



PRINCIPI MODERNIH TELEKOMUNIKACIJA

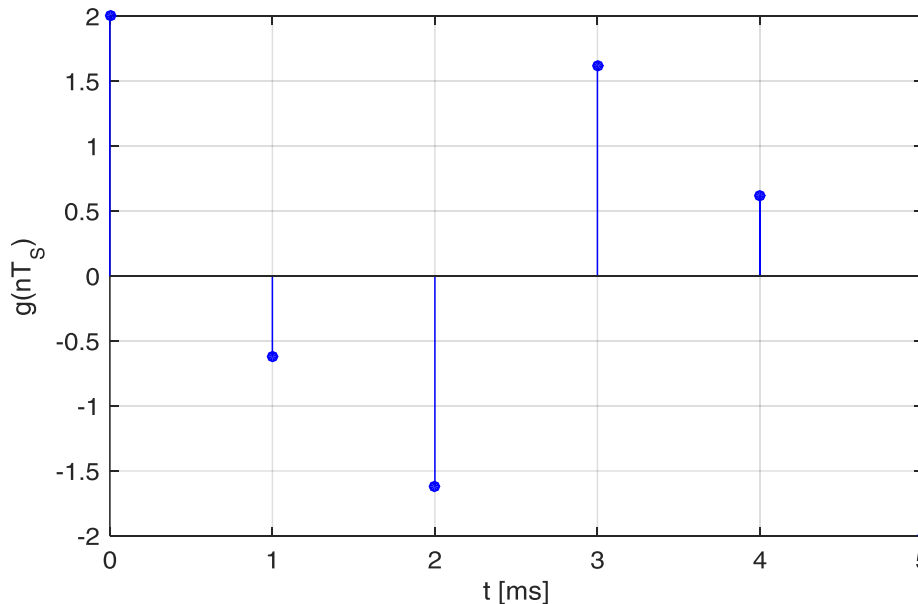
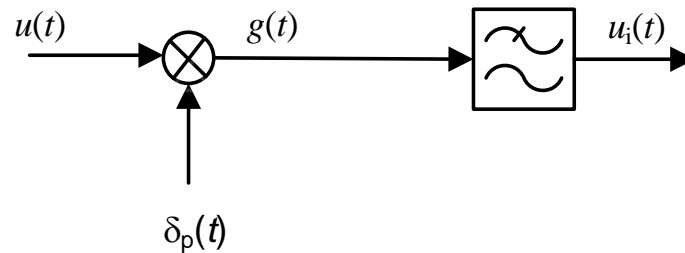
*Elektrotehnički fakultet
Katedra za telekomunikacije
Beograd, 2020/2021.*



