

UNIVERZA V LJUBLJANI



FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Jernej Trnkoczy

PRENOS Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM

SEMINARSKA NALOGA PRI PREDMETU DIGITALNE KOMUNIKACIJE

Mentor: prof. dr. Sašo Tomažič

Ljubljana, Maj 2005

I. KAZALO

I. KAZALO.....	2
II. SLOVAR UPORABLJENIH KRATIC	4
1 UVOD	5
2 PREGLED NAČINOV SODOSTOPA DO PRENOSNEGA MEDIJA.....	8
2.1 Frekvenčni sodostop	8
2.2 Časovni sodostop.....	9
2.3 Kodni sodostop	10
3 TERETIČNA OBRAVNAVA SISTEMOV Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM	11
3.1 Princip razširjanja spektra in kodnega sodostopa	11
3.2 Teoretična obravnava kodnega sodostopa in lastnosti kod.....	13
3.2.1 Prvi člen.....	14
3.2.2 Drugi člen	15
3.2.3 Tretji člen.....	16
3.3 Vpliv zahtev na izbiro kode.....	16
3.3.1 Prva zahteva: pulzna avtokorelacijska funkcija.....	16
3.3.2 Druga zahteva: križno korelacijska funkcija kod enaka nič.....	17
3.3.3 Analiza zahtev	17
4 LASTNOSTI SISTEMOV CDMA IN PRENOSA Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM	20
5 NAČINI RAZŠIRJANJA SPEKTRA	22
5.1 Neposredno razširjanje z nizom.....	23
5.2 Frekvenčno skakanje	25
5.3 Časovno skakanje	27
5.4 Pulzno frekvenčna modulacija	29
6 PRIMERI UPORABE PRENOSA Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM	30
6.1 Uporaba razširjenega spektra v satelitskih prenosnih sistemih	30
6.1.1 Satelitski sistemi tipa VSAT	30

6.1.2	Širokopasvni satelitski sistemi.....	31
6.1.3	Moblini satelitski sistemi.....	31
6.1.4	Ozkopasovni LEO satelitski sistemi in GPS.....	31
6.2	Uporaba razširjenega spektra v mobilnih celičnih sistemih.....	31
6.3	Uporaba razširjenega spektra v brezžičnih zemeljskih omrežjih	32
7	ZAKLJUČEK.....	34
8	UPORABLJENA LITERATURA.....	35

II. SLOVAR UPORABLJENIH KRATIC

BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFHSS	Fast Frequency Hopping Spread Spectrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Fraquency Shift Keying
GEO	Geostationary Earth Orbit
GPS	Global Positioning Systems
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT 2000	International Mobile Telecommunications 2000
ISM	Industrial Scientific and Medical band
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit
NMT	Nordic Mobile Telephone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PCM	Pulse Code Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
SFHSS	Slow Frequency Hopping Spread Spectrum
SS	Spread Spectrum
SSMA	Spread Spectrum Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
THSS	Time Hopping Spread Spectrum
UMTS	Universal Mobile Telephone System
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
VSAT	Very Small Aperture Terminal

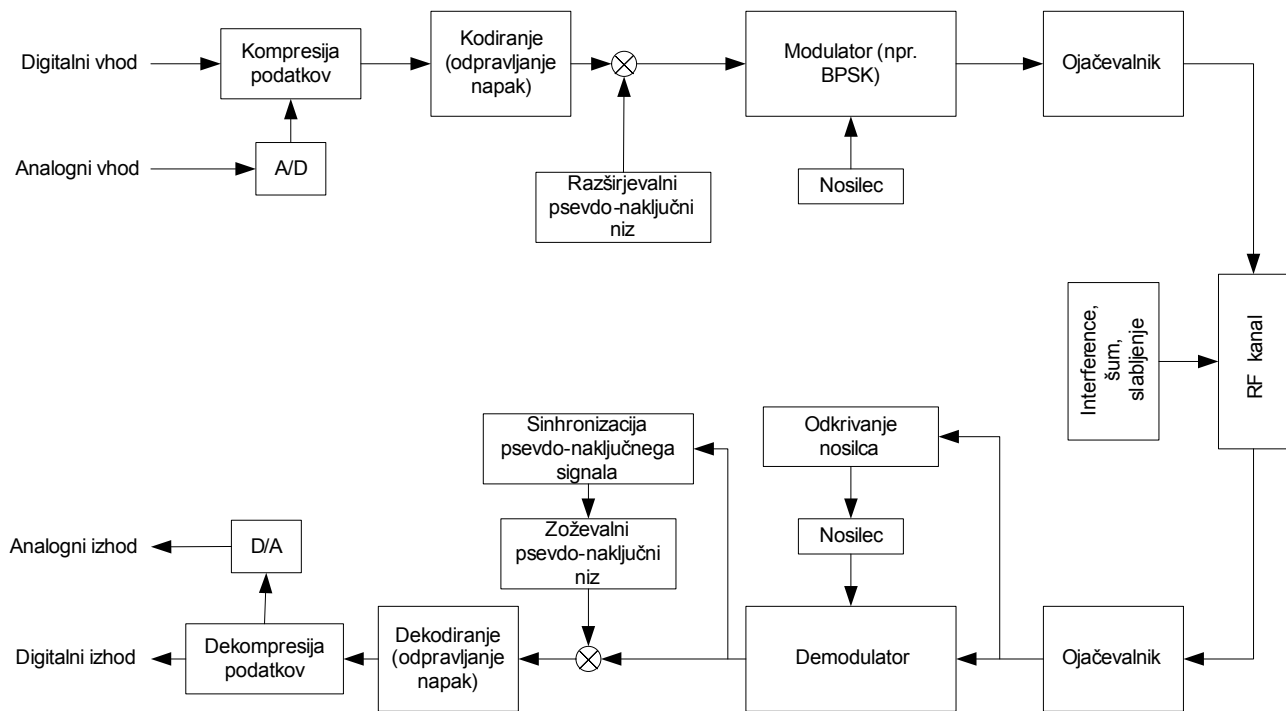
1 UVOD

V telekomunikacijskih sistemih, še posebej radijskih, je pasovna širina omejena dobrina in sistemi so načrtovani tako, da dosejajo čimvečji izkoristek. Pasovna širina potrebna za prenos analognega signala v primeru obojestranske amplitudne modulacije je dvakrat večja od pasovne širine izvirnega signala. V primeru frekvenčne modulacije, pasovna širina potrebna za prenos znaša nekajkratnik pasovne širine izvirnega signala, odvisna pa je od modulacijskega indeksa. V primeru prenosa digitalnega signala je potrebna prenosna širina v velikostnem razredu bitne hitrosti izvora. Odvisna je od tipa modulacije (BPSK, QPSK itn.).

