# Analiza i simulacija dijagrama oka, BER, ISI i ostalih parametara digitalnih komunikacijskih sustava.

**Felding, Emilia**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:430987

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

# ANALIZA I SIMULACIJA DIJAGRAMA OKA, BER, ISI I OSTALIH PARAMETARA DIGITALNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA

**Završni rad**

**Emilia Felding**

**Osijek, 2016.**

# SADRŽAJ


1. UVOD ..... 3
   1.1. Zadatak završnog rada ..... 3
2. DIGITALNI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI ..... 4
   2.1. Modulacije ..... 5
      2.1.1. Diskretna modulacija amplitude ..... 5
      2.1.2. Diskretna modulacija frekvencije ..... 7
      2.1.2. Diskretna modulacija faze ..... 9
   2.2. Parametri ..... 12
      2.2.1. Odnos signal/šum ..... 12
      2.2.2. *Bit Error Rate* i vjerojatnost pogreške ..... 13
      2.2.2. Intersimbolna interferencija ..... 16
      2.2.3. Dijagram oka ..... 19
3. SIMULACIJA PRETHODNO OBRAĐENIH PARAMETARA ..... 22
   3.1. Simulacija diskretnih modulacija amplitude, faze i frekvencije ..... 22
   3.2. Usporedba modulacijskih postupaka na temelju *Bit Error Rate*-a ..... 24
   3.3 Simulacija dijagrama oka ..... 27
4. ZAKLJUČAK ..... 30
5. LITERATURA ..... 31
6. SAŽETAK ..... 32
7. ŽIVOTOPIS ..... 33
8. PRILOZI ..... 34

# 1. UVOD

Komunikacija je prijenos skupa znakova koji imaju neko značenje od jednog pojedinca ili grupe ljudi ka drugome pojedincu ili grupi ljudi. Riječ komunikacija dolazi od latinske riječi *communicare* što znači dijeliti. Ljudi su međusobno dijelili informacije još od prastarih vremena te ih i dalje dijele. Jedino što se promijenilo od tada način je dijeljenja tih informacija. Sve je počelo sa slikama u pećinama, a tijekom povijesti razvilo se u razne masovne medije kojih smo danas svjedoci. Razvoj cijelog komunikacijskog sustava u početku je išao jako sporo da bismo u zadnjih pedesetak godina bili svjedoci ogromnom napretku u tome području. Prije su za prijenos ponekad bili potrebni i dani, a danas se sve događa gotovo trenutno. Veliku ulogu u tome imaju digitalni komunikacijski sustavi. Oni, kao i ostali sustavi, imaju zadaću da prenesu informaciju od izvora do jednog ili više odredišta, odnosno primatelja.

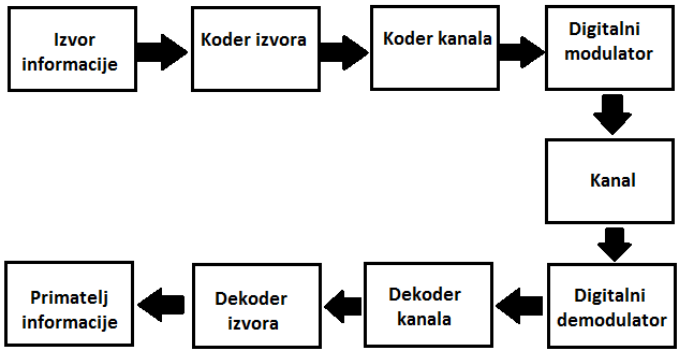
U ovome radu obradit će se temeljna građa digitalnog komunikacijskog sustava te će se u radu posebno fokusirati na sam prijenos poruke jer je ona najbitnija za cijelu komunikaciju. U prvom poglavlju obradit će se načini moduliranja poruke, odnosno načini prilagodbe poruke mediju kojim se prenosi modulirajući tri najbitnija parametra svakog signala - amplitudu, fazu i frekvenciju. Tako će se objasniti diskretna modulacija amplitude, diskretna modulacija frekvencije i diskretna modulacija faze. Uz to važna nam je i točnost prenesene poruke, odnosno ispravnost informacije koju će primatelj primiti te će se u sljedećem poglavlju obratiti pozornost na parametre koji nam govore kolika je pogreška nastala u prijenosu. Obradit će se odnos snaga signala i šuma, utjecaj te veličine na vjerojatnost pogreške, povezanost vjerojatnosti pogreške i *bit error rate*-a te pojam intersimbolne interferencije i njen prikaz na osciloskopu – dijagram oka. U zadnjem poglavlju simulirat će se digitalni komunikacijski sustav te će se na primjeru pojasniti svaka od modulacija. Slijedi simulacija sustava u kojoj će se vidjeti kako se mijenjanjem parametara mijenjaju veličine koje nam govore o nastaloj pogrešci.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada teorijski je obraditi pojam digitalnih komunikacijskih sustava te objasniti diskretne modulacije amplitude, frekvencije i faze. Potrebno je objasniti odnos snage signala i snage šuma, *bit error rate*, intersimbolnu interferenciju, dijagram oka te njihovu međusobnu povezanost te kako oni utječu na pogrešku nastalu u prijenosu signala medijem. Navedene modulacije i parametre zatim je potrebno simulirati u *Matlab*-u te dobivene rezultate analizirati.

# 2. DIGITALNI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI

Digitalni komunikacijski sustavi prenose informacije u digitalnom obliku od izvora koji tu informaciju generira do jednog ili više odredišta, odnosno primatelja. Na slici 2.1. prikazana je shema digitalnog komunikacijskog sustava s osnovnim elementima.




Sl.2.1. *Shema digitalnog komunikacijskog sustava*

Izvor informacije generira analogni ili digitalni signal. Taj signal prenosi informaciju koja se u digitalnom komunikacijskom sustavu pretvara u binarni niz. Proces pretvaranja informacija, bilo analognih ili digitalnih, nazivamo kodiranje izvora. Niz bitova zatim se prosljeđuje koderu kanala. Njegova je zadaća minimalizirati utjecaj smetnji na prijenosni sustav. On unosi redundanciju u našu informaciju tako što za svaku $m$-torku informacijskih simbola stvara jednoznačnu $n$-torku simbola koja omogućava kontrolu pogrešaka te nju šalje kroz cijeli komunikacijski kanal. Ta $n$-torka informacijskih simbola sastoji se od bitova informacije $m$ i dodanih bitova redundancije $k$, odnosno $n=m+k$. Niz se zatim prosljeđuje digitalnom modulatoru koji ga pretvara u valni oblik koji se prenosi komunikacijskim kanalom. Komunikacijski kanal može biti fizički, kao što je optički kabel, ili bežični (pomoću mikrovalova ili zraka). Problem koji se javlja kod obje vrste komunikacijskih kanala je šum. Šum je neželjeni signal koji ometa i izobličava poslani signal. Ta izobličenja mogu biti izobličenja oblika, povećanje, odnosno smanjenje amplitude, vremenski pomak ili neki drugi bitan parametar. Kada informacija u valnom obliku prođe kroz kanal, ona se šalje na digitalni demodulator koji pretvara valni oblik natrag u niz bitova tako što detektira ovojnicu izlaznog signala na filtrima. Uspoređivanjem ovojnica donosi se odluka o prenesenom znaku. Niz bitova se zatim šalje na dekoder kanala koji pokušava

rekonstruirati početnu informaciju tako što ponavlja pravilo kodiranja koje je korišteno pri kodiranju kanala. Koliko su demodulator i dekoder efikasni vidi se iz broja pogrešaka na prijemnoj strani. Ponekad prijemnik zbog šuma nije u mogućnosti razaznati izvornu informaciju jer su izobličenja prevelika. Razlog tomu je što je šum slučajan signal, odnosno ne može ga se opisati nekom jednadžbom. Na kraju digitalnog komunikacijskog sustava nalazi se još i dekoder izvora koji rekonstruira originalni signal, sa pogreškom ili bez nje.[1]

Uz digitalni, valja spomenuti i analogni komunikacijski sustav. Glavna razlika je ta što signal u analognom sustavu neprekidno mijenja vrijednosti amplitude/faze/frekvencije što kod digitalnog sustava nije slučaj. U digitalnom komunikacijskom sustavu impulsni niz koji nosi informaciju modulira sinusni signal te se dobije modulirani signal sa točno određenim brojem diskretnih stanja amplitude/faze/frekvencije.

Brojne su prednosti digitalnog sustava nad analognim:

- veća otpornost na šum
- mogućnost zaštitnog kodiranja
- mogućnost istovremenog prijenosa signala iz različitih izvora

Iz tih se razloga digitalni sustavi sve više i više koriste te potiskuju analogne iz uporabe.

## 2.1. Modulacije

Kao što je prije navedeno, da bi signal koji nosi informaciju prošao kroz komunikacijski kanal, potrebno ga je modulirati. Modulacija je postupak prilagođavanja signala informacije prolasku kroz medij. Modulacijski postupci koji se koriste u digitalnim komunikacijskim sustavima ovise o parametru koji se modulira. To može biti amplituda, faza ili frekvencija, ali i dva ili sva tri parametra istodobno. Tako su najčešće korištene modulacije ASK – diskretna modulacija amplitude sinusnog signala, FSK – diskretna modulacija frekvencije sinusnog signala te PSK – diskretna modulacija faze sinusnog signala. Proces vraćanja signala u izvorni oblik naziva se demodulacija i odvija se na prijemnoj strani. U procesu modulacije razlikujemo prijenosni signal, modulacijski signal odnosno signal informacije te modulirani signal. Za prijenosni signal najčešće se uzima sinusni signal.

### 2.1.1. Diskretna modulacija amplitude

Najstariji postupak diskretne modulacije sinusnog signala diskretnim signalom naziva se diskretna modulacija amplitude (engl. *Amplitude Shift Keying* – ASK). Općeniti oblik zapisa ove

modulacije je MASK, gdje se slovo *M* predstavlja broj stanja, odnosno amplituda u ovome slučaju. Broj stanja je uvijek $2^N$ gdje potencija *N* predstavlja broj bitova u simbolu. Ovisno o broju bitova u simbolu, postoji nekoliko diskretnih modulacija amplitude.

Najjednostavniji je primjer s 2 stanja, odnosno $2^1$ ($M = 2^N \rightarrow N = 1$). Iz toga se zaključuje da jedan bit predstavlja jedan simbol, tj. '0' ili '1'. Prema jednadžbama (2-1) i (2-2) simbol '1' predstavljen je nominalnom amplitudom prijenosnog signala *A* dok je u intervalu simbola '0' amplituda moduliranog signala jednaka nuli:

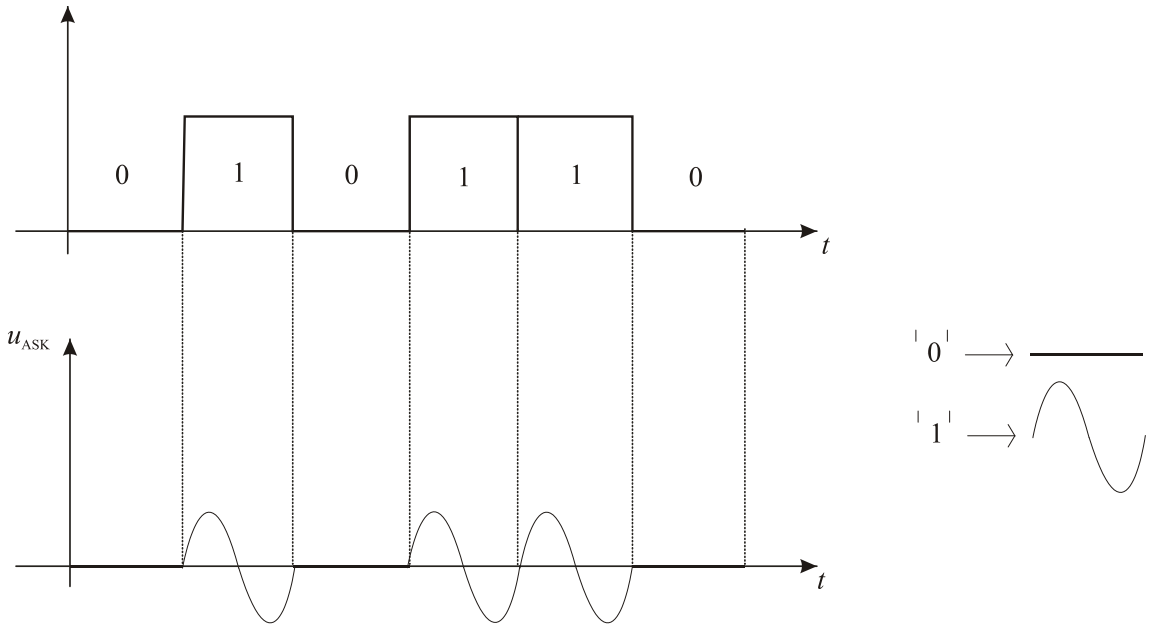
$$u_1(t) = A\cos\omega t \tag{2-1}$$

$$u_2(t) = 0 \tag{2-2}$$

gdje je:

- $A$ – amplituda,
- $\omega$ – kružna frekvencija.