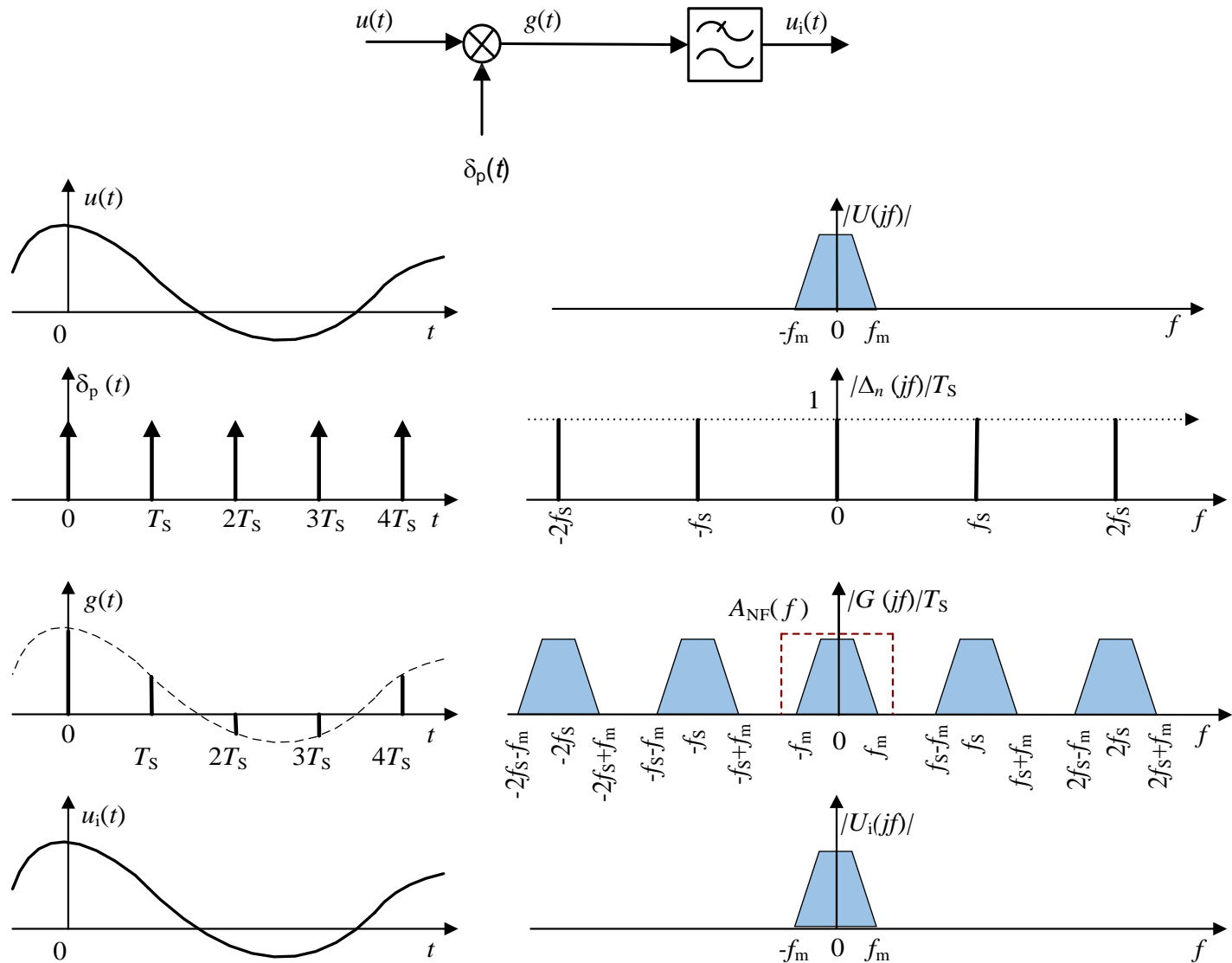
DISKRETIZACIJA I DIGITALIZACIJA SIGNALA

Zadatak– Diskretizacija signala

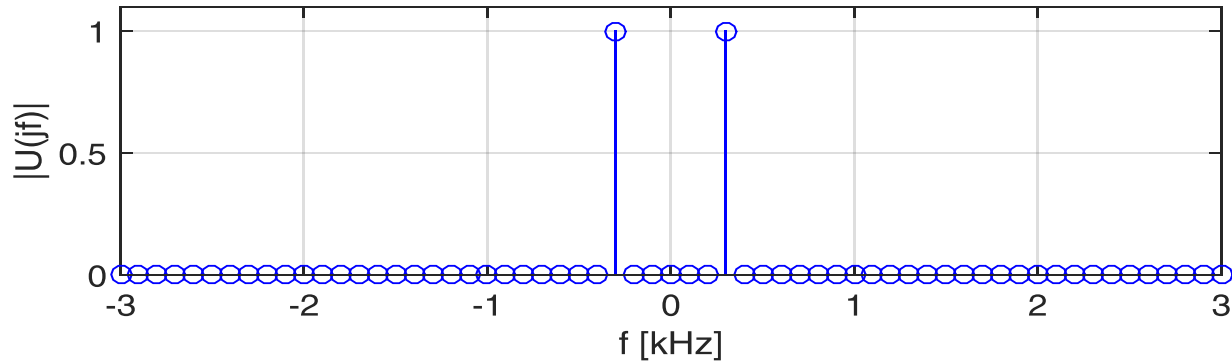
Posmatra se signal $u(t) = 2\cos(2\pi f_{m1}t)$, $f_{m1}=300$ Hz, na koji je primenjen postupak idealne diskretizacije po vremenu, pri čemu je $T_S = 1$ ms. Odrediti spektar signala nakon postupka diskretizacije. Na koji način je moguće rekonstruisati signala $u(t)$?



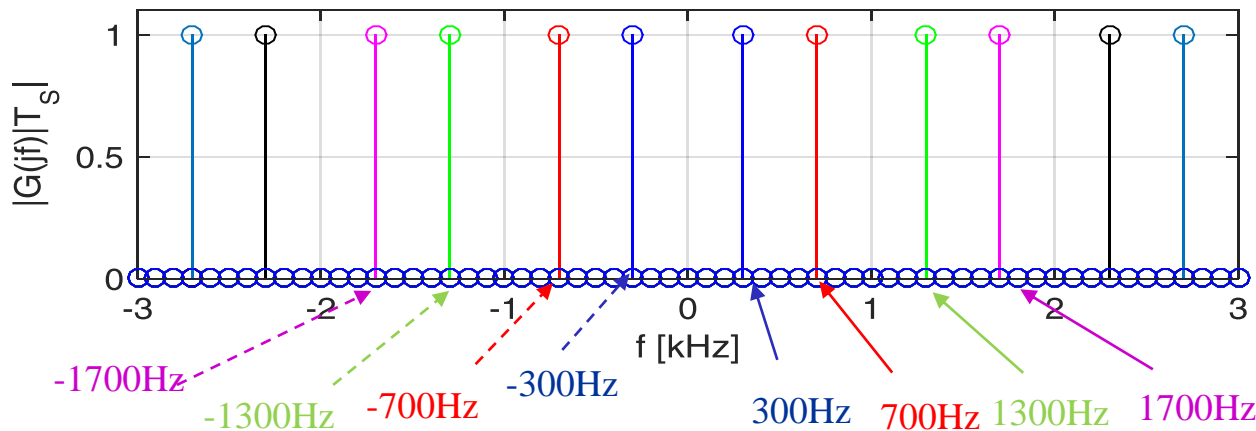
Zadatak– Diskretizacija signala



Zadatak– Diskretizacija signala



Analizirani kontinualni signal $u(t)$ je periodičan pa je spektar diskretan, sa komponentama na učestanostima $\pm f_{m1} = \pm 300\text{Hz}$



$f_s = 1000\text{Hz}$

Spektar diskretizovanog signala je takođe diskretan sa komponentama na učestanostima $nf_s \pm f_{m1}, n \in \mathbb{Z}$

$$n=0 \quad f_s \pm f_{m1} = \pm 300\text{Hz}$$

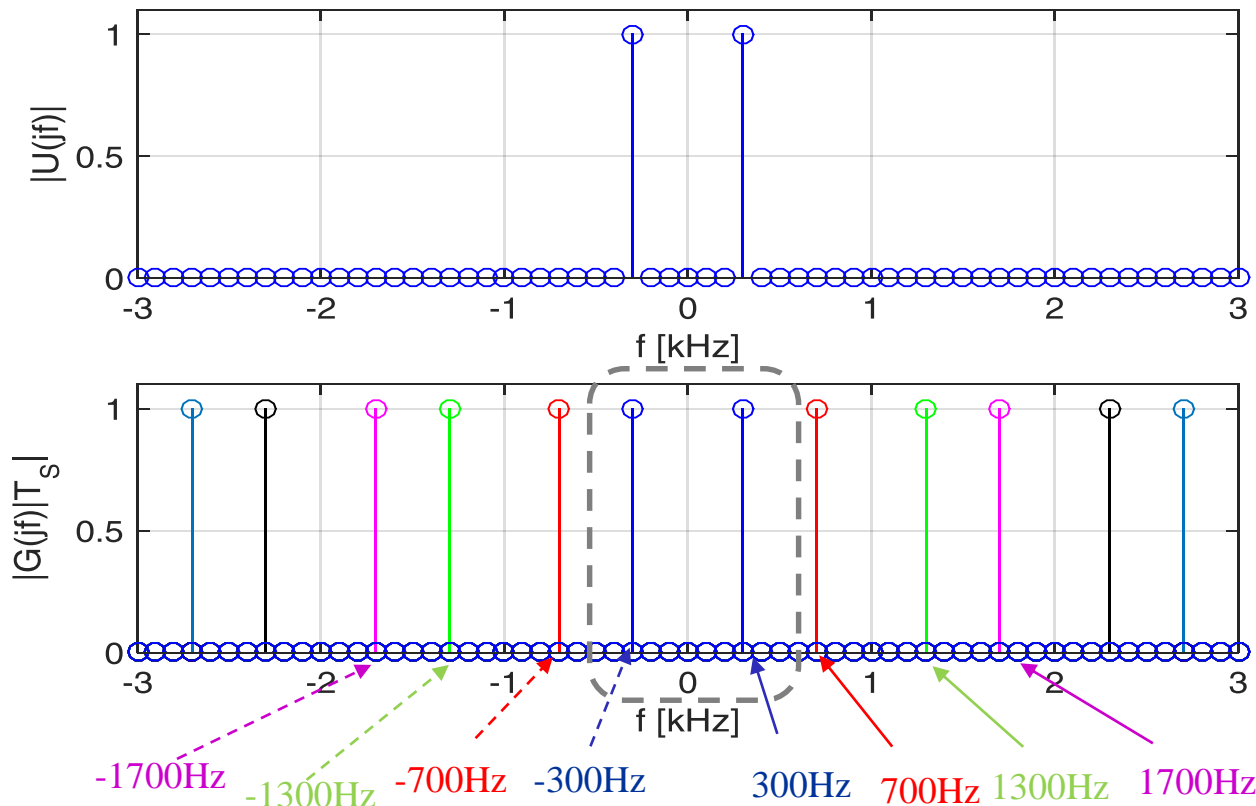
$$n=1 \quad f_s + f_{m1} = 1300\text{Hz} \quad f_s - f_{m1} = 700\text{Hz}, \quad n=-1 \quad -f_s + f_{m1} = -700\text{Hz} \quad -f_s - f_{m1} = -1300\text{Hz}$$

$$n=2 \quad 2f_s + f_{m1} = 2300\text{Hz} \quad 2f_s - f_{m1} = 1700\text{Hz}, \quad n=-2 \quad -2f_s + f_{m1} = -1700\text{Hz} \quad -2f_s - f_{m1} = -2300\text{Hz}$$

$$n=3 \quad 3f_s + f_{m1} = 3300\text{Hz} \quad 3f_s - f_{m1} = 2700\text{Hz}, \quad n=-3 \quad -3f_s + f_{m1} = -2700\text{Hz} \quad -3f_s - f_{m1} = -3300\text{Hz}$$

...

