

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Neslužbeni sažetak

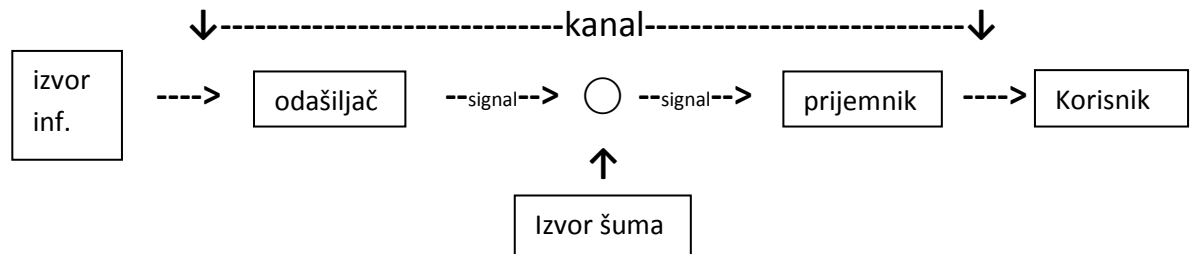
**Elektroničke komunikacije – teorija za prvi  
ciklus 2011/12. v2.**

krkan23 (ex gratakazha88)  
Zell

Zagreb, studeni 2011.

**Komunikacija** – prijenos informacije -> podatak + smisao

**Komunikacijski sustav** - sustav koji omogućava prijenos informacije između prostorno udaljenih točaka



1. **Pretvoriti npr. 1W u dBm.** –  $1W = 30 \text{ dBm}$ .  $P[\text{dB}] = 10 \log(P[W]/1W)$ ,  
 $P[\text{dBm}] = P[\text{dB}] + 30 \text{ dB}$ .
2. **Slušno i govorno područje.** – 20 Hz do 20 kHz slušno, govorno 100 Hz do 7 kHz.
3. **Telefon frekvencije.** – 300 Hz do 3400 Hz.

**Informacija i signal:**

- analogna inf – telefon – analogni signal
- digitalna inf – modem – analogni signal
- analogna inf – koder – digitalni signal
- digitalna inf – odašiljač – digitalni signal

### Digitalni signali u osnovnom pojasu frekvencija

**Linijski kodovi** – prikaz binarnih znakova električnim signalom

- NRZ (Non Return to Zero) – sadrži istosmjernu komponentu
- RZ (Return to Zero) – sadrži istosmjernu komponentu i zauzima veću širinu pojasa od NRZ, osjetljiv je na šum i zahtjeva složenije sklopovlje, olakšava sinkronizaciju bita
- Manchester – nema istosmjernu komponentu, složeniji sklopovi, ne treba taktne impulse za sinkronizaciju
- M-arni lin. kodovi – poprimaju M diskretnih razina –  $w = \log_2 M$ ,  $M = 2^w$ ,  $w = 1, 2, 3 \dots$
- Kvaternarni lin. kod – poprima 4 diskretne razine (-3, -1, 1, 3), (00=-3, 01=-1, 10=1, 11=3)

**Diferencijalno kodirani linijski kodovi** – nastaju diferencijalnim kodiranjem izvornog binarnog slijeda

## Prijenos digitalnih podataka preko fiz. komunikacijskog kanala

### ograničavaju:

- smetnje među simbolima dig. signala
- šum u kanalu – neželjeni slučajni el. signal

Pravokutni impuls zauzima pojas f. beskonačne širine.

Prijenosni kanal je konačne širine – treba ga ograničiti i filtrirati.

Filter za ograničavanje širine pojasa obavlja oblikovanje impulsa dig. signala.

**4. Prvi Nyquistov teorem.** – Idealni granični filter frekvencije  $f_g$  može prenijeti maksimalno  $2f_g$  simbola u sekundi bez smetnje među njima.

**5. Drugi Nyquistov teorem.** – idealni granični filter širine pojasa  $f_g$  konvoluiran sa bil kojom simetričnom funkcijom s linearnom fazom oko  $f_g$  daje isti nulti ISI kao i idealni filter.