Na slici 2.2. grafički je prikazano kako se mijenja amplituda za različite logičke vrijednosti. Logička nula ima vrijednost amplitude 0, a logička jedinica ima nominalnu amplitudu prijenosnog signala *A*.




Sl.2.2. *Grafički prikaz diskretne modulacije amplitude s 2 stanja*

Nedostatak je ove modulacije činjenica da odnos signal/šum kod znakova '1' i '0' nije jednak te je veliko opterećenje izvora napajanja i elemenata uređaja zbog samo dva stanja amplitude moduliranog signala. Uz ta dva nedostatka javlja se i problem nemogućnosti indikacije prekida veze jer se prekid očituje isto kao i simbol '0'. Ova modulacija rijetko se koristi, a kad se koristi, najviše se koristi u prijenosu telegrafskih znakova i drugih vrsta digitalnih signala malih brzina kod kojih se ne zahtijeva velika točnost prijenosa. Također se upotrebljava pri modulaciji mikrovalnih signala radiorelejnim uređajima za srednje brzine. [2]

### 2.1.2.Diskretna modulacija frekvencije

Modulirani signal u slučaju diskretne modulacije frekvencije ima *M* frekvencija. Najjednostavniji je primjer BFSK (engl. *Binary Frequency Shift Keying*), odnosno slučaj gdje je *M*=2 što znači da prijenosni signal ima dvije frekvencije $f_0$ i $f_1$ prema jednadžbama (2-3) i (2-4):

$$u_1(t) = A\cos 2\pi f_0 t \tag{2-3}$$

$$u_2(t) = A\cos 2\pi f_1 t \tag{2-4}$$

Frekvencije $f_0$ i $f_1$ određuju se prema (2-5) i (2-6):

$$f_0 = f_p - \Delta f \tag{2-5}$$

$$f_1 = f_p + \Delta f \tag{2-6}$$

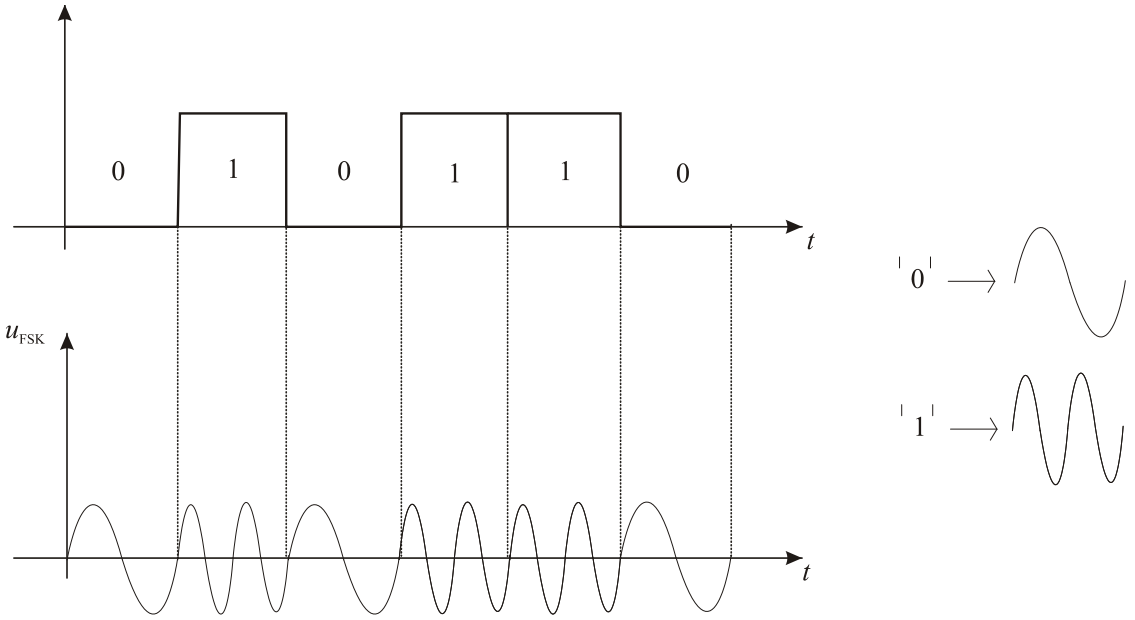
a $\Delta f$ po (2-7):

$$\Delta f = \frac{f_1 - f_0}{2} \tag{2-7}$$

gdje je:

- $f_p$ – frekvencija prijenosnog signala,
- $\Delta f$ – devijacija frekvencije.

Grafički prikaz binarne diskretne modulacije frekvencije prikazan je na slici 2.3. Vidi se da logička nula ima neku frekvenciju $f_0$ dok je frekvencija logičke jedinice dva puta veća od $f_0$.




Sl.2.3. *Grafički prikaz diskretne modulacije frekvencije sa 2 stanja*

Važan parametar za daljnje proučavanje ove metode je indeks modulacije koji se definira prema izrazu (2-8):

$$m_F = \frac{\Delta f}{f_m} \tag{2-8}$$

gdje je:

- $f_m$ – maksimalna frekvencija digitalnog signala.

On nam govori koliki je utjecaj modulacijskog signala na frekvenciju prijenosnog signala. Još se može izraziti i jednadžbom (2-9):

$$m_F = 2\Delta f \cdot \tau \tag{2-9}$$

gdje je: $\tau$ – period jednog znaka.[2]

Ova modulacija jednaka je zbroju izlaza dva odvojena ASK modulatora sa moduliranim signalima $m_0(t)$ i $m_1(t)$ kao što je prikazano jednadžbom (2-10)[3]:

$$u(t) = Am_0(t)\cos(2\pi f_0 t) + Am_1(t)\cos(2\pi f_1 t) = \frac{A}{2}\left\{m_0(t)\left[e^{j2\pi f_0 t} + e^{-j2\pi f_0 t}\right] + \frac{A}{2}m_1(t)\left[e^{j2\pi f_1 t} + e^{-j2\pi f_1 t}\right]\right\} \tag{2-10}$$

Postoje dvije vrste FSK-signala: signal s kontinuiranom fazom i signal s diskontinuitetima u fazi. Naime, trenutna faza FSK signala mijenja se pri prijelazu s jedne frekvencije moduliranog signala na drugu. Diskontinuitet se može pojaviti pri modulaciji idealnim pravokutnim impulsima, odnosno kada generiramo FSK signal pomoću dva oscilatora koji proizvode električne titraje frekvencije $f_0$ i $f_1$. Kada se mijenja frekvencija titraja samo jednog oscilatora, do diskontinuiteta neće doći, odnosno signal će imati kontinuiranu fazu (engl. *Continuous Phase Frequency Shift Keying* – CPFSK).[2]

Ako koristimo M-arni digitalni modulacijski signal u postupku FSK, dobivamo M mogućih frekvencija te je tada riječ o MFSK (engl. *M-ary Frequency Shift Keying*). Indeks modulacije u MFSK slučaju definira se isto kao i kod BFSK, a MFSK signal može se opisati pomoću (2-11):

$$u_{MFSK}(t) = Acos\left\{\omega_p t + u_{m,k}\frac{\pi m_F}{T_s}[t-(k-1)T_s] + \pi m_F \sum_{j=1}^{k-1} u_{m,j} + \varphi_0\right\},$$

$$(k-1)T_s < t \leq kT_s \qquad (2\text{-}11)$$

gdje je:

- $u_{m,k}$ – razina M-arnog digitalnog signala u k-tom intervalu signaliziranja te može poprimiti vrijednosti $u_{m,k} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \ldots \pm (M-1)$.

Kada je riječ o M-arnoj modulaciji, odnosno kada uzimamo više bitova od jednog za jedan simbol, poželjno je koristiti se tzv. Grayevim kodom. On uzima bitove tim redoslijedom da se dva susjedna razlikuju za samo jedan bit. U slučaju kada je M=4, to bi značilo da ih uzima redom: '00' → '01' → '11' → '10'. Na taj se način smanjuje vjerojatnost pogreške.

### 2.1.2. Diskretna modulacija faze

U ovome postupku faza moduliranog signala poprima diskretne vrijednosti iz konačnog skupa (2-12):

$$\varphi_m = \left\{\pi\frac{2n+c}{M}, n = 0,1,2, \ldots M-1\right\}, c = 0,1 \qquad (2\text{-}12)$$

gdje: $M$ – broj članova.

Ako se uzme $c = 0$, naš će skup sadržavati fazu od 0°, a ako je $c = 1$, te faze neće biti u skupu. Jednostavnije, 360° se podijeli s $M$. Rezultat koji se dobije, za toliko se faza okreće. [2]

U binarnoj diskretnoj modulaciji faze (BPSK) broj stanja M iznosi 2 što u ovom slučaju predstavlja dvije faze međusobno pomaknute za 180°. Broj bitova u simbolu iznosi 1 ($M = 2^N \rightarrow N = 1$ ). Iz toga slijedi da se prenosi 1 bit, tj. '0' ili '1'.

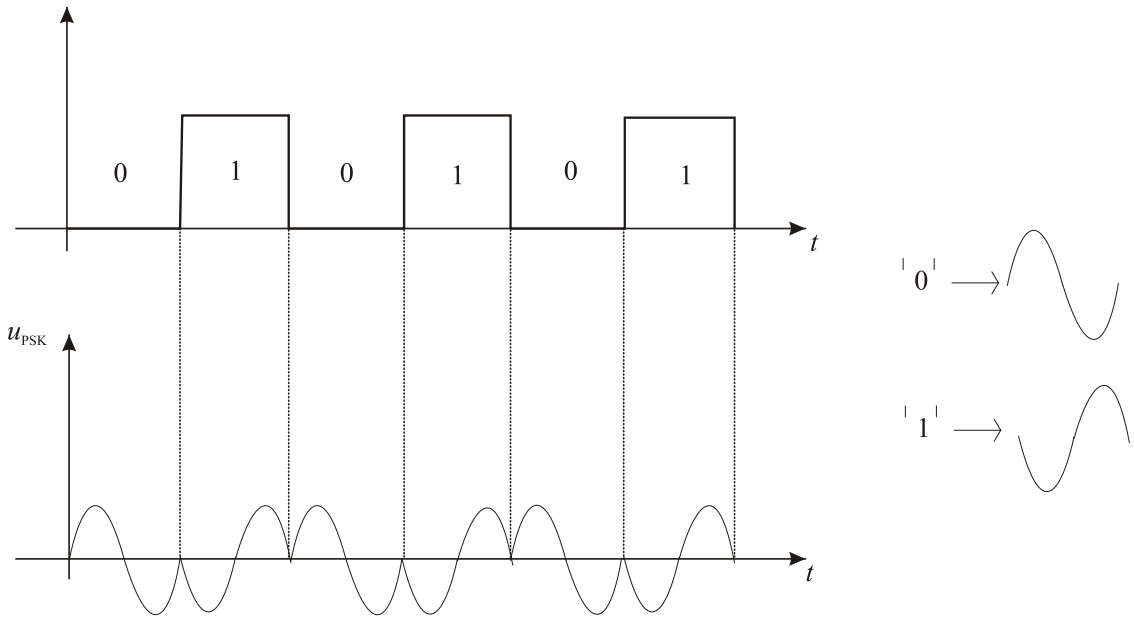
Binarni signal ima oblik (2-13):

$$u_{BPSK}(t) = \begin{cases} A\cos(\omega_p t + 0) \ za \ \ 1 \\ A\cos(\omega_p t + \pi) \ za \ \ 0 \end{cases} \tag{2-13}$$

ili prema (2-14):

$$u_{BPSK}(t) = \begin{cases} A\cos\omega_p t \, za \ \ 1 \\ -A\cos\omega_p t \ \ za \ \ 0 \end{cases} \tag{2-14}$$

Grafički prikaz diskretne modulacije faze nalazi se na slici 2.4. Na njoj se vidi kako logička nula ima fazu 0°, a logička jedinica 180°.