Zadatak– Diskretizacija signala



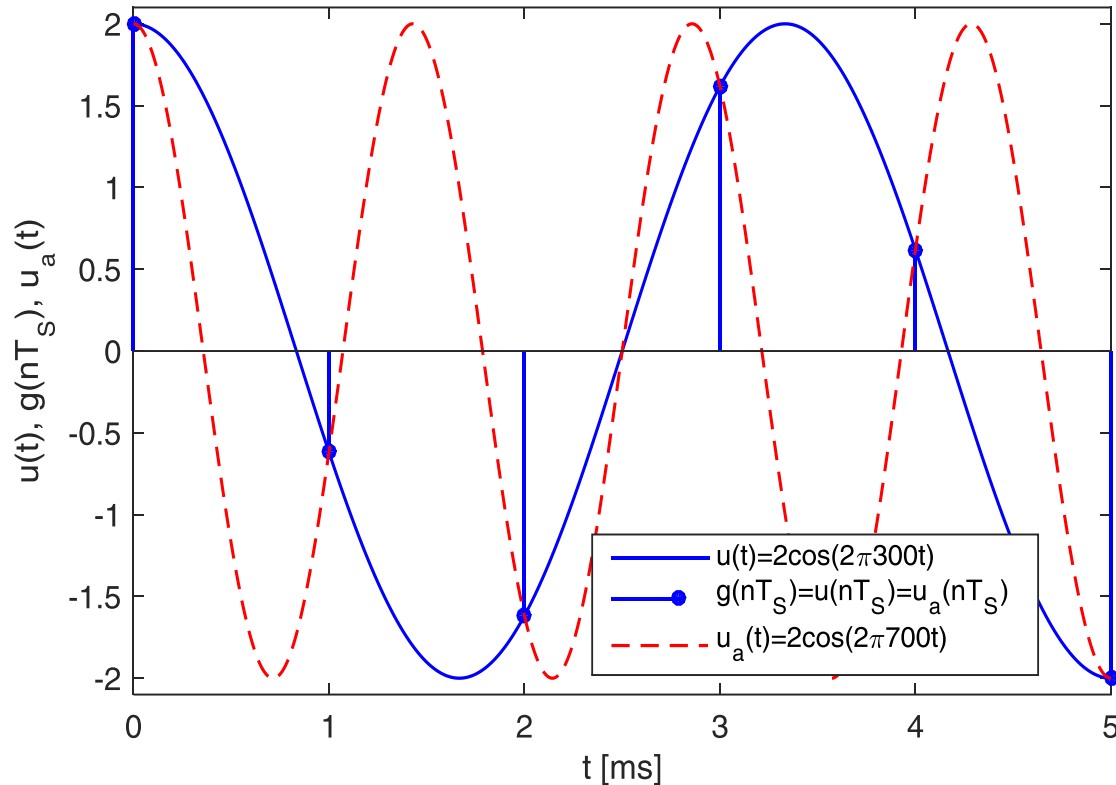
Analizirani kontinualni signal $u(t)$ je periodičan pa je spektar diskretan, sa komponentama na učestanostima $\pm f_{m1} = \pm 300\text{Hz}$

$$f_s = 1000\text{Hz}$$

Spektar diskretizovanog signala je takođe diskretan sa komponentama na učestanostima $nf_s \pm f_{m1}$, $n \in \mathbb{Z}$

Komponente originalnog kontinualnog signala dobijaju se propuštanjem kroz NF filter granične učestanosti f_{gr} ($f_{m1} < f_{gr} < f_s - f_{m1}$), nakon čega se dobija rekonstruisani prostoperiodičan signal na $f_{m1} = 300\text{Hz}$.

Zadatak– Diskretizacija signala



Na kojim učestanostima se nalaze komponente signala $u_a(t) = 2\cos(2\pi f_{a1}t)$, $f_{a1} = 700\text{Hz}$ nakon diskretizacije učestanošću $f_s = 1000\text{Hz}$? \rightarrow na $nf_s \pm f_{a1}$, $n \in \mathbf{Z}$

U oba slučaja dobija se **isti diskretizovan spektar** jer $f_{a1} = f_s - f_{m1}$ ($700\text{Hz} = 1000\text{Hz} - 300\text{Hz}$).

Nakon filtriranja NF filtrom granične učestanosti $f_s/2 = 500\text{Hz}$ ($f_{m1} < f_{gr} < f_s - f_{m1}$), rekonstruisani signal bi u oba slučaja bio prostoperiodičan signal na 300Hz.

Učestanost odabiranja signala $u_a(t)$ nije adekvatno izabrana jer $f_s = 1000\text{Hz} < 2 \times 700\text{Hz}$.

Zadatak - uticaj realne karakteristike filtra

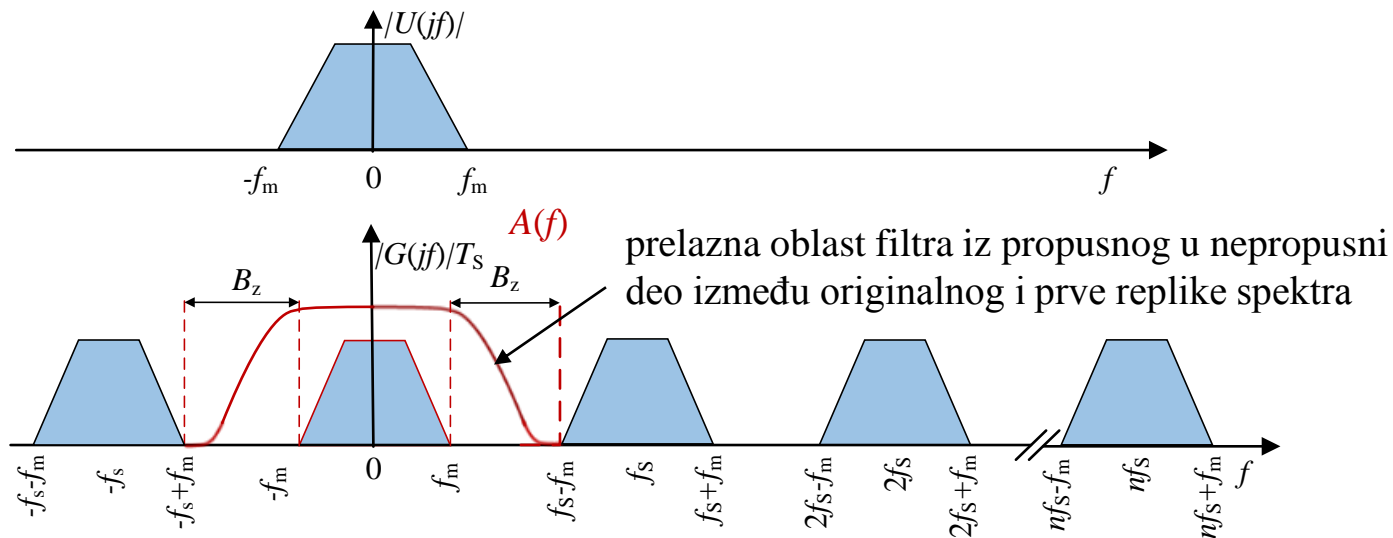
Potrebno je izvršiti diskretizaciju signala učestanošću $f_s = 44$ kHz.