**6. Dijagram oka.** – procjena kvalitete digitalnog signala, preklapanje velikog broja bitova (simbola) jedan preko drugog. Period  $T_b$ , idealno pravokutni signal su dvije vodoravne crte. ISI smanjuje otvor oka.

**Smetnje u komunikacijskom kanalu** – gušenje, kašnjenje, šum – u analognim su stavima izazivaju smanjenje kvalitete prijamnog signala, u digitalnim pogreške bita

- gušenje - smanjenje razine električkog signala pri prijenosu komunikacijskim kanalom. Ovisi o vrsti prijenosnog medija i frekvenciji signala.  $L=10\log(P_{ul}/P_{izl})$ . Kompenzira se uporabom pojačala.
- kašnjenje - ovisi o brzini propagacije signala kroz medij i duljini prijenosne linije – dolazi do izobličenja signala
- šum – neželjeni signal koji se pojavljuje u isto vrijeme, na istom mjestu ili u istom frekvencijskom području kao i željeni signal. Uvijek je prisutan u komunikacijskim sustavima. Postoji termički (bijeli) šum, intermodulacijski, preslušavanje, impulsni. Termički  $N=kTB$ ,  $k$ =Boltzmannova konstanta,  $T$ =temperatura u K,  $B$ =širina pojasa. Odnos signal/šum – važan je njihov relativan odnos snaga, a ne apsolutni iznosi.  $S/N[dB]=10\log(S[W]/N[W])$ .

**BER** - vjerojatnost pogreške u prepoznavanju bita. Učestalost pogreške bita.

**Kapacitet kanala** – iskazuje se kao brzina prijenosa u bitima u sekundi [bit/s] – najveća brzina kojom se mogu prenositi podaci. Ovisi o  $B$  (širina frek. pojasa).  $C=2B$  ili  $C=2B\log_2 M$  ( $M$ -broj naponskih razina).

Shannonova brzina:  $C=B\log_2(1+S/N)$  - najviša moguća brzina pouzdanog prijenosa informacije u zadanome pojasu frekvencija u uvjetima djelovanja bijelog šuma. Ta bi se brzina ostvarila optimalnom obradom informacije

(kodiranjem i modulacijom).

**Optimalni prijam** – mora detektirati impuls prenesen komunikacijskim kanalom koji je izložen djelovanju šuma.

**Utjecaj šuma** – u digitalnom se prijenosu umjesto omjera snaga korisnog signala i šuma koristi omjer energije signala po bitu (energija simbola) i gustoće snage šuma  $E_b/N_0$ .

### **Prijenos analognog i digitalnog signala**

#### **Analogni sustavi:**

- prenose analognu ili digitalnu informaciju
- kvaliteta prijama ne ovisi o sadržaju signala
- osjetljivi su na šum i nelinearna izobličenja
- povećanjem prijenosne udaljenosti raste gušenje signala

#### **Digitalni sustavi:**

- kvaliteta prijama ovisi o sadržaju signala
- osjetljivi su na gušenje signala, manje na šum
- moguće je rabiti tehnike za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka u prijenosu

#### **Prednosti digitalnog sustava:**

- visoka kvaliteta prijamnog signala
- jeftiniji sklopovi i uređaji
- moguće je ostvariti veće prijenosne udaljenosti u kanalima niske kvalitete
- bolje iskorištenje prijenosnih kapaciteta i frekvencijskog spektra
- povećana sigurnost i privatnost (šifriranje signala)

### **Značajke prijenosnih medija**

**Upletena parica** – dva izolirana vodiča spiralno upletena jedan oko drugog – vodiči su upleteni jedan oko drugog radi smanjenja preslušavanja. Rabe se za povezivanje telefonskih pretplatnika na telefonsku centralu te u lokalnim mrežama (LAN). **Dobre strane** – jeftin medij jednostavan za polaganje, **loše strane** – ograničene brzine prijenosa, ograničene prijenosne udaljenosti, neotpornost na šum i elektromagnetske smetnje. Kvaliteta kabela određena je gušenjem i preslušavanjem.

**Koaksijalni kabel** - dva vodiča smještena u istoj osi i odvojena izolatorom - više kabela može biti združeno. Rabi se u sustavima kabela televizije te za povezivanje radijskih odašiljača ili prijemnika s antenom.

