



# PRINCIPI MODERNIH TELEKOMUNIKACIJA

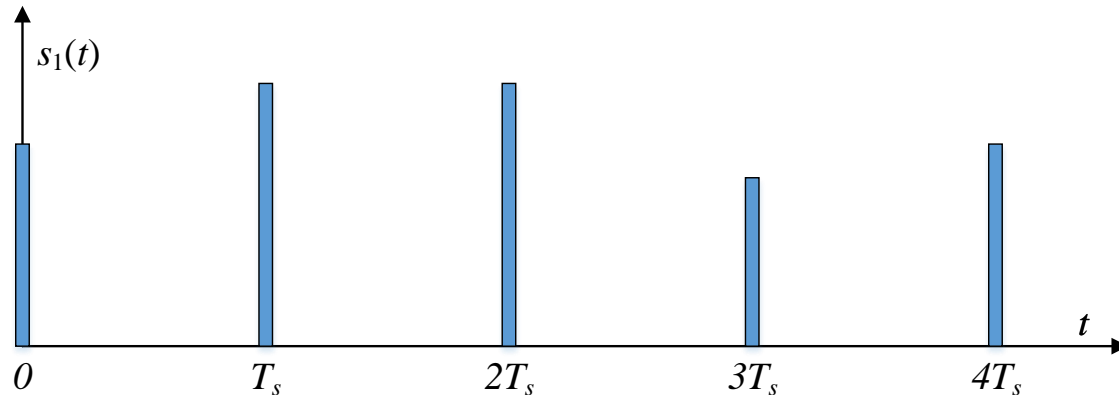
*Elektrotehnički fakultet  
Katedra za telekomunikacije  
Beograd, 2019/2020.*



# Vremenski multipleks

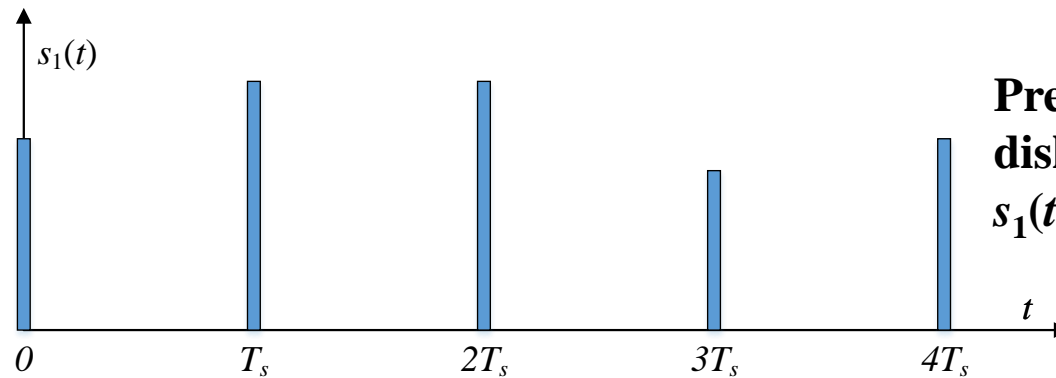
## TDM (*Time Division Multiplexing*)

# Vremenski multipleks (TDM)

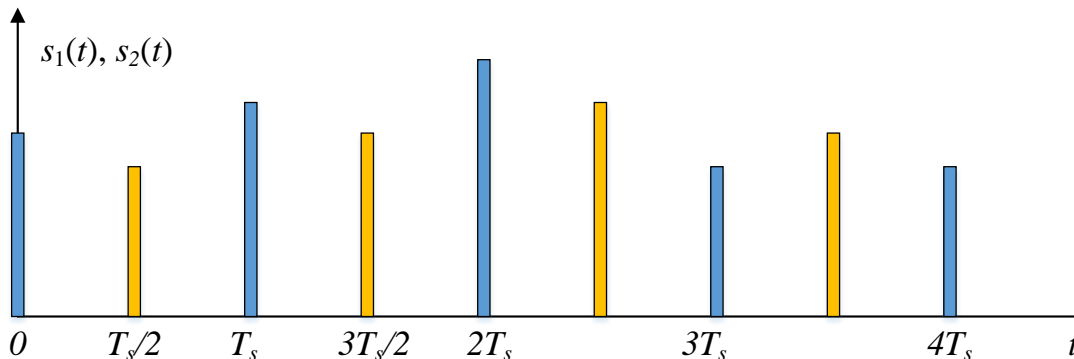


- \* Signal koji je ograničen u spektru može se predstaviti svojim odbircima uzetim u tzv. ekvidistantnim vremenskim trenucima. Uzastopni odbirci uzimaju sa jednakim međuintervalima, sa periodom odabiranja  $T_s$ , čime se vrši diskretizacija signala po vremenu (vrednosti amplitude su proizvoljne!).
- \* Učestanost odabiranja signala čija je maksimalna učestanost u spektru jednaka  $f_m$ , mora da ispunjava uslov  $f_s = 1/T_s \geq 2f_m$  (po teoremi odabiranja).
- \* Odbirci vremenski diskretizovanog signala, pri prenosu se (na liniji veze) pojavljuju sa vremenskim rastojanjem  $T_s$  (jednakim periodi odabiranja). Prenos signala realno zauzima liniju veze samo za vreme trajanja odbirka  $\tau$  (koje je najčešće znatno manje od vremena  $T_s$ ), pa je preostali deo vremena linija veze slobodna i može se iskoristiti za prenos drugih signala.

# Vremenski multipleks (TDM)



Prenos jednog signala diskretizovanog po vremenu,  $s_1(t)$  perioda odabiranja  $T_s$

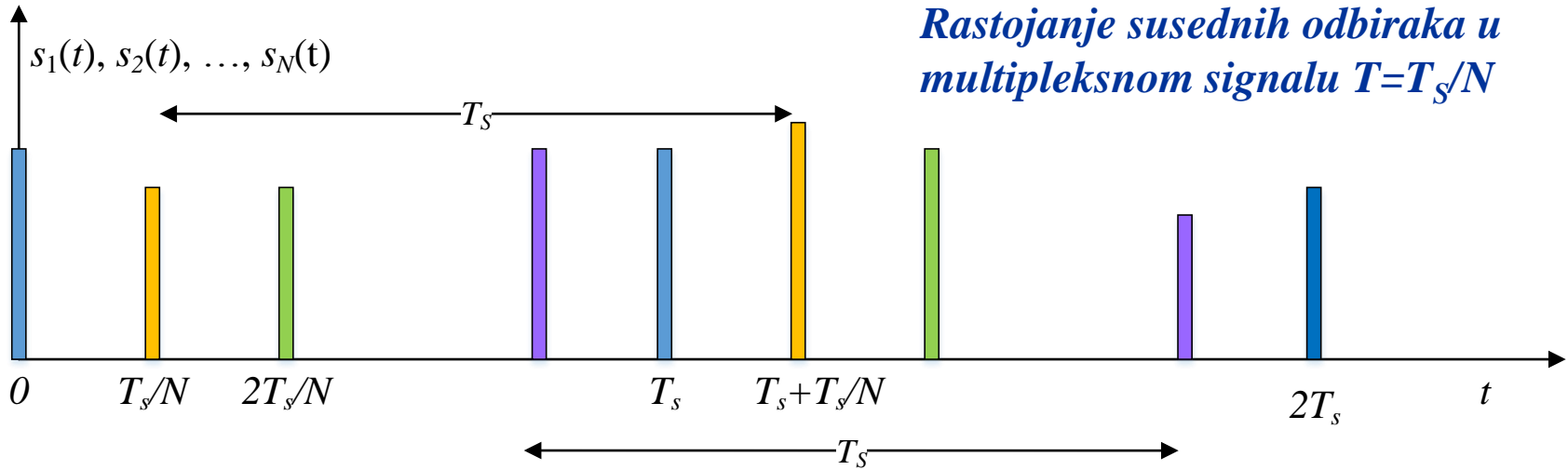


Prenos dva signala diskretizovana po vremenu,  $s_1(t)$  i  $s_2(t)$  u multipleksu

- \* Perioda odabiranja svakog od signala jednaka  $T_s$
- \* *Interval između svaka dva susedna odbirka je  $T_s/2$*

Primenom ovog principa može ostvariti istovremeni prenos  $N$  nezavisnih, vremenski diskretizovanih signala, čije su učestanosti odabiranja međusobno jednake  $\Rightarrow$  multipleks sa vremenskom raspodelom kanala (TDM, Time Division Multiplexing)

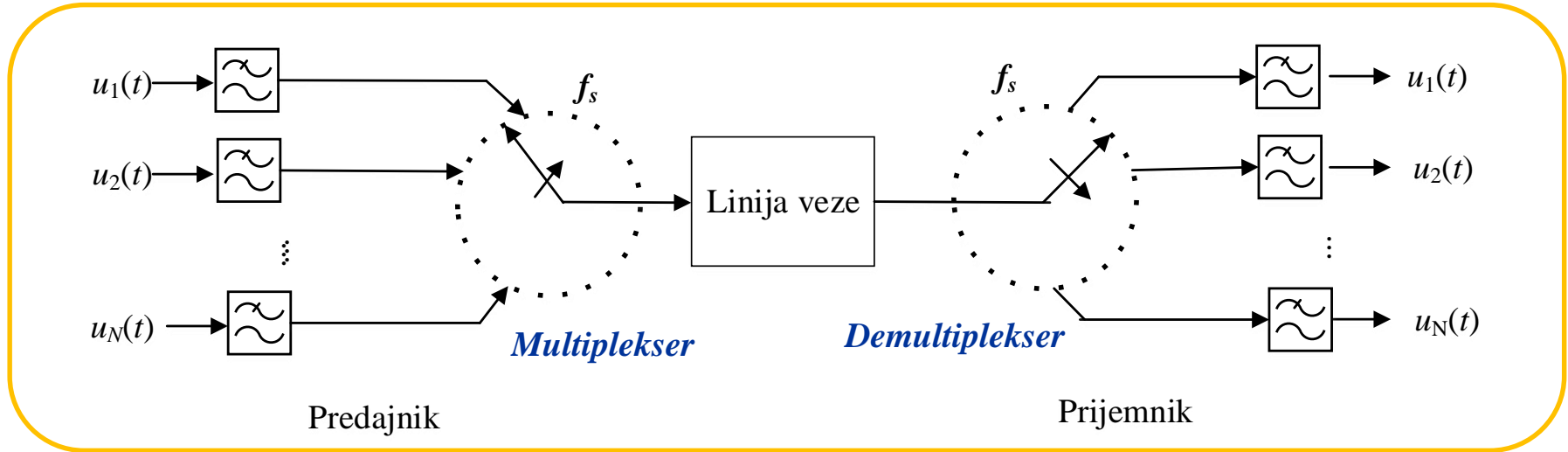
# TDM - Time Division Multiplexing



- \* Posmatra se prenos  $N$  nezavisnih signala u multipleksu sa vremenskom raspodelom, kada su učestanosti odabiranja svakog od signala jednaki  $f_s = 1/T_s$
- \* Na slici je prikazan vremenski oblik signala, koji se dobija multipleksiranjem  $N$  signala u vremenu (učestanost odabiranja svakog od signala je jednaka  $f_s$ )
- \* Na liniju veze šalju se odbirak prvog, drugog, trećeg, ...,  $N$ -tog signala, pa zatim odbirak prvog, drugog, trećeg, ...,  $N$ -tog signala  $\Rightarrow$  linija veze se (u vremenu) naizmenično dodeljuje prvom, drugom, ...,  $N$ -tom signalu
- \* Rastojanje između uzastopnih odbiraka svakog od signala jednako je  $T_s$
- \* Rastojanje između susednih odbiraka u multipleksnom signalu je  $T_s/N \Rightarrow$  učestanost ponavljanja impulsa u multipleksnom signalu je  $f_{mux} = N \times f_s$

# Vremenski multipleks (TDM)

*Blok šema prenosa signala primenom multipleksiranja sa vremenskom raspodelom kanala*