Za potrebe rekonstrukcije signala na raspolaganju je NF filter kod kojeg je širina prelazne oblasti iz propusnog u nepropusni deo jednaka 4 kHz.

Koliko iznosi maksimalnu učestanost u spektru signala f_m , tako da je moguće izvršiti pravilnu rekonstrukciju signala?

Rešenje:

$$f_m + B_z < f_s - f_m \quad \Rightarrow \quad f_{m,\max} = \frac{1}{2}(f_s - B_z) = 20\text{kHz}$$



Zadatak – PCM, kvantizacija

A/D konverzija signala vrši se primenom PCM. Raspodela amplituda odbiraka signala $u(t)$ je uniformna u intervalu $[-2, +2]$ V.

Ukoliko se kvantizacija vrši sa $q=4$ nivoa kvantizacije odrediti:

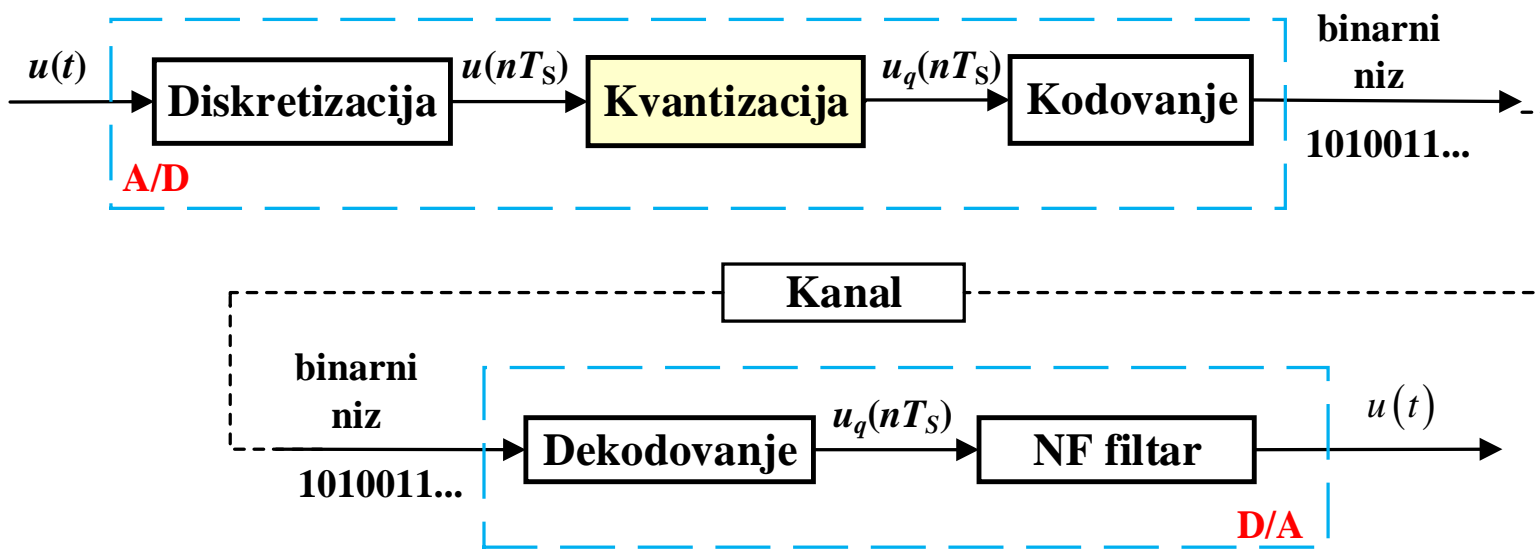
- Vrednosti koraka kvantizacije i kvantizacionih nivoa. Koliko iznosi maksimalna vrednost greške kvantizacije?
- Za sledeći niz odbiraka ulaznog signala odrediti vrednosti odbiraka na izlazu kvantizera: $+0.126, +1.986, -1.376, -0.264, +1.578$ [V].
- Pod pretpostavkom da se odbirci koduju prostim binarnim kodom, počev od najniže kvantizacione vrednosti (00...0 za najniži kvantizacioni nivo, 11..1 za najviši kvantizacioni nivo), odrediti odgovarajuće vrednosti niza bita na izlazu PCM kodera.
- Izračunati odnos snage signala i snage šuma kvantizacije. Dobijenu vrednost izraziti u decibelima (dB).
- Ukoliko se odabiranje signala vrši učestanošću $f_s=10$ kHz odrediti binarni protok signala.

Ponoviti postupak za broj nivoa kvantizacije $q=8$.