**Svjetlovod** - vrlo tanak (2 – 125 mm) i fleksibilan medij. Ponaša se kao valovod u frekvencijskom području  $10^{14}$  –  $10^{15}$  Hz (područje infracrvene i vidljive svjetlosti). Jezgra koja prenosi svjetlost načinjena je od stakla ili plastike. Jedan

optički kabel sadrži više svjetlovoda. Kao izvori svjetlosti rabe se poluvodički laseri ili diode LED. Najčešće se rabi za prijenos signala na velike udaljenosti.

**Dobre strane** - visoke brzine prijenosa (nekoliko stotina Gbit/s), male dimenzije i mala težina, malo gušenje signala, otpornost na elektromagnetske smetnje, potreba za uporabom pojačala svakih desetak kilometara ili više. **Loše strane** - iako su optički kabeli jeftini, ostali uređaji potrebni za elektrooptičku i optoelektričku pretvorbu su relativno skupi - složenija instalacija te održavanje sustava.

**Radijski prijenos** – ostvaruje se putem elektromagnetskog (EM) vala koji se širi u slobodnom prostoru frekvencije od 9 kHz do 3 000 GHz. Temeljni elementi radijskog sustava su odašiljač (generira signal i provodi modulaciju), odašiljačka i prijamna antena (zrače odnosno primaju elektromagnetski val), prijenosni medij (atmosfera), prijamnik (odabire željeni kanal (signal), pojačava signal i izdvaja informaciju). Radijski prijenos može biti **usmjeren** – antena zrači uski snop elektromagnetskih valova, služi za povezivanje dvije točke, pri čemu odašiljačka i prijamna antena moraju biti točno usmjerene jedna prema drugoj (point to point) - pogodan za područje viših frekvencija (iznad 1 GHz) i **neusmjeren** – odašiljani signal se širi u više smjerova, signal jednog odašiljača može biti primljen na velikom broju prijamnika.

### **Modulacijski postupci**

**Modulacija** – postupak transformacije električnog signala, koji nosi informaciju, radi njegove prilagodbe za prijenos (mijenjanje jednog ili više parametara pomoćnog signala (prijenosnog)).

**Demodulacija** – postupak povratne transformacije signala u izvorni oblik.

**Parazitna modulacija** – neželjene promjene parametara moduliranog signala koje nastaju uz korisnu modulaciju.

**Modulacijski/modulirani/prijenosni signal** – Modulacijski signal nosi informaciju, upravlja promjenama parametara prijenosnog signala, modulirani signal je signal kojem se mijenjaju parametri ovisno o razini modulacijskog signala. Prijenosni signal je pomoćni signal kojem se mijenjaju parametri i on ne prenosi informaciju.

**Modulator** – elektronički sklop koji obavlja modulaciju.

**Demodulator** (detektor) – elektronički sklop koji obavlja demodulaciju (detekciju).

**Podjela prema vrsti prijenosnog signala:** Modulacija sinusnog signala, impulsnog signala i ostalih vrsta signala.

**Podjela prema vrsti modulacijskog signala:** Kontinuirani (analogni) modulacijski postupci (signali zvuka, slike), diskretni (signali podataka), digitalni (ulazni je analogni, izlazni je digitalni).

Postupci demodulacije se dijele na **koherentne** (ako je prijamnik sinkroniziran s odašiljačem po fazi prijenosnog signala) i **nekoherentne** (manje kompleksni, lošija radna svojstva) postupke.

**Modulacija amplitude AM** - indeks modulacije amplitude ( $m_a$ ) je najveća promjena amplitudno moduliranog signala u odnosu na amplitudu prijenosnog signala  $U_{pm}$ . Za  $m_a \leq 1$  ovojnica moduliranog signala točno prati valni oblik modulacijskog signala, a za  $m_a > 1$  je ovojnica isprekidana.  $m_a = (A_{max} - A_{min}) / (A_{max} + A_{min})$ ,  $B_{am} = 2f_m$ . Snaga  $P_{am} = U_{pm}^2 / (2 \cdot R) \cdot (1 + m_a^2 / 2)$ .

