

OPŠTE NAPOMENE

- ❖ Uloga predmeta na III godini studija (peti semestar)!
Značaj predmeta!
- ❖ Organizacija predmeta:
 - predavanja – 3 časa nedeljno,
 - auditorne vežbe – 2 časa nedeljno,
 - laboratorijske vežbe – 6 vežbi (2 ciklusa sa po 3 vežbe),
 - Testovi – 40% ispita! Nisu uslov za rad na lab. vežbi,
 - Test – 10 pitanja ($3 \times 0.5 + 4 \times 1 + 3 \times 1.5$), 20/25 min!
- ❖ Laboratorijske vežbe su obavezne! Uslov za izlazak na ispit!
 - Pravilnik o radu na laboratorijskim vežbama!
 - Nadoknade na laboratorijskim vežbama su restriktivne!

TELEKOMUNIKACIJE 2 - NASTAVNICI

- ❖ dr Goran Marković
 - gmarkovic@etf.rs
 - kabinet 109, Lab. 54
- ❖ dr Dejan Vujić
 - vujic@etf.rs
 - kabinet 109, Lab. 54
- ❖ Administrator URL: si-telit.etf.rs, novi sajt - telit.etf.rs
 - Djordje Sarač, dipl. inž., kabinet 109, Lab. 54
 - sarac@etf.rs
- ❖ Obaveštenja i prateći materijali:
 - si-telit.etf.rs, novi sajt Katedre - telit.etf.rs
 - lists.etf.rs/www – mailing lista predmeta (Tel2)
 - oglasne table – između učionica 57 i 59, soba 108 i 109

CILJEVI PREDMETA!

1. Svrha kursa je upoznavanje sa osnovnim principima digitalnih telekomunikacija.
2. Nakon kursa, studenti će biti upoznati sa osnovnim temama u oblasti digitalnih telekomunikacija koje obuhvataju entropijsko kodiranje, linijske kodove, analizu intersimbolske interferencije, prenos digitalnih signala, digitalne modulacije, elemente teorije odlučivanja itd.
3. Efektivno 39 časova predavanja + 26 časova računskih vežbi + 15 časova laboratorijskih vežbi sa uvodnim testovima.
4. Približno 40 sati samostalnog učenja i vežbanja!

TELEKOMUNIKACIJE 2 - PROGRAM PREDMETA

- ❖ Digitalni svet, značaj digitalne obrade i prenosa signala. Model digitalnog telekomunikacionog sistema.
- ❖ Kriterijumi za ocenu performansi digitalnih telekomunikacionih sistema.
- ❖ Linijski kodovi, vremenske i spektralne karakteristike.
- ❖ Kodiranje izvora, algoritmi. Kriterijumi kvaliteta i ograničenja sistema.
- ❖ Prenos digitalnih signala u OOU. Uticaj šuma.
- ❖ Prenos digitalnih signala u OOU kroz kanal ograničenog opsega.
- ❖ Intersimbolska interferencija. Uobličavanje signala i ISI. Nyquist-ovi kriterijumi. Principi ekvalizacije kanala. Signaliziranje sa delimičnim odzivom.

TELEKOMUNIKACIJE 2 - PROGRAM PREDMETA

- ❖ Optimalni prijemnik u prisustvu ABGŠ.
- ❖ Elementi teorije odlučivanja.
- ❖ Digitalne koherentne i nekoherentne modulacije.
 - Digitalne modulacije i uticaj šuma.
 - Izbor energetski i spektralno efikasnih modulacija.
 - Poređenje digitalnih modulacija.

- ❖ Ispit iz jednog dela - trajanje 3 sata!
- ❖ 2 zadatka, 3 pitanja.
- ❖ Priznate lab. vežbe su uslov za izlazak na ispit!

Princip ocenjivanja

$$L = \frac{\text{Srednja ocena lab vežbi} = \sum (\text{Ocena sa vezbe})}{\text{Broj vežbi}}$$

$$R = \frac{\text{Srednja ocena (2 zadatka)} + \text{Srednja ocena (3 pitanja)}}{2} \geq 5.1$$

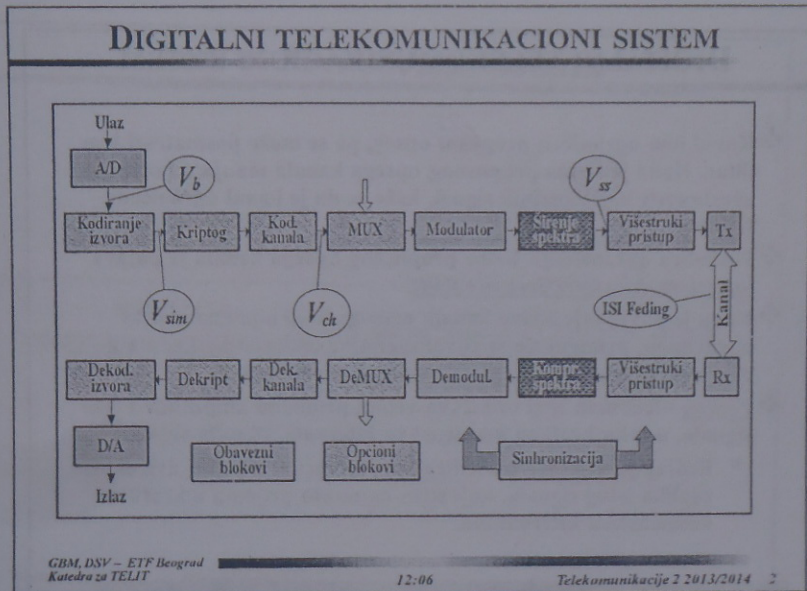
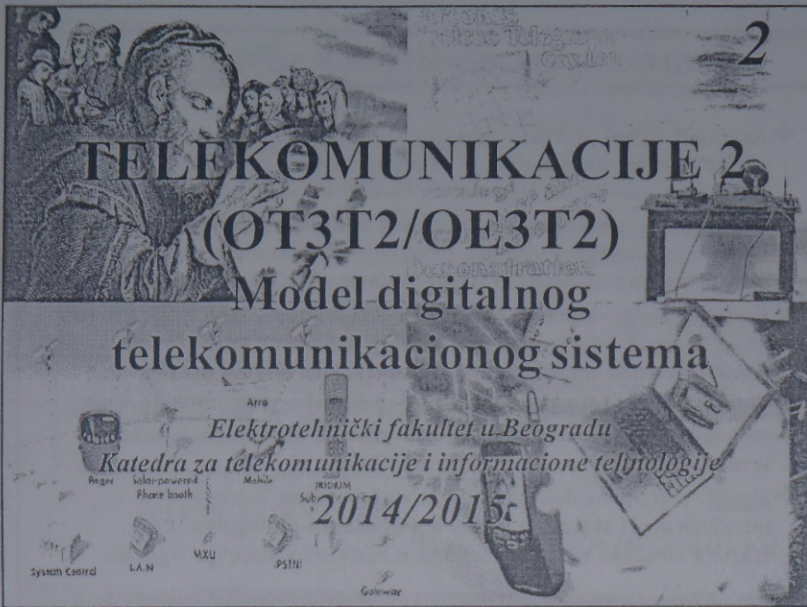
Srednja ocena (2 zadatka) ≥ 5.1 (eliminatoran uslov)

Srednja ocena (3 pitanja) ≥ 5.1 (eliminatoran uslov)

$$T2 = 0.4 \times L + 0.6 \times R \geq 5.1$$

TELEKOMUNIKACIJE 2 - LITERATURA

- ❖ Dukić M.L.: Principi telekomunikacija, 2. izdanje. Akademska misao, Beograd, 2014.
- ❖ Dukić M.L., Marković G. i Vujić D.: Principi telekomunikacija - Zbornik rešenih problema. Akademska misao, Beograd, 2009.
- ❖ Dukić M.L. i ost.: Telekomunikacije 2 - Praktikum za izradu laboratorijskih vežbi, 2009.
- ❖ Proakis J. and Salehi M.: Communication Systems Engineering, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1994.
- ❖ Proakis J. and Salehi M.: Digital Communication, 5th edition, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 2007.
- ❖ Das A.: Digital Communication, Principles and System Modelling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- ❖ Xiong F.: Digital Modulation Techniques, 2ed. Artech House, Boston, 2006.
- ❖ Sklar B.: Digital Communications: Fundamentals and Applications, John Wiley & Sons, London, 2001.



DIGITALNI TELEKOMUNIKACIONI SISTEM

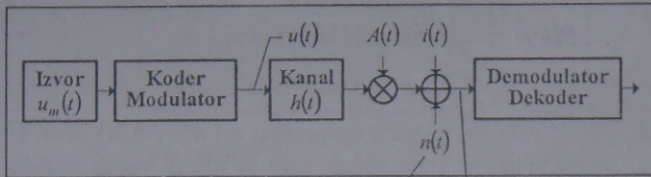
- ❖ Analogni signal pretvara se u A/D konvertoru (Telekomunikacije 1) u digitalnu formu. Ukoliko je prenošeni signal generički u digitalnom obliku, on se direktno dovodi na ulaz u koder izvora.
- ❖ Koder izvora - smanjenje redundanse u prenošenom signalu, a time i povećanje protoka. Posledica je smanjenje potrebnog propusnog opsega sistema za prenos (Teorija informacija i kodovi u TK).
- ❖ Kanalski koder - namerno se dodaje redundansa, tako da se greške usled šuma ili interferencije u toku prenosa kroz kanal, mogu ispraviti u prijemniku (Teorija informacija i kodovi u TK).
- ❖ Širenje spektra - namerno širenje spektra, signal postaje otporniji na uticaj interferencije, i može se svrstati u klasu signala *male verovatnoće presretanja* (Telekomunikacije 3).
- ❖ Kanal - signalu se dodaje aditivni slučajni šum, i drugi interferirajući signali, a preko kompleksnih multiplikativnih faktora izražava se uticaj *fedinga* u kanalu i slabljenja signala.

DIGITALNI TELEKOMUNIKACIONI SISTEM

- ❖ Kanal ima ograničen propusni opseg, pa se može posmatrati kao filter. Kada je širina propusnog opsega kanala manja od opsega učestanosti koji zauzima signal, kaže se da je kanal ograničene širine.
- ❖ Posledica ograničenja širine propusnog opsega kanala je pojava intersimbolske interferencije (ISI).
- ❖ Kada je povećanje širine kanala nemoguće ili nije ekonomski opravdano, primenjuje se ekvalizacija karakteristika kanala u cilju smanjenja uticaja intersimbolske interferencije.
- ❖ Feding - fenomen koji označava veliku promenu amplitude i faze signala, u toku kratkog vremenskog intervala, ili puta signala.
 - Feding je najčešće posledica interferencije između dve ili više replika istog signala, koji stižu na mesto prijema u kratkim vremenskim intervalima.

DTS -- UPROŠĆENI MODEL

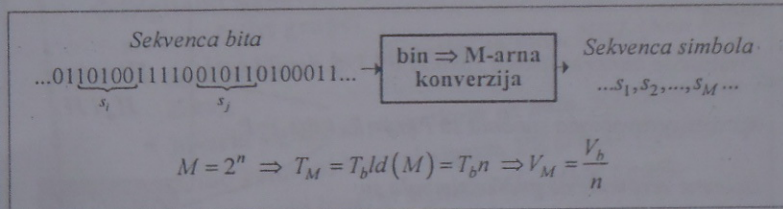
- ❖ Blok šema na na prethodnoj slici je samo uobičajena konfiguracija sistema.
- ❖ Realni sistem je po pravilu znatno kompleksniji.
- ❖ U cilju opisivanja tehnika modulacije i demodulacije i analiziranja njihovih karakteristika, često se koristi uprošćeni model sistema.



$$S_n(\omega) = N_0/2 = \text{Const.}$$

$$u(t) = A(t)[u(t) * h(t)] + n(t) + i(t)$$

BIN \Rightarrow M-ARNA KONVERZIJA



VEROVATNOĆA GREŠKE!

❖ Verovatnoća greške po simbolu na izlazu iz prijemnika data je,

$$P_{eM} = \sum_{i=1}^M P(s_i) P(\hat{s}_i \neq s_i)$$

s_i *Prenošeni simbol*

\hat{s}_i *Estimirani simbol*

$P(s_i)$ *Apriori verovatnoća simbola*

$P(\hat{s}_i \neq s_i)$ *Uslovna verovatnoća greške*

❖ Ako jedan od simbola formira sekvencu od $n = ld(M)$ bita, i ako je u toj sekvenci najviše jedan bit pogrešan, verovatnoća greške po bitu na izlazu iz prijemnika približno iznosi,

$$P_{eb} \cong \frac{P_{eM}}{ld(M)}$$

VEROVATNOĆA GREŠKE!