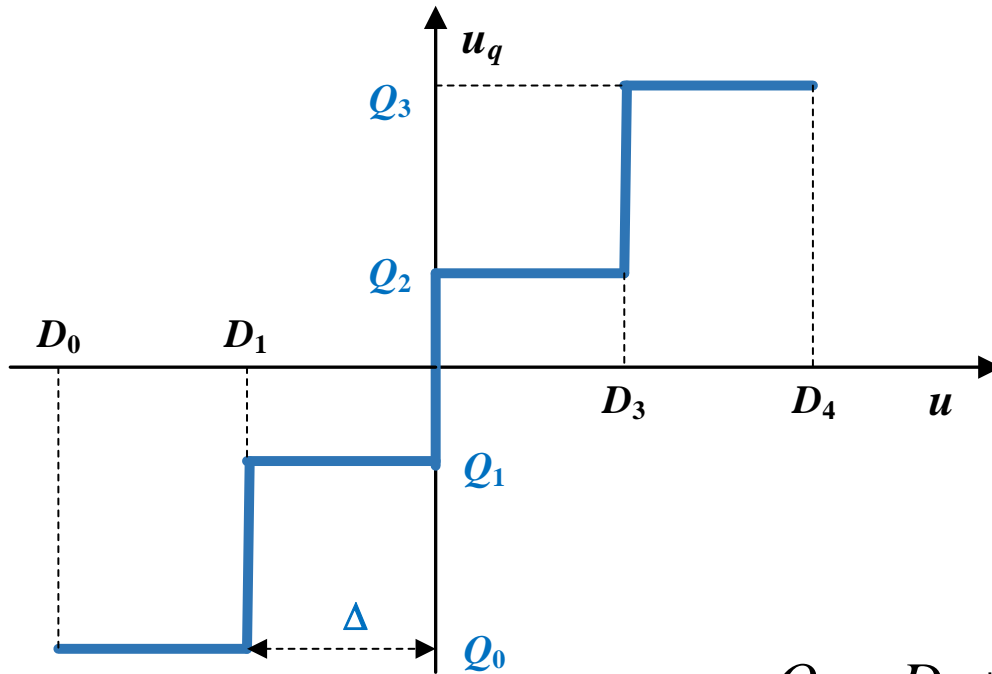
Zadatak – PCM, kvantizacija

Konverzija analognog signala u digitalni:

- Diskretizacija signala u vremenu
- Diskretizacija signala po amplitudi - *kvantizacija*
- Kodovanje



Zadatak – PCM, kvantizacija



$$U_{\min} = D_0 = -2\text{V}, \quad U_{\max} = D_4 = +2\text{V}$$

$$U = U_{\max} - U_{\min} = 4\text{V}$$

$$\Delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{q} = \frac{2 - (-2)}{4} \text{V} = 1\text{V}$$

$$D_0 = -2\text{V}$$

$$D_1 = D_0 + \Delta = -1\text{V}$$

$$D_2 = D_1 + \Delta = 0\text{V}$$

$$D_3 = D_2 + \Delta = +1\text{V}$$

$$D_4 = D_3 + \Delta = +2\text{V}$$

$$Q_k = D_0 + \Delta/2 + k\Delta, \quad k = 0, 1, \dots, q-1$$

$$Q_0 = D_0 + \Delta/2 = -1.5\text{V} \Rightarrow \text{kodna re\u0107 } 00$$

$$Q_1 = D_0 + \Delta = -0.5\text{V} \Rightarrow \text{kodna re\u0107 } 01$$

$$Q_2 = D_1 + \Delta = 0.5\text{V} \Rightarrow \text{kodna re\u0107 } 10$$

$$Q_3 = D_2 + \Delta = +1.5\text{V} \Rightarrow \text{kodna re\u0107 } 11$$

Zadatak – PCM, kvantizacija

Kvantizacioni interval	Vrednost odbirka signala na izlazu kvantizera	Kodna reč (primenjen prost binarni kod)
{-2, -1}	$Q_0 = -1.5V$	00
{-1, -0}	$Q_1 = -0.5V$	01
{0, 1}	$Q_2 = +0.5V$	10
{1, 2}	$Q_3 = +1.5V$	11

Amplituda impulsa signala $u(nT_s)$	+0.126	+1.986	-1.376	-0.264	+1.578
Kvantizacioni interval kojem pripada	[+0, +1]	[+1, +2]	[-2, -1]	[-1, 0]	[+1, +2]
Amplituda kvantizovanog signala $u_q(nT_s)$	+0.5	+1.5	-1.5	-0.5	+1.5
Kodna reč na izlazu kodera	10	11	00	01	11

Maksimalna greška kvantizacije je $\Delta/2=0.5V$

Zadatak – PCM, kvantizacija

Broj nivoa kvantizacije $q=8$

Korak kvantizacije $\Delta=(2-(-2))/q=0.5V$

Kvantizacioni interval	Kvantizacioni nivo	Kodna reč (prost binarni kod)
$\{-2, -1.5\}$	$Q_0 = -1.75V$	000
$\{-1.5, -1\}$	$Q_1 = -1.25V$	001
$\{-1, -0.5\}$	$Q_2 = -0.75V$	010
$\{-0.5, 0\}$	$Q_3 = -0.25V$	011
$\{0, 0.5\}$	$Q_4 = 0.25V$	100
$\{0.5, 1\}$	$Q_5 = 0.75V$	101
$\{1, 1.5\}$	$Q_6 = 1.25V$	110
$\{1.5, 2\}$	$Q_7 = 1.75V$	111

Amplituda impulsa signala $u(nT_S)$	+0.126	+1.986	-1.376	-0.264	+1.578
Kvantizacioni interval kojem pripada	[+0, +0.5]	[+1.5, +2]	[-1.5, -1]	[-0.5, 0]	[+1.5, 2]
Amplituda kvantizovanog signala $u_q(nT_S)$	+0.25	+1.75	-1.25	-0.25	+1.75
Kodna reč na izlazu kodera	100	111	001	011	111

Maksimalna greška kvantizacije je $\Delta/2=0.25V$

Zadatak – PCM, kvantizacija

Broj nivoa kvantizacije $q=4$

Srednja snaga signala na ulazu u kvantizer $P_s = \frac{U^2}{12} = \frac{4^2}{12} = \frac{4}{3} \text{ W}$

Srednja snaga šuma kvantizacije $P_{qN} = \frac{\overline{e_q^2}}{12} = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{2^2}{12} = \frac{4}{12} = \frac{1}{3} \text{ W}$

Odnos signal/šum kvantizacije

$$SNR_q = \frac{P_s}{P_{Nq}} = \frac{U^2}{12} / \frac{(\Delta u)^2}{12} = \left(\frac{U}{\Delta} \right)^2 = q^2 = 16$$

Signal/šum kvantizacije u decibelima

$$snr_q = 10 \log_{10}(q^2) = 10 \log_{10}(2^{2n}) = 20n \times \log_{10} 2 = 10 \log_{10} 16 = 12.04 \text{ dB}$$

Binarni protok PCM signala

$$V_{b,PCM} = f_s \times n = f_s \times \log_2 q = 10 \text{ kHz} \times \log_2 4 = 20 \text{ kb/s}$$

Zadatak – PCM, kvantizacija

Broj nivoa kvantizacije $q=8$

Srednja snaga signala na ulazu u kvantizer $P_s = \frac{U^2}{12} = \frac{4^2}{12} = \frac{4}{3} \text{ W}$

Srednja snaga šuma kvantizacije $P_{qN} = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{0.5^2}{12} = \frac{1}{48} \text{ W}$

Odnos signal/šum kvantizacije

$$SNR = \frac{P_s}{P_{Nq}} = \frac{U^2}{12} / \frac{(\Delta u)^2}{12} = \left(\frac{U}{\Delta} \right)^2 = q^2 = 64$$

Signal/šum kvantizacije u decibelima

$$snr_q = 10 \log_{10}(q^2) = 10 \log_{10}(2^{2n}) = 20n \times \log_{10} 2 = 10 \log_{10} 16 = 18.06 \text{ dB}$$

Binarni protok PCM signala

$$V_{b,PCM} = f_s \times n = f_s \times \log_2 q = 10 \text{ kHz} \times \log_2 8 = 30 \text{ kb/s}$$

Svaki dodatni bit
($\log_2 4 \rightarrow \log_2 8$) povećava
odnos snr_q za 6dB

Zadatak – A/D konverzija telefonskog signala

Koliki je kapacitet potreban za skladištenje informacije o binarnom zapisu digitalizovanog telefonskog signala u trajanju 1h?

