



# PRINCIPI MODERNIH TELEKOMUNIKACIJA

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



# Prenos digitalnih signala u transponovanom opsegu učestanosti (TOU)

# Analitički opis digitalnog signala u OOU- opšti slučaj

## \* Digitalni signal

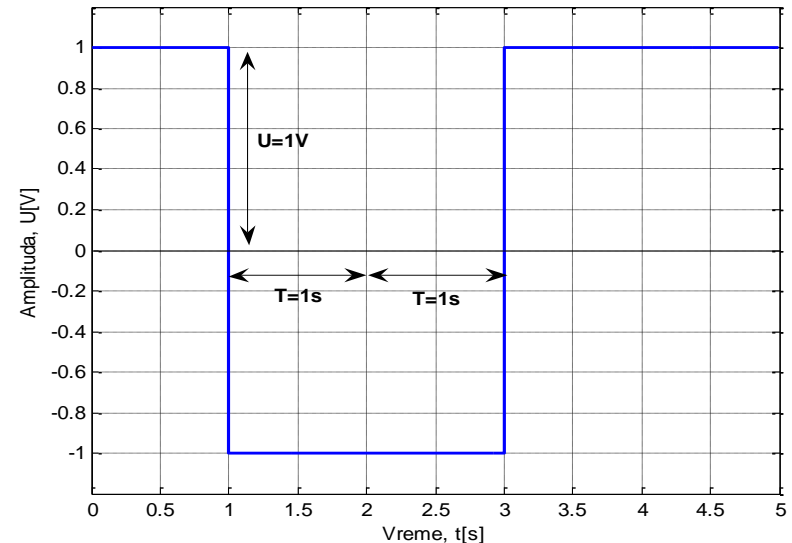
$$u_u(t) = \sum_{k=-N}^N a_k x(t - kT)$$

## \* Dve bitne veličine:

- $x(t)$  je elementarni impuls
- $a_k$  je informacioni sadržaj

## \* Osobine spektra

- Kontinualan i beskonačno širok
- Bitne komponente su na niskim učestanostima
- Bitne komponente u spektru nalaze se približno do prve nule.
- Širina spektra do prve nule je za NRZ signale  $B_{\text{dig}} = 1/T = V_S$
- Za prenos bez ISI dovoljno je  $B_{\text{dig,bez ISI}} = V_S/2$



# Prenos digitalnog signala u OOU/TOU

## \* U osnovnom opsegu učestanosti (OOU)

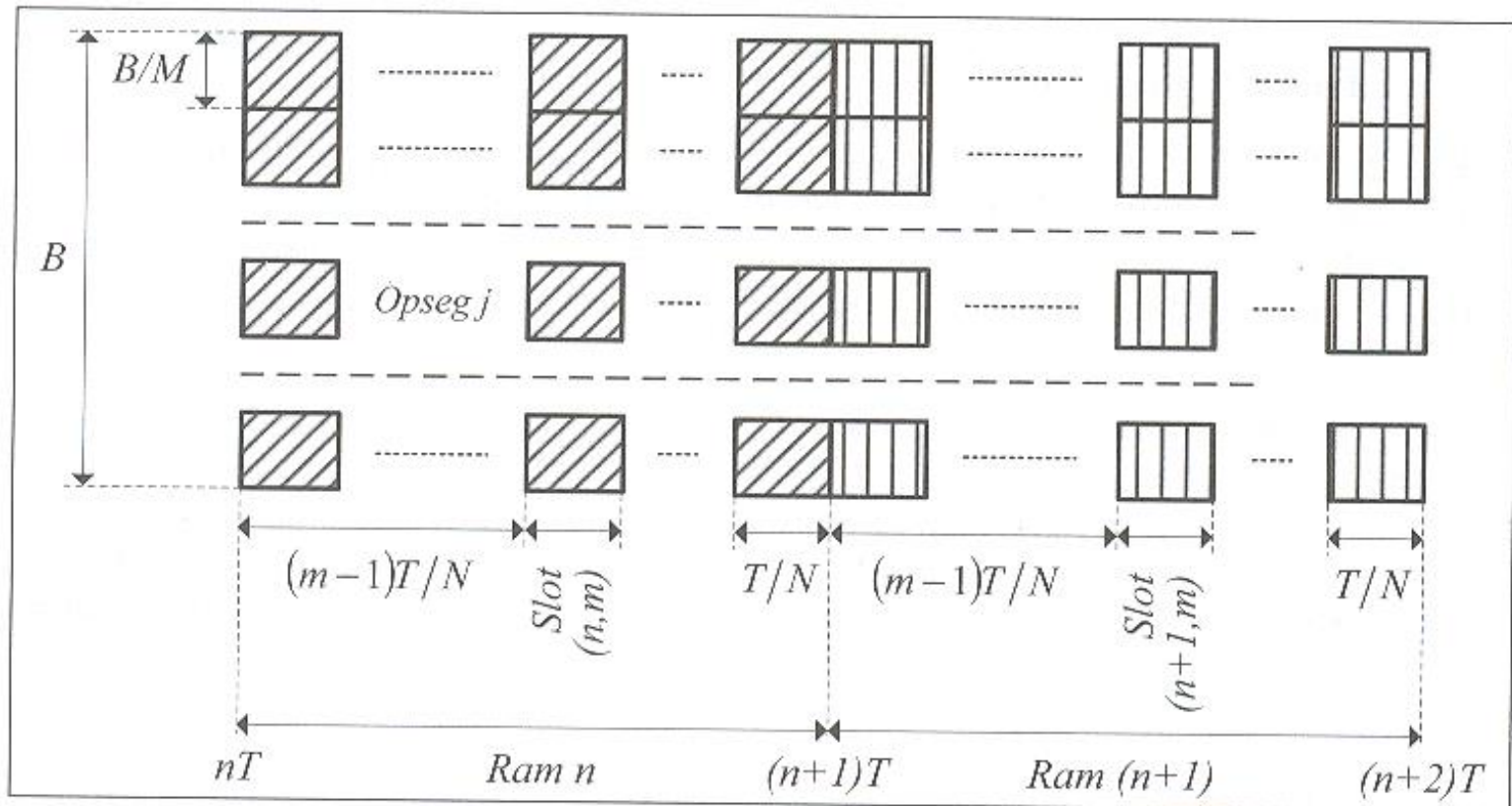
- Prenos digitalnog signala moгуće je obaviti u opsegu učestanosti u kojoj se njegov spektar prirodno nalazi.
- Za ovakav prenos kaže se da je to prenos digitalnog signala u osnovnom opsegu učestanosti (OOU).
- Kanal se opisuje NF filtrom.
- Na ovaj način signal se prenosi preko parica i koaksijalnih kablova.
- Digitalna telefonija, računarske mreže.

## \* U transponovanom opsegu učestanosti (TOU)

- Ponekad se prenos mora obaviti u uskom opsegu oko neke centralne učestanosti. Za ovakav prenos kaže se da je to prenos digitalnog signala u *transponovanom opsegu učestanosti* (TOU).
- Kanal se opisuje filtrom propusnikom opsega učestanosti (POU).
- Neophodno koristiti kada je za prenos signala na raspolaganju određeni opseg na višim učestanostima (*bandpass*), radio-prenos, kao i kad god se u nekom obliku primenjuje FDM pristup.

# FDM/TDM multipleksiranje

- \* Kompletan propusni opseg kanala izdeli se na podopsege
- \* U svakom podopsegu multipleksiranje u vremenu.
- \* Korisniku se dodeli jedan slot (koji se periodično ponavlja) u jednom frekvencijskom kanalu.



# GSM sistem - multipleksiranje

## \* Multipleks je kombinacija

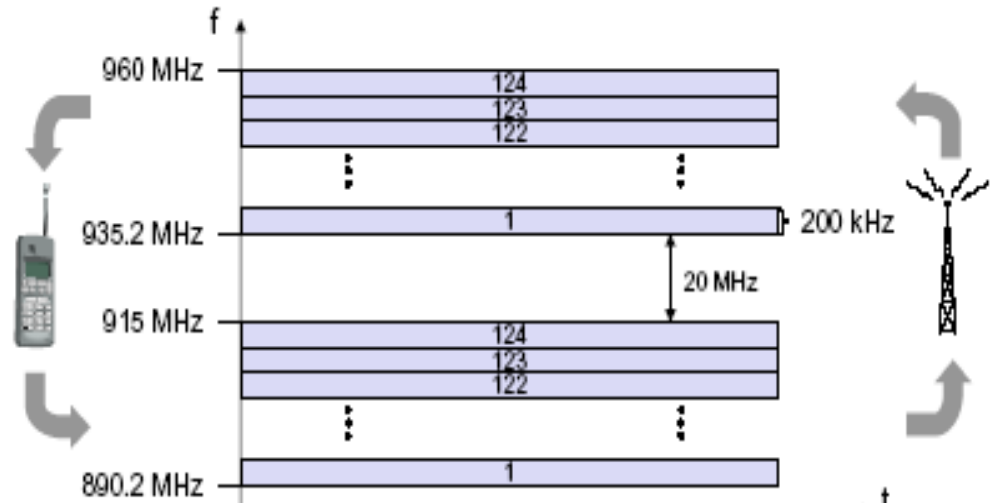
### \* FDMA/FDD (frequency division duplex)

- Uplink na 124 kanala u opsegu 890-915MHz, svaki širok po 200kHz
- Downlink na 124 kanala u opsegu 935-960MHz, svaki širok po 200kHz
- Između izabranog up- i down- kanala razmak 45MHz

### \* TDMA

- Osmam korisnika dele isti kanal (na istom nosiocu).
- Maksimalan (ukupan) protok TDM signala u jednom kanalu je 270kb/s.

Criterion	GSM900
Frequency range (Uplink)	890 MHz - 915 MHz
Frequency range (Downlink)	935 MHz - 960 MHz
Duplexing distance	45 MHz
Bandwidth Up- and Downlink	2 x 25 MHz
Bandwidth of a channel	200 kHz
Access method	FDMA & TDMA
Number of carrier frequencies	124
Timeslots per carrier frequency	8
Channels	992
Bit rate	270,833 KBit/s
Net bit rate for voice	13 KBit/s
Modulation method	GMSK
Cell size (radius)	2 - 35 km
Transmission power of a MS	max. 20 Watt