Sl.2.4. *Grafički prikaz diskretne modulacije faze sa 2 stanja*

Prednost binarne diskretne modulacije faze je visoka otpornost na smetnje.

Ako postoje četiri moguća diskretna stanja relativne faze moduliranog signala, riječ je o kvarternarnoj diskretnoj modulaciji faze (QPSK). QPSK nastaje superponiranjem dvaju BPSK-a signala. Moguće faze su dane (2-15) i (2-16):

za $c = 0, \ \varphi_m = \left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right\}$ i (2-15)

za $c = 1$, $\varphi_m = \left\{\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}\right\} = \left\{\pm\frac{\pi}{4}, \pm\frac{3\pi}{4}\right\}$ (2-16)

Svakom se elementu skupa $\varphi_m$ pridruže po dva binarna znaka koji se tako grupirani nazivaju parovima ili dibitima. Pridruživanje može biti proizvoljno ili se može koristiti Grayev kod. Najčešće su binarni znakovi sa fazama pridruženi na sljedeći način:

'11' → $\frac{\pi}{4}$,

'01' → $\frac{3\pi}{4}$,

'00' → $\frac{-3\pi}{4}$,

'10' → $\frac{-\pi}{4}$.

Da bi se mogao generirati modulirani signal, potrebno je oba znaka privesti istodobno modulatoru. Tako se serijski slijed znakova pretvara u dva paralelna slijeda koji odgovaraju binarnim digitalnim signalima *I(t)* i *Q(t)* te se njima pridruži dvostruko duži vremenski interval. Tako se QPSK može opisati izrazom (2-17):

$$u_{QPSK}(t) = I(t)cos\omega_p t - Q(t)sin\omega_p t \quad (2\text{-}17)$$

*I(t)* predstavlja BPSK sa fazama 0° i 180°, a *Q(t)* drugi BPSK sa fazama +90° i -90° što nas vraća na zaključak da su se superponirala dva BPSK signala.[2]

PSK-signal sa osam diskretnih stanja faze označava se sa 8PSK. Kada se to uvrsti u formulu (2-12), za iznose faza se dobiju vrijednosti (2-18) odnosno (2-19):

$$\varphi_m = \left\{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}\right\} = \left\{0, \pm\frac{\pi}{4}, \pm\frac{\pi}{2}, \pm\frac{3\pi}{4}, \pi\right\} \quad (2\text{-}18)$$

ili

$$\varphi_m = \left\{\frac{\pi}{8}, \frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8}, \frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8}, \frac{11\pi}{8}, \frac{13\pi}{8}, \frac{15\pi}{8}\right\} = \left\{\pm\frac{\pi}{8}, \pm\frac{3\pi}{8}, \pm\frac{5\pi}{8}, \pm\frac{7\pi}{8}\right\} \quad (2\text{-}19)$$

Svakoj fazi se pridružuju po tri binarna znaka modulacijskog signala, opet najčešće koristeći Grayev kod.

Slijedi 16PSK sa četiri binarna znaka u bitu te 16 mogućih diskretnih stanja faze. U praksi se dalje od 16PSK ne ide jer je već 16PSK jako osjetljiv na šum i smetnje te se upotrebljava samo u kanalima sa visokim odnosom signala i šuma.[2]

## 2.2. Parametri

Kada dođe do demodulacije, na prijemniku je da prepozna jedan od konačno mnogo elementarnih simbola. Međutim, postoji mogućnost da je šum izazvao promjene na moduliranom signalu te tada prijemnik prepoznaje onaj elementarni simbol koji je najsličniji primljenom signalu. Ako je utjecaj šuma veći, to će izazvati promjene na signalu koje mogu dovesti do pogreške u prepoznavanju.

### 2.2.1. Odnos signal/šum

Prvi od parametara koji najviše utječu na to kako će informacija koju prenosimo stići na odredište omjer je snage signala i snage šuma (2-20):

$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_{\check{S}}} \tag{2-20}$$

gdje je:

- $P_S$ – snaga signala,
- $P_{\check{S}}$ – snaga šuma.

Omjer snage signala i snage šuma (engl. *Signal to Noise Ratio – SNR*) osnovna je mjera kvalitete signala.

Budući da je riječ o omjeru dviju snaga, omjer je bezdimenzionalan, ali se često izražava pomoću logaritamske jedinice decibel (dB) (2-21):

$$\frac{S}{N} = 10 \log\left(\frac{P_S}{P_{\check{S}}}\right) [dB] \tag{2-21}$$

Međutim, za usporedbu različitih sustava često se koristi omjer $E_b/N_0$ koji predstavlja omjer energije moduliranog signala po binarnom znaku ili bitu informacije i gustoće snage šuma odnosno snage šuma u pojasu od 1 Hz. Taj omjer je normirani odnos signala i šuma. U slučaju kada nije riječ o jednom bitu ili pojasu od 1 Hz, tj. kada odnos nije normiran, tada je njihova relacija dana izrazom (2-22)[4]:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0}\frac{B}{f_S} \tag{2-22}$$

gdje je:

- $B$ – frekvencijski pojas,

- $f_S$ – broj simbola u sekundi.

### 2.2.2. *Bit Error Rate* i vjerojatnost pogreške

*Bit Error Rate* sljedeći je ključni parametar digitalnih komunikacijskih sustava. On predstavlja broj pogrešaka koje će se pojaviti u nizu poslanih bitova, odnosno predstavlja omjer jednostavno prikazan formulom (2-23):

$$BER = \frac{broj\ pogrešno\ detektiranih\ bitova}{broj\ poslanih\ bitova} \tag{2-23}$$

Ako jedno stanje signala nosi N bitova, tada se mjeri i *Symbol Error Rate* (2-24):

$$SER = \frac{broj\ pogrešno\ detektiranih\ simbola}{broj\ poslanih\ bitova} \tag{2-24}$$

Ako je broj odaslanih bitova dovoljno velik, *Symbol Error Rate* tada se približava teorijskoj vjerojatnosti pogreške $P_e$. Ako je komunikacijski kanal između pošiljatelja i primatelja dobar te je omjer snage signala i snage šuma velik, *Bit Error Rate* bit će vrlo malen te neće imati velik i značajan utjecaj na cjelokupni sustav. Međutim, u većini stvarnih sustava to nije slučaj jer se tu nalazi i šum te se tada i *Bit Error Rate* treba uzeti u obzir. Iako postoje neke razlike između ta dva sustava, osnove za izračun *Bit Error Rate*-a su iste. U prijenosu informacija uvijek postoji neka vjerojatnost da će se ona putem izobličiti i da neće stići u izvornome obliku na svoj cilj. Upravo to je razlog računanja *Bit Error Rate*-a, da bi se utvrdila kolika je učinkovitost i pouzdanost komunikacijskog sustava.

Za razliku od drugih parametara, *Bit Error Rate* promatra sustav u cjelini, od pošiljatelja do primatelja, uključujući naravno sam komunikacijski kanal. To omogućuje prikaz stvarne učinkovitosti cijelog sustava, a ne samo određenih dijelova.[5]

Za izračun *Bit Error Rate*-a odnosno vjerojatnosti pogreške bitno je nekoliko parametara:

- energija moduliranog signala po binarnom znaku ili bitu informacije
- gustoća snage šuma odnosno snaga šuma u pojasu od 1 Hz
- funkcija pogreške (engl. *error function)*

Mijenjajući prva dva parametra može se optimizirati sustav. Vrijednosti funkcije pogreške najčešće se mogu naći tablično u priručnicima. Uz nju se često koristi i komplementarna funkcija pogreške čija je vrijednost dana izrazom (2-25):

$$erfc(x) = 1 - \mathrm{erf}(x) \tag{2-25}$$

U diskretno amplitudno moduliranim sustavima vjerojatnost pogreške se izražava jednadžbom (2-26):

$$P_e = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \tag{2-26}$$

Pogreška u ovim sustavima nastaje kada je komponenta šuma protufazna moduliranome signalu u intervalu znaka '1' ili ako je u fazi sa moduliranim signalom znaka '0'.[2]

U diskretno frekvencijski moduliranim sustavima vjerojatnost pogreške izražava se jednadžbom (2-27):

$$P_e = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \tag{2-27}$$

Detekcijom ovojnice izlaznog signala dvaju uskopojasnih filtara donosi se odluka o prenošenom znaku. Uspoređujući dvije ovojnice, zaključuje se da je prenesen onaj znak koji ima višu razinu uzorka. Također, u demodulatoru nalaze se i detektori faze kojima se dovode signali sa dvije diskretne frekvencije. Pogreška u ovim sustavima javlja se kada je ovojnica koja propušta sinusni signal niže razine od ovojnice filtra koji propušta samo šum, odnosno kada je njihova razlika negativna.[2]

U BPSK i QPSK sustavima vjerojatnost pogreške simbola odnosno bita dana je izrazom (2-28):

$$P_e = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \tag{2-28}$$

U MPSK sustavima vjerojatno pogreške ima vrijednost (2-29):

$$P_e = erfc \left( \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} sin \frac{\pi}{M} \right) \tag{2-29}$$

iz čega se vidi da će se u MPSK sustavima detektirati ispravan simbol kad je zbog šuma nastala promjena faze moduliranog signala manja od $\pi/M$. [2]

Uspoređujući diskretne modulacije na temelju izraza za vjerojatnost pogreške (2-27) i (2-28) može se zaključiti da binarna diskretna modulacija faze zahtjeva za 3 dB manji odnos $E_b/N_0$ nego binarna diskretna modulacija frekvencije za istu vjerojatnost pogreške što je pokazano primjerom u nastavku:

Pr. $P_e = 10^{-6}$

FSK sustav

$$P_e = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}$$

$$2 \cdot 10^{-6} = erfc \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}$$

$$\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} = 3{,}36$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 13{,}537\ dB$$

PSK sustav

$$P_e = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

$$2 \cdot 10^{-6} = erfc \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

$$\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} = 3{,}36$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 10{,}527\ dB$$

Uz to, sustavi koji koriste postupke s više elementarnih signala zahtijevaju veći odnos $E_b/N_0$ te su osjetljiviji na šum (2-28)(2-29).

Pr. $P_e = 10^{-6}$

BPSK sustav

$$P_e = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

$$2 \cdot 10^{-6} = erfc \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

$$\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} = 3{,}36$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 10{,}527\ dB$$

16PSK sustav

$$P_e = erfc\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \cdot sin\frac{\pi}{16}\right)$$

$$10^{-6} = erfc\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \cdot sin\frac{\pi}{16}\right)$$

$$3{,}45 = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \cdot sin\frac{\pi}{16}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 21{,}94\ dB$$

### 2.2.2. Intersimbolna interferencija

Svaki simbol koji se prenosi sustavom ima svoj određeni period trajanja $T_b$. Ako se period prvog simbola preklopi s drugim, odnosno ako se period prvog simbola produži, doći će do međusobnog preklapanja simbola što može dovesti do pogrešnog očitanja na dekoderu. To međusobno preklapanje naziva se intersimbolna interferencija.

