

Sve izmjene e biti pisane ovim fontom i bojom (oldgateLANEoutline ili sl.),
neki dio teksta e biti highlightan(žuto), strelice, pokušaj slika itd. :)
ali nijedan originalan dio ne e biti brisan! (samo strelice i sl. ne e biti zelene nego
crvene)

Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca

OFDM

(Orthogonal Frequency Division Multiplex)

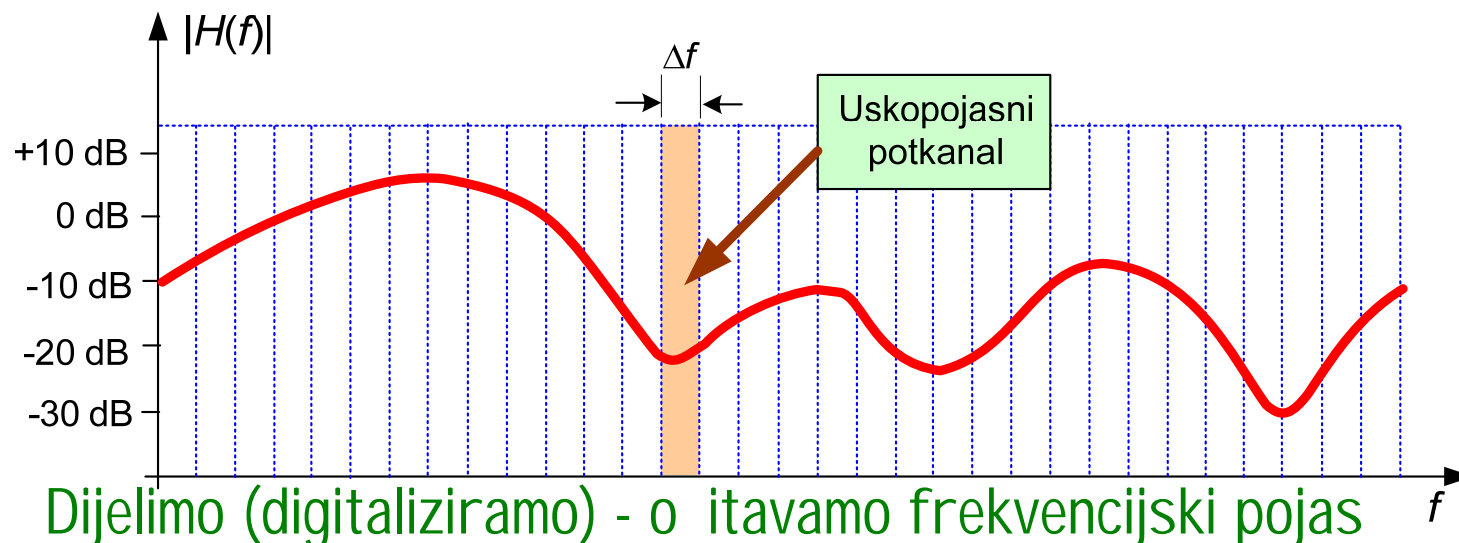
Sve primjedbe, greške, možda dodatne komentare koje imate vi u bilj. pa da ih
dodam i sve što može pomo i poboljšanju ovoga javite na PM!

By:egislav



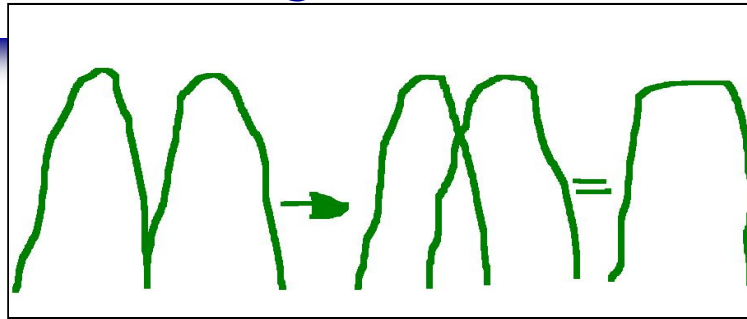
Komuniciranje s više nosilaca

- Velike brzine prijenosa digitalnih podataka → modulirani signal zauzima veliku širinu pojasa frekvencija. $R_b = 1/T_b = f_b \rightarrow$ veća brzina-veći pojas
- Zbog neidealne frekvencijske prijenosne karakteristike komunikacijskog kanala nejednoliki je prienos pojedinih komponenti moduliranog signala → nastaju smetnje među simbolima moduliranog signala (ISI).
- Velike relativne promjene razina komponenti moduliranog signala nastaju zbog višestaznog širenja elektromagnetskog vala u radijskom prijenosu npr.

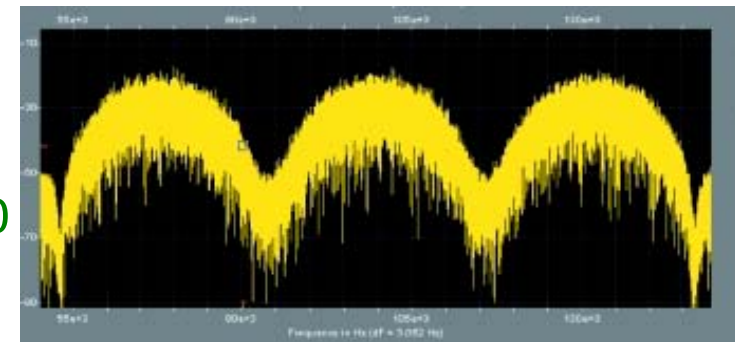
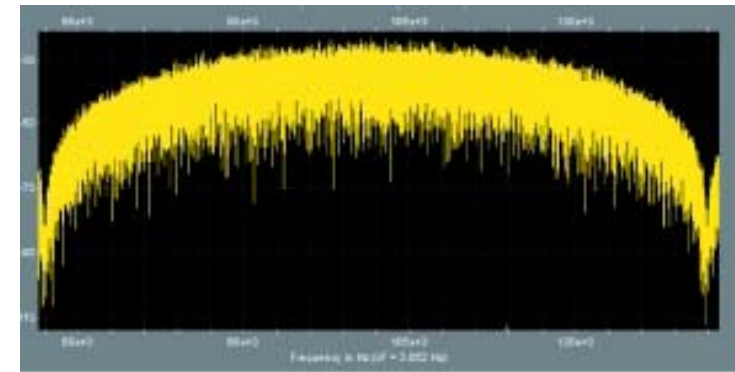
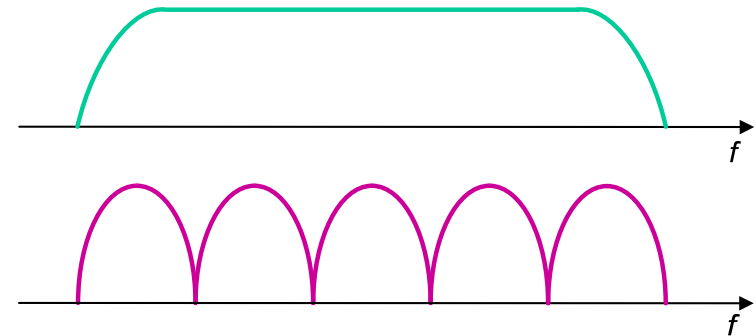


Komuniciranje s više nosilaca

- Ideja:*



- Umjesto jednog koristiti više nosilaca istodobno.
- Serijski slijed podataka velike brzine razdijeliti na više paralelnih sljedova.
- Svaki od paralelnih sljedova manje je brzine i on zasebno modulira jedan od više nosilaca → nastali modulirani signali zauzimaju manje širine pojasa.
- Svaki od nastalih moduliranih signala smjestiti u zasebni pojas i paralelno prenositi podatke uz pomoć više nosilaca.



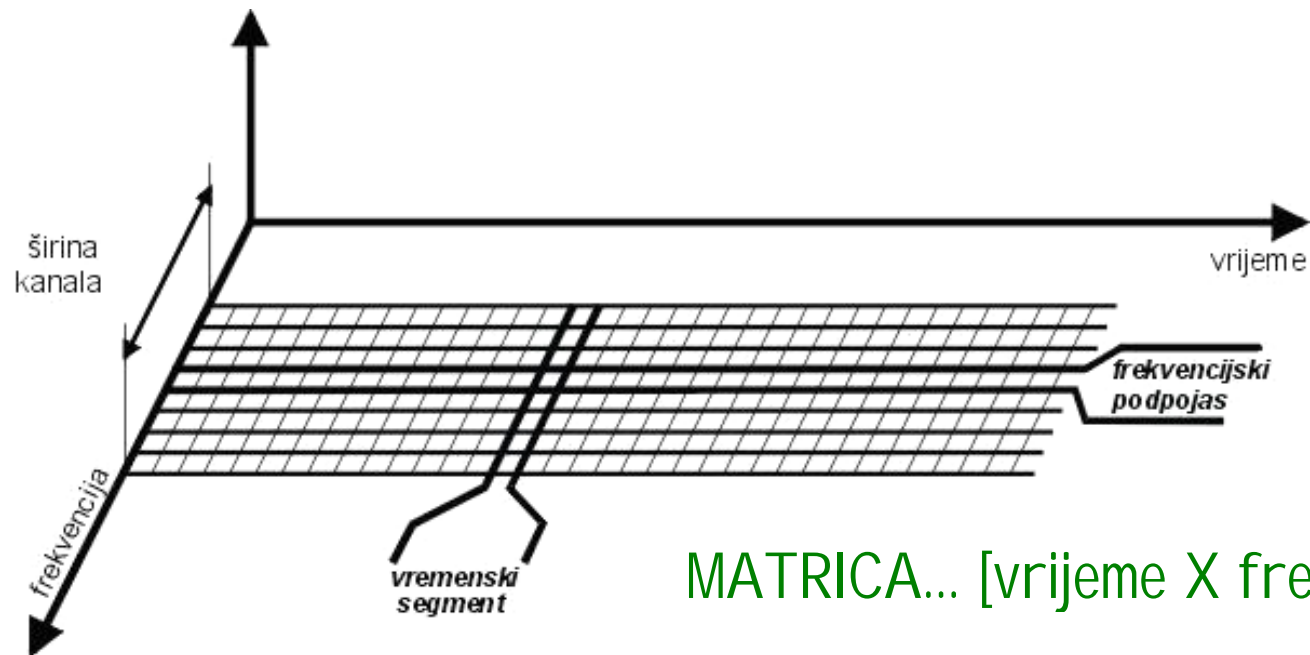
Potrebno je manje frekv. područje, jer očitavamo u diskretnim trenucima (digitalizirano) - nije kao kod analognog

Komuniciranje s više nosilaca

- Zbog relativno male širine pojasa svakog od više moduliranih signala male su promjene frekvencijske prijenosne karakteristike komunikacijskog kanala pa su stoga zanemarive nastale smetnje među simbolima (ISI).
- Naziv postupka: *Modulacija više nosilaca* (MCM, *Multi-Carrier Modulation*).

Što je OFDM?

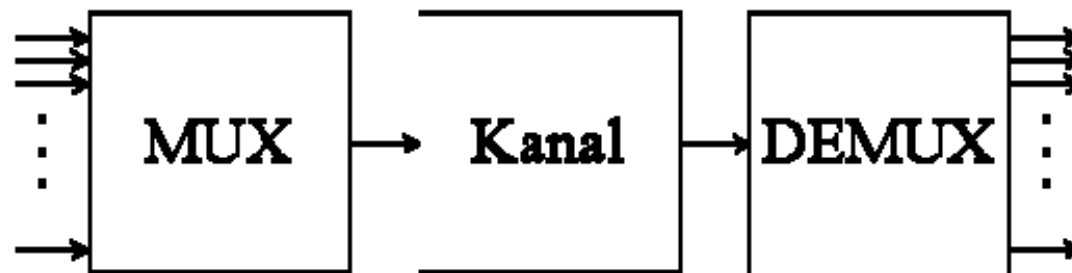
- OFDM je u osnovi jedna tehnika multipleksiranja.
- OFDM se dobiva digitalnom obradom simbola moduliranog signala i naknadnom modulacijom.
- OFDM-kanal dijeli se na veći broj potpojaseva, potkanala.
- Digitalna informacija velike brzine raspodjeljuje se na **potkanale** gdje modulira podnosioce.



Što je OFDM?

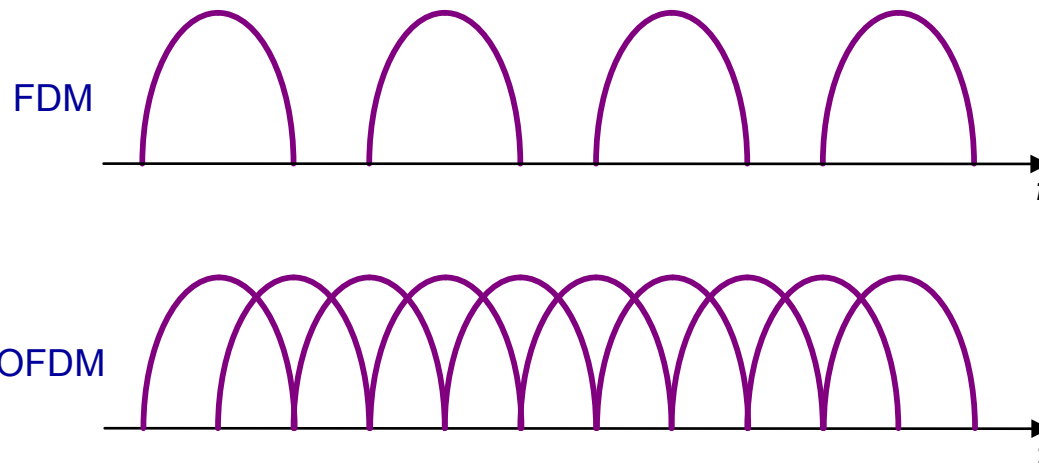
- Brzina prijenosa u svakom potkanalu je mala → produženo je trajanje simbola moduliranog signala u potkanalu.
- OFDM primjenjuje dijeljenje fizičkog kanala u oba područja, i u vremenskom i u frekvencijskom području. Konačni OFDM-kanal organiziran je kao skup uskih "frekvencijskih potpojaseva" i kao skup malih susjednih "vremenskih segmenata".
- U početnoj fazi razvoja ovaj postupak nazivao se *Discrete Multitone* (DMT).

nevažno



FDM i OFDM

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



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 .

$$f_v = v \cdot f_0, \quad f_z = z \cdot f_0.$$

Frekvencije i modulacija podnosilaca

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

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

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

Modulacijski postupci primijenjeni u potkanalima

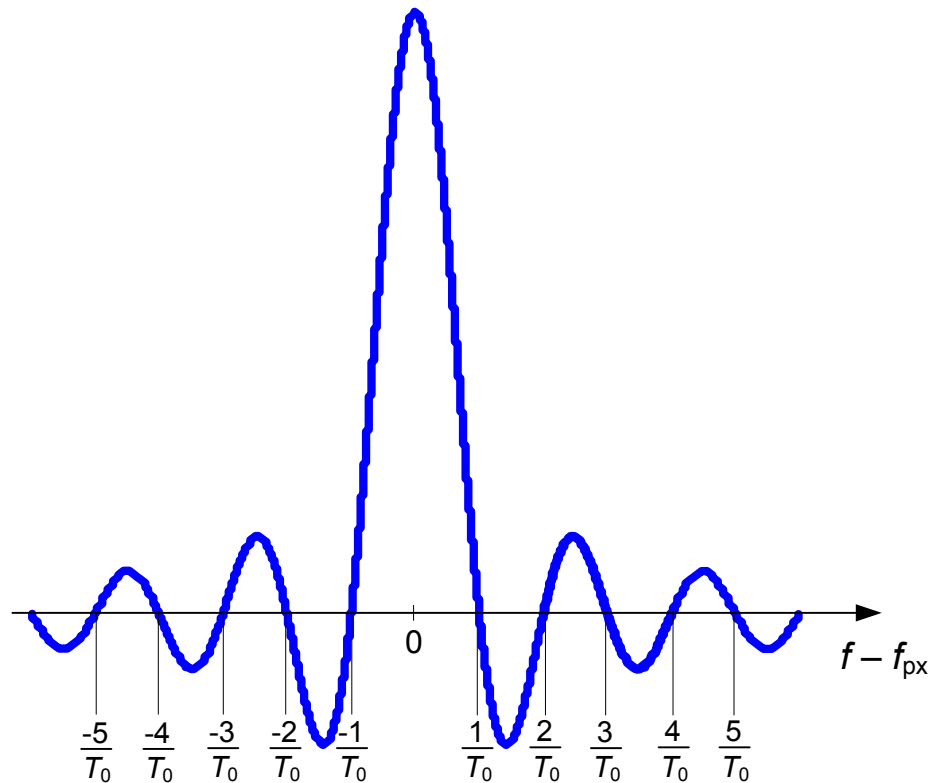
- Za prijenos podataka u potkanalima najčešće se koriste modulacijski postupci PSK ili QAM.
- PSK i QAM su linearnih osobina → visoka spektralna učinkovitost.
- Jedan OFDM-simbol sastoji se od simbola moduliranih signala u svim potkanalima.

