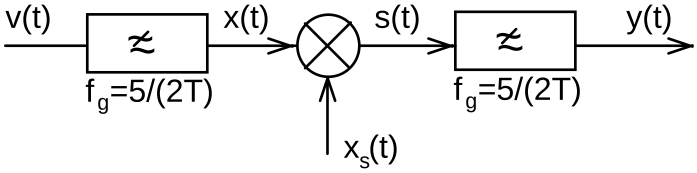


Slika 1. Sistem za odabiranje sa NF filtrom na ulazu

Rešenje:
Prema tekstu zadatka, ulazni signal je periodična povorka pravougaonih impulsa i pauza jednakog trajanja. Za takav signal u zadatku 4.1.1. izraz (2), pokazano je da sadrži samo jednosmernu komponentu i neparne harmonike. Kroz ulazni NF filtar praktično prolaze samo jednosmerna komponenta, amplitude $E/2$ i prvi harmonik, amplitude E/π, na učestanosti $f_0 = 1/T$. Ovakav signal odabire se sa učestanošću odabiranja $f_s = 2/T = 2 \cdot f_0$. Nakon odabiranja, spektar signala odbiraka sadrži komponente na svim multiplima učestanosti f_0. Izlazni filtar propušta jednosmernu komponentu i dva harmonika, na učestanostima f_0 i $2 \cdot f_0$, sa amplitudama $E/2$, $2E/\pi$ i E, respektivno. Izlazni signal ima oblik:

$$y(t) = \frac{E}{2} + \frac{2E}{\pi} \cdot \cos \omega_0 t + E \cdot \cos 2\omega_0 t \,.$$

4.2. Kvantizacija

Kvantizacija je postupak kojim se kontinualni skup vrednosti signala (napona ili struje) preslikava (pretvara) u diskretni skup vrednosti. Kvantizacija je jedan od osnovnih koraka u formiranju digitalnog signala. Kvantizacija je ireverzibilan postupak. Ne postoji način da se, posle izvršene kvantizacije, signal vrati u oblik koji je imao pre kvantizacije.

Postoje dva osnovna tipa kvantizacije: uniformna i neuniformna. Osnovna osobina uniformne kvantizacije jeste da su koraci kvantizacije (pojam koji je detaljno objašnjen u nastavku) jednaki na svim amplitudskim nivoima. Ovakva kvantizacija veoma je jednostavna i za analizu i za realizaciju, ali nije pogodna za primenu kod svih tipova signala. Za mnoge potrebe pogodnije je da koraci kvantizacije ne budu jednaki, nego da budu prilagođeni trenutnim vrednostima signala. Ovakva kvantizacija naziva se neuniformna kvantizacija. Osobine neuniformne kvantizacije objašnjene su u nastavku.

Uniformna kvantizacija

Kvantizacija se najlakše objašnjava grafički, na primeru prikazanom na slici 4.2.1. Uvodi se niz novih pojmova:

- Maksimalna i minimalna vrednost signala, U_{max} i U_{min} odgovaraju očekivanoj najvećoj i najmanjoj vrednosti signala koji treba kvantizovati. Često su moduli tih vrednosti jednaki pa važi

$U_{max} = -U_{min} = U$. Ako trenutna vrednost signala premaši očekivane vrednosti signala, dolazi do tzv. klipovanja ili odsecanja opsega vrednosti koji izlazi izvan navedenih granica.

- Broj kvantizacionih nivoa, q, ceo broj koji se obično bira tako da bude jednak stepenu broja 2, tj. $q = 2^m$. Razlozi za ovakav izbor leže u postupku koji obično sledi nakon kvantizacije, tj. kodovanju kvantizovanih odbiraka. Postupak kodovanja detaljno je opisan u nastavku ove glave.

- Korak kvantizacije definiše se kod uniformne kvantizacije kao $\Delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{q}$, a ako je $U_{max} = -U_{min} = U$ tada je $\Delta U = \frac{2 \cdot U}{q}$. Svi koraci kvantizacije imaju istu vrednost. Kod neuniformne kvantizacije koraci su različiti u svakom intervalu i ne važe gore navedene jednačine;