Razlog preklapanja je činjenica da ako je impuls vremenski ograničen, on ne može biti frekvencijski ograničen i obrnuto – ako je impuls frekvencijski ograničen, on ne može biti vremenski ograničen. Ako je impuls vremenski ograničen, doći će do širenja samog impulsa što u konačnici dovodi do intersimbolne interferencije. Isti je slučaj i sa već frekvencijski ograničenim impulsom. U tome slučaju impuls se neće izobličiti, ali zbog činjenice da on ne može biti vremenski ograničen, svejedno će doći do preklapanja. Usprkos tome, intersimbolna interferencija može se izbjeći pomoću Nyquistovih kriterija pomoću kojih se može signal tako oblikovati da se izbjegne intersimbolna interferencija.[6]

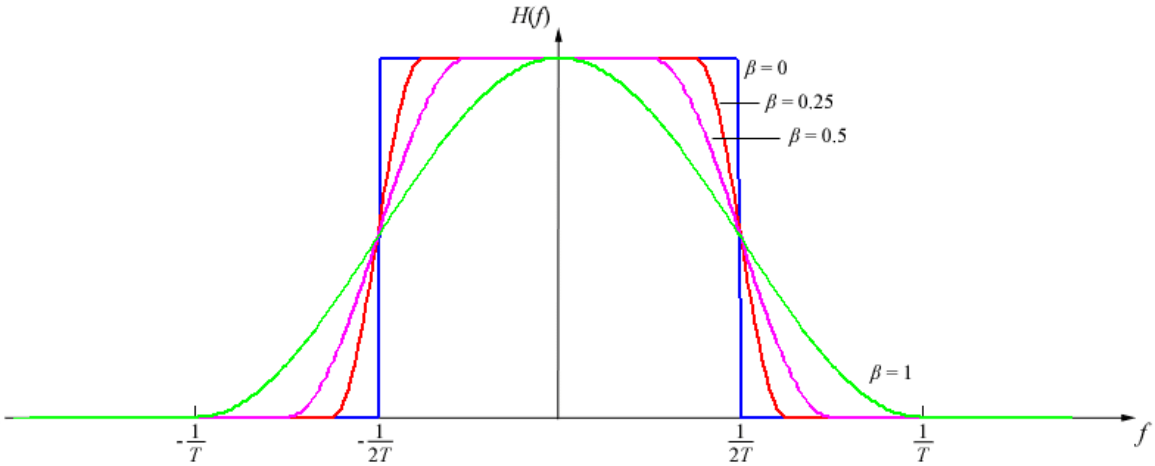
Prije svega potrebno je definirati prijenosnu karakteristiku. Ona predstavlja omjer izlaznog i ulaznog signala (2-30) te nam govori o tome kako se mijenja signal prolaskom kroz filtar u kompleksnoj domeni $j\omega$:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \tag{2-30}$$

Prvi kriterij kaže da je za intersimbolnu interferenciju jednaku nuli potreban signal čiji impuls ima amplitudu različitu od nule u svojem središtu u trenutku $t=0$ i amplitudu jednaku nuli u nekom trenutku $t = \pm nT_b$ $(n = 1,2,3, \dots)$ gdje je $T_b$ razlika između dva impulsa u nizu. Tako oblikovan signal odnosno impuls ne bi uzrokovali interferenciju na mjestima najviše amplitude susjednog impulsa gdje se zapravo odlučuje o kojem je simbolu riječ. Međutim, ovaj kriterij vrijedi samo u teoriji jer u praksi signal mora proći kroz neki filtar, a ne postoji filtar sa idealno pravokutnom prijenosnom karakteristikom amplitude pomoću kojega bi se taj kriterij mogao realizirati.[6]

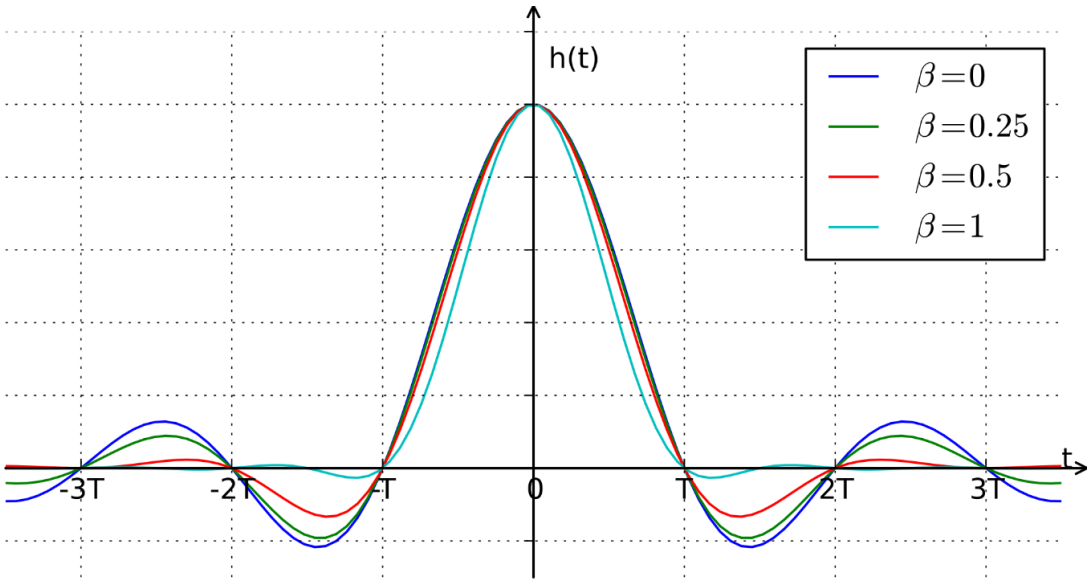
Pomoću drugog Nyquistovog kriterija pokušava se riješiti problem filtra iz prvog kriterija. On tvrdi da signal mora proći kroz filtar sa kosinusno zaobljenom frekvencijskom karakteristikom da bi imao vrijednost intersimbolne interferencije nula.

Na slici 2.5. je prikazana prijenosna karakteristika filtra s kosinusnim zaobljenjem te kako se za različite faktore zaobljenja beta mijenja širina pojasa te kako vrijednost $\beta = 0$ ima idealnu pravokutnu prijenosnu karakteristiku prema prvome Nyquistovom kriteriju.



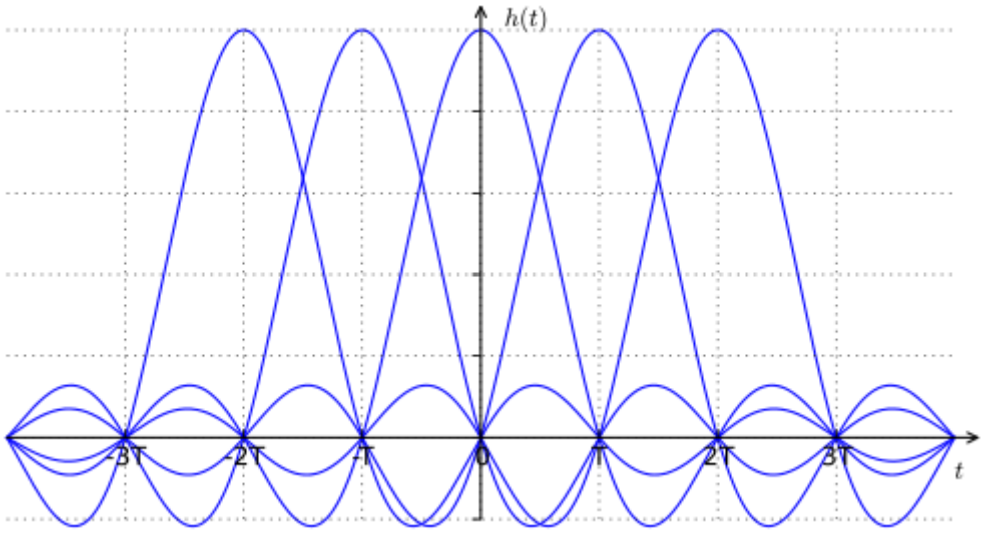

Sl.2.5. *Prijenosna karakteristika filtra sa kosinusnim zaobljenjem* [7]

Na slici 2.6. se vidi da se zaobljenjem prijenosne karakteristike filtra ne mijenja mjesto sjecišta signala sa *f*-osi te se ne mijenja ni razina maksimalne amplitude. To ukazuje na neprisutnost interferencije.




Sl.2.6. *Impulsni odziv filtra s kosinusno zaobljenom karakteristikom* [8]

Na slici 2.7. prikazan je niz impulsa između kojih nema intersimbolne interferencije jer je signal prošao kroz filtar sa kosinusno zaobljenom karakteristikom. Također se vidi kako maksimalna amplituda ne mijenja vrijednost od impulsa do impulsa te kako prvi impuls siječe vremensku os na mjestu najviše amplitude sljedećeg impulsa u nizu što zadovoljava prvi Nyquistov kriterij.

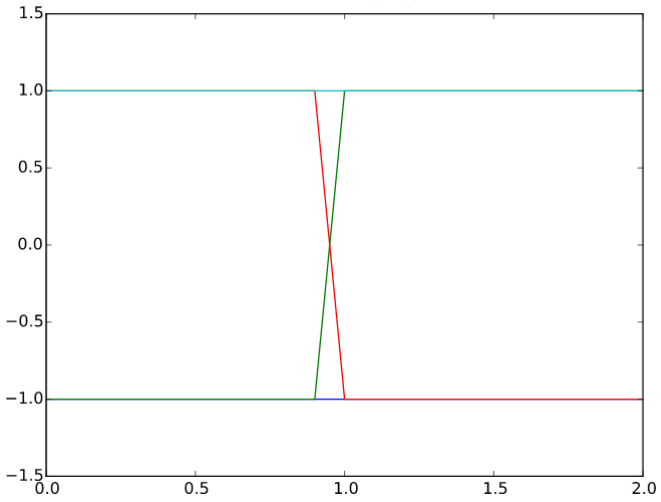



Sl.2.7. *Signal nakon kosinusno zaobljenog filtra koji zadovoljava prvi Nyquistov kriterij* [9]

### 2.2.3. Dijagram oka

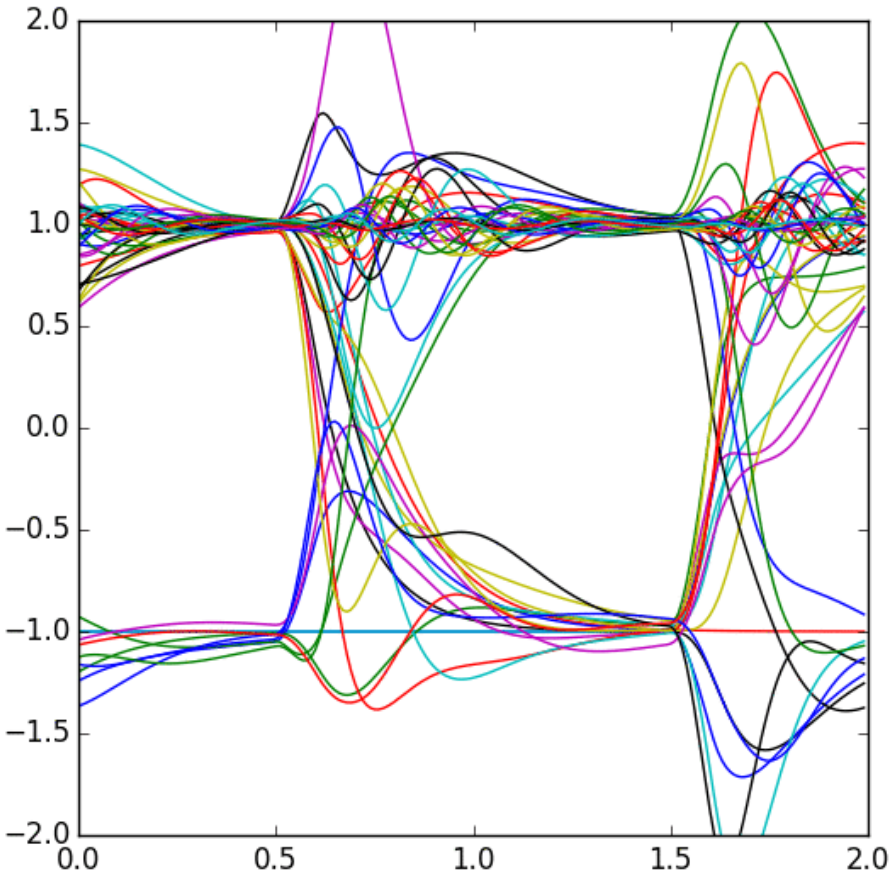
Dijagram oka prikaz je na zaslonu osciloskopa koji nam ukazuje na prisutnost interferencije među simbolima te kao takav govori nam o kvaliteti digitalnog signala. Na pločice za vertikalni otklon potrebno je dovesti digitalni signal, a taktni impulsi digitalnog signala okidaju vremensku bazu osciloskopa. Prikaz je ime dobio zbog sličnosti sa ljudskim okom.[2]

Idealni dijagram oka se sastoji od dviju horizontalnih crta nastalih preklapanjem intervala više binarnih znakova te je prikazan slikom 2.8.