Spektralna obilježja OFDM-signala

- U PSK- ili QAM-postupcima modulacijski su signali pravokutnog oblika.
- Ovojnica spektra takvih signala zato slijedi oblik funkcije

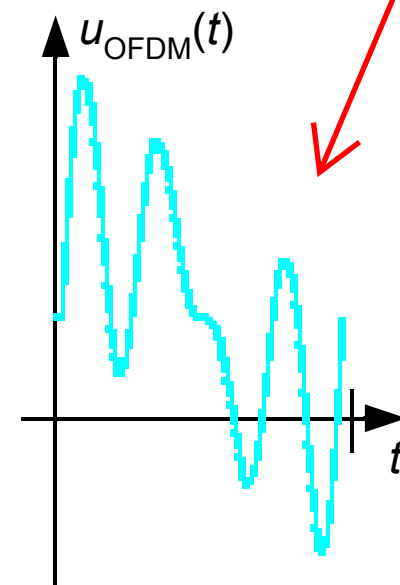
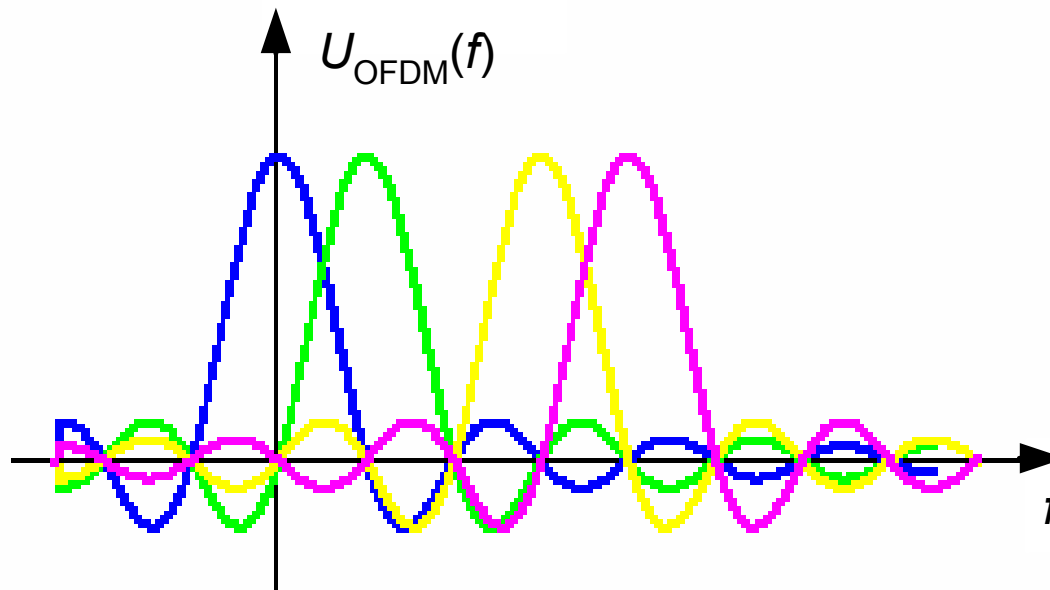
$$\frac{\sin x}{x}.$$

- Nulte točke ovojnice spektra nalaze se na višekratnicima od $1/T_0$, gdje je T_0 trajanje simbola moduliranog signala u potkanalu i ono je jednako intervalu ortogonalnosti.



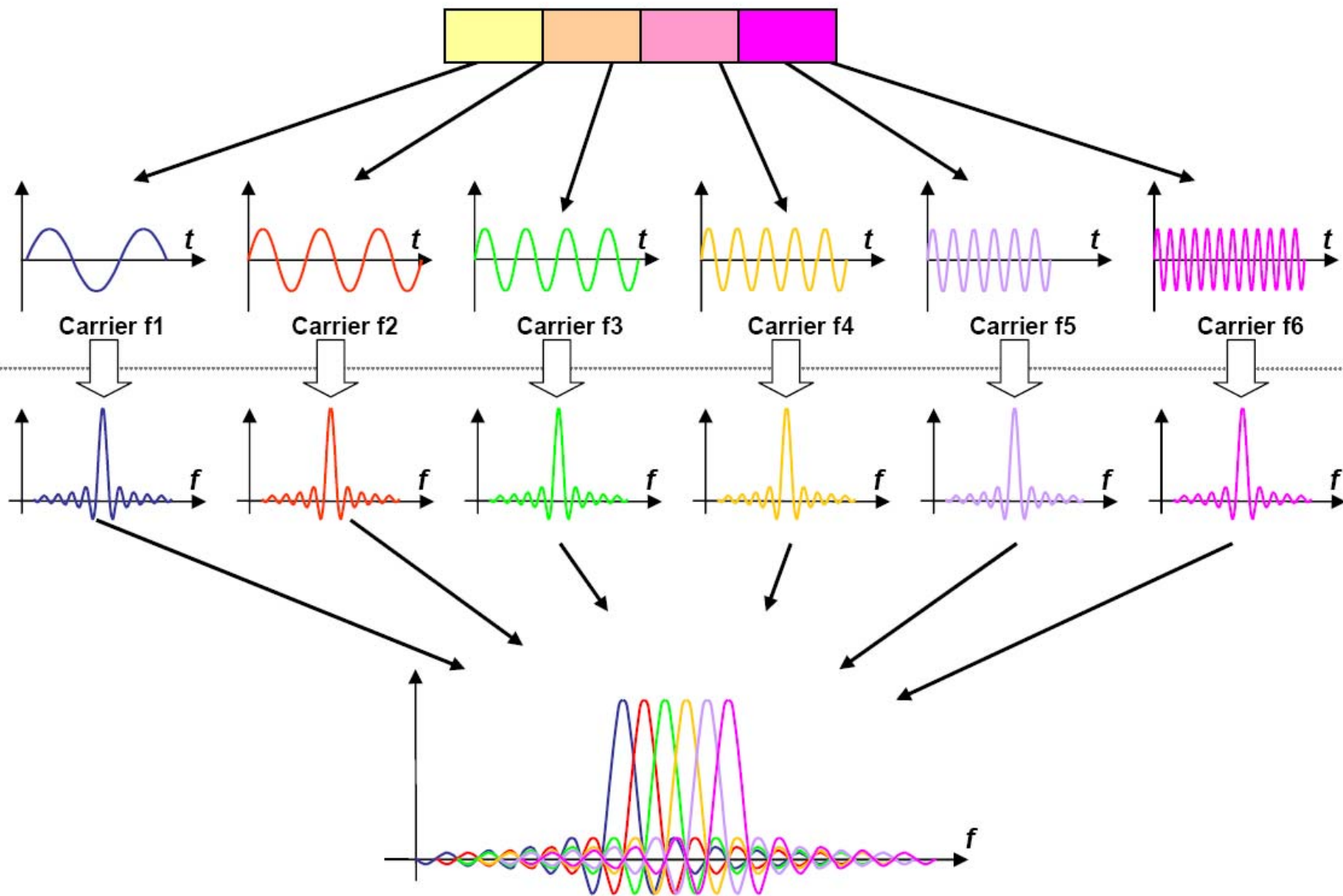
Spektralna obilježja OFDM-signala

- Podnosioci u OFDM-kanalu su ortogonalni → nalaze se na razmaku $1/T_0$ na frekvencijskoj osi.
- Svaki od podnosilaca dolazi u nultočku spektra ostalih moduliranih podnosilaca → **nema smetnji među nosiocima u pojedinim potkanalima (ICI, *Inter-Carrier Interference*)**.
u vremenskoj domeni izgleda kao bijeli šum (puno sinusoida raznih frekv.)

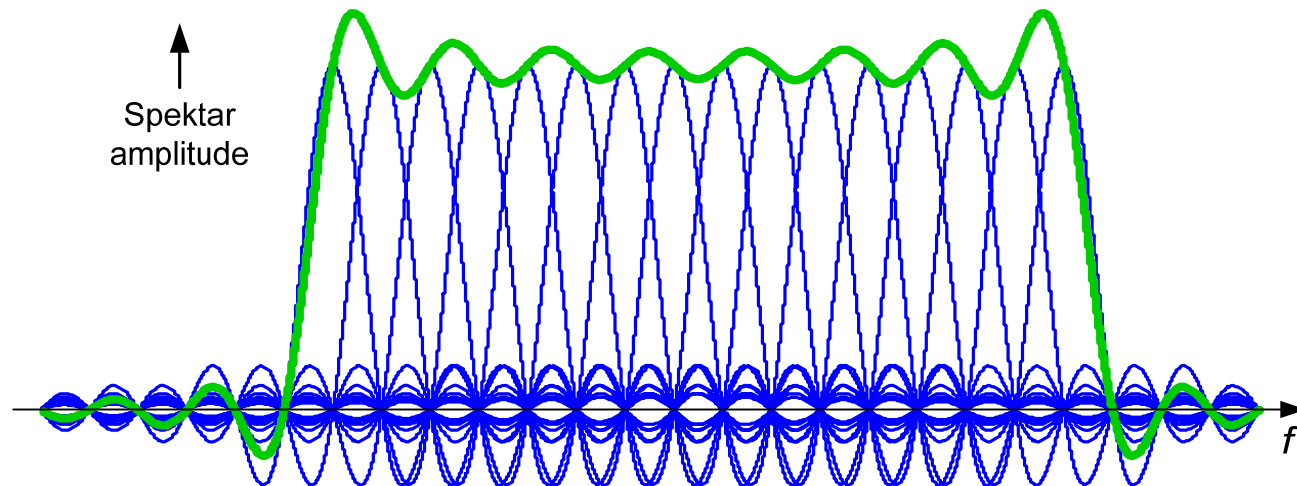


Vremensko područje

Frekvencijsko područje

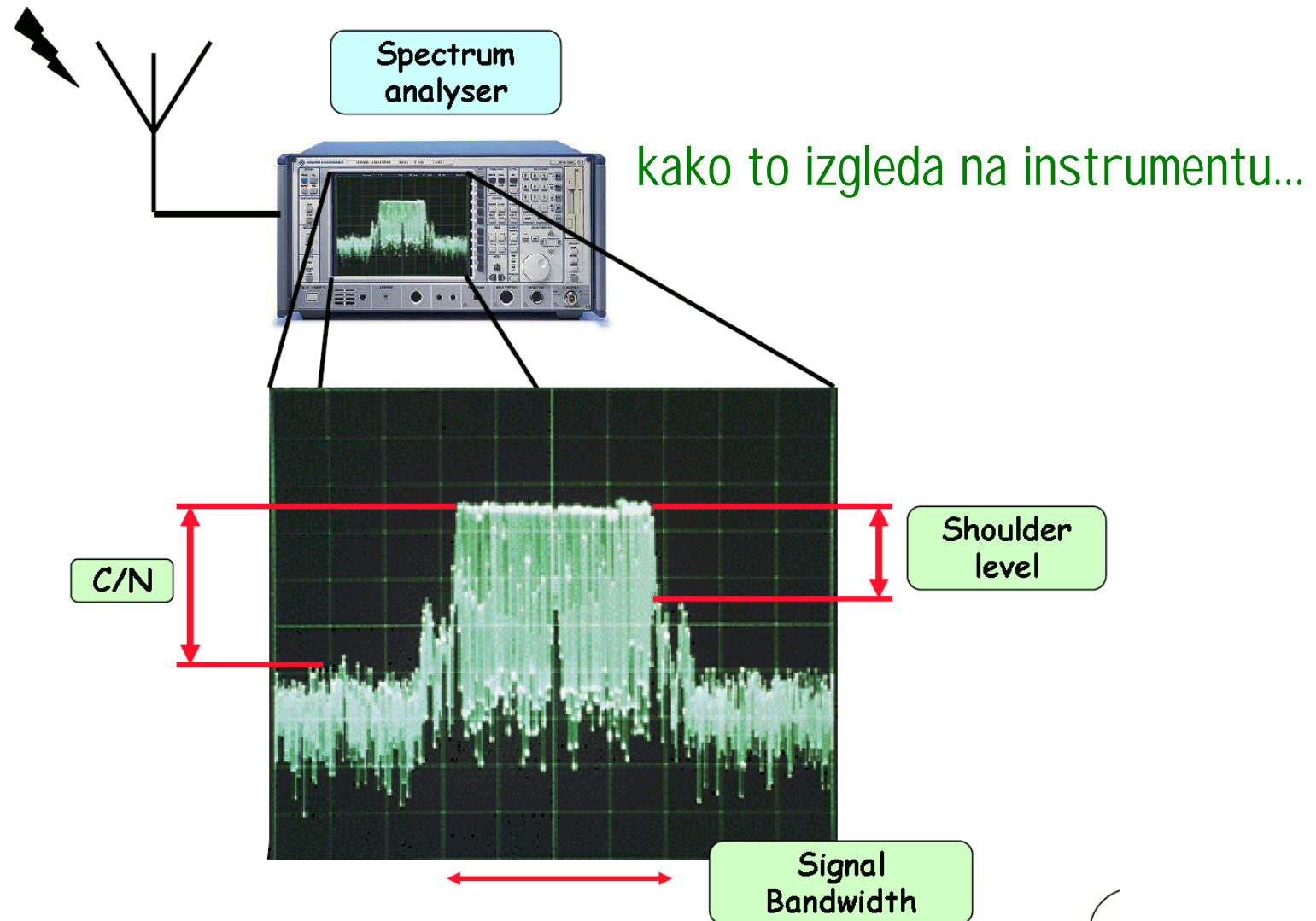


Spektralna obilježja OFDM-signala



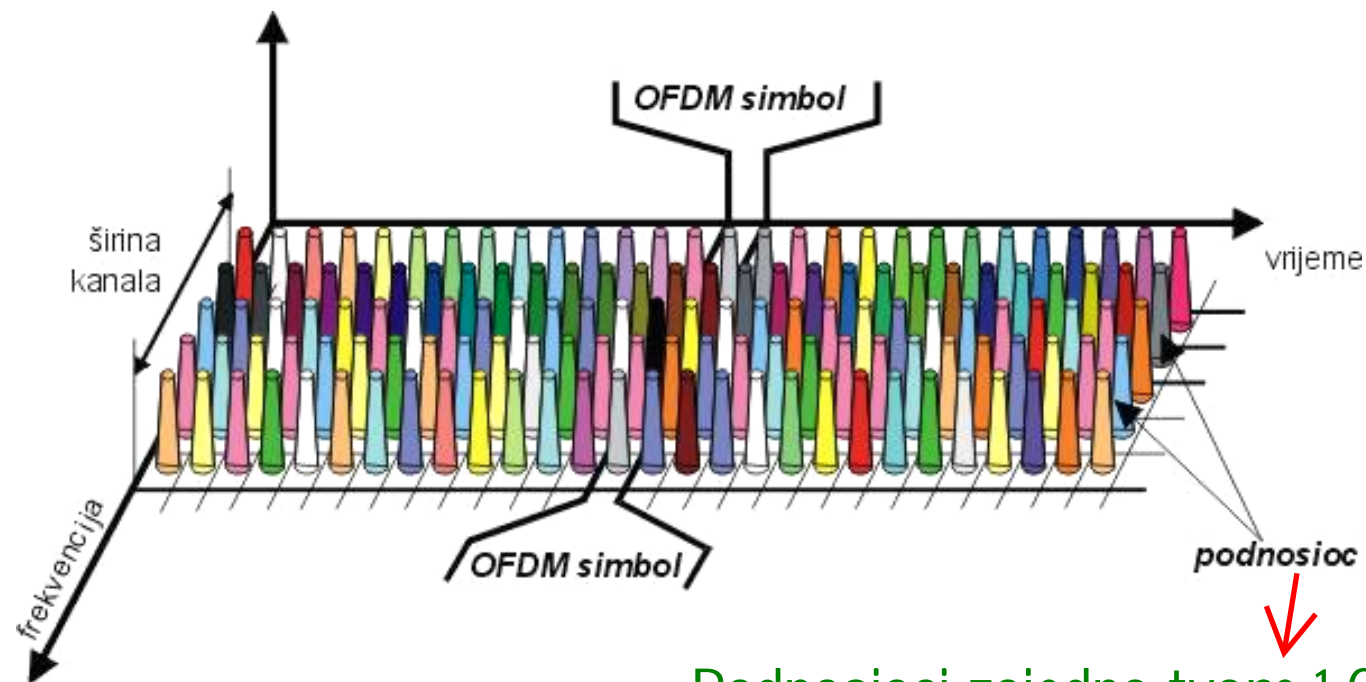
- OFDM-signal učinkovito zauzima dodijeljeni pojas frekvencija.
- Spektar OFDM-signala približno je pravokutnog oblika.
- Problemi, koji su posljedica nadvišenja u spektru OFDM-signala na rubovima pojasa, mogu se riješiti tako da se ne koriste krajnji potkanali OFDM-sustava.

Spektralna obilježja OFDM-signala



OFDM-simboli

Vremensko-frekvencijski prikaz OFDM-simbola



Podnosioci zajedno tvore 1 OFDM simbol

Tehnika dobivanja OFDM-a

- Podnosioci u potkanalima moraju biti sinkroni kako bi se osiguralo ispunjavanje uvjeta o njihovoj ortogonalnosti na intervalu trajanja T_0 .
- Simbol PSK- ili QAM-signal u potkanalu x može se analitički opisati izrazom,

$$s(t)_x = I_x \cos 2\pi f_{px} t - Q_x \sin 2\pi f_{px} t ,$$

ili u kompleksnom obliku,

$$u(t)_x = \Re\{[I_x + jQ_x][\cos 2\pi f_{px} t + j \sin 2\pi f_{px} t]\},$$

nevažno...

pa to daje simbol x moduliranog signala u jednom potkanalu,

$$\dot{U}_x = \dot{d}_x \cdot e^{j2\pi f_{px} t}, \quad \dot{d}_x = I_x + jQ_x .$$

- OFDM-simbol sastoji se od N moduliranih potnosilaca u pojasu od $a \cdot f_0$ do $b \cdot f_0$, gdje je,

$$b \cdot f_0 = (a + N - 1) \cdot f_0 .$$

Tehnika dobivanja OFDM-a

- N simbola moduliranih signala, iz svakog potkanala po jedan, daju OFDM-simbol x ,

$$\dot{U}_{\text{OFDM}_x} = \sum_{m=a}^{a+N-1} \dot{d}_{x,m-a} \cdot e^{j2\pi m f_0 t}.$$

Kad se m zamijeni s $i = m - a$, onda izlazi,

$$\dot{U}_{\text{OFDM}_x} = \underbrace{\left[\sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_{x,i} e^{j2\pi i f_0 t} \right]}_{\substack{\text{modulacijski signal } \dot{g}(t) \\ \text{OFDM-simbol}}} e^{j2\pi a f_0 t}.$$

nevažno

- OFDM-signal nastaje kad modulacijski signal $\dot{g}(t)$, a koji se naziva *OFDM-simbolom*, modulira sinusni prijenosni signal oblika, $e^{j2\pi f_p t}$.

