

Digitalne modulacije

Prenos u proširenom spektru

Uvod

- Razvoj ove tehnike prenosa signala iniciran je vojnim potrebama
 - Cilj je bio onemogućavanje prisluškivanja i ometanja prenosa
- Kod prenosa u proširenom spektru (*spread spectrum transmission*) signal kojim se prenose podaci zauzima mnogo širi spektar nego što to diktira digitalni protok, tj. brzina signaliziranja
- Proširenje spektra se ostvaruje korišćenjem pomoćnog pseudoslučajnog signala, koji je poznat samo na predajnoj i prijemnoj strani

Prednosti korišćenja prenosa u proširenom spektru

1. Zaštita od interferencije

- Interferencija može biti namerna i nenamerna
 - Namerna interferencija – ometanje
 - Nenamerna – potiče od ostalih korisnika u sistemu
 - Karakteristična za bežične mreže sa višestrukim pristupom (WiFi, mobilna telefonija)
 - Proširenjem spektra signala na predaji, i njegovim ponovnim sužavanjem na prijemu, omogućava se potiskivanje interferencije

2. Onemogućavanje prisluškivanja

- Spektar signala na prijemu može da „skupi“ (i tako protumači prenošenu poruku) samo prijemnik koji „zna“ kako je spektar proširen

3. Sniženje nivoa spektralne gustine energije (SGE)

- Proširenjem spektra signala, energije signala se raspodeljuje po širokom opsegu, pa je nivo SGE izrazito nizak
 - Ovim se postiže otežana detekcija signala u proširenom spektru – nivo SGE je ispod nivoa šuma
 - Takođe, propisi u pojedinim zemljama ograničavaju nivo SGE – korišćenjem ove tehnike se može postići zahtevani nivo SGE

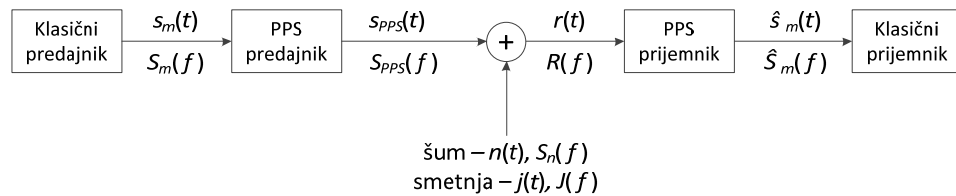
4. Precizna lokalizacija

- Lokalizacija (određivanje rastojanja) često se vrši merenjem vremena propagacije signala (brzina propagacije se zna)
 - Neodređenost merenja vremena propagacije Δt je obrnuto srazmerna širini spektra signala B

$$\Delta t \sim \frac{1}{B}$$

- Što je spektar signala širi, merenje vremena propagacije je tačnije

Princip rada PPS sistema



- Klasični predajnik emituje modulirani signal $s_m(t)$
 - Širina spektra emitovanog signala je određena modulacionim postupkom
- U PPS predajniku se vrši proširenje spektra signala korišćenjem operacije $E_{PPS}\{\}$:

$$S_{PPS}(f) = E_{PPS}\{S_m(f)\}$$

- Izvođenje operacije $E_{PPS}\{\}$ diktira generator pseudoslučajne sekvence, koji je sadržan u PPS predajniku
- Smatraćemo da je operacija $E\{\}$ linearna, i inverzna samoj sebi:

