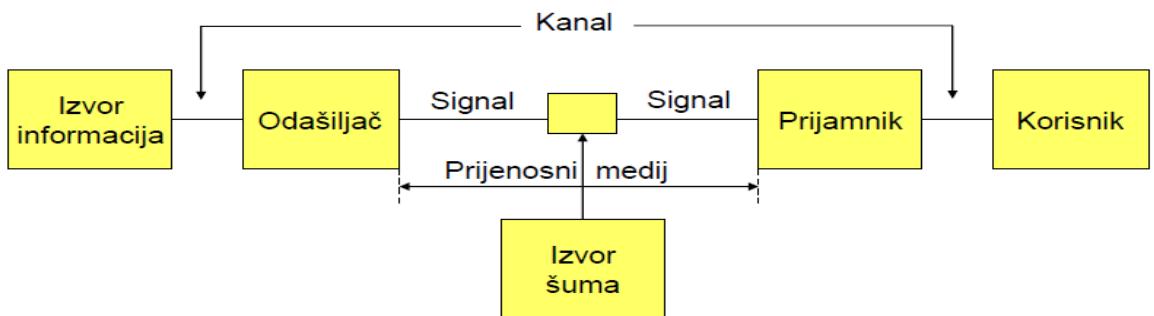


MODEL KOMUNIKACIJSKOG SUSTAVA

Komunikacijski sustav → Sustav koji omogućava prijenos informacije između prostorno udaljenih točaka.

Opći model komunikacijskog sustava



Izvor informacija → osoba, objekt ili uređaj koji generira informaciju koju treba prenijeti korisniku

Odašiljač → pretvara primljenu informaciju u signal pogodan za prijenos

Signal → električni ili elektromagnetski prikaz informacije

Prijenosni medij → sredstvo kroz koje se signal prenosi od odašiljača do prijemnika

Izvor šuma → utjecaj okoline (stohastičke prirode)

Prijemnik → pretvara primljeni električni signal u informaciju

Korisnik → osoba, uređaj ili objekt kome je informacija namijenjena

DEFINIRANJE MJERNE JEDINICE DECIBEL

Decibel (dB) → Mjerna jedinica kojom se izražava omjer snaga, napona, struja i sl.

Omjer snaga signala u decibelima

$$\frac{P_2}{P_1}[\text{dB}] = 10 \log \frac{P_2[\text{W}]}{P_1[\text{W}]}.$$
Ako se umjesto P_1 stavi referentna razina **1 W** ili **1 mW** dobiva se snaga u jedinici **dBW** ili **dBm**

$$P[\text{dBW}] = 10 \log \frac{P[\text{W}]}{1 \text{ W}}$$

$$P[\text{dBm}] = 10 \log \frac{P[\text{mW}]}{1 \text{ mW}}$$

$$P[\text{dBW}] = P[\text{dBm}] - 30$$

$$P[\text{dBm}] = P[\text{dBW}] + 30$$

Pretvorba snage izražene u dBW ili u dBm u snagu izraženu u W ili mW .

$$P[\text{W}] = 10^{\frac{P[\text{dBW}]}{10}}$$

$$P[\text{mW}] = 10^{\frac{P[\text{dBm}]}{10}}$$

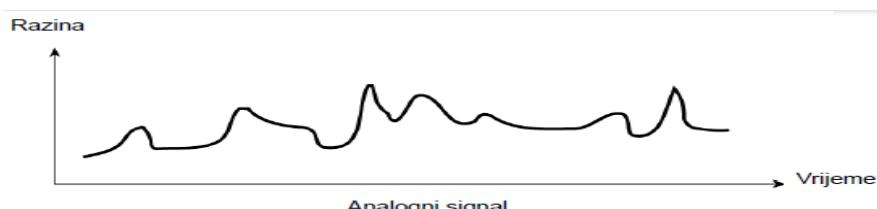
IZVORI INFORMACIJA I OBLICI SIGNALA

OBLICI IZVORA INFORMACIJE

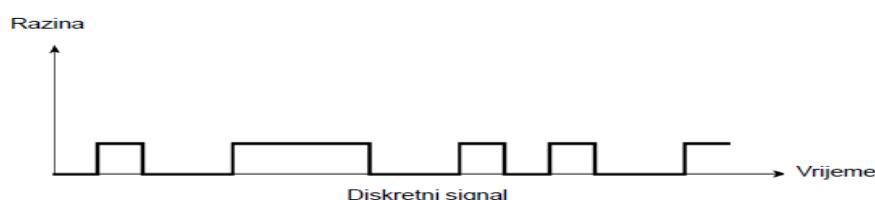
- Izvori analogne informacije** → Kontinuirano generiraju vrijednosti u nekom vremenskom intervalu.
Analogne informacije su: govor (zvuk), slika i sl.
- Izvori digitalne informacije** → Generiraju diskretne vrijednosti
Digitalne informacije su: tekst, brojevi i sl.
- Prijenos informacija** → Za prijenos analogne / digitalne informacije mogu se koristiti i analogni i digitalni signali.
Moguće je koristiti analogni signal za prijenos digitalne informacije → faks, modemi
Moguće je koristiti digitalni signal za prijenos analogne informacije → CD, DVD, MP3

OBLICI SIGNALA U VREMENSKOM PODRUČJU

- Analogni signal** → kontinuirana promjena razine signala u vremenu



- Diskretni signal** → ima samo diskretne vrijednosti razine signala u vremenu



SIGNAL GOVORA I GLAZBE (AUDIO SIGNAL)

- Ljudski slušni sustav** → osjetljiv na frekvencijsko područje od 20 Hz do 20 kHz (čujno područje).
- Govor** → zauzima frekvencijsko područje od 100 Hz do 7 kHz .
- Telefonski sustav** → signal govora ograničen na frekvencijsko područje od 300 Hz do 3,4 kHz .

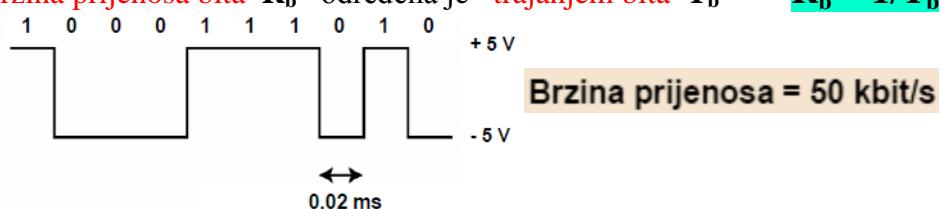
SIGNAL SLIKE (VIDEOSIGNAL)

- Videosignal** → Nastaje u kamери gdje se optičke slike pretvaraju u električni signal.
Optička slika se analizira po linijama.
Povećanjem broja linija raste kvaliteta slike (ali i širina pojasa frekvencija)
U TV standardne kvalitete koristi se 625 linija, a širina pojasa videosignalata je 5 MHz

SIGNALI PODATAKA

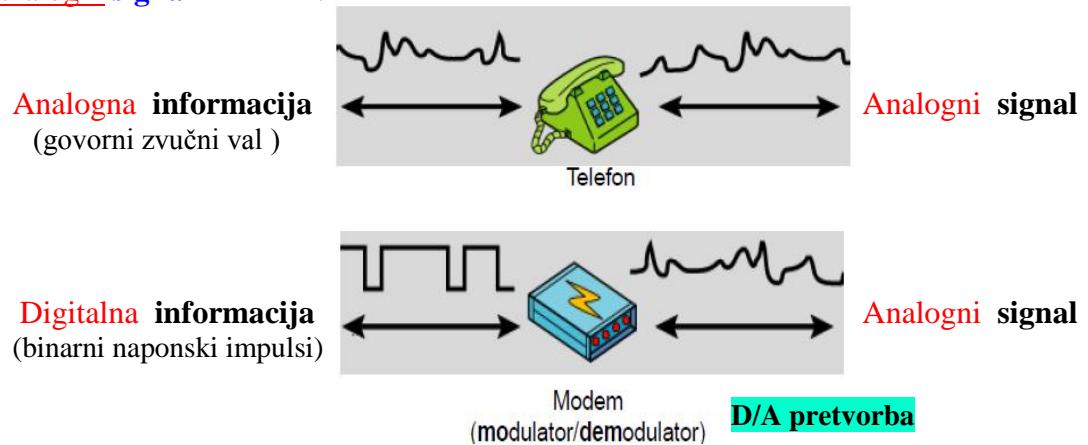
- Signali podataka** → Generiraju ih uglavnom računala.
Informacija je diskretna. Stvara se uz pomoć simbola.
Najčešće se koristi binarni kod u kojem se kombiniraju dva stanja: 1 i 0
Simboli se pretvaraju u signale čiji je valni oblik definiran s dvije naponske razine (jedna odgovara znaku '1', a druga znaku '0')

$$\text{Brzina prijenosa bita } R_b \text{ određena je trajanjem bita } T_b \quad R_b = 1/T_b$$

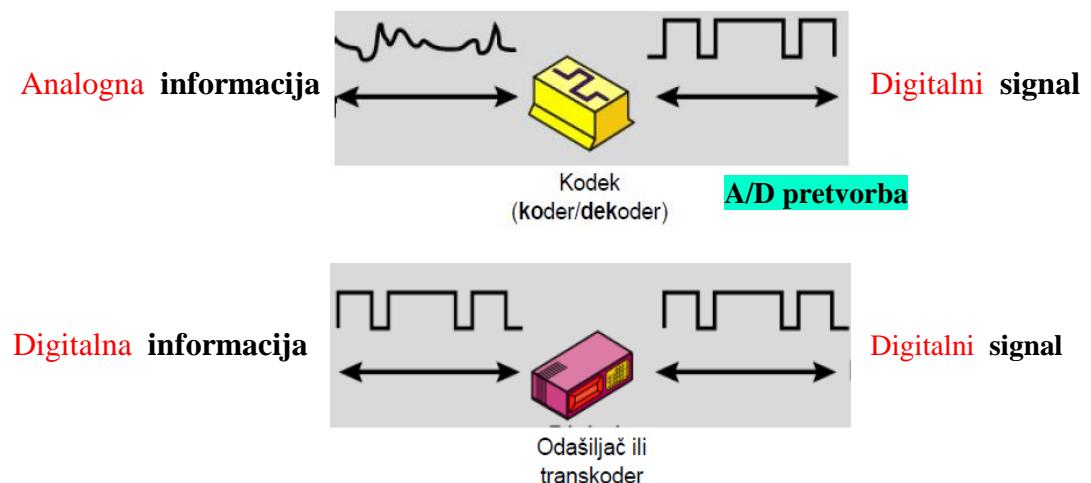


PRETVORBA INFORMACIJE U SIGNAL

Pretvorba informacije u analogni signal



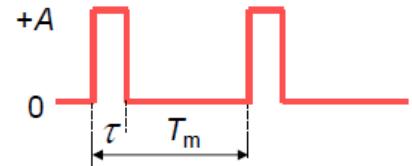
Pretvorba informacije u digitalni signal



DIGITALNI SIGNALI U OSNOVНОM POJASU FREKVENCIJA

OBILJEŽJA DIGITALNIH SIGNALA

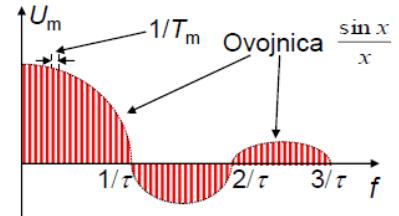
Binarna digitalna informacija → prikazana je **nizom binarnih znakova '0' i '1'**



Valni oblik digitalnog el. signala → sastoji se od **pravokutnih impulsa** (u vremenskoj domeni)

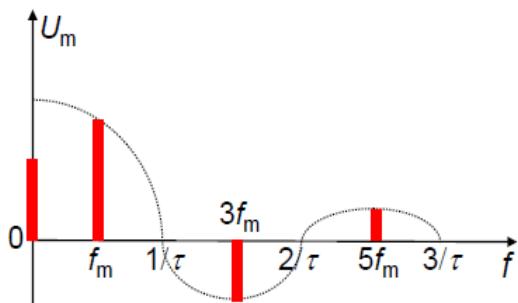
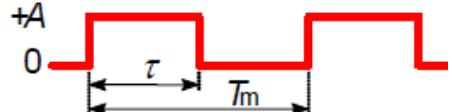
Spektar periodičnog pravokutnog signala → - dobiva se **razvojem funkcije u Fourierov red** (u frekvencijskoj domeni)

- ima oblik $\sin(x)/x$



$$u_m(t) = \frac{A\tau}{T_m} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A\tau}{T_m} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi\tau}{T_m}}{\frac{n\pi\tau}{T_m}} \cdot \cos n \frac{2\pi t}{T_m}$$

Kad je trajanje impulsa jednako polovici perioda signala ($\tau = T_m/2$)



$$u_m(t) = A \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \frac{2\pi t}{T_m} - \frac{2}{3\pi} \cos 3 \frac{2\pi t}{T_m} + \frac{2}{5\pi} \cos 5 \frac{2\pi t}{T_m} - \dots \right)$$

LINIJSKI KODOVI

Linijski kod → **prikaz binarnih znakova električnim signalom**
(format digitalnih signala)

Podjela linijskih kodova → prema načinu pridruživanja **binarnih znakova električnom signalu**

1. Binarni znak je pridružen razini el. signala

Binarni linijski kodovi → sastoje se od **2 simbola** (elementarna signala)
 $s_0(t)$ se pridružuje znaku '0', $s_1(t)$ se pridružuje znaku '1'

M-arni linijski kodovi → sastoje se od **M simbola** (M diskretnih razina)
Svakoj **razini** pridružuje se **w bitova**

$$M = 2^w$$

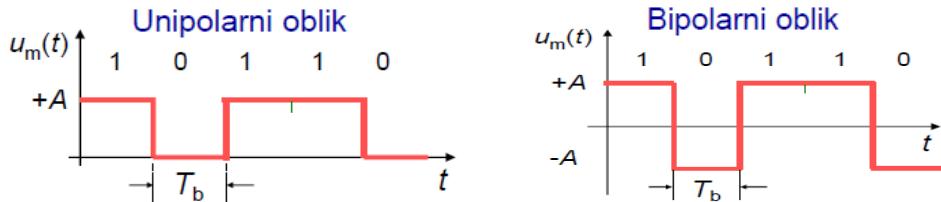
2. Binarni znak je pridružen promjeni razine el. signala

Diferencijalno kodirani linijski kodovi

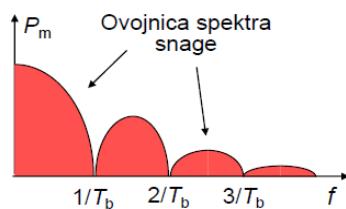
PRIMJERI BINARNIH LINIJSKIH KODOVA

NRZ kod → Znak '0' prikazan je **niskom razinom pravokutnog signala** u cijelom intervalu znaka
Kod **unipolarnog oblika** niska razina je **nula**, a kod **bipolarnog oblika** je **-A**

Znak '1' prikazan je **visokom razinom pravokutnog signala** u cijelom intervalu znaka



NRZ signal ima **istosmjernu komponentu** (smanjuje se korištenjem **bipolarnog oblika**).

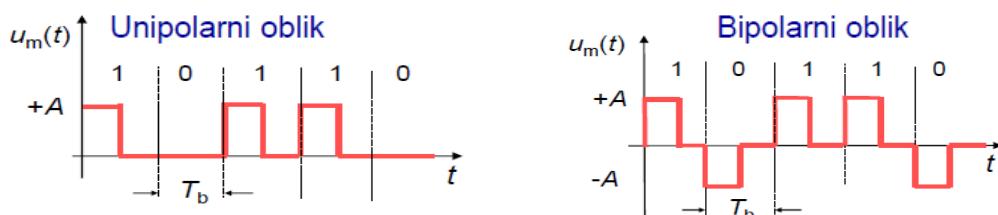


Kod dužeg niza znakova iste vrste javlja se **problem sinkronizacije**.
Ne može se odrediti početak/ kraj jednog znaka. Potrebni su posebni **taktni impulsi**.

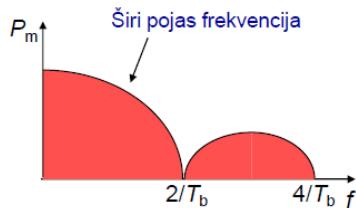
RZ kod → **Unipolarni oblik** → Znak '0' = **niska (nulta)** razina signala u **cijelom** intervalu **znaka**
Znak '1' = **visoka (A)** razina signala u **prvoj polovici** intervala **znaka**
Znak '1' = **niska (nulta)** razina signala u **drugoj polovici** intervala

Bipolarni oblik → Znak '0' = **niska (-A)** razina signala u **prvoj polovici** intervala **znaka**
Znak '0' = **niska (nulta)** razina signala u **drugoj polovici** intervala
Znak '1' = **visoka (A)** razina signala u **prvoj polovici** intervala **znaka**
Znak '1' = **niska (nulta)** razina signala u **drugoj polovici** intervala

Bipolarni **RZ signal** ima **3 diskretne razine** → **kvaziternarni signal**

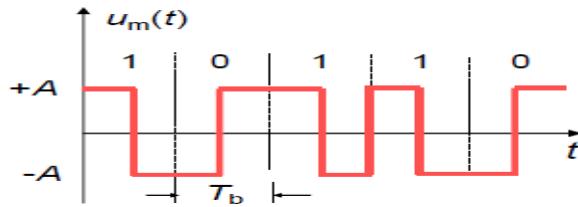


RZ signal ima **istosmjernu komponentu**. Zauzima **veću širinu pojasa** od NRZ signala.

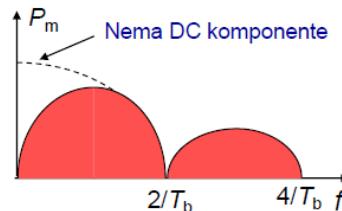


Osjetljiviji je na **šum** i zahtjeva **složenije sklopoljje**.
Olakšana **sinkronizacija** bita. Nisu potrebni posebni taktni impulsi.

Manchester kod → Znak '0' ima **nisku razinu** u prvoj polovici i **visoku** u drugoj polovici intervala
Znak '1' ima **visoku razinu** u prvoj polovici i **nisku** u drugoj polovici intervala



Manchester signal **nema istosmjernu** komponentu. To mu je najznačajnija osobina.

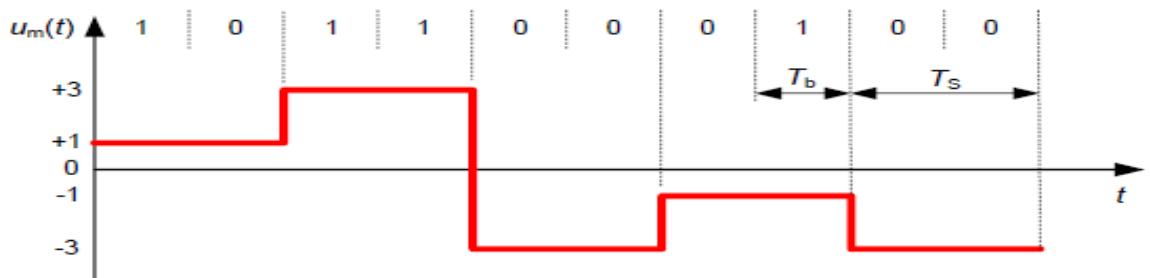


Nisu potrebni posebni taktni impulsi za sinkronizaciju. Sklopovi su nešto složeniji.

PRIMJER M-arnog LINIJSKOG KODA

Kvaternarni kod → Sastoje se od **4 simbola** → ima **4 diskretne razine** (npr. -3, -1, +1, +3)
Svakom **simbolu (razini)** pridružuju se **dva bita (dabit)** prema slijedećem **pravilu**:

$$\begin{array}{ll} '00' \rightarrow -3 & '10' \rightarrow +1 \\ '01' \rightarrow -1 & '11' \rightarrow +3 \end{array}$$



DIFERENCIJALNO KODIRANI LINIJSKI KODOVI

Diferencijalno kodirani linijski kodovi → **Informacija je u promjeni razine** signala.
Nastaju **diferencijalnim kodiranjem izvornog binarnog niza**.

Niz s diferencijalno kodiranim '1' → '1' u **izvornom** nizu → **promjena znaka** u **kodiranom** nizu
'0' u **izvornom** nizu → **ponavljanje** prethodnog **znaka** u **kodiranom**

Niz s diferencijalno kodiranim '0' → '0' u **izvornom** nizu → **promjena znaka** u **kodiranom** nizu
'1' u **izvornom** nizu → **ponavljanje** prethodnog **znaka** u **kodiranom**

Izvorni niz	1 0 1 1 0 0 0 1 0 0	Pri pojavi '1' u izvornom, znak se mijenja
Niz s diferencijalno kodiranim «1»	0 1 1 0 1 1 1 1 0 0	Pri pojavi '0' u izvornom, znak se mijenja
Niz s diferencijalno kodiranim «0»	0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0	

Početni znak is indicated by an arrow pointing to the first bit of the original sequence.

PRIJENOS DIGITALNOG SIGNALA U OSNOVNUM POJASU FREKVENCIJA

OSNOVNI POJMOVI I OBILJEŽJA PRIJENOSA

Osnovni pojas frekvencija → Pojas frekvencija izvornoga informacijskog signala.

Signal u osnovnom pojasu frekvencija → El. signal linijskog koda kojim su prikazani binarni podaci.
Izvor digitalnog signala u osnovnom pojasu frekvencija je npr računalo

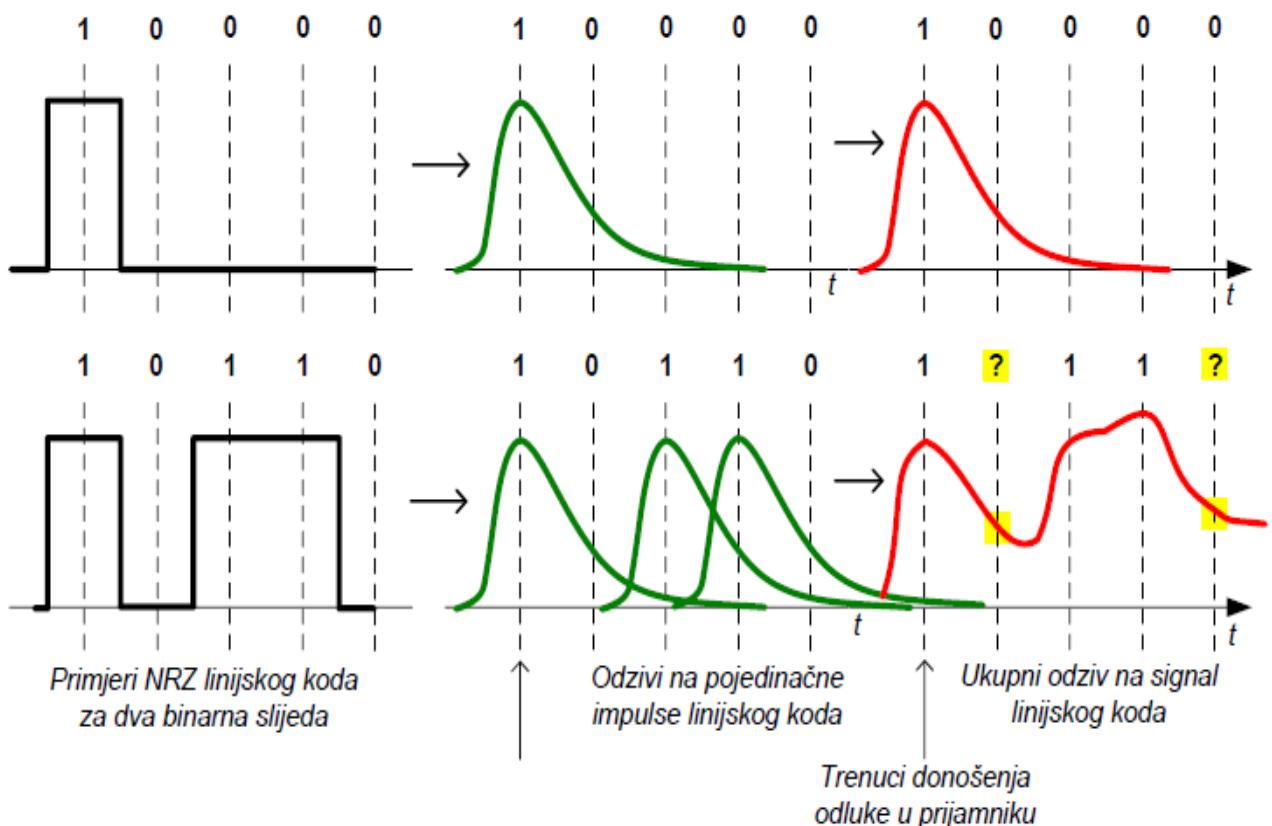
Faktori koji ograničavaju prijenos podataka → smetnje i šum u kanalu

Smetnje → Interferencija među simbolima digitalnog signala (ISI)
Nastaju zbog nesavršenosti frekvencijske karakteristike prijenosnog kanala.

Šum u kanalu → Neželjeni slučajni el. signal koji se javlja na izlazu prijenosnog kanala zajedno s korisnim informacijskim signalom

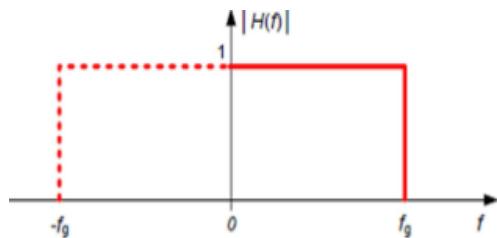
Pravokutni impuls → Temelj svih linijskih kodova. Ima oblik $\sin(x)/x$ u frekvencijskoj domeni i zauzima pojas frekvencija beskonačne širine.

Filtriranje dig. signala → Ograničavanje širine pojasa dig. signala (zbog konačne širine prijenosnog kanala).
Suženje u frekvencijskoj domeni → širenje u vremenskoj domeni.
Rezultat filtriranja su izobličenja digitalnog signala.
Dio u vremenu proširenog impulsa pojavljuje se u intervalima susjednih impulsa i nastaje smetnja (ISI). Interferencija među simbolima može uzrokovati netočno prepoznavanje bitova na prijemnoj strani.



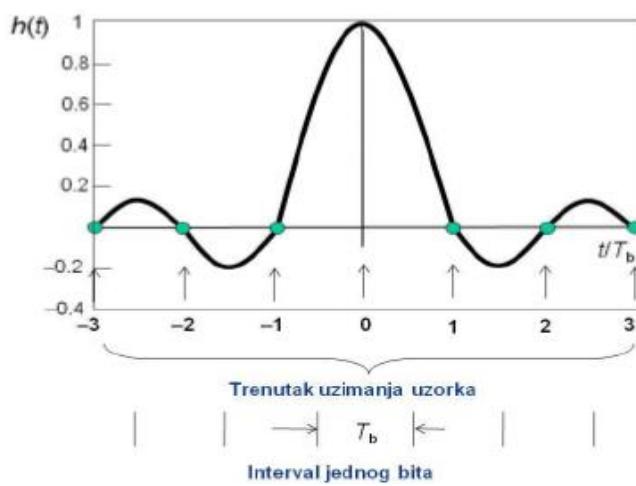
FILTRIRANJE DIGITALNOG SIGNALA

Idealni niskopropusni filter → Imma pravokutnu frekvencijsku karakteristiku i graničnu frekvenciju f_g



Diracov impuls na ulazu filtra

$$|H(j2\pi f)| = \begin{cases} 1, & \text{za } |f| \leq f_g \\ 0, & \text{za } |f| > f_g \end{cases}$$



Stvara odziv $h(t)$ oblika

$$h(t) = 2f_g \frac{\sin(2\pi f_g t)}{2\pi f_g t}$$

Nul točke impulsnog odziva su

$$k \cdot \frac{1}{2 \cdot f_g} = k \cdot T_b \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Ako se drugi impuls pojavi u trenutku nultočke impulsnog odziva onda nema smetnje među simbolima

1. Nyquistov teorem

teorem minimalne širine pojasa

→ Idealni filter, granične frekvencije f_g , omogućuje prijenos $2 \cdot f_g$ simbola u sekundi bez smetnji među njima

Nyquistova brzina prijenosa

→ Najviša ostvariva brzina prijenosa bez smetnji među simbolima u sustavu s idealnom prijenosnom karakteristikom

$$R_N = 2 \cdot f_g$$

Spektralna učinkovitost prijenosa

→ Broj prenesenih bita u sekundi po jedinici širine pojasa. Teorijski najviša ostvariva spektralna učinkovitost prijenosa u osnovnom pojasu frekvencija iznosi

$$R_b / B = 2 \text{ [bit/s / Hz]}$$

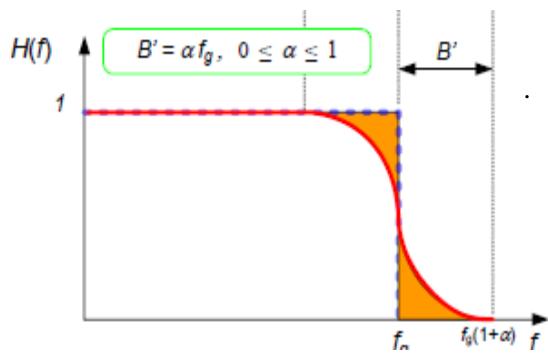
Idealni Nyquistov filter ne može se praktično izvesti.

2. Nyquistov teorem

teorem smetnje

→ Bilo koji idealni filter, širine pojasa f_g , konvoluiran s proizvoljnom simetričnom funkcijom s linearom fazom oko f_g , daje multi ISI kao i idealni filter.

Filtar s kosinusnim zaobljenjem → Niskopropusni filter s zaobljenom frekvencijskom karakteristikom po zakonu kosinus kvadrat funkcije.

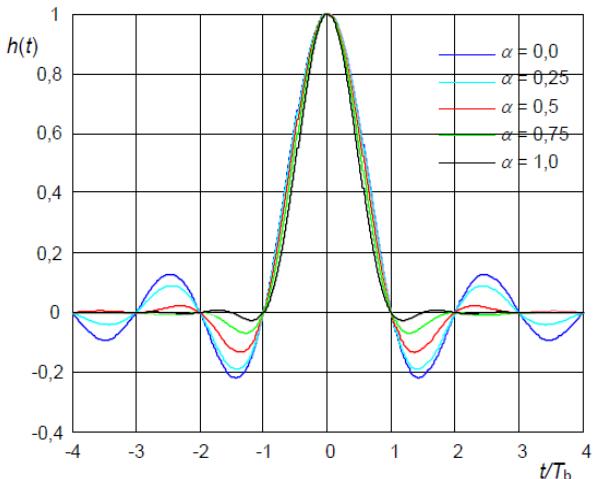


$$|H(j2\pi f)| = \begin{cases} 1, & 0 \leq f \leq f_g(1-\alpha), \\ \cos^2 \frac{\pi}{4\alpha f_g} [f - f_g(1-\alpha)], & f_g(1-\alpha) \leq f \leq f_g(1+\alpha) \\ 0, & f_g(1+\alpha) \leq f \leq \infty. \end{cases}$$

Filtrirani signal zauzima veću širinu pojasa od minimalno potrebne

Faktor zaobljenja (strmine) filtra α

Pokazuje relativno povećanje širine pojasa u odnosu na minimalnu širinu. U praksi se koriste filtri s faktorima zaobljenja do 0,4



$$\alpha = 0,4$$

$$B = 1,4 \cdot f_g$$

$$\text{Spektralna učinkovitost} = \frac{2}{1,4} = 1,43 \text{ bit/s/Hz}$$

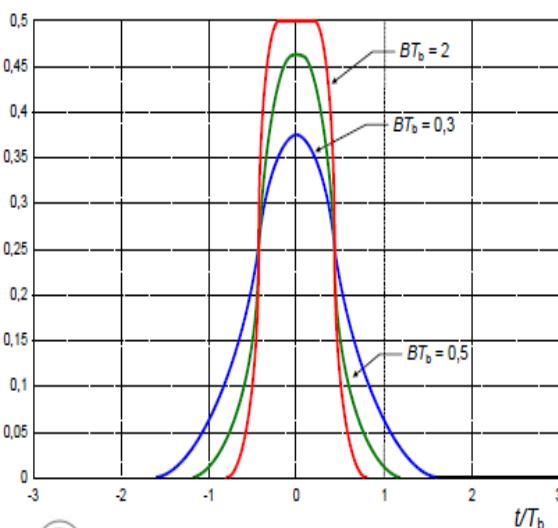
Impulsni odziv filtra

$$h(t) = \frac{\sin(2\pi f_g t)}{2\pi f_g t} \cdot \frac{\cos(2\pi \alpha f_g t)}{1 - (4\alpha f_g t)^2}$$

Gaussov niskopropusni filter

→ Definiran je normiranim širinom pojasa $B \cdot T_b$ (binarni signali $B \cdot T_b$)

Impulsni odziv filtra



B je tzv. **3-dB** širina pojasa **Gaussovog filtra**

Konvolucijom funkcije impulsnog odziva $h(t)$ i funkcije pravokutnog signala dobiva se **odziv** na realne linijske kodove.

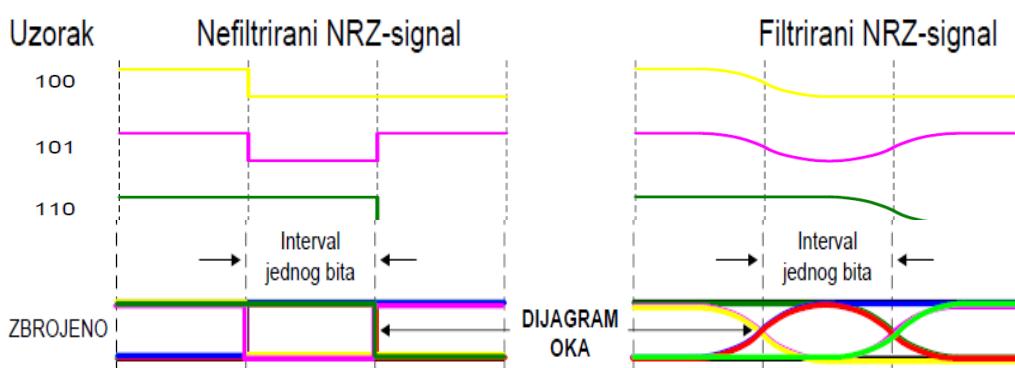
U vremenskoj karakteristici ima oblik **Gaussovog zvona**, pri čemu je zvono uže i više, što je veći umnožak $B \cdot T_b$

Kod malih širina pojasa, impuls na izlazu **filitra** proširuje se na intervale susjednih simbola → nastaje **ISI**

Dijagram oka → Nastaje preklapanjem velikog broja simbola jedan preko drugog.

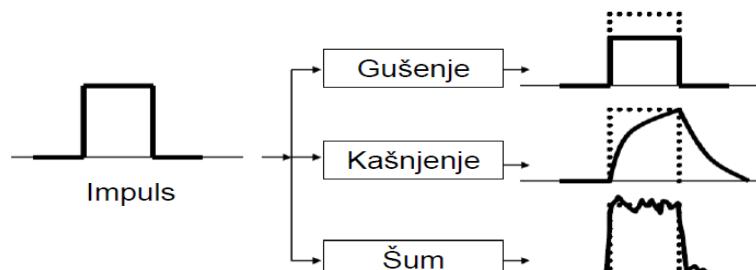
Služi za procjenu kvalitete digitalnoga signala. Može se procijeniti:

- veličina smetnji među znakovima (ISI smanjuje otvor oka);
- vremenska točnost regeneriranoga taktnog signala
- nelinearnost u prijenosu (uzrokuje asimetričnost dijagrama oka)



SMETNJE U KOMUNIKACIJSKOM KANALU, KAPACITET KANALA

Smetnje u komunikacijskom kanalu → gušenje signala (atenuacija), kašnjenje, šum



Posljedica smetnji u analognim sustavima → smanjenje kvalitete prijemnog signala

Posljedica smetnji u digitalnim sustavima → pogreške bita

Gušenje signala → Smanjenje razine el. signala pri prijenosu komunikacijskim kanalom

Ovisi o: vrsti prijenosnog medija, frekvenciji signala (raste s porastom frekvencije)

Razina prijemnog signala mora biti dovoljno visoka da omogući detekciju signala

Ne smije biti previsoka da ne dođe do prepobude sklopova u odašiljaču ili prijemniku

Gušenje signala je omjer snaga signala na ulazu i na izlazu iz kanala u decibelima

$$L = 10 \log (P_{ul}/P_{izl})$$

$$L = 20 \log (U_{ul}/U_{izl})$$

Gušenje signala se kompenzira upotreborom pojačala

Pojačanje signala je omjer snaga signala na izlazu i na ulazu u pojačalo u decibelima

$$A = 10 \log (P_{izl}/P_{ul})$$

Kod prijenosa kroz široko frekvencijsko područje, vrši se ujednačavanje signala ekvilizacija - signali visokih frekvencija pojačavaju se više od signala niskih frekvencija

Kašnjenje signala → Ovisi o: brzini propagacije signala kroz medij i duljini prijenosne linije.

Brzina propagacije mijenja se promjenom frekvencije

Razne frekvencijske komponente imaju različito kašnjenje

Nelinearna promjena faznih pomaka → fazno izobličenje signala

Linearna promjena faznih pomaka → nema faznog izobličenja signala

Šum → Neželjeni signal koji se pojavljuje u isto vrijeme i na istom mjestu kao i željeni signal

Termički šum (bijeli) → Uzrok šuma je gibanje elektrona unutar atoma. Uvijek je prisutan. Ne može se ukloniti.
Razina šuma računa se po formuli:

$$N = k \cdot T \cdot B \quad [W]$$

k – Boltzmannova konstanta;
 T – temperatura u kelvinima;
 B – širina pojasa u Hz.

Intermodulacijski šum → Nastaje kada signali različitih frekvencija dijele isti prijenosni medij.

Nastaju nove neželjene frekvencijske komponente.

Preslušavanje → Signali koji idu istim prostorom međusobno si smetaju (npr više signala u koaksijalnom kabelu)

Impulsni šum → Nekontinuirani šum koji se javlja u obliku impulsa kratkog trajanja i velike amplitude. Nije problem u analognim sustavima. U digitalnim uzrokuje gubitak informacija.

Odnos signal/šum → Signal mora biti veći od šuma da bi se mogao reproducirati

Za procjenu kvalitete signala (analogni prijenos) definira se omjer snaga signala i šuma

$$\frac{S}{N} \quad [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{S[W]}{N[W]} \right)$$

U digitalnom prijenosu koristi se omjer energije signala po bitu E_b i gustoće snage šuma N_0

Vjerojatnost pogreške → Određuje kvalitetu digitalne informacije na prijemnoj strani.

u prepoznavanju bita → Pogreška bita nastaje kad postoji razlika poslanog i primljenog bita

BER (Bit Error Rate) → BER je omjer pogrešnih bitova n i svih poslanih bitova N

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

Kapacitet kanala → **Maksimalna brzina** kojom se mogu prenositi **podaci** bez pogrešaka [bit/s]
 Ovisi o **frekvencijskoj širini pojasa B [Hz]**
 Na kapacitet kanala utječe: **broj naponskih razina signala M** ,
srednja razina šuma N ,
potrebna vjerojatnost pogreške bita **BER**.