❖ Primer binarnog prenosa,

$$P_{eM} = P_{eb} = \sum_{i=1}^{M=2} P(s_i) P(\hat{s}_i \neq s_i) = P_0 P_{1/0} + P_1 P_{0/1}$$

Prenose se bunarni simbol simboli 0 i 1, tj. $s_0=0$ i $s_1=1$.

Apriori verovatnoća simbola su $P(s_0)=P_0$ i $P(s_1)=P_1$.

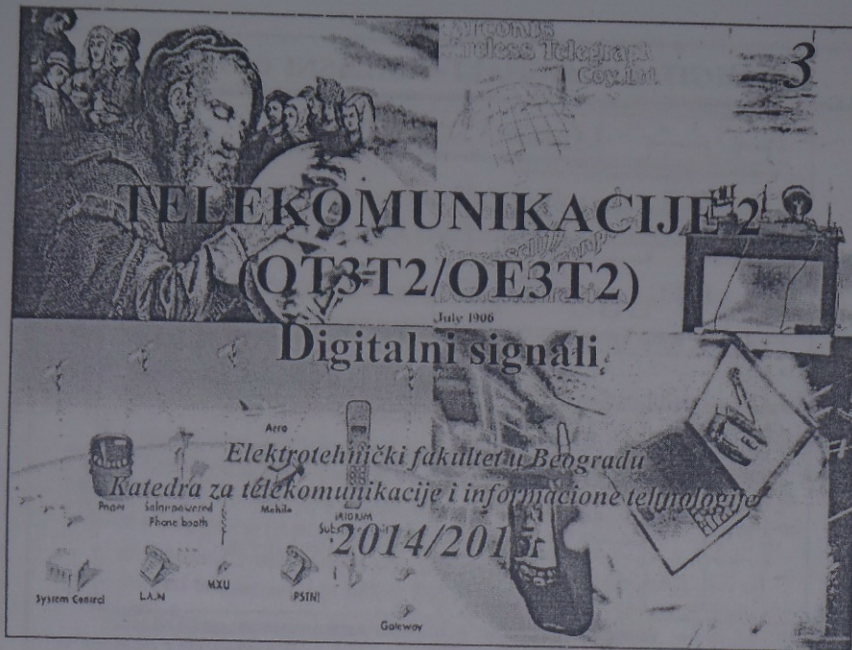
Uslovne verovatnoće greške simbola su:

$$P(\hat{s}_0 \neq s_0) = P_{1/0} \quad P(\hat{s}_1 \neq s_1) = P_{0/1}$$

Hipoteze
 H_0 i H_1

Odlučivanje

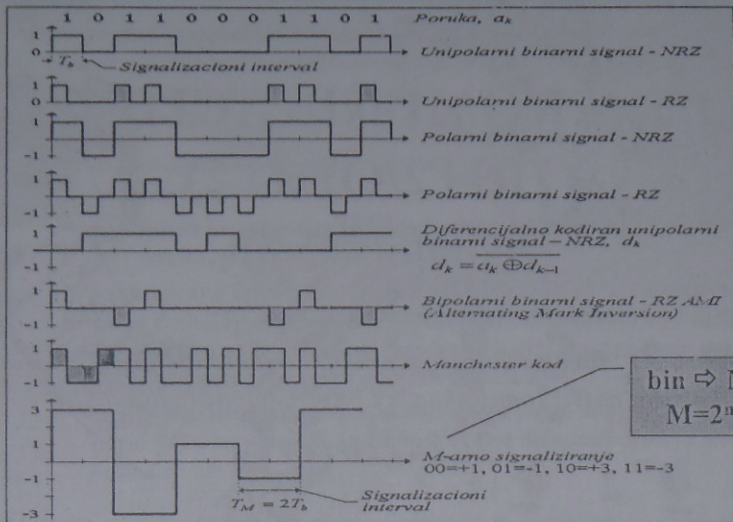
22



DIGITALNI SIGNALI

- ❖ Najjednostavniji oblik digitalnog signala je binarni signal, i on predstavlja elementarni digitalni signal.
- ❖ Ukoliko se formatiranje diskretne poruke obavlja signalom čiji značajan parametar ima više vrednosti, onda se radi o M -arnom signalu.
- ❖ Digitalni signali, u opštem slučaju, mogu se podeliti u sledeće četiri grupe:
 - binarni signali bez povratka na nulu, NRZ (*Non Return to Zero*),
 - binarni signali sa povratkom na nulu, RZ (*Return to Zero*),
 - fazno kodirani binarni signali, PE (*Phase Coded*),
 - višenivovski binarni signali, ML (*Multi Level*),
 - M -arni signali ($M=2^m$)!

DIGITALNI SIGNALI – TALASNI OBLICI



DIGITALNI SIGNALI – OSNOVNI ZAHTEVI

- ❖ Jednosmerna komponenta. Ukoliko signal nema jednosmernu (DC) komponentu omogućava se kondenzatorska, odnosno transformatorska, sprega u sistemu. Sistem nije osetljiv na izobličenja signala u niskofrekvencijskom domenu.
- ❖ Samosinhronizacija. Digitalni signal koji ima inherentnu osobinu samosinhronizacije znatno pojednostavljuje proces akvizicije i održavanja sinhronizacije u sistemu. Tipičan primer je *Manchester kod* koji ima tranziciju na sredini svakog signalizacionog intervala bez obzira na strukturu prenošenog signala – detekcija prolaska kroz nulu.
- ❖ Korekcija greške. Pojedini postupci formatiranja, kao što je duobinarno signaliziranje, omogućuju detekciju greške u toku prenosa bez dodavanja posebnog bita za detekciju greške.
- ❖ Spektralna efikasnost. Spektralna efikasnost uobičajeno se definiše kao količnik ekvivalentne brzine signaliziranja (ekvivalentni binarni protok) i minimalno potrebnog opsega učestanosti za prenos signala. Tipičan primer za povećanje spektralne efikasnosti je korišćenje višenivovskih digitalnih signala.
- ❖ Otpornost na šum. Izborom pogodnog oblika digitalnog signala moguće je značajno uticati na otpornost sistema na uticaj šuma u toku prenosa signala. Primera radi, polarni binarni NRZ signal znatno je otporniji na uticaj šuma u odnosu na unipolarni RZ binarni signal (pri signalizaciji sa istom srednjom snagom signala na predaji ili istom maksimalnim naponom signala).

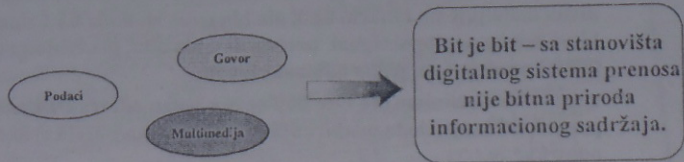
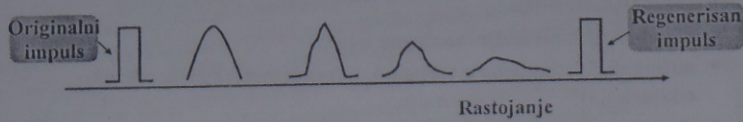
DIGITALNI SIGNALI

- ❖ Prethodno (Telekomunikacije 1) je pokazano kako se može izvršiti konverzija analognih signala u odgovarajući digitalni oblik (IKM, DIKM, ADIKM, DM).
- ❖ Primenom A/D konverzije analogne signale:
 - najpre diskretizujemo u vremenu, u trenucima nT (T je period odabiranja);
 - obavljammo kvantizaciju amplituda dobijenih odbiraka na jednu od $q=2^m$ vrednosti (q broj kvantizacionih nivoa);
 - kvantizirane odbirke kodujemo tako što svakom kvantizacionom nivou dodeljujemo binarni kod, niz binarnih simbola 0 i 1 dužine m bita, te smo analogni signal pretvorili u niz bita, pri čemu grupe od m bita predstavljaju jedan odbirak signala;
 - u *real-time* sistemima sve bite koji opisuju jedan odbirak moramo preneti tokom perioda odabiranja T (pre dolaska/počетка) idućeg odbirka.

DIGITALNI SIGNALI

- ❖ Kroz digitalne sisteme prenosa se ne prenose samo analogni signali, već i signali koji su prirodno, izvorno, zadati u digitalnom obliku. Npr. sistem za prenos podataka između dva računara (imamo fajl sačinjen od binarnih simbola koji ne predstavlja analogni signal).
- ❖ Izvorno digitalni signali, su potpuno različite prirode u odnosu na analogne signale. Kod ovih signala nije moguće definisati odnos S/N , pošto signali u vremenskom domenu zapravo i ne postoje, postoji samo povorka binarnih simbola.
- ❖ Pri analizi kvaliteta sistema za prenos digitalnog signala ne mogu se koristiti kriterijumi koji su korišćeni za analizu kvaliteta analognog sistema za prenos (dakle odnos signal/šum), već se moraju koristiti drugačiji kriterijumi ocene.
- ❖ U slučaju digitalnog sistema prenosa, ako se pri prenosu pojedinačnog simbola ne načini greška usled dejstva šuma, simbol se pravilno prenosi kao da šum nije ni delovao. Samim tim, digitalni prenos poseduje prednost u odnosu na analogni u smislu otpornosti na šum.

DIGITALNI SIGNALI



DIGITALNI SIGNALI

❖ Osnovni parametar na osnovu koga se vrednuje kvalitet jednog sistema za prenos digitalnog signala je verovatnoća greške pri prenosu.

- Pri prenosu digitalnog signala, u pojedinačnom periodu signaliziranja, prenose se pojedinačni simboli "0" i "1", pretvoreni u fizičke, električne signale. Binarni simboli šalju se u obliku impulsa sa različitim karakteristikama za slučaj "0" i "1";
- Ovi impulsi pri prenosu preko linije veze trpe uticaj šuma. Usled toga, na mestu prijema može se doneti pogrešna odluka o tome da li je u trenutnom periodu signaliziranja poslata "0" i "1", odnosno postoji neka verovatnoća donošenja pogrešne odluke;
- Pri analognom prenosu signala, šum se dodaje na signal koji se prenosi, odnosno svo vreme u izlaznom signalu postoji uticaj šuma, koji se meri vrednošću S/N.
- Pri digitalnom prenosu signala, ako se pri prenosu pojedinačnog simbola ne načini greška usled dejstva šuma, simbol se pravilno prenosi kao da šum nije ni delovao. Samim tim, digitalan prenos poseduje prednost u odnosu na analogni u smislu otpornosti na šum

BINARNI I M-ARNI PRENOS

- ❖ Digitalni prenos signala u suštini predstavlja prenos povorne binarnih simbola "0" i "1", dobijenih A/D konverzijom analognog signala ili kao niz binarnih simbola izvorno digitalnog signala.
- ❖ Ovaj prenos može se ostvariti na takav način da se preko linije veze prenosi originalan niz binarnih simbola "0" i "1", i tada govorimo o binarnom prenosu. Trajanje simbola na liniji veze, u ovom slučaju, predstavlja trajanje bita, T_b , definisano A/D konverzijom, odnosno brojem bita u sekundi koji prenosimo – binarnim protokom (brzinom prenosa binarnog signala), V_b .
- Logički signal "0" ili "1", koji treba preneti modelujemo *delta impulsima* koji može imati amplitude 0 i 1 (V), odnosno -1 i 1 (V), respektivno. Imamo unipolarni prenos u prvom, ili polarni prenos u drugom slučaju. Kada posmatramo celokupan niz bita koje treba preneti dobijamo da je signal opisan izrazima:

$$\text{unipolarni prenos: } u(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT_b), a_k \in \{0,1\}$$

$$\text{polaran prenos: } u(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT_b), a_k \in \{-1,1\}$$

brzina prenosa, binarni protok signala je $V_b = 1/T_b$

BINARNI I M-ARNI PRENOS

- ❖ Prenos niza binarnih simbola, može se ostvariti i na takav način da se pre prenosa izvrši kombinovanje nekoliko uzastopnih binarnih simbola "0" i "1" i na taj način dobiju tzv. M-arni simboli.
- ❖ U ovom slučaju, kombinovanjem m uzastopnih bita, dobijaju se binarne reči, *M-arni* simboli, pri čemu nastaje $M=2^m$ različitih simbola. Trajanje simbola na liniji veze, T_S , je m puta duže od trajanja pojedinačnog bita. U ovom slučaju govorimo o M-arnom protoku, ili protoku simbola (brzinom prenosa simbola), preko linije veze.
- M-arne simbole, koji predstavljaju logičke veličine, modelujemo *delta impulsima* koji mogu imati M različitih vrednosti amplitude dodeljenih pojedinačnim simbolima. Kada posmatramo originalan niz binarnih simbola, odnosno izvedeni niz M-arnih simbola, koje treba preneti dobijamo da je signala koji treba preneti opisan izrazom:

$$\text{M-arni prenos: } u(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT_S), a_k \in \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$$

Trajanje simbola na liniji veze je $T_S = mT_b$

Brzina prenosa, M-arni protok signala, protok simbola je $V_S = 1/T_S$

Ekvivalentni binarni protok je $V_B = 1/T_b = V_S \log_2 M = mV_S$

BINARNI I M-ARNI PRENOS

❖ M-arni prenos je:

- komplikovaniji, složenija je realizacija;
- njegovom primenom ostvaruje se u veća verovatnoća greške nego u slučaju binarnog prenosa.
- M-arni prenos poseduje i dobre osobine - najbitnija je manji zahtevani propusni opseg za prenos, tj. veća spektralna efikasnost.