$$E_{PPS}\{E_{PPS}\{\}\} = 1$$

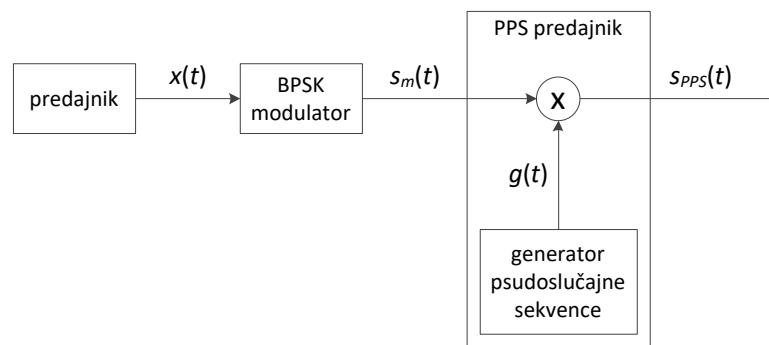
- Signalu u proširenom spektru se tokom prenosa superponiraju šum $n(t)$ i smetnja $j(t)$
- Na prijemu se prvo vrši skupljanje spektra primljenog signala $r(t)$
- Za skupljanje spektra PPS prijemnik koristi istu operaciju $E_{PPS}\{\}$
 - PPS prijemnik takođe sadrži generator pseudoslučajne sekvence, koji mora biti u sinhronizmu sa generatorom na predajnoj strani

$$\hat{S}_m(f) = E_{PPS}\{R(f)\}$$

- Nakon skupljanja spektra, klasični prijemnik vrši izdvajanje prvobitnog modulisanog signala
- Postoji nekoliko načina realizacije prenosa u proširenom spektru:
 - Direktna sekvenc
 - Frekvencijsko skakanje
 - Vremensko skakanje
 - Kombinovane tehnike

PRENOS U PROŠIRENOM SPEKTRU KORIŠĆENJEM DIREKTNE SEKVENCE

- Ovaj tip prenosa se na engleskom naziva *Direct Sequence Spread Spectrum* (DS-SS)
- U slučaju PPS sistema sa direktnom sekvencom, proširenje spektra se vrši nad BPSK moduliranim signalom
- Blok šema predajnika



- Predajnik emituje binarni polarni NRZ signal $x(t)$, čije su amplitude ± 1
 - $x(t)$ je modulišući signal osnovnom opsegu

- BPSK modulator emituje modulisani signal

$$s_m(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi(t))$$

gde je: $\phi(t) \in \{0, \pi\}$

- Važi:

$x(t)$	$\phi(t)$
-1	π
+1	0

- Stoga sledi:

$$s_m(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi(t)) = A x(t) \cos(\omega_0 t)$$

- Direktna sekvenca $g(t)$ je pseudoslučajni signal u osnovnom opsegu, koji množi BPSK modulisani signal

- $g(t)$ je takođe binarni polarni NRZ signal, čije su amplitude ± 1

- Dobija se:

$$s_{PPS}(t) = A x(t) g(t) \cos(\omega_0 t) = A \cos(\omega_0 t + \phi(t) + \xi(t))$$

gde je:

$g(t)$	$\xi(t)$
-1	π
+1	0

- Brzina emitovanja impulsa signala $g(t)$ je mnogo veća od brzine signaliziranja $x(t)$

- Impulsi signala $g(t)$ nazivaju se čipovi
- Brzina emitovanja impulsa signala $g(t)$ se naziva brzina čipa i označava sa v_c
- Važi:

$$v_c \gg v_s$$

Procesno pojačanje

- Generalno, širina spektra signala je srazmerna brzini emitovanja simbola
 - Širina spektra BPSK signala $s_m(t)$ je:
$$B_m \approx 2v_s$$
 - Sa obzirom da je $v_c \gg v_s$, širina spektra signala u proširenom spektru $s_{PPS}(t)$ srazmerna je v_c
 - Važi:

$$B_{PPS} \approx 2v_c$$

- Odnos $G = \frac{B_{PPS}}{B_m}$ naziva se procesno pojačanje (ili faktor proširenja spektra)
- Kod PPS sistema sa direktnom sekvencom važi:

$$G = \frac{B_{PPS}}{B_m} = \frac{v_c}{v_s}$$

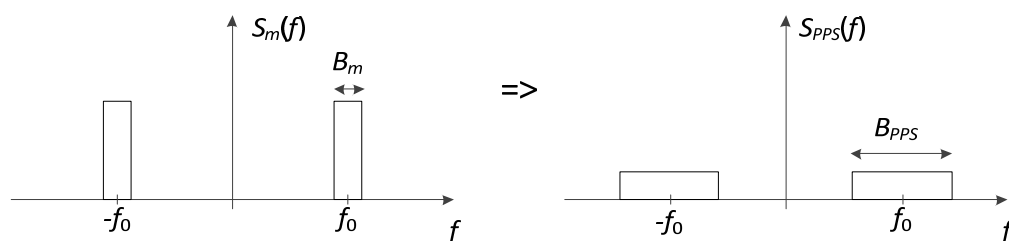
- Procesno pojačanje se još izražava u decibelima:

$$\gamma = 10 \log G$$

- Obično je γ u rasponu 20 – 60 dB

Spektri signala

- Spektri BPSK i PPS signala se mogu aproksimirati sa:



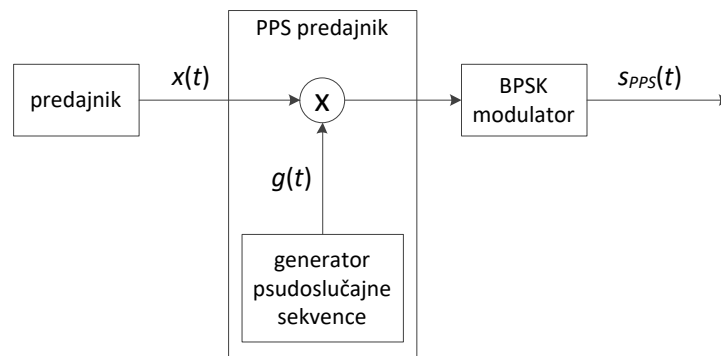
- Pošto operacija širenja spektra ne menja snagu signala, površine ispod krivih $S_m(f)$ i $S_{PPS}(f)$ su iste

Alternativna realizacija predajnika

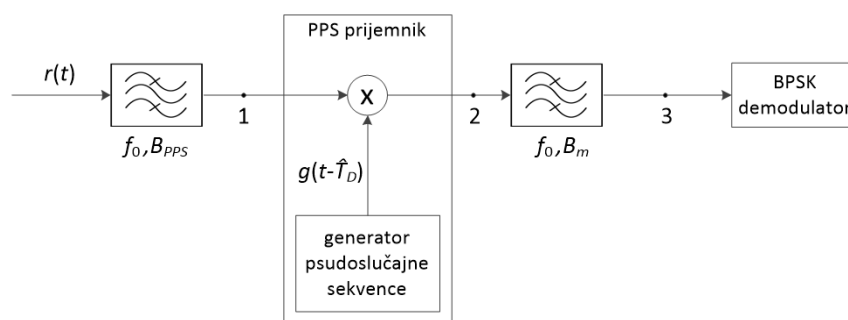
- S' obzirom da je:

$$s_{PPS}(t) = A x(t)g(t)\cos(\omega_0 t)$$

predajnik se može realizovati na sledeći način:



Blok šema predajnika



- Posmatraćemo prvo slučaj kada je signal na prijemu $r(t)$ jednak samo (zakašnjenom) poslatom signalu $s_{PPS}(t - T_D)$
 - Uticaj šuma i smetnje se zanemaruje
 - Kašnjenje T_D je posledica propagacije

- Dobija se:

$$s_1(t) = r(t) = s_{PPS}(t - T_D) = A x(t - T_D) g(t - T_D) \cos(\omega_0(t - T_D))$$

$$s_2(t) = s_1(t) g(t - \hat{T}_D) = A x(t - T_D) g(t - T_D) g(t - \hat{T}_D) \cos(\omega_0(t - T_D))$$

- Ukoliko je:

$$\hat{T}_D = T_D$$

tj. ako je ostvarana idealna sinhronizacija između predajnika i prijemnika, dobija se:

$$s_2(t) = A x(t - T_D) g^2(t - T_D) \cos(\omega_0(t - T_D))$$

pošto je:

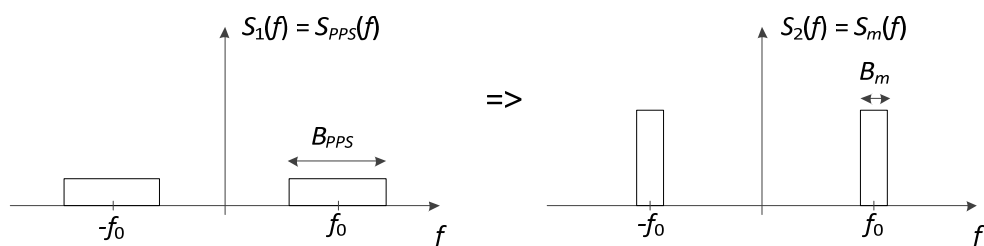
$$g^2(t - T_D) = 1$$

sledi:

$$s_2(t) = A x(t - T_D) \cos(\omega_0(t - T_D)) = s_m(t - T_D)$$

tj. dobija se BPSK modulirani signal

- Spektri signala na prijemu su:



- U slučaju da je $\hat{T}_D \neq T_D$, spektar signala $s_2(t)$ ostaje proširen
 - Nije moguće izvršiti demodulaciju!

Uticaj šuma na prijemu

- Pretpostavićemo da je:
 - Signal na prijemu zbir signala u proširenom spektru i belog Gausovog šuma
 - Da je kašnjenje signala usled propagacije zanemarljivo
- Važi:

$$r(t) = s_{PPS}(t) + n(t) = A x(t)g(t)\cos(\omega_0 t) + n(t)$$

- Pojasni filter na ulazu u PPS prijemnik ograničava snagu šuma, a propušta signal u proširenom spektru:

$$s_1(t) = s_{PPS}(t) + n_1(t)$$

- $n_1(t)$ je obojeni Gausov šum, čiji je spektar centriran na f_0 , a širina spektra jednaka B_{PPS}
- U sledećem koraku se vrši množenje sa pseudoslučajnom signalom $g(t)$:

$$\begin{aligned} s_2(t) &= s_1(t)g(t) = A x(t)g^2(t)\cos(\omega_0 t) + n_1(t)g(t) \\ &= A x(t)\cos(\omega_0 t) + n_1(t)g(t) = s_m(t) + n_2(t) \end{aligned}$$

- $n_2(t)$ je takođe obojeni Gausov šum čiji je spektar centriran na f_0 , a širina spektra jednaka B_{PPS}
 - Množenjem $n_1(t)$ i $g(t)$ neće se ni proširiti spektar niti skupiti spektar $n_1(t)$
 - Snage $n_1(t)$ i $n_2(t)$ su jednake i iznose:

$$P_{n_1} = P_{n_2} = 2 \frac{N_0}{2} B_{PPS} = N_0 B_{PPS}$$

- Nakon skupljanja spektra, vrši se dodatno filtriranje pojasnim filtrom, pre nego što se izvrši BPSK demodulacija:

$$s_3(t) = s_m(t) + n_3(t)$$

- $n_3(t)$ je obojeni Gausov šum, čiji je spektar centriran na f_0 , a širina spektra jednaka B_m
 - Snaga $n_3(t)$ je:

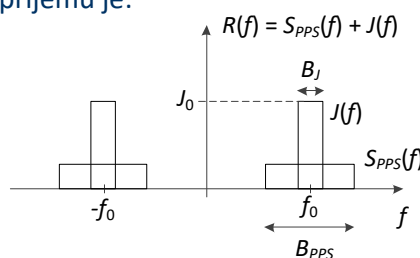
$$P_{n_3} = 2 \frac{N_0}{2} B_m = N_0 B_m = \frac{P_{n_2}}{G}$$