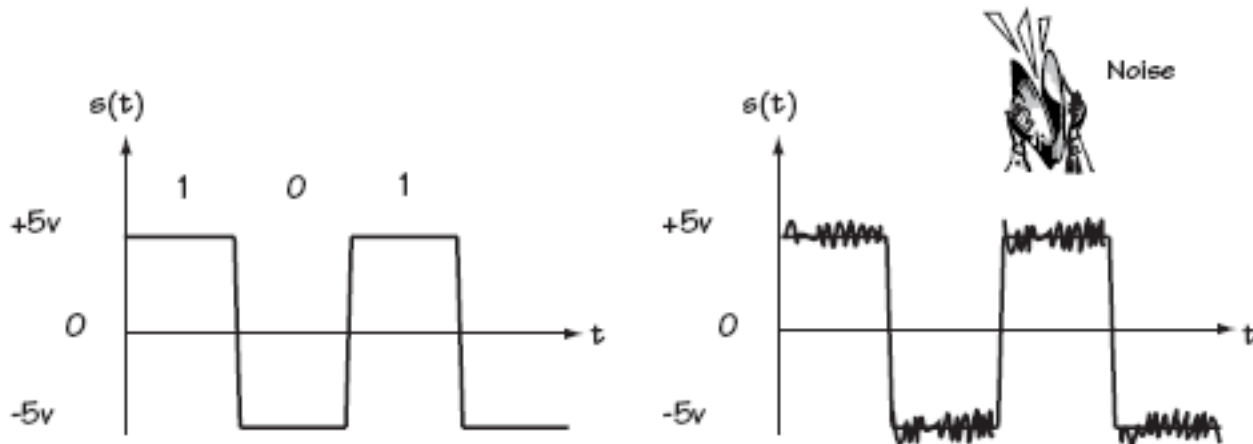
- \* Za efikasan prenos neophodna je **sinhronizacija** predajnog i prijemnog dela.
- \* NF filtri u svakom od kanala (grana) u predajniku ograničavaju maksimalnu učestanost u spektru signala  $f_m$ . Učestanost odabiranja u svakom kanalu mora da ispunjava uslov teoreme odabiranja ( $f_s \geq 2f_m$ ).
- \* Slanje odbiraka na liniju veze obavlja se pomoću tzv. *multipleksera* (koji se može predstaviti rotirajućim prekidačem koji napravi pun krug u periodu odabiranja  $T_s$ ).
- \* Na prijemnom delu, *demultiplekser* razdvaja dolazni multipleksni signal na odbirke koji odgovaraju signalima u svakom od  $N$  kanala.
- \* NF filtri u prijemniku imaju ulogu da rekonstruišu NF signale iz odgovarajućih odbiraka u svakoj od grana.



# A/D konverzija, PCM, DPCM

# Prenos digitalnog signala - prednosti

- **Digitalni signali su znatno otporniji na dejstvo interferencije i šuma**
  - Pri prenosu *analognog signala* potrebno je preneti *tačnu vrednost signala u svakom trenutku*; svaka promena vrednosti signala, usled izobličenja ili šuma manifestuje se kao degradacija korisnog signala.
  - Mera postignutog kvaliteta prenosa analognog signala je **odnos snage signala i šuma**.
  - Pri prenosu *digitalnog signala* u prijemniku nije bitno rekonstruisati tačan oblik signala, već **prepoznati** da li je dobijeni signal odgovara obliku kojim se predstavlja binarni simbol 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 odnos signal/šum), a da se ipak izvrši tačno odlučivanje.
  - Mera postignutog kvaliteta prenosa digitalnog signala je **verovatnoća greške**.



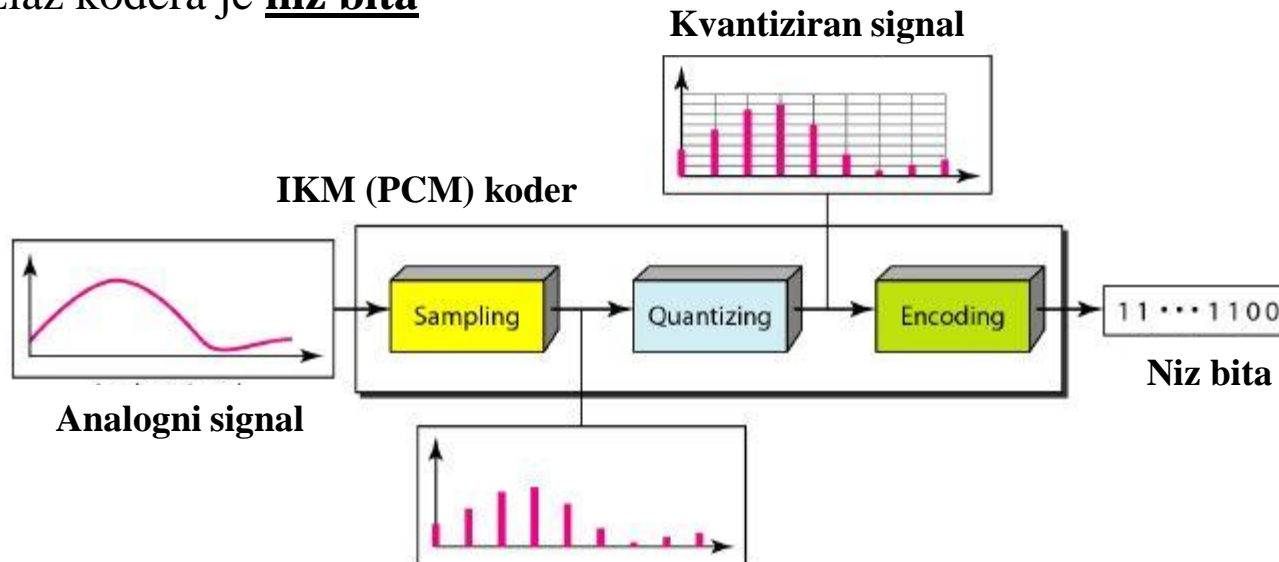
# Prenos digitalnog signala - prednosti

- Jedna od najvećih prednosti prenosa digitalnih signala je mogućnost korišćenja tzv. **regeneratora**. Prikom propagacije signala njegova snaga slabi, pa je maksimalno rastojanje na kojem je moguće preneti signal limitirano predajnom snagom. Pojačanjem ukupnog signala (signal+šum) u bilo kojoj tački, jednako se pojačava snaga korisnog signala i snaga šuma, pa odnos SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) nije promenjen!
- Pri prenosu digitalnog signala, moguće je postaviti regeneratorske stanice na kojima se vrši detekcija signala i ponovno emitovanje. Ukoliko se regeneratori postavljaju na dovoljno bliskim rastojanjima, gde efekat šuma nije suviše veliki, moguće je na svakom od njih izvršiti ispravnu detekciju signala i omogućiti ispravan prenos na većim rastojanjima.
- **Multipleksiranje** signala je znatno jednostavnije u odnosu na analogne signale.
- Prenos digitalnih signala može biti veoma **pouzdan** zbog mogućnosti primene kodova za kontrolu grešaka, čime se može postići prenos sa veoma malim verovatnoćama greške.
- Može se ostvariti visoka **bezbednost** pri prenosu (enkripcija).
- „Skladištenje“ digitalnog signala je jeftinije i efikasnije. Reprodukција digitalnih signala je znatno pouzdanija i (moguća) bez oštećenja.
- Cena prenosa digitalnog signala je **veća zahtevana širina propusnog opsega** u odnosu na prenos analognog signala.

# IKM (PCM)

**IKM – Impulsna kodna modulacija (PCM – Pulse Code Modulation), postupak modulacije koji omogućuje konverziju signala iz analognog u digitalni oblik:**

- **Odabiranje (*sampling*) – diskretizacija u vremenu**, rezultat je signal čije su vrednosti amplituda kontinualne, u nekom opsegu, kao kod ulaznog signala. Signal je pre odabiranja ograničen u spektru (filtriran NF filtrom)!
- **Kvantizacija (*quantizing*)** - umesto tačne vrednosti amplitude, amplituda svakog odbirka koji se prenosi je kvantizirana („zaokružena“) na jednu od konačnog broja amplitudskih nivoa → signal je **diskretizovan i po vremenu i po amplitudi**
- **Kodiranje (*encoding*)** – odgovarajućim nivoima amplituda dodeljuju se **binarne kodne reči** – izlaz koderu je **niz bita**



Signal nakon odabiranja, vrednosti amplituda su kontinualne

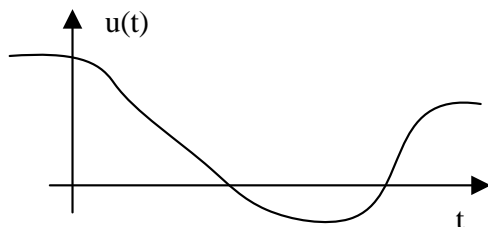
# Filtriranje i odabiranje

## \* Filtriranje

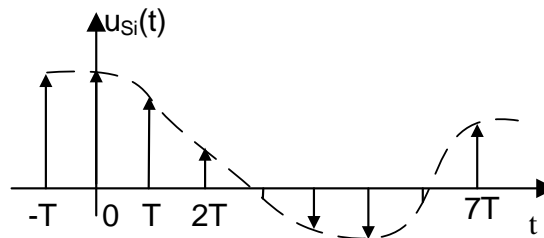
- $u(t)$  – kontinualan analogni signal koji nosi poruku, značajne komponente signala nalaze se do učestanosti  $f_m$ . Signal se pre odabiranja propušta kroz NF filter granične učestanosti  $f_m$  (da bi se izbegla izobličenja).

## \* Odabiranjem signala dobija se signal diskretizovan u vremenu

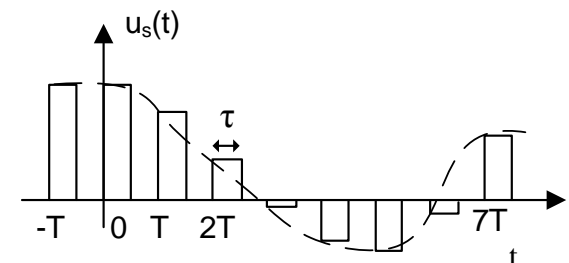
- Kontinualan signal ograničen je u spektru maksimalnom učestanošću  $f_m$ , može se predstaviti odbircima uzetim sa učestanošću odabiranja  $f_s \geq 2f_m$ .
- Odabiranje signala vrši se u trenucima:  $t = nT = n/(2f_m)$ ,  $n = 1, 2, \dots$
- Dobijeni signal je diskretizovan po vremenu, ali ne i po amplitudi – svaki odbirak može imati bilo koji amplitudski nivo (kao analogni ulazni signal)!



Analogni signal



Idealno odabiranje



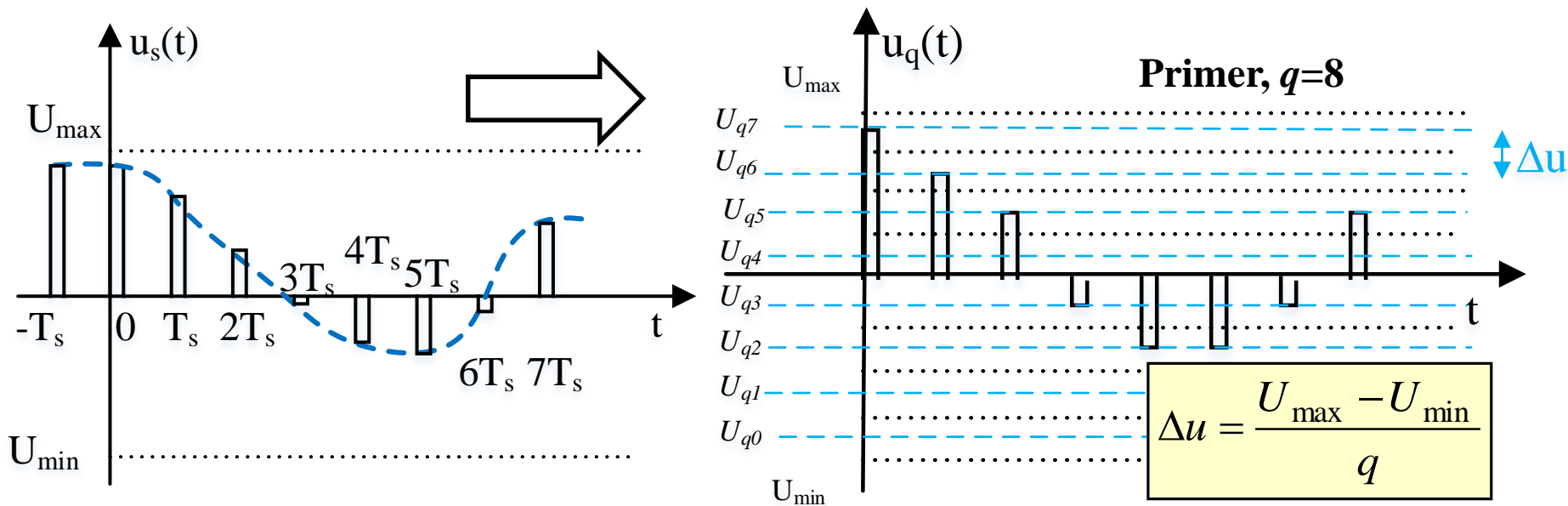
Regularno odabiranje

# Ravnomerna kvantizacija

Kvantizacija je proces konverzije vrednosti amplituda odbiraka koji pripadaju kontinualnom opsegu u skup diskretnih vrednosti amplituda.

