

Hibridni ARQ sistem zasnovan na SR-ARQ šemi sa konačnom dužinom bafera

Miroslav Jankov, Vojin Šenk

Sadržaj — U ovom radu smo predstavili drugi tip hibridnog sistema zasnovanog na selektivno-povratnoj ARQ (Automatic Repeat Request) šemi sa konačnom dužinom bafera. Objasnili smo postupak retransmisije parnog vektora kao najvažnije karakteristike ovog sistema. Detaljno smo analizirali procedure transmisije i retransmisije vektora, kao i operacije prijemnika u normalnom i blokiranom stanju. Na kraju rada smo definisali propusnu efikasnost sistema i pomoću dijagrama prikazali odnos propusne efikasnosti hibridnog ARQ sistema II tipa i selektivno-povratnog ARQ sistema za različite dužine bafera i koda.

Ključne reči — ARQ, FEC, HARQ, SR-ARQ šema

I. UVOD

DVE osnovne tehnike koje se koriste za kontrolu grešaka su FEC (Forward Error Control) i ARQ (Automatic Repeat Request) [1].

U ARQ sistemima koristi se kôd za detekciju grešaka. Nakon prijema kodne reči, prijemnik izračunava sindrom. Ako je sindrom nula, prijemnik pretpostavlja da je primljena kodna reč ispravna. Prijemnik prihvata taj vektor kako bi ga isporučio korisniku, a u isto vreme preko kanala povratne sprege šalje signal predajniku da je poslato vektor uspešno primljen [2]. Ukoliko sindrom nije nula, prijemnik pretpostavlja da je došlo do greške i preko kanala povratne sprege, signalizira predajniku da izvrši retransmisiju. Postupak retransmisije se nastavlja dok poslato vektor ne bude uspešno primljen. Pogrešan vektor se isporučuje korisniku samo u slučaju kada prijemnik propusti da detektuje prisustvo greške. Ovaj problem se rešava upotrebom odgovarajućeg linearnog koda, koji verovatnoću da greška neće biti detektovana svodi na najmanju moguću meru.

U FEC sistemima se koristi kôd za korekciju grešaka. Rad ovih sistema zasniva se na sledećoj proceduri: kada prijemnik detektuje prisustvo greške on pokušava da otkrije lokaciju greške i da je koriguje. Ako je odredio tačnu lokaciju greške, on će je uspešno ispraviti i primljeni vektor će biti uspešno dekodovan. Međutim, ukoliko prijemnik ne pronade tačnu lokaciju greške, primljeni vektor će biti pogrešno dekodovan i tako pogrešan isporučen korisniku.

FEC sistem obezbeđuje konstantnu propusnu efikasnost bez obzira na stanje kanala, dok pouzdanost sistema opada sa porastom grešaka nastalih u kanalu tokom prenosa. Nasuprot FEC sistemu, ARQ sistem sa ugrađenim moćnim linearnim kodom za detekciju grešaka, obezbeđuju visoku pouzdanost sistema bez obzira na kvalitet kanala, dok propusna efikasnost sistema značajno opada sa povećanjem broja retransmisija.

Kombinacijom FEC i ARQ sistema mogu se prevazići njihovi nedostaci. Sistem koji nastaje njihovom kombinacijom nazivamo hibridni ARQ sistem ili skraćeno HARQ sistem (HARQ- Hybrid ARQ System).

II. HIBRIDNE ARQ ŠEME

Hibridni ARQ sistem se sastoji od FEC podsistema koji je ugrađen u ARQ šemu. FEC šema može biti korišćena u kombinaciji sa bilo kojom od tri ARQ šeme: *the stop-and-wait ARQ*, *the go-back-N ARQ*, i *the selective-repeat ARQ (SR-ARQ)*.