Sl.2.8. *Idealni dijagram oka* [10]

Međutim, zbog nesavršenosti sustava dolazi do intersimbolne interferencije te dijagram oka poprima izgled sličan kao onaj prikazan slikom 2.9. Da je riječ o intersimbolnoj interferenciji govori nam varijacija u razini signala na sredini signala.




Sl.2.9. *Dijagram oka sa intersimbolnom interferencijom* [11]

Pri proučavanju dijagrama oka važno je obratiti pažnju na sljedeće parametre [12]:

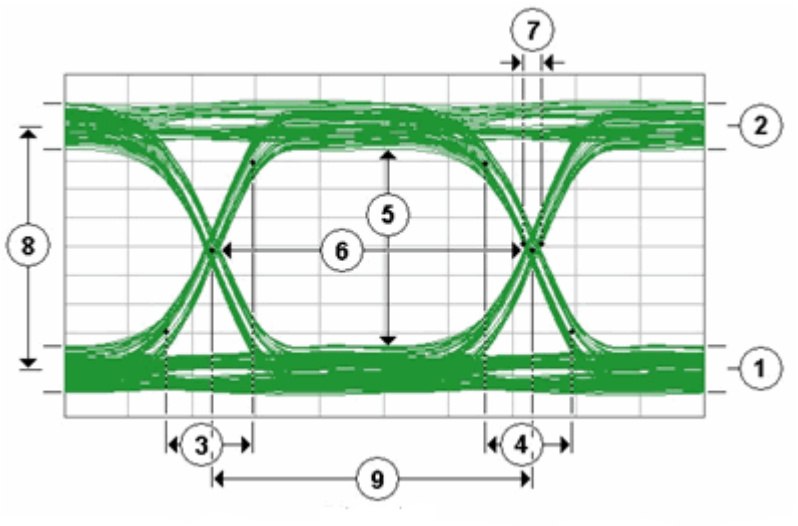
- nivo '1' – predstavlja logičku jedinicu (2)
- nivo '0' – predstavlja logičku nulu (1)
- amplituda oka – razlika između jedinice i nule (8)
- visina oka – mjera vertikalne otvorenosti oka, u idealnom slučaju jednaka je amplitudi, ali se zbog prisustva šuma smanjuje (5)
- postotak preklapanja – mjesto na sredini grafa u kojemu se preklapaju crte pomoću kojega se mjeri postotak preklapanja pomoću formule (2-31):

$$postotak\ preklapanja = 100 \cdot \frac{mjesto\ preklapanja - logička\ nula}{logička\ jedinica - logička\ nula} \quad (2\text{-}31)$$

- period bita – mjera horizontalne otvorenosti dijagrama oka između mjesta sjecišta (9)

- širina oka – mjera horizontalne otvorenosti oka, mjeri se razlika između mjesta sjecišta (6)
- vrijeme podizanja – mjera vremena potrebnog da se prijeđe sa logičke nule na logičku jedinicu, odnosno sa 10% vrijednosti amplitude na 90% (3)
- vrijeme spuštanja – mjera vremena potrebnog da se prijeđe sa logičke jedinice na logičku nulu, odnosno sa 90% vrijednosti amplitude na 10% (4)
- *jitter* – devijacija od prave periodičnosti (7)

Kako se te vrijednosti iščitavaju iz dijagrama oka prikazuje slika 2.10.




Sl.2.10. *Parametri dijagrama oka* [13]

# 3. SIMULACIJA PRETHODNO OBRAĐENIH PARAMETARA

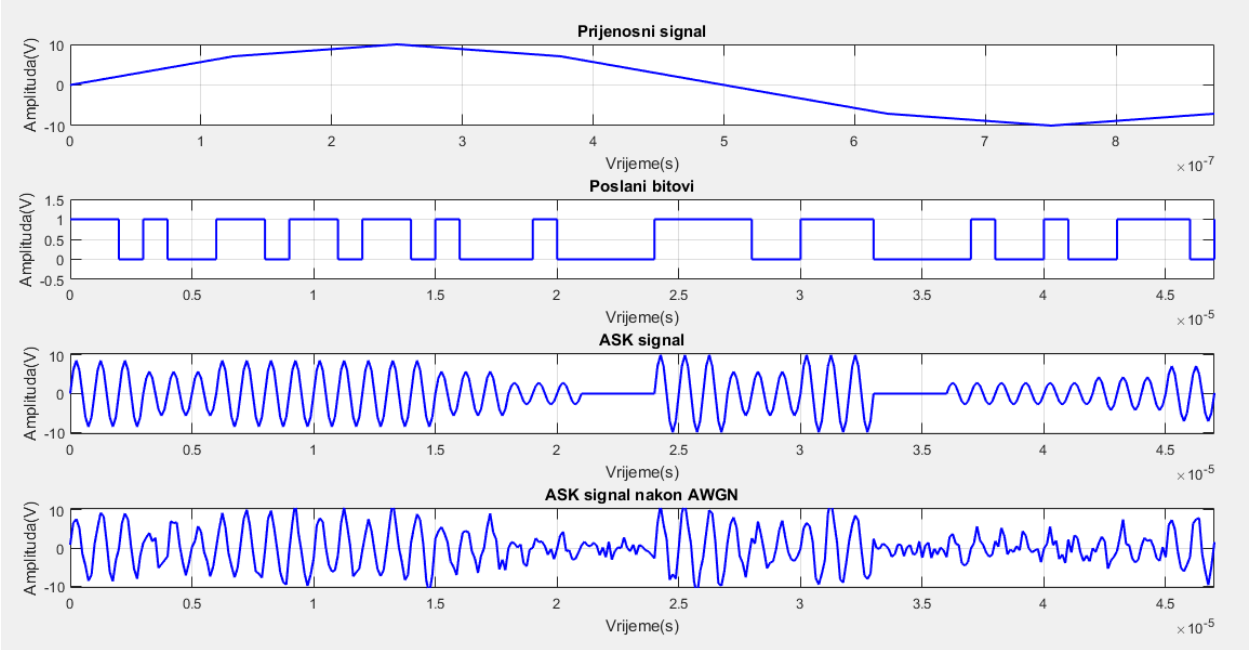
Cilj je simulacije pojedinih modulacijskih postupaka da se na vizualno boljem primjeru objasne te iste modulacije te da se međusobno usporede na temelju broja pogrešaka koje nastanu nakon istih.

## 3.1. Simulacija diskretnih modulacija amplitude, faze i frekvencije

Simulacija modulacija napravljena je u *Matlab*-u. Kod je priložen u prilogu. Potrebno je unijeti parametre te zatim odabrati jednu od tri ponuđene modulacije. Prvo je simulirana diskretna modulacija amplitude. Parametri koji su uneseni su sljedeći:

- broj bitova – 50
- odabrana modulacija – 8-ASK
- amplituda prijenosnog signala [V] – 10
- frekvencija prijenosnog signala [MHz] – 1
- SNR [dB] – 10

Kao rezultat dobili smo kako je prikazano na slici 3.1.




Sl.3.1. *ASK modulacija*

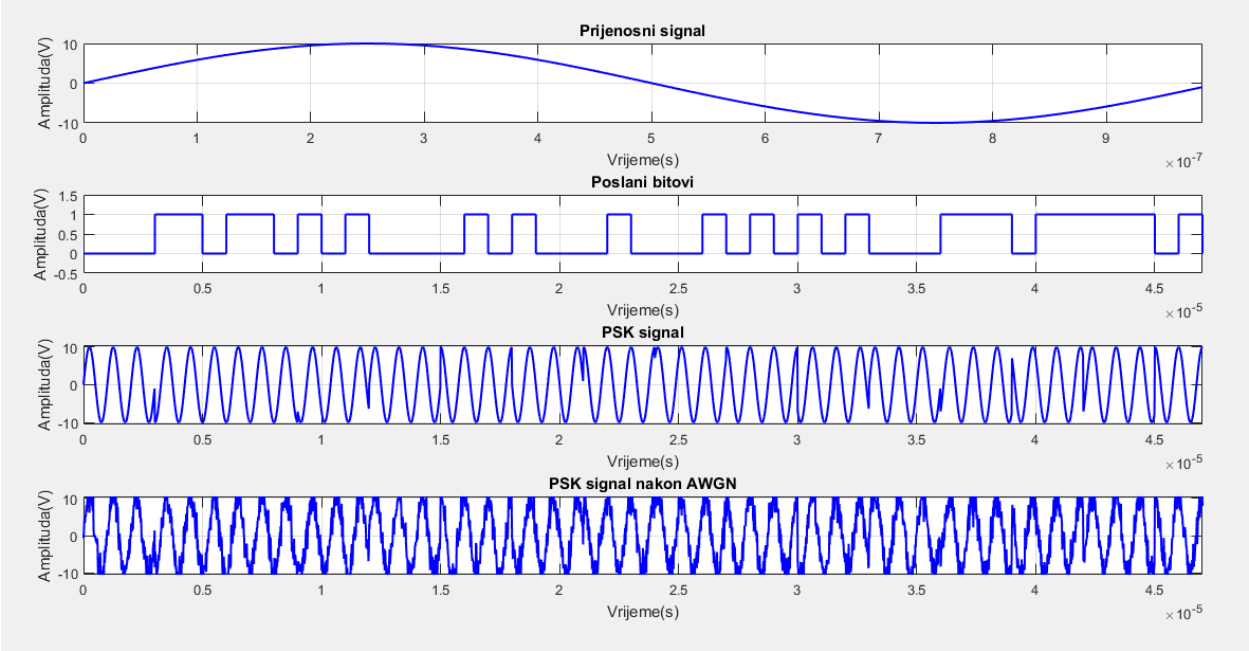
Prvi graf prikazuje prijenosni sinusni signal. Drugi je prikaz slučajno generiranih bitova, odnosno niz slučajno izabranih '0' i '1'. Treći graf u nizu prikazuje amplitudno modulirani signal

gdje se jasno vidi razlika između pojedinih stanja. Tri bita koja imaju vrijednost amplitude 10 V su '111', dok vrijednost 0 V imaju tri nule, odnosno '000'. Ostale moguće kombinacije nula i jedinica nalaze se u tome rasponu vrijednosti, tj. imaju vrijednost amplitude između 0 i 10 V. Zadnji graf prikazuje signal nakon AWGN kanala. Signal je izobličen te je na nekim mjestima teško očitati vrijednost amplitude. Izračunata je i vrijednost *Bit Error Rate*-a koja iznosi 0,54.

