Elektroničke komunikacije

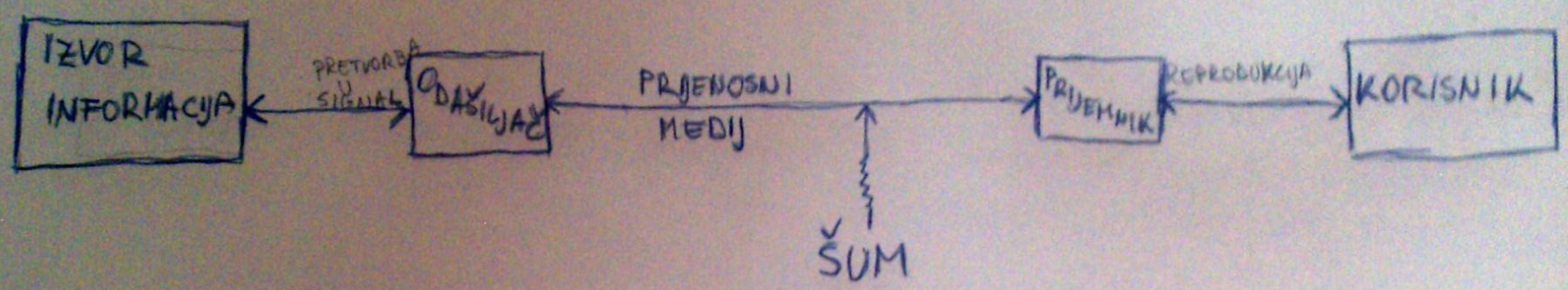
1. predavanje

by: egislov

1. DIO: Komunikacija, digitalni podaci

→ općenito:

- KOMUNIKACIJA JE PRIJENOS INFORMACIJE (PODATAKA, SMISLA) OD IZVORA PREKO UREĐAJA ZA SLANJE (ODAŠILJAČA) TE PRIJENOSNOG MEDIJA DO PRIJEMNIKA (UREĐAJA ZA PRIMANJE) I KORISNIKA
- PRITOM JE U BILO KOJEM DIJELU MOGUĆA GREŠKA, NO UZIMA SE DA ŠUM (NEPREDVIDIVI) DJELUJE KOD PRIJENOSNOG MEDIJA I OZNAČAVA UTJECAJ OKOLINE (PA JE STOGA I STOHASTIČAN)



→ decibeli (dB):

- OMJER NAPONA, SNAGA (NAJČEŠĆE) ILI NEKIH DRUGIH VELIČINA KAKO BI SE ONE LAKŠE PRIKAZIVALE I SL.

$$\frac{P_2}{P_1}[dB] = 10 \log \frac{P_2[W]}{P_1[W]} \; ; \; \boxed{dBW \rightarrow P_1 = 1W} \; \boxed{dBm \rightarrow P_1 = 1mW}$$

- MNOŽENJE SNAGA SE SVODI NA ZBROJ DECIBELA, DIJELJENJE NA ODUZIMANJE;

$3dB = 2x$; $-3dB = \frac{1}{2}x$; AKO SE RADI O OMJERU NAPONA, FORMULA JE:

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1}[dB] = 10 \log \left[\left(\frac{U_2^2}{R}\right) / \left(\frac{U_1^2}{R}\right) \right] = 10 \log \frac{U_2^2}{U_1^2} = 20 \log \frac{U_2[V]}{U_1[V]}}$$

→ oblici signala:

- SIGNAL KOJI SE ŠALJE KOMUNIKACIJSKIM KANALOM (PRIJENOSNIM MEDIJEM) MOŽE BITI ANALOGAN ILI DIGITALAN (MOGUĆE SU A\D I D\A KONVERZIJE)
- PODACI KOJI SE ŠALJU U ODAŠILJAČU MOGU KOMPRIMIRATI RADI VEĆE BRZINE PRIJENOSA, ČIM JE VEĆA BRZINA POTREBNIJI JE ŠIRI FREKVENCIJSKI SPEKTAR (UZ ISTU KOMPRESIJU I OSTALE PARAMETRE)

• UREĐAJI KOJI NE VRŠE A/D ILI D/A PRETVORBU (ODAŠILJAČI/PRIJEMNICI):

ANALOGNA INF. ⟷ **Telefon** ⟷ ANALOGNI SIGNAL

DIGITALNA INF. ⟷ **Transkoder** ⟷ DIGITALNI SIGNAL

• UREĐAJI KOJI VRŠE A/D ILI D/A KONVERZIJU:

ANALOGNA INF. ⟷ **Kodek** ⟷ DIGITALNI SIGNAL

DIGITALNA INF. ⟷ **Modem** ⟷ ANALOGNI SIGNAL

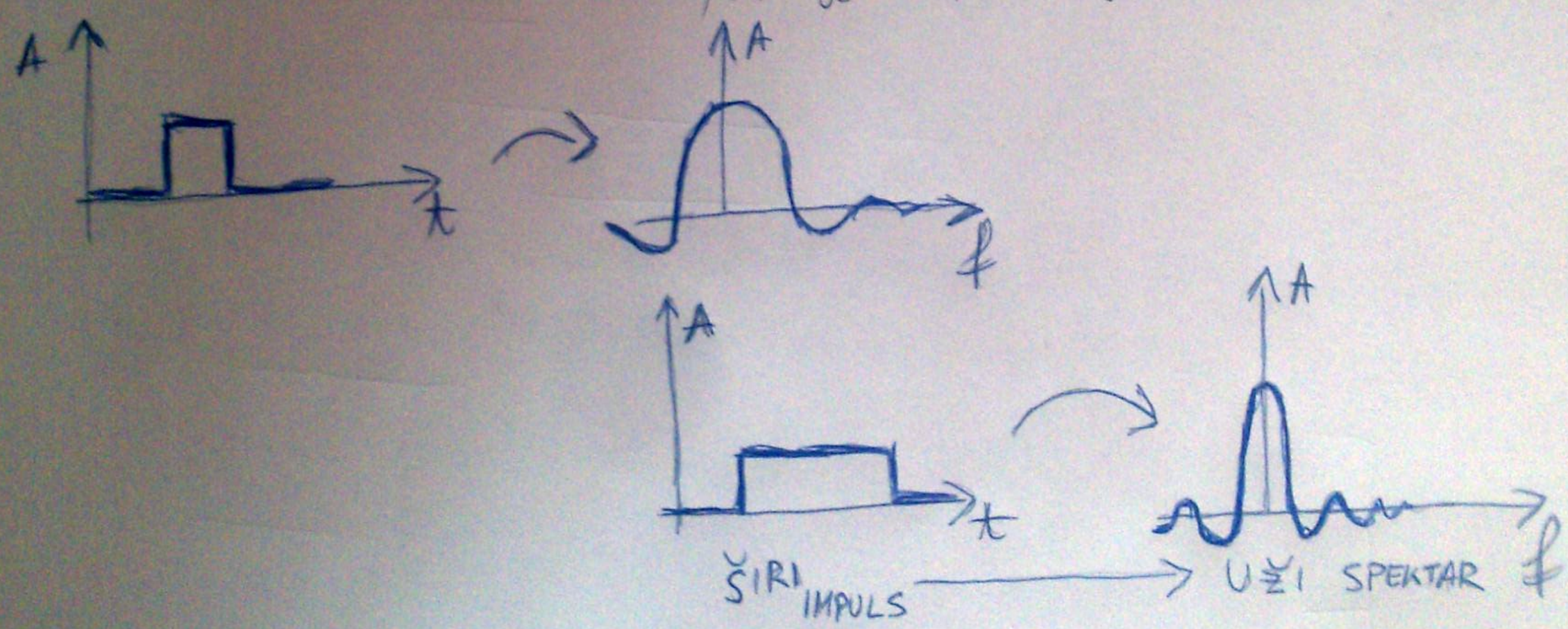
IZVOR

KANAL

→ vrste i osnove digitalnih signala:

• DIGITALNI SIGNAL JE SIGNAL S DISKRETNIM RAZINAMA SIGNALA, PRAVOKUTNOG OBLIKA, PRI ČEMU JE NAJJEDNOSTAVNIJI ONAJ S DVIJE (NAPONSKE) RAZINE, "0" I "1"

• PRAVOKUTNI OBLIK SIGNALA U VREMENSKOJ DOMENI, U FREKVENCIJSKOJ DOMENI POPRIMA OBLIK ČEŠLJA KOJEMU JE OKOJNICA $\frac{\sin x}{x}$, TE ČIM JE SIGNAL UŽI U VREM. DOMENI, ŠIRI JE U FREKVENCIJSKOJ DOMENI I OBRATNO:

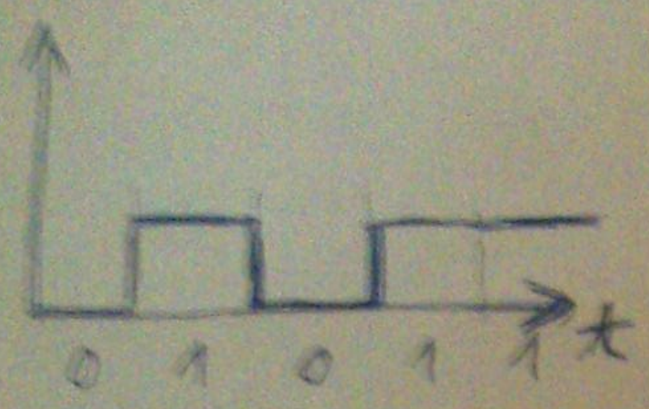


• PRIJE KOMPRESIJE, MODULACIJE I KONAČNOG SLANJA SIGNALA KANALOM, PODACI SE KODIRAJU (PREDOČUJU JEDNIM OD KODA)

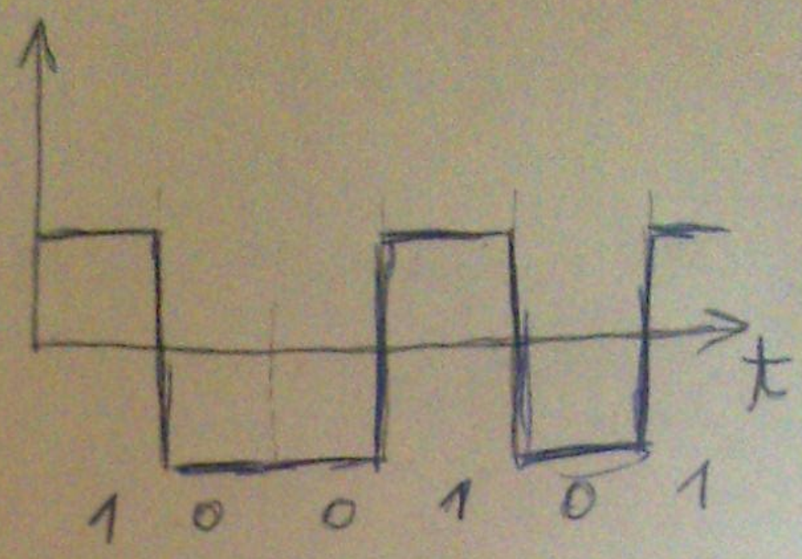
• SVAKI KOD IMA SVOJU PRIMJENU JER SE KODOVI MEĐUSOBNO RAZLIKUJU PO SPEKTRALNIM OBILJEŽJIMA, SREDNJOJ RAZINI SIGNALA I SL.