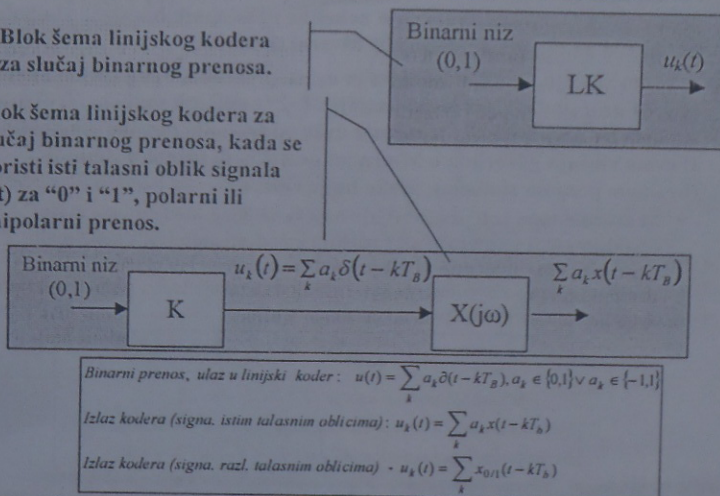
❖ Bez obzira na tip prenosa (binarni ili M-arni), želimo da prenesemo niz delta impulsa sa brzinom prenosa, protokom, V_b , odnosno V_s .

- U realnom slučaju, nije moguće preneti dirakove impulse, između ostalog ovakvi signali realno ne postoje, a imali bismo i izuzetno veliku širinu spektra signala koji treba preneti – širok propusni opseg;
- Stoga, simboli koji se prenose, odnosno odgovarajući binarni impulsi pretvaraju se u odgovarajući oblik električnog signala koji će biti poslat preko linije veze – pri tome se koristi linijski koder.
- U linijskom koderu, obavlja se konverzija binarnog ili M-arnog niza informacionih simbola, u električni signal, tako što se za svaki binarni ili M-arni simbol na ulazu, emituje jedan *signal konačnog trajanja* koji odgovara tom simbolu.

BINARNI PRENOS

Blok šema linijskog koder
za slučaj binarnog prenosa.

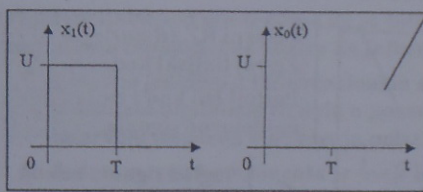
Blok šema linijskog koder
za slučaj binarnog prenosa, kada se
koristi isti talasni oblik signala
 $x(t)$ za "0" i "1", polarni ili
unipolarni prenos.



BINARNI PRENOS

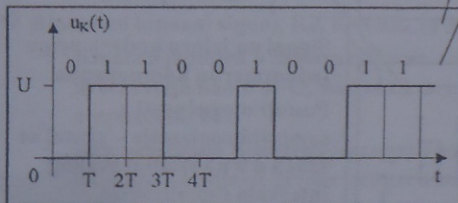
- ❖ U slučaju binarnog prenosa, za simbol "0" emituje se signal $x_0(t)$, a za simbol "1" signal $x_1(t)$, trajanja T_b . Svi emitovani signali čine jedan kodirani signal $u_k(t)$.
 - Signali $x_0(t)$ i $x_1(t)$ u slučaju polarnog prenosa su istog oblika, ali pozitivne ili negativne vrednosti amplitude, dok se pri unipolarnom prenosu koristi jedan oblik signala za $x(t)$, standardni talasni oblik signala (*elementarni impuls*), a za binarni simbol "0" se ne obavlja se slanje signala – pauza;
 - njegovom primenom ostvaruje se u veća verovatnoća greške nego u slučaju binarnog prenosa.
 - M-arni prenos poseduje i dobre osobine - najbitnija je manji zahtevani propusni opseg za prenos, tj. veća spektralna efikasnost.
- ❖ Postupak pretvaranja ulaznog binarnog niza u kodovani signal zove se *linijsko kodiranje*. Suština linijskog kodiranja je izbor signala $x_0(t)$, koji odgovara simbolu "0", i signala $x_1(t)$, koji odgovara simbolu "1".
 - Na ulaz u linijski koder, pri binarnom prenosu, dolazi V_b bita/s, tako da linijski koder mora da emituje V_b signala $x_0(t)$ ili $x_1(t)$ u sekundi;
 - Trajanje jednog signala je onda $T_b = 1/V_b$, gde je V_b binarni protok odgovara tom simbolu.

UNIPOLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ



Unipolarni NRZ (*Non-Return-to-Zero*) linijski kod.

Izgled signala nakon kodovanja.

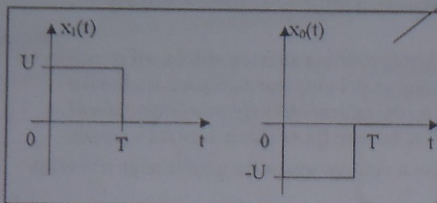


Signal na izlazu kodera ima izraženu jednosmernu komponentu – ne može se koristiti ako linija veze ne prenosi DC komponentu.

Nema mogućnosti samosinhronizacije.

Nema mogućnost detektovanja grešaka.

POLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ



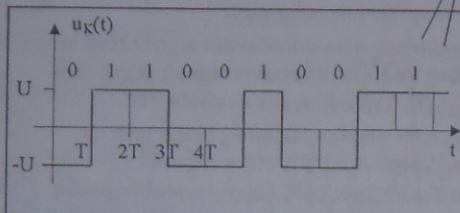
Polarni NRZ (*Non-Return-to-Zero*) linijski kod.

Izgled signala nakon kodovanja.

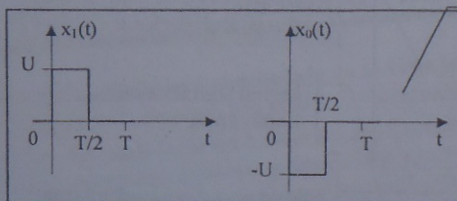
Signal na izlazu koodera nema jednosmernu komponentu ako su binarni simboli 0 i 1 jednakoverovatni.

Nema uvek mogućnosti samosinhronizacije – za duže sekvence 0 ili 1 prijemnik ne može da odredi početak i kraj trajanja simbola.

Nema mogućnost detektovanja grešaka u prenosu.



POLARNI BINARNI SIGNAL, RZ



Polarni RZ (*Return-to-Zero*) linijski kod.

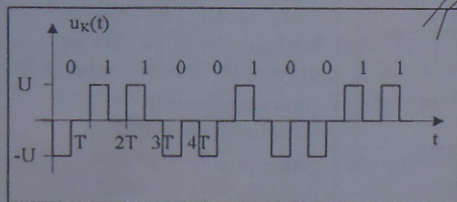
Postoji isti kod i za unipolarne signale.

Izgled signala nakon kodovanja.

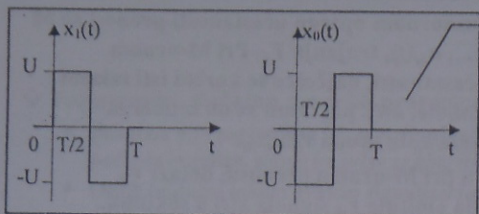
Signal na izlazu koodera nema jednosmernu komponentu.

Postoji mogućnosti samosinhronizacije – signal se vraća u 0 na sredini svakog intervala signalizacije.

Nema mogućnost detektovanja grešaka u prenosu.

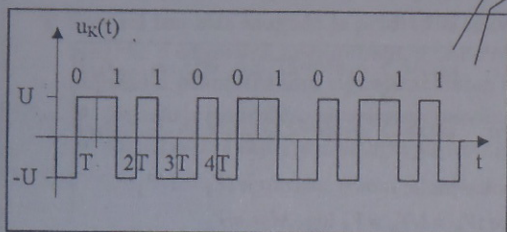


MANCHESTER SIGNAL



Manchester linijski kod.
Koristi se u *Ethernet*
mrežama (računarskim).

Izgled signala nakon
kodovanja.



Signal na izlazu kodera nema
jednosmernu komponentu.

Postoji mogućnosti
samosinhronizacije – signal
prolazi kroz 0 na sredini
svakog intervala signalizacije.
Nema mogućnost detektovanja
grešaka u prenosu.

BINARNI PRENOS

- ❖ Diferencijalni kod obezbeđuje da se šalje jednak broj pozitivnih i negativnih impulsa, bez obzira na informacione simbole.
 - Binarna jedinica u informacionom sadržaju dovodi do promene polariteta digitalnog signala u posmatranom signalizacionom intervalu (binarna 0 ne menja polaritet signala).
 - Jednosmerna komponenta je uvek bliska vrednosti 0V (na dovoljno dugoj sekvenci).
- ❖ Bipolarni binarni signal, RZ ili NRZ, ili AMI signal
 - Binarna jedinica u informacionom sadržaju se naizmenično predstavlja kao U i $-U$, dok se binarna nula predstavlja sa amplitudom 0V.
 - Dva uzastopna pozitivna ili negativna impulsa ($+U, +U$) ili ($-U, -U$) ukazuju na pojavu greške pri prenosu – mogućnost detekcije greške.

M-ARNI PRENOS

- ❖ U slučaju M-arnog prenosa u osnovnom opsegu učestanosti prenosi se M različitih talasnih oblika $u_1(t), \dots, u_M(t)$, trajanja T_S . Pri M-arnom prenosu u osnovnom opsegu učestanosti, najčešće se koristi isti talasni oblik signala za sve M-arne simbole, $u(t)$, pri čemu se on množi sa različitim vrednostima amplitude a_k iz skupa s_1, \dots, s_M .
- ❖ Pošto na ulaz u linijski koder, u pri M-arnom prenosu, dolazi V_S simbola/s, onda i koder mora da emituje V_S signala $x(t)$ u sekundi. Trajanje jednog signala je onda $T_S = 1/V_S$, gde je V_S M-arni protok, protok simbola.

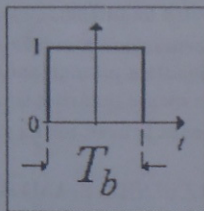
$$\text{M-arni prenos, ulaz u koder: } u(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT_S), a_k \in \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$$

$$\text{M-arni prenos, izlaz iz kodera: } u(t) = \sum_k a_k x(t - kT_S), a_k \in \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$$

$$\text{Brzina prenosa, M-arni protok signala, protok simbola je: } V_S = 1/T_S$$

$$\text{Ekvivalentni binarni protok je: } V_B = 1/T_B = V_S \log_2 M = mV_S.$$

OPŠTI OBLIK DIGITALNIH SIGNALA



$$u(t) = \sum_k a_k x(t - kT)$$

a_k Simboli

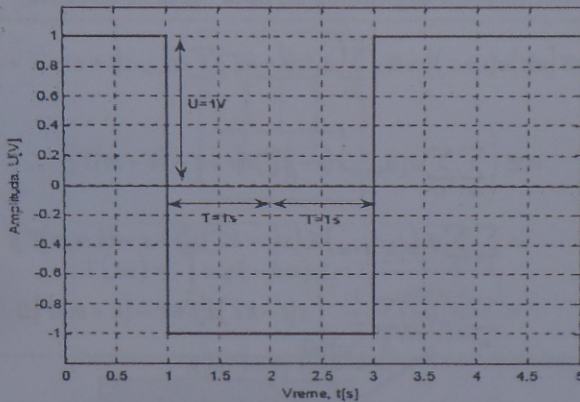
$x(t - kT)$ Standardni signal

T Signalizacioni interval

PRIMER - POLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ

- ❖ Posmatramo slučajnu povorku pravougaonih impulsa trajanja T_b .
 - Povorka nije periodična (T_b je trajanje signalizacionog intervala a ne perioda impulsa, *slanje impulsa se obavlja periodično*).
 - Oblik impulsa tokom svakog signalizacionog intervala $x(t)$ je usamljeni pravougaoni impuls - standardni talasni oblik (*elementarni impuls*) je usamljeni pravougaoni impuls trajanja T_b i amplitude U ;
- ❖ Povorci impulsa moguće je pridružiti sekvencu bita pri čemu svaka binarna 0 odgovara negativnom, a binarna 1 pozitivnom polaritetu impulsa u posmatranom signalizacionom intervalu.
 - Signalu je pridružena binarna informaciona sekvencu (*informacioni sadržaj*);
 - Signal koji se emituje je binarni polarni signal, NRZ.