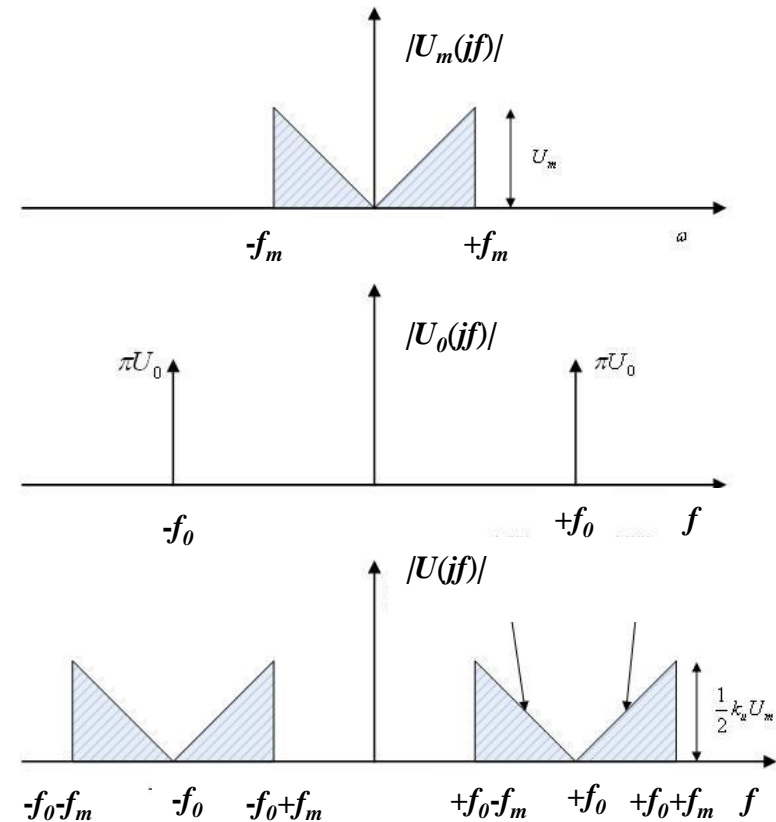
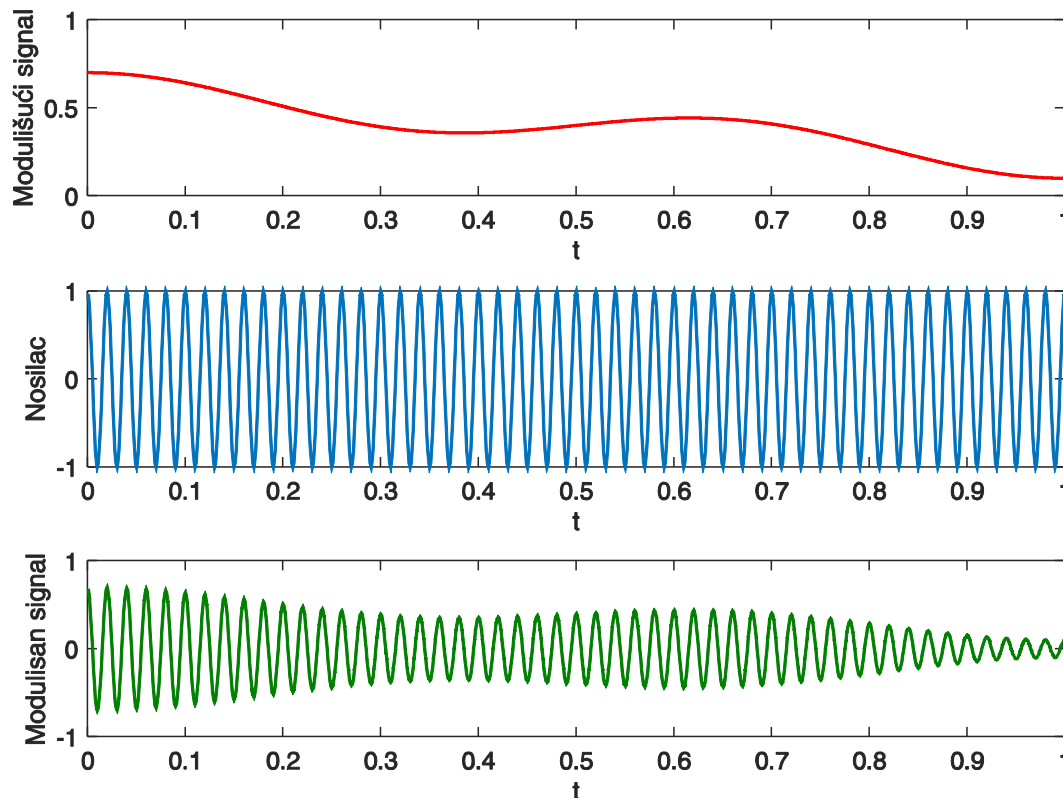


# Najbitniji kriterijumi širine propusnog opsega (OOU)

- \* Koliki deo spektra signala propustiti kroz filter da signal ostane neizobličen?
  - Teorijski – moraju se propustiti sve učestanosti.
  - Praktično, to nikad nije moguće!
- \* Koliku graničnu učestanost (i kakvu prenosnu karakteristiku) treba da ima kanal da bi se obavio “uspešan” prenos signala?
- \* U prvoj aproksimaciji kanal je idealan NF filter. Mogući kriterijumi za izbor  $f_c$  su:
  - Prenos dela signala do prve nule u spektru  
u ovom slučaju kroz kanal prođe obično preko 90% snage signala (tačna vrednost zavisi od tipa elementarnog impulsa).  
Za NRZ signale širina spektra po kriterijumu prve nule je
$$f_{c,(1\ nule)}=1/T=V_S$$
  - Prenos bez ISI - tada minimalna granična učestanost ekvivalentnog NF filtra iznosi
$$f_{c,Nyquist}=1/(2T)=V_S/2$$
  
u ovom slučaju izobličenja signala ne utiču na donete odluke

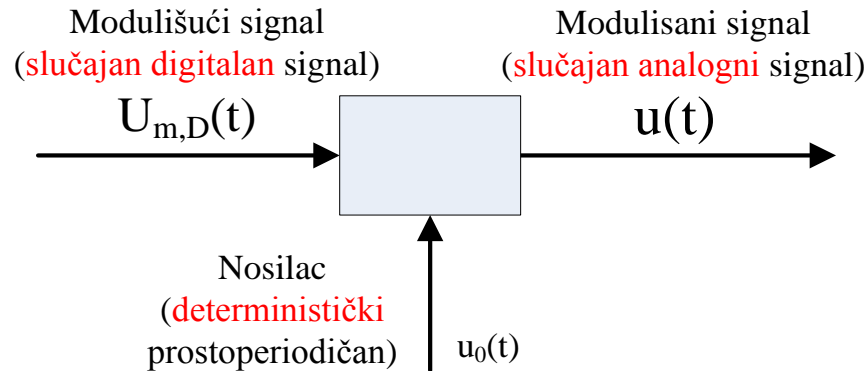
# Postupak modulacije (podsetnik)

- Prethodno su proučavane analogne modulacije, gde je modulišući signal analogan.
- Nosilac je prostoperiodični signal učestanosti  $f_0$ . Ukoliko je maksimalna učestanost u spektru modulišućeg signala  $f_m$ , tada je za prenos modulisanog signala (dobijenog množenjem nosiocem) potrebna širina propusnog opsega  $B=2f_m$



# Prenos u transponovanom opsegu učestanosti (TOU)

- \* Digitalni signali se mogu prenositi pomoću nosioca.
- \* U slučaju digitalnih modulacionih postupaka *modulišući signal je digitalan*.



- \* Nosilac je deterministički sinusoidalni signal. Određen je sa tri parametra:
  - amplitudom,
  - fazom,
  - frekvencijom.
- \* Promenom jednog od parametara srazmerno digitalnom signalu koji se prenosi (sa druga dva parametara konstantna), dobijaju se tri osnovna tipa moduliranih signala.

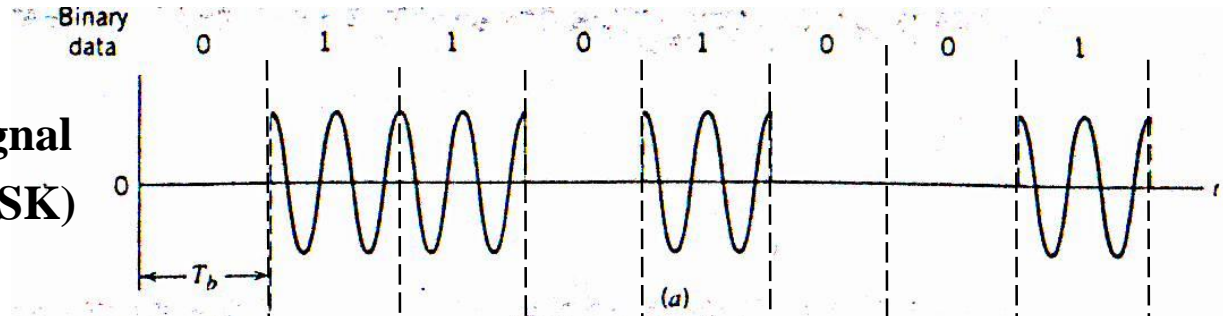
# Najbitniji kriterijumi širine propusnog opsega (TOU)

- \* **Koliki deo spektra signala propustiti kroz filter da signal ostane neizobličen?**
  - Teorijski – moraju se propustiti *sve* učestanosti u beskonačno širokom spektru.
  - Praktično - to nikad nije moguće (ne postoji takav sistem za prenos)!
- \* **U prvoj aproksimaciji kanal je idealan filter propusnik opsega učestanosti (POU). Koliku širinu propusnog opsega treba da ima kanal da bi se obavio “uspešan” prenos signala?**
- \* **Mogući kriterijumi za izbor  $B$  su:**
  - Prenos dela signala do prve nule u spektru - tada je
$$B_{pr,nule} = 2 * 1/T = 2V_s$$
u ovom slučaju kroz kanal prođe obično preko 90% snage signala;
  - Prenos bez ISI - tada širina propusnog opsega ekvivalentnog filtra POU iznosi
$$B_{Nyquist} = 2 * 1/(2T) = V_s$$
u ovom slučaju izobličenja signala ne utiču na donete odluke.

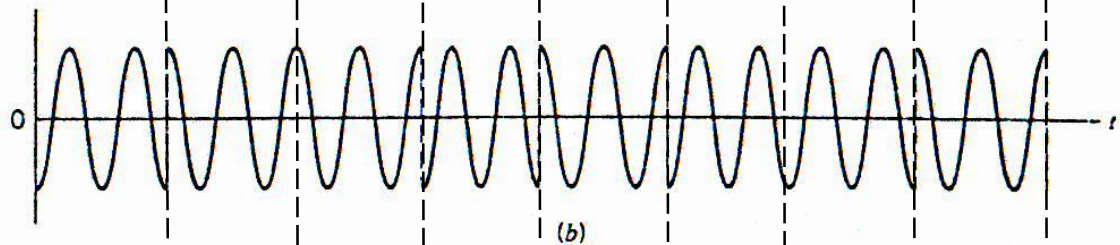
# Osnovni tipovi digitalnih modulacija

U zavisnosti od toga koji parametar nosioca se modifikuje pod uticajem digitalnog modulišućeg signala razlikujemo sledeće osnovne tipove digitalnih modulacija:

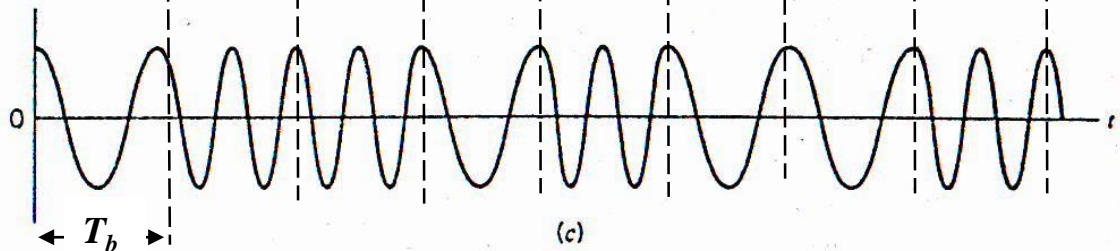
a) Amplitudski modulisan signal  
*Amplitude Shift Keying (ASK)*



b) Fazno modulisan signal  
*Phase Shift Keying (PSK)*



c) Frekvencijski modulisan signal  
*Frequency Shift Keying (FSK)*



# Karakteristike digitalnih modulacionih postupaka

- Na prethodnom slajdu su prikazane **binarne** ASK, PSK, FSK, ali ove modulacije u opštem slučaju mogu biti i nebinarne.
- U zavisnosti od informacionog sadržaja:
  - Kod ASK se menja amplituda signala u posmatranom signalizac. intervalu.
  - Kod PSK se menja početna faza signala u posmatranom signalizac. intervalu.
  - Kod FSK se menja učestanost signala u posmatranom signalizac. intervalu.
- PSK i FSK modulirani signali imaju konstantnu anvelopu (obvojnica) dok ASK nema konstantnu anvelopu.
  - Zato su PSK i FSK otpornije na nelinearna amplitudska izobličenja, kakva se često javljaju u radio vezama u mikrotalasnom opsegu i satelitskim kanalima.
  - U praksi, PSK i FSK se koriste za prenos digitalnih signala moduliranim nosiocem preko nelinearnih kanala.
  - ASK se danas koristi samo u optičkim sistemima prenosa.