Funkcija FEC šeme u okviru HARQ sistema je smanjenje broja retransmisija korigovanjem grešaka koje se najčešće javljaju. Kao posledicu toga imamo povećanje propusne efikasnosti sistema. Ako se pojave greške koje se retko javljaju i koje on detektuje, ali ne može da ispravi, FEC signalizira da je vektor pogrešan i šalje signal predajniku da izvrši retransmisiju. Ovim postupkom se značajno povećava pouzdanost sistema. Kao rezultat odgovarajuće kombinacije ARQ i FEC šema mogli bi imati veću pouzdanost od FEC sistema i veću propusnu efikasnost nego bilo koji ARQ sistem.

Hibridne ARQ šeme možemo klasifikovati na sledeći način:

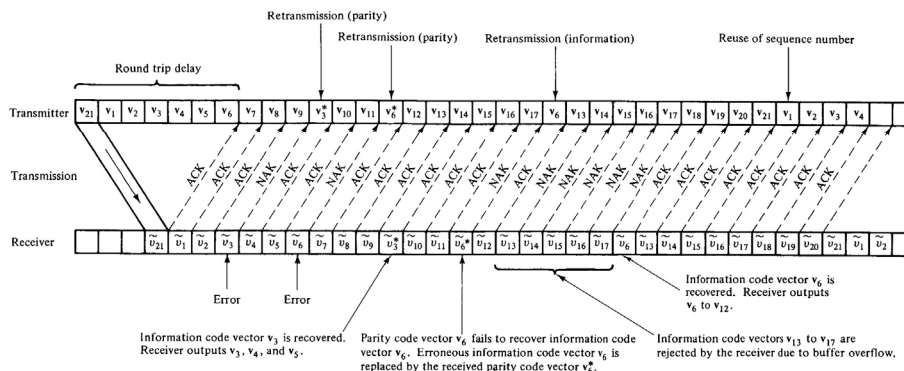
1. Hibridne ARQ šeme I-tipa
2. Hibridne ARQ šeme II-tipa

Prvi tip ARQ šeme sadrži linearni kod (n, k) , koji je dizajniran da istovremeno vrši detekciju i korekciju greške. Kada je kod primljenog vektora detektovana greška, prijemnik pokušava da locira i ispravi grešku. Ako je broj grešaka u opsegu u kojem prijemnik pored detektovanja greške može da vrši i ispravku, on će izvršiti korekciju. Posle izvršene korekcije kôd će biti isporučen korisniku ili snimljen u baferu prijemnika. Ako je prijemnik detektovao grešku koja ne može biti ispravljena, on će odbiti da primi taj vektor i zahtevaće retransmisiju istog. Ovaj postupak korekcije i retransmisije trajaće sve dok vektor ne bude uspešno primljen i dekodovan.

Drugi tip ARQ šeme se bazira na konceptu slanja digita provere parnosti, na zahtev prijemnika, koji se koriste za ispravljanje grešaka. U ovoj šemi se koriste dva linearna koda. Linearni (n, k) kod C_0 sa visokom vrednošću kodnog količnika i linearni invertibilni $(2k, k)$ kod C_1 , kodnog količnika $R=1/2$, koji se koristi za detekciju i korekciju grešaka.

III. MODEL HARQ ŠEME ZASNOVAN NA SR-ARQ ŠEMI

Postupak retransmisije parnog vektora može biti korišćen sa bilo kojom ARQ šemom, ali najveća efikasnost se postiže kada se koristi u kombinaciji sa selektivno-povratnom ARQ šemom sa konačnom dužinom



Sl. 1. II tip hibridnog sistema zasnovanog na selektivno-povratnoj ARQ (Automatic Repeat Request) šemi sa konačnom dužinom bafera.

bafera. Mi ćemo razmotriti slučaj za koji je dužina bafera N , a redni broj poslatog vektora uzima vrednost do $3N$.

