraziti u logaritamskoj formi kao

$$\begin{aligned} R_b(k) &\equiv \ln r_b(k) = \ln \left(\sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\}, subset}} e^{\sum_{i=0}^{N-1} (-1)^{b+1} L_{in}(i)/2} \right) \\ &= lsexp \left(\sum_{\underline{n} \in N_{\{b,k\}, subset}} \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^{b+1} L_{in}(i)/2 \right), \end{aligned} \quad (22)$$

dok se a posteriori log-likelihood vrednosti $L_{out}(k)$ mogu izraziti u obliku

$$L_{out}(k) = R_1(k) - R_0(k). \quad (23)$$

Operator lsexp() se može aproksimirati [4], [21], kao

$$lsexp(a_1, a_2, \dots, a_p) \approx \max(a_1, a_2, \dots, a_p), \quad (24)$$

pri čemu max() vraća vrednost najvećeg argumenta.

Koristeći ovu aproksimaciju, izlazne a posteriori verovatnoće (22) mogu se napisati u obliku

$$R_b(k) \equiv \ln r_b(k) \approx \max_{\underline{n} \in N_{\{b,k\}, subset}} \left(\sum_{i=0}^{N-1} (-1)^{b+1} L_{in}(i)/2 \right), \quad (25)$$

formirajući na taj način max-log MAP verziju algoritma za dekodavanje MTR kodova principom finog odlučivanja.

D) Fino odlučivanje u logičkim kolima

Zbog jednostavnog mapiranja sekvenci, MTR kodovi se fizički mogu realizovati upotrebom osnovnih logičkih kola [2]. Može se lako pokazati da je u slučaju logičkog kola kojim se vrši komplement binarne promenljive (NOT circuit), a posteriori fina vrednost $L_{out}(x)$ oblika

$$L_{out}(\bar{x}) = \ln \frac{p(\bar{x}=0)}{p(\bar{x}=1)} = \ln \frac{p(x=1)}{p(x=0)} = -L_{in}(x), \quad (26)$$

što predstavlja jednostavnu propagaciju ulazne fine vrednosti kroz kolo. Na taj način logika kola za komplement, pored grube odluke daje i pouzdanost same odluke.

Isti princip se može ponoviti i u slučaju kola za „I“ lo-

gičku operaciju (AND circuit) [5], gde se dobija da je

$$L_{out}(x_1 \text{ AND } x_2) = \ln(e^{L_{in}(x_1)} + e^{L_{in}(x_2)} + e^{(L_{in}(x_1)+L_{in}(x_2))}), \quad (27)$$

pri čemu se podrazumeva statistička nezavisnost binarnih promenljivih x_1 i x_2 . Nažalost, ni ovde se statistička nezavisnost ne može uvek podrazumevati ali je ona neophodna da bi se dobio upotrebljiv metod finog odlučivanja.

U slučaju logičkog kola koje obavlja „ILI“ logičku operaciju (OR circuit) a posteriori fina vrednost $L_{out}(x)$ se dobija u obliku

$$L_{out}(x_1 \text{ OR } x_2) = -\ln(e^{-L_{in}(x_1)} + e^{-L_{in}(x_2)} + e^{-(L_{in}(x_1)+L_{in}(x_2))}), \quad (28)$$

pri čemu se statistička nezavisnost binarnih promenljivih takođe podrazumeva [5].

U slučaju kola koje obavlja logičko sabiranje po modulu dva (XOR circuit)

$$L_{out}(x_1 \text{ XOR } x_2) = \ln \frac{1 + e^{L_{in}(x_1)} e^{L_{in}(x_2)}}{e^{L_{in}(x_1)} + e^{L_{in}(x_2)}}, \quad (29)$$

podrazumevajući statističku nezavisnost [5], [6].

Fizička realizacija logaritamske i eksponencijalne funkcije, u digitalnom svetu, nije tako jednostavan zadatak. Pri tome, čak i da se to postigne, ovim se funkcijama ne može obezbediti jednostavno prostiranje finih vrednosti promenljivih kroz novoformirana logička kola.

E) Suboptimalno fino odlučivanje u logičkim kolima

Da bi se obezbedilo jednostavno prostiranje finih vrednosti, upotrebljene su aproksimacije (21) i (24) u logici rada osnovnih logičkih kola.