Cilj digitalnih komunikacijskih sustava

Na **određenoj frekvencijskoj širini pojasa** postići **što veću brzinu prijenosa**
 uz **ograničenu vjerojatnost pogreške bita**

Nyquistova formula → Prepostavlja **kanal bez šuma**
 Za prijenos **binarnog signala** (dvije naponske razine) u **frekvencijskom pojasu širine B** , kapacitet kanala **C** je

$$C = 2B \text{ [bit/s]}$$

Ako signal može poprimiti **M naponskih razina kapacitet kanala je**

$$C = 2B \log_2 M \text{ [bit/s]}$$

Kapacitet kanala raste s porastom broja naponskih razina **M**

Shannonova formula → Prepostavlja **kanal s bijelim šumom**

Kapacitet kanala C je

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

Omjer snaga S/N je u absolutnom iznosu (nije u dB)

Smanjenjem **širine kanala B**, povećava se omjer **signal/ šum** i kapacitet je nepromijenjen

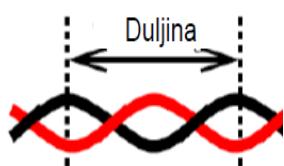
PRIJENOS ANALOGNOG I DIGITALNOG SIGNALA

Analogni sustavi → Prenose **analognu ili digitalnu** informaciju.
Kvaliteta prijenosa ne ovisi o sadržaju signala.
 Osjetljivi su na **šum i nelinearna izobličenja**.
 Povećanjem prijenosne **udaljenosti raste gušenje** signala

Digitalni sustavi → Visoka **kvaliteta prijemnog signala**.
Kvaliteta prijenosa ovisi o sadržaju signala.
 Osjetljivi su na **gušenje** signala, a manje su osjetljivi na **šum**.
 Moguće je **otkrivanje i ispravljanje pogrešaka** u prijenosu.
 Moguće su **veće prijenosne udaljenosti** u kanalima **niske kvalitete**.
Povećana sigurnost i privatnost (**šifriranje** signala).
 Bolje iskorištenje **prijenosnih kapaciteta i frekvencijskog spektra**.
 Jeftiniji sklopovi i uređaji.

ZNAČAJKE PRIJENOSNIH MEDIJA

Upletena parica



→ Dva izolirana vodiča spiralno upletena jedan oko drugog .

Više tako uplenih parova čini **kabel**

Većinom se koriste **neoklopljeni kabeli (UTP)**

Kvaliteta kabela određena je gušenjem i preslušavanjem

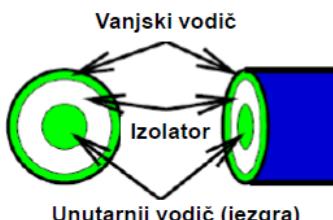
Koriste se za povezivanje **pretplatnika na telefonsku centralu** i u **lokalnim mrežama (LAN)**.

Dobre strane: **jeftin medij , jednostavno polaganje.**

Loše strane: **ograničena brzina prijenosa i udaljenosti,**

neotpornost na šum i elektromagnetske smetnje

Koaksijalni kabel



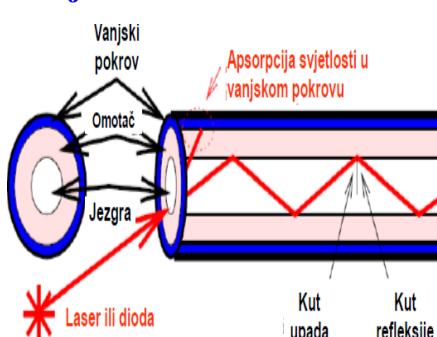
→ Dva vodiča smještena u istoj osi i odvojena izolatorom

Više kabela može biti združeno.

Koriste se za: **sustave kabelske televizije, povezivanje radijskih odašiljača, za povezivanje prijemnika s antenom**

Kompliciraniji i skuplji od upletene parice

Svjetlovod



→ Vrlo tanak (2-125 mm) i fleksibilan medij.

Ponaša se kao **valovod** u frekvencijskom području $10^{14} - 10^{15}$ Hz

Jedan **optički kabel** sadrži više **svjetlovoda**

Dvije vrste **svjetlovoda**: **jednomodni i višemodni**

Dvije vrste **izvora svjetlosti**: LED (jeftiniji i lošiji), **LASER** (bolji i skuplji)

Dobre strane: **visoke brzine prijenosa, malo gušenje signala, otpornost na elektromagnetske smetnje**

Loše strane: **skupoća uređaja za elektrooptičku pretvorbu, složenija instalacija i održavanje** sustava

Radijski prijenos

→ Prijenos informacije se ostvaruje putem elektromagnetskog vala

Radijski valovi su EM valovi **frekvencija od 9 kHz do 3000 GHz**

Elementi sustava su: **odašiljač, odašiljačka i prijemna antena, prijenosni medij, prijemnik**

Prijenos može biti: **usmjeren** (od točke do točke) ili **neusmjeren** (primaju svi)

Domet EMV-a (1 antena) [km]

$$d = 3,57 \sqrt{Kh} \quad h - \text{visina na kojoj se nalazi antena}$$

K = 1 za optičku vidljivost K = 4/3 za radijski horizont

Domet EMV-a (2 antene) [km]

$$d = 3,57 \left(\sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2} \right) \quad h_1, h_2 - \text{visine na kojima se nalaze antene}$$

Smetnje u radijskom prijenosu

Porastom **frekvencije** raste **širina pojasa i brzina prijenosa**, a smanjuje se **prijenosna udaljenost** zbog **gušenja signala**.

Gušenje EMV-a , valne duljine **1** na udaljenosti **d**

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

Pri svakom udvostručenju **udaljenosti ili frekvencije** raste **gušenje za 6 dB**

Osim antenama, EMV se šalju i **satelitom**:

GEO (geostacionarni, najviši), **MEO** (2000-5000 km), **LEO** (< 2000 km)

WLAN - Radijske **lokalne mreže**. Koriste **nelicencirane** frek. pojaseve radijskog spektra namijenjene **industriji, znanosti i medicini (ISM)**.

Najčešće se koristi ISM pojas oko **2,4 GHz**

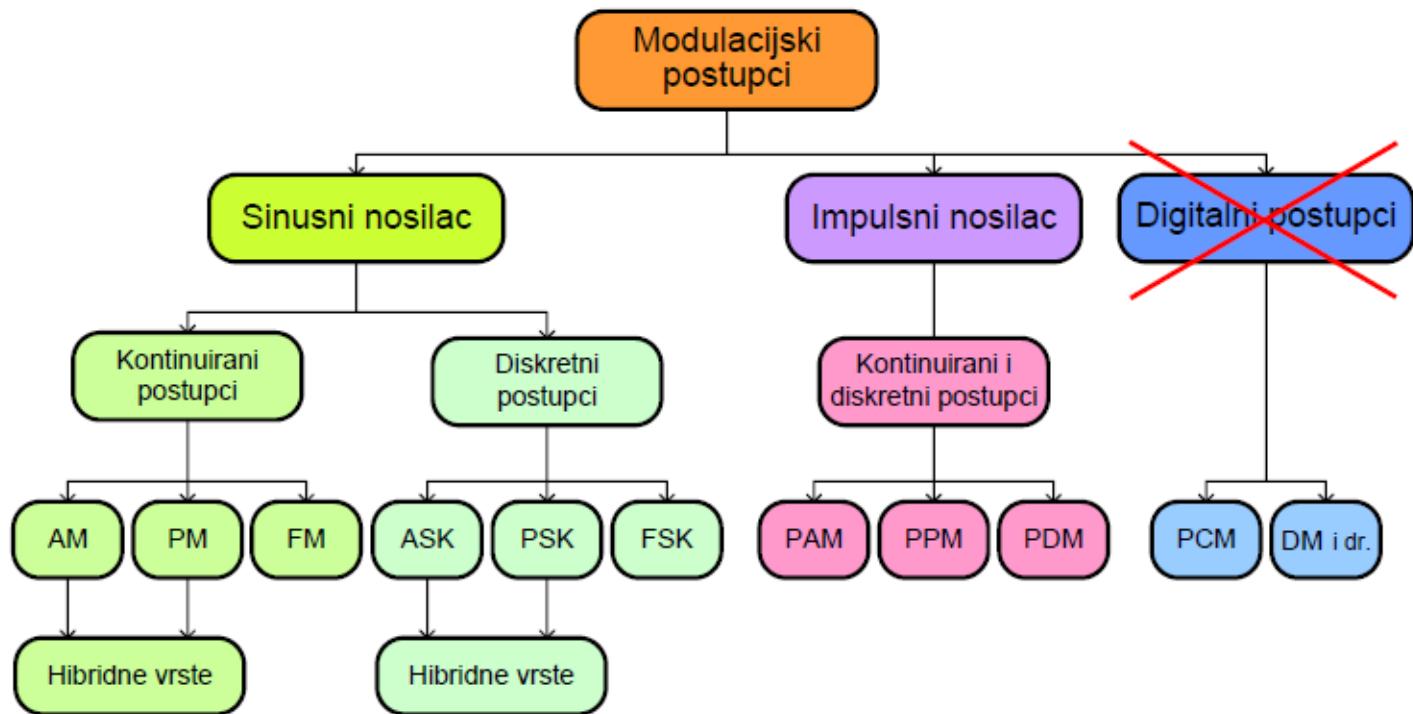
MODULACIJSKI POSTUPCI

OSNOVNI POJMOVI O MODULACIJI

- Modulacija** → transformacija električnog signala koji nosi informaciju radi njegove prilagodbe za prijenos.
- Modulacija u užem smislu** → mijenjanje jednog ili više parametra pomoćnog signala ovisno o signalu koji nosi informaciju
- Prijenosni signal** → pomoći signal kojem se mijenjaju parametri
- Modulacijski signal** → signal koji nosi informaciju i upravlja promjenama parametara prijenosnog signala
- Modulirani signal** → signal koji je rezultat modulacije prijenosnog signala upravljane modulacijskim signalom
- Modulator** → električni sklop koji vrši modulaciju
- Parazitna modulacija** → neželjene promjene parametara moduliranog signala koje nastaju uz korisnu modulaciju
- Demodulacija** → postupak povratne transformacije moduliranog signala u izvorni oblik
- Demodulator** → električni sklop koji vrši demodulaciju

PODJELA MODULACIJSKIH POSTUPAKA

- Prema vrsti prijenosnog signala** → modulacija sinusnog signala (sinusni nosilac)
→ modulacija impulsnog signala (impulsni nosilac)
→ modulacija ostalih vrsta signala
- Prema vrsti modulacijskog signala** → kontinuirani postupci (signali zvuka, slike)
→ diskretni postupci (signali podataka)
→ digitalni postupci (analogni modulacijski sig., digitalni modulirani sig.)



PODJELA DEMODULACIJSKIH POSTUPAKA

- Koherentna demodulacija** → odašiljač i prijemnik su sinkronizirani po fazi prijenosnog signala
- Nekoherentna demodulacija** → odašiljač i prijemnik nisu sinkronizirani po fazi prijenosnog signala

KONTINUIRANA MODULACIJA SINUSNOG SIGNALA

OSNOVNE VRSTE MODULACIJSKIH POSTUPAKA

Modulacijski signal $u_m(t) \rightarrow$ kontinuirani signal (analogni signal)

Prijenosni signal $u_p(t) \rightarrow$ sinusni signal određen sa 2 parametra **amplitudom** $U_{pm}(t)$ i **argumentom** $\Phi(t)$
Argument (trenutna faza) $\Phi(t)$ je **sinusni** ili **eksponencijalni**

$$u_p(t) = U_{pm} \cos \Phi(t)$$

$$u_p(t) = U_{pm} \Re e^{j\Phi(t)}$$

Argument je **linearna funkcija** vremena

$$\Phi(t) = \omega_p t + \varphi$$

Argument možemo **modulirati** na 2 načina:

- mijenjanjem **frekvencije** prijenosnog signala ω_p
- mijenjanjem **relativne faze** prijenosnog signala φ

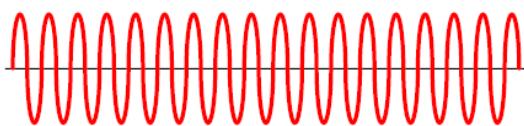
Modulacija sinusnog prijenosnog signala \rightarrow mijenja se **amplituda** ili **argument** ili **oba parametra zajedno**

Modulacija amplitude (AM) \rightarrow Mijenja se **amplituda** **prijenosnog signala**
Rezultat modulacije je **amplitudno modulirani signal**

Modulacija faze (PM) \rightarrow Mijenja se **relativna faza** **prijenosnog signala**
Rezultat modulacije je **fazno modulirani signal**

Modulacija frekvencije (FM) \rightarrow Mijenja se **trenutna frekvencija** **prijenosnog signala**
Rezultat modulacije je **frekvencijski modulirani signal**

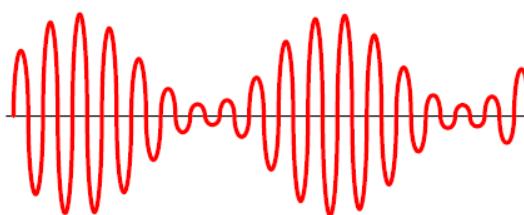
Prijenosni
signal



Modulacijski
signal



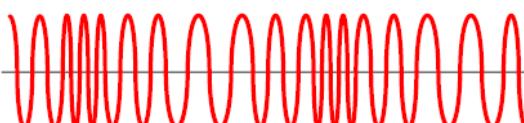
Amplitudnomodulirani
(AM) signal



Faznomodulirani
(PM) signal



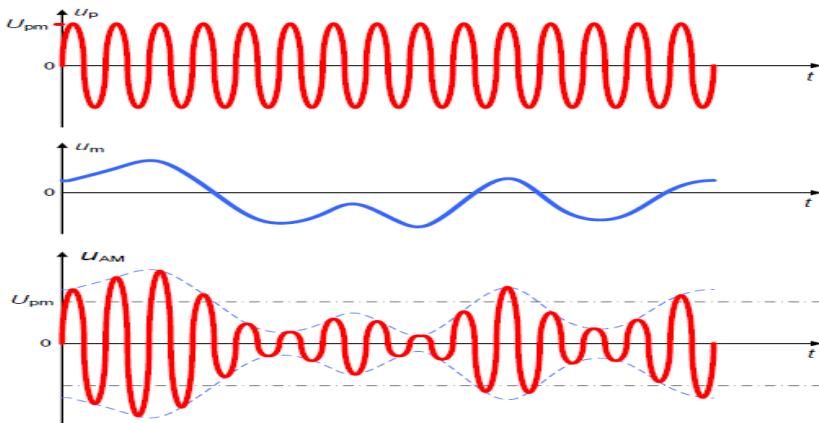
Frekvencijskimodulirani
(FM) signal



MODULACIJA AMPLITUDE (AM)

OBILJEŽJA AM-SIGNALA

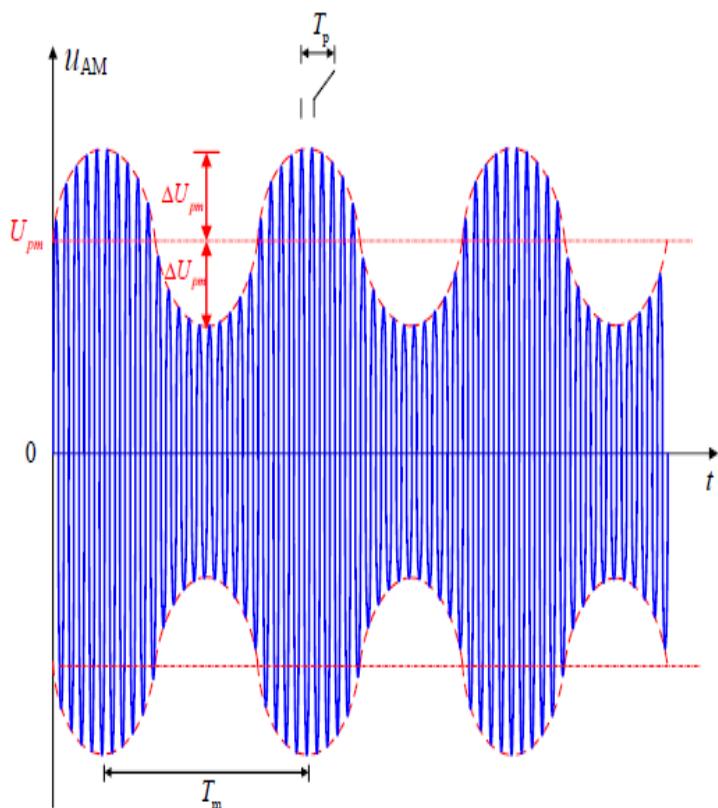
Modulacija amplitude → Amplituda sinusnog prijenosnog signala je funkcija razine modulacijskog signala



Modulacijski signal → sinusnog oblika (sastoji se od jedne frekvencijske komponente → modulacija jednim tonom)

$$u_m(t) = U_{mm} \cos \omega_m t$$

Amplitudno modulirani signal



$$u_{AM}(t) = [U_{pm} + k_a U_{mm} \cos \omega_m t] \cos \omega_p t$$

$$u_{AM}(t) = U_{pm} \left[1 + \frac{k_a U_{mm}}{U_{pm}} \cos \omega_m t \right] \cos \omega_p t$$

k_a – osjetljivost modulatora amplitute

Gornja modulacijska točka

trenutak najveće amplitute $(U_{pm} + k_a \cdot U_{mm})$.

Donja modulacijska točka

trenutak najmanje amplitute $(U_{pm} - k_a \cdot U_{mm})$

Najveća promjena amplitute AM signala

u odnosu na amplitudu prijenosnog signala U_{pm}

$$\Delta U_{pm} = k_a U_{mm}$$

$$u_{AM}(t) = U_{pm} \left[1 + \frac{\Delta U_{pm}}{U_{pm}} \cos \omega_m t \right] \cos \omega_p t$$

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

Indeks modulacije amplitude → odnos amplituda modulacijskog i prijenosnog signala

$$m_a = \frac{\Delta U_{pm}}{U_{pm}} = k_a \frac{U_{mm}}{U_{pm}} \quad \text{ako se uzme } k_a = 1$$

$$m_a = \frac{U_{mm}}{U_{pm}}$$

$m_a \leq 1$ → ovojnica moduliranog signala prati valni oblik modulacijskog signala
 $m_a > 1$ → premodulacija (ovojnica je izobličena)

Određivanje indeksa modulacije amplitude pomoću najveće i najmanje amplitude

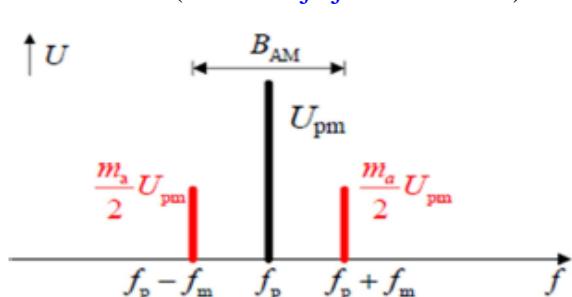
$$\begin{aligned} A_{\max} &= U_{\text{pm}}(1+m_a) \\ A_{\min} &= U_{\text{pm}}(1-m_a) \end{aligned} \rightarrow m_a = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}$$

Dubina modulacije → indeks modulacije izražen u postocima

SPEKTAR AM-SIGNALA

Spektar AM signala → Prikaz AM signala pomoću komponenti u frekvencijskom području

AM signal moduliran kosinusom jedne frekvencije → u frekvencijskoj domeni ima 3 komponente (modulacija jednim tonom)



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

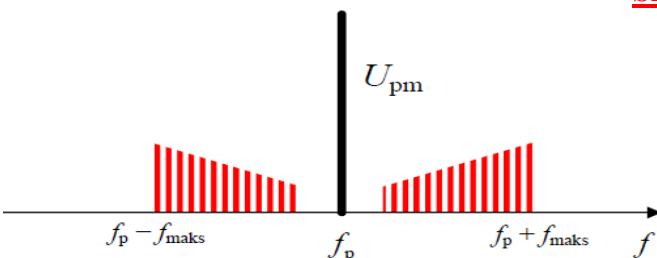
Širina pojasa frekvencija sinusno moduliranog AM signala

$$B_{\text{AM}} = 2 f_m$$

AM signal moduliran kosinusima više frekvencija → u frekvencijskoj domeni ima više od 3 komponente

(5, 7, 9)

Širina pojasa frekvencija sinusno moduliranog AM signala



$$B_{\text{AM}} = 2 f_{\max}$$

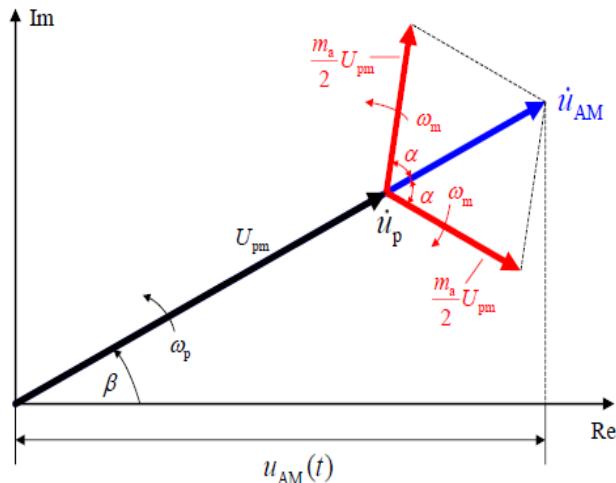
f_{\max} najviša od modulacijskih frekvencija

AM je linearni modulacijski postupak → Čuva broj frekvencijskih komponenti

Prije i poslije modulacije širina pojasa je ostala ista

KOMPLEKSNI PRIKAZ AM-SIGNALA

Kompleksni prikaz AM signala →



Svaka frekvencijska komponenta prikazana je kao realni dio nekog kompleksnog broja (jedan vezor u kompleksnoj ravnini). Zbroj vezora triju komponenti daje vezor AM signala

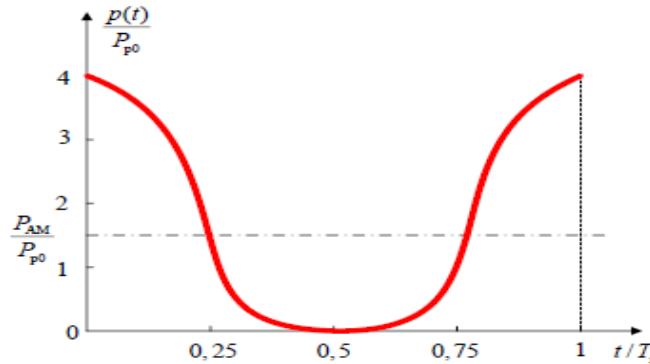
$$u_{\text{AM}}(t) = U_{\text{pm}} \Re \left\{ e^{j\omega_p t} + \frac{m_a}{2} e^{j(\omega_p + \omega_m)t} + \frac{m_a}{2} e^{j(\omega_p - \omega_m)t} \right\}$$

SNAGA AM-SIGNALA

Srednja snaga AM signala



To je snaga modulacijskog signala u intervalu jedne periode



$$P_{AM} = P_{p0} \left(1 + \frac{m_a^2}{2} \right)$$

P_{p0} – snaga prijenosnog signala (kad nema modulacije)

Parsevalov zakon



Srednja snaga složenog signala jednaka je zbroju srednjih snaga njegovih spektralnih komponenata

$$P_{AM} = \frac{1}{2R} \left[U_{pm}^2 + \left(U_{pm} \frac{m_a}{2} \right)^2 + \left(U_{pm} \frac{m_a}{2} \right)^2 \right]$$

Uz 100 % modulaciju ($m_a = 1$), snaga bočnih komponenata iznosi **1/3** ukupne snage AM signala koja iznosi

$$P_{AM} = 1.5 P_{p0}$$

DEMODULACIJA AM-SIGNALA

Demodulacija AM signala

→ nekoherentni postupak (najčešće) i koherentni postupak (rijetko)

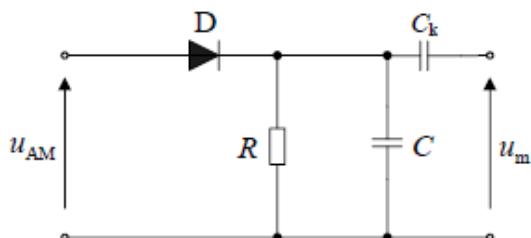
→ Može se primijeniti ako su ispunjena **2 uvjeta**:

1. frekvencija prijenosnog signala >> najviše modulacijske frekvencije
2. indeks modulacije < 1 (dubina modulacije < 100 %)

Kondenzator C nabija se na vršnu vrijednost (amplitudu) AM signala
Izbija se preko otpora R do sljedećeg trenutka nabijanja.

Demodulirani signal slijedi valni oblik ovojnica

Sadrži istosmjernu komponentu koja odgovara amplitudi prijenosnog signala (uklanja se pomoću serijskog kondenzatora)



Koherentni postupak

→ Kada frekvencija prijenosnog signala nije puno veća od najviše modulacijske frekvencije (manje od 2 reda veličine) koristi se koherentni (sinkroni) postupak demodulacije → AM signal množimo s jednim pomoćnim signalom koji mora biti **što sličniji prijenosnom signalu**

PRIMJENA MODULACIJE AMPLITUDE

Primjena modulacije amplitude → Analogna radiodifuzija zvuka u području dugog, srednjeg i kratkog vala

→ Radijski uredaji u tzv. gradanskom području frekvencija CB

MODULACIJA ARGUMENTA → Modulacija faze (PM), Modulacija frekvencije (FM)

Modulacija argumenta

- modulacija kuta (sinusni prijenosni signal)
- modulacija eksponenta (eksponencijalni prijenosni signal)

Modulacija faze

- mijenja se relativna faza ϕ prijenosnog signala

$$\varphi(t)_{\text{PM}} = \varphi_0 + k_p u_m(t) \quad \varphi_0 = 0 \quad k_p - \text{osjetljivost modulatora faze}$$

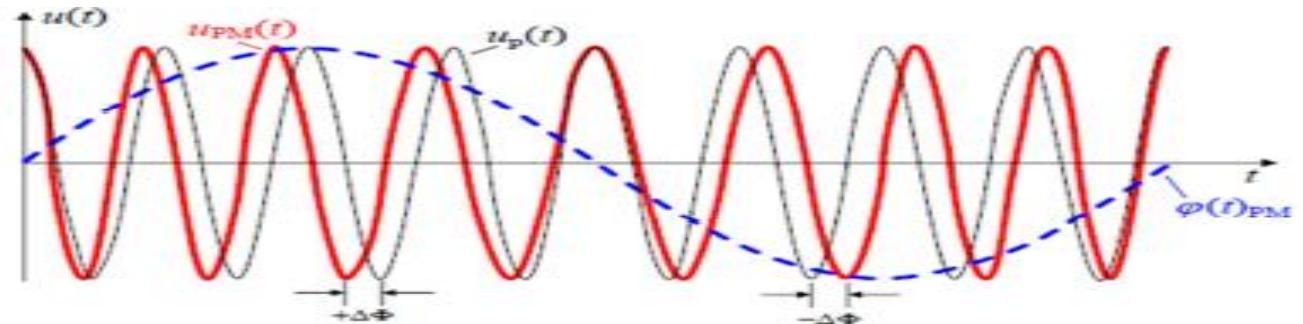
Trenutna faza PM signala

$$\Phi(t)_{\text{PM}} = \omega_p t + k_p u_m(t)$$

Fazno modulirani signal

$$u_{\text{PM}}(t) = U_{\text{pm}} \cos [\omega_p t + k_p u_m(t)]$$

Valni oblik sinusno moduliranog PM signala



Indeks modulacije faze

$$m_p = \Delta\Phi_{\text{PM}} = k_p U_{\text{mm}}$$

PM signal

$$u_{\text{PM}}(t) = U_{\text{pm}} \cos [\omega_p t + m_p \sin \omega_m t]$$

Definicija frekvencije

- derivacija faze

$$\omega(t)_{\text{PM}} = \frac{d\Phi(t)_{\text{PM}}}{dt} = \omega_p + m_p \omega_m \cos \omega_m t$$

Promjena trenutne frekvencije → pri sinusnoj promjeni faze nastaje kosinusna promjena frekvencije

Modulacija frekvencije

- mijenja se trenutna frekvencija prijenosnog signala

$$\omega(t)_{\text{FM}} = \omega_p + k_f u_m(t) \quad k_f - \text{osjetljivost modulatora frekvencije}$$

Frekvencijski modulirani signal

$$u_{\text{FM}}(t) = U_{\text{pm}} \cos \left[\omega_p t + \frac{\Delta\omega_{\text{FM}}}{\omega_m} \sin \omega_m t \right]$$

Indeks modulacije frekvencije

- devijacija faze FM signala

$$m_f = \Delta\Phi_{\text{FM}} = \frac{\Delta\omega_{\text{FM}}}{\omega_m} = \frac{k_f U_{\text{mm}}}{\omega_m}$$

FM signal

$$u_{\text{FM}}(t) = U_{\text{pm}} \cos [\omega_p t + m_f \sin \omega_m t]$$

SPEKTAR PM i FM SIGNALA

Spektar PM i FM signala → Kosinusnom modulacijom frekvencije i sinusnom modulacijom faze nastaju jednaki oblici moduliranog signala.
PM i FM signali imaju **jednaki frekvencijski spektar**
Izraz koji u sebi uključuje i **modulaciju frekvencije i modulaciju faze**

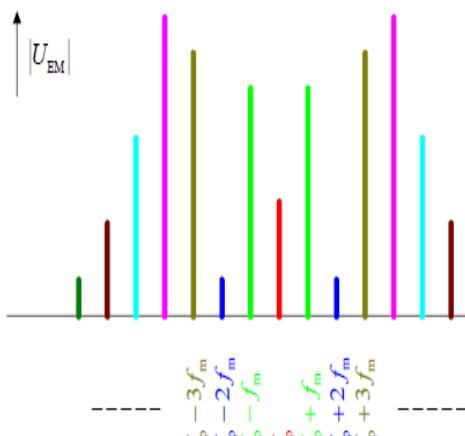
$$u_{\text{EM}}(t) = U_{\text{pm}} \cos[\omega_p t + m \sin \omega_m t]$$

Kad su indeksi modulacije mali $m < 0,4$

- uskopojasna modulacija argumenta
- modulirani signal

$$u_{\text{EM}}(t) = U_{\text{pm}} \left[\cos \omega_p t - \frac{m}{2} \cos (\omega_p - \omega_m)t + \frac{m}{2} \cos (\omega_p + \omega_m)t \right]$$

- Spektar se može aproksimirati s 3 komponente
- Faza se mijenja po sinusnom zakonu → donja bočna komponenta negativna
- Širina pojasa $B_{\text{EM}} \approx 2f_m$



Kad su indeksi modulacije veliki $m > 0,4$

- širokopojasna modulacija argumenta
- Spektar se računa Besselovim funkcijama i Jacobijevim redovima
Sastoje se od komponente nosioca i beskonačnog broja bočnih komponenata
- Carsonovo pravilo → empirijska formula → daje približnu širinu pojasa

$$B_{\text{EM}} = 2f_m(m+1)$$

Pojas obuhvaća sve komponente čije su amplitude veće od 10 % amplitude moduliranog signala odnosno sve komponente snaga većih od 1 % ukupne snage moduliranog signala

- Kad se **modulacijski signal** sastoji od **kosinusa s više frekvencija** onda se u formulama f_m zamjeni sa f_{maks}

SNAGA PM i FM SIGNALA

Snaga PM i FM signala → Snaga fazno ili frekvencijski moduliranog signala jednaka je snazi prijenosnog signala **kad nema modulacije**.

$$P_{\text{EM}} = \frac{U_{\text{pm}}^2}{2R} = P_p$$

DEMODULACIJA FM SIGNALA

Demodulacija FM signala → FM signal se demodulira na posredan način.
U prvom koraku se pretvori u AM signal. U drugom koraku se taj AM signal demodulira nekoherenntnim postupkom detekcije ovojnica.

PRIMJENA FM I PM MODULACIJE

Primjena modulacije faze → Modulacija faze se ne koristi za prijenos informacija.
PM se koristi za **neizravno** dobivanje FM signala.

Primjena modulacije frekvencije → Analogna radiodifuzija zvuka u VHF području
→ Privatne radijske mreže (analogne)

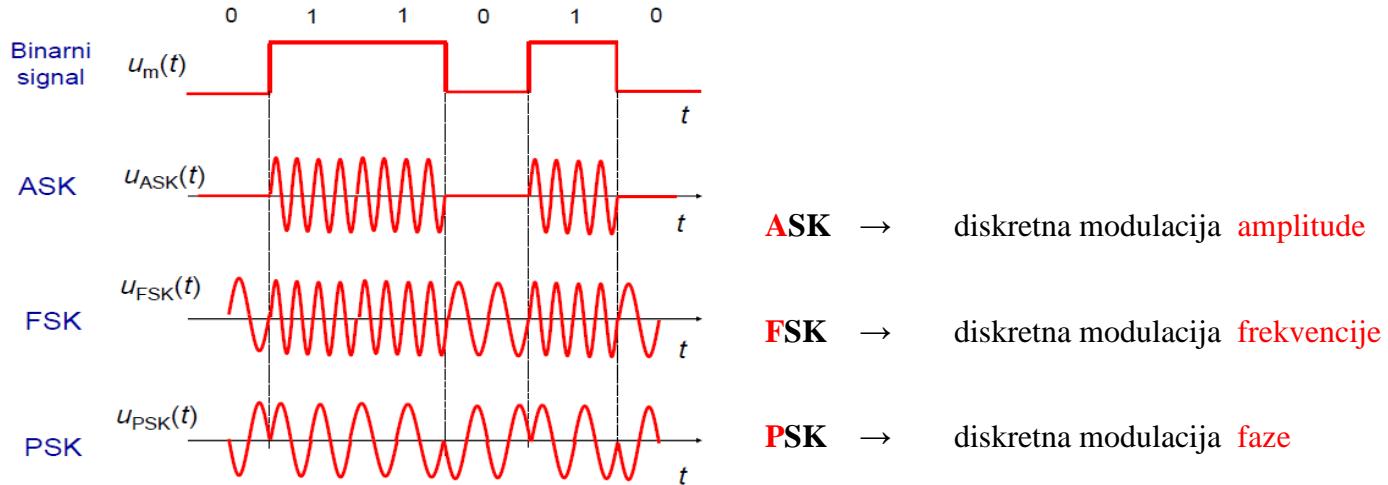
DISKRETNAYA MODULACIJA SINUSNOG SIGNALA

DISKRETNAYI SIGNAL I DISKRETNAYE MODULACIYE

Digitalna informacija → Opisana je **konačnim brojem binarnih znakova** (npr 1000110011).
Modulacijski signal (koji nosi informaciju) ima konačni broj **diskretnih razina** (**diskretni** električni signal)

Diskretnaya modulaciya → Modulacijom se **diskretno** mijenja **parametar** sinusnoga **prijenosnog signala**.

Temeljni diskreti modulacijski postupci → Mijenja se **jedan parametar** sinusnoga **prijenosnog signala**.



Hibridni diskreti modulacijski postupak → Mijenjaju se **dva parametra** (amplituda i faza) sinusnoga **prijenosnog signala**

QAM → kvadraturna diskretnaya modulaciya amplitude

SIMBOL MODULIRANOG SIGNALA

Simbol moduliranog signala → Dio moduliranog signala s jednim stanjem moduliranog parametra

Svakoj **diskretnoj razini modulacijskog signala** odgovara **jedno diskretno stanje** amplitude, frekvencije ili faze **moduliranog signala**

Modulirani signal prikazujemo **nizom simbola**.

Broj simbola je neka potencija **broja 2**

Binarni postupci koriste samo **dva simbola** $s_0(t)$ i $s_1(t)$.

Svakom od njih pridružuje se **jedan bit**.



BRZINA I DJELOTVORNOST PRIJENOSA

Djeletvornost prijenosa → Raste kad ima **više simbola**. Tada svakome pridružujemo **više od jednog bita**.

Brzina prijenosa simbola → $R_s = 1/T_s$ [Bd] T_s - trajanje simbola
(brzina signaliziranja)

Brzina prijenosa bita → $R_b = R_s \log_2 M$ [bit/s] M - broj simbola (binarni sustav M = 2)

KRITERIJI ZA ODABIR MODULACIJSKOG POSTUPKA

Učinkovitost snage (E_b/N_0) → Omjer energije bita i gustoće snage bijelog šuma kojim se ostvaruje tražena kvaliteta prijenosa izražena vjerojatnošću pogreške prijenosa bita (BER)

Energija potrebna za prijenos jednog bita

$$E_b = C \cdot T_b = \frac{C}{R_b} \quad T_b - \text{trajanje bita} \quad T_b = T_s / \log_2 M$$

Spektralna gustoća snage šuma (snaga šuma u pojasu širine 1 Hz)

$$N_0 = \frac{N}{B} \quad N - \text{srednja snaga šuma u kanalu} \\ B - \text{širina pojasa frekvencija}$$

Učinkovitost snage

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\frac{C}{R_b}}{\frac{N}{B}} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B}{R_b} \quad \rightarrow \begin{array}{l} \text{Ne mjeri se direktno.} \\ \text{Mjeri se omjer } C/N \text{ i korigira za omjer } B/R_b \end{array}$$

Spektralna učinkovitost (R_b/B) → Broj prenesenih bita u sekundi po jedinici širine pojasa (po Hz).
Mjeri se u jedinicama **bit/s/Hz**

Stupanj kompleksnosti sustava → Količina i složenost sklopolvlja (uključujući i njegovu cijenu).

UTJECAJ ŠUMA I VJEROJATNOST POGREŠKE

Analogni sustavi → Utjecaj šuma na ispravnost prijenosa određuje se temeljem omjera **S/N**
To je omjer snage korisnog signala i snage šuma (Signal / Noise)

Digitalni sustavi → Utjecaj šuma na ispravnost prijenosa određuje se temeljem omjera **C/N**.
To je omjer snage nemoduliranog prijenosnog signala i snage šuma (Carrier / Noise)
u pojasu frekvencija određenom Nyquistovim filtrom s kosinusnom karakteristikom

SER → Vjerojatnost pogreške simbola moduliranog signala p_{ES} (Symbol Error Rate)

BER → Vjerojatnost pogreške bita moduliranog signala p_{Eb} (Bit Error Rate)

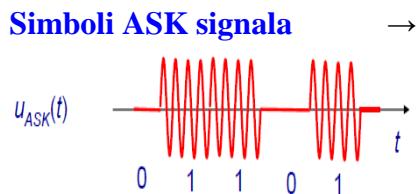
POSTUPCI DEMODULACIJE

Hard- decision → Demodulator odlučuje da li je poslan znak **0** ili **1**. Najčešće korišteni postupak.

Soft- decision → Demodulator odlučuje da li je poslan znak **0** ili **1** i daje vjerojatnost ispravnosti odluke.