PRIMER - POLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ

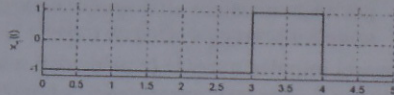


PRIMER - POLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ

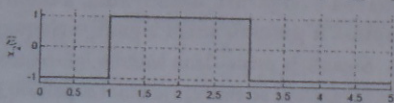
❖ Ansambl mogućih funkcija polarnog binarnog digitalnog signala:

- U pet sukcesivnih signalizacionih intervala može da se javi $2^5 = 32$ različitih talasnih oblika digitalnog signala ' toliko ima različitih kombinacija biranih simbola.
- Što je vreme posmatranja duže, broj kombinacija raste eksponencijalno, ali svi ovi signali imaju nake zajedničke osobine.

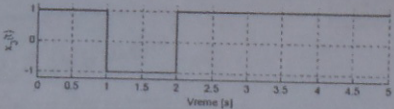
$$a^{(1)} = [-1, -1, -1, 1, -1] \rightarrow$$



$$a^{(2)} = [-1, 1, 1, -1, -1] \rightarrow$$



$$a^{(3)} = [1, -1, 1, 1, 1] \rightarrow$$



SGSS DIGITALNIH SIGNALA

❖ Autokorealacija digitalnog signala data je izrazom,

$$\begin{aligned} R_u(\tau) &= \mathcal{E}[u(t)u(t+\tau)] = \mathcal{E}\left\{\sum_k a_k x(t-kT) \sum_m a_{k+m} x[t+\tau-(k+m)T]\right\} \\ &= \mathcal{E}\left\{\sum_k \sum_m a_k a_{k+m} x(t-kT) x[t+\tau-(k+m)T]\right\} \\ &= \sum_m \sum_k \mathcal{E}(a_k a_{k+m}) \mathcal{E}\{x(t-kT) x[t+\tau-(k+m)T]\} \\ &= \sum_m R_a(m) \sum_k \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t-kT) x[t+\tau-(k+m)T] dt \end{aligned}$$

$$R_a(m) = \mathcal{E}[a_k a_{k+m}]$$

SGSS DIGITALNIH SIGNALA

$$R_u(\tau) = \sum_m R_a(m) \sum_k \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t-kT) x[t+\tau-(k+m)T] dt \quad \mu = t-kT$$

$$R_u(\tau) = \sum_m R_a(m) \sum_k \frac{1}{T} \int_{-T/2-kT}^{T/2-kT} x(\mu) x(\mu+\tau-mT) d\mu = \sum_m R_a(m) \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x(\mu) x(\mu+\tau-mT) d\mu$$

$$R_u(\tau) = \sum_m R_a(m) \frac{1}{T} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{-j\omega\tau} e^{j\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} x(\mu) e^{j\omega\mu} d\mu d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|X(j\omega)|^2}{T} \sum_m R_a(m) e^{-j\omega\tau} e^{j\omega\tau} d\omega$$

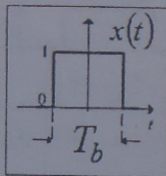
$$S_u(f) = \frac{|X(jf)|^2}{T} \sum_m R_a(m) e^{-j2\pi f m T}$$

$$S_x(f) = \frac{|X(jf)|^2}{T} \quad R_a(m) = \mathbb{E}[a_k a_{k+m}]$$

IFT

STANDARDNI SIGNAL - X(jω)!

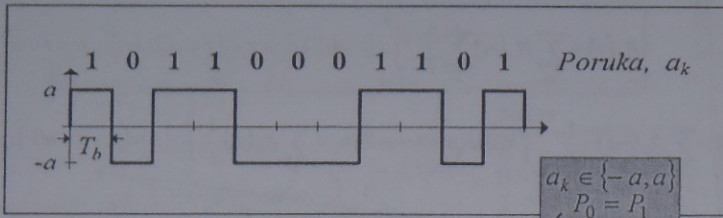
❖ Standardni signal oblika usamljenog pravougaonog impulsa!



$$X(j\omega) = \int_{-T_b/2}^{T_b/2} \exp(-j\omega t) dt = T_b \frac{\sin(\omega T_b/2)}{\omega T_b/2}$$

$$X(jf) = T_b \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b}$$

SGSS – POLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ

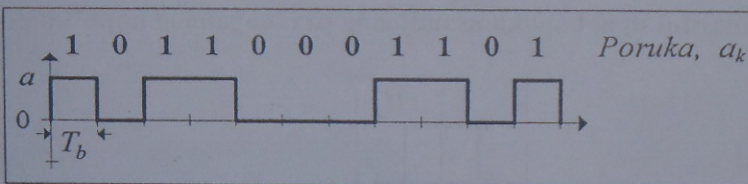


$$R_a(m) = \mathbb{E}(a_k a_{k+m}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(aa) + \frac{1}{2}(-a)(-a) = a^2, & m=0 \\ \frac{1}{4}(aa) + \frac{1}{4}[a(-a)] + \frac{1}{4}(-aa) + \frac{1}{4}[-a(-a)] = 0, & m \neq 0 \end{cases}$$

$$S_u(f) = \frac{|X(jf)|^2}{T_b} \sum_m R_a(m) e^{-j2\pi f m T_b} = a^2 T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2$$

$$X(jf) = T_b \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b}$$

SGSS – UNIPOLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ



$$R_a(m) = \mathbb{E}(a_k a_{k+m}) = \begin{cases} \frac{1}{2}0^2 + \frac{1}{2}a^2 = \frac{a^2}{2}, & m=0 \\ \frac{1}{4}(0 \cdot a) + \frac{1}{4}(0 \cdot 0) + \frac{1}{4}(a \cdot 0) + \frac{1}{4}(aa) = \frac{a^2}{4}, & m \neq 0 \end{cases}$$

$$X(jf) = T_b \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b}$$

SGSS – UNIPOLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ

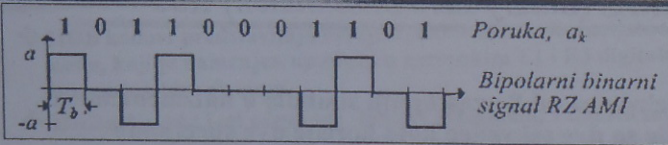
$$S_u(f) = \frac{|X(jf)|^2}{T_b} \sum_m R_a(m) e^{-j2\pi f m T_b} = T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \left(\frac{a^2}{2} + \frac{a^2}{4} \sum_{m \neq 0} e^{-j2\pi f m T_b} + \frac{a^2}{4} - \frac{a^2}{4} \right)$$

$$= \frac{a^2}{4} \cdot T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \left(1 + \sum_m e^{-j2\pi f m T_b} \right)$$

Poisson – ova sumaciona formula $\sum_m e^{-j2\pi f m T} = \frac{1}{T} \sum_m \delta\left(f - \frac{m}{T}\right)$

$$S_u(f) = \frac{a^2}{4} T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{T_b} \sum_m \delta\left(f - \frac{m}{T_b}\right) \right] = \frac{a^2}{4} \delta(f) + \frac{a^2}{4} T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2$$

SGSS - BIPOLARNI BINARNI SIGNAL, NRZ



$$R_a(m) = \mathbb{E}(a_k a_{k+m}) = \begin{cases} \frac{1}{2} 0^2 + \frac{1}{4} a^2 + \frac{1}{4} a^2 = \frac{a^2}{2}, & m = 0 \\ -\frac{a^2}{4}, & m = \pm 1 \\ 0, & m \neq 0, m \neq \pm 1 \end{cases}$$

$$a_k \in \{0, \pm a\}$$

$$P(0) = 1/2$$

$$P(a) = P(-a) = 1/4$$

$$S_u(f) = \frac{|X(jf)|^2}{T_b} \sum_m R_a(m) e^{-j2\pi f m T_b} = T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \left[\frac{a^2}{2} - \frac{a^2}{4} e^{j2\pi f T_b} - \frac{a^2}{4} e^{-j2\pi f T_b} \right]$$

$$S_u(f) = a^2 T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \sin^2(\pi f T_b)$$

BNZS (*Binary Zero Substitution*) KOD

- ❖ Osnovni problem u primeni AMI (*Alternating Mark Inversion*) linijskog koda je pojava dugačke sekvence binarnih simbola 0, jer AMI kod spada u tronivoske kodove sa simetričnim nenultim simbolima suprotnog znaka.
- ❖ Modifikacija koda tako što se veći broj uzastopnih simbola 0 menja odgovarajućim kodnim dodatkom, posebnom kombinacijom simbola koja ne postoji u originalnom kodu.
- ❖ Modifikovani AMI linijski kod poznat je pod nazivom BnZS (*Binary Zero Substitution*) kod, gde n predstavlja broj uzastopnih binarnih simbola 0, koji se zamenjuju kodnim dodatkom.
- ❖ Najčešće korišćeni kodovi su B8ZS i B3ZS.

BNZS (*Binary Zero Substitution*) KOD

- ❖ B8ZS - sekvenca od 8 uzastopnih simbola 0 naizmenično se zamenjuje sa dve sekvence koje koriste dve specijalne kombinacije simbola koje ne postoje u originalnom kodu.
- ❖ Ako je poslednji nenulti simbol u emitovanoj originalnoj sekvenci bio pozitivan, a pre početka 8 uzastopnih simbola 0, tada predajnik 8 uzastopnih nultih elemenata zamenjuje sekvencom $+1-1+1-1+1-1-1+1$, koja se završava pozitivnim simbolom i sadrži sledeće dve specijalne kodne kombinacije:
 - na prvom mestu posle pozitivnog simbola, ponovo je emitovan pozitivni simbol,
 - na sedmom mestu posle negativnog simbola ponovo se emituje negativni simbol.

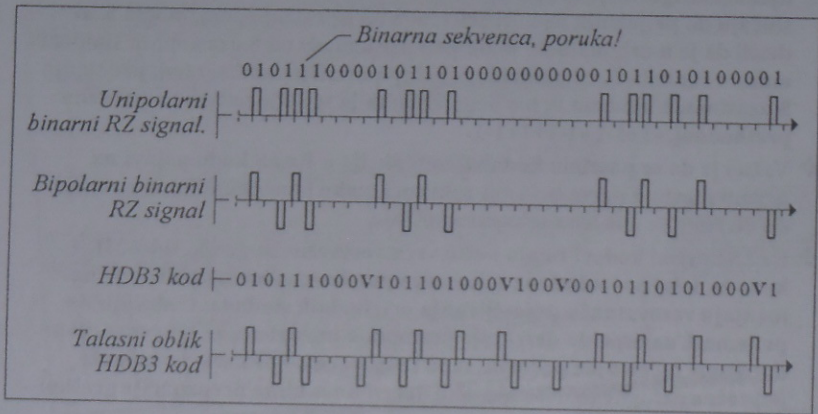
BNZS (*BINARY ZERO SUBSTITUTION*) KOD

- ❖ Uloga prijemnika je da detektuje ovu sekvencu u celini i da na osnovu njene konfiguracije utvrdi da se radi o zameni 8 uzastopnih simbola . U slučaju da prijemnik ne uoči sekvencu na ispravan način, moglo bi se desiti da je u originalnom kodu prikaže kao niz od 8 uzastopnih simbola umesto simbola 0. Ukoliko je poslednji poslati nenulti simbol, pre slanja 8 uzastopnih simbola 0, bio negativan, tada se šalje sekvenca inverzna prethodnoj, $-1+1-1+1-1+1+1-1$.
- ❖ Važno je da se posebna kodna kombinacija u BnZS kodu pojavi na prvom mestu u novoubačenoj sekvenci, kako bi prijemnik bio u stanju da utvrdi gde ubačena sekvenca počinje.
- ❖ BnZS linijski kodovi imaju nešto veću verovatnoću greške od AMI kodova, iako novoubačene sekvence i posebne kodne kombinacije ne menjaju verovatnoću pojavljivanja originalnih simbola. U slučaju da prijemnik ne uspe da detektuje postojanje novoubačene sekvence, ili ne detektuje tačno njen početak, tada se čak i cela nova sekvenca može pogrešno dekodirati. Na taj način dolazi do n-bitne propagacije greške!