Tehnika dobivanja OFDM-a

- Trajanje simbola svakog potkanala jednako je T_0 , a toliko je i trajanje OFDM-simbola.
- Ako se uzme N uzoraka signala $\dot{g}(t)$ unutar intervala T_0 to znači da se oni uzimaju u vremenskim trenucima $t_k = k \cdot T_0 / N$, $k = 0; 1; 2; \dots (N-1)$.
- Argument eksponencijalne funkcije u izrazu za $\dot{g}(t)$ poprima onda diskretne vrijednosti,

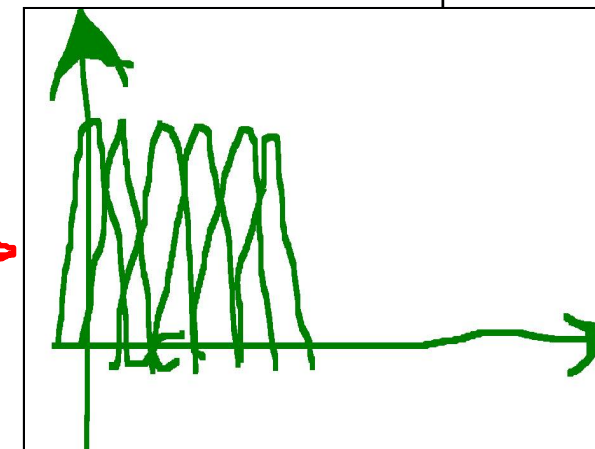
$$j2\pi f_0 t_k = j2\pi \frac{t_k}{T_0} = j2\pi \frac{k}{N}.$$

- Uzorci signala $\dot{g}(t)$ su onda oblika,

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

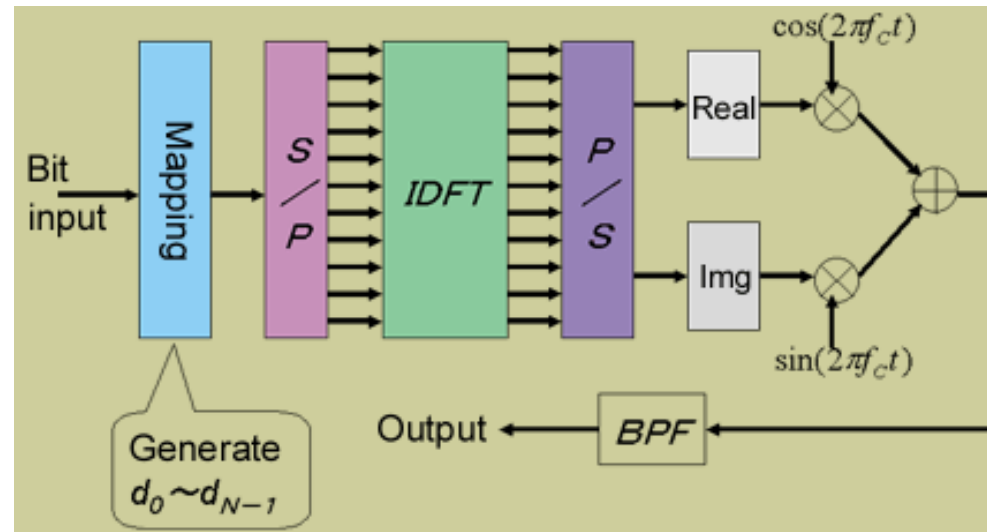
$$k = 0; 1; 2; \dots N-1.$$

nevažno



$k(T_0/N)$; u nulto kama, tj. maximumima

Tehnika dobivanja OFDM-a



- S obzirom na strukturu OFDM- simbola izlazi da se on može dobiti postupkom *inverzne diskretne Fourierove transformacije* (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) niza kompleksnih simbola moduliranih signala u potkanalima OFDM-sustava.
- IDFT realizira se algoritmima inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) dakle postupkom digitalne obrade signala.

Fizikalno značenje postupka IFFT

- OFDM tretira polazne QPSK ili QAM-simbole kao komponente u frekvencijskom području budući su to ulazni parametri za IFFT koji veličine u području frekvencija transformira u veličine u vremenskom području.
- Svaki od tih ulaznih simbola predstavlja «kompleksnu težinu» odgovarajućega sinusnog signala iz skupine ortogonalnih sinusnih signala koji su osnova IFFT-a.
- Kompleksni QPSK ili QAM-simbol dakle određuje amplitudu i fazu odgovarajućega sinusnog podnosioca odnosno IFFT predstavlja učinkoviti način za moduliranje skupine ortogonalnih podnosilaca.
- Blok od N uzoraka na izlazu IFFT jedinice predstavlja OFDM-simbol.
- Postupkom IFFT kompleksni se simboli potkanala prebacuju iz područja frekvencija u područje vremena.
- Simboli potkanala komponente su neke vrste kompleksnoga i diskretnog spektra signala u potkanalima.

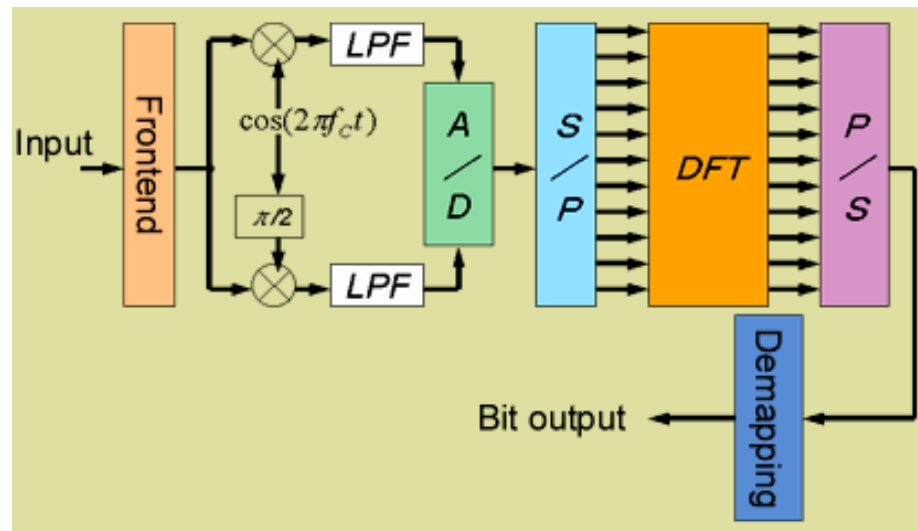
Odabir broja podnosilaca i frekvencije f_p

- Zbog osobina IFFT-postupka zahtjeva se da broj ulaznih podataka u IFFT-algoritam bude neka potencija od broja 2, dakle da je on oblika 2^n .
- IFFT-proces obavlja DSP-čip (DSP, *Discrete Signal Processing*).
- Prijenosnu frekvenciju f_p uobičajenije je uzeti u sredini OFDM-pojava pa je onda:

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

Obrada OFDM-a u prijamniku

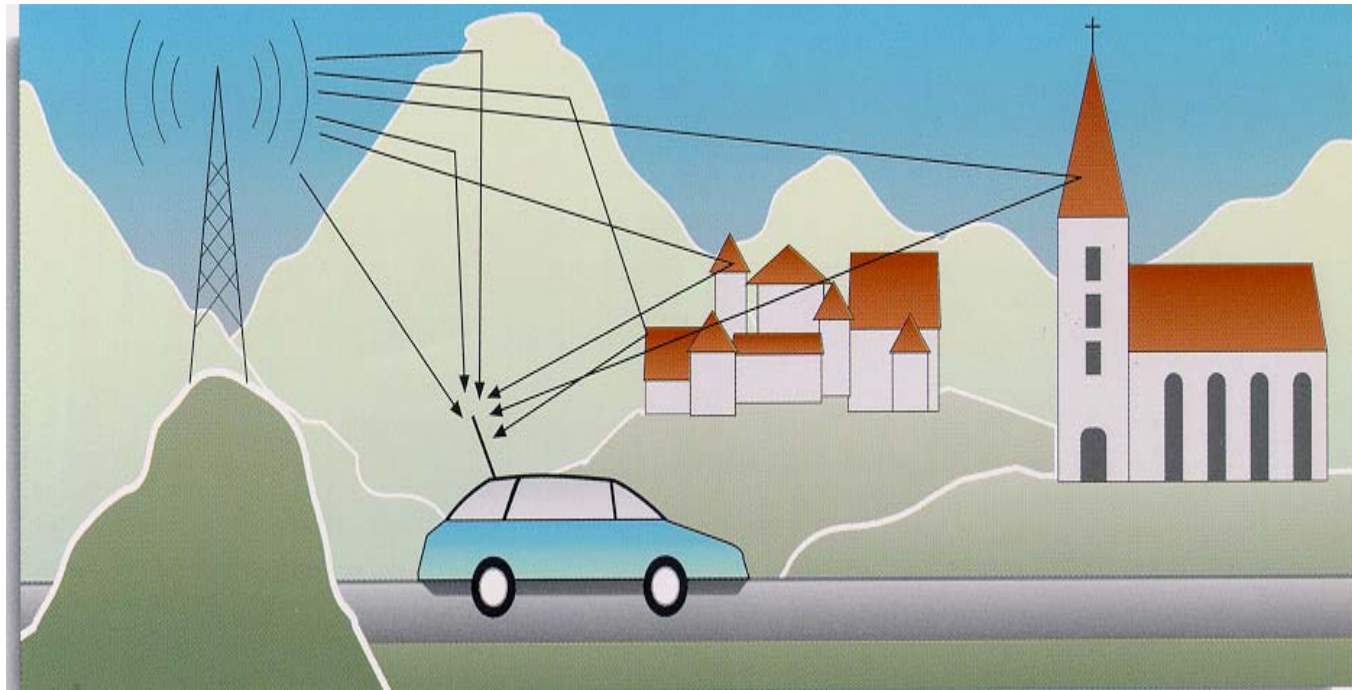
- Na prijamnoj se strani uz pomoć postupka diskretne Fourierove transformacije (DFT, *Discrete Fourier Transform*) regeneriraju simboli (kompleksni brojevi) koji odgovaraju dijagramima stanja polaznih PSK- ili QAM-signala. Koriste se algoritmi brze Fourierove transformacije (FFT, *Fast Fourier Transform*).



Sažetak obilježja OFDM-a

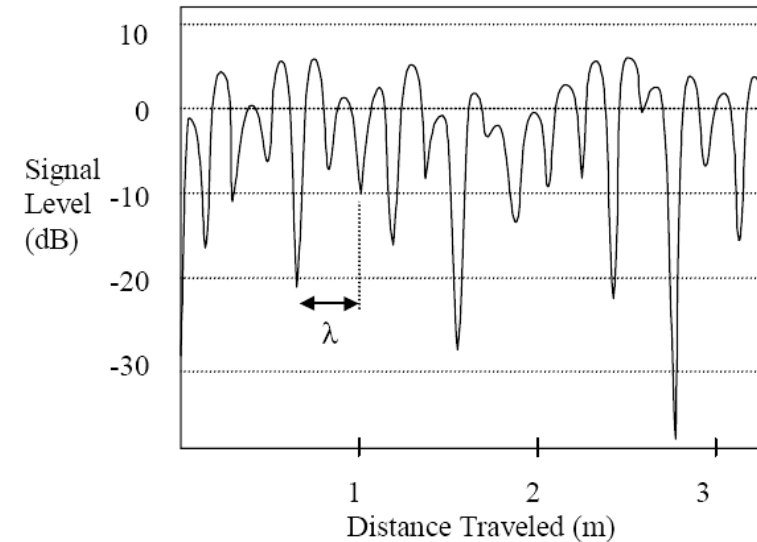
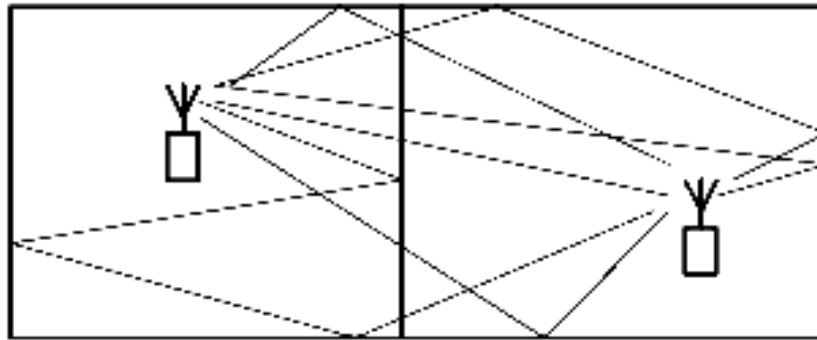
- Potkanali se nalaze na razmaku frekvencija $1/T_0 = f_0$
 - Kako su frekvencije podnosilaca višekratnici od $1/T_0$ time je osigurana ortogonalnost podnosilaca na intervalu trajanja T_0 .
 - Spektri moduliranih signala susjednih kanala se prekrivaju, ali zbog ortogonalnosti ne dolazi do smetnji među podnosiocima (ICI).
 - Zbog dopuštenog prekrivanja spektara signala u potkanalima minimizirana je širina potrebnoga frekvencijskog pojasa i on se koristi učinkovito (približno pravokutni oblik spektra cjelokupnog OFDM-signal).
- (tj. oni se sumiraju, ali mi uzimamo vrijednosti samo u disk. trenucima $k \cdot f_0$ pa nam preklapanje nije važno...

OFDM u uvjetima višestaznog prostiranja



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

OFDM u uvjetima višestaznog prostiranja



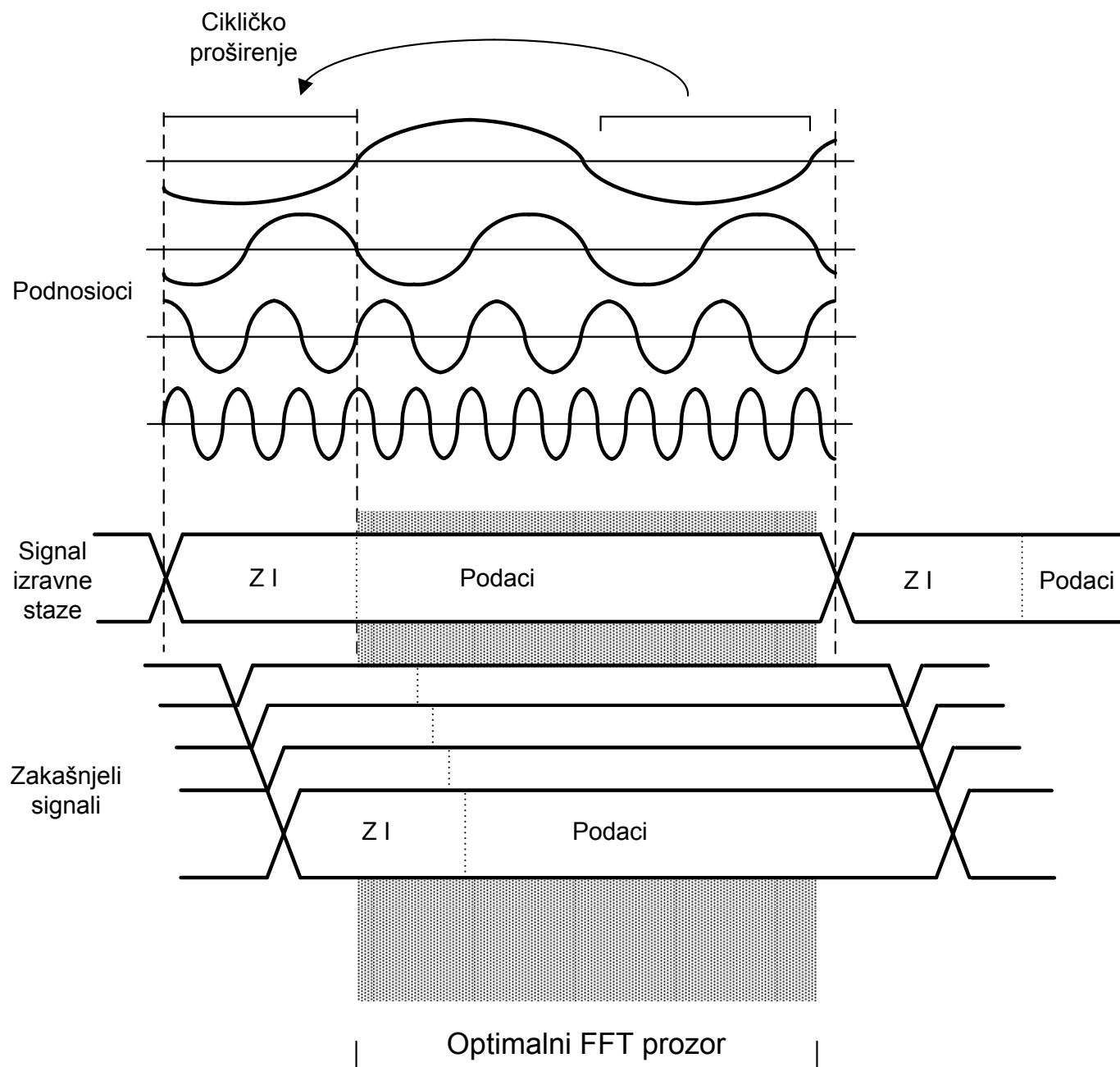
- Pri gibanju odašiljača i/ili prijamnika radijske veze dolazi do čestih i jakih propadanja razine prijamnog signala zbog višestaznog prostiranja.
- U OFDM-sustavima produljeno trajanje simbola moduliranih signala u potkanalima ukazuje na povećanu otpornost na smetnje nastale od višestaznog prostiranja. Kašnjenja su tad manji dio trajanja simbola.