ASK - DISKRETNAYA MODULACIJA AMPLITUDE

SIMBOLI ASK-signala

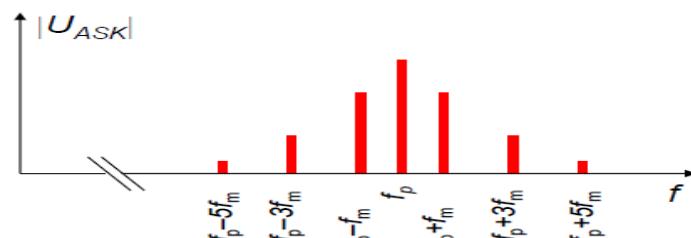


Diskretni modulacijski signal (s razinama 0 i 1) modulira amplitudu sinusnog prijenosnog signala.

U intervalu znaka '1' razina moduliranog signala je nazivne amplitude U_{pm} , a u intervalu znaka '0' razina je jednaka nuli.

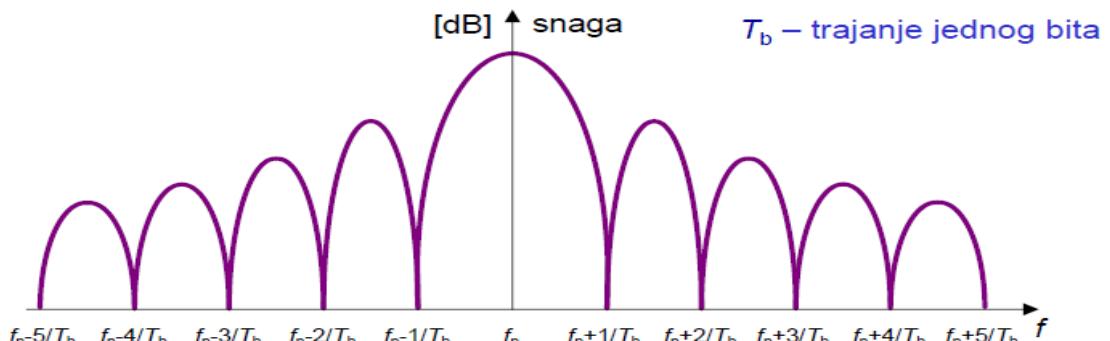
SPEKTAR ASK-signala

Spektar ASK signala → Kad modulaciju obavlja periodični pravokutni signal (niz 010101)



$$f_m = \frac{1}{2T_b}$$

→ Kad modulaciju obavlja neperiodični diskretni signal (realna situacija)
Ovojnica spektra snage



ŠIRINA POJASA, SPEKTRALNA UČINKOVITOST ASK-signala

Širina pojasa ASK signala → Idealni ASK signal zauzima beskonačno širok pojas frekvencija.

Za smanjivanje širine pojasa koristimo filtre s kosinusno zaobljenom frekvenčijskom karakteristikom

Kad modulacijski signal ima konačnu širinu pojasa (oblikovani impulsi) onda je i B_{ASK} konačan. Širina pojasa ASK signala u praktičnoj primjeni

$$B_{ASK} = 2 \cdot 1,6 f_m = 1,6 / T_b$$

Spektralna učinkovitost →

$$\frac{R_b}{B} = \frac{\frac{1}{T_b}}{\frac{1.6}{T_b}} = \frac{1}{1.6} = 0.6 \text{ bits/s/Hz}$$

Srednja snaga ASK signala → Približno je jednaka polovici snage prijenosnog signala

$$P_{ASK} \approx \frac{P_{p0}}{2} = \frac{U_{pm}^2}{4R}$$

Demodulacija ASK signala → nekoherentno (detekcijom ovojnica) ili koherentno (množenjem s pomoćnim signalom)

Primjena ASK modulacije → Sustavi za prijenos digitalnih signala male brzine

FSK - DISKRETNJA MODULACIJA FREKVENCIJE

BFSK - BINARNA FSK

Simboli → BFSK koristi **dva simbola** odnosno **dvije frekvencije**

$$\text{«}0\text{»} \rightarrow f_0 = f_p - \Delta f, \quad \text{«}1\text{»} \rightarrow f_1 = f_p + \Delta f.$$

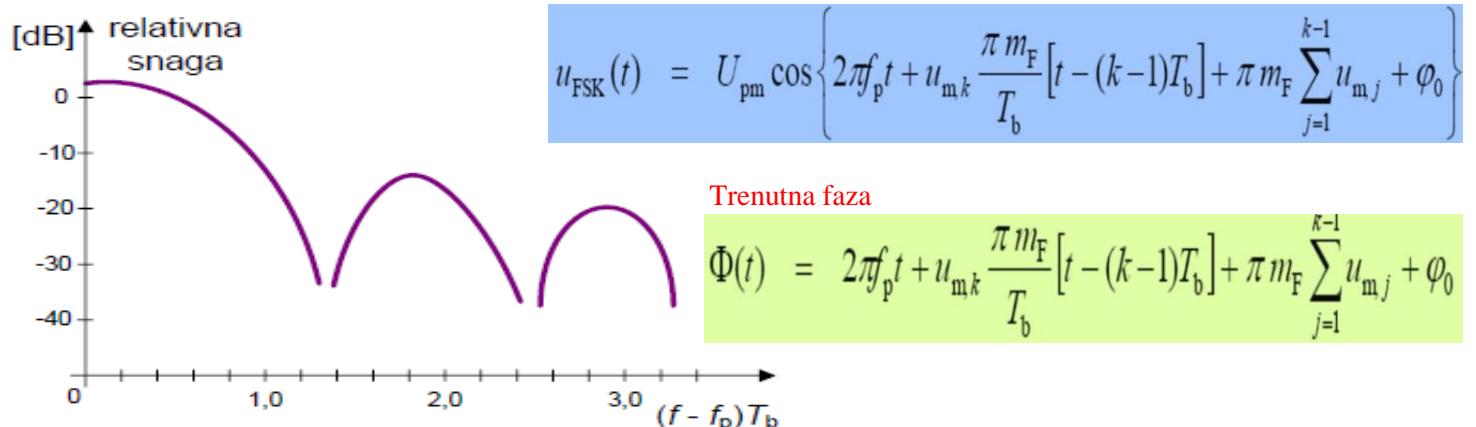


Širina pojasa → Za određivanje **približne širine pojasa** koristi se **Carsonovo pravilo**

$$B_{\text{FSK}} \approx 2(\Delta f + f_m) = 2\Delta f + \frac{1}{T_b}$$

Za smanjenje **širine pojasa** koriste se **niskopropusni filtri** → **kosinusni** i **Gaussov**

Ovojnica spektra snage → BFSK je **nelinearni** modulacijski postupak



Indeks modulacije → Jednak je omjeru **devijacije frekvencije** Δf i **najveće frekvencije modulacijskog signala** f_m

$$m_F = \frac{\Delta f}{f_m} = \Delta f \cdot T_m = \underbrace{2 \cdot \Delta f}_{\substack{\text{razmak} \\ \text{diskretnih} \\ \text{frekvencija}}} \cdot T_b$$

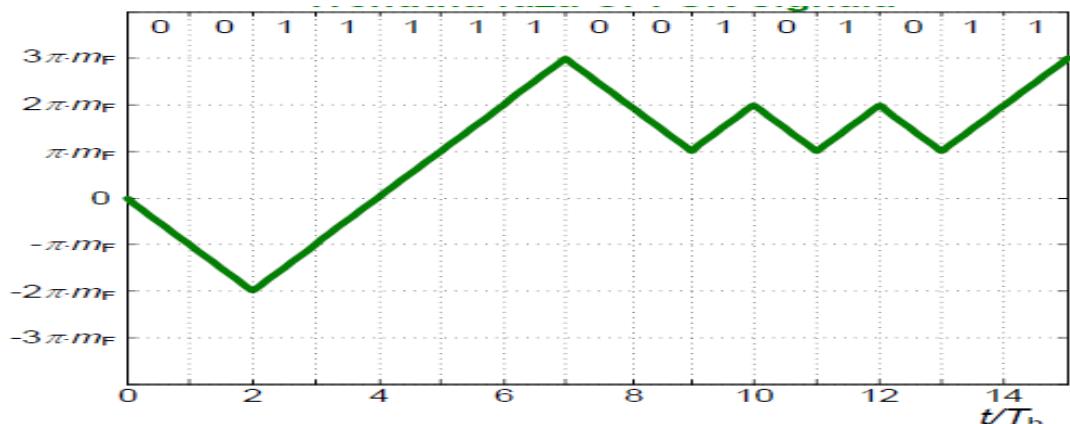
Indeks modulacije **nije jednak** najvećoj promjeni faze **moduliranog signala**

Kontinuiranost faze → Diskontinuiteti **faze** jako proširuju zauzeti pojas frekvencija.
Kontinuiranost **faze** dobiva se za **cjelobrojne indekse modulacije**

$$2 \cdot \Delta f = k \cdot \frac{1}{T_b} \quad k = 1, 2, \dots$$

CPFSK → Diskretnja modulacija frekvencije s **kontinuiranom fazom**

Unutar intervala **1 bita faza** se promjeni **linearno** za iznos $\pm \pi m_F$



GFSK - GAUSSOVA FSK

GFSK → Koristi **Gaussov filter** za oblikovanje **impulsa modulacijskog signala**. Nakon filtriranja **diskretni modulacijski signal** postaje **kontinuirana funkcija vremena**. Zbog toga je **kontinuirana i promjena frekvencije moduliranog signala**.

M-FSK - FSK S VIŠE FREKVENCIJA

M-FSK → Koristi **M frekvencija** odnosno **M simbola**. Svakom **simbolu** pridružuje se **$\log_2 M$ bita**.

U svakom **intervalu simbola** $T_S = T_b \cdot \log_2 M$

trenutna **frekvencija M-FSK signala** poprima jednu od **M** mogućih vrijednosti.

Ako su **diskrete frekvencije jednoliko razmaksnute** za $2 \cdot \Delta f$ onda je **indeks modulacije**

$$m_F = 2 \cdot \Delta f \cdot T_S$$

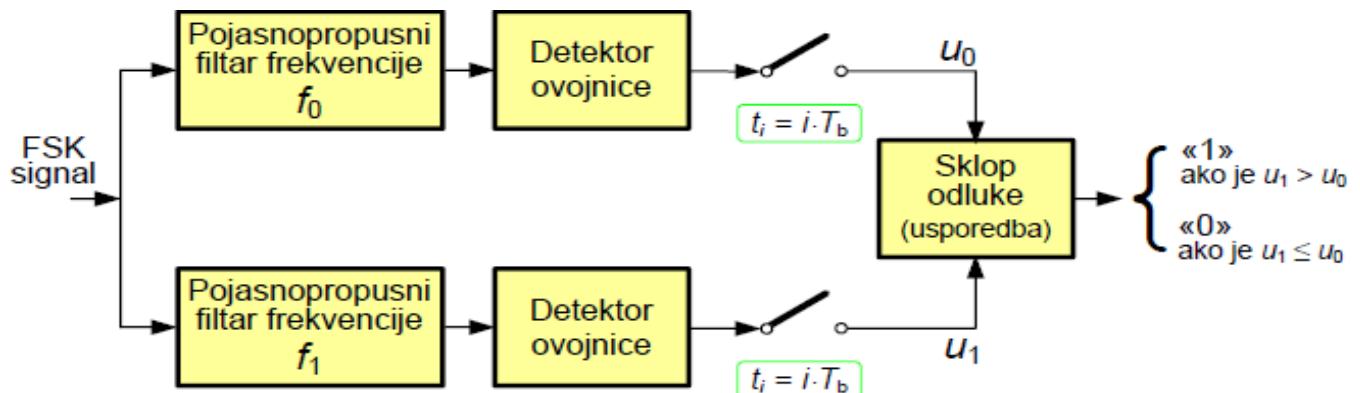
DEMODULACIJA FSK SIGNALA

Demodulacija FSK signala → **nekoherentno** (detekcijom ovojnica) ili **koherentno** (množenjem s pomoćnim signalom)

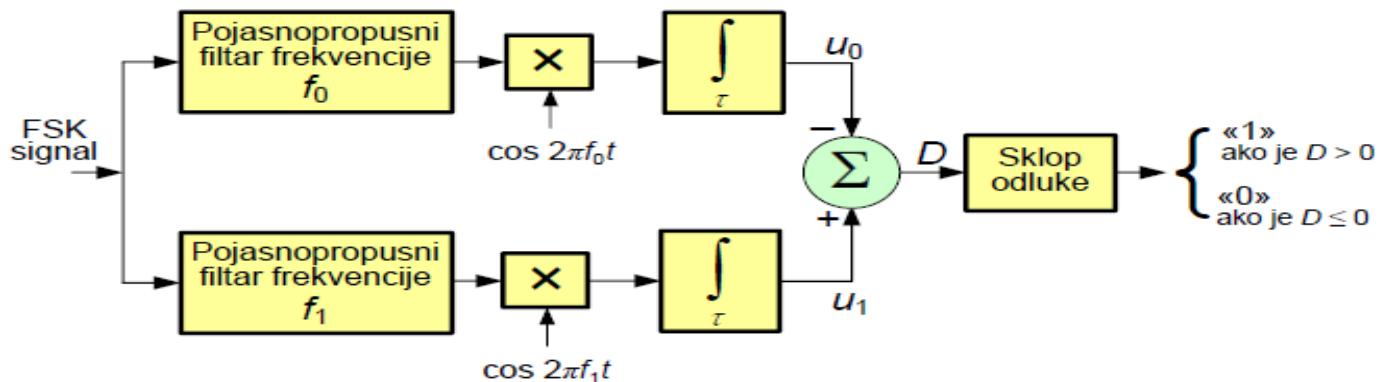
Nekoherentni postupak → FSK signal se može prikazati kao **zbroj dva ASK signala** prijenosnih frekvencija f_0 i f_1

ASK signal frekvencije f_1 dobiva se **izravnom modulacijom** niza podataka
ASK signal frekvencije f_0 dobiva se kad modulaciju obavlja **invertirani niz istih podataka**

Nekoherentna demodulacija se temelji na **detekciji ovojnica** ovih ASK signala i usporednjom dobivenih rezultata.



Koherentni postupak → Rijetko se koristi. **Množenje s pomoćnim signalom**.



PRIMJENA FSK SIGNALA

Primjena FSK → Sustavi za prijenos digitalnih signala **male i srednje brzine**.

GFSK se koristi u **radijskim tehnologijama**: DECT, Bluetooth, WLAN

PSK - DISKRETNAYA MODULACIJA FAZE

PSK signal → Prikazujemo kao zbroj dva ASK signala koji su zaokrenuti u fazi za $\pi/2$

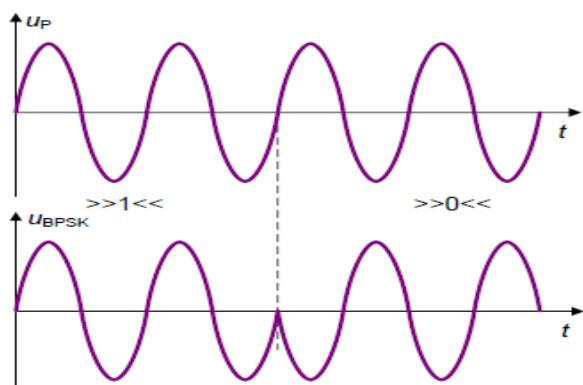
$$u_{\text{PSK}}(t) = U_{\text{pm}} [\cos \varphi_k \cdot \cos 2\pi f_p t - \sin \varphi_k \cdot \sin 2\pi f_p t]$$

U idealnim uvjetima PSK signal ima konstantnu amplitudu

PSK je linearni modulacijski postupak (za razliku od kontinuirane modulacije faze PM)

BPSK (2-PSK) - BINARNA PSK

Simboli BPSK signala



Dijagram stanja BPSK signala

→ BPSK ima dva diskretna stanja faze $\varphi_m = \{0, \pi\}$

Simboli moduliranog BPSK signala

$$s_0(t) = U_{\text{pm}} \cos(2\pi f_p t + \pi) = -U_{\text{pm}} \cos 2\pi f_p t$$

$$s_1(t) = U_{\text{pm}} \cos(2\pi f_p t + 0) = U_{\text{pm}} \cos 2\pi f_p t$$

BPSK signal → prikazujemo kao produkt

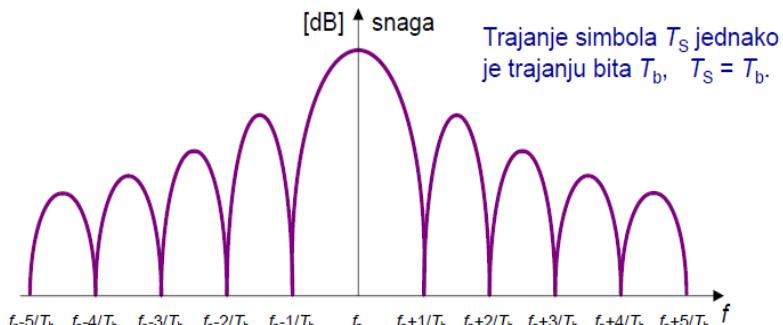
$$u_{\text{BPSK}}(t) = u_m(t) \cdot \cos 2\pi f_p t$$

Prikaz u kompleksnoj ravnini

I-os → kofazna os; Q-os → kvadraturna os

Moguća su 2 vezora BPSK signala

Ovojnica spektra snage → spektralne karakteristike BPSK signala jednake su karakteristikama ASK signala



$$S_{\text{BPSK}}(f) = k_B T_b \left[\frac{\sin \pi(f - f_p)T_b}{\pi(f - f_p)T_b} \right]^2$$

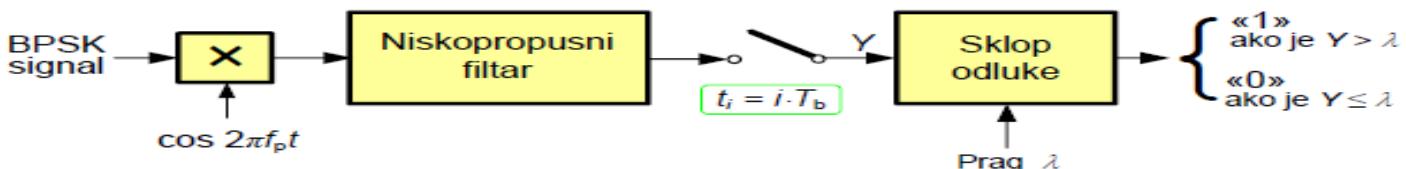
k_B - osjetljivost modulatora

Spektralna učinkovitost
(teorijski najviša moguća)

$$\rightarrow \frac{R_b}{B} = \frac{R_s \cdot \log_2 M}{\frac{1}{T_s}} = \frac{\frac{1}{T_s} \log_2 M}{\frac{1}{T_s}} = \log_2 M = 1 \text{ bit/s/Hz}$$

Spektralna učinkovitost je mala ali je otpornost na smetnje velika

Demodulacija BPSK signala → BPSK signal se demodulira samo koherentno



Primljeni BPSK signal se množi s lokalno generiranim nosiocem

Niskopropusni filter uklanja komponente oko dvostrukog prijenosne frekvencije $2f_p$ (propušta samo komponente u osnovnom pojasu frekvencija).

U intervalu svakog znaka uzima se uzorak izlaznog signala filtra i uspoređuje s nekim pragom 1. Ovisno o rezultatu usporedbe, donosi se odluka u korist znaka 0 ili znaka 1.

QPSK (4-PSK) - KVATERNARNA PSK

Simboli QPSK signala

→ QPSK signal ima **4 diskretna stanja faze** (broj simbola $M = 4$) i dvije inačice:

(za $c = 0$)

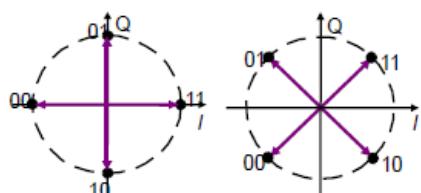
$$\varphi_m = \left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right\}$$

(za $c = 1$)

$$\varphi_m = \left\{\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}\right\} = \left\{\pm\frac{\pi}{4}, \pm\frac{3\pi}{4}\right\}$$

QPSK signal sa **stanjima faze** ($\pm\pi/4, \pm3\pi/4$) nastaje **zbrajanjem 2 BPSK signala**.

Dijagram stanja



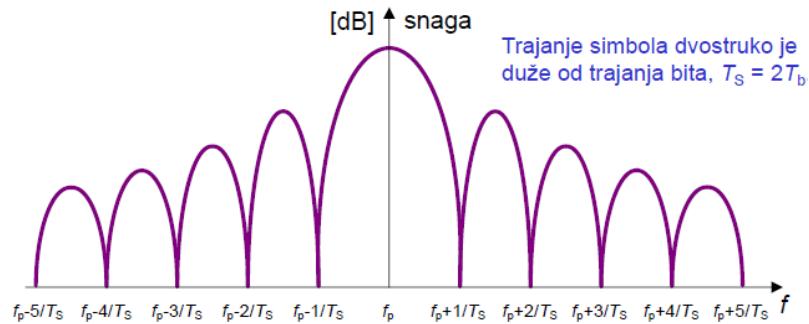
→

Svakom simbolu pridružuju se **2 bita** → **dibit**.

Zakon pridruživanja slijedi pravilo **Grayeva koda**.

Susjednim stanjima faze (u **I-Q ravnini**) pridružuju se **parovi bitova** koji se razlikuju u **jednom binarnom znaku**

Ovojnica spektara snage



→ Dobiva se kao **zbroj spektara** 2 neovisna **BPSK signala** od kojih se sastoji

$$T_S = 2T_b$$

$$S_{\text{QPSK}}(f) = k_Q T_S \left[\frac{\sin \pi(f - f_p) T_S}{\pi(f - f_p) T_S} \right]^2$$

Spektralna učinkovitost

$$\frac{R_b}{B} = \frac{R_S \cdot \log_2 M}{\frac{1}{T_S}} = \frac{\frac{1}{T_S} \log_2 M}{\frac{1}{T_S}} = \log_2 M$$

$M = 4$

$$\frac{R_b}{B} = 2 \text{ bit/s/Hz}$$

QPKS ima **veću spektralnu učinkovitost** od BPKS ali **manju otpornost na smetnje**.

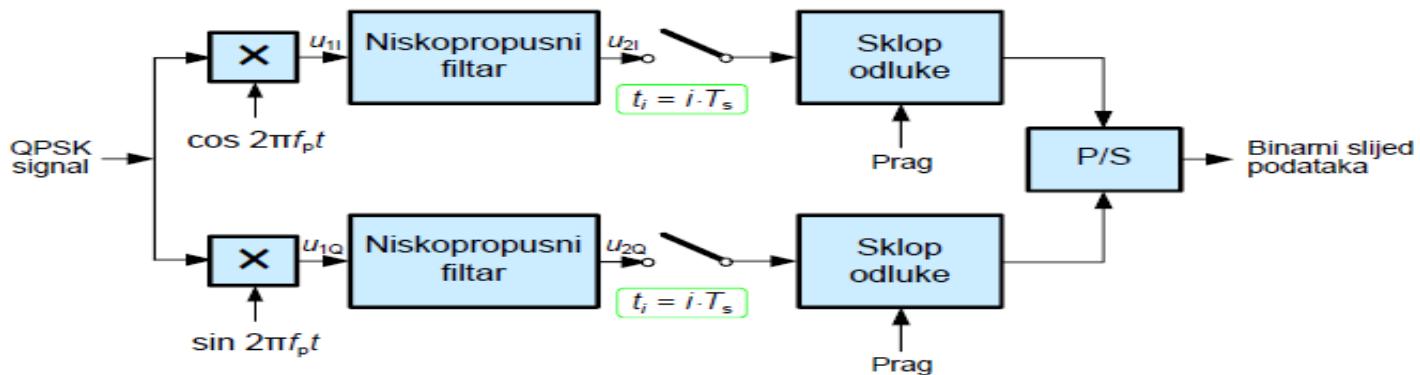
Amplituda QPSK signala

→ Teorijski je **konstantna**, realno se mijenja.

To je nepovoljno za **demodulacijske uređaje** i ispravlja se na **2 načina**: **Offset - QPSK modulacijom** ili **$\pi/4$ - QPSK modulacijom**

Demodulacija QPSK signala

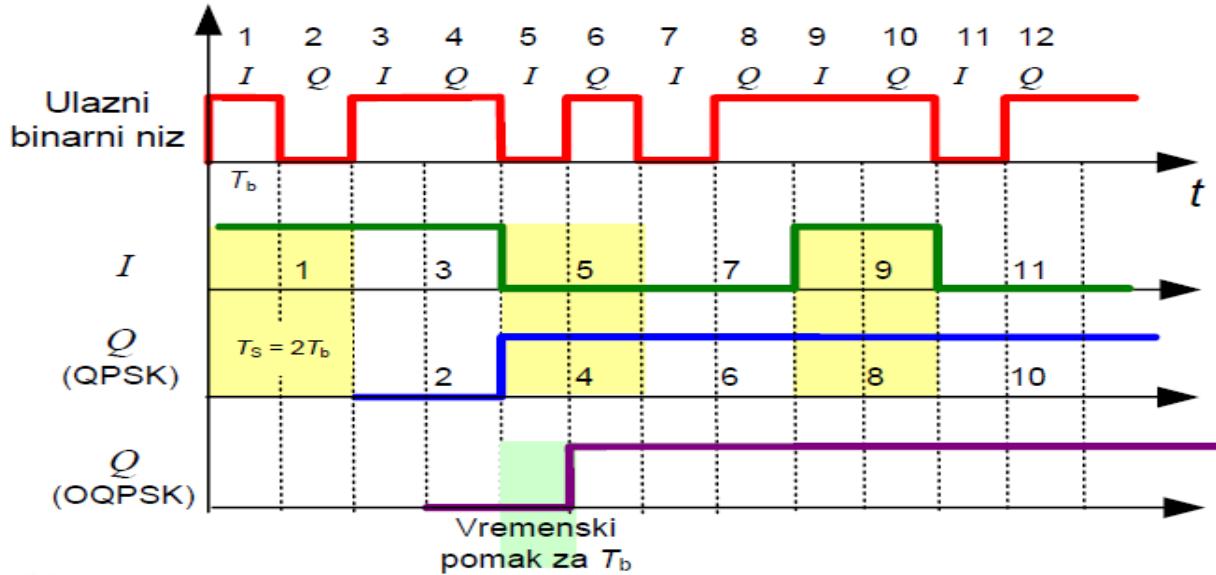
→ **Koherentna** demodulacija QPSK signala sastoji se od **2 zasebne demodulacije** - demodulacije **kofazne komponente** i demodulacije **kvadraturne komponente**



Demodulacijom **I(t)** signala određuju se **neparni** bitovi, a demodulacijom **Q(t)** signala **parni** bitovi **konačnog niza bitova**.

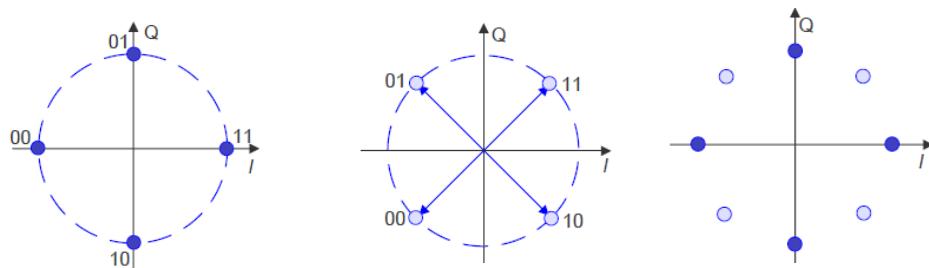
Multipleksorom (izvedenim kao paralelno/serijski pretvornik) obnavlja se **izvorni niz** digitalnih podataka.

O-QPSK modulacija → Diskretna modulacija faze **s vremenskim pomakom jednog znaka**.
 Offset modulacija mijenja fazu u **dva koraka**:
 prvo se promjeni **I komponenta** (faza se promjeni za $+90^\circ$ ili -90°), a nakon **vremenskog pomaka** $T_s/2 = T_b$ i **Q komponenta** (za **dalnjih** $+90^\circ$ ili -90°)



Ovim postupkom **smanjuju se promjene amplitudine realnih moduliranih signala**. **OQPSK signal** se može **demodulirati** samo **koherentnim** postupkom.

$\pi/4$ - QPSK modulacija → Koristi se da bi se izbjegla pojava **istovremene** promjene **razine** **$I(t)$** i **$Q(t)$** signala kada se mijenjaju **oba** binarna znaka **u paru**.
 Nastaje **preklapanjem** dvije inačice **stanja** ($c=0$, $c=1$).
Dijagram stanja QPSK signala zaokrene se za $\pi/4$ nakon svakog para binarnih znakova (na taj način postoje **8 stanja faze**).
 Time je **onemogućena** promjena faze za $\pm \pi$ (moguće promjene: $\pm \pi/4$ i $\pm 3\pi/4$) što rezultira **manjim** promjenama **amplitude** u odnosu na **QPSK signal**.



Ovaj modulacijski postupak pripada skupini **koherentnih** postupaka.
 Ne koristi se kao takav (primjenjuje se **u zajednici** s **diferencijalnim kodiranjem**)

8 - PSK

Simboli 8-PSK signala

→ 8-PSK signal ima **8 diskretnih stanja faze** (broj simbola $M = 8$) i dvije inačice:

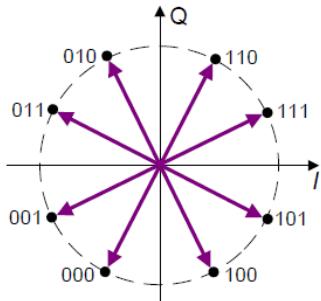
(za $c = 0$)

$$\varphi_m = \left\{ 0, \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{\pi}{2}, \pm \frac{3\pi}{4}, \pi \right\}$$

(za $c = 1$)

$$\varphi_m = \left\{ \pm \frac{\pi}{8}, \pm \frac{3\pi}{8}, \pm \frac{5\pi}{8}, \pm \frac{7\pi}{8} \right\}$$

Dijagram stanja



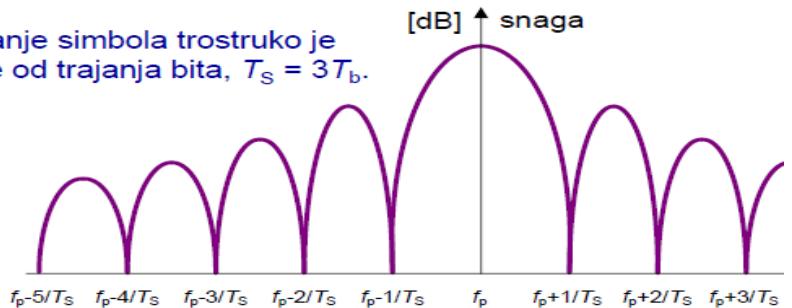
→ Svakom simbolu pridružuje se po **3 bita** ($\log_2 8$) → tribit.

Susjednim stanjima faze pridružuju se **tribiti** koji se razlikuju u **jednom bitu**.

Ovojnica spektara snage

→ Trajanje **simbola** je **trostruko** duže od trajanja **bita** $T_s = 3T_b$.

Trajanje simbola trostruko je
duže od trajanja bita, $T_s = 3T_b$.



Spektralna učinkovitost

$$\frac{R_b}{B} = \frac{R_s \cdot \log_2 M}{\frac{1}{T_s}} = \frac{\frac{1}{T_s} \log_2 M}{\frac{1}{T_s}} = \log_2 M$$

$$M = 8$$

$$\frac{R_b}{B} = 3 \text{ bit/s/Hz}$$

8-PKS ima **veću** spektralnu učinkovitost od **BPKS** i **QPKS** ali **manju otpornost na smetnje**.

Demodulacija 8-PSK signala

→ slična demodulaciji **QPSK signala** s tim da su demodulirani signali u_{2I} i u_{2Q} diskretni signali **kvaternarne vrste**

KOHERENTNI I DIFERENCIJALNI POSTUPCI PSK

- Koherentni postupci PSK** → U PSK-signalu **informacija** se nalazi u **relativnoj fazi**. Signal se demodulira usporedbom **faza moduliranog i referentnog signala** (**jednak prijenosnom signalu** u odašiljaču). **Koherentna** modulacija se označava **slovom C** ispred **tipa** modulacije (**CBPSK, CQPSK**). Koherentni postupak zahtjeva **poznavanje faze prijenosnog signala** iz odašiljača. To je teško zadovoljiti u uvjetima **mobilnog odašiljača ili prijemnika**.
- Diferencijalni postupci PSK** → Ti se postupci temelje na **diferencijalnom kodiranju** PSK-signala (**informacija** se nalazi u **promjeni faze moduliranog signala**) Pri **demodulaciji** se **faza simbola moduliranog signala** uspoređuje s **fazom prethodnog simbola** (utvrđuje se **diferencijalna razlika**) **Diferencijalna** modulacija se označava **slovom D** ispred **tipa** modulacije (**DBPSK, DQPSK**)

Pravilo pridruživanja promjene faze simbola binarnim znakovima

Modulacijski postupak	Binarni znakovi	Promjena faze
DBPSK	0	π
	1	0
DQPSK	00	π
	01	$\pi/2$
	11	0
	10	$3\pi/2$

Promjene faze kod **diferencijalnih** postupaka **jednake su absolutnim vrijednostima faza** kod **koherentnih** postupaka.

Spektralna učinkovitost diferencijalnih postupaka → približno **jednaka učinkovitosti** odgovarajućega **koherentnog postupka**

DIFERENCIJALNO KODIRANJE PSK - signala

DEBPSK → Diferencijalno kodirani BPSK signal

'0' u izvornom nizu → promjena faze moduliranog signala za π radijana.

'1' u izvornom nizu → faza moduliranog signala ostaje nepromijenjena.

Diferencijalno kodiranje opisuje izraz

$$d_k = \overline{a_k \oplus d_{k-1}}$$

a_k → znak iz izvornog niza ($a_k = 1 \rightarrow d_k = d_{k-1}$ $a_k = 0 \rightarrow d_k \neq d_{k-1}$)

d_k → trenutni znak iz diferencijalno kodiranog niza

d_{k-1} → prethodni znak iz diferencijalno kodiranog niza

Faze simbola koherentnog i diferencijalno kodiranog BPSK signala

a_k	φ_{Ck}	d_{k-1}	φ_{Dk-1}	d_k	φ_{Dk}
0	π	0	π	1	0
0	π	1	0	0	π
1	0	0	π	0	π
1	0	1	0	1	0

φ_{Ck} → faza simbola koherentnog CBPSK signala

φ_{Dk} → faza simbola diferencijalno kodiranog DEBPSK signala

$$\varphi_{Dk} = \varphi_{Ck} + \varphi_{Dk-1}$$

Primjer 1

Zadan je niz binarnih znakova

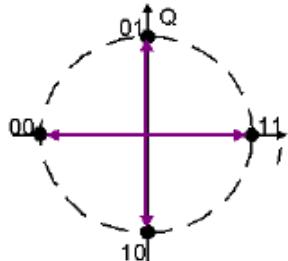
Faze simbola koherentnog i diferencijalno kodiranog BPSK signala

Niz binarnih znakova	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Faza CBPSK-signala	0	π	0	0	π	π	π	0	π	π
Faza DE-BPSK-signala	0	0	π	π	π	0	π	0	π	0

Primjer 2

Zadan je niz binarnih znakova

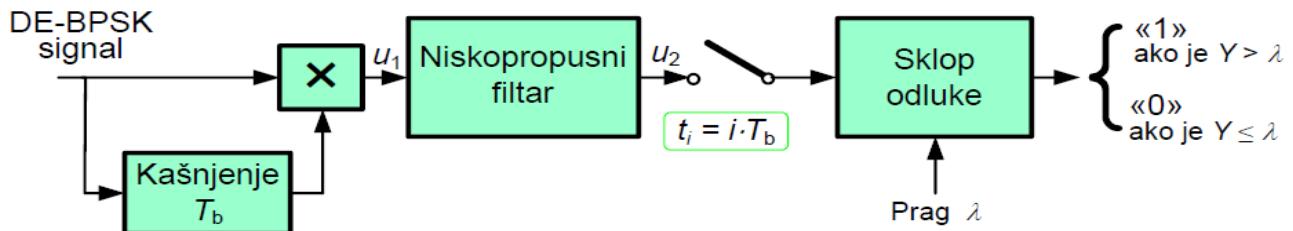
Faze simbola koherentnog i diferencijalno kodiranog QPSK signala



Niz binarnih znakova	10	11	00	01	00
Faza CQPSK-signala	$3\pi/2$	0	π	$\pi/2$	π
Faza DE-QPSK-signala	0	$3\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$	π

DIFERENCIJALNA DEMODULACIJA BPSK - signala

Diferencijalna demodulacija BPSK signala → Temelji se na **koherentnom** postupku.



Primljeni signal se uspoređuje sa **primljenim signalom** koji **kasni** za T_b .

Izlaz iz **niskopropusnog filtra** je

$$u_2 = \frac{1}{2} k_{\text{BPSK}} U_m \cos(\varphi - \psi)$$

φ - faza moduliranog signala u k -tom intervalu
 ψ - faza moduliranog signala u $k-1$ intervalu

Kad je **diferencijalna faza** jednaka **nuli** $\varphi - \psi = 0 \rightarrow u_2 > 0 \rightarrow$ sklop odluke prepoznae **znak '1'**

Kad je **diferencijalna faza** jednaka π $\varphi - \psi = \pi \rightarrow u_2 < 0 \rightarrow$ sklop odluke prepoznae **znak '0'**

MODULACIJSKI POSTUPAK $\pi/4$ - DQPSK

Promjena faze $\pi/4$ -DQPSK signala

→ Faza se mijenja ovisno o **prenošenim podacima** za $\pm \pi/4$ i $\pm 3\pi/4$

Nakon svake **promjene faze** prenosi se **jedan simbol** koji sadrži **2 bita** ($T_S = 2 T_b$)

Dibit	Promjena faze $\pi/4$ -DQPSK-signala
00	$\pi/4$
01	$7\pi/4 = -\pi/4$
11	$5\pi/4 = -3\pi/4$
10	$3\pi/4$

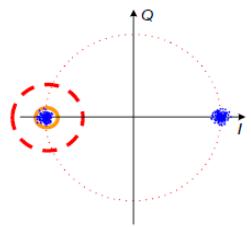
Primjer 3

Zadan je niz binarnih znakova

Faze simbola **diferencijalno kodiranog $\pi/4$ -QPSK signala**

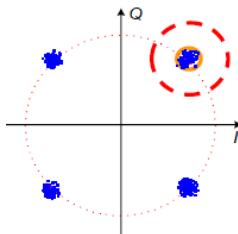
Niz binarnih znakova	10 11 00 00 01 00
Promjena faze $\pi/4$ -DQPSK-signala	$3\pi/4$ $5\pi/4$ $\pi/4$ $\pi/4$ $7\pi/4$ $\pi/4$
Faza $\pi/4$ -DQPSK-signala	0 $3\pi/4$ 0 $\pi/4$ $\pi/2$ $\pi/4$ $\pi/2$

UTJECAJ ŠUMA NA PSK-signale



Mjenja se položaj vrha odgovarajućeg verzora u I-Q ravnini.