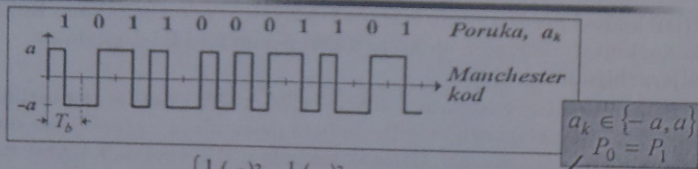
HDB (*HIGH DENSITY BIPOLAR*)

- ❖ HDB kodovi predstavljaju evropski ekvivalent sekvencijalnom BnZS kodu, koji je namenjen upotrebi u evropskim E1 i E3 digitalnim hijerarhijskim nivoima.
- ❖ HDBm linijski kod odgovara BN(m+1)ZS kodu, s tim što se posebna kodna kombinacija originalnih simbola primenjuje na (m+1)-om mestu u novoubačenoj sekvenci. Ostatak simbola u sekvenci su 0, izuzev možda prvog simbola u novoj sekvenci koji može imati nenultu vrednost. Taj simbol se postavlja tako da se ne mogu dogoditi dve uzastopne specijalne kodne kombinacije, što znači da je broj promena znaka između dve specijalne kombinacije neparan.
- ❖ Najčešće korišćen je HDB3, koji je prihvaćen i kao međunarodni standard. Specijalne kodne kombinacije ovog koda su 000V i B00V, gde B=1 znači prihvatanje a V=1 neprihvatanje bipolarnog pravila. Izbor sekvence 000V ili B00V obavlja se tako da uzastopni impulsi naizmenično menjaju znak čime se izbegava jednosmerna komponenta signala. To znači, da ako nakon poslednje specijalne sekvence sledi paran broj 1 koristiće se sekvenca B00V, odnosno ako sledi neparan broj 1 koristiće se specijalna sekvenca 000V.

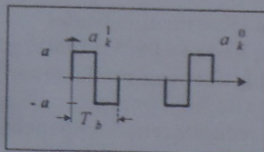
HDB3



SGSS - MANCHESTER KODA



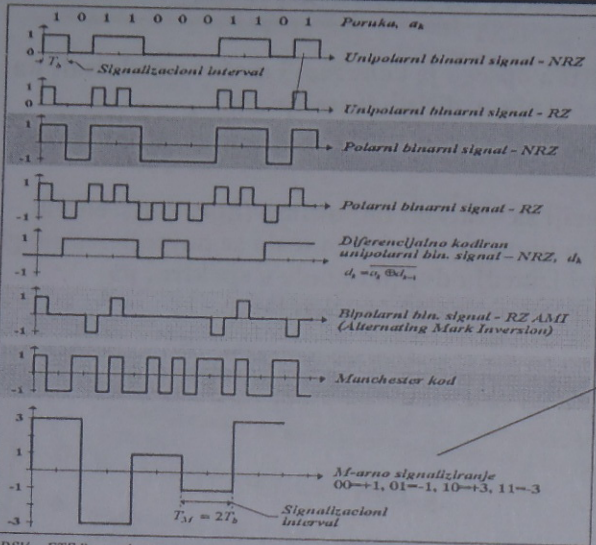
$$R_a(m) = \mathbb{E}(a_k a_{k+m}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(a_k^0)^2 + \frac{1}{2}(a_k^1)^2 = a^2, & m = 0 \\ \frac{1}{4}(a_k^1 a_k^1) + \frac{1}{4}(a_k^1 a_k^0) + \frac{1}{4}(a_k^0 a_k^1) + \frac{1}{4}(a_k^0 a_k^0) = 0, & m \neq 0 \end{cases}$$



$$|X(jf)|^2 = T^2 \left(\frac{\sin \pi f T / 2}{\pi f T / 2} \right)^2 \sin^2(\pi f T / 2)$$

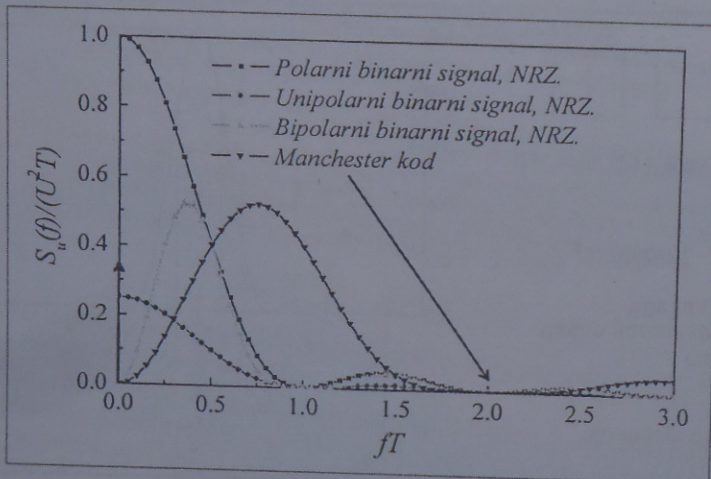
$$S_u(f) = \frac{|X(jf)|^2}{T_b} \sum_m R_a(m) e^{-j2\pi f m T_b} = a^2 T \left(\frac{\sin \pi f T / 2}{\pi f T / 2} \right)^2 \sin^2(\pi f T / 2)$$

DIGITALNI SIGNALI – TALASNI OBLICI



bin \Leftrightarrow M
 $M=2^n$

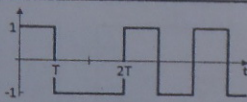
SGSS DIGITALNIH SIGNALA



ŠIRINA OPSEGA ZA PRENOS

- ❖ Praktična širina opsega je konačna, i može se definisati na osnovu većeg broja različitih kriterijuma.
- ❖ U literaturi se koriste različiti kriterijumi za određivanje širine spektra.
- ❖ Pri signalizaciji sa kratkim impulsima (npr. korišćenjem pravougaonih impulsa) očigledno je da se najveći deo snage signala nalazi izmedju dve prve nule u spektru, pa kriterijum prve nule izgleda adekvatan.

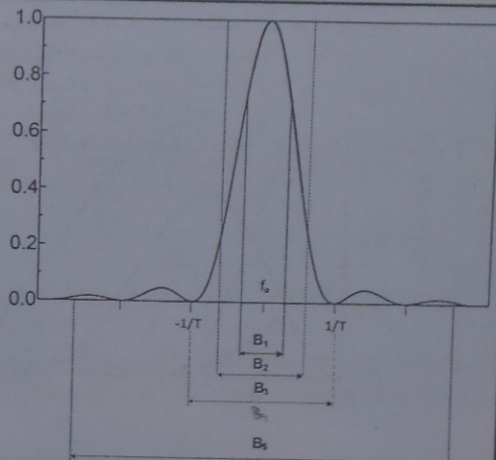
ŠIRINA OPSEGA ZA PRENOS



$$S(f) = T [\text{sinc}(\pi(f-f_0)T)]^2$$

Kriterijumi

1. 3dB snaga
2. Ekvivalentni opseg šuma
3. $2/T = 2V$
4. 99% snage
5. Dato slabljenje



KRITERIJUMI ZA IZBOR ŠIRINE OPSEGA

- ❖ B1 - kriterijum 3dB slabljenja. To je opseg učestanosti u kome je spektralna gustina srednje snage veća od $\frac{1}{2}$ njene maksimalne vrednosti - $B_1 = 2 \times (0.443T)$.
- ❖ B2 - Kriterijum ekvivalentnog opsega. Srednja snaga posmatranog signala jednaka srednjoj snazi hipotetičkog signala čija je spektralna gustina srednje snage konstantna u opsegu učestanosti širine B_2 .

$$B_2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S(f) df}{S(f_0)}$$

- ❖ B3 - kriterijum prve nule u odnosu na centralnu učestanost u spektru.
- ❖ B4 - kriterijum zahtevanog procenta snage. Ako spektr modulisanog signala nema nula, nije moguće koristiti kriterijum prve nule. U ovom slučaju, kao kriterijum može se koristiti zahtevan procenat snage sadržan u izabranom opsegu.
- ❖ B5 - kriterijum zahtevanog slabljenja.
- ❖ Kao poseban slučaj definiše se i *Nyquist-ov* kriterijum o širini opsega učestanosti koji zauzima signal. $\eta_s = 1 (b/s) / Hz$

SPEKTRALNA EFIKASNOST

- ❖ Unipolarni NRZ binarni signal sadrži nultu spektralnu komponentu, što predstavlja nedostatak ovog koda.
- ❖ Prva nula u spektru *Manchester* koda javlja se na dva puta većoj učestanosti u odnosu na spektre analiziranih NRZ linijskih kodova.
- ❖ Jedan od ključnih parametara prilikom izbora linijskog koda je njegova spektralna efikasnost, kada je reč o prenosu kroz kanale sa ograničenim propusnim opsegom. Spektralna efikasnost prenošenog digitalnog signala definisana je kao

$$\eta_s = \frac{V_{eb}}{B}, \quad [(bit/s) / Hz]$$

gde je V_{eb} ekvivalentni binarni protok i B širina propusnog opsega sistema za prenos.

- ❖ S druge strane, maksimalna spektralna efikasnost ograničena je uticajem šuma u kanalu i data je *Shannon-ovom* relacijom za kapacitet kanala,

$$\eta_{max} = \frac{C}{B} = \log(1 + S/N)$$

SPEKTRALNA EFIKASNOST

Tip linijskog koda	Propusni opseg određen položajem prve nule u spektru signala	Spektralna efikasnost, $\eta_s = V_{eb}/B$
Unipolarni NRZ Bipolarni NRZ Polarni NRZ	V_{eb}	$1 \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}}$
Unipolarni RZ <i>Manchester</i> NRZ	$2V_{eb}$	$0.5 \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}}$
Višenivovski polarni NRZ, $M = 2^n$	$V_{eb}/\log(2^n)$	$n \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}}$

TELEKOMUNIKACIJE 2²

(OT3T2/OE3T2)

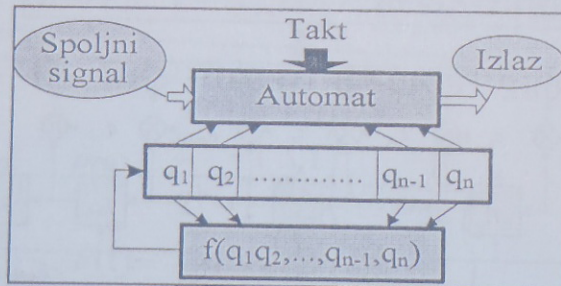
July 1908

Pseudoslučajne sekvence



POSTUPAK GENERISANJA PSS

Postupak generisanja



- ❖ Maksimalan broj binarnih kombinacija je 2^n - perioda sekvence ne može biti veća od 2^n - stanje sve 0 je zabranjeno stanje.
- ❖ Sekvenca periode $2^n - 1$, za registar dužine n , naziva se sekvence maksimalne dužine (Linearna PSS maksimalne dužine - LPSSMD).

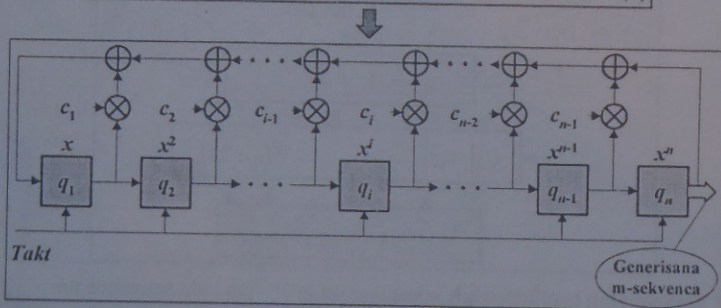
PSS - POSTULATI SLUČAJNOSTI

- ❖ Balansiranost. U sekvenci dužine $P=2^n-1$, broj simbola +1 u jednoj periodi PSS ne treba da se razlikuje za više od 1 od broja binarnih simbola -1.
- ❖ Dužina podnizova. Ukupno u sekvenci dužine 2^n-1 ima $(2^n-1+1)/2=2^{n-1}$ podnizova sastavljenih od jednakih bita. Od tog broja $1/2$ podnizova treba da bude dužine 1, $1/4$ podnizova treba da bude dužine 2, $1/8$ podnizova treba da bude dužine 3 i tako dalje. Treba da postoji jedan podniz sastavljen samo od simbola 0 dužine $n-1$ i jedan podniz sastavljen samo od simbola 1 dužine n .
- ❖ Autokorelaciona funkcija sekvence $\{b_k\}$, $b_k \in \{\pm 1\}$, je binarna funkcija,

$$R(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L b_i b_{i+k} = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ c < 1, & 0 < |k| < L \end{cases} \quad L \leq 2^n - 1$$

SSRG KAO GENERATOR M-SEKVENCE

$$f(x) = 1 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_{n-1} x^{n-1} + x^n, \quad c_i \in GF(2)$$



$$c_i \in \{0, 1\}$$

q_j - memorijski elementi pomeračkog registra

\oplus - Sabiranje po modulu 2

M-SEKVENCE - MATRIČNI MODEL

Generator matrica

Matrica stanja

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_{n-1} & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad S(k) = \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \\ \dots \\ s_n(k) \end{bmatrix} \quad S(k+j) = A^j S(k)$$

$$S(k+1) = AS(k)$$

Karakteristični polinom

$\det(A - \lambda I) = 0$, λ - skalar, I - jedinična matrica

Rešenje, karakteristični polinom

$$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x^i, \quad x = 1/\lambda \Rightarrow \text{operator kašnjenja!}$$

- Ako je $2^n - 1$ prost broj, svaki ireducibilni polinom stepena n definiše m -sekvencu.
- Za bilo koje n karakteristični polinom treba da bude primitivan.
- Ireducibilni polinom stepena n je primitivan, onda i samo onda, ako deli polinom $x^m - 1$, $m > n$.