Po definiciji prenosni sistem spada v družino sistemov z razširjenim spektrom, če **prenašani signal zavzema večjo pasovno širino, kot je to minimalno potrebno za prenos informacije in razširjanje spektra doseženo z signalom, ki je neodvisen od podatkovnega signala.** Definicija torej izključuje sisteme z frekvenčno modulacijo, pri katerih je pasovna širina prenašanega signala lahko precej večja kot pasovna širina izvirnega signala, vendar je odvisna od izvirnega signala.

V komunikacijskih sistemih z razširjenim spektrom (Spread Spectrum- SS) se torej pasovna širina izvirnega signala pred prenosom razširi, običajno za nekajkratni velikostni razred. V primeru da sistem uporablja en sam uporabnik, je izkoristek pasovne širine slab, če pa sistem uporablja veliko število uporabnikov, ki si delijo en in isti prenosni pas, pa sistem lahko postane spektralno učinkovit, pri tem pa obdrži prednosti prenosa z razširjenim spektrom. Takemu načinu sodostopa do zmogljivosti kanala pravimo **kodni sodostop** (CDMA- Code Division Multiple Access) oz. tudi skupinski sodostop z razširjenim spektrom (SSMA- Spread Spectrum Multiple Access). Kodni sodostop je torej tesno povezan z prenosom z razširjenim spektrom.

Strukturo tipičnega sistema z razširjenim spektrom ponazarja Slika 1. Izvor podatkov je lahko analogen ali digitalen. V primeru da je analogen, moramo analogni signal najprej digitalizirati z neke vrste analogno/digitalno (PCM, delta-modulation itn.) pretvorbo. Sledi kompresija podatkov, ki odstrani informacijsko redundanco digitalnega izvora, nato kodiranje v namene odkrivanja in odpravljanja napak, razširjanje do željene pasovne širine in modulacija, ki premakne razširjeni spekter na ustrezni frekvenčni pas primeren za prenos. Modulirani signal nato še ojačamo in pošljemo na prenosni kanal. Na prenosnem kanalu se koristnemu signalu prištejejo motnje in šum, signal se na prenosni poti oslabi, zaradi odbojev pa pride tudi do razširjanja po večih prenosnih poteh. Na sprejemni strani poteka obraten postopek, torej: demodulacija, zožanje spektra, dekodiranje (zaznavanje in odpravljanje napak), dekompresija, v primeru analognega izvirnega signala pa še digitalno-analogni pretvorba. Od običajnih ozkopasovnih sistemov se torej sistemi z razširjenim spektrom razlikuje v glavnem le po elementu za razširjanje/zožanje spektra.



Slika 1: Oddajno-sprejemna veriga tipičnega sistema z razširjenim spektrom.

Razširjanje minimalne, za prenos potrebne pasovne širine, doseženo z pomočjo psevdo-naključnega niza, ki mu pravimo tudi razširjevalna koda. Glede na to, na kakšen način uporabimo razširjevalno kodo, ločimo tri osnovne načine razširjanja spektra:

1. Neposredno razširjanje z nizom (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum)
2. Frekvenčno skakanje (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum)
3. Časovno skakanje (THSS – Time Hopping Spread spectrum)

Pri **neposrednem razširjanju z nizom** dosežemo razširitev spektra signala tako, da digitalni podatkovni signal množimo (operacija EXOR) s psevdonaključnim nizom. Ker je frekvenčni pas psevdo-naključnega niza (oz. kode) bistveno širši od frekvenčnega pasu podatkovnega signala, pride pri tem do frekvenčne razširitve. Postopek je linearen in je načelno enak amplitudni modulaciji. Predstavljamo si lahko, da s podatkovnim signalom amplitudno moduliramo kodo.

Pri **frekvenčnem skakanju** dosežemo razširitev spektra s skakanjem visokofrekvenčnega nosilca po različnih frekvencah znotraj določenih frekvenčnih pasov. Širša kot je skupna širina uporabljenih frekvenčnih pasov, večjo razširitev dobimo. Skakanje po različnih frekvencah je določeno z psevdo-naključnim nizom. Pri tem v resnici velja, da je komunikacija v vsakem posameznem trenutku ozkopasovna, če pa opazujemo spekter preko daljšega časovnega intervala pa opazimo, da je razširjen.

Pri **časovnem skakanju** uporabnikov signal skače po različnih časovnih rezinah, ki se nahajajo znotraj časovnih okvirjev. V osnovi gre za poseben način časovnega sodostopa,

pri katerem položaj časovne rezine v ovirju ni stalen, ampak se psevdo-naključno spreminja glede na kodo. Bloki podatkovnih bitov se torej prenašajo ob psevdo-naključno izbranih časovnih intervalih (rezinah) znotraj okvirja, ki ga ponavadi sestavlja veliko število časovnih rezin.

Iz povedanega lahko torej zaključimo, **da je torej psevdo-naključni niz oz. koda ključen element sistemov z razširjenim spektrom**. Obstajajo pa tudi izjeme (glej poglavje 5.4).

Omenili smo že, da je sistem, ki uporablja prenos z razširjenim spektrom lahko spektralno učinkovit le v primeru večih uporabnikov. Kadar si zmogljivosti nekega sistema deli več uporabnikov, temu pravimo sistem z sodostopom. V primeru sistema z razširjenim spektrom sodostopu večih uporabnikov pravimo kodni sodostop. Vsak uporabnik uporablja celotni frekvenčni pas, ki je na voljo, uporabnike pa sistem loči z pomočjo kod. Vsak uporabnik ima namreč dodeljeno svojo karakteristično kodo in če so le te med saboj nekorelirane lahko sprejemnik signale ostalih uporabnikov izloči. Žal popolnoma idealne kode ne obstajajo (glej poglavje 3.3), zato v realnih sistemih predstavljajo interference ostalih uporabnikov sistema glavno omejitev kapacitete takšnega sistema. Povedano z drugimi besedami: sistema sočasno ne more uporabljati neomejeno število uporabnikov, saj je sistem interferenčno omejen.