U slučaju „I“ logičke operacije dobijeno je sledeće

$$L_{out\ app}(x_1 \text{ AND } x_2) = \max[L_{in}(x_1), L_{in}(x_2)], \quad (30)$$

gde max() operator vraća vrednost većeg argumenta.

Ovom funkcijom se u znatnoj meri pojednostavljuje realizacija logike kola, kao i prostiranje finih vrednosti [5].

Jednostavna fizička realizacija logike finog odlučivanja „ILI“ logičko kolo moguća je upotrebom aproksimacije

$$L_{out\ app}(x_1 \text{ OR } x_2) = \min[L_{in}(x_1), L_{in}(x_2)], \quad (31)$$

gde min() operator vraća vrednost manjeg argumenta [5].

Na kraju, za kolo koje vrši logičko sabiranje po modulu dva, jednostavna fizička realizacija finog odlučivanja dobija se upotrebom sledeće aproksimacije

$$L_{out\ app}(x_1 \text{ XOR } x_2) = \text{sign}[L_{in}(x_1)] \cdot \text{sign}[L_{in}(x_2)] \cdot \min[L_{in}(x_1), L_{in}(x_2)], \quad (32)$$

gde operator sign() vraća znak argumenta, dok operator || daje apsolutnu vrednost argumenta [5], [6].

VI. LDPC – MTR SERIJSKA VEZA KODOVA

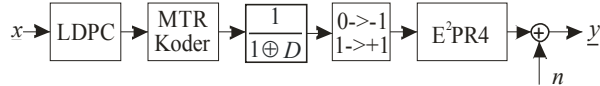
Dobre modulacione karakteristike MTR koda su odmah uočene ali i njegove slabe performanse kao zaštitnog koda, što je pored dekodovanja na bazi grubog odlučivanja proizvelo njegovu malu praktičnu upotrebljivost.

Bilo je jasno da MTR kod mora da se poveže sa nekim drugim kodom, pa su predloženi različiti pristupi povezivanja, od kojih navodimo samo neke: sa RLL kodom [22], sa nekim od zaštitnih kodova [23] i za ovaj rad veoma interesantnim low-density parity-check (LDPC) kodom [21].

U ovom radu je analiziran slučaj gde je LDPC kod postavljen kao spoljašnji zaštitni kod, a MTR, kao modulacioni unutrašnji kod, pri čemu se razmena finih vrednosti vrši od detektora kanala, kroz MTR dekodera, ka dekoderu LDPC koda i to u samo jednom smeru bez povratne grane.

A) LDPC – MTR kod na E^2PR4 OTOH kanalu

LDPC – MTR serijska veza kodova je razmatrana na E^2PR4 OTOH modelu kanala koristeći LDPC kod, kodne brzine $R = 0,96$ i $4/5$ MTR ($2, k = 8$) kod, u simulacionoj šemi prikazanoj na slici 8.



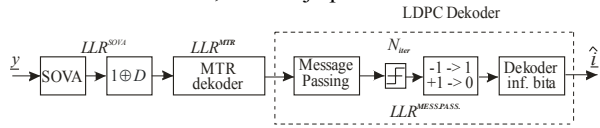
Slika 8. LDPC – MTR kod na E^2PR4 OTOH kanalu

LDPC kod dužine $N = 4732$ sa $M = 169$ bita za proveru parnosti i težinom pojedinih kolona 3, baziran je na Kirkmanovim sistemima [24].

U svim analizama i simulacijama koje slede, pretpostavljeno je da u sistemu deluje aditivni beli Gausov šum, pri čemu su odmerci šuma nekorelisani duž staze magnetskog kanala. Odnos signal/šum je definisan kao

$$SNR = 10 \log \left(\frac{E_b}{N_o} \right) = 10 \log \left(\frac{E_b}{2\sigma^2} \right) = 10 \log \left(\frac{E_c}{2R\sigma^2} \right), \quad (33)$$

Drugi važan faktor jeste i potreba da se što više smanji sveukupna kompleksnost detektora kanala. Zbog toga se u kodnim šemama simulira samo situacija kada detektor kanala prosleđuje fine vrednosti spoljašnjim dekoderima, bez međusobne razmene, kao što je prikazano na slici 9.