BALANSIRANOST M-SEKVENCI

$$L = 2^n - 1, \quad 2^{n-1} - 1 \Rightarrow "0", \quad 2^{n-1} \Rightarrow "1"$$

$$P(0) + P(1) = 1$$

$$P(0) = \frac{2^{n-1} - 1}{2^n - 1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2^n - 1} \right)$$

$$P(1) = \frac{2^{n-1}}{2^n - 1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2^n - 1} \right)$$

$$\text{Nebalansiranost} \Rightarrow \pm \frac{1}{2^n - 1}$$

BROJ m-SEKVENCI

Eulerova funkcija - faktORIZACIJA!

$$\Phi(n) = \begin{cases} 1, & n = 1 \\ \prod_{i=1}^k p_i^{\alpha_i-1} (p_i - 1), & n > 1 \\ p - 1, & n = p \text{ prost broj} \end{cases}$$

$$56 = 7 \times 2^3, \quad p_1 = 7, \alpha_1 = 1, \quad p_2 = 2, \alpha_2 = 3$$

$$\Phi(56) = 7^0 \times (7-1) \times 2^2 (2-1) = 24$$

$$N_{LPSSMD} = \frac{\Phi(2^n - 1)}{n}$$

$$n = 6 \Rightarrow N_{LPSSMD} = \frac{\Phi(64 - 1)}{6} = 6$$

Euler broj $\phi(2^n-1)$ definiše se kao broj pozitivnih celih brojeva, uključujući jedan, koji su relativno prosti u odnosu na brojeve manje od 2^n-1 .

LISTA GENERATORA m-SEKVENCI

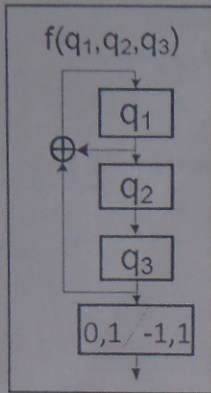
Dužina registra	Struktura povratne sprege - $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n$
2*	[1,2]
3*	[1,3]
4*	[1,4]
5*	[2,5], [2,3,4,5], [1,2,4,5]
6*	[1,6], [1,2,5,6], [2,3,5,6]
7*	[3,7], [1,2,3,7], [1,2,4,5,6,7], [2,3,4,7], [1,2,3,4,5,7], [2,4,6,7], [1,7], [1,3,6,7], [2,5,6,7]
8*	[2,3,4,8], [3,5,6,8], [1,2,5,6,7,8], [1,3,5,8], [2,5,6,8], [1,5,6,8]
9	[4,9], [3,4,6,9], [4,5,8,9], [1,4,8,9], [2,3,5,9], [1,2,4,5,6,9], [5,6,8,9], [1,3,4,6,7,9], [2,7,8,9]
10	[3,10], [2,3,8,10], [3,4,5,6,7,8,9,10], [1,2,3,5,6,10], [2,3,6,8,9,10], [1,3,4,5,6,7,8,9,10]
11	[2,11], [2,5,8,11], [2,3,7,11], [2,3,5,11], [2,3,10,11], [1,3,8,9,10,11], [1,4,6,12], [1,2,5,7,8,9,11,12], [1,3,4,6,8,10,11,12], [1,2,5,10,11,12], [2,3,9,12], [1,2,4,6,11,12]
20	[3,20], [3,5,9,20], [2,3,6,8,11,20]
30	[1,2,23,30], [1,3,4,6,7,9,12,13,15,18,20,21,24,30]
61	[1,2,5,61]
89	[3,5,6,89]

- Recipročni polinom primitivnog polinoma je, također, primitivan:

$$f^R(x) = x^n f(1/x)$$

- U tabeli nisu navedeni recipročni polinomi!

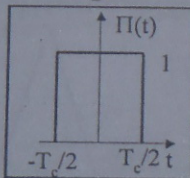
PRIMER m-SEKVENCE - $f(x)=1+x+x^3$



i	$f(x)=1+x+x^3=q_1+q_3$	q_1	q_2	q_3
0	0	0	1	0
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	1	1	1	0
4	0	1	1	1
5	1	0	1	1
6	0	1	0	1
7	0	0	1	0
8	1	0	0	0
9	1	1	0	0
10	1	1	1	0
11	0	1	1	0
12	1	0	1	0
13	0	1	0	0
14	0	0	1	0
15	1	0	0	1
16	1	1	0	0

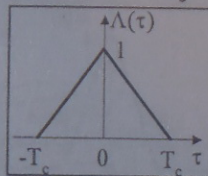
SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE m-SEKVENCI

Signal



⇒

Autokorelacija



$$\Lambda(\tau) = \frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \Pi(t) \Pi(t-\tau) dt \Rightarrow \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{T_c}, & |\tau| \leq T_c \\ 0, & |\tau| > T_c \end{cases}$$

$$R(\tau) = \frac{1}{L T_c} \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1-n} b_n b_m \int_0^{L T_c} \Pi(t - n T_c) \Pi(t + \tau - m T_c) dt$$

$$R(\tau) = -\frac{1}{L} + \frac{L+1}{L} \Lambda(\tau) \otimes \sum_k \delta(\tau - k L T_c)$$

SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE m-SEKVENCI

❖ Kroskorelacija, mera sličnosti, dve različite sekvence,

$$R_c(k) = \sum_{n=1}^N a_n b_{n+k}$$

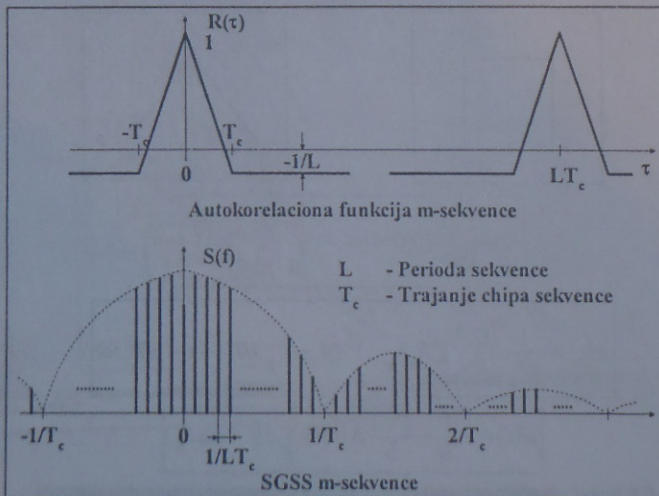
gde su a_n i b_n elementi dve različite sekvence sa periodom N .

$$R_c(k) \geq N \sqrt{\frac{M-1}{MN-1}} \cong \sqrt{N}$$

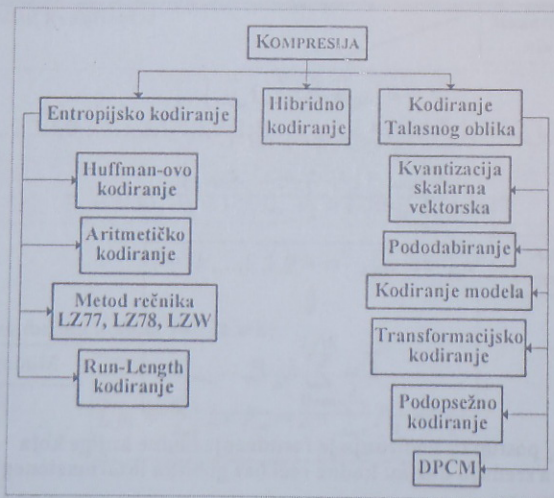
❖ Spektralna gustina srednje snage je,

$$S(f) = \mathcal{F}\{R(\tau)\} = \frac{1}{L^2} \delta(f) + \frac{L+1}{L^2} \left[\frac{\sin(\pi f T_c)}{\sin(\pi f T_c)} \right]^2 \sum_{k \neq 0} \delta\left(f - \frac{k}{LT_c}\right)$$

SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE m-SEKVENCI



Kopresija - klasifikacija



Entropijsko kodiranje

- ❖ Kompresija izvora je moguća samo ako raspodela njegovih simbola nije uniformna. U slučaju uniformne raspodele simbola entropija iznosi $H(S) = \log(M)$.

$$\bar{L} = \sum_{m=0}^{M-1} l_m P_m, \quad \eta = \frac{H(S)}{\bar{L}}, \quad R = \frac{\bar{L} - H(S)}{\bar{L}} = 1 - \eta$$

Prosečna dužina
kodne reči

Kodna efikasnost

Redudansa

$$H(S) \leq \bar{L} < H(S) + 1$$

Primer

$$S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{M-1}\}$$

$$P_0, P_1, P_2, \dots, P_{M-1}$$

$$C_{Book} = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_{M-1}\}$$

$$c_m \Rightarrow s_m, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

⇓

$$\bar{L} = \sum_{m=0}^{M-1} l_{c_m} P_m$$

Minimum!!

- ❖ Glavni cilj postupka kodiranja je formiranje kodne knjige koja minimizira srednju dužinu kodne reči bez gubitka informacionog sadržaja izvora.

Primer

❖ Dvobitni kvantizator

Kvantizacioni
nivoi!!

$$S = \{0, 1, 2, 3\}$$

..., 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1, 2, ...

Slučajna
sekvenca

$$P_0 = 3/30, P_1 = 14/30, P_2 = 12/30, P_3 = 1/30$$

Apriori
verovatnoće

❖ Fiksna dužina kodnih reči, 2 bita,

$$\bar{L}_{fix} = \sum_{m=0}^3 2 \times P_m = 2 \times \sum_{m=0}^3 P_m = 2 [b]$$

Primer – Fiksna dužina kodne reči

❖ Dvobitni kvantizator

Kvantizacioni
nivoi!!

$$S = \{0, 1, 2, 3\}$$

..., 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1, 2, ...

Slučajna
sekvenca

$$P_0 = 3/30, P_1 = 14/30, P_2 = 12/30, P_3 = 1/30$$

Apriori
verovatnoće

❖ Fiksna dužina kodnih reči, 2 bita,

$$\bar{L}_{fix} = \sum_{m=0}^3 2 \times P_m = 2 \times \sum_{m=0}^3 P_m = 2 [b]$$

Primer – Fiksna/promenljiva dužina kodne reči

❖ Kada *a priori* verovatnoće simbola u sekvenci nisu iste, možemo smanjiti srednju dužinu kodne reči korišćenjem kodiranja sa promenljivom dužnomkodnih reči.

Simbol	Vrednost <i>a priori</i> verovatnoće, P_i	Kodna reč	Dužina kodne reči, l_m
1	$P_1 = 14/30$	1	$l_1 = 1$
2	$P_2 = 12/30$	01	$l_2 = 2$
0	$P_3 = 3/30$	001	$l_3 = 3$
3	$P_4 = 1/30$	0001	$l_4 = 4$

$$\bar{L}_{\text{var}} = \sum_{m=0}^3 P_m l_m = 1.7 [b] \Rightarrow \eta_{\text{var}} = \frac{H(S)}{\bar{L}_{\text{var}}} = 0.9045$$

$$R_{\text{compres,var}} = \frac{\bar{L}_{\text{var}}}{L_{\text{fix}}} = 1.176$$

Primer – Rezidualna sekvenca

❖ Možemo posmatrati rezidualnu sekvencu, $r(n) = s(n) - s(n-1)$:

...1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, 0, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, ...

