



PRINCIPI MODERNIH TELEKOMUNIKACIJA (SI2PMT)

*Elektrotehnički fakultet
Katedra za telekomunikacije
Beograd, 2011/2012.*



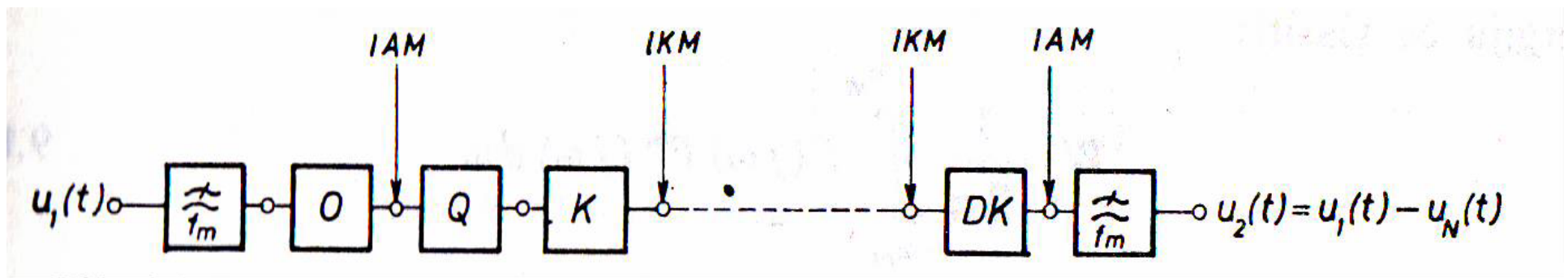
-VIII-

Impulsna kodna modulacija

Impulsna kodna modulacija – predajna strana

* IKM (PCM – *Pulse Coided Modulation*) je digitalni sistem modulacije

- Filtriranje NF filtrom
 - Rezultat je modulišući signal sa spektrom u opsegu $[0, f_m]$
- Odabiranja
 - Diskretizacija u vremenu, rezultat je PAM signal
- Kvantizacije
 - Rezultat je signal sa ograničenim brojem amplitudskih nivoa
- Kodiranja (kodovanja)
 - Rezultat je niz bita (predstavljenih impulsima sa samo dva nivoa)



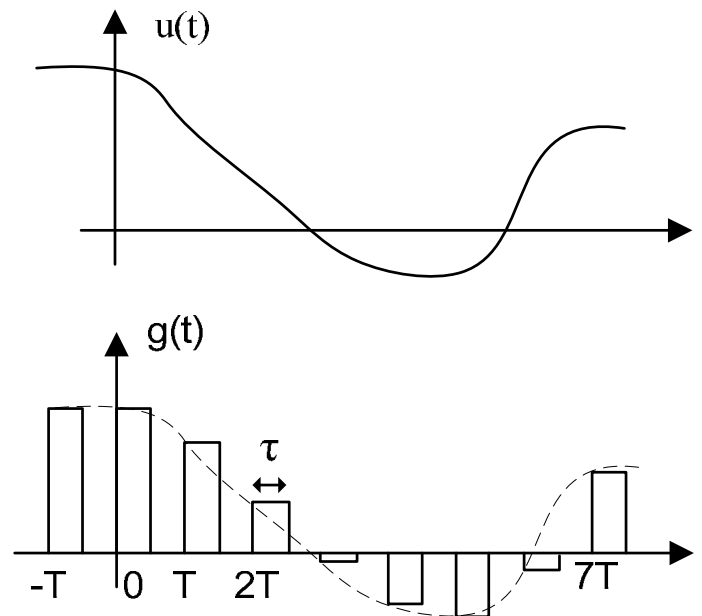
Filtriranje i odabiranje

* Filtriranje

- $u(t)$ – nosi poruku, spektar ograničen učestanosti f_m .
- ovo je neophodno da bi se uopšte moglo raditi odabiranje!

* Odabiranje

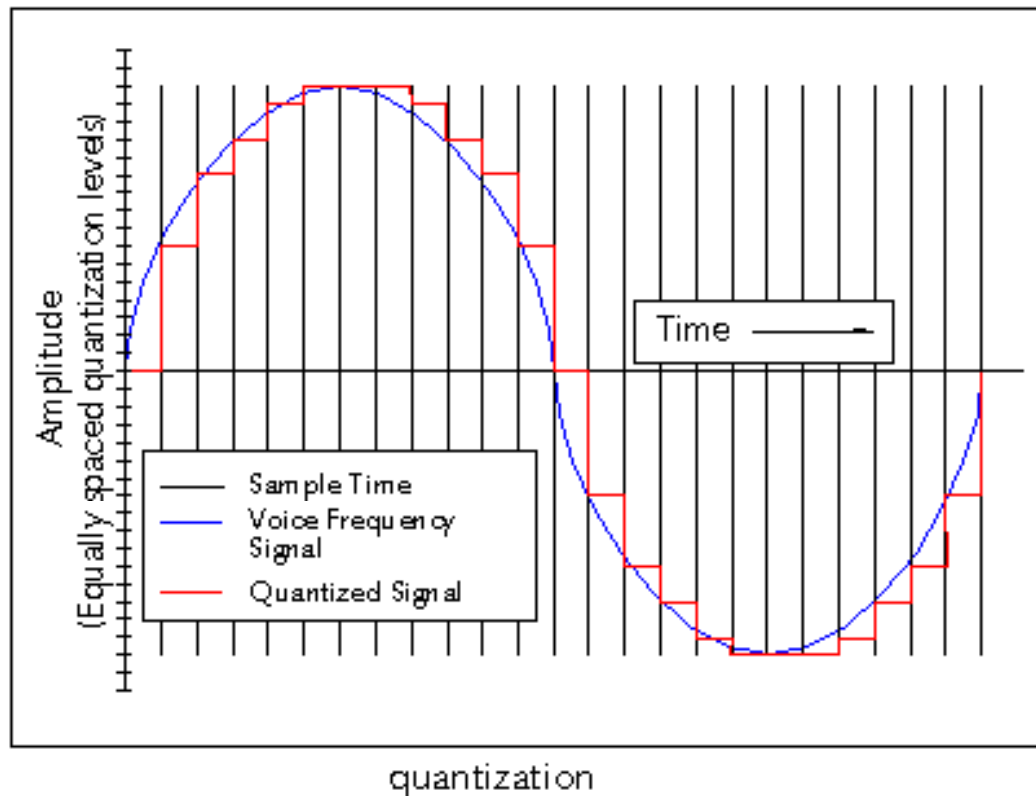
- odabiranje (semplovanje) signala u : $t=nT=n/2f_m$, $n=1, 2, \dots$
- obično se radi regularno odabiranje
- dobijeni signal je diskretizovan po vremenu ali ne i po amplitudi – svaki odbiran može imati bilo koji amplitudski nivo.



Ravnomerna kvantizacija

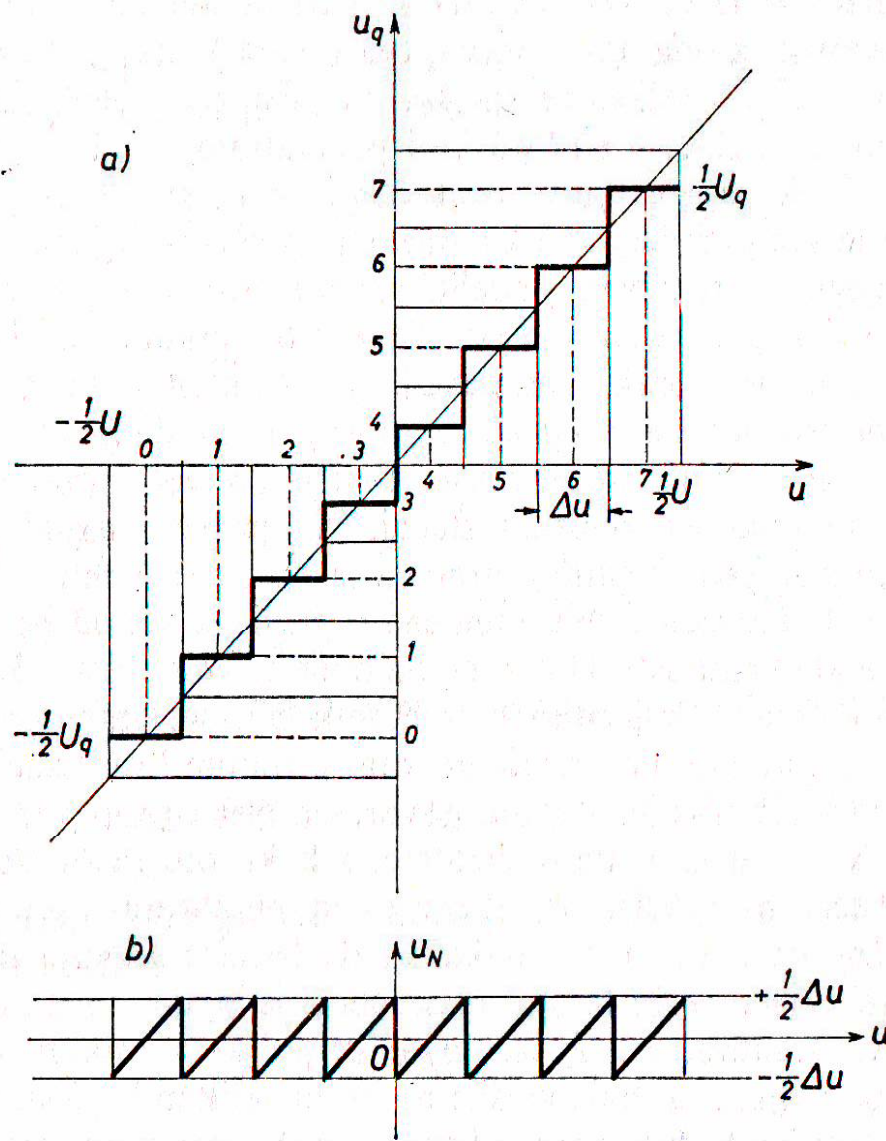
* Kvantizacija (zaokruživanje) vrednosti amplituda izvršava se tako da je maksimalna greška $\pm\Delta u/2$

- Kompletan dinamički interval napona se deli na q podintervala $U=q\Delta u$, gde je Δu **korak kvantizacije (kvantizacioni interval)**.
- Moguće vrednosti amplituda odbiraka: $\pm\Delta u/2, \pm3\Delta u/2, \pm5\Delta u/2, \dots, \pm(q-1)\Delta u/2$



$$\Delta u = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{q}$$

Karakteristika kvantizacije



- Na x -osu nanosi se trenutna vrednost analognog signala (bilo koji realan broj iz opsega $[U_{\min}, U_{\max}]$). Pritom je često $U_{\min} = -U/2$, $U_{\max} = U/2$.
- Na y -osi očitava se **kvantizovana vrednost odbirka** u_{qi} – jedna od q mogućih (diskretnih) vrednosti.
- Kada se vrednost analognog signala nalazi u opsegu između dve **granične vrednosti (označene sa u_i)** – počev od U_{\min} do U_{\max} , sa korakom Δu .
- Za amplitudu odbirka u i -tom intervalu $u_i \leq u \leq u_{i+1}$, amplitude odbiraka nakon kvantizacije su u_{qi}

$$U_{q,\min} = U_{\min} + \Delta u / 2$$

$$U_{qi} = U_{q,\min} + i\Delta u$$

$$U_{q,\max} = U_{q,\min} + (q - 1)\Delta u$$
- Greška kvantizacije u i -tom ovom intervalu je $u_{N_i} = u - u_{qi}$.

Ravnomerna kvantizacija - primer

* Slučaj sa $q=4$:

- Celokupan interval vrednosti amplituda $[-1.5, 1.5]$ deli se na $q=4$ podintervala širine $\Delta u = (1.5 - (-1.5))/4 = 0.75$ (Δu je korak kvantizacije).
- Granice intervala kvantizacije su:

$$\{-1.5, -0.75, 0, 0.75, 1.5\}$$

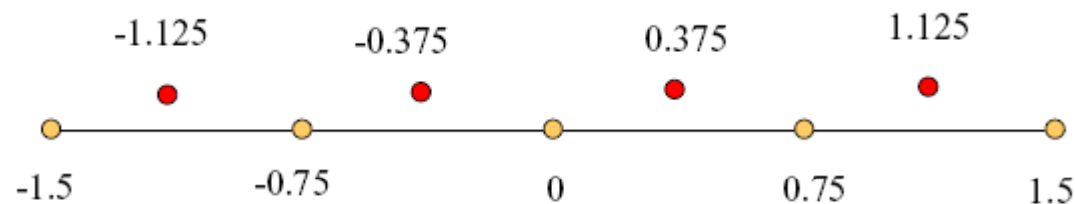
- Kvantizacioni nivoi (moguće vrednosti amplituda odbiraka) su

$$U_{q,0} = -1.5 + 0.75/2 = -1.125$$

$$U_{q,1} = -1.5 + 0.75/2 + 1 \cdot 0.75 = -0.375$$

$$U_{q,2} = -1.5 + 0.75/2 + 2 \cdot 0.75 = 0.375$$

$$U_{q,3} = -1.5 + 0.75/2 + 3 \cdot 0.75 = 1.125$$



- Širina jednog intervala kvantizacije i razmak između dva kvantizaciona nivoa je uvek $\Delta u = 0.75$.
- Maksimalna vrednost greške kvantizacije je $\Delta u/2 = 0.375$.