Pretpostavićemo još da je k -bitna poruka u , koju treba preneti, povezana sa tri vektora na sledeći način:

1. vektor $v = (f(u), u)$ baziran na linearnom (n, k) kodu C_0 za detekciju grešaka
2. vektor $w = (q(u), u)$ baziran na invertibilnom $(2k, k)$ kodu C_1 , čiji je kodni količnik $R=1/2$
3. vektor $v^* = (f[q(u)], q(u))$ baziran na k -bitnom parnom bloku $q(u)$ i kodu C_0

Kako bi na što lakši način objasnili procedure transmisije i retransmisije, kao i operacije prijemnika u normalnom i blokiranom stanju, vektor $v = (f(u), u)$ ćemo definisati kao informacioni vektor vektora u , a vektor $v^* = (f[q(u)], q(u))$ kao parni vektor vektora u . Koristićemo još i vektore $\tilde{v} = (\tilde{f}(u), \tilde{u})$ i $\tilde{v}^* = (\tilde{f}[q(u)], \tilde{q}(u))$ kako bi označili da su primljeni odgovarajući vektori v i v^* .

Tokom procesa transmisije i retransmisije, informacioni vektor v i parni vektor v^* poruke u imaju isti redni broj. Kada je informacioni vektor v spreman za transmisiju dodeli mu se redni broj i on se smešta u ulazni red transmitera. Posle transmisije vektora v i njegovog parnog vektora v^* , oni se snimaju u retransmissioni bafer i ostaju u njemu do trenutka dok za v ne dobijemo pozitivnu potvrdu ACK (ACK- *positively acknowledge*) o prijemu. Nakon dobijanja pozitivne potvrde ACK posle *round-trip delay-a* (vremenskog intervala od momenta slanja kodne reči, pa do momenta prijema ACK ili NAK poruke o prijemu), vektori v i v^* se otpuštaju iz retransmissionog bafera. Međutim, ukoliko posle slanja vektora v dobijemo negativnu potvrdu NAK (NAK- *negative acknowledge*) posle *round-trip delay-a*, transmitter će izvršiti retransmisiju i poslati vektor v^* koji će biti korišćen za korekciju greške. Posle drugog *round-trip delay-a*, ako je ACK poruka primljena oba vektora v i v^* će biti otpuštena ili, u drugom slučaju, vektor v će biti poslat. Postupak naizmeničnog slanja vektora v i v^* će biti nastavljen sve dok ne dobijemo pozitivnu potvrdu ACK za vektor v (sl.1).

A. Procedura transmisije i retransmisije

Kada predajnik pošalje informacioni ili parni vektor, on u isto vreme izračunava njegov *forward index* f_T u retransmissionom baferu, nakon čega on postaje *time-out* vektor. Na osnovu f_T predajnik donosi odluku da li će sledeći informacioni vektor u ulaznom redu predajnika biti

poslat ili će predajnik inicirati retransmisiju.

Pravilo na osnovu kog predajnik donosi odluku objasnićemo na sledeći način:

Ako za *time-out* vektor dobijemo pozitivnu potvrdu ACK, i ako je $f_T < N$, tada će prvi informacioni vektor u ulaznom redu predajnika biti poslat.

Ako za *time-out* vektor, recimo v_j , dobijemo negativnu potvrdu NAK ili ne dobijemo nikakvu potvrdu, i ako je $f_T < N$, postupak retransmisije će biti inicijalizovan. Vektor koji šaljemo postupkom retransmisije je parni vektor v_j^* , jer je predhodno bio poslat informacioni vektor v_j . Ako je *time-out* vektor, za koji smo dobili negativnu potvrdu NAK, prvi vektor u retransmissionom baferu koji nije dobio pozitivnu potvrdu ($f_T=0$), svi informacioni vektori u retransmissionom baferu sa $f_T > N$ će biti vraćeni u ulazni red predajnika kako bi se izvršilo njihovo ponovno slanje. Te vektore prijemnik nije prihvatio, jer mu je bafer pun, odnosno došlo je do zagušenja bafera.

Ako je $f_T \geq N$, prvi informacioni vektor u ulaznom redu predajnika će sledeći biti poslat.