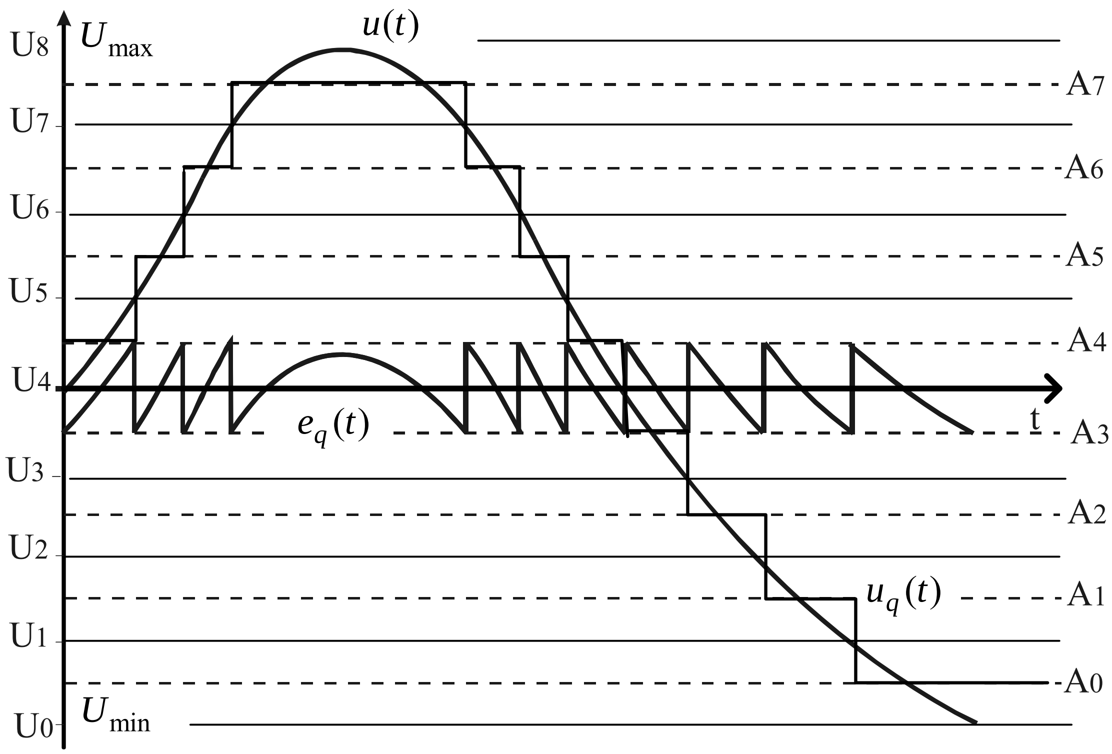
- Granice kvantizacionih intervala $U_n = U_{min} + n \cdot \Delta U$, $n = 0...q$;

- Dozvoljeni amplitudski nivoi $A_n = \frac{1}{2} \cdot (U_n + U_{n+1})$, $n = 0...q-1$;

- Kvantizovani signal $u_q(t)$;

- Greška kvantizacije:

$$e_q(t) = u(t) - u_q(t). \tag{4.2.1}$$



Slika 4.2.1. Kvantizacija analognog signala

Na slici 4.2.1. vidi se da greška kvantizacije ima amplitudu ograničenu na opseg: $\left|e_q(t)\right| < \dfrac{\Delta U}{2}$;

Kao što je već rečeno, kvantizacija je ireverzibilan postupak. Nakon izvršene kvantizacije više nije moguća potpuno tačna rekonstrukcija originalnog signala. Pokazuje se, međutim, da potpuno tačna rekonstrukcija nije ni potrebna. Postupak kvantizacije uglavnom se primenjuje na signale govora, muzike i slike, namenjene ljudskim čulima. Nesavršenost čula sluha i vida i njihova skromna mogućnost razlikovanja veoma sitnih detalja omogućuju primenu kvantizacije. Prednosti koje se ostvaruju daljom obradom kvantizovanih signala daleko premašuju prividne nedostatke ovog postupka.

Pošto se kvantizovani signal $u_q(t)$, prema (4.2.1), može izraziti u obliku $u_q(t) = u(t) - e_q(t)$, greška kvantizacije može se posmatrati i kao nepoželjan signal koji se dodaje (sa negativnim znakom) korisnom signalu. Odavde i potiče alternativni naziv za grešku kvantizacije: šum kvantizacije ili kvantizacioni šum. Kao i kod svih drugih vrsta šuma, trenutne vrednosti šuma nemaju poseban značaj u analizi uticaja šuma. Uticaj šuma analizira se kroz njegove statističke parametre, a naročito snagu i odnos snaga korisnog signala i šuma. Može se pokazati da odnos snaga korisnog signala i kvantizacionog šuma ima vrednost koja je približno jednaka za različite signale i iznosi:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_q = SNR_q = q^2. \tag{4.2.2}$$

Dokaz jednakosti (4.2.2) moguć je na nekoliko načina. Ako se posmatra bilo koji signal, obično je potrebno iskoristiti statističke osobine signala i statističke postupke. Ako se posmatra kosinusoida, postoji analitički dokaz [1] da je odnos snaga jednak $3 \cdot q^2 / 2$. U zadatku 4.2.1. pokazano je da se za signale kod kojih je verovatnoća pojavljivanja svih amplituda jednaka, dobija upravo izraz (4.2.2). Obično se smatra da se pomoću izraza (4.2.2) određuje odnos snaga signala i šuma za svaki signal.