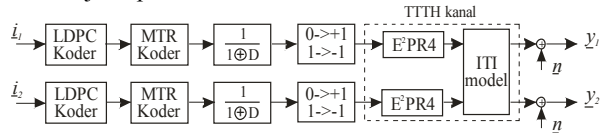


Slika 9. Dekodovanje na E^2PR4 OTOH kanalu

U ovoj simulacionoj šemi prisutno je prostiranje finih vrednosti samo u jednom smeru i treba primetiti da nema razmene između message-passing modula i SOVA detektora [6], tako da SOVA ne dobija *a priori* informacije.

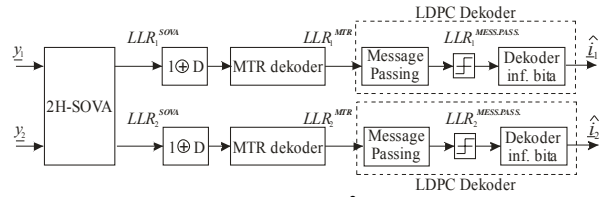
B) LDPC – MTR kod na E^2PR4 TTTH kanalu

U E^2PR4 TTTH modelu kanala analizirana je LDPC – MTR serijska veza kojom se koduje svaka staza ponaosob, kao što je to prikazano na slici 10.



Slika 10. LDPC – MTR kod na E^2PR4 TTTH kanalu

U TTTH modelu kanala do izražaja dolazi kompleksnost detektora, a da bi se ona što više smanjila ponovo je analiziran slučaj kada detektor kanala samo prosleđuje fine vrednosti message-passing modulima u pojedinim stazama, kao što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Dekodovanje na E^2PR4 TTTH kanalu

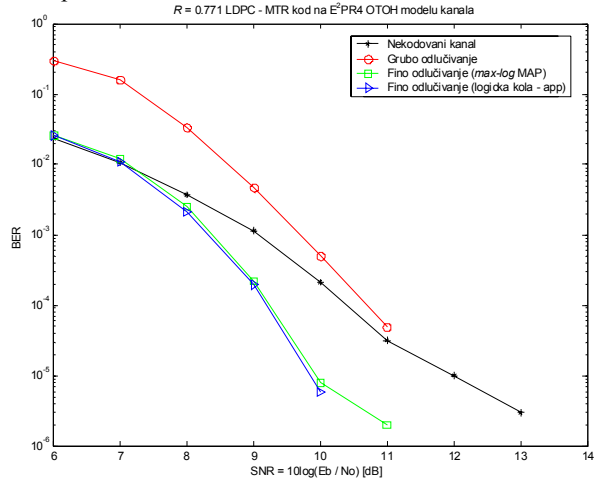
U simulacionoj šemi nema iterativne razmene informacija između detektora kanala i pojedinih dekodera, a message-passing moduli rade sa jednom internom iteracijom, nakon čega se donosi odluka o LDPC kodnoj reči.

VII. REZULTATI SIMULACIJA

U istraživanju su korišćeni jednostavni i dobro poznati kodovi da bi se u što lakšem obliku prikazale postojeće i novorazvijene tehnike dekodovanja. Kao posledica LDPC – MTR veze, dobijena je mala kodna brzina od $R = 0,771$, što nije odgovarajuće za magnetski zapis visoke gustine, ali nije ni ograničavajući faktor za početna istraživanja.

A) LDPC – MTR kod na E^2PR4 OTOH kanalu

Rezultati simulacija dekodovanja LDPC – MTR serijske veze prikazani su na slici 12.



Slika 12. Dekodovanja LDPC – MTR na E^2PR4 OTOH

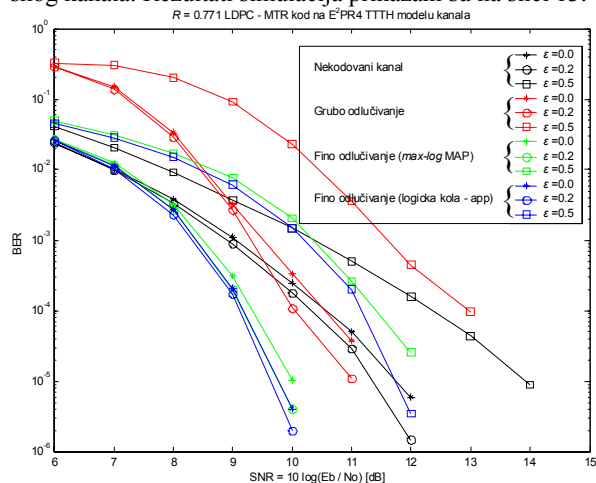
U rezultatima simulacija može se uočiti da suboptimalne verzije algoritama dekodovanja principom finog odlučivanja daju praktično iste performanse, sa dobrotkom kodovanja od 2dB, za verovatnoću greške $BER = 10^{-5}$ i u odnosu na nekodovani kanal [15].