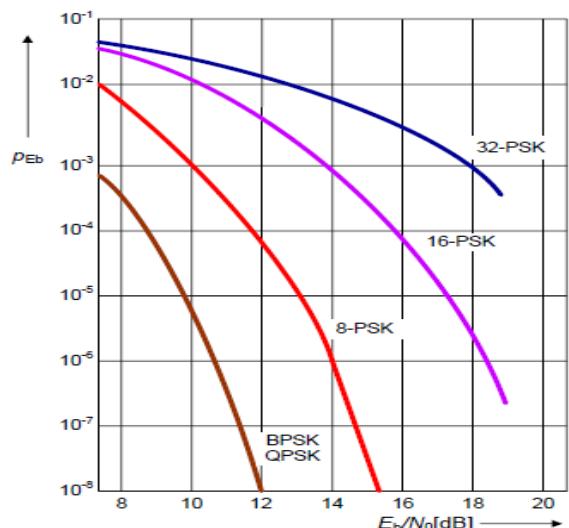
Prijemnik će ispravno detektirati simbol **BPSK** signala, ako se vrh rezultante (korisnog signala i šuma) nalazi u simbolu pridruženoj **poluravnini**



Prijemnik će ispravno detektirati simbol **QPSK** signala, ako se vrh rezultante (korisnog signala i šuma) nalazi u simbolu pridruženoj **kvadrantu**

QPSK signala je **osjetljiviji** na smetnje od **BPSK** signala

Vjerovatnost pogreške bita različitih PSK signala



PRIMJENA RAZLIČITIH INAČICA PSK

Primjena raznih inačica PSK → Modemi u području govornih frekvencija 0,3 - 3,4 kHz
 Razne radijske tehnologije WLAN, WMAN, EDGE, HSDPA
 Tehnologije digitalne televizije DVB-T i DVB-H

MSK – MODULACIJSKI POSTUPAK S MINIMALNIM RAZMAKOM FREKVENCIJA

TEMELJNA OBILJEŽJA MSK - signala

MSK (FFSK) → Poseban slučaj **FSK signala**, kad je indeks modulacije $m_F = 0,5$ tj. kada je razmak diskretnih frekvencija $2\Delta f$ jednak polovici brzine digitalnog signala podatka

$$f_1 - f_0 = 2\Delta f = \frac{1}{2T_b} = \frac{R_b}{2}$$

Koristi se pri većim brzinama digitalnih signala, zato je dobio naziv **brza diskretna modulacija frekvencije FFSK**

Ima **dobru spektralnu učinkovitost** (idealno 2 bit/s/Hz) kad se postigne **sinkronost simbola moduliranog signala** s digitalnim **modulacijskim signalom**.

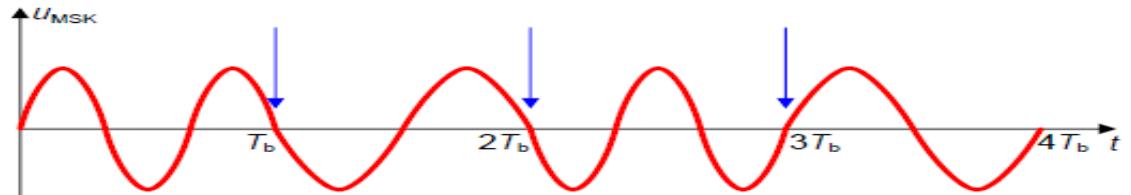
Da bi se ostvarila ta sinkronost:

- vrijednosti diskretnih frekvencija f_0 i f_1 moraju biti višekratnici od $1/2T_b$
- prijenosna frekvencija f_p mora biti neparni višekratnik od $1/4T_b$

Diskretne **frekvencije MSK signala** su onda:

$$f_0 = f_p - \frac{1}{4T_b} \quad f_1 = f_p + \frac{1}{4T_b}$$

Ovim **uvjetom** postignuto je da se **diskrete promjene frekvencije moduliranog signala** dešavaju samo **u nultočkama moduliranog signala**, time je **osigurana kontinuiranost faze**.



U intervalu **jednog simbola** nalazi se **cijeli broj poluvalova sinusnih titraja**, a **dva simbola moduliranog signala** razlikuju se za **jedan poluval**.

Simboli **MSK signala** nalaze se na **minimalnoj frekvencijskoj udaljenosti** → otuda naziv modulacije **Minimum Shift Keying**.

Unutar intervala **jednog bita**, **trenutna faza MSK signala** se mijenja **linearno** za iznos $\pm \pi m_F \rightarrow \pm \pi /2$ (ovisno o **binarnom znaku**)

Karakteristike **MSK signala** su: **konstantnost amplitude** i **dobra spektralna učinkovitost**

DOBIVANJE MSK - signala

Povezanost postupka **MSK i OQPSK** → **MSK signal** u potpunosti odgovara **OQPSK signalu**

MSK je samo **specijalni slučaj OQPSK postupka**

MSK je **linearni postupak** (za razliku od **FSK** koji je **nelinearni**)

Dobivanje MSK signala → Postupak dobivanja **MSK signala** temelji se na **kvadraturnom modulatoru** kao i postupak dobivanja **OQPSK**

$$\text{MSK signal} \rightarrow u_{\text{MSK}}(t) = U_{\text{pm}} \left\{ u_{m1} \cos \left(\frac{\pi t}{2T_b} \right) \cdot \cos 2\pi f_p t - u_{m2} \cos \left[\frac{\pi(t-T_b)}{2T_b} \right] \cdot \sin 2\pi f_p t \right\}$$

Niz **binarnih znakova u_m** pretvara se u **dva paralelna niza znakova u_{m1} i u_{m2}** koji zauzimaju **vremenske intervale dvostrukog trajanja ($2T_b$)**.

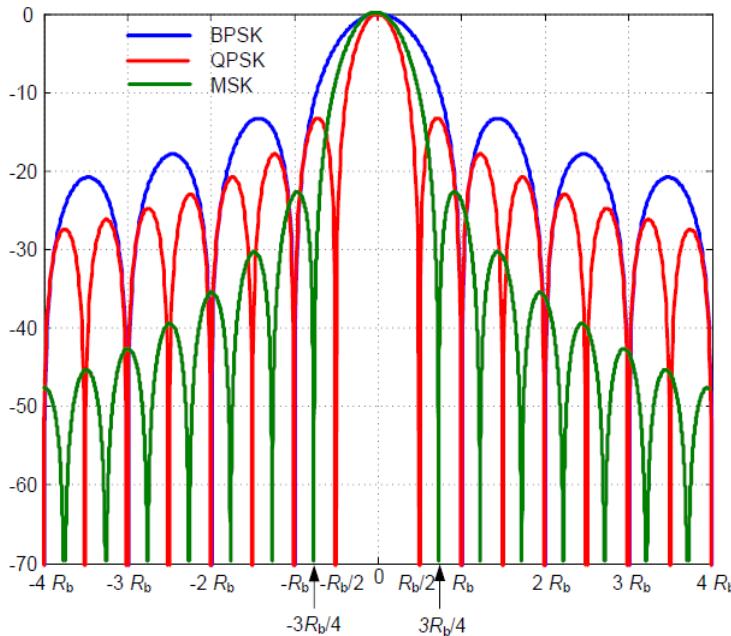
Znakovi niza u_{m2} dodatno su pomaknuti za T_b

Znakovi niza u_{m1} odgovaraju **neparnim znakovima digitalnog niza podataka**

Znakovi niza u_{m2} odgovaraju **parnim znakovima digitalnog niza podataka**

SPEKTAR MSK - signala

Ovojnica spektara snage MSK signala



→

$$S_{\text{MSK}}(f) = k_M T_S \frac{1 + \cos 2\pi(f - f_p)T_S}{[1 - 4(f - f_p)^2 T_S^2]^2}$$

k_M - osjetljivost modulatora

Spektralni oblik je **isti** kao i kod **OQPSK**

Najveći dio **snage** koncentriran je u **pojasu frekvencija širine**

$$B = 1,5 \cdot R_b = 1,5 / T_b$$

Razina **spektra snage** opada brže nego kod **QPSK** signala

Idealna spektralna učinkovitost je **2 bit/s/Hz** (u praksi oko **1.9 bit/s/Hz**)

DEMODULACIJA MSK - signala

MSK signal se može **demodulirati** koherentno i nekoherentno (diferencijalnim postupkom)

Nekoherentni postupak se temelji na **detektiranju promjene faze** MSK signala koja nastaje unutar intervala jednog binarnog znaka

U intervalu znaka '0' trenutna faza MSK signala se promjeni za $-\pi/2$, a u intervalu znaka '1' za $+\pi/2$

GMSK - GAUSSOVA MSK

GMSK → je MSK uz primjenu **Gaussova filtra** radi dodatnog **smanjenja širine pojasa frekvencija**. Filtriranjem **nestaju diskontinuiteti faze i promjene frekvencije** su kontinuirane i **manja je širina zauzetog pojasa frekvencija**.

Glavna varijabla je **normirana širina pojasa** $B \cdot T_b$ Gaussova filtra

Za $B \cdot T_b = \infty$ dobiva se običan MSK. Gaussov filter **manje normirane širine pojasa** $B \cdot T_b = 0,2$ znatno **smanjuje širinu spektra** GMSK signala, a tek **neznatno se smanjuje otpornost sustava na smetnje**

Primjena GMSK → Tehnologije za pokretne mreže druge generacije **GSM**, Radijska tehnologija **GPRS**

QAM - KVADRATURNA DISKRETNJA MODULACIJA AMPLITUDU

- QAM** → je **hibridni modulacijski postupak** koji nastaje **istovremenom** diskretnom modulacijom **amplitude i faze**. To je **linearni** modulacijski postupak
- QAM signal** → $u_{\text{QAM}}(t) = I(t)\cos 2\pi f_p t - Q(t)\sin 2\pi f_p t$
- Dva **diskretna modulacijska signala** **I(t)** i **Q(t)** moduliraju amplitude dviju kvadraturnih komponenti sinusnoga prijenosnog signala
- M-QAM signal** ima **spektralnu učinkovitost**
- $$\log_2 M \text{ bit/s/Hz} \quad M = 2^n$$
- Porastom **M** raste **spektralna učinkovitost** ali raste i **osjetljivost na smetnje**
→ potreban **veći E_b/N_0**
- Dijagrama stanja ima **kvadratni oblik** samo kad je **broj diskretnih stanja modularnog signala** parna potencija od 2
- 4 - QAM signal** → Dva **binarna modulacijska signala** moduliraju **kvadraturne komponente sinusnog nosioca**.
- 4-QAM signal** je **istovjetan QPSK signalu** (4-PSK) **4-QAM = QPSK**
- Za veće **M** ne vrijedi ova jednakost (**M-QAM \neq M-PSK**).
- 16 - QAM signal** → **Dijagram stanja**
-
- Dva **kvaternarna modulacijska signala**, normiranih razina **-3, -1, +1, +3**, moduliraju **kvadraturne komponente sinusnog nosioca**.
- Nastali **modulirani signal** se sastoji od **16 simbola** (raznih amplituda i raznih faza)
- Svakom simbolu su pridružena **4 bita**
Grayev kod → susjedne četvorke se razlikuju za 1 znak
- 16-QAM postupak** ima visoku **spektralnu učinkovitost**
Idealna spektralna učinkovitost bila bi **4 bit/s/Hz** (u praksi **3,7 bit/s/Hz**)
- 32 - QAM signal** → **Dijagram stanja**
-
- 32 različita simbola.**
Svakom simbolu pridružuje se **5 bitova** ($32 = 2^5$ → neparna potencija)
Idealna spektralna učinkovitost bila bi **5 bit/s/Hz**
- 64 - QAM signal** → **64 različita simbola.**
Svakom simbolu pridružuje se **6 bitova** ($64 = 2^6$ → parna potencija)
Idealna spektralna učinkovitost bila bi **6 bit/s/Hz**
- 128 - QAM signal** → **128 različita simbola.**
Svakom simbolu pridružuje se **7 bitova** ($128 = 2^7$ → neparna potencija)
Idealna spektralna učinkovitost bila bi **7 bit/s/Hz**
- Demodulacija QAM signala** → QAM se demodulira **isključivo sinkronim postupkom**
Postupak se temelji (kao i kod QPSK) na **zasebnoj demodulaciji kofazne komponente i kvadraturne komponente**

- Utjecaj šuma na QAM signale** → **QAM signali s više simbola osjetljiviji su na šum.**
Radi poboljšanja osobina **moduliranog signala** u pogledu šuma treba ostvariti što veći međusobni **razmak** točaka **dijagrama stanja**. To se postiže **heksagonalnom strukturom dijagrama stanja**
- Primjena raznih inačica QAM** → **modemi u području govornih frekvencija 0,3 -3,4 kHz,**
razne radijske tehnologije,
digitalna televizija u kabelskim mrežama

UČINKOVITOST SNAGE I SPEKTRALNA UČINKOVITOST MODULACIJSKIH POSTUPAKA

KRITERIJI ODABIRA MODULACIJSKOG POSTUPKA

- Koriste se **dva kriterija**:
- kriterij koji se temelji na spektralnoj učinkovitosti
 - kriterij koji se temelji na učinkovitosti snage

SPEKTRALNA UČINKOVITOST - USPOREDBA

Najveća ostvariva spektralna učinkovitost ograničena je:

- Nayquistovim teoremom minimalne širine pojasa
- Shannonovim teoremom o kapacitetu kanala

Kanalom širine **B** (u osnovnom pojasu frekvencija) može se prenijeti najviše **2B simbola** u sekundi

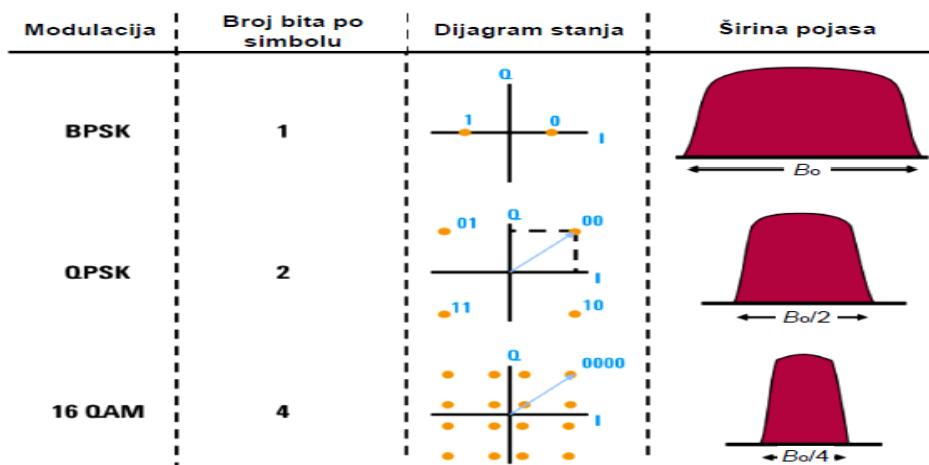
Primjenom linearog modulacijskog postupka u **pojasnopropusnom** kanalu **širine B** može prenijeti **najviše B simbola** u sekundi

Shannonova granica → Teorijski najveća moguća spektralna učinkovitost

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

Svi diskretni modulacijski postupci imaju manju spektralnu učinkovitost od Shannonove granice

Porastom broja simbola spektralna učinkovitost raste, ali raste i osjetljivost na šum



QPSK ima **dvostruku spektralnu učinkovitost** u odnosu na BPSK ali zahtjeva **3 dB veću snagu**, odnosno za **3 dB viši omjer C/N**

Minimalna vrijednost omjera E_b/N_0 → Dobiva se kada $R_b/B \rightarrow 0$
 $E_b/N_0 = 0,693 \rightarrow -1,59 \text{ dB}$

Obilježja M-PSK i QAM postupaka → Kad je **veći broj simbola M**, QAM dopušta rad s **manjim omjerom E_b/N_0** nego PSK. QAM ima **veću učinkovitost snage** od PSK.
 Kod **M-FSK** postupaka **povećanjem M smanjuje se spektralna učinkovitost** ali **smanjuje se** i zahtjev na E_b/N_0

PRIMJER

Analogni telefonski kanal zauzima pojas od 300 do 3400 Hz → **Širina pojasa B = 3100 Hz**

U **idealnim uvjetima**, tim kanalom može se prenijeti **najviše 3100 simbola u sekundi** (3100 Bd)

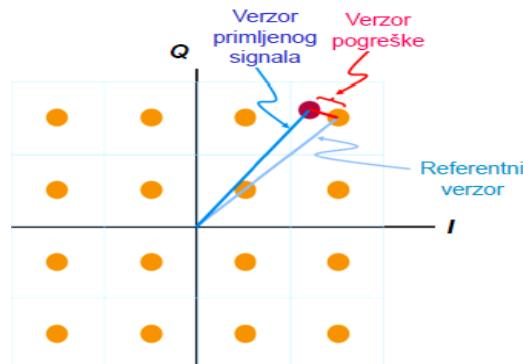
Zbog korištenja realnih filtera, čiji je **pojas propuštanja** veći od Nyquistovog, **snižava se brzina prijenosa simbola** na najviše **2400 Bd**.

Modemi za brzine prijenosa od 14400 bit/s moraju koristiti **modulacijski postupak** s barem $14400 / 2400 = 6$ bita po simbolu (npr **64-QAM** uz **2400 Bd** ili **256-QAM** uz **1800 Bd**) kako bi se uklopili u ograničenje $R_s \leq 2400 \text{ Bd}$

KVALITETA MODULACIJE

EVM - VELIČINA VEZORA POGREŠKE

Veličina vektora pogreške EVM



→ Mjera za kvalitetu modulacije.

Kvantificira obilježja digitalnog odašiljača ili prijemnika vezano uz pogreške amplitude i faze

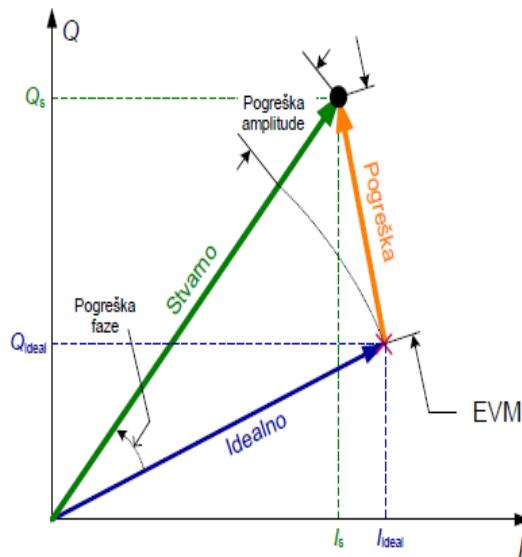
Koristi se umjesto BER → učestalost pogreške

Mjerenje BER je komplikirano

Pokazuje koliko je stvarni položaj točke udaljen od idealnog položaja

Uzima se kao efektivna vrijednost (obično se uzima 1000 simbola)

$$EVM_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (\Delta I_k)^2 + (\Delta Q_k)^2}{S_{\text{maks}}^2}} \times 100\%$$



S_{maks} - najveća amplituda simbola idealno moduliranog signala

Drugi oblici

$$EVM(\%) = \sqrt{\frac{P_{\text{error}}}{P_{\text{ref}}}} \times 100\%$$

$$EVM(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{error}}}$$

P_{error} - srednja snaga vektora pogreške

P_{ref} - srednja snaga simbola idealno moduliranog signala koji je najveće amplitude

MER - OMJER POGREŠKE MODULACIJE

Koristi se za određivanje kvalitete modulacije (npr. u QAM sustavima)

$$MER(\text{dB}) = 10 \log \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [I_{sk}^2 + Q_{sk}^2]}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [(\Delta I_k)^2 + (\Delta Q_k)^2]}$$

$$MER(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_s}{P_{\text{error}}}$$

$$MER(\%) = \sqrt{\frac{P_{\text{error}}}{P_s}} \times 100\%$$

I_{sk} i Q_{sk} - koordinate stanja jednog od N simbola mjerenoj signala,
 P_s - srednja snaga N simbola mjerenoj moduliranog signala,
 P_{error} - srednja snaga verzora pogreške.

POSTUPCI SINKRONIZACIJE I OBNOVE NOSIOCA

ZAŠTO JE POTREBNA SINKRONIZACIJA ?

- Za **koherentni** prijem **diskretnog moduliranog signala**, prijemnik mora biti sinkroniziran s **odašiljačem**
- Postupcima sinkronizacije postiže se i održava **istodobnost** odgovarajućih događaja

VRSTE SINKRONIZIRANJA

Sinkronizacija **prijemnika** s **odašiljačem** sastoji se od dvije komponente koje se mogu odvijati **istovremeno** ili **u slijedu jedna iza druge**.

Obnova ili sinkronizacija nosioca → Postupak **procjene frekvencije i faze nosioca** u prijemniku (mora imati jednaku frekvenciju i fazu kao i **prijenosni signal**)

Sinkronizacija simbola → Postupak **procjene trenutka** za uzimanje **uzorka signala** (moraju biti poznati trenuci **početka i kraja** jednog **simbola**)
Služi za **obnovu takta**

U **nekoherentnim sustavima** ne provodi se **obnova nosioca** ali se provodi **sinkronizacija simbola** (za obnovu **taktnog signala**)

Dvije temeljne vrste postupaka sinkronizacije su:

1. Zajedno sa **signalom koji nosi informaciju**, u vremenskom multipleksu, periodično se šalje, **poznati početni niz bitova**. Taj niz sadrži podatke o **nosiocu** i o **vremenskim parametrima simbola**. (mana → manja učinkovitost, dio kapaciteta se troši na prijenos početnog niza bitova)
2. Prijemnik uspostavlja sinkronizam **uz pomoć podataka koje izdvaja iz primljenog moduliranog signala**. (bolja učinkovitost propusnosti i snage, ali duže vrijeme sinkronizacije)

OBNOVA NOSIOCA

Obnavljanje nosioca obavlja se iz **primljenih simbola moduliranog signala**.

Kod nekih modulacijskih postupaka (**MSK, PSK**) komponenta **prijenosnog signala** ne postoji u spektru **modeliranog signala**. Takav se **modulirani signal** obrađuje **nelinearno**.

Nelinearni postupak u primjeru **BPSK-signala**

Modulirani signal se **kvadrira**. **Promjene amplitude** uklanjuju se **graničnikom amplitude**.

Nastali signal se u **sklopu za dijeljenje frekvencija** dijeli s 2 i dobiva se **lokralni referentni signal**.

Obnovljeni nosioc ima **neodređenu fazu** u iznosu **180°**

Primjenom ovog postupka na **M-PSK** signal dobiva se **obnovljini nosioc** s **neodređenom fazom** iznosa **360°/M**

Neodređenost faze onemoguće ispravno određivanje **binarnog niza podataka** u **koherentnim sustavima**. Problem se riješava slanjem tkz. **sinkronizirajućeg slijeda** koji sadrži određeni broj **unaprijed poznatih znakova**.

SINKRONIZACIJA SIMBOLA

To je **najniža razina sinkronizacije prijemnika na odašiljač**.

Iz nje slijede **sinkronizacija riječi** i **sinkronizacija okvira** kao dijelovi **obnove takta**.

Korišteni postupci koriste se **podacima iz primljenog signala** i primjenjuju **pravilo procjene** na temelju **najveće podudarnosti**.

Postupci se temelje na **poznavanju oblika odašiljačkih impulsa na prijemnoj strani**.

Primljeni impuls se uspoređuje s nizom **vremenski pomaknutih** i **prijemniku poznatih odašiljačkih impulsa**. Usporedba se provodi **korelacijskim postupkom**.

Utvrdjivanjem **impulsa** s kojim se **primljeni signal maksimalno podudara**, određena je **veličina pogreške sinkronizacije prijemnika s odašiljačem**, koju se treba ispraviti.

OFDM - FREKVENCIJSKI MULTIPLEKS ORTOGONALNIH PODNOSILACA

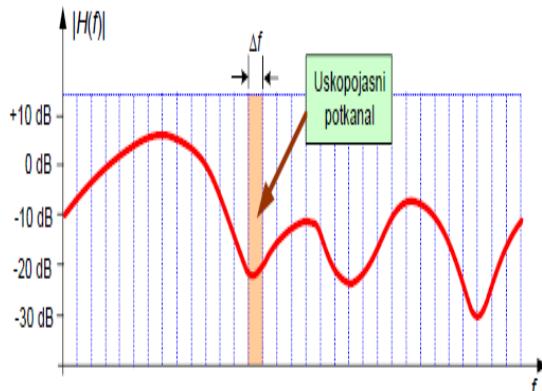
KOMUNICIRANJE S VIŠE NOSILACA

Brzine prijenosa digitalnih podataka su **velike** → **modulirani signal** zauzima **veliku širinu pojasa frekvencija**. Neidealna frekvencijska prijenosna karakteristika komunikacijskog kanala → nejednoliki prijenos pojedinih komponenti **moduliranog signala** → nastaju smetnje među simbolima **moduliranog signala (ISI)**.

Velike relativne promjene **razina** komponenti **moduliranog signala** nastaju zbog:

- nejednolike **frekvencijske karakteristike** vođenog **medija**
- višestaznog **širenja** elektromagnetskog vala u **radijskom prijenosu**

Modulacija više nosilaca MCM



→ Postupak modulacije kod kojeg se **umjesto jednog istovremeno** koristiti **više nosilaca**.

Serijski **niz podataka** velike brzine razdijeli se na **više paralelnih nizova**.

Svaki od **paralelnih nizova** manje je **brzine** i zasebno modulira **jedan od više nosilaca**.

Nastali **modulirani signali** zauzimaju **manje širine pojasa**, i svaki je smješten u **zasebni pojaz**.

Širine pojaza **moduliranih signala** su **male** → male su i promjene frekvencijske prijenosne karakteristike **komunikacijskog kanala** → smetnje među simbolima (ISI) su **zanemarive**.

Podaci se prenose **paralelno**, uz pomoć **više nosilaca**.

ŠTO JE OFDM ?

- OFDM** → To je **jedna tehnika multipleksiranja**. Dobiva se **digitalnom** obradom **simbola moduliranog signala** i **naknadnom** modulacijom **OFDM kanal** dijeli se na **veći broj podkanala** (podpojaseva). **Digitalna informacija** velike brzine, raspodjeljuje se na **potkanale** gdje **modulira podnosioce**. Brzina prijenosa u svakom **potkanalu** je **mala** (produljeno je **trajanje simbola**). **Fizički kanal** se dijeli i u **vremenskom** i u **frekvencijskom** području i dobiva se skup **uskih frekvencijskih potpojaseva** i skup **malih susjednih vremenskih segmenata**

RAZLIKA FDM I OFDM

- FDM** → **Potkanali** se **ne smiju preklapati**. Između susjednih **potkanala** postoji **zaštitni pojaz**. Koristi se **koherentna i nekoherentna demodulacija** **potkanala**.
- OFDM** → **Dopušta se određeno preklapanje potkanala**. Zbog **ortogonalnosti** **podnositaca** ne dolazi do međudjelovanja **potkanala**. Koristi se **koherentna demodulacija** **potkanala**.

ŠTO ZNAČI POJAM ORTOGONALAN ?

Podnosioci sinusnog oblika su **ortogonalni** na intervalu **trajanja T_0** ako vrijedi:

$$\int_0^{T_0} \cos(2\pi f_v \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_z \cdot t) dt = 0, \quad \text{za } f_v \neq f_z, \\ \int_0^{T_0} \cos(2\pi f_v \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_v \cdot t) dt = T_0, \quad \text{za } f_v = f_z.$$

$f_v = v \cdot f_0$

$f_z = z \cdot f_0$

Uvjet ' $= 0$ ' bit će ispunjen samo ako se **dva podnosioca** na intervalu T_0 razlikuju za **cijeli broj perioda** → frekvencije f_v i f_z moraju biti **višekratnici** **iste** osnovne frekvencije f_0

Najmanji razmak frekvencija Δf dvaju podnositaca koji su **ortogonalni** na intervalu T_0 je **jedna perioda**

$$\Delta f = \frac{1}{T_0} \quad f_0 = \frac{1}{T_0}$$

U OFDM sustavima, frekvencije podnositaca su **višekratnici** temeljne frekvencije f_0

MODULACIJSKI POSTUPCI PRIMJENJENI U POTKANALIMA

Za prijenos podataka u potkanalima najčešće se koriste modulacijski postupci **PSK** ili **QAM**.

PSK i **QAM** su **linearni postupci** → **visoka spektralna učinkovitost**

SPEKTRALNA OBILJEŽJA OFDM SIGNALA

Oblik modulacijskog signala → U PSK ili QAM postupcima **modulacijski signali** su **pravokutni**
Ovojnica njihovog spektra slijedi oblik funkcije $\sin x / x$

Nultočke ovojnica nalaze se na višekratnicima od $1/T_0$ gdje je T_0 trajanje simbola moduliranog signala u potkanalu i ono je jednako intervalu ortogonalnosti

Podnosioci u **OFDM kanalu** su **ortogonalni** → nalaze se na razmaku $1/T_0$ na **frekvencijskoj osi**



Svaki od podnositaca dolazi u nultočku spektra ostalih moduliranih podnositaca → nema smetnji među nosiocima
OFDM signal učinkovito zauzima **dodijeljeni pojas frekvencija**
Spektar **OFDM signala** približno je **pravokutnog oblika**

TEHNIKA DOBIVANJA OFDM-a

OFDM simbol → Sastoje se od **simbola moduliranih signala** u **svim potkanalima**
Može se dobiti postupkom **Inverzne Diskretne Fourierove Transformacije (IDFT)** niza **kompleksnih moduliranih signala** u potkanalima **OFDM sustava**.
IDFT je postupak **digitalne obrade signala** i realizira se algoritmima **Inverzne Brze Fourierove Transformacije (IFFT)**

IFFT postupak → IFFT veličine u području frekvencija **transformira** u veličine u vremenskom području.
Ulagani parametri su kompleksni **QPSK** ili **QAM simboli** koji određuju amplitudu i fazu odgovarajućeg **sinusnog podnosioca**.
Broj ulaznih parametara (broj podnositaca) je neka potencija broja $2 \rightarrow 2^n$
Blok od N uзорака na izlazu IFFT jedinice predstavlja **OFDM simbol**
Prijenosna frekvencija f_p se uzima u **sredini OFDM pojasa**

$$f_p = \left(a + \frac{N-1}{2} \right) f_0$$

DFT postupak → Pomoću postupka **Diskretne Fourierove Transformacije**, na **prijemnoj strani** regeneriraju se polazni **QPSK** ili **QAM simboli** (kompleksni brojevi) koji odgovaraju **dijagramima stanja** polaznih **QPSK** ili **QAM signala**

OFDM U UVJETIMA VIŠESTAZNOG PROSTIRANJA

Pri gibanju odašiljača ili prijemnika radijske veze, zbog višestaznog prostiranja, dolazi do čestih i jakih propadanja razine prijemnog signala.

U OFDM sustavima, trajanje simbola moduliranih signala u potkanalima je produljeno, time je povećana otpornost na sметnje nastale zbog višestaznog prostiranja.

Zaštitni interval u OFDM simbolu → Dodavanjem **zaštitnog intervala** na **početak** OFDM simbola uklanja se **kašnjenje** pojedinih **simbola**.

Trajanje simbola T_s povećava se za iznos trajanja zaštitnog intervala $T_{ZI} = T_0 / 4$ (obično četvrtina trajanja intervala ortogonalnosti)

$$T_S = T_0 + T_{ZI}$$

Smetnje ne nastaju kad je najveće kašnjenje signala manje od veličine zaštitnog intervala

Pilotski signali u OFDM simbolu → Za ispravnu demodulaciju **OFDM signala**, potrebno je **točno** postaviti **vremenski prozor** u odnosu na trenutak pojave **svakog emitiranog OFDM simbola**.

U tu svrhu se koriste **pilotski podnosioci**.

Oni su **pravilno raspoređeni** u **prijenosnom kanalu** i služe kao sinkronizacijski markeri.

Utjecaj smetnji na potkanale OFDM-a → Zbog višestaznog prostiranja različito je prigušenje pojedinih potkanala.

OFDM je otporniji na uskopojasne smetnje od sustava s jednim nosiocem.

Broj pogrešno demoduliranih bitova je mali čak i kada su smetnje koncentrirane samo na neke potkanale.

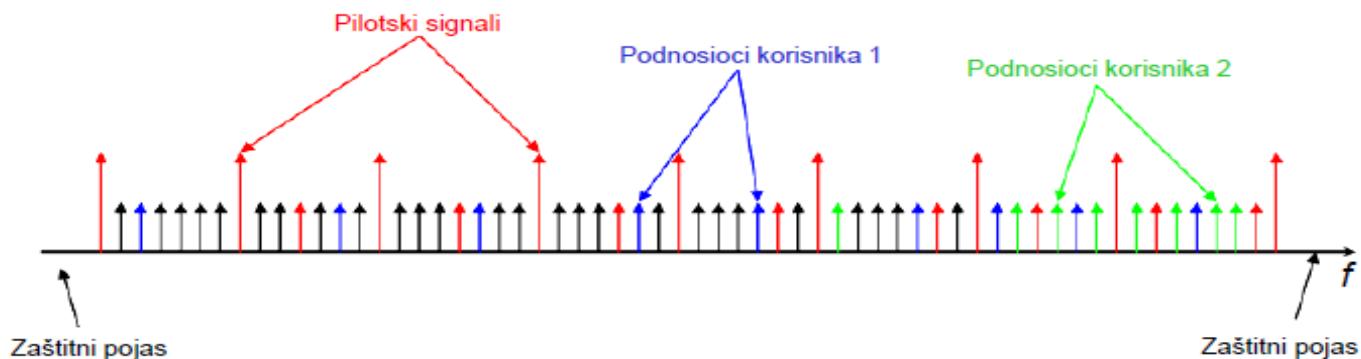
Prije modulacije bitovi se **po nekom pravilu permutiraju**, kako bi se nakon **inverzne permutacije u prijemniku** dobio slučajni **položaj pogrešnih bitova**.

Kodirani OFDM (COFDM) → Postupak u kojem su **sjedinjeni postupci zaštitnog kodiranja** radi ispravljanja pogrešaka i **OFDM-a**
COFDM koristi **zaštitno kodiranje** koje se temelji na **unošenju redundancije** u signal.
Vjerodostojnost **demoduliranih znakova** utvrđuje se pomoću tzv. **informacije o stanju kanala (CSI)**

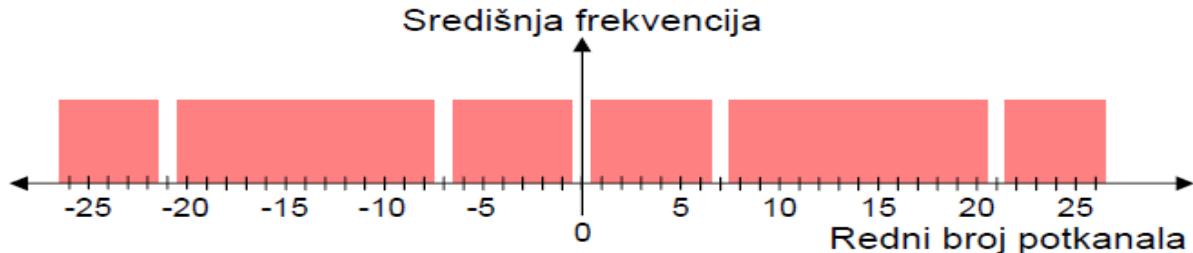
Rad mreže na jednoj frekvenciji (SFN) → Svi **odašiljači** u mreži rade na **istoj frekvenciji**. Za ispravan rad **SFN mreže** nužno je da svi **odašiljači** u mreži u svakom trenutku odašilju **potpuno jednaki signal** → **odašiljači** moraju biti **sinkronizirani** po vremenu i po frekvenciji To se riješava pomoću **globalnog sustava za određivanje položaja (GPS)**

VIŠESTRUKI PRISTUP OFDMA

Svakom korisniku dodjeljuje se skupina potkanala u okviru OFDM-a



OBILJEŽJA OFDM SIGNALA U WLAN-u



Koristi se sustav od **52 potkanala** → **48** za prijenos informacije, preostala **4** su pilotski signali

Potkanal broj 0 ne koristi se za prijenos

Pilotski signali smješteni su u **potkanale** br. **-21, -7, +7, +21** i oni se **moduliraju** fiksnim nizom bitova

Pilotski kanali uvijek su modulirani **BPSK**

OFDM signal smješta se u **radio frekvencijski (RF) kanal širine 20 MHz**

TEHNIKE PROŠIRENOG PODNOSILACA

Prijenos uz proširenje frekvencijskog pojasa

→ Osnovna prednost u odnosu na ostale tehnike prijenosa je mogućnost održavanja veze u uvjetima slabog prijemnog signala i uz prisutnost uskopojasnih ili širokopojasnih signala smetnje. Kod **sustava s proširenim spektrom**, frekvencijska širina pojasa je neovisna o širini pojasa **modulacijskog signala**.

Prijenos uz proširenje pojasa vrednuje se preko procesnog dobitka G_p . G_p pokazuje koliko je S/N ove tehnike **manji** u odnosu na S/N klasičnih **modulacija**, uz ostvarenje jednake kvalitete **prijemnog signala**.

Proširenje pojasa može se realizirati **na dva načina**:

DSSS postupak

→ Postupak **s izravnim slijedom**. Svaki **informacijski impuls osnovnog pojasa** proširi se **nizom mnogo užih impulsa (podimpulsi)**. Niz **podimpulsa** dio je tzv. **PN-slijeda** određene duljine.

FHSS postupak

→ Postupak **sa skakanjem frekvencija**. Dijelovi **osnovne informacije** prenose se **nosiocima različitih frekvencija**. **Frekvencijski pojaz** je podijeljen na **uske potpojaseve** koji se biraju prema unaprijed zadanom kodu. **PN-slijed** upravlja promjenama frekvencija.