Ukupan dinamički opseg amplituda ulaznog signala jednak  $(U_{max}-U_{min})$  deli se na  $q$  **jednakih podintervala širine  $\Delta u$  (ravnomerna kvantizacija)**. Pri tome,  $\Delta u$  se naziva korak kvantizacije (širina kvantizacionog intervala).

**Kvantizer zaokružuje amplitude dolaznih odbiraka na vrednost najbližeg kvantizacionog nivoa  $U_{qi}$  (kojih ima ukupno  $q$ :  $U_{q0}, U_{q1}, \dots$ )**



Signal diskretizovan po vremenu.

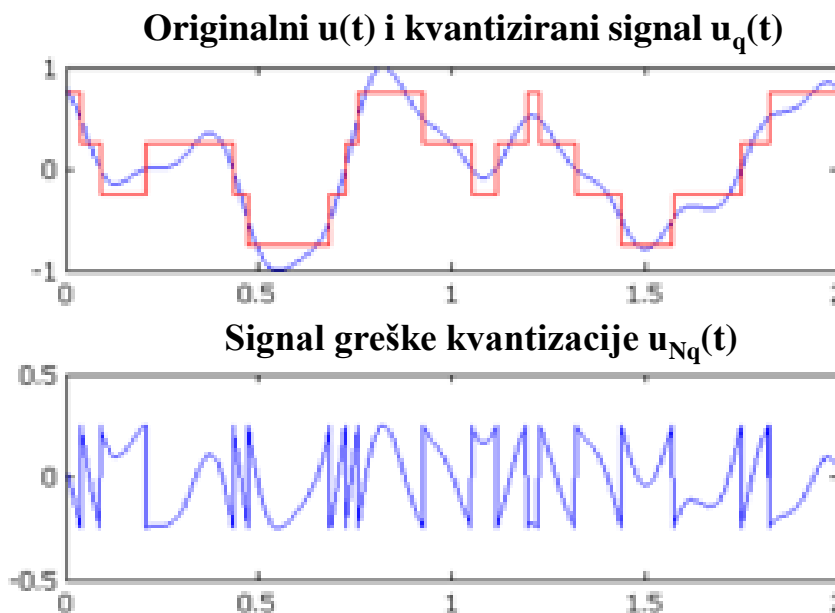
Signal  $u_q(t)$  nakon kvantizacije, diskretizovan po vremenu i amplitudi, na  $q=8$  nivoa

# Ravnomerna kvantizacija

- U procesu kvantizacije vrednosti amplituda se kvantizuju (zaokružuju) na vrednosti najbližeg kvantizacionih nivoa. Time se u dobijene vrednosti amplituda odbiraka unosi greška, jednaka razlici amplituda odbiraka na ulazu i izlazu kvanizatora i naziva se šum kvantizacije

$$u_{Nq}(t) = u(t) - u_q(t)$$

- Uneta greška kvantizacije se ne može otkloniti na strani prijema, jer funkcija kvantizera nije tipa 1→1, odnosno ceo interval kvantizacije sa ulaza kvantizatora se predstavlja jednim kvantizacionim nivoom



$$U_{q,0} = -0.75V$$

$$U_{q,1} = -0.25V$$

$$U_{q,2} = +0.25V$$

$$U_{q,3} = +0.75V$$

$$|u_{Nq}(t)| \leq \Delta/2 = 0.25V$$

# Ravnomerna kvantizacija – primer sa $q=4$ nivoa

Primer sa  $q=4$  nivoa gde je  $U_{\min}=-1\text{V}$ ,  $U_{\max}=1\text{V}$ :

- Celokupan interval vrednosti amplituda  $[-1, 1]\text{V}$  deli se na  $q=4$  podintervala širine  $\Delta u = (1-(-1))/4=0.5\text{V}$  ( $\Delta u$  - korak kvantizacije).

- Granice intervala kvantizacije su:

$$\{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$$

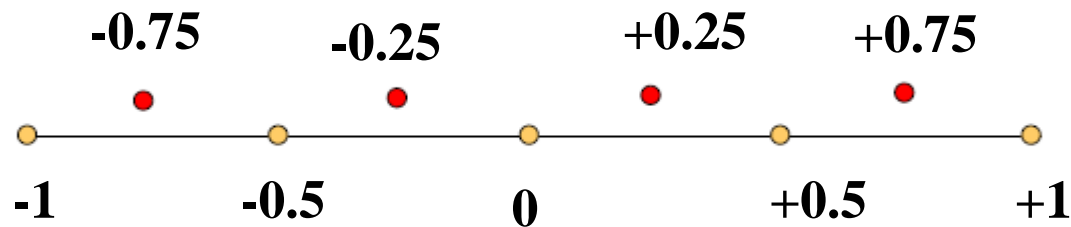
- Kvantizacioni nivoi (moguće vrednosti amplituda odbiraka) su

$$U_{q,0} = -1 + 0.5/2 = -0.75\text{V}$$

$$U_{q,1} = -1 + 0.5/2 + 1 * 0.5 = -0.25\text{V}$$

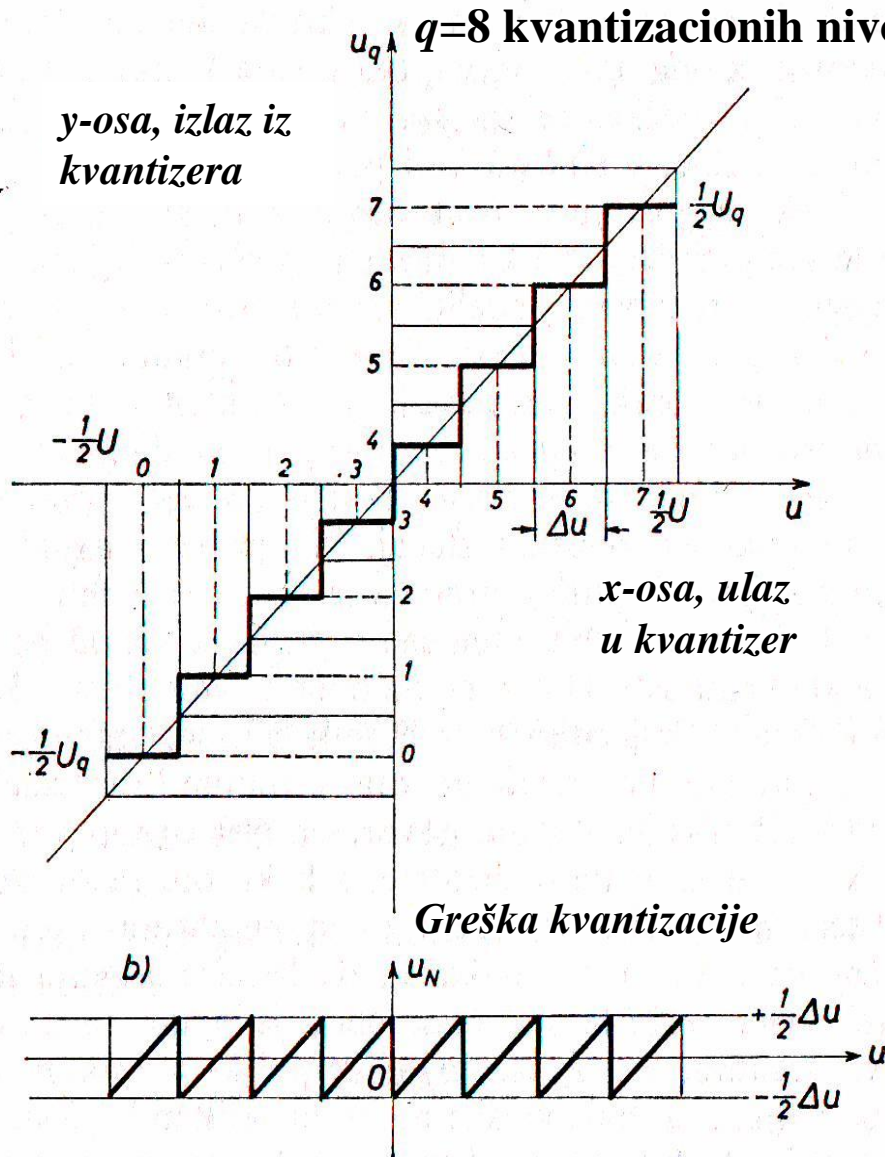
$$U_{q,2} = -1 + 0.5/2 + 2 * 0.5 = +0.25\text{V}$$

$$U_{q,3} = -1 + 0.5/2 + 3 * 0.5 = +0.75\text{V}$$



- Širina svakog intervala kvantizacije je  $\Delta u=0.5$  – *ravnomerna kvantizacija!*
- **Maksimalna vrednost greške kvantizacije  $\Delta u/2=0.25\text{V}$**  (videti prethodni slajd).

# Karakteristika kvantizacije, primer $q=8$



- Na x-osu nanosi se trenutna vrednost amplitude 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  $u_q$  – jedna od  $q$  mogućih (diskretnih) vrednosti
- Vrednost analognog signala nalazi se u opsegu između dve granične vrednosti (označene sa  $u_i$ ) – počev od  $U_{\min}$  do  $U_{\max}$ , sa korakom  $\Delta u$ .
- Za amplitudu odbirka u  $i$ -tom intervalu  $u_i \leq u \leq u_{i+1}$ , amplitude odbiraka nakon kvantizacije su  $U_{qi}$ 

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

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

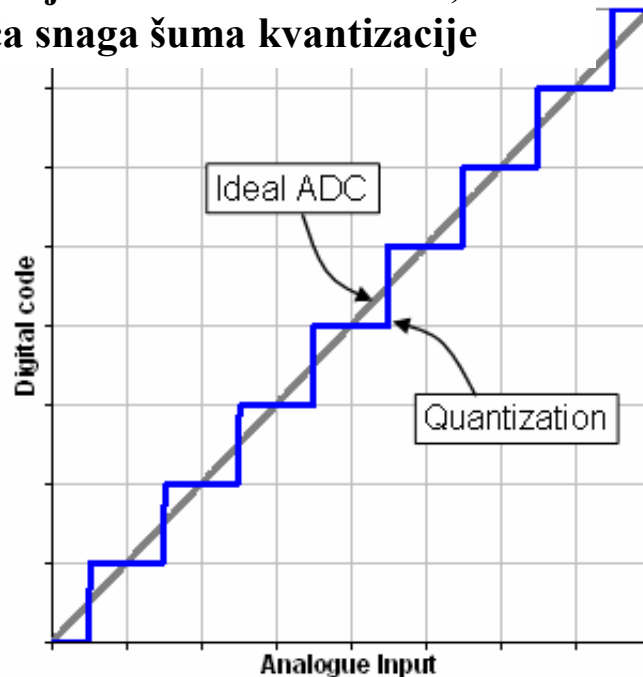
$$U_{q,\max} = U_{q,\min} + (q-1)\Delta u$$
- Greška kvantizacije u  $i$ -tom intervalu je
$$u_{N_i} = u - U_{qi}$$