Dekodovanje MTR koda upotrebom grubog odlučivanja daje znatno lošije rezultate, pošto u ovom slučaju MTR dekodera na svom izlazu daje samo informaciju da li je bit 0 ili 1. Ne postoji fina vrednost pojedinih bita, pa je pouzdanost odluke unapred predefinisana, što ne ide u prilog message-passing algoritmu za dekodovanje LDPC koda.

B) LDPC – MTR kod na E^2PR4 TTTH kanalu

U poslednjem delu analize, poređeni su rezultati simulacija *max-log* MAP i finog odlučivanja u logičkim kolima

koristeći aproksimacije za dekodovanje MTR koda u serijskoj LDPC – MTR vezi, u stazama E²PR4 TTTH magnetiskog kanala. Rezultati simulacija prikazani su na slici 13.



Slika 13. Dekodovanja LDPC – MTR na E²PR4 TTTH

Može se uočiti da dekodovanje MTR koda principom finog odlučivanja, koristeći aproksimacije u logičkim kolima, ostvaruje nešto veće dobitke kodovanja, u odnosu na *max-log* MAP verziju, na svim nivoima ITI [15].

Upotrebom dekodovanja koristeći aproksimacije u logičkim kolima ostvaruje se dobitak od 1,9dB, za nivoe ITI od $\epsilon = 0$ i $\epsilon = 0,2$, pri verovatnoći greške BER = 10^{-5} i u odnosu na nekodovani kanal [15].

Dodatno, za nivo ITI od $\epsilon = 0,5$ ostvaruje se dobitak kodovanja od 2,2dB, za verovatnoću greške BER = 10^{-5} i u odnosu na nekodovani kanal.

VIII. ZAKLJUČAK

U periodu od 111 godina, svakodnevni izazovi u domenu povećanja kapaciteta memorijskih uređaja formirali su tehnologiju magnetskog memorisanja kao jednu zrelu i u velikoj meri istraženu tehnologiju.

Implementacijom MTR kodova, specijalno dizajniranih i namenjenih unošenju ograničenja u kanale sa E²PR4 ekvalizacijom, poboljšavaju se karakteristike kvadratnog euklidskog rastojanja i povećava se *m.e.r.* kanala.

U okviru rada predstavljene su dve potpuno nove tehnike dekodovanja MTR kodova, među kojima se izdvajaju *max-log* MAP verzija i fino odlučivanje u logičkim kolima koristeći aproksimacije.

U situaciji kada je implementirana LDPC – MTR serijska veza na E²PR4 OTOH sistemu, obe tehnike dekodovanja daju praktično isti dobitak od skoro 2dB, za verovatnoću greške od BER = 10^{-5} i u odnosu na nekodovani kanal.

U situaciji E²PR4 TTTH sistema, *max-log* MAP verzija daje za nijansu slabije rezultate, pri istim nivoima ITI, a sa svojom povećanom kompleksnošću u prvi plan izbacuje fino odlučivanje u logičkim kolima, kao kandidata za dekodovanja MTR kodova principom finog odlučivanja.

Upotrebom dekodovanja koristeći aproksimacije u logičkim kolima ostvaruje se dobitak od 1,9dB, za nivoe ITI od $\epsilon = 0$ i $\epsilon = 0,2$, pri verovatnoći greške BER = 10^{-5} i u odnosu na nekodovani kanal.