Primjena proširenog spektra →

Vojni sustavi,
WLAN - radijska lokalna mreža,
UMTS - treća generacija javne pokretne mreže

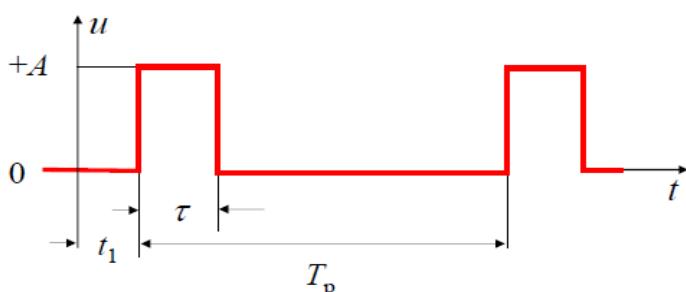
MODULACIJA IMPULSNOG SIGNALA

Temeljna obilježja modeliranja impulsa

→ Prijenosni signal je **niz** obično **pravokutnih impulsa**. **Modulacijom impulsa** mijenja se **jedan** od njihovih **parametara** (npr. amplituda) ovisno o razini **uzorka analognog ili diskretnog modulacijskog signala**. **Impulsni signali** se **ne mogu** modulirati **vremenski kontinuiranim modulacijskim signalom**

Periodični impulsni signal

→ određen je sa **4 parametra**: amplitudom A , vremenom trajanja impulsa τ , trenutkom pojave impulsa t_1 frekvencijom $f = 1/T_p$



POSTUPCI MODULIRANJA IMPULSA

PAM → Modulacija **amplitude** impulsa

PDM → Modulacija **trajanja** impulsa (**PWM** → Modulacija **širine** impulsa)

PPM → Modulacija **faze** impulsa

OBILJEŽJA MODULACIJSKOG SIGNALA

Prije modulacije, modulacijski signal treba **diskretizirati po vremenu**

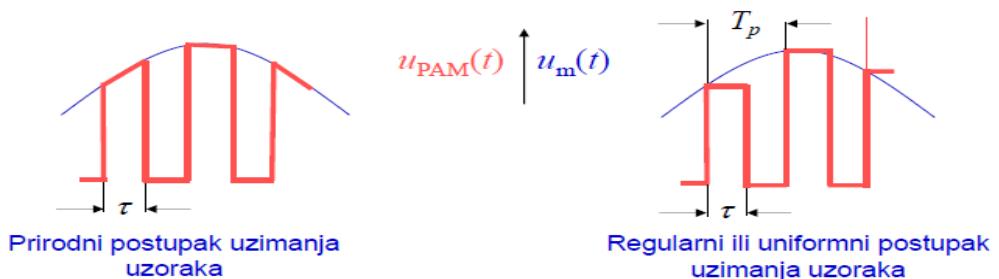
Uzorci modulacijskog signala uzimaju se u **vremenski jednako udaljenim trenucima**.

Teorem uzoraka → **Broj uzoraka u sekundi** mora biti **veći ili jednak dvostrukoj najvišoj frekvenciji** u spektru **modulacijskog signala**
Vremenski razmak uzorka T mora biti manji od

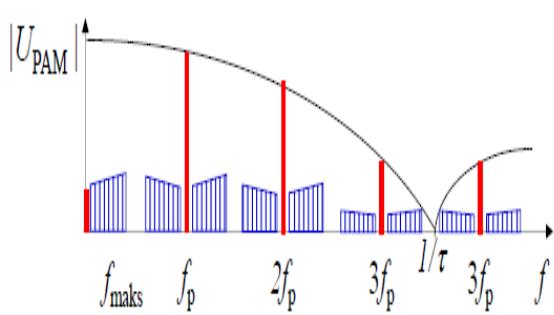
$$T \leq \frac{1}{2f_{\max}}$$

PAM - MODULACIJA AMPLITUDE IMPULSA

Oblik impulsa PAM signala → ovisi o **osobinama postupka uzimanja uzorka**



Prirodni postupak uzimanja uzorka → Dobiva se **unipolarni PAM signal**



$$u_{\text{PAM}}(t) = \frac{A\tau}{T_p} [1 + m_A \cos 2\pi f_m t] + \frac{2A\tau}{T_p} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi f_p \tau}{n\pi f_p \tau} \times \left[\cos 2\pi n f_p t + \frac{m_A}{2} \cos 2\pi (nf_p - f_m)t + \frac{m_A}{2} \cos 2\pi (nf_p + f_m)t \right]$$

$$k_a U_{\text{mm}} / A = m_A \rightarrow \text{indeks modulacije}$$

U spektru **PAM signala** javljaju se **bočne komponente** oko svih spektralnih komponenti **impulsnog prijenosnog signala**. Donja i gornja bočna komponenta (pojas oko nf_p) međusobno su **jednake**. Korigiraju se za **jednaki korigirajući faktor** kao i **odgovarajuća komponenta** u spektru **impulsnog prijenosnog signala**. Korigirajući faktor je oblika

$$\frac{\sin n\pi f_p \tau}{n\pi f_p \tau}$$

Regularni ili uniformni postupak uzimanja uzorka →

Donja i gornja bočna komponenta imaju **različite razine**.

To nastaje jer je odgovarajući **korekcijski faktor** oblika

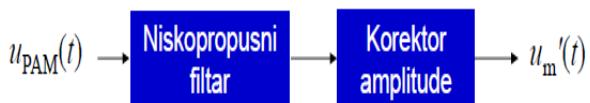
$$\frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau}$$

Korekcijski faktor ovisi o **frekvenciji svake spektralne komponente**

Demodulacija PAM signala

→ PAM se može demodulirati jednim **niskopropusnim filtrom**. Kod **regularnog uzimanja uzorka**, **demodulirani signal** je **linearno izobličen**. Zbog toga se **filtriranjem korigira amplituda** po pravilu

$$\frac{\pi f \tau}{\sin \pi f \tau}$$

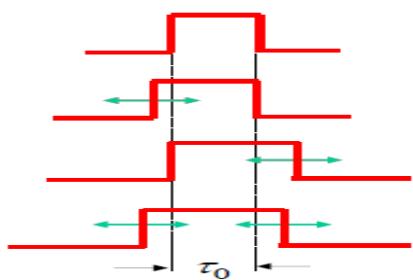


Primjena modulacije amplitude impulsa →

Slaba zbog **velike osjetljivosti** na **smetnje i šum**. PAM je često **prvi korak** u dobivanju ostalih vrsta **impulsnih ili digitalnih modulacija**.

PDM/PWM - MODULACIJA TRAJANJA / ŠIRINE IMPULSA

PDM/PWM - Modulacija trajanja → ili širine impulsa



Informacija je sadržana u trenutku pojave impulsa.

PDM (zajedno s **PPM** i **PFM**) se ubraja u postupke modulacije vremenskog parametra **impulsnog nosioca**

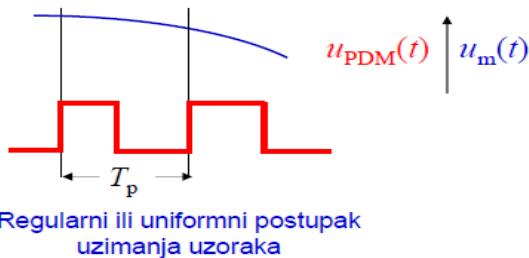
(Pulse Time Modulation - **PTM**)

Širina impulsa modulira se mijenjajući položaj **prednjeg brida**, **stražnjeg brida** ili **oba brida impulsa** na vremenskoj osi.

Položaj brida razmjeran je **razini uzorka modulacijskog signala**.

Regularni ili uniformni postupak → uzimanja uzoraka

Uzorci se uzimaju u vremenski ekvidistantnim trenucima



Prirodni postupak uzimanja uzoraka

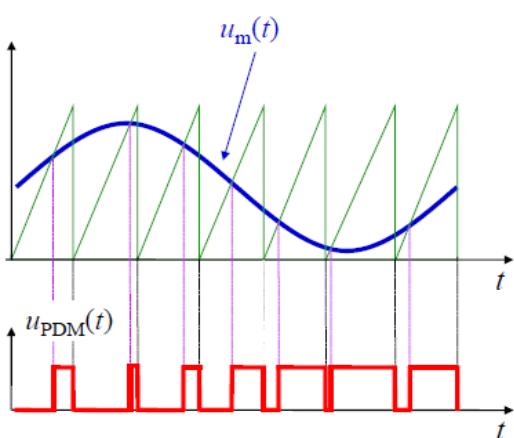
→ Uzorci se uzimaju u vremenski ekvidistantnim trenucima.

Trenutak uzimanja uzoraka poklapa se s trenutkom pojave **moduliranog brida** impulsa. Trenuci uzimanja uzoraka **nisu jednoliko raspoređeni** po vremenskoj osi. **Vremenski razmak uzoraka** se mijenja i u korelaciji je s promjenama razine **modulacijskog signala**.

Za **sinusni modulacijski signal trajanje impulsa PDM signala**

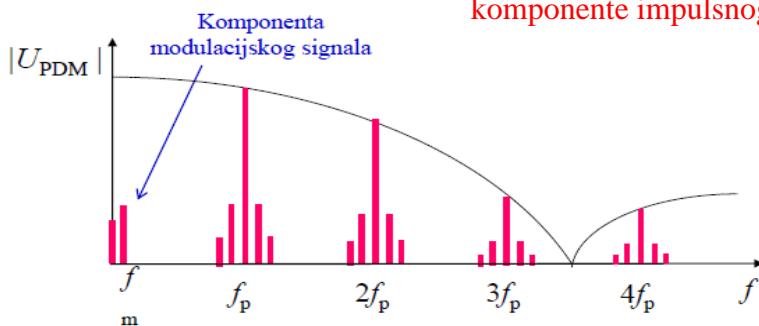
$$\tau(t) = \tau_0 (1 + m_D \sin 2\pi f_m t) \quad m_D = \frac{k_D U_{mm}}{\tau_0}$$

τ_0 - trajanje impulsa prijenosnog signala, **m_D** - indeks modulacije



Spektar PDM signala

→ Sadrži **istosmjernu komponentu**, **komponentu modulacijskog signala** i **komponente impulsnog nosioca** (oko kojih su parovi bočnih komponenti)



Demodulacija PDM signala

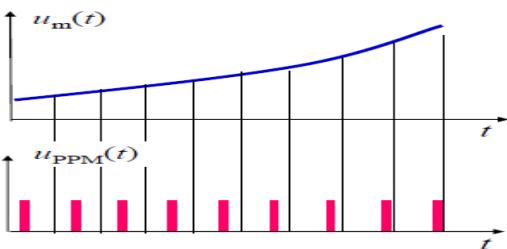
→ Demodulacija se svodi na **filtriranje niskim propustom**

Primjena modulacije trajanja/širine impulsa

→ Pomoću **PDM upravlja se snagom** koja se privodi nekom trošilu **bez korištenja elemenata s gubicima**
(upravljanje brzine vrtnje istosmjernih elektromotora, upravljanje razinom svjetla žarulje)

PPM - MODULACIJA POLOŽAJA / FAZE IMPULSA

PPM - Modulacija položaja/faze impulsa →



PPM je ekvivalentan **modulaciji faze sinusnog signala**.

Vremenski položaj impulsa određen je **razinom modulacijskog signala** u trenutku uzimanja uzorka.

Ima karakteristike **nelinearnog postupka**

Regularni ili uniformni postupak uzimanja uzoraka →

Uzorci se uzimaju u vremenski ekvidistantnim trenucima
Obično na početku intervala **periode trajanja T_p**

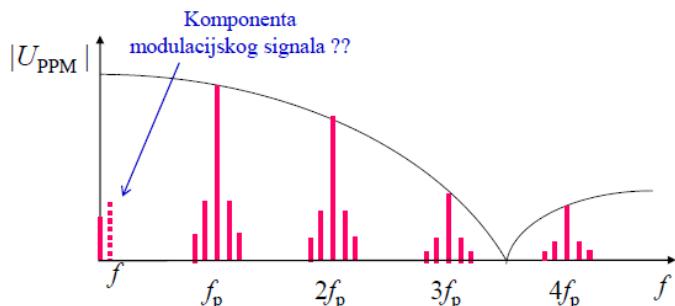
Razine **bočnih komponenti** u paru nisu međusobno jednake
(kao kod PAM)

Prirodni postupak uzimanja uzoraka →

Uzorci se uzimaju u **trenutku pojave impulsa**.
Vremenski razmak **uzoraka** mijenja se u korelaciji s promjenom
razine modulacijskog signala

Spektar PPM signala

→ Sadrži **istosmjernu komponentu** i komponente impulsnog nosioca



Demodulacija PPM signala

→ PPM se može demodulirati jednim **niskopropusnim filtrom**

Dobiveni **demodulirani signal** je **linearno izobličen**.

Njegovim **komponentama** smanjena je **razina** za faktor

$$\frac{\sin \pi f_m \tau}{\pi f_m \tau}$$

pa je potrebno **korigirati amplitudu** signala **nakon filtriranja**

Primjena modulacije položaja/faze impulsa

→ PPM je čest u **optičkim komunikacijama**, gdje nisu izražene smetnje od
višestaznog širenja

PFM - MODULACIJA FREKVENCIJE IMPULSA

PFM - Modulacija frekvencije impulsa →

Broj impulsa u jedinici vremena **razmjeran je razini modulacijskog signala**

Primjena modulacije frekvencije impulsa →

Najviše se primjenjuje u **mjernoj tehnici**

KOMUNIKACIJSKE MREŽE

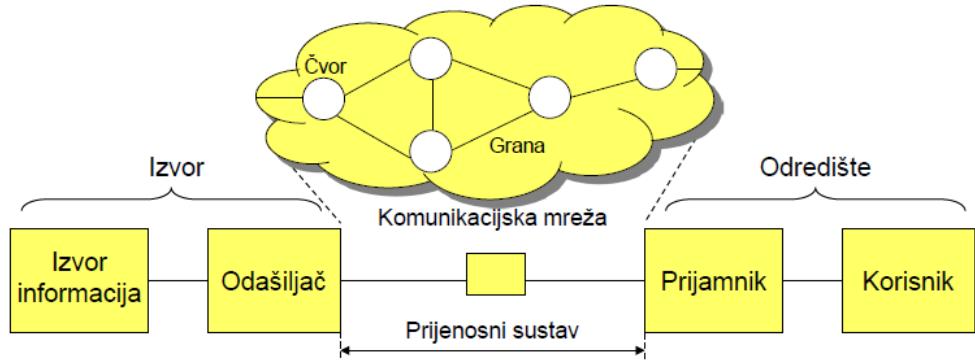
KOMUNIKACIJSKA MREŽA

point-to-point

- Prijenos od **točke do točke** je **najjednostavniji** slučaj prijenosa informacije.
Informacija se prenosi **između** dva izravno povezana uređaja
Nije ekonomično.

Komunikacijska mreža

- **Zamjenjuje prijenosni sustav u općem modelu komunikacijskog sustava**
Čine ju **međusobno povezani komunikacijski sustavi** na koje se spaja korisnička i druga potrebna oprema.
Građena je od **čvorova (node)** i **grana ili veza (link)**



čvorovi i grane

- Uređaji na **izvoru i odredištu** se **povezuju** na **čvorove**.
Čvorovi **razmjenjuju** informaciju i prenose je od **izvora** do **odredišta**
Izvor i odredište su **krajnji čvorovi**
Grane međusobno povezuju čvorove u mrežu

korisnik (user)

- **Uredaj ili sustav** priključen na **mrežu**.

kriteriji za podjelu mreža

- način spajanja uređaja i čvorova;
način prijenosa podataka;
namjena;
postupak komutacije (prespajanje sa **ulaza** na **izlaze**);
topologija;
smjer prijenosa informacije;
veličina;

VRSTE MREŽA

prema načinu spajanja uređaja i čvorova

- **komutirane veze**
Čvorovi služe za komutaciju.
Komutacija je **usmjeravanje informacije** na određeni **prijenosni put** od čvora do čvora, **do željenog odredišta**

zakupljene veze

Privatne **veze** kod kojih su **dviye lokacije** stalno međusobno povezane, a **prijenos informacije** se odvija **uvijek istim putem**

namjenske veze

Isto što i **zakupljene veze**, ali **krajnji korisnici** su **vlasnici veze**

prema načinu prijenosa podataka

- **komutirane mreže**
Komunikacija između **izvora i odredišta** obavlja se preko **međusobno povezanih čvorova** koji **usmjeravaju podatke**.
Čvor može biti **komutator** ili **preklopnik (switch)**, **usmjerivač (router)** l.
mreže s neusmjerenim odašiljanjem (broadcast network)
Nemaju **međučvorove** za komutaciju.
Informacija se prenosi od **izvora svih čvorova** **istovremeno**
Ukoliko je **prijem** omogućen **samo podskupu čvorova**, taj se način prijenosa naziva **višesmjerno odašiljanje (multicasting)**
Primjeri: **lokalne mreže, satelitska radiodifuzija**

prema namjeni mreže

- **javna mreža**
Dostupna **korisnicima** (preplatnicima) s ugovornim odnosom s **mrežnim operaterom**
Preplatniku je omogućeno komuniciranje s **preplatnicima vlastite ili drugih mreža**, te sa **davateljima usluga** u zemlji i inozemstvu, **bez vremenskih i prostornih ograničenja**.

privatna mreža

Namijenjena **ograničenoj skupini korisnika** unutar određene zajednice.
Primjeri: **korporacijska mreža, akademska istraživačka mreža (CARNet)**

prema izvedbi mreže

- **fiksne (nepokretne) mreže**
 - javna komutirana telefonska mreža (**PSTN**)
 - digitalna mreža integriranih usluga (**ISDN**)**pokretne mreže**
 - globalni sustav mobilnih komunikacija (**GSM**)
s proširenjima za komunikaciju podacima:
 - opća usluga paketskog radijskog prijenosa (**GPRS**)
 - poboljšane brzine prijenosa za razvoj GSM-a (**EDGE**)
 - univerzalni sustav mobilnih telekomunikacija (**UMTS**)

prema postupku komutacije →

mreže s komutacijom kanala

Između izvora i odredišta uspostavlja se **namjenski prijenosni put** koji se naziva **kanal**.

Za vrijeme trajanja veze svi podaci se prenose **uspostavljenim kanalom**.

mreže s komutacijom paketa

U izvoru informacije formiraju se **paketi podataka** u kojima se nalazi **adresa odredišta**

Izvor šalje **pakete čvoru** na koji je **spojen**, a on ih šalje do **drugog čvora** najpovoljnijim putem u danom trenutku

Paketi se šalju od čvora do čvora sve do **odredišta**.

Dvije su vrste komutacije paketa

- komutacija paketa **u obliku datagrama**
- komutacija paketa **virtualnim kanalima**

prema topologiji mreže

- **Topologija mreže** je **raspored i način povezivanja čvorova** komunikacijske mreže **fizičkim** (stvarnim) ili **logičkim** (virtualnim) **putem** Dvije mreže imaju **istu topologiju** ako je **konfiguracija veze ista**

Standardne topologije mreže

- **potpuna povezanost**

Svaki čvor je izravno povezan sa **svim ostalim čvorovima** u mreži

Prednost: olakšano usmjeravanje informacije kroz mrežu, pouzdan prijenos

Nedostatak: visoki troškovi izvedbe mreže

Primjena: povezivanje manjeg broja mrežnih čvorova na ograničenom području

- **stablo (tree)**

Hijerarhijska struktura - komunikacija između čvora više razine i s njim povezanog čvora niže razine je **izravna**, a svaka druga komunikacija zahtijeva posredovanje jednog ili više čvorova

Prednost: jednostavno proširenje mreže, olakšano otkrivanje kvarova

Nedostatak: kvarovi glavnih čvorova onemogućavaju komunikaciju segmenata

Primjena: **telefonska mreža**

- **sabirница (bus)**

Svi čvorovi su priključeni na **zajednički prijenosni medij**

Svaki čvor može **odašiljati podatke** u bilo kojem vremenskom trenutku

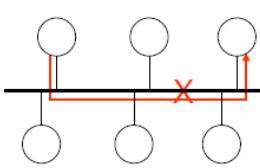
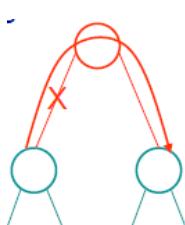
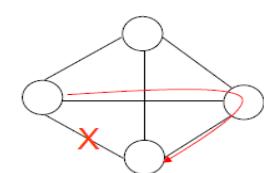
Ti podaci mogu biti primljeni **na svim ostalim čvorovima**

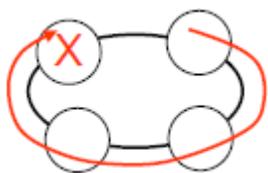
Čvorovi ne sudjeluju u prosljeđivanju podataka (**pasivna tehnologija**)

Prednost: ekonomična uporaba kabela, jednostavno proširenje sustava

Nedostatak: osjetljivost na kvarove

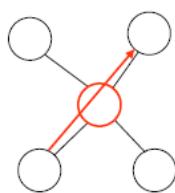
Primjena: **lokalne mreže**





- prsten (ring)

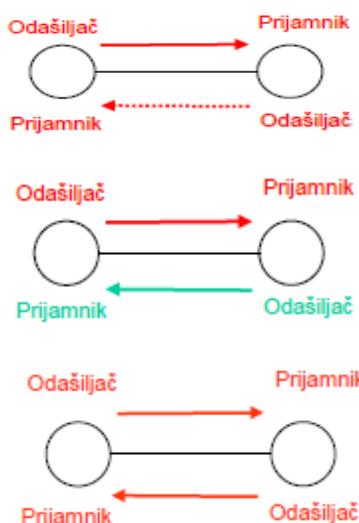
Svi čvorovi su priključeni na **zajednički prijenosni medij** koji čini **zatvorenu petlju (prsten)**. Komunikacija duž petlje je **jednosmjerna**. Podaci poslati s pojedinog čvora **se primaju i obrađuju** na sljedećem čvoru u prstenu, te **prosljeđuju** do idućeg čvora (**aktivna tehnologija**)
Prednost: moguć prijenos na velike udaljenosti (obnavljanje signala u čvoru)
Nedostatak: osjetljivost na kvarove (jedan čvor izvan funkcije prekida petlju)
Primjena: **optičke mreže** (mreže velikog kapaciteta)



- zvijezda (star)

Svi čvorovi su povezani na **središnji čvor** preko kojeg se obavlja **sva komunikacija** (**centralizirano upravljanje mrežom**)
Prednost: olakšano otkrivanje kvarova
Nedostatak: kvar središnjeg čvora onemogućava funkcioniranje cijele mreže
Primjena: **lokalni mreži**

prema smjeru prijenosa informacije



- jednosmjerne mreže (simplex)

Informacija se može odašiljati **samo u jednom smjeru**
Jedan čvor je odašiljač a drugi je prijemnik

- poludvosmjerne mreže (half-duplex)

Informacija se može odašiljati **u oba smjera ali ne istovremeno**
Čvor može biti i odašiljač i prijemnik ali ne u istom trenutku.
Potrebno je **koristiti proceduru** kojom se jedan čvor određuje kao odašiljač, a drugi kao prijemnik

- dvosmjerne mreže (full-duplex)

Informacija se može odašiljati **u oba smjera istovremeno**
Čvor istovremeno može biti i odašiljač i prijemnik, a podaci se prenose u oba smjera u isto vrijeme (**djelotvoran način komunikacije**).

prema veličini mreže



Udaljenost	Mreža se nalazi na
1 m	na istom kvadratnom metru
10 m	u istoj prostoriji
100 m	u istoj zgradi
1 km	u istoj organizacijskoj jedinici
10 km	u istom gradu
100 km	u istoj državi
1 000 km	na istom kontinentu
10 000 km	na više kontinenata

} Osobna mreža
 } Lokalna mreža
 } Gradska mreža
 } Regionalna mreža

- osobne mreže (PAN)

Namjenjene su **jednoj osobi**.
Primjer: **radijska mreža** koja povezuje **središnju jedinicu računala** s mišem, tipkovnicom i pisačem

- lokalne mreže (LAN)

Privatne mreže **unutar jedne ili više zgrada** koje pripadaju **istom organizacijskom području**.

- gradske mreže (MAN)

Pokrivaju područje **jednog grada** ili **većeg naselja**
(mreže za kabelsku tv, mreže za fiksni širokopojasni radijski pristup)

- regionalne mreže (WAN)

Pokrivaju **veliko geografsko područje**

MREŽE S KOMUTACIJOM KANALA

- faze komunikacije** → Komunikacija se obavlja u **tri faze**:
- uspostavljanje kanala**
- **izvor** izražava želu za uspostavljanjem veze (**signal poziva**)
 - **mreža** određuje **namjenski prijenosni put (kanal)**
 - **kanal** zauzima **fiksni kapacitet** pojedine grane **za vrijeme trajanja veze**
 - **poziv** se odbacuje ako **potrebni kapacitet kanala nije raspoloživ**
- prijenos podataka**
- započinje **nakon uspostavljanja kanala**
 - **svi podaci** se prenose **istim kanalom**
- raskidanje veze**
- nakon završetka komunikacije **veza se raskida**
 - **zahtjev za raskid** dolazi iz **izvora ili odredišta**
 - nakon raskida veze, **mreža** oslobađa **sve resurse**
- kašnjenje signala u mreži s komutacijom signala** →
- zbog **uspostavljanja poziva (signal poziva i potvrda)**
 - zbog **propagacije** (širenja signala kroz medij)
- Prednosti mreže s komutacijom signala** →
- **kontinuirani prijenos informacije s malim kašnjenjem**
 - komunikaciju **u stvarnom vremenu**
- Nedostaci mreže s komutacijom signala** →
- **kanal** zauzima **fiksni kapacitet** za cijelo vrijeme trajanja veze
 - **neučinkovito i skupo**
- Primjer mreže s komutacijom signala** →
- **telefonska mreža (PSTN),**
 - **digitalna mreža s integriranim uslugama (ISDN)**

MREŽE S KOMUTACIJOM PAKETA

- komunikacija** → **Informacija se u izvoru dijeli na pakete.**
Svakom paketu se dodjeljuje **redni broj**.
Paket se sastoji od: **zaglavlja, podataka i završnog dijela**.
Zaglavje i završni dio prenose **upravljačke informacije**.
U njima se mora nalaziti **adresa odredišta**
Paketi se prenose **od čvora do čvora** prema **odredištu**
Ako u **određenoj grani** nema slobodnog **kapaciteta**,
paketi čekaju u **spremnicima**
- vrste komutacije paketa** →
- komutacija paketa u obliku **datagrama**
 - komutacija paketa **virtualnim kanalima**
- Komutacija paketa u obliku datagrama** → **Datagrami su paketi s neovisnim usmjeravanjem**
Omogućavaju **nespojnu mrežnu uslugu**
(prethodna uspostava veze **izvora i odredišta nije potrebna**).
Niz paketa može biti primljen **u promijenjenom redoslijedu**
- kašnjenje signala u mreži s komutacijom datagrama** →
- zbog **čekanja paketa u spremnicima čvora**
 - zbog **propagacije** (širenja signala kroz medij)
- kašnjenje signala ovisi o: **duljini paketa i kapacitetu pojedine grane**
kašnjenje se smanjuje: **porastom kapaciteta i smanjenjem duljine paketa**
- Primjer mreže s komutacijom datagrama** → **Internet**

Komutacija paketa virtualnim kanalima

- Objedinjuje komutaciju kanala i komutaciju paketa.
Podaci se šalju u obliku paketa.
Svi paketi **jednog niza** prenose se **unaprijed uspostavljenim virtualnim kanalom**. Taj se put **označava u čvorovima** na tom putu.
Paketi dolaze do odredišta **u nepromijenjenom redoslijedu**.
Nakon završetka komunikacije **virtualni kanal** se **prekida**.

Primjer mreže s komutacijom paketa virtualnim kanalima

- mreže s asinkronim načinom prijenosa

Prednosti mreže s komutacijom paketa

- - kapaciteti mreže su zauzeti **samo** za vrijeme **prijenosu paketa**
- u vremenskim intervalima kada **jedan izvor** ne šalje pakete,
mogu se prenositi paketi drugih izvora

Nedostaci mreže komutacijom paketa

- - zbog **kašnjenja** i **promjenjivosti kašnjenja** **otežana** je **komunikacija** u **stvarnom vremenu**
- dio **kapaciteta mreže** se troši na **prijenos upravljačkih informacija**

vjeratnost blokiranja

- Vjeratnost da **pozivajući korisnik** **ne dobije vezu**.
Koristi se za **usporedbu mreža s komutacijom kanala**
Vjeratnost blokiranja **i-te grane** ovisi o: **broju kanala u grani**,
ulaznom prometu

kašnjenje paketa

- **Srednja vrijednost vremena zadržavanja paketa** u mreži.
Koristi se za **usporedbu mreža s komutacijom paketa**
Karakteristike **i-te grane** ovise o: **brzini prijenosa u grani**,
duljini paketa,
ulaznom prometu

TEHNIKE MULTIPLEKSIRANJA

multipleksiranje

- postupak kojim se **većem broju izvora i odredišta** omogućava **istodobna** upotreba **iste grane** ili **veze (link)** u mreži

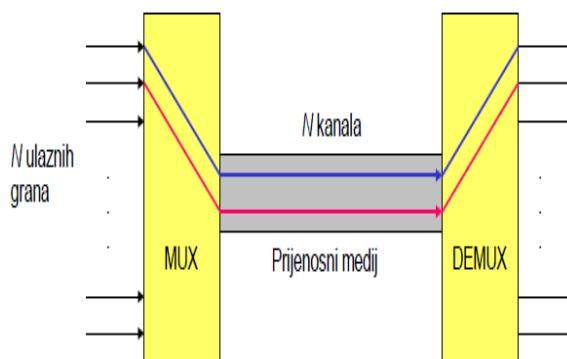
načelo multipleksiranja

- u **uredjaj za multipleksiranje (MUX)** ulazi **N grana**,

- **MUX** je povezan s **uredjajem za demultipleksiranje (DEMUX)** **jednom vezom od točke do točke**

- **MUX** kombinira podatke iz **N grana** u **jedan zajednički signal**

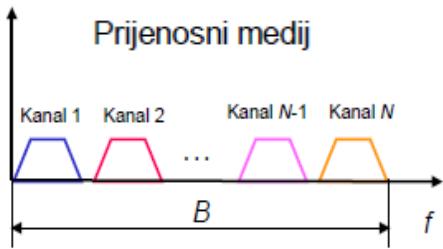
- **DEMUX** **izdvaja podatke i dostavlja ih na odgovarajući izlaz**



načini raspodjele kapaciteta prijenosnog medija

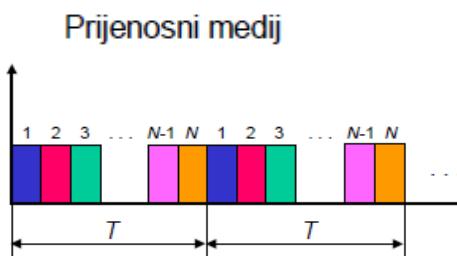
- - raspodjela po frekvenciji,
- raspodjela po vremenu
- raspodjela po kodu
- raspodjela po valnoj duljini
- statistička raspodjela

multipleksiranje po frekvenciji (FDM)

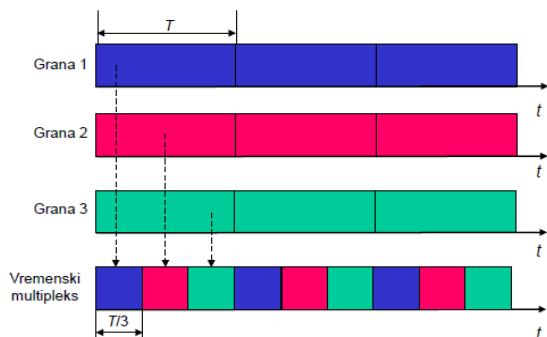


- raspoloživi **pojas frekvencija B** dijeli se na manje dijelove - **kanale**
- između susjednih kanala ostavlja se **zaštitni pojas frekvencija**
- **zaštitni pojasevi** se ne koriste za prijenos podataka (uzrok frekvencijske neučinkovitosti **FDM-a**)
- koristi se za: **radiodifuziju radijskih i televizijskih programa, satelitske komunikacije,**

multipleksiranje po vremenu (TDM)



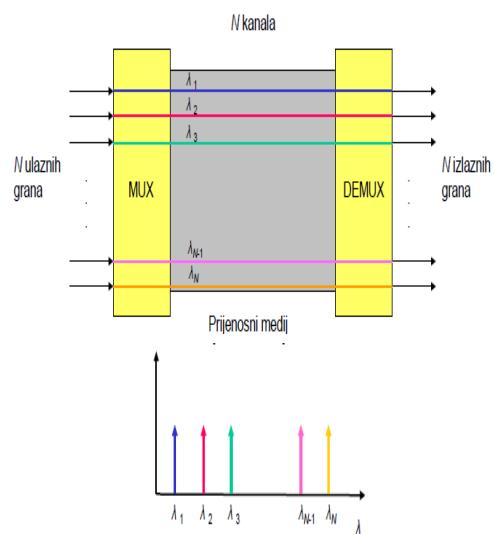
- raspoloživo **vrijeme** dijeli se na vremenske **okvire T (frame)**, a svaki **okvir**, na manje vremenske **odsječke (slot)** jednog trajanja
- svakom **paru** (ulaznoj i izlaznoj **grani**) dodjeljuje se **određeni vremenski odsječak (slot)**
- **kanal** je vremenski niz odsječaka namijenjenih **jednom paru**
- fiksno vrijeme trajanja **odsječka** je uzrok neučinkovitosti **TDM**
- koristi se za: **prijenos digitalnog telefonskog signala, satelitske komunikacije,**



Primjer multipleksiranja po vremenu s tri ulazne grane

- vremenski odsječci ($T/3$) mogu predstavljati **bitove ili oktete**
- svaki **kanal** može na **zajedničkom prijenosnom putu** koristiti samo **1/3 vremena izvornog kanala**
- **brzina prijenosa (kapacitet)** zajedničkog prijenosnog puta je **3 puta veći od brzine svakog ulaznog kanala**

multipleksiranje po valnoj duljini (WDM)

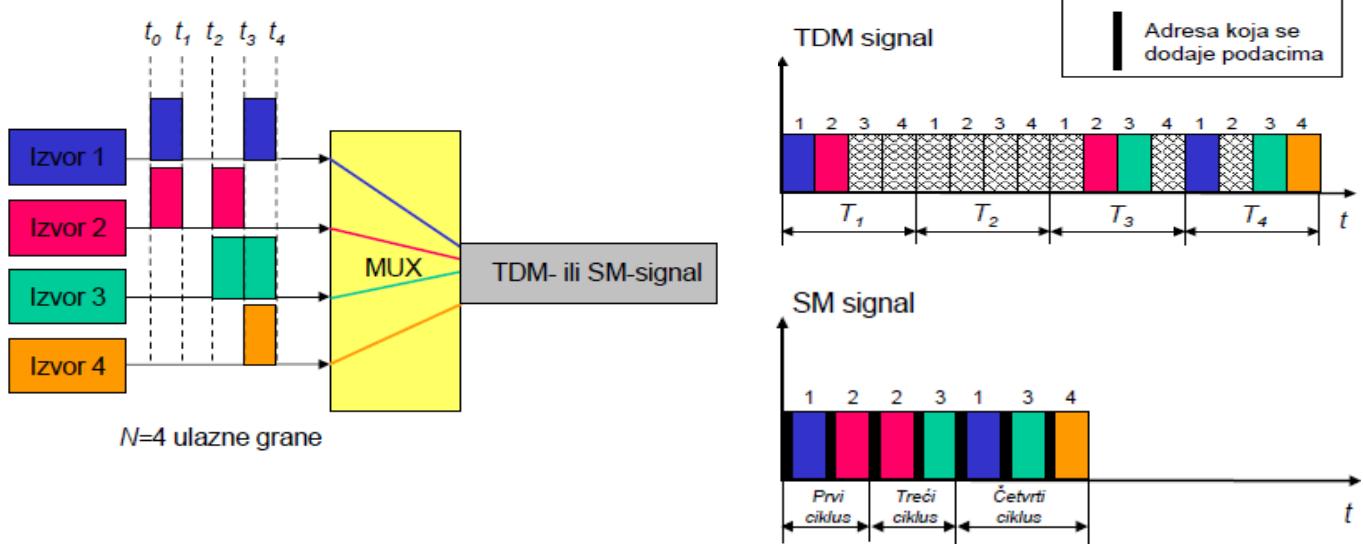


- koristi se **samo u optičkim komunikacijskim sustavima**
- svakom **paru** (ulaznoj i izlaznoj **grani**) dodjeljuje se **određena valna duljina** koja se naziva **optički kanal**
- više različitih **valnih duljina** se **multipleksira i prenosi** jednim **svjetlovodom**
- **valna duljina** je proporcionalna recipročnoj vrijednosti **frekvencije**, pa je **WDM** koncepcijски sličan **FDM-u**
- **raspoloživa širina pojasa** iznosi nekoliko **THz**
- razvijena su **dva sustava WDM-a:**
rijetki CWDM
koristi **2 do 10 kanala** po svjetlovodu s **razmakom kanala od 5 - 50 nm**
gusi DWDM
koristi **10 do 100 kanala** po svjetlovodu s **razmakom kanala od 0,1- 5 nm**

statističko multipleksiranje (SM)

- primjenjuje se na podatke koji su organizirani u pakete.
- temelji se na činjenici da **izvori** spojeni na **ulaz MUX-a** ne šalju podatke **stalno**, a **različiti izvori** rijetko šalju podatke **istovremeno**
- **vremenski odsječci** se **dinamički** dodjeljuju **pojedinim izvorima** i to **u skladu s količinom podataka** koju **izvor** generira
(**veći broj vremenskih odsječaka** dodjeljuje se **izvoru** koji generira **veći broj paketa**)

usporedba TDM i SM



- na **ulaz MUX-a** spojene su **4 grane** ($N = 4$), a na **svaku granu** po **jedan izvor informacije** proces **multipleksiranja** započinje u trenutku t_0
u trenutku t_1 na raspolaganju su **paketi iz izvora 1 i 2**
u intervalu od t_2 do t_3 podatke generiraju **izvori 2 i 3**

uredaj za multipleksiranje u TDM sustavu

- **podaci** iz intervala od t_0 do t_1 iz **izvora 1 i 2** smještaju se u **odgovarajuće vremenske odsječke** a **odsječci** koji pripadaju **izvorima 3 i 4** prenose se **prazni**
- u intervala od t_1 do t_2 **svi odsječci** se prenose **prazni**
- u intervala od t_2 do t_3 multipleksiraju se podaci iz **izvora 2 i 3**, **odsječci** koji pripadaju **izvorima 1 i 4** prenose se **prazni**
- u intervala od t_3 do t_4 multipleksiraju se podaci iz **izvora 1, 3 i 4**, **odsječak** koji pripada **izvoru 2** prenosi se **prazan**

uredaj za multipleksiranje u SM sustavu

- **podaci** iz intervala od t_0 do t_1 iz **izvora 1 i 2** smještaju se u **odgovarajuće vremenske odsječke** aiza njih se smještaju podaci iz intervala od t_2 do t_3 , pa na kraju podaci iz intervala od t_3 do t_4

KOMUNIKACIJSKI PROTOKOLI

KOMUNIKACIJSKI PROTOKOL

zadatak komunikacijske mreže →

Omogućiti razmjenu informacija između uređaja.

To zahtijeva visoki stupanj suradnje između uključenih strana.

Suradnja se postiže obvezivanjem **uključenih strana** da se pridržavaju **skupa pravila (protokola)** za komunikaciju.

Složenost zadataka koji treba ispuniti komunikacijska mreža reducira se podjelom u **podzadatke**.

protokol

→ **Skup pravila i dogovora** koji se koriste pri **komunikaciji entiteta** različitih sustava.
Entitet je aktivni dio sustava koji ima sposobnost slanja i primanja **informacije**

ključni elementi protokola →

Sintaksa

Format, veličina i sadržaj **poruke ili paketa**

Semantika

Značenje **poruke ili paketa** (radnje koje treba poduzeti kao odgovor)

Vrijeme

Kada odbaciti poruku ili paket, ponovno ih odaslati, odustati od slanja, itd

SLOJEVI MREŽE

slojevi mreže →

Komunikacijska mreža je organizirana tako da je vertikalno podjeljena na **slojeve (layer)**.

Sloj se sastoji od jednog ili više entiteta.