Simbol	Vrednost <i>a priori</i> verovatnoće, P_i	Kodna reč	Dužina kodne reči, l_i
-1	$P_{r,0} = 14/30$	1	$l_1 = 1$
1	$P_{r,2} = 14/30$	01	$l_2 = 2$
0	$P_{r,1} = 2/30$	001	$l_3 = 3$

$$\bar{L}_{\text{var,res}} = \sum_{m=0}^2 P_{r,m} l_{r,m} = 1.6 [b] \quad R_{\text{compres,var,res}} = \frac{\bar{L}_{\text{var,res}}}{L_{\text{fix}}} = 1.25$$

$$H(S_r) = \sum_{m=0}^2 -P_{r,m} \log_2(P_{r,m}) = 1.2833 \left[\frac{b}{\text{sim}} \right] = 1.2833 \left[\frac{\text{binarnih sim.}}{\text{sim. resid. izvora}} \right]$$

$$\eta_r = \frac{H(S_r)}{\bar{L}_{\text{var,res}}} = 0.8021 \wedge \eta_{r,\text{orig}} = \frac{H(S)}{\bar{L}_{\text{var,res}}} = 0.961$$

Primer - Blokovi

❖ Pretpostavimo sada da sekvencu simbola reorganizujemo u blokove simbola,

$$S = \{0, 1, 2, 3\}$$

..., 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1, 2, ...

(1, 2), (1, 0), (1, 2), (1, 2), (1, 0), (1, 2), (2, 1), (2, 1), (2, 3), (2, 1), (2, 1), (1, 2), (1, 0), (1, 2), (1, 2)

$$P(2, 1) = \frac{4}{15}, \quad P(1, 0) = \frac{3}{15}, \quad P(1, 2) = \frac{2}{15} \quad \text{i} \quad P(2, 3) = \frac{1}{15}$$

$$H_{\text{blok}}(S_B) = \sum_{\text{blok}} P_{\text{blok}}(x, y) \log_2 \left[\frac{1}{P_{\text{blok}}(x, y)} \right] = 1.746 [b/\text{blok}]$$

$$H_{\text{sim}}(S_B) = \frac{1}{2} H_{\text{blok}}(S_B) = 0.873 [b/\text{sim}]$$

Primer - Blokovi

Blok	$P_{B,m}$	Kodna reč	$l_{B,m}$
(1, 2)	7/15	1	1
(2, 1)	4/15	01	2
(1, 0)	3/15	001	3
(2, 3)	1/15	0001	4

$$L_{sr,B} = \sum_{m=0}^3 P_{B,m} l_{B,m} = 1.8667 [b/\text{blok}]$$

$$L_{sr,sim} = \frac{L_{sr,B}}{2} = 0.9333 [b/\text{sim}]$$

$$\eta_{sim} = \frac{H_{sim}(S)}{L_{sr,sim}} = 0.9354$$

Vrednost entropije zavisi od modela kodiranja i statističkih osobina izvora !!!!

Shannon-Fano-vo kodiranje

- ❖ Algoritam *Shannon-Fano*-ovog kodiranja sastoji se od sledećih koraka,
 - skup simbola uredi se po opadajućim vrednostima AP simbola. Zbir svih apriori verovatnoća simbola treba da iznosi jedan;
 - skup simbola se podeli na dve grupe simbola sa približno jednakim zbirnim AP, pri čemu grupa simbola ne sadrži nesusedne simbole;
 - svakoj od dve grupe simbola pridružuje se binarni simbol 0 ili 1, pri čemu ovaj binarni simbol predstavlja početni bit pridruženih kodnih reči za svaki od simbola iz te grupe;
 - ako grupe formirane u prethodnom koraku sadrže više od jednog simbola, ponavlja se prethodni korak algoritma. Svakoj podgrupi dodeljuje se novi binarni simbol, koji se u kodnoj reči nadovezuje na prethodno dodeljene bite;
 - opisani postupak se ponavlja sve dok svi simboli ne budu mapirani kodnim rečima.

Shannon-Fano-vo kodiranje - Primer

$$S_{SF} = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$$

$$P_0 = 0.3, P_1 = 0.1, P_2 = 0.2, P_3 = 0.05, P_4 = 0.1, P_5 = 0.25$$

Simbol	Apriori verovatnoća simbola	Mapiranje kodnih reči				Kodna reč	
		#1	#2	#3	#4		
s_0	0.3	0				00	
s_5	0.25			1			01
s_2	0.2				0		10
s_1	0.1	1			0	110	
s_4	0.1				1	0	1110
s_3	0.05				1	1	1111

$$H_{SF} = 2.366 [b / sim]$$

$$\bar{L}_{SF} = 2.4 [b]$$

$$\eta_{SF} = \frac{H_{SF}}{\bar{L}_{SF}} = 0.986$$

Shannon-Fano - Grupisanje simbola - Primer

Simbol	P_i	A				Kodna reč A	B				Kodna reč B
		Mapiranje kodnih reči					Mapiranje kodnih reči				
		#1	#2	#3	#4		#1	#2	#3	#4	
s_0	4/9	0				0				00	
s_1	1/9			0		100			1	01	
s_2	1/9		0		0	1010		0		100	
s_3	1/9	1			1	1011			1	101	
s_4	1/9			0		110		0		110	
s_5	1/9		1			111		1		111	

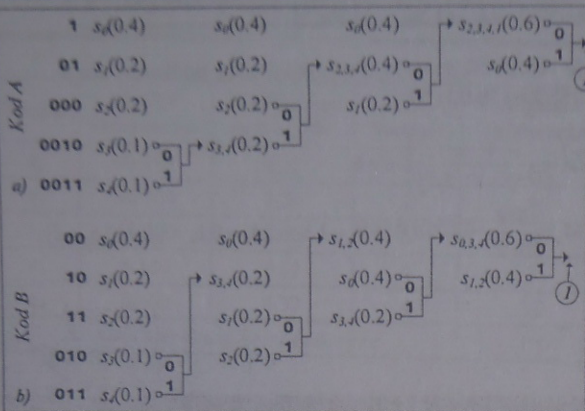
$$H_{AB} = 2.281 [b / sim], \quad \bar{L}_A = 21/9 [b], \quad \eta_A = H_{AB} / \bar{L}_A = 0.977$$

$$H_{AB} = 2.281 [b / sim], \quad \bar{L}_B = 22/9 [b], \quad \eta_B = H_{AB} / \bar{L}_B = 0.933$$

Huffman-ovo kodiranje

- ❖ Algoritam Huffman-ovog kodiranja sastoji se od sledećih koraka,
1. Skup simbola uredi se po opadajućim vrednostima apriori verovatnoća simbola. Zbir svih AV simbola treba da iznosi jedan;
 2. Udruže se dva poslednja simbola (simboli sa najmanjim vrednostima AV) u novi simbol čija je apriori verovatnoća jednaka zbiru njihovih apriori verovatnoća;
 3. Preuredi se skup novih simbola po opadajućim vrednostima AV;
 4. Ponovi se proces udruživanja dva poslednja simbola (sa najmanjim vrednostima AV);
 5. Formira se novi simbol čija je AV jednaka zbiru njihovih apriori verovatnoća;
 6. Opisani postupak se ponavlja sve dok se ne dobije jedan simbol čija je AV jednaka jedan;
 7. U procesu udruživanja dva simbola sa najmanjim vrednostima apriori verovatnoća, binarni simbol "0" dodeljuje se gornjem simbolu, a binarni simbol "1" donjem simbolu, odnosno simbolu sa manjom AV;
 8. Kodna reč svakog simbola formira se kao niz dodeljenih binarnih simbola, počevši od simbola čija je AV jednaka jedan.

Huffmanovo kodiranje – Primer!



$$H_{A,B} = 2.122 [b / sim]$$

$$\bar{L}_A = 2.2 [b]$$

$$\bar{L}_B = 2.2 [b]$$

$$\eta_{A,B} = H_{A,B} / \bar{L}_{A,B} = 0.964$$

$$\sigma_A^2 = 0.4(1-2.2)^2 + 0.2(2-2.2)^2 + 0.2(3-2.2)^2 + 0.1(4-2.2)^2 + 0.1(4-2.2)^2 = 1.36$$

$$\sigma_B^2 = 0.4(2-2.2)^2 + 0.2(2-2.2)^2 + 0.2(2-2.2)^2 + 0.1(3-2.2)^2 + 0.1(3-2.2)^2 = 0.16$$

Primer – Aritmetičko kodiranje

Data je sekvenca simbola $\{s_1=1, s_2=0, s_3=1, s_4=1, s_5=0\}$. *Apriori* verovatnoće pojedinih simbola u posmatranoj sekvenci su respektivno $\{P_{s_1}, P_{s_2}, P_{s_3}, P_{s_4}, P_{s_5}\} = \{3/5, 2/5, 3/5, 3/5, 2/5\}$, tj. $P_1 = 3/5$ i $P_0 = 2/5$.

$$I_{init} = [0,1] \Rightarrow \left[0 + \frac{2}{5}, \frac{2}{5} + 1\right] = [P_0, P_1]$$

$$I_1 = \left[\frac{2}{5} + 1\right] = \frac{3}{5}, \text{ desni deo } I_{init}, s_1 = 1$$

$$I_2 = \left[\frac{2}{5}, \frac{2}{5} + \frac{2}{5}\right] = \left[\frac{2}{5}, \frac{16}{25}\right] = \frac{6}{25}, \text{ levi deo } I_1, s_2 = 0$$

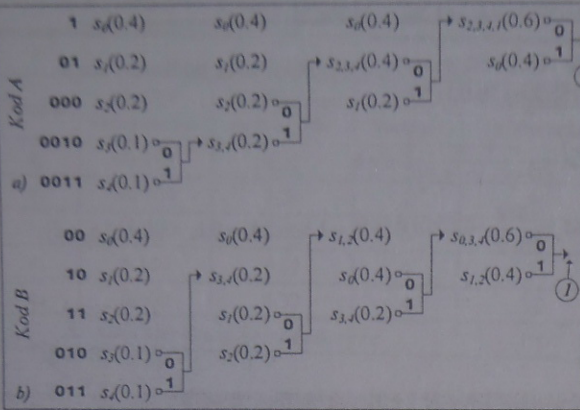
$$I_3 = \left[\frac{16}{25} - \frac{3}{5}, \frac{16}{25}\right] = \left[\frac{62}{125}, \frac{16}{25}\right] = \frac{18}{125}, \text{ desni deo } I_2, s_3 = 1$$

$$I_4 = \left[\frac{16}{25} - \frac{3}{5}, \frac{16}{25}\right] = \left[\frac{346}{625}, \frac{16}{25}\right] = \frac{54}{625}, \text{ desni deo } I_3, s_4 = 1$$

$$I_5 = \left[\frac{346}{625}, \frac{346}{625} + \frac{2}{5}\right] = \left[\frac{346}{625}, \frac{1838}{3125}\right] = \frac{108}{3125}, \text{ levi deo } I_4, s_5 = 0$$

Prvi korak za aritmetičko kodiranje – imamo binarnu sekvencu sa 5 simbola, određujemo rekursivno 5 intervala u funkciji simbola sekvence.

Huffmanovo kodiranje – Primer!



$$H_{A,B} = 2.122 [b / sim]$$

$$\bar{L}_A = 2.2 [b]$$

$$\bar{L}_B = 2.2 [b]$$

$$\eta_{A,B} = H_{A,B} / \bar{L}_{A,B} = 0.964$$

$$\sigma_A^2 = 0.4(1-2.2)^2 + 0.2(2-2.2)^2 + 0.2(3-2.2)^2 + 0.1(4-2.2)^2 + 0.1(4-2.2)^2 = 1.36$$

$$\sigma_B^2 = 0.4(2-2.2)^2 + 0.2(2-2.2)^2 + 0.2(2-2.2)^2 + 0.1(3-2.2)^2 + 0.1(3-2.2)^2 = 0.16$$

Primer – Aritmetičko kodiranje

Data je sekvenca simbola $\{s_1=1, s_2=0, s_3=1, s_4=1, s_5=0\}$. *Apriori* verovatnoće pojedinih simbola u posmatranoj sekvenci su respektivno $\{P_{s_1}, P_{s_2}, P_{s_3}, P_{s_4}, P_{s_5}\} = \{3/5, 2/5, 3/5, 3/5, 2/5\}$, tj. $P_1 = 3/5$ i $P_0 = 2/5$.

$$I_{init} = [0,1] \Rightarrow \left[0 + \frac{2}{5}, \frac{2}{5} + 1\right] = [P_0, P_1]$$

$$I_1 = \left[\frac{2}{5}, 1\right] = \frac{3}{5}, \text{ desni deo } I_{init}, s_1 = 1$$

$$I_2 = \left[\frac{2}{5}, \frac{2}{5} + \frac{2}{5}\right] = \left[\frac{2}{5}, \frac{16}{25}\right] = \frac{6}{25}, \text{ levi deo } I_1, s_2 = 0$$

$$I_3 = \left[\frac{16}{25} - \frac{3}{5}, \frac{16}{25}\right] = \left[\frac{62}{125}, \frac{16}{25}\right] = \frac{18}{125}, \text{ desni deo } I_2, s_3 = 1$$

$$I_4 = \left[\frac{16}{25} - \frac{3}{5}, \frac{16}{25}\right] = \left[\frac{346}{625}, \frac{16}{25}\right] = \frac{54}{625}, \text{ desni deo } I_3, s_4 = 1$$

$$I_5 = \left[\frac{346}{625}, \frac{346}{625} + \frac{2}{5}\right] = \left[\frac{346}{625}, \frac{1838}{3125}\right] = \frac{108}{3125}, \text{ levi deo } I_4, s_5 = 0$$

Prvi korak za aritmetičko kodiranje – imamo binarnu sekvencu sa 5 simbola, određujemo rekursivno 5 intervala u funkciji simbola sekvence.