# Digitalni modulacioni postupci

- Nasilac je prostoperiodičan signal  $u_0(t) = U \cos(2\pi f_0 t)$
- Modulišići signal  $u_m = u_m(t)$ , koji nosi informaciju, je digitalan!
- Amplitudski modulisan signal – amplituda modulisanog signala menja se u zavisnosti od modulišućeg signala (faza i frekvencija signala su konstantni)

$$u_{ASK}(t) = U(u_m) \cos(2\pi f_0 t)$$

- Fazno modulisan signal – faza modulisanog signala menja se u zavisnosti od modulišućeg signala (amplituda i frekvencija su konstantni)

$$u_{PSK}(t) = U \cos(2\pi f_0 t + \theta(u_m))$$

- Frekvencijski modulisan signal – faza modulisanog signala menja se u zavisnosti od modulišućeg signala (amplituda i frekvencija su konstantni)

$$u_{FSK}(t) = U \cos(2\pi f_0(u_m)t)$$

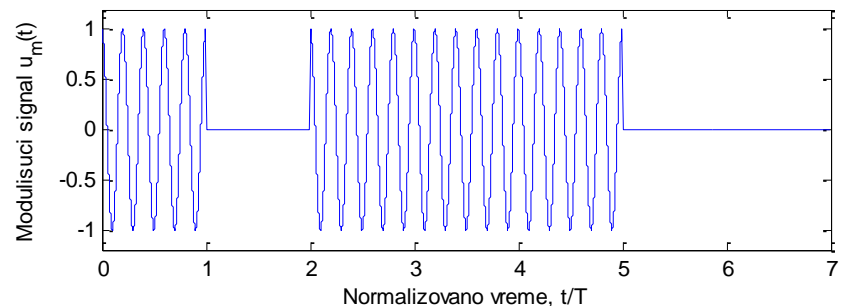
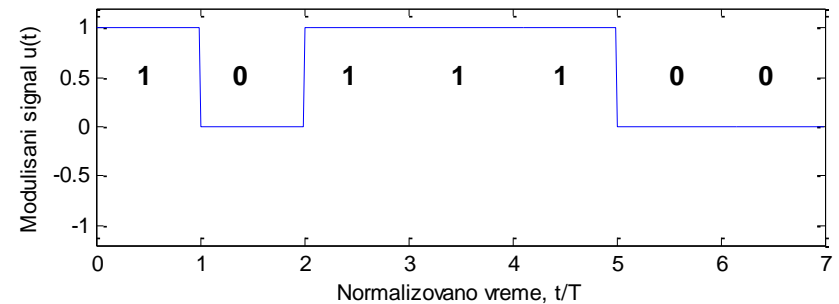
- Moguća je i kombinacija parametara koji se menjaju u zavisnosti od  $u_m$  (npr. amplituda i faza).

# BASK modulacija – osnovni pojmovi

- \* **Binarna ASK (BASK) predstavlja najjednostavniji postupak prenosa digitalnog signala modulisanim nosiocem.**
  - Uključuje se i isključuje nosilac pod diktatom digitalnog modulišućeg signala.
  - Kada informacijski sadržaj modulišućeg signala u posmatranom signalizacionom intervalu trajanja  $T$  ima vrednost "1", modulisani signal je po obliku jednak nosiocu, a kada se prenosi "0" to znači da se na liniju veze ne emituje nikakav signal.
  - Uključivanje i isključivanje nosioca je promena njegove amplitude, te se radi o amplitudskoj modulaciji.

\* **Uključivanje nosioca - množenje nosioca sa "1", a isključivanje kao množenje sa "0".**

\* **Realizacija u slučaju NRZ – tokom čitavog signalizacionog intervala nosilac treba pomnožiti informacionim sadržajem binarnog unipolarnog signala.**

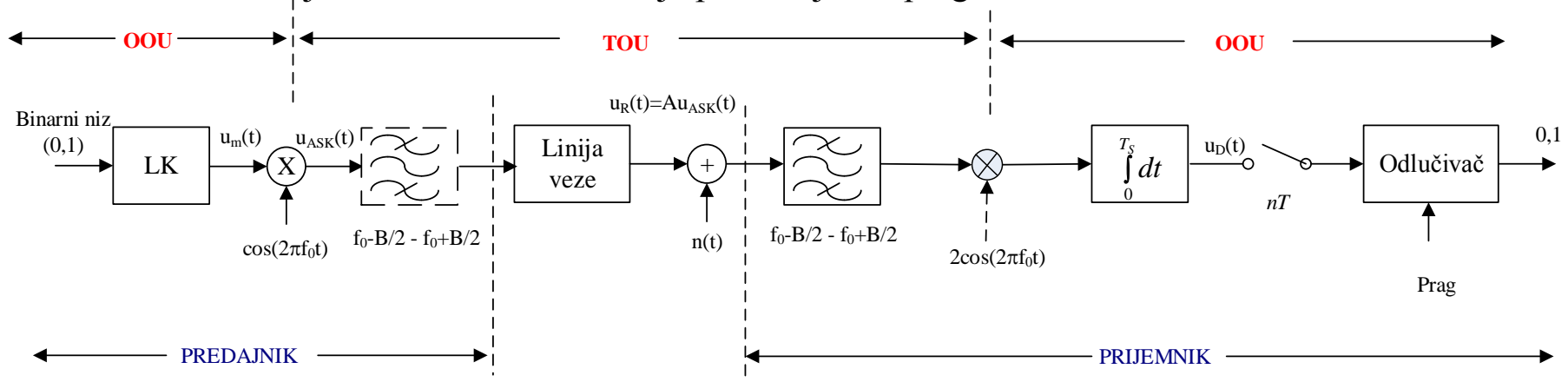


# BASK modulacija – predajnik i prijemnik

\* Ako je standardni (elementarni) impuls  $x(t)$  oblika pravougaonog impulsa, optimalan prijemnik za digitalni signal u OOU predstavlja prijemnik sa integracijom i rasterećenjem.

## \* BASK postupak:

- Modulacija – binarni unipolarni digitalni signal pomnoži se nosiocem, čime se spektar modulišućeg signala transponuje na više učestanosti (translira se u deo oko centralne učestanosti  $f_0$ ).
- Prenos – modulisani signal se (nakon filtriranja, koje je opciono i u realnim uslovima ograničava spektar modulisanog signala na opseg širine B) prenosi kroz liniju veze. Linija veze ne unosi izobličenja u opsegu  $f_0 - B/2 - f_0 + B/2$ . Primljeni signal je oslabljen i na njega je dodat šum, pa se na ulazu prijemnika obavezno vrši filtriranje!
- Demodulacija – Signal se demoduliše (njegov spektar se transponuje u OOU). Signal na izlazu produktnog modulatora se propusti kroz integrator sa rasterećenjem (integrator praktično ne propušta komponente oko  $2f_0$  već samo niskofrekventni deo), uzmu se odbirci na kraju svakog signalizacionog intervala i na njima se izvrši odlučivanje poređenjem s pragom.



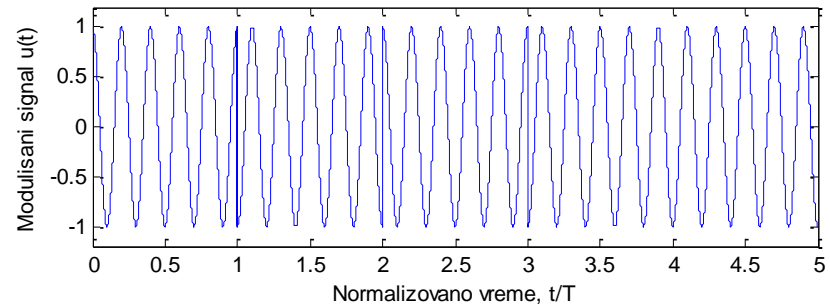
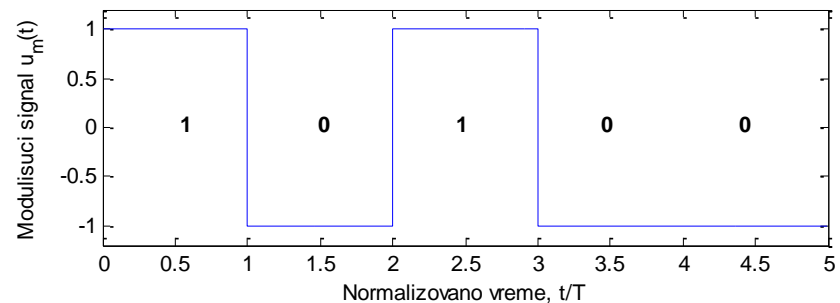
# BPSK modulacija – osnovni pojmovi

## \* Binarna PSK (BPSK):

- Nosilac se povremeno invertuje pod diktatom digitalnog modulišućeg signala.
- Kada informacijski sadržaj modulišućeg signala u posmatranom signalizacionom intervalu trajanja  $T$  ima vrednost "1", modulirani signal je po obliku jednak nosiocu, a kada se prenosi "0" to znači da se na liniju veze emituje invertovani nosilac.
- Invertovanje nosioca praktično predstavlja promenu njegove početne faze (na početku signalizacionog intervala ona je  $0$  ili  $\pi$ ), pa se radi o faznoj modulaciji.

**Invertovanje nosioca - množenje nosioca sa "-1".**

**Realizacija u slučaju NRZ – tokom čitavog signalizacionog intervala nosilac treba pomnožiti informacionim sadržajem binarnog polarnog signala.**

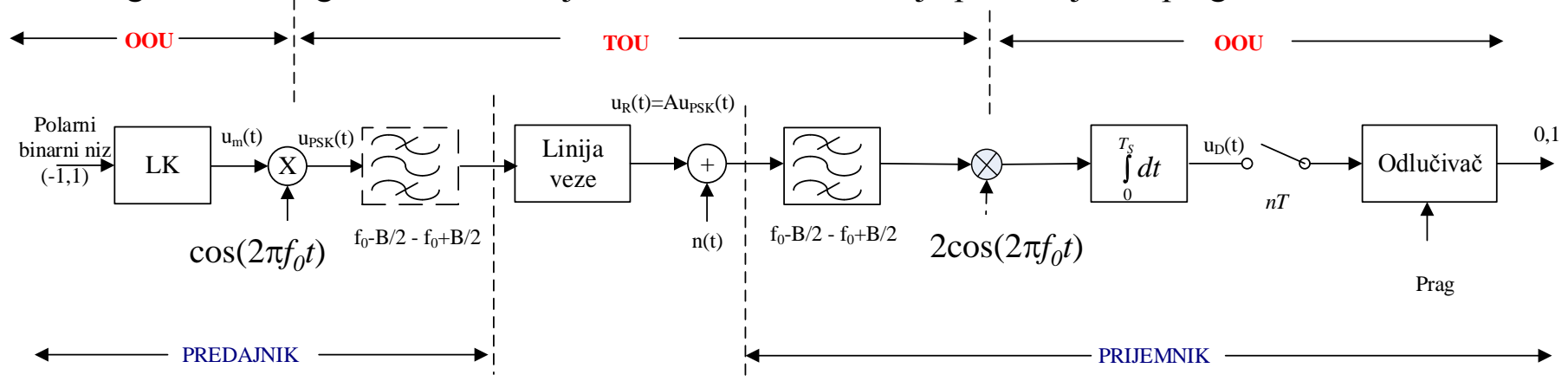


# BPSK modulacija – predajnik i prijemnik

\* Ako je standardni (elementarni) impuls  $x(t)$  oblika pravougaonog impulsa, optimalan prijemnik za digitalni signal u OOU predstavlja prijemnik sa integracijom i rasterećenjem.