Sljedeća modulacija je diskretna modulacija faze. Odabrani parametri su:

- broj bitova - 50
- odabrana modulacija – 8-PSK
- amplituda prijenosnog signala [V] – 10
- frekvencija prijenosnog signala [MHz] – 1
- SNR [dB] – 10

Rezultat je prikazan na slici 3.2. Prvi graf prikazuje prijenosni sinusni signal, a drugi slučajno generirani niz nula i jedinica. Na trećem grafu se vidi fazno modulirani signal. Kako se mijenjaju bitovi tako se mijenjaju i faze. Na primjer, niz '000' ima fazu od 0°, a niz '101' ima fazu od -90°. Slijedi prikaz tog istog moduliranog signala nakon prolaska kroz AWGN kanal. Nagle promjene faza je moguće očitati, ali susjedna stanja koja imaju manje razlike između faza nije moguće razlikovati. Također, izračunata vrijednost *Bit Error Rate*-a iznosi 0,52.

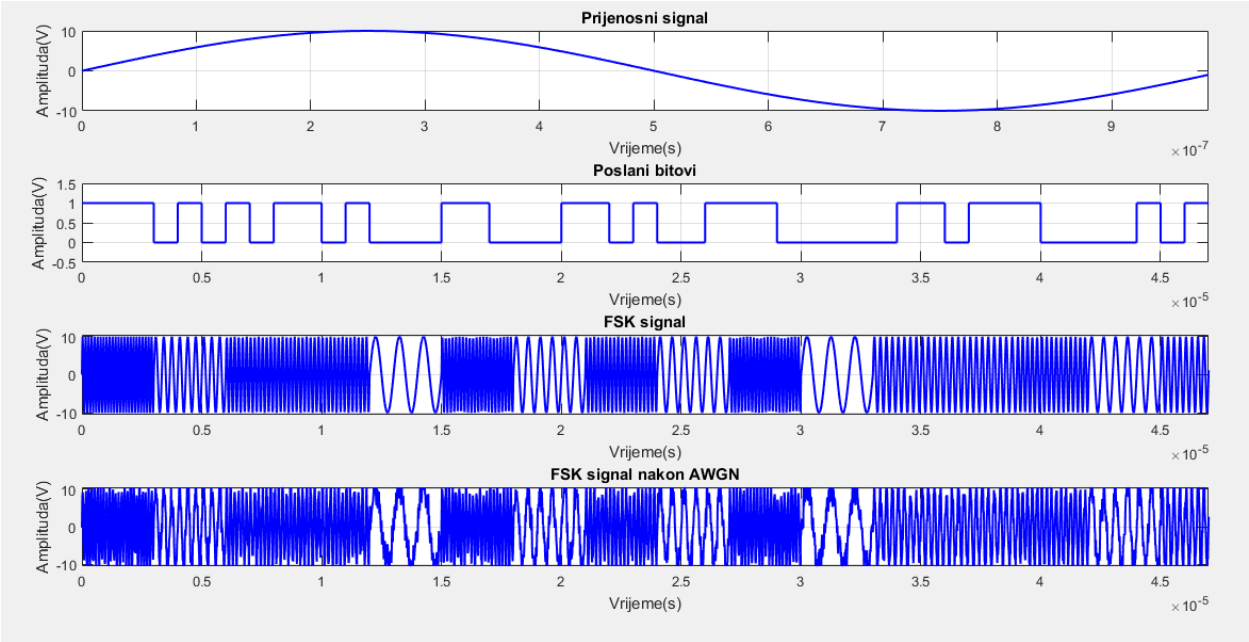



Sl.3.2. *PSK modulacija*

Zadnja modulacija je diskretna modulacija frekvencije. Odabrani parametri su:

- broj bitova - 50
- odabrana modulacija – 8-FSK
- amplituda prijenosnog signala [V] – 10
- frekvencija prijenosnog signala [MHz] – 1
- SNR [dB] – 10

Na slici 3.3. prvi graf prikazuje prijenosni sinusni signal, a drugi slučajno generirani niz nula i jedinica. Na trećem grafu je prikazan frekvencijsko modulirani signal. U ovome slučaju, kako se mijenjaju bitovi, tako se mijenjaju i frekvencije. Na grafu se jasno vidi razlika između stanja, kao npr. između '111' gdje je frekvencija znatno veća od one kod '000'. Slijedi prikaz tog moduliranog signala nakon prolaska kroz AWGN kanal. Razlike između stanja je moguće očitati isključivo jer je poslan manji broj bitova. Izračunata vrijednost *Bit Error Rate*-a iznosi 0,46.

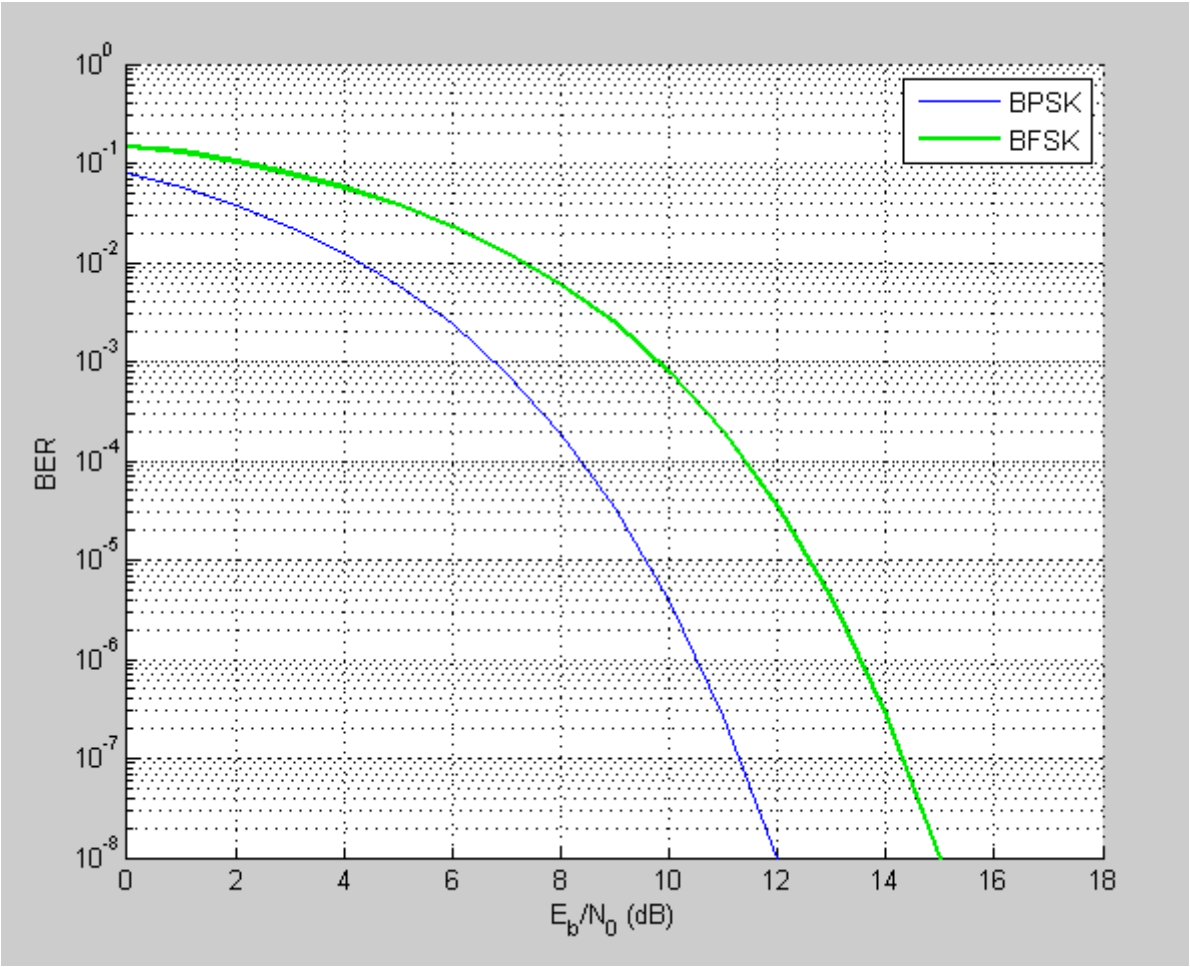



Sl.3.3. *FSK modulacija*

## 3.2. Usporedba modulacijskih postupaka na temelju *Bit Error Rate*-a

U potpoglavlju 2.2. matematički su uspoređena dva diskretna modulacijska postupka – binarna diskretna modulacija faze i binarna diskretna modulacija frekvencije. Došlo se do zaključka da je za binarni FSK sustav potreban za oko 3 dB veći omjer $E_b/N_0$ da bi se postigla ista

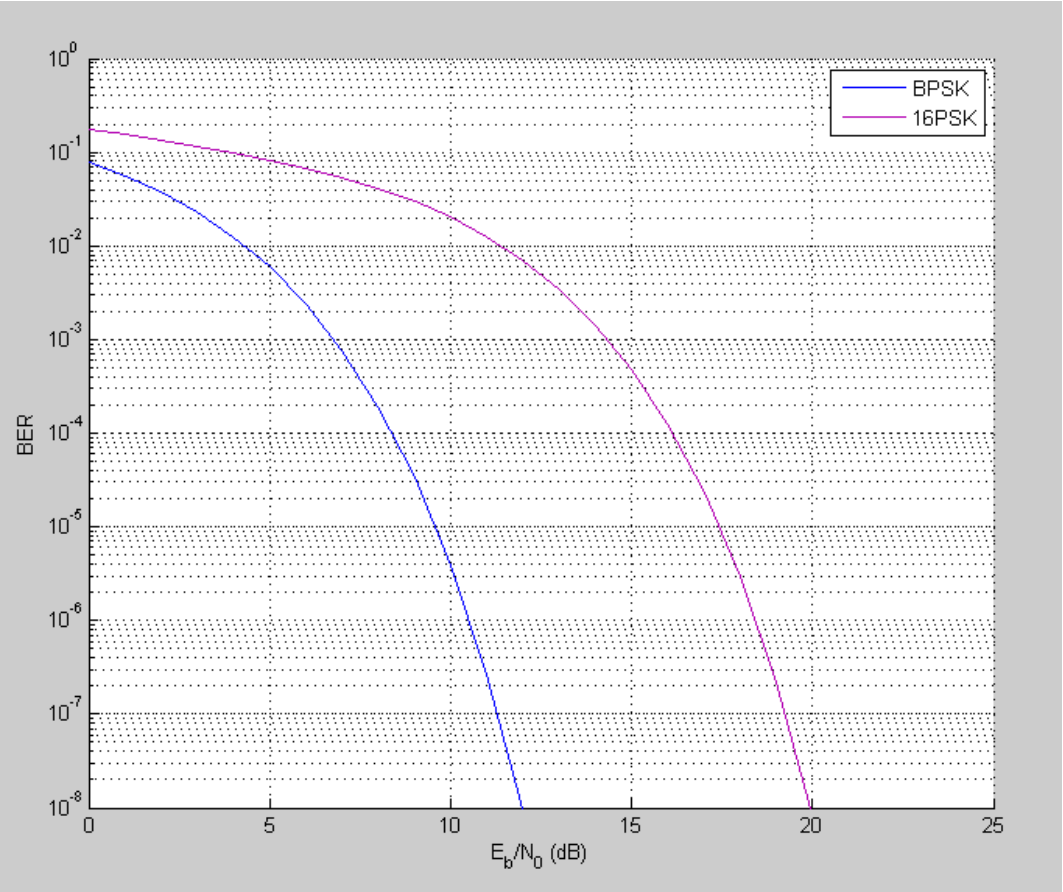
vjerojatnost pogreške kao i u binarnom PSK sustavu. Isto je dokazano *Matlab* alatom *Bertool.* On omogućuje analizu *Bit Error Rate*-a u komunikacijskim sustavima.




Sl.3.4. *Bertool simulacija BPSK i BFSK*

Slika 3.4. je prikaz ovisnosti *Bit Error Rate*-a i omjera $E_b/N_0$. Za približno istu vjerojatnost pogreške razlika između ova dva diskretna modulacijska postupka je oko 3 dB, što je matematički dokazano u potpoglavlju 2.2.2.

