

Radijske pristupne mreže

Doc. dr. sc. Gordan Šišul

Modulacijski postupak, multipleksiranje i frekvencijski spektar

Osnovni pojmovi o diskretnoj modulaciji

- Radijske lokalne mreže pripadaju skupini digitalnih komunikacijskih sustava, tj. one služe za prijenos digitalnog oblika informacije.
- Digitalna informacija opisana je konačnim brojem binarnih znakova i predočuje se diskretnim električnim signalom. Zbog toga se u prijenosu koriste postupci diskretne modulacije sinusnog signala.
- Svakoj diskretnoj razini modulacijskog signala odgovara jedno diskretno stanje amplitude, frekvencije ili faze moduliranog signala ili pak neka njihova kombinacija.
- *Simbolom* se naziva dio moduliranog signala s jednim stanjem moduliranog parametra.
- Modulirani je signal predočen slijedom simbola.

Osnovni pojmovi o diskretnoj modulaciji

- Binarni postupci rabe samo dva simbola. Svakom od njih pridružuje se jedan bit.
- Kad ima više simbola (njihov broj je neka potencija broja 2) onda se svakom od njih pridružuje više bita.
- *Brzina prijenosa simbola* ili *brzina signaliziranja* jednaka je:

$$R_S = 1/T_0 \text{ [Bd]}, \quad T_0 - \text{trajanje simbola}$$

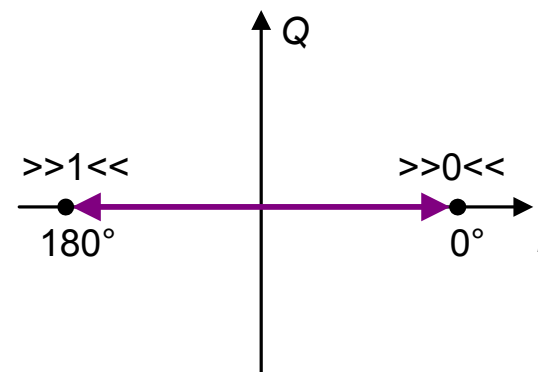
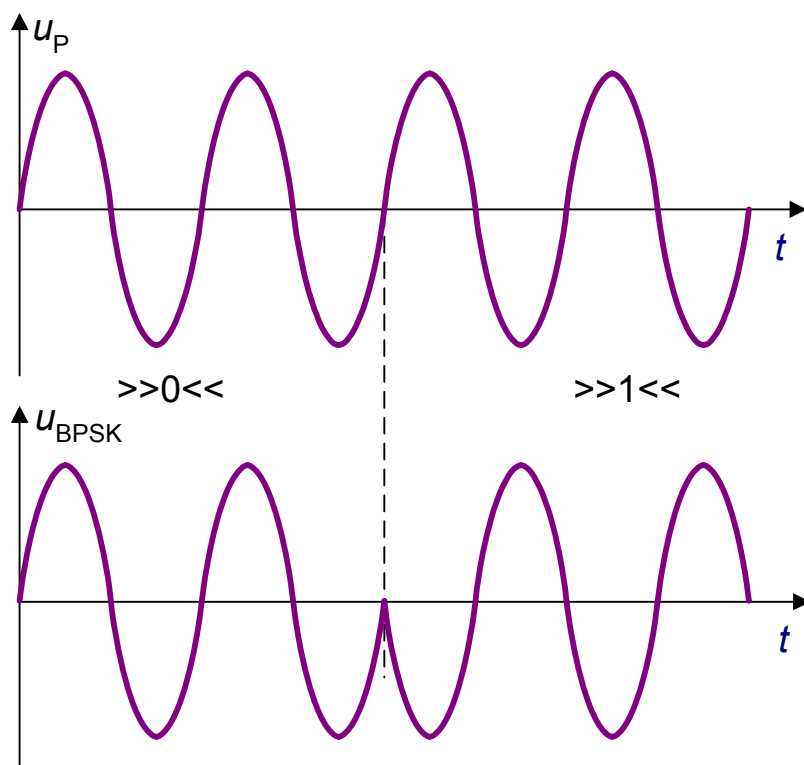
- *Brzina prijenosa bita* jednaka je:

$$R_D = R_S \log_2 M \text{ [bit/s]}, \quad M - \text{broj simbola}$$

- Kvaliteta prijenosa mjeri se *vjerojatnošću pogreške simbola* p_{Es} ili SER (*Symbol Error Rate*) odnosno *vjerojatnošću pogreške bita* p_{Eb} ili BER (*Bit Error Rate*).

Modulacijski postupak BPSK

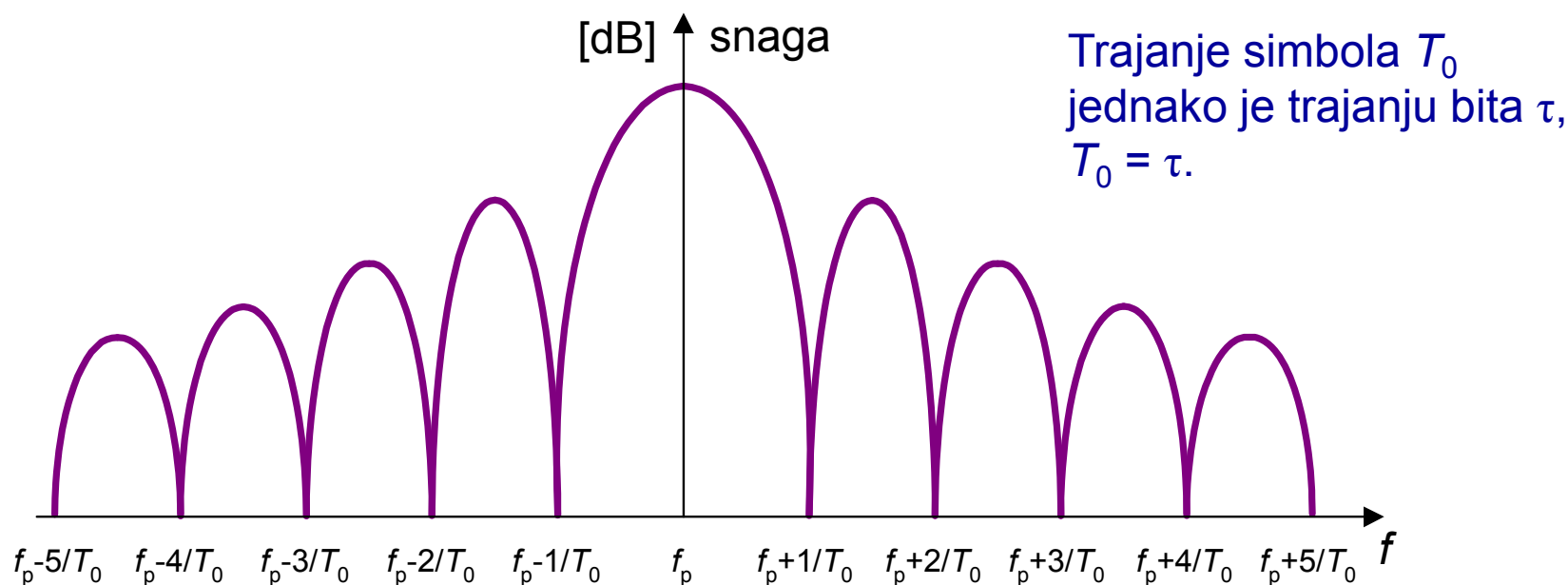
- Binarna diskretna modulacija faze (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*) rabi samo dva stanja faze: 0° i 180° .



Modulacijski postupak BPSK (nastavak)

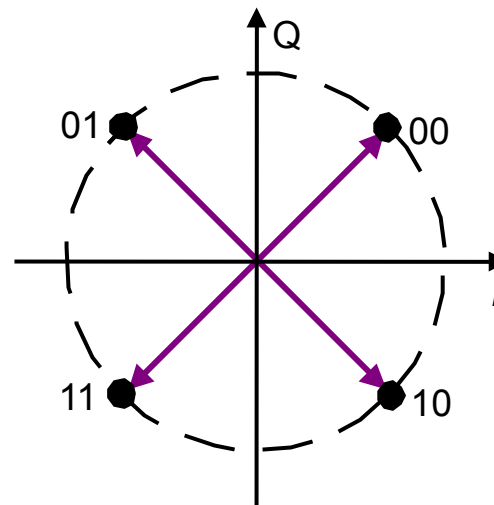
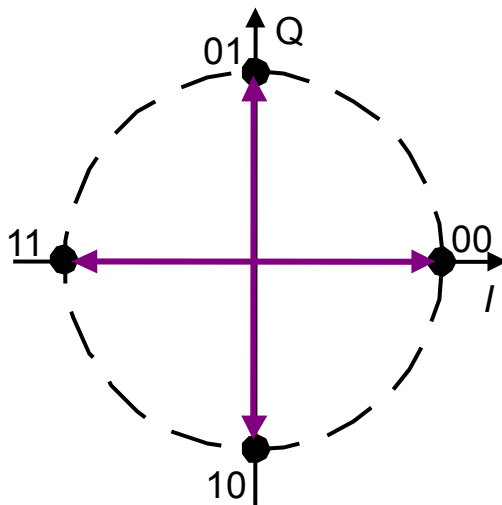
- *Spektralna učinkovitost*, koja odgovara broju prenesenih bita u sekundi po jedinici zauzete širine pojasa frekvencija, uz idealno Nyquistovo filtriranje, iznosi 1 bit/s/Hz za BPSK.

ovojnica spektra snage BPSK-signal



Modulacijski postupak QPSK

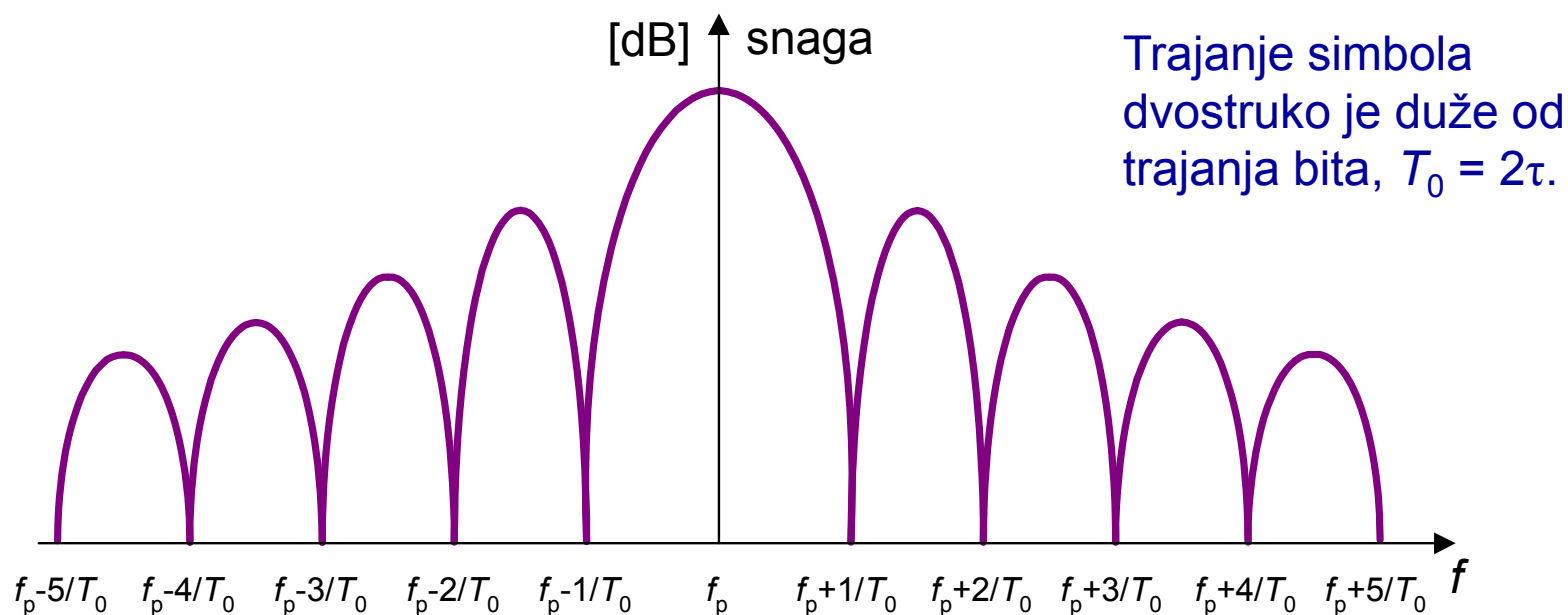
- *Kvaterarna diskretna modulacija faze (Quaternary Phase Shift Keying ili Quadriphase PSK)* rabi četiri stanja faze:
 - 0° , $\pm 90^\circ$ i 180° u jednoj varijanti ili,
 - $\pm 45^\circ$ i $\pm 135^\circ$ u drugoj varijanti.
- Broj simbola iznosi $M = 4$. Svakom simbolu (stanju faze) pridružuju se dva bita odnosno *dibit*.



Modulacijski postupak QPSK (nastavak)

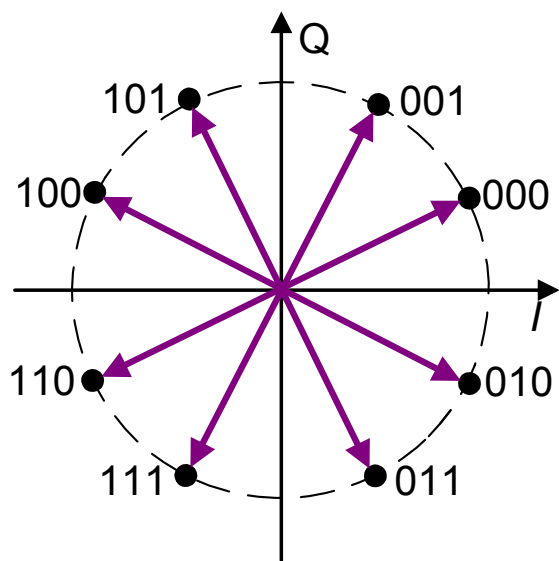
- Brzina prijenosa simbola upola manja od brzine prijenosa binarnih znakova.
- Spektralna učinkovitost idealno iznosi 2 bit/s/Hz.

ovojnica spektra snage QPSK-signal



Modulacijski postupak 8-PSK

- U modulacijskom postupku 8-PSK osam je stanja faze i to:
 - $0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ$ i 180° u jednoj varijanti ili,
 - $\pm 22,5^\circ, \pm 67,5^\circ, \pm 112,5^\circ$ i $\pm 157,5^\circ$ u drugoj varijanti.
- Broj simbola iznosi $M = 8$. Svakom simbolu (stanju faze) pridružuju se tri bita odnosno *tribit*.