• BINARNI ZNAK MOŽE BITI PRIDRUŽEN RAZINI ELEKTRIČNOG SIGNALA ILI PROMJENI EL. SIGNALA PRI ČEMU JE BROJ RAZLIČITIH ZNAKOVA (SIMBOLA) PRIRODNA POTENCIJA BROJA 2, 2^n; $n \in \mathbb{N}$ (U NAJJEDNOSTAVNIJEM SLUČAJU SAMO SU 2 ZNAKA - "0" I "1")

• **NRZ** KOD (Non Return to Zero) JE NAJJEDNOSTAVNIJI, SVAKI SIMBOL IMA SVOJU RAZINU



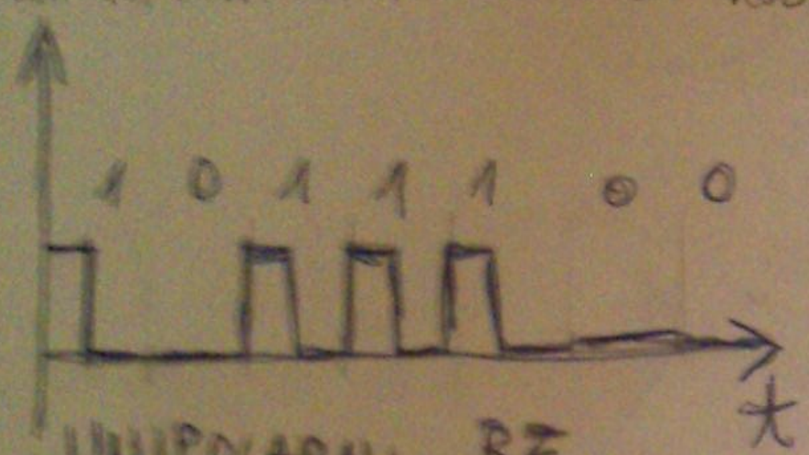
UNIPOLARNI NRZ



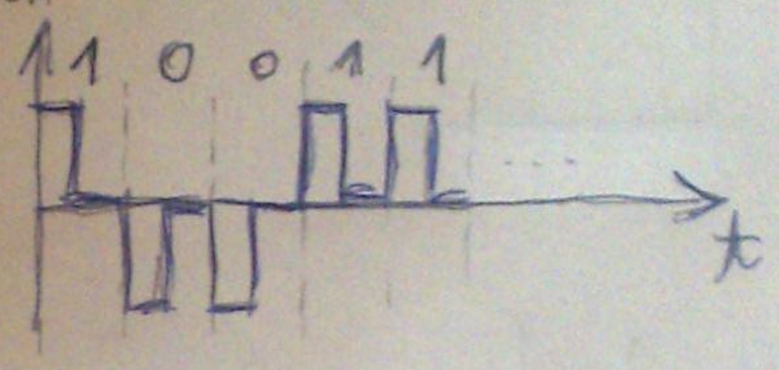
BIPOLARNI NRZ

• NRZ KOD IMA ISTOSMJERNU KOMPONENTU (SREDNJA RAZINA) KOJA SE SMANJUJE BIPOLARNIM OBLIKOM, NO POSTOJI PROBLEM U SINKRONIZACIJI TAKTA PRI DUGOM NIZU ISTIH SIMBOLA (JER SE NEZNA GDJE JE KRAJ, GDJE POČETAK JEDNOG ZNAKA)

• **RZ** KOD (Return to Zero), POGOTOVO BIPOLARNA INAČICA, RJEŠAVA PROBLEM DUGIH NIZOVA ISTIH SIMBOLA KOD NRZ KODA



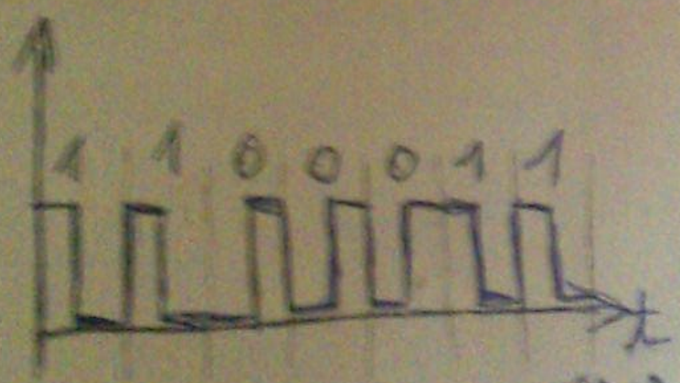
UNIPOLARNI RZ



BIPOLARNI RZ

• IAKO SE U INTERVALU TRAJANJA SIMBOLA RAZINA VRAĆA NA NULU, SVEJEDNO POSTOJI ISTOSMJERNA KOMPONENTA (KOJA JE BAR DUPLO MANJA OD RZ KODA), A I FREKVENCIJSKI POJAS JE DUPLO ŠIRI

• **MANCHESTER KOD** NEMA ISTOSMJERNU KOMPONENTU, NEMA PROBLEMA SA SINKRONIZACIJOM TAKTA, ALI MU JE FREKV. POJAS ŠIRI OD NRZ (KAO I RZ KOD)



UNIPOLARNI MANCHESTER KOD

BIPOLARNI MANCHESTER KOD

• **DIFERENCIJALNO KODIRANI** KODOVI – PROMJENA SIMBOLA PRI ODREĐENOM NAPONU :

IZVORNI NIZ		1	1	0	1	0	0	0	1
DIFER. KODIRANA	"1"	0	1	0	0	1	1	1	1	0
DIFERENC. KODIRANA	"0"	0	0	0	1	1	0	1	0	0

→ PRI POJAVI "1" U IZVORNOM, ZNAK SE MJENJA

→ PRI POJAVI "0" U IZVORNOM, ZNAK SE MJENJA, INAČE OSTAJE ISTI

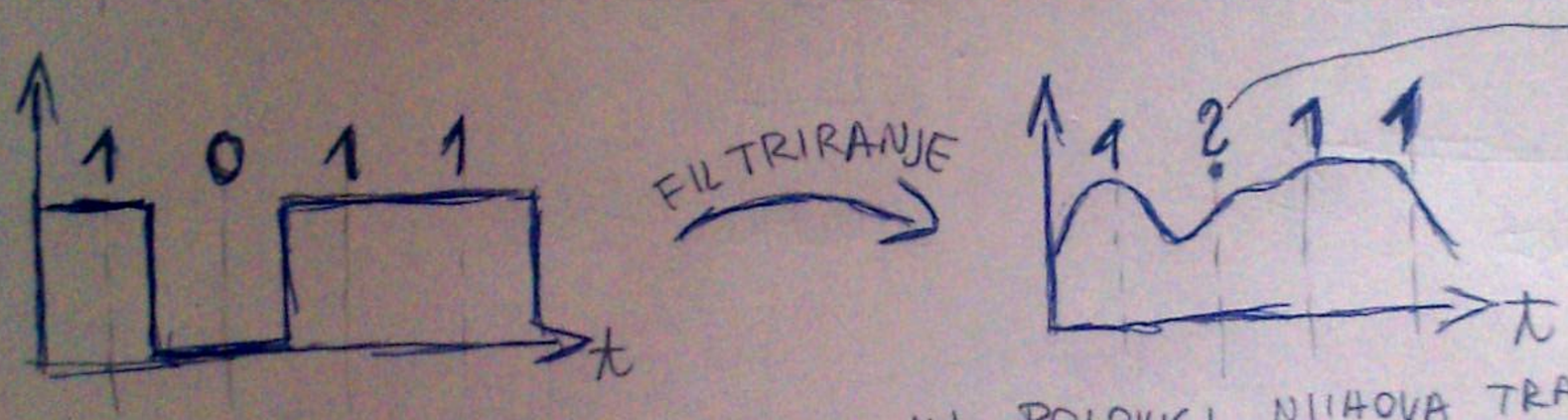
OBRATITI POZORNOST NA POČETNI ZNAK

2. DIO: Prijenos (digitalnog) signala

⇒ filtriranje digitalnog signala:

- SIGNAL JE PRIJE MODULACIJE U OSNOVNOM POJASU FREKVENCIJE, TE PRAVOKUTNI IMPULS (OD KOJEGA SE DIGITAL. SIGNALI SASTOJE) ZAUZIMA BESKONAČNO ŠIROKI FREKVENCIJSKI POJAS ($\frac{\sin x}{x}$)
- KANAL KOJIME SE SIGNALI ŠALJU NIJE BESKONAČNE ŠIRINE, PA SE SIGNALI PRIJE SLANJA FILTRIRAJU. TO JE MOGUĆE JER $\frac{\sin x}{x}$ PRAKTIČKI IMA DOVOLJNO NISKE RAZINE KOJE SU NA VELIKIM FREKVENCIJAMA
- POSLJEDICA FILTRIRANJA SU IZOBLIČENJA SIGNALA (SIGNAL SE U FREKV. DOMENI SUŽUJE ŠTO ZNAČI DA SE U VREM. DOMENI ON ŠIRI)
- POSLJEDICA PROŠIRENJA IMPULSA (SIGNALA) JE INTER-SIMBOLNA-INTERFERENCIJA (ISI)

PROŠIRENJE IMPULSA

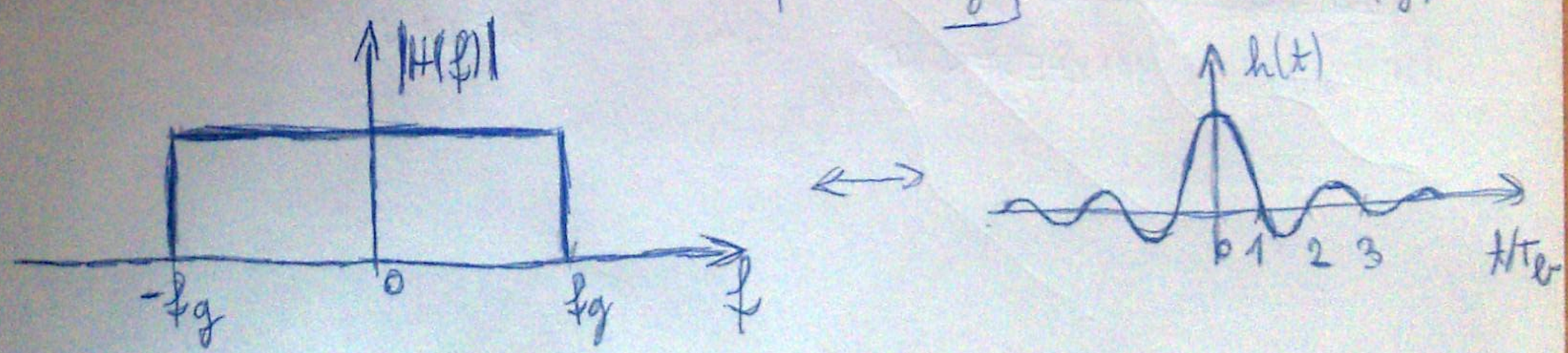


ISI

SOSTAV NEĆE ZNATI KOJI SU NEKI OD SIMBOLA

- KAKO SUSTAV OČITAVA IMPULSE NA POLOVICI NJIHOVA TRAJANJA, UZ ISI, NEKI OD NJIH ĆE BITI POGREŠNO ODREĐENI

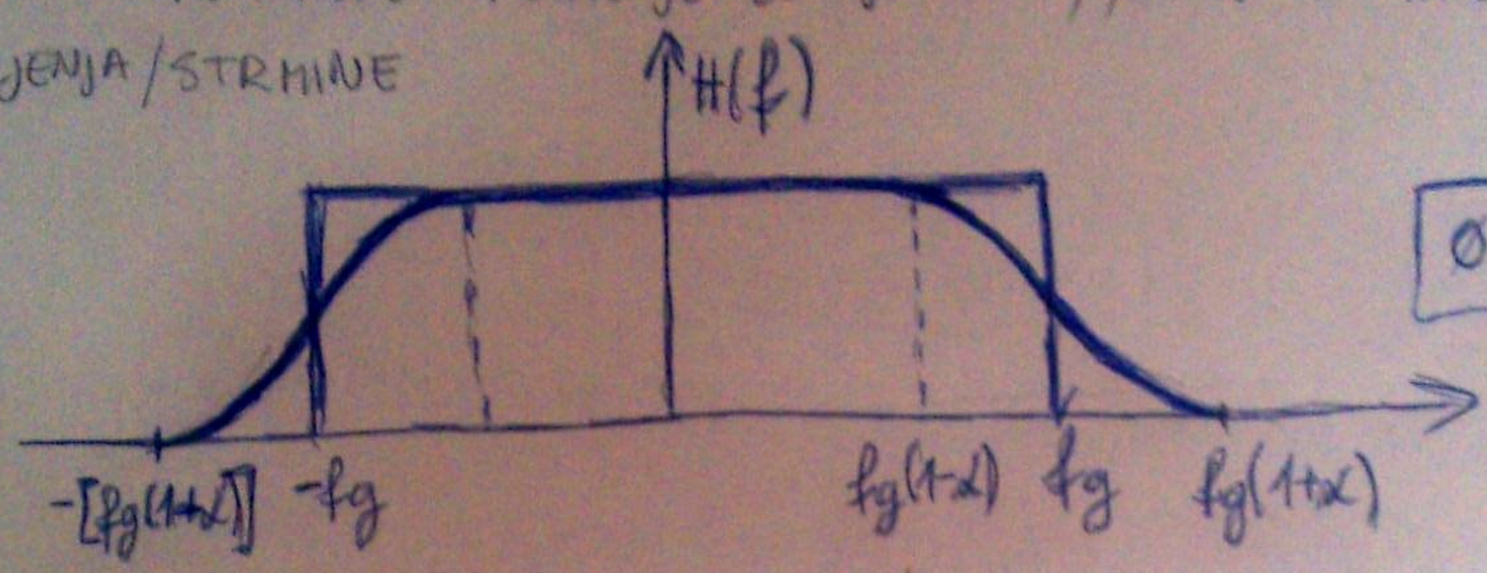
- IDEALNI FILTAR:
  - IMA PRAVOKUTNU FREKV. KARAKTERISTIKU, GRANIČNE FREKV. f_0, ŠTO ZNAČI DA MU JE VREMENSKA KARAKTERISTIKA OBLIKA $\frac{\sin x}{x}$ S NULTOČKAMA U $k \cdot \frac{1}{2f_g} = kT_b$
  - KAKO SU NULTOČKE U kT_b, MINIMALNA ŠIRINA POJASA POSLIJE MODULACIJE, ODNOSNO BRZINA PRIJENOSA SIMBOLA JE $\boxed{R_N = 2 \cdot f_g}$ (JER JE $T_b = \frac{1}{2f_g}$)