- Vidi se da pojasni filter pre ulaska u BPSK demodulator smanjuje snagu šuma G puta
- Drugim rečima, na snagu šuma u prijemniku ne utiče PPS sklop, već samo pojasni filteri!
- Teorijski posmatrano, moguće je zameniti redosled PPS i BPSK demodulatora u prijemniku
 - Međutim, u praksi se zahteva da se prvo izvrši PPS demodulacija, a zatim BPSK demodulacija
 - Razlog ovome je činjenica da BPSK demodulator zahteva da odnos signal-šum na njegovom ulazu bude bar 3 dB
 - Odnos signal-šum na ulazu u prijemnik (pre PPS demodulacije) je ≤ -15 dB
 - Stoga je potrebno prvo skupiti spektar signala i izvršiti dodatno pojasno filtriranje, da bi se smanjila snaga šuma i tako obezbedio odnos signal-šum zahtevan za uspešnu BPSK demodulaciju

Uticao uskopojasne smetnje na prijemu

- Pretpostavićemo da je:
 - Signal na prijemu zbir signala u proširenom spektru i uskopojasne smetnje
 - Da je kašnjenje signala usled propagacije zanemarljivo
- Važi:

$$r(t) = s_{PPS}(t) + j(t) = A x(t)g(t)\cos(\omega_0 t) + j(t)$$
- Spektar signala na prijemu je:



- Odnos snaga signala i smetnje na ulazu u prijemnik je $\left(\frac{S}{J}\right)_{ul} = \frac{P_{SPPS}}{P_J}$

- Signal $r(t)$ prolazi kroz pojasni filter na ulazu u prijemnik neizmenjen:

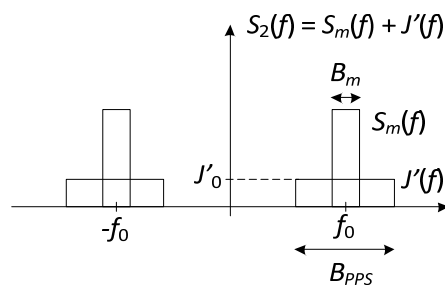
$$s_1(t) = r(t)$$

- U sledećem koraku se vrši množenje sa pseudoslučajnom signalom $g(t)$:

$$\begin{aligned} s_2(t) &= s_1(t)g(t) = A x(t)g^2(t)\cos(\omega_0 t) + j(t)g(t) \\ &= A x(t)\cos(\omega_0 t) + j'(t) = s_m(t) + j'(t) \end{aligned}$$

- Množenjem sa $g(t)$, uskopojasna smetnja $j(t)$ postaje širokopojasna smetnja $j'(t)$
 - PPS prijemnik proširuje spektar $j(t)$, na isti način kako je PPS predajnik proširio spektar $s_m(t)$
- PPS prijemnik ne menja ukupnu snagu ni signala ni smetnje, već samo širine i nivoe SGSS
 - Odnos snage signala i smetnje ostaje nepromenjen

- Spektar signala $s_2(t)$ je:



- Važi:

$$P_J = 2J_0 B_J = P_{J'} = 2J'_0 B_{PPS}$$

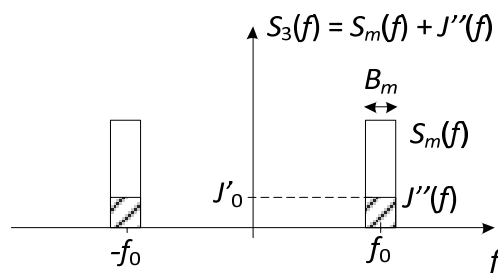
- pa je:

$$\begin{aligned} J_0 B_J &= J'_0 B_{PPS} \\ J'_0 &= J_0 \frac{B_J}{B_{PPS}} \end{aligned}$$

- U sledećem koraku signal $s_2(t)$ se dodatno filtrira pojasnim filtrom, pre nego što se izvrši BPSK demodulacija:

$$s_3(t) = s_m(t) + j''(t)$$

- Smetnja $j''(t)$ je uskopojasna smetnja dobijena filtriranjem širokopojasne smetnje $j'(t)$
- Spektar signala $s_3(t)$ je:



- Snaga smetnje $j''(t)$ je:

$$P_{J''} = 2J'_0 B_m = 2J_0 \frac{B_J}{B_{PPS}} B_m = P_J \frac{B_m}{B_{PPS}} = \frac{P_J}{G}$$

- Odnos snage signala i smetnja u tački 3 je:

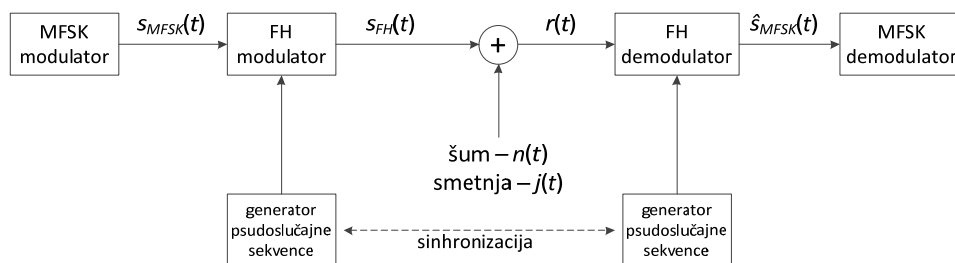
$$\left(\frac{S}{J}\right)_3 = \frac{P_{S_m}}{P_{J''}} = \frac{P_{S_{PPS}}}{\frac{P_J}{G}} = G \left(\frac{S}{J}\right)_{ul}$$

- Drugim rečima, snaga smetnje je smanjena G puta, a odnos snage signala i smetnje je povećan G puta
- Posmatrano u decibelima je:

$$SJR_3 = SJR_{ul} + \gamma$$

FREKVENCIJSKO SKAKANJE

- Ova tehnika za prenos u proširenom spektru naziva se *Frequency Hopping* (FH)
- Frekvencijsko skakanje se kombinuje sa MFSK modulacijom
- Blok šema predajnika:



- MFSK modulator emituje modulisani signal, čije su noseće učestanosti iz skupa od M učestanosti
 - Centralna učestanost (aritmetička sredina nosećih učestanosti) MFSK modulatora je f_c
- Rad FH modulatora diktira generator pseudoslučajne sekvence
 - Svako stanje generatora određuje novu centralnu učestanost FH modulatora, na koju se pomera (skače) centralna učestanost MFSK signala
 - Po analogiji sa DS-SS sistemom, stanja generatora nazivaju se čipovi
 - Učestanost takta generatora pseudoslučajne sekvence (brzina promene stanja generatora) određuje brzinu skakanja i naziva se brzina čipa v_c
- Ukoliko je $v_c > v_s$ (brzina čipa je veća od brzine signaliziranja) – frekvencijsko skakanje je brzo
 - Predajnik skače više puta po jednom simbolu
 - Trajanje simbola T je duže od trajanja čipa T_c
- Za $v_s > v_c$ frekvencijsko skakanje je sporo
 - Po jednom skoku se prenosi više simbola
 - Trajanje simbola T je duže od trajanja čipa T_c

- Procena širina spektra MFSK signala $s_m(t)$ je (pretpostavka je da je u pitanju nekoherentna modulacija):

$$B_m = \frac{M}{T}$$

- Procena širina spektra FH signala je:

$$B_{FH} = N_c \Delta f_c$$

gde je N_c broj stanja generatora

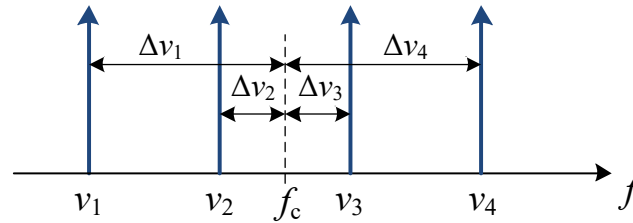
- Procesno pojačanje je:

$$G = \frac{B_{FH}}{B_m}$$

- Za razliku od DS-SS sistema, gde je spektar signala u proširenom spektru „stalno“ širine B_{PPS} , kod FH spektar signala „skače“ sa jedne centralne učestanosti na drugu, kako to diktira generator pseudoslučajne sekvence
 - FH signal „briše“ u vremenu širinu spektra B_{FH}

