

Procena performansi hibridne ARQ tehnike sa UMTS turbo kodom

Srđan Brkić, Predrag Ivaniš, *Member, IEEE*

Sadržaj - Hibridne tehnike automatskog zahteva za retransmisiju (HARQ – *Hybrid Automatic Repeat reQuest*) predstavljaju princip zaštitnog kodovanja koji u okviru istog sistema za prenos informacija kombinuje neki zaštitni kod i klasičnu proceduru automatske retransmisije (ARQ – *Automatic Repeat reQuest*). U ovom radu, Monte Karlo simulacionim postupkom, ispitivane su se osobine jedne realizacije HARQ tehnike, koja koristi turbo kod standardizovan u okviru javnog mobilnog sistema treće generacije UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*).

Ključne reči - ARQ, HARQ, Simulacija, UMTS turbo kod

I. UVOD

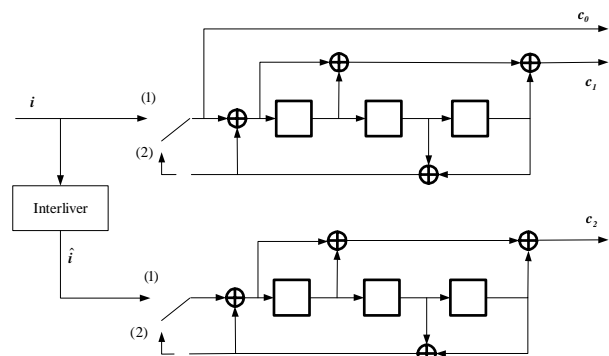
Turbo kodovi predstavljaju specifičnu klasu linearnih blok kodova, koja se koristi za ispravljanje grešaka unapred (FEC – *Forward Error Corection*). Njihov pronalazak je omogućio ogroman napredak teorije zaštitnog kodovanja i približio efikasnost prenosa na samo deo decibela od Šenonove granice [1].

Turbo koderom se smatra struktura sastavljena od konvolucionih kodera paralelno vezanih blokovima za interliving. Kasnija istraživanja su pokazala kako se dolazi do izbora optimalnih turbo kodova i procenjeno je da se najbolji kodovi dobijaju korišćenjem rekurzivnih sistematskih konvolucionih RSC (*Recursive Systematic Convolutional*) kodova i bloka za pseudo-slučajni interliving [2]. Na slici 1 je prikazan izgled jednog turbo koder, kodnog količnika 1/3, koji je primenu našao u UMTS sistemu mobilne telefonije treće generacije. Može se primetiti da se ovaj koder sastoji od dva identična RSC koder sa po tri pomeracka registra. Kodna reč se formira združivanjem tri sekvence: informacione sekvence (c_0), sekvence kontrolnih bita koji se dobijaju propuštanjem informacione sekvence kroz prvi RSC koder (c_1) i sekvence kontrolnih bita dobijenih kodovanjem permutovane informacione sekvence (u bloku za interliving) drugim RSC koderom (c_2). Uloga interlivinga je da razdvoji uzastopne greške nastale u toku prenosa, tako da ih prijemnik lakše ispravi. U UMTS koderu interliver prihvata određeni broj informacionih bita formirajući matricu za interliving.

S. S. Brkić, Tošin Bunar 173, Beograd, Srbija (telefon: 381-64-5707143, e-mail: brka05@gmail.com).

P. Ivaniš, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu (e-mail: predrag.ivanis@etf.rs)

Elementi matrice se zatim permutuju na pseudo-slučajan način, opisan u standardu UMTS sistema [3], nakon čega se prosleđuju na izlaz interlivera.



Sl. 1. Izgled koderu UMTS turbo koda

Dekodovanje turbo kodova se obavlja iterativno i predviđa postojanje dva nezavisna komponentna dekodera, koji, u svakoj iteraciji algoritma dekodovanja, međusobno razmenjuju poruke o mekim procenama informacionih bita. Obično se u komponentnim dekoderima primenjuje MAP (*Maximum A posteriori Probabiity*) algoritam, čiji se izlazni logaritamski količnik verodostojnosti LLR (*Log-Likelihood Ratio*) može napisati u sledećem obliku [4]:

$$LLR(i_k) = L_{sys} + L_{in} + L_{ext}, \quad (1)$$

gde je L_{sys} predstavlja doprinos sistematskog bita poslatog u trenutku k , L_{ext} uticaj svih drugih sitematskih bita i svih kontrolnih bita posmatranog RSC koda, dok L_{in} definiše podatak koji je dekoderu stigao od drugog komponentnog dekodera, tj. uticaj svih kontrolnih bita drugog RSC koda. Parametar L_{ext} se naziva spoljašnja informacija i proseđuje se drugom dekoderu, koji ga koristi kao L_{in} , što dovodi do iterativnih ciklusa. Svaku iteraciju sačinjavaju dve etape, pri čemu jedna etapa odgovara procesu dekodovanja pojedinačnog RSC dekodera.

Pouzdan prenos se može obezbediti i pomoću ARQ procedura. Ovaj oblik borbe protiv grešaka podrazumeva paketski prenos i umetanje redundantnih bita u svaki paket, na osnovu kojih se na prijemnoj strani može detektovati oštećenje paketa. Obično se, kao zaštitni kod, koristi ciklična provera redundanse CRC (*Cyclic Redundancy Check*), koja pokazuje dobre performanse u pogledu otkrivanja grešaka, a

ima malu kompleksnost realizacije [5]. Ako prijemnik na osnovu CRC provere zaključuje da se u toku prenosa desila greška, povratnim kanalom obaveštava predajnik o potrebi retransmisije paketa [6].

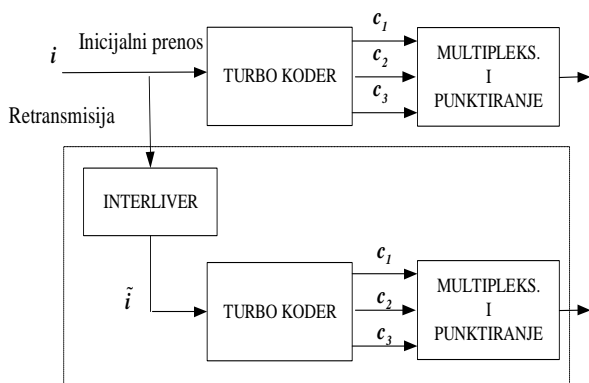
Hibridne ARQ procedure kombinuju klasični ARQ princip sa nekim FEC kodom. Ovakva realizacija podrazumeva da se paket (formiran dodavanjem CRC redundanse na informacionu sekvencu) pre slanja koduje FEC tehnikom. Zaštitni kod ima zadatak da ispravi greške koje se najčešće dešavaju, a pojava grešaka koje nije u stanju da koriguje dovodi do retransmisije paketa. ARQ/FEC (HARQ) tehnika ispravlja neke nedostatke pojedinačno primenjenih tehnika: povećava se uspešnost prenosa u odnosu na FEC sistem i ostvaruje veći informacioni protok nego kod klasičnih ARQ tehnika. Radi dodatnog poboljšanja performansi moguće je na osnovu određenog kriterijuma kombinovati primljene replike poruke.

U ovom radu je prikazana jedna HARQ tehnika, predstavljena u [7], koja kao FEC kod koristi turbo kodove i njihov princip iterativnog dekodovanja. U slučaju da turbo kod nije ispravio sve greške, meke procene informacionih bita se memorišu, da bi se koristile kao apriori verovatnoće pojavljivanja bita prilikom dekodovanja replike. Takođe, u ovom radu su ispitane performanse UMTS sistema u kome bi se upotrebila ovakva procedura.

II. TURBO ARQ PROCEDURA

Realizacija turbo ARQ procedure veoma je slična strukturi u kojoj se koriste samo turbo kodovi. Potrebno je samo izvršiti manje promene koje zahteva ARQ princip.