Kodni sodostop je očitno tesno povezan z prenosom z razširjenim spektrom, zato bom posebno poglavje seminarske naloge (poglavje 2) posvetil opisu različnih načinov sodostopa. Razdelitev seminarskega dela bo torej sledeča: V drugem poglavju bom opisal osnovne načine sodostopa do prenosnih zmogljivosti. V tretjem poglavju bom na matematični način predstavil posplošen model kodnega sodostopa, ki na poenoten način podaja frekvenčni, časovni in kodni sodostop. Obravnava bo potekala na primeru neposrednega razširjanja z nizom, saj je v tem primeru najenostavnejša. Pojasnil bom, da sta frekvenčni in časovni sodostopa le posebna primera posplošenega kodnega sodostopa, saj ju lahko ponazorimo z ustreznima naboroma kod. V poglavju 4 bom opisal glavne lastnosti prenosa z razširjenim spektrom in CDMA sistemov. Sledilo bo poglavje, ki bo podrobneje opisalo osnovne načine razširjanja spektra (poglavje 5), pregled najznačilnejših primerov uporabe prenosa z razširjenim spektrom (poglavje 6), ter na koncu še zaključno poglavje.

2 PREGLED NAČINOV SODOSTOPA DO PRENOSNEGA MEDIJA

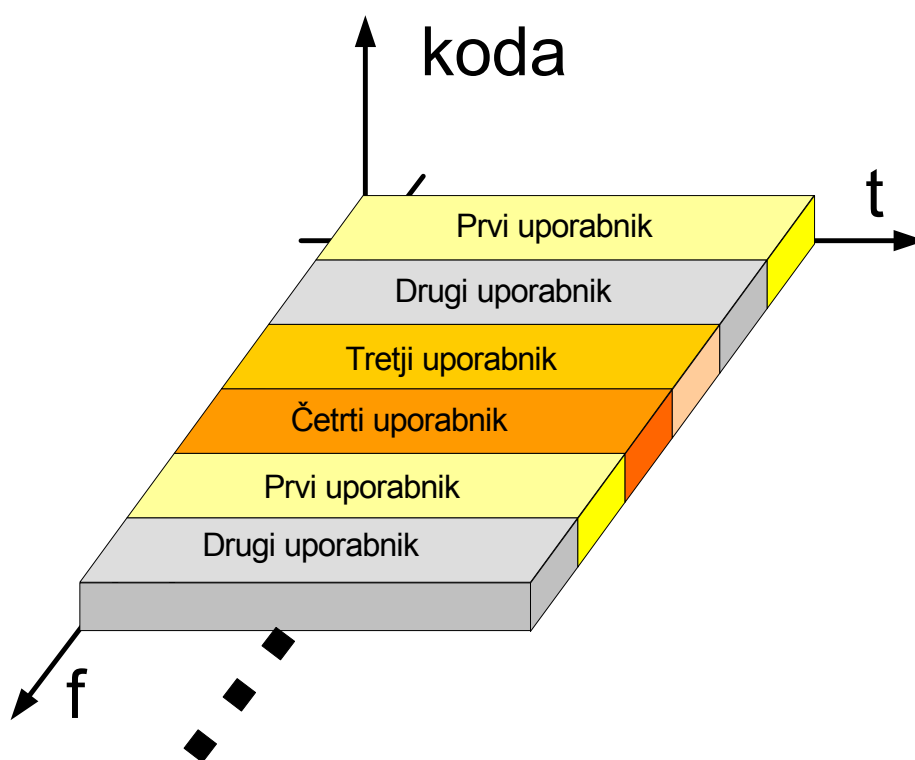
V telekomunikacijskih sistemih, kjer dostop do prenosnega kanala navadno zahteva več uporabnikov hkrati, je potrebno zagotoviti ustrezen način sodostopa uporabniko do skupnih prenosnih zmogljivosti. Glede na naravo prometa, ki ga generirajo uporabniki in glede na lastnosti zveze oz. prenosnega medija, je bilo razvitih več načinov sodostopa. Posamezen način doseže optimalno izkoriščenost prenosnih kapacitet pri točno določeni specifični naravi prometa in lastnostih zveze, zato v danem primeru ni smotno uporabiti kateregakoli od obstoječih načinov.

V osnovi delimo način sodostopa na sodostop z zaseganjem kanala in sodostop z delitvijo zmogljivosti. V primeru **sodostopa z zaseganjem kanala** uporabnik za nek čas zaseže medij v celoti. Uporabniki do prenosnega medija želijo dostopati naključno, brez reda, kar povzroča trke (kolizije) uporabniških sporočil, ki jih je potrebno z ustreznimi mehanizmi razrešiti. Takšen način sodostopa predstavlja težavno zagotavljanje kvalitete storitev in slabo izkoriščenost prenosnega medija v primeru velikih obremenitev omrežja. Značilen primer sodostopa z zaseganjem kanala je protokol ALOHA. Pri **sodostopu z delitvijo zmogljivosti** se v nasprotju z zgoraj omenjenim principom kapaciteta prenosnega medija razdeli na več delov oz. kanalov, kar omogoča sočasno (oz. v primeru sistemov z časovnim sodostopom vsaj navidezno sočasno) komunikacijo večih uporabnikov. Do kolizij v takem primeru ne prihaja, saj je določen kanal v nekem trenutku dodeljen eni sami zvezi.