- *Spektralna učinkovitost* idealno iznosi 3 bit/s/Hz.
- Ovojnica spektra snage odgovara onoj u BPSK ili QPSK s tim da je $T_0 = 3\tau$.
- Postupak 16-PSK jako je osjetljiv na smetnje – rijetko se koristi.

Diferencijalna PSK — DPSK

- Dvije su temeljne vrste PSK-signalâ s obzirom na naâin pridruŹivanja informacije:
 - Kod *koherentnih PSK-popstupaka*, npr. CBPSK (*Coherent BPSK*) ili CQPSK (*Coherent QPSK*) informacija je sadrŹana u relativnoj fazi moduliranog signala.
 - Demodulacija se moŹe obavljati samo koherentnim postupcima tj. izravnom usporedbom faza moduliranoga i referentnog signala.
 - Zahtjev za poznavanjem faze referentnog signala iz odašiljaâ predstavlja poteškoâu u uvjetima mobilnog odašiljaâ i/ili prijarnika.
 - U diferencijalnim postupcima informacija nalazi u promjeni faze moduliranog signala.
 - Pri demodulaciji se faza simbola uspoređuje s fazom prethodnog simbola, drugim rijeâima utvrđuje se diferencijalna faza.
 - Odgovarajuâi se postupci onda nazivaju *diferencijalnom PSK* (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*).

Diferencijalna PSK — DPSK (nastavak)

- Kvantitativne promjene faze diferencijalnih postupaka uzimaju se jednakima apsolutnim vrijednostima faze kod koherentnih postupaka.

Pravilo pridruživanja promjena faze simbola

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

Diferencijalna PSK — DPSK (nastavak)

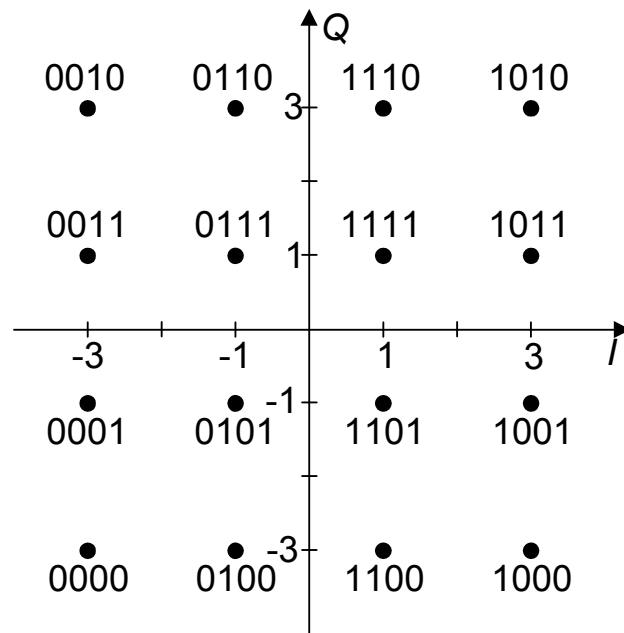
Faze simbola koherentnoga i diferencijalnog PSK-signalâ za jedan primjer niza binarnih znakova

Niz binarnih znakova		1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Faza CBPSK-signalâ		π	0	π	π	0	0	0	π	0	0
Faza DBPSK-signalâ	π	0	0	π	0	0	0	0	π	π	π

Niz binarnih znakova		10	11	00	01	00
Faza CQPSK-signalâ		$3\pi/2$	π	0	$\pi/2$	0
Faza DQPSK-signalâ	0	$3\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	π	π

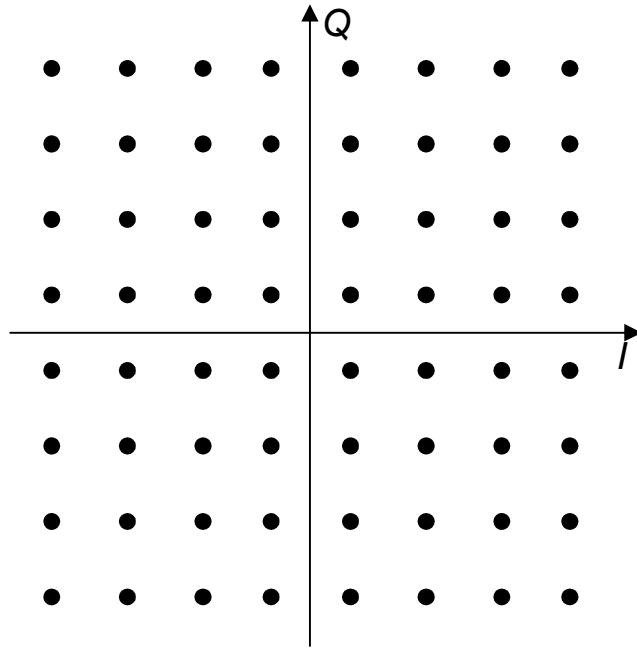
Kvadratura modulacija amplitude – QAM

- *Kvadratura modulacija amplitude* (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) nastaje kad dva međusobno neovisna diskretna signala moduliraju amplitude dviju kvadraturnih komponenti sinusnoga prijenosnog signala.
 - QAM pripada skupini tzv. hibridnih modulacijskih postupaka kod kojih se modulacijom mijenjaju dva parametra nosioca: amplituda i faza.



- 4-QAM u potpunosti je istovjetan QPSK.
- Svakome od šesnaest simbola 16-QAM postupka pridružuje se po četiri bita, pa je trajanje simbola četiri puta dulje od trajanja bita ($T_0 = 4\tau$).
- Najviši teorijski iznos spektralne učinkovitosti za 16-QAM iznosi 4 bit/s/Hz.

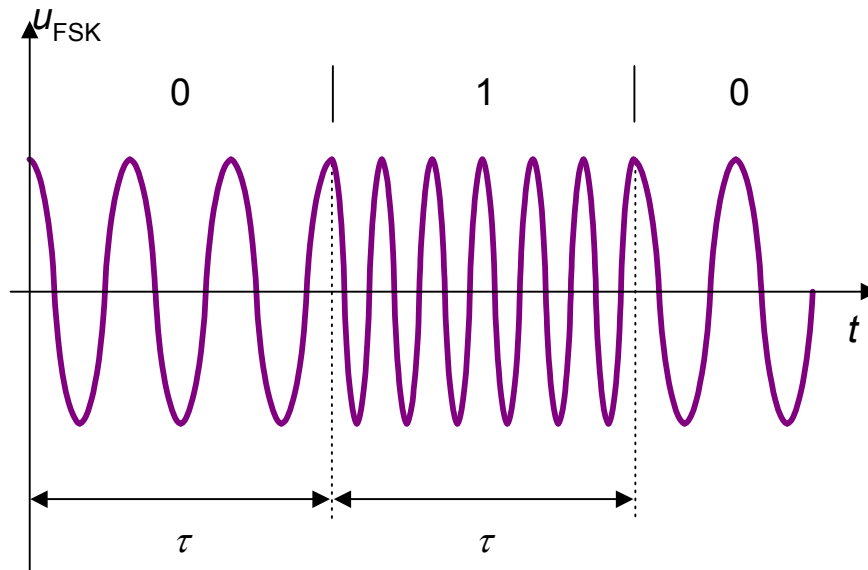
Kvadratura modulación amplitude – QAM



- Još se veća spektralna učinkovitost postiže pridruživanjem po šest bitova svakom simbolu QAM-signalu što bi idealno dalo 6 bit/s/Hz. Za ostvarenje toga potreban je modulaijski postupak s 64 različita simbola. 64-QAM jedan je od takvih postupaka.
- Pri daljnjem povećanju broja simbola moduliranog signala (postupak 256-QAM npr.) raste spektralna učinkovitost, ali i osjetljivost na smetnje.
- Povećani zahtjevi na odnos signala i šuma ograničavaju najveći mogući broj stanja QAM-signalu.

Diskretna modulacija frekvencije – FSK

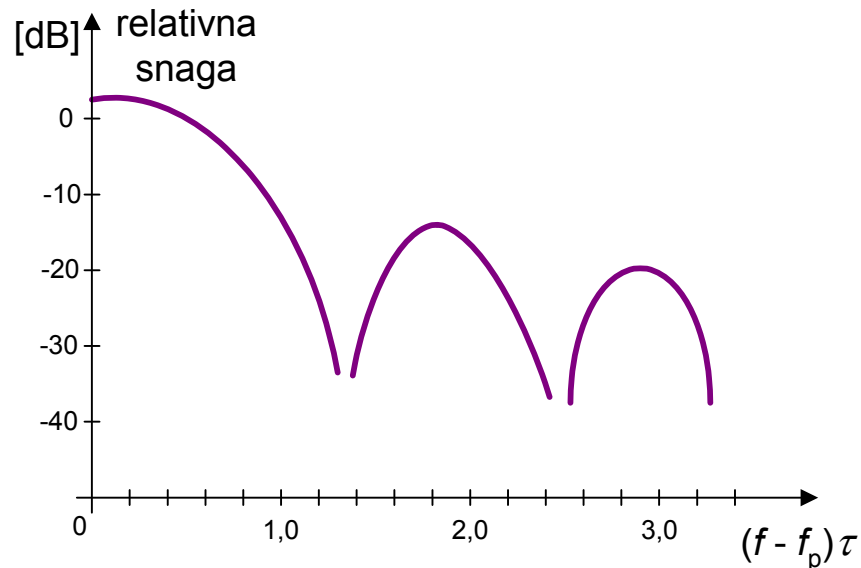
- Simboli FSK-signal (FSK, *Frequency Shift Keying*) odgovaraju sinusnim titrajima različitih diskretnih frekvencija.
 - Osim koherentnima FSK-signal se može demodulirati i nekoherentnim postupcima.
 - Binarna diskretna modulacija frekvencije (BFSK, *Binary Frequency Shift Keying*) rabi dva simbola odnosno dvije frekvencije.



- Indeks modulacije jednak je: $m_{fsk} = \Delta f / R_S$, Δf – razmak diskretnih frekvencija.
- Modulacijski postupci M -FSK koriste M simbola, odnosno M frekvencija.
 Primjer: *Kvaternarna FSK*, 4-FSK, sadrži četiri simbola odnosno frekvencije.

Diskretna modulacija frekvencije – FSK

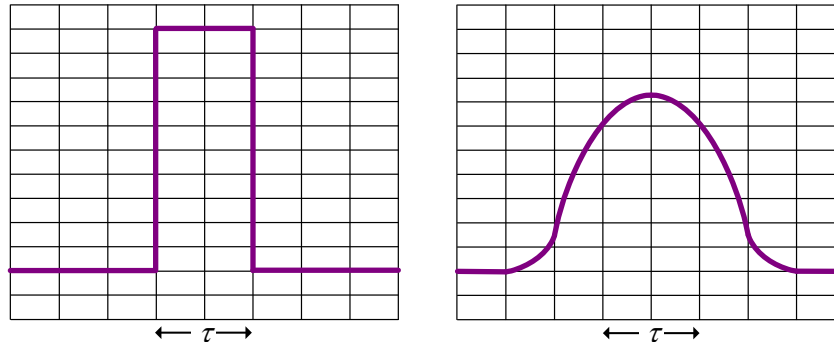
Ovojnica spektra snage BFSK-signala za $m = 0,25$



- Radi smanjenja širine zauzetog pojasa frekvencija filtriranjem se oblikuju impulsi diskretnoga modulacijskog signala. Koriste se niskopropusni filtri:
 - filtri s kosinusno zaobljenom frekvencijskom karakteristikom,
 - Gaussovi filtri u kojih impulsni odziv filtra odgovara Gaussovoj funkciji.

Gaussova – GFSK

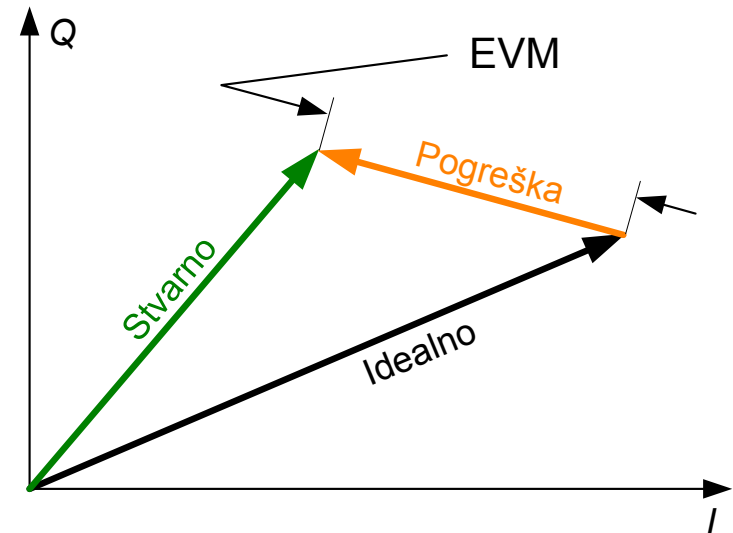
- Gaussova diskretna modulacija frekvencije (GFSK, *Gaussian FSK*) primjenjuje Gaussov niskopropusni filter.
 - Nakon filtriranja modulacijski signal gubi svoja diskretna obilježja i on postaje kontinuirana funkcija vremena.



- Zbog ograničavanja širine pojasa dolazi do proširenja impulsa modulacijskog signala što je uzrokom interferencije među simbolima (ISI, *Inter-Symbol Interference*).
- Normirana širina pojasa filtra jednaka je $B \cdot T_0$, odnosno $B \cdot \tau$ u binarnih modulacija. S B označena je tzv. 3-dB širina pojasa Gaussovog filtra. Kod jedne vrste WLAN-a koriste se filtri s $B \cdot T_0 = 0,5$.