B. Operacije prijemnika u normalnom stanju

U normalnom stanju, prijemnik prima informacione vektore i bafer prijemnika je prazan. Kada je informacioni vektor primljen, prijemnik na bazi linearnog koda C_0 izračunava sindrom primljenog vektora i računa njegov *forward index* f_R u odnosu na poslednji primljeni i isporučeni informacioni vektor.

- Ako je sindrom nula i $f_R=1$ primljeni informacioni vektor je isporučen korisniku.
- Ako je $f_R > N$ primljeni informacioni vektor je označen kao ranije primljen i isporučen.
- Ako je kojim slučajem kod primljenog informacionog vektora detektovana greška ili $1 < f_R < N$ prijemnik prelazi iz normalnog u blokirano stanje.

C. Operacije prijemnika u blokiranom stanju

Ako se prijemnik nađe u blokiranom stanju usled detektovanja greške u primljenom informacionom vektoru $\tilde{v} = (\tilde{f}(u), \tilde{u})$ sa $f_R=1$, primljena pogrešna poruka \tilde{u} se smešta na prvo mesto u bafer prijemnika i NAK poruka se šalje predajniku. Posle toga prijemnik nastavlja da prima i proverava sledeće informacione vektore i smešta ih na odgovarajuće pozicije u bafer na osnovu njihovog rednog broja, sve do trenutka dok bafer ne bude popunjen. Kada je

bafer popunjen prijemnik šalje odgovarajuće obaveštenje predajniku za svaki primljeni vektor.

Ako prijemnik uđe u blokirano stanje sa $f_R > 1$, tada su $f_R - 1$ informacioni vektori između zadnjeg isporučenog informacionog vektora i tekućeg primljenog vektora izgubljeni. Prijemnik tada rezerviše prvih $f_R - 1$ lokacija bafera za izgubljene vektore i snima tekući primljeni vektor na (f_R) -tu lokaciju bafera. Sledeći vektori koji se primaju posle ovog vektora smeštaju se na ostale pozicije bafera.

Nakon prijema ponovo poslatog parnog vektora $\tilde{v}_j^* = (\tilde{f}(q(u_j), \tilde{q}(u_j)))$, prijemnik odmah vrši korekciju prve pogrešno primljene poruke u_j .

- Ako je sindrom vektora \tilde{v}_j^* nula, poruka u_j je ispravljena inverzijom vektora $\tilde{q}(u_j)$.

- Ako sindrom vektora \tilde{v}_j^* kojim slučajem nije nula, $\tilde{q}(u_j)$ i u_j se zajedno koriste za ispravku greške na bazi koda za korekciju grešaka C_L .

Ako greška može da se ispravi, poruka u_j će biti uspešno ispravljena. Prijemnik tada otpušta u_j i sve naknadno primljene ispravne poruke u određenom uzastopnom redosledu $u_j, u_{j+1}, \dots, u_{j+N}$ za $0 \leq L < N$. Dok je retransmisija selektivna i dok su poruke od u_{j+1} do u_{j+L} uspešno ispravljene, vektori koji slede posle \tilde{v}_j^* vektora su novi informacioni vektori $\tilde{v}_{j+N}, \tilde{v}_{j+N+1}, \dots, \tilde{v}_{j+N+L-1}$. Kada ti novi informacioni vektori stignu, proveravaju se njihovi sindromi i oni se po određenom redosledu smeštaju u bafer prijemnika dok ne budu spremni za isporuku korisniku ili za korekciju grešaka.

Ako $\tilde{q}(u_j)$ ne ispravi poruku u_j , prijemnik otpušta \tilde{u}_j , smešta u bafer $\tilde{q}(u_j)$ i šalje NAK poruku do predajnika. Sve dok poruke koje nemaju grešku ne budu otpuštene iz bafera prijemnika, u baferu neće biti mesta za prijem novih informacionih vektora od \tilde{v}_{j+N} do $\tilde{v}_{j+N+L-1}$. U tom slučaju, bafer se nalazi u stanju zagušenja i ti informacioni vektori se odbijaju.