Demodulacija se provodi nekoherentno – detekcijom ovojnice (vršno ispravljanje), a može i koherentno množenjem sa pomoćnom signalom sličnim prijenosnom u modulatoru. Dubina modulacije - indeks modulacije izražen u postocima. Parsevalov zakon - srednja snaga nekoga složenog signala jednaka je zbroju srednjih snaga njegovih spektralnih komponenata.

**PM (fazna modulacija)/FM (frekvencijska modulacija)** – promjenom faze nastaju trenutne promjene frekvencije i nastaje kosinusna devijacija frekvencije što je najveće odstupanje frekvencije moduliranog signala od frekvencije prijenosnog signala. Indeks modulacije faze ( $m_p$ ) može biti veći ili manji od 1. Pri modulaciji frekvencije nastaje trenutna promjena faze i to se zove sinusna devijacija faze. Indeks modulacije ( $m_f$ ) može biti veći ili manji od 1. Širina spektra se određuje Carsonovim pravilom:  $B = 2f_m(m + 1)$ . Snaga fazno ili frekvencijski moduliranog signala je jednaka snazi prvotnog signala, samo je drugačija raspodjela snage. Demodulacija se provodi posredno u dva koraka: pretvori se u AM signal u prvom koraku pa se nakon toga u drugom koraku se nekoherentno demodulira detekcijom ovojnice. Sve se to obavlja u frekvencijskom diskriminatoru.

**Akcentuacija/deakcentuacija** – akcentuacijom se izobličuje modulacijski signal tako da mu se naglase komponente viših frekvencija prije modulacije, a

deakcentuacijom se vraća u prvotni oblik nakon demodulacije. Karakteristika akcentuacije je 6 dB/oktavi ili 20 dB/dekadi.

### **Diskretna modulacija sinusnog signala**

- diskretna modulacija amplitude (ASK, Amplitude–Shift Keying),
- diskretna modulacija frekvencije (FSK, Frequency–Shift Keying),
- diskretna modulacija faze (PSK, Phase–Shift Keying).

**Brzina prijenosa simbola** –  $R_s = 1/T_s$ ,  $R_s = R_b \cdot \log_2 M$

**Kriteriji za odabir modulacijskog postupka** – učinkovitost snage ( $E_b/N_0$ ), spektralna učinkovitost ( $R_b/B$ ), kompleksnost sustava (količina i složenost sklopovlja uključujući tehničku složenost sustava kao i njegovu cijenu).

**ASK (diskretna modulacija amplitude)** – najstariji diskretni modulacijski postupak. U intervalu znaka «1»  $u_{ASK}$  je nazivne amplitude  $U_{pm}$ , dok je u intervalu znaka «0» razina moduliranog signala jednaka nuli. Idealni ASK-signal zauzima beskonačno širok pojas frekvencija radi čega se koriste niskopropusni filtri (filtri s kosinusno zaobljenom frekvencijskom karakteristikom).  $k_{fm} = 1/2T_b$ ,  $B_{ASK} = 1.6 \cdot 2 \cdot f_m = 1.6/T_b$  širina pojasa, snaga  $P_{ASK} = U_{pm}^2/4R$ . Demodulacija je nekoherentna detekcijom ovojnice i koherentna množenjem ASK s pomoćnim signalom nosioca na koju utječe kofazna komponenta. Primjena - sustavi za prijenos digitalnih signala male brzine.

### **Diskretna modulacija frekvencije FSK**

Simboli FSK-signala odgovaraju sinusnim titrajima različitih diskretnih frekvencija. U idealnim uvjetima stalne amplitude  $\rightarrow f_0 = f_p - \Delta f$ ,  $f_1 = f_p + \Delta f$  za BFSK. Indeks modulacije  $m_f = \Delta f / f_m = \Delta f \cdot T_m = 2 \Delta f \cdot T_b$ . Unutar jednog intervala faza se promijeni za  $\pm \pi \cdot m_f$ . Širina pojasa se određuje Carsonovim pravilom:  $B_{FSK} = 2 \cdot (\Delta f + f_m) = 2 \Delta f + 1/T_b$ . Filtriranjem se smanjuje B, a koriste se niskopropusni filtri sa kosinusno zaobljenom karakteristikom i Gaussovi filtri  $B \cdot T_s = 0.5$ . Simboli M-FSK su ortogonalni na  $1/T_s$ . Demodulira se nekoherentnim postupkom sa povezanošću s ASK – FSK je zbroj dva ASK signala prijenosnih frekvencija  $f_0$  i  $f_1$ , dakle invertirani međusobno. Koherentni postupak se rijetko koristi, a to je kad se jedinica za detekciju amplitude nadomjesti jedinicom za množenje i integriranje. Vjerojatnost pogreške je  $p_e = 1/2 \cdot e^{-(E_b/2 \cdot N_0)}$ . Nelinearan frekvencijski postupak je FSK.

