



Osnove telekomunikacija

Prof. dr Igor Radusinović (igorr@ucg.ac.me)

Prof. dr Enis Kočan (enisk@ucg.ac.me)

Dr Slavica Tomović (slavicat@ucg.ac.me)

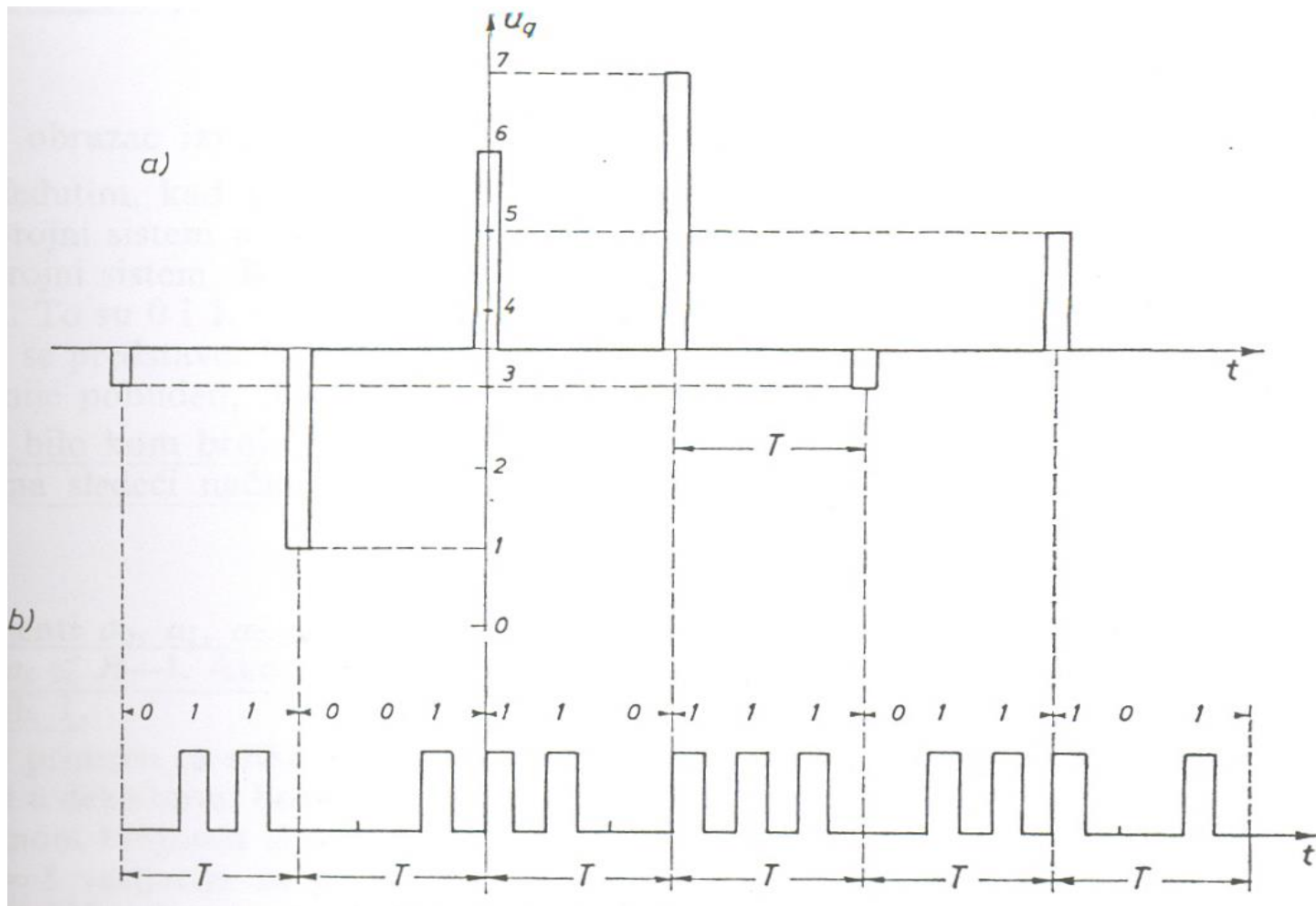
Sadržaj

- **Impulsno kodna modulacija - IKM**
- Digitalne modulacije
 - ASK
 - FSK
 - PSK
 - M-QAM
- Digitalni komunikacioni sistemi

Impulsno kodna modulacija - IKM

- Impulsna kodna modulacija spada u grupu impulsnih modulacija, jer modulirani signal ima diskretan talasni oblik.
- Riječ je o postupku koji je predstavnik digitalnih modulacija.
- Osim oznake IKM mnogo češće se koristi oznaka **PCM** (*Pulse Code Modulation*).
- Prva ideja o prenosu signala impulsno kodnom modulacijom patentirana je 1938. god.
- Princip na kome počiva postupak IKM zasniva se na diskretizaciji kontinualnih poruka, odnosno njima odgovarajućih signala.
- **U osnovi IKM-a su teorema o odabiranju i kvantizacija.**
- Postupkom kvantizacije se već na samom početku pravi izvjesna greška
 - Veličina greške zavisi od broja kvantizacionih nivoa, odnosno od “finoće” zaokruživanja.

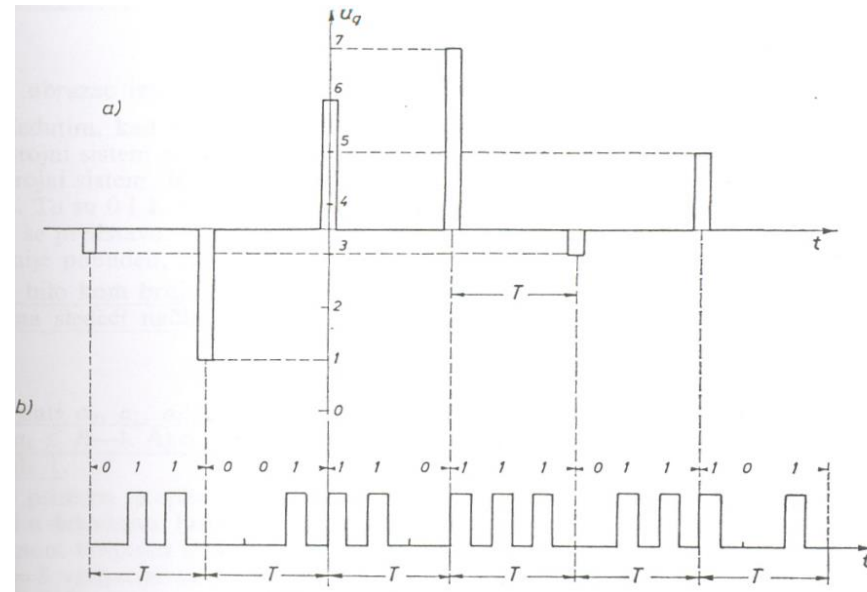
Impulsno kodna modulacija - IKM



a) Kvantizirani odbirci signala $u(t)$; b) odgovarajući IKM signal

Impulsno kodna modulacija - IKM

- Imamo konačan skup diskretnih vrijednosti odbiraka.
- U električnom smislu, mnogo je povoljnije numerisanje odbiraka ciframa binarnog brojnog sistema, jer on ima svega dva različita stanja: 0 i 1.
- Ovakva dva simbola u nekom električnom sistemu mogu vrlo lako da se predstave (npr. 1 – ima “struje”, 0 – nema “struje”).



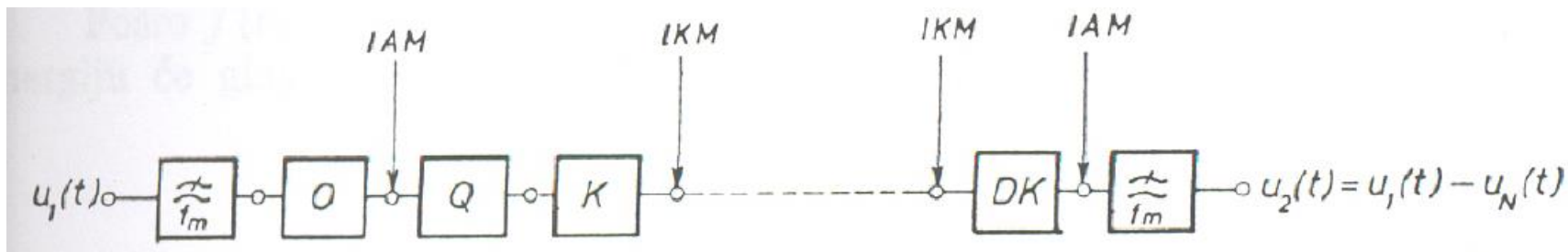
- Ako je broj kvantizacionih nivoa koji se primjenjuje u IKM sistemu jednak q , onda broj bita, n , kojim će se predstaviti svaki odbirak, mora da zadovolji uslov:

$$q \leq 2^n$$

Impulsno kodna modulacija - IKM

- Ovakvim postupkom modulacije **problem prijema svodi se na jednostavan problem odlučivanja**.
 - Prijemnik treba svaki put da odgovori na pitanje da li je u datom intervalu predajnik poslao impuls ili ne.
 - Talasni oblik primljenog signala može biti značajno deformisan.
- Svi uređaji i sklopovi jednog ovakvog sistema mogu biti mnogo jednostavniji i manje precizni nego u analognim sistemima prenosa.
- Druga prednost je u tome što se u ovim sistemima **može tolerisati znatno veći šum** nego u analognim sistemima.
 - Koriste se regenerativne (obnavljačke) stanice za prenos na veće rastojanja, dok se kod analognih sistema koriste pojačavačke stanice, koje pojačavaju i signal i šum
- Glavni nedostatak sistema sa IKM-om je to što su sva poboljšanja postignuta na račun širine propusnog opsega koji sistem mora da ima.
 - IKM se ne primjenjuju na magistralnim trasama sa velikim brojem kanala.
 - Ali zato sistemi multipleksa sa IKM pokazuju svoju ekonomičnost u vezama nakratkim rastojanjima.