# Srednja kvadratna vrednost greške kvantizacije

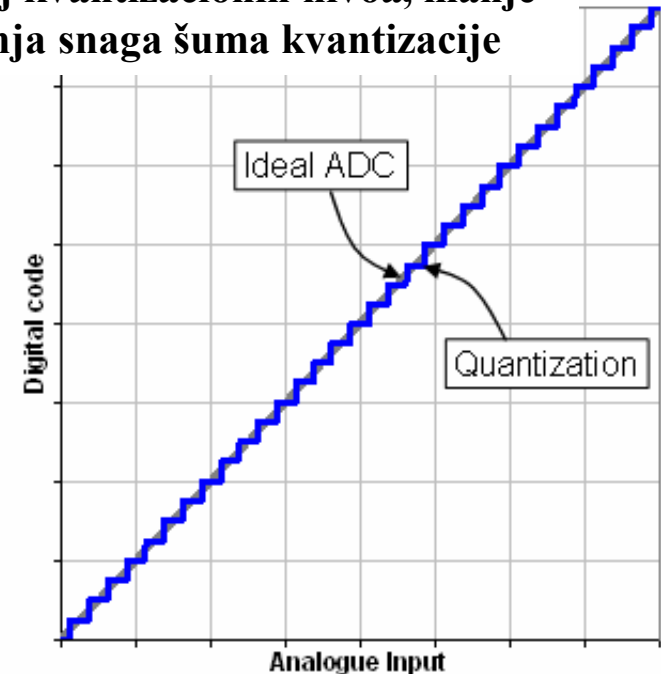
- Srednja snaga šuma kvantizacije (srednja kvadratna vrednost greške kvantizacije) zavisi od širine kvantizacionog intervala  $\Delta u$
- Povećanjem broja kvantizacionih nivoa, greška se može učiniti proizvoljno malom. Može se pokazati da je snaga šuma kvantizacije jednaka

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

Manji broj kvantizacionih nivoa, veće  $\Delta u$  i veća snaga šuma kvantizacije



Veći broj kvantizacionih nivoa, manje  $\Delta u$  i manja snaga šuma kvantizacije



# Odnos snage signala i šuma kvantizacije

- \* Srednja snaga signala uniformno raspodeljenog u opsegu  $-U/2$  do  $U/2$

$$P_S = \frac{U^2}{12} = \frac{(q\Delta u)^2}{12}$$

- \* Srednja snaga kvantizovanog signala

$$P_q = \sum_{i=0}^{q-1} \frac{1}{q} \times U_{q_i}^2 = \frac{(q^2 - 1)(\Delta u)^2}{12}$$

- \* Odnos srednje snage signala  $P_S$ , odnosno snage kvantizovanog signala  $P_q$  i srednje kvadratne vrednosti greške usled kvantizacije

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

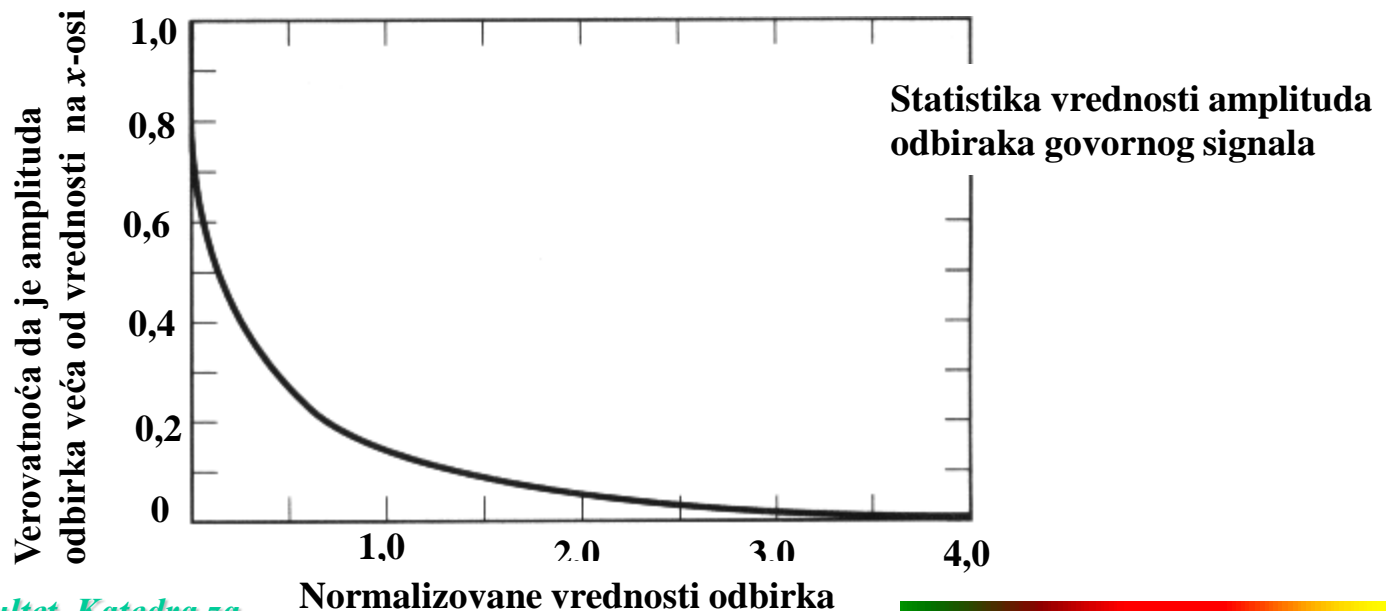
$$\frac{P_q}{P_{N_q}} = q^2 - 1$$

- \* Za veliki broj kvantizacionih nivoa

$$\frac{P_S}{P_{N_q}} \approx \frac{P_q}{P_{N_q}} \approx q^2$$

# Neravnomerna kvantizacija

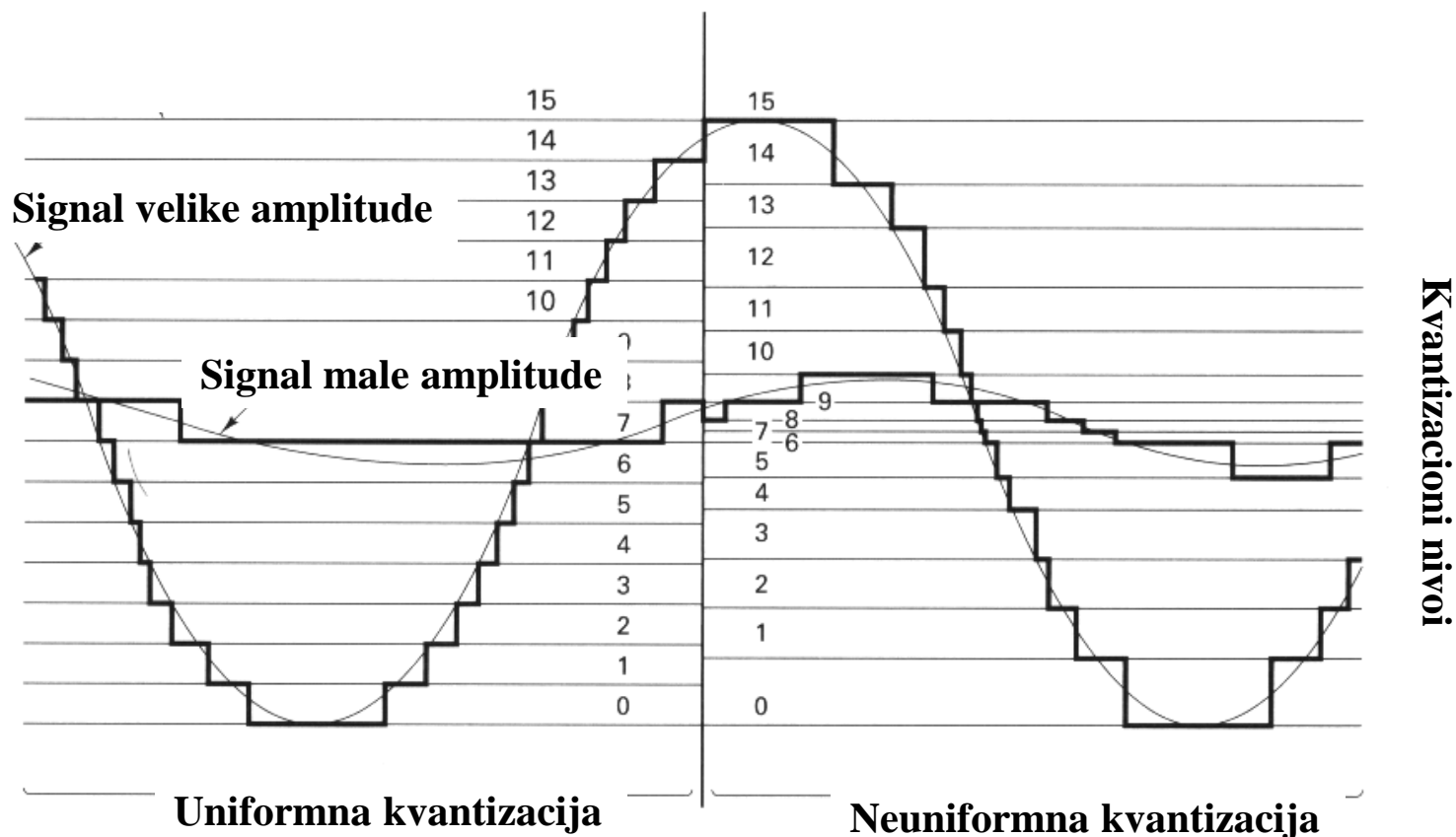
- \* Na ulazu kvantizera je signal koji je diskretan po vremenu, ali teorijski može imati sve moguće amplitudске nivoe. U praksi je ovaj signal slučajan, pa ga opisujemo alatima verovatnoće i statistike, tj. preko funkcije gustine verovatnoće (PDF).
- \* *Ravnomerna kvantizacija je optimalna* samo u slučaju kada je funkcija gustine raspodele (PDF) odbiraka signala na ulazu kvantizera uniformna, tj. **kada su sve amplitude signala na ulazu kvantizera jednako verovatne, pa se svi kvantizacioni nivoi jednako koriste.**
- \* **Tipični signali koji se prenose (govor, audio signal, video signal,...) nemaju uniformnu raspodelu amplituda, pa za njih ravnomerna kvantizacija nije optimalna.**



# Neravnomerna kvantizacija

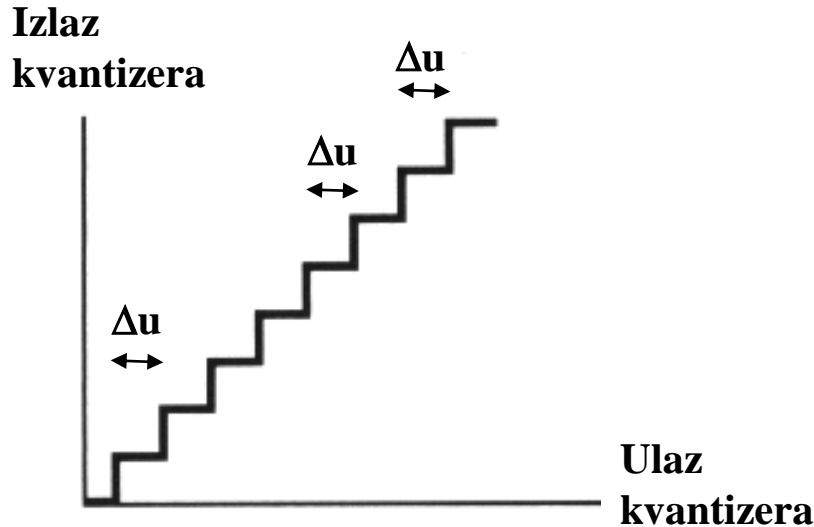
Kod uniformne kvantizacije srednja snaga šuma kvantizacije je jednaka za signale svih amplituda. Međutim, odnos snage signala i šuma kvantizacije je znatno manji za signale malih amplituda, u odnosu na signale velikih amplituda!