Spektar originalnog analognog signala nalazi u opsegu 300 Hz do 3400 Hz.

Očitavanje amplituda kontinualnog signala $f_S = 8 \text{ kHz}$ ($f_S \geq f_{S,\min} = 2 \times 3.4 \text{ kHz}$).

Perioda odabiranja, rastojanje svaka dva uzastopna impulsa $T_S = 1/f_S = 125 \text{ } \mu\text{s}$.

Diskretizacija amplituda $q = 256$ kvantizacionih nivoa.

Kodovanje diskretizovanih amplituda sa $n = \log_2 256 = 8$ bita.

Binarni protok digitalizovanog telefonskog signala

$$V_{b,\text{PCM}} = n f_S = 8 \times 8 \text{ kHz} = 64 \text{ kb/s}$$

Potreban kapacitet

$$N_b = N_S n = t_{\text{tot}} n / T_S = t_{\text{tot}} n f_S = 3600 \text{ s} \times 8 \text{ bita} \times 8 \text{ kHz} \approx 28 \text{ MB}$$

Kapacitet potreban za zapis digitalizovane vrednosti raste sa **učestanošću kojom se vrši diskretizacija** (odabiranje) signala, **preciznošću kvantizacije** (brojem nivoa kvantizacije) i **dužinom trajanja intervala** t_{tot} .

Zadatak – PCM, odnos SNR_q

Signal $u(t)$ prenosi se postupkom impulsne kodne modulacije (PCM).

Maksimalna učestanost u spektru signala $u(t)$ jednaka je $f_m=20\text{kHz}$.

Učestanost odabiranja signala $u(t)$ jednaka je minimalnoj vrednosti određenoj teoremom odabiranja.

Raspodela amplituda signala $u(t)$ je uniformna, a kvantizacija odbiraka je ravnomerna sa $q=2^n$ nivoa.

Zahteva se da odnos signal/šum kvantizacije snr_q bude veći od 60dB.

- Odrediti učestanost odabiranja signala $u(t)$.
- Odrediti minimalan broj bita u kodnoj reči.
- Odrediti protok V_b binarnog signala na izlazu PCM kodaera.
- Odrediti protok V_b binarnog signala na izlazu PCM kodaera, ukoliko se signal $u(t)$ odabire učestanošću koja je dvostruko veća od minimalno dozvoljene, a za kodovanje kvantiziranih odbiraka koristi se dva bita više od minimalnog broja određenog u a). Odrediti koliko u tom slučaju iznosi odnos signal/šum kvantizacije.

Zadatak – PCM, odnos SNR_q

Rešenje:

a) Maksimalna učestanost u spektru signala $u(t)$ jednaka je $f_m=20\text{kHz}$. Po teoremi odabiranja minimalna vrednost učestanosti odabiranja je $f_s=2f_m=40\text{kHz}$.

b) Odnos Signal/Šum kvantizacije određen je izrazom

$$SNR_q = q^2$$

Odnos Signal/Šum kvantizacije izražen u decibelima iznosi

$$snr_q = 10\log_{10} SNR_q = 10\log_{10}(q^2) = 20\log_{10}(q)$$

b) Odnos signal/šum kvantizacije zavisi od broja kvantizacionih nivoa. Zahteva se da odnos signal/ šum kvantizacije bude veći od granične vrednosti jednake 60dB, pa važi

$$snr_q = 10\log_{10} SNR_q = 10\log_{10}(q^2) = 20\log_{10}(q) \geq 60\text{dB}$$

Zadatak – PCM, odnos SNR_q

Znači da je potrebno da broj nivoa koji se primenjuje pri kvantizaciji bude veći od neke granične vrednosti.

$$\begin{aligned} snr_q &= 10 \log_{10} SNR_q = 10 \log_{10} (q^2) = 20 \log_{10} (q) \geq 60 \text{dB} \Rightarrow \\ q &\geq 10^{snr_q/20} = 10^{60/20} = 10^3 = 1000 \end{aligned}$$

Kako se tekstom zadatka zahteva da se koristi broj nivoa koji je oblika $q=2^n$, prvi broj koji ispunjava uslov $q > 1000$ i predstavlja stepen broja 2 je broj $q=1024=2^{10}$.

Znači, da bi bio ispunjen uslov da je odnos signal/šum kvantizacije veći od 60dB, minimalan broj kvantizacionih nivoa bi trebalo da bude jednak $q_{min}=1024$.

Za kodiranje $q=1024$ kvantizacionih nivoa potrebno je $n=\log_2(1024)=10$ bita.

Minimalan broj bita za kodiranje jednog odbirka je $n_{min}=10$.

Zadatak – PCM, odnos SNR_q

c) Učestanost odabiranja je $f_s = 2f_m = 40\text{kHz}$.

Svaki odbirak signala se kodira sa $n_{\min} = 10$ bita, pa je protok binarnog PCM signala

$$V_b = n_{\min} * f_s = 10 * 40\text{kHz} = 400\text{kb/s}.$$

d) Ukoliko se signal odabire dvostruko većom učestanošću od minimalno dozvoljene, učestanost odabiranja iznosi $f_{s1} = 2 * 2f_m = 2 * 40\text{kHz} = 80\text{kHz}$.

Po uslovu zadatka, svaki odbirak kodira se sa 2 bita više bita od broja određenog u tački b), pa je ukupan broj u ovom slučaju $n = n_{\min} + 2 = 12$ bita.

Protok binarnog PCM signala sada je $V_{b1} = n * f_{s1} = 12 * 80\text{kHz} = 960\text{kb/s}$.

Ukupan broj bita za kodiranje je $n = 12$, a ukupan broj kvantizacionih nivoa $q = 2^n = 2^{12}$. Odnos signal/šum kvantizacije je

$$snr_q = 10 \log_{10}(q^2) = 20 \log_{10}(q) = 20 \log_{10}(2^n) = 20n \log_{10} 2 = 72\text{dB}$$