Zaštitni interval u OFDM-simbolu

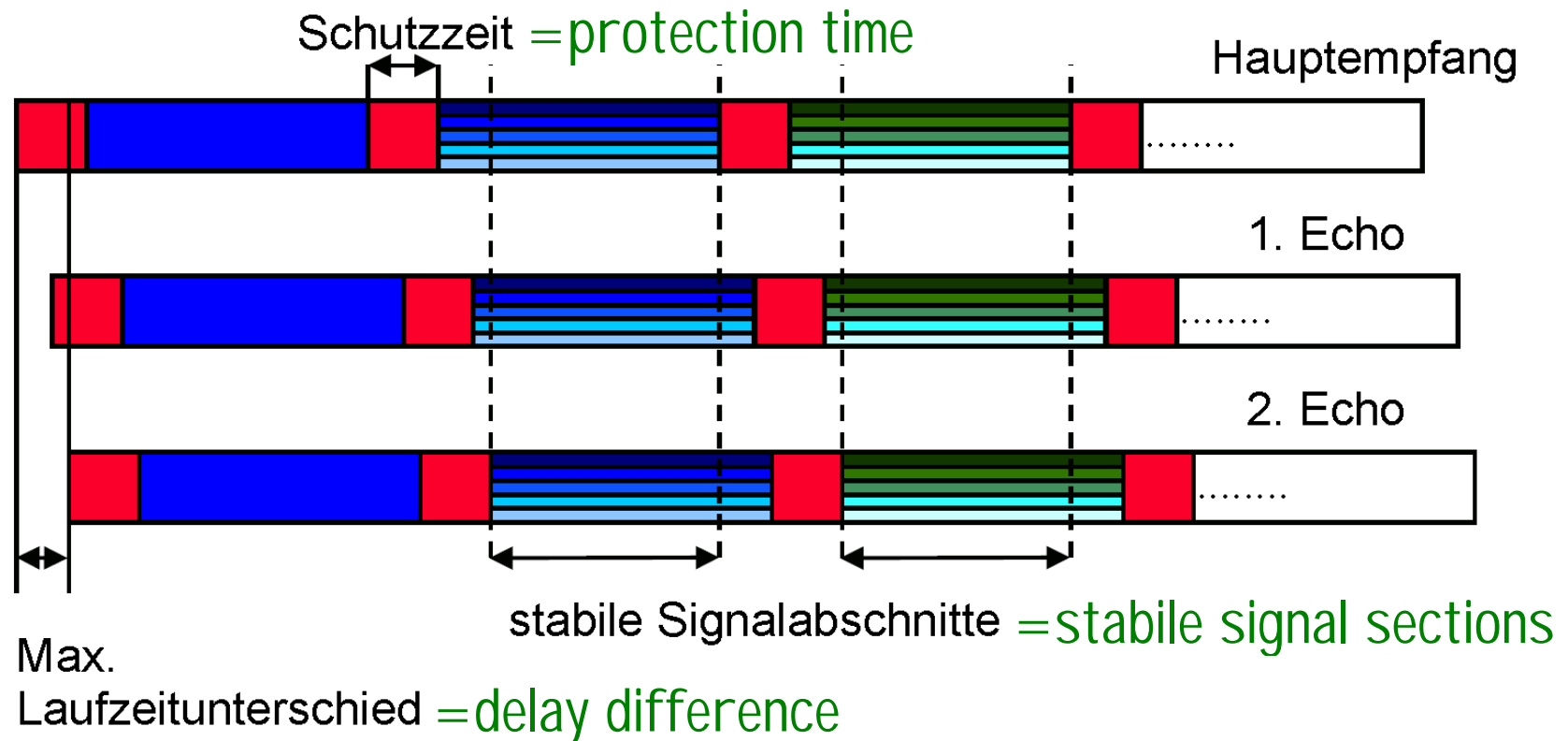
- Nepovoljne učinke kašnjenja pojedinih signala uklanja se dodavanjem tzv. *zaštitnog intervala* na početak OFDM-simbola.
- Trajanje OFDM simbola T_S se tad povećava za iznos trajanja zaštitnog intervala T_{ZI} ,

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

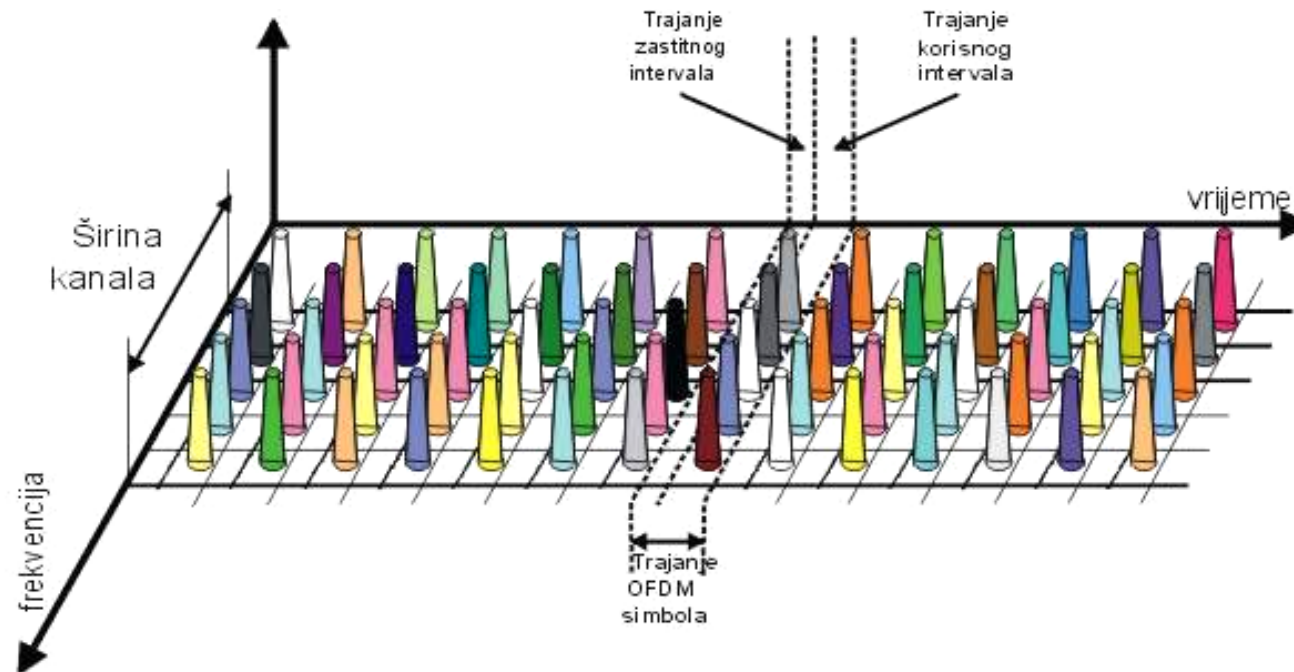
- Zaštitni se interval dobiva cikličkim proširenjem signala odnosno preslikom zadnjeg dijela OFDM-simbola u trajanju zaštitnog intervala. To se proširenje naziva *cikličkim prefiksom* OFDM-simbola.
- Veličina zaštitnog intervala uzima negdje do oko $T_0/4$ odnosno do oko četvrtine trajanja intervala ortogonalnosti.



Zaštitni interval u OFDM-simbolu

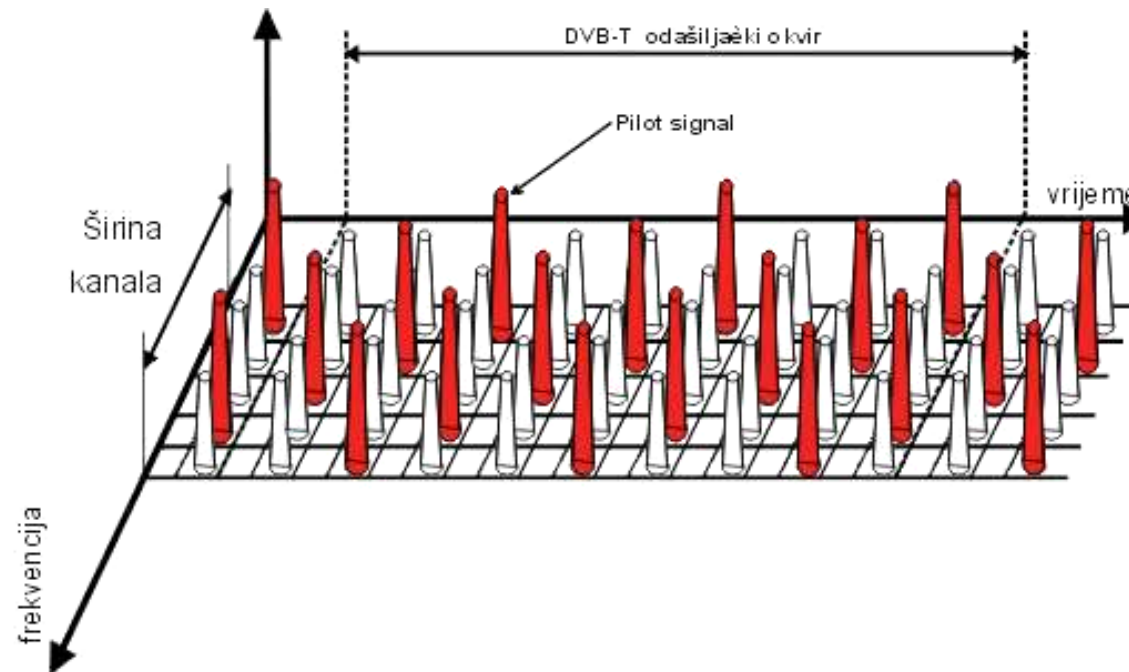


Zaštitni interval u OFDM-simbolu



- Kad je najveće kašnjenje signala manje od veličine zaštitnog intervala onda ne nastaju smetnje pri prijenosu, jer je zadržana ortogonalnost signala u potkanalima tijekom vremena analiziranja T_0 i u uvjetima različitog kašnjenja signala u pojedinim potkanalima.

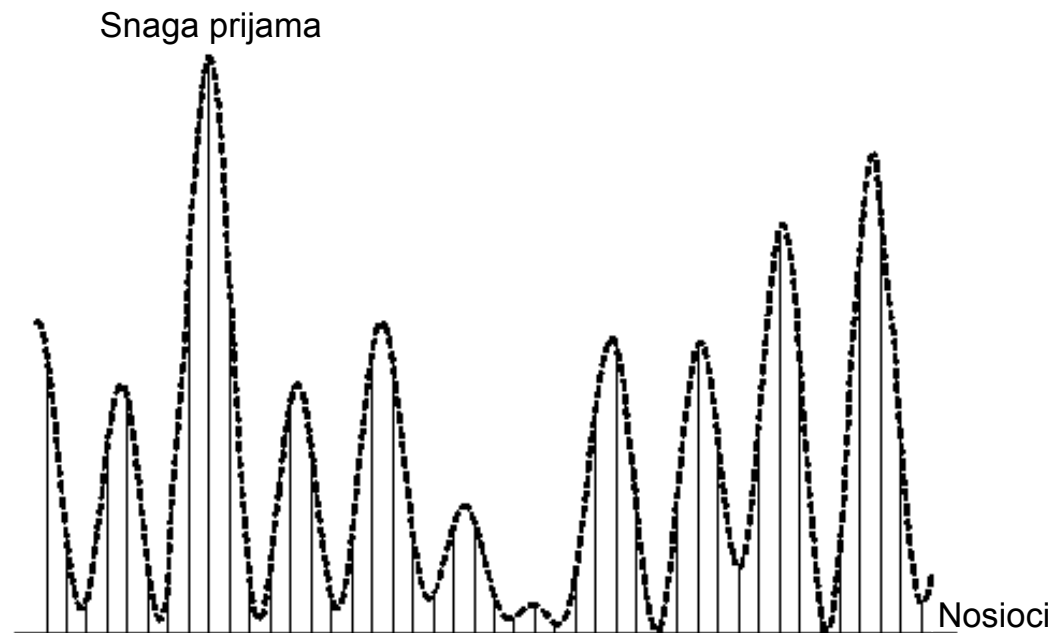
Pilotski signali u OFDM-simbolu → sinkroniziranje



- Za ispravnu demodulaciju OFDM-signala potrebno je vremenski prozor postaviti točno u odnosu na trenutak pojave svakoga emitiranog OFDM-simbola.
- U te se svrhe 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



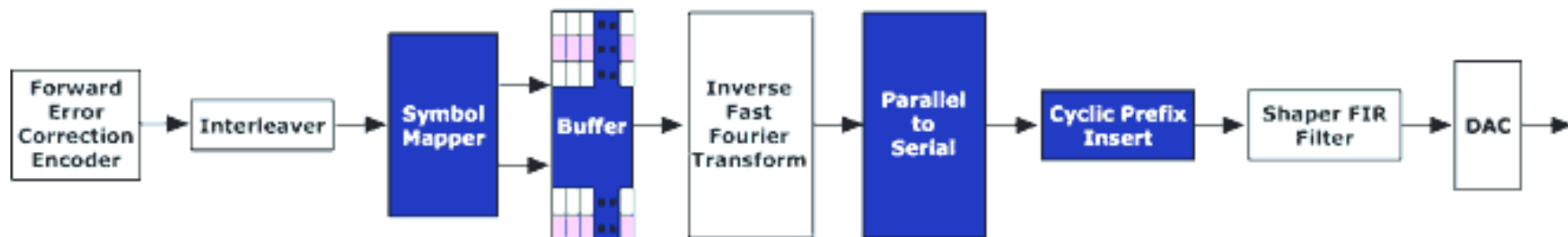
- OFDM-pokazuje povoljne osobine i u uvjetima kad su smetnje koncentrirane na uski pojas unutar pojasa OFDM-signalu (selektivni fading). Tad su «napadnuti» samo neki od potkanala odnosno mali dio cjelokupnog OFDM-simbola pa je mali broj pogrešno demoduliranih binarnih znakova.

Poboljšanje ispravnosti prijenosa

- OFDM je otporniji na uskopojasne smetnje od sustava s jednim nosiocem.
- Frekvencijski selektivni fading radiokanala pogađa manju skupinu potkanala OFDM-sustava.
- Pogreške prijenosa se koncentriraju na određene skupine bitova. To čini postupke zaštitnog kodiranja neučinkovitima.
- Zbog toga se prije modulacije bitovi permutiraju (ispremiješaju) po nekom pravilu kako bi se nakon inverzne permutacije u prijamniku postigao slučajni karakter položaja pogrešnih bitova.

Kodirani OFDM — COFDM

- Kodirani OFDM ili COFDM (*Coded OFDM*) označuje postupak u kojem su sjedinjeni postupci zaštitnog kodiranja radi ispravljanja pogrešaka i OFDM-a.
- Ovaj je postupak prilagođen uvjetima 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.

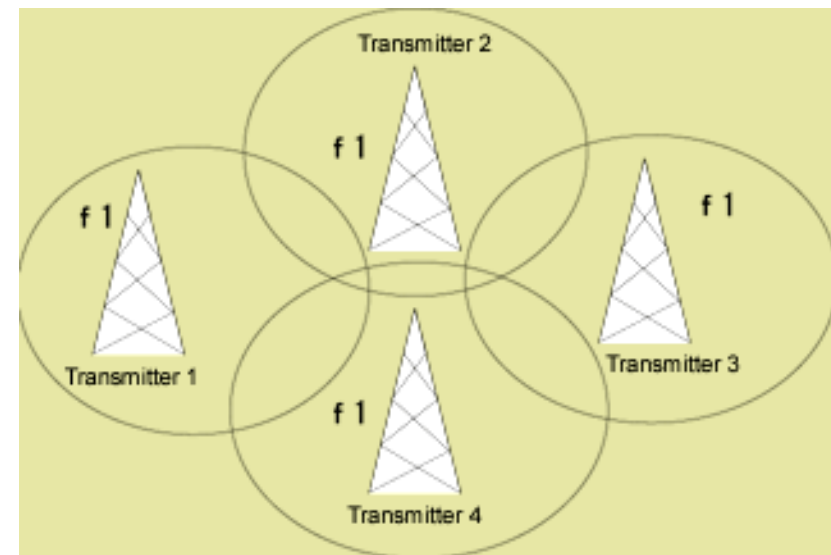


Kodirani OFDM — COFDM

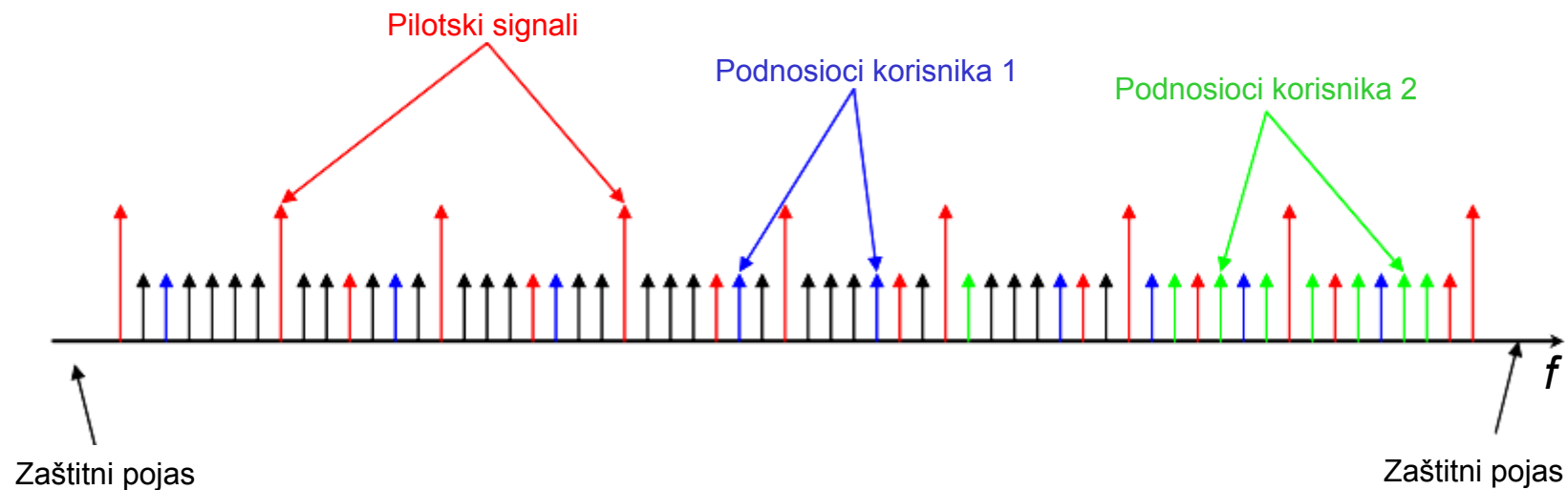
- Zaštitno se kodiranje obavlja uz pomoć blokovskih (npr. Reed-Solomon) ili konvolucijskih kodova.
- a) *Korisnost koda (code rate) iznosi k/n ($k/n < 1$) ako se svakom bloku od k bita dodaje $n - k$ zalihosnih bitova.*
- b) Alternativna metoda umjesto bitova za zaštitno kodiranje koristi simbole moduliranih podnosilaca → tehnika *kodirane modulacije* i primjena tzv. "rešetkastih kodova" (*Trellis Codes; TCM, Trellis Coded Modulation*).
- c) Vjerodostojnost demoduliranih znakova utvrđuje se pomoću tzv. "informacije o stanju kanala" (CSI, *Channel-State Information*).
- Uz pomoć CSI "tvrdo" demoduliranje bita (*hard decision*) nadomještava se odgovarajućim "mekim" postupkom (*soft decision*) u Viterbijevom dekoderu.
- Ovi postupci znatno povećavaju robusnost COFDM-postupka.