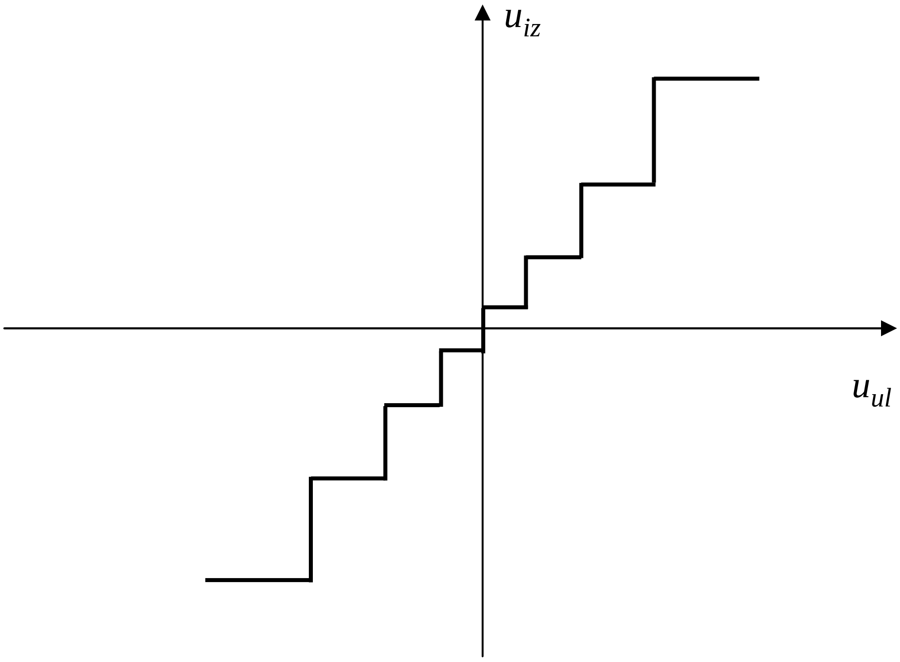
Neuniformna kvantizacija

Pri određivanju odnosa snaga signala i šuma (4.2.2) vrši se usrednjavanje snage signala i snage šuma. Pri tom snaga šuma uopšte ne zavisi od toga da li signal ima velike ili male trenutne vrednosti. Međutim, u vremenskim intervalima u kojima signal ima male vrednosti amplitude, njegova je trenutna snaga (definisana izrazom (2.1.3b)) manja, pa je i trenutni odnos snaga signala i šuma manji, što znači da šum u takvim intervalima vremena značajnije kvari kvalitet signala. Zbog toga se i javila ideja da se veličina koraka kvantizacije prilagodi trenutnim vrednostima signala i to na sledeći način:

- ako signal ima male vrednosti, njih treba kvantizovati finije, sa manjim korakom kvantizacije;

- ako signal ima velike vrednosti, kvantizacija može da bude grublja, sa većim korakom kvantizacije.

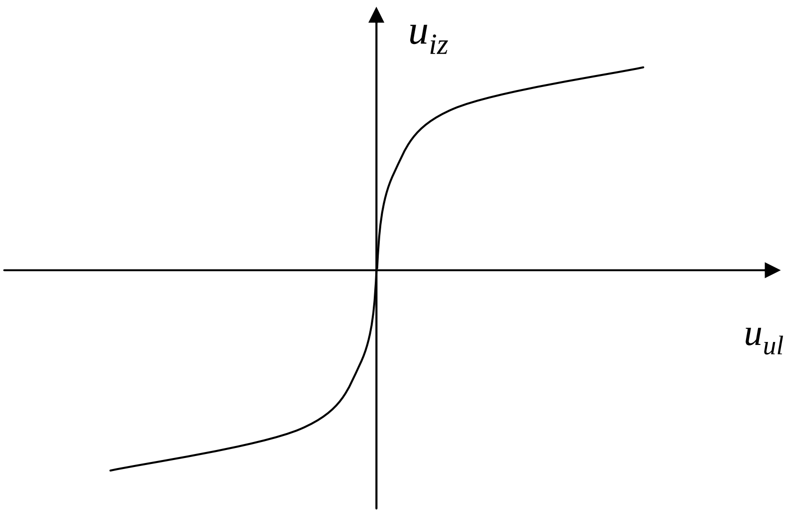
Ideja neuniformne kvantizacije može se ilustrovati grafički, kao na slici 4.2.2. Na slici je data zavisnost trenutne vrednosti izlaznog napona, u_{iz}, od trenutne vrednosti ulaznog napona, u_{ul}.