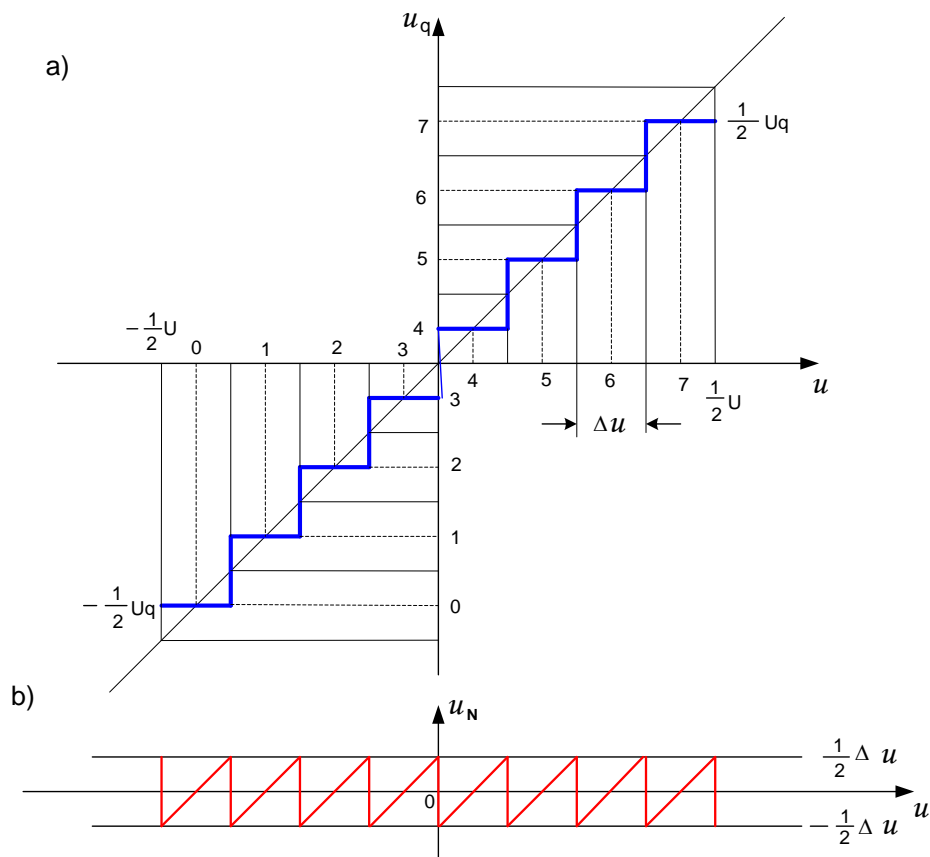
Impulsno kodna modulacija - IKM



- Operacija predstavljanja diskretnih odbiraka odgovarajućom binarnom sekvencom se obavlja u **koderu**.
- Ovakav signal prenosi se kroz sistem do prijemnika
 - Poznavajući kod, ovi impulsi mogu ponovo da se pretvore u odgovarajuće odbirke.
 - Taj proces se obavlja u **dekoderu** i kaže se da je signal dekodiran. Propuštajući dekodirane impulse potom kroz niskofrekventni filter, na njegovom izlazu dobiće se signal $u_q(t)$.
 - Ako učinjena greška kvantizacije $u_N(t)$ nije velika, $u_q(t)$ se neće mnogo razlikovati od $u(t)$ i prenos će biti prihvatljiv.
- Ovakvi sistemi prenosa diskretnog tipa u kojima se u stvari prenose brojevi nazivaju se **digitalnim sistemima prenosa**.

Impulsno kodna modulacija - IKM

- Za procjenu greške kvantizacije koristi se **snaga šuma kvantizacije** koja predstavlja **srednju kvadratnu vrijednost greške kvantizacije**.



a) Karakteristika kvantizatora ; b) karakteristika greške kvantizacije

Ravnomjerna kvantizacija

- Karakteristika ravnomjerne kvantizacije je stepenasta funkcija, pri čemu su na apcisi nanese vrednosti odbiraka u , signala $u(t)$, a na ordinati vrednosti kvantiziranih odbiraka u_q .
- Ako sa q označimo broj kvantizacionih nivoa, onda je:

$$U = q\Delta u$$

$$U_q = (q-1)\Delta u$$

- Neka je $p(u)du$ vjerovatnoća da se amplituda odbirka signala $u(t)$, koji kvantiziramo, nalazi u intervalu od u do $u + du$.
- Srednja kvadratna vrednost greške u intervalu (u_i, u_{i+1}) biće :

$$\overline{u_{Ni}^2} = \int_{u_i}^{u_{i+1}} (u - u_{qi})^2 p(u) du$$

- Ukupna srednja kvadratna vrednost greške $\overline{u_N^2}$ biće jednaka sumi vrednosti $\overline{u_{Ni}^2}$ iz svih intervala.

Ravnomjerna kvantizacija

- Ukupna srednja kvadratne vrijednost greške kvantizacije, koja se još i označava kao **snaga šuma kvantizacije** je jednaka:

$$P_{Nq} = \overline{u_N^2} = \frac{1}{12} (\Delta u)^2$$

→ Zavisu samo od koraka kvantizacije!!

- Za ocjenu kvaliteta samog postupka kvantizacije služi **odnos srednje snage kvantiziranog signala i snage šuma kvantizacije**, i on se jednostavno naziva - **odnos signal/šum kvantizacije**.
- Ako su sve vrijednosti odbiraka signala $u(t)$ jednako vjerovatne, onda je je srednja snaga signala:

$$P_s = \int_{-\frac{1}{2}U}^{\frac{1}{2}U} u^2 p(u) du = p_0 \int_{-\frac{1}{2}U}^{\frac{1}{2}U} u^2 du = \frac{1}{12} p_0 U^3 \quad \text{ili} \quad P_s = \frac{1}{12} U^2 = \frac{1}{12} q^2 (\Delta u)^2$$

Ravnomjerna kvantizacija

- **Srednja snaga kvantiziranog signala je jednaka:**

$$P_s - P_{Nq} = \frac{1}{12} q^2 (\Delta u)^2 - \frac{1}{12} (\Delta u)^2 = \frac{q^2 - 1}{12} (\Delta u)^2 = P_q$$

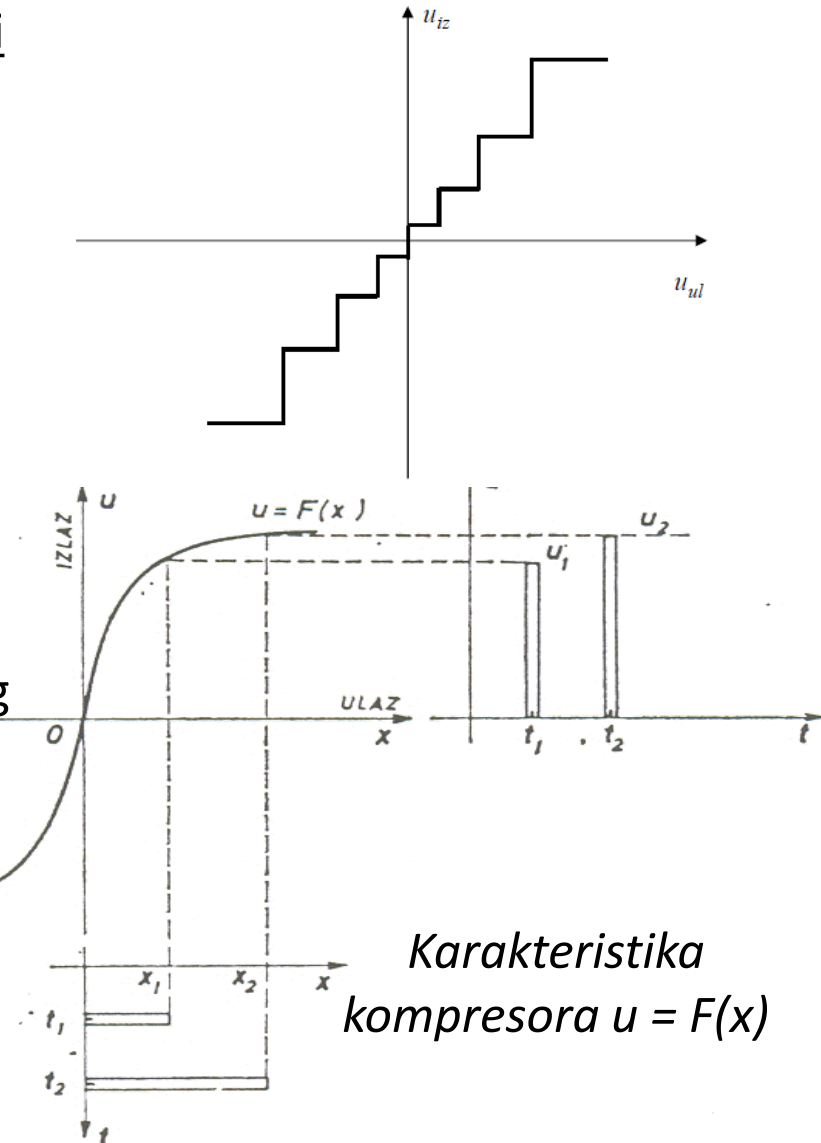
- Traženi **odnos srednje snage kvantiziranog signala i šuma kvantizacije** koji postoji na izlazu iz predajnika biće jednak

$$A_{Nq} = \frac{P_q}{P_{Nq}} = q^2 - 1 \quad \text{tj.} \quad A_{Nq} \cong q^2$$

- Izraženo u decibelima: $a_{Nq} = 10 \log A_{Nq} = 10 \log(q^2 - 1) \cong 20 \log q$
- Eksperimentalno je utvrđeno da je 16, pa čak i 8 kvantizacionih nivoa dovoljno za dobru razumljivost prenesenog **govora**. Međutim, pri ovakvom broju nivoa šum je veoma izrazit.
 - Za kvalitet koji se smatra besprekornim koristi se **128 kvantizacionih nivoa**.

Neravnomjerna kvantizacija

- Ako u statistici signala preovlađuju signali malih amplituda, ravnomjerna kvantizacija ne predstavlja optimalno rješenje.
- Zadržavajući isti broj koraka kvantizacije q , bolje je uzeti male korake kvantizacije za signale malih amplituda, a veće za signale većih amplituda, jer će na taj način ukupan odnos signal/šum kvantizacije biti poboljšán.
- Za praktičnu realizaciju neravnomjerne kvantizacije, najprije se odbirci primarnog signala propuste kroz jedan nelinearan sklop koji se naziva **kompresor**.
- Na odbirke na izlazu iz kompresora se zatim primjenjuje ravnomjerna kvantizacija!