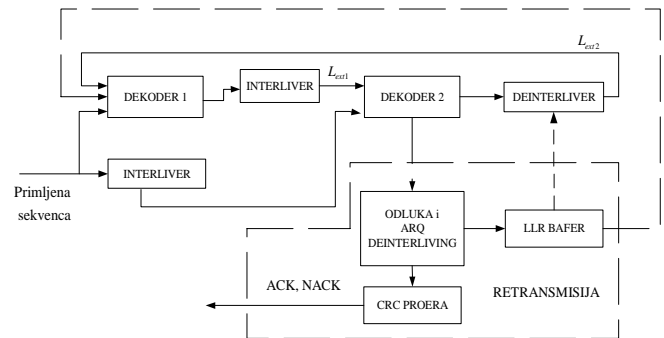
Koder, kako se to može primetiti na slici 2, predstavlja modifikaciju klasičnog turbo koder. Prilikom inicijalnog prenosa paket se koduje standardnim turbo koderom. Ako predajnik, povratnim kanalom, primi negativnu potvrdu kojom se zahteva retransmisija paketa, predajnik prvo izvrši permutaciju bita paketa, pa ga onda koduje identičnim koderom kao i pri inicijalnom prenosu. Interliver primenjen za permutaciju je pseudo-slučajni i različit od onoga primenjenog u turbo koderu. Permutovanjem sekvence koja je izazvala retransmisiju povećava se verovatnoća uspešnog prijema replike. Ako je potrebna, svaka naredna replika se permutuje drugačijim obrazcom za interlivering.



Sl. 2. Koder turbo ARQ sistema

Struktura dekodera HARQ procedure je vrlo slična turbo dekodera (slika 3). Kad god se utvrdi da je paket oštećen predajniku se šalje negativna potvrda, a vrednosti LLR se za svaki bit memoriše. Kada se primi replika paketa, memorisane vrednosti se koriste kao apriori vrednosti bita potrebne za njeno dekodovanje. Pri inicijalnom prenosu, na samom početku iterativnog procesa dekodovanja, smatra se da su apriori verovatnoće za sve informacione bita iste i iznose $P(i_k = 0) = P(i_k = 1) = 0,5$, tj. vrednost parametra $L_{in}(i_k)$ iz izraza (1) je jednaka 0. U slučaju retransmisije ne smatra se da su ulazni simboli podjednako verovatni, već se $L_{in}(i_k)$ postavlja na $L'(i_k)$, vrednost LLR-a iz prethodnog prenosa. Tako će se sada drugom komponentnom dekodera proslediti informacija $L_{ext}(i_k) + L'(i_k)$. Navedene radnje je moguće učiniti jer je apriori informacija iz prethodnog prenosa nekorelisana sa spoljašnjom informacijom generisanom od strane komponentnih dekodera. $L'(i_k)$ se može koristiti i u sledećim iteracijama dekodovanja, pa se izlaz MAP dekodera može predstaviti izrazom

$$LLR(i_k) = L_{sys} + L_{in} + L_{ext} + L'(i_k). \quad (2)$$



Sl. 3. Dekoder turbo ARQ sistema

Iako se pri prenosu svih paketa koristi turbo kod nepromenjenog kodnog količnika, ipak se može zaključiti da kombinovanje replika paketa efektivno smanjuje vrednost kodnog količnika zaštitnog koda. Tako ako se koristi turbo kod kodnog količnika 1/2, nakon dva prenosa iste poruke kodni količnik ekvivalentnog turbo koda iznosi 1/4.

Opisani način kombinovanja replika u prijemniku nije optimalan, ali ima veliku prednost u pogledu kompleksnosti, koja je određena kompleksnošću turbo dekodera. Sve što dodatno treba uraditi je rezervisati memorijski prostor za LLR vrednosti i realizovati CRC proveru.

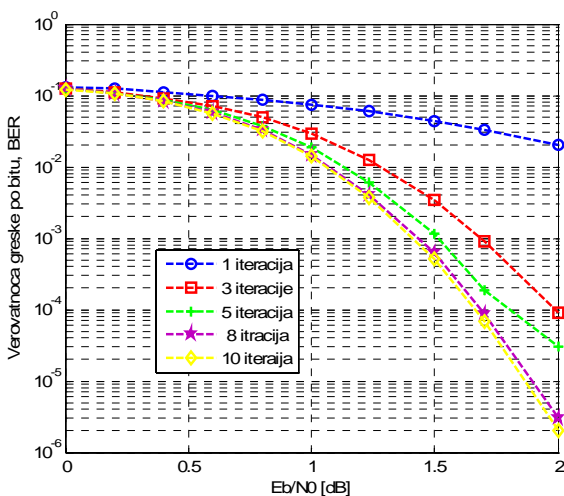
III. SIMULACIONA ANALIZA

Uobičajno je da se, u nedostatku odgovarajućih analitičkih tehnika, performanse telekomunikacionog sistema u kome su primenjeni turbo kodovi ispituju simulacionim putem. Tako je i u ovom radu, pomoću Monte Karlo simulacionog metoda [8], određena zavisnost verovatnoće greške po bitu BER (*Bit Error Rate*) od odnosa energije po informacionom bitu i srednje spektralne gustine snage šuma u kanalu, u sistemu u kome se koristi predstavljena HARQ procedura. Simulacija je vršena za kanal u kome deluje samo beli

aditivni Gausov šum, a pretpostavljeno je da je širina propusnog opsega izabrana u skladu sa Nikvistovim kriterijumom, tako da se efekat intersimbolske interferencije može zanemariti.