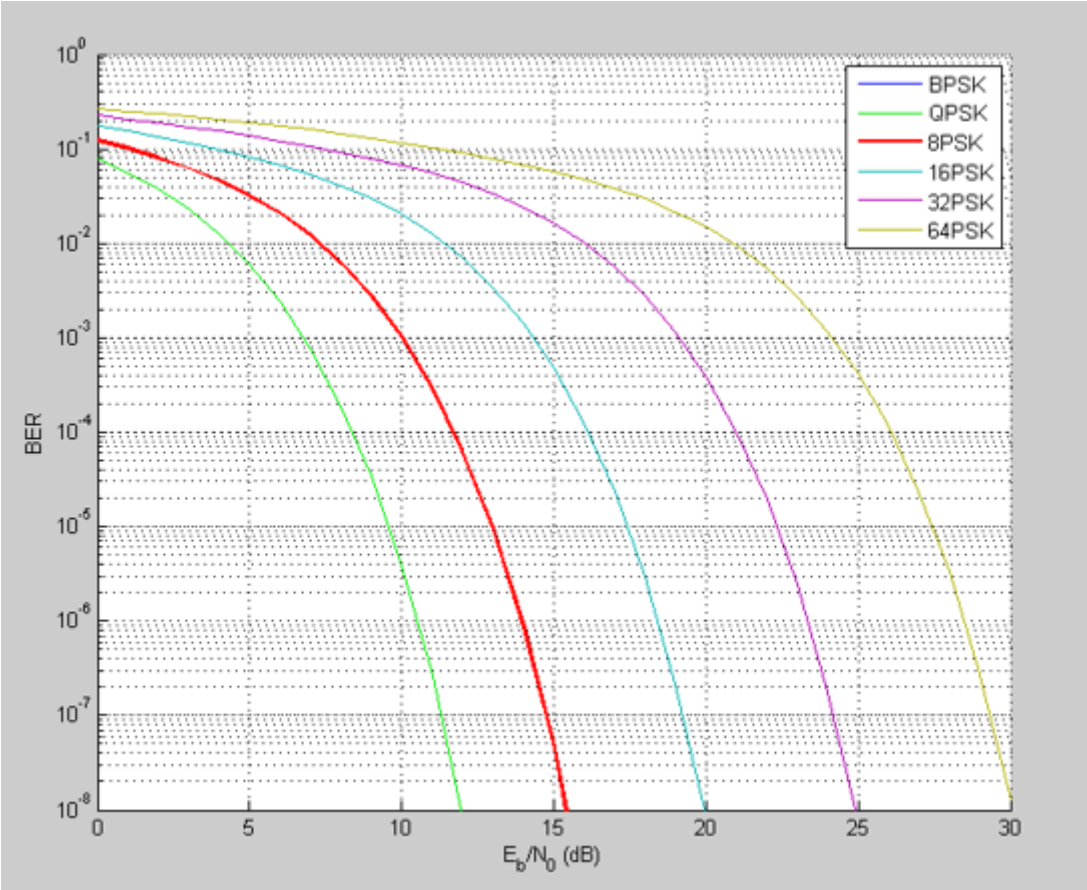
U istome potpoglavlju su uspoređena dva postupka diskretne modulacije faze, jedan sa dva stanja, drugi sa 16. Isto je simulirano pomoću *Bertool*-a te su rezultati prikazani slikom 3.5.




Sl.3.5. *Bertool simulacija BPSK i 16PSK*

Sada je i simulacijom dokazano da su sustavi koji koriste modulacijske postupke sa više elementarnim signala osjetljiviji na šum te im je potreban veći omjer $E_b/N_0$ da bi imali istu vjerojatnost pogreške kao sustavi sa manje elementarnih signala.

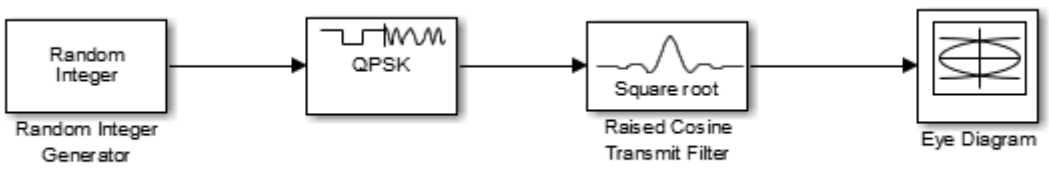
Slika 3.6. prikazuje kako se dalje mijenja ovisnost *Bit Error Rate*-a i $E_b/N_0$ . Povećanjem broja stanja raste i utjecaj šuma te je potrebno povećati snagu signala da bi održala ista vjerojatnost pogreške.




Sl.3.6. *Bertool simulacija BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK i 64PSK*

## 3.3 Simulacija dijagrama oka

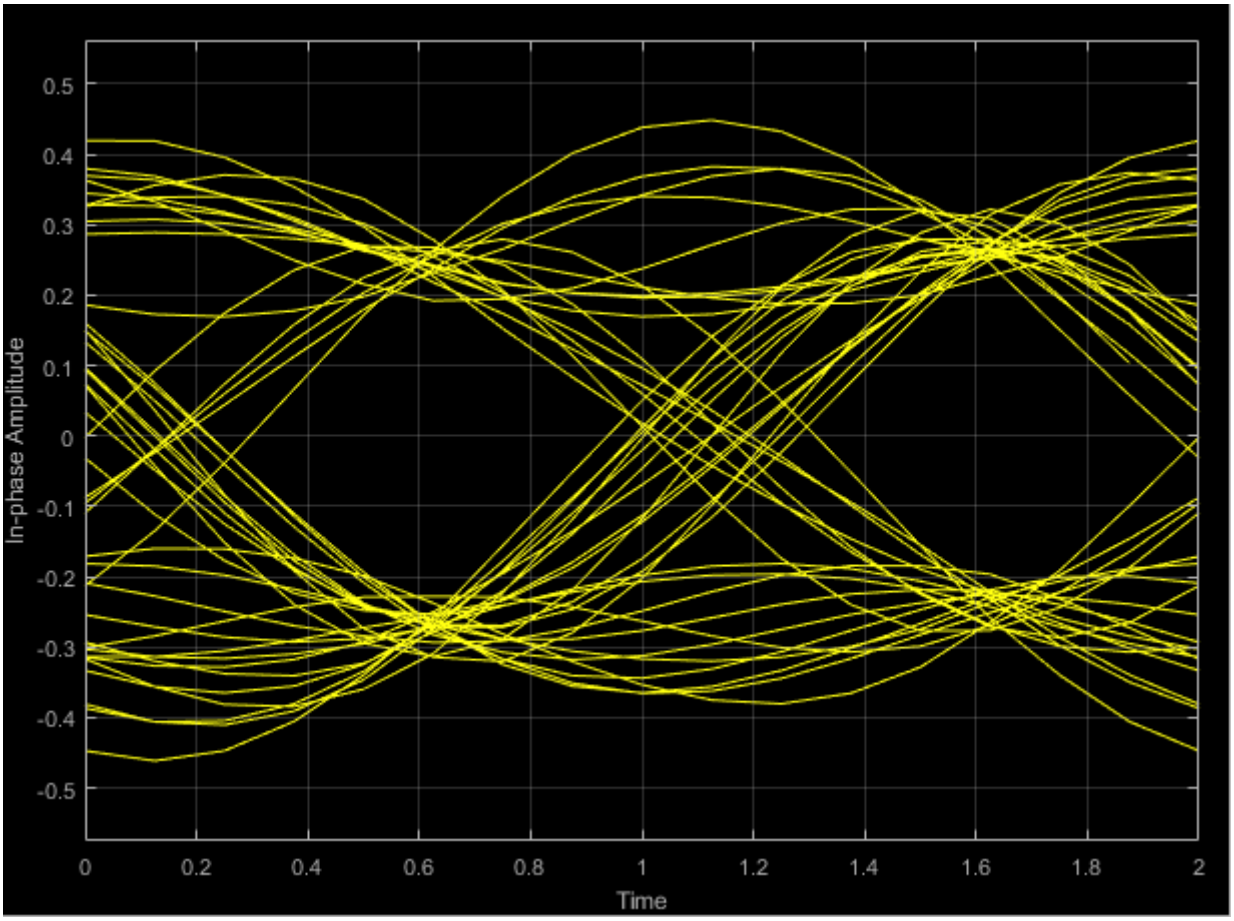
Za simulaciju dijagrama oka koristiti ćemo u *Matlab* unaprijed ugrađen model sustava koji se poziva unosom *doc_eye_diagram_scope* u *Command Window*. Otvara se sljedeći model u *Simulink*-u (Sl.3.7.):




Sl.3.7. *Simulink model za simulaciju dijagrama oka QPSK moduliranog signala*

Prvi blok je *Random Integer Generator* koji generira niz slučajnih integera u rasponu (0, *M*-1) koji se zatim šalju na QPSK modulator sa pomakom u fazi od π/2. Sljedeći blok u nizu je

*Raised Cosine Transmit Filter*, odnosno filter uzdignutom kosinusa koji rješava problem prvog Nyquistovog kriterija za vrijednost intersimbolne interferencije jednaku nuli. Zadnji blok je *Eye Diagram* na kojemu se, nakon pokretanja simulacije, dobije sljedeći prikaz (Sl.3.8.):




Sl.3.8. *Dijagram oka nakon QPSK*

Slika 3.8. prikazuje dva dijagrama oka sa varijacijama u razini signala na sredini dijagrama oka. To ukazuje na prisustvo intersimbolne interferencije. Mogu se uočiti i svi parametri jednog dijagrama oka:

- nivo '1' – 0,25
- nivo '0' - -0,25
- amplituda oka – 0,5
- visina oka – 0,4
- postotak preklapanja – 50%
- period bita - 1
- širina oka – 0,7
- vrijeme podizanja – 0,65

- vrijeme spuštanja – 0,65
- *jitter* - 0,3

# 4. ZAKLJUČAK

U radu je dan uvid u građu cijelog digitalnog komunikacijskog sustava. Posebna je pažnja posvećena postupcima modulacije, točnije diskretnoj modulaciji amplitude, frekvencije i faze. U obzir su uzeti parametri koji utječu na promjene informacije koja se šalje komunikacijskim kanalom. Obrađeni su pojmovi odnosa snage signala i snage šuma, *Bit Error Rate,* intersimbolna interferencija i dijagram oka. Sustav je tada simuliran u *Matlabu* te su dobiveni rezultati simulacijom uspoređeni sa rezultatima dobivenim matematičkim putem. Uspoređivanjem rezultata došlo se do zaključka da je porastom broja mogućih stanja potrebna veća snaga signala da bi se održala ista vjerojatnost pogreške. To ujedno znači da porastom broja stanja utjecaj šuma je veći.

# 5. LITERATURA


[1] J.G.Proakis, M.Salehi, Digital Communications, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York, 2008.

[2] B.Modlic, I.Modlic, Modulacije i modulatori, Školska knjiga, Zagreb, 2005.

[3] J.R. Arguelles, R.M. Dimapilis, M.K. Duterte, J.W. Ibanez, B.E. Ocampo, M.E. Suarez, Frequency Shift Keying, ECCE Department, Ateneo de Manila University, Philippines

[4] A.B.Carlson, P.B.Crilly, J.C.Rutledge, Communication Systems, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2002.

[5] I.Ali, Bit-Error-Rate Simulation Using MATLAB, International Journal of Engineering Research and Applications, No.1.,Vol.3. str.706-711, siječanj-veljača 2013.

[6] B.P.Lathi, Modern Digital and Analog Communication System, Third Edition, Oxford University Press, 1998.

[7] http://jontio.zapto.org/hda1/paradise/QAMidea/QAMidea.htm (27.06.2016.)

[8] http://jontio.zapto.org/hda1/paradise/QAMidea/QAMidea.htm (27.06.2016.)

[9] http://jugandi.com/eXe_Projects/SystemVue/nyquist_channels.html (27.06.2016.)