Srednja kvadratna greška kvantizacije

* Srednja kvadratna vrednost greške u i -tom intervalu (smatra se da je svaki interval kvantizacije dovoljno mali):

$$\overline{u_{N_i}^2} = \int_{u_i}^{u_{i+1}} (u - u_{q_i})^2 p(u) du \quad u_i = u_{q_i} - \frac{1}{2} \Delta u_i, u_{i+1} = u_{q_i} + \frac{1}{2} \Delta u_i$$
$$\overline{u_{N_i}^2} = p(u_{q_i}) \int_{u_{q_i} - \frac{1}{2} \Delta u_i}^{u_{q_i} + \frac{1}{2} \Delta u_i} (u - u_{q_i})^2 du = \frac{1}{12} p(u_{q_i}) (\Delta u_i)^3$$

* Ukupna srednja kvadratna greška je jednaka sumi srednjih kvadratnih grešaka iz svih intervala (naziva se i srednja snaga greške kvantizacije – P_q)

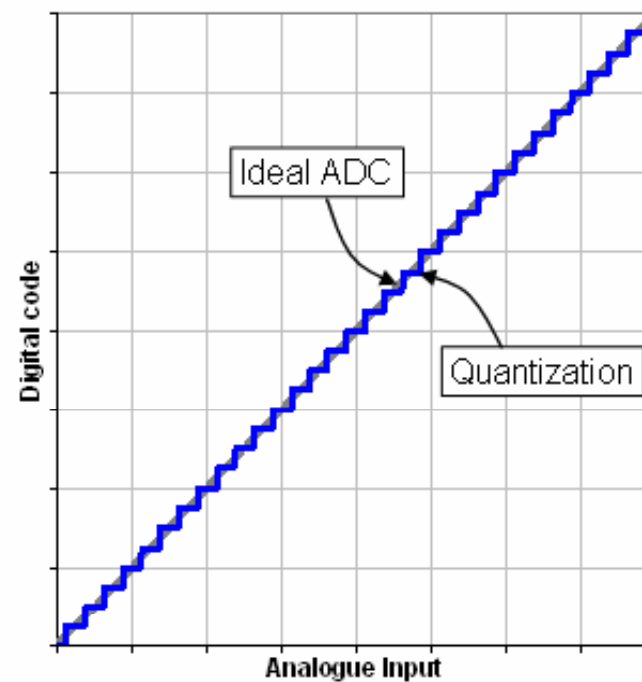
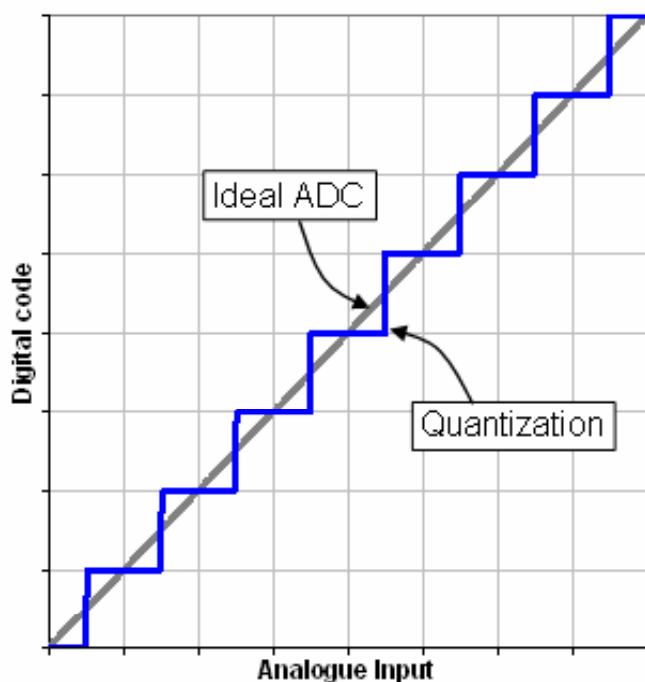
$$\overline{u_N^2} = \sum_{i=0}^{q-1} \overline{u_{N_i}^2} = \frac{1}{12} (\Delta u)^2 \sum_{i=0}^{q-1} p(u_{q_i}) \Delta u \quad \sum_{i=0}^{q-1} p(u_{q_i}) \Delta u = 1$$

$$P_{qN} = \overline{u_N^2} = \frac{1}{12} (\Delta u)^2, \Delta u = \text{const}$$

Srednja snaga greške kvantizacije

* Srednja snaga greške kvantizacije

- Zavisi samo od širine kvantizacionog intervala (Δu) i značajno se smanjuje kada se povećava broj nivoa kvantizacije q .
- Primer – za isti naponski opseg $U=U_{\max}-U_{\min}$:
 - $q=9$ (slika levo): $\Delta u=U/9$, $P_{qN1}=U^2/81$
 - $q=33$ (slika desno): $\Delta u=U/33$, $P_{qN2}=U^2/1089=0.074P_{q1}$



Odnos snage signala i šuma kvantizacije

* Srednja snaga čitavog signala

$$P_s = \int_{-\frac{1}{2}U}^{\frac{1}{2}U} u^2 p(u) du = p \int_{-\frac{1}{2}U}^{\frac{1}{2}U} u^2 du = \frac{1}{12} p U^3 = \frac{U^2}{12} = \frac{(q\Delta u)^2}{12}$$

* Kvantizovani signal

$$\pm \frac{1}{2} \Delta u, \pm \frac{3}{2} \Delta u, \pm \frac{5}{2} \Delta u, \dots, \pm \frac{q-1}{2} \Delta u$$
$$P_q = \frac{1}{q} 2 \frac{(\Delta u)^2}{4} [1 + 3^2 + 5^2 + \dots + (q-1)^2] = \frac{(q^2 - 1)(\Delta u)^2}{12}$$

* Odnos srednja snaga signala P_s , odnosno kvantizovanog signala P_q i srednje kvadratne vrednosti greške usled kvantizacije

$$\frac{P_s}{P_{N_q}} = q^2$$

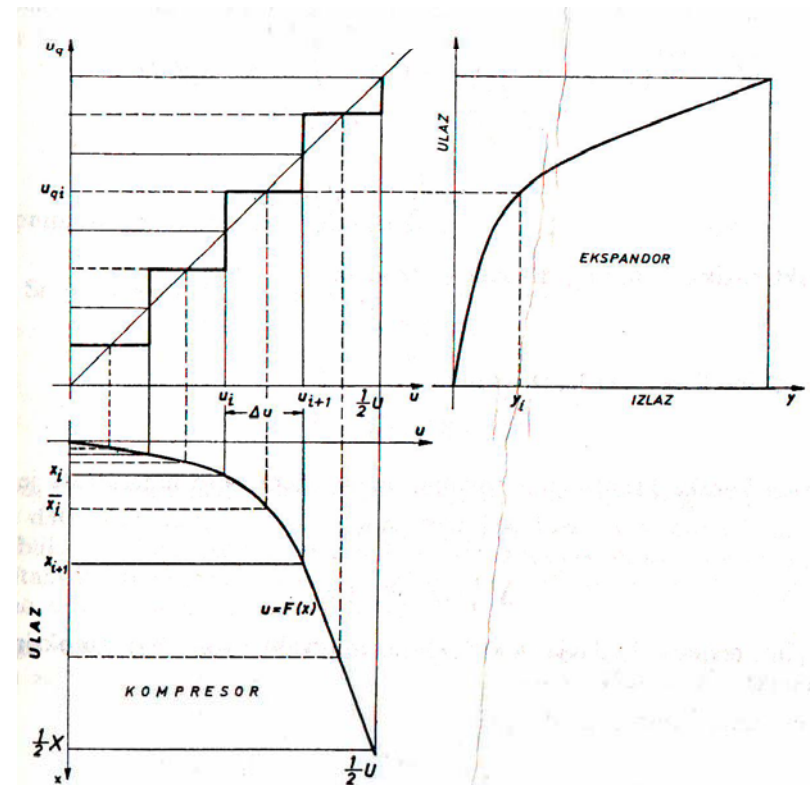
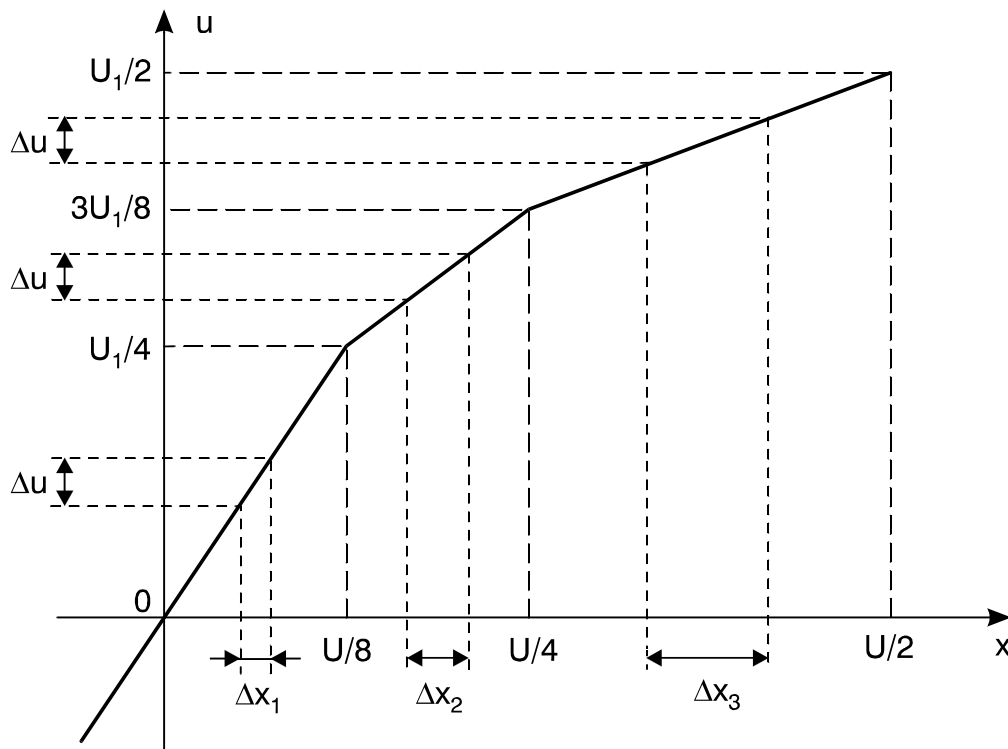
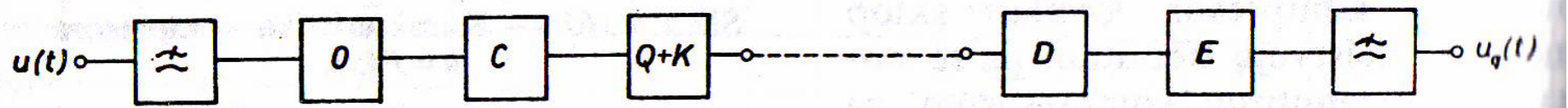
$$\frac{P_q}{P_{N_q}} = q^2 - 1$$

Neravnomerna kvantizacija

- * Na ulazu kvantizera uvek imamo signal koji je diskretan po vremenu ali može imati sve moguće amplitudске nivoe. U praksi je ovaj signal slučajan pa ga opisujemo alatima verovatnoće i statistike, tj. preko funkcije gustine verovatnoće (PDF).
- * Ravnomerna kvantizacija je optimalna samo u slučaju kada je funkcija gustine raspodele (PDF) analognog signala $u(t)$ na ulazu kvantizera uniformna, tj. kada su sve amplitude signala na ulazu kvantizera jednako verovatne.
- * Ni jedan od tipičnih signala koji se prenose (govor, audio signal, video signal,...) nema uniformnu raspodelu. Zato za ove signale ravnomerna kvantizacija nije optimalna.
- * Primera radi, u slučaju signala govora češće se javljaju manji nivoi (amplitude) signala a veoma retko veliki nivoi signala.
- * Zato intervali kvantizacije treba da budu manji za male vrednosti signala na ulazu kvantizera, dok se kvantizacija većih vrednosti signala može obavljati sa većim intervalima kvantizacije.