Slika 4.2.2. Neuniformna kvantizacija

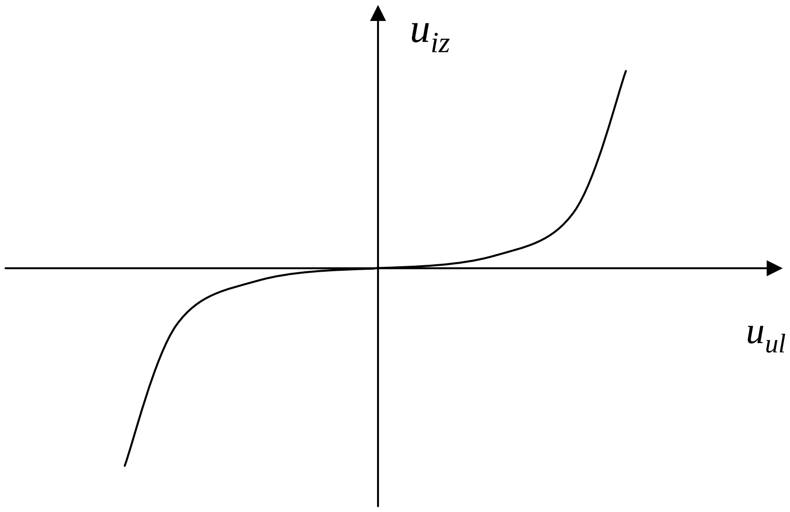
Da bi se pojednostavio postupak neuniformne kvantizacije, umesto neuniformnog kvantizera primenjuje se redna veza dve komponente, kompresora i uniformnog kvantizera.

Kompresor je nelinearni sistem bez memorije kod kog je veza između izlaznog i ulaznog signala prikazana na slici 4.2.3. Kompresor vrši neravnomerno pojačanje trenutnih vrednosti ulaznog signala: male vrednosti signala značajnije se pojačavaju, a kako vrednosti signala rastu, pojačanje se smanjuje. Naziv 'kompresor' potiče od činjenice da je opseg vrednosti signala nakon prolaska kroz sistem smanjen, tj. 'sabijen'. Signal koji je propušten kroz kompresor zatim se kvantizuje pomoću uniformnog kvantizera. Na taj način dobija se signal koji odgovara signalu kvantizovanom primenom neuniformnog kvantizera.



Slika 4.2.3. Karakteristika kompresora

Da bi se komprimovani i kvantizovani signal vratio u svoj prvobitni oblik, potrebno je na prijemnoj strani signalu vratiti trenutne vrednosti koje je imao pre kompresije. Ovaj postupak realizuje se pomoću nelinearnog sistema sa karakteristikom koja je inverzna karakteristici kompresora. Takav sistem naziva se ekspandor. Karakteristika ekspandora prikazana je na slici 4.2.4. Može se pokazati [1] da kombinacija kompresor-uniformna kvantizacija-ekspandor ne menja signal, ali smanjuje negativan uticaj kvantizacije tako što poboljšava i trenutne vrednosti odnosa signal/šum i ukupnu vrednost odnosa signal/šum.



Slika 4.2.4. Karakteristika ekspandora

Optimalna neuniformna kvantizacija

Oblik karakteristike kompresora i ekspandora značajno utiče na karakteristike postupka. Da bi se postupak na neki način optimizovao, treba odrediti kriterijum i postupak optimizacije. Ako se kao kriterijum za optimizaciju usvoji zahtev da odnos koraka kvantizacije i trenutne vrednosti signala bude konstantan, relativno složenim analitičkim postupkom [1] može se pokazati da je optimalna tzv. logaritamska kompresija, kod koje je karakteristika kompresora data logaritamskom krivom. Logaritamska kriva, međutim, ne prolazi kroz koordinatni početak, a karakteristika kompresora mora da prođe kroz tu tačku, pa je bilo neophodno da se izvrše aproksimacije koje će uskladiti ta dva zahteva. Usklađivanje je izvršeno za praktične potrebe, u prenosu signala u telefonskom saobraćaju.

Kao i u mnogim drugim komunikacionim sistemima, i u oblasti neuniformne kvantizacije signala usvojeni su različiti standardi u Americi i u ostalom delu sveta. U Americi i Japanu, u unutrašnjem telefonskom saobraćaju, usvojen je tzv. $\mu -$zakon (mi zakon), po kom je veza između izlaznog i ulaznog signala data izrazom:

$$u_{iz} = \frac{1}{\ln(1+\mu)} \cdot \ln\left(1 + \frac{\mu \cdot u_{ul}}{U}\right), \tag{4.2.3}$$

gde je μ parametar koji se naziva faktor kompresije, u_{ul} trenutna vrednost ulaznog napona, a $U = U_{\max}$ maksimalna očekivana vrednost signala. Izraz (4.2.3) važi samo za $0 \le u_{ul} \le U$, dok se za negativne vrednosti koristi odgovarajuća neparna karakteristika. Eksperimentalno je utvrđeno da optimalne osobine imaju kompresori za koje je $\mu = 255$.