\* BPSK postupak (koherentna demodulacija):

- Modulacija – binarni polarni digitalni signal pomnoži se nosiocem, čime se spektar modulišućeg signala transponuje na više učestanosti (translira se u deo oko centralne učestanosti  $f_0$ ).
- Prenos – modulirani signal se (nakon filtriranja, koje je opciono i u realnim uslovima ograničava spektar modulisanog signala na opseg širine B) prenosi kroz liniju veze. Linija veze ne unosi izobličenja u opsegu  $f_0 - B/2 - f_0 + B/2$ . Primljeni signal je oslabljen i na njega je dodat šum, pa se na ulazu prijemnika obavezno vrši filtriranje!
- Demodulacija – Signal se demoduliše (spektar se transponuje u OOU). Signal na izlazu produktnog modulatora se propusti kroz integrator sa rasterećenjem (integrator praktično ne propušta komponente oko  $2f_0$  već samo niskofrekventni deo), uzmu se odbirci na kraju svakog signalizacionog intervala i na njima se izvrši odlučivanje poređenjem s pragom.



# Binarna fazna modulacija (BPSK)

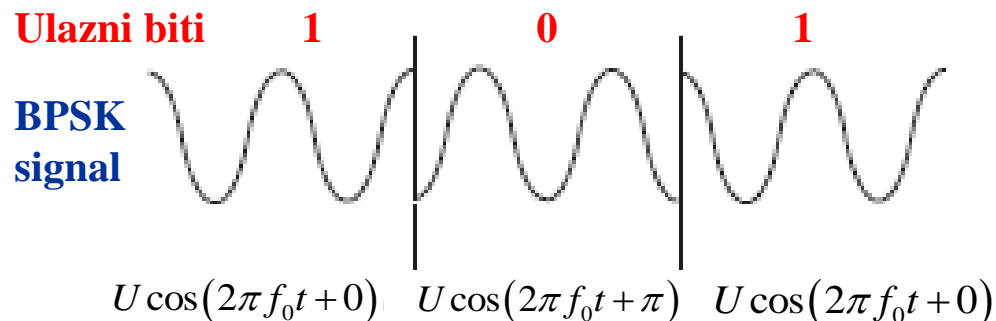
- \* Kod BPSK (tj. kod svih PSK modulacija) informacija se prenosi u fazi signala. U svakom signalizacionom intervalu, u zavisnosti od poslatog simbola menja se početna faza signala.
- \* Faza nosioca može imati jednu od sledeće dve vrednosti:  $0^\circ$  i  $180^\circ$ .
  - Binarni simbol **1** predstavlja se sa

$$U \cos(2\pi f_0 t + 0) = +U \cos(2\pi f_0 t)$$

- Binarni simbol **0** predstavlja se sa

$$U \cos(2\pi f_0 t + \pi) = -U \cos(2\pi f_0 t)$$

- Amplituda je dakle uvek  $U$  i ona se ne menja tokom vremena.



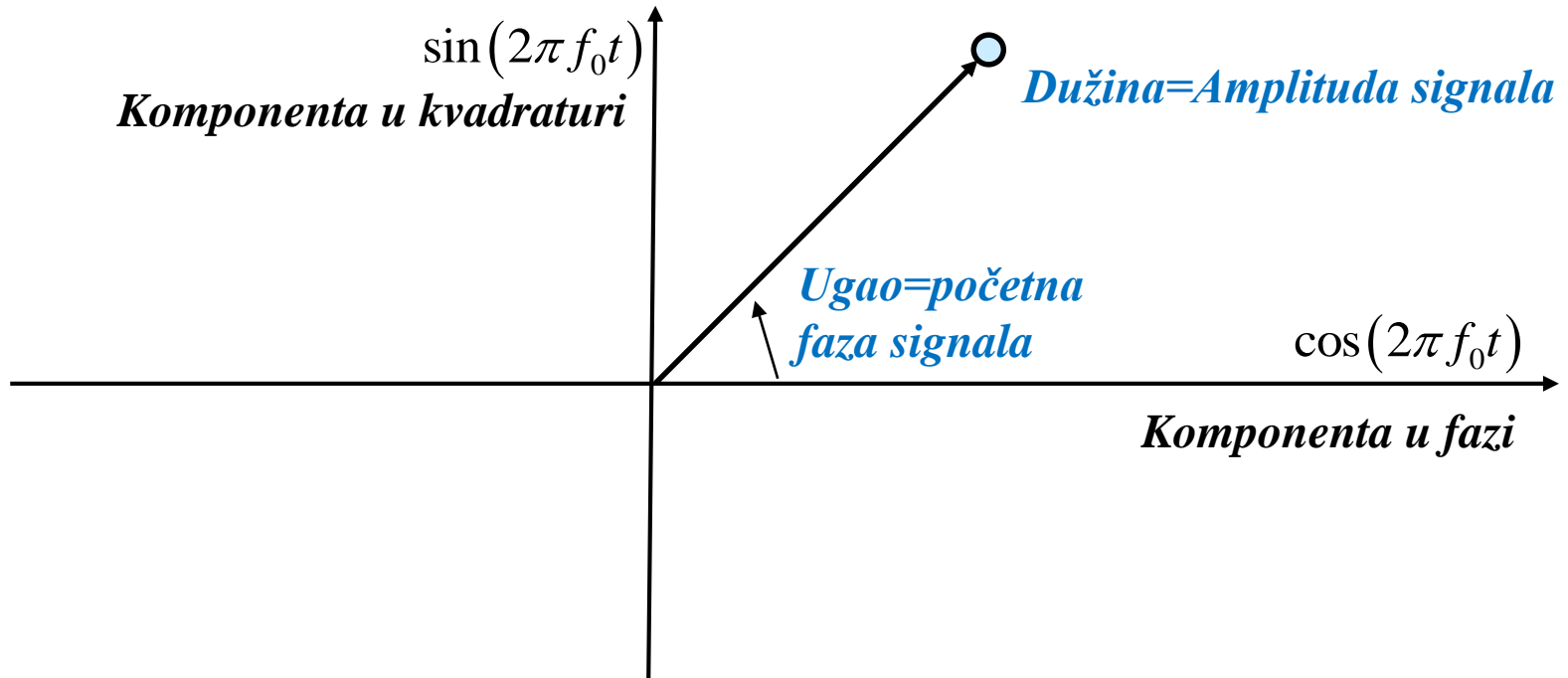
# Konstelacioni dijagram

Konstelacioni dijagram omogućava grafičko predstavljanje mogućih amplituda i početnih faza digitalno modulisanog signala u toku trajanja signalizacionog intervala.

Signali koji odgovaraju tačkama na konstelacionom dijagramu predstavljaju:

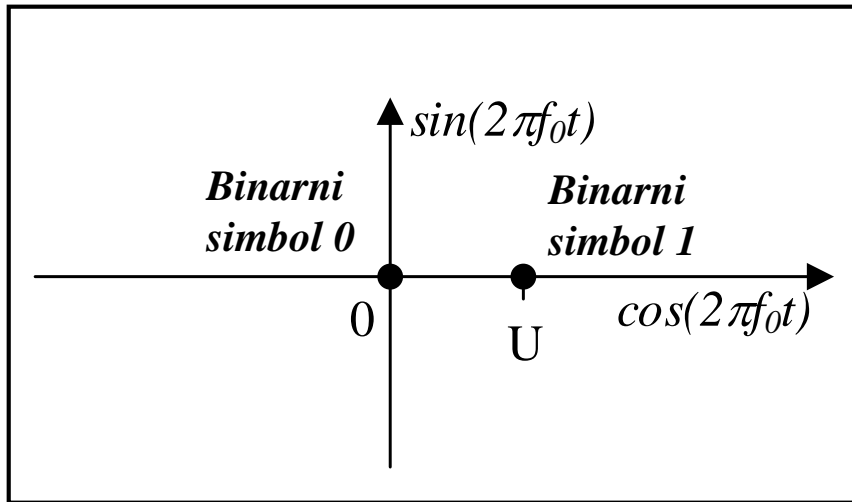
- Binarni simbol (bit) u slučaju binarnog prenosa
- Simbol, koji predstavlja kombinaciju bita u slučaju  $M$ -arnog prenosa (broj bita  $n = \log_2 M$ )

Manja rastojanja između tačaka na konstelacionom dijagramu ukazuju na veću verovatnoću greške pri prenosu signala, za konstantnu snagu aditivnog šuma.