Primer 10 – Aritmetičko kodiranje

Širina podintervala I_5 je $108/3125$, a srednja vrednost ovog podintervala je $M = (346/625 + 1838/3125)/2 = 1784/3125$.

$$k = \left\lceil \lg \left(\prod_{i=1}^5 P(s_i) \right) \right\rceil + 1 = \left\lceil \lg \left(\frac{1}{(3/5)^3 \times (2/5)^2} \right) \right\rceil + 1 = 6$$

Binarna ekstenzijabroj M je $\frac{1784}{3125} = 0.100100 \Rightarrow \{b_1 = 1, b_2 = 0, b_3 = 0, b_4 = 1, b_5 = 0, b_6 = 0\}$

Dekodiranje:

$$M_e = \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \dots + \frac{b_k}{2^k} = \frac{1}{2} + \frac{0}{2^2} + \frac{0}{2^3} + \frac{1}{2^4} + \frac{0}{2^5} + \frac{0}{2^6} = \frac{9}{16} = 0.5625$$

Primer 10 – Aritmetičko kodiranje

$$I_1 = \left[0, \frac{2}{5} \right) \vee \left[\frac{2}{5}, 1 \right], M = 9/16 \in \text{desnom podintervalu} \Rightarrow s_1 = 1$$

$$I_2 = \left[\frac{2}{5}, \frac{16}{25} \right) \vee \left[\frac{16}{25}, 1 \right], M = 9/16 \in \text{levom podintervalu} \Rightarrow s_2 = 0$$

$$I_3 = \left[\frac{2}{5}, \frac{62}{125} \right) \vee \left[\frac{62}{125}, \frac{16}{25} \right], M = 9/16 \in \text{desnom podintervalu} \Rightarrow s_3 = 1$$

$$I_4 = \left[\frac{62}{125}, \frac{346}{625} \right) \vee \left[\frac{346}{625}, \frac{16}{25} \right], M = 9/16 \in \text{desnom podintervalu} \Rightarrow s_4 = 1$$

$$I_5 = \left[\frac{346}{625}, \frac{1838}{3125} \right) \vee \left[\frac{1838}{3125}, \frac{16}{25} \right], M = 9/16 \in \text{levom podintervalu} \Rightarrow s_5 = 0$$

Primer – Poređenje Aritmetičko/Huffman

Simbol	Apriori verovatnoća	Informacioni sadržaj, [b]	Huffman [b/sim]	Huffman [b/sim/sekv]	Aritmetički [b/sim/sekv]
s_1	40/100	1.32	1	40	$1.32 \times 40 = 52.87$
s_5	40/100	1.32	2	80	$1.32 \times 40 = 52.87$
s_2	10/100	3.32	3	30	$3.32 \times 10 = 33.21$
s_4	5/100	4.32	4	20	$4.32 \times 5 = 21.61$
s_3	5/100	4.32	4	20	$4.32 \times 5 = 21.61$
Ukupan broj bita za prenos sekvence				190	182.19

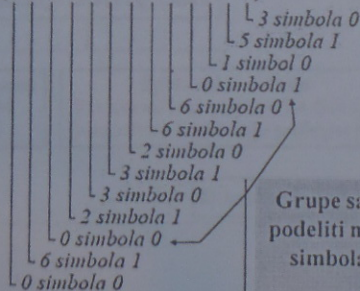
Dobijamo poboljšanje od oko 4.1% za aritmetičko u odnosu na Huffman-ovo kodiranje čak i za ovu veoma kratku sekvencu.

Run-Length kodiranje

$A = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ ili $B = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ se koriste za Run-Length kodiranje binarne sekvence $S = \{11111110001110011111000000011111000\}$.

Kompresija sekvenci čiji simboli imaju osobinu da oblikuju ponavljajuće grupe - umesto kodiranja pojedinačnog simbola u grupi kodira se simbol i dužina grupe.

$$S_{run-length} = \{0, 6, 0, 2, 3, 3, 2, 6, 6, 0, 1, 5, 3\}$$



Konstrukcija Run-Length sekvence sa alfabetom B , uz pretpostavku da se polazi od simbola 0.

Grupe sa više od 6 simbola se moraju podeliti na podgrupe od maksimalno 6 simbola. Za alfabet A maksimalna dužina grupe je 4.

Run-Length kodiranje

Nakon formiranja *run-length* sekvence korišćenjem alfabeta *A* ili *B*, simboli nove sekvence se kodiraju putem entropijskog (npr. *Huffman*-ovog) kodiranja.

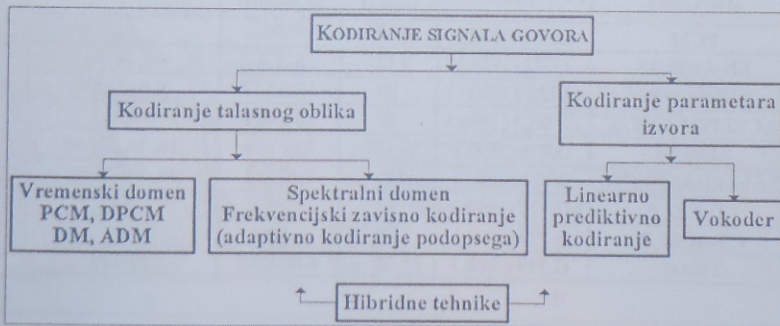
Alfabet A			Alfabet B		
Simbol (S_i)	$P(S_i)$	Kodna reč	Simbol (S_i)	$P(S_i)$	Kodna reč
0	5/17	00	0	3/13	01
1	1/17	111	1	1/13	0010
2	2/17	110	2	2/13	000
3	4/17	10	3	3/13	10
4	5/17	01	4	0/13	00111
			5	1/13	00110
			6	3/13	11

Kodna sekvenca	01	11	01	000	01	01	01	11	11	01	0010	0110	10
Run-lengths (B)	0	6	0	2	3	3	2	6	6	0	1	5	3
Simbol	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Kodna sekvenca	00	01	00	01	10	10	110	01	00	110	01	00	10	01	00	10	111	10
Run-lengths (A)	0	4	0	4	3	3	2	4	0	2	4	0	3	4	0	3	1	3
Simbol	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1



Klasifikacija tehnika kodiranja SG



Klasifikacija kodiranja SG prema protoku

Kategorija	Protok [kb/sec]
Koder visokog protoka (<i>High Bit Rate Codec, HBRC</i>)	>15
Koder srednjeg protoka (<i>Medium Bit Rate Codec, MBRC</i>)	5+15
Koder niskog protoka (<i>Low Bit Rate Codec, LBRC</i>)	2+5
Koder vrlo niskog protoka (<i>Very Low Bit Rate Codec, VLBR</i>)	<2

ITU standardi

Algoritam	ITU-T standard	Segment [msec]	Biti po segmentu	Protok [kb/s]
PCM	G.711 (1972.)	0.125	8	64
SB-ADPCM	G.722 (1988.)	0.125	6, 7, 8	48, 56, 64
AMR-WB	G.722.2 (2000.)	20	133÷477	6.6÷23.85
ACELP/MP-MLQ	G.723.1 (1996.)	30	158, 192	5.3, 6.3
ADPCM	G.726 (1990.)	0.125	2, 3, 4, 5	16, 24, 32, 40
Embedded ADPCM	G.727 (1990.)	10	2, 3, 4, 5	16, 24, 32, 40
LD-CELP	G.728 (1992.)	10	10	16
CS-ACELP	G.729 (1996.)	10	80	8
FBAC	G.719 (2008.)	20	640-2560	32-128

SB-ADPCM – Sub Band Adaptive Differential PCM,

AMR-WB - Adaptive Multi Rate Wide Band,

ACELP/MP-MLQ – Algebraic Code Excited Linear Prediction Multi Pulse Maximum Likelihood Quantisation,

LD-CELP – Low Delay Code Excited Linear Prediction,

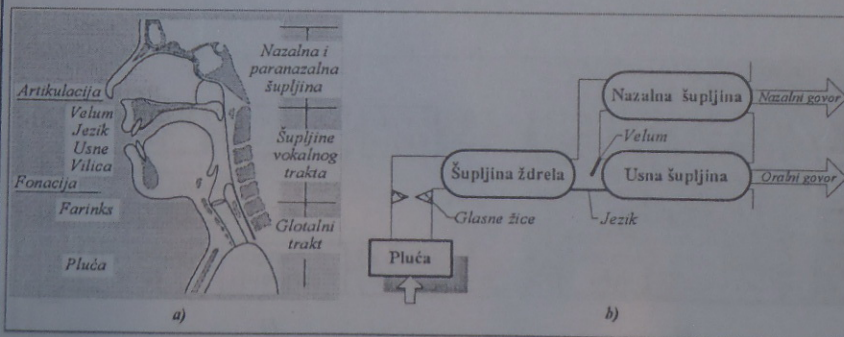
CS-ACELP – Conjugate Structure ACELP, [HSW, 07].

Algoritmi kodiranja signala govora

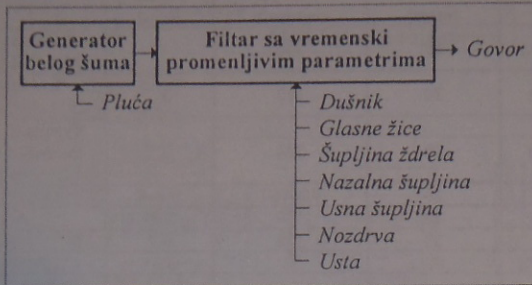
Vrsta kodera	Segment [msec]	Biti po segmentu	Protok [kb/s]	Region
RPE-LTP (1991.)	20	260	13	Evropa, ETSI GSM Full Rate 06.10
VSELP (1999.)	20	112	5.6	Evropa, ETSI GSM Half Rate 06.20
ACELP (2000.)	20	244	12.2	Evropa, ETSI GSM Enhanced Full Rate 06.60
IS-96 QCELP	20	16+160	0.8+8	USA
IS-54 VSELP	20	159	7.95	USA
PDC VSELP	20	134	6.7	Japan
PSI-CELP (1999.)	40	31	3.45	Japan
Skype's SILK (2009.)	20	120+800	6+40	

RPE-LTP - Regular Pulse Excitation Long Term Prediction,
 VSELP - Vector Sum Excited Linear Prediction,
 QCELP - Qualcomm CELP, PDC-VSELP - Personal Digital Cellular VSELP,
 PSI-CELP - Pitch Synchronous Innovation CELP, [HSW, 07].

Osnove fiziologije govora

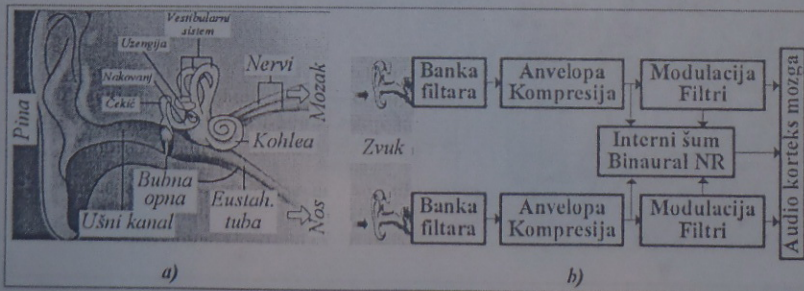


Osnove fiziologije govora



- ❖ Generisanja govora može se modelirati filtrom promenljivih karakteristika. Zvučni glasovi, pobuda je povorka impulsa osnovne učestanosti. Za muškarce ova perioda je tipično 4-20ms, dok je kod žena 2-8ms. Bezvučni glasovi, pobuda se dobro modelira belim šumom.
- ❖ Pluća generišu vazduh, energija koji ulazi u vokalni trakt. Vazduh koji ulazi u vokalni trakt može se predstaviti kao beli šum, pluća se mogu predstaviti kao izvor belog šuma. Akustički kanal sa svim anatomskim strukturama predstavlja vremenski promenljiv filter.

Osnove fiziologije govora



Linearno prediktivno kodiranje govora