U Evropi, većem delu ostatka sveta (osim SAD i Japana) i na međunarodnim komunikacionim linijama usvojen je tzv. $A-$zakon, po kom veza između izlaznog i ulaznog signala ima oblik:

$$u_{iz} = \begin{cases} \dfrac{A}{1+\ln A} \cdot \left(\dfrac{u_{ul}}{U} \right) & 0 \le \dfrac{u_{ul}}{U} \le \dfrac{1}{A}, \\ \dfrac{1}{1+\ln A} \cdot \left(1 + \ln \dfrac{u_{ul}}{U} \right) & \dfrac{1}{A} < \dfrac{u_{ul}}{U} \le 1, \end{cases} \tag{4.2.4}$$

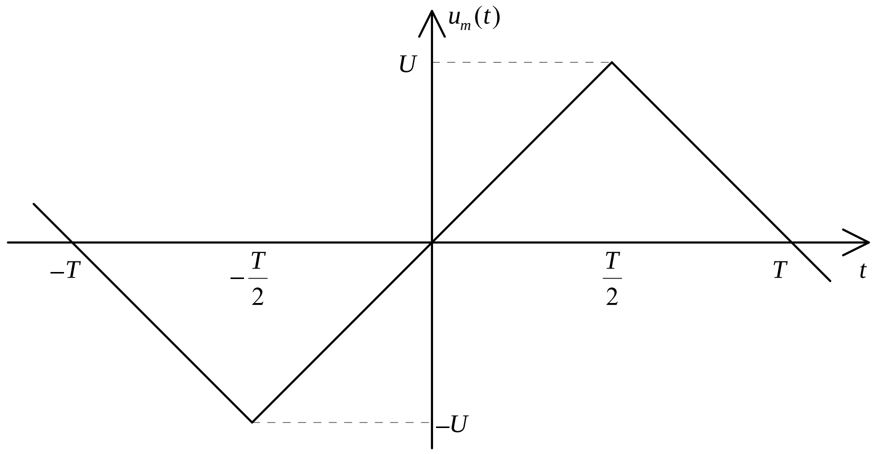
gde je A parametar za koji je eksperimentalno utvrđeno da ima optimalnu vrednost $A = 87.6$. Prema (4.2.4), za promene ulaznog napona u opsegu $0 \le u_{ul} \le U / A$, izlazni napon ima linearnu promenu vrednosti. Ako se ulazni napon menja u opsegu $U / A < u_{ul} \le U$, promena je logaritamska.

Mogu se pokazati i mnoge druge osobine navedenih tipova kompresora signala. Detaljniji dokazi, međutim, zahtevaju više znanja iz statističke teorije telekomunikacija i ne obrađuju se u ovom udžbeniku.

Rešeni primer uz poglavlje 4.2.

Zadatak 4.2.1. (E)

Jedna perioda ulaznog signala $u_m(t)$ prikazana je na slici 1. Nacrtati talasne oblike karakterističnih signala i odrediti odnos snaga signala i šuma kvantizacije ako je broj kvantizacionih nivoa $q = 8$.



Slika 1. Ulazni signal $u_m(t)$

Rešenje:

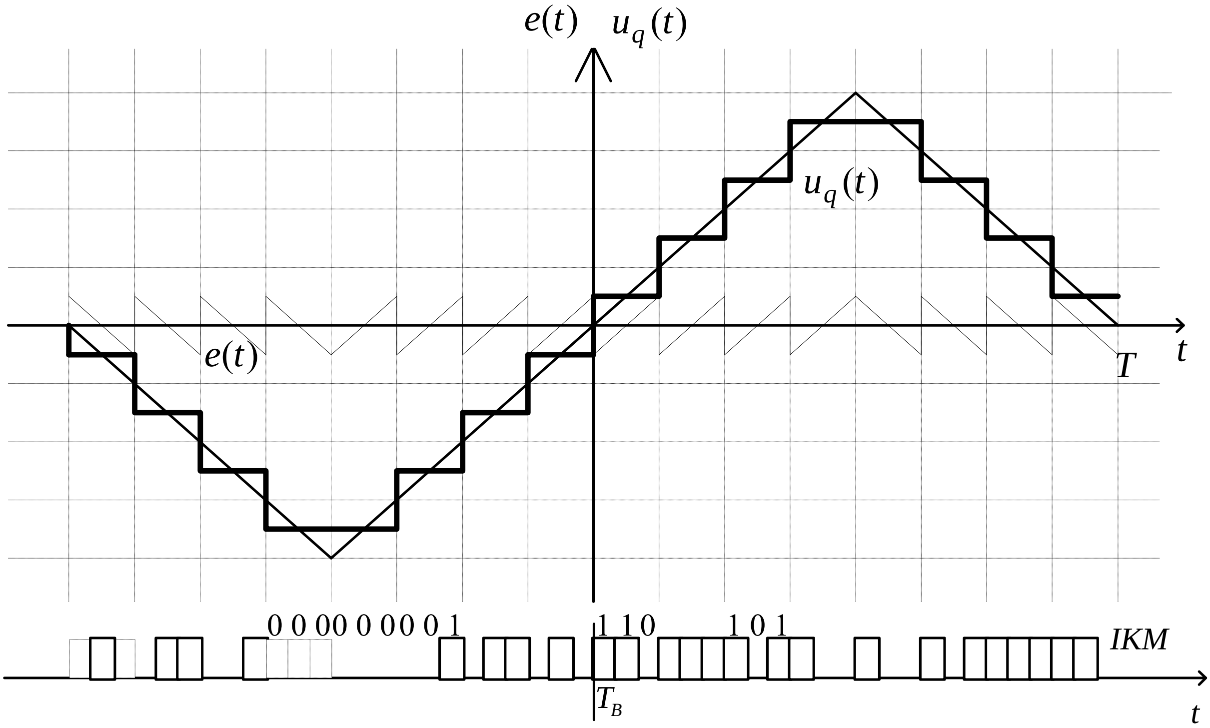
a) Korak kvantizacije ima vrednost $\Delta U = 2U / q = U / 4$, a kvantizovani signal ima vrednosti:

$$u_q(t) = (2k+1) \cdot \Delta U / 2 \text{ za } k \cdot \Delta U < u_m(t) \le (k+1) \cdot \Delta U, \quad k = -q/2, ..., q/2-1.$$

Šum kvantizacije definiše se kao odstupanje (razlika) kvantizovanog i ulaznog signala od:

$$e(t) = u_m(t) - u_q(t),$$

i prisutan je na prijemnoj strani nakon dekodovanja signala. Signali su prikazani na slici 2.



Slika 2. Karakteristični signali u postupku kvantizacije

Snaga korisnog signala ima vrednost:

$$P = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} u_m^2(t) \cdot dt = \frac{U^2}{3},$$

a snaga šuma kvantizacije, označenog na slici 2. sa $e(t)$, može se odrediti postepenim izračunavanjem, deo po deo, ili primenom jednostavnog trika: snaga šuma jednaka je snazi periodične povorke trougaonih impulsa širine $T/16$, maksimalne amplitude $\Delta U/2$. Ova osobina lako se dokazuje ako se posmatra signal $e(t)$ na slici 2. Bez obzira na znak i oblik (položaj) bilo kog malog trougla, širine $T/16$, amplitude $\Delta U/2$, njegov doprinos snazi signala $e(t)$ uvek je isti. Snaga šuma kvantizacije iznosi:

$$P_q = \frac{1}{T/16} \int_{0}^{T/16} e^2\left(\frac{8 \cdot \Delta U}{T} \cdot t\right)^2 \cdot dt = \frac{\Delta U^2}{12},$$

pa je odnos snaga signala i šuma kvantizacije jednak:

$$(S/N)_q = \frac{U^2/3}{\Delta U^2/12} = q^2,$$

odnosno u logaritamskim jedinicama $SNR_q = 10 \cdot \log(q^2) = 18\ \text{dB}$. Na slici 2. prikazan je i IKM signal (vidi poglavlje 4.4.), dobijen primenom Grejovog koda, opisanog u poglavlju 4.3.

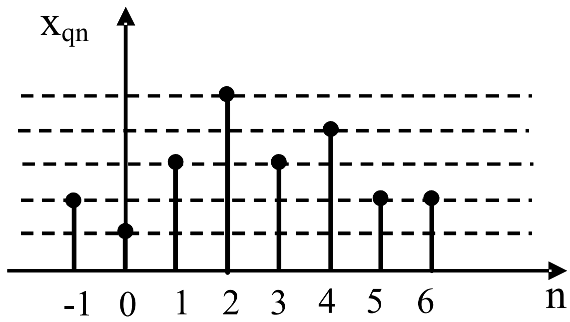
4.3. Kodovanje

Nakon izvršenog odabiranja i kvantizacije, analogni signal zamenjen je nizom odbiraka. Postoji konačan broj različitih vrednosti odbiraka signala. Prenos signala dalje se vrši u digitalnom obliku, tako što će se vrednost svakog odbirka zameniti nekim simbolom, npr. brojem, a zatim će se prenositi niz simbola.

Prenos signala u analognom obliku bio je karakterističan za većinu telekomunikacionih sistema do početka 70-tih godina prošlog veka. Prenos u digitalnom obliku karakterističan ja za savremene telekomunikacione sisteme.