Osim toga, za signal koji dominantno ima male vrednosti amplituda, kvantizacioni nivoi većih vrednosti se retko koriste! → ravnomerna kvantizacija nije optimalna

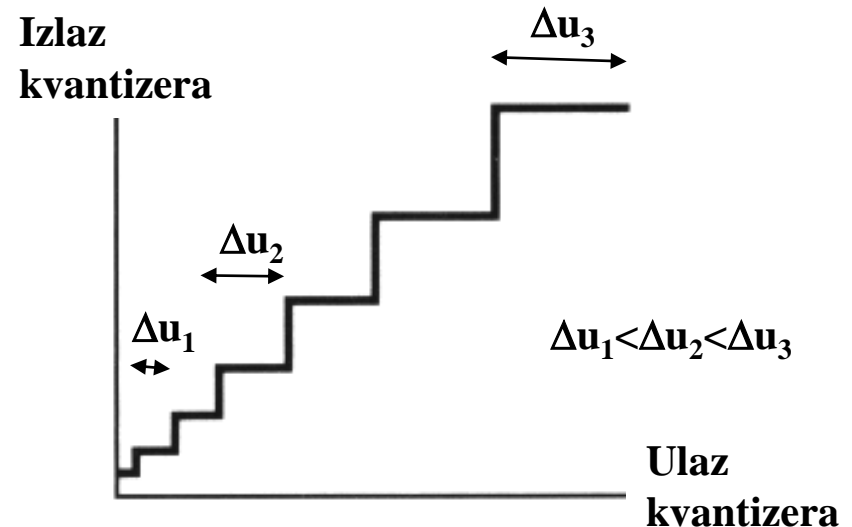


# Neravnomerna kvantizacija

- U slučaju signala govora češće se javljaju odbirci signala manjih amplituda, a ređe odbirci velikih amplituda, pa se i kvantizacioni nivoi velikih amplituda ređe koriste.
- Neuniformna kvantizacija u ovom slučaju može da omogući male vrednosti intervala kvantizacije za male vrednosti amplituda signala na ulazu kvantizera, i veća vrednost intervala kvantizacije za veće amplitude signala.
- Smanjivanjem kvantizacionog šuma za manje vrednosti amplituda (koje su češće), i povećanjem kvantizacionog šuma za veće vrednosti amplituda (koje su ređe) može se dobiti povećanje ukupnog srednjeg odnosa snage signala i šuma.



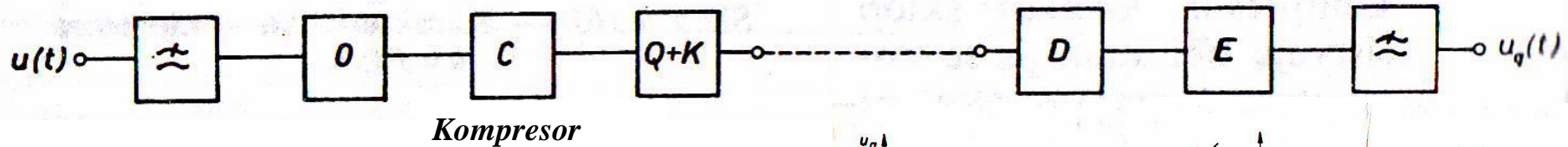
Ravnomerna kvantizacija



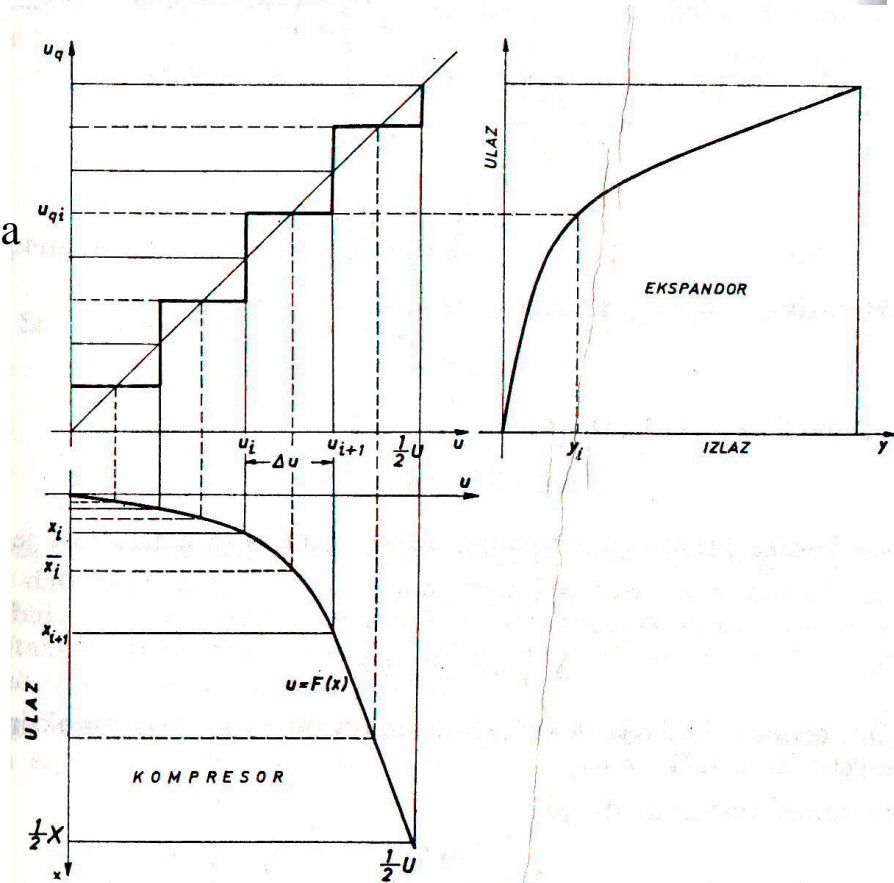
Neravnomerna kvantizacija

# Kompresor i ekspandor

Neuniformni kvantizatori se najčešće praktično realizuju kaskadnom vezom nelinearnog pojačavača koji se naziva kompresor i uniformnog kvantizatora



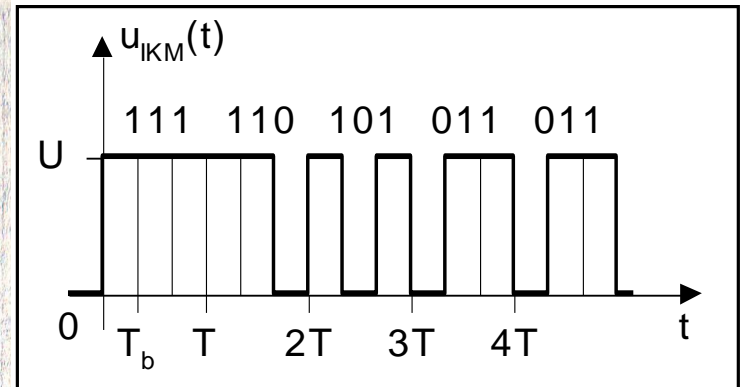
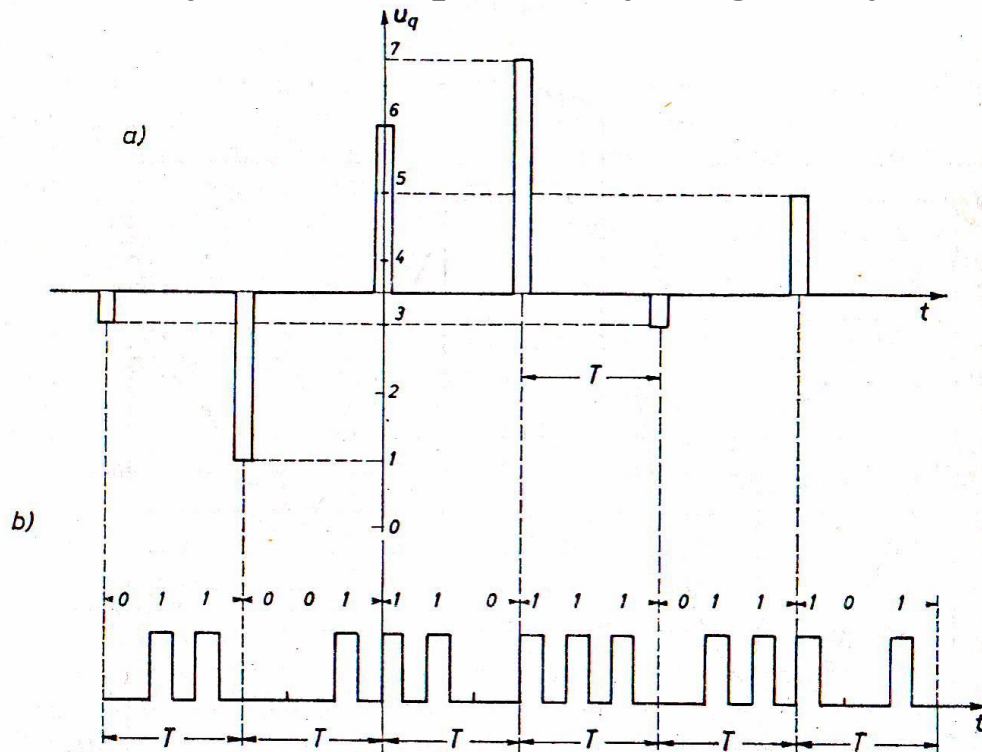
- Kompresor znatno više povećava signale malih amplituda u odnosu na signale velikih amplituda
- Primenom kompresora menja se raspodela amplituda odbiraka. Cilj je da ona na izlazu kompresora bude (u idealnom slučaju) uniformna, pa se iza njega može postaviti ravnomerni kvantizer (koji je u tom slučaju optimalan!).
- Na prijemu, ekspandor vrši funkciju inverznu kompresoru, pa ne bi došlo do izobličenja.
- Za digitalizaciju govornog signala koristi se logaritamska karakteristika kompresije.



# Kodiranje (kodovanje)

Svaki kvantizovani odbirak predstavlja se PCM kodnom reči, tj. 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 predstavljen je sa  $n=3$  bita (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111)
- Ovaj niz bita se predstavlja odgovarajućim digitalnim signalom



Vremenski oblik PCM signala, kada je primenjen prost binarni kod

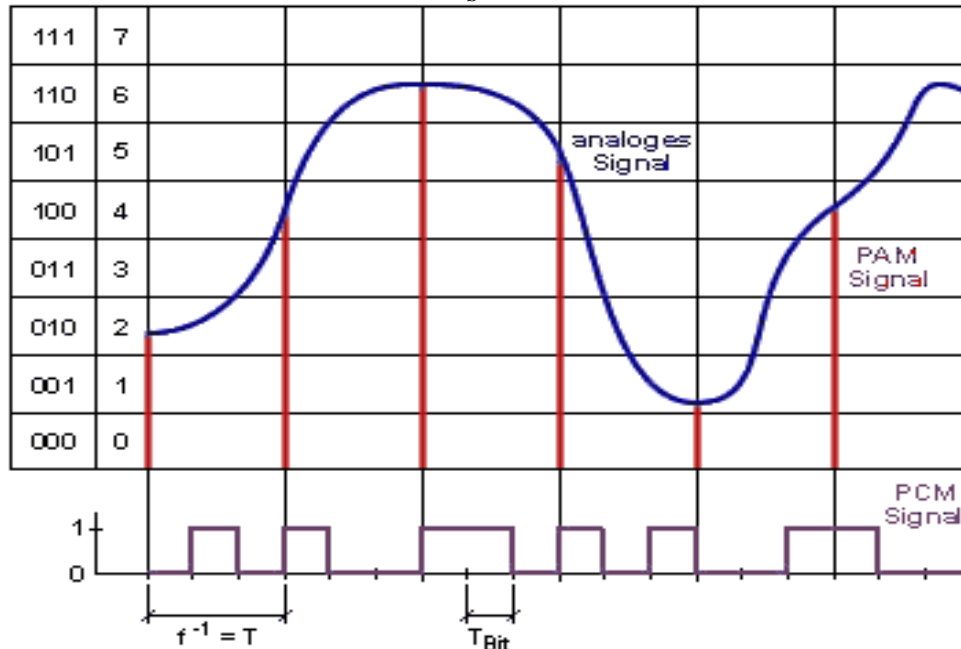
# Kompletan postupak IKM modulacije, primer

## \* IKM (PCM):

- Odabiranje impulsa periode  $T=1/f_s$  (izabrano  $T$  zadovoljava uslov teoreme odabiranja).
- Kvantizacija odbiraka sa  $q=8$  nivoa.
- Kodiranje svakog odbirka sa po  $n=\log_2 q=\log_2 8=3$  bita ( **vreme za predstavljanje svakog bita PCM kodne reči jednako je  $T_b=T/n$** ).