Kompresor i ekspandor

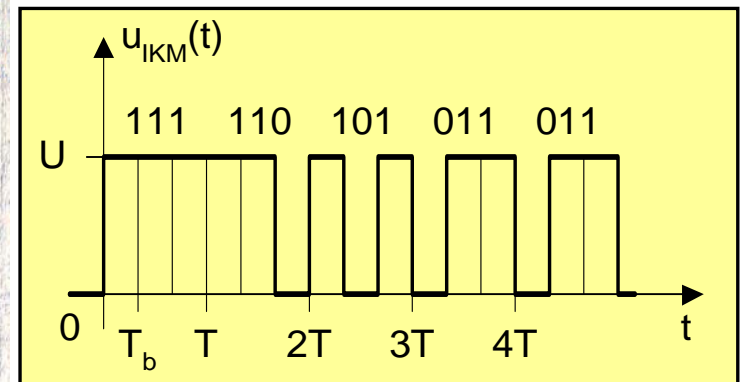
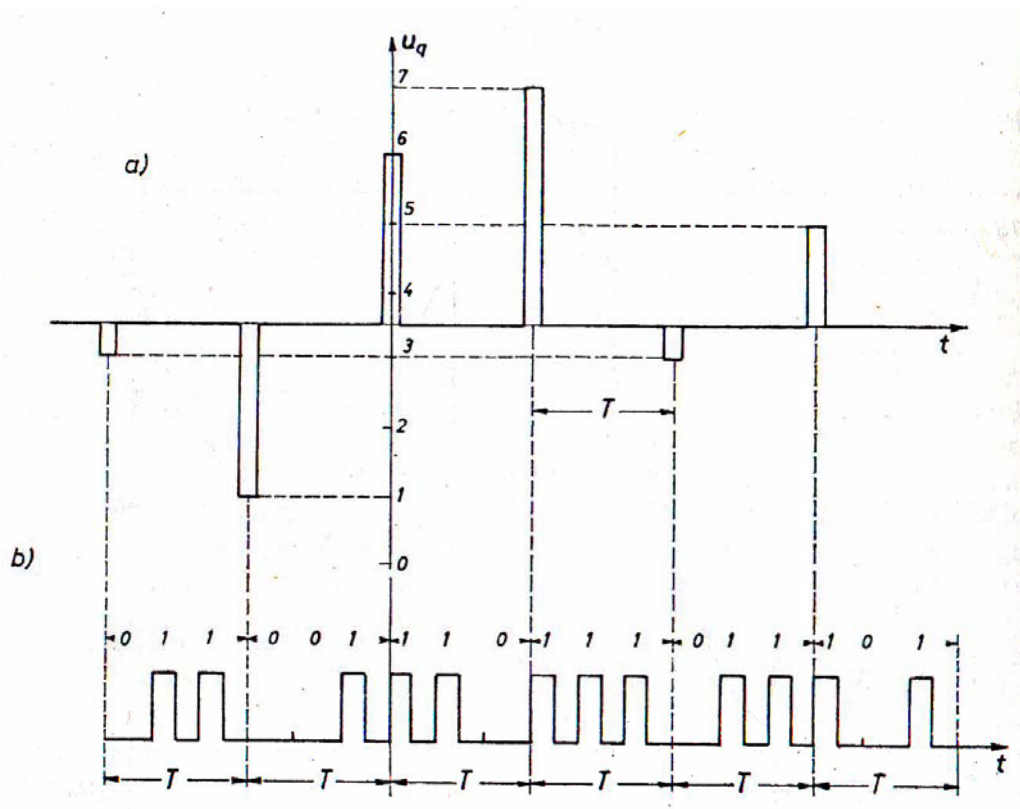
- * Kompresor na strani predaje menja funkciju gustine raspodele u uniformnu, pa se tada iza njega može postaviti ravnomerni kvantizer (jer je tada on optimalan).
- * Ekspander u prijemniku obavlja inverznu operaciju.



Kodiranje (kodovanje)

* Svaki kvantizovani odbirak kodira se kombinacijom od $\log_2(q)$ bita.

- Umesto kvantiziranih odbiraka signala iz određenog skupa dovoljno je preneti skup bita (binarnih cifara) koji kao kod predstavljaju te amplitude
- $q=2^n$ različitih simbola predstavljaju se sa $n=\log_2(q)$ bita
- Za $q=8$ simbola predsta je sa $n=3$ bita (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111)



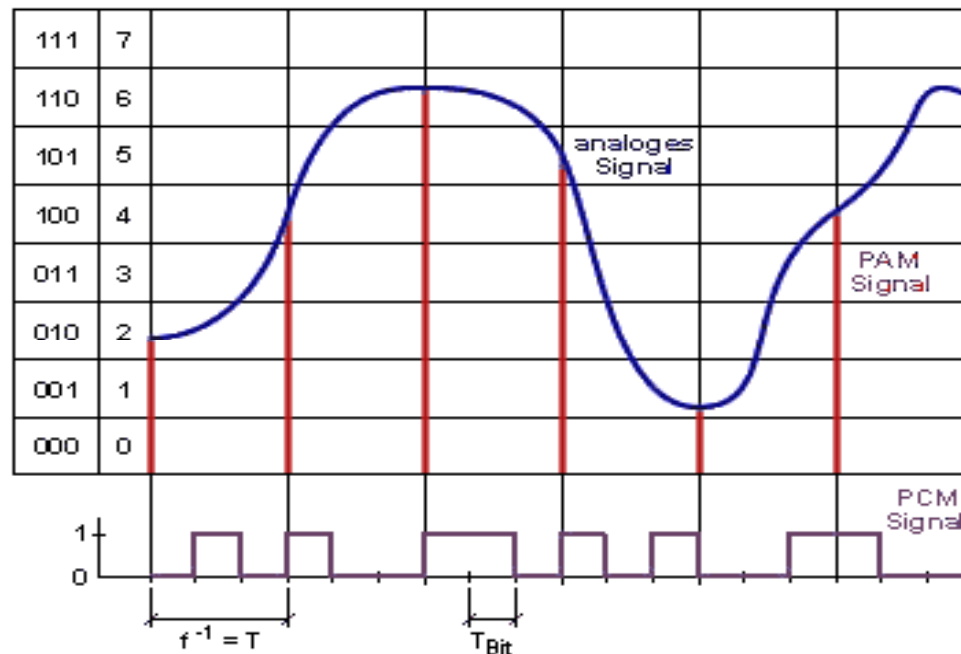
Kompletan postupak IKM modulacije

* IKM:

- Odabiranje kratkim impulsima (ili nešto dužim) periode T .
- Kvantizacija na $q=8$ nivoa.
- Kodiranje svakog odbirka sa po $n=3$ bita (max. trajanje odgovarajućih impulsa iznosi $T_b=T/n$).

* Rezultat PCM postupka je povorka impulsa koji imaju samo dva nivoa!

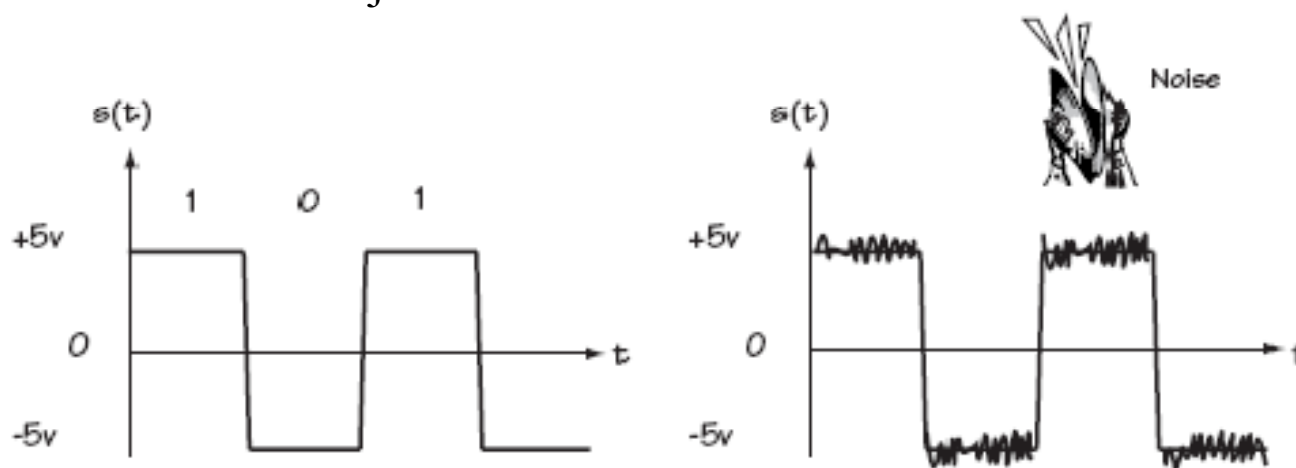
- Od analognog signala formiran je digitalni, koji se može opisati nizom nula i jedinica. Kod ovog signala brzina protoka bita je $V_b=n \cdot f_s = \log_2(q)/T$.



Prenos kodiranog signala

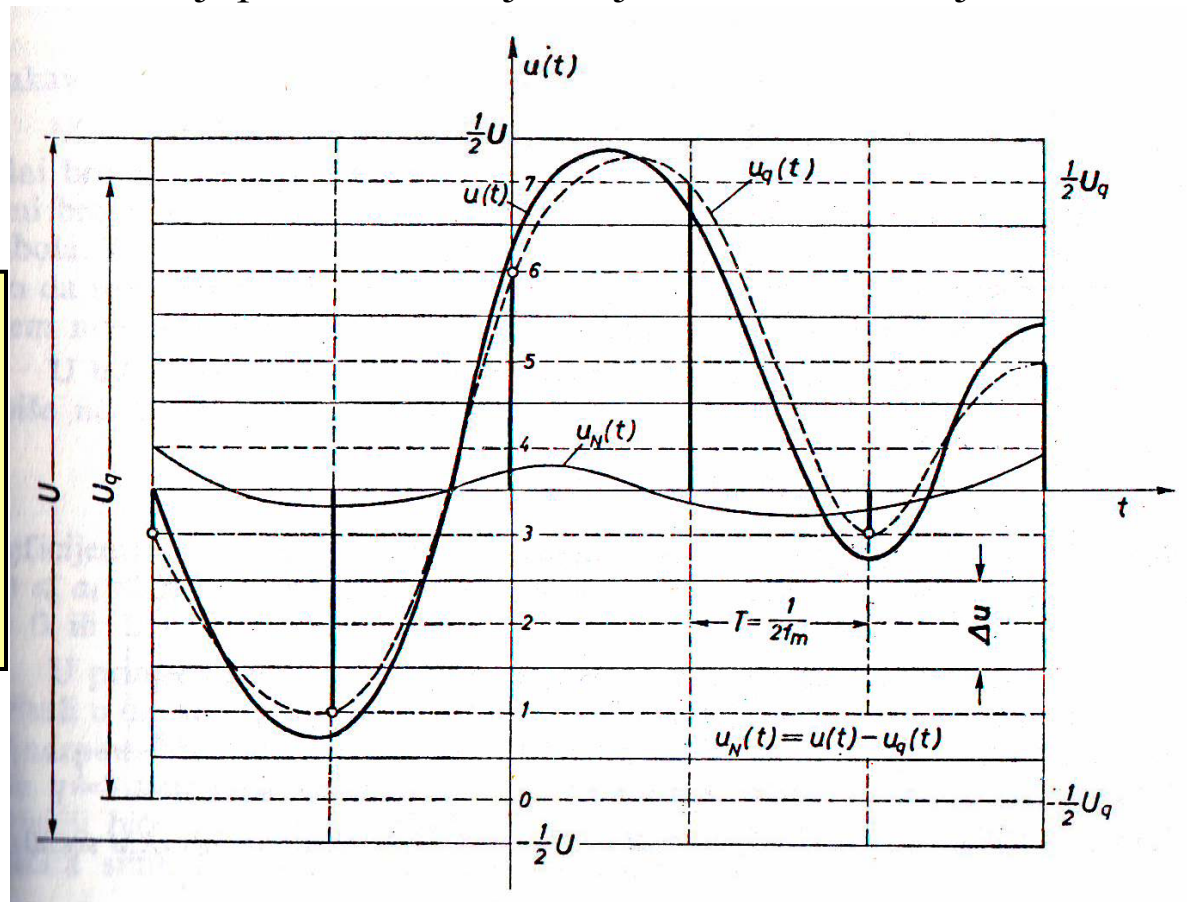
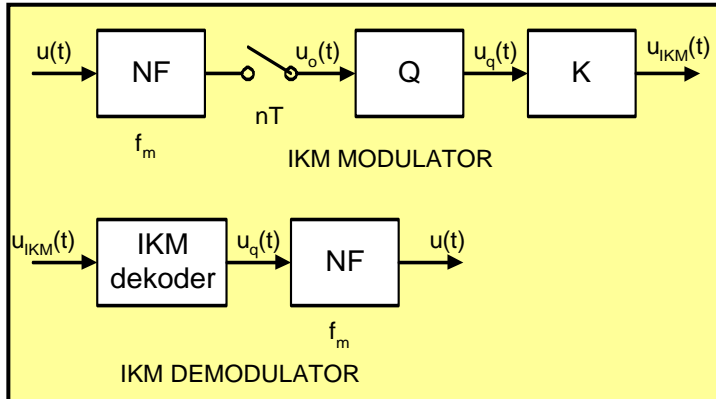
* Velike prednosti:

- Preko linije veze prenosi digitalni signal umesto analognog pa se problem prepoznavanja (rekonstrukcije) svodi na problem odlučivanja.
- U prenosu analognog signala moramo se poznavati *tačna vrednost signala u svakom trenutku*; usled izobličenja ili šuma dolazi do degradacije korisnog signala – mera postignutog kvaliteta prenosa je odnos signal/šum (S/N).
- U prenosu digitalnog signala, međutim, u prijemniku nije bitno prepoznati tačan oblik signala, već samo otkriti da li je dobijeni signal 1 ili 0. Pošto su signali koji predstavljaju 1 i 0 međusobno dosta različiti, moguće je da signal na ulazu u prijemnik bude dosta izobličen (relativno mali SNR), a da se ipak izvrši tačno odlučivanje.