Kodovanje je postupak kojim se jedan niz simbola (npr. odbiraka signala) zamenjuje drugim nizom simbola, ne obavezno iz istog skupa. Simboli mogu biti brojevi, amplitude jednosmernog signala, ali najčešće predstavljaju istovremeno amplitudski i fazno modulisanu sinusoidu trajanja jednog simbolskog intervala.

Postoji mnogo različitih varijanti kodovanja. Kao najjednostavniji primer može da posluži obična numeracija. Ako je broj kvantizacionih nivoa q, svaki nivo može se redom numerisati brojevima, npr. $0,1,...q-1$ ili $1,2,...q$, ili $-q/2, -q/2+1,...q/2-1$, ili bilo kojom drugom kombinacijom u kojoj se razlikuje q nivoa (stanja, simbola). Ako posmatramo primer sa slike 2.2.1., ponovljen radi preglednosti na slici 4.3.1., primenom jednostavnog pravila dobijamo digitalni signal: $x(-1)=2$, $x(0)=1$, $x(1)=3$, $x(2)=5$, $x(3)=3$,...



Slika 4.3.1. Primer signala pripremljenog za kodovanje

Amplitudski nivoi često se koduju tako što se prvo njihov redni broj pretvori u broj u binarnom obliku. Niz nula i jedinica dobijen na taj način predstavlja kodnu reč. Ukoliko želimo da sve kodne reči imaju istu dužinu (tzv. blokovsko kodovanje), prvo mora da se utvrdi broj bita neophodan za prenos maksimalne vrednosti signala, kako bi kodna reč za svaki amplitudski nivo imala jednaku dužinu.

Npr. ako signal ima 50 amplitudskih nivoa, dužina binarne kodne reči mora da bude 6, jer je $2^5 < 50 < 2^6$. Tada se npr. nivo 15 zamenjuje binarnim kôdom 001111. Binarni oblik pogodan je zbog lakše računarske obrade i memorisanja. Osim toga, dva različita binarna simbola (0 i 1) mogu se lako praktično realizovati kao npr. impulsi sa različitim amplitudama, fazama ili frekvencijama. Postupak prenosa digitalnog signala detaljno je analiziran u glavi 10.

Postoji više načina da se izabere tip kôda. U primeru u tabeli 4.3.1. pokazana su četiri karakteristična binarna kôda. U kolonama sa oznakom ‘nivo’ upisan je redni broj nivoa za koje su kôdovi dati sa desne strane.

Tabela 4.3.1. Nekoliko varijanti binarnih kodova

Nivo	Binarni kôd	Grejov kôd	Nivo	Kôd modula	Kôd modula sa inverzijom bita
7	1111	1100	7	1111	1010
6	1110	1101	6	1110	1011
5	1101	1111	5	1101	1000
4	1100	1110	4	1100	1001
3	1011	1010	3	1011	1110
2	1010	1011	2	1010	1111
1	1001	1001	1	1001	1100
0	1000	1000	0	1000	1101
-1	0111	0000	0	0000	0101
-2	0110	0001	-1	0001	0110
-3	0101	0011	-2	0010	0111
-4	0100	0010	-3	0011	0110
-5	0011	0110	-4	0100	0001
-6	0010	0111	-5	0101	0000
-7	0001	0101	-6	0110	0011
-8	0000	0100	-7	0111	0010

Binarni i Grejov kôd mogu da koduju 16 različitih nivoa sa 4 bita. Preostala dva kôda mogu da koduju 15 različitih nivoa jer se za nivo ‘0’ koriste dve različite kodne reči. Kod kôda modula, tri bita koriste se za kodovanje osam nivoa, od 0 do 7. Četvrti bit koristi se za kodovanje znaka odbirka. Prednost ovog kôda leži u tome što kod signala koji često menjaju znak ne dolazi do neprekidnih promena vrednosti skoro svih bita, kao kod binarnog kôda. Poslednji prikazan kôd odgovara kôdu modula, ali su svi biti na parnim položajima invertovani. Npr. kodna reč 1111 pretvorena je inverzijom dve jedinice na položajima 0 i 2 u kodnu reč 1010. Ovakv kôd pogodan je za prenos signala koji često imaju uzastopne vrednosti jednake nuli pa se kod njih javljaju dugi nizovi nula koji nepovoljno utiču na prenos digitalnog signala.

Kodovanje signala, osim elementarne namene, digitalnog predstavljanja signala, ima i različite druge namene. Ovde su ukratko opisani statističko (entropijsko) i zaštitno kodovanje.