V tem seminarskem delu različnih izvedenki sodostopa z zaseganjem kanala ne bom predstavil. Predstavil pa bom različne načine sodostopa z delitvijo zmogljivosti. Osnovna klasifikacija te vrste sodostopov je delitev na **frekvenčni sodostop** (FDMA- Frequency Division Multiple Access), **časovni sodostop** (TDMA -Time Division Multiple Access) in **kodni sodostop** (CDMA- Code Division Multiple Access), čeprav lahko TDMA in FDMA načina smatramo le kot posebna primera splošnega modela kodnega sodostopa (glej poglavje 3.3.3). Pogosta je tudi uporaba kombinacije omenjenih načinov sodostopa. Značilen primer kombinacije dveh načinov najdemo v radijskem delu mobilnega sistema GSM (Global System for Mobile Communications), kjer se uporablja kombinacija časovnega in frekvenčnega sodostopa.

2.1 Frekvenčni sodostop

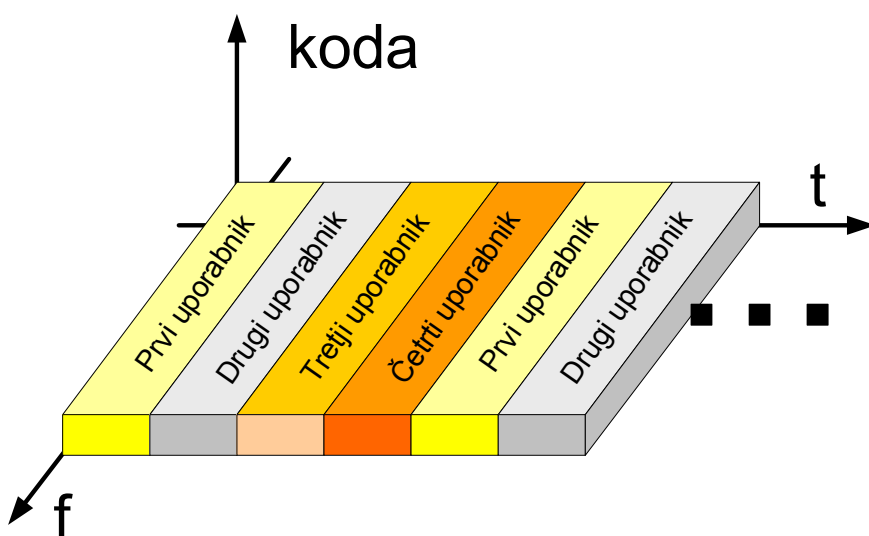
V primeru frekvenčnega sodostopa (Slika 2) so kanali različnih uporabnikov ločeni po frekvenčnih pasovih. Vsakemu uporabniku je dodeljen svoj frekvenčni pas za ves čas trajanja zveze. Kanali oz. frekvenčni pasovi se frekvenčno ne prekrivajo. Tak način sodostopa se naprimer uporablja v starejših satelitskih prenosnih sistemih in v analognem mobilnem sistemu NMT (Nordic Mobile Telephone).



Slika 2: Frekvenčni sodostop, pri katerem so posameznim uporabnikom dodeljeni posamzni ločeni frekvenčni pasovi.

2.2 Časovni sodostop

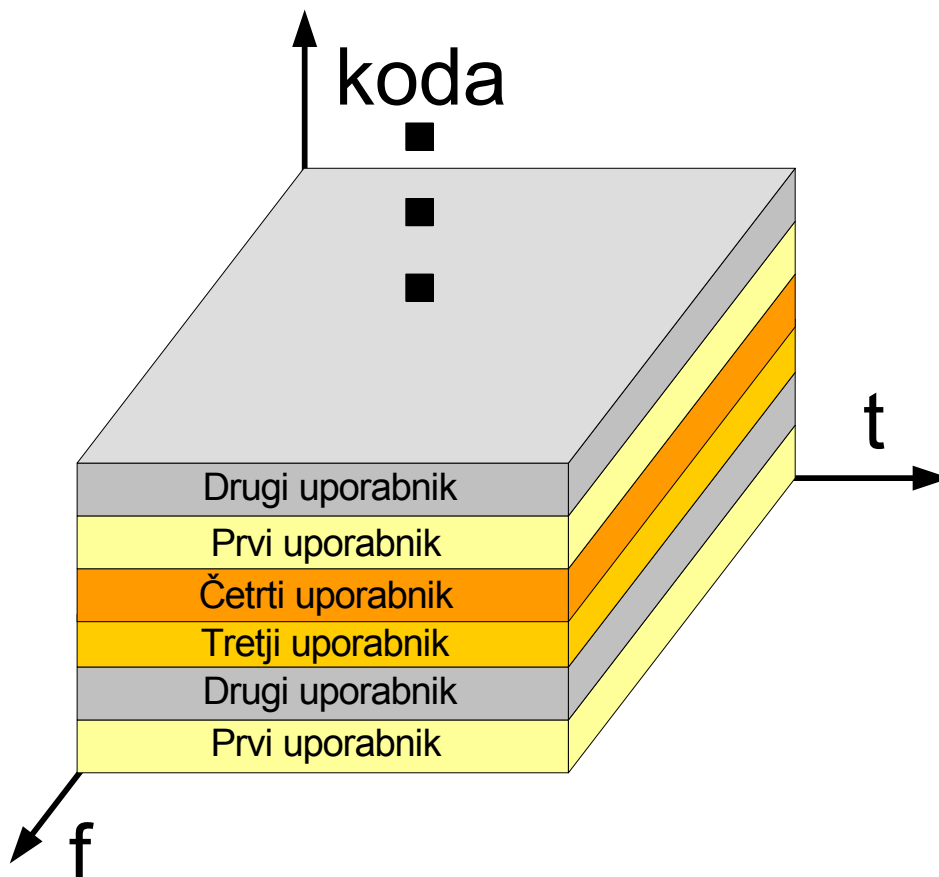
V primeru časovnega sodostopa (Slika 3) so signali različnih uporabnikov ločeni časovno. Vsakemu uporabniku je dodeljen nek časovni interval, v katerem je celoten frekvenčni pas na razpolago le njemu. Časovni intervali dodeljeni določenemu uporabniku se periodično ponavljajo. Signali različnih uporabnikov so časovno neprekrivajoči.



Slika 3: Časovni sodostop pri kateremu so posameznim uporabnikom dodeljene časovne rezine.