Kao komponentni turbo kod korišćen je UMTS turbo kod, čiji se izlazi pre prosleđivanja na liniju veze uvode u blok za punktiranje, u cilju povećanja kodnog količnika koda. Punktiranje se izvršava tako da se informacioni biti prosleđuju neizmenjeni, dok se kontrolni biti RSC kodova šalju naizmenično u susednim intervalima slanja. Kodni količnik ovako punktiranog turbo koda iznosi 1/2.

Izabran je iterativni mehanizam dekodovanja koji se bazira na MAP algoritmu primenjenom u oba komponentna dekodera. Princip iterativnog dekodovanja turbo kodova je heuristika i ne postoji striktni matematički dokaz koliko je ciklusa dekodovanja potrebno da bi se dostiglo stacionarno stanje. Broj potrebnih iteracija zavisi od kodnog količnika koda, strukture interlivera i dužine kodne reči. Uticaj broja iteracija na verovatnoću greške opisanog UMTS koda prikazan je na slici 4. Simulacija je izvršena za dužinu informacione sekvence od $K = 637$ bita, na koju su dodata i 3 terminirajuća bita sa ciljem da se prvi RSC koder, nakon slanja kodne reči, vrati u početno stanje. Broj terminirajućih bita jednak je broju memorijskih ćelija koder. Zbog upotrebe interlivera na ovakav način nije moguće resetovati i drugi RSC koder i ako se želi i njegovo vraćanje u početno stanje potrebno je slanje dodatnih terminirajućih bita.



Sl. 4. Uticaj broja iteracija dekodovanja na performanse UMTS turbo koda, kodnog količnika 1/2

Očigledno je da povećanje broja iteracija dovodi do poboljšanja performansi koda. Tako se, na primer, verovatnoća greške po bitu od 10^{-4} sa tri iteracije dostiže pri odnosu $E_b/N_0 = 2$ dB, dok se ista verovatnoća greške može postići sa $E_b/N_0 \approx 1,65$ dB, korišćenjem 8 ciklusa dekodovanja. Simulacionom analizom je utvrđeno da je za dekodovanje bloka od 640 bita dovoljan broj iteracija algoritma dekodovanja $I = 8$ i da dalje povećanje broja iteracija ne dovodi do značajnijeg poboljšanja korektivne sposobnosti koda, a s druge strane može da ima negativan uticaj na sisteme osetljive na kašnjenje. Pri daljoj analizi

HARQ sistema upravo će se podrazumevati da se odluke o poslatim bitima donose nakon 8 iteracija algoritma dekodovanja.

Simulacija HARQ procedure je izvršena pod pretpostavkom korišćenja tehnike retransmisije „stani i čekaj”. Ova tehnika podrazumeva da se za svaki primljeni paket predajniku, povratnim kanalom, šalje potvrda o uspešnosti slanja. Odluka o ponovnom slanju paketa se donosi na osnovu 16-obitne CRC provere, čiji je generišući polinom $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$. CRC dodatak se dodaje informacionim bitima sa kojima formira paket dužine 637 bita, tako se nakon umetanja terminirajućih bita turbo koderu prosleđuje blok ukupne dužine 640 bita. U slučaju da turbo kod nije ispravio sve greške predajnik, pre slanja replike paketa, informacionu sekvencu permutuje na pseudo-slučajan način prema zakonu