Rad mreže na jednoj frekvenciji — SFN

- Svi odašiljači u mreži rade na istoj frekvenciji (SFN, *Single Frequency Network*). Nužan je sinkroni rad svih odašiljača → emitira se sinkroni digitalni signal.
- Učinak prijama signala od više odašiljača jednak je učinku prijama signala nastalog višestaznim prostiranjem.
- Posljedice dubokih fedinga (ako ih ima) dobro se rješavaju metodama zaštitnog kodiranja.
- Za ispravni 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.
- Taj se problem može riješiti uz pomoć globalnog sustava za određivanje položaja (GPS, *Global Positioning System*). (koji služi kao referenca za sinkroniziranje vremena)

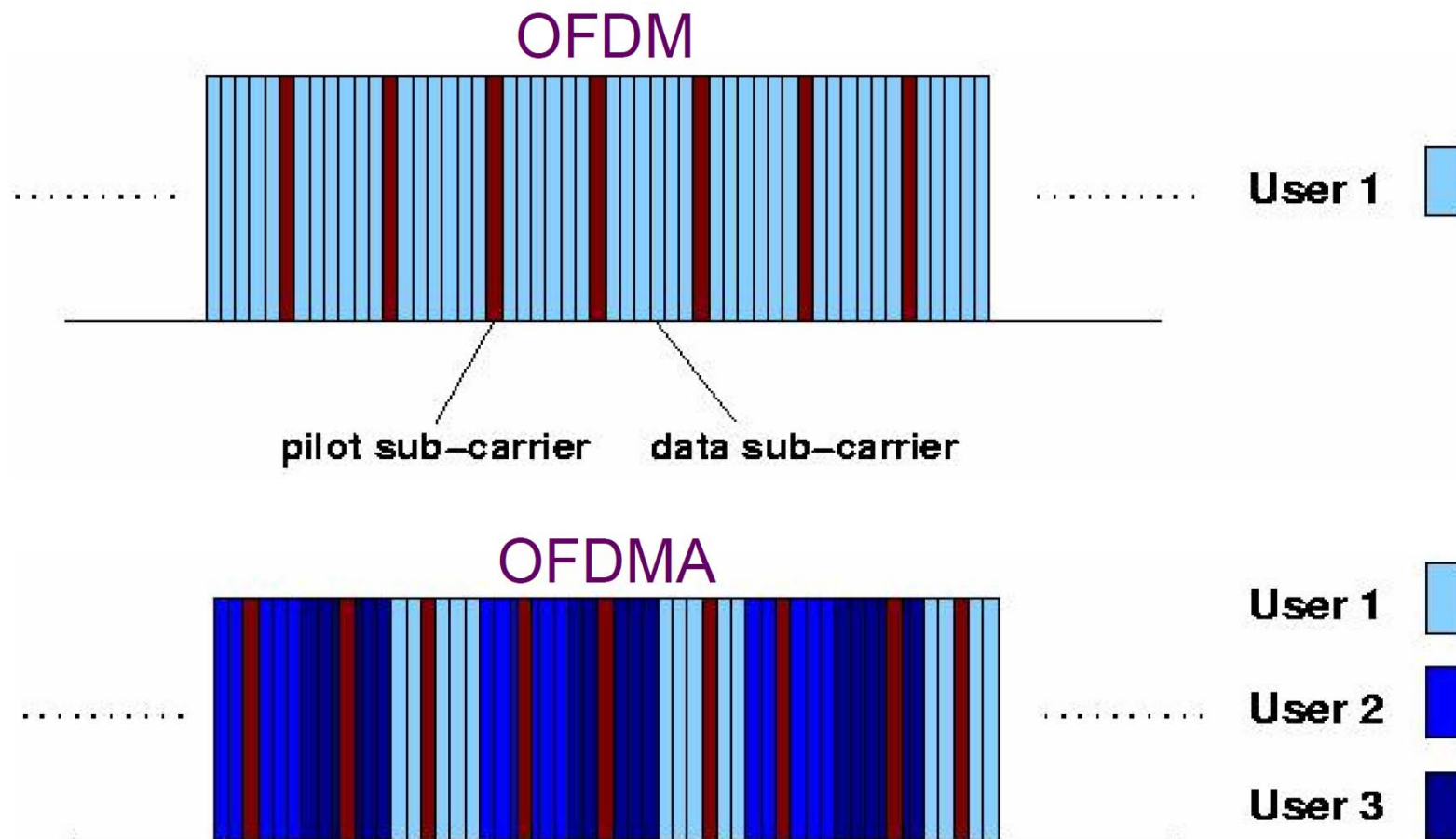


Višestruki pristup OFDMA

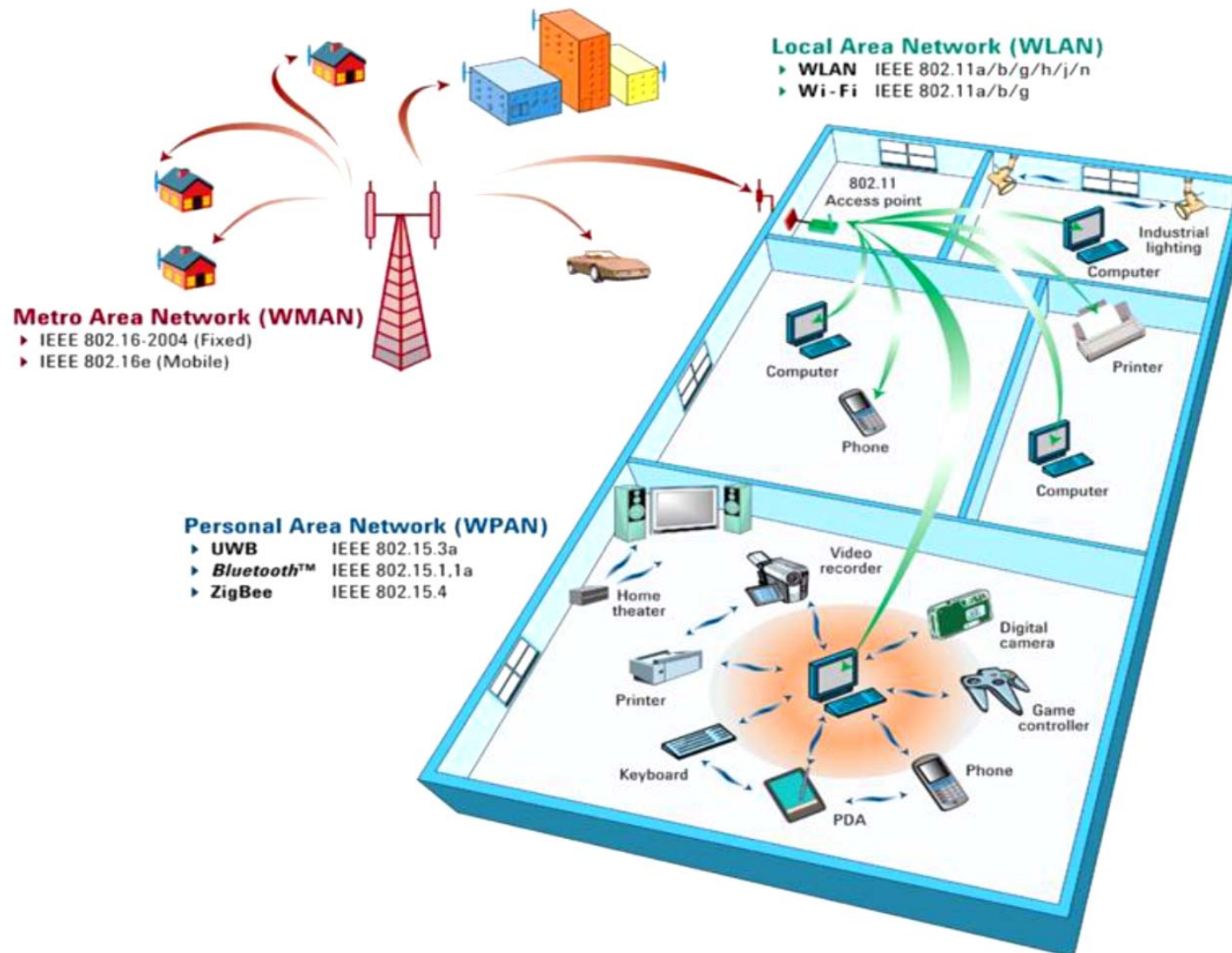


- U višekorisničkoj okolini OFDM je osnova višestrukog pristupa na osnovama podjele po ortogonalnim frekvencijama (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*),
- svakom korisniku dodjeljuje se skupina potkanala u okviru OFDM-a.

OFDM i OFDMA

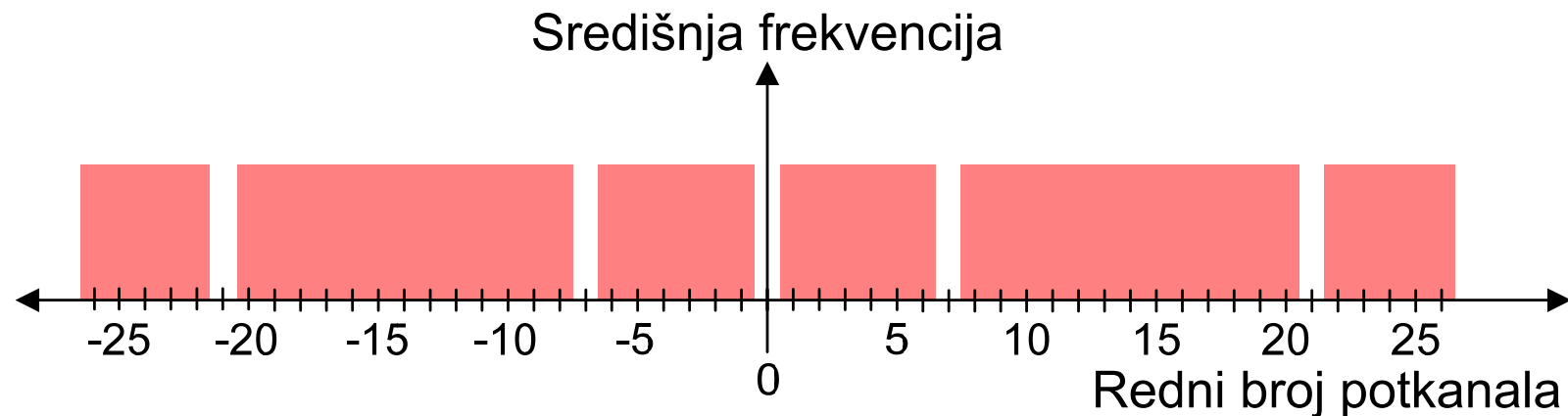


Gdje se koristi tehnologija OFDM?



Obilježja OFDM-signala u WLAN-u

Raspored potkanala u WLAN-u po normama IEEE 802.11a/g

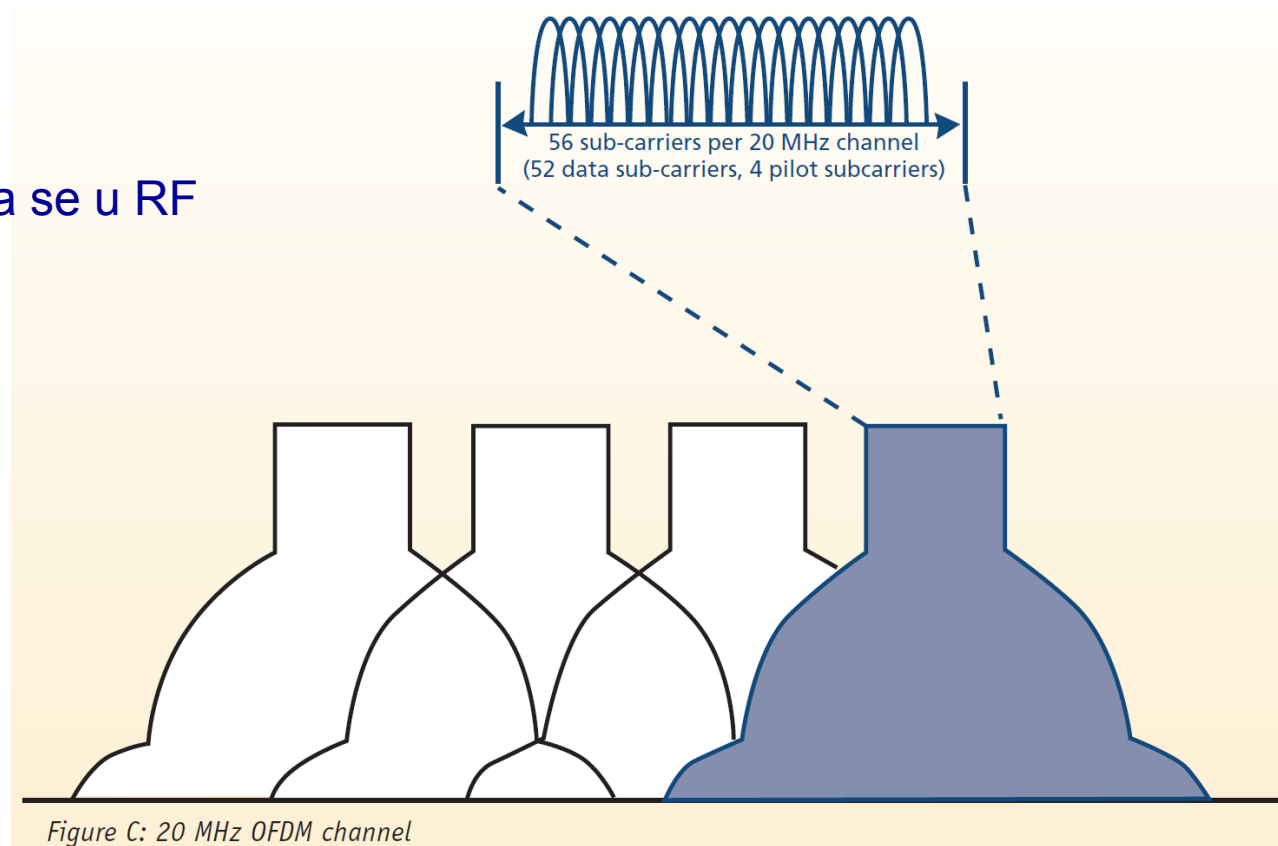


- Koristi se sustav od 52 potkanala od kojih se njih 48 koristi za prijenos informacije, a u preostala 4 potkanala su pilotni signali.
- Potkanal broj 0 ne koristi se za prijenos.
- Pilotni se signali smještaju u potkanale br. -21; -7; +7 i +21 i oni se moduliraju fiksnim slijedom bitova.

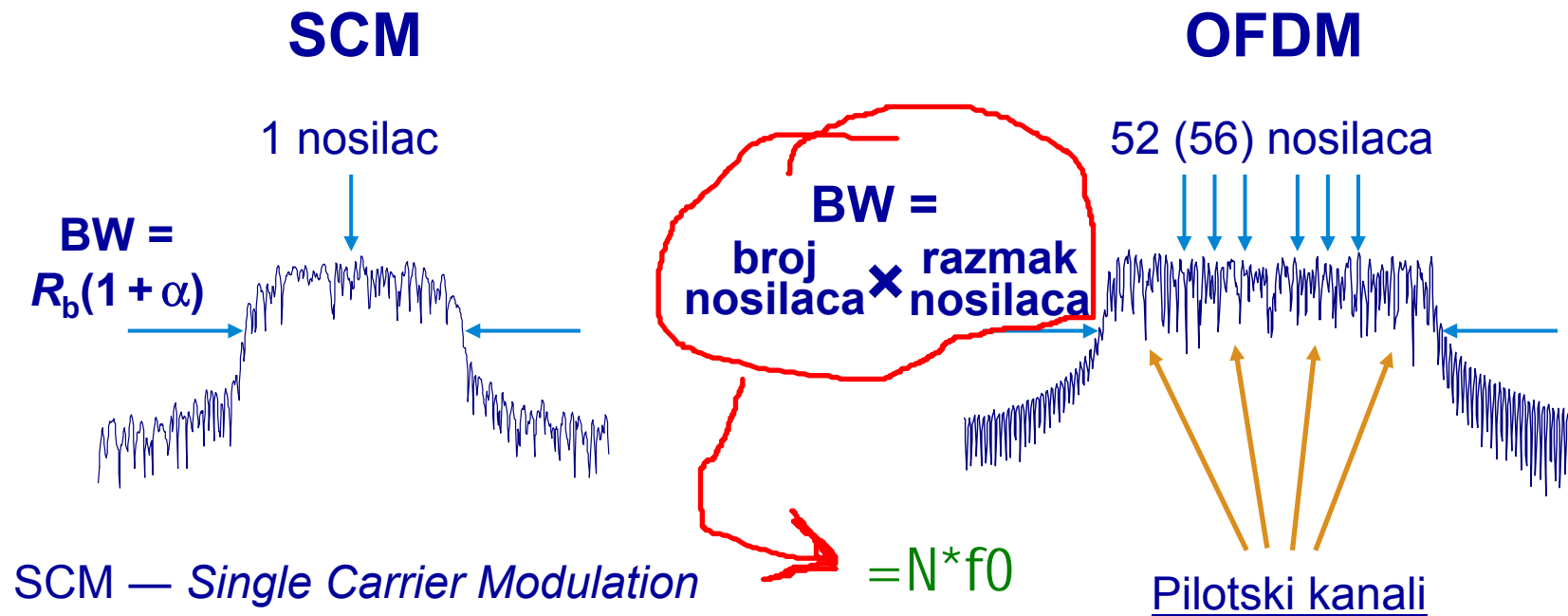
Obilježja OFDM-signala u WLAN-u

Radiofrekvencijski kanal u WLAN-u po normi IEEE 802.11n

- OFDM signal smješta se u RF kanal širine 20 MHz.