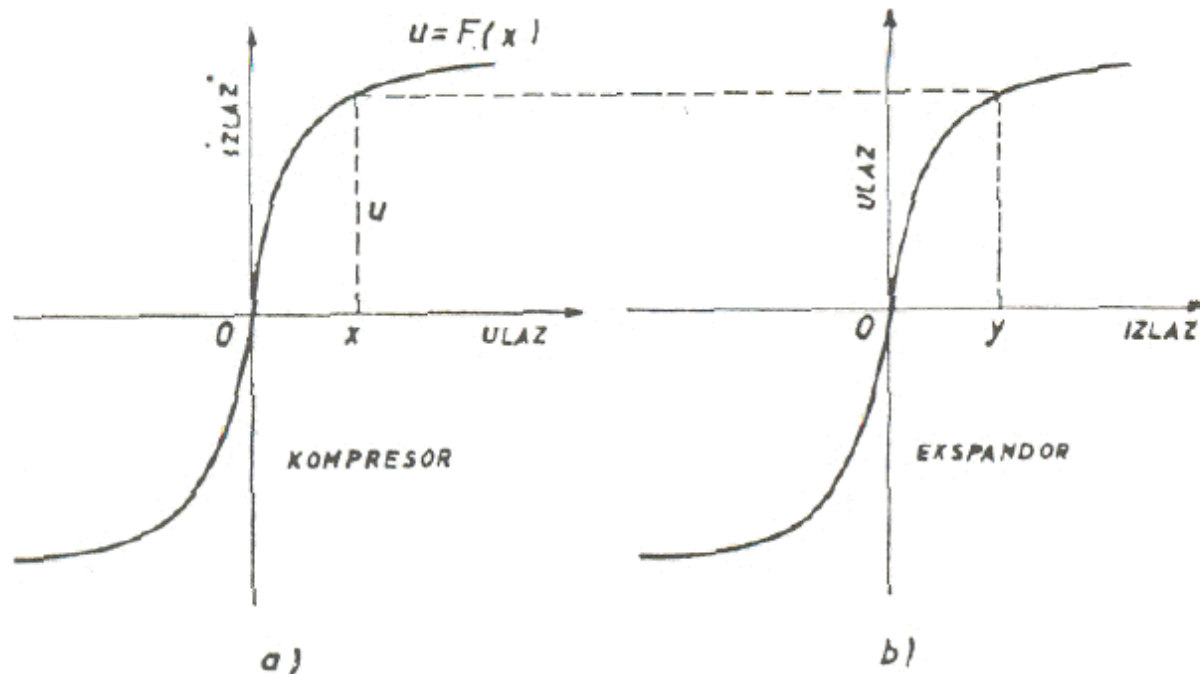


Neravnomjerna kvantizacija

- Za karakteristiku kompresora kakva je zadana na slici, odbirci malog intenziteta se znatno više pojačavaju od odbiraka velikog intenziteta.
 - Na taj način dijapazon između malih i velikih amplituda koji postoji na ulazu u kompresor, na izlazu biva komprimovan
 - Nakon primjene ravnomjerne kvantizacije, odbirci malog intenziteta biće “finije” kvantizirani od onih velikog intenziteta
- Karakteristika kompresora $u = F(x)$ zavisi od statistike signala!
- Na prijemnoj strani potrebno je obaviti operaciju inverznu kompresiji, da bi se dobili originalni odbirci.
 - To se obavlja sklopom koji se naziva **ekspandor**.
 - Karakteristika ekspandora je ista kao i karakteristika kompresora, s tim što ona predstavlja zavisnost “ulaza od izlaza”, a ne “izlaza od ulaza”

Neravnomjerna kvantizacija

- **Karakteristike kompresora i ekspandora moraju biti komplementarne** u tom smislu da, ako se vežu u tandem kompresor - ekspandor, ulaznom signalu x u kompresor mora da odgovara izlazni signal y iz ekspandora takav da je $y = x$.
 - To je uslov da ovaj tandem, poznat pod nazivom **komparator**, ne unosi izobličenje.



Neravnomjerna kvantizacija

- Opšti izraz za srednju kvadratnu grešku kvantizacije na izlazu iz sistema sa neravnomjernom kvantizacijom, za neku datu karakteristiku kompresije $u = F(x)$ je oblika:

$$\overline{u_N^2} = \frac{1}{12} \frac{U^2}{q^2} \int_{-\frac{U}{2}}^{\frac{U}{2}} \frac{p(x)}{[F'(x)]^2} dx$$

- U IKM sistemu sa neravnomjernom kvantizacijom, na izlazu iz ekspandora dobiće se kvantizirani odbirci prenošenog signala.
 - Kada se oni dovedu na ulaz NF filtra, signal na njegovom izlazu predstavljaće kvantizirani signal $u_q(t)$.



- O – predajni odabirač ; C – kompresor ; $Q+K$ - sklop za kvantiziranje i kodiranje;
 D – dekodier ; E – ekspandor.

Sadržaj

- Impulsno kodna modulacija - IKM
- **Digitalne modulacije**
 - ASK
 - FSK
 - PSK
 - M-QAM
- Digitalni komunikacioni sistemi

Digitalne modulacije

- Postupci modulacija kod kojih je modulišući signal digitalni, označavaju se kao **digitalne modulacije**.
- Koncept osnovnih tipova digitalnih modulacionih postupaka se ne razlikuje od koncepta analognih modulacija.
 - Pomoćni signal je prostoperiodični nosilac, koji ima 3 značajna parametra (amplitudu, frekvenciju i fazu), pa se u skladu sa načinom utiskivanja poruke (modulišušeg signala) u nosilac razlikuju:
 1. ASK – *Amplitude Shift Keying*
 2. FSK – *Frequency Shift Keying*
 3. PSK – *Phase Shift Keying*
 - Kao rezultat modulacije dobijamo analogni modulisani signal, tj. nosilac sa promjenljivim, ali diskretnim vrijednostima značajnih parametara.
 - Broj različitih diskretnih vrijednosti odgovara veličini alfabeta digitalnog modulišućeg signala, ***M***.
- Danas su od posebnog značaja višenivoovski amplitudsko-fazni digitalni modulacioni postupci (*M*-QAM).

ASK

- Kod ovog tipa modulacije, informacija se utiskuje u **amplitudu nosioca**. Amplituda može imati jednu od M diskretnih vrednosti:

$$u(t) = a_k U_0 \cos(2\pi f_0 t + \phi), \quad a_k = 0, \dots, M - 1$$

- Kao što se iz izraza za ASK signal može vidjeti, modulacije se realizuje množenjem informacionog signala sa nosiocem (produktna modulacija)
- Uobičajeno je da se digitalni modulacioni postupci predstavljaju vektorski, na **fazorskom (ili konstelacionom) dijagramu**, na kojem se mogu prikazati amplitude i faze signala.
- Kod ASK modulacije fazor modulisanog signala je uvijek realan. Moguće vrijednosti fazora modulisanog signala označavaju se tačkama u kompleksnoj ravni.
- Fazorski dijagram M -arne ASK modulacije je prikazan na slici:

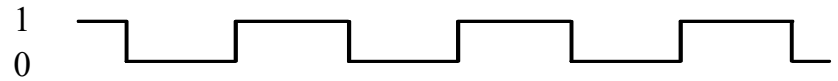


ASK

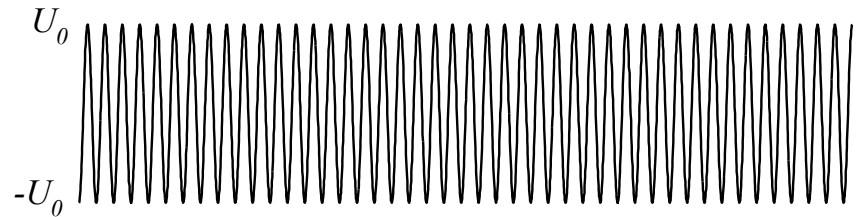
- U najprostijem slučaju binarnog modulišućeg signala, na fazorskim dijagramu bi postojale samo 2 tačke, koje bi predstavljale različite amplitude za binarnu nulu i jedinicu.
 - Vremenski oblik ASK signala za ovaj slučaj se može zapisati kao:

$$u(t) = \begin{cases} U_1 \cos(2\pi f_0 t + \phi) & \text{binarna 1} \\ U_2 \cos(2\pi f_0 t + \phi) & \text{binarna 0} \end{cases}$$

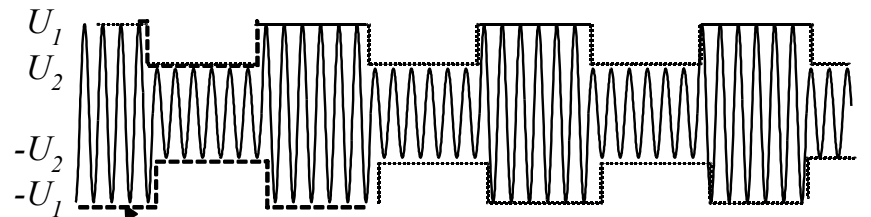
Binarni
modulišućí
signal



Nosilac



ASK
signal



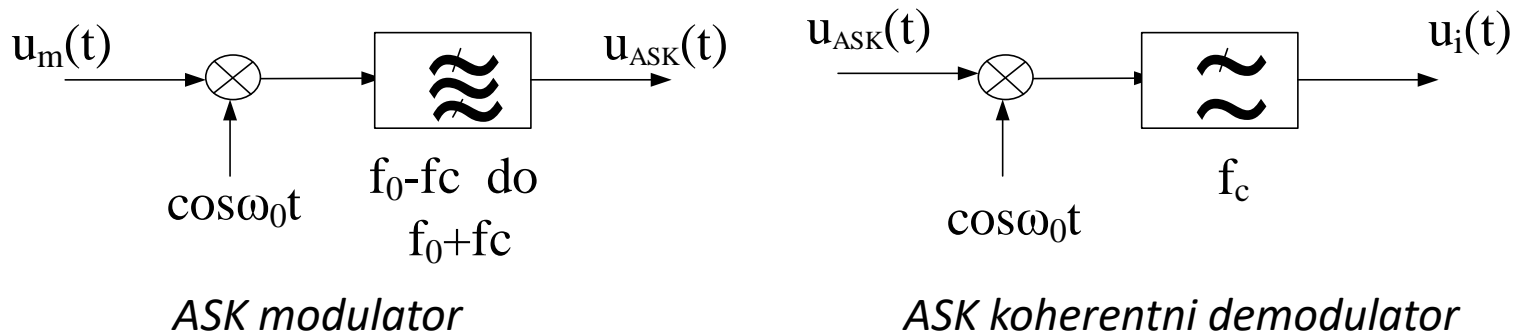
Anvelopa modulisanog
signala

ASK

- Spada u linearne modulacione postupke
- Širina spektra modulisanog signala je dva puta veća od širine opsega signala u osnovnom opsegu
- Jednostavna je za realizaciju, ali je **veoma osjetljiva na uticaj šuma**, kao **i na nelinearnosti primijenjenih sklopova**, jer je poruka skrivena u amplitudi
 - Da bi se izbjegli takvi problemi, svi elementi sistema moraju funkcionisati u linearnom režimu, daleko od oblasti maksimalne snage
 - Zato nije našla neku značajniju primjenu
 - Posebna vrsta ASK modulacije, OOK (OOK – *On-Off Keying*, signal tipa “sve ili ništa”) primjenjuje se u optičkim komunikacijama i koristila se u prenosu Morse-ovog koda radio putem.
- ASK signali se mogu demodulisati **sinhrono i asinhrono** (OOK modulacija).