REFERENCE

- [1] K. Nguyen, "Perpendicular recording: A boon for consumer electronics," Hitachi GST – Inspire the next, white paper, web adresa: www.hitachigst.com/hdd/research/images/pr%20images/PerpRecWP.pdf.
- [2] J. Moon and B. Brickner, "Maximum transition run codes for data storage systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 5, pp. 3992-3992, Sept. 1996.
- [3] L. Barbosa, "Simultaneous detection of readback signals from interfering magnetic recording tracks using array heads," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, no. 5, pp. 2163-2165, Sept. 1990.
- [4] N. Đurić, "A MAP algorithm for soft-decision decoding of MTR codes," 4th *International Conference on Engineering – ICET 2009*, Novi Sad, Serbia, 28-30, pp. 1-3, April 2009.
- [5] N. Đurić, "Iterative decoding of LDPC-MTR code concatenation over partial response magnetic recording channels," *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment – ICEE 2005*, pp. 1-4, Novi Sad, Serbia, 18-20 May, 2005.
- [6] J. Hagenauer, "Source-controlled channel decoding," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 43, No. 9, pp. 2449-2457, Sept. 1995.
- [7] O. Smith, "Some possible forms of phonograph," *The Electrical World*, No. 12, pp. 116, 8. Sept. 1888.
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Microdrive> - (revision 21:53, 26 June 2009).
- [9] R. Wood, Y. Hsu and M. Schultz, "Perpendicular magnetic recording technology," Hitachi GST – Inspire the next, white paper: www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/.../PMR_white_paper_final.pdf.
- [10] S. H. Charrap, P. L. Lu, and Y. He, "Thermal stability of recorded information at high densities," *IEEE Trans. Magn.*, pt. 2, vol. 33, no. 1, pp. 978-983, Jan. 1997.
- [11] B. Vasić and E. M. Kurtas, "Coding and signal processing for magnetic recording systems," CRC press, 2005.
- [12] R. Wood, J. Miles and T. Olson, "Recording technologies for terabit per square inch systems," *IEEE Trans. Mag.*, no. 38, pp. 1711 - 1718, July 2002.
- [13] H. K. Thapar and A. M. Patel, "A class of partial-response systems for increasing storage density in magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-25, pp. 3666-3668, Sept. 1987.
- [14] N. Đurić, "Kodovanje u višedimenzionom kanalu za memorisanje informacija," Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2003.
- [15] N. Đurić, "Dekodovanje MTR kodova principom finog odlučivanja na kanalima za magnetsko memorisanje informacija," Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2009.
- [16] E. Soljanin and C. N. Georghiadis, "Multihead detection for multi-track recording channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, No. 7, pp. 2988-2997, Nov. 1998.
- [17] E. Soljanin and C. N. Georghiadis, "Coding for two-head recording systems," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Vol. 41, no. 3, pp. 747 -755, May 1995.
- [18] S. A. Altekari, M. Berggren, B. M. Moision, P. H. Siegel and J. K. Wolf, "Error-event characterization on partial-response channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, No. 1, pp. 241-247, Jan. 1999.
- [19] N. Đurić and M. Despotović, "Distance analysis for E²PR4 two-track two-head magnetic recording channel," *Proceedings of XI conference TELFOR*, Beograd, Serbia, pp. 26-28, Nov. 2003.
- [20] B. E. Moision, P. H. Siegel and E. Soljanin, "Distance enhancing codes for digital recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol 34., no. 1, pp. 69-74, Jan. 1998.
- [21] R. M. Todd and R. Cruz, "Enforcing maximum-transition-run code constraints and low-density parity-check decoding," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, No. 6, pp. 3566-3571, Nov. 2004.
- [22] A. J. van Wijngaarden and E. Soljanin, "A combinatorial technique for constructing high rate MTR-RLL codes," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, pp. 582-588, April 2001.
- [23] T. Kanaoka and T. Morita, "Structured LDPC codes with reversed MTR/ECC for magnetic recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, No. 10, pp. 2561-2563, Oct. 2006.
- [24] B. Vasić, E. Kurtas and A. Kuznetsov, "Kirkman systems and their application in perpendicular magnetic recording," *IEEE Trans. Mag.*, vol. 38, no. 4, Part 1, pp. 1705 -1710, July 2002..

ABSTRACT

This paper presents the novel soft-decision decoding techniques for decoding of the maximum transition run (MTR) codes. Performances of such techniques have been analyzed in combination with the error correcting low-density parity-check (LDPC) code over magnetic recording channels, especially the two-track two-head channel model. Ideal E²PR4 equalization suitable for high density magnetic recording has been used.

IMPLEMENTATION OF THE SOFT-DECISION DECODING OF MTR CODES OVER MAGNETIC RECORDING CHANNELS

Nikola Đurić, Vojin Šenk