Obilježja OFDM-signala u WLAN-u

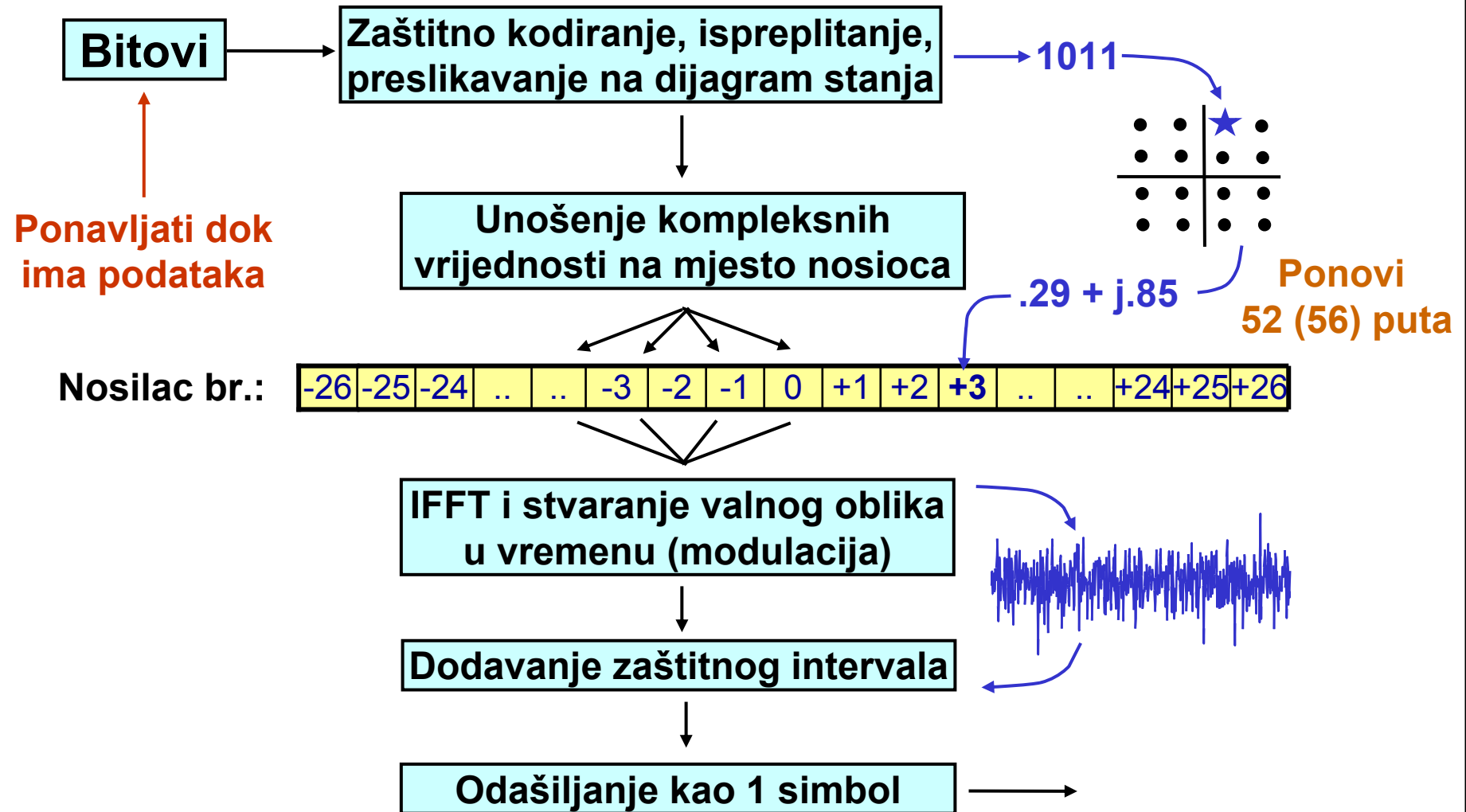


- Uz pomoć pilotskih kanala prati se tijekom promjena amplitude i faze unutar cijelog OFDM-bursta.

- uvijek su modulirani BPSK,
- stalna je amplituda i 2 faze,
- koriste se kao osnova za koherentnu demodulaciju.

nije toliko važno

Prikaz dobivanja OFDM-a u WLAN-u



Ostale primjene OFDM

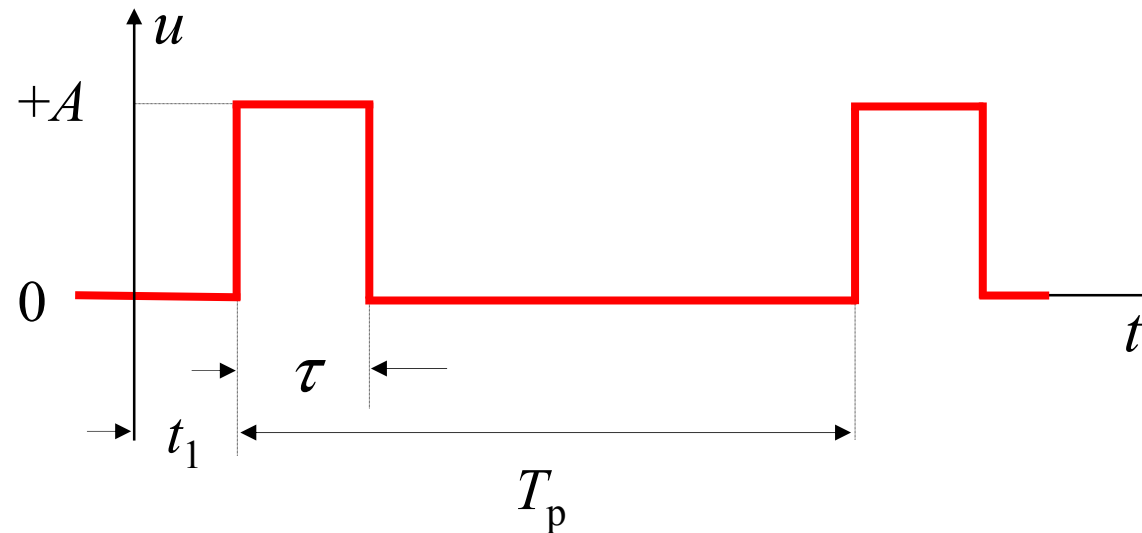
- Asimetrična digitalna pretplatnička linija **ADSL** (*Asymmetric Digital Subscriber Line*),
 - koristi se 256 u jednoj odnosno 134 podnosilaca u drugoj inačici.
- Razne radijske tehnologije,
 - radijska mreža gradskih područja, tehnologija WiMAX (IEEE 802.16):
 - koristi se do 2048 podnosilaca i višestruki pristup OFDMA,
 - tehnologije digitalne televizije **DVB-T i DVB-H**:
 - u zemaljskoj digitalnoj televiziji (DVB-T) koristi se 6817 podnosilaca (tzv. 8k inačica),
 - u digitalnoj televiziji za mobilni prijam odnosno prijam ručnim prijamnicima (DVB-H) koristi se 3409 podnosilaca (tzv. 4k inačica).

Modulacija impulsnog signala

Temeljna obilježja moduliranja impulsa

- Prijenosni signal odgovara periodičnom slijedu obično pravokutnih impulsa.
- Modulacijom impulsa mijenja se jedan od njihovih parametara (npr. amplituda, trajanje, položaj ...) ovisno o razini uzorka analognoga modulacijskog signala ili o razini diskretnoga modulacijskog signala.
- Informacija se, dakle, u osnovi prenosi u analognom obliku ali se ona obavlja u diskretnima vremenskim trenucima.
- Promjene parametara impulsnog nosioca mogu biti i diskretne u svrhu prijenosa digitalnih podataka.

Periodični impulsni signal VAŽNO!



- Periodični impulsni signal određen je četirima parametrima:
 - amplitudom A ,
 - vremenskim trajanjem impulsa τ ,
 - trenutkom pojave impulsa t_1 , odnosno fazom $\varphi = 2\pi t_1/T_p$ i,
 - frekvencijom ili repeticijom impulsa $f = 1/T_p$.
- Ti su parametri kontinuirane veličine i mogu poprimiti bilo koju vrijednost unutar nekih granica.

Postupci moduliranja impulsa

- Postupci moduliranja impulsnih signala

⇔ *impulsni modulacijski postupci:*

A – modulacija amplitude impulsa (PAM, *Pulse Amplitude Modulation*),

tau – modulacija trajanja impulsa (PDM, *Pulse Duration Modulation*), ista
modulacija širine impulsa (PWM, *Pulse Width Modulation*). stvar

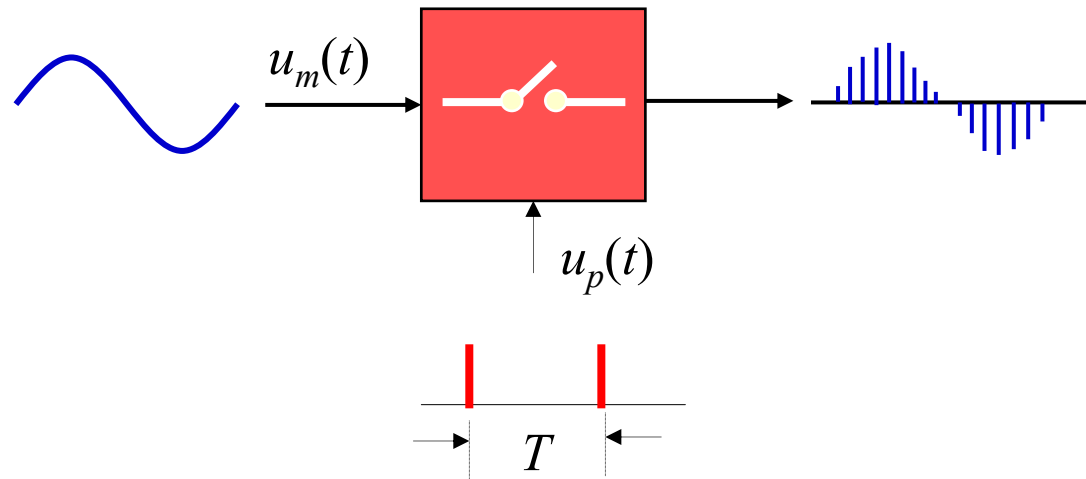
t-jedan modulacija položaja (faze) impulsa (PPM, *Pulse Position (Phase) Modulation*),

$1/T_p$ – modulacija frekvencije impulsa (PFM, *Pulse Frequency Modulation*).

- Impulsni signali imaju obilježja vremenski diskretnih pojava
→ impulsni se signali ne mogu modulirati vremenski kontinuiranim modulacijskim signalom.

Obilježja modulacijskog signala

prvo se prijenosni signal modulira i tada sa njima otipkavamo modulacijski s.



(prirodno ili
regularno -
vidi za 2 slajda)

- Modulacijski signal valja diskretizirati po vremenu prije modulacije
→ uzimaju se uzorci modulacijskog signala u vremenski ekvidistantnim trenucima.
- *Teorem uzoraka* → broj uzoraka u jedinici vremena (sekundi) mora biti veći od dvostruke najviše frekvencije u spektru modulacijskog signala f_{maks} ili jednak toj frekvenciji.

$$f(\text{uzoraka}) > 2 \cdot f(\text{max})$$

Obilježja modulacijskog signala

- Vremenski razmak uzoraka T mora biti onda manji od,

$$T \leq \frac{1}{2f_{\text{maks}}}.$$

- *Moduliranje impulsnih signala obavlja se uzorcima modulacijskog signala.*

- *Primjer:*

Govorni signal zauzima pojas od 300 do 3400 Hz.

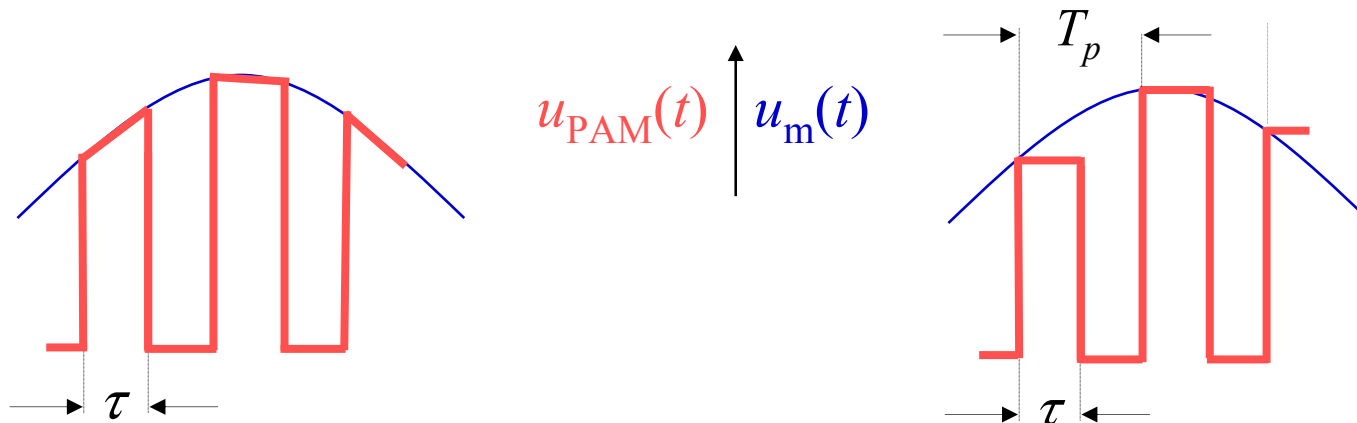
Prema teoremu uzoraka uzorke valja uzimati s frekvencijom od barem 6,8 kHz → odabrana je frekvencija uzoraka od 8,0 kHz.

Vremenski razmak uzoraka govornog signala iznosi $1/(8 \cdot 10^3) = 125 \mu\text{s}$ → to je ujedno i trajanje periode impulsnoga prijenosnog signala.

zna i: $T(\text{prijenosni}) = T(\text{uzoraka})$

Modulacija amplitude impulsa — PAM

- Modulacija amplitude impulsa odgovara postupku uzimanja uzoraka. Uzorci su predočeni električnim impulsima konačnog trajanja.
- Oblik impulsa PAM-signala ovisi o osobinama postupka uzimanja uzoraka,
 - prirodni postupak,
 - regularni ili uniformni postupak.



Prirodni postupak uzimanja
uzoraka

Regularni ili uniformni postupak
uzimanja uzoraka

iste su gornje i donje bo ne
komponente!

nisu iste gornje bo ne i donje bo ne
komponente

Modulacija amplitude impulsa — PAM

- Neka je sinusni modulacijski signal oblika,

$$u_m(t) = U_{mm} \cos 2\pi f_m t,$$

dok se impulsni prijenosni signal opisuje poznatim izrazom.

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



- Prirodnim postupkom uzimanja uzoraka dobiva se unipolarni PAM-signal,

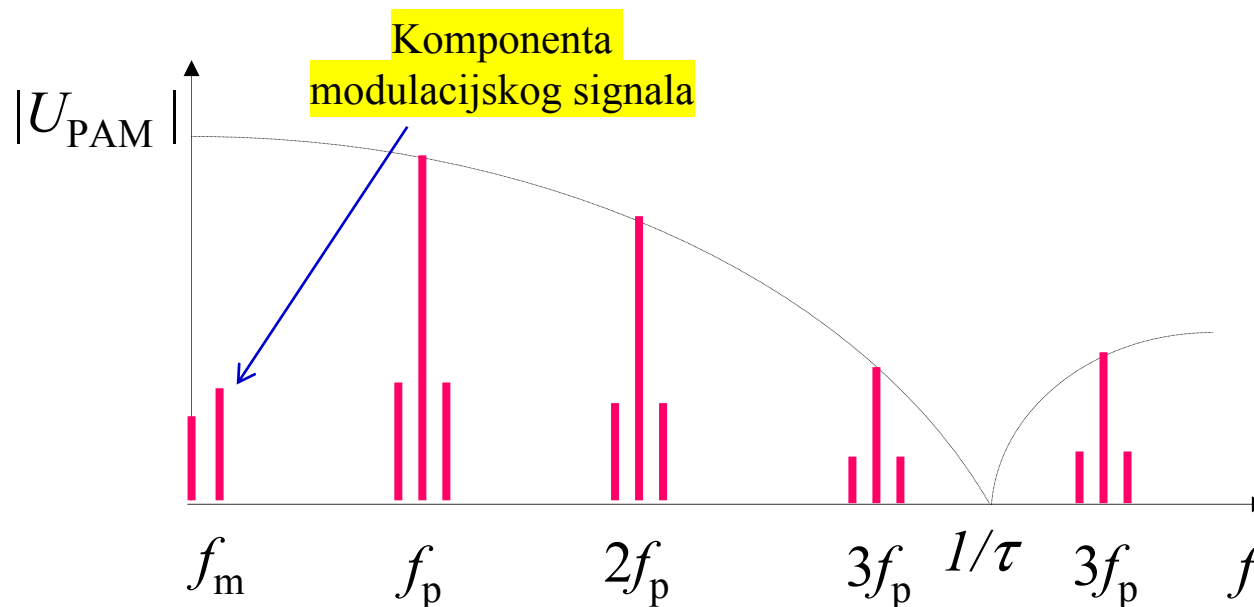
$$u_{PAM}(t) = \frac{A\tau}{T_p} \left[1 + k_A \frac{U_{mm}}{A} \cos 2\pi f_m t \right] \times \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi f_p \tau}{n\pi f_p \tau} \cdot \cos 2\pi n f_p t \right).$$

nevažno!