- SPEKTRALNA UČINKOVITOST JE OMJER PRENESENIH BITA U SEKUNDI I ŠIRINE POJASA:

$$\boxed{R_b / B}$$

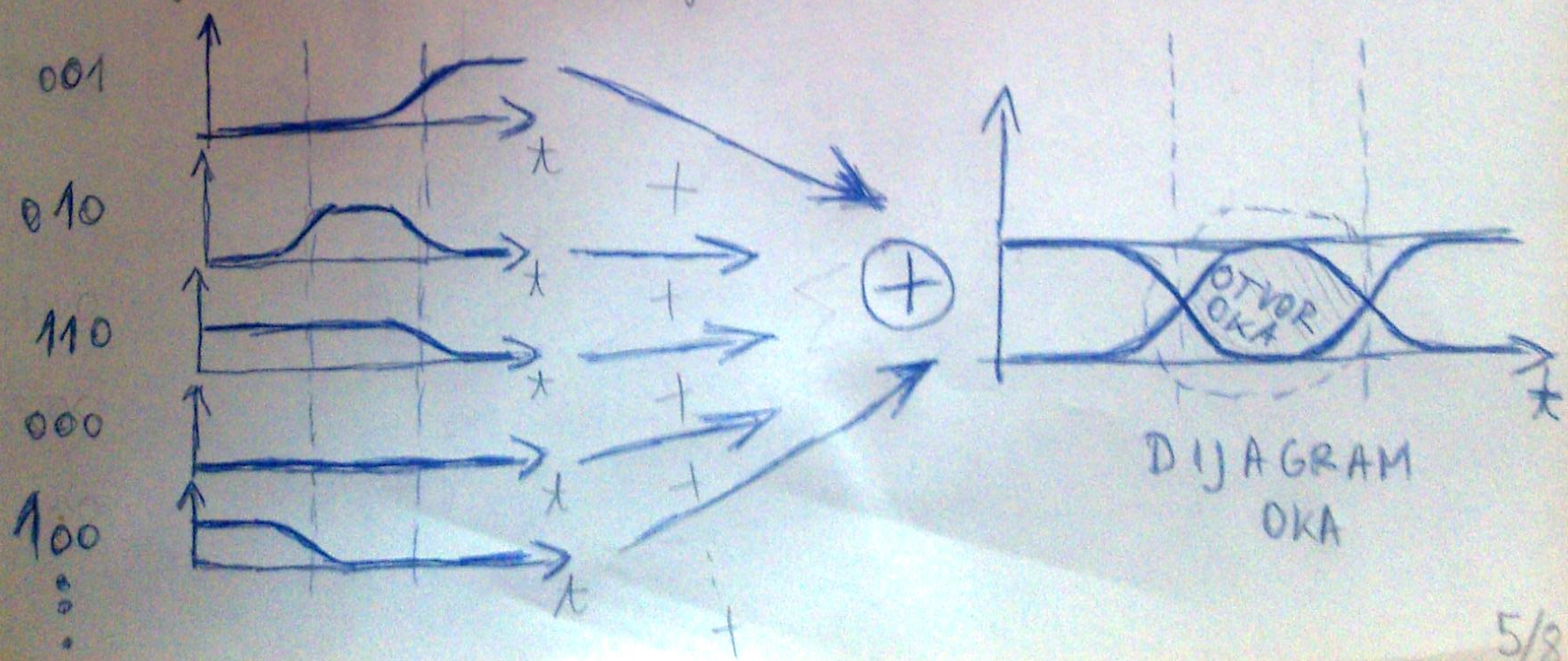
- FILTAR S KOSINUSNIM ZAOBLJENJEM:
  - REALNA KONSTRUKCIJA IDEALNOG FILTRA JE NEMOGUĆA, PA SE KORISTE ONI REALNO IZVEDIVI, POPUT KOSINUSNOG
  - KOSINUSNI FILTAR SE DOBIJE SIMETRIČNIM PROŠIRENJEM IDEALNOG, ČIME IZ NYQUISTOVOG TEOREMA IZLAZI DA POLOŽAJ NULTOČKI U VREMENSKOJ DOMENI OSTAJE OČUVAN (DOK JE FREKVENCIJSKI POJAS ŠIRI ZA $\Delta f = f \cdot \alpha$)
  - KOD KOSINUSNOG FILTRA OSTVARENI SU ISTI UVJETI ZA ISI (JER POLOŽAJ NULTOČKI VREMENSKE FUNKCIJE OSTAJE ISTI), A α SE NAZIVA FAKTOROM ZAOBLJENJA/STRMINE



$\boxed{0 \leq \alpha \leq 1}$

- GAUSSOV FILTAR:
  - IMA OBLIK GAUSSOVOG ZVONA U VREMENSKOJ KARAKTERISTICI PRI ČEMU JE ZVONO TO UŽE I VIŠE ŠTO JE VEĆI UMNOŽAK PARAMETARA: $B \cdot T_0$

→ dijagram oka:
- NASTAJE PREKLAPANJEM VELIKOG BROJA SIMBOLA NA ISTOM GRAFU, ČIME SE DOBIVA OBLIK OKA
- PRI IZOBLIČENJU SIMBOLA (ISI) OTVORENOST OKA SE SMANJUJE/POMIČE ŠTO SLUŽI ZA PROCJENU IZOBLIČENJA I KVALITETE
- OTVORENOST OKA JE IDEALNO 100%, U REALNIM SITUACIJAMA ISI GA SMANJUJE PA ZADOVOLJAVA >50%
- POMAK OKA USLIJED PODRHTAVANJA OKA
- OKO JE ASIMETRIČNO AKO JE PRIJENOS NELINEARAN



Smetnje, šum:

- KARAKTERISTIKA SIGNALA SE MNOŽI S KARAKTERISTIKOM FILTRA, KANALA TE KARAKTERISTIKOM PRIJEMNIKA
- FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA KANALA NIJE RAVNA CRTA, PA SU RAZNE FREKVENC. KOMPONENTE SIGNALA RAZLIČITO PRIGOŠENE, IMAJU RAZLIČITO KAŠNJENJE TE IM JE SUPERPONIRAN STOHASTIČKI ŠUM
- GOŠENJE SIGNALA RASTE PORASTOM FREKVENCIJE, TE SE IZRAŽAVA U DECIBELIMA:

GOŠENJE: $L = 10 \log(P_{UL}/P_{IZL}) = 20 \log(U_{UL}/U_{IZL})$ [dB]

POJAČANJE: $A = 10 \log(P_{IZL}/P_{UL})$ [dB]

- BRZINA PROPAGACIJE SIGNALA JE FREKV. OVISNA PA RAZNE KOMPONENTE (FREKVENCIJSKE) IMAJU RAZLIČITO KAŠNJENJE
- ŠUM SE JAVLJA ZBOG UTJECAJA OKOLINE I UREĐAJA, TE SE DIJELI NA:

– TERMIČKI ŠUM – UZROKOVAN TEMPERATUROM (GIBANJEM ELEKTRONA), IZ OKOLINE TE SAMIH UREĐAJA ZA SLANJE/PRIMANJE, IMA PRIBLIŽNO JEDNOLIKU RASPODJELU DUŽ FREKVENCIJSKE OSI I RAZINA SE RAČUNA PO FORMULI:

$$N = kTB \; [W]$$

k – BOLTZMANNOVA KONST.
T – TEMP. U KELVINIMA
B – ŠIRINA POJASA U Hz

– INTERMODULACIJSKI ŠUM – SIGNALI KOJI SE ŠALJU NA RAZNIM FREKVENCIJAMA SI U ISTOM KANALU MEĐUSOBNO SMETAJU

– PRESLUŠAVANJE – SIGNALI KOJI IDU ISTIM PROSTOROM SI MEĐUSOBNO SMETAJU

– IMPULSNI ŠUM – JAVLJA SE USLIJED JAKIH IMPULSA UZROKOVANIH GRMLJAVINOM I SL.

- ZA MOGUĆU REPRODUKCIJU SIGNALA, ON MORA BITI VEĆI OD ŠUMA, ZATO SE ZA KVALITETU SIGNALA DEFINIRA ODNOS SIGNAL/ŠUM:

$$S/N \; [dB] = 10 \log_{10}(S[W]/N[W])$$

(*ILI C/N; E_b/N_0 U DIGITAL. PRIJ.*)

- ZA PROCJENU KVALITETE DIGITALNE INFORMACIJE KORISTI SE I BER (Bit Error Rate) KOJI JE OMJER POGREŠNIH BITOVA NAD ODASLANIM:

$$BER = \frac{n}{N}$$

n – POGREŠNI BITOVI
N – SVI ODASLANI BITOVI

- KAKO KANAL IMA FREKVENCIJSKI SELEKTIVNU KARAKTERISTIKU NA PRIJEMNOJ STRANI POKUŠAVA SE TO KOMPENZIRATI FILTRIMA S PROMJENJIVIM KOEFICIJENTIMA

→ kapacitet kanala i usporedba analognog/digit. prijenosa:

- KANAL IMA OGRANIČENU MAKSIMALNU BRZINU PRIJENOSA PODATAKA (T.J. KAPACITET), ON OVISI O ŠIRINI FREKV. POJASA, RAZINI ŠUMA, BROJU NAPONSKIH RAZINA I MINIMALNOM BER-U
- NYQUISTOVA FORMULA: $C = 2B\log_2 M$
  - M → BROJ NAPONSKIH RAZINA
- SHANNONOVA FORMULA: $C = B\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right)$
  - $\frac{S}{N}$ → NIJE U dB
- KOD ANALOGNIH SIGNALA KVALITETA NE OVISI O SADRŽAJU, OSJETLJIV JE NA ŠUM, NIJE MOGUĆA REGENERACIJA SIGNALA (PORASTOM UDALJENOSTI KVALITETA SE NEPOVRATNO GUBI)
- KOD DIGITALNIH SUSTAVA KVALITETA OVISI O SADRŽAJU, ALI SU SIGNALI MANJE OSJETLJIVI NA ŠUM I MOGUĆA JE REGENERACIJA SIGNALA; UREĐAJI SU JEFTINIJI I BOLJE JE ISKORIŠTEN SPEKTAR, MOGUĆE JE ŠIFRIRANJE SIGNALA

3. DIO: Prijenosni mediji

→ upletena parica:

- SPIRALNO UPLETENI VODIČ KAKO BI SE SMANJILI VANJSKI I MEĐUSOBNI UTJECAJ
- JEFTIN I JEDNOSTAVAN, ALI VELIKO GOŠENJE NA VELIKE UDALJENOSTI

→ koaksijalni kabel:

- 2 KABELA, TANJI UNUTAR VEĆEG, ŠUPLJEG; ODVOJENI IZOLATOROM
- PUNO VIŠE SMANJENI VANJSKI UTJECAJI, NO KOMPLICIRANIJI I SKUPLJI

→ svjetlovod:

- FLEKSIBILAN I JEFTIN, NO KRAJNJI UREĐAJI (LASERI) SU SKUPI
- MALO GOŠENJE, KORISTI SE NA VEĆE UDALJENOSTI, VELIKE BRZINE
- DVIJE VRSTE PRISTUPNIH UREĐAJA, LED (JEFTINIJI I LOŠIJI) I LASER (BOLJI, SKUPLJI)
- 2 VRSTE: VIŠEMODNI I JEDNOMODNI

→ radijski prijenos

- SIGNAL SE ŠALJE I PRIMA ANTENAMA ELEKTROMAGNETSKIM VALOM KROZ SLOBODNI PROSTOR
- PRIJENOS MOŽE BITI: - USMJEREN - OD TOČKE DO TOČKE
  - NEUSMJEREN - OLAŠIJAČ I PRIMAJU SVI KOJI TO MOGU

- DO 30 MHz EM-VAL SE REFLEKTIRA OD IONOSFERE, ŠTO SE KORISTI U KOMUNIKACIJAMA
- IZNAD 30MHz VAL PROLAZI KROZ IONOSFERU
- PRI JAKO MALIM FREKV. VAL PRATI ZAOBLJENOST ZEMLJE
- ZBOG RAZLIČITE GUSTOĆE ATMOSFERE VAL SE LOMI PREMA ZEMLJI PA BLAGO (VIŠE ILI MANJE) PRATI ZAOBLJENOST ZEMLJINE POVRŠINE
- DOMET EM-VALA (2 ANTENE):

$$d = 3.57\left(\sqrt{kh_1} + \sqrt{kh_2}\right)$$

; $k=1$ ZA OPTIČKU VIDLJIVOST

$k=4/3$ ZA RADIJSKI HORIZONT

- GUŠENJE EM-VALA VALNE DULJINE λ NA UDALJENOSTI d:

$$L = 10\log\left(\frac{4\pi d^2}{\lambda}\right) [dB]$$

- GUŠENJE RASTE S UDALJENOSTI I FREKVENCIJOM
- ZBOG VIŠESTAZNOG ŠIRENJA VALA, ISTI VAL MOŽE SAM SEBI SMETATI (REFLEKSIJE)
- OSIM ANTENAMA, EM-VAL SE MOŽE SLATI I SATELITOM:
  - GEO - GEOSTACIONARNI, NAJVIŠI I NAJVEĆE KAŠNJENJE, MALI BROJ SATELITA
  - MEO - (Medium) - SREDNJI
  - LEO - (Low) - NAJNIŽI, NAJMANJE KAŠNJENJE, NAJVEĆI POTREBAN BROJ SATELITA
  - ZA SVAKU VEZU (downlink ILI uplink) I DODJELU VEZA BRINE SE UREĐAJ TRANSPONDER
- WLAN - BEŽIČNI PRIJENOS NA MALU UDALJENOST

Elektroničke komunikacije

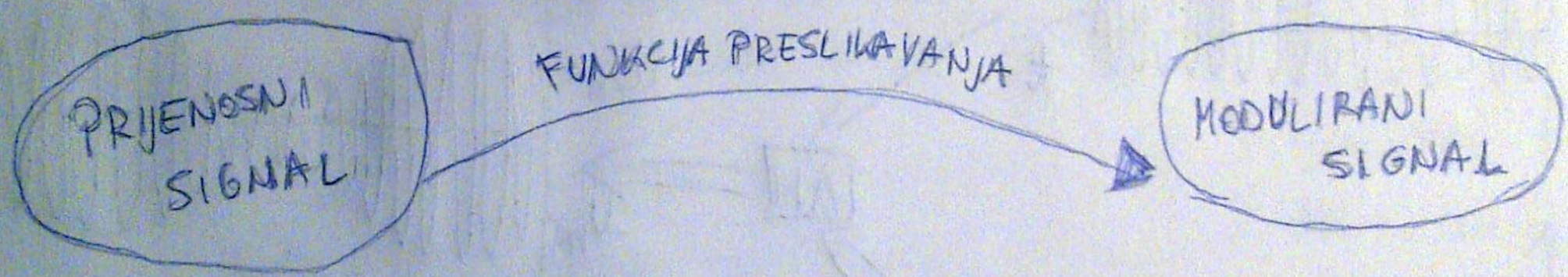
2. predavanje

by: egislov

1. DIO: Općenito i amplitudna modulacija (AM)

Općenito:

- NAKON KODIRANJA, ŠIFRIRANJA I OBRADE PODATAKA, SIGNAL JE PRIJE SLANJA KOMUNIKACIJSKIM KANALOM POTREBNO MODULIRATI I NA PRIJEMNOJ STRANI DEMODULIRATI
- MODULACIJA JE PROMJENA PARAMETARA SIGNALA PRIJE SLANJA (AMPLITUDE, FAZNIH ODNOSA...) ČIME SIGNAL IZ OSNOVNOG POJASA (NIŽIH FREKVENCIJA; OD $0 - f_g$) PREBACUJEMO (MODULIRAMO) U VIŠI POJAS FREKVENCIJA
- SIGNAL (PODATKE) PRIJE MODULACIJE ZOVEMO MODULACIJSKI SIGNAL I ON UPRAVLJA PROMJENAMA PARAMETARA POMOĆNOG, PRIJENOSNOG SIGNALA
- DRUGIM RIJEČIMA: GENERATOROM SIGNALA GENERIRAMO PRIJENOSNI SIGNAL KOJI U SEBI NE NOSI KORISNU INFORMACIJU; ZATIM MIJENJAMO PARAMETRE PRIJENOSNOG SIGNALA OVISNO O PARAMETRIMA MODULACIJSKOG SIGNALA (KOJI SADRŽI PODATKE), REZULTATNI SIGNAL KOJI ŠALJEMO KANALOM ZOVE SE MODULIRANI SIGNAL:
- UREĐAJI KOJI VRŠE (DE)MODULACIJU ZOVU SE MODULATORI/DEMODULATORI



- FUNKCIJA PRESLIKAVANJA OVISI O PODACIMA (MODULACIJSKI SIGNAL) I MODULACIJSKOM POSTUPKU
- DEMODULACIJA SE DIJELI NA:
  - KOHERENTNU – PRIJEMNIK I ODAŠILJAČ SU SINKRONIZIRANI PO FAZI PRIJ. SIGNALA
  - NEKOHERENTNU – PRIJEMNIK I ODAŠILJAČ NISU SINKRONIZIRANI – " –
- MODULACIJE SE DIJELE NA:
  - KONTINUIRANE – OVO PREDAVANJE :) (PRIJ. → SINUSNI I MODULACIJSKI SIGNALI SU KONTINUIRANI)
  - DISKRETNE – 3. PREDAVANJE (PRIJENOSNI S. JE SINUS, MODULAC. JE DISKRETAN)
  - IMPULSNE – 4. PREDAVANJE (PRIJ. SIG. JE DISKRETAN, MODULACIJSKI ILI ANAL. ILI DISKR.)
  - DIGITALNE – NEĆE SE RADITI NA PREDMETU (KOMPLICIRANI POSTUPCI)

AM (Amplitude Modulation):

- AMPLITUDA PRIJENOSNOG SIGNALA LINEARNA JE FUNKCIJA MODULACIJSKOG SIGNALA

PRIJENOSNI SIGNAL: $u_p(t) = U_{PM}\cos(\omega_p t + f)$; $U_{PM} = f(u_m(t)) = U_{PM} + k_a u_m(t)$;

ČIME SE DOBIVA AM-SIGNAL

- FAZA JE OVDJE NEBITNA, ONA SE NEĆE MODULIRATI PA MOŽEMO PISATI $f = 0$; A MODULACIJSKI SIGNAL FOURIEROVOM ANALIZOM MOŽEMO RASTAVITI NA KOSINUSE RAZNIH FREKVENCIJA (RADI JEDNOSTAVNOSTI PRVO ĆE SE UZETI SAMO JEDAN OD TIH KOSINUSA):

AM-SIGNAL: $u_{AM}(t) = U_{AM}\cos\omega_p t = \left[U_{PM} + k_a U_{MM}\cos\omega_M t\right]\cos\omega_p t$

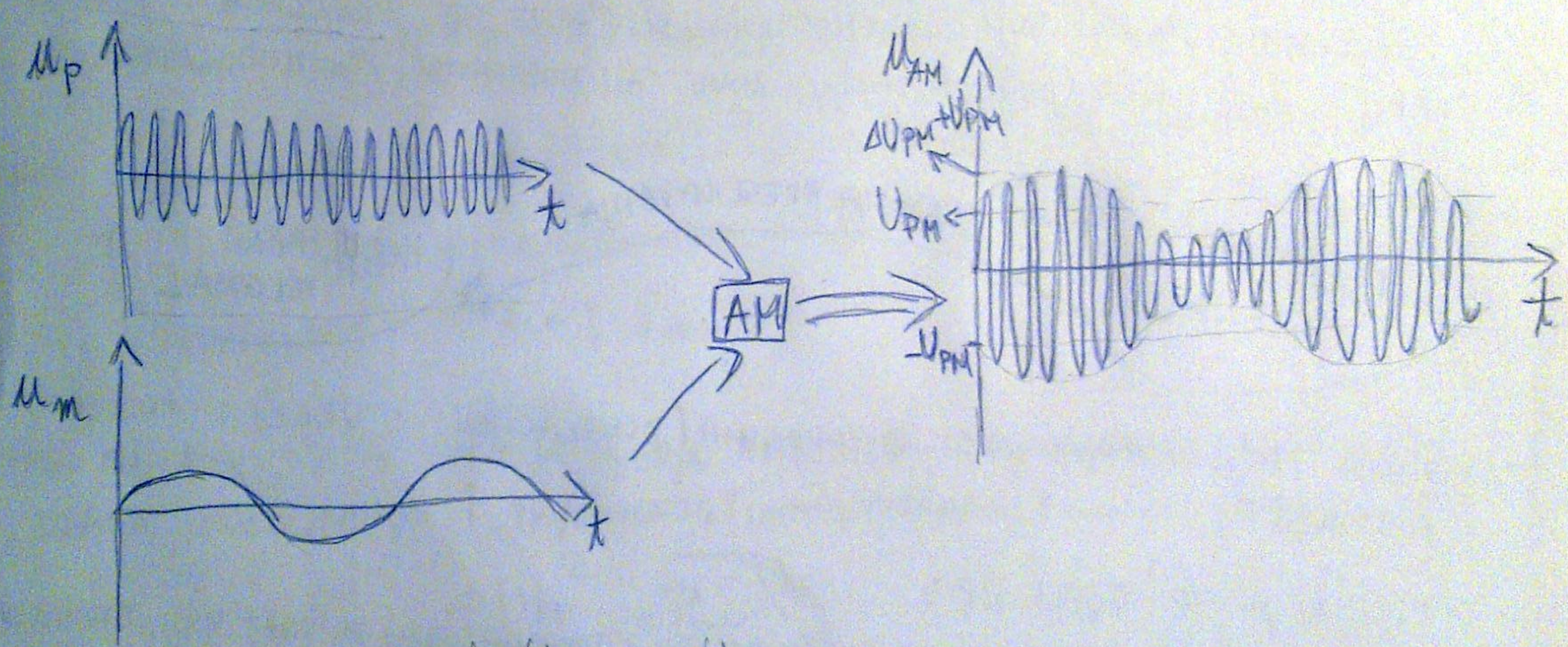
- MAXIMUM, TJ. MINIMUM AMPLITUDE JE PRI $\cos\omega_M t = \pm 1$

$$u_{AM}(t) = U_{PM}\left(1 + \frac{k_a U_{MM}}{U_{PM}}\cos\omega_M t\right)\cos\omega_p t$$

- PRITOM JE PRIJENOSNI SIGNAL PUNO VEĆE FREKVENCIJE OD MODULACIJSKOG KAKO BI PREBACILI NEMODULIRANI SIGNAL IZ OSNOVNOG POJASA U POJAS VIŠIH FREKVENCIJA;

$$\omega_p \gg \omega_M$$

- REZULTAT, AM-SIGNAL JE U MNOŽAK PRIJENOSNOG SIGNALA I LINEARNE FUNKCIJE MODULACIJSKOG:

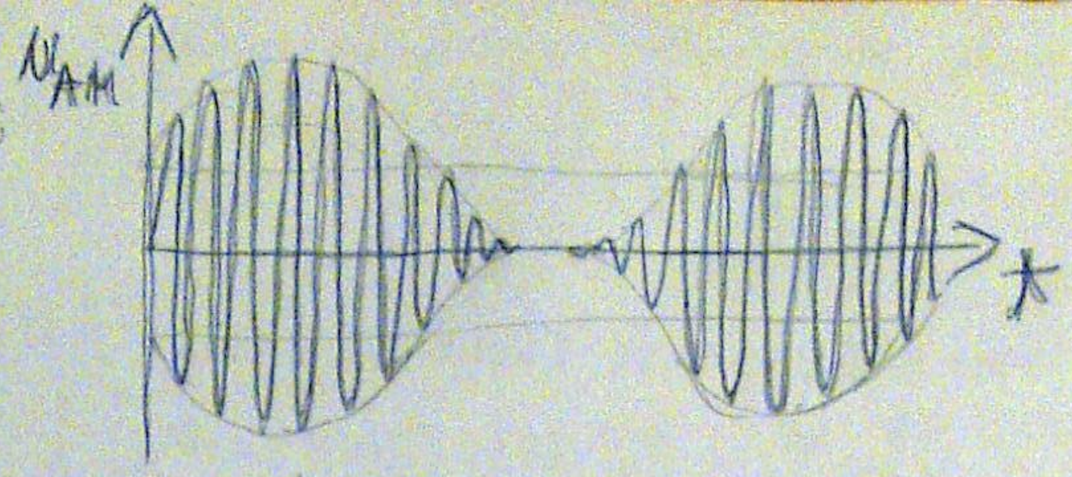


$\Delta U_{PM} = k_a U_{MM}$; $\frac{k_a U_{MM}}{U_{PM}} = \frac{\Delta U_{PM}}{U_{PM}} = m_a$ ... INDEKS MODULACIJE AM-SIGNALA

$$u_{AM}(t) = U_{PM}(1 + m_a\cos\omega_M t)\cos\omega_p t$$

- INDEKS MODULACIJE GOVORI O "DUBINI" MODULACIJE, KADA JE $m_a \leq 1$ OVOJNICA ĆE PRATITI (NEPREKIDNO) PROMJENU VREMENA, PRI $m_a > 1$ DOĆI ĆE DO PREMODULACIJE, TJ. OVOJNICA ĆE SE IZOBLIČITI JER ĆE BITI $\Delta U_{PM} > U_{PM}$ (VIDI SLIKU NA SLJ. STRANICI)

PREMODULACIJA:



IZOBLIČENJE OVOJNICE

- KORIŠTENJEM FORMULE ZA UMNOŽAK KOSINUSA AM-SIGNAL PRELAZI U:

$$u_{AM}(t) = U_{PM}\left[\cos\omega_p t + \frac{m_a}{2}\cos(\omega_p t + \omega_M t) + \frac{m_a}{2}\cos(\omega_p t - \omega_M t)\right]$$

- PREBACI LI SE GORNJA FORMULA U FREKVENCIJSKU DOMENU VIDI SE DA SE AM-SIGNAL MODULIRAN KOSINUSOM JEDNE FREKV. (ω_M) SASTOJI OD 3 KOMPONENTE!

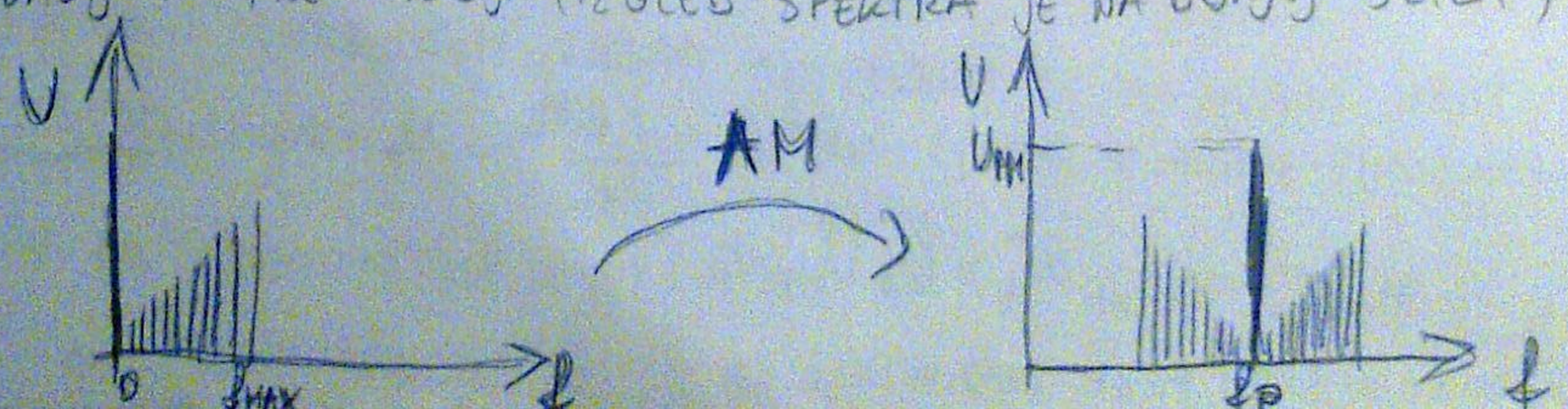
FREKVENCIJA:	$\omega_p - \omega_M$	ω_p	$\omega_p + \omega_M$
AMPLITUDA	$U_{PM}\cdot\frac{m_a}{2}$	U_{PM}	$U_{PM}\cdot\frac{m_a}{2}$

- FREKVENCIJSKA ŠIRINA POJASA JE OČITO: $B = (\omega_p + \omega_M) - (\omega_p - \omega_M) = 2\omega_M$ tj. $2f_M$
- AM JE LINEARNI MODULACIJSKI POSTUPAK JER ČUVA BROJ FREKVENCIJSKIA KOMPONEN, PRIJE I POSLIJE MODULACIJE ŠIRINA POJASA JE OSTALA ISTA (PRIJE MODULACIJE NISMO BROJALI I NEGATIVNE FREKV. KOMP. MODULACIJSKOG SIGNALA KOJE SE POSLIJE AM POMIČU NA POZITIVNI DIO OSI PA ONDA I NJIH BROJIMO), ZA RAZLIKU OD PM I FM POSTUPKA GDJE SE PRI MODULACIJI JAVLJAJU NOVE FREKV. KOMPONENTE PA POJAS BODE ∞

SPEKTAR AM-SIGNALA

$$B_{AM} = 2f_M$$

- AKO SE RADI O REALNOM SLUČAJU, MODULACIJOM KOSINUSIMA (VIŠE OD JEDNE MODULACIJSKE FREKVENCIJE), TADA JE $B_{AM} = 2f_{MAX}$, GDJE JE f_{MAX} NAJVIŠA OD MODULACIJSKIH FREKVENCIJA (IZGLED SPEKTRA JE NA DONJOJ SLICI)



• AM-SIGNAL SE MOŽE PRIKAZATI I U KOMPLEKSNOM OBLIKU:

$$u_{AM}(t) = U_{PM}\,\mathrm{Re}\left\{ e^{j\omega_P t} + \frac{m_a}{2} e^{j(\omega_P+\omega_M)t} + \frac{m_a}{2} e^{j(\omega_P-\omega_M)t} \right\}$$

• SREDNJA SNAGA AM-SIGNALA SE DOBIJE INTEGRIRANJEM (NA OTPORU 'R') PO PERIO

$$P_{AM} = \frac{U_{PM}^2}{2R}\left(1+\frac{m_a^2}{2}\right) = P_{P0}\left(1+\frac{m_a^2}{2}\right)$$

; P_{P0} ... SNAGA PRIJENOSNOG SIGNALA (NEMODULIRANOG)

• DEMODULACIJA AM-SIGNALA NA PRIJEMNOJ STRANI RADI SE NA 2 NAČINA:

- KOHERENTNI POSTUPAK (RJEĐE) – OSNIVA SE NA MNOŽENJU AM-SIGNALA S JEDNIM POMOĆNIM SIGNALOM KOJI TREBA BITI ČIM SLIČNIJI IZVORNOM PRIJENOSNOM SIGNALU U MODULATORU
- NEKOHERENTNI POSTUPAK – DETEKCIJA OVOJNICE, PRI ČEMU TREBA BITI $f_P \gg f_M$ I $m_a < 1$

2. DIO: Modulacija faze i frekvencije (PM i FM)

→ PM (Phase Modulation):

• FAZA (RELATIVNA) PRIJENOSNOG SIGNALA JE LINEARNA FUNKCIJA MODULACIJSKOG SIGNALA (AMPLITUDA SE NE MIJENJA):

$$f(t)_{PM} = f_0 + k_P u_M(t)\ ;\ f_0 = \emptyset \text{ JER JE I ONAKO SVEJEDNO}$$

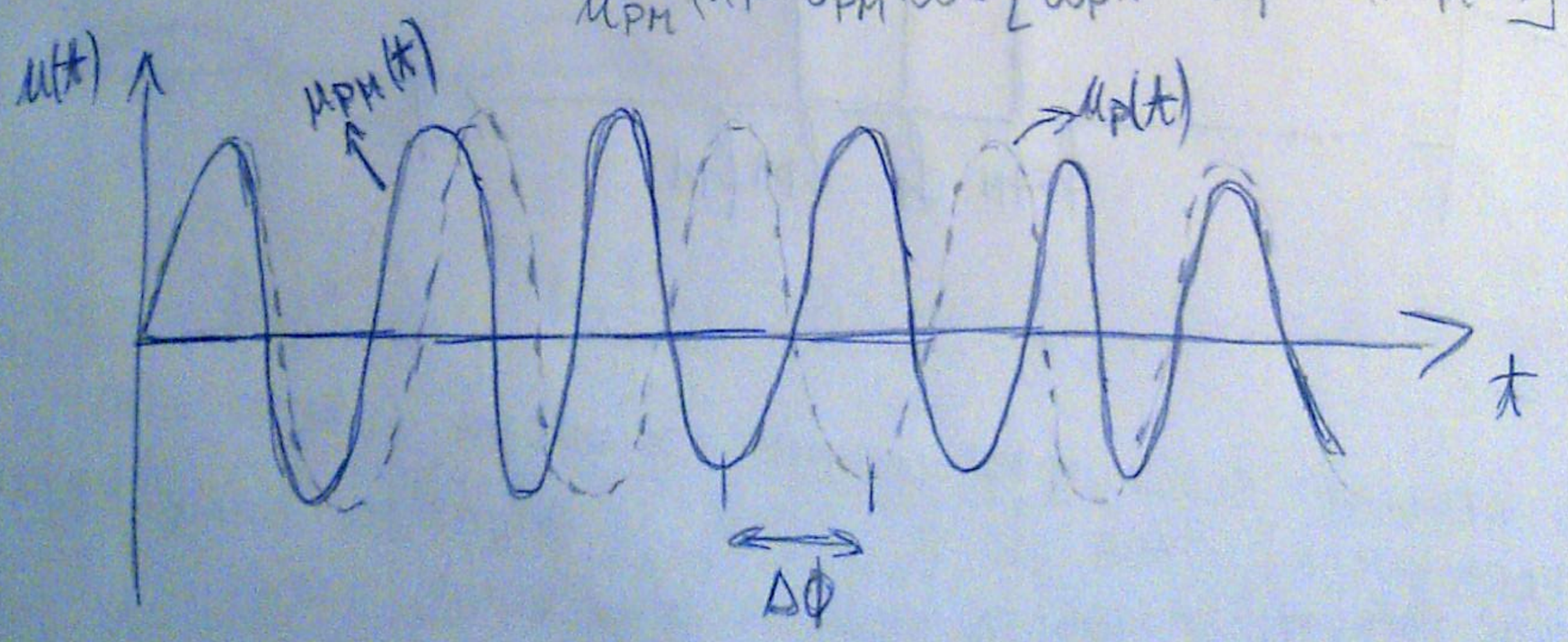
$$u_{PM}(t) = U_{PM}\cos\left(\omega_P t + k_P u_M(t)\right)$$

• AKO SE MODULACIJSKI SIGNAL SASTOJI OD KOSINUSA JEDNE FREKVENCIJE, $u_M(t) = U_{MM}\sin\omega_M t$, TADA JE (MAKSIMALNA) DEVIJACIJA (ODSTUPANJE) FAZE OD PRIJENOSNE:

$$\Delta\phi_{PM} = k_P U_{MM} = m_P \text{ ... INDEKS MODULACIJE PM-SIGNALA}$$

$m_P \in \mathbb{R}$ (ZA RAZLIKU OD AM-SIGNALA)

$$u_{PM}(t) = U_{PM}\cos\left[\omega_P t + m_P \sin(\omega_M t)\right]$$



• MODULACIJOM FAZE MIJENJA SE I TRENUTNA FREKV. MODULIRANOG SIGNALA (JER JE DEFINICIJA FREKVENCIJE – DERIVACIJA FAZE): $\omega(t)_{PM} = \frac{d\phi(t)_{PM}}{dt} = \omega_P + m_P\omega_M \cos(\omega_M t)$

$\Delta\omega_{PM} = m_P\omega_M = \Delta\phi_{PM}\omega_M = k_P U_{MM}\omega_M$; PM I FM POSTUPCI SU USKO POVEZANI, SINUSNOM PROMJENOM FAZE FREKVENCIJA SE MIJENJA PO KOSINUSU!