Pojam entropije uveden je u poglavlju 1.2. Ako verovatnoća pojavljivanja simbola (tj. različitih vrednosti odbiraka) nije ravnomerna, može se primeniti poseban postupak po kom se verovatnijim vrednostima odbiraka, tj. vrednostima koje se češće javljaju dodeljuje kraći niz nula i jedinica. Vrednostima odbiraka koje se retko pojavljuju dodeljuje se duži niz nula i jedinica. Jedan od postupaka naziva se Hafmanovo kodovanje. U postupku kodovanja treba obezbediti da se signal može jednoznačno dekodovati, jer bi inače kodovanje bilo besmisleno. Npr. u telefonskom numerisanju država, SAD ima pozivni broj 1 i zbog toga ni jedna druga zemlja ne sme da ima pozivni broj koji počinje sa 1. Problemi koji se javljaju u ovoj vrsti kodovanja nisu jednostavni. Kodovanje se detaljnije izučava u predmetu Teorija informacija i kodovanja.

Druga interesantna grupa postupaka naziva se zaštitno kodovanje. Suština zaštitnog kodovanja jeste da se, osim bita koji predstavljaju kodovane odbirke diskretizovanog signala (tzv. informacionih bita), prenose i dodatni, tzv. zaštitni biti. Sistem koji generiše povorku bita sa zaštitnim kodovanjem znatno je složeniji nego sistem bez kodovanja, ali su i poboljšanja koja se postižu u kvalitetu i pouzdanosti prenosa izvanredna. Najjednostavniji primer zaštitnog kodovanja naziva se provera parnosti. Na svaku grupu od N informacionih bita dodaje se po jedan bit čija vrednost zavisi od broja jedinica u grupi informacionih bita. Npr. ako je broj jedinica paran, zaštitni bit ima vrednost 0, a ako je broj jedinica neparan, zaštitni bit ima vrednost 1. Ovaj jednostavan postupak omogućuje da se na prijemnoj strani sa velikom verovatnoćom otkrije pojava greške u digitalnom prenosu.

Kod složenijih sistema zaštitnog kodovanja, kod kojih se grupi od N informacionih bita dodaje veći broj zaštitnih bita, pri čemu se njihove vrednosti izračunavaju na poseban način, mnoge greške nastale u prenosu digitalnog signala mogu se otkriti pa čak i ispraviti. Na primer, ovakav sistem zaštitnog kodovanja pod nazivom cikličko kodovanje, primenjen je u sistemu za prenos podataka putem radio difuzije, RDS, opisanom u poglavlju 11.5.

4.4. Impulsna kodna modulacija, IKM

Na ovom mestu treba reći nekoliko reči o postupku za obradu signala koji se naziva impulsna kodna modulacija, IKM (engl. Pulse Code Modulation, PCM). IKM je postupak kojim se realizuje digitalizacija signala, tj. konverzija analognog signala u digitalni oblik, povorku simbola, odnosno brojeva. IKM je kombinacija tri postupka objašnjena u prethodnim poglavljima:
- odabiranja,
- kvantizacije i
- kodovanja.

IKM signal u stvari je povorka simbola. Primer je pokazan na donjem delu slike 2. u zadatku 4.2.1. Povorka kvantizovanih i kodovanih odbiraka (primenom Grejovog koda) u tom zadatku ima oblik .....010 011 001 000 001 011 110 111 101 100 101 111 110..... Postoji nekoliko varijanti impulsne kodne modulacije. Osim obične IKM, kod koje se svaki odbirak koduje u celini i nezavisno od okolnih odbiraka, voma su interesantne još dve varijante: diferencijalna IKM (DIKM) i delta modulacija (DM ili ΔM).

Kod DIKM obično se koristi učestanost odabiranja koja je nešto veća od minimalne, određene pomoću teoreme o odabiranju. Nakon odabiranja, kvantizuje se i koduje razlika susednih odbiraka. Broj kvantizacionih nivoa znatno je manji nego kod obične IKM i iznosi $q = 4, 8\ ili\ 16$. Na ovaj način, indirektno koristeći činjenicu da se uzastopni odbirci signala (memorija signala) menjaju u malim koracima, smanjuje se broj bita potrebnih za prenos signala. Nedostatak postupka jeste opasnost od nagomilavanja greške. Postoje i varijante adaptivne DIKM, kod kojih se koraci kvantizacije prilagođavaju brzini promene amplitude signala.

Kod DM koristi se znatno veća učestanost odabiranja od minimalne. Razlike odbiraka koduju se samo sa po jednim bitom, pri čemu se porast koduje npr. jedinicom, a opadanje signala nulom.

Ako se IKM signal posmatra kao povorka pravougaonih ili nekih drugih impulsa trajanja T_B, koji prenose digitalnu informaciju, može se reći da takav signal ima teoretski beskonačno širok spektar. U praksi se usvaja da je širina spektra IKM signala konačna i da se nalazi u granicama:

$$B = k / T_B, \quad 0.5 < k < 2. \tag{4.4.1}$$

Konstanta k zavisi od oblika impulsa i mora se na neki način unapred definisati.