**BPSK (binarna diskretna modulacija faze (PSK)).** – dva stanja: 0 na 180 stupnjeva, a 1 na 0 stupnjeva.  $T_s = T_b$ . Demodulira se koherentno kao i ASK. Ne može se demodulirati nekoherentnim postupkom.

**QPSK (kvaternarna PSK).** – četiri stanja i pridružuju se dva bita, dabit pravilom Grayeva koda.  $T_s = 2T_b$ . Koherentna demodulacija se provodi posebno demodulacijom kvadrature, a posebno kofazne komponente. Na još dva načina se može demodulirati: prvinačin OQPSK (Offset QPSK) kojim se prelazi u prvoj polovici znaka u susjedno stanje,  $\pm 90$  stupnjeva, a u drugom u daljnje susjedno, a unosi se kašnjenje u kvadraturnu komponentu od  $T_s/2 = T_b$  pa koherentna demodulacija. Drugi način je preklapanje osnovne inačice QPSK i njene inačice sa pomakom  $\pi/4$  ili  $\pi/4$ -QPSK. On je isto koherentan, pa se ne koristi, nego se koriste diferencijalni postupci demodulacije.

**8-PSK (osam stanja faze)** –  $T_s = 3T_b$ , pridružuju se tri bita, tribiti, po principu Grayeva koda.

**Diferencijalni postupci demodulacije PSK signala** – slide 72-81.

**MSK (modulacijski postupak s minimalnom razlikom frekvencija)** – za  $m_f = 0.5$  razmak diskretnih frekvencija je  $f_1 - f_0 = 2\Delta f = 1/2T_b = R_b/2$ . Diskretne frekvencije su  $f_0 = f_p - 1/4T_b$  i  $f_1 = f_p + 1/4T_b$ . Dobiva se kao i QPSK nadomjestkom I i Q kao kosinusnog i sinusnog signala. On je specijalni oblik OQPSK postupka. Dobiva se kvadraturnim modulatorom kao OQPSK.  $T_s = 2T_b$ .  $B = 1.5R_b = 1.5/T_b$ . Koherentni postupak demodulacije je kao i demodulacija QPSK, a nekoherentni je diferencijalno kodiranje, temeljeno na detekciji promjene faze MSK signala unutar intervala jednog binarnog znaka. Uz pomoć Gaussovog filtra se smanjuje širina pojasa MSK i to se zove GMSK. Promjene faze su linearne i oblika  $\pm \pi t / 2T_b$ . GMSK unosi ISI pa je kompliciran proračun vjerojatnosti pogreške. To se može kompenzirati povećanjem  $E_b$  za oko 1dB.

**QAM (Kvadratura diskretna modulacija amplitude)** – I i Q moduliraju amplitude dviju kvadrature komponenti, tj. zbrajaju se dva ASK signala, to je linearni postupak. U pogledu šuma se pokušava poboljšati performansa QAM-a na način da se učini drugačija struktura, a time je manja snaga potrebna za istu vjerojatnost pogreške. Demodulira se sinkronim ili koherentnim postupkom – zasebna modulacija kofazne i kvadrature komponente kao i kod QPSK. QAM sa više simbola je osjetljiviji na šum.



## **Učinkovitost snage i spektralna učinkovitost modulacijskog postupka**

**Kriteriji odabira modulacijskog postupka** – dva su: ovisno o spektralnoj učinkovitosti i ovisno o učinkovitosti snage. Za spektralnu učinkovitost je po Shannonu bitna da ona ide u 0, pa vrijednost omjera  $E_b/N_0$  je tada 0.693 ili – 1.59dB. Teorijski najviše ostvariva je  $C/B[\text{dB}] = \log_2(1+C/N)$ .