$$X_{n+1} = (aX_n + c) \bmod N, \quad (3)$$

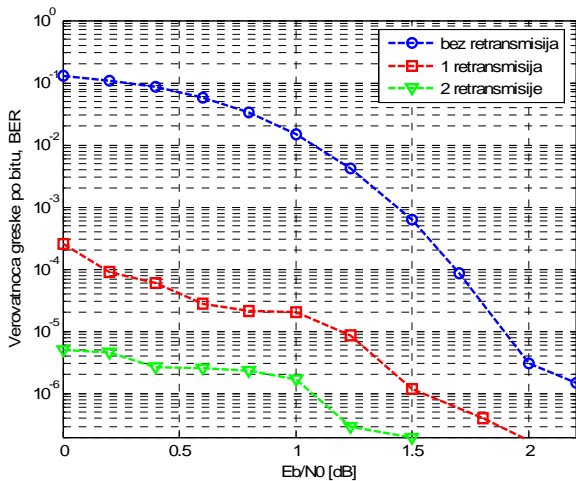
gde je N dužina bloka, dok se parametri a i c biraju tako da $a - 1$ bude jednako proizvodu svih prostih faktora broja N , $N.Z.D.(c,N) = 1$ i $a - 1$ deljivo sa 4 ako je N deljivo sa 4 [7]. Svaki put kad je potrebna nova retransmisija drugačiji permutacioni obrazac se dobija izborom drugih vrednosti a i c . Rezultati simulacije ovako definisanog sistema grafički su prikazani na slici 5, za slučajeve kada se koristi jedna, odnosno dve retransmisije. Korišćenje većeg broja retransmisija nije pogodno u sistemima osetljivim na kašnjenje.

Uočljivo je da korišćenje HARQ procedure značajno poboljšava performanse sistema u regionu sa niskim odnosom E_b/N_0 . Prenos bez retransmisija odgovara korišćenju samo UMTS turbo koda i pri vrednosti $E_b/N_0 = 0$ dB ostvaruje se verovatnoća greške od $BER \approx 10^{-1}$. S druge strane HARQ prenos obezbeđuje znatno manje verovatnoće greške koje iznose $BER \approx 2 \cdot 10^{-4}$, u sličaju 1 retransmisije i $BER \approx 6 \cdot 10^{-6}$, ako je dozvoljeno slanje 2 replike. Razlog superiornosti HARQ tehnike predstavlja činjenica da svaka retransmisija efektivno smanjuje kodni količnik koda koji štiti paket. Međutim, povećanjem odnosa E_b/N_0 dobitak koji unosi upotreba retransmisija se smanjuje (krive HARQ procedure imaju znatno blaži pad). Zbog dobrih performansi turbo koda povećanjem odnosa E_b/N_0 , broj retransmisija se smanjuje, pa samim tim i uticaj ARQ procedure na prenos. Tako, pri $E_b/N_0 = 2,2$ dB verovatnoća greške za prenos sa 1 retransmisijom iznosi $BER \approx 2 \cdot 10^{-7}$, što je relativno blisko performansama sistema bez retransmisija ($BER \approx 10^{-6}$). Verovatnoća greške prenosa sa dve retransmisije je, pri datom odnosu E_b/N_0 , manja od vrednosti 10^{-7} , ali će se sa daljim povećanjem odnosa E_b/N_0 sve više smanjivati razlika performansi sistema sa i bez retransmisije.

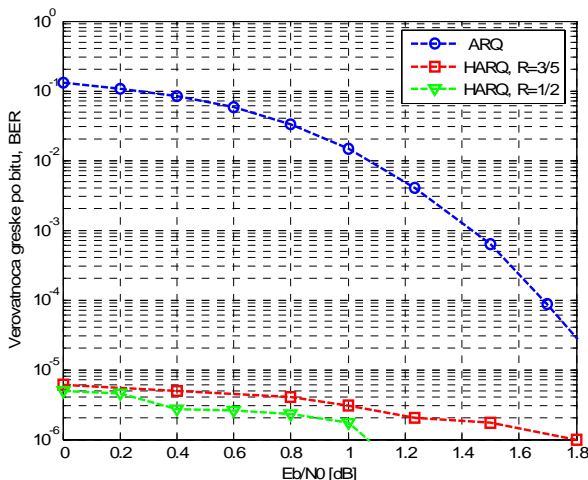
Na slici 6 izvršeno je poređenje performansi HARQ sistema sa sistemom koji koristi klasičnu ARQ proceduru bez kombinovanja paketa, pri čemu je broj retransmisija ograničen na 2. Klasična ARQ procedura se zasniva na pretpostavci da se stanje kanala između dva prenosa promenilo i da će u trenutku slanja replike delovati šum manje snage. Kako u kanalu deluje samo nepromenjivi Gausov šum prosta retransmisija pogrešno primljenih paketa

ne unosi nikakva poboljšanja i performanse ARQ procedure su identične performansama sistema bez retransmisije.