2.3 Kodni sodostop

V primeru kodnega sodostopa (Slika 4) so signali različnih uporabnikov ločeni z različnimi kodami. Vsi aktivni uporabniki sočano oddajajo v celotnem frekvenčnem pasu. Kode, ki pripadajo posameznim uporabnikom so izbrane tako, da se uporabniki med seboj ne motijo oziroma se motijo čimmanj. Kodni sodostop se naprimer uporablja v mobilnem sistemu UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).



Slika 4: Kodni sodostop pri katerem so podamezni uporabniki ločeni z različnimi kodami.

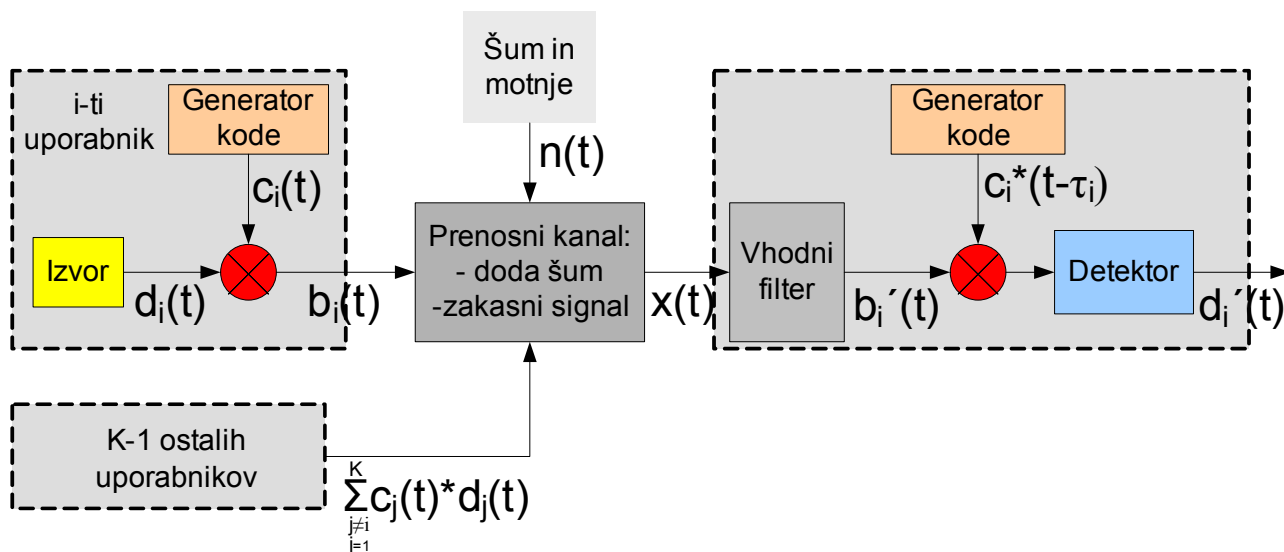
3 TERETIČNA OBRAVNAVA SISTEMOV Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM

V tem poglavju bom na teoretični izpeljavi prikazal mehanizem razširjanja spektra in značilnosti kodnega sodostopa. Kadar bom v tem poglavju omenjal razširjanje spektra, bom z tem mislil na neposredno razširjanje z nizom. Na tem načinu je namreč najlažje teoretično obravnavati principe razširjanja in kodnega sodostopa. Ostale načine razširjanja spektra bom opisal v poglavju 5.

Najprej bom na matematični način predstavil princip razširjanja spektra. Sledila bo obravnavo kodnega sodostopa in lastnosti, ki jih morajo izpolnjevati kode, da je sistem učinkovit. Pokazal bom tudi, da sta frekvenčni in časovni sodostop le posebna primera kodnega sodostopa, zato lahko govorimo o posplošenem modelu kodnega sodostopa.

3.1 Princip razširjanja spektra in kodnega sodostopa

Princip bo predstavljen na primeru neposrednega razširjanja z nizom. Neposredno razširjanje z nizom je pravzaprav postopek linearnega kodiranja (Slika 5). Uporabnikov signal se na oddajni strani kodira (EXOR operacija med podatkovnim signalom in kodo), nato skupaj z signali ostalih uporabnikov prenese preko skupnega prenosnega kanala in na sprejemni strani dekodira (ponovno množi z isto kodo). Kode različnih uporabnikov so različne, kar omogoča ločevanje »mešanice« sprejetih signalov na sprejemni strani. Ločevanje pa je možno samo v primeru, da kode izpolnjujejo določene pogoje.



Slika 5: Shema prenosnega sistema z neposrednim razširjanjem z nizom

V nadaljevanju bomo zaradi enostavnejše razlage predpostavili določene poenostavitve v sistemu:

1. Podatkovni $[d_i(n)]$ in kodirni $[c_i(n)]$ signal sta oba časovno diskretna signala, zapisal ju bomo v obliki nizov. Indeks i nam predstavlja posameznega uporabnika.

2. Čas trajanja simbola podatkovnega signala (T_d) naj bo enak periodi kode ($N \cdot T_c$). T_c je trajanje simbola kodirnega signala. Privzamemo tudi, da je $N \gg 1$, kar pomeni, da bo frekvenčni spekter kode mnogo širši od frekvenčnega spektra uporabniškega signala.