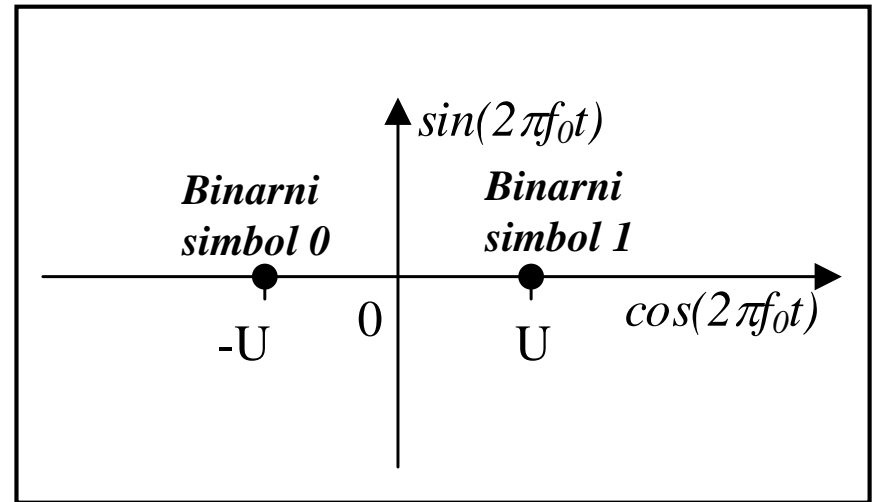


# Konstelacioni dijagram – poslati signal

*Konstelacioni dijagram BASK signala*



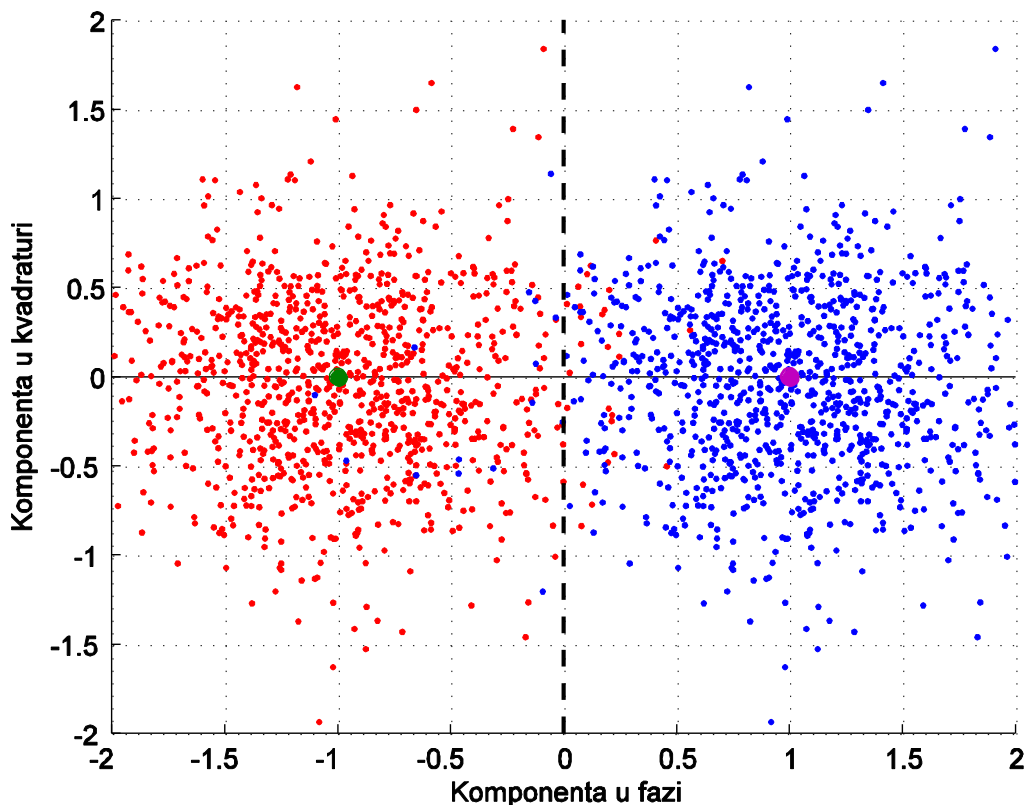
*Konstelacioni dijagram BPSK signala*



- **BASK** – u toku signalizacionog intervala trajanja  $T$  šalje se:  
 $u(t)=0$ , kada se šalje binarni simbol 0  
 $u(t)=U\cos(2\pi f_0 t)$ , kada se šalje binarni simbol 1
- **BPSK** – u toku signalizacionog intervala trajanja  $T$  šalje se:  
 $u(t)=U\cos(2\pi f_0 t + \pi)$ , kada se šalje binarni simbol 0  
 $u(t)=U\cos(2\pi f_0 t + 0)$ , kada se šalje binarni simbol 1

# Konstelacioni dijagram - primljeni signal

- \* Na slici je prikazan primer konstelacionog dijagrama poslatog i primljenog signala za slučaj BPSK modulacije
- \* Poslati signal ima amplitudu  $U=1$  i fazu 0 ili  $\pi$ , u zavisnosti od informacionog sadržaja.
- \* Na ovaj signal superponira se šum koji ima Gausovu raspodelu amplitude i jednakoverovatne faze. Proverava se da li je dobijeni signal u levoj ili desnoj poluravni.



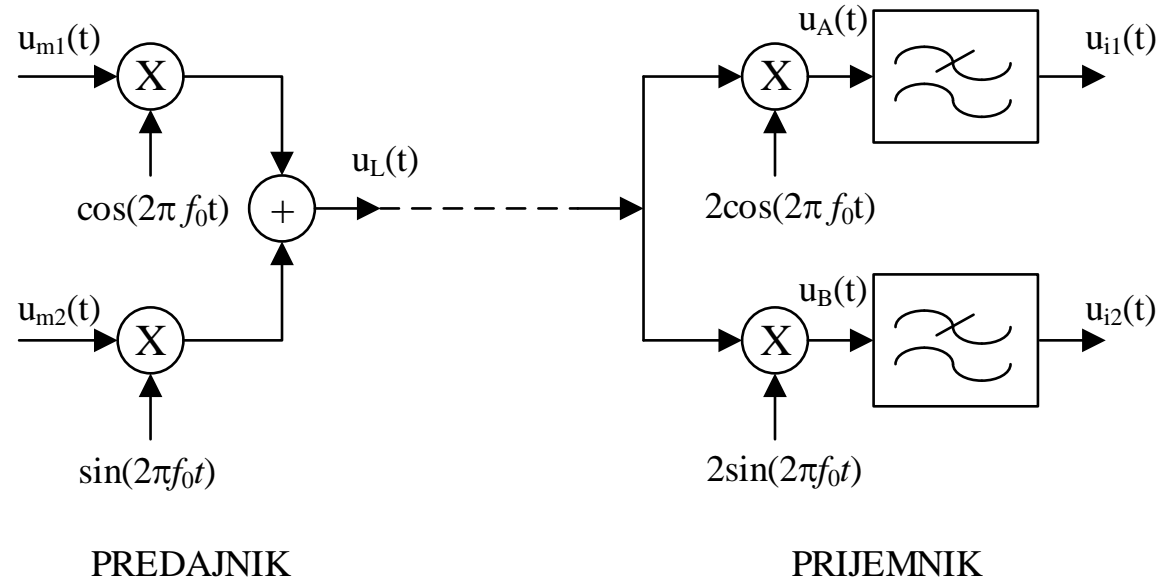
**Verovatnoća greške po bitu (BER)**

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{p_N}} \right)$$

$E_b$  energija po bitu,

$p_N$  spektralna gustina snage šuma

# Modulacija nosiocima u kvadraturi (ortogonalna modulacija) - podsetnik



Na slici je prikazan prenos pomoću nosilaca u kvadraturi - istovremeno se prenose dva nezavisna modulišuća signala (obično iste maksimalne učestanosti u spektru).

U gornjoj i donjoj grani u predajniku kao nosioci se koriste kosinusoida i sinusoida. Ova dva prostoperiodična signala su fazno pomereni za  $\pi/2$  što odgovara pravom uglu (pa se nazivaju nosiocima u kvadraturi).

# Modulacija nosiocima u kvadraturi - podsetnik

Modulisani signal na izlazu iz predajnika je definisan izrazom:

$$u_L(t) = u_{m1}(t)\cos(2\pi f_0 t) + u_{m2}(t)\sin(2\pi f_0 t)$$

Prijemnik se sastoji od dve paralelne grane - na izlazu gornje grane:

$$u_A(t) = u_L(t)2\cos(2\pi f_0 t) = u_{m1}(t) + u_{m1}(t)\cos(2\pi \times 2f_0 t) + u_{m2}(t)\sin(2\pi \times 2f_0 t)$$

Nakon filtriranja NF filtrom, na izlazu gornje grane nalazi se samo komponenta na niskim učestanostima:

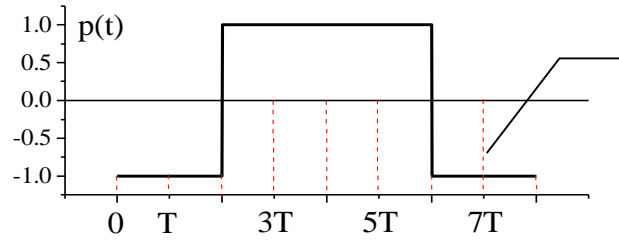
$$u_{i1}(t) = u_{m1}(t)$$

Slično, na izlazu donje grane prijemnika, izdvaja se drugi modulišući signal.

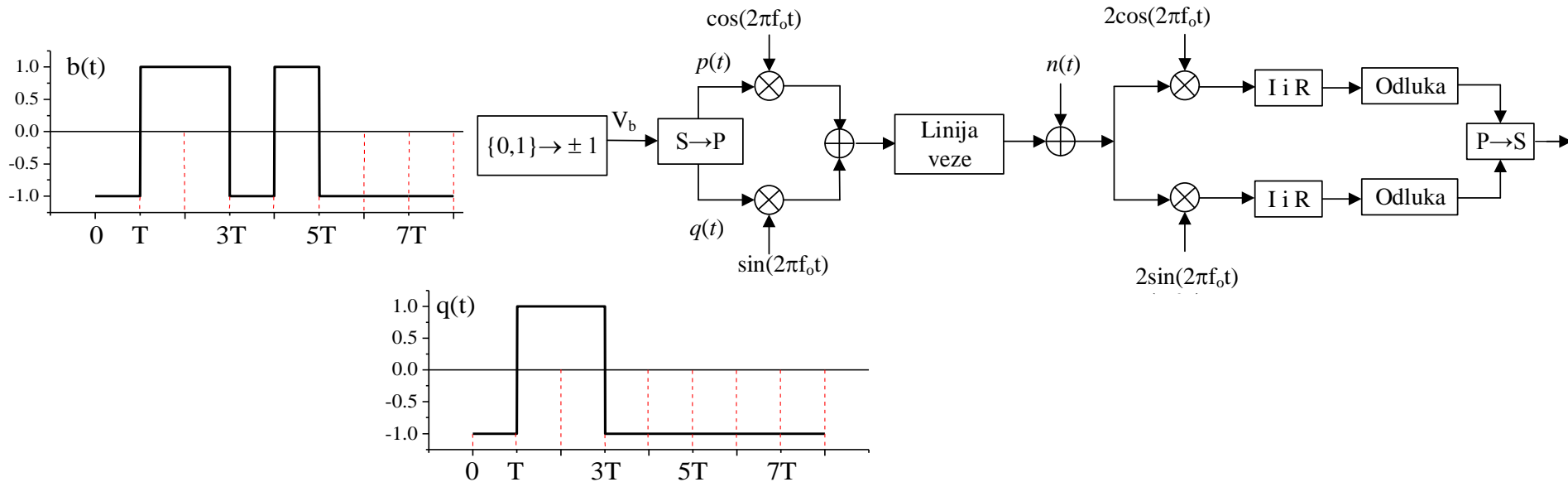
$$u_{i2}(t) = u_{m2}(t)$$

Iako se modulišući signali  $u_{m1}(t)$  i  $u_{m2}(t)$  prenose na istoj učestanosti nosioca, pa se modulisani signali preklapaju u spektralnom domenu, **moguće ih je potpuno razdvojiti na strani prijema.**

# QPSK modulacija – predajnik i prijemnik



**Princip prelaza sa redne na paralelnu vezu – trajanje  $T_S=2T_b$ .**



**Blok šema sistema za prenos QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) signala, uz pretpostavku signaliziranja polarnim NRZ linijskim kodom. U opštem slučaju umesto integratora sa rasterećenjem nalaze se optimalni filtri**

# QPSK – ideja

- \* Blok šema modulatora kvadraturene digitalne fazne modulacije (QPSK) sastoji se od dva amplitudska modulatora sa nosiocima „u kvadraturi”.
- \* Iz jednog binarnog signala, razdvajajući parne i neparne bite, naprave se dva binarna niza. Ovo razdvajanje se obavlja u bloku *serija u paralelu* ( $S \rightarrow P$ ).
- \* Šta se dobija ovim razdvajanjem bita?
  - Pošto u gornjoj grani modulatora signal  $p(t)$  čine samo neparni biti, a signal  $q(t)$  čine samo parni biti, u svakoj grani modulatora je *dva puta manji binarni protok*,  $V_b/2$  u odnosu na binarni protok  $V_b$  signala na ulazu u modulator.
  - *Dva puta manji binarni protok znači da je na izlazu množača i u gornjoj i u donjoj grani signal dva puta manje širine spektra.*
  - Izlazni signal, kao zbir ova dva signala imaju istu širinu spektra kao i signali u pojedinim granama. Na ovaj način se **dvostruko bolje koristi propusni opseg**, odnosno imamo **dvostruko poboljšanje spektralne efikasnosti**.