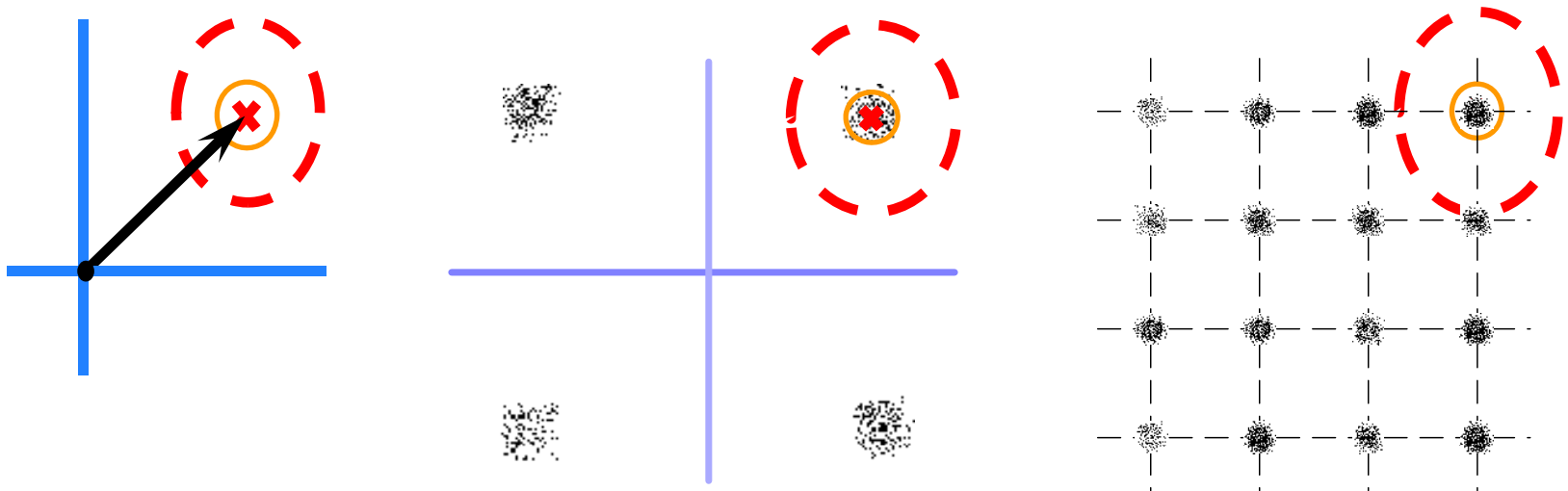
Kvaliteta modulacije

- Pogreške su uzrokom promjena parametara simbola moduliranog signala.
 - Izvori pogrešaka su:
 - aditivni šum,
 - nelinearna izobličenja,
 - linearna izobličenja,
 - fazni šum,
 - sporedne emisije (*spurious*),
 - ostale pogreške modulacije
 - Kao mjera kvalitete modulacije uzima se “veličina vektora pogreške”, EVM (*Error Vector Magnitude*).
 - Svaki simbol ima svoj vektor pogreške.
 - EVM se uzima kao efektivna vrijednost preko većeg broja simbola (uobičajeno je uzimati 1000 simbola).



Smetnje, šum i vjerojatnost pogreške

- Smetnja mijenja položaj vrha vektora moduliranog signala koji prikazuje stanje simbola moduliranog signala.
 - Stanje simbola se rasipa oko mjesta na kojem bi on trebao biti.
 - Pri višoj razini smetnje povećava se površina po kojoj se on rasipa.
 - Kad superponirana smetnja prebaci vrh vektora moduliranog signala u susjedni kvadrant dijagrama stanja, kod PSK npr., doći će do pogrešnog prepoznavanja simbola što rezultira pogreškom u demodulaciji bita.



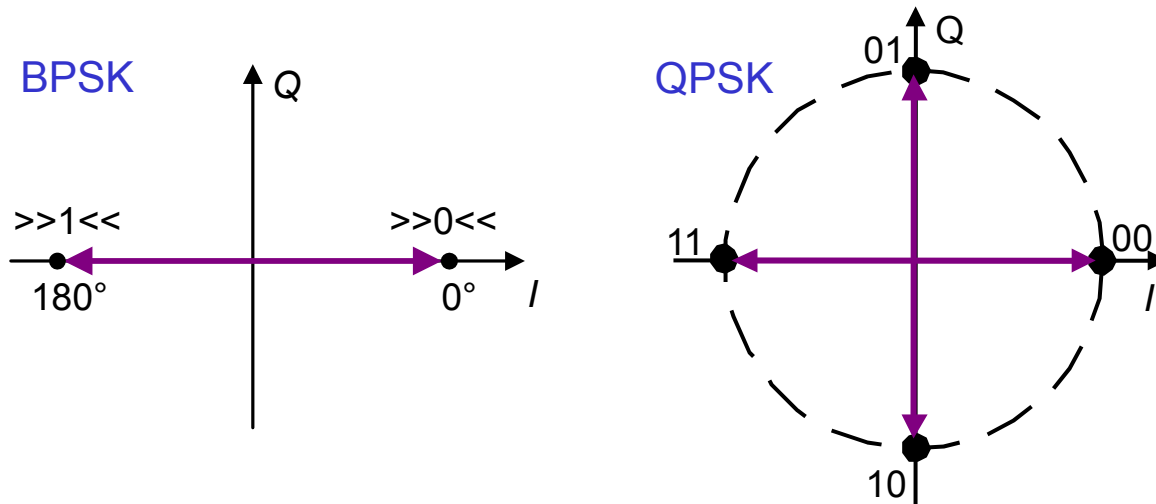
Smetnje, šum i vjerojatnost pogreške

(nastavak)

- Stanja BPSK-signalala nalaze se na $\sqrt{2}$ puta većoj udaljenosti u ravnini I – Q u odnosu na odgovarajuća stanja QPSK-signalala.
 - To pokazuje da je QPSK osjetljiviji na smetnje. Može se pokazati da je:

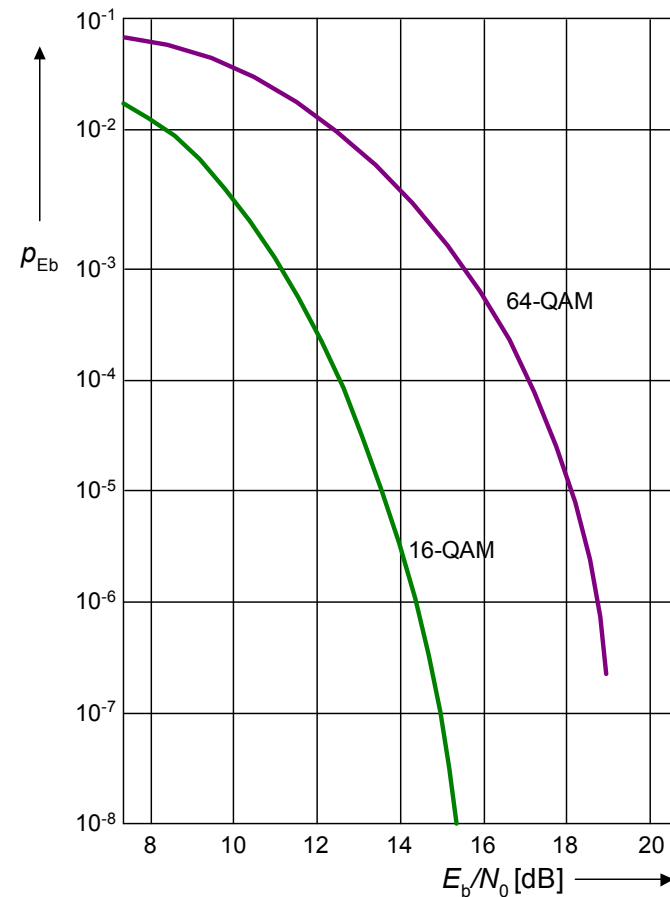
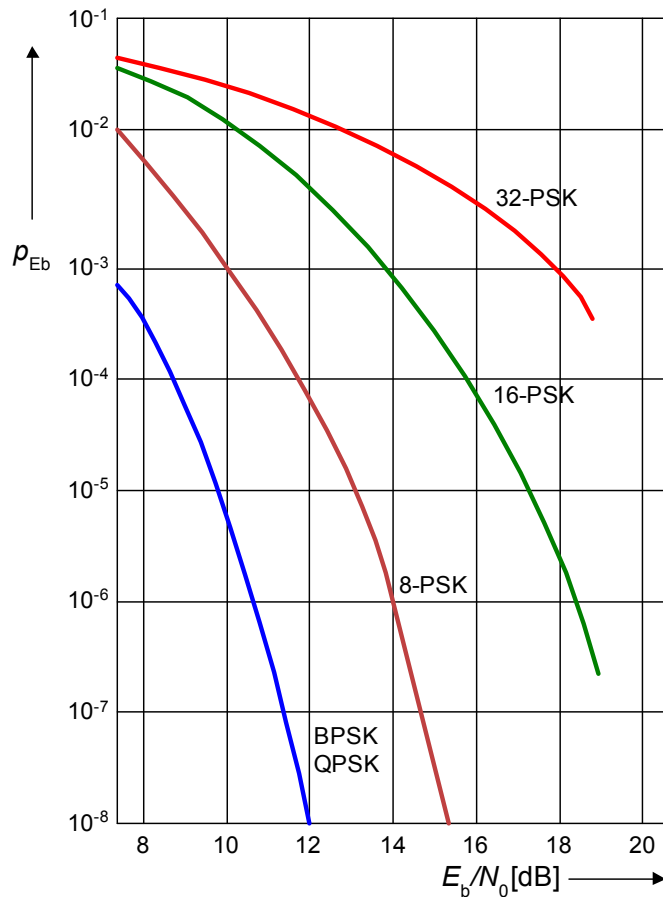
$$p_{\text{Es(QPSK)}} = 2 \cdot p_{\text{Es(BPSK)}}$$

- Stanja 8-PSK-signalala nalaze se na još manjoj udaljenosti. Zato je 8-PSK još osjetljiviji na smetnje, tj. veća je vjerojatnost pogreške simbola.



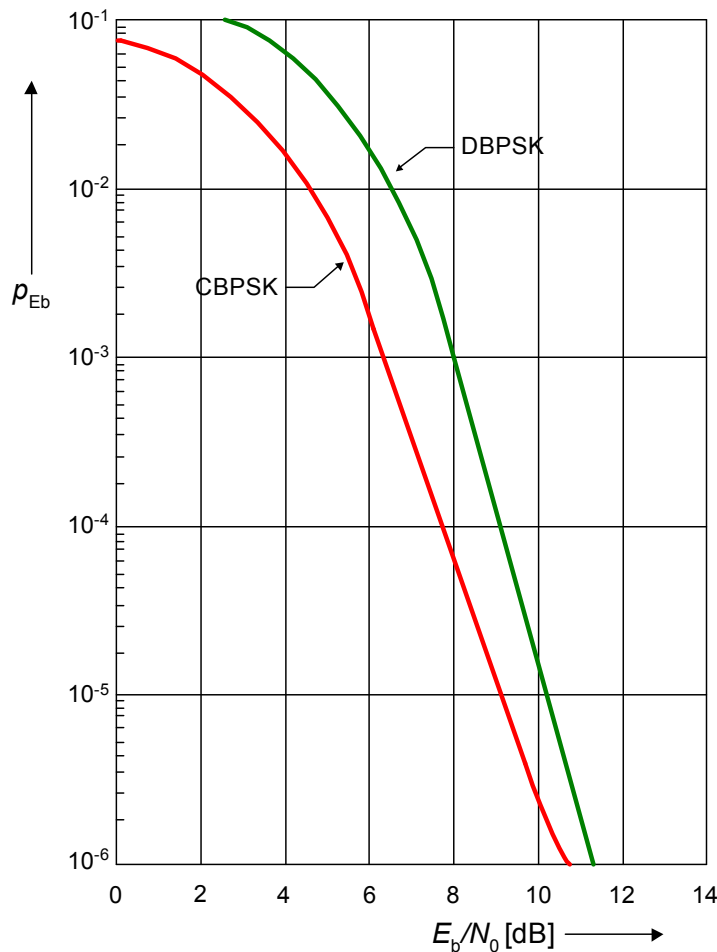
Vjerojatnost pogreške prijenosa

Vjerojatnost pogreške bita u M -PSK- i u M -QAM-sustavima

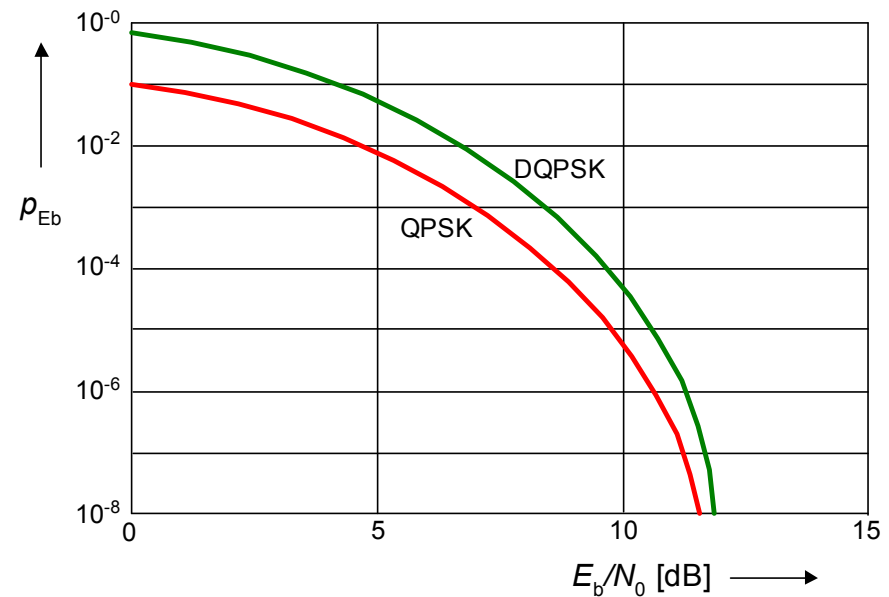


Vjerojatnost pogreške prijenosa (nastavak)