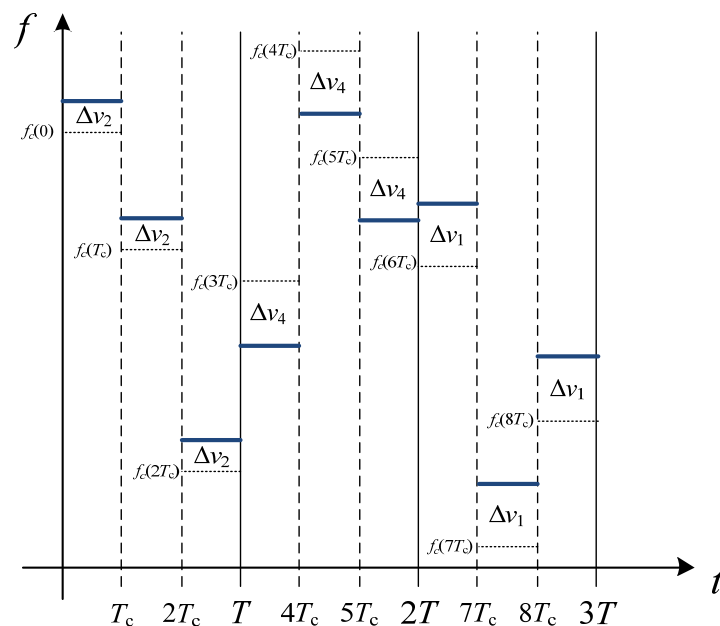
Primer brzog frekvencijskog skakanja

- Posmatra se 4FSK signal



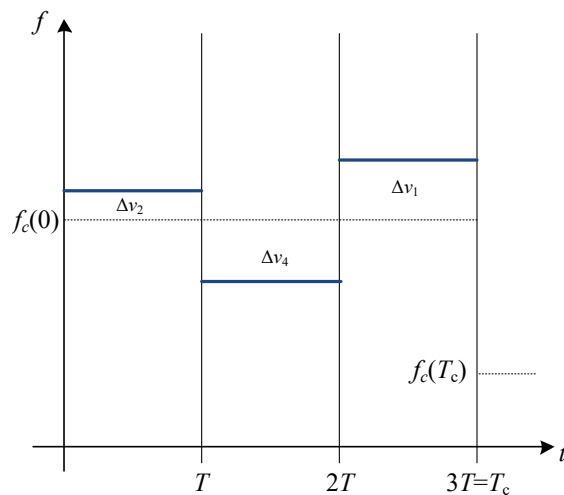
- Neka se prenosi informaciona sekvenca v_2, v_4, v_1
- Pretpostavimo da je $v_c = 3v_s$
 - broj skokova po simbolu je 3
- Prenos FH signala ćemo ilustrovati na dijagramu vreme-učestanost

- Tokom trajanja jednog simbola, trenutna noseća učestanost ima 3 vrednosti
- Trenutna noseća učestanost jednaka je zbiru trenutne centralne učestanosti i rastojanja između centralne učestanosti i učestanosti koju diktira MFSK modulator



Primer sporog frekvencijskog skakanja

- Posmatramo isti 4FSK signal
- Neka je broj simbola po skoku 3



- Brzo frekvencijsko skakanje se češće primenjuje u praksi nego sporo
- Na kraju, treba reći da se FH sistem može realizovati kao jedinstven (a ne dvostepeni) sklop, u kome se istovremeno vrši i MFSK modulacija frekvencijsko skakanje

KRAJ