ASK

- Na slici je prikazana realizacija ASK komunikacionog sistema, za slučaj koherentne demodulacije
- Podrazumijeva se da je $u_m(t)$ binarna informaciona povorka, čiji se spektar u osnovnom opsegu može ograničiti učestanošću f_c , u skladu sa Nuquist-ovim kriterijumom



- Kada je modulišući signal unipolarni binarni signal, dobija se **OOK** modulirani signal na izlazu prikazanog modulatora
 - U tom slučaju je moguće obaviti **nekoherentu demodulaciju**, korišćenjem kola detektora anvelope (DA)

FSK

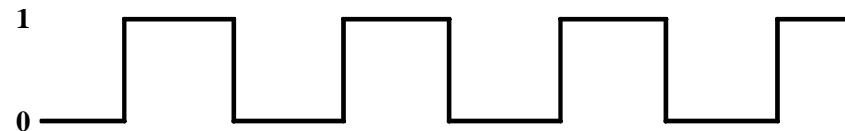
- Amplituda i faza signala su konstantne, a digitalna informacija se prenosi skokovitim promjenama frekvencije nosioca
 - Broj različitih učestanosti odgovara broju mogućih stanja digitalnog signala
 - Učestanosti se mijenjaju sa korakom Δf oko centralne učestanosti f_0

$$u(t) = U_0 \cos \left[2\pi (f_0 + a_k \Delta f) t + \phi \right], \quad a_k = -M / 2, \dots, -1, 1, \dots, M / 2$$

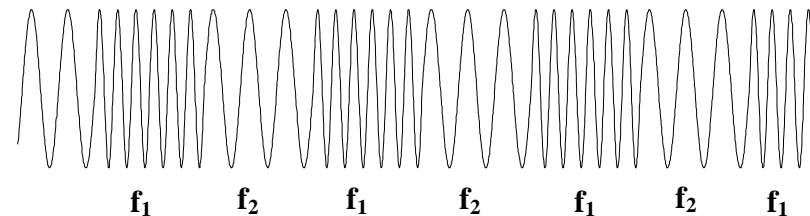
- U slučaju binarnog modulišućeg signala, postoje samo 2 frekvencije modulisanog FSK signala, tj. jedna za prenos binarne nule i druga za prenos binarne jedinice.

$$u(t) = \begin{cases} U_0 \cos(2\pi f_1 t + \varphi) & \text{binarna } 1 \\ U_0 \cos(2\pi f_2 t + \varphi) & \text{binarna } 0 \end{cases}$$

Binarni
modulišućí
signal



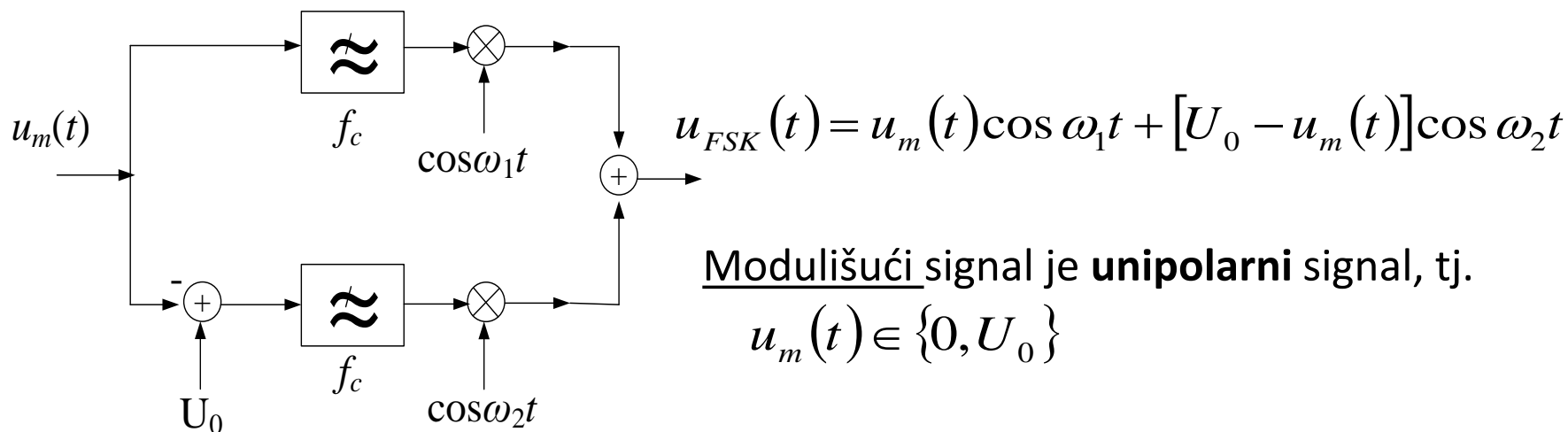
FSK
signal



FSK

- Spada u nelinearne modulacione postupke
- Širina spektra modulisanog signala je beskonačna, ali se u skladu sa kriterijumom o značajnim komponentama može izraziti preko **Carsonovog** obrasca $B=2 \cdot f_c(m+1)$
- Moguće je obaviti koherentnu i nekoherentnu demodulaciju FSK signala
- Performanse FSK sistema zavise od tipa demodulatora
- Uzimajući u obzir izrazitu nelinearnost ovog modulacionog postupka, rijetko je primijenjivana u praksi u ovoj formi
 - Međutim, neki modulacioni postupci izvedeni iz FSK imaju primjenu u pejdžing sistemima, bežičnim telefonskim sistemima (DECT - *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*), senzorskim mrežama, Bluetooth tehnologiji, 2G mobilnim komunikacionim sistemima (GSM),...

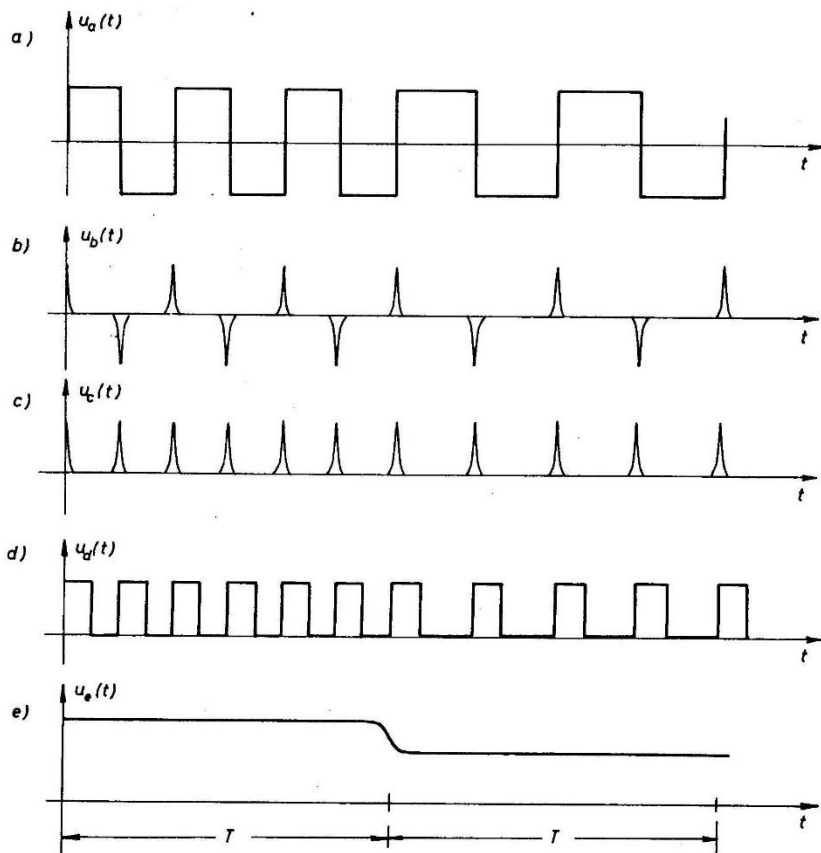
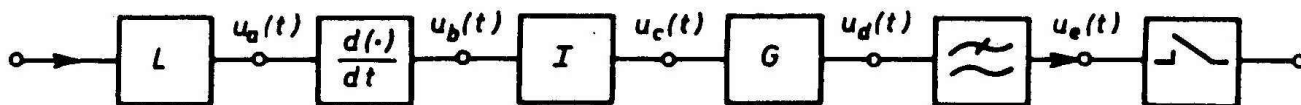
Primjer FSK modulatora



- Neki od tipova FSK demodulatora su:
 - Sa limiter-diskriminatorom
 - Sa detektorom presjeka sa nulom
 - Sa diferencijalnim detektorom
 - Sa koherentnim demodulatorom (CFSK)
 - Sa detektorom anvelope - DA (nekoherentni demodulator - NCFSK)

Primjer FSK demodulatora

- Na slici je prikazana blok šema **detektora presjeka sa nulom** kao i oblici signala u naznačenim karakterističnim tačkama ove šeme.



Kada se na ulaz limitera dovede FSK signal, na njegovom izlazu se dobija signal sastavljen od skoro pravougaonih impulsa.