Vjerojatnost pogreške u koherentnima i diferencijalnim sustavima

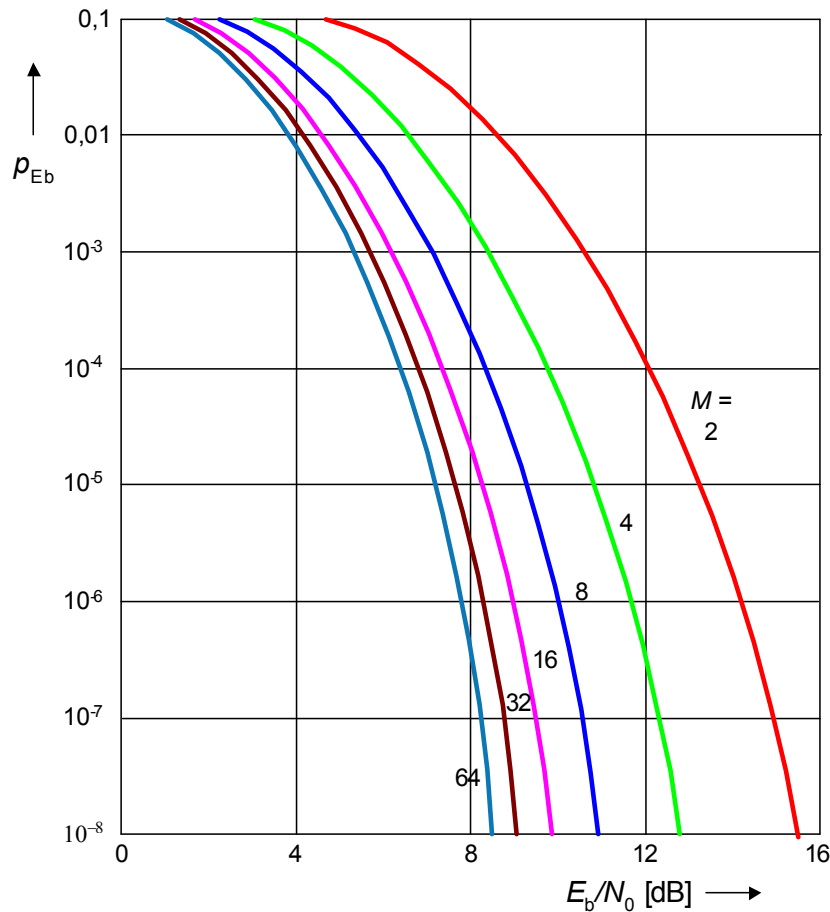


Diferencijalni postupci PSK osjetljiviji su na smetnje od odgovarajućih koherentnih postupaka.



Vjerojatnost pogreške prijenosa (nastavak)

Vjerojatnost pogreške bita u nekoherentnom M -FSK-sustavu



- Sustavi s nekoherentnom demodulacijom pokazuju veću osjetljivost na smetnje od sustava koji rabe koherentni postupak.
- Usprkos tome, nekoherentna se demodulacija znatno češće susreće zbog jednostavne izvedbe odgovarajućih sklopova.

Tehnike proširenog spektra

Osnovna blok shema sustava s proširenim spektrom



- Kod sustava s proširenim spektrom (SS, *Spread Spectrum*) širina zauzetog RF pojasa neovisna je o informaciji u osnovnom pojasu. Ona je mnogo veća od minimalno potrebne širine pojasa za prijenos informacije određene kvalitete.

Tehnike proširenog spektra (nastavak)

- Proširenje pojasa može se realizirati na dva načina:
 - Postupak s *izravnim slijedom* DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).
 - Svaki informacijski impuls osnovnog pojasa proširi se nizom mnogo užih impulsa (podimpulsi, u stranoj literaturi oni se označuju kao *chip*).
 - Niz podimpulsa dio je tzv. PN-slijeda (*Pseudorandom Numerical*) određene duljine.
 - PN-slijed bi trebao imati karakteristike šuma tj. ciklus ponavljanja bi trebao težiti ka neizmjernom.
 - Postupak sa *skakanjem frekvencije* FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)
 - Pojedini dijelovi osnovne informacije prenose se nosiocima različitih frekvencija.
 - PN-slijed upravlja frekvencijama nosilaca. Zauzeti pojas najčešće je širi nego što je uobičajeno koristi kod DSSS sustava.

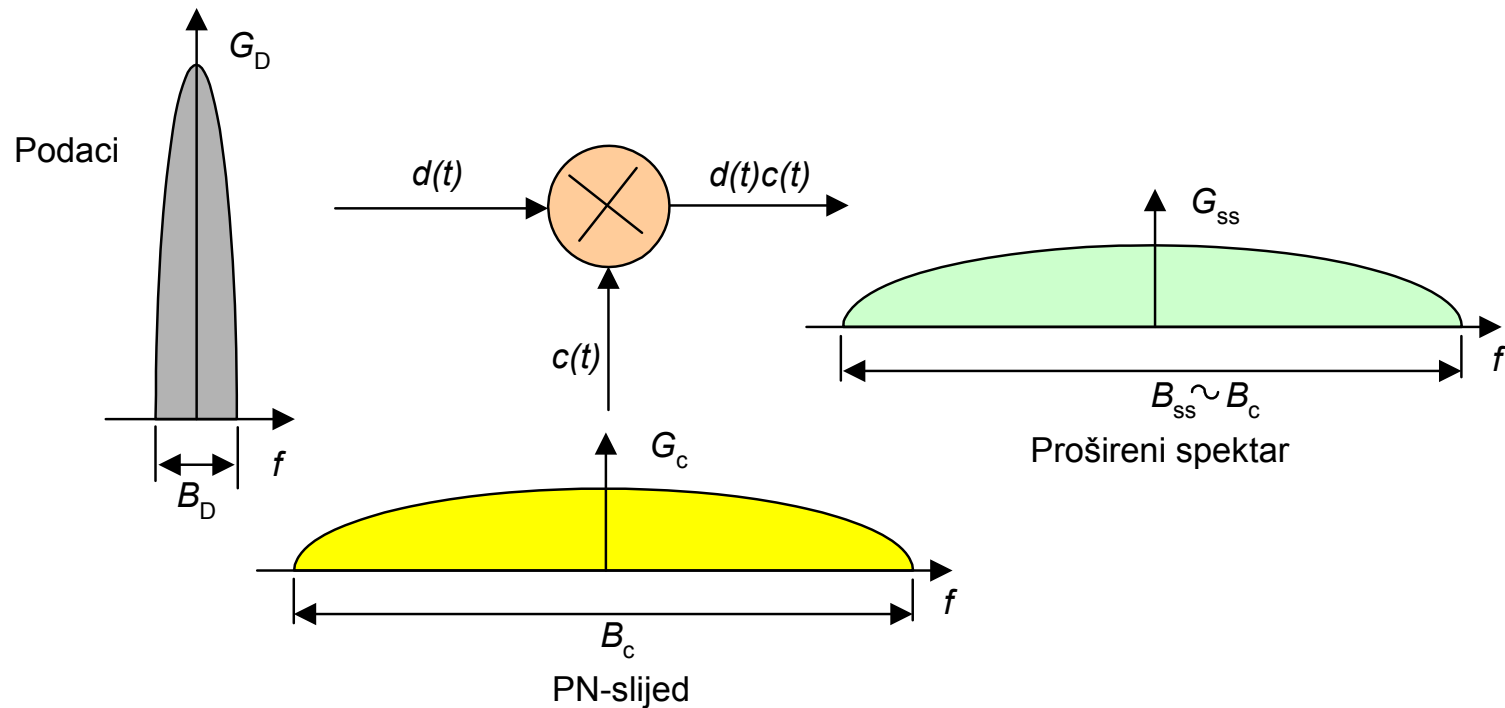
Sustavi s izravnim slijedom – DSSS

- Postoji mogućnosti održavanja veze u uvjetima slaboga prijemnog signala (mali SNR) te uz prisutnost uskopojasnih ili širokopojasnih smetajućih signala.
 - Procesni dobitak grubo pokazuje koliko pri ovoj tehnici SNR (*Signal to Noise Ratio*) može biti manji u odnosu na SNR kod klasičnih modulacija, a da se ostvari jednaka kvaliteta prijemnog signala.
 - *Procesni dobitak* G_p se pri DSSS određuje:
 - u vremenskom području kao omjer širine podatkovnog impulsa T_D i širine podimpulsa T_c koji se nalazi u PN-slijedu,
 - u frekvencijskom području kao omjer konačnog RF pojasa B_{SS} i pojasa informacijskog signala B_D (veličina B_D se često izražava kao brzina protoka informacijskih bita R_D što su u potpunosti kompatibilne veličine).

Red veličine ostvarivih procesnih dobitaka leži u rasponu od 10 do 1000 (10 do 30 dB). IEEE 802.11 radna grupa utvrdila je da za potrebe WLAN-a minimalna vrijednost procesnog dobitka mora iznositi barem 11.

Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

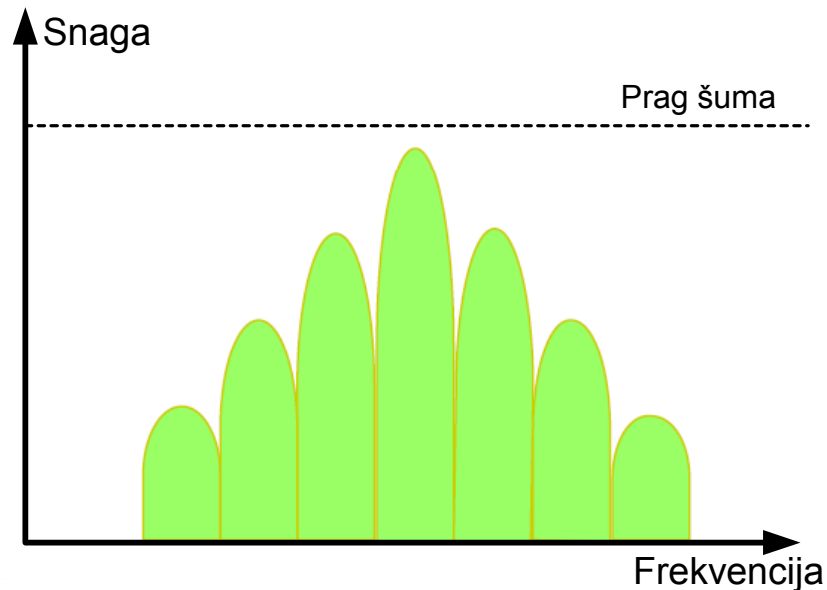
Obrada signala u odašiljaču



- Proširenje spektra se postiže množenjem svakog podatkovnog impulsa slijedom podimpulsa određenog trajanja.

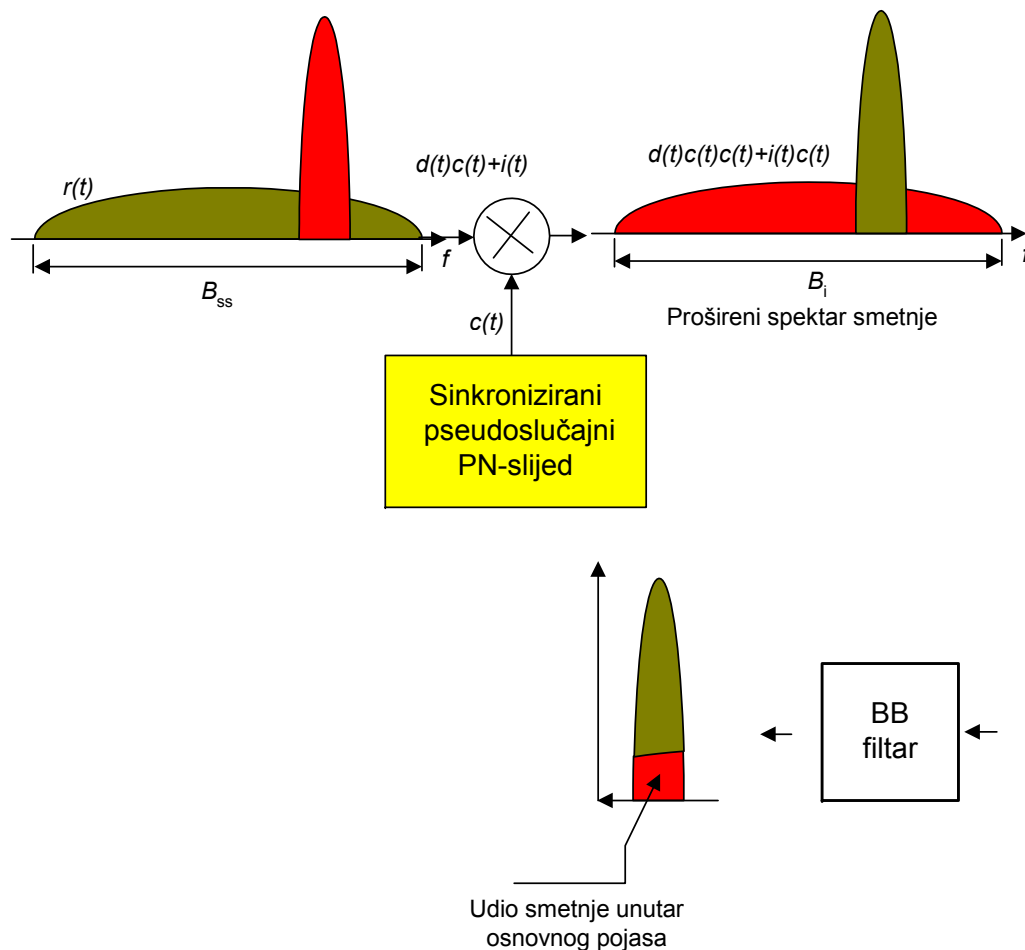
Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

- Signali nastali proširenjem spektra u frekvencijskom području izgledaju kao šum. Razina DSSS-signalu pada ispod praga šuma bez gubitka informacije.
- Za prijamnike izvan sustava DSSS-signal predstavlja širokopojasni šum male snage. Takav signal nema utjecaja na većinu uskopojasnih prijamnika.



Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

Obrada signala u prijamniku



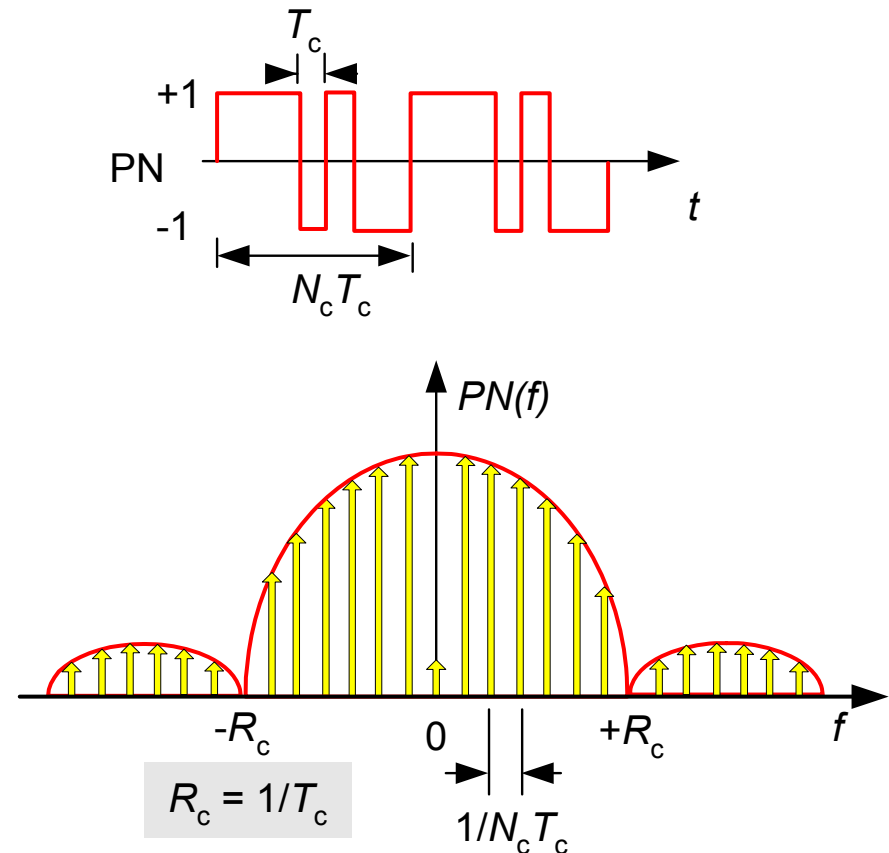
- Prošireni korisni signal sažima se na prijašnju širinu B_D , dok se sve smetnje (posebno one uskopojasne) proširuju.
- Na ovaj se način smanjuje gustoća spektra snage smetajućeg signala u pojasu B_D i poslije filtriranja od smetnje ostaje samo vrlo mali ekcesni šum.

BB-filtar (*Baseband*), filtar u osnovnom pojasu frekvencija.

Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

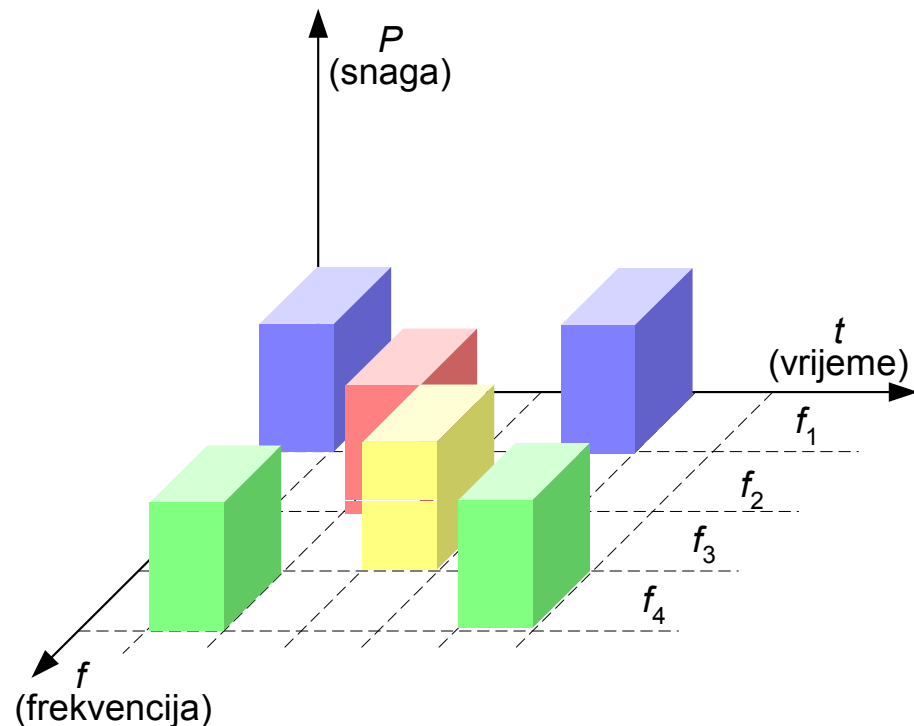
- Za proširenje podatkovnog informacijskog bita koristi se cijeli niz kodova čija svojstva umnogome određuju sveukupna svojstva cijelog DSSS sustava.
- Jednu grupu čine pseudoslučajni ili PN-kodovi. Oni se koriste i kod DSSS i kod FHSS.
- Neki zahtjevi na PN-kodove:
 Udio «1» i «0» trebao bi biti ujednačen tako da se energija jednoliko raspodjeli preko cijelog frekvencijskog pojasa (svojstva bijelog šuma).
 Mora imati izrazito nisku križnu korelaciju u odnosu na ostale korištene kodove. To je vezano uz razlučivost korisnika.

Primjer PN-slijeda od 7 podimpulsa



Sustavi sa skakanjem frekvencije – FHSS

- Radna frekvencija (frekvencija nosioca) skokovito se mijenja unutar određenoga frekvencijskog područja koje može biti čak za red veličine šire od onoga u DSSS.
- Promjenama frekvencije upravlja neki kod, najčešće PN-slijed.
- Za moduliranje nosioca skokovite promjene frekvencije najčešće se koristi postupak *M*-FSK.

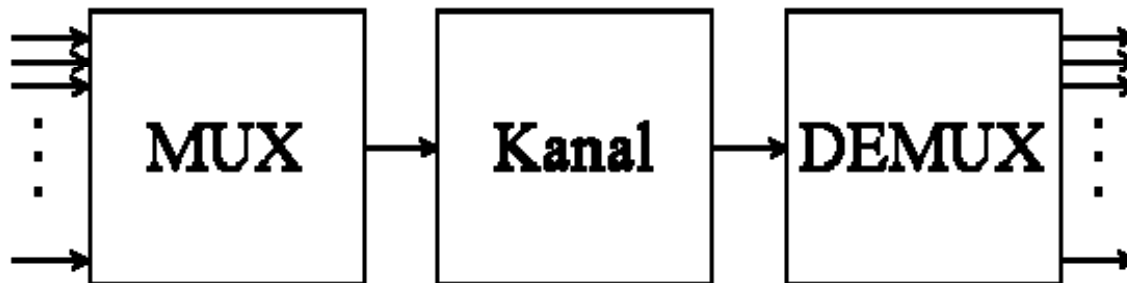


FHSS-sustavi (nastavak)

- FHSS-sustavi dijele se prema veličini dijela informacijskog slijeda koji se prenosi u jednom skoku.
 - Sustavi sa sporim frekvencijskim skakanjem SFH (*Slow Frequency Hopping*) prenose barem jedan M-FSK simbol (ili više njih) u intervalu između dva skoka frekvencije.
 - Sustavi s brzim frekvencijskim skakanjem FFH (*Fast Frequency Hopping*) između dva skoka frekvencije prenosi se dio jednog M-FSK simbola.
- Radna frekvencija svakoga komunikacijskog kanala mijenja se po drugom kodu.
 - Potrebno je sinkrono skakanje radne frekvencije odašiljača i prijamnika po istom kodu.
 - *Ortogonalni kodovi* nikad ne koriste iste frekvencije u isto vrijeme.

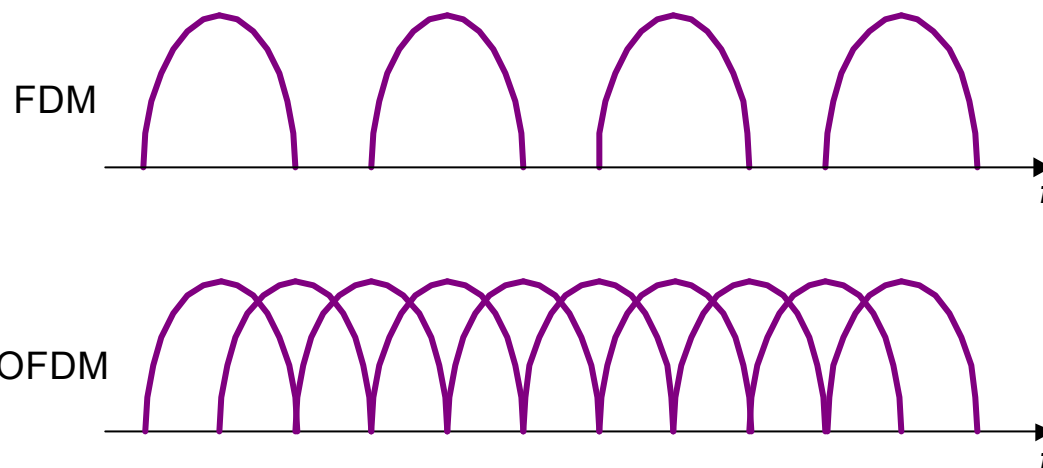
Što je OFDM?

- OFDM je akronim za *Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca* (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*).
- OFDM je u osnovi jedna tehnika multipleksiranja.
- OFDM se dobiva digitalnom obradom simbola moduliranog signala i naknadnom modulacijom.
- OFDM dijeli kanal na veći broj podpojaseva, podkanala.
- Digitalna informacija velike brzine raspodjeljuje se na podkanale gdje modulira podnosioce.
- Brzina prijenosa u svakom podkanalu je mala → produljeno je trajanje simbola moduliranog signala u podkanalu.



FDM i OFDM

- FDM** → Podkanali se ne smiju preklapati.
Između susjednih kanala postoji zaštitni pojas.
Koristi se nekoherentna demodulacija podkanala.
- OFDM** → Dopušta se određeno preklapanje podkanala.
Ne dolazi do međudjelovanja podkanala zbog *ortogonalnosti* podnosilaca.
Koristi se koherentna demodulacija podkanala.



Što znači pojam *ortogonalan*?

- *Ortogonalnost* je svojstvo koje se pridružuje jedinkama koje su međusobno neovisne. Matematički to znači da se ni jedna od njih ne može se prikazati kao linearna kombinacija ostalih.
 - Podnosioci sinusnog oblika su ortogonalni na intervalu trajanja T_0 ako je:

$$\int_0^{T_0} \cos(2\pi f_v \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_z \cdot t) dt \begin{cases} = 0, & \text{za } f_v \neq f_z \\ \neq 0, (= T_0) & \text{za } f_v = f_z \end{cases}$$

- Uvjet " $= 0$ " bit će ispunjen samo ako se ova dva podnosioca na intervalu T_0 razlikuju za cijeli broj perioda \rightarrow frekvencije f_v i f_z moraju biti višekratnici iste temeljne frekvencije f_0 .

$$f_v = v \cdot f_0 \quad ; \quad f_z = z \cdot f_0$$

Što znači pojam *ortogonalan*? (nastavak)

- Najmanji razmak frekvencija dvaju podnosilaca Δf , a da oni budu ortogonalni, je onaj kad se podnosioci na intervalu T_0 razlikuju za jednu periodu.

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

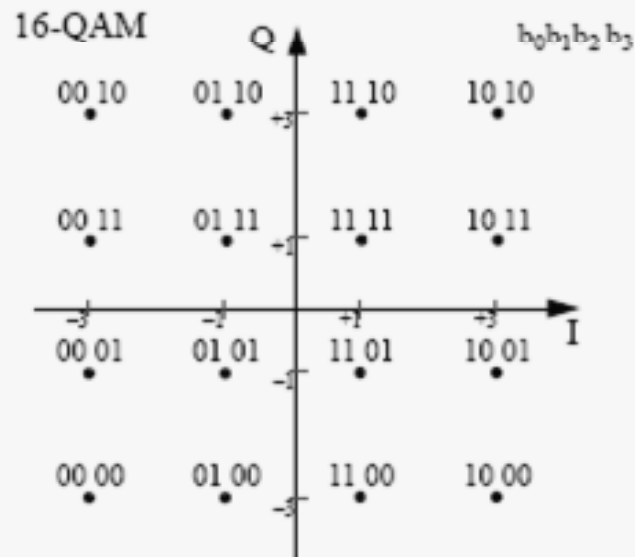
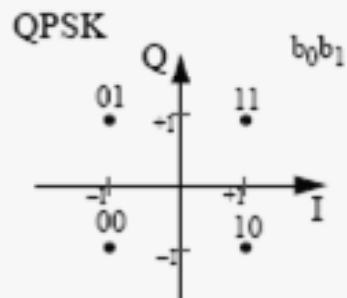
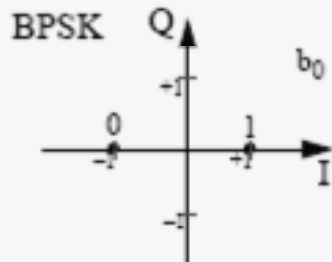
- U OFDM-sustavima frekvencije podnosilaca odabiru se kao višekratnici temeljne frekvencije f_0 .

Modulacijski postupci u podkanalima

- Za prijenos podataka u podkanalima najčešće se koriste modulacijski postupci PSK ili QAM.
 - PSK i QAM su linearnih osobina → visoka spektralna učinkovitost.