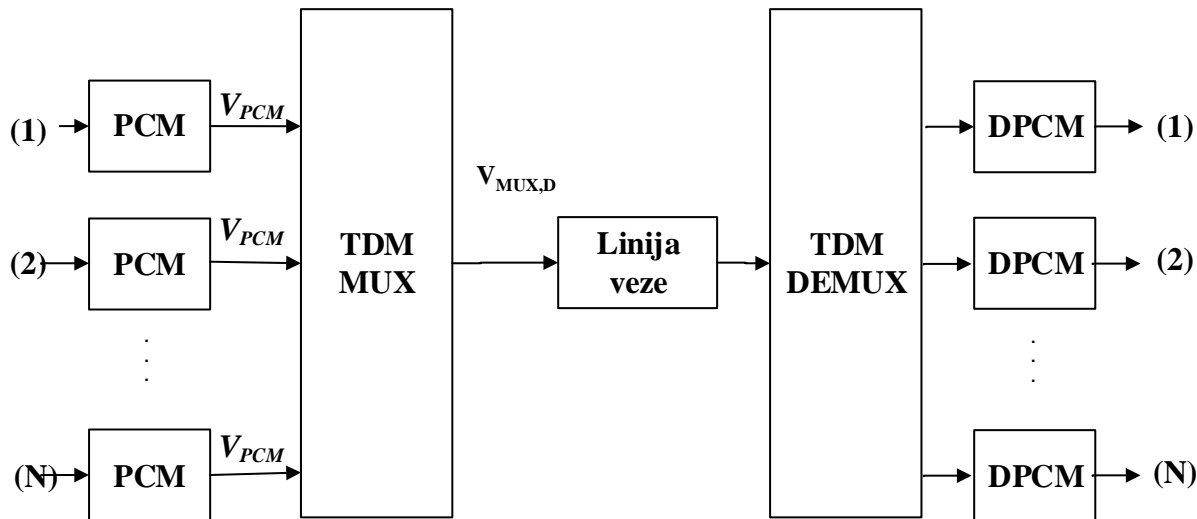
Svaki dodatni bit koji se koristi za kodiranje signala, kroz odgovarajuće povećanje broja kvantizacionih nivoa povećava odnos signal/šum za $20 \log_{10}(2) = 6\text{dB}$!

Zadatak – PCM+TDM

Ukupan broj od $N=30$ nezavisnih signala prenosi se korišćenjem blok-šeme prikazane na slici. Maksimalna učestanost u spektru svakog signala je $f_m=4\text{kHz}$. Odabiranje ulaznog signala vrši se minimalnom učestanošću određenom teoremom odabiranja, a primenjena je ravnomerna kvantizacija odbiraka ulaznih signala sa $q=256$ nivoa.

U bloku TDM/MUX vrši se vremensko multipleksiranje dolaznog digitalnog signala.

- Odrediti učestanost odabiranja svakog od N signala.
- Odrediti protok V_{PCM} binarnog signala na izlazu iz svakog od PCM blokova.
- Odrediti protok $V_{MUX,D}$ digitalnog multipleksnog signala na liniji veze.



Blok šema, vremensko multipleksiranje N digitalnih signala.

Zadatak – PCM+TDM

a) Maksimalna učestanost u spektru svakog od signala je $f_m=4\text{kHz}$, pa pod pretpostavkom da se odabiranje signala vrši minimalnom učestanošću određenom teoremom odabiranja, učestanost odabiranja iznosi $f_s=2f_m=8\text{kHz}$.

b) Ravnomerna kvantizacija se obavlja sa $q=2^n=256$ nivoa, pa se svaki odbirak signala u koderu predstavlja korišćenjem

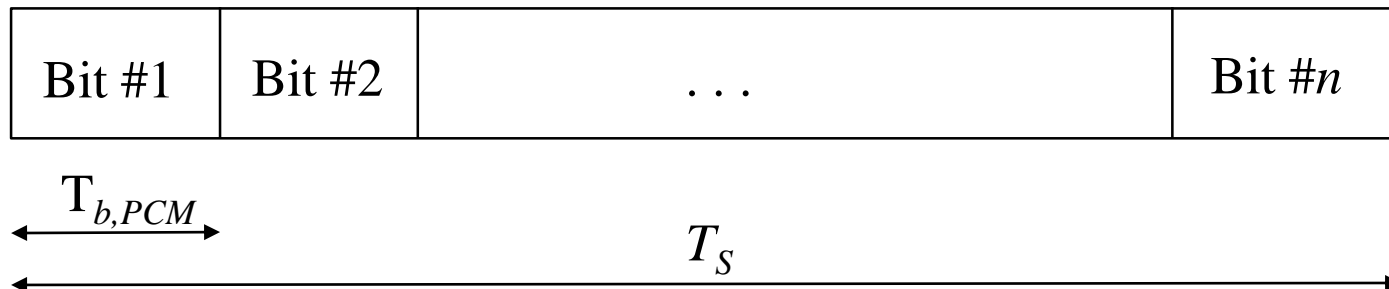
$$n = \log_2 q = \log_2 256 = 8 \text{ bita}$$

Protok binarnog signala na izlazu PCM kodera (za svaki od N kanala) je

$$V_{PCM} = n \cdot f_s = 8 \cdot 8\text{kHz} = 64 \text{ kb/s}$$

Trajanje jednog bita u PCM kodnoj reči $T_{b,PCM}$ (trajanje signalizacionog interval, tj. vreme za prenos jednog bita u PCM kodnoj reči) iznosi

$$T_{b,PCM} = 1/V_{PCM} = T_s/n = 125\mu\text{s}/8=15.625\mu\text{s}$$



Zadatak – PCM+TDM

c) Pri formiranju digitalnog multipleksnog TDM signala, ukupno vreme između uzimanja dva odbirka istog signala T_S ($T_S = 1/f_S$ je perioda odabiranja svakog od signala u multipleksu) na raspolaganju je za prenos bita koji predstavljaju odbirke svih N signala.

U toku periode odabiranja T_S prenosi se po n bita za odbirke svakog od N signala.

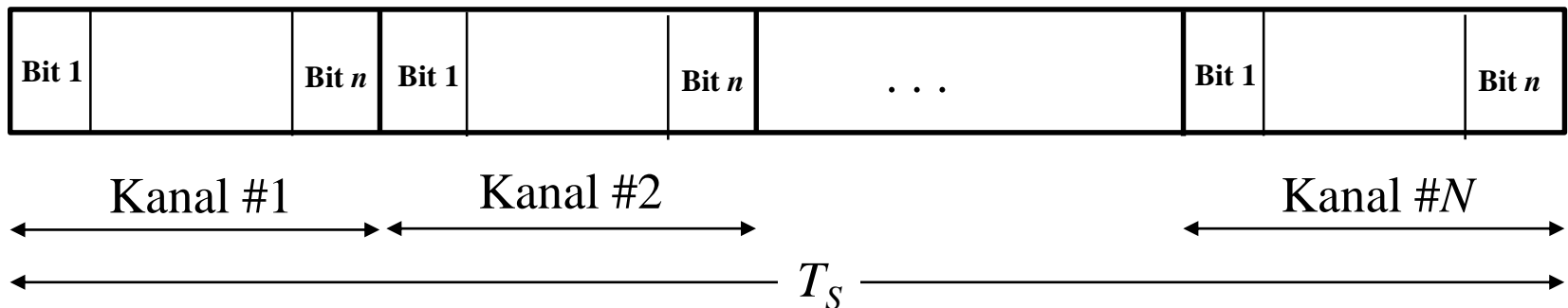
Trajanje bita na liniji veze $T_{b,MUX}$ pri prenosu multipleksnog signala je N puta kraće od $T_{b,PCM}$ (odnosno $N \times n$ kraće od periode odabiranja T_S).