M (Frequency Modulation):

- FREKVENCIJA PRIJENOSNOG SIGNALA JE LINEARNA FUNKCIJA MODULACIJSKOG SIGNALA

$$\omega(t)_{FM} = \omega_p + k_F u_M(t)$$

- KAKO JE FREKVENCIJA DERIVACIJA FAZE, TADA JE FAZA FM-SIGNALA INTEGRAL FAZE PO VREMENU:

$$\phi(t)_{FM} = \int_0^t \omega(t)_{FM}\,dt = \omega_p t + k_F \int_0^t u_M(t)\,dt$$

- AKO JE MODULACIJSKI SIGNAL KOSINUS JEDNE FREKVENCIJE, TADA JE JEDNOSTAVNO IZRAČUNATI POTREBNE PARAMETRE:

$$u_M(t) = U_{MM} \cos \omega_M t$$

$$\boxed{\Delta\omega_{FM} = k_F U_{MM}}$$

$$\phi(t)_{FM} = \omega_p t + \frac{k_F}{\omega_M} U_{MM} \sin \omega_M t = \omega_p t + \frac{\Delta\omega_{FM}}{\omega_M} \sin \omega_M t$$

$$\boxed{\Delta\phi_{FM} = \frac{\Delta\omega_{FM}}{\omega_M} = \frac{k_F U_{MM}}{\omega_M} = m_F \quad \text{... INDEKS MODULACIJE}}$$

$$u_{FM}(t) = U_{PM} \cos\left[\omega_p t + m_F \sin(\omega_M t)\right]$$

- MODULACIJOM PO KOSINUSU, FAZA ĆE SE MJENJATI PO SINUSU! OBLIK MODULIRANIH SIGNALA PM I FM JE JEDNAK (AKO JE JEDAN PO KOSINUSU A DRUGI PO SINUSU I OBRATNO), TE IM JE I SPEKTAR JEDNAK, JEDINA RAZLIKA JE U DEFINIRANIM INDEKSIMA MODULACIJE I DEVIJACIJAMA FAZE/FREKVENCIJE

- AKO JE $m < 0.4$ PRIBLIŽNIM APROKSIMACIJAMA DOBITI ĆE SE 3 SPEKTRALNE KOMPONENTE I KAŽEMO DA SE RADI O USKOPOJASNOJ MODULACIJI ARGUMENTA;

FREKVENCIJA	$f_P - f_M$	f_P	$f_P + f_M$
AMPLITUDA	$U_{PM} \cdot \frac{m}{2}$	U_{PM}	$U_{PM} \cdot \frac{m}{2}$

(PRI $m < 0.4$ SPEKTAR PM I FM SIGNALA JEDNAK JE AM-SIGNALU)

- UKLJUČO ĆE FAZA MJENJA PO SINUSNOM ZAKONU; $u_{PM} = U_{PM} \cos\left[\omega_p t + m \boxed{\sin(\omega_M t)}\right]$, DONJA BOČNA KOMPONENTA ĆE BITI NEGATIVNA $\left(-U_{PM} \cdot \frac{m}{2}\right)$ JER JE SINUS NEPARNA FUNKCIJA

- PRI $m > 0.4$ RADI SE O ŠIROKOPOJASNOJ MODULACIJI I SPEKTAR SE NE MOŽE APROKSIMIRATI S 3 KOMPONENTE
- PRI ŠIROKOPOJASNOJ MODULACIJI SPEKTRALNE KOMPONENTE SE RAČUNAJU S BESSELOVIM FUNKCIJAMA I JACOBIJEVIM REDOVIMA
- FREKVENCIJSKI POJAS ĆE PRI $m > 0.4$ BITI ∞ ŠIROK JER SE JAVLJA BESKONAČNO MNOGO BOČNIH SPEKTRALNIH KOMPONENTI OKO f_P, PA SE PM I FM NAZIVAJU <u>NELINEARNIM MODULACIJAMA</u> (ZA RAZLIKU OD AM)
- U PRAKSI ONE UDALJENE FREKV. KOMPONENTE SE MOGU ZANEMARITI JER IMAJU MALE AMPLITUDE, PA SE KORISTI EMPIRIJSKA FORMULA ZA $m > 0.4$, ZVANA <u>CARSONOVO PRAVILO</u>, ZA ODREĐIVANJE ŠIRINE POJASA:

$$m > 0.4 \Rightarrow B_{PM/FM} \approx 2 f_M (m+1)$$

- ODBACUJU SE SPEKTRALNE KOMPONENTE AMPLITUDA VEĆIH OD 10% MODULIRANOG SIGNALA ; TJ. SNAGA VEĆIH OD 1% UKUPNE SNAGE MODULIRANOG SIGNALA
- PRI $m < 0.4$ ŠIRINA POJASA JE:

$$m < 0.4 \Rightarrow B_{PM/FM} \approx 2 f_M$$

- AKO SE MODULACIJSKI SIGNAL SASTOJI OD KOSINUSA (S) VIŠE FREKVENCIJA, f_M U FORMULAMA SE ZAMJENJUJE S MAKSIMALNOM FREKVENCIJOM MODULACIJSKOG SIGNALA ; f_{MAX}
- KAKO SE KOD PM I FM NE MIJENJA AMPLITUDA PRIJENOSNOG SIGNALA, SNAGA MODULIRANOG I PRIJENOSNOG (NEMODULIRANOG) SIGNALA JEDNAKA JE:

$$P_{PM/FM} = \frac{U_{PM}^2}{2R} = P_P$$

- PM I FM SIGNALI SE DEMODULIRAJU NEKOHERENTNIM POSTUPKOM, MODIFICIRANOM DETEKCIJOM OVOJNICE

Elektronička komunikacije

3. predavanje

Ivy Egislov

1. DIO: ASK (Amplitude-Shift Keying)

→ općenito o diskretnim postupcima:

- DISKRETNE MODULACIJE NASTAJU KADA JE MODULACIJSKI SIGNAL DISKRETAN (NIZ JEDINICA I NULA, ODNOSNO DISKRETNIH RAZINA); PRIJENOSNI S. JE ANALOGAN
- PONOVO SE MIJENJA JEDAN OD PARAMETARA PRIJENOSNOG SIGNALA (AMPLITUDA-ASK, FREKVENCIJA-FSK, FAZA-PSK), ILI VIŠE PARAMETARA ODJEDNOM - HIBRIDNI POSTUPCI (NPR. QAM)
- BRZINA PRIJENOSA BITA I SIMBOLA (T_s JE TRAJANJE SIMBOLA):

$$R_s = \frac{1}{T_s} \quad [Bd] \qquad R_b = R_s \log_2 M \quad [bit/s]$$

- POSTUPAK MODULACIJE SE BIRA S OBZIROM NA KOMPLEKSNOST POTREBNIH UREĐAJA, UČINKOVITOST SNAGE ILI SPEKTRALNU UČINKOVITOST (BRZINA S OBZIROM NA POTREBNU ŠIRINU POJASA):

$$\text{SPEKTRALNA UČINKOVITOST} = \frac{R_b}{B} \quad [bit/s/Hz]$$

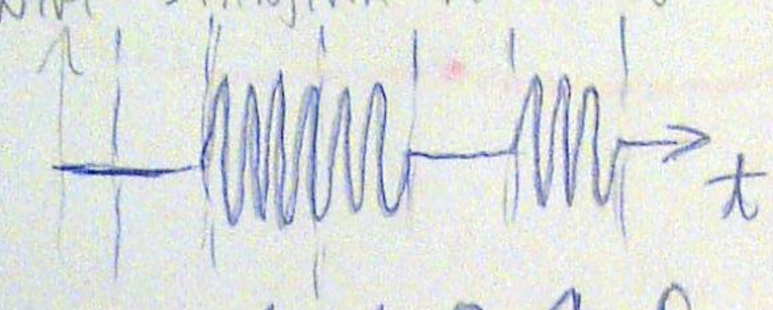
- PRI DEMODULACIJI, DEMODULATOR TREBA ODREDITI O KOJEM SE ZNAKU RADI:
  - HARD-DECISION: SAMO ODLUKA O KOJEM SE ZNAKU RADI
  - SOFT-DECISION: UZ ODLUKU DAJE I VJEROJATNOST TOČNOSTI ODLUKE
- U ANALOGNIM SUSTAVIMA KORISTI SE ODNOS SIGNAL-ŠUM KAO POKAZATELJ KVALITETE, A U DIGITALNIM (DISKRETNIM) SUSTAVIMA ODNOS SNAGE PRIJENOSNOG SIGNALA I ŠUMA U PROMATRANOM FILTRIRANOM PODRUČJU: C/N (Carrier/Noise)
- OSIM ODNOSA C/N, ČEŠĆE SE KORISTI BER KAO POKAZATELJ KVALITETE (OMJER KRIVO PRENESENIH BITA I UKUPNOG BROJA BITA)
- KORISTI SE I ODNOS ENERGIJE JEDNOG MODULIRANOG BITA I GUSTOĆE SNAGE ŠUMA (SNAGA ŠUMA U FREKV. ŠIRINI OD 1 Hz):

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \cdot \frac{R_b}{B}$$

⇒ ASK:

• DISKRETNI MODULACIJSKI SIGNAL MODULIRA AMPLITUDU ANALOGNOG PRIJENOSNOG SIGNALA, ŠTO ZNAČI DA JE OVOJNICA PRIJ. SIGNALA PRAVOKUTNOG OBLIKA S DISKRETNIM STANJIMA MODULACIJSKOG S.; ASK JE LINEARAN POSTUPAK

$u_{ASK}(t)$:



MODULACIJSKI SIGNAL: 0 1 1 0 1 0

• ASK SE ZOVE I OOK (On-Off-keying), JER JE PRI "0" - MODULACIJSKI MODULIRANI = NULA, A PRI "1" JE AMPLITUDA MODULIRANOG MAKSIMALNA

$$u_{ASK}(t) = \begin{cases} 0 \; ; & \text{MODULACIJSKI JE "0"} \\ U_{PM} \cos \omega_p t \; ; & \text{MODULACIJSKI JE "1"} \end{cases}$$

• OVOJNICA SNAGE U FREKVENCIJSKOJ DOMENI OBLIKA JE $\frac{\sin^2 x}{x^2}$ I TEORIJSKI JE FREKV. POJAS ∞ (S NULTOČKAMA U $\frac{k}{T_b}$)

• KORISTI SE U PRAKSI NYQUISTOV FILTAR ŠIRINE $1.6 f_M$ (f_M - FREKVENCIJA MODULACIJSKOG S.), PA JE ŠIRINA FREKV. POJASA:

$$\boxed{B_{ASK} = 2 \cdot 1.6 f_M = \frac{1.6}{T_b}}$$

SPEKTRALNA UČINKOVITOST $= \frac{R_b}{B} = \frac{\frac{1}{T_b}}{\frac{1.6}{T_b}} = \frac{1}{1.6} = 0.6$ bit/s/Hz

$$\boxed{P_{ASK} \approx \frac{P_{PO}}{2} = \frac{U_{PM}^2}{4R}}$$

• ASK SE DEMODULIRA NEKOHERENTNO (DETEKCIJOM OVOJNICE) ILI KOHERENTNO

2. DIO: FSK (Frequency-Shift Keying)

⇒ BFSK I GFSK (Binary i Gauss FSK):