**Kvaliteta modulacije.** – Veličina verzora pogreške je EVM, ona predstavlja učestalost pogreške BER-a. Osim nje, postoji omjer pogreške modulacije ili MER koji je povezan s MER-om po pitanju definicije.

**Komunikacija s više nosilaca** – modulirani signal zauzima velika frekvencijska područja pa su velike brzine prijenosa. Nastaju smetnje među simbolima zbog neidealne karakteristike komunikacijskog kanala i nejednolik je prijenos komponenti moduliranog signala. Velike relativne promjene komponenti moduliranog signala nastaju zbog višestaznog širenja vala.

**OFDM (Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca).** – tehnika multipleksiranja, dobivena obradom simbola moduliranog signala i naknadnom modulacijom, dijeli se na veći broj kanala i podpojaseva. Mala je brzina u svakom potkanalu čime je produljeno trajanje simbola. Razlika FDM i OFDM je u tome što se kod FDM-a ne smiju preklapati potkanali i što se koristi nekoherentna demodulacija, a kod OFDM-a se smiju preklapati i koristi se koherentna demodulacija potkanala. Za prijenos podataka se koriste PSK i QAM jer su linearnih osobina i velike spektralne učinkovitosti. Nule spektra se nalaze na višekratnicima od  $1/T_0$ , gdje je  $T_0$  trajanje simbola moduliranog signala u potkanalu. Dobiva se postupkom inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT), kojim se kompleksni simboli prebacuju u vremensku domenu. Broj ulaznih podataka mora biti potencija broja 2, dakle  $2^n$ . Nepovoljni učinci kašnjenja se rješavaju dodavanjem zaštitnog intervala koji je u većini slučajeva jednak četvrtini  $T_0$ . Da bi se ispravile pogreške kodiranja, uveden je kodirani OFDM (COFDM) koji provodi postupce zaštitnog kodiranja (FEC), koji se provode blokovskim kodovima (Reed-Solomon npr.) ili konvolucijskim kodovima. Koristi 52 potkanala, od toga su 4 pilotska koji se moduliraju fiksnim slijedom bitova, a 48 za prijenos. Potkanal 0 se ne koristi.

**Modulacija impulsnog signala** – obilježja vremenski diskretnih pojava, znači da se ne mogu modulirati vremenski kontinuiranim modulacijskim signalom.

Dijele se na modulacije: amplitude (PAM), trajanja i širine impulsa (PDM, PWM), položaja ili faze impulsa (PPM) i frekvencije impulsa (PFM). Modulacijski signal se diskretizira po vremenu pa se uzimaju uzorci u vremenski ekvidistantnim trenucima. Teorem uzoraka kaže da mora broj jednake i nalaze se oko višekratnika  $f_p$  pa se korigiraju za faktor  $\sin(n\pi f_p t)/(n\pi f_p t)$ . PAM se demodulira jednim niskopropusnim filtrom, ali se amplituda tog signala mora korigirati za faktor  $(\pi f t)/\sin(\pi f t)$ . Širina i trajanje impulsa (PDM/PWM) se modulira mijenjajući položaj bridova signala i uzimanja uzoraka u vremenski ekvidistantnim trenucima, ovisno radi li se o regularnom ili prirodnom načinu uzimanja uzoraka. Ta dva postupka su nelinearna. Demodulira se niskopropusnim filtrom. Modulacija položaja ili faze impulsa (PPM) je slična PM modulaciji gdje se uzorci uzimaju, ovisno o prirodnom ili regularnom postupku. U regularnom se uzimaju obično na početku intervala periode  $T_p$ , a u prirodnom postupku u trenutku pojave impulsa. PPM je nelinearni modulacijski postupak i ako se demodulira filtriranjem, onda se izobličuje pa je potrebno amplitudu korigirati za faktor  $\sin(\pi f_m t)/(\pi f_m t)$ . Modulacija frekvencije impulsa je dosta slična PPM, kao što je FM sličan PM modulacijskom postupku.