$$T_{MUX,D} = \frac{T_S}{nN} = 0.52\mu s$$

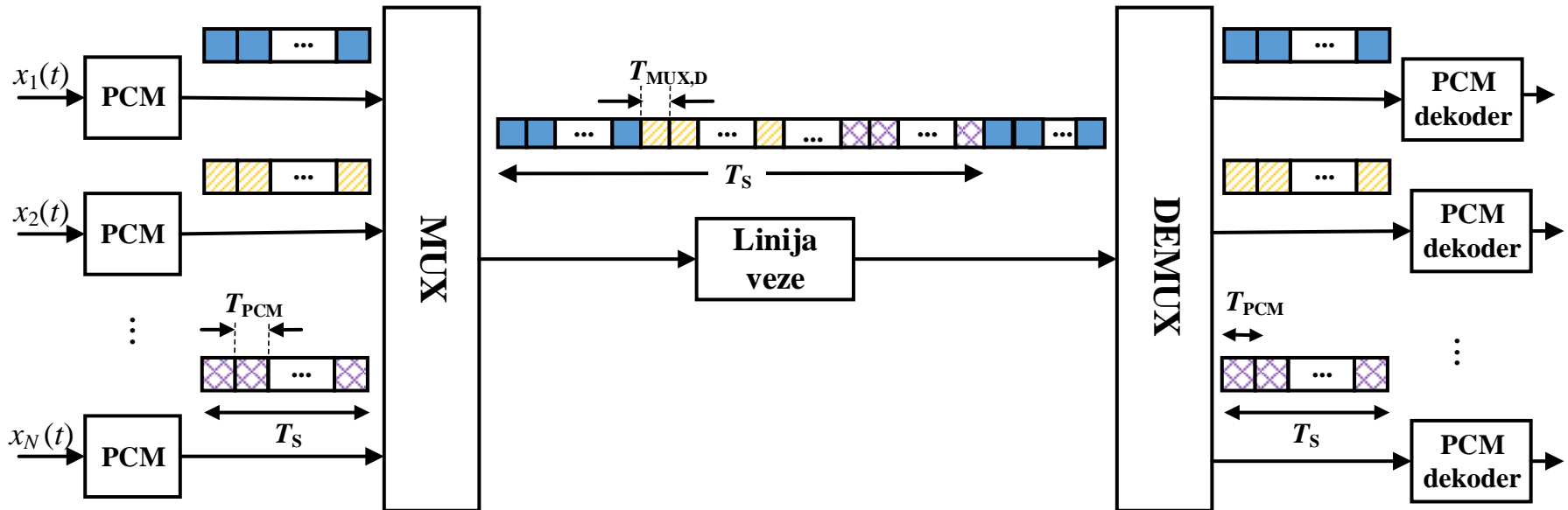
Binarni protok multipleksnog signala V_{MUX}

$$V_{MUX,D} = \frac{1}{T_{MUX,D}} = \frac{Nn}{T_S} = Nnf_S = 1920\text{kb/s}$$

$T_{b,MUX}$
↔



Zadatak – PCM+TDM



$$T_{MUX,D} = \frac{T_S}{nN} = 0.52\mu s$$

$$V_{MUX,D} = \frac{1}{T_{MUX,D}} = \frac{Nn}{T_S} = Nnf_s = 1920\text{kb/s}$$

Zadatak, digitalni PCM+TDM sistem

Signali iz $N=24$ kanala maksimalne učestanosti u spektru jednake 20kHz prenose se u multipleksu sa vremenskom raspodelom, pri čemu je A/D konverzija svakog od N signala u multipleksu prethodno izvršena primenom PCM.

Odabiranje signala vrši se minimalnom učestanošću određenom teoremom odabiranja. Raspodela amplituda odbiraka svakog od N signala je uniformna u intervalu $[-10.24V, 10.24V]$. Kvantizacija odbiraka obavlja se korišćenjem uniformnog kvanizatora, pri čemu se zahteva da maksimalna greška kvantizacije ne bude veća od 0.01V.

- a) Odrediti učestanost odabiranja signala.
- b) Odrediti minimalan broj kvantizacionih nivoa, kao i vrednosti tri najniža i tri najviša kvantizaciona nivoa.
- c) Odrediti protok signala na liniji veze.
- d) Koliko iznosi odnos snage signala i snage šuma kvantizacije SNR_q ? Dobijenu vrednost izraziti u decibelima.

Zadatak, digitalni PCM+TDM sistem

Rešenje:

a) Maksimalna učestanost u spektru signala u svakom od kanala je 20kHz. Kako se signal odabire minimalnom učestanošću određenom teoremom odabiranja ona iznosi $f_s = 2f_m = 40\text{kHz}$

b) Maksimalna greška kvantizacije iznosi $\frac{\Delta}{2}$

Maksimalna greška kvantizacije je $\Delta_{\max}/2 = 0.01\text{V}$, pa je maksimalna dozvoljena vrednost koraka kvantizacije $\Delta_{\max} = 0.02\text{V}$.

Kako je raspodela odbiraka ulaznih signala uniformna u opsegu

$[U_{\min}, U_{\max}] = [-U/2, +U/2] = [-10.24\text{V}, +10.24\text{V}]$, minimalan broj kvantizacionih nivoa je $q_{\min} = U/\Delta_{\max}$ nivoa, odnosno

$$q_{\min} = \frac{U}{\Delta_{\max}} = \frac{2 \cdot 10.24}{0.02} = 1024 \text{ nivoa}$$

Zadatak, digitalni PCM+TDM sistem

Ukoliko je ukupan broj kvantizacionih nivoa $q_{min}=1024$, znači da se svaki odbirak PCM signala predstavlja sa $n=\log_2 1024=10$ bita

Vrednosti tri najniža kvantizaciona nivoa su

$$Q_0=U_{min}+\Delta/2=-10.24+0.01=-10.23V$$

$$Q_1=U_{min}+3\Delta/2=-10.24+3*0.01=-10.21V$$

$$Q_2=U_{min}+5\Delta/2=-10.24+5*0.01=-10.19V$$

Vrednosti tri najviša kvantizaciona nivoa su

$$Q_{1023}=U_{max}-\Delta/2=+10.24-0.01=+10.23V$$

$$Q_{1022}=U_{max}-3\Delta/2=+10.24-3*0.01=+10.21V$$

$$Q_{1021}=U_{max}-5\Delta/2=+10.24-5*0.01=+10.19V$$

c) Protok signala na liniji veze je

$$V_{MUX} = N \cdot n \cdot f_s = 24 \cdot 10 \cdot 40kHz = 9600 \text{ kb/s}$$

d) Odnos signal/šum kvantizacije $[S/N]_q$

$$snr_q = 10\log_{10}(q^2) = 20\log_{10}(q) = 20\log_{10}(2^n) = 20n \log_{10} 2 = 60.2dB$$