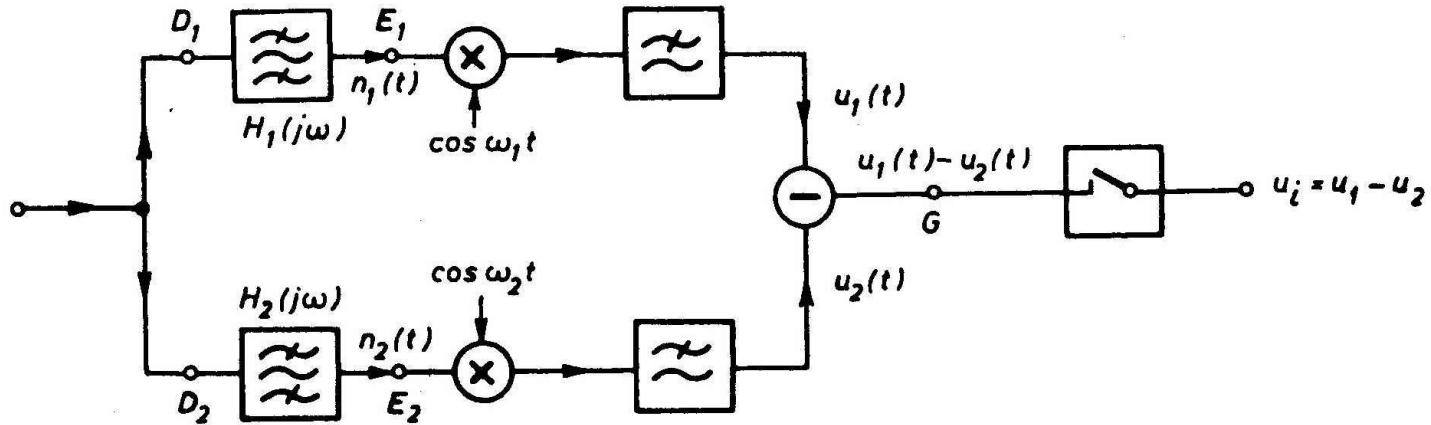
Ovakav signal na izlazu diferencijatora daje povorku naizmjeničnih impulsa.

Kada se impulsi negativnog polariteta isprave ispravljačem I, dobija se povorka impulsa kao na slici c), koja upravlja radom generatora impulsa G.

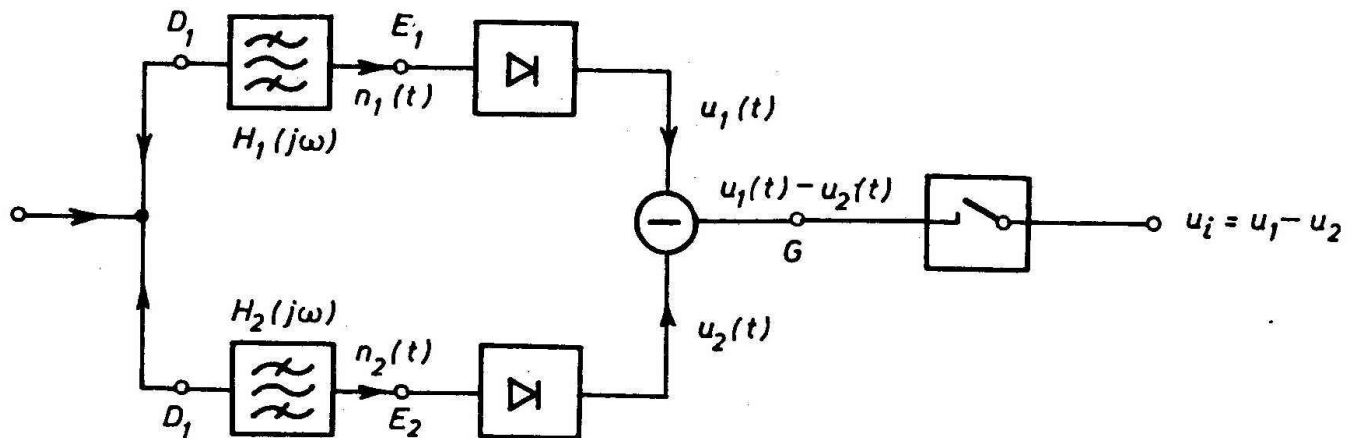
Na njegovom izlazu dobijaju se pravougaoni impulsi jednakih trajanja i jednakih amplituda. Njihov broj po jedinici vremena predstavlja broj presjeka FSK signala sa nulom.

Usrednjavanjem ovih impulsa iz povorke sa slike d), što je moguće učiniti propuštanjem kroz NF filter, dobiće se signal kao na slici e).

Primjer FSK demodulatora



Koherentni FSK demodulator



FSK demodulator sa detektorom anvelope – nekoherentni FSK demodulator

PSK

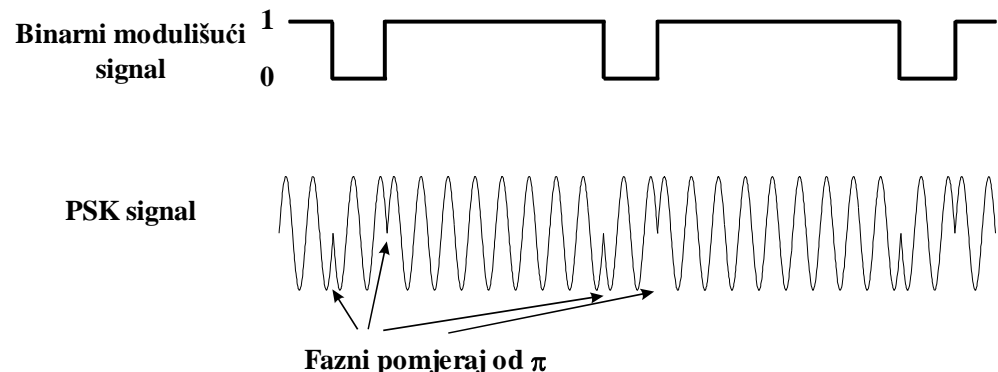
- Amplituda i frekvencija signala su konstantne, a digitalna informacija se prenosi skokovitim promjenama faze nosioca
 - Broj različitih faza odgovara broju mogućih stanja digitalnog signala
 - Faze se mijenjaju sa korakom $2\pi/M$, gdje je M broj stanja digitalnog modulišućeg signala

$$u(t) = U_0 \cos\left(2\pi f_0 t + a_k \frac{2\pi}{M}\right), \quad a_k = 0, \dots, M - 1$$

- U slučaju binarnog modulišućeg signala, postoje samo 2 faze kod modulisanog PSK signala, pa se takav **BPSK (Binary PSK)** signal može analizirati kao ASK signal sa polarnim modulišućim signalom.

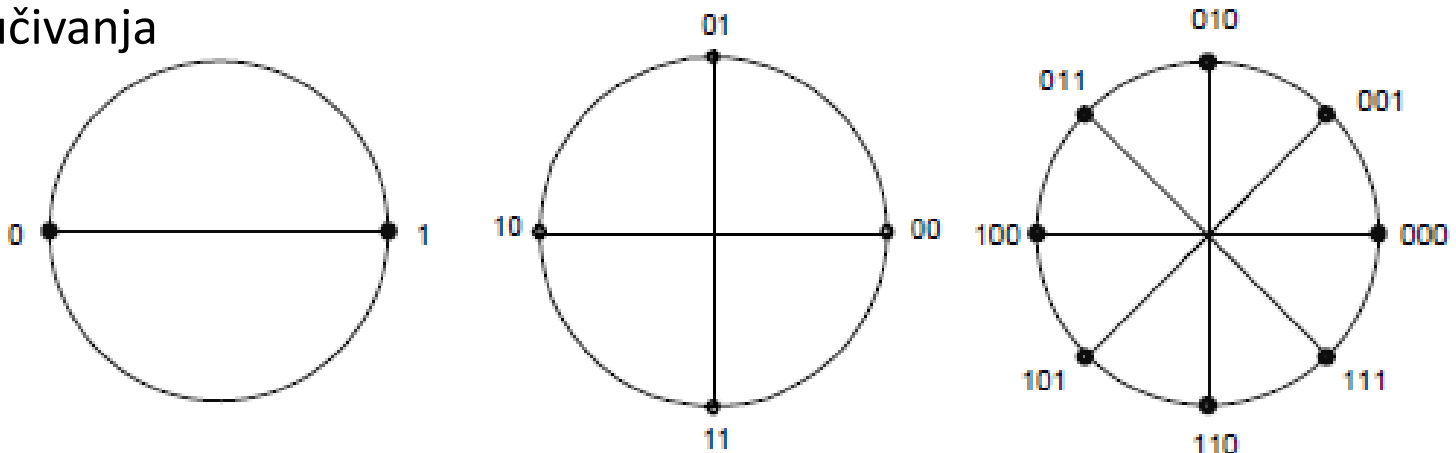
$$u(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + a_k \pi) = \pm U_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

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



PSK

- Na fazorskom dijagramu, BPSK modulacija je predstavljena sa 2 tačke na različitim stranama jediničnog kruga, između kojih postoji fazna razlika π .
- U slučaju kada alphabet, čiji se simboli emituju, ima četiri simbola, simboli su međusobno razmaknuti za $\pi/2$ i tada se radi o **QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)** modulaciji.
- Povećanjem broja nivoa višenivoovske modulacije, povećava se brzina prenosa podataka (uz isti zauzeti opseg), **ili se smanjuje zauzeti opseg** (uz konstantnu brzinu prenosa podataka)
 - Nedostatak je veća vjerovatnoća greške u odnosu na BPSK, jer se smanjuje oblast odlučivanja