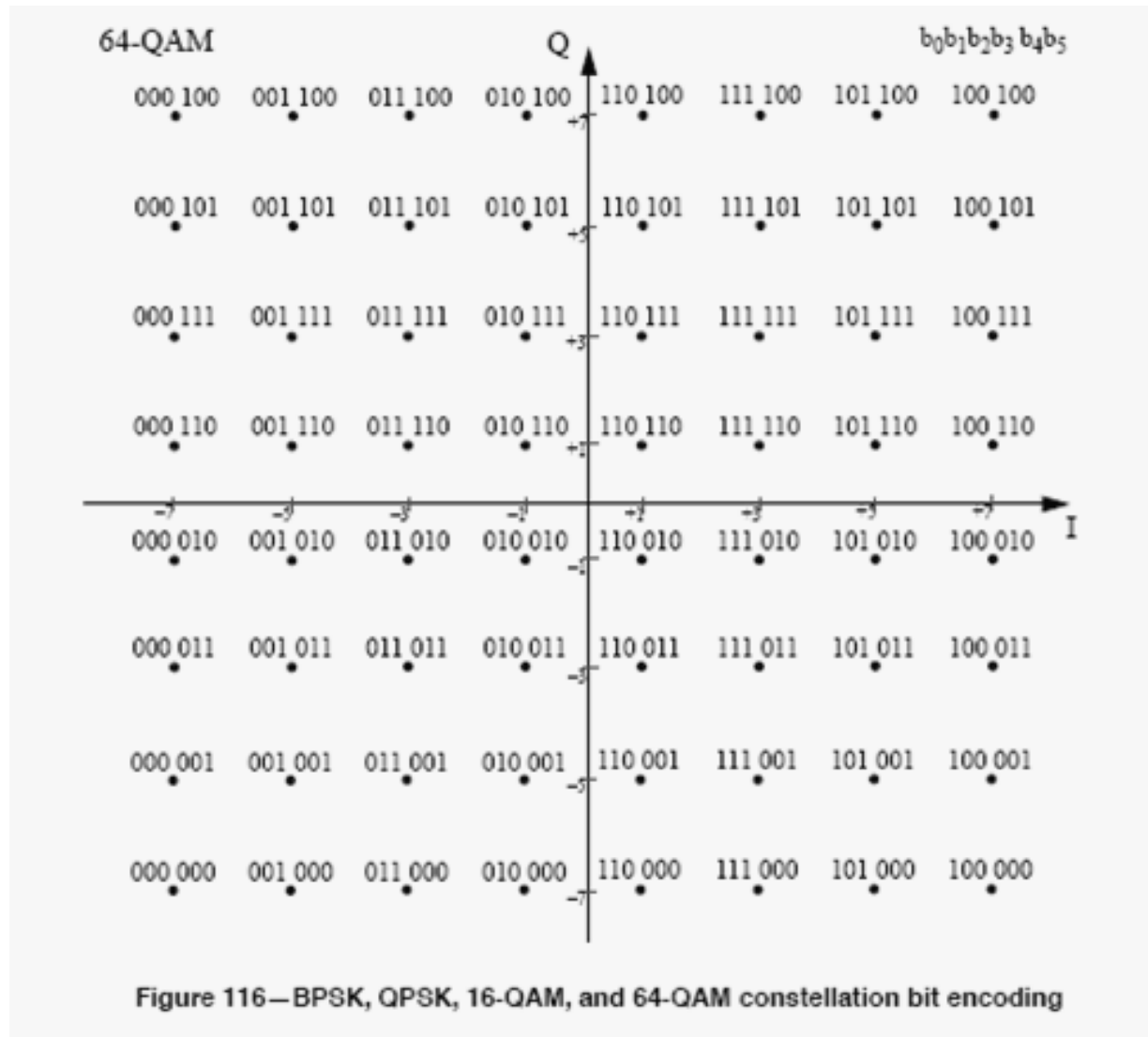
IEEE
Std 802.11a-1999

SUPPLEMENT TO IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY—



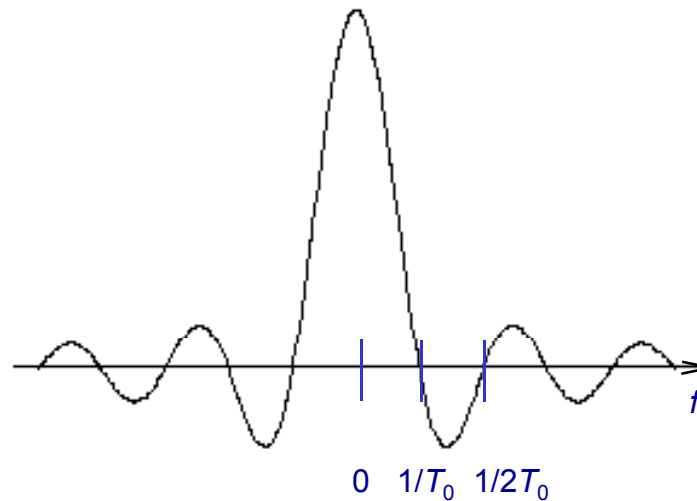
Modulacijski postupci u podkanalima

(nastavak)



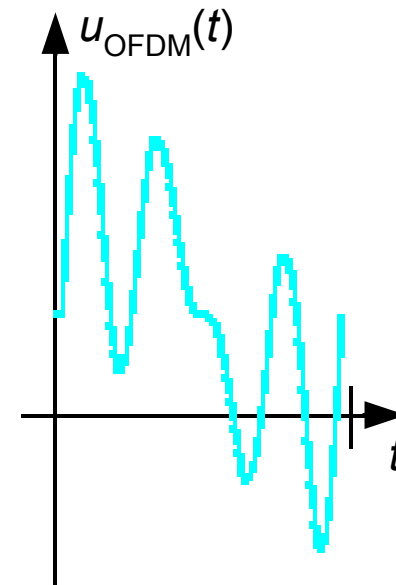
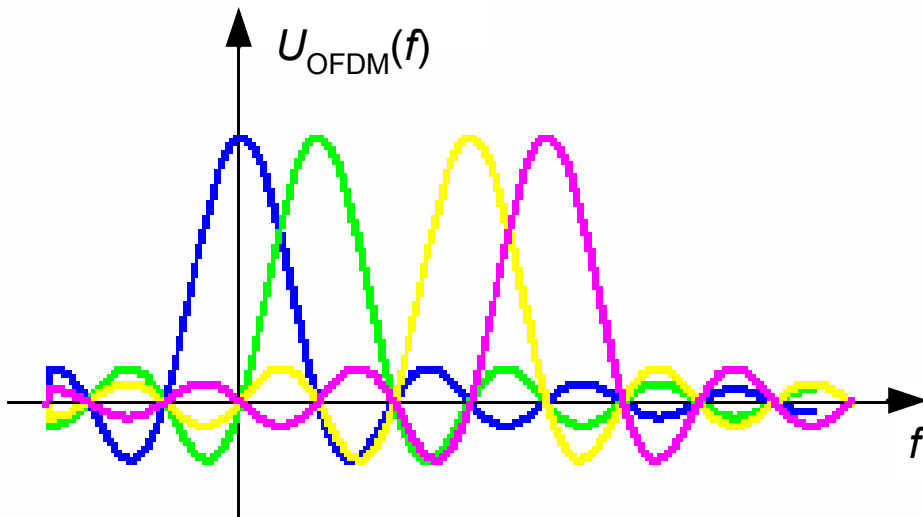
Spektar OFDM-signalala

- U PSK- ili QAM-postupcima modulacijski su signali pravokutnog oblika.
- Ovojnica spektra takvih signala zato slijedi oblik funkcije $(\sin x)/x$.
- Nultočke ovojnice spektra nalaze se na višekratnicima od $1/T_0$ gdje je T_0 trajanje simbola moduliranog signala u podkanalu.

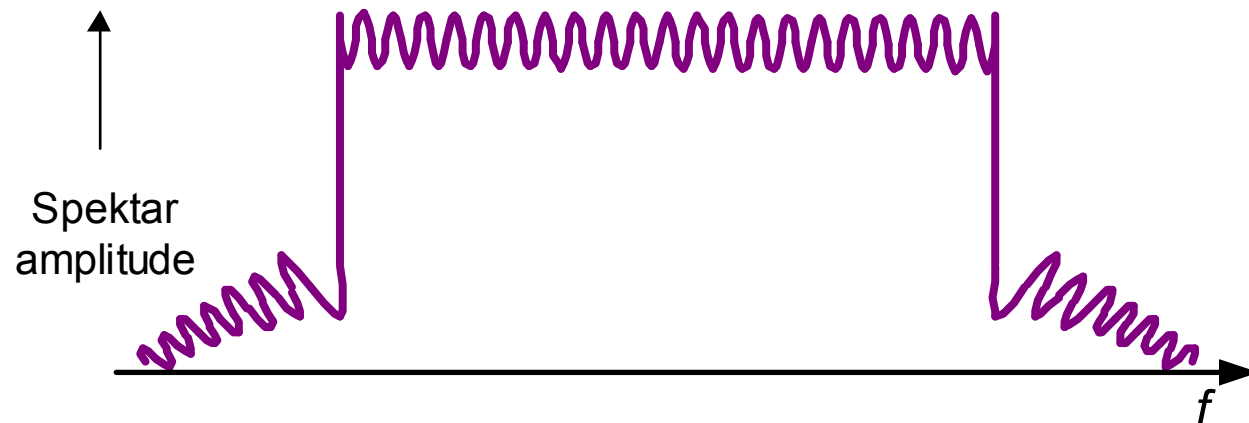


Spektar OFDM-signalu (nastavak)

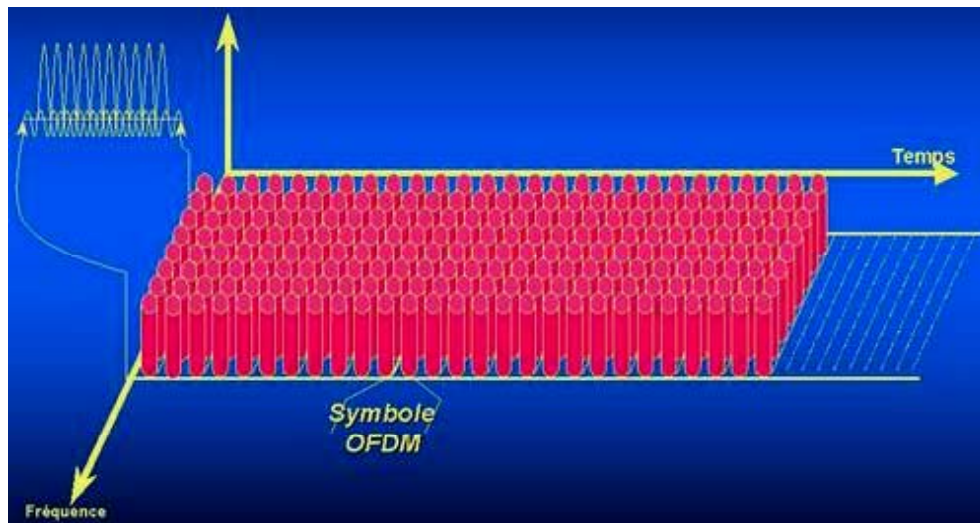
- Podnosioci u OFDM-kanalu su ortogonalni \rightarrow nalaze se na razmaku $1/T_0$ na frekvencijskoj osi.
- Svaki od podnosioca dolazi u nultu točku spektra ostalih moduliranih podnosioca \rightarrow nema *interferencije među nosiocima* u pojedinim podkanalima (ICI, *Inter-Carrier Interference*).



Spektar OFDM-signala (nastavak)



Vremensko-frekvencijski prikaz OFDM-simbola



Tehnika dobivanja OFDM-a

- Uzorci simbola moduliranog signala svakog podkanala nastaju tako da se uzorci funkcije svakog podnosioca (uzorci funkcija oblika $e^{j\omega_0 t}$), koji su predloženi odgovarajućima kompleksnim brojevima, pomnože s odgovarajućima kompleksnim brojevima na temelju dijagrama stanja PSK- odnosno QAM-signal, a koje određuje skupina binarnih znakova podataka.
- Uzorci simbola moduliranih signala svih podkanala na intervalu trajanja T_0 čine *simbol OFDM-signal* koji se sastoji od niza kompleksnih brojeva.
- Ti kompleksni brojevi simbola OFDM-signal onda moduliraju nosioc cijelog OFDM-kanala, koji je oblika $e^{j\omega_p t}$ i koji se nalazi na sredini OFDM-signalu dodijeljenog pojasa frekvencija.
- Matematički se OFDM-signal, nastao iz N moduliranih OFDM-podkanala, može opisati kao:

$$\dot{U}_{\text{OFDM}_r} = \underbrace{\left[\sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_{r,i} e^{j2\pi f_0 t} \right]}_{\text{modulacijski signal } \dot{g}(t)} \underbrace{e^{j2\pi \underbrace{af_0}_{f_p} t}}_{\text{modulacijski simbol podnosioca}} \rightarrow \text{prijenosni signal}$$

Tehnika dobivanja OFDM-a (nastavak)

- OFDM-signal nastaje, dakle, kad modulacijski signal $\dot{g}(t)$, a koji se naziva OFDM-simbolom, modulira sinusni prijenosni signal $e^{j2\pi f_p t}$.
- Modulacijski signal zapisan u kontinuiranoj vremenskoj domeni glasi:

$$\dot{g}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_{r,i} e^{j2\pi i t / T_0}$$

- Jedan OFDM simbol $\dot{g}(t)$ definiran je unutar vremenskog okvira T_0 tj. $rT_0 \leq t \leq (r+1)T_0$, gdje je r neki cijeli broj
- Ako se uzme N uzoraka jednog OFDM simbola $\dot{g}(t)$ (diskretizacija u vremenu) u vremenskim trenucima $t_k = k \cdot T_0 / N$ onda su uzorci signala $\dot{g}(t)$ oblika:

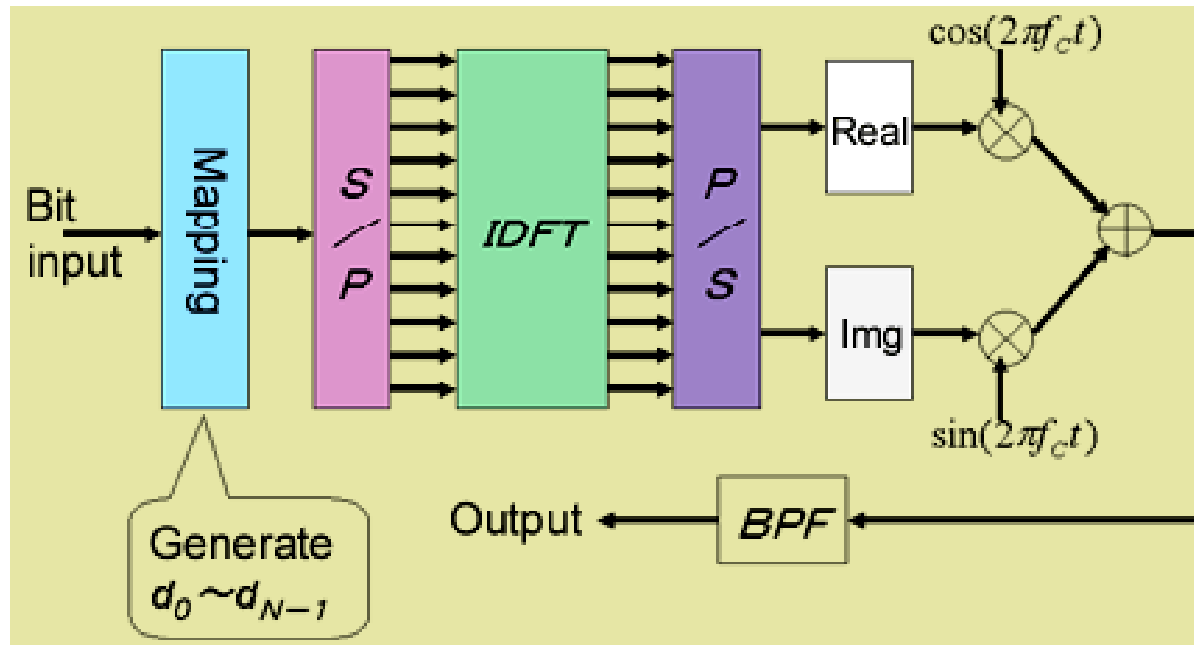
$$\dot{g}(t_k) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_i e^{j2\pi i t_k / T_0}, k \in [0, 1, 2, \dots, N-1]$$

$$\dot{g}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_i e^{j2\pi i \frac{k}{N}} = N \cdot \text{IDFT}(d_i)$$

Tehnika dobivanja OFDM-a (nastavak)

- S obzirom na strukturu simbola OFDM-signal izlazi da se on može dobiti postupkom *inverzne diskretne Fourierove transformacije* (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*).
- Inverzna diskretna Fourierova transformacija (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) realizira se algoritmima inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*).