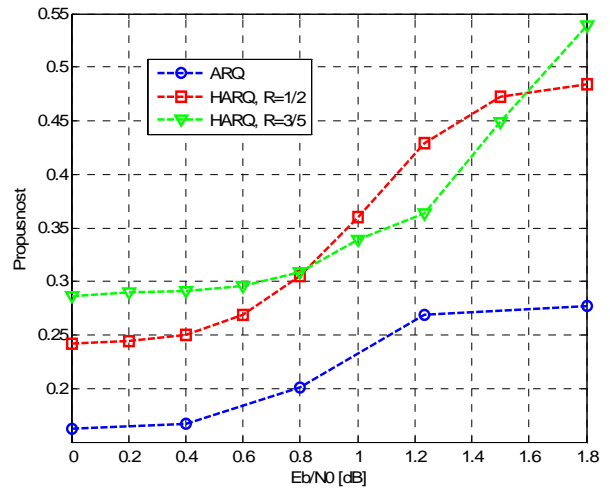
Izvršena je i simulaciona analiza HARQ sistema sa turbo kodom većeg kodnog količnika ($R = 3/5$), koji je očekivano pokazao nešto (neznatno) lošije karakteristike od sistema sa kodom količnika 1/2. Prednost korišćenja koda većeg kodnog količnika se može uočiti posmatranjem vrednosti propusnosti (slika 7). Dodatnim bušenjem turbo koda njegova korektivna moć se smanjila, ali se smanjio i broj redundantnih bita koji se šalje. Pokazalo se da, u pojedinim intervalima odnosa E_b/N_0 , manja korektivna sposobnost koda ne povećava značajno broj retransmisija, tako da ovakva procedura ima veću propusnost. Razlika je posebno izražena u regionu sa velikim odnosom E_b/N_0 , kada se propusnosti približavaju maksimalnim vrednostima. Ako je, na primer, $E_b/N_0 = 1,8$ dB propusnost procedure sa većim kodnim količnikom iznosi približno 0,54, što je nešto više od vrednosti 0,48, koliko se postiže korišćenjem turbo koda količnika 1/2. Iz prikazane analize jasno je da se kodni količnik koda može izabrati kao kompromis zahtevane verovatnoće greške i željene propusnosti.



Sl. 5. HARQ procedura sa različitim brojem retransmisija



Sl. 6. Poređenje HARQ i ARQ procedure



Sl. 7. Propusnosti HARQ i ARQ procedure

LITERATURA

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes," *in Proc '93*, Geneva, Switzerland, May 1993, pp. 1064-1070.
- [2] B. Vucetic, J. Yuan, "Turbo Codes: Principles and Applications", Kluwer Academic Publishers, Boston 2000.
- [3] Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Multiplexing and channel coding (TDD) (3GPP TS 25.222 version 5.5.0 Release 5), ETSI 2003.
- [4] J. C. Moreira, P. G. Farrell, "Essentials of Error-Control Coding", John Wiley & Sons, England, 2006.
- [5] G. Castagnoli, J. Ganzo, P. Graber, "Optimum Cyclic Redundancy-Check Codes with 16-bit Redundancy", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 38 (1990), pp. 111-114.
- [6] S. Lin, D. J. Costello, "Error Control Coding", Second Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [7] K. R. Narayanan and G. L. Stuber, "A novel ARQ technique using the turbo coding principle," *IEEE Commun. Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 49-51, Mar. 1997
- [8] D. Drajić, P. Ivaniš, "Uvod u teoriju informacija i kodovanje", treće izdanje, Akademska misao, Beograd, 2009

ABSTRACT

The hybrid automatic repeat request technique (HARQ) represent the error control principle which combines an error correcting code and automatic repeat request procedure (ARQ), within the same transmission system. In this paper, using Monte Carlo simulation process, the characteristics of HARQ technique are determined, for the case of the Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) turbo code.

PERFORMANCE EVALUATION OF HARQ TECHNIQUE WITH UMTS TURBO CODE

Srđan Brkić, Predrag Ivaniš