Rekonstrukcija kontinualnog signala

- * Signal $u_q(t)$ na prijemu dobijen dekodiranjem a zatim propuštanjem tako dobijenog PAM signala kroz NF filter
 - greška kvantizacije je $u_N(t) = u(t) - u_q(t)$
 - rekonstruisan signal je utoliko sličniji polaznom što je broj nivoa kvantizacije veći.



Analogni/digitalni prenos

* Mane postupka:

- Ako broj kvantizacionih nivoa nije dovoljno veliki, rekonstruisani signal nije veran originalnom (modulišućem) signalu.
- Greške pri prenosu različitih bita ne utiču jednako na degradaciju rekonstruisanog signala. Najopasnije su greške na bitima najveće težine (MSB – *Most Significant Bit*) a najmanju štetu prave greške pri prenosu bita najmanje težine (LSB - *Least Significant Bit*).
- Za prenos signala u digitalnom obliku (dakle IKM modulisanom) obično je potreban mnogo veći opseg učestanosti u odnosu na opseg koji bi bio potreban za prenos tog istog signala analogno modulisanog (npr. AM1BO, AM2BO,...).
- Pokazuje se da je minimalna širina propusnog opsega potrebna za prenos digitalizovanog signala koji ima binarni protok V_b jednaka $B=V_b/2$ (više reči o ovome biće na narednim predavanjima).
- To je cena koja se mora platiti za ostvareni dodatni kvalitet prenošenog signala.

Digitalizacija signala govora

* Telefonski signal:

- Modulišući signal je signal govora sa $f_m=3.4$ kHz.
- Odabiranje se vrši sa učestanošću odabiranja $f_s=8$ kHz (perioda odabiranja je $T=1/8000=125$ μ s).
- Kvantizacija se obavlja na $q=256$ nivoa.
- Kodovanje svakog odbirka sa po $n=\log_2(256)=8$ bita.
- Odgovarajući binarni protok iznosi $V_b=nf_s=8*8000=64$ kb/s (trajanje impulsa binarnog signala iznosi $T_b=T/n=15.625$ μ s).

* Potreban propusni opseg potreban za prenos telefonskog signala:

- U originalnom obliku (analogni signal):

$$B_{\text{orig}}=f_m=3.4\text{kHz}$$

- Analogno modulisanog signala

$$B_{\text{KAM}}=B_{\text{AM2BO}}=2f_m=6.8\text{kHz}, \quad B_{\text{AM1BO}}=f_m=3.4\text{kHz}$$

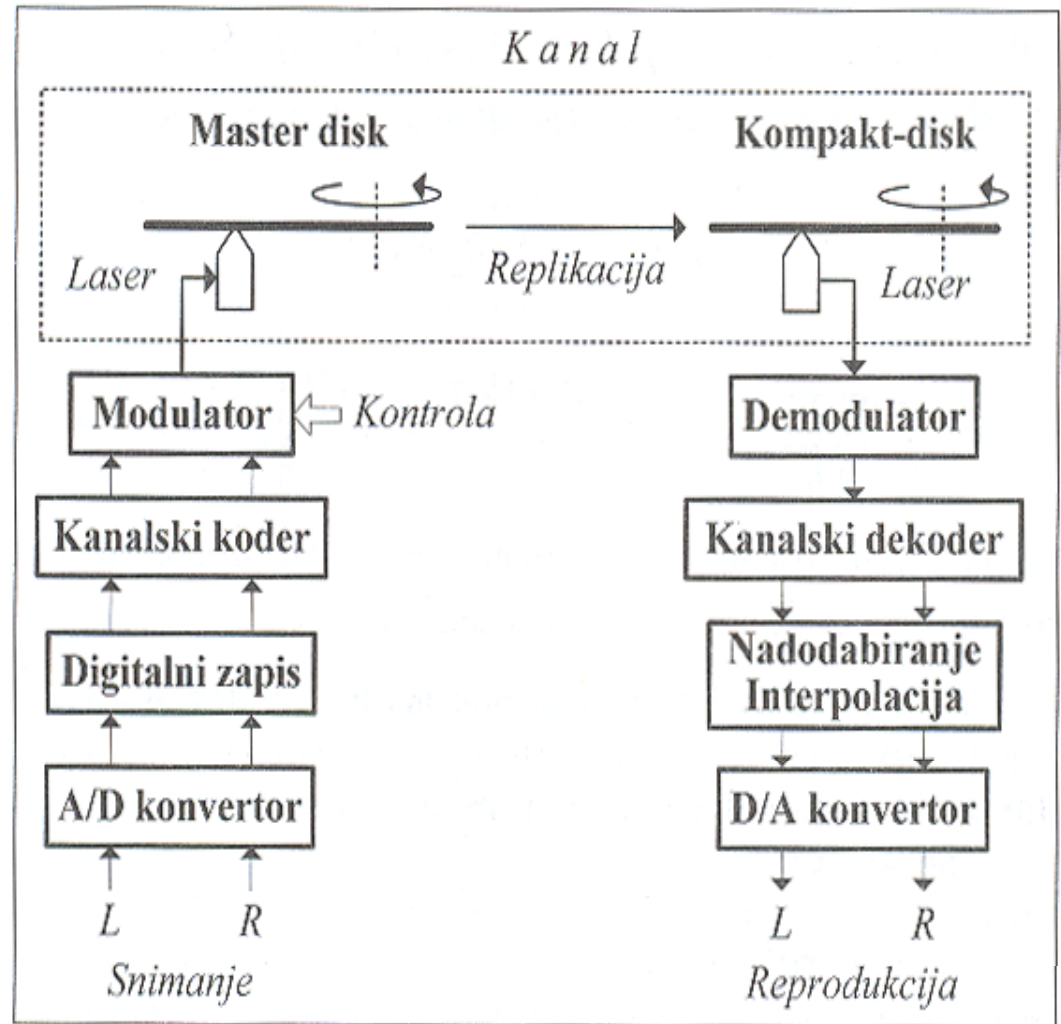
- Digitalizovanog signala:

$$B_{\text{PCM}}=V_b/2=32\text{kHz}>9B_{\text{orig}}$$

Zapis audio signala

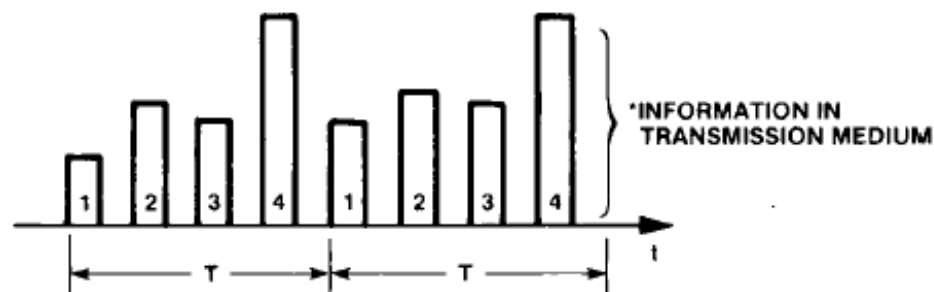
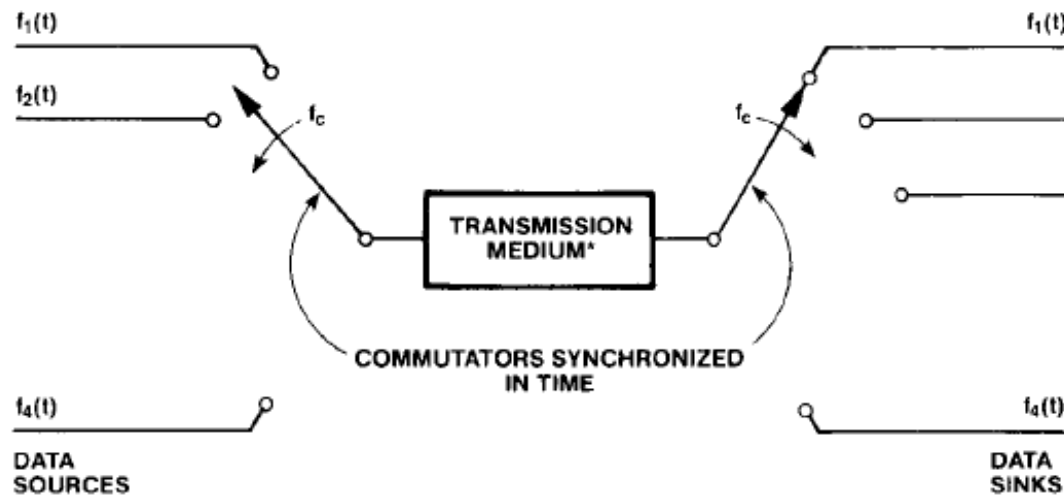
- * 44.1kHz (kompatibilnost sa PAL standardom TV signala – 25 slika u sekundi, 588 linija po slici, 3 odbirka po liniji).
- * 16 bita po odbirku -> 65536 kvantizacionih nivoa, odnos signal-šum kvantizacije od 96dB.
- * “Greške u kanalu” ispravlja kanalski koder;

Karakteristika	LP	CD
Propusni opseg	30 Hz-20 kHz, ± 3 dB	20 Hz-20 kHz, $+0.5/-1$ dB
Dinamički opseg	70 dB pri 1 kHz	> 90 dB
Odnos S/N	60 dB	> 90 dB
Harmonijska izobličenja	1-2 %	0.005 %
Trajanost	Više godina. Tokom vremena gubi se na kvalitetu reprodukcije visokofrekvencijskih komponenti.	Trajan
Radni vek	500-600 sati	>5000 sati



Multipleksiranje po vremenu (TDM)

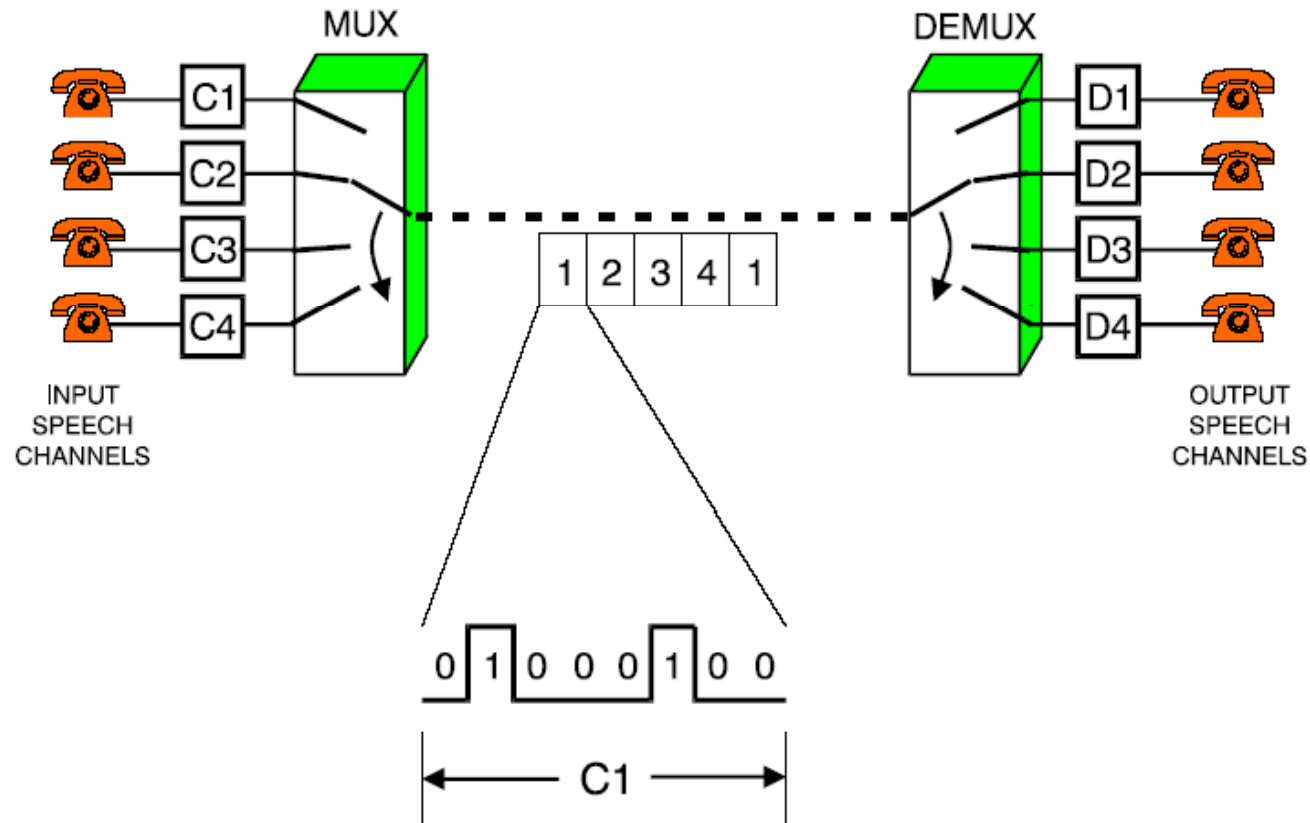
* TDM - Time Division Multiplex (mux. PAM signala)



TDM multipleksiranje

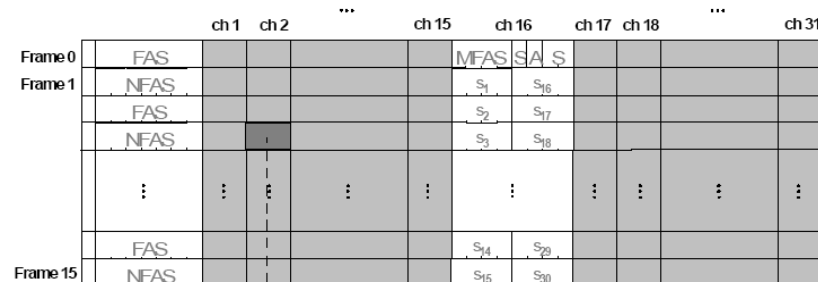
* Primer za N=4 telefonska kanala

- Multipleksiranje se ovde obavlja odbirak po odbirak (kodna reč po kodna reč).
- Svaki četvrti osmobarbitni slot odgovara prvom govorniku, tj. u svakom četvrtom slotu (kanalu u vremenskom multipleksu) se prenosi osam bita koji odgovaraju kvantizovanom odbirku koji potiče od njega.