[10] http://blog.bradysalz.com/eye-diagrams/ (27.06.2016.)

[11] http://blog.bradysalz.com/eye-diagrams/ (27.06.2016.)

[12] M.Jeeva, S.Boddu, International Journal of Advances in Engineering and Technology, No.2., Vol.7., str.627-634, svibanj 2014.

[13] http://na.support.keysight.com/plts/help/WebHelp/Analyzing/Analyzing_Data_using_Eye_Diagrams.html (27.06.2016.)

# 6. SAŽETAK

Digitalni komunikacijski sustavi prenose informacije u digitalnom obliku od izvora koji tu informaciju generira do jednog ili više odredišta, odnosno primatelja. Da bi signal koji nosi informaciju prošao kroz komunikacijski kanal, potrebno ga je modulirati. Modulacija je postupak prilagođavanja signala informacije prolasku kroz medij. Najčešće korištene modulacije su ASK – diskretna modulacija amplitude sinusnog signala, FSK – diskretna modulacija frekvencije sinusnog signala te PSK – diskretna modulacija faze sinusnog signala. Pri prolasku kroz komunikacijski kanal, javlja se neželjeni signal – šum koji izobličava signal informacije. Njegov utjecaj se promatra kroz parametre kao što su odnos snage signala i snage šuma, *Bit Error Rate*, vjerojatnost pogreške, intersimbolna interferencija te dijagram oka. Simulacijom tih parametara u *Matlab*-u pobliže se objašnjava njihova međusobna ovisnost te kako oni utječu na informacijski signal.

Ključne riječi: digitalni komunikacijski sustav, diskretna modulacija amplitude, diskretna modulacija faze, diskretna modulacija frekvencije, *Bit Error Rate,* odnos snage signala i snage šuma, intersimbolna interferencija, dijagram oka

Digital communication systems transfer information in digital form from the source which generates that information to one or more destinations, i.e. receivers. In order for the signal which carries the information to pass through communication channel, it has to be modulated. Modulation is a process of adjusting the signal of information for the passage through some media. The most frequently used modulations are ASK – amplitude shift keying, FSK – discrete modulation of a frequency and PSK – discrete modulation of a phase. While passing through the communication channel, an undesired signal appears – a noise which distorts the signal of the information. Its influence is observed through the parameters such as signal to noise ratio, Bit Error Rate, error probability, intersymbol interference and eye pattern. By running a simulation of these parameters in Matlab, their correlation and the way they influence the information signal is closely explained.

Key words: digital communication system, amplitude shift-keying, phase shift-keying, frequency shift-keying, Bit Error Rate, signal to noise ratio, intersymbol interference, eye pattern

# 7. ŽIVOTOPIS

Emilia Felding rođena je 1.lipnja 1994. u Slavonskom Brodu. U Oriovcu je završila osnovnu školu te je nakon toga upisala Klasičnu gimnaziju fra Marijana Lanosovića u Slavonskom Brodu. Završetkom gimnazije seli se u Osijek gdje upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, smjer Elektrotehnika. Od stranih jezika služi se engleskim i njemačkim.

# 8. PRILOZI

*Matlab* kod za ASK, FSK i PSK simulacije

```
clc
clear variables
close all

%% Parametri
nbit=input('Unesite broj bitova koji zelite poslati: ');
b=randi([0 1],1,nbit);
f=1;

n=input('Odaberite n(2^n) izmedu 1 - 6: ');
while n<1 || n>6
    n=input('Krivi unos, pokusajte ponovno: ');
end
nS=floor(nbit/n);

A=input('Unesite amplitudu prijenosnog signala (V): ');
frekv=input('Unesite frekvenciju prijenosnog signala (MHz): ');

mod=input('Odaberite modulaciju: 1 - ASK, 2 - PSK, 3 - FSK: ');
while mod<1 || mod>3
  mod=input('Krivi unos, pokusajte ponovno: ');
end

SNR=input('Unesite SNR (dB): ');
disp(' ')

%% Modulacije i demodulacije

switch mod

  case 1        % M-ASK
```

```
%% Moduliranje
disp(['Odabrali ste ' num2str(2^n) '-ASK'])
disp('Moduliranje...')

i=1; j=1;
polje=zeros(1,nS);
while i<nS+1
   t1=n;
   while t1>0
      polje(i)=polje(i)+b(j)*(2^(t1-1));
      j=j+1;
      t1=t1-1;
   end
   i=i+1;
end

t=0:1/(8*frekv):1-1/(8*frekv);

ask=[];
for i=1:nS
   for j=1:n
      ask=[ask polje(i)*A*sin(2*pi*frekv*t)];
   end
end
ask=ask/(2^n-1);
disp('Zavrseno')

%% Prijenos kroz signal
% AWGN
askn=awgn(ask,SNR,'measured');

%% Demoduliranje

disp('Demoduliranje...')
```

```
lth=A/(2*(2^n-1));
th=zeros(1,2^n+1);
for i=1:2^n
   th(i+1)=lth+(i-1)*A/(2^n-1);
end

temp=zeros(1,length(t));
askd=zeros(1,nS);
k=1;
for i=1:n:n*nS
   temp=askn((1+(i-1)*length(t)):i*length(t));
   for j=0:2^n-1
      vmax=max(temp);
      if vmax>=th(j+1) && vmax<th(j+2)
         askd(k)=j;
         k=k+1;
         break
      end
   end
end

brx=[];
for i=1:length(askd)
   brx=[brx dec2bin(askd(i),n)];
end
brx=brx-'0';
disp('Zavrseno')

%% Plotanje
figure(1)
tb=(0:1/(8*frekv):(n*nS)-1/(8*frekv))/(f*1e6);
subplot(411)
plot(t/(f*1e6),A*sin(2*pi*frekv*t),'b','linewidth',1.5)
```

```
    axis([0 t(end)/(f*1e6) -A A])
    title('Prijenosni signal');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
    subplot(412)
    stairs((0:nbit)/(f*1e6),[b(1:nbit) b(nbit)],'b','linewidth',1.5)
    axis([0 (n*nS-1)/(f*1e6) -0.5 1.5])
    title('Poslani bitovi');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
    subplot(413)
    plot(tb,ask,'b','linewidth',1.5)
    axis([0 (n*nS-1)/(f*1e6) -A-0.5 A+0.5])
    title('ASK signal');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
    subplot(414)
    plot(tb, askn,'b','linewidth',1.5)
    axis([0 (n*nS-1)/(f*1e6) -A-0.5 A+0.5])
    title('ASK signal nakon AWGN');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');


case 2          % M-PSK
    %% Moduliranje
    disp(['Odabrali ste ' num2str(2^n) '-PSK'])
    disp('Moduliranje...')

    i=1; j=1;
    polje=zeros(1,nS);
    while i<nS+1
        t1=n;
        while t1>0
            polje(i)=polje(i)+b(j)*(2^(t1-1));
            j=j+1;
            t1=t1-1;
        end
```

```
    i=i+1;
end

t=0:1/(64*frekv):1-1/(64*frekv);

psk=[];
for i=1:nS
    for j=1:n
        psk=[psk A*sin(2*pi*frekv*t+polje(i)*2*pi/(2^n))];
    end
end
disp('Zavrseno')

%% Prijenos kroz kanal
% AWGN
pskn=awgn(psk,SNR,'measured');

%% Demoduliranje

disp('Demoduliranje...')

k=1;
temp=zeros(1,length(t));
pskd=zeros(1,nS);
for i=1:n:n*nS
    temp=pskn((1+(i-1)*length(t)):i*length(t));
    for j=0:2^n-1
        vm=mean(temp.*sin(2*pi*frekv*t+j*2*pi/(2^n)));
        if vm>=0.99*(A/2) && vm<1.01*(A/2)
            pskd(k)=j;
            k=k+1;
            break
        end
    end
```

```
end

brx=[];
for i=1:length(pskd)
   brx=[brx dec2bin(pskd(i),n)];
end
brx=brx-'0';
disp('Zavrseno')

%% Plotanje

figure(1)
tb=(0:1/(64*frekv):(n*nS)-1/(64*frekv))/(f*1e6);
subplot(411)
plot(t/(f*1e6),A*sin(2*pi*frekv*t),'b','linewidth',1.5)
axis([0 t(end)/(f*1e6) -A A])
title('Prijenosni signal');grid on
xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
subplot(412)
stairs((0:nbit)/(f*1e6),[b(1:nbit) b(nbit)],'b','linewidth',1.5)
axis([0 (n*nS-1)/(f*1e6) -0.5 1.5])
title('Poslani bitovi');grid on
xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
subplot(413)
plot(tb,psk,'b','linewidth',1.5)
axis([0 (n*nS-1)/(f*1e6) -A-0.5 A+0.5])
title('PSK signal');grid on
xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
subplot(414)
plot(tb, pskn,'b','linewidth',1.5)
axis([0 (n*nS-1)/(f*1e6) -A-0.5 A+0.5])
title('PSK signal nakon AWGN');grid on
xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
```

```
case 3  % M-FSK
    %% Moduliranje
    disp(['Odabrali ste ' num2str(2^n) '-FSK'])
    disp('Moduliranje...')

    i=1; j=1;
    polje=zeros(1,nS);
    while i<nS+1
        t1=n;
        while t1>0
            polje(i)=polje(i)+b(j)*(2^(t1-1));
            j=j+1;
            t1=t1-1;
        end
        i=i+1;
    end

    t=0:1/(8*(2^n)*frekv):1-1/(8*(2^n)*frekv);

    fd=zeros(1,2^n);
    fd(1)=frekv;
    for k=2:2^n
        fd(k)=k*fd(1);
    end
    fsk=[];
    for i=1:nS
        for j=1:n
            fsk=[fsk A*sin(2*pi*fd(polje(i)+1)*t)];
        end
    end
    disp('Zavrseno')

    %% Prijenos kroz kanal
```

```
% AWGN
fskn=awgn(fsk,SNR,'measured');

%% Demoduliranje
disp('Demoduliranje...')

k=1;
fskd=zeros(1,nS);
temp=zeros(1,length(t));
for i=1:n:n*nS
   temp=fskn((1+(i-1)*length(t)):i*length(t));
   for j=0:2^n-1
      vm=mean(temp.*sin(2*pi*fd(j+1)*t));
      if vm>=0.99*(A/2) && vm<1.01*(A/2)
          fskd(k)=j;
          k=k+1;
          break
       end
   end
end

brx=[];
for i=1:length(fskd)
   brx=[brx dec2bin(fskd(i),n)];
end
brx=brx-'0';
disp('Zavrseno')

%% Plotanje

figure(1)
tb=(0:1/(8*(2^n)*frekv):(n*nS)-1/(8*(2^n)*frekv))/(f+1e6);
subplot(411)
plot(t/(f+1e6),A*sin(2*pi*frekv*t),'b','linewidth',1.5)
```

```
    axis([0 t(end)/(f+1e6) -A A])
    title('Prijenosni signal');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
    subplot(412)
    stairs((0:nbit)/(f+1e6),[b(1:nbit) b(nbit)],'b','linewidth',1.5)
    axis([0 (n*nS-1)/(f+1e6) -0.5 1.5])
    title('Poslani bitovi');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
    subplot(413)
    plot(tb,fsk,'b','linewidth',1.5)
    axis([0 (n*nS-1)/(f+1e6) -A-0.5 A+0.5])
    title('FSK signal');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');
    subplot(414)
    plot(tb, fskn,'b','linewidth',1.5)
    axis([0 (n*nS-1)/(f+1e6) -A-0.5 A+0.5])
    title('FSK signal nakon AWGN');grid on
    xlabel('Vrijeme(s)');ylabel('Amplituda(V)');


end

%%  BER

disp('Racunanje BER-a...')
nbit_error=0;
for i=1:length(brx)
   if b(i)~=brx(i)
      nbit_error=nbit_error+1;
   end
end
BER=nbit_error/nbit;
disp(['   BER=' num2str(BER)])
```