## \* IKM postupkom od analognog signala formira se binarni digitalni signal!

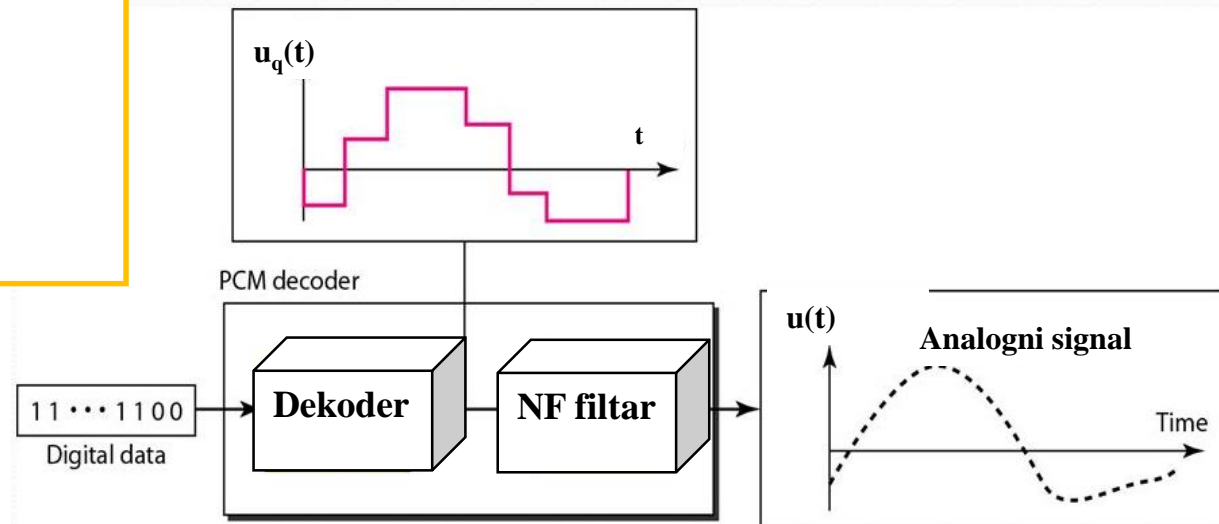
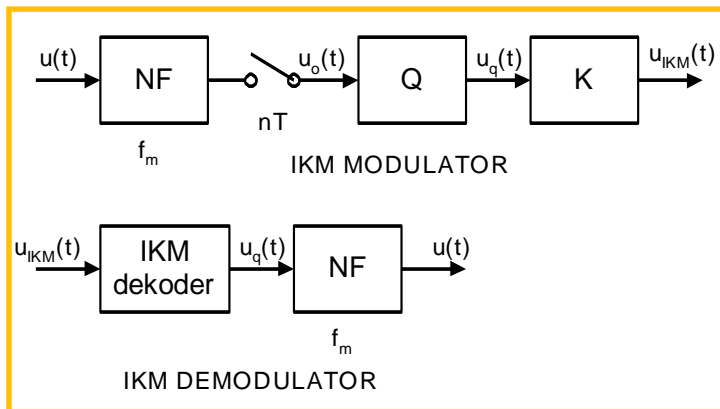
- Binarni protok ovog signala jednak je  $V_b=1/T_b=n/T=\log_2(q)\times f_s$ .
- Npr. za učestanost odabiranja signala  $f_s=20\text{kHz}$  i  $n=3$ , binarni protok je  $V_b=60\text{kb/s}$



# Rekonstrukcija kontinualnog signala

Signal  $u_q(t)$  na prijemu dobija se dekodiranjem. Na osnovu jedne od  $q$  kodnih reči generiše se odbirak koji ima odgovarajuću amplitudu (jednu od  $q$  mogućih vrednosti). Signal se rekonstruiše propuštanjem 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  $q$  veći.



Postupak demodulacije PCM signala

# IKM (PCM) signal - osobine

- PCM postupkom se unosi greška kvantizacije. **Greška kvantizacije se može proizvoljno smanjiti povećanjem broja kvantizacionih nivoa  $q$ !** S druge strane, povećanjem  $q$  povećava se i binarni protok signala! Kao što će biti pokazano, time se povećava i širina opsega učestanosti potrebna za prenos signala.
- **Odabir broja nivoa kvantizacije  $q$  predstavlja kompromis kvaliteta kvantizacije (odnos  $S/N_q$ ) i binarnog protoka PCM signala.**
- Za prenos signala u digitalnom obliku (PCM modulisanog signala) obično je potreban znatno veći opseg učestanosti u odnosu na opseg koji bi bio potreban za prenos tog istog signala analogno modulisanog.
- Pokazuje se da je minimalna širina propusnog opsega potrebna za prenos digitalizovanog signala koji ima binarni protok  $V_b$  jednaka  $B=V_b/2$  (biće detaljno analizirano na narednim predavanjima).
- **Povećani opseg učestanosti, potreban za prenos digitalnog signala, je cena koja se mora platiti za ostvareni dodatni kvalitet signala koji se prenosi.**
- Osim kvantizacionog šuma, na kvalitet prijemnog signala utiču i **greške pri prenosu PCM signala** (zavise od postupka prenosa signala). Pri tome, greške pri prenosu različitih bita ne utiču jednako na degradaciju rekonstruisanog signala. Ove greške zavise od načina kodiranja. Za prost binarni kod, najveću degradaciju unosi greška na bitu najveće težine (MSB, *Most Significant Bit*), a najmanju štetu prave greške pri prenosu bita najmanje težine (LSB, *Least Significant Bit*).

# 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  $T_s=1/8000=125$   $\mu$ s).
- Kvantizacija se obavlja na  $q=256$  nivoa.
- Kodovanje svakog odbirka sa po  $n=\log_2(256)=8$  bita.
- Odgovarajući binarni protok iznosi  $V_b=nf_s=8\times 8000=64$  kb/s (trajanje impulsa binarnog signala iznosi  $T_b=T/n=15.625$   $\mu$ s).

## \* Potreban propusni opseg potreban za prenos telefonskog signala:

- U originalnom obliku (analogni signal)

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

- Analogno modulisanog signala

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

- Digitalizovanog signala:

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

# Zapis audio signala

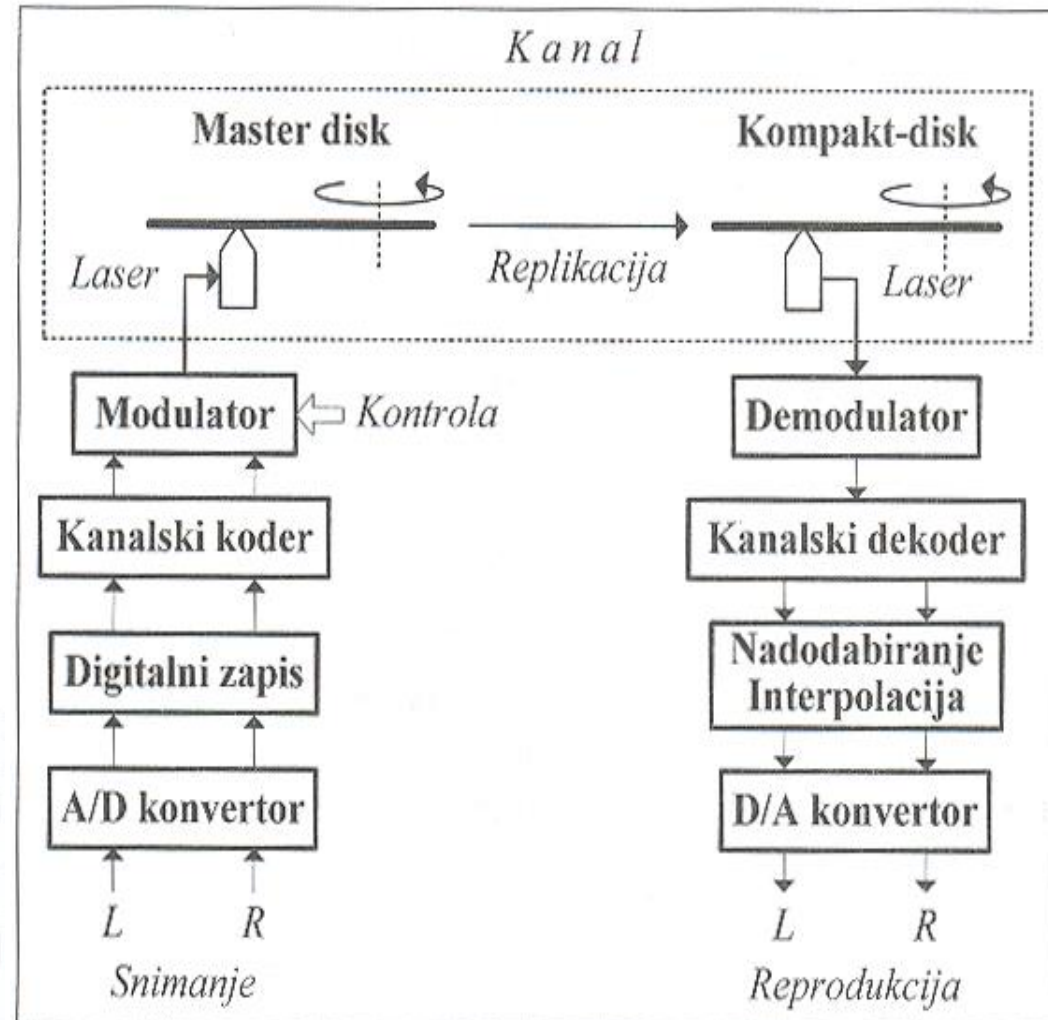
## \* CD format zapisa

- Odabiranje sa 44.1kHz (kompatibilnost sa PAL standardom TV signala).
- Kvantizacija 16 bita po odbirku → 65536 kvantizacionih nivoa, odnos signal-šum kvantizacije od 96dB.

## \* DVD format

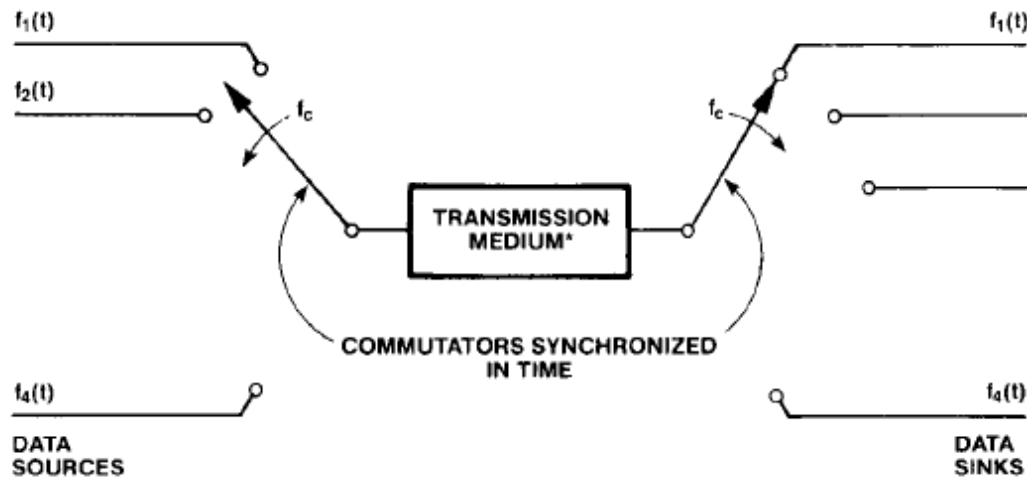
- Odabiranje sa 96kHz.
- Kvantizacija sa 24 bita po odbirku → teorijski odnos signal/šum kvantizacije do 144dB.