Posle prijema druge NAK poruke za $v_j = (f(u_j), u_j)$, predajnik ponovo šalje v_j do prijemnika. Prijemnik prima $\tilde{v}_j = (\tilde{f}(u_j), \tilde{u}_j)$ i pokušava da popravi u_j poruku.

- Ako je sindrom vektora \tilde{v}_j nula, pretpostavljamo da poruka \tilde{u}_j nije pogrešna i ona se otpušta iz bafera.

- Ako sindrom vektora \tilde{v}_j nije nula, vektori \tilde{u}_j i $\tilde{q}(u_j)$ se smeštaju u bafer prijemnika i zajedno se koriste za ispravljanje greške.

Ukoliko prijemnik ponovo propusti priliku da ispravi grešku u vektoru u_j , on otpušta vektor $\tilde{q}(u_j)$ i u bafer smešta vektor \tilde{v}_j . Postupak retransmisije informacionog vektora v_j će biti nastavljen sve dok u_j ne bude uspešno ispravljen. Retransmisije su postupci alternativnog ponavljanja parnog vektora v_j^* i informacionog vektora

v_j , kao i alternativnog smeštanja vektora v_j i $\tilde{q}(u_j)$ u bafer prijemnika.

Kada u blokiranom stanju prijemnik primi informacioni vektor, on računa njegov *forward index* l_f . **Ako je $l_f < N$** , vektor se smešta u bafer prijemnika. Ako se greška ne detektuje ACK poruka se šalje predajniku, a ako je greška detektovana šalje se NAK poruka. **Ako je $l_f \geq N$** , prijemnik izračunava *backward index* l_b . Ako je $l_b < 2N$, primljeni informacioni vektor je vektor koji je ranije prihvaćen i isporučen korisniku. U ovom slučaju, prijemnik ignoriše ovaj vektor i šalje ACK poruku predajniku. Ako je $l_b \geq 2N$, primljeni vektor je novi informacioni vektor, međutim, bafer je pun i javlja se zagušenje bafera. Tada prijemnik ne prihvata ovaj vektor i šalje NAK poruku predajniku. Posle prijema NAK poruke, predajnik vrši retransmisiju. Kada prijemnik primi ovaj vektor proverava da li taj vektor i njegov odgovarajući vektor koji je smešten u baferu prijemnika, formiraju poruku. Ako oni formiraju par (informacioni+parni deo), prijemnik će pokušati da povрати originalnu poruku inverzijom i procesom dekodovanja. U slučaju da ne formiraju par (informacioni + parni deo), predajnik će proveriti da li su novi primljeni vektor i njegov odgovarajući vektor u baferu prijemnika informacioni, ili su to parni vektori. **Ako su oba vektora informacioni vektori**, prijemnik prima onaj vektor koji je bez greške. Ukoliko su oba vektora pogrešna, prijemnik prihvata novi tek primljeni vektor, a ranije primljeni vektor otpušta. **Kada su oba vektora parni vektori**, novi parni vektor koji je primljen će zameniti stari parni vektor smešten u bafer prijemnika. Ako je primljeni vektor odgovarajući izgubljeni vektor, prijemnik će ga prepoznati i smestiti ga na rezervisanu lokaciju u baferu prijemnika [3].

IV. PERFORMANSE HIBRIDNE ARQ ŠEME I SELEKTIVNO-POVRATNE ARQ ŠEME

Najbolja mera za određivanje performansi HARQ i SR-ARQ sistema je propusna efikasnost (*Throughput Efficiency*). Propusnu efikasnost definišemo kao odnos prosečnog broja informacionih digita koje je prijemnik uspešno primio po jedinici vremena i ukupnog broja digita koji mogu biti poslani po jedinici vremena [3].