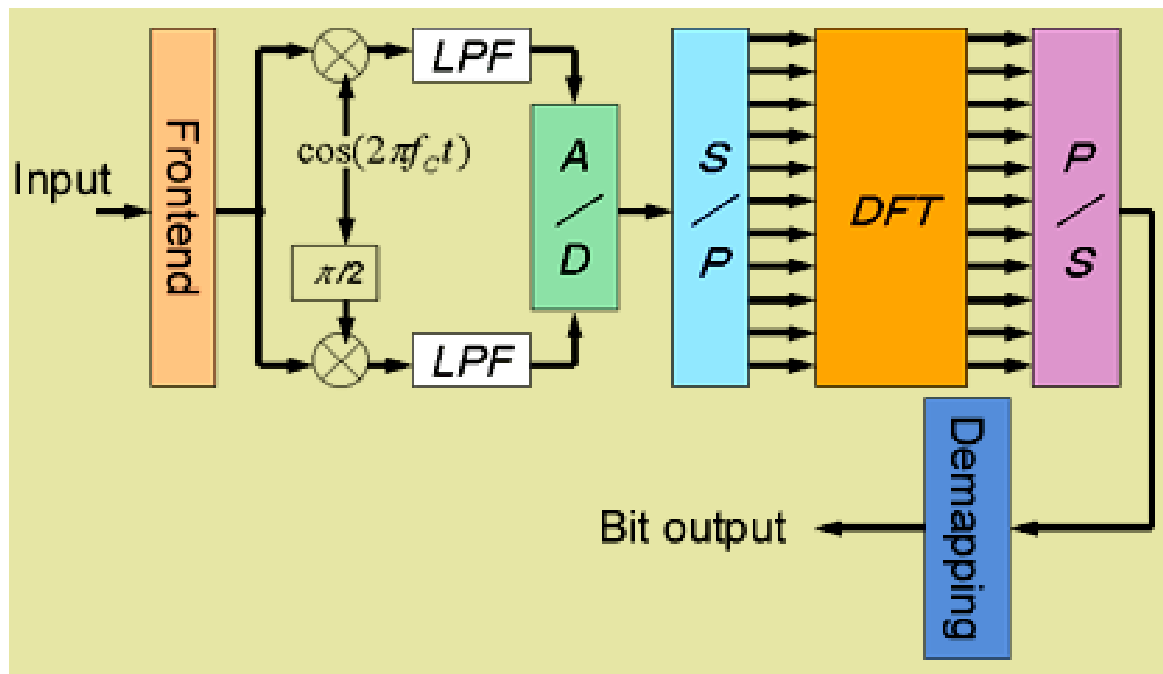
Tehnika dobivanja OFDM-a (nastavak)



- Zbog osobitosti IFFT-postupka zahtjeva se broj ulaznih podataka u IFFT-algoritam bude neka potencija od broja 2, dakle oblika 2^n .
- IDFT-proces obavlja DSP-čip (DSP, *Discrete Signal Processing*).

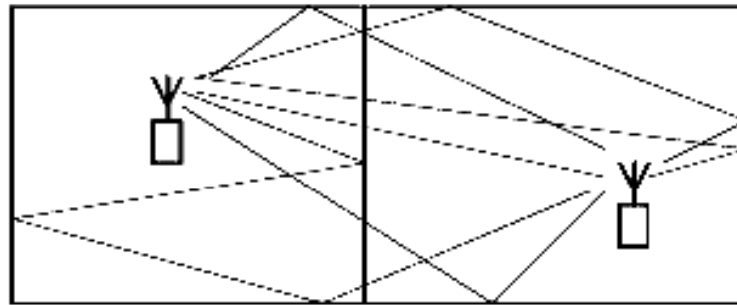
Obrada OFDM-signalu u prijemu

- Na prijamnoj se strani uz pomoć postupka diskretne Fourierove transformacije (DFT, *Discrete Fourier Transform*) regeneriraju simboli (kompleksni brojevi) koji odgovaraju dijagramima stanja polaznih PSK- ili QAM-signalu.
- Koriste se algoritmi brze Fourierove transformacije (FFT, *Fast Fourier Transform*).



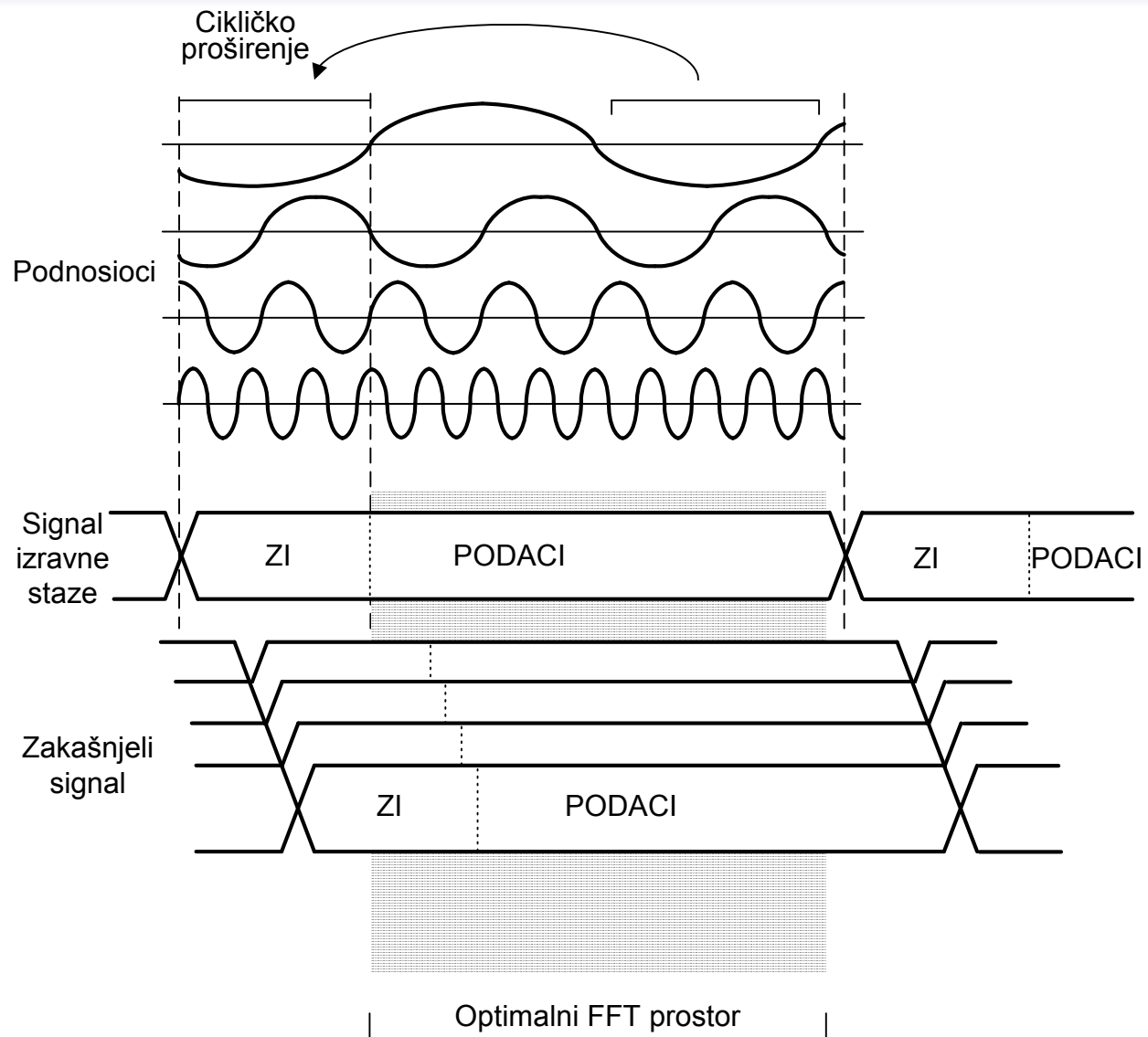
Utjecaj višestaznog prostiranja

- Kašnjenje primljenog signala, koji je stigao nekom neizravnom stazom, uzrokom je smetnji kod sustava s jednim nosiocem.



- U OFDM-sustavima produljeno trajanje simbola moduliranih signala u podkanalima ukazuje na povećanu otpornost na smetnje nastale od višestaznog prostiranja. Kašnjenja su tad manji dio trajanja simbola.
- Nepovoljne učinke kašnjenja pojedinih signala uklanja se dodavanjem tzv. *zaštitnog intervala* na početak OFDM-simbola.

Zaštitni interval i cikličko proširenje

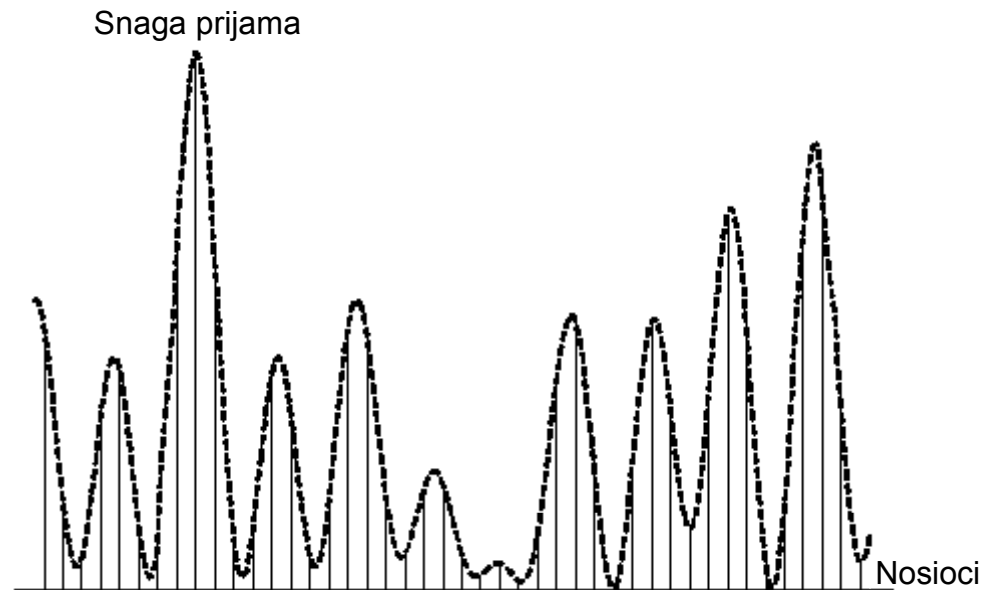


Obilježja OFDM-a u pogledu smetnji

- Zaštitni se interval dobiva cikličkim proširenjem signala. To se proširenje naziva *cikličkim prefiksom* OFDM-simbola.
- Veličina zaštitnog intervala uzima negdje do oko $T_0/4$ odnosno do oko četvrtine trajanja OFDM-simbola.
- Kad je kašnjenje signala manje od veličine zaštitnog intervala onda ne nastaju smetnje pri prijenosu.
- OFDM-pokazuje povoljne osobine i u uvjetima kad su smetnje koncentrirane na uski pojas unutar pojasa OFDM-signal (selektivni fading). Tad su «napadnuti» samo neki od podkanala odnosno mali dio cjelokupnog OFDM-simbola pa je mali broj pogrešno demoduliranih bita.
- OFDM je otporniji na uskopojasne smetnje od sustava s jednim nosiocem.

Obilježja OFDM-a u pogledu smetnji (nastavak)

Zbog višestaznog prostiranja različito je prigušenje pojedinih podkanala



- Pogreške prijenosa se koncentriraju na određene skupine bitova. To čini postupke zaštitnog kodiranja neučinkovitima.
- Zbog toga se prije modulacije bitovi ispremiješaju (*interleaving*) po nekom pravilu kako bi se nakon inverzne permutacije u prijamniku postigao slučajni karakter položaja pogrešnih bitova.

Kodirani OFDM – COFDM

- COFDM prilagođen je za uvjete izraženoga višestaznog prostiranja i kao posljedice izraženih selektivnih osobina radijskog kanala te smetnji u obliku sinusnog signala ili analognog TV-signal.
- COFDM primjenjuje postupke zaštitnog kodiranja (FEC, *Forward Error Correction*) koji se osnivaju na unošenju zalihosti (redundancije) u signal.
- Zaštitno se kodiranje obavlja uz pomoć blokovskih (npr. Reed-Solomon) ili konvolucijskih kodova.
- Korisnost koda (*code rate*) iznosi k/n ($k/n < 1$) ako se svakom bloku od k bita dodaje $n - k$ zalihosnih bitova.
- Alternativna metoda umjesto bitova za zaštitno kodiranje koristi simbole moduliranih podnosilaca → tehnika kodirane modulacije i primjena tzv. "rešetkastih kodova" (*Trellis Codes*; TCM, *Trellis Coded Modulation*).