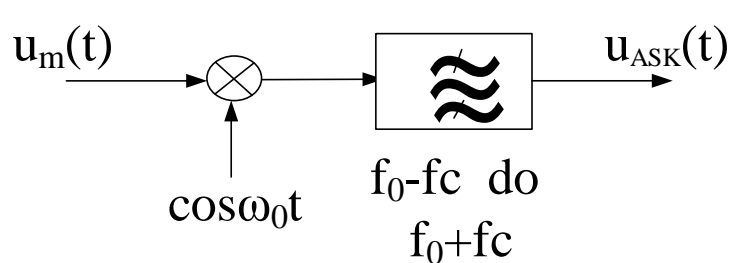


Fazorski dijagrami BPSK, QPSK i 8-PSK modulacija

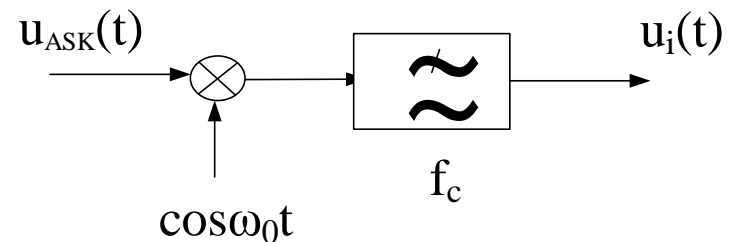
BPSK

- Kao što je matematički i pokazano, u slučaju da je **modulišući signal polarni binarni** signal, onda se BPSK modulacija može analizirati kao ASK modulacioni postupak, pa su i realizacije modulatora i demodulatora identične
 - modulišući signal $u_m(t)$ ima se spektar ograničen učestanošću f_c , u skladu sa Nuquist-ovim kriterijumom

$$u_m(t) \in \{-U_0, U_0\}$$



BPSK modulator



BPSK demodulator

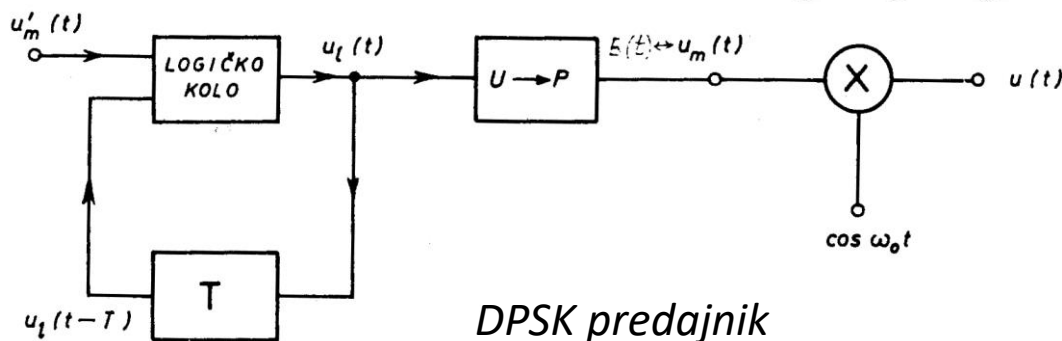
DPSK

- **Diferencijalna fazna modulacija** (DPSK) predstavlja jedno specijalno rješenje u prenosu digitalnih signala faznom modulacijom.
- Njena osnovna prednost je ta što **za demodulaciju diferencijalno fazno moduliranih signala nije potreban lokalni nosilac u prijemu**.
- Diferencijalno fazno modulirani signal predstavlja kombinaciju diferencijalnog kodiranja i fazne modulacije. Dobija se na sledeći način:
 - Neka je binarni unipolarni signal koji treba prenijeti $u'_m(t)$ predstavljen odgovarajućom povorkom "1" i "0". Na osnovu ove povorke generiše se povorka diferencijalno kodiranog signala kojoj odgovara signal $u_m(t)$.
 - Kodiranje se vrši na sledeći način:
 - prvi bit u povorci je proizvoljan, 1 ili 0;
 - dalje, svakoj **nuli** originalne povorke odgovara u diferencijalno kodiranoj povorci promijenjeno stanje u odnosu na stanje iz prethodnog intervala, dok svakoj **jedinici** iz originalne povorke odgovara nepromijenjeno stanje u odnosu na stanje u njenom prethodnom značajnom intervalu.

DPSK

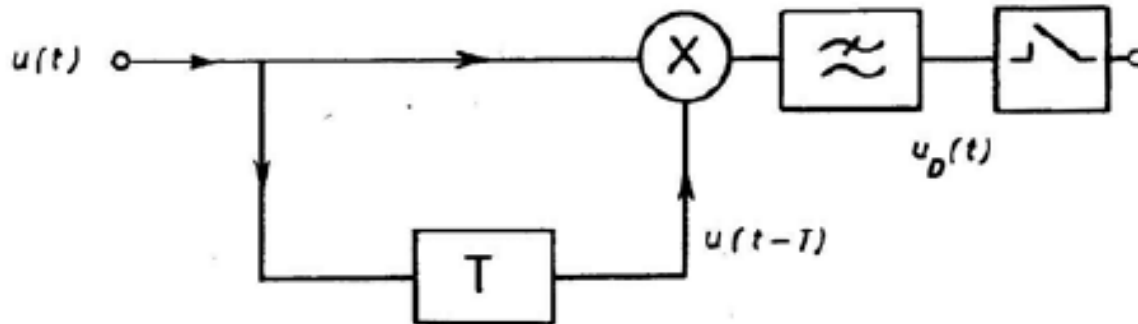
- Ako se dobijena povorka opiše binarnim polarnim signalom $u_m(t)$ i ako se on dovede na produktni modulator kao modulišući signal, na njegovom izlazu će se dobiti diferencijalno fazno modulisan signal $u(t)$. U njemu, **binarnoj brojci 1** odgovara **faza $\Phi=0$** , a **binarnoj brojci 0** **faza $\Phi=\pi$** .

Originalna povorka	0	1	0	1	0	0	1	1	0
Diferencijalno kodirana povorka	1	0	0	1	1	0	1	1	0
Faza DPSK signala	0	π	π	0	0	π	0	0	π
Promjena faze	-	+	-	+	-	-	+	+	-
Primljena poruka	0	1	0	1	0	0	1	1	0



DPSK

- Nedostatak DPSK sistema prenosa je **veća vjerovatnoća greške** u odnosu na PSK sistem, jer se greške javljaju u parovima.
 - Naime, ukoliko se dogodi da se u posmatranom signalizacionom intervalu izmijeni signal toliko da predstavlja onu drugu binarnu cifru, onda će se u donošenju odluke dva puta pogriješiti: biće pogrešna odluka o promjeni značajnog stanja u odnosu na prethodni interval i u odnosu na onaj sledeći.

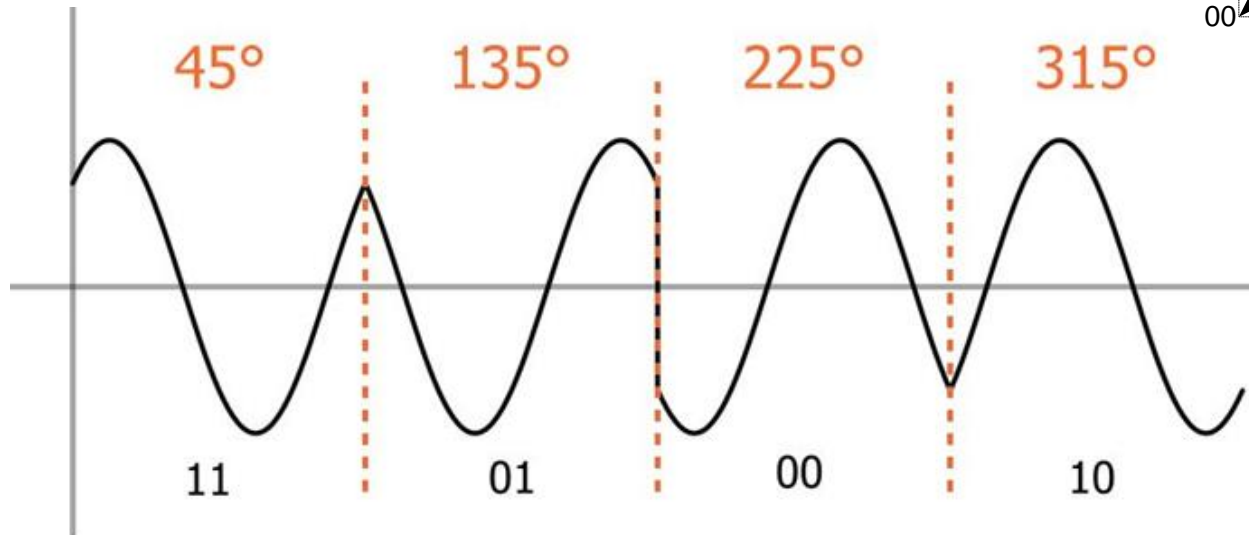
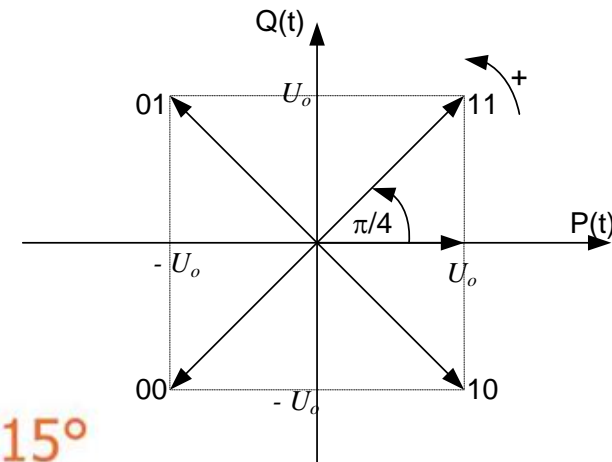


DPSK prijemnik

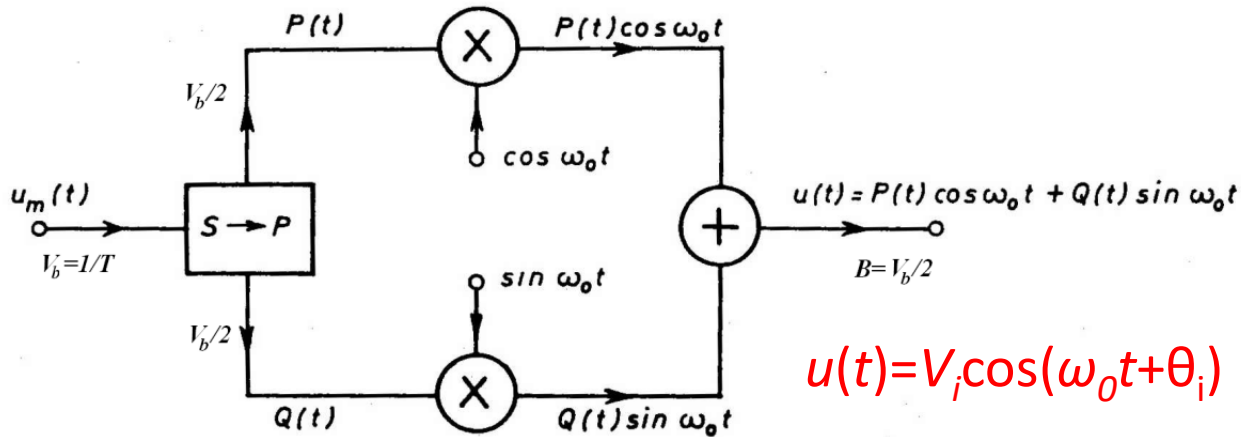
QPSK

- Analitički i vremenski oblik QPSK signala su dati u narednom dijelu

$$u(t) = \begin{cases} U_0 \cos(2\pi f_0 t + 45^\circ) & \text{za kombinaciju } 11 \\ U_0 \cos(2\pi f_0 t + 135^\circ) & \text{za kombinaciju } 01 \\ U_0 \cos(2\pi f_0 t + 225^\circ) & \text{za kombinaciju } 00 \\ U_0 \cos(2\pi f_0 t + 315^\circ) & \text{za kombinaciju } 10 \end{cases}$$