Analizu i izračunavanje propusne efikasnosti HARQ sistema izvršili smo tako što smo pretpostavili da je kanal kroz koji šaljemo digite BSC kanal i da je povratni kanal bez greške.

Propusna efikasnost hibridnog ARQ sistem II tipa izračunava se po formuli

$$\eta_{II} \geq \frac{\delta_0}{\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 N},$$

$$Q_1 = P + \frac{1}{1-P} \left\{ \sum_{i=0}^{L-1} \binom{2k}{i} p^i (1-p)^{2k-i} + (1-p)^{2n} \right. \\ \left. - 2(1-p)^n \left[(1-p)^k + \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} p^i (1-p)^{k-i} \right] \right\},$$

$$Q_2 \geq P + \frac{1}{(1-P)(1-Q_1)} \left\{ \sum_{i=1}^{L-1} \Delta_i S_{i-1} (1-\Delta_0 - S_{i-1}) \right\},$$

$$\Delta_i = \binom{k}{i} p^i (1-p)^{k-i},$$

$$S_j = \sum_{i=1}^j \Delta_i,$$

$$\begin{aligned}\theta_0 &= 1 - (1 - P)(1 - Q_1), \\ \theta_1 &= 1 - (1 - P)(1 - Q_1)(1 - Q_2), \\ \theta_2 &= Q_1 + (1 - Q_1)Q_2, \\ \delta_0 &= \frac{\theta_2}{1 - \theta_1} (1 - \theta_2 \theta_1^{N-1}), \\ \delta_1 &= PQ_1 \theta_0^{N-2} + P(1 - Q_1)Q_2 \theta_1^{N-2}, \\ \delta_2 &= 2 - PQ_1 \theta_0^{N-2} - \theta_0 \theta_2 \theta_1^{N-2},\end{aligned}$$

gde je:

- P - verovatnoća da će informacioni ili parni vektor biti uspešno primljen
- C₁- odgovarajući linearni (n, k) kod za ispravljanje t ili manje grešaka, kao i istovremeno detektovanje d (d > t) ili manje grešaka
- Q₁- uslovna verovatnoća da će poruka u_j biti uspešno dobijena od primljenog parnog bloka $\tilde{q}(u_j)$ inverzijom ili dekodovanjem baziranom na C₁, pri čemu je greška detektovana u primljenom informacionom vektoru $\tilde{v}_j = (\tilde{f}(u_j, \tilde{u}_j))$
- Q₂ - uslovna verovatnoća da će u_j biti uspešno dobijen iz $v_j = (f(u_j, u_j))$ posle druge retransmisije, pri čemu su greške detektovane u prvom parnom vektoru $\tilde{v}_j = (\tilde{f}[q(u_j), \tilde{q}(u_j)])$ i prvi parni primljeni blok $\tilde{q}(u_j)$ je propustio da obnovi u_j, ali je detektovao prisustvo greške u ($\tilde{q}(u_j), \tilde{u}_j$)
- p- kanalna verovatnoća prelaza

Propusna efikasnost SR-ARQ šeme se izračunava po formuli

$$\eta_{SR} = \frac{1}{T_{SR}} \left(\frac{k}{n} \right) = \left(\frac{k}{n} \right) P,$$

$$P = P_c + P_e,$$

$$\text{ako } P_e \ll P_c, \text{ tada } P \approx P_c,$$

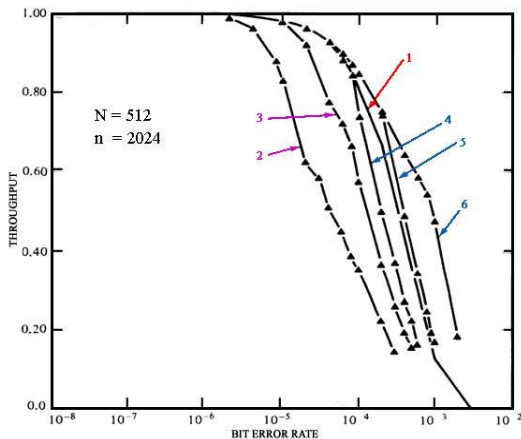
$$P_d = 1 - P \approx 1 - P_c,$$

$$T_{SR} = 1 \cdot P + 2 \cdot P(1 - P) + 3 \cdot P(1 - P)^2 + \dots + l \cdot P(1 - P)^l + \dots,$$