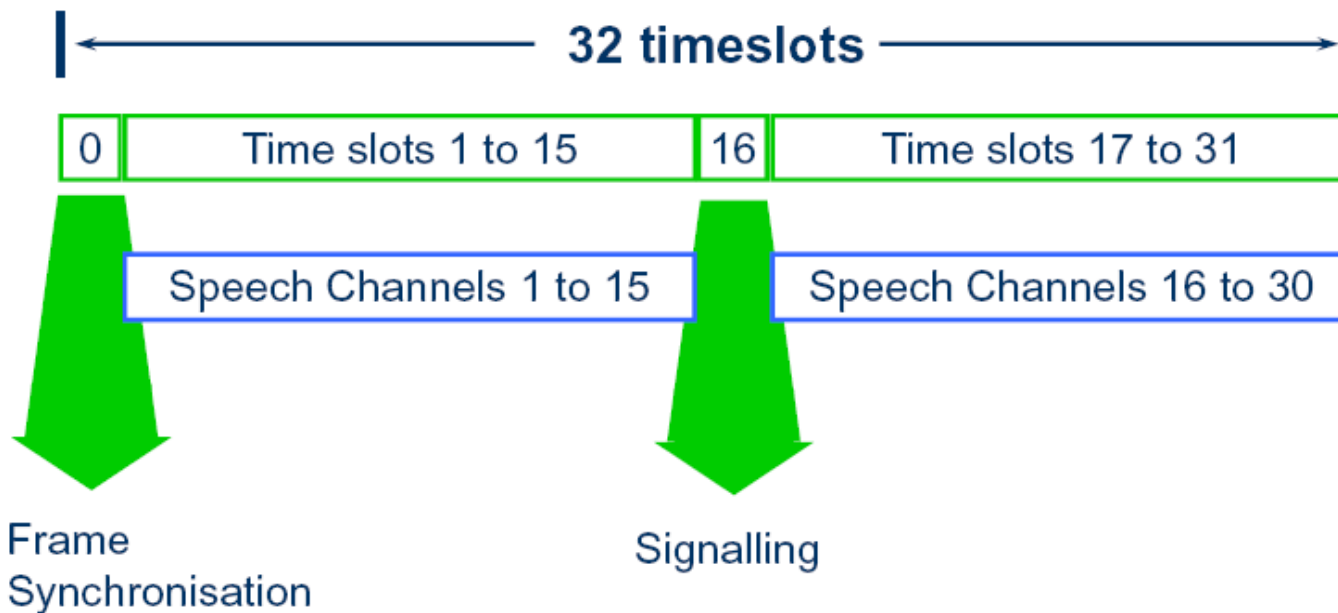


TDM multipleksiranje – E1

- * **30 telefonskih kanala + 2 kontrolna**
 - 0-ti kanal za sinhronizaciju rama
 - 16-ti kanal za signalizaciju
- * **Formira se primarna (E1) grupa Evropskog PDH sistema**
 - 16 uzastopnih ramova formiraju superram



8 bit per sample
8000 samples per second
30 or 31 channels of information
125μs frame period
3.400 Hz bandwidth per channel



Multipleksiranje po vremenu (TDM) – E1

* Primarni multipleks - mux. IKM (PCM) signala:

- Ukoliko se pri kvantizaciji koristi $q=256=2^8$ kvantizacionih nivoa ($n=8$), a odabiranje se vrši sa učestanošću od 8kHz, trajanje jednog bita T_B i binarni protok odgovarajućeg digitalnog signala definisani su izrazima:

$$V_B = nf_s = 64 \text{ kb/s}, \quad T_B = 1/V_B = 15.625 \mu\text{s}$$

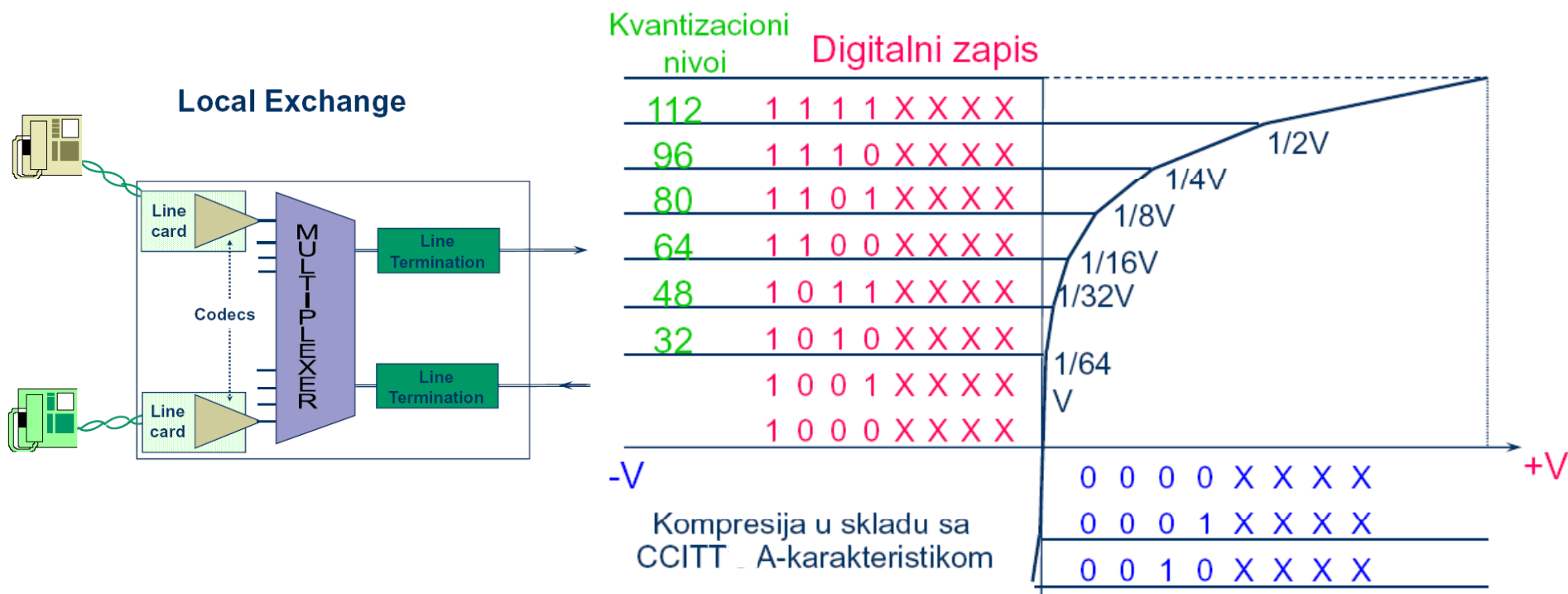
- Neka $N=32$ nezavisnih signala nastalih digitalizacijom govornog signala primenom IKM želimo da prenesemo zajedničkom linijom veze.
 - Tada se period odabiranja deli na N delova trajanja T/N . Govornim signalima dodeljuje se redni broj, označen sa j , koji može da uzme vrednosti od 1 do N .
 - Tada n bita koji odgovaraju trenutnom odbirku tog signala prenosimo u j -tom periodu trajanja T/N .
 - Na taj način, u toku trajanja jednog perioda odabiranja šalju se svi bite svih kanala, pri čemu se mora znati koji signal se prenosi u kom vremenskom kanalu (j -ti period trajanja T/N), kako bi se na mestu prijema ponovo izdvojili biti svakog od signala.
 - Prema tome u toku jednog perioda odabiranja, neophodno je preneti nN bita, binarnih simbola, pa u ovom slučaju trajanje jednog bita i protok simbola multipleksiranog signala definisan izrazima:

$$T_{B,MUX} = T_B / N = T / Nn = 0.488 \mu\text{s}$$
$$V_{B,MUX} = Nnf_s = Nf_s \log_2 q = 2048 \text{ kb/s}$$

Gde se obavlja digitalizacija signala?

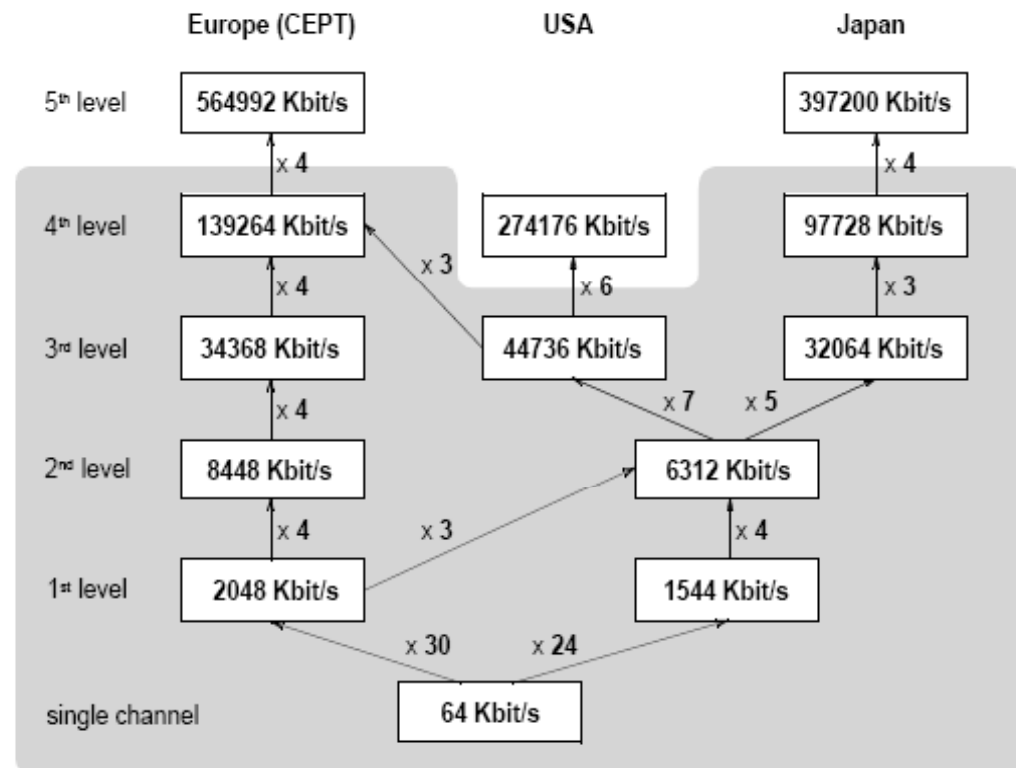
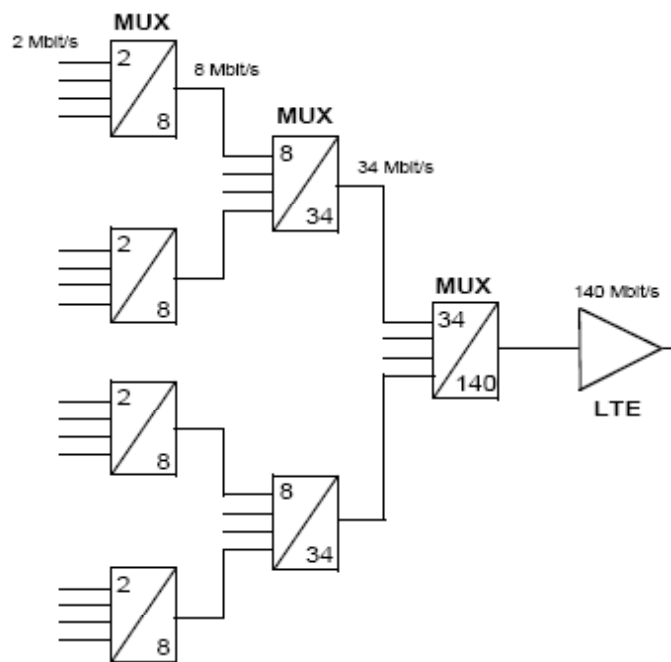
* U javnoj telefonskoj mreži digitalizacija se obavlja u delu telefonske centrale (*local exchange*).