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 %
Trajnost	Više godina. Tokom vremena gubi se na kvalitetu reprodukcije visokofrekvencijskih komponenti.	Trajan
Radni vek	500-600 sati	>5000 sati

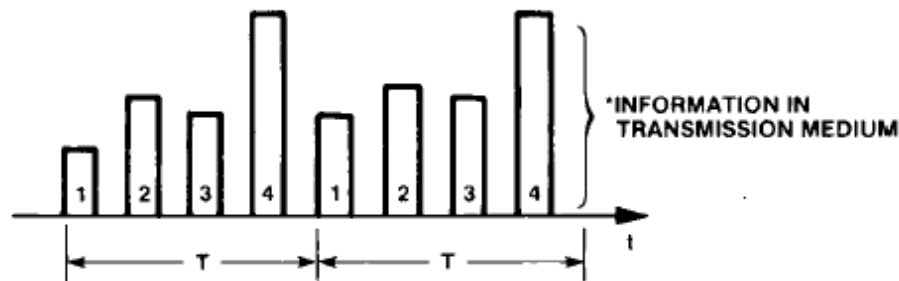


# TDM

Podsećanje - multipleksiranje signala diskretizovanih u vremenu, multipleks odbiraka (TDM)

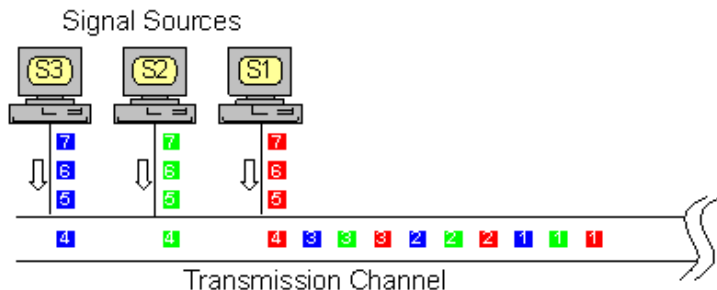


Primer, multipleks odbiraka 4 signala, svaki od signala u multipleksu odabran sa periodom  $T$ . Ovde se multipleksiraju odbirci (vrednosti amplituda su proizvoljne, signal je analogan, ali diskretizovan u vremenu, pa je omogućeno multipleksiranje)

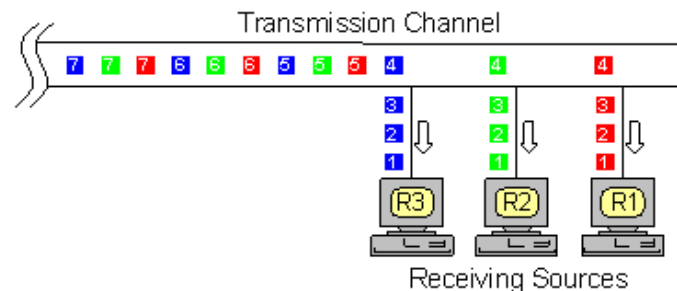


# TDM digitalnih signala

- Prethodno je analizirano vremensko multipleksiranje odbiraka signala (vremenski diskretizovani signali). Ovakav multipleksni signal, može se dalje kvantizirati i kodovati u cilju dobijanja digitalnog multipleksnog signala.
- Danas je dominantno digitalno multipleksiranje. **Prvo se vrši konverzija analognih signala u digitalni oblik, nakon čega se primenjuje digitalni multiplekser. Ovo multipleksiranje se može vršiti na nivou bita ili na nivou IKM (PCM) kodne reči.**
- **Binarni protok  $N$  multipleksnih digitalnih signala čiji su individualni protoci jednaki  $V_b$ , iznosi**



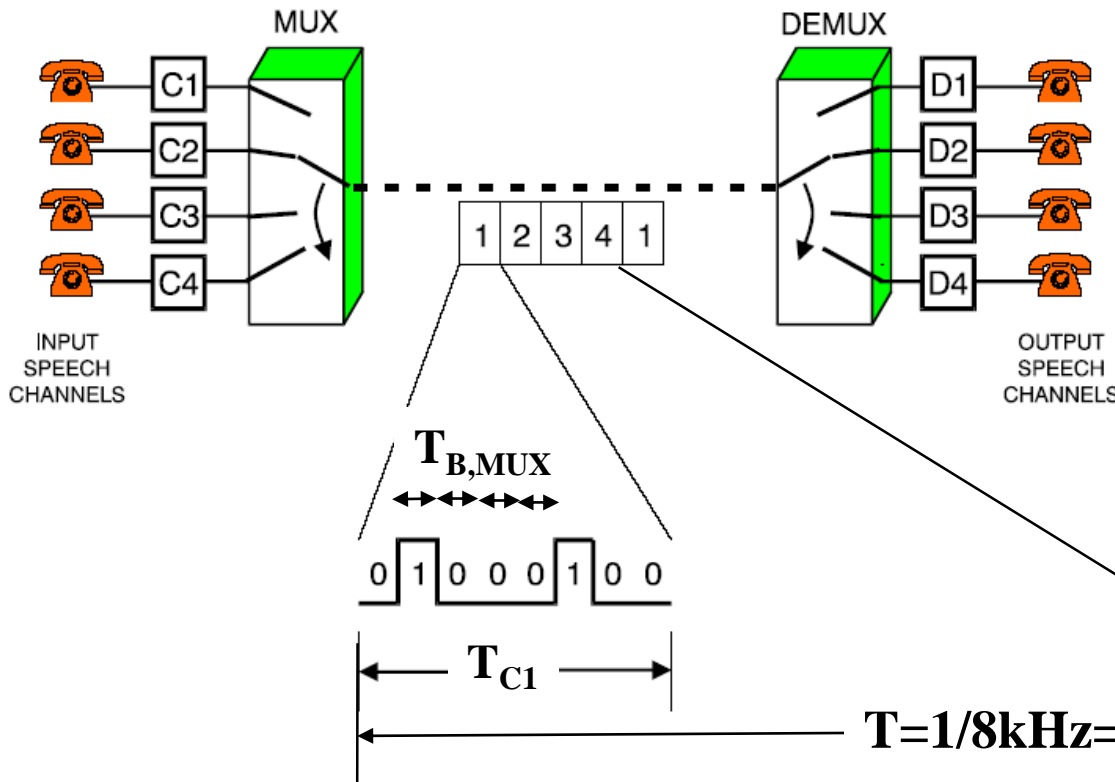
$$V_{MUX} = N \times V_b$$



# TDM digitalnih signala

## 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.
- Binarni protok multipleksnog signala je  $V_{B,MUX} = 4kanala \times 8bita \times 8kb/s = 256kb/s$



## Trajanje bita multipleksnog signala

$$T_{B,MUX} = 1/V_{B,MUX} = T / (4kanala \times 8bita)$$

$$T = 4 \times T_{C1} = 4 \times 8 \times T_{B,MUX}$$

Učestanost odabiranja telefonskog govornog signala  
 $T = 125\mu s$  ( $f_s = 1/T = 8kHz$ )



# Multipleksiranje po vremenu (TDM) – E1

## \* Primarni multipleks - multipleks 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:

$$V_B = nf_s = 8 \times 8\text{kHz} = 64 \text{ kb/s}, \quad T_B = 1/V_B = 15.625 \mu\text{s}$$

- **Zajedničkom linijom veze želimo da prenesemo  $N=32$  nezavisna signala nastala digitalizacijom govornog signala primenom IKM → formiramo vremenski multipleks 32 digitalna signala**

- Period odabiranja svakog od signala u MUX deli se na  $N$  delova, trajanja  $T/N$ . Govornim signalima dodeljuje se redni broj, označen sa  $j$ , koji može da uzme vrednosti od 1 do  $N$ .
- $n$  bita koji odgovaraju trenutnom odbirku tog signala prenose se u  $j$ -tom periodu trajanja  $T/N$ .
- Na taj način, u toku trajanja jednog perioda odabiranja šalju se svi biti 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.
- **U toku jednog perioda odabiranja  $T$ , neophodno je preneti  $n \times N$  bita (binarnih simbola), pa u ovom slučaju trajanje jednog bita i binarni protok multipleksiranog signala :**

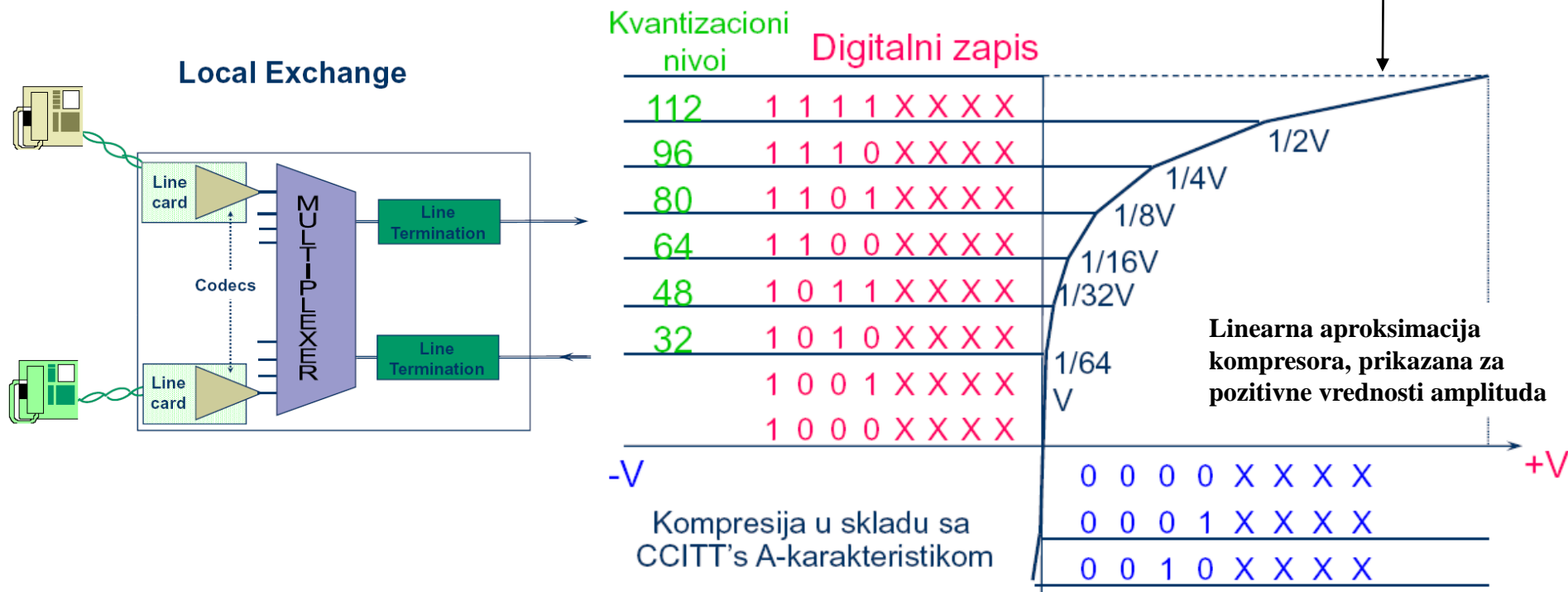
$$T_{B,MUX} = T_B / N = T / Nn = 0.488 \mu\text{s}$$