# Prenos u TOU – QPSK modulacija

- \* QPSK signal u svakom signalizacionom intervalu trajanja  $T_S=2T_b$ , u zavisnosti od informacije koju prenosi (odgovarajućeg dibita) ima jedan od četiri moguća oblika:

$$u_{QPSK}^{(1)}(t) = +U \cos(2\pi f_0 t) + U \sin(2\pi f_0 t)$$

$$u_{QPSK}^{(2)}(t) = +U \cos(2\pi f_0 t) - U \sin(2\pi f_0 t)$$

$$u_{QPSK}^{(3)}(t) = -U \cos(2\pi f_0 t) + U \sin(2\pi f_0 t)$$

$$u_{QPSK}^{(4)}(t) = -U \cos(2\pi f_0 t) - U \sin(2\pi f_0 t)$$

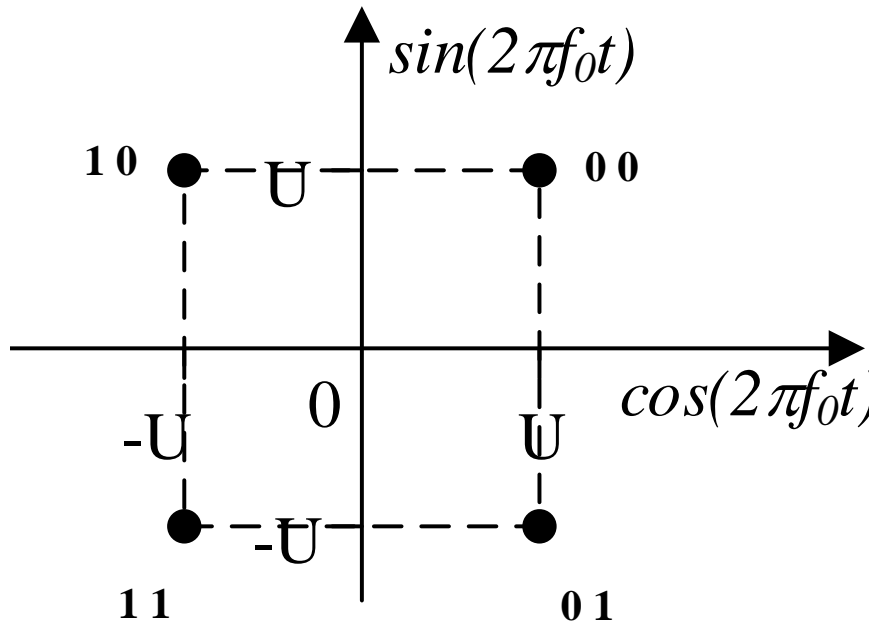
- \* QPSK signal se može predstaviti i sledećim oblikom, gde  $a_k$  predstavlja parne, a  $b_k$  neparne bite, dok je trajanje standardnog signala  $T_S$  dva puta duže od trajanja bita  $T_b$  ( $T_S=2T_b$ )

$$u_{QPSK}(t) = a_k U \cos(2\pi f_0 t) + b_k U \sin(2\pi f_0 t) = \sqrt{2}U \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k)$$

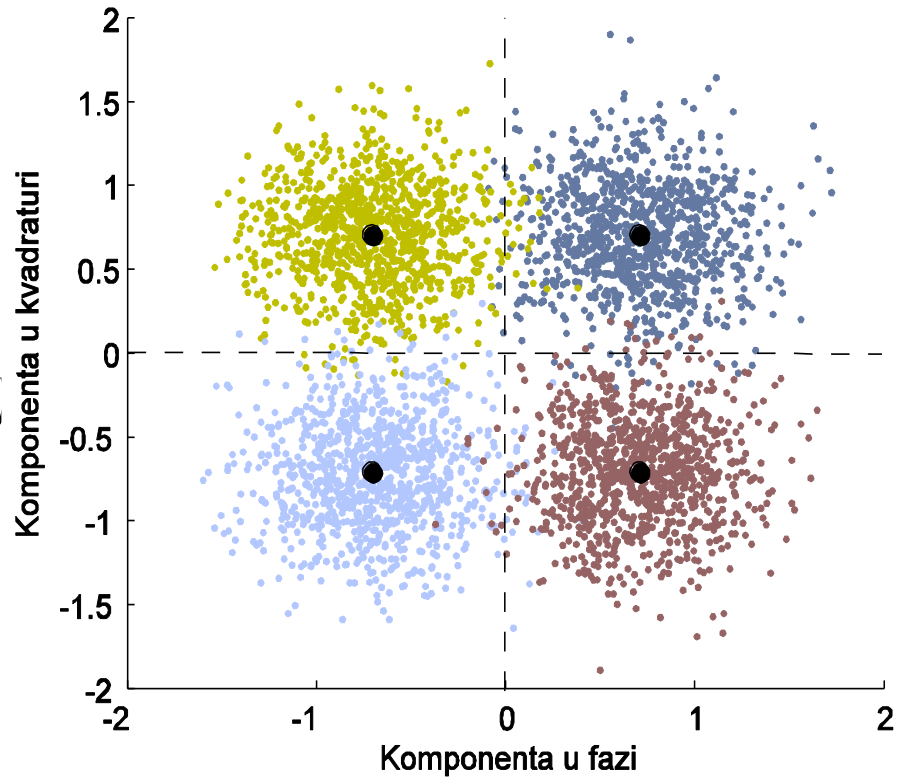
- \* Simboli  $b_k$  i  $a_k$  mogu biti +1 ili -1, pa faza  $\varphi_k$  može imati samo četiri moguće vrednosti:  $\pi/4$ ,  $-\pi/4$ ,  $3\pi/4$  ili  $-3\pi/4$ .

# QPSK – fazorski (konstelacioni) dijagram

- Konstelacioni dijagram poslatog signala, četiri tačke na dijagramu levo (sa Grejevim mapiranjem)



- Konstelacioni dijagram primljenog signala – poslato 10000 modulisanih signala i na njih je dodat ABGŠ.
- Proverava se u kom kvadrantu je tačka koja odgovara primljenom signalu.



# QPSK – verovatnoća greške

- \* Izraz za verovatnoću greške u svakoj od grana ima vrednost

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{P_N}}$$

- \* Srednja verovatnoća greške po simbolu iznosi

$$P_{e,QPSK} = P_e(1 - P_e) + (1 - P_e)P_e + P_e^2 \approx 2P_e = \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{P_N}}$$

- \* Srednja verovatnoća greške po bitu za Grejevo mapiranje iznosi

$$P_{b,QPSK} \approx \frac{P_{e,QPSK}}{\log_2(4)} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{P_N}}$$

pa je ova vrednost ista kao u slučaju BPSK!

- \* Verovatnoća greške po bitu kod BPSK i QPSK ima istu vrednost ali se verovatnoća greške po simbolu razlikuje (dva puta je veća kod QPSK).

# MPSK – modulisani signal, fazorski dijagram

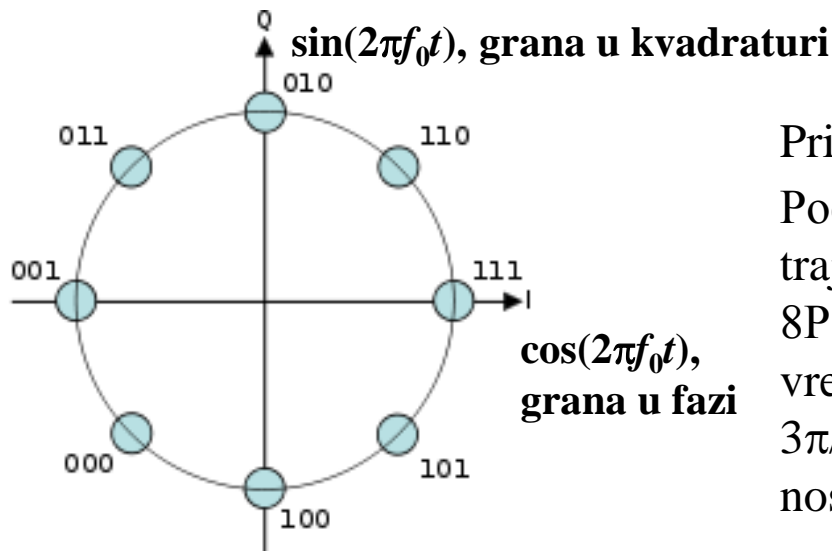
- \* MPSK -  $M$  mogućih vrednosti faze signala.

$$u_{MPSK}(t) = U \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k), \quad \varphi_k = (k-1) \frac{2\pi}{M};$$

$$t \in [(k-1)T_S, kT_S]; \quad T_S = T_b \log_2 M$$

- \* Fazorski dijagram ima  $M$  ekvidistantnih vrednosti faze na rastojanju  $2\pi/M$ .

- Povećanjem  $M$  smanjuje se rastojanje između susednih tačaka na dijagramu (za istu snagu signala) zbog manje razlike mogućih faza, pa manji šum može da izazove grešku pri prenosu.
- Dakle, povećanjem  $M$  raste spektralna efikasnost, ali i verovatnoća greške pri prenosu signala, što se može nadoknaditi samo povećanjem srednje snage.



Primer 8PSK signal:

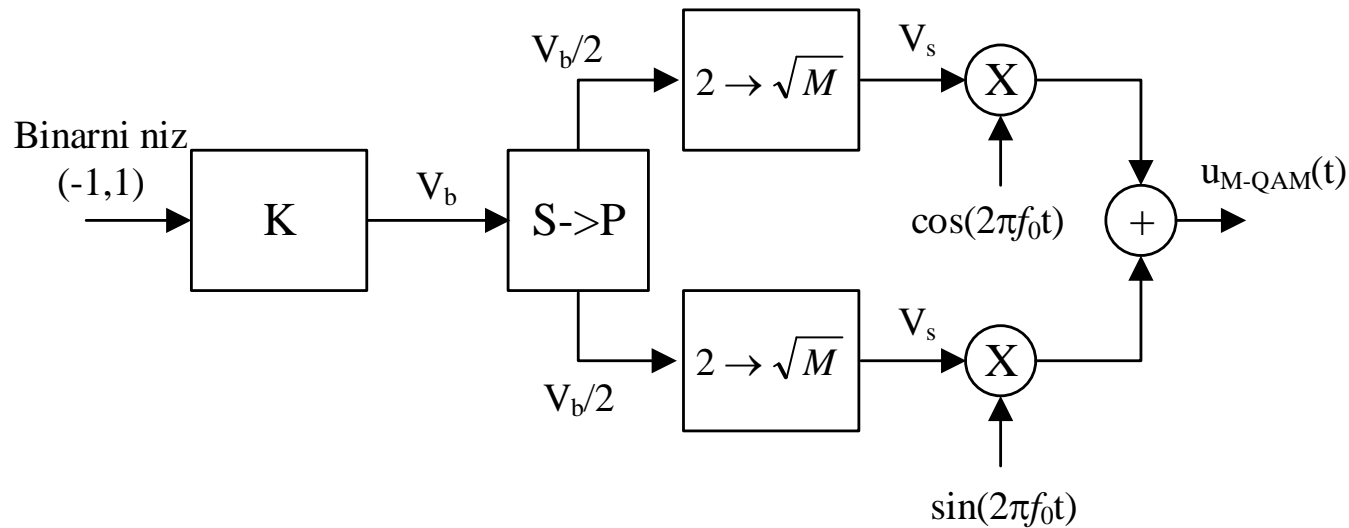
Početna faza se menja sa svakom simbolom trajanja  $T_S = 3T_b$

8PSK signal može imati jednu od sledećih vrednosti faza:  $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8$ , u zavisnosti od informacije koju nosi (tri bita po 8PSK simbolu)

# Prenos u TOU – M-QAM modulacija

- \* Spektralna efikasnost postignuta primenom binarnih i kvaternarnih modulacija obično nije dovoljna, pošto je potrebno dalje povećanje spektralne efikasnosti.
- \* Pri prenosu binarnog signala u osnovnom opsegu učestanosti povećan je binarni protok tako što su se umesto bita prenosili simboli, tj. umesto binarnog prenosili smo  $M$ -arni signal.
- \* Sa druge strane, povećavanjem  $M$  kod MASK ili MPSK značajno se povećava verovatnoća greške, simboli su sve bliži jedan drugom u fazorskoj ravni.
- \* Kvadraturno amplitudski modulisani signal sa više nivoa (MQAM): oba nosioca u kvadraturi mogu se umesto binarnim, modulirati  $M$ -arnim signalom.