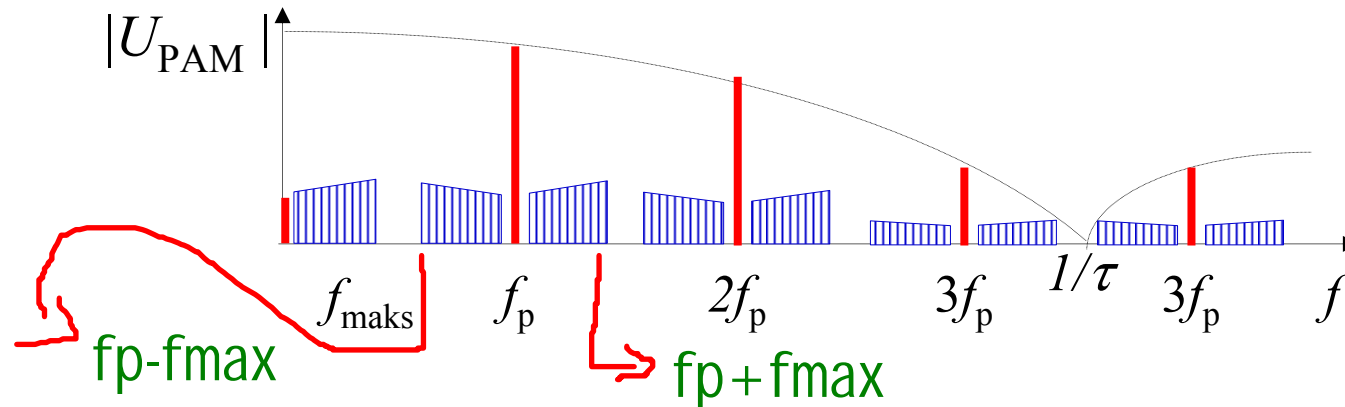
Modulacija amplitude impulsa — PAM

- Ako se uvede oznaka $k_a U_{mm}/A = m_A$, a što odgovara *indeksu modulacije*, izlazi,

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



Modulacija amplitude impulsa — PAM



- U spektru takvog, prirodnim postupkom uzorkovanja nastalog PAM-signala javljaju se bočne komponente odnosno bočni pojasevi oko svih spektralnih komponenti impulsnoga prijenosnog signala.
- Donja i gornja bočna komponenta ili pojas oko nekog višekratnika f_p međusobno su jednaki, ali se svaki par oko frekvencije nf_p korigira za jednaki faktor kao i odgovarajuća komponenta u spektru impulsnoga prijenosnog signala, koji je jednak,

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

unipolarni ima istosmjernu komponentu (na frekv. $f=0$), dok bipolarni nema - isto piše i na slj. slajdu

Modulacija amplitude impulsa — PAM

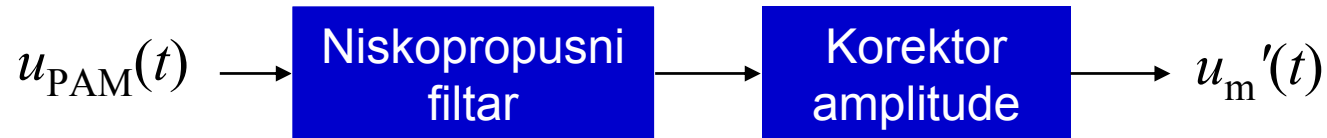
- Spektar PAM-signalâ nastalog regularnim ili uniformnim postupkom uzimanja uzoraka sliĉnih je osobina.
- Osobitost je spektra ove vrste PAM-signalâ u nejednakosti razina donje i pripadajuće gornje komponente. To nastaje zbog toga što je odgovarajući korekcijski faktor oblika,

$$\frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau}, \text{ neva\u017eno}$$

odnosno on ovisi o frekvenciji svake spektralne komponente na koju se primjenjuje.

- Obje vrste PAM-signalâ sadr\u017ee u svom spektru i komponente modulacijskog signalâ.
- PAM se mo\u017ee **demodulirati** jednim niskopropusnim filtrom.
- Istosmjerna komponenta u moduliranom signalu posljedica je unipolarnog karaktera impulsnoga prijenosnog signalâ. Uporabom bipolarnih PAM-impulsa (impuls mijenja polaritet kod negativnih razina modulacijskog signalâ) izbjegava se pojava istosmjerne komponente.

Modulacija amplitude impulsa — PAM



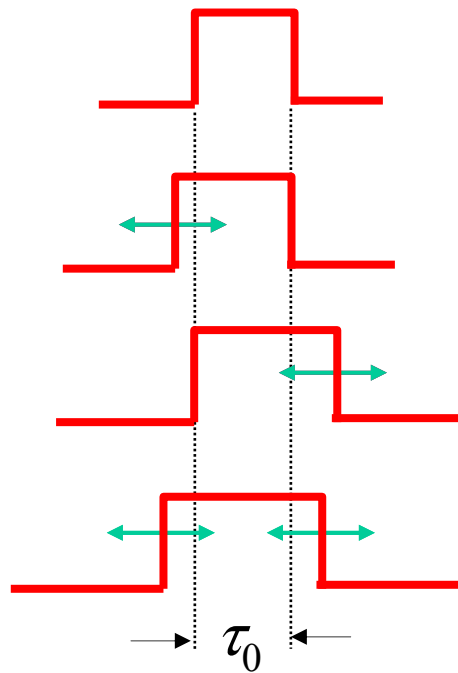
- Pri regularnom uzimanju uzoraka demodulirani je signal linearno izobličen pa je potrebno u pojasu frekvencija modulacijskog signala korigirati amplitudu filtriranjem dobivenog signala po pravilu,

$$\frac{\pi f \tau}{\sin \pi f \tau} \cdot \text{nevažno}$$

- Modulacija amplitude impulsa sama po sebi nema neko značenje zbog velike osjetljivosti na smetnje i šum. PAM je često prvi korak u dobivanju ostalih vrsta impulsnih ili digitalnih modulacija.

Modulacija trajanja/širine impulsa

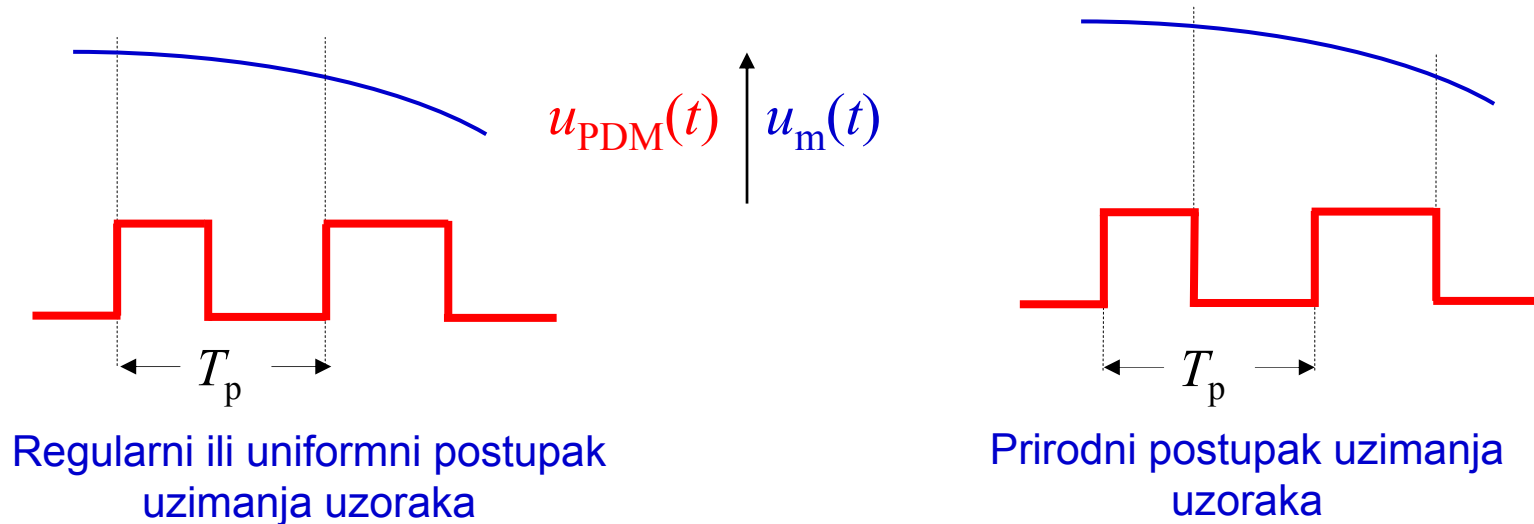
- Modulacija trajanja ili širine impulsa PDM/PWM specifični je modulacijski postupak za impulsne nosioce. Ona nema ekvivalenta među kontinuiranim postupcima modulacije sinusnog signala.



- Informacija je sadržana u trenutku pojave impulsa pa se PDM zajedno s PPM i PFM ubraja u postupke *modulacije vremenskog parametra impulsnog nosioca* (PTM, *Pulse Time Modulation*).
- Širina impulsa modulira se mijenjajući položaj prednjeg brida, stražnjeg brida ili oba brida impulsa na vremenskoj osi.
- Vremenski položaj brida impulsa, koji se modulira, razmjeran je razini uzorka modulacijskog signala.

detaljno objašnjenje za 3 slajda!

Modulacija trajanja/širine impulsa



- Kod uniformnoga ili regularnog postupka uzorkovanja uzorci modulacijskog signala uzimaju se u vremenski ekvidistantnim trenucima.
- U prirodnom postupku trenutak se uzimanja uzoraka poklapa 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.

(na po etak brida - koji nije uvijek na istom mjestu - vidi sljede i slajd)

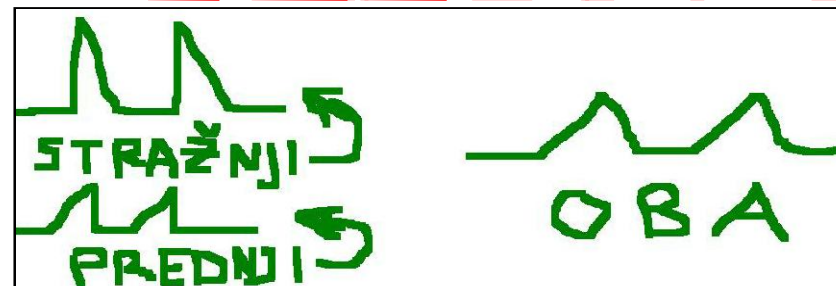
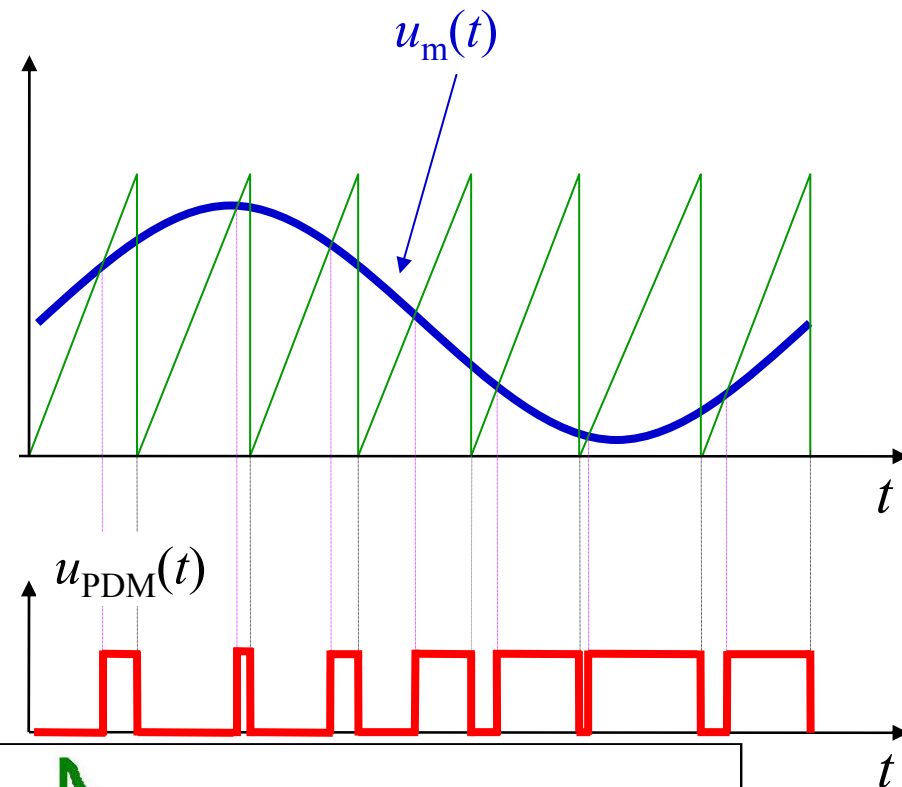
Modulacija trajanja/širine impulsa

- Za primjer sinusnoga modulacijskog signala trajanje impulsa PDM-signala je,

$$\begin{aligned}\tau(t) &= \tau_0 + k_D U_{mm} \sin 2\pi f_m t, \\ &= \tau_0 (1 + m_D \sin 2\pi f_m t), \\ m_D &= \frac{k_D U_{mm}}{\tau_0}, \quad \text{nevažno}\end{aligned}$$

gdje je τ_0 trajanje impulsa prijenosnog signala, a m_D stupanj ili *indeks modulacije*.

Un je pravokutnog oblika, mogu i oblici Um:



Ovisno o obliku, modulira se (pomi e) prednji, stražni ili oba brida

Modulacija trajanja/širine impulsa - objašnjenje prošlog s.

- Analitički opis PDM-signal nastaje kad se u izraz za prijenosni signal,

$$u_p(t) = \frac{A\tau_0}{T_p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A\tau_0}{T_p} \cdot \frac{\sin n\pi f_p \tau_0}{n\pi f_p \tau_0} \cdot \cos 2\pi n f_p t.$$

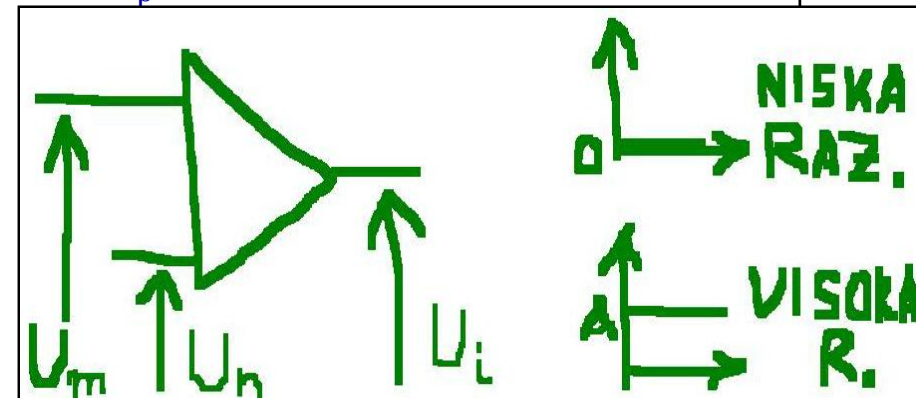
KOMPARATOR:

umjesto τ_0 stavi $\tau(t)$ sa prethodnog slide-a,

$$u_{\text{PDM}}(t) = \frac{A\tau_0}{T_p} (1 + m_D \sin 2\pi f_m t) +$$

nevažno

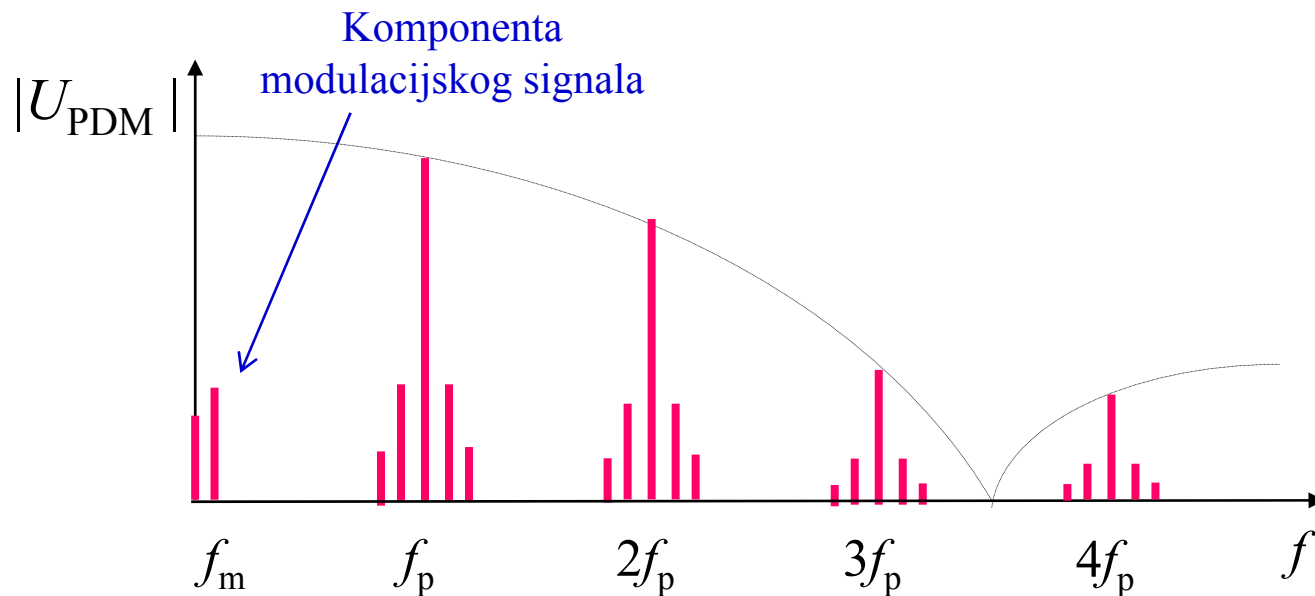
$$+ A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \left[n\pi \frac{\tau_0}{T_p} (1 + m_D \sin 2\pi f_m t) \right] \cdot \cos 2\pi n f_p t.$$