$$V_{B,MUX} = Nnf_s = Nf_s \log_2 q = 2048 \text{ kb/s}$$

# Gde se obavlja digitalizacija signala?

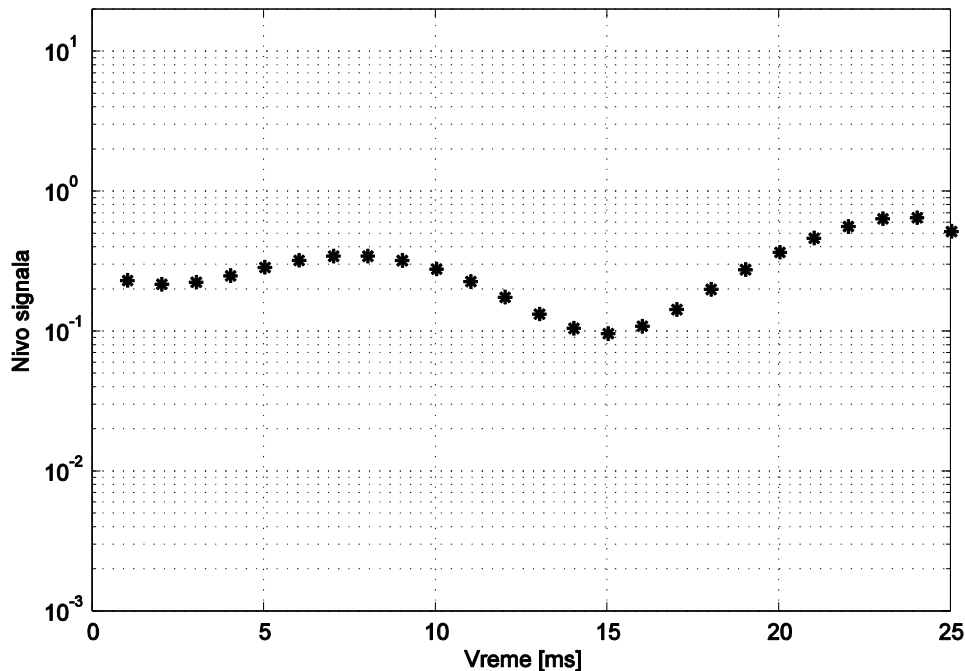
\* U javnoj telefonskoj mreži digitalizacija se obavlja u delu telefonske centrale (*local exchange*)

- Primi se analogni telefonski signal
- Obavlja se odabiranje sa učestanošću od 8000Hz
- Neuniformna kvantizacija odbiraka sa 256 nivoa i primenjenom kompresijom (u Evropi se koristi A-karakteristika kompresije, praktično se primenjuje sa **13-to segmentnom linearnom aproksimacijom**). Kodovanje se vrši osmobitnim 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/ss

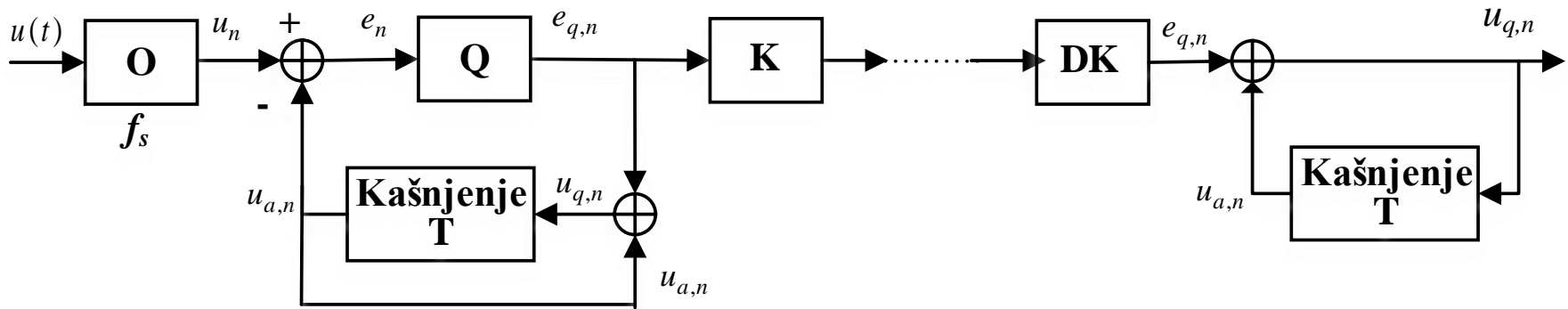


# Uticaj vremenske korelacija signala

- \* **Signali kao što je govorni signal, uglavnom se sporo menjaju u vremenu.**
  - U slučaju PCM vrednosti prethodnih odbiraka ne utiču na kvantizaciju tekućeg odbirka (svaki odbirak signala se kvantizuje nezavisno od drugih).
  - Promena govornog signala u periodu uzimanja nekoliko uzastopnih odbiraka je veoma mala (između uzastopnih odbiraka je obično reda 5-15% vrednosti čitavog odbirka).
  - Osnovna ideja diferencijalne PCM (DPCM, *Differential PCM*) je da se ne prenosi celokupna vrednost amplitude za svaki odbirak, već *razlika amplituda uzastopnih odbiraka*, čime se **značajno smanjuje opseg amplituda koje se prenosi.**



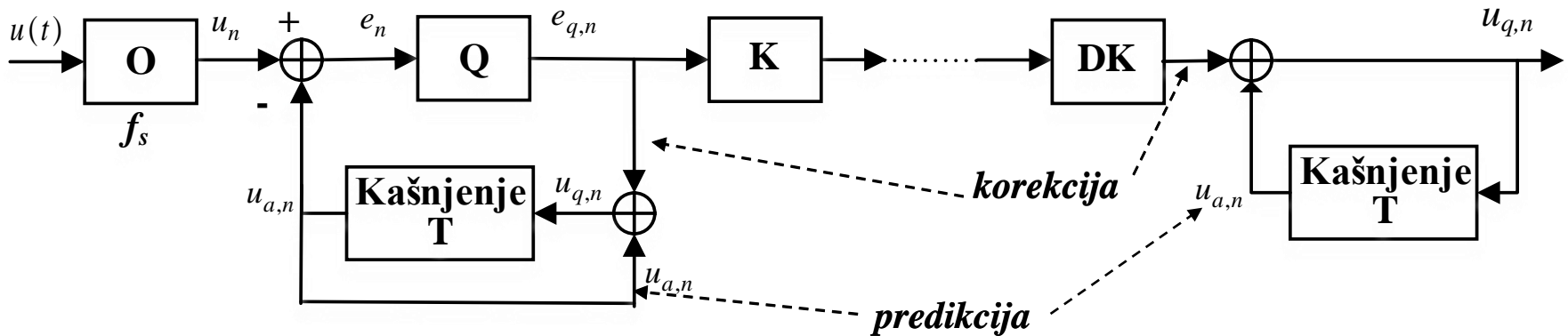
# Diferencijalna IKM (PCM) - realizacija



**Ideja je da se ne prenosi vrednost amplitude za svaki odbirak, već *razlika amplitude dolaznog odbirka i njene predviđene vrednosti (predikcija)***

- Odabiranje se obavlja učestanošću  $f_s = 1/T \geq 2f_m$ , gde je  $f_m$  maksimalna učestanost u spektru signala  $u(t) \rightarrow$  odbirci signala  $u_n$ .
- Signal  $u_{a,n}$  na negativnom ulazu sabirača predstavlja predikciju ulaznog signala. Predajnik formira signal razlike  $e_n = u_n - u_{a,n}$ , koji predstavlja razliku dolaznog odbirka i njene predviđene vrednosti. Signal razlike  $e_n$  se ravnomerno kvantizuje u kvantizeru sa  $q$  kvantizacionih nivoa, pri čemu se dobija kvantizirana vrednost razlike  $e_{q,n}$ . Predajnik koriguje predikciju signala  $u_{a,n}$ , sabiranjem sa kvantizovanim signalom razlike  $e_{q,n}$  čime se dobija signal  $u_{q,n}$ . Ova vrednost predstavlja predikciju za sledeći dolazni odbirak signala.
- U slučaju da pri prenosu ne dođe do greške (idealni prenos), vrednost na izlazu dekodera (DK) jednaka je vrednosti na ulazu kodera u predajniku  $e_{q,n}$ , pa je izlaz DIKM prijemnika u tom slučaju jednak  $u_{q,n}$ .

# Diferencijalna IKM (PCM) - realizacija



Razlika vrednosti susednih odbiraka na ulazu u kvantizer je

$$e_n = u_n - u_{a,n}$$

Kvantizirana vrednost razlike, izlaz kvantizera jednak je ulaznom signalu u kvantizer sabranim sa signalom greške kvantizacije  $q_{e,n}$

$$e_{q,n} = e_n + q_{e,n}$$

Zamenom prve formule u prethodnu dobija se  $e_{q,n} = u_n - u_{a,n} + q_{e,n}$

Kvantizirana vrednost ulaznog signala  $u_{q,n}$ , razlikuje se od odbirka ulaznog signala  $u_n$  za vrednost greške kvantizacije  $q_{e,n}$

$$u_{q,n} = u_{a,n} + e_{q,n} = u_n + q_{e,n}$$

# Diferencijalna IKM (PCM)

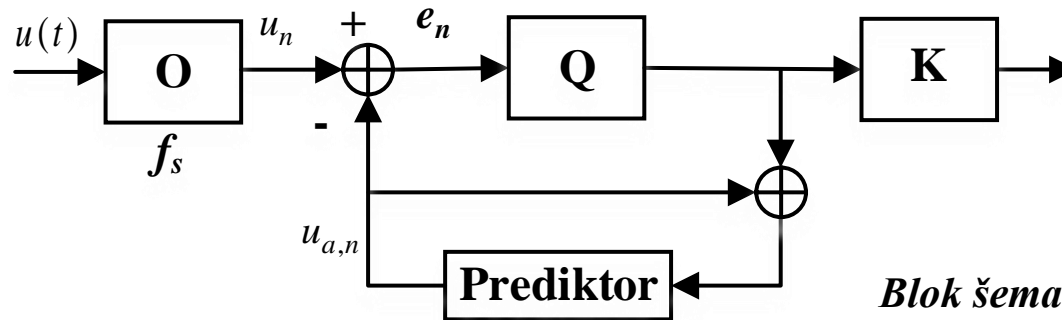
**Primenom PCM ne uzima se u obzir vremenska korelisanost signala (zavisnost koja postoji između susednih odbiraka signala)**

- Da bi se obezbedio dovoljan kvalitet PCM signala, neophodno je obavljati kvantizaciju sa velikim brojem nivoa, odnosno kodovati odbirke sa dovoljno velikim brojem bita.
- I u slučaju sporopromenljivog signala (npr. signal govora), nepotrebno se prenosi veliki broj odbiraka u sekundi, što rezultuje vrlo velikim bitskim protokom PCM signala.
- Učestanost odabiranja kod DPCM se ne mora povećavati u odnosu na PCM, pa ukupan binarni protok tada opada (kako se prenosi signal razlike, prenosi se manje bita po odbirku). Postupak je veoma efikasan ako se signal sporo menja.

**Ako je maksimalna razlika amplitude susednih odbiraka znatno manja od maksimalne vrednosti amplitude, na ulazu u kvantizator se nalazi signal čije su vrednosti amplituda u znatno manjem opsegu 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 PCM) 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.

# Diferencijalna IKM (PCM)



- Primenom DPCM postiže se da se **signal razlike  $e_n$  koji se kvantizira, nalazi u znatno manjem opsegu amplituda od opsega ulaznog signala  $u_n$ !** Ovaj opseg je utoliko uži, ukoliko je predikcija signala bolja. **Predikcija signala  $u_{a,n}$  može se odrediti i na osnovu nekoliko prethodnih vrednosti odbiraka.**
- Princip DPCM se primenjuje pri digitalizaciji govornog, audio i video signala.
- ADPCM (Adaptive DPCM) je varijanta DPCM gde je moguća promena koraka kvantizacije u zavisnosti od brzine promene signala koji se prenosi. Prenos govornog signala se može vršiti sa znatno manjim brojem bita po odbirku (2-5 bita po odbirku) u odnosu na primenu PCM (8 bita/odbirku), pa su i odgovarajući binarni protoci signala (16kb/s-40kb/s) znatno manji u odnosu na PCM. ADPCM tehnike imaju primenu i u VoIP (Voice over IP).