- Primi se analogni telefonski signal;
- Obavlja se odabiranje sa učestanošću od 8000Hz;
- Kvantizacija sa 256 nivoa sa kompresijom (A-karakteristika);
- Kodovanje osmобitnim kodom (sve na linijskoj kartici);
- Rezultat je signal čiji je protok 64kb/s;
- U multiplekseru se od 32 signala pravi signal čiji je protok 2048 kb/s.



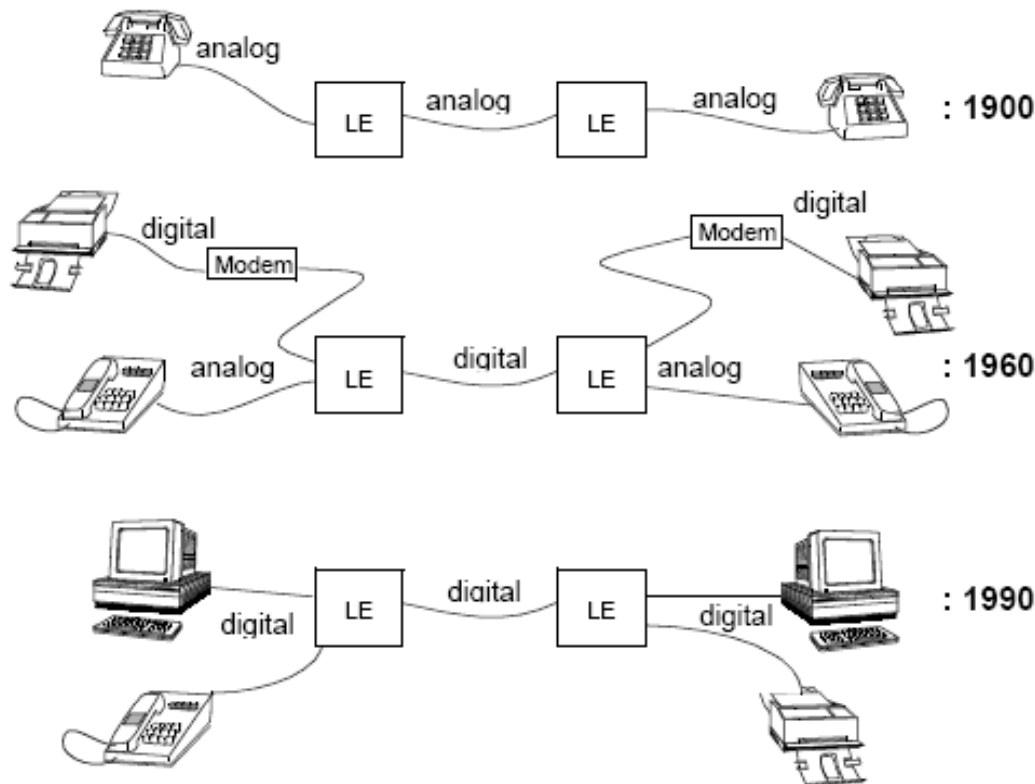
Plesiohrona hijerarhija (PDH)

- * Signali se multipleksiraju (TDM) radi lakšeg prenosa veće količine podataka na velika rastojanja, istom linijom veze.
- * Svaka centrala ima svoj oscilator, ne postoji savršena sinhronizacija – umeću se tzv. “slepi” biti.
- * U Evropi se ovaj sistem koristi za protoke do 140Mb/s (iznad toga SDH).



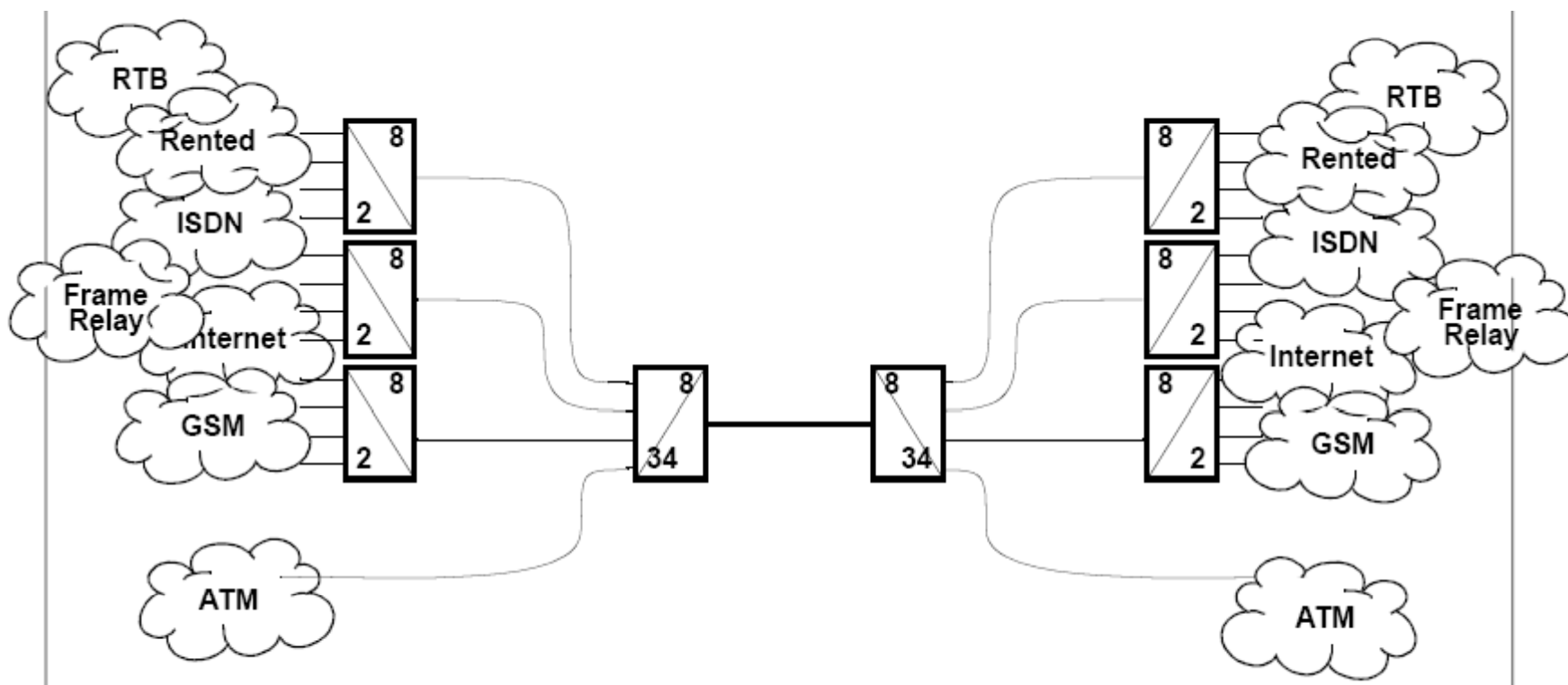
Digitalizacija transportne mreže

- * Na ovaj način izvršena je digitalizacija transportne mreže.
- * Pošto je sistem dizajniran za prenos signala govora, smatralo se da signal koji stiže do telefonske centrale mora biti analogan.
- * Digitalni podaci iz računara su se digitalnim modulacijama pretvarali u analogne a zatim u centrali opet digitalizovali!



Digitalizacija transportne mreže

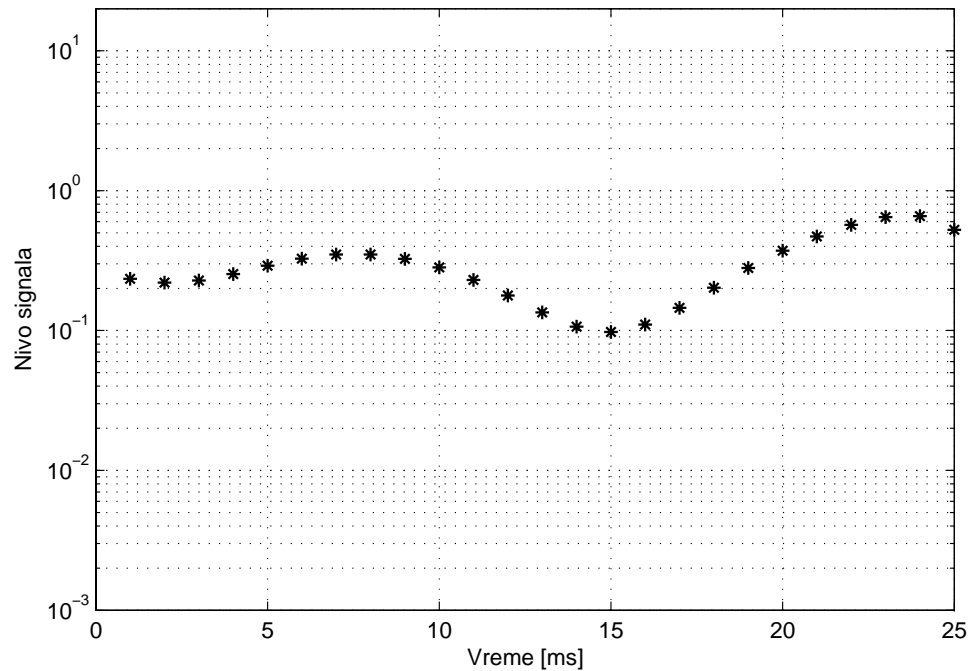
- * Danas postoji mogućnost da se preskoči dvostruka konverzija, tj. prenos može da bude potpuno digitalan (end-to-end).
- * Postojeća PDH mreža se i dalje koristi za prenos signala iz različitih izvora, veoma je bitna za transport.
- * Na ove ulaze se ne uključuju analogni signali iz javne telefonske mreže!



Vremenska korelacija signala

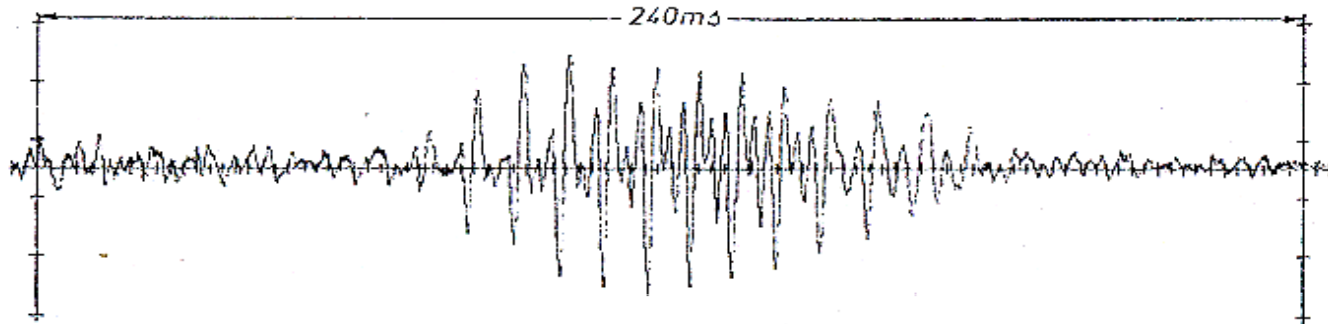
* Signali kao što je govorni signal, uglavnom se sporo menjaju u vremenu.

- Kod ovakvih signala prenosimo veliki broj uzastopnih odbiraka signala koji su veoma bliske vrednosti – promena signala u periodu uzimanja nekoliko uzastopnih odbiraka je veoma mala.
- Promena između uzastopnih odbiraka je obično reda 5-15% vrednosti čitavog odbirka.
- Ako su susedni odbirci bliski po amplitudi, autokorelaciona funkcija signala $R(\tau)$ lagano opada sa porastom τ . Ka takav signal se kaže da je značajno korelisan.