- Daljnijim uređenjem ovog izraza može se dobiti uvid u spektralne osobine PDM-signal (vidi udžbenik “Modulacije i modulatori”).
- Spektar PDM-signal sadrži istosmjernu komponentu, komponentu modulacijskog signal i ostale komponente impulsnog nosioca oko kojih se nalazi više parova bočnih komponenti.

ako je $U_m > U_n$, U_i je visoka razina i obrnuto (U_m je pilasti, U_n pravokutni signal)

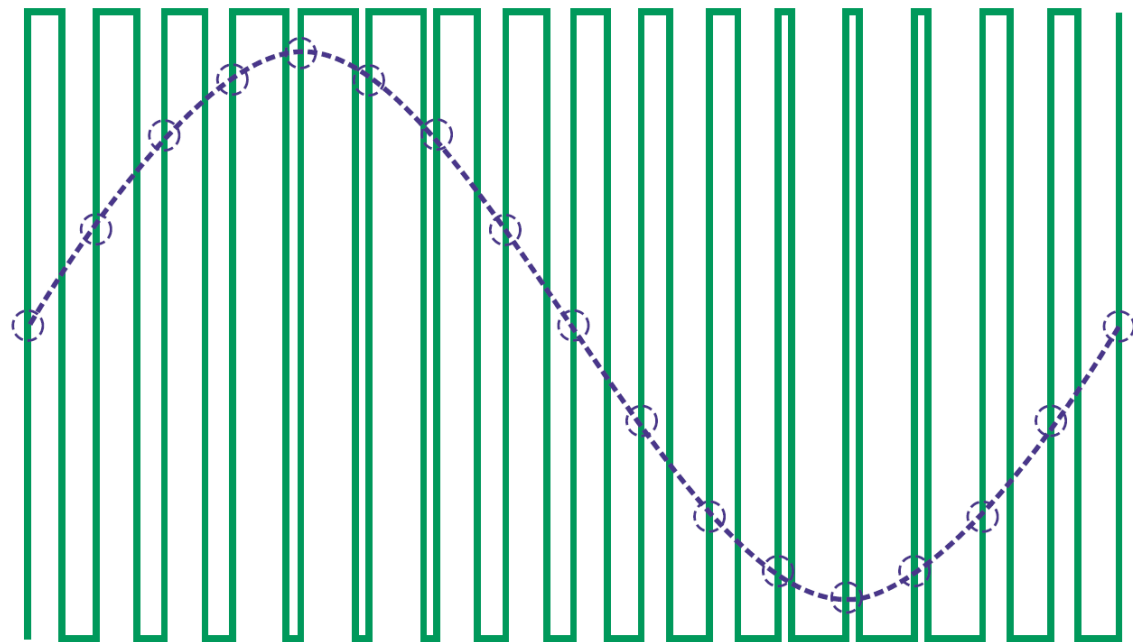
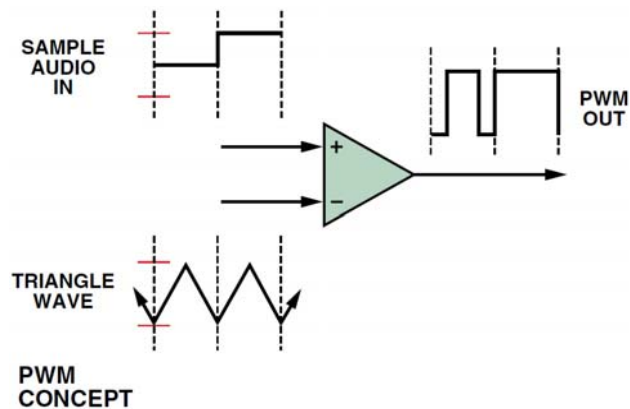
Modulacija trajanja/širine impulsa



- Uporabom bipolarnih PDM-impulsa izbjegava se pojava te istosmjerne komponente.
- **Modulacija trajanja/širine impulsa je nelinearni modulacijski postupak.**
jer je bila jedna komponenta a sada ih imamo više!

Modulacija trajanja/širine impulsa

Promjer dobivanja PDM/PWM-signala s promjenljivim položajem oba brida impulsa



PWM
EXAMPLE

SINE = AUDIO INPUT
PULSES = PWM OUTPUT

bipolarni

Modulacija trajanja/širine impulsa



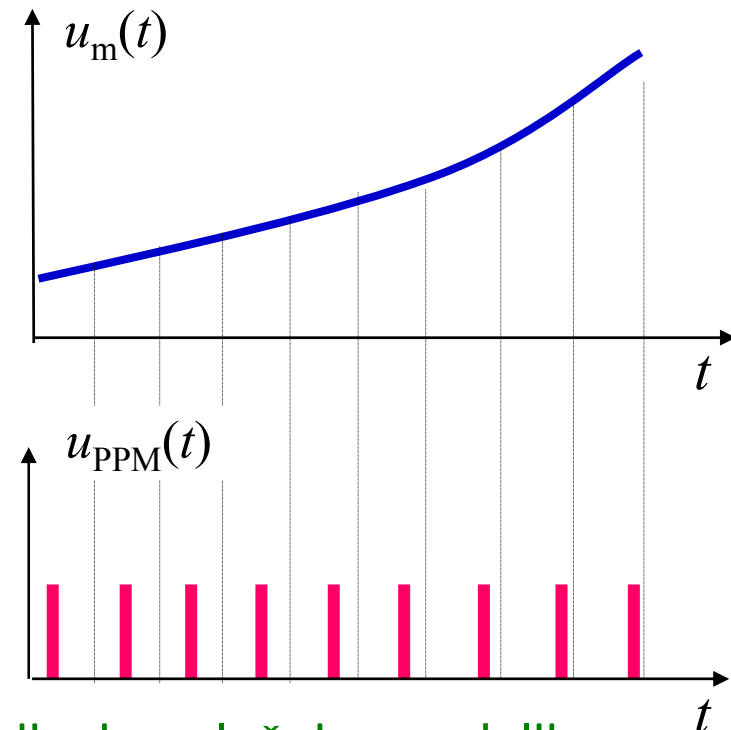
- Komponente spektra modulacijskog signala sastavni su dio PDM/PWM spektra pa se **demodulacija** svodi na filtriranje niskim propustom.

Primjena:

- Modulacija širine impulsa koristi se u uređajima koji pojačavaju snagu niskofrekvencijskog signala do jako visokih razina (pojačala klase S).
- Pomoću PDM upravlja se snagom koja se privodi nekom trošilu bez korištenja elemenata s gubicima. (nemoramo koristiti otpornik)
 - Srednja snaga, koja se privodi uređaju, ovisi o radnom ciklusu (τ/T_p) PDM-signala.
 - Navedeni princip koristi se za upravljanje brzinom vrtnje istosmjernih elektromotora kao i za upravljanje razinom svjetla žarulje.
 - PDM se koristi u impulsno upravljanim ispravljačkim uređajima.

Modulacija položaja/faze impulsa — PPM

- PPM je ekvivalentan modulaciji faze sinusnog signala. Vremenski položaj impulsa određen je razinom modulacijskog signala u trenutku uzimanja uzorka.
- Pri regularnom ili uniformnom postupku uzimaju se uzorci u vremenski ekvidistantnim trenucima, obično na početku intervala periode trajanja T_p .
- U prirodnom postupku uzima se uzorak u trenutku pojave impulsa pa se vremenski razmak uzoraka mijenja u korelaciji s promjenom razine modulacijskog signala.
- PPM ima obilježja *nelinearnog postupka*. **isto kao i PDM, samo se ne mijenja položaj a ne duljina**



Modulacija položaja/faze impulsa — PPM

- Periodični slijed impulsa trajanja τ i periode T_p , koji odgovara prijenosnom signalu jednak je,

$$u_p(t) = \frac{A\tau}{T_p} + A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T_p} \cos n\Phi(t),$$

nevažno

gdje je $\Phi(t) = 2\pi f_p t$.

- PPM-signal nastaje kad se linearno rastuća trenutna faza nadomjesti funkcijom oblika (odnosi se na sinusni modulacijski signal),

$$\Phi(t) = 2\pi f_p t + k_p U_{mm} \sin 2\pi f_m t = 2\pi f_p t + \Delta\Phi \sin 2\pi f_m t.$$

- Relativna je faza impulsa onda razmjerna razini modulacijskog signala u trenutku koji odgovara sredini PPM-impulsa.

Modulacija položaja/faze impulsa — PPM

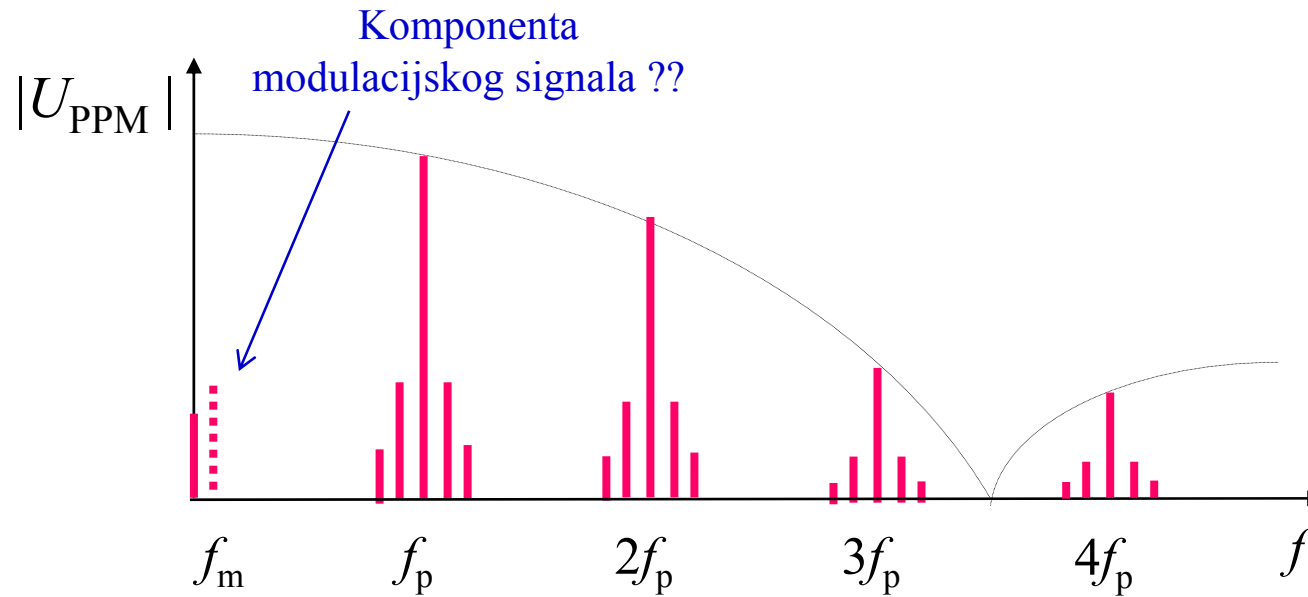
- Nastali PPM-signal je onda,

$$u_{\text{PPM}}(t) = \frac{A\tau}{T_p} + A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T_p} \cdot \cos n(2\pi f_p t + \Delta\Phi \sin 2\pi f_m t).$$

nevažno

- Drugi član ovog izraza predoduje zbroj faznomoduliranih signala na frekvenciji f_p i njezinim harmonicima.
- Izraz ukazuje da se spektar prirodnim postupkom uzorkovanja dobivenog PPM-signala sastoji od istosmjerne komponente i ostalih komponenti impulsnoga prijenosnog signala. Oko komponente frekvencije f_p i njezinih harmonika nastaje više parova bočnih komponenti kao kod PM-postupka.
- Pri uporabi bipolarnih PPM-impulsa izostaje istosmjerna komponenta.
- Ova vrsta PPM-signala ne sadrži komponentu modulacijskog signala, pa se signal ne može demodulirati filtriranjem kao PAM i PDM.*

Modulacija položaja/faze impulsa — PPM



- PPM-signal nastao regularnim postupkom uzimanja uzoraka sadrži komponente modulacijskog signala, ali razine bočnih komponenti u paru nisu međusobno jednake (jednako kao kod PAM).

Modulacija položaja/faze impulsa — PPM



- Filtarskim postupkom dobiveni demodulirani signal je linearno izobličen, jer je komponentama demoduliranog signala smanjena razina za faktor,

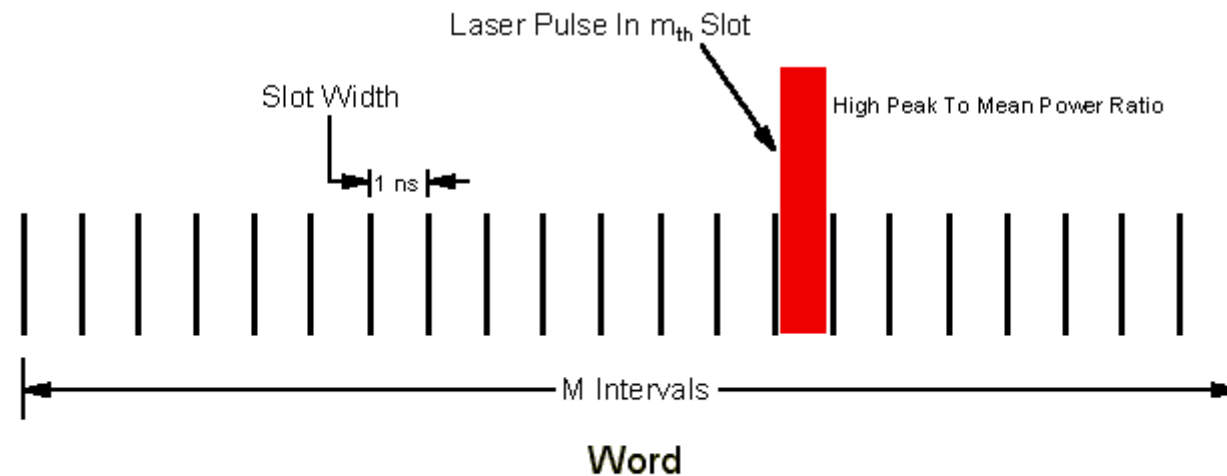
$$\frac{\sin \pi f_m \tau}{\pi f_m \tau}, \text{ nevažno}$$

pa je potrebno korigirati amplitudu signala nakon filtriranja.

Modulacija položaja/faze impulsa — PPM

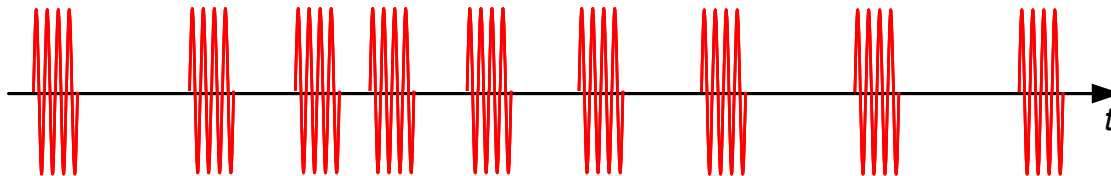
Primjena:

- Za primjer prijenosa digitalnih podataka predloženih s b bita, impuls PPM-signal zauzima jedan od $M = 2^b$ mogućih diskretnih položaja unutar periode trajanja T_p . Brzina prijenosa je tad $R_b = b/T_p$.
- PPM je vrlo čest u optičkim komunikacijama gdje nisu izražene smetnje od višestaznog širenja.



Modulacija položaja/faze impulsa — PPM

- U odgovarajućim sustavima valja provesti dobru sinkronizaciju jer je informacija sadržana u relativnom položaju impulsa na vremenskoj osi u odnosu na neki taktni signal.
- To je razlogom korištenja tzv. diferencijalne modulacije položaja impulsa (DPPM, *Differential Pulse Position Modulation*). U tom postupku položaj nekog impulsa mjeri se u odnosu na položaj prethodnog impulsa moduliranog signala.
- PPM se u zajednici s još jednom diskretnom modulacijom sinusnog signala (ASK ili FSK) koristi za radijsko upravljanje robotima ili modelima kao i za komunikaciju s beskontaktnom pametnom karticom (*Smart Card*).



Modulacija frekvencije impulsa — PFM

- PFM je po svojim obilježjima slična i povezana s PPM kao što su slične i povezane odgovarajuće kontinuirane inačice sinusnog signala FM i PM.
- Broj impulsa u jedinici vremena razmjeran je razini modulacijskog signala.
- Modulacija frekvencije impulsa najviše se primjenjuje u mjernoj tehnici, a rijetka je njezina uporaba u komunikacijama.
- PFM-postupak ne može se koristiti u TDMA-sustavima ako modulacijski signal sadrži istosmjernu komponentu, jer tad bi PFM-impuls izašao iz vremenskog intervala koji je pridružen komunikacijskom kanalu.