3. Kode naj bodo normirane, kar pomeni, da je njihova moč enaka enoti:

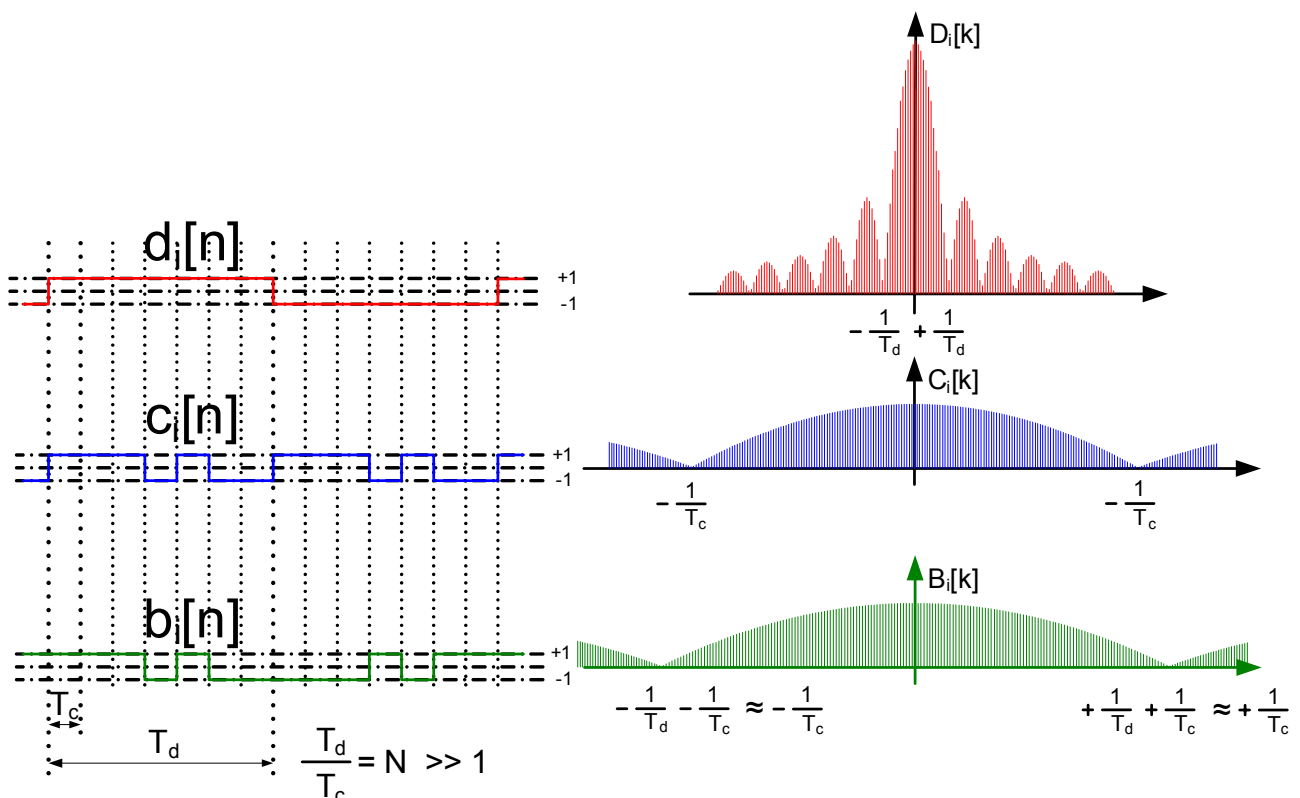
$$P_c = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |c_i[n]|^2 = 1, \quad 1 \leq i \leq K$$

4. Pri obravnavi ne upoštevamo širjenja signala po večjih poteh in drugih pojavov v kanalu. Predpostavimo, da prenosni kanal signal uporabnika le zakasni za nek čas $\tau_i \cdot T_c$

5. Moč podatkovnih signalov (signalov $d_i(t)$; $i=1 \dots K$) posameznih uporabnikov naj bo za vse signale enaka.

6. Obravnava bo potekala v osnovnem pasu. Na izhodu iz oddajnika v resnici nimamo signala $b_i(t)$ temveč visokofrekvenčni signal nosilne frekvence f_c , ki je rezultat modulacije z nosilcem f_c .

Uporabnik i generira časovno diskretni signal $d_i[n]$ z časom trajanja simbola T_d . Ta signal kodiramo tako, da ga množimo z kodirnim signalom $c_i[n]$, ki je periodičen, perioda pa je enaka trajanju simbola podatkovnega signala, torej T_d . Čas trajanja simbola kodirnega signala naj bo T_c . Rezultat množenja je niz $b_i[n] = d_i[n] \cdot c_i[n]$.



Slika 6: Princip razširjanja spektra z množenjem uporabniškega signala z kodirnim signalom.

Če si ogledamo spektre omenjenih signalov ugotovimo, da je pasovna širina signala $b_i[n]$ enaka vsoti pasovnih širin signalov $d_i[n]$ in $c_i[n]$. To je posledica dejstva, da produkt signalov v časovnem prostoru pomeni konvolucijo njunih spektrov v frekvenčnem prostoru.

Ob predpostavki, da je $T_d/T_c = N \gg 1$ je frekvenčni spekter kodirnega signala mnogo širši od frekvenčnega spektra uporabniškega signala. Tako lahko napravimo poenostavitev in rečemo, da je širina spektra signala po kodiranju (signala $b_i[n]$) približno enaka širini spektra kodirnega signala. Definiramo lahko faktor razširitve signala G_p , ki mu pravimo tudi dobitok procesa razširjanja:

$$G_p = \frac{B_b}{B_d} \approx \frac{T_d}{T_c} = N$$

Slika 6 nam prikazuje princip razširjanja spektra z pomočjo direktnega razširjanja z nizom. Prikazana je razširitev spektra signalov in zmanjšanje amplitude močnostnega spektra, saj mora ploščina (energija signala) pod ovojnico spektra pred razširjanjem in po razširjanju ostati nespremenjena. To je tudi eden od razlogov, zaradi katerega se je prenos z razširjenim spektrom sprva uporabljal v vojaške namene, saj je na ta način možno prikriti obstoj komunikacije (prenos je podoben šumu).

3.2 Teoretična obravnava kodnega sodostopa in lastnosti kod

Na Slika 5 vidimo, da se v prenosnem kanalu kodiranemu signalu i -tega uporabnika prištejejo tudi kodirani signali ostalih $K-1$ uporabnikov. Poleg tega se signalu prištevajo tudi različne motnje in šum. Ob zgornjih poenostavitvah (poenostavitve 1...5) lahko zapišemo signal, ki ga dobimo na sprejemni strani kot:

$$b_i'[n] = d_i[n - \tau_i] * c_i[n - \tau_i] + \sum_{j \neq i} d_j[n - \tau_j] * c_j[n - \tau_j] + s[n]$$

Kodirani uporabniški signal i -tega uporabnika je torej zakasnjjen za τ_i , medtem ko so motilni signali ostalih uporabnikov zakasnjjeni za različne čase τ_j . Člen $s[n]$ nam predstavlja šum in motnje, ki jih z vhodnim filtrom ni možno izločiti, saj se nahajajo v frekvenčnem področju koristnega signala.

Nad signalom $b_i'[n]$ v sprejemniku nato poteka še postopek detekcije koristnega signala, to je postopek koreliranja (množenja) z enako kodo, kot je bila v oddajniku uporabljena za kodiranje (torej koda $c_i[n]$). Ker ta koda v začetku ni sinhronizirana z prihajajočim signalom zakasnitev označimo z τ_i' .

$$\begin{aligned} d_i'[n] &= \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} d_i[n - \tau_i] * c_i[n - \tau_i] * c_i^*[n - \tau_i'] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} \sum_{j \neq i} d_j[n - \tau_j] * c_j[n - \tau_j] * c_i^*[n - \tau_i'] \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} s[n] * c_i^*[n - \tau_i'] \end{aligned}$$

Gornja enačba je sestavljena iz treh členov. Željeni signal se nahaja le v prvem, zato želimo, da je pri postopku detekcije rezultat tega člena največji, ostala člena pa naj prispevata čimmanj. Na prispevke lahko vplivamo z primerno izbiro kod, z katerimi kodiramo naš signal, zato si v nadaljevanju podrobneje pogledjmo vsak člen posebej.

Še prej bom navedel definicije splošne korelacijske ter avtokorelacijske funkcije in lastnosti njihovih spektrov, saj jih bom potreboval pri nadaljni izpeljavi:

$$r_{x,y}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^*[n] * y[n + \tau] \dots \text{Splošna korelacijska funkcija}$$

$$r_{x,x}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^*[n] * x[n + \tau] \dots \text{Avtokorelacijska funkcija}$$

$$r_{x,y}(\tau) \rightarrow DFT \rightarrow R_{x,y}[k] = X^*[k]Y[k] \dots \text{Fourierov par}$$

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \dots \text{Spekter diskretnega signala}$$

3.2.1 Prvi člen

Sprejemnik je na začetku nesinhroniziran s sprejetim signalom. Zakasnitve za katero se je signal preko kanala zakasnil ne poznamo. Zakasnitve generatorja kode v sprejemniku τ_i' zato ne moremo nastaviti enako τ_i . Prav tako ne poznamo začetka korelacijskega intervala n_0 .

Želimo, da je prvi člen enak:

$$\text{prvi člen} = \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} d_i[n - \tau_i] * c_i[n - \tau_i] * c_i^*[n - \tau_i'] = \begin{cases} d_i[n - \tau_i] & \text{pri } \tau_i = \tau_i' \\ 0 & \text{pri } \tau_i \neq \tau_i' \end{cases}$$

V posebnem primeru, ko se podatkovni signal na intervalu korelacije ($n_0 \leq n \leq n_0 + N - 1$) ne spremeni lahko prvi člen zapišemo:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} d_i[n - \tau_i] * c_i[n - \tau_i] * c_i^*[n - \tau_i'] = d_i[n - \tau_i] * \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} c_i[n - \tau_i] * c_i^*[n - \tau_i']$$

Če uvedemo novi spremenljivki $\tau = \tau_i' - \tau_i$ in $m = n - \tau_i$, ter postavimo $n_0 = 0$ dobimo:

$$d_i[n - \tau_i] * \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} c_i^*[m] * c_i[m + \tau] = d_i[n - \tau_i] * r_{i,i}[\tau]$$

Če upoštevamo zgoraj navedeno željo potem mora veljati:

$$r_{i,i}[\tau] = \begin{cases} 1 & \text{pri } \tau = 0 \rightarrow \tau_i = \tau'_i \\ 0 & \text{pri } \tau \neq 0 \rightarrow \tau_i \neq \tau'_i \end{cases}$$

Zahteva pravi, da mora biti **avtokorelacijska funkcija zaradi potrebe po sinhronizaciji impulzna funkcija**. Korelator mora na izhodu dati impulz, ko je dosežena sinhronizacija z simbolno periodo, v ostalih časih pa mora biti izhod enak nič.

Pri izpeljavi zahteve smo predpostavili, da je podatkovni signal konstanten več simbolov zapored. Gornji pogoj je torej potreben, ne pa tudi zadosten pogoj za doseganje sinhronizacije. Vendar gornje predpostavke v praksi ni težko izpolniti. Za potrebe sinhronizacije lahko namreč na začetku komunikacije vstavimo zaporeden niz enakih podatkovnih simbolov. Ko sinhronizacijo enkrat dosežemo, pa nam od prvega člena ostane le željeni signal:

$$\text{prvi člen} = d_i[n - \tau_i]$$

3.2.2 Drugi člen

Drugi člen predstavlja prispevke, ki jih doprinesejo ostali uporabniki sistema, te pa za naš signal predstavljajo motnjo. Ta člen mora biti čimmanjši, želimo torej:

$$\text{drugi člen} = \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} \sum_{j \neq i} d_j[n - \tau_j] * c_j[n - \tau_j] * c_i^*[n - \tau_i] = 0$$

Prispevek vsakega motečega uporabnika lahko v gornjem členu obravnavamo ločeno. Skupna vsota vseh motenj posameznih uporabnikov bo namreč najmanjša kadar bo prispevek vsakega motečega uporabnika posebej najmanjši. Torej mora biti za vse $j=1 \dots K$ razen $j=i$ (torej za vse moteče uporabnike) njihov prispevek enak nič:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} d_j[n - \tau_j] * c_j[n - \tau_j] * c_i^*[n - \tau_i] = 0$$

Nadalje predpostavimo, da smo sinhronizacijo že dosegli ($\tau_i = \tau'_i$) in z tem določili tudi n_0 . Problem pa predstavlja dejstvo, da je signal d_j asinhron na signal d_i (n_0 je že določen) saj je zaradi različne oddaljenosti motečih uporabnikov zakasnen za nek drug čas, kot pa signal d_i . Zaradi enostavnosti bomo sedaj predpostavili še, da se signal d_j na intervalu korelacije (glej vsoto v enačbi) ne spreminja, torej ga lahko izpostavimo pred vsoto:

$$d_j[n - \tau_j] \frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} c_j[n - \tau_j] * c_i^*[n - \tau_i] = 0$$

Uvedemo še novi spremenljivki $\tau = \tau_i - \tau_j$ in $m = n - \tau_i$, postavimo $n_0=0$, saj se signal d_j na intervalu korelacije ne spreminja (izpostavimo ga pred vsoto), torej je vseeno od kod do kod teče vsota. Dobimo:

$$r_{i,j}[\tau] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c_i^*[n] * c_j[n + \tau] = 0$$

Ta enačba mora veljati za vse možne kombinacije (pare) kod i in j (razen $i=j$) in za vse vrednosti τ . Zahteva torej pravi, da morajo biti križne korelacijske funkcije posameznih kod enake nič, ali povedano drugače, **kode morajo biti nekorelirane, da se uporabniki med seboj ne bodo motili**. Ponovno je ta pogoj, zaradi predpostavke da se signal d_j na intervalu korelacije ne spreminja, le potreben ne pa tudi zadosten pogoj.

3.2.3 Tretji člen

Tretji člen predstavlja motnje, ki se prištevajo na komunikacijskem kanalu in znaša:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} s[n] * c_i^*[n - \tau_i']$$

Na ta člen z izbiro kode praktično ne moremo vplivati, saj so motnje in šum naključne narave. Vpliva le teh se zato ne moremo znebiti z ustrezno izbiro kode. Značilnost prenosa z razširjenim spektrom pa je, da v postopku detekcije v sprejemniku vpliv motenj in šuma (predvsem ozkopasovnih) precej zmanjšamo (Slika 11). Ozkopasovne motnje namreč v sprejemniku, z tem ko jih monožimo z $c_i[n-\tau_i]$ razširimo (in z tem zmanjšamo amplitudo močnostnega spektra), nato pa jih z korelatorjem filtriramo (korelator namreč vrši konvolucijo v časovnem prostoru, kar pomeni množenje v frekvenčnem prostoru). Zmanjšanje vpliva motenj je proporcionalno dobitku procesa G_p .

3.3 Vpliv zahtev na izbiro kode

Zahtevi iz poglavij 3.2.1 in 3.2.2 se nanašata na lastnosti, ki jih morajo izpolnjevati kode oziroma psevdo-naključni nizi. Nabor kod, ki bi izpolnjeval obe zahtevi hkrati, bi bil idealen nabor, saj bi ob takih lastnostih zlahka dosegli sinhronizacijo na oddajani signal, poleg tega pa se uporabniki med seboj nebi motili. Idealni nabor kod, ki hkrati izpolnjuje zahtevo po nekoreliranosti med sosednjimi kodami in zahtevo po idealni avtokorelaciji (idealne samosinhronizacijske lastnosti) seveda ne obstaja. V nadaljevanju bom podrobneje analiziral omenjeni zahtevi in predstavil vpliv teh zahtev na izbiro družine kod.

3.3.1 Prva zahteva: pulzna avtokorelacijska funkcija

Koda mora omogočati učinkovito sinhronizacijo sprejemnika. Sinhronizacija je najenostavnejša v primeru, ko ima avtokorelacijska funkcija pulzni potek:

$$r_{i,i}[\tau] = \begin{cases} 1 & \text{pri } \tau = 0 \rightarrow \tau_i = \tau_i' \\ 0 & \text{pri } \tau \neq 0 \rightarrow \tau_i \neq \tau_i' \end{cases}$$

Če izračunamo diskretni Fourierov transform pulzne avtokorelacijske funkcije dobimo:

$$R_{i,i}[k] = C_i^*[k] * C_i[k] = |C_i[k]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r_{i,i}(\tau) e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} = \frac{1}{N} (1 + 0 + 0 + 0 \dots) = \frac{1}{N}$$

Gostota močnostnega spektra kode $c_i[n]$ mora biti torej na intervalu $0 \leq k \leq N-1$ bela (konstantna) in enaka $1/N$. Seveda mora to veljati za vse kode iz družine, kajti sinhronizacija je potrebna za vse uporabnike. Z drugimi besedami povedano: **za dobro sinhronizacijo morajo bit spektri kod beli.**

3.3.2 Druga zahteva: križno korelacijska funkcija kod enaka nič

Zahteva, da je križna korelacijska funkcija med kodami enaka nič pomeni, da se uporabniki med seboj ne motijo. Če hočemo doseči čimmanjšo interferenco med uporabniki, morajo biti torej njihove kode med seboj nekorelirane:

$$r_{i,j}[\tau] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c_i^*[n] * c_j[n + \tau] = 0$$

Ta zahteva mora veljati za vse pare kod (i,j) razen za $i=j$ in za vse zamike τ .

Če izračunamo diskretni Fourierov transform križne korelacijske funkcije dobimo:

$$R_{i,j}[k] = C_i^*[k] * C_j[k] = \frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{N-1} r_{i,j}(\tau) * e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} = \frac{1}{N} (0 + 0 + 0 \dots) = 0$$

Zahteva torej pravi, da mora bit produkt močnostnih spektrov dveh kod za vsak k enak nič, kar pomeni, da morata biti spektra kod neprekrivajoča. Povedano drugače: **pogoj o ničelni križno korelacijski funkciji bo izpolnjen, ko bodo spektri kod neprekrivajoči.**

3.3.3 Analiza zahtev

Gornji zahtevi sta si očitno nasprotujoči. Po eni strani pravimo, da mora biti spekter kode neskončen (bel), po drugi strani pa, da se spektri različnih kod ne smejo prekrivati. Obeh zahtev očitno ne moremo izpolniti sočasno, torej idealni nabor kod ne obstaja. Vsaka izbira kod torej predstavlja kompromis med potekom avtokorelacijske in krožnokorelacijske funkcije, torej med sinhronizacijskimi lastnostmi in medsebojnimi interferenčnimi lastnostmi med kodami različnih uporabnikov. V nadaljevanju si pogledajmo kakšen je optimalni kompromis, ki je realno dosegljiv, torej kakšne so omejitve pri izbiri kod.

V ta namen najprej definirajmo kriterije, z katerim ocenimo določen nabor kod.