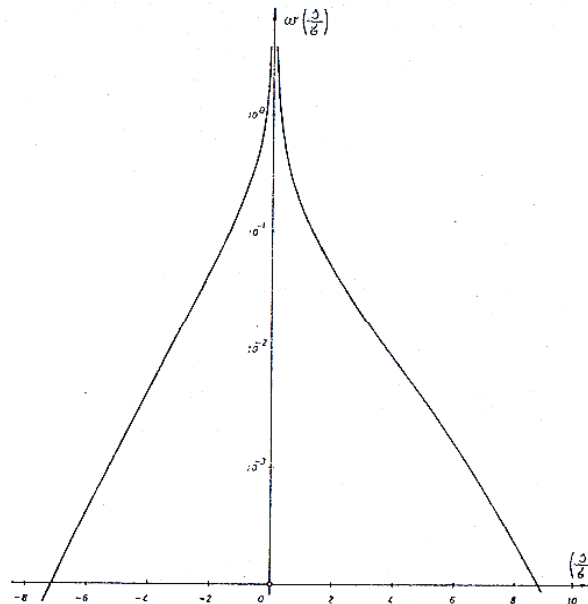


Karakteristike signala govora

* Vremenski oblik



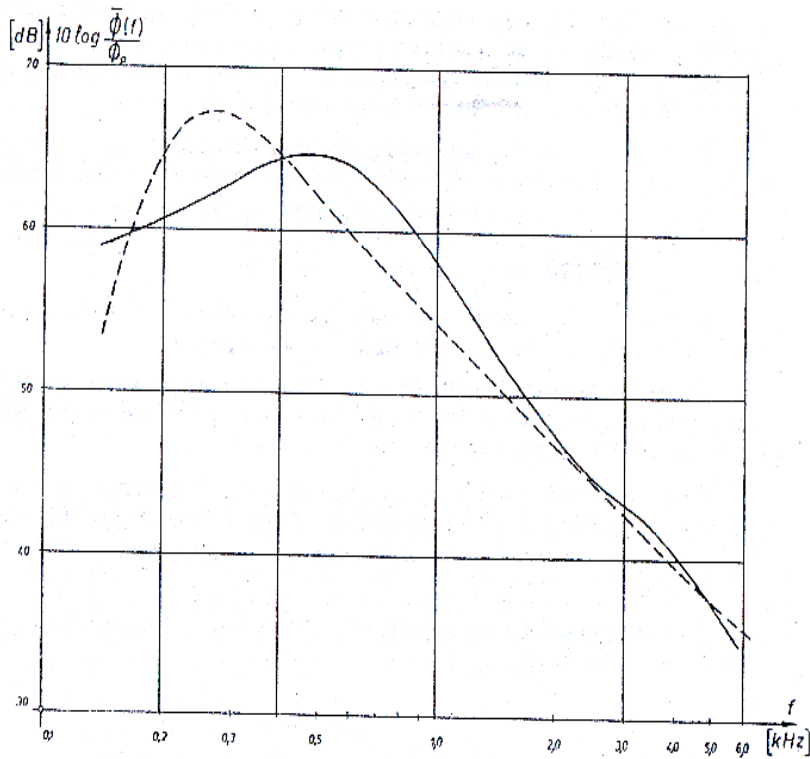
* PDF



Karakteristike signala govora

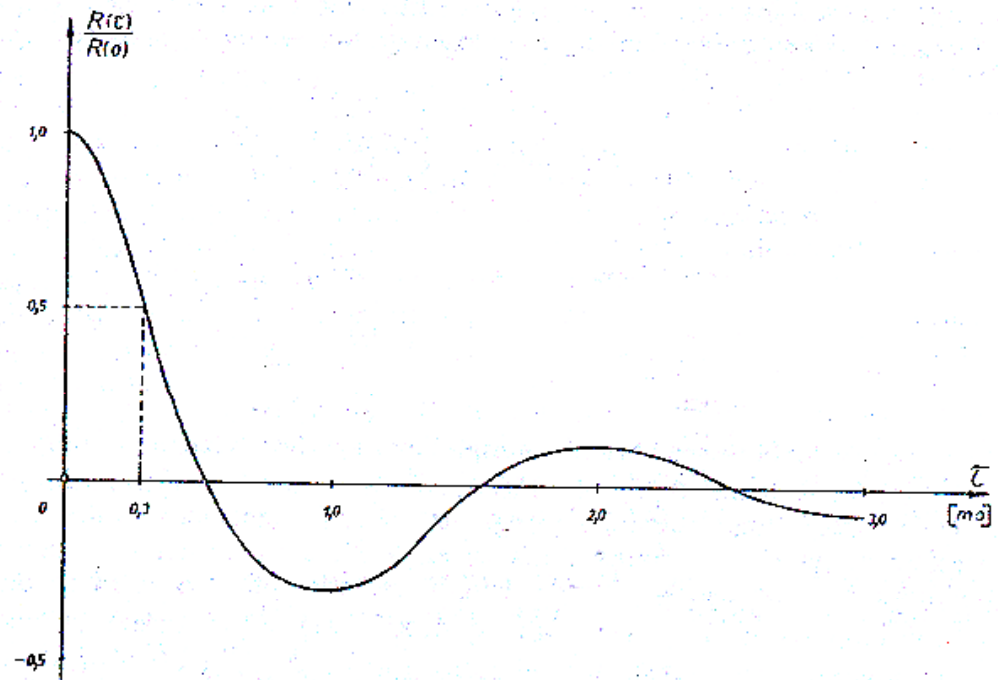
* SGSS:

- Engleski ---
- Ruski - - -
- Uvek se češće pojavljuju komponente na niskim učestanostima (preko 4kHz zanemarljivo).



* Autokorelaciona funkcija (ACF)

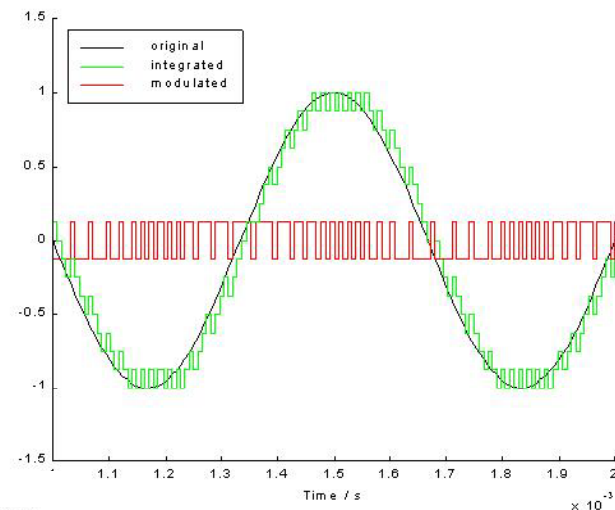
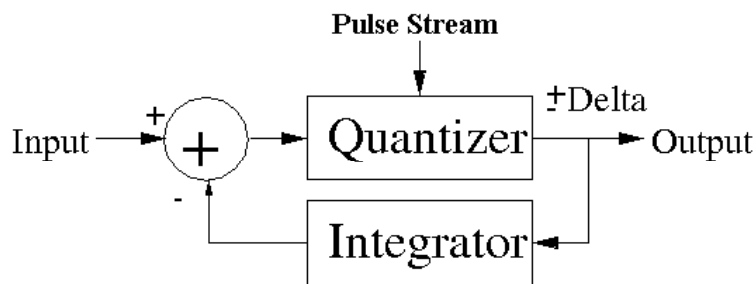
- Inverzna FT od SGSS!
- Autokorelacija za pomeraje do $\tau=0.3\text{ms}$ nije zanemarljiva.
- Ako znamo vrednost signala u jednom trenutku, on se neće bitno promeniti za npr. 0.1ms!



Delta modulacija

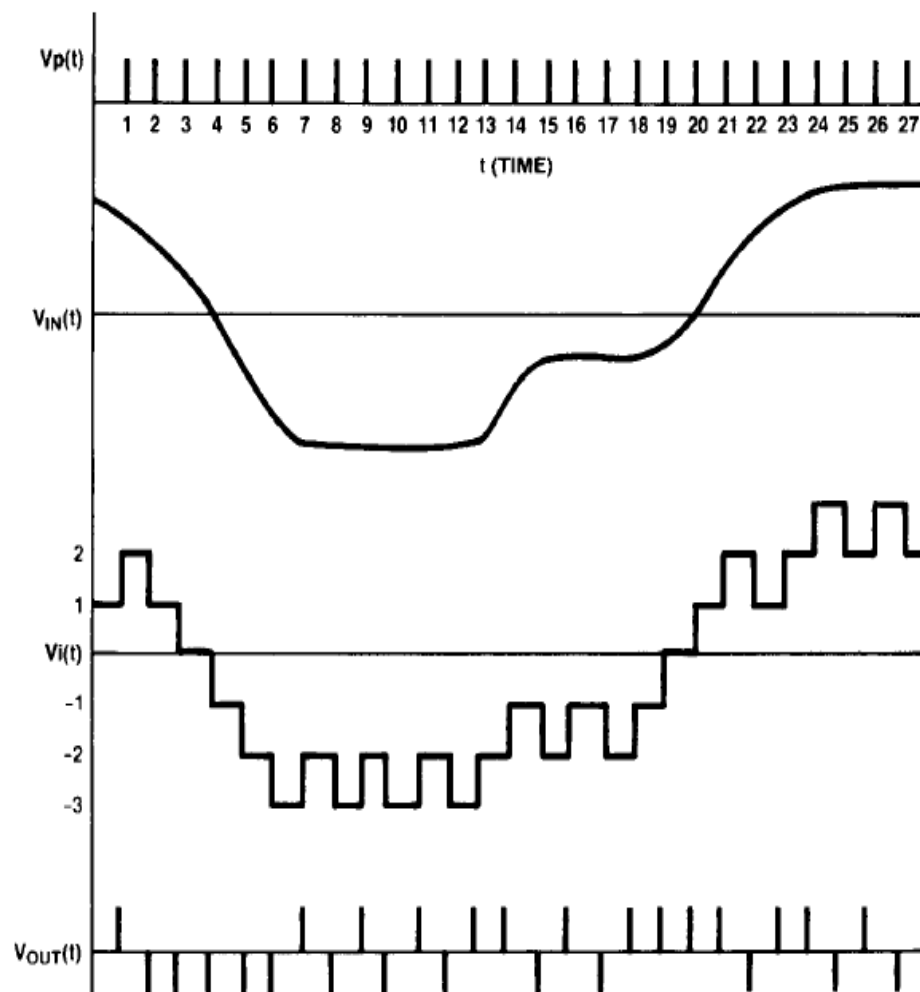
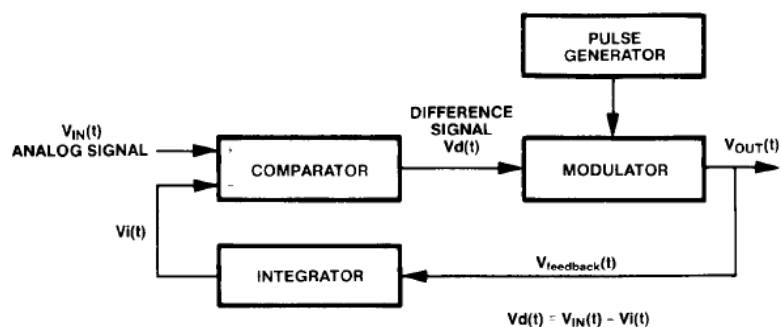
* Realizacija

- Od ulaznog kontinualnog signala se oduzima njegova aproksimacija;
- Tako dobijeni signal greške se diskretizuje, tj. uzima se njegova vrednost u trenucima vremena određenim trenucima pojave kratkih impulsa koji u ovom slučaju predstavljaju nosilac;
- Diskretizovani signal greške se kvantizuje na svega dva nivoa ($+\Delta$ ili $-\Delta$) i tako dobijen digitalizovan signal šalje se na liniju veze;
- Propuštanjem digitalnog signala kroz integrator, dobija se stepenasta kriva koja odgovara aproksimaciji kontinualnog (modulišućeg) signala od koga se pošlo.
- Stepenasta kriva odgovara aproksimaciji signala zakašnjenog za jedan odbirak!



Delta modulacija

- * Postupak ima smisla samo ako je ulazni signal korelisan, tj. ne postoji velika razlika između vrednosti signala u dva susedna diskretna trenutka (odbirka).
- * Ovim postupkom se implicitno koduje (jednim bitom) razlika signala u odnosu na vrednost u prethodnom trenutku.
- * Jednostavna realizacija, manji broj kvantiz. nivoa, manji binarni protok.
- * Izuzetno robustan sistem, često u vojnim primenama umesto PCM.



Delta modulacija – granularni šum

* Izbor veličine parametra Δ je kritičan za funkcionisanje sistema.