Ravnopravni entiteti su entiteti koji se nalaze na istom **sloju** ali na različitim uredajima

Svaki sloj provodi točno definirane **funkcije**

Protokol sloja N upravlja komunikacijom između **ravnopravnih entiteta** sloja N

Protokolni složaj (protocol stack) je skup protokola koje koristi određeni sustav.

Za svaki sloj definirani su: **usluge sloja; sučelja sa susjednim slojevima; protokoli;**

Pojedini sloj pruža usluge višem sloju (sloj N pruža usluge sloju N+1)

Sučelje (interface) između slojeva može biti: - **skup instrukcija i podataka (objekt),**

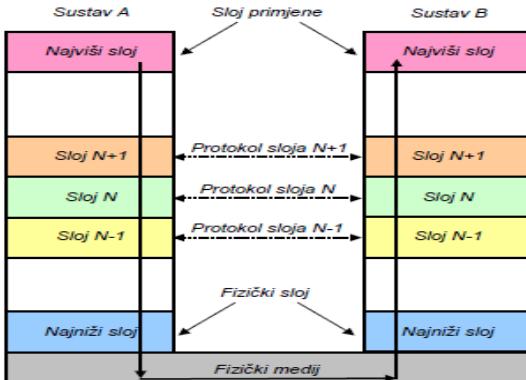
- **usluga koju jedan sloj pruža višem sloju**

Protokol sloja N određuje **komunikacijsko ponašanje** dva ravnopravna entiteta sloja N
(dva procesa, dva računala, dva korisnika)

komunikacija između slojeva

→

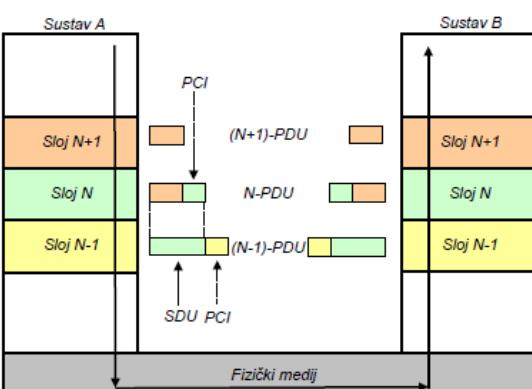
Komunikacija se ne provodi izravno između **sloja N** jednog sustava i **sloja N** drugog sustava.



Viši sloj prosljeđuje podatke i upravljačke informacije **sloju neposredno ispod sebe** sve dok se ne dođe do **najnižeg sloja**

Najviši sloj uvijek je **aplikacijski sloj** koji predstavlja **aplikacije i usluge za korisnike**

Najniži sloj uvijek je **fizički sloj** ispod kojeg se nalazi **fizički medij** kroz koji se **stvarno provodi komunikacija**



N-PDU – jedinica podatka protokola sloja N

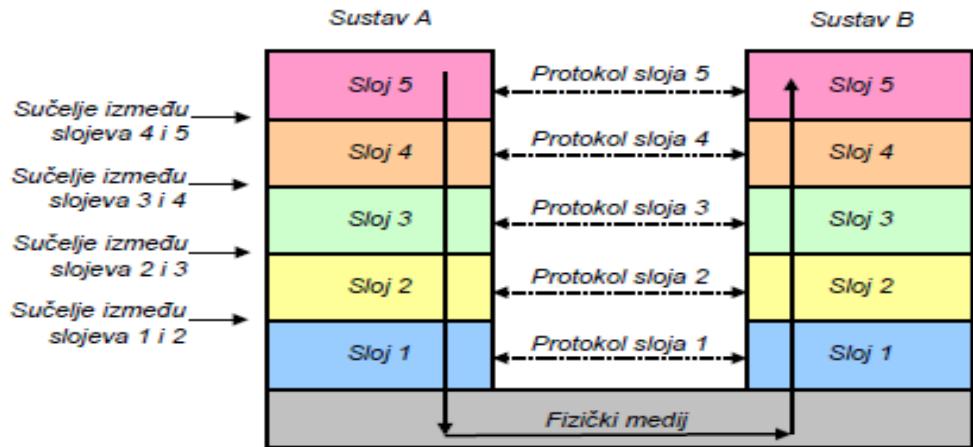
Jedinica podatka koju koristi **protokol** sloja N

Sastoje se od: - **PCI** – protokolne upravljačke informacije (zaglavljje)

- **SDU** – jedinice podatka usluge

Primjer – mreža s 5 slojeva

→ Stvarna komunikacija označena je punom crtom,
a prividna komunikacija isprekidanom crtom



tok podataka u mreži s 5 slojeva

→ Poruka **M** generira se u **sloju 5 pošiljatelja** i prenosi u **sloj 4**

U **sloju 4** dodaje se **zaglavlj H4**

Veličina paketa koje se može slati **protokolom sloja 3** je **ograničena** (u ovom primjeru)

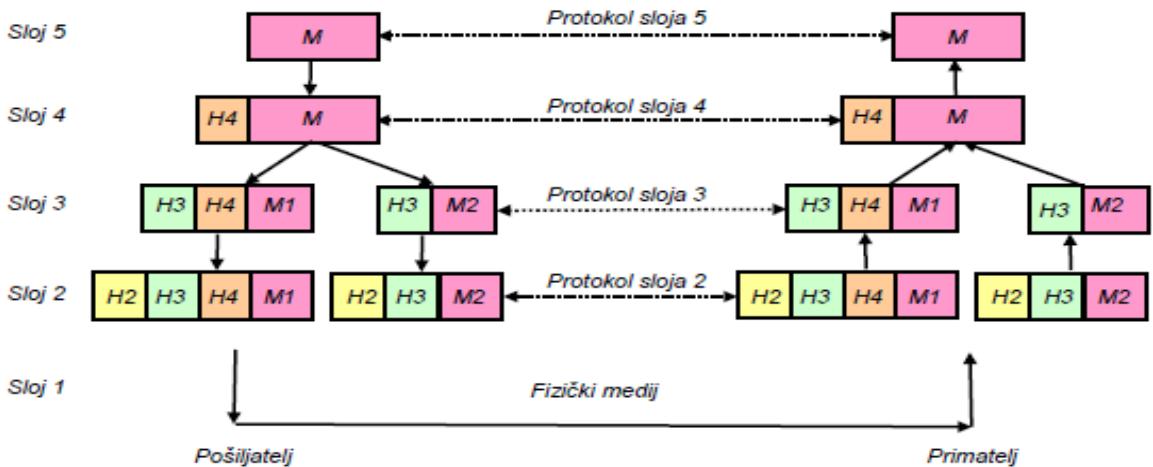
U **sloju 3** se **velika dolazna poruka** dijeli na **dva dijela (M1 i M2)**, dodaje se **zaglavlj H3**, i sve se prosljeđuje sloju 2

Sloj 2 dodaje **svoje zaglavje H2** i **sve prosljeđuje sloju 1**

Sloj 1 **fizički šalje** podatke

Na strani **primatelja** uklanjaju se **zaglavlj** uzlazno od sloja do sloja

U **horizontalnom smjeru**, **ravnopravni slojevi** virtualno komuniciraju pomoću **odgovarajućeg protokola**



projektiranje slojeva → **funkcije koje mora obavljati svaki sloj**

- raspoznavanje pošiljatelja i primatelja
- određivanje pravila prijenosa informacije

funkcije koje može obavljati svaki sloj

- upravljanje pogreškama (otkrivanje pogrešaka i ispravljanje pogrešaka)
- održavanje ispravnog redoslijeda paketa
- upravljanje tokom podataka (ograničenje brzine odašiljanja ili slanje povratne poruke)
- upravljanje dužinom paketa (mehanizmi za rastavljanje i sastavljanje paketa)
- multipleksiranje / demultipleksiranje

vrste usluga

koje sloj nudi
sloju iznad sebe

→ **spojne usluge**

Usluge s uspostavljanjem izravne veze (primjer telefonski razgovor)

Prijenosu informacija prethodi uspostavljanje veze (kojim se određuje put kroz mrežu)

Veza može biti: stvarna, virtualna, logička, ...

Po završetku prijenosa podataka veza se prekida

nespojne usluge

Usluge bez uspostavljanja izravne veze (primjer slanje 2 pisma na istu adresu)

Svaka se jedinica podataka usmjerava i isporučuje neovisno o ostalim jedinicama.

Ne jamči se isporuka podataka na odredište (usluga je nepouzdana)

usluge s potvrdom prijama →

Pouzdane usluge jer omogućavaju prijenos bez gubitaka

Primatelj mora potvrditi prijam jedinice podatka.

Potvrđivanje prijama zahtijeva dodatne kapacitete mreže i unosi kašnjenje

usluge bez potvrde prijama →

Nepouzdane usluge jer odredište ne potvrđuje prijam jedinica podatka

i moguć je njihov gubitak.

**odnos između
usluga i protokola**

→

Usluga je skup osnovnih operacija koje niži sloj pruža višem sloju unutar jednog sustava

Protokol je skup pravila i dogovora koji vrijede u komunikaciji između istih slojeva različitih sustava

Protokol se odnosi na realizaciju usluge i nije vidljiv korisniku usluge

arhitektura mreže →

Skup slojeva i protokola koji omogućavaju razmjenu informacija između entiteta

Detalji realizacije i specifikacija sučelja nisu dio arhitekture mreže

prednosti slojevite arhitekture mreže →

olakšano projektiranje mreže;

olakšana rekonstrukcija mreže;

nedostaci slojevite arhitekture mreže →

nedjelotvornost (svaki sloj dodaje vlastite upravljačke informacije);

ograničenost (sloj N ne može pristupiti slojevima ispod sloja N-1);

redundancija (neke funkcije se ponavljaju u svakom sloju);

REFERENTNI MODELI

- referentni modeli →**
- Definiraju **koncepte i postavljaju norme**
 - Utvrđuju **pravila povezivanja sustava u mrežu**, te **mreža** međusobno
 - Omogućavaju stvaranje **otvorenih rješenja** neovisnih o proizvođaču opreme
- osnovni referentni modeli**
- **OSI** → referentni model **povezivanja otvorenih sustava**
 - **TCP/IP** → protokol za upravljanje prijenosom TCP i internetski protokol IP

Referentni model OSI

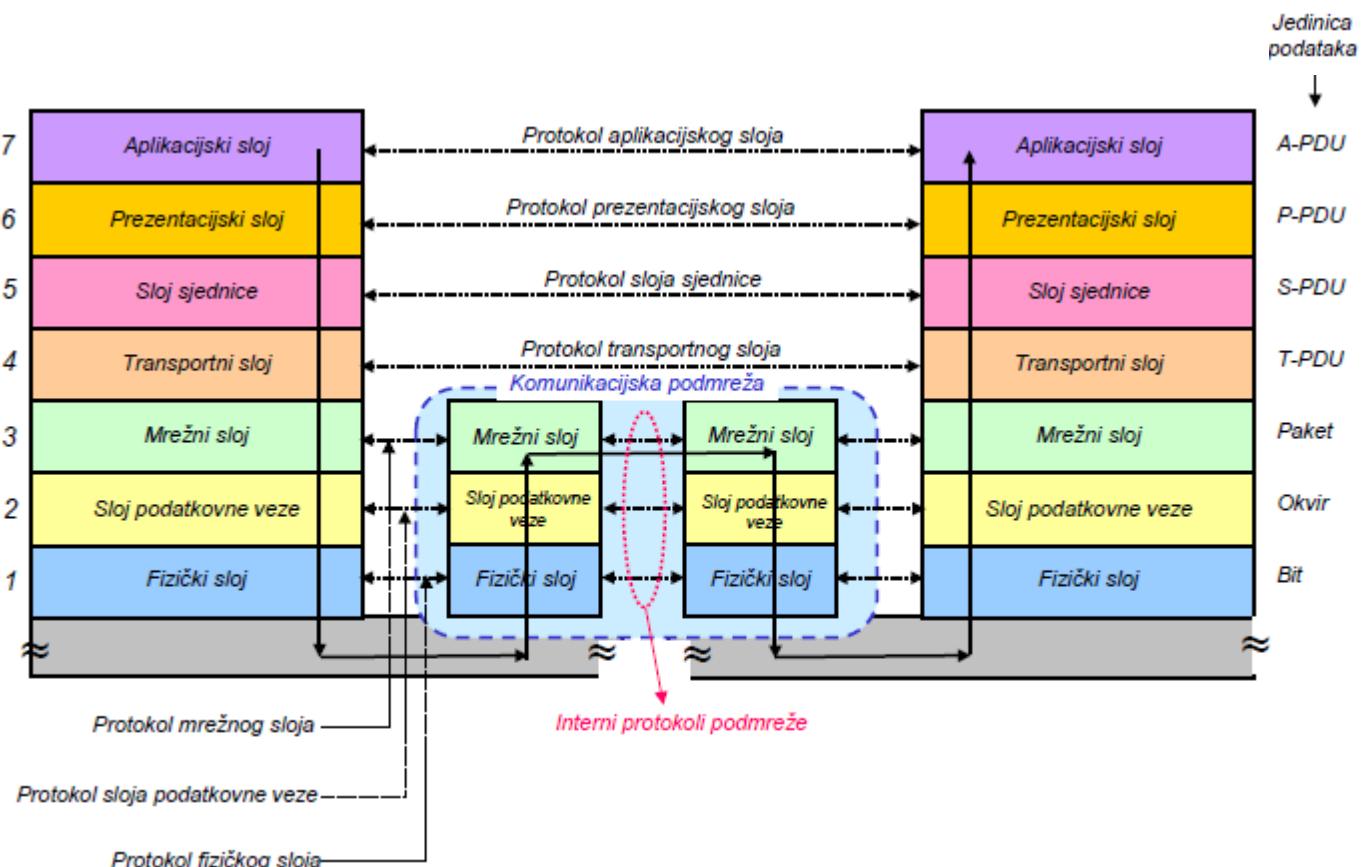
Sastoji se od **7 slojeva**



1. **fizički sloj** – omogućava **prijenos signala u komunikacijskom kanalu**
2. **sloj podatkovne veze** – Omogućava **komunikaciju između 2 izravno povezana čvora**.
Uzalni podaci se dijele u **okvire** i šalju jedan za drugim
Primatelj potvrđuje **prijam okvira** slanjem **okvira potvrde**.
Osnovne funkcije: prijenos okvira; upravljanje pogreškama; upravljanje tokom podataka
Usluge koje sloj podatkovne veze pruža mrežnom sloju:
 - **nespojne usluge bez potvrde prijama** (npr. LAN)
 - **nespojne usluge s potvrdom prijama** (radijski sustavi)
 - **spojne usluge s potvrdom prijama** (sustavi visoke pouzdanosti)
3. **mrežni sloj** – Osigurava **neovisnost viših slojeva** o tehnologijama prijenosa i komutacije
Sloj podatkovne veze osigurava **vezu** između **dva susjedna čvora**, ali **ako** između njih **postoje međučvorovi** mora se aktivirati **mrežni sloj**.
Osnovne funkcije: uspostava, održavanje i raskidanje **veza**; usmjeravanje **jedinica podataka** (paketa) od **izvora** prema **odredištu**; upravljanje **pogreškama**; upravljanje **tokom podataka**; povezivanje **heterogenih mreža**
4. **transportni sloj** – Osigurava **pouzdan i transparentan prijenos podataka** između **izvora i odredišta**
Osnovne funkcije: definiranje **transportnih usluga** koje se nude **sloju sjednice**; upravljanje **pogreškama s kraja na kraj**; upravljanje **tokovima podataka s kraja na kraj**;
5. **sloj sjednice** – Usklađuje **sustave** koji **međusobno komuniciraju** i omogućava korisnicima **različitih sustava** da međusobno uspostave **sjednicu**
Osnovne funkcije: uspostavlja, upravlja i raskida **vezu (sjednicu)**; upravlja **dijalogom** između **aplikacija**; dodjeljuje **prava** za komuniciranje;
6. **prezentacijski sloj** – Omogućava **aplikacijama neovisnost** u načinu prikaza **podataka**
Osnovne funkcije: obrađuje **apstraktne strukture podataka**; omogućava **promjenu formata podataka** koji se prenose;
7. **aplikacijski sloj** – Omogućava **korisnicima** pristup **okruženju OSI** i stvara uvjete za **realizaciju usluga**
Osnovne funkcije: sadrži **skup protokola** koji su najčešće potrebni **korisnicima**;

komunikacija između dva sustava

- Aplikacijski sloj jednog **sustava** poziva aplikacijski sloj **sustava** koji treba primiti **podatke** i s njim uspostavlja **ravnopravni odnos** koristeći **protokol sloja 7**
- **Protokol sloja 7** zahtijeva od **sloja 6** potrebne **usluge**. **Sloj 6** uspostavlja **ravnopravni odnos** s **istim slojem sustava** koji treba primiti **podatke** koristeći **protokol sloja 6**
- **Protokol sloja 6** zahtijeva od **sloja 5** potrebne **usluge**, itd., sve do **fizičkog sloja**
- **Protokoli slojeva 7-4** protežu se **izravno** između ravnopravnih slojeva dva **sustava**,
- **Protokoli slojeva 3-1** se **lančano vežu** jedan za drugi, tako da **veza** između odgovarajućih ravnopravnih slojeva nije **izravna**



podjela korisničkih i upravljačkih informacija na slojeve

- Prva **4 sloja** obavljaju **transport korisničkih i upravljačkih informacija** (slojevi 1 i 2 – prijenos, slojevi 3 i 4 – komutacija)
- Slojevi **5, 6 i 7** **procesiraju upravljačke informacije u komutacijskim čvoristima**

prednosti modela OSI

- jasne granice između **usluge, sučelja i protokola**
- može se koristiti za **različite skupove protokola** i za opisivanje **različitih mreža**
- **stari protokoli** mogu se jednostavno zamijeniti **novim protokolima**

nedostaci modela OSI

- **protokoli se teško implementiraju** i nedjelotvorni su u radu.
- neujednačena **raspodjela funkcija slojeva**
(sloj podatkovne veze i mrežni sloj jako opterećeni, sloj sjednice i prezentacijski sloj prazni)
- neke **funkcije se ponavljaju** u svakom **sloju**

Referentni model TCP/IP

Sastoji se od **4 sloja**.

Odnosi se na mreže s komutacijom paketa gdje se **svaki paket usmjerava zasebno (komutacija datagrama)**



1. **sloj pristupa mreži** – omogućava razmjenu podataka između krajnjeg čvora i mreže
2. **mrežni (internetski) sloj** – Temelji se na internetskom protokolu **IP**
Definira **format paketa i adresiranje**.
Usmjerava **pakete** prema odredištu ili u drugu mrežu.
3. **transportni sloj** – Osigurava **pouzdan i transparentan prijenos podataka** između **izvora i odredišta**. U njemu su definirana **dva protokola**:
 - **protokol za upravljanje prijenosom (TCP)**
Omogućava prijenos **bez pogrešaka** u nepromijenjenom redoslijedu
Upravlja **tokom podataka** (**brzi pošiljatelj** ne može **zagušiti sporog primatelja**)
 - **protokol za korisničke datagrame (UDP)**
Namijenjen je **aplikacijama** koje **same** (umjesto protokola **TCP**) uređuju **pakete** i upravljaju **tokom podataka**
4. **aplikacijski sloj** – Sadrži **aplikacijske protokole** koji pružaju **uslugu** korisniku:
 - **korisnički protokoli**
 - SMTP** – protokol za **elektroničku poštu**
 - HTTP** – protokol za **preuzimanje stranica s WWW**
 - **protokoli sustava**
 - DNS** – sustav za **imenovanje domena**
 - SNMP** – protokol za **upravljanje mrežom**

prednosti modela TCP/IP - jednostavni model

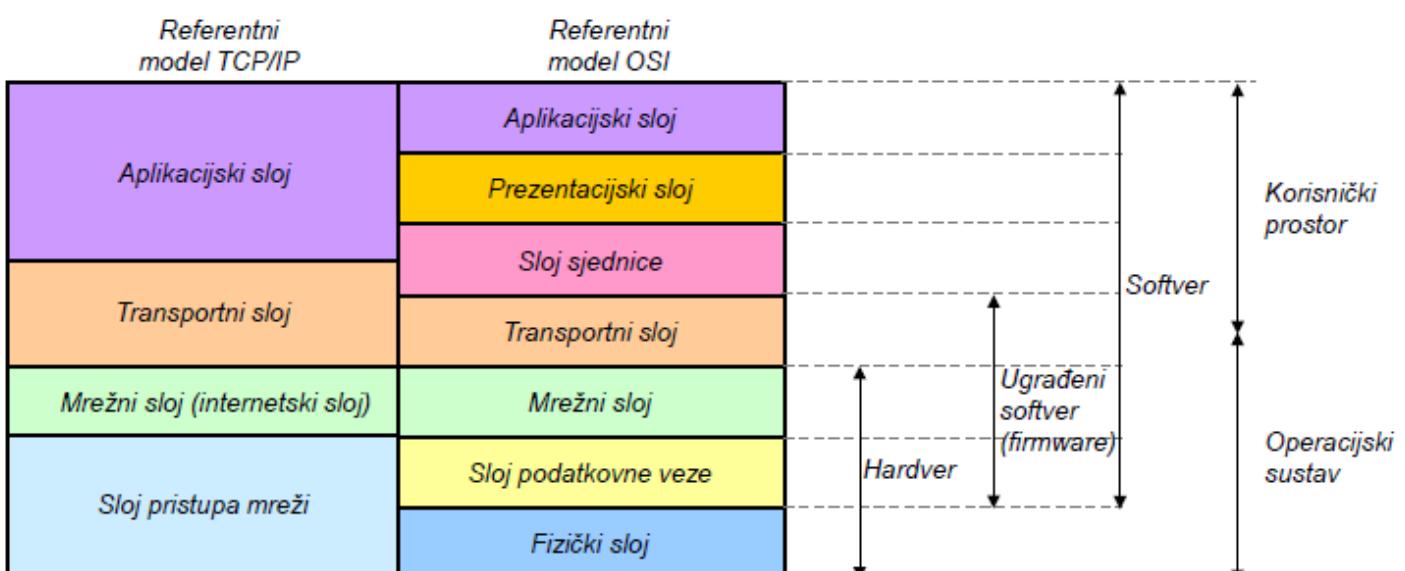
- u **transportnom sloju** podržava **spojne i nespojne usluge**

nedostaci modela TCP/IP - **nisu definirane jasne granice između usluge, sučelja i protokola.**

- **fizički sloj i sloj podatkovne veze nisu dio** modela

Usporedba OSI i TCP/IP

S označenim **načinom implementacije** pojedinih **slojeva**



MREŽNI SLOJ - IP PROTOKOL

- IP protokol** → 2 verzije protokola: **Ipv4; Ipv6.** Nespojni protokol.
 Informacije se prenose kroz mrežu svaka zasebno u paketima.
 Paketi se prenose TCP ili UDB protokolima
 Protokoli za usmjeravanje omogućuju prijenos i dostavu podataka svakom uređaju.
 IP adrese označuju svaki uređaj na mreži.

- IP adresa (v4)**
- 32 bita: 4 x 8 bita (primjer adrese 161.54.19.201)
 - adresa se sastoji od 2 dijela: prvi dio opisuje vrstu i adresu mreže (Network ID)
 drugi dio opisuje adresu računala (Host ID)
 - adresa mreže dobiva se računajući logički I između adrese računala i mrežne maske (opisuje veličinu mreže)

Primjer:

adresa računala mrežna maska

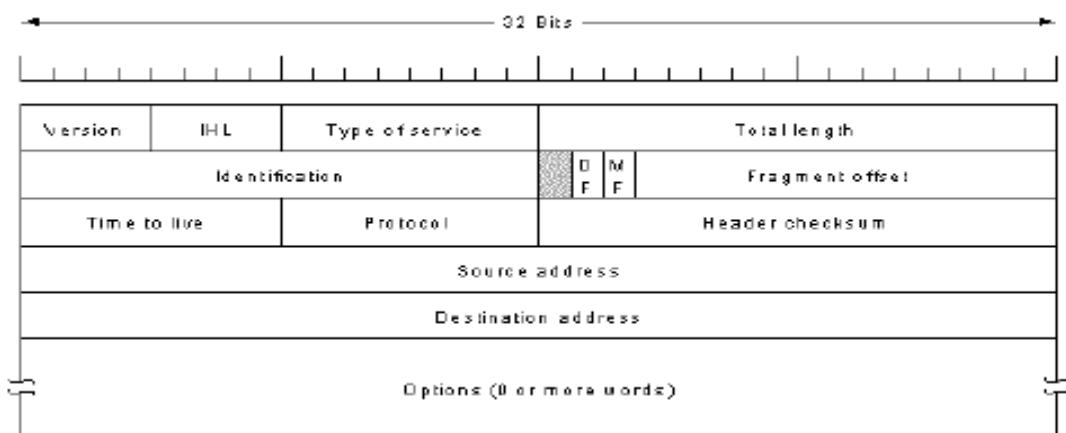
192.168.1.100 & **255.255.255.0** → **192.168.1.0** adresa mreže

192.168.1.255 adresa svih računala u mreži

Obzirom da su potrošene adrese **0** i **255** ostalo je još **254** moguće adrese
 To je maksimalni broj računala u toj mreži

- klase IP adresa** → A – adresa mreže prvih **8 bita** (prvi bit **0**)
 B – adresa mreže prvih **16 bita** (prva 2 bita **10**)
 C – adresa mreže prvih **24 bita** (prva 3 bita **110**)
 D – višeodredišna adresa – **multicast slanje** (prva 4 bita **1110**)
 E – rezervirano (prva 5 bita **11110**)

IP zaglavlj



- Verzija** → verzija protokola (**IPv4** ili **IPv6**) kojoj pripada **datagram** (paket s neovisnim usmjeravanjem)
- IHL** → duljina zaglavlja u 32-bitnim riječima (min 5x32, max 15x32)
- Tip usluge** → vrsta usluge koju čvor očekuje (prioritet, zastoj, propusnost, pouzdanost)
- Ukupna duljina** → duljina **datagrama** (zaglavlja i podataka)
- Identifikacija** → omogućuje da odredišni čvor odredi kojem datagramu pripada fragment koji je stigao
- DF** → Zabrana fragmentiranja **datagrama** jer ga odredišni čvor ne može ponovno složiti
- MF** → Oznaka da pristigli fragment nije zadnji fragment
- Pomak fragmenta** → Označuje poziciju fragmenta unutar **datagrama**
- Vrijeme života paketa** → Smanjuje se pri svakom skoku, kad dosegne nulu, paket se odbacuje
- Protokol** → Obavijest mrežnom sloju koji će se protokol prijenosnog sloja koristiti (**TCP, UDB**)
- Kontrolni zbroj zaglavlja** → Koristi se za provjeru pogreške u zaglavljju
- Izvorišna adresa** → adresa izvorišnog čvora
- Odredišna adresa** → adresa odredišnog čvora

MREŽNI SLOJ - IPv6 PROTOKOL

Razlike IPv6 u odnosu na IPv4



- **Veći adresni prostor** (2^{128} adresa, kod **IPv4** 2^{32} adresa).
- Za prikaz **IPv6** adresa koriste se **heksadecimalni znakovi**
- **Višedredišno adresiranje** u **osnovnoj specifikaciji** (kod **IPv4 opcija**)
- **Sigurnost i autentifikacija** u **osnovnoj specifikaciji** (kod **IPv4 opcija**)
- **Raspodjela prometa** ovisno o **opterećenju linkova**

Vrste IP adresa (v6)

- unicast adresa

Adresa **jednog mrežnog sučelja**.

Koristi se za **direktnu komunikaciju** između **2 klijenta**

Jedno sučelje može imati **više unicast IPv6 adresa**

- anycast adresa

Koristi se za komunikaciju s **najблиžim sučeljem**

Najbliže sučelje je **protokol za usmjeravanje prometa**

- multicast adresa

Koristi se za komunikaciju s **više sučelja** (npr. za prijenos videa)

MREŽNI SLOJ - PROTOKOLI

IGMP

(Internet Group Management Protocol)

- **Višedredišno** (multicast) odašiljanje pri čemu se **klijenti grupiraju**.
- Služi za odašiljanje **videosignalima** ili **online igra**
- Efikasnije korištenje mrežnih resursa i smanjivanje kašnjenja
- Koristi se kod **IPTV** televizije

ICMP

(Internet Control Message Protocol)

- Provjera i dojava **neispravnosti u mreži**.

- Koristi se kod **alata** poput: **ping** (provjera dostupnosti odredišta) i **traceroute** (prikaz rute i mjerjenje kašnjenja paketa) ili za **dojavu greške**

ARP

(Address Resolution Protocol)

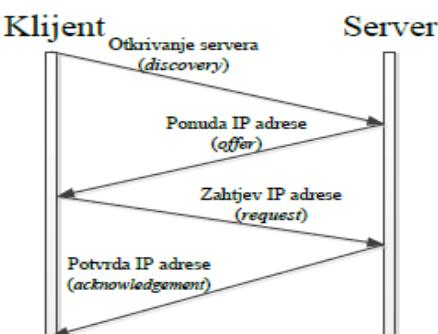
- Služi za dobivanje **MAC adresu** iz **IP adrese**.

- Spada u **sloj pristupa mreži** jer djeluje unutar **jedne lokalne mreže**

DHCP

(Dynamic Host Configuration Protocol)

- **DHCP** je protokol u **IP mrežama** koji omogućuje **dinamičko dodjeljivanje TCP/IP** mrežnih **konfiguracijskih parametara** (IP adresa, mrežna maska DNS domena)
- **Olakšava administraciju mreže** i osigurava da se **IP adrese ne ponavljaju**
- Radi na **principu klijent - poslužitelj**
- **DHCP klijent** šalje **broadcast upit poslužitelju**
- **Bilo koji DHCP server** na mreži može **odgovoriti** na upit
- **Pridjeljivanje IP adrese** se izvodi u **4 koraka**:
 1. **otkrivanje DHCP servera**
 2. **ponuda IP adrese**
 3. **zahtjev IP adrese**
 4. **potvrda IP adrese**



NAT

(Network Address Translation)

- Povezivanje **privatne i javne mreže**
- **Više računala** u privatnoj mreži dobiva **istu jedinstvenu IP adresu** u **javnoj**
- **Mapiranje** se provodi **izmjenom podataka** u **zaglavlju IP datagrama**
- Uredaj koji provodi **mapiranje** čuva podatke o **izvoršnoj i odredišnoj adresi** i **korištenim vratima** u **logičkoj vezi**



TRANSPORTNI SLOJ - PROTOKOLI

- TCP**
(Transmission Control Protocol)
- Osigurava **pouzdani tok podataka** s jednog do drugog kraja po **nepouzdanim mrežama**
 - Svako računalo koje podržava TCP ima **TCP prijenosni entitet** (dio softvera) kao **proceduru, korisnički proces ili dio jezgre**, koji upravlja **TCP** tokovima i sučeljima prema **IP sloju**
 - **TCP entitet** prihvata od **lokalnih procesa** **tok podataka korisnika**, razbija ga u dijelove koji ne prelaze **64 kB** i šalje svaki dio kao **posebni IP datagram**
 - Kada **IP datagram** sa **TCP podacima** stigne na **drugi kraj**, predaje se **TCP entitetu** koji obnavlja **originalni tok bajtova**
 - **TCP** mora osigurati **pouzdanost** (bez pogrešaka, višestrukosti, gubitka podataka i promjene redoslijeda)
 - **Logička veza** između **procesa** definirana je **parom 16-bitnih transportnih adresa** koje se nazivaju **vrata (port)**
 - **Broj vrata** označuje koji **protokol** će se koristiti u **logičkoj komunikaciji**
 - Brojevi **vrata** dijele se u **3 skupine:**
 - **dobro znana vrata** (raspon **0-1023**)
 - **registrirana vrata** (raspon **1024-49151**)
 - **dinamički dodijeljena i privatna vrata** (raspon **49152-65535**)
 - Na razini **cijelog Interneta unaprijed** su definirani **brojevi** **dobro znanih vrata** za **standardne internetske usluge**
 - Korištenjem **vrata** omogućuje se **više logičkih veza** na **jednom mrežnom sučelju**
- UDP**
(User Datagram Protocol)
- Nadograđuje se na **IP** (IP-u dodaje **adresiranje portova**)
 - **Bezspojni protokol** koji omogućuje **slanje IP datagrama** sa **dodatnim kratkim zaglavljem, bez potrebe** da se **uspstavi veza i potvrdi primitak poruke**
 - Koriste ga **klijent-server aplikacije** (npr **DNS**) sa **jednim zahtjevom** (request) i **jednim odgovorom** (response)
 - **UDP datagram** sastoji se od **8-bajtnog zaglavlja** nakon kojeg slijede **podaci**

Usporedba TCP i UDP protokola

TCP	UDP
Spojni protokol	Nespojni protokol
Potvrda primitka, visoka pouzdanost	Nema potvrde primitka, niska pouzdanost
Upotreba za aplikacije kojima vrijeme prijenosa nije bitno	Upotreba za aplikacije kojima je vrijeme prijenosa bitno (prijenos zvuka i videa)
Protcoli koji koriste TCP: HTTP, HTTPS, FTP, SMTP, Telnet	Protcoli koji koriste UDP: DNS, DHCP, TFTP, SNMP, RIP, VOIP
Slaže pakete po redoslijedu, bez obzira na vrijeme dolaska	Paketi su neovisni jedan od drugog, a slaganje se odvija na aplikacijskom sloju
Provjerava i ispravlja pogreške	Provjerava pogreške. Ako se pogreška dogodila, odabacuje paket
Obavlja kontrolu toka i provjeru zagušenosti mreže	Nema kontrole toka ni provjeru zagušenosti mreže

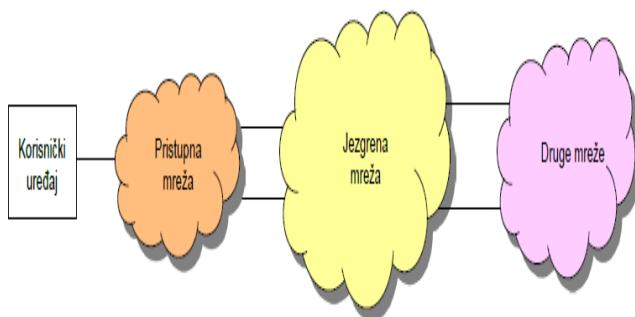
APLIKACIJSKI SLOJ - APLIKACIJE

- FTP** (File Transfer Protocol) - Transfer datoteka
- SMTP** (Simple Mail Transfer Protocol) - Elektronička pošta
- HTTP** (Hyper Text Transfer Protocol) - Globalni informacijski sustava
- RTP** (Real-time Transfer Protocol) - Prijenos u realnom vremenu

JEZGRENE I PRISTUPNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE

DIJELOVI KOMUNIKACIJSKE MREŽE

dijelovi komunikacijske mreže



Korisnički uređaji

Pristupna mreža

Infrastruktura preko koje se korisnici priključuju na mrežu

Jezgrena mreža

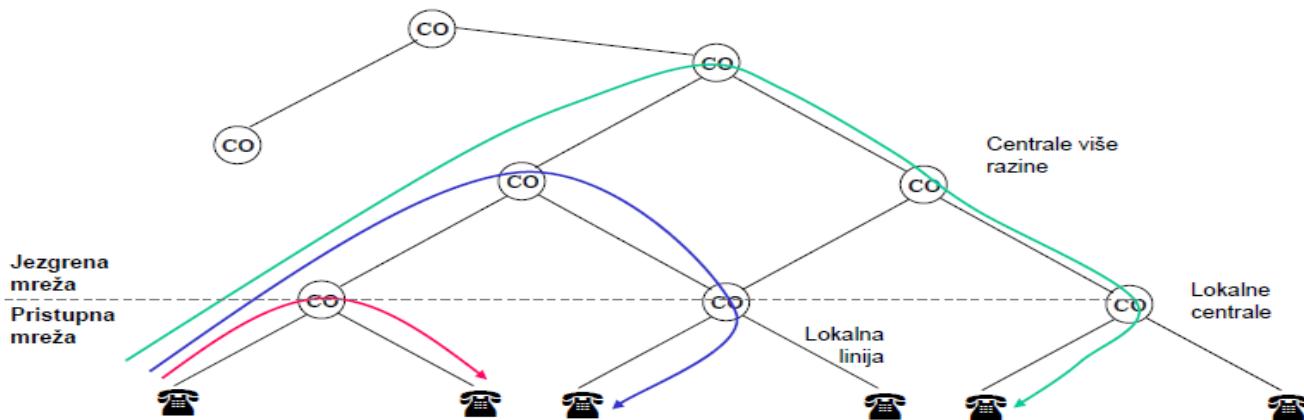
Povezuje sustave u pristupnoj mreži i omogućava komunikaciju s drugim mrežama

TELEFONSKA MREŽA

PSTN

- Javna komutirana telefonska mreža.
- Omogućava prijenos govora i podataka.
- Uspostavljanje poziva i usmjeravanje poziva kroz mrežu izvedeni su korištenjem standardiziranog brojevnog plana
- Za vrijeme trajanja poziva uspostavlja se veza između 2 kompatibilna korisnička uređaja (telefona, modema ili telefaksa) preko komutacijskih čvorova (telefonskih centrala)
- PSTN koristi: komutaciju kanala, multipleksiranje po vremenu (TDM), multipleksiranje po frekvenciji (FDM)
- FDM se koristi u prijenosu analognog govornog signala
- TDM se koristi u prijenosu digitalnog govornog signala
- Telefonska mreža je hijerarhijska mreža
- Korisnički uređaj povezuje se s lokalnom telefonskom centralom, a lokalne centrale vežu se na čvorove više razine.
- Veza između telefona i centrale naziva se lokalna linija ili lokalna petlja.

Uspostavljanje veze između dvije lokalne linije



PCM

- Impulsno-kodna modulacija
- Sva komutacijska čvorova i vodovi (osim onih u pristupnoj mreži) u PSTN mreži su digitalni. U lokalnim centralama provodi se A/D pretvorba i multipleksiranje više govornih signala.
- A/D pretvorba govornih signala provodi se impulsno-kodnom modulacijom PCM
- Telefonski signal je analogni signal u frekvenčnom području 300 – 3400 Hz
- Frekvencija uzorkovanja je 8 kHz, tj. svakih 125 µs.
- Kodiranje uzorka provodi se s 8 bit / uzorku.
- Brzina prijenosa govornog kanala je 8 kHz x 8 bit / uzorku → 64 kbit/s.