Parametri OFDM-a u WLAN-u

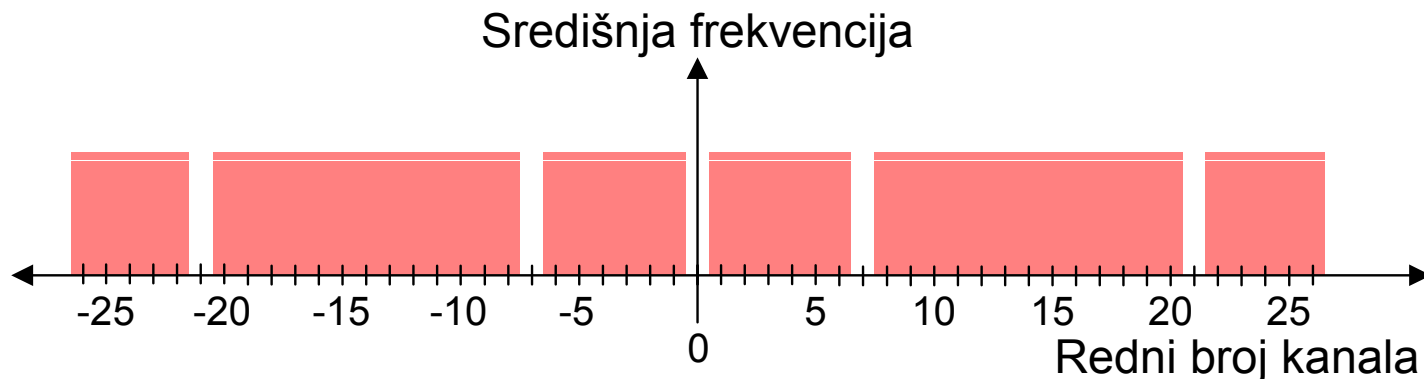
Temeljni parametri OFDM-sustava u WLAN-u prema IEEE normi 802.11a i IEEE normi 802.11g

Parametar	Vrijednost
Brzina prijenosa	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54 Mbit/s
Modulacijski postupak	BPSK; QPSK; 16-QAM; 64-QAM
Korisnost koda (FEC)	1/2; 2/3; 3/4
Broj podkanala	52
Broj pilotskih kanala	4
Broj informacijskih kanala	48
Trajanje OFDM-simbola	4 μ s
Zaštitni interval – trajanje	800 ns
Razmak podnosilaca	312,5 kHz
-3 dB širina pojasa	16,56 MHz
Širina OFDM-kanala	20 MHz

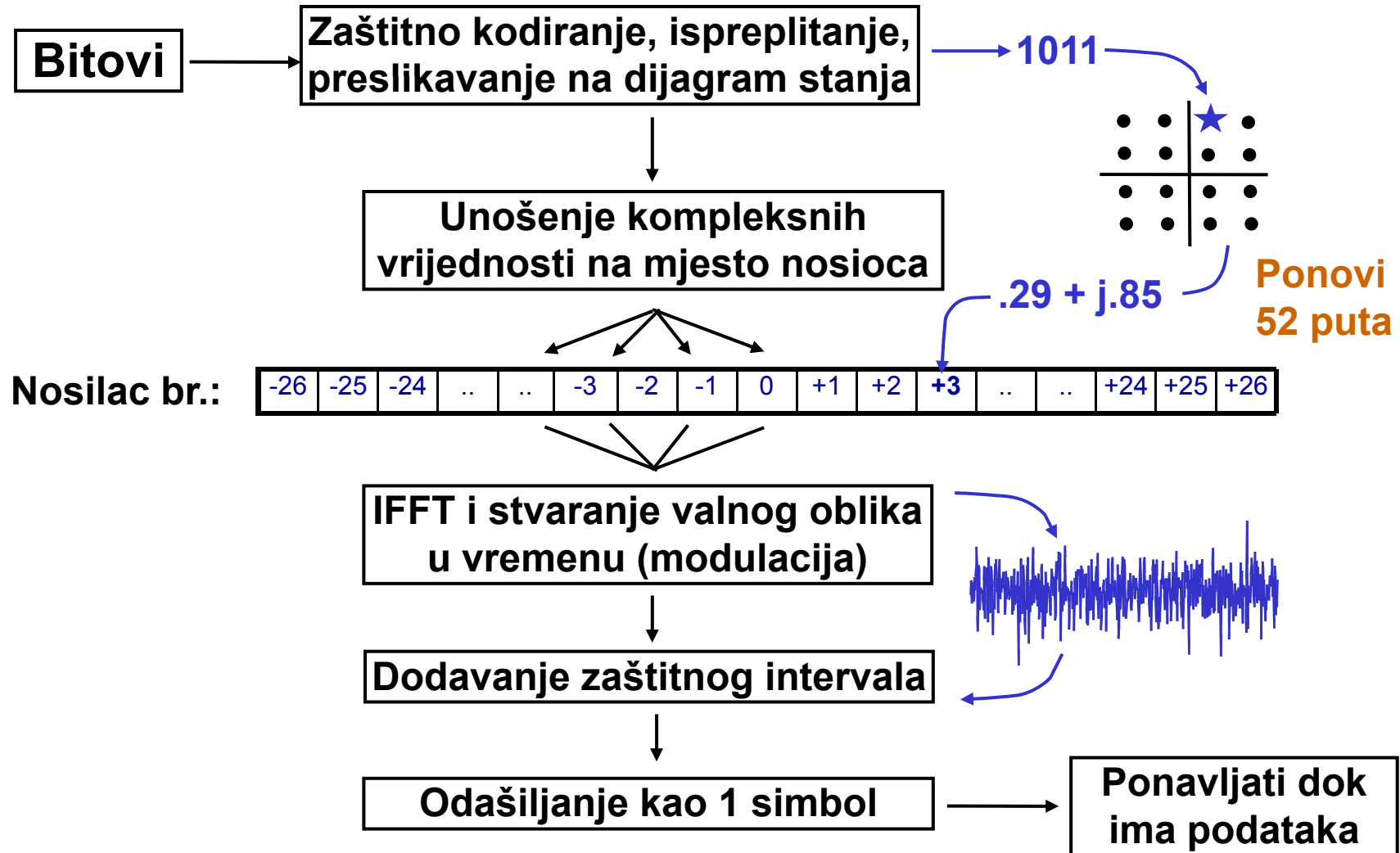
WLAN po IEEE normi 802.11g može raditi i u tehnici proširenog spektra.

Struktura OFDM-kanala u WLAN-u

- Odabrane vrijednosti parametara pokazuju se povoljnima posebno za zatvorene prostore.
 - Kako je zaštitni interval $T_{\text{ZI}} = 0,8 \mu\text{s}$ i trajanje OFDM-simbola $T_0 + T_{\text{ZI}} = 4 \mu\text{s}$ izlazi da je razmak frekvencija podnosilaca onda jednak $1/T_0 = 312,5 \text{ kHz}$.
 - FFT-postupak je reda 64.
 - Sustav ima 52 podkanala od kojih se njih 48 koristi za prijenos informacije, a u preostala 4 podkanala su pilotski signali.
 - Podkanal broj 0 ne koristi se za prijenos. Pilotski se signali smještaju u podkanale br. -21; -7; +7 i +21 i oni se moduliraju fiksnim slijedom bitova.

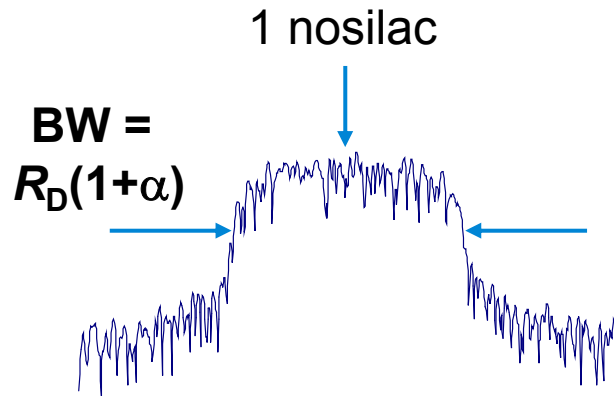


Ilustracija dobivanja OFDM-a u WLAN-u



Obilježja OFDM-signalala u WLAN-u

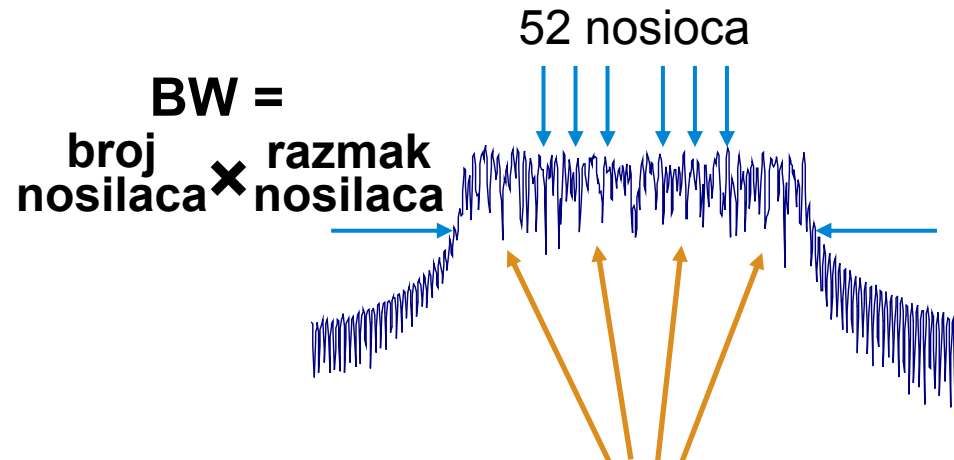
SCM



SCM — *Single Carrier Modulation*

- Uz pomoć pilotskih kanala prati se tijekom promjena amplitude i faze unutar OFDM simbola.

OFDM



Pilotski kanali

- -21, -7, +7, +21
- uvijek BPSK
- stalna amplituda i 2 faze
- koriste se kao referenca za demodulaciju

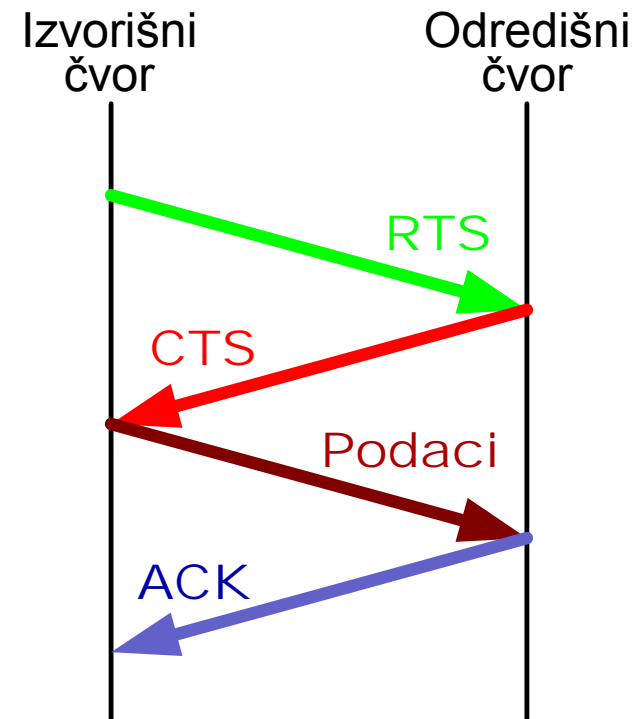
Metode višestrukog pristupa

- Postupci upravljanja pristupom prijenosnom mediju rješavaju problem kad dva ili više mrežnih čvorova žele odašiljati podatke u isto vrijeme. Oni u određenom trenutku dopuštaju samo jednom čvoru da pristupi mreži.
 - U fiksnim (žičanim) LAN-ovima rabe se dva načina upravljanja pristupom prijenosnom mediju:
 - *višestruki pristup detekcijom nosioca i detekcijom sudara (CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect)*

U CSMA/CD mrežni čvor, koji želi odašiljati podatke, “osluškuje” rabi li trenutno neki drugi čvor mrežu. Ako ne, započinje odašiljati podatke. Nakon završetka odašiljanja ponovno “osluškuje” kako bi otkrio je li došlo do sudara zbog toga što je drugi čvor istodobno odašiljao. Kada dođe do sudara, svaki pojedini čvor čeka slučajno odabrano vrijeme prije nego započne ponovno odašiljanje.
 - *prosljeđivanje pristupne riječi (token passing).*

CSMA/CA metoda višestrukog pristupa

- U radijskoj mreži mrežni čvor ne može znati je li došlo do sudara (*Collision Detection*) negdje u radijskom mediju. Zato čvorovi pretpostavljaju da uvijek dolazi do sudara osim kad su posebno obaviješteni da do toga nije došlo.
 - U radijskim Ethernet mrežama rabi se *višestruki pristup s detekcijom nosioca i izbjegavanjem sudara (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)*.
 - Mrežni čvorovi rabe postupak usklađivanja u četiri koraka radi izbjegavanja sudara. Ako ne stigne konačna potvrda (ACK) o uspješnom prijemu podataka emisija se ponavlja.
 - Ponavljanje emisije razlogom je smanjenja propusnosti WLAN-a na oko 50% kapaciteta kanala.



Višestruki pristup TDMA, FDMA

- Svakome mrežnom čvoru koji koristi isti RF kanal dodjeljuje se određeni vremenski odsječak (TDMA, *Time Division Multiple Access*).
 - Čvor odašilje samo u dodijeljenom vremenskom odsječku u specificiranom RF kanalu.
 - TDMA je posebno prikladan za:
 - interaktivne govorne ili personalne komunikacije kao što su: razgovor, telefax, podaci, SMS i sl.
 - za aplikacije koje zahtijevaju veće širine pojasa npr: multimedija i videokonferencije.
- FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) – svaki čvor radi na svojoj frekvenciji (kanalu)
 - Prikladan za simetrični prijenos podataka.