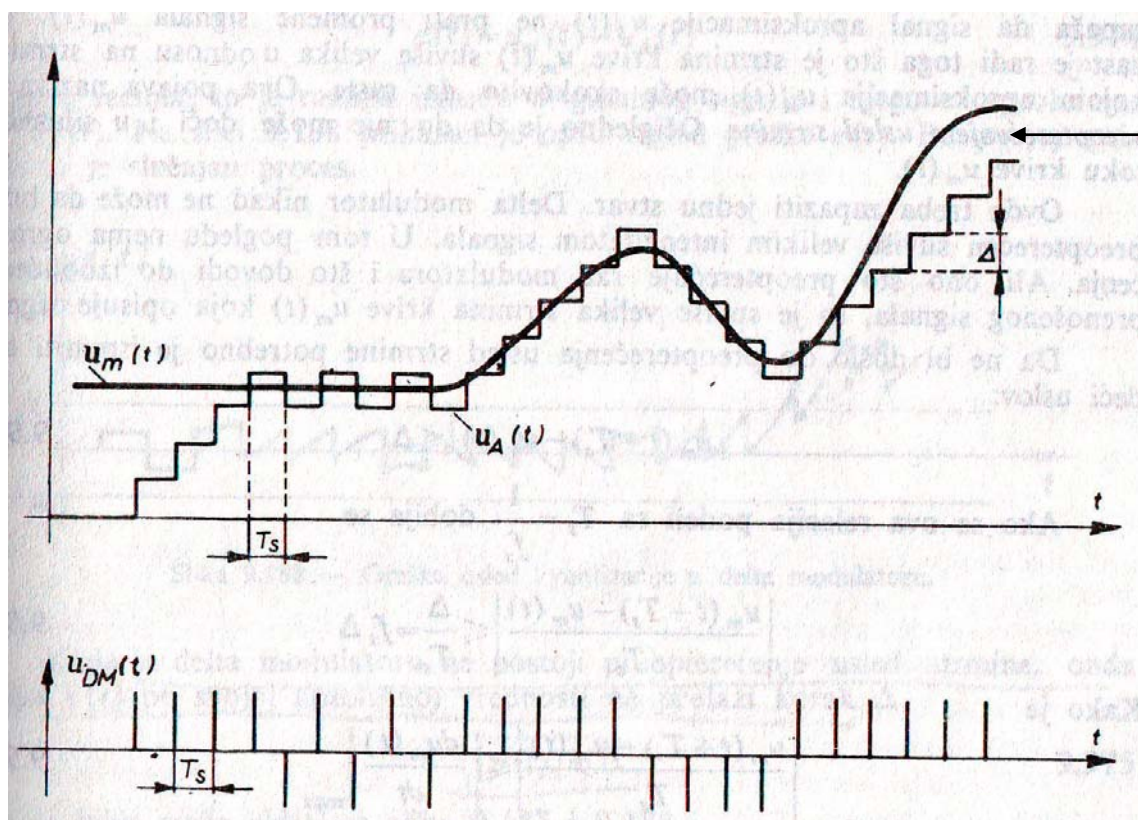
- Ako je Δ suviše veliko, aproksimacija će biti jako gruba.
- Razlika originalnog signala i aproksimacije (na izlazu integratora) naziva se granularni šum.
- Snaga granularnog šuma je utoliko manja što je parametar Δ manji, a pritom je i poželjno da učestanost odabiranja, označena sa f_s , bude što veća.
- Odnos signal/granularni šum:

$$(S / N)_g = 3 \frac{\overline{u_m^2}}{\Delta^2} \frac{f_s}{f_m}$$

- Sa druge strane, ako je parametar Δ suviše mali, aproksimacija ne može dovoljno brzo da prati promene originalnog signala.
- Ovaj efekat se naziva preopterećenje usled strmine.
- Čak i ako parametar Δ ima malu vrednost, ovaj efekat se može izbeći ako je učestanost odabiranja (generisanja impulsa) dovoljno velika.

Delta modulacija - preopterećenje usled strmine

- Ako se signal prebrzo menja izlaz delta modulatora ne može da ga prati – ovo je poznato kao preopterećenje usled strmine.



*Uslov da ne dođe do
preopterećenja usled strmine

$$|u_m(t + T_s) - u_m(t)| \leq \Delta$$

$$\left| \frac{u_m(t + T_s) - u_m(t)}{T_s} \right| \leq \frac{\Delta}{T_s} = f_s \Delta$$

$$\left| \frac{du_m(t)}{dt} \right|_{\max} \leq f_s \Delta$$

Diferencijalna IKM

* **Primenom IKM ne uzima se u obzir vremenska korelisanost signala**

- kako bi se obezbedio dovoljan kvalitet signala, neophodno je obavljati kvantizaciju sa velikim brojem nivoa, čemu odgovara kodovanje sa dovoljno velikim brojem bita.
- čak i na na sporopromenljivom signalu, recimo signalu govora, nepotrebno se prenosi veliki broj odbiraka u sekundi, što rezultuje vrlo velikim bitskim protokom.

* **Primenom Delta modulacije, uzima se u obzir vremenska korelisanost**

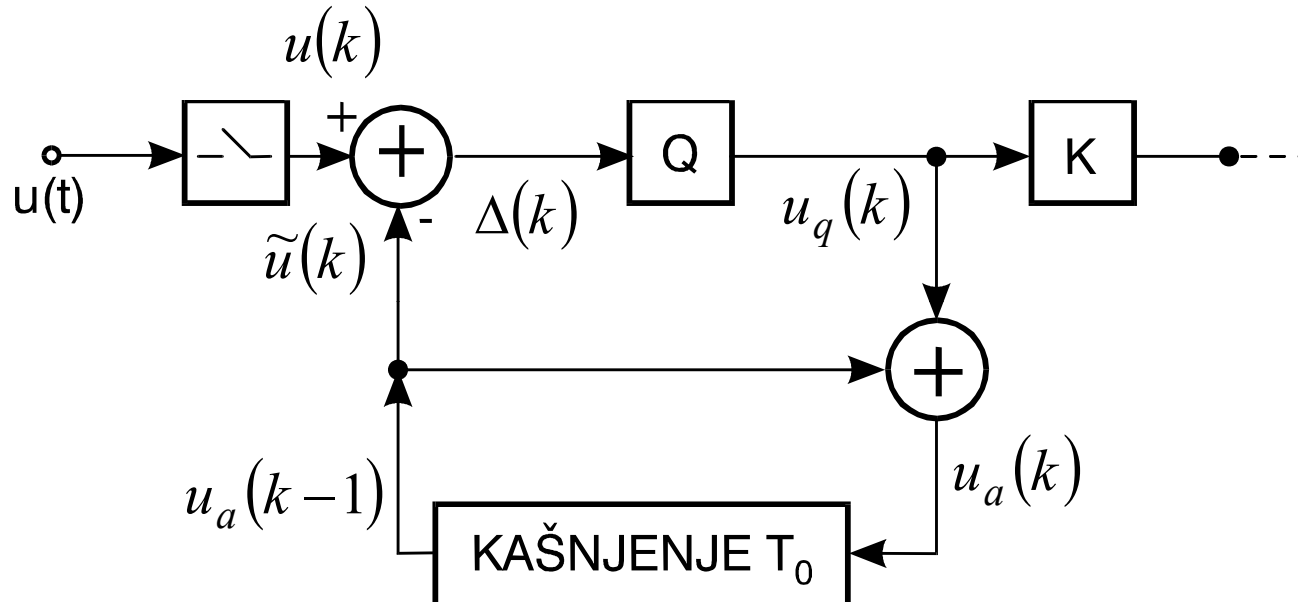
- ako je signal jako korelisan, razlika dva susedna odbirka je mnogo manja od celokupnog naponskog opsega u kome može biti vrenost napona signala;
- obavlja se kodovanje razlike dva susedna odbirka samo jednim bitom, što ne obezbeđuje dovoljan kvalitet reprodukcije originalnog signala;
- kritičan je izbor parametra Δ – ako on ima malu vrednost, tada je granularni šum dovoljno mali, ali se mora povećati f_s da bi se izbeglo preopterećenje usled strmine pa protok opet raste!

* **Diferencijalna IKM predstavlja kompromis**

- Slično Delta modulaciji, ne kvantizuje se odbirak već razlika dva susedna odbirka;
- Kvantizacija se radi na veći broj nivoa nego kod Delta modulacije, ali znatno manji nego kod IKM;
- Učestanost odabiranja se ne mora povećavati u odnosu na IKM, pa ukupan binarni protok pada! Postupak je veoma efikasan ako se signal sporo menja.

Diferencijalna IKM - realizacija

- * Ako se ne prenosi vrednost amplitude za svaki odbirak, već razlika amplitude uzastopnih odbiraka, prenosi se samo informacija o promeni signala.



- * Odabiranje se obavlja učestanošću $f_s = 1/T_s \geq 2f_m$, gde je f_m maksimalna učestanost u spektru signala $u(t)$.
- * Signal na negativnom ulazu sabirača predstavlja nekakvu aproksimaciju ulaznog signala.
- * Signal razlike $\Delta(t)$ ravnomerno se kvantizuje u kvantizeru sa q kvantizacionih nivoa, pri čemu korak kvantizacije iznosi Δu .
- * Kvantizirani odbirci se zatim pretvaraju u koderu u binarni signal.

Diferencijalna IKM - realizacija

- * Trenutne vrednosti signala $u(t)$ nalaze se u opsegu $|u(t)| \leq U/2$. Međutim, razlika signala $u(t)$ iz dva uzastopna trenutka odabiranja zadovoljava uslov $|u(t)-u(t-T_0)| \leq U_1/2$, pri čemu je $U_1 < U$.

- * Mogu se postaviti sledeće jednačine

$$\left. \begin{aligned} u_q(k) &= \Delta(k) - e_q(k) \\ \Delta(k) &= u(k) - \tilde{u}(k) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \tilde{u}(k) = u(k) - \Delta(k) = u(k) - u_q(k) + e_q(k)$$

$$\left. \begin{aligned} u_a(k) &= \tilde{u}(k) + u_q(k) \\ \tilde{u}(k) &= u_a(k-1) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \tilde{u}(k) = \tilde{u}(k-1) + u_q(k-1)$$

- * Jasno je da aproksimacija ulaznog signala u stvari predstavlja prethodni odbirak ulaznog signala, uvećan za grešku kvantizacije a signal razlike (koji se kvantizuje) odgovara razlici dva susedna odbirka:

$$\tilde{u}(k) = u(k-1) - u_q(k-1) + e_q(k-1) + u_q(k-1) = u(k-1) + e_q(k-1)$$

$$\Delta(k) = u(k) - u(k-1) - e_q(k-1)$$

Diferencijalna IKM - posledice

- * Greška usled kvantizacije biće po apsolutnoj vrednosti manja od $\Delta u/2$ za ako za svaki odbirak važi

$$-q \frac{\Delta u}{2} \leq \Delta(k) \leq q \frac{\Delta u}{2}$$

- * U slučaju IKM ovo se svodi na uslov

$$q \geq 1 + U_1 / \Delta u$$

dok je kod IKM važno

$$q' \geq \frac{U}{\Delta u}$$

- * Protok u svakom od dva sistema prenosa tada iznosi

$$V_{DIKM} = f_{sld}(q) = f_{sld}(1 + U_1 / \Delta u)$$

$$V_{IKM} = f_{sld}(q') = f_{sld}(U / \Delta u)$$

- * Jasno je da će znatna ušteda u broju kvantizacionih nivoa (za isti nivo greške kvantizacije, tj. istu vrednost Δu) biti postignuta ako važi $U_1 \ll U$.
 - U slučaju potpuno nekorelisanog signala (npr. ABGŠ) postupak DIKM ne donosi poboljšanje nego se protok čak i povećava u odnosu na IKM!

Diferencijalna IKM - posledice

- * **Ako je maksimalna razlika amplitude susednih odbiraka znatno manja od maksimalne vrednosti amplitude, na ulazu u kvantizator se nalazi signala znatno manjeg opsega napona.**
 - Za kvantizaciju ovog signala, potrebno je znatno manje kvantizacionih intervala (što odgovara manjem protoku), ako se zadrži ista širina intervala a samim tim i isti odnos S/N kvantizacije.
 - Ako se zadrži isti broj kvantizacionih intervala, smanjuje se njihova širina. U tom slučaju se za nepromenjen binarni protok (u odnosu na IKM) smanjuje greška kvantizacije i povećava S/N kvantizacije.
 - Moguće je napraviti i rešenje koje delimično smanjuje binarni protok, a delimično povećava vrednost S/N kvantizacije.
- * **Ako postoji značajna autokorelacija za nekoliko uzastopnih odbiraka signala, na osnovu nekoliko prethodnih vrednosti odbiraka može se proceniti vrednost sledećeg odbirka - predikcija putem ekstrapolacije.**
 - U ovom slučaju ne prenosi se razlika dva uzastopna odbirka, već se prenosi razlika odbirka i njegove prediktovane vrednosti na osnovu prethodnih odbiraka.
 - Na ovaj način može se još više smanjiti opseg amplitude na ulazu kvantizatora i dodatno poboljšanje performansi.

Literatura

- [1] **Dukić M, *Principi telekomunikacija*, Akademska misao, Beograd, 2008.**
- [2] **Ilija Stojanović, *Osnovi telekomunikacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1971.**
- [3] **Dukić M, Marković G, Vujić D, *Principi telekomunikacija – Zbornik rešenih zadataka*, Akademska misao, Beograd, 2009.**
- [4] **Georgije Lukatela, Dušan Drajić, Grozdan Petrović, Rade Petrović, *Digitalne telekomunikacije*, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.**
- [5] **Web strane:**
 - http://rfwireless.rell.com/pdfs/TN_WJdigital.pdf
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-code_modulation
 - <http://www.educyclopedia.be/electronics/rfdigmod.htm>