- vremensko multipleksiranje (TDM) govornih kanalu**
- Digitalnim signalima u uređajima komunikacijskog sustava **upravljuju generatori taktnih impulsa**
 - **Vremensko multipleksiranje digitalnih signala** koji dolaze iz **različitih izvornih čvorova** može biti:
- asinkrono**
- Taktni impulsi su **asinkroni**.
 Odstupanje taktnih impulsa od **nominalne frekvencije** ne smije biti veće od **definiranog** iznosa Δf
 Mreža u kojoj se koristi takav odnos **taktnih impulsa** naziva se **pleziokronom sinkrono**
- Svi **taktni impulsi** su **iste frekvencije** ili se **sinkroniziraju na istu frekvenciju**.
 Mreža u kojoj se koristi takav odnos **taktnih impulsa** naziva se **sinkronom**
- Pleziokrona digitalna hijerarhija (PDH)**
- Prvi sustav projektiran za **prijenos digitalnog govora**
 - Koristi se za **vremensko multipleksiranje** govornih kanala 'bit po bit' radi **zajedničkog** prijenosa
 - **Istom prijenosnom linijom** prenose se **govorni signali i podaci**
 - Definirani su: **različite razne prijenosa, brzine prijenosa podataka** za svaku razinu i **broj govornih kanala** po razini
 - **Niže razine** su namijenjene za **spajanje korisničke opreme** na mrežu.
 - **Više razine** su namijenjene **prijenosu podataka** unutar mreže.
 - **Multipleksiranje** je moguće samo **između susjednih razina**.
 - **Početna brzina prijenosa** je **brzina prijenosa digitalnog govornog signala 64 kbit/s**
 - **Hijerarhije** se razlikuju u odnosu na **primarnu brzinu prijenosa**. U Europi **primarna brzina prijenosa** je **2048 Mbit/s**
- Nedostaci PDH**
- Složeni postupci pretvorbe jedne hijerarhije u drugu
 - Multipleksiranje/demultipleksiranje moguće samo **između susjednih razina prijenosa**
- Sinkrona digitalna hijerarhija (SDH)**
- **Hijerarhija** koja je naslijedila **PDH**
 - **Svjetska norma**. Može se koristiti posvuda u svijetu.
 - Izravno **sinkrono multipleksiranje**.
 - Prijenos **visokim brzinama** i učinkovita uporaba **svjetlovoda**.
 - Omogućene **široko pojedine usluge** (prijenos videosignalna, videokonferencije).
 - **Normirana sučelja**.
 - Brzina prijenosa **155,52 Mbit/s** (**sinkroni transportni modul** razine 1 - **STM-1**)
- Komponente SDH sustava**
- Termalni multipleksori (TM)** - **krajnji čvorovi** koji provode multipleks/demultipleks **ulaznih spremnika (PDH ili SDH)** na odgovarajuću razinu **STM-N**
- AD multipleksori (ADM)** - dodaju ili izuzimaju **pojedine dijelove nižih brzina prijenosa** iz **digitalnog niza više brzine prijenosa**
- Digitalni prospojnici (DXC)** - prospajaju (**komutiraju**) pojedine **virtualne spremnike** ili njihove skupine
- Regeneratori** - **obnavljaju signal**
- Optička transportna mreža (OTN)**
- Nova **norma** koja bolje pokriva potrebe **optičkog umrežavanja**
 - **Brzine prijenosa: OTU1 - 2,67 Gbit/s; OTU2 - 10,71 Gbit/s; OTU3 - 43,01 Gbit/s;**
 - **Mogućnosti:** unaprijedno ispravljanje pogrešaka; transparentnost za protokole; asinkroni način rada; upravljanje mrežom;

Usporedba SDH i OTN brzina prijenosa

STM-16	2,49 Gbit/s	OTU1	2,67 Gbit/s
STM-64	9,95 Gbit/s	OTU2	10,71 Gbit/s
STM-256	39,81 Gbit/s	OTU3	43,02 Gbit/s

10 Gbit Ethernet nije moguće prenositi **STM-64 brzinom prijenosa (SDH tehnologija)** ali ga je moguće prenositi **OTU2 brzinom prijenosa (OTN tehnologija)**

OTN ima 7 % veću brzinu prijenosa u odnosu na **SDH**

PRISTUPNE MREŽE

- Modemske veze
- Digitalne pretplatničke linije (DSL)
- Optičke pristupne mreže (FTTx)
- Hibridne optičko-koaksijalne mreže (HFC)

MODEMSKE VEZE

Modem → modulator + demodulator.

Uredaj za pretvorbu digitalnih podataka (nastalih u računalu) u analogni oblik pogodan za slanje telefonskom linijom i obrnuto

U modemu se generira prijenosni signal frekvencije 1000 - 2000 Hz (ton) koji se modulira digitalnim modulacijskim signalom

Analogni signal, nastao u modemu, šalje se do lokalne telefonske centrale, gdje se u kodeku pretvara u digitalni oblik za slanje magistralnim vodovima

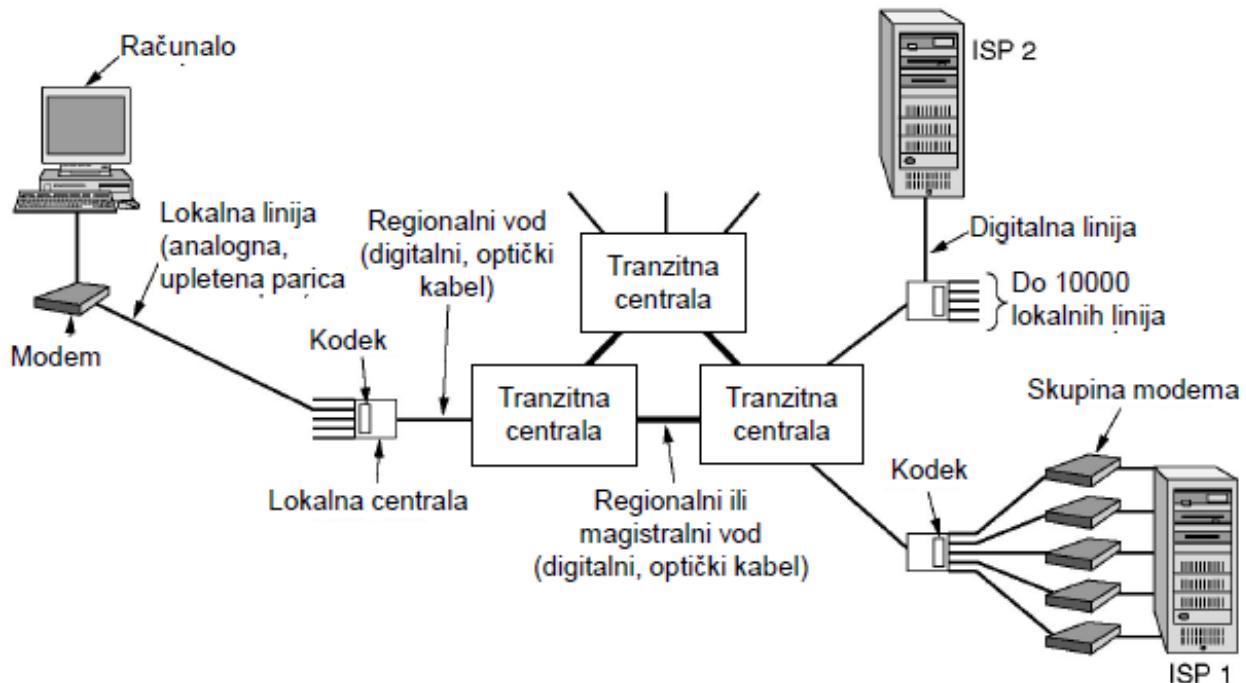
Na odredišnoj strani, digitalni signal se u kodeku pretvara u analogni oblik koji se demodulira u modemu.

Radi povećanja brzine prijenosa u modemima se koriste hibridni modulacijski postupci i kompresija podataka prije prijenosa.

Teorijski najveća brzina prijenosa modema je 35 kbit/s

Povećanje brzine prijenosa postiže se digitalnim prijenosom u lokalnoj petlji

Veza između računala i davatelja internetskih usluga (ISP)



DIGITALNE PRETPLATNIČKE LINIJE

- DSL** → Povećavaju **brzinu prijenosa** u **pristupnoj telefonskoj mreži** iznad **56 kbit/s**.
 Omogućavaju **istovremeni** prijenos **govora i podataka**.
 Koriste **postojeće upletene parice** u **širem frekvencijskom području**
Jednostavne su za **implementaciju na strani korisnika**.

DSL tehnologije

ISDN - **Digitalna mreža integriranih usluga**

HDSL - **High Bit Rate DSL**. Povezivanje **korporacijskih mreža**.

HDSL2 - Povećanje **brzine prijenosa** i veći **domet** u odnosu na **HDSL**.

Dvosmjerni prijenos po jednoj parici ili prijenos s dvije parice.

Simetrične **usluge** s jednakim kapacitetom za **odlazni i dolazni smjer**

MSDSL - **Simetrična digitalna preplatnička linija s više brzina prijenosa**.

Koristi jednu paricu. Podržava istovremenu govornu uslugu i prijenos podataka
 Brzina prijenosa može se mijenjati ovisno o potrebama korisnika

ADSL - **Asimetrična digitalna preplatnička linija**.

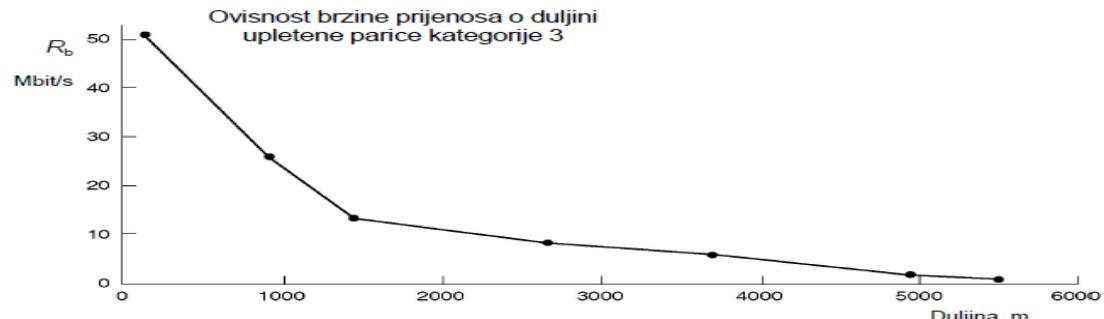
Omogućava **širokopojasne usluge** (video na zahtjev, pristup Internetu, ..)

VDSL - **Very High Bit Rate DSL**.

Veće brzine prijenosa, ali **kraće udaljenosti** nego kod **ADSL**

Koristi se u **mrežama** gdje je **optički kabel** doveden **blizu korisnika**

- ADSL** → Brzina prijenosa u dolaznom smjeru **prema korisniku** (**downstream**) veća je od brzine u odlaznom smjeru (od korisnika prema centrali - **upstream**)
 Zbog ograničenja **odlazne brzine ADSL** nije atraktivan **poslovnim korisnicima**.
 Informacije se prenose preko **jedne parice**
 Prijenosne **udaljenosti** ograničene na **5 km** (**nedostatak upletene parice**)



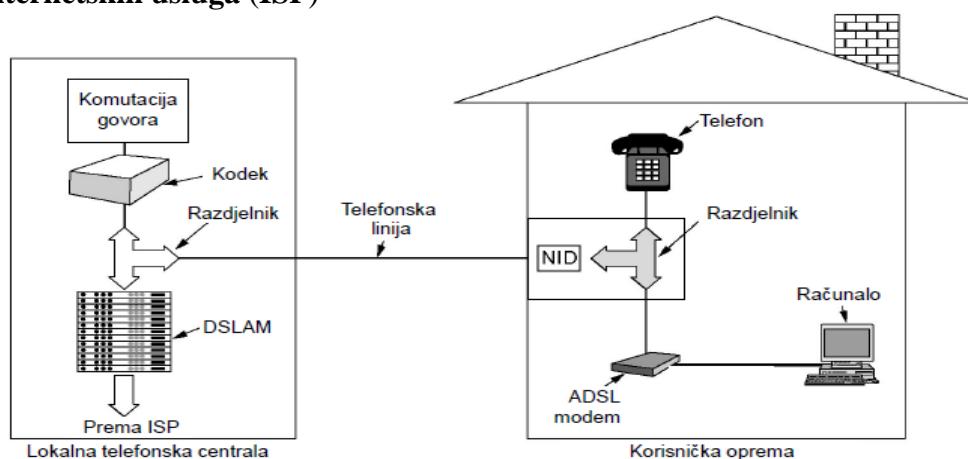
ADSL sustav

Na strani **korisnika**, telefon i **ADSL modem** spajaju se na **razdjelnik**.

Razdjelnik razdvaja **govor i podatke**. Razdjelnik se koristi i u **telefonskoj centrali**.

Podaci se obrađuju u **DSL pristupnom multipleksoru (DSLAM)**

Izlaz iz **DSLAM** je **niz bitova** koji se oblikuje u **pakete** i šalje prema **davatelju internetskih usluga (ISP)**



Norme za ADSL

Postoje dvije temeljne norme za ADSL:

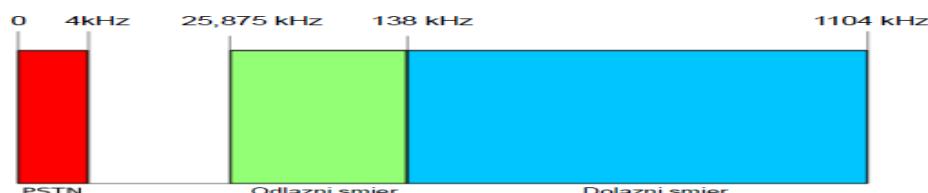
ITU-T G.992.1. → **G.DMT**

ITU-T G.992.2. → **G.Lite**

Obje norme se temelje na primjeni **OFDM** postupka modulacije a razlikuju se po širini frekvencijskog područja

G.DMT → Koristi 2 odvojena frekvencijska područja.

Jedno za dolazni smjer prema korisniku, a drugo za odlazni smjer prema centrali



Raspoloživo frekvencijsko područje dijeli se u **256 potkanala** širine **4312,5 Hz**

Potkanal 0 koristi se za prijenos **govornog signala**

Potkanali 1 - 5 (4 kHz - 25,875 kHz) se **ne koriste**

Dva potkanala se koriste za **upravljanje** (po jedan za svaki smjer)

Za korisničke podatke preostaje **248 potkanala**.



Unutar svakog **potkanala** koristi se **modulacijski postupak QAM (0-15 bit/simbol, brzina 4000 Bd)**

Primjer: Za prijenos prema korisniku se koristi **224 potkanala s 15 bit/simbol**

Brzina prijenosa za dolazni smjer je: **$224 \times 4000 \text{ Bd} \times 15 \text{ bit/simbol} = 13,44 \text{ Mbit/s}$**

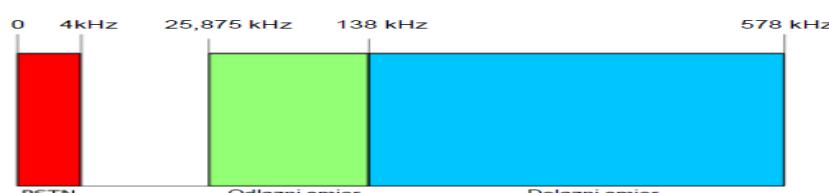
U praksi **odnos C/N** ne dopušta tako visoku **brzinu prijenosa**

Stvarna najveća brzina u dolaznom smjeru je oko **8 Mbit/s**

Tijekom uspostavljanja veze, **ADSL modem** provjerava **potkanale** i određuje koji od njih ima zadovoljavajući **C/N**.

U skladu sa **stanjem linije** podešava se **brzina prijenosa** u **potkanalu** ili se **određeni potkanali** ne koriste.

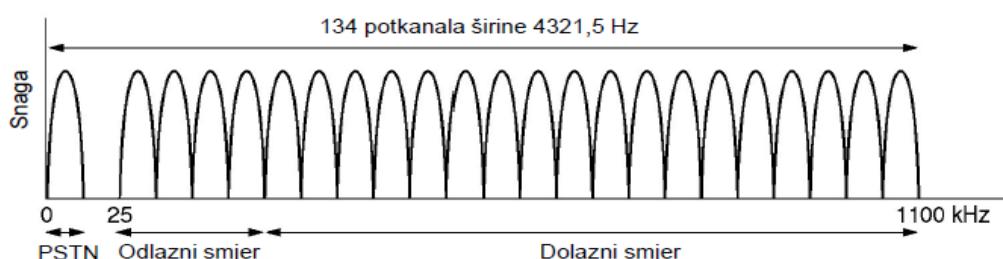
G.Lite → Koristi manju širinu frekvencijskog područja u odnosu na **G.DMT**



Raspoloživo frekvencijsko područje dijeli se u **134 potkanala** širine **4312,5 Hz**

Potkanal 0 koristi se za prijenos **govornog signala**

Za korisničke podatke koristi se **127 potkanala** (25 odlazni i 102 dolazni smjer)



Brzina prijenosa prema korisniku **1,5 Mbit/s**, a od korisnika **512 kbit/s**

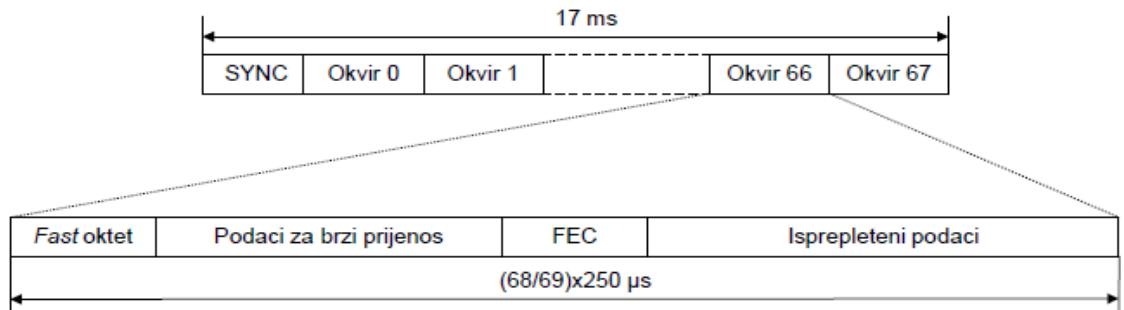
Format okvira i superokvira

Superokvir sadrži **68** okvira za podatke + **1** sinkronizacijski okvir. Šalje se svakih **17 ms.**

Sinkronizacijski okvir (SYNC) dodaje OFDM modulator radi određivanja granica superokvira.

Iza **SYNC** okvira slijede **okviri 0 i 1** koji se koriste za **upravljanje pogreškama** i **nadzor veze**.

Okvir se sastoji iz **2 dijela**: podaci iz međuspremnika **za brzi prijenos** i podaci iz međuspremnika **s isprepletenim podacima**



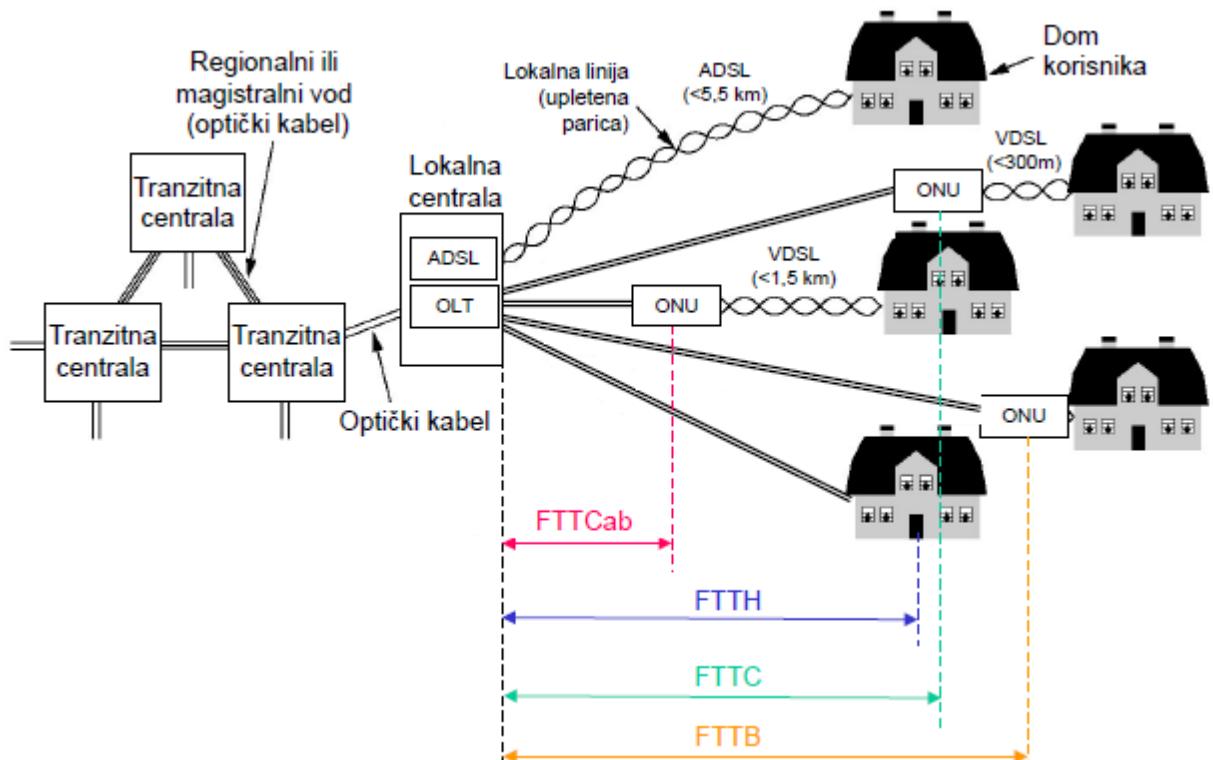
Fast oktet prenosi bitove za upravljanje.

FEC je područje za upravljanje pogreškama.

Okvir se šalje svakih (68/69) x 250 ms.

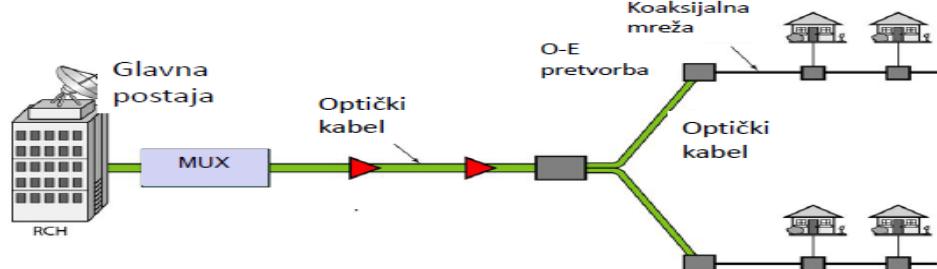
VDSL

- Koristi se u **pristupnim mrežama** gdje je **optički kabel** doveden u **lokalnu petlju**. Omogućava prijenos signala **upletonom paricom** vrlo **visokim brzinama** (do **55 Mbit/s**) na **kratkim udaljenostima** (do **300 m**).
Optička mrežna jedinica (**ONU**) je mjesto u mreži gdje se provodi **optoelektrička** i **elektrooptička** pretvorba (od ONU prema korisniku prenosi se električki signal, a prema mreži optički).
Optičke pristupne tehnologije (FTTx) razlikuju se po **mjestu u mreži** gdje se nalazi **ONU**:
 - FTTCab** – optički kabel se dovodi do **ormarića** udaljenog **300-1500 m** od **korisnika**
 - FTTC** – optički kabel se dovodi do **ormarića** udaljenog manje od **300 m** od **korisnika**
 - FTTB** – optički kabel se dovodi do **većeg stambenog objekta**
 - FTTH** – optički kabel se dovodi do **doma** korisnika**Optičko linijsko zaključenje (OLT)** je **završetak** optičkih kabela u centrali.



HFC

- **Hibridne optičko-koaksijalne mreže**
 Kombinira **optičku tehnologiju** i postojeće **koaksijalne instalacije**



U Evropi se koristi **frekvencijska širina kanala 8 MHz (64-QAM ili 256-QAM modulacija)** za **silaznu vezu (downstream)** i **uži kanali** (200 kHz do 6,4 MHz) za **uzlaznu vezu (4, 8, 16, 64, 128-QAM modulacija)**

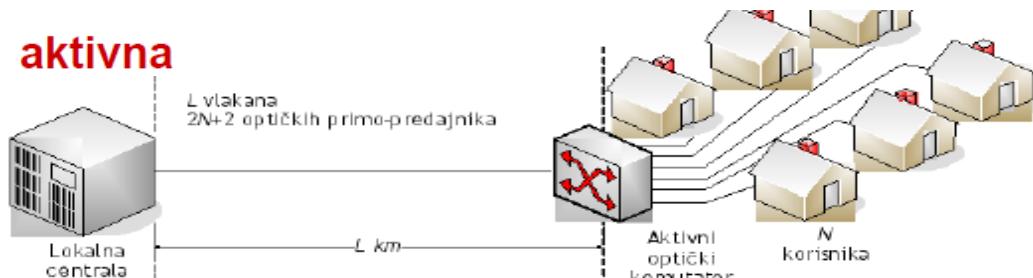
FTTH

- **Optička pristupna mreža do kuće korisnika.** Dva oblika izvedbe:
mreža od točke do točke (PtP):



Primjer: **projekt Google Fiber** → cilj korisnik dobiva **1 Gbit/s (uzlazna i silazna veza)**

mreža od točke do više točaka (PtMP); Može biti **aktivna** ili **pasivna**



Aktivna oprema se nalazi **u ormarićima** na ulicama.

Za aktivnu opremu treba osigurati: **napajanje 220 V, neprekinito napajanje (UPS)**
hlađenje/grijanje uređaja

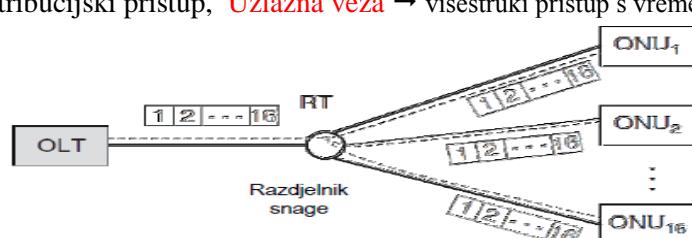


Kod **pasivne pristupne mreže** ne postoji nikakva **aktivna oprema** između **centrale** i **korisnika**.
Pasivne komponente (djelitelji snage) mogu se ugraditi **bilo gdje** i ne trebaju **nikakvu prateću opremu**

Najčešće korištena tehnika **višestrukog pristupa** u **FTTH mrežama** je **TDM-PON**
(TDM - Vremensko multipleksiranje, PON - Pasivna optička mreža)

Koristi se u **normama: BPON, GPON, EPON**

Silazna veza → distribucijski pristup, Uzlazna veza → višestruki pristup s vremenskom raspodjeljom



LOKALNE MREŽE

LOKALNE MREŽE - TEMELJNE OSOBINE

LAN → Lokalna mreža.

Mreža koja pokriva relativno malo područje, a služi za povezivanje osobnih računala i drugih sličnih uređaja na određenoj lokaciji. Mreža je vlasništvo jedne organizacije.

Obilježja LAN: visoke brzine prijenosa, malo kašnjenje, mali BER

Prednosti LAN: raspodjela i razmjena podataka između korisnika mreže; raspodjela i zajedničko korištenje programske podrške, uređaja i opreme

Načini prijenosa podataka u LAN mrežama

- jednosmjerni prijenos (unicast)

Paketi se šalju od izvorišnog do odredišnog čvora.

Izvorišni čvor adresira paket pridružujući mu adresu odredišnog čvora.

- istodobni prijenos do skupine mrežnih čvorova (multicast).

Izvorišni čvor adresira paket adresom koja sadrži više odredišnih čvorova.

Paket se šalje u mrežu koja ga kopira u potrebnim brojem primjeraka i po jednu kopiju šalje u svaki čvor koji je sastavni dio adrese.

- istodobni prijenos do svih mrežnih čvorova (broadcast).

Izvorišni čvor adresira paket adresom koja sadrži sve čvorove u mreži.

Paket se šalje u mrežu koja ga kopira i šalje po jednu kopiju svakom čvoru u mreži.

Prijenosni mediji u LAN mrežama

- koaksijalni kabeli

- upletene parice

- optički kabeli

Osnovne topologije LAN mreža

- sabirница (bus)

- prsten (ring)

- zvijezda (star)

- stablo (tree)

Normiranje LAN mreža

- IEEE 802 normama

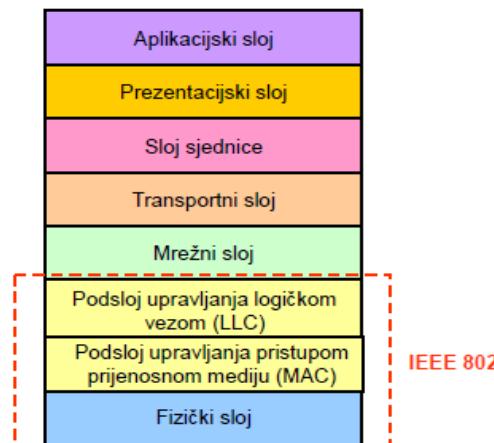
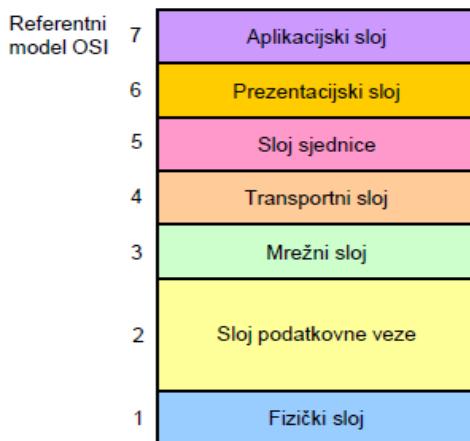
Norme IEEE 802 odnose se na mreže u kojima se prenose okviri promjenjive veličine Usluge i protokoli sadržani u normama IEEE 802 zauzimaju prva 2 sloja ISO/OSI modela: fizički sloj i sloj podatkovne veze

Funkcije komutiranja i usmjeravanja paketa nisu potrebne

Sloj podatkovne veze podijeljen je na dva podsloja:

MAC - podsloj za upravljanje pristupom prijenosnom mediju

LLC - podsloj za upravljanje logičkom vezom



LAN - PRISTUP PRIJENOSNOM MEDIJU

Više mrežnih postaja **ne može istovremeno** komunicirati putem mreže.

Upravljanje pristupom prijenosnom mediju rješava problem koji se javlja kada dvije ili više mrežnih postaja trebaju odašiljati podatke u isto vrijeme.

Načini upravljanja pristupom prijenosnom mediju - Višestruki pristup osluškivanjem nosioca i detekcijom sudara (CSMA/CD)

Mrežna postaja koja želi **odašiljati podatke** 'osluškuje' da li neka druga **postaja** odašilje podatke i da li je medij zauzet.

Ako je **prijenosni medij slobodan**, mrežna postaja započinje odašiljati.

Za vrijeme **odašiljanja**, postaja 'osluškuje' da li je došlo do **sudara**.

Do **sudara** dolazi kada **više postaja istovremeno** utvrdi da je **medij** slobodan i započne odašiljanje **okvira**. Postoje **2 vrste sudara**.

Rani sudar je sudar koji **postaja** detektira za vrijeme **dok odašilje okvire**.

U tom slučaju **postaja** prekida emitiranje **okvira** i čeka **slučajno odabranu vrijeme** prije nego započne ponovno odašiljanje.

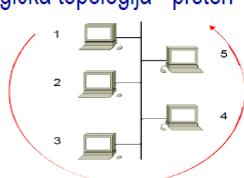
Kasni sudar je sudar do kojega dolazi **nakon** što je **postaja prestala slati okvire**. Postaja **ne može** detektirati **kasni sudar**.

- Upravljanje pristupom prijenosnom mediju proslijđivanjem pristupne riječi.

Poseban mrežni paket nazvan **pristupna riječ** (token) kruži **mrežom** od jedne do druge **mrežne postaje** (preduvjet je **logička topologija prsten**).

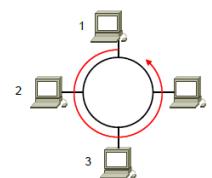
fizička topologija - sabirnica

logička topologija - prsten



fizička topologija - prsten

logička topologija - prsten



Kada **mrežna postaja** treba odašiljati **podatke**, mora **čekati** dok **pristupna riječ** ne dođe **do nje** i tada može započeti odašiljanje podataka.

Ako **mrežna postaja** kod koje je **pristupna riječ** **ima podataka za slanje**, uzima **pristupnu riječ**, u njoj **zamjenjuje 1 bit**, dodaje **podatke za slanje** i šalje ih do iduće **mrežne postaje u prstenu**.

Ako **mrežna postaja** kod koje je **pristupna riječ** **nema podataka za slanje**, prosljeđuje **pristupnu riječ** **slijedećoj mrežnoj postaji**

Svaka **mrežna postaja** može zadržati **pristupnu riječ** određeni **maksimalni vremenski period**

Dok **informacije** putuju **mrežom**, u **mreži** nema **pristupne riječi**.

Ostale **mrežne postaje** koje žele **odašiljati podatke** moraju **čekati**.

ETHERNET

Ethernet

- **glavna LAN tehnologija** (85% računala povezanih u **lokalne mreže** koriste **Ethernet**)
- **definiran IEEE 802.3 normom**

fizički sloj
u Ethernetu
sačinjavaju

- **zajednički medija** na koji su spojene **sve mrežne postaje**;
- **mrežni uređaji**;

fizički sloj
je specifičan

- za određenu **vrstu prijenosnog medija**;
- za **područje brzina prijenosa podataka**;

klase
mrežnih uređaja

- **mrežne postaje ili podatkovni krajnji uređaji (DTE)**;
- Uredaji koji su **izvor ili odredište paketa** podataka (npr. osobna računala)

- **uredaji za prijenos podataka (DCE)**;

Među uređajima koji su **primaju i prosljeđuju pakete** podataka kroz **mrežu**

Obnavljači (repeaters), **komutatori** (switches), **usmjerivači** (routers), komunikacijska sučelja: mrežne kartice ili **modemi**

Ethernet II okvir

- Preambula

Označava **početak okvira** i služi za **sinkronizaciju odašiljača i prijamnika** (**8** okteta).

- Adresa odredišta

Određuje jedan ili više **krajnjih uređaja** kojima se šalju **okviri**.

- Adresa izvora

Određuje **krajnji uređaj** koji šalje **okvire**.

- Vrsta

Određuje **protokol višeg sloja** čiji **podaci** su prebačeni u **Ethernet okvir**.

- Podaci

Zauzimaju **46** do **1500** okteta (ako ima manje od 46 oktetova **nadopunjava se do 46**).

- FCS

Slijed za provjeru **ispravnosti okvira**.

Ethernet 802.3 okvir

- Preambula

Služi za **sinkronizaciju odašiljača i prijamnika** (**7** okteta).

- SoF

Označava **početak okvira**.

- Adresa odredišta

Određuje jedan ili više **krajnjih uređaja** kojima se šalju **okviri**.

- Adresa izvora

Određuje **krajnji uređaj** koji šalje **okvire**.

- Duljina

Određuje **duljinu okvira** (bez **Preamble**).

- LLC zaglavlje i podaci

LLC zaglavlje nosi **informaciju** u kojim **međuspremnicima** se nalaze **podaci**.

- FCS

Slijed za provjeru **ispravnosti okvira**.

kompatibilnost okvira Ethernet II i 802.3

- Ako je **vrijednost polja vrsta/duljina < 1500** → polje se interpretira kao **duljina**
- Ako je **vrijednost polja vrsta/duljina ≥ 1536** → polje se interpretira kao **vrsta**

Podsloj LLC u Ethernetu

- Definiran **IEEE 802.2 normom**;
- **Sučelje** između **MAC podsloja** i **mrežnog sloja** u **OSI modelu**
- Obavlja sljedeće **usluge**:
 - **nespojna usluga bez potvrde primitka okvira**
 - **nespojna usluga s potvrdom primitka okvira**
 - **spojna usluga**

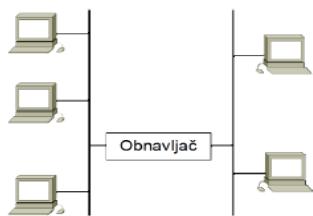
adresiranje krajnjih uređaja u lokalnoj mreži

- Svaki **krajnji uređaj** ima svoju **jedinstvenu MAC adresu** duljine **48 bita**
- Proizvođač ugrađuje **MAC adresu** u **ugrađeni softver** mrežnog uređaja

mrežni uređaji

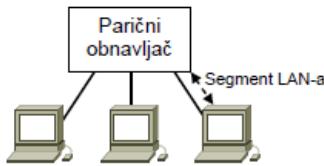
- **repetitor** ili **obnavljač**
- **koncentrator** ili **parični obnavljač (hub)**
- **LAN komutator** (switch)
- **most** (bridge)
- **usmjerivač** (router)

obnavljač



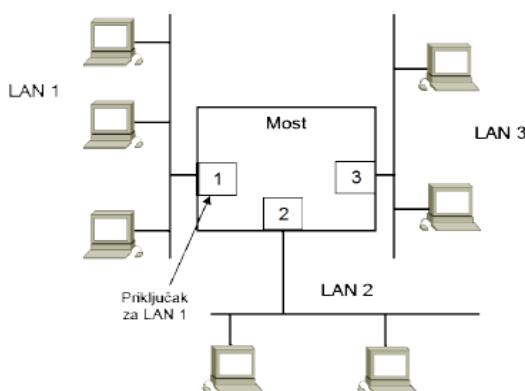
- Mrežni uređaj koji se koristi za **povezivanje** dva ili više mrežnih segmenata;
- Koristi se u topologiji **sabirnice** koja se izvodi **koaksijalnim kabelom**
- Prima **sve signale** jednog mrežnog segmenta, pojačava ih, obnavlja i odašilje u **drugi mrežni segment**
- Radi na **fizičkom sloju**

parični obnavljač



- Povezuje **mrežne postaje** u **lokalnu mrežu**;
- Koristi se u topologiji **zvijezde** s **upletonom paricom** kao prijenosnim medijem
- Pojačava primljeni signal, obnavlja ga i odašilje na sve ostale priključke
- **Otkriva sudare i nepravilnosti u radu mreže**
- Radi na **fizičkom sloju**
- Nedostaci: **povećava kašnjenje okvira**;
ne razdvaja **dijelove LAN-a** na međusobno **odvojene domene sudara**;

most



- **MAC most**

Služi za povezivanje **istovrsnih lokalnih mreža**.

Radi na **MAC podsloju podatkovne veze**.

Funkcije LLC-a obavljaju **krajnji mrežni uređaji**.

- **mješoviti most**

Služi za povezivanje **istovrsnih i raznovrsnih lokalnih mreža**.

Koristi **oba podsloja (MAC i LLC) podatkovne veze**.

LLC obavlja **pretvorbu okvira** iz jednog u drugi **format**.