QPSK

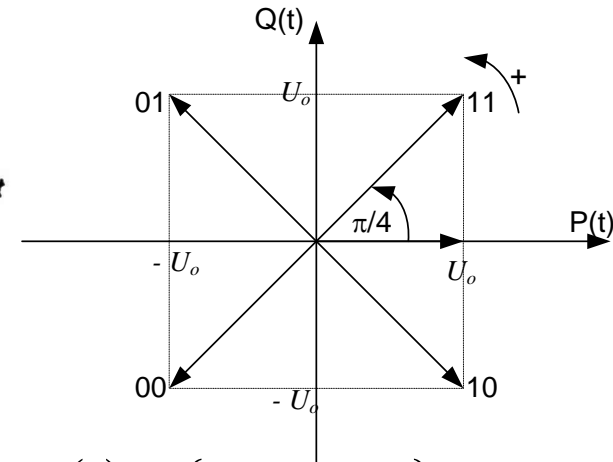


QPSK predajnik

$$u(t) = V_i \cos(\omega_0 t + \theta_i)$$

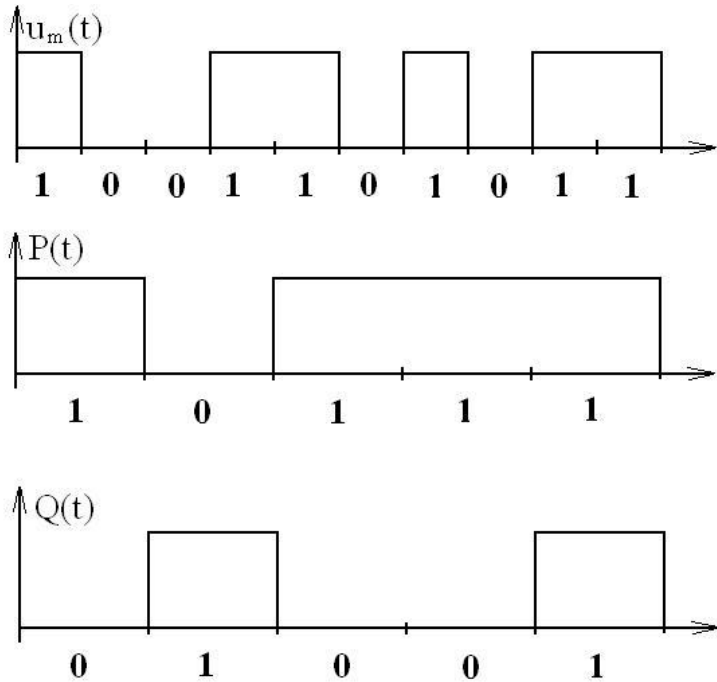
$$P(t) \in \{-U_0, U_0\} \text{ i } Q(t) \in \{-U_0, U_0\}$$

$$V_i = \sqrt{P^2 + Q^2} = U_0 \sqrt{2} \quad \theta_i = \left\{ \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right\}$$

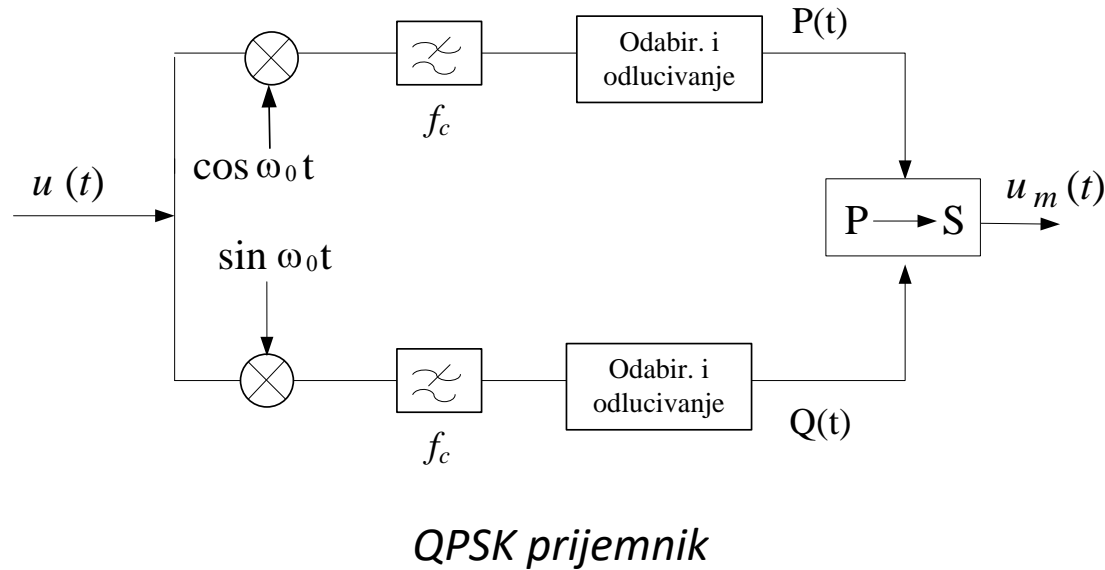


- Sklop **S → P** je konvertor serije u paralelu i ima 2 izlazna stanja.
- Princip funkcionisanja ovog sklopa je sledeći:
 - Trajanje svakog neparnog simbola iz poruke se produžava dva puta i usmjerava u gornju granu (dobija se signal $P(t)$)
 - Trajanje svakog parnog simbola iz poruke se produžava dva puta i usmjerava u donju granu (dobija se signal $Q(t)$)

QPSK



Prikaz signala na ulazu i izlazima
S-P kola

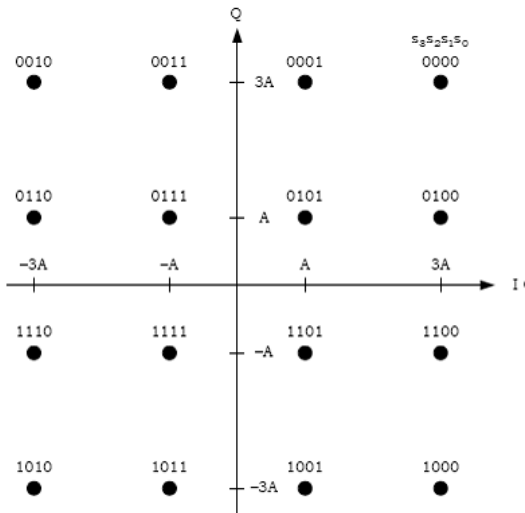


QPSK prijemnik

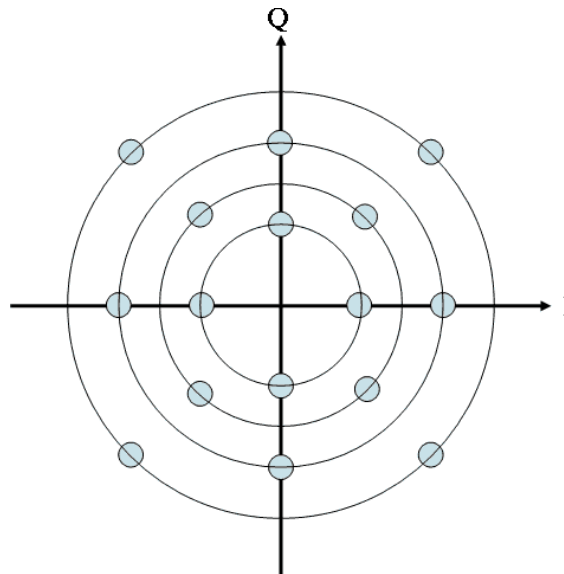
- Sklop **P → S** je konvertor paralele u seriju i obavlja obrnutu funkciju u odnosu na S → P kolo na strani predaje

M-QAM

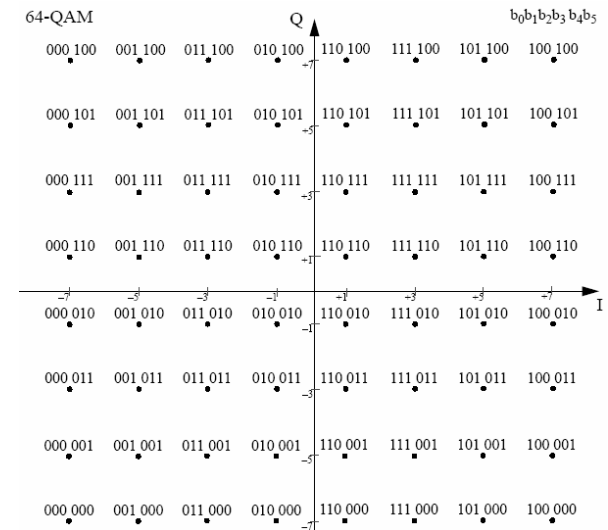
- Predstavlja kombinovanu ASK-PSK modulaciju
- Kao i QPSK modulacija, QAM signal sadrži **komponentu u fazi**, tj. onu koja se množi sa nosiocem oblika $\cos\omega_0 t$, i **komponentu u kvadraturi**, tj. komponentu koja se množi nosiocem oblika $\sin\omega_0 t$
- QAM i QPSK modulacije imaju iste fazorske dijagrame i realizuju se na isti način.