# M-QAM modulacija - predajnik

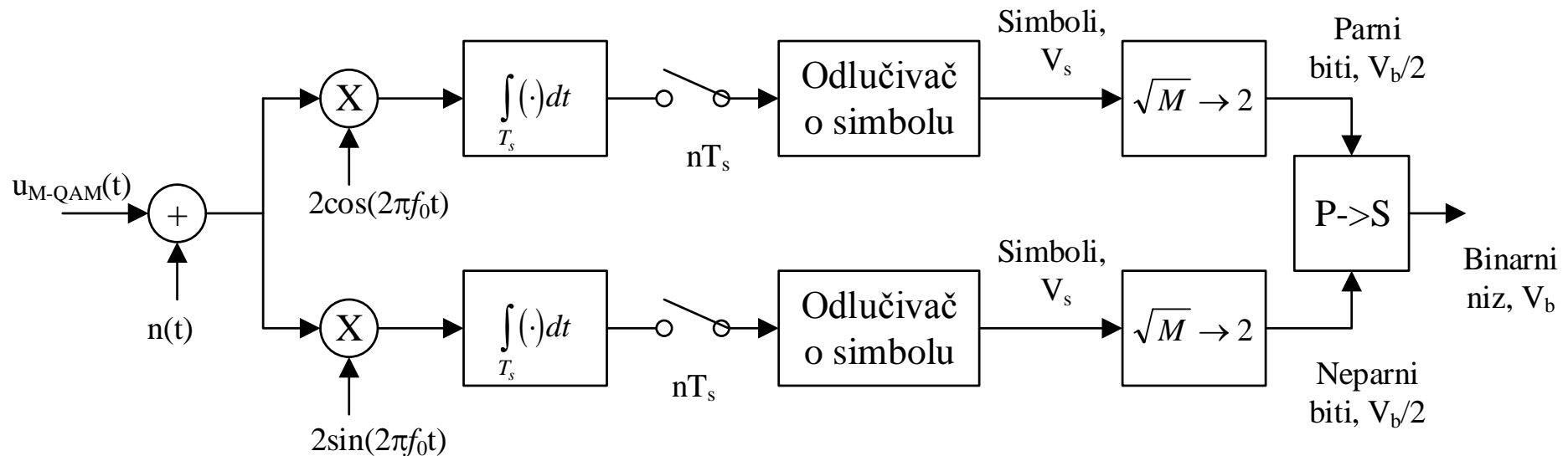


- \* Modulator  $M$ -QAM signala predstavlja kombinaciju QPSK modulatora i modulatora za  $M$ -arni sistem prenosa u OOU.
- \* Blok  $2 \rightarrow \sqrt{M}$  predstavlja konvertor iz binarnog u  $M$ -arni signal. Na ulazu u konvertor u svakoj grani binarni protok je  $V_b/2$ , a u konvertoru se svaka grupa od  $n$  bita pretvara u jedan od različitih simbola. Pošto  $\sqrt{M}$  mora biti stepen broja 2,  $M$  mora biti stepen broja 4, pa je brzina prenosa na liniji:

$$V_s = \frac{V_b / 2}{\log_2 \sqrt{M}} = \frac{V_b}{\log_2 M}$$

# M-QAM modulacija - prijemnik

- Teorijski, kroz liniju veze date širine  $B$  moguće je preneti proizvoljno mnogo bita u sekundi, za dovoljno veliko  $M$ .
- I ovde, kao i u  $M$ -arnom prenosu u OOU, ograničavajući faktor je verovatnoća greške, koja se za dati odnos signal/šum značajno pogoršava sa povećanjem  $M$ .
- Struktura  $M$ -QAM prijemnika je kombinacija blok šeme prijemnika QPSK signala i  $M$ -arnog signala.



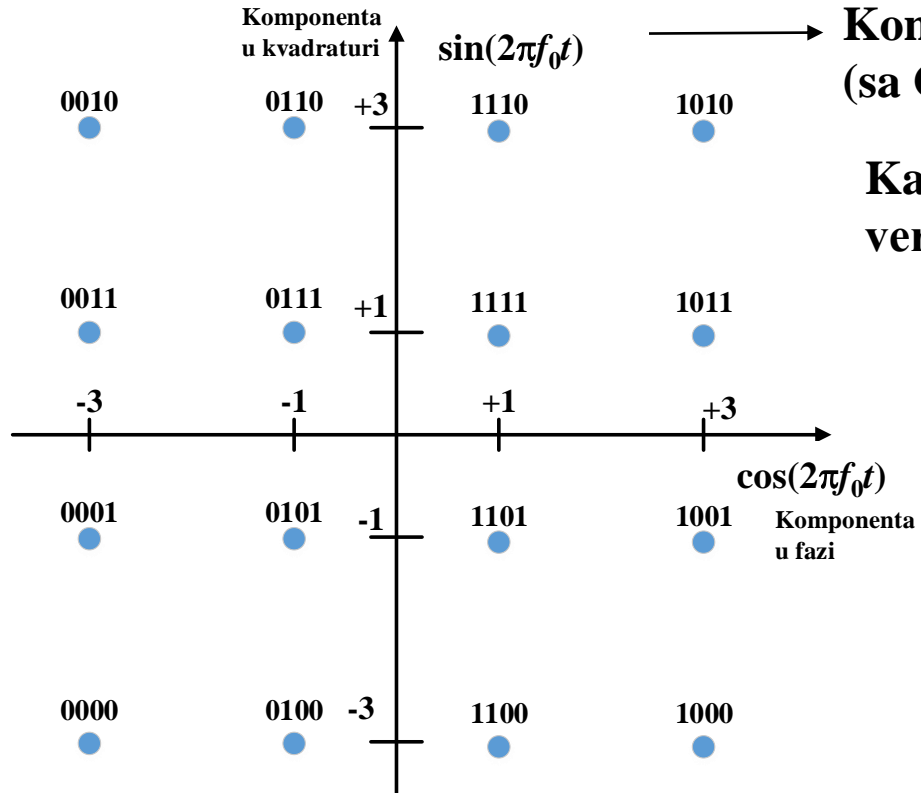
# Prenos u TOU – M-QAM modulacija

**MQAM - nosilac je istovremeno amplitudski i fazno modulisan!**

**U toku trajanja signalizacionog intervala trajanja  $T_s$ , signal je oblika**

$$s_k(t) = a_k \cos(2\pi f_0 t) - b_k \sin(2\pi f_0 t), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$T_s = T_b \log_2 M \quad a_k, b_k \in \left\{ \pm U, \pm 3U, \dots, \pm (\sqrt{M} - 1)U \right\}$$



**Konstelacioni dijagram za 16-QAM (sa Grejevom mapiranjem)**

**Kada je primenjeno Grejevo mapiranje, odnos ver. greške po simbolu i ver. greške po bitu je**

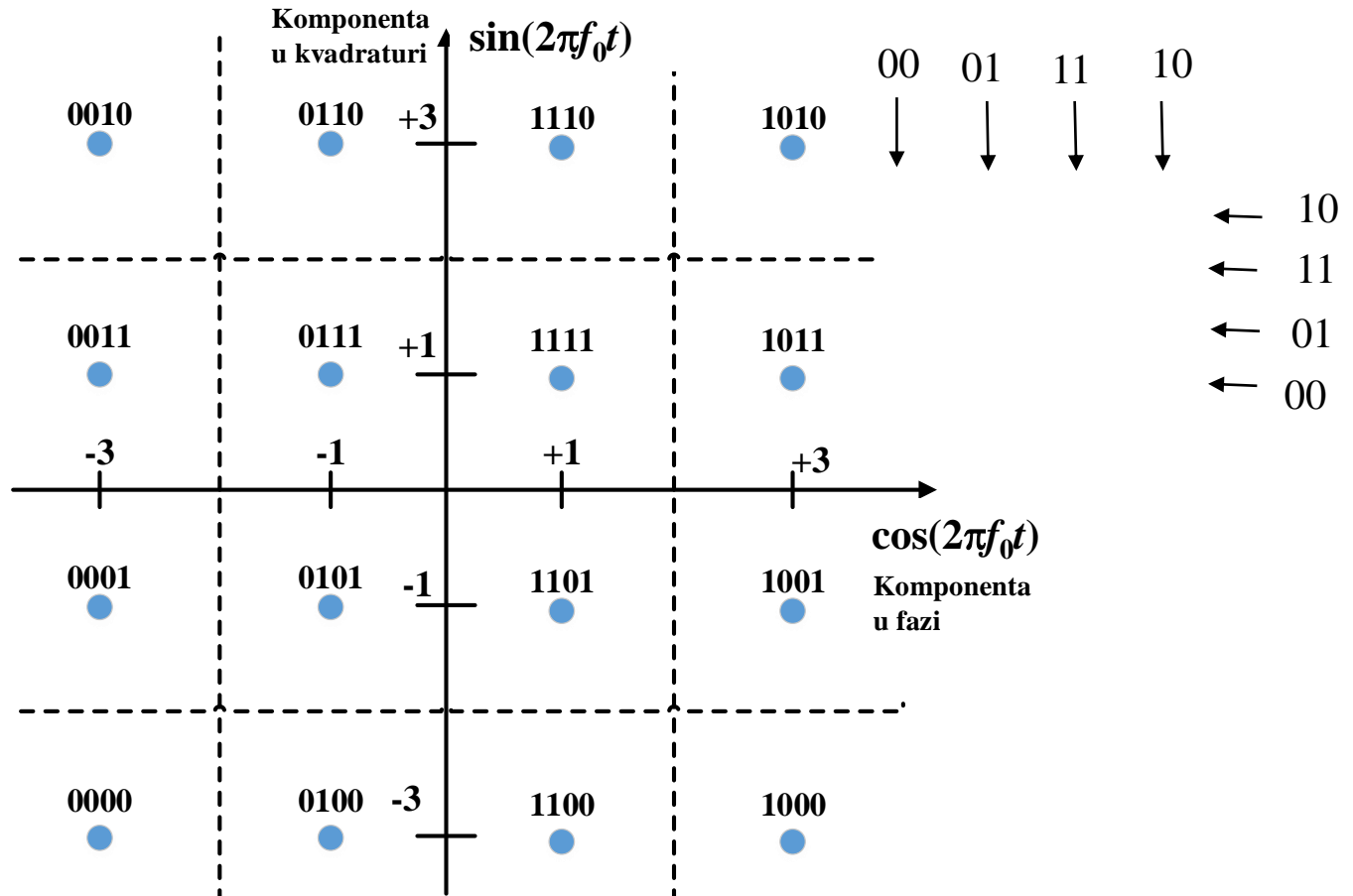
$$P_{e,b} \approx \frac{P_e}{\log_2 M}$$

**Ver. greške po bitu na za M-QAM modulaciju data je izrazom:**

$$P_{e,b} = \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{P_s \log_2 M}{2 p_N V_b}}$$

# MQAM - regioni odlučivanja

- \* Odlučivanje se vrši tako što se proveru u kom kvadrantu (sa koje strane granica odlučivanja, prikazane isprekidanim linijama) se nalazi primljeni signal, pa se kao rezultat dekodovanja dobija odgovarajuća binarna kombinacija.
- \* Greški na jednom simbolu može da odgovara i greška na većem broju bita, ali uvek važi  $BER < SER$ . Obično se BER dodatno smanjuje primenom Grejevog mapiranja.