Funkcije mosta

- Prenosi **okvire** iz **jedne mreže** u **drugu** (ako su **ispravno oblikovani**)
- Razdvaja **domene sudara**
- Formira **dinamičku tablicu** u koju upisuje **MAC adrese mrežnih postaja** u svakoj **mreži** (**uči topologiju mreže**)

LAN komutator

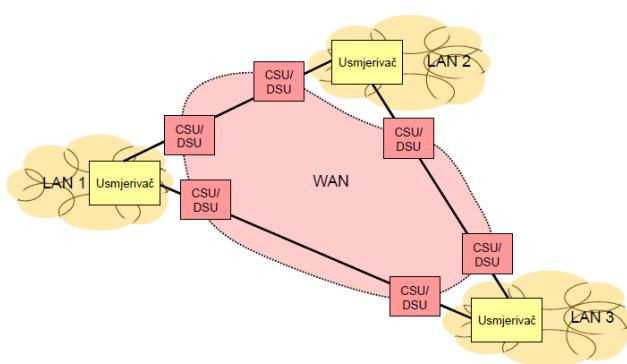
- Obavlja **iste funkcije** kao **most** s **većim brojem priključaka**;
- Za **razliku od mosta** funkcije proslijđivanja **okvira** implementirane su **hardverski**
- Radi na **sloju podatkovne veze**
- Razdvaja **domene sudara**
- **Komutacija okvira** od **ulaznog** do **izlaznog priključka** provodi se na temelju **tablice komutiranja** u kojoj su pohranjeni **parovi** (**MAC adresa, broj priključka**)
- Komutator, kao i **most**, **uči topologiju mreže**

usmjerivač

- Koristi se za povezivanje **više LAN mreža** u **cjelinu** ili za povezivanje **LAN mreža s WAN mrežom**
- Radi na **mrežnom sloju**, ako **mreže** koje povezuje koriste **iste protokole drugog sloja**
- Radi na **mrežnom i drugom sloju**, ako **mreže** koje povezuje koriste **različite protokole drugog sloja**
- Povezivanje dvije **lokalne mreže** putem **usmjerivača** i **WAN veze** može se provesti putem **zakupljenih linija i modema** ili putem **komutacije okvira**
- **Usmjerivač** šalje **pakete** kroz **mrežu** **optimalnim putem**, temeljem poznavanja **odredišne adrese i tablice usmjeravanja**
- **Tablice usmjeravanja** sadrže **adrese udaljenih mreža** i **adrese usmjerivača** kojima treba poslati **pakete** za tu **mrežu**
- **Usmjerivač** može biti i **prolaz (gateway)** → spaja **mreže** koje koriste **različite protokole**
- **Usmjerivač** predstavlja **kraj lokalne mreže**

POVEZIVANJE LOKALNIH MREŽA

povezivanje LAN mreža



- najčešće se koriste **zakupljeni kanali**;
- **zakupljeni kanali** zajedno s mrežnim uređajima **CSU/DSU** (Control/Data Service Unit) čine privatnu ili **javnu WAN mrežu**;
- **Nedostaci uporabe zakupljenih kanala**
- **Visoki troškovi** izgradnje i uporabe **mreže**
- Nedjelotvorna uporaba **kapaciteta kanala**
- **Dinamička promjena** načina povezivanja **uređaja** **nije moguća**

RADIJSKE LOKALNE MREŽE

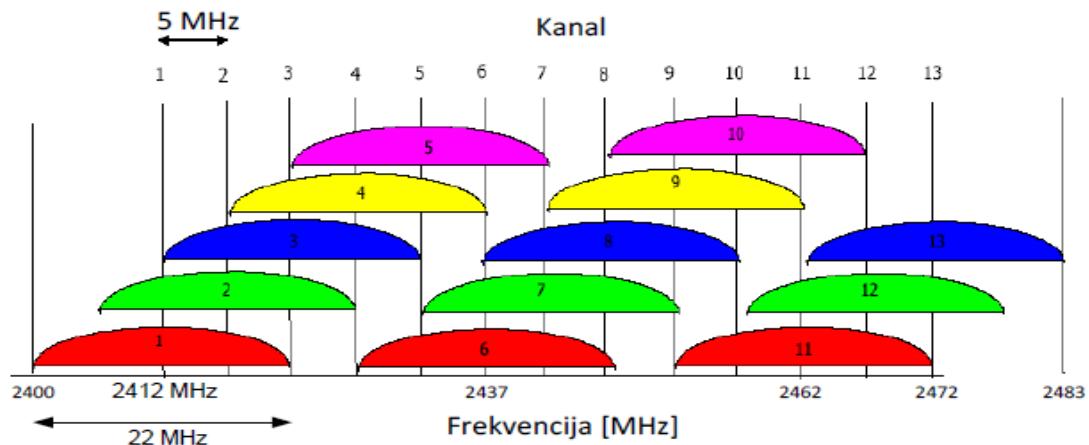
RADIJSKE LOKALNE MREŽE - TEMELJNE OSOBINE

WLAN

- Radijske lokalne mreže;
- Vrsta **lokalnih mreža** koje za prijenos **informacije** između **mrežnih čvorova** koriste **elektromagnetske valove** u **radijskom** ili **infracrvenom frekvencijskom području**
- U WLAN-u koriste se **2 osnovna prijenosna medija**:
Prijenos u infracrvenom dijelu spektra IR (850-950 nm)
Radijski prijenos RF (nelicencirani i licencirani frekvencijski pojasevi)

ISM

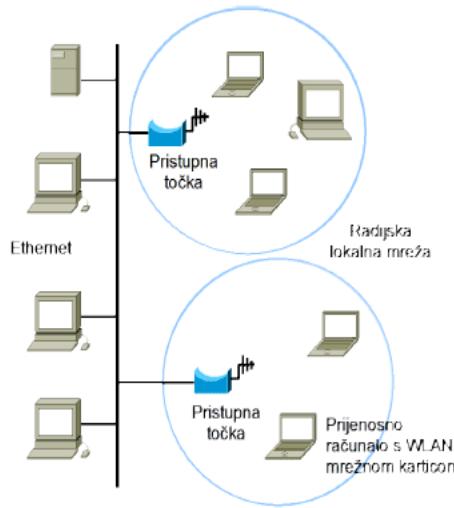
- **Nelicencirana frekvencijska područja (2400 - 2483,5 MHz);**
- Pojas širine **83,5 MHz** podijeljen je u Europi na **13 kanala** širine **22 MHz**
- Istovremeno se može koristiti **najviše 3 kanala**
- Ne plaća se naknada za uporabu frekvencije, ne trebaju dozvole



Norme za WLAN

- **IEEE 802.11**
Norma za rad u **nelicenciranom području frekvencija od 2,4 GHz** i u **licenciranom području** oko **5 GHz**
- **HiperLAN**
Norma Europskog instituta za telekomunikacijske norme, predviđena za rad u **licenciranom području** oko **5 GHz**

pristupanje WLAN mreži



- preko **WLAN mrežnih kartica** koje su sastavni dio **osobnih računala**; Mrežne kartice koriste **radijsko mrežno sučelje**

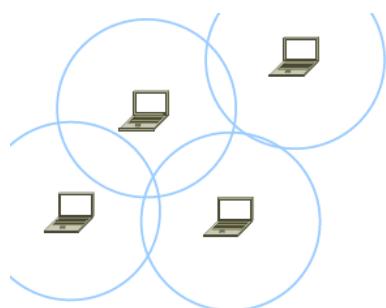
- preko **pristupnih točaka**:
Pristupne točke povezuju radijske i **fiksne LAN mreže** na **fiksnoj lokaciji** koristeći standardni **Ethernet kabel**

Funkcije pristupne točke

- Služi za **povezivanje WLAN mreže s fiksnom mrežom**
- Komunicira s **mrežnim postajama** koje su u **dometu** pokrivanja **radijskim valovima**

temeljne arhitekture WLAN-a

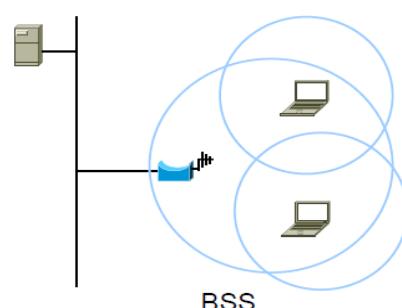
WLAN bez pristupne točke



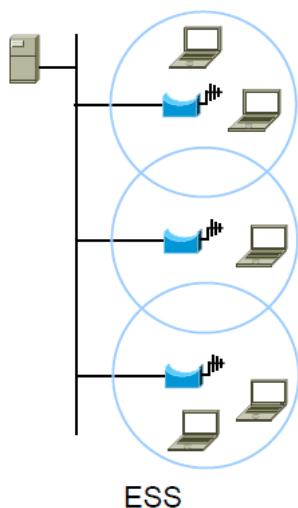
- **neovisni WLAN** (WLAN **bez pristupne točke**) ;
- **infrastrukturni WLAN** (WLAN **s pristupnom točkom**) ;

- nastaje **proizvoljnim** povezivanjem neovisnih **radijskih mrežnih postaja** koje **ravnopravno komuniciraju** (peer-to-peer) ;
- **dva ili više računala** opremljena **WLAN mrežnim karticama** mogu uspostaviti **izravnu međusobnu vezu** ukoliko su u **dometu** pokrivanja **radijskim valovima**. ;
- **mreža je fleksibilna i jeftina** jer ne zahtijeva **upravljanje**

WLAN s pristupnom točkom

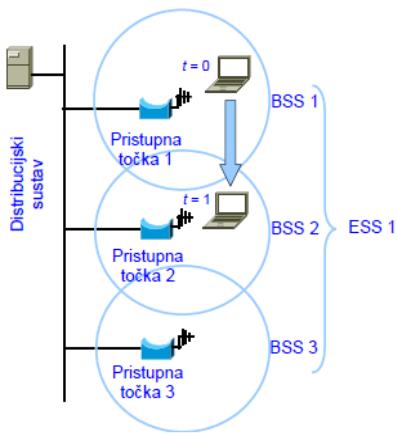


- korištenjem **barem jedne pristupne točke** u WLAN mreži dobiva se **infrastrukturna topologija**.
- **Pristupna točka** **sinkronizira** i **koordinira**, **prosljeđuje okvire** i **povezuje WLAN mrežu s fiksnom LAN mrežom**
- **Način povezivanja** u kome se koristi **jedna pristupna točka** naziva se **BSS - infrastrukturni skup osnovne usluge**



- Za pokrivanje **većih područja** koristi se **više pristupnih točaka**
- **Način povezivanja** u kome se koristi **više pristupnih točaka** naziva se **ESS - infrastrukturni skup proširene usluge**
- **ESS** nastaje kada se **više pristupnih točaka** povezuju u **jedan** zajednički **distribucijski sustav**

pokretljivost korisnika u WLAN mreži

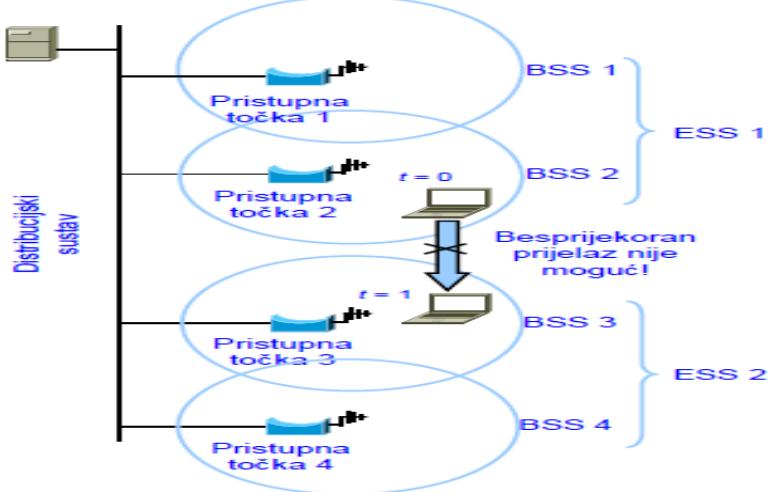


- mrežne postaje mogu se kretati za vrijeme dok su povezane na mrežu i tijekom kretanja mogu odašiljati podatke.

tri su moguće vrste prijelaza u mreži ili između mreža:

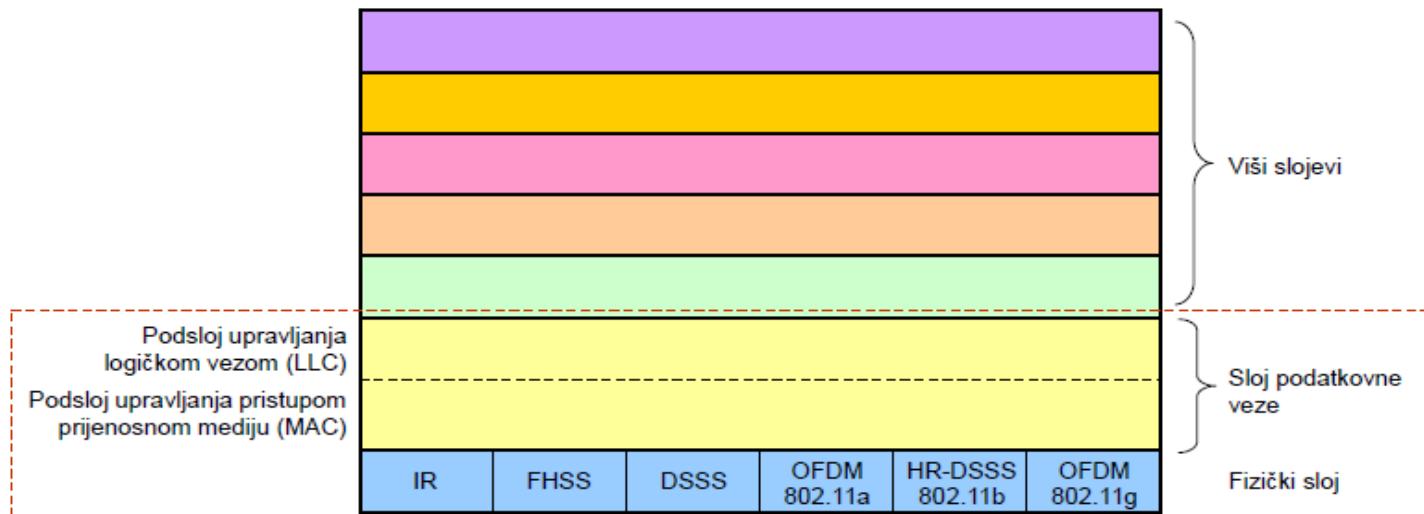
- **kretanje bez prijelaza** (zadržavanje u okviru jednog BSS)
- **prijelazi između BSS segmenata ESS mreže**
- **prijelazi između različitih ESS mreža**

ukoliko se **mrežna postaja** kreće i **prelazi** iz područja pokrivanja jedne **pristupne točke** u područje pokrivanja **druge pristupne točke**, kontinuirana komunikacija je moguća samo ako se područja prekrivanja preklapaju



Norma IEEE 802.11

- definira uporabu **5 vrsta fizičkog sloja**
- svaka **vrsta fizičkog sloja** praćena je **vlastitim MAC podslojem**
- **LCC podsloj** je **zajednički** za sve vrste IEEE 802 mreža
- **skup protokola** u mreži **IEEE 802.11**



IR fizički sloj

- Prijenos u **infracrvenom području**. Brzine prijenosa **1 Mbit/s** i **2 Mbit/s**. Zbog **malih brzina prijenosa** i **jakih smetnji** ovaj **način prijenosa** nije raširen

DSSS fizički sloj

- Modulacija **DBPSK** za prijenos podataka brzinama **1 Mbit/s**. Modulacija **DQPSK** za prijenos podataka brzinama **2 Mbit/s**.

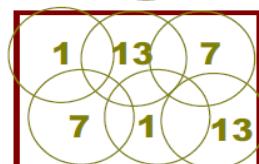
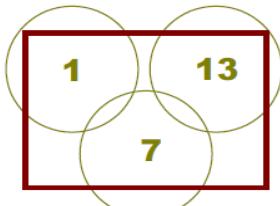
Planiranje pokrivanja

Pristupna točka na **odabranoj lokaciji** mora dobro **pokrivati** željeni **prostor**, a **područja pokrivanja** (ćelije) **susjednih pristupnih točaka** trebaju se **preklapati**. Željeni **prostor** se bolje pokriva **smanjenjem snage** i uporabom **više pristupnih točaka**. Svaka **pristupna točka** radi na **jednom kanalu**.

Kada se koristi **više pristupnih točaka** za pokrivanje određenog **prostora**, radi izbjegavanja **smetnji**, mogu se koristiti **samo 3-4 nepreklapajuća kanala**:

- kanali **1, 7, 13** ili **1, 5, 9, 13**, razmak između kanala **20 MHz**

U nekim Evropskim zemljama preporuča se upraba **samo 3 kanala (1, 7, 13)**



FHSS fizički sloj

- Koristi **Gaussovu diskretnu modulaciju frekvencije (GFSK)**
- **2-GFSK** za prijenos podataka brzinama **1 Mbit/s**.
- **4-GFSK** za prijenos podataka brzinama **2 Mbit/s**.
- Frekvencijsko područje** podjeljeno je na **79 kanala širine 1 MHz**
- Redoslijed skakanja** određen je na temelju **pseudoslučajnog koda**
- Vrijeme zadržavanja** na pojedinoj frekvenciji može se **podešavati**.
- 10-15 mreža** može raditi u susjedstvu (kod **DSSS** samo **3**)

Norma IEEE 802.11a

- dodatak normi **IEEE 802.11**
- radi u **frekvencijskom području** od **5 GHz**
- **brzina prijenosa** od **54 Mbit/s**
- prijenos na **fizičkom sloju** primjenom **OFDM tehnike**

Norma IEEE 802.11b

- dodatak normi **IEEE 802.11** (poznata kao **Wi-Fi**)
- radi u **frekvencijskom području** od **2,4 GHz**
- **brzina prijenosa** od **11 Mbit/s**
- prijenos na **fizičkom sloju** primjenom **HR-DSSS**

Norma IEEE 802.11g

- zadržala **sva obilježja** norme **802.11a**, a koristi **frekvencijsko područje 802.11b**
- omogućen je **prijelaz iz mreže**, koja zahtjeva **veliku širinu prijenosnog pojasa** i **visoku brzinu prijenosa**, u **mrežu** u kojoj se koriste **niže brzine**, bez **prekidanja usluge**.

Prednosti mreže po normi **802.11g**

- zadržana **brzina prijenosa** kao u **802.11a** (uz **bolje pokrivanje**)
- moguć **neprimjetni prijelaz** (roaming) između **802.11g** i **802.11b**
- koristi se u **cijelom svijetu**

Nedostaci mreže po normi **802.11g**

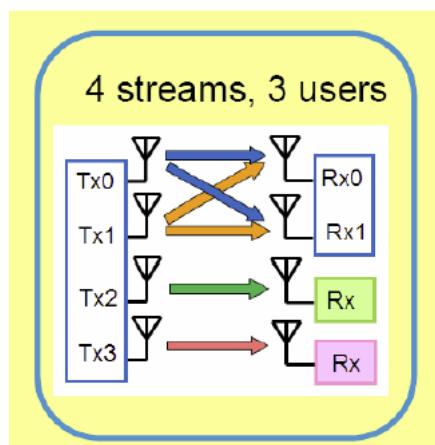
- **isti izvori smetnji** kao i kod **802.11b** (**ISM pojas**)
- **povećana** je potrošnja **snage**

Norma IEEE 802.11n

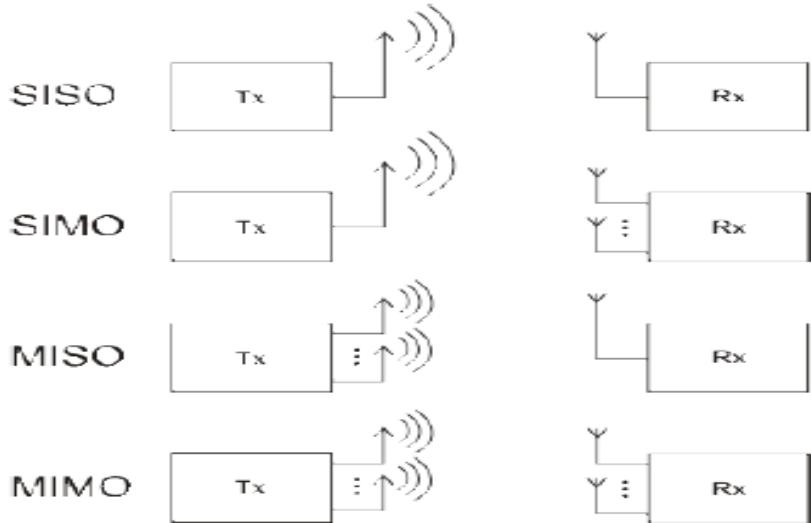
- cilj razvoja povećanje **brzine prijenosa** u **WLAN** mrežama
- **maksimalna teorijska brzina prijenosa** je **600 Mbit/s**
- koristi **kanale širine 40 MHz** (za razliku od **širine 20 MHz** u **prijašnjim normama**)
- koristi se u **pojasu** od **2,4 GHz** i **5 GHz**
- **glavna značajka** koju je ova norma uvela je **korištenje MIMO tehnike**

Norma IEEE 802.11ac

- odobrena u siječnju **2014**
- zahtjeva se **brzina prijenosa** veća od **1 Gbit/s**
- rad **isključivo** u **pojasu 5 GHz**
- **širina kanala** od **20 MHz** do **160 MHz**
- **modulacijski postupci** do **256-QAM**
- više **paralelnih prostornih tokova** (do **8**)
- više-korisnički **MIMO** (npr 4 niza podataka i 3 korisnika u istom sustavu)



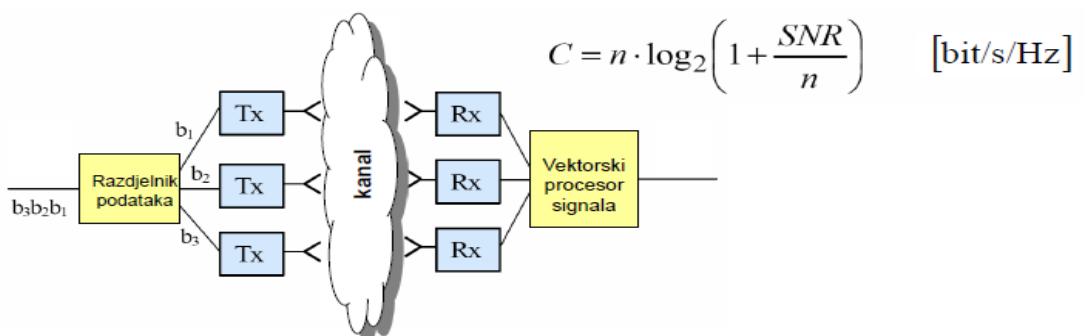
Postoji nekoliko osnovnih sustava odašiljanja i prijama radiosignalna



S = single
M = multiple
I = input
O = output

MIMO sustavi

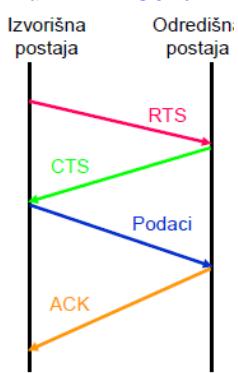
- prijamnik i odašiljač imaju više od jedne antene
- u istom kanalu omogućava se prijenos nezavisnih tokova podataka
- digitalni procesor signala (DSP) rekonstruira primljeni signal
- paralelni prijenos između n odašiljača i prijamnika povećava kapacitet kanala
- kad bi kanali bili nezavisni, ukupni kapacitet bio bi n puta veći od Shannonovog



- broj antena na prijamniku i odašiljaču ograničava maksimalni broj prostornih tokova koji se mogu stvoriti
- izraz oblika $a \times b : c$ u sebi sadrži 3 parametra koji opisuju neki MIMO sustav
 a – broj odašiljačkih antena
 b – broj prijamnih antena
 c – broj različitih prostornih tokova koji se prenose ($c \leq \min(a, b)$)

Primjer sustav $2 \times 3 : 2$ → sustav ima 2 odašiljačke i 3 prijamne antene kojima se prenose 2 niza podataka (prostorna toka)

Podsloj MAC u IEEE 802.11



- Određuje pravila za pristupanje zajedničkom radijskom mediju;
- Funkcije MAC protokola zajedničke su za sve vrste fizičkog sloja
- U WLAN mreži čvorovi ne mogu samostalno odrediti da li je prijenosni medij slobodan ili ne, i da li je došlo do sudara ili ne.

U WLAN mrežama za izbjegavanje sudara koristi se CSMA:

- izvođačni čvor šalje zahtjev za slanje RTS
- ako je slobodan odredišni čvor šalje slobodan za slanje CTS
- izvođačni čvor šalje podatke, a odredišni čvor potvrđuje prijam ACK

Detekcija nosioca

Koristi se radi utvrđivanja da li je prijenosni medij slobodan

Funkcija za fizičku detekciju nosioca provodi se u fizičkom sloju

Funkcija za virtualnu detekciju nosioca provodi se uz pomoć vektora dodjeljivanja kapaciteta mreže NAV

MOBILNE KOMUNIKACIJE

- Korisnici usluga prilikom komunikacije s drugim korisnicima mogu mijenjati svoj položaj unutar područja pokrivanja pojedinog **operatora**
- Promjena položaja podrazumijeva da je **pristup sustavu** ostvaren preko **radijskog sučelja** (**bežično**)
- Mobilni komunikacijski **sustav** je povezan sa **javnim fiksnim mrežama** i čini **globalnu komunikacijsku mrežu**
- Ako se usluge pružaju **unutar zatvorenog sustava** bez mogućnosti **javnog pristupa**, radi se o **privatnim mobilnim sustavima**

ćelijski sustav

Javni mobilni komunikacijski sustavi su ćelijske vrste

Bazna postaja (BS)

Sadrži odašiljačku i prijamnu opremu za odašiljanje/prijam signala do/od korisničke opreme te uređaje za povezivanje na **jezgrenu mrežu**.

Ćelija

Područje koje **bazna postaja** pokriva radijskim signalom.

Oblik i veličina ćelije ovise o: frekvencijskom području, dijagramu zračenja **antenskog sustava** i izračenoj snazi **bazne postaje**

Za pokrivanje većih područja koristi se više baznih postaja

Rubna područja susjednih ćelija se preklapaju.

To omogućava prekapčanje veze i kontinuiranu komunikaciju pri prijelazu **mobilne postaje (MS)** iz jedne ćelije u drugu.

Ograničenje u planiranju ćelijskog sustava je interferencija

Ćelije koje rade na istom kanalu ne smiju biti prostorno jedna blizu druge.

Radi povećanja kapaciteta sustava ograničava se snaga **baznih postaja**

Skup ćelija kod kojeg su jednom iskorišteni svi raspoloživi kanali naziva se **grozd ćelija**

Zadatak ćelijskog planiranja

Dodijeliti kanale ćelijama u grozdu, te grozdovima pokriti određeno područje pazeći da razmak istokanalnih ćelija bude dovoljno velik kako bi interferencija ostala u prihvatljivim granicama.



dvosmjerni (dupleksni) prijenos

Omogućava **kontinuiranu i istodobnu** komunikaciju (**full duplex**): u silaznoj vezi (**DL**), od bazne postaje prema korisničkim mobilnim uređajima i uzlaznoj vezi (**UL**), od korisničkih uređaja prema baznoj postaji

U realizaciji dupleksnog prijenosa mogu se koristiti dva pristupa:

frekvencijski dupleks (FDD)

Silazna i uzlazna veza odvojeni su frekvencijski.

Uzlazna veza je uvijek na nižoj frekvenciji od silazne veze.

Koriste se **dva odvojena bloka frekvencija** između kojih se nalazi **zaštitni interval**.

vremenski dupleks (TDD)

Silazna i uzlazna veza odvojeni su vremenski.

Koristi se **samo jedan blok frekvencija** koji se dijeli na **vremenske odsječke (slots)**.

Višestruki pristup

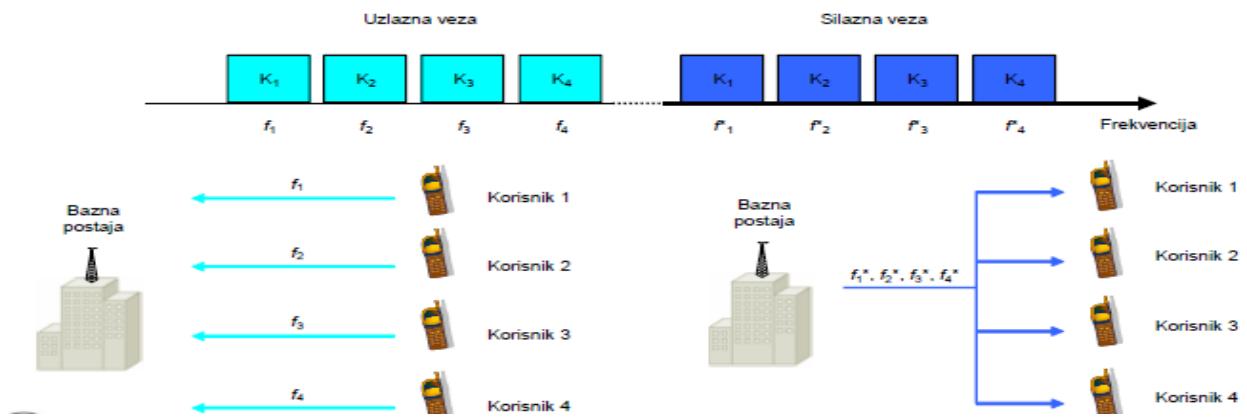
Zajednički prijenos signala koji dolaze iz različitih izvora u dodijeljenom bloku frekvencija uz mogućnost njihovog razdvajanja na odredištu.

Temeljni postupci za višestruki pristup

- Višestruki pristup s frekvencijskom raspodjelom (**FDMA**)
- Višestruki pristup s vremenskom raspodjelom (**TDMA**)
- Višestruki pristup s kodnom raspodjelom (**CDMA**)
- **OFDMA**

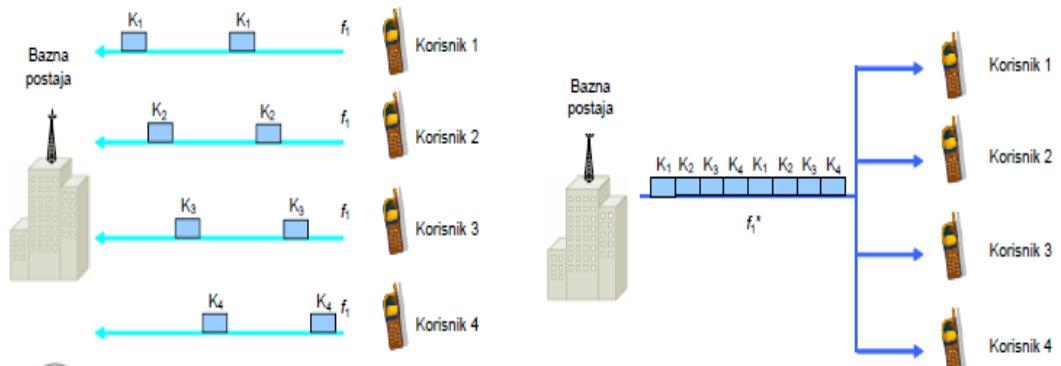
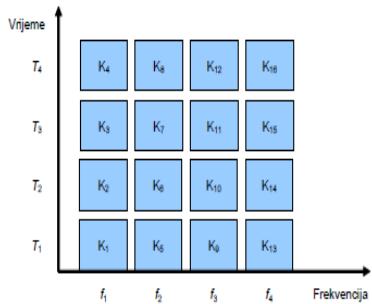
FDMA

- Svakom korisniku dodjeljuje se dio frekvencijskog područja
- Za odašiljanje signala u silaznoj vezi koriste se frekvencije $f_1^*, f_2^*, f_3^*, f_4^*$, koje su u paru s frekvencijama u uzlaznoj vezi f_1, f_2, f_3, f_4
- Korisnički uređaj izdvaja frekvenciju koja mu je unaprijed dodijeljena



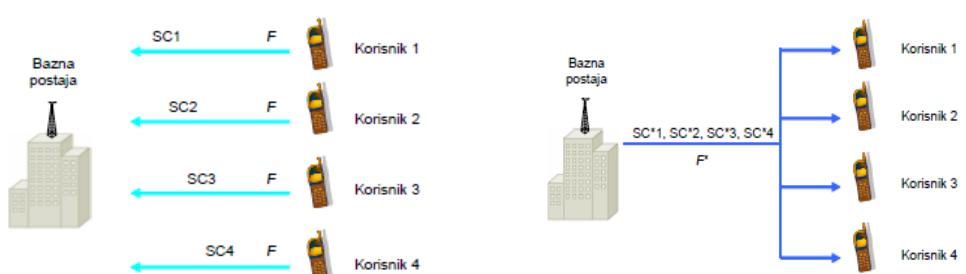
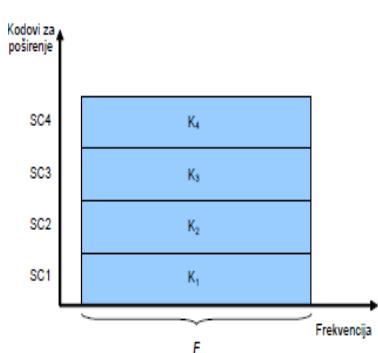
TDMA

- Raspoloživi frekvencijski spektar podijeljen je na uske frekvencijske pojaseve - **kanale**
- Pojedini **kanal** se dijeli na određeni broj vremenskih odsječaka (slot)
- Korisniku se dodjeljuje **vremenski odsječak** za pristup **kanalu**



CDMA

- Korisnik ima svoj određeni kod (skup kodova sadrži međusobno ortogonalne kodove)
- U uzlaznom smjeru, digitalna informacija se modulira uz uporabu jedinstvenog koda za raspršenje (**SC**)
- U silaznom smjeru koriste se kodovi za proširenje, a korisnički uređaj određenog korisnika prepoznaje i izdvaja samo informacije namijenjene tom korisniku.
- Kodovi za raspršenje **SC1, SC2, SC3, SC4**, se dodjeljuju korisnicima u trenutku uspostavljanja veze
- U silaznom smjeru informacije se proširuju kodovima za proširenje, **SC*1, SC*2, SC*3, SC*4**



MOBILNI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI

1G – Prva generacija

Prijenos **analognih** govornih **signala**
Koristili su modulaciju frekvencije FM

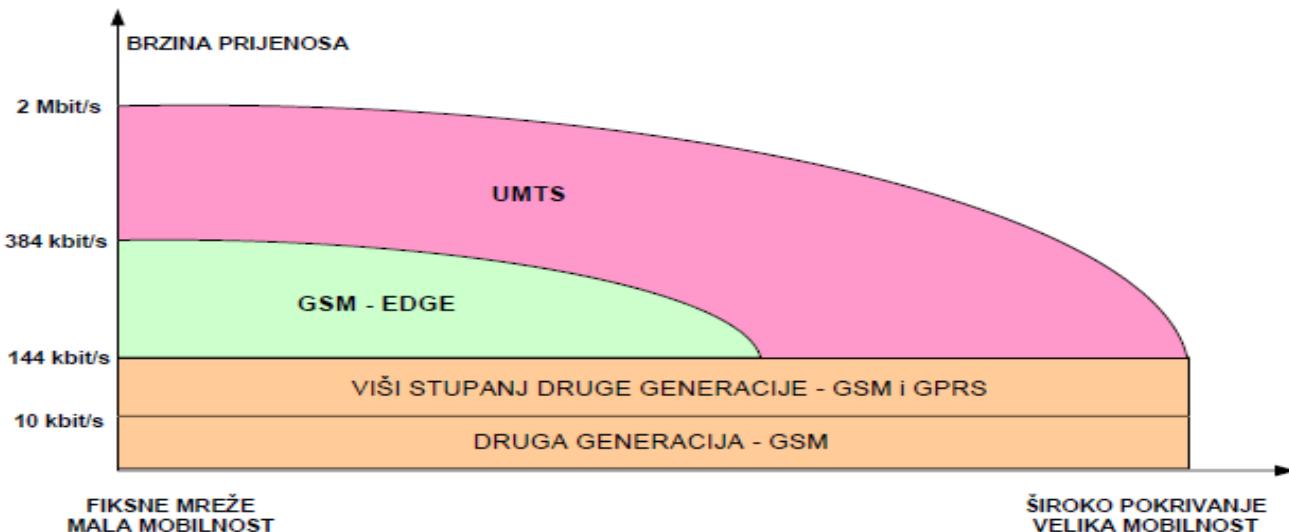
2G – Druga generacija

Globalni sustav mobilnih komunikacija (GSM)

3G – Treća generacija

UMTS sustav

Temelji se na tehnologiji **širokopojasnog višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom**



GSM

Koristi se za **komunikaciju** između **mobilnih telefona**

Koristi **modulacijski postupak GMSK**

Širina kanala 200 kHz

Koristi **FDMA/TDMA** pristup.

Svakoj frekvenciji pridružen je **vremenski okvir** koji se sastoji od **8 vremenskih odsječaka**

Koriste se **grozdovi** od $N = 3, 7$ ili **12** **ćelija**

Primjer: **GSM900** ima **124** **prijenosne frekvencije**

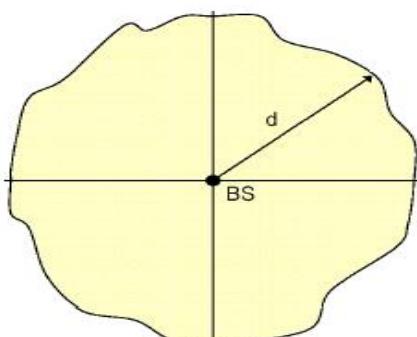
Ako u **grodzu** ima **12 ćelija** → svaka na raspolažanju ima **10** **prijenosnih frekvencija**

Na svakoj **prijenosnoj frekvenciji** možemo imati **8 TDMA kanala** što daje

kapacitet od 80 istovremenih poziva unutar **ćelije**

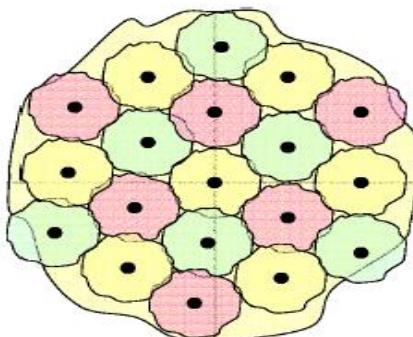
Ako u sustavu radi **više operatera** npr. **3**, svaka **ćelija** bi mogla koristiti **3 prijenosne frekvencije** (**24 istovremena poziva** unutar **ćelije**)

Pokrivanje istog područja različitim brojem ćelija



1 ćelija, 10 frekvencija

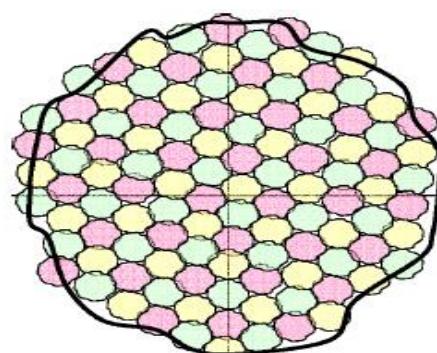
$$10 \times 8 \times 1 = 80 \text{ istodobnih poziva}$$



19 ćelija, svaka ćelija po 3 frekvencije
(ukupno 10 različitih frekvencija)

$$3 \times 8 \times 19 = 456 \text{ istodobnih poziva}$$

manje ćelije → povećanje kapaciteta



Veliki broj ćelija, svaka ćelija po 3 frekvencije (ukupno 10 različitih frekvencija)

Broj istodobnih poziva određen je brojem ćelija,

npr. broj ćelija = 126

$$3 \times 8 \times 126 = 3024 \text{ istodobna poziva}$$