16-QAM (kvadraturna konstelacija)



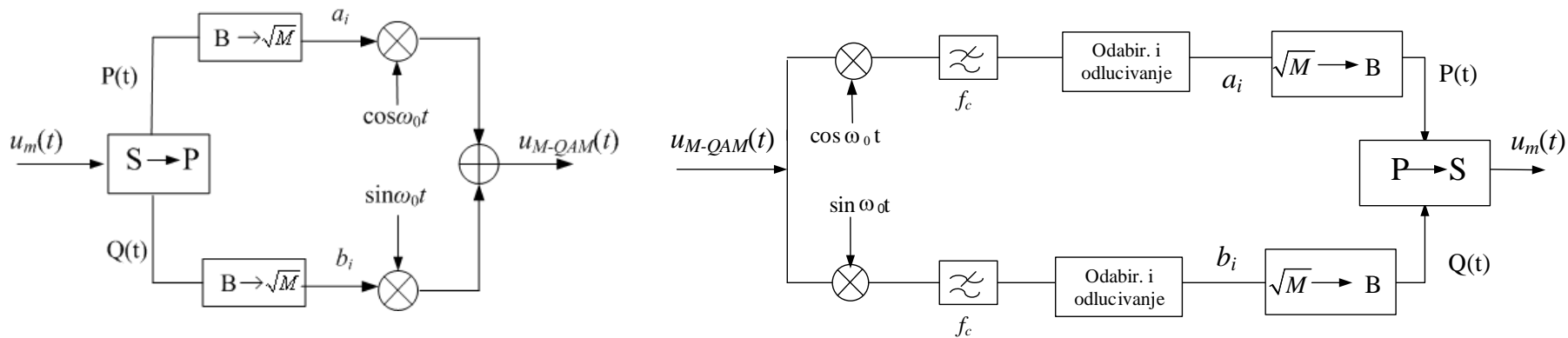
16-QAM (kružna konstelacija)



64-QAM

M-QAM

- Višenivoovske QAM modulacije se danas primjenjuju u gotovo svim sistemima gdje se zahtijevaju velike brzine prenosa podataka
- WiFi mreže, 3G, 4G i 5G mobilni celularni sistemi, digitalna difuzija audio (DAB) i video signala zemaljskim putem (DVB-T),...
- Novi standard za WiFi mreže, IEEE 802.11ax uključuje mogućnost primjene **1024-QAM** modulacije, a u mobilnim celularnim i DVB-T sistemima se koriste modulacije do nivoa 256-QAM.



Principialna šema predajnika i prijemnika M-QAM signala

Sadržaj

- Impulsno kodna modulacija - IKM
- Digitalne modulacije
 - ASK
 - FSK
 - PSK
 - M-QAM
- **Digitalni komunikacioni sistemi**

Digitalni telekomunikacioni sistemi

- Dominatnu primjenu u većini komunikacionih sistema današnjice zauzimaju digitalni telekomunikacioni sistemi
 - Ostali su samo rijetki primjeri gdje se zadržao potpuno analogni prenos.
- Glavne prednosti primjene digitalnih komunikacionih sistema su:
 - Efikasnost dizajna
 - Prilagodljiv hardver
 - Novi i unaprijeđeni servisi
 - Efikasnija kontrola kvaliteta prenosa
 - Poboljšana bezbijednost
 - Fleksibilnost i kompatibilnost

Digitalni telekomunikacioni sistemi

- Sa druge strane, neminovno je da sama priroda realizacije digitalnih komunikacionih sistema nosi sa sobom i neke nedostatke, kao što su:
 - Potrebna širina opsega za prenos
 - Složenost sinhronizacije
 - Veliki pad performansi sistema za scenarije loših komunikacionih uslova
 - Potreba za obimnom obradom signala.

Digitalni telekomunikacioni sistemi

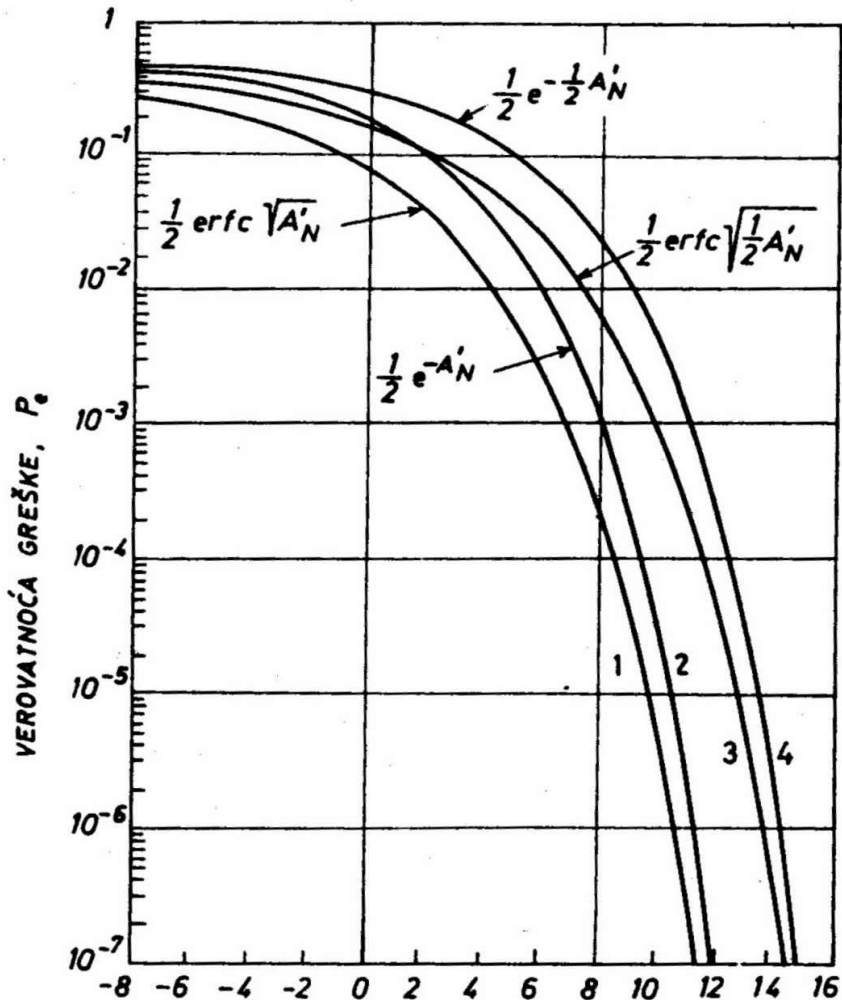
- Kvalitet prenosa digitalnim komunikacionim sistemom se može ocijeniti kroz dva parametra, označena kao:
 1. **Brzina prenosa podataka** - predstavlja broj prenesenih bita (digita) u jedinici vremena, a izražava se kao **b/s** ili **baud**
 2. **Vjerovatnoća greške po bitu (BER – Bit Error Rate)** – predstavlja odnos broja pogrešno rekonstruisanih bita na prijemu i ukupnog broja poslatih bita.
- Oba ova parametra su zavisna od **širine opsega sistema za prenos, B** , koja se izražava u Hercima [Hz], i odnosa snage signala i snage šuma (**SNR – Signal-to-Noise Ratio**) na ulazu u prijemnik.
- **Shannon** je definisao maksimalnu ostvarivu brzinu prenosa podataka bez grešaka, kroz idealan kanal širine B , i za zadati odnos srednje snage signala, S , i srednje snage šuma, N .

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Digitalni telekomunikacioni sistemi

- Sa stanovišta BER-a, digitalni sistem ima bolje performanse, što je vrijednost BER-a manja
- Sa zadatim resursima, potrebno je realizovati sistem koji će uz minimalnu složenost, utrošak energije i spektralnih resursa, ostvariti zahtijevanu vjerovatnoću greške po bitu.
- BER se obično prikazuje u funkciji odnosa **energije bita** (simbola), E_b , i **jednostrane spektralne gustine snage šuma**, N_0
 - Ovaj odnos je direktno vezan sa odnosom signal/šum na ulazu u prijemnik (SNR)
 - Obično su ose u logaritamskom odnosu, tj. E_b/N_0 se izražava u decibelima [dB]
- Osim BER-a, za ocjenu nivoa greške, koriste se još i parametri:
 - vjerovatnoća greške po simbolu (**SER** - *Symbol Error Rate*) i
 - vjerovatnoća greške po paketu (**PER** – *Packet Error Rate*).

Digitalni telekomunikacioni sistemi



Primjeri BER grafika

Kriva 1 predstavlja BER za:

- ASK sa koherentnom demodulacijom, u kome je nosilac modulisan binarnim polarnim signalom,
- BPSK.

Kriva 2 predstavlja BER za DPSK modulaciju.

Kriva 3 predstavlja BER za:

- FSK sa koherentnom demodulacijom,
- ASK (OOK) sa koherentnom demodulacijom.

Kriva 4 predstavlja BER za:

- FSK sa nekoherentnom demodulacijom,
- ASK (OOK) sa nekoherentnom demodulacijom.

Digitalni telekomunikacioni sistemi

- Bez obzira da li se radi o analognom ili digitalnom komunikacionom sistemu, postoje **dva primarna resursa**, a to su:
 1. **Emisiona snaga** i
 2. **Širina kanala za prenos.**
- U zavisnosti od konkretnih realizacionih uslova za neki sistem, jedan od ova dva resursa resursa može biti važniji od drugog, pa se komunikacioni kanali mogu klasifikovati na:
 - **spektralno-ograničene**, kao što je npr. kanal kod javnog telefonskog komunikacionog sistema i
 - **energetski-ograničene**, kakvi su npr. satelitski komunikacioni kanal i kanali kod kablova sa optičkim vlaknima.
- Svaki od ova dva resursa igra veoma bitnu ulogu u dizajnu jednog komunikacionog sistema.

Digitalni telekomunikacioni sistemi

- Pri kreiranju nekog digitalnog komunikacionog sistema, postoji mnogo ciljeva koje treba postići, ali nisu svi oni od iste važnosti.
 - Neki su obavezni, a neki su poželjni
 - Neke je lako postići, a drugi traže značajno povećanje složenosti sistema.
- Nikada nije moguće ostvariti istovremeno sve ciljeve pri kreiranju nekog komunikacionog sistema, jer su oni inherentno međusobno povezani, a mnogi su međusobno suprotstavljeni, pa iziskuju kompromisne izbore.
 - Npr. ostvarenje velike brzine prenosa podataka je suprotstavljeno cilju da se koristi što uži opseg,
 - Cilj ostvarenja male vjerovatnoće greške po bitu je u suprotnosti sa ciljem energetske efikasnosti, u smislu male emisije snage predajnika.
- Dizajn digitalnog komunikacionog sistema i mreže zato predstavlja izazov, pošto je to višedimenzioni, nelinearni problem optimizacije.