• PRI FSK POSTUPKU MODULACIJSKI SIGNAL MODULIRA FREKVENCIJU PRIJENOSNOG SIGNALA, SVAKOJ RAZINI MODULAC. S. ODGOVARA ODREĐENA FREKVENCIJA MODULIRANOG SIGNALA; FSK JE NELINEARAN POSTUPAK

• KOD BFSK DVA SU STANJA FREKVENCIJE, KOD "0" FREKVENCIJA PRIJ. S. (f_P) SE UMANJUJE ZA Δf, A KOD "1" f_P SE UVEĆAVA ZA Δf

$$f_{ASK} = \begin{cases} f_P - \Delta f \; ; & \text{MODULACIJSKI SIGNAL = "0"} \\ f_P + \Delta f \; ; & \text{— " — = "1"} \end{cases}$$

- INDEKS MODULACIJE JE OMJER DEVIJACIJE FREKVENCIJE I MAKSIMALNE FREKVENCIJE MODULACIJSKOG SIGNALA

$$\left(m_{FSK} = \frac{\Delta f}{f_m} = 2\Delta f \cdot T_b \right)$$

- UKOLIKO SE KORISTE 2 OSCILATORA TADA JE MODULACIJU MOGUĆE SAVRŠENO OSTVARITI, PREKAPČANJEM S JEDNOGA NA DRUGI (I TAKO MJENJAJUĆI FREKV.), ALI TADA SU MOGUĆI DISKONTINUITETI U FAZI PRI PROMJENI SIMBOLA MODULACIJSKOG SIGNALA
- AKO SE KORISTI JEDAN OSCILATOR KOJEMU SE MJENJA FREKVENCIJA, TADA SU PROMJENE U FAZI KONTINUIRANE (NEMA SKOKOVA USLIJED PREKAPČANJA), I RADI SE O CPFSK POSTUPKU (Continous Phase FSK)
- KONTINUIRANOST FAZE (CPFSK) JE OSIGURANA ZA CJELOBROJNE INDEKSE MODULACIJE (JER JE TADA $\Delta f = k \cdot f_m$)
- UNUTAR INTERVALA JEDNOG BITA FAZA SE PROMJENI ZA $\underline{\pm \pi m_{FSK}}$; IZ ČEGA SE OPET VIDI UVJET ZA CPFSK
- ZA ODREĐIVANJE ŠIRINE POJASA KORISTI SE CARSONOVO PRAVILO (IZ FM-POSTUPKA):

$$\left\langle B_{FSK} \approx 2(\Delta f + f_m) = 2\Delta f + \frac{1}{T_b} \right\rangle$$

- GFSK POSTUPAK OZNAČAVA GAUSSOV FILTAR ZA OBLIKOVANJE MODULACIJSKOG S.

→ M-FSK:

- ISTO KAO I FSK, SAMO SE KORISTI "M" FREKVENCIJA, U SVAKOM INTERVALU TRAJANJA $T_s = T_b \cdot \log_2 M$ FREKVENCIJA M-FSK SIGNALA POPRIMA JEDNU OD M VRIJEDNOSTI
- AKO JE RAZMAK DISKRETNIH FREKVENCIJA $2\Delta f$, ONDA JE INDEKS M.:

$$m_{M\text{-}FSK} = 2\Delta f \cdot T_s$$

- AKO JE $2\Delta f = \frac{1}{T_s}$, TADA SU SIMBOLI M-FSK ORTOGONALNI
- FSK POSTUPCI (I BFSK I M-FSK) SE DEMODULIRAJU KOHERENTNO ILI NEKOHERENTNO
- CPFSK MODULIRANI SIGNALI (BINARNI) MOGU SE RASTAVITI NA 2 ASK SIGNALA S OBRNUTIM VRIJEDNOSTIMA MODULACIJSKIH S. I S FREKVENCIJAMA $f_p + \Delta f$ I $f_p - \Delta f$

3.D10: PSK (Phase-Shift keying)

- PRI DISKRETNOJ MODULACIJI FAZE, MODULACIJSKI SIGNAL DISKRETNO MODULIRA (FAZU) ANALOGNOG PRIJENOSNOG SIGNALA I FAZA MODULIRANOG SIGNALA (RELATIVNA) POPRIMA JEDNU OD "M" VRIJEDNOSTI (M-PSK):

$$f_M = \left\{ \pi \frac{2n+c}{M} ; n = 0, 1, 2 \dots, M-1 \right\}$$

GDJE AKO JE "c" = $\emptyset$ FAZA IMA NAJNIŽU VRIJEDNOST $\emptyset$, A ZA "c" = 1 FAZI JE DODANO $\frac{\pi}{M}$, TJ. CIJELI JE KOORDINATNI SUSTAV POMAKNUT ZA $\frac{\pi}{M}$

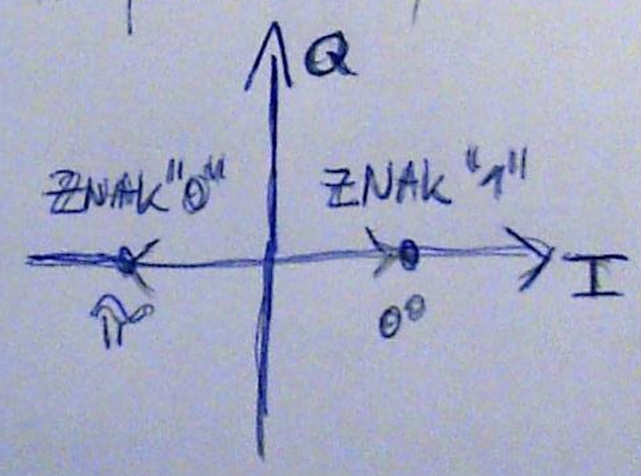
- PSK JE LINEARAN MODULACIJSKI POSTUPAK

- SVAKI PSK SIGNAL MOŽE SE PRIKAZATI KAO ZBROJ 2 ASK SIGNALA KOJI SU U KVADRATURNOM ODNOSU (ZAKRENUTI U FAZI ZA $\pi/2$), TJ. KOJI SU ORTOGONALNI (PA KAKO JE ASK LINEARAN POSTUPAK, ZBRAJANJEM 2 ASK SIGNALA OPET SE DOBI LINEARAN S.)

BPSK (Binary PSK):

- $M = 2$; $n = 0, 1$ I $f_{BPSK} = \emptyset$ ILI π (ZA $c = 0$), TJ. $\frac{\pi}{2}$ I $\frac{3\pi}{2}$ (ZA $c = 1$)

- FAZE I AMPLITUDE DISKRETNIH POSTUPAKA CRTAJU SE U DIJAGRAMU STANJA, GDJE JE APSCISA In-phase OS, A ORDINATA Quadrature-phase OS (I i Q)



$c = \emptyset$

- OVOJNICA SNAGE U FREKVENCIJSKOJ DOMENI IMA ISTI OBLIK KAO I ASK, $\frac{\sin^2 x}{x^2}$, S NULTOČKAMA U $\frac{1}{T_b}$ (ZA BPSK), TJ. $\frac{1}{T_s}$ (ZA M-PSK)

- SPEKTRALNA UČINKOVITOST PSK POSTUPAKA JE:

$$\frac{R_b}{B} = \frac{R_s \cdot \log_2 M}{\frac{1}{T_s}} = \frac{\frac{1}{T_s} \log_2 M}{\frac{1}{T_s}} = \log_2 M \text{ (IDEALNO)};$$

PA JE ZA BPSK ONA 1 bit/s/Hz

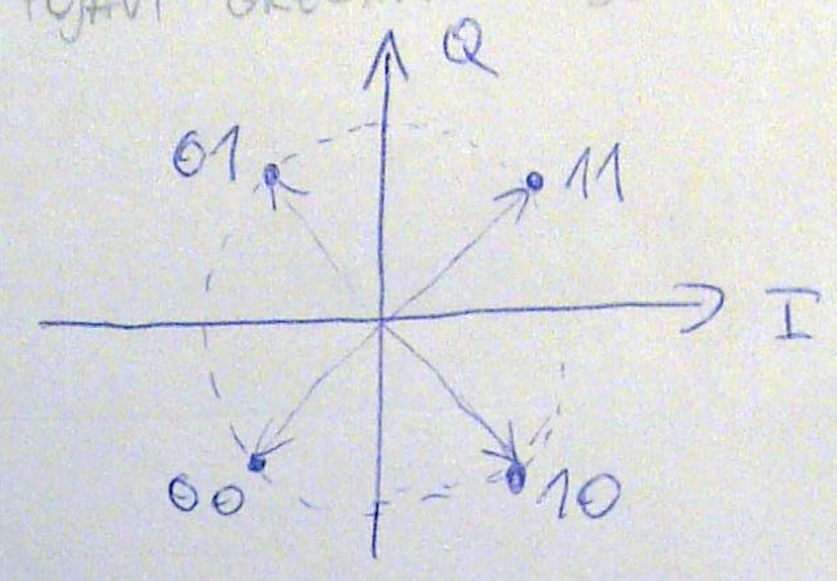
- SAMO DIFERENCIJALNO KODIRANI PSK POSTUPCI SE MOGU DEMODULIRATI NEKOHERENTNO (DIFERENCIJALNO), OSTALI SAMO KOHERENTNOM DEMODULACIJOM

⇒ QPSK (Quaternary PSK):

- SASTOJI SE OD 4 SIMBOLA S 4 DISKRETNE RELATIVNE FAZE:

$$\varphi_M = \left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right\} \text{ ZA } c=0 \text{ , TJ. } \varphi_M = \left\{\pm\frac{\pi}{4}, \pm\frac{3\pi}{4}\right\} \text{ ZA } c=1$$

- ZAKON PRIDRUŽIVANJA (OPĆENITO M-PSK SIGNALA) SLIJEDI PRAVILO GRAYEVA KODA, JER SE ONDA SUSJEDNI SIGNALI RAZLIKUJU SAMO U 1 ZNAKU (ŠTO JE BOLJE PRI POJAVI GREŠAKA I DEMODULACIJI), DIJAGRAM STANJA JE:



$c=1$

- SPEKTAR QPSK JE DUPLO UŽI U ODNOSU NA BPSK; $B = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{2T_b}$, PA JE $\frac{R_b}{B} = 2$ bit/s/Hz (UZ MANJU OTPORNOST NA SMETNJE)
- KAKO SE PSK SIGNALI FILTRIRAJU (JER JE FREKV. POJAS ∞), FILTRIRANJEM DOLAZI DO TOGA DA AMPLITUDA VIŠE NIJE KONSTANTNA (OVOJNICA PRIJENOSNOG SIGNALA), ŠTO SE VIDI PRI PROMJENI SIMBOLA
- PRI PROMJENI SIMBOLA U DIJAMETRALNO SUPROTNI (NPR. 01 → 10) AMPLITUDA SIGNALA SE DRASTIČNO MIJENJA I PROLAZI I KROZ NULU, ŠTO JE NEPOVOLJNO ZA OČUVANJE AMPLITUDE I (DE)MODULACIJSKE UREĐAJE; OVO SE ISPRAVLJA UVOĐENJEM OQPSK I $\frac{\pi}{4}$-QPSK POSTUPAKA

⇒ OQPSK (Offset QPSK):

- KAKO SE QPSK MOŽE RASTAVITI NA I I Q KOMPONENTU, TO SE KORISTI I Q DIO SE U OQPSK SIGNALU POMIČE ZA $\frac{T_s}{2} = T_b$
- TIME SE POSTIŽE DA PRI PROMJENI FAZE ZA 180° (NAJNEPOVOLJNIJI SLUČAJ), SIGNAL POSTEPENO PRELAZI U SUPROTNO STANJE (PRVO SE PROMJENI I DIO PA ZA $\frac{T_s}{2}$ Q DIO, ČIME SE FAZA MIJENJA U 2 STUPNJA (2 POTA PO 90°)
- AMPLITUDA IMA MANJE OSCILACIJE, A SIGNAL NE PROLAZI KROZ ISHODIŠTE

→ $\frac{\pi}{4}$ - QPSK:

- 8 JE STANJA FAZE, PRI $c=0$ i $c=1$ UKOMPONIRANO U ISTI QPSK POSTUPAK
- PRAVILO JE JEDNOSTAVNO, AKO JE TRENUTNI SIMBOL U $c=1$, SLJEDEĆI ĆE BITI PRI $c=0$ I OBRNUTO
- TIME SE ONEMOGUĆUJE PROMJENA FAZE ZA $\pm\pi$, MAKSIMALNA PROMJENA JE SADA $\pm\frac{3\pi}{4}$; ŠTO ZNAČI MANJE PROMJENE AMPLITUDE (OD QPSK, ALI VEĆE OD OQPSK)
- $\frac{\pi}{4}$-QPSK SE UVIJEK DIFERENCIJALNO KODIRA (DIFER. KOD. JE OBJAŠNJENO U NASTAVKU)

→ 8-PSK:

- SVAKOM SIMBOLU SE PRIDRUŽUJE $\log_2 8 = 3$ BITA, 8 JE STANJA FAZE U DIJAGRAMU STANJA
- SPEKTAR JE 3 PUTA UŽI, PA JE $\frac{R_b}{B} = 3\ bit/s/Hz$, NO POVEĆANA JE

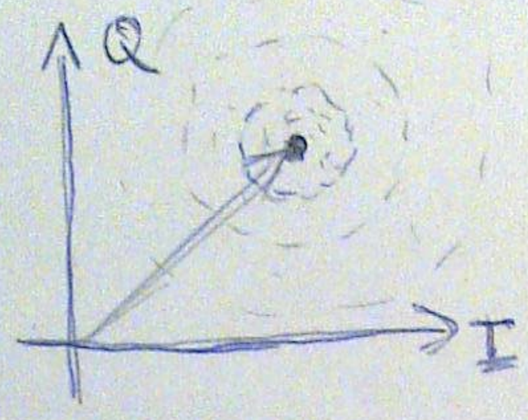
→ koherentno i diferencijalno kodirani PSK:

- KOD KOHERENTNO MODULIRANIH PSK INFORMACIJA SE NALAZI U RELATIVNOJ FAZI MODULIRANOG SIGNALA (ONO ŠTO SE OBJAŠNJAVALO DO SADA), KOD DIFERENCIJALNO, PAK, MODULIRANIH SIGNALA INFORMACIJA JE SADRŽANA U PROMJENI (RELATIVNOJ) FAZE
- TIME SE UKLANJA (POTREBA) ZA REFERENTNIM BITOVIMA/SIGNALOM S KOJIM ĆE SE RELATIVNA FAZA USPOREDIVATI, ALI JE VEĆA OSJETLJIVOST NA ŠUM
- DIFERENCIJALNI PSK SE DEMODULIRAJU DIFERENCIJALNO (NEKOHERENTNI POSTUPAK), ŠTO JE GLAVNI RAZLOG UVOĐENJA DIF. POSTUPAKA
- UOČITI DA JE SVEJEDNO POTREBNO SLATI SINKRONIZACIJSKI SIGNAL koji ĆE ODREDITI POČETAK I KRAJ POJEDINOG SIMBOLA
- KOD DIFERENCIJALNIH POSTUPAKA PROMJENE FAZE PRI SIMBOLIMA JEDNAKE SU APSOLUTNIM VRIJEDNOSTIMA FAZE KOD KOHERENTNIH POSTUPAKA (NPR. DQPSK: $00=\pi$, $01=\pi/2$, $11=0$, $10=\frac{3\pi}{2}$ ⇒ SIMBOLI I PRIPADNE PROMJENE FAZE PRI NJIHOVIM POJAVAMA)
- PROMJENE FAZE KOD $\pi/4$ - DQPSK:

SIMBOL	$\Delta\varphi$
00	$\pi/4$
01	$-\pi/4$
11	$-3\pi/4$
10	$3\pi/4$

→ Utjecaj šuma na PSK signale:

- ŠUM MIJENJA POLOŽAJ TOČAKA U DIJAGRAMU STANJA (AMPLITUDU I FAZU), ČIME SE KRUŽNO ŠIRI PODRUČJE POJEDINIH STANJA (AKO JE ŠUM NEKORELIRAN)
- NEĆE DOĆI DO POGREŠKE AKO JE PROMJENA FAZE MANJA OD π/M



- KOD VEĆIH M VEĆA JE VJEROJATNOST POGREŠKE JER SU STANJA U DIJAGRAMU BLIŽA (ČIM VEĆI M KOD M-PSK, VEĆA VJEROJATNOST GREŠKE, ALI I VEĆA SPEKTRALNA UČINKOVITOST)
- PRI VEĆIM M POTREBNIJI JE VEĆI ODNOS C/N (TJ. E_b/N_0)
- ISTO VRIJEDI I ZA DPSK U ODNOSU NA PSK (JER SE POGREŠKOM NA JEDNOM SIMBOLU GREŠKA JAVLJA I U SUSJEDNOM SIMBOLU, PA SE VIŠE GRIJEŠI KOD DPSK)

4. DIO: MSK I QAM

→ MSK (Minimum-Shift Keying):

- MSK (OZNAČAVA SE I FFSK - Fast FSK) JE POSEBAN SLUČAJ FSK SIGNALA, KADA JE $m_{FSK} = 0.5$, ŠTO ZNAČI DA JE RAZMAK DISKRETNIH FREKVENCIJA, $2\Delta f$, JEDNAK f_M (MAX. FREKVENCIJI MODULACIJSKOG SIGNALA)
- OSIGURANA JE KONTINUIRANOST FAZE JER PROMJENE FREKVENCIJE NASTUPAJU U NULTOČKAMA MODULIRANOG SIGNALA
- FAZA SE U INTERVALU SIMBOLA FSK POSTUPKA PROMIJENI ZA $\pm \pi m_{FSK}$, PA SE FAZA MIJENJA ZA $\pm \pi/2$
- MSK JE KOSINUS ZBROJA, PA AKO SE ON RASTAVI DOBIJE SE ISTI OBLIK KAO I QPSK, TJ. OQPSK
- OQPSK JE ZBROJ 2 ASK SIGNALA (KAO I BILO KOJI PSK), DOK JE MSK ZBROJ 2 AM SIGNALA KOJI SU U KVADRATURNOM ODNOSU (POMAK OD $\pi/2$)
- MSK JE POSEBAN SLUČAJ FSK, ALI I OQPSK POSTUPKA, ISTOVREMENO (MSK, TJ. FFSK JE OQPSK MODULIRAN KOSINUSNIM MODULACIJSKIM SIGNALOM
- KAKO SU PSK POSTUPCI LINEARNI, TAKO JE MSK ISTO LINEARAN POSTUPAK (IAKO JE ISTOVREMENO I POSEBAN SLUČAJ FSK POSTUPKA)
- I I Q KOMPONENTA SU POMAKNUTE (MEĐUSOBNO) ZA T_b (KAO I KOD OQPSK)

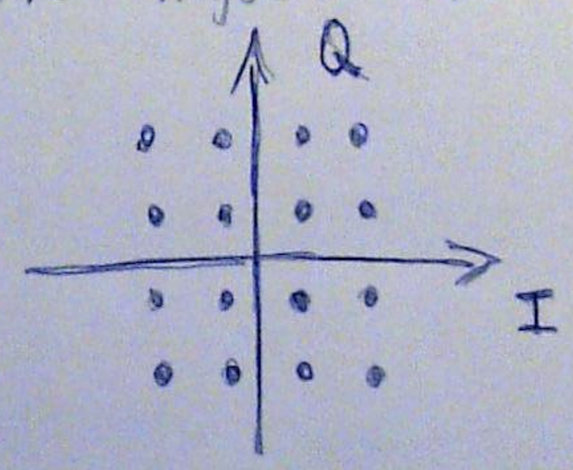
- SPEKTRALNI OBLIK JE ISTI KAO I KOD OQPSK, $\frac{R_b}{B}$ JE ISTO 2 bit/s/Hz, IAKO JE PRVA NULTOČKA OVOJNICE SNAGE U FREKV. DOMENI NA $\frac{3}{4T_b}$
- MSK SE MOŽE DEMODULIRATI KOHERENTNO ILI NEKOHERENTNO (DIFERENCIJALNO, JER SE FAZA MIJENJA ZA $+\pi$ ILI $-\pi$)
- GMSK JE MSK UZ PRIMJENU GAUSSOVA FILTRA S GLAVNOM VARIJABLOM NORMIRANOM ŠIRINOM POJASA; $B \cdot T_b$
- GMSK SMANJUJE ŠIRINU POJASA UZ MALO NARUŠENJE KVALITETE; KADA JE $B \cdot T_b = \infty$ DOBIVA SE OBIČNI MSK

→ QAM (Quadrature Amplitude Modulation):

- QAM NASTAJE ISTODOBNOM DISKRETNOM MODULACIJOM AMPLITUDE I FAZE, PA SE ZOVE HIBRIDNI MODULACIJSKI POSTUPAK (MODULIRAJU SE 2 KARAKTERISTIKE)
- NASTAJE ZBRAJANJEM 2 ASK SIGNALA S VIŠE AMPLITUDNIH RAZINA (2 × L-ASK), PA JE QAM LINEARAN POSTUPAK

$$u_{QAM} = I(t)\cos\omega_p t - Q(t)\sin\omega_p t$$

- M-QAM IMA SPEKTRALNU UČINKOVITOST $\log_2 M$ bit/s/Hz
- 4-QAM = QPSK, DOK ZA VEĆE M VRIJEDI M-QAM ≠ M-PSK; $M = 2^n$
- DIJAGRAM STANJA 16-QAM:



- ZA VEĆE M, STANJA QAM SIGNALA SU JEDNOLIKO RASPOREĐENA NA KRUGU (TJ. PROSTORU), BOLJE OD PSK SIGNALA GDJE SU STANJA POREDANA PO KRUŽNICI (PA SE PORASTOM M STANJA VIŠE PRIBLIŽAVAJU NEGO KOD QAM)
- PORASTOM M RASTE $\frac{R_b}{B}$, ALI I OSJETLJIVOST NA SMETNJE (POTREBAN VEĆI E_b/N_0)
- OBLIKOVANJEM STANJA U HEKSAGONALNI OBLIK (VIŠE NALIK KRUGU), OSJETLJIVOST NA ŠUM SE SMANJUJE U USPOREDBI S KVADRATNIM OBLIKOM
- QAM SE MOŽE DEMODULIRATI SAMO SINKRONO
- UTJECAJEM ŠUMA STANJA U DIJAGRAMU SE KRUŽNO ŠIRE (KAO I PSK), KORISTI SE GRAYEV KOD

5. DIO: Usporedba i kvaliteta diskretnih postupaka, sinkronizacija

- NAJVEĆA MOGUĆA SPEKTRALNA UČINKOVITOST (SHANNONOVA GRANICA) JE:

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

SVI DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPCI IMAJU (IDEALNO) MANJU R_b/B OD SHANNONOVE GRANICE

- PORASTOM BROJA SIMBOLA (M), R_b/B RASTE, NO RASTE I OSJETLJIVOST NA ŠUM (POTREBNIJI VEĆI C/N ODNOSNO E_b/N_0)
- KAKO ODREĐIVANJE BER-a MOŽE BITI KOMPLICIRANO, DEFINIRA SE JEDNOSTAVNIJA MJERA, VELIČINA VEKTORA POGREŠKE; EVM (Error Vector Magnitude)
- EVM JE JEDNAK MODULU RAZLIKE IDEALNOG POLOŽAJA ODREĐENOG STANJA I VEKTORA STANJA, OČITANOG
- DEFINIRA SE I OMJER POGREŠKE MODULACIJE, MER (Modulation Error Ratio) KOJI JE VEZAN UZ EVM I OMJER JE SNAGE IDEALNOG I EVM

→ Sinkronizacija:

- KOD NEKOHERENTNE MODULACIJE POTREBNO JE OBAVITI SINKRONIZACIJU SIMBOLA – ODREDITI POČETAK I KRAJ POJEDINOG INTERVALA SIMBOLA
- KOD KOHERENTNE (DE)MODULACIJE OSIM SINKRONIZACIJE SIMBOLA NUŽNO JE OBAVITI I SINKRONIZACIJU NOSIOCA – REFERENTNI SIGNAL U DEMODULATORU ISTE FREKVENCIJE I FAZE KAO I PRIJENOSNI SIGNAL (ŠTO NIJE JEDNOSTAVNO :)
- SINKRONIZACIJA SE MOŽE OSTVARITI PERIODIČNIM SLANJEM SINKRONIZIRAJUĆE SEKVENCE ILI, SPORIJE, IZDVAJANJEM I USPOREDBOM PODATAKA IZ MODULIRANOG SIGNALA