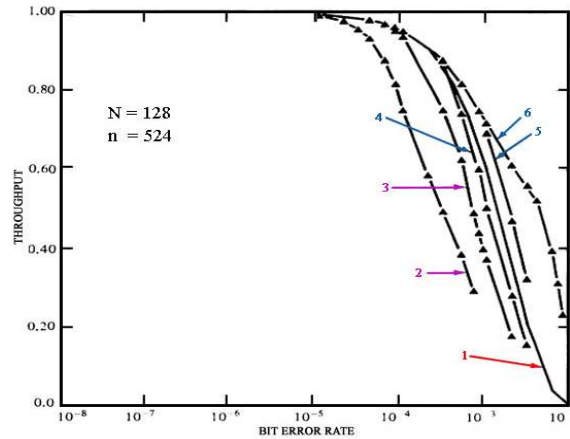
$$T_{SR} = \frac{1}{P},$$

gde je:

- P_c – verovatnoća da primljeni vektor ne sadrži grešku
- P_d – verovatnoća da primljeni vektor sadrži grešku koju je moguće detektovati
- P_e – verovatnoća da primljeni vektor sadrži grešku koja ne može da se detektuje.
- k/n – kodni količnik linearnog koda (n, k)
- T_{SR} – prosečan broj retransmisija



Sl. 2. Propusna efikasnost ARQ šema za N=512 i n=2024.



Sl. 3. Propusna efikasnost ARQ šema za N=128 i n=524.

- (1) idealna selektivno-povratna šema sa beskonačnom dužinom bafera
- (2) i (3) selektivno-povratna šema sa dužinama bafera N and 2N
- (4), (5) i (6) II tip selektivno-povratne hibridne ARQ šeme sa dužinom bafera N i mogućnošću ispravke grešaka dužine t=3, t=5 i t=10

V. ZAKLJUČAK

Analizom performansi SR-ARQ sistema i hibridnog ARQ sistema za različite dužine bafera i koda, primetili smo da propusna efikasnost idealnog SR-ARQ sistema može biti postignuta implementacijom invertibilnog koda C₁ dizajniranim za korekciju od t=3 do t=5 grešaka, u HARQ šemu. Ako bi kojim slučajem koristili kod koji može da ispravi broj grešaka veći od 5 (npr. t=10), dobili bismo sistem čija je propusna efikasnost bolja od propusne efikasnosti idealnog SR-ARQ sistema sa beskonačnom dužinom bafera.

LITERATURA

- [1] W. W. Peterson and E. J. Weldon, Jr., Error Correcting Codes. Cambridge, MA M.I.T. Press, 1978.
- [2] S. Lin, D. J. Costello, Jr., and M. J. Miller, "Automatic repeat request error control schemes", IEEE Trans. Commun., vol. 22, pp. 5-17, Dec.1984.
- [3] S. Lin and D. J. Costello, Jr., Error Control Coding: Fundamentals and Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.

ABSTRACT

In this paper we presented the type II selective-repeat hybrid ARQ scheme with buffer of finite size and explained the parity retransmission as the most important feature of this system. Based on this system, we showed all steps of the vector's transmission and retransmission procedure and discussed the receiver's operation in normal and blocked state. At the end of this paper we gave a definition of the throughput efficiency and analysed the throughput efficiency between Type II Hybrid-ARQ and Selective-Repeat ARQ Schemes.

Hybrid ARQ system based on selective-repeat ARQ scheme with finite buffer

Miroslav Jankov, Vojin Šenk