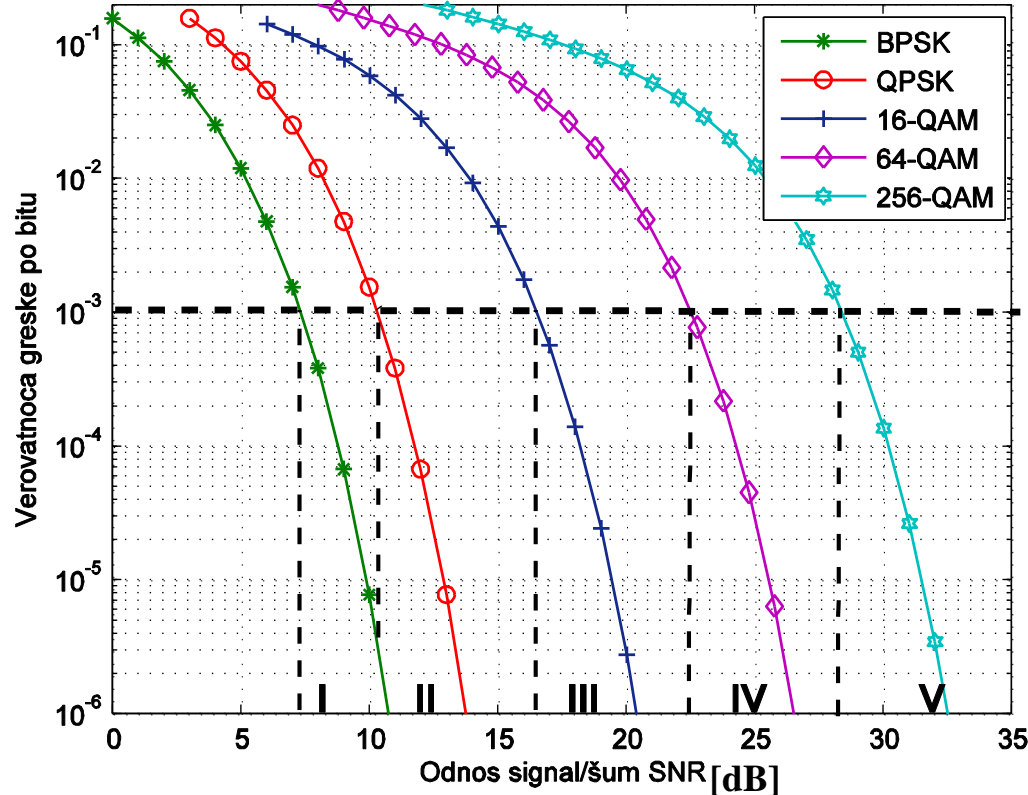


Isprekidane linije  
označavaju granice  
regiona odlučivanja



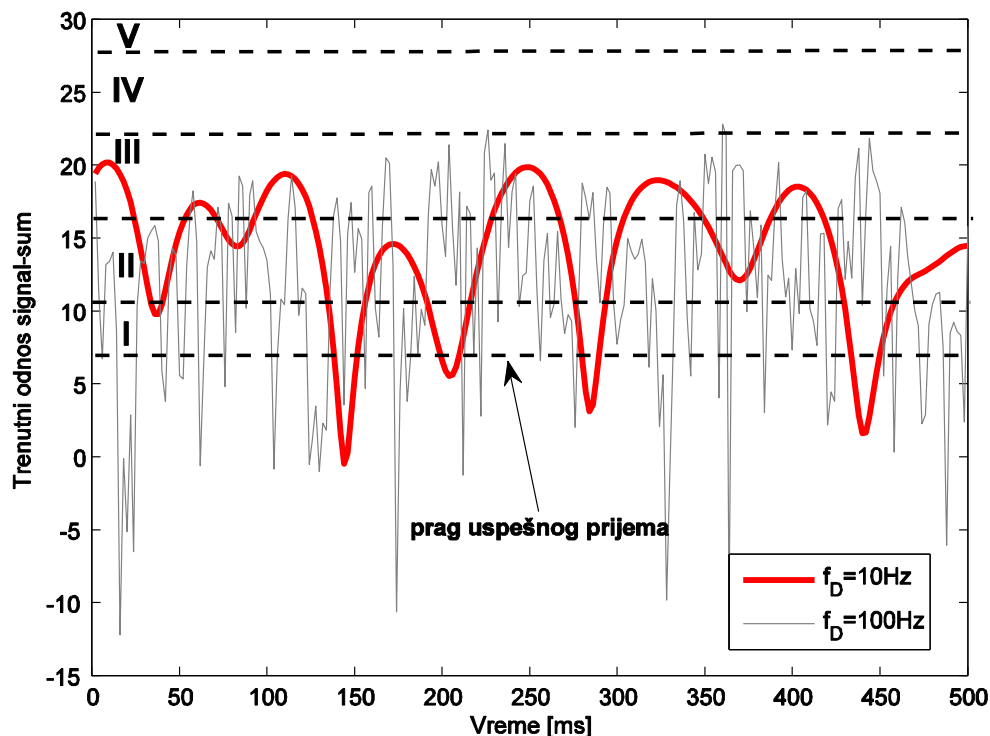
# Verovatnoća greške po bitu za razne modulacije

- \* Konstelacija višeg reda za isti simbolski protok obezbeđuje veći binarni protok (prednost), ali se isti nivo verovatnoće greške po bitu postiže za veći odnos signal-šum (mana).
- \* To znači da, primera radi, za isti kvalitet prenosa kod 16-QAM treba emitovati signal veće srednje snage nego kod QPSK.



# Dinamičko prilagođavanje modulacije

- \* Trenutni odnos signal-šum se često menja tokom vremena.
- \* Ukupan odnos signal-šum se deli na podregione, a u svakom trenutku se proverava koja je optimalna modulacija za taj trenutak.
- \* Ako je signal ispod neke granice (prag uspešnog prijema), nije moguće postići BER ispod zadatog nivoa ni sa jednom modulacijom iz datog skupa.



# Adaptivna modulacija

- **Više modova rada:**
  - U mnogim bežičnim sistemima, na fizičkom sloju se primenjuje adaptivna modulacija i to BPSK ili QAM sa kvadratnim konstelacijama reda 4, 16, 64, 256, ..., 4096.
  - kontrola grešaka (FEC) je takođe adaptivna,
  - vrši se i kontrola izlazne snage u zavisnosti od stanja u kanalu,
  - pogrešno primljeni paketi se retransmituju.

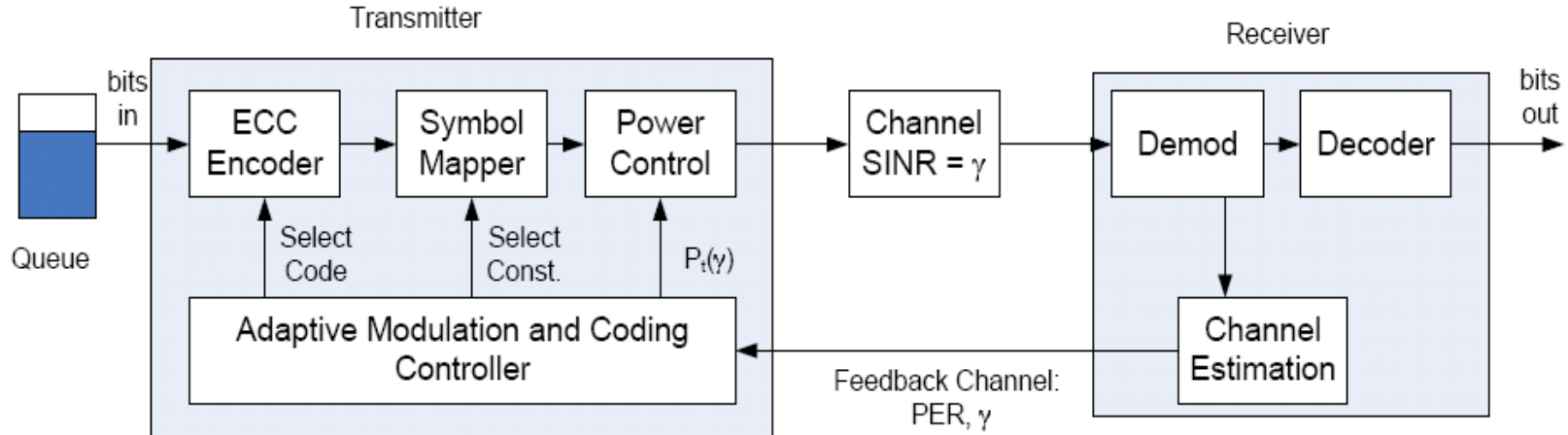


Figure 6.7: Adaptive Modulation and Coding Block Diagram.

# Tipični modovi rada

- \* Tehnika je zasnovana na dinamičkom prilagođavanju veličine konstelacije i kodnog količnika na vremenski promenljivo stanje kanala.
- \* Izbor tipa modulacije i kodnog količnika vrši se na početku svakog transmisionog rama.
- \* Pri tome važi pravilo da se, u trenucima kada je odnos signal-šum na prijemu mali, kombinuje konstelacija sa najmanjim brojem tačaka i što snažniji zaštitni kod i obrnuto.

		Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6	Mod 7	Mod 8
WLAN IEEE 802.11a	Mod	BPSK	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	64-QAM	64-QAM
	$R_c$	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
	$R$ [bit/s]	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	4.50
	PSK i QAM modulacije, punktirani konvolucioni kodovi (PCC), SR-ARQ								
WLAN HIPERLAN/2	Mod	BPSK	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	-	64-QAM
	$R_c$	1/2	3/4	1/2	3/4	9/16	3/4	-	3/4
	$R$ [bit/s]	0.50	0.75	1.00	1.50	2.25	3.00	-	4.50
	PSK i QAM modulacije, punktirani konvolucioni kodovi (PCC), SR-ARQ								
WMAN IEEE 802.16 (WiMax)	Mod	BPSK	-	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	-	64-QAM
	$R_c$	1/2	-	1/2	3/4	9/16	3/4	-	3/4
	$R$ [bit/s]	0.50	-	1.00	1.50	2.25	3.00	-	4.50
	PSK i QAM modulacije, punktirani konvolucioni kodovi (PCC), SR-ARQ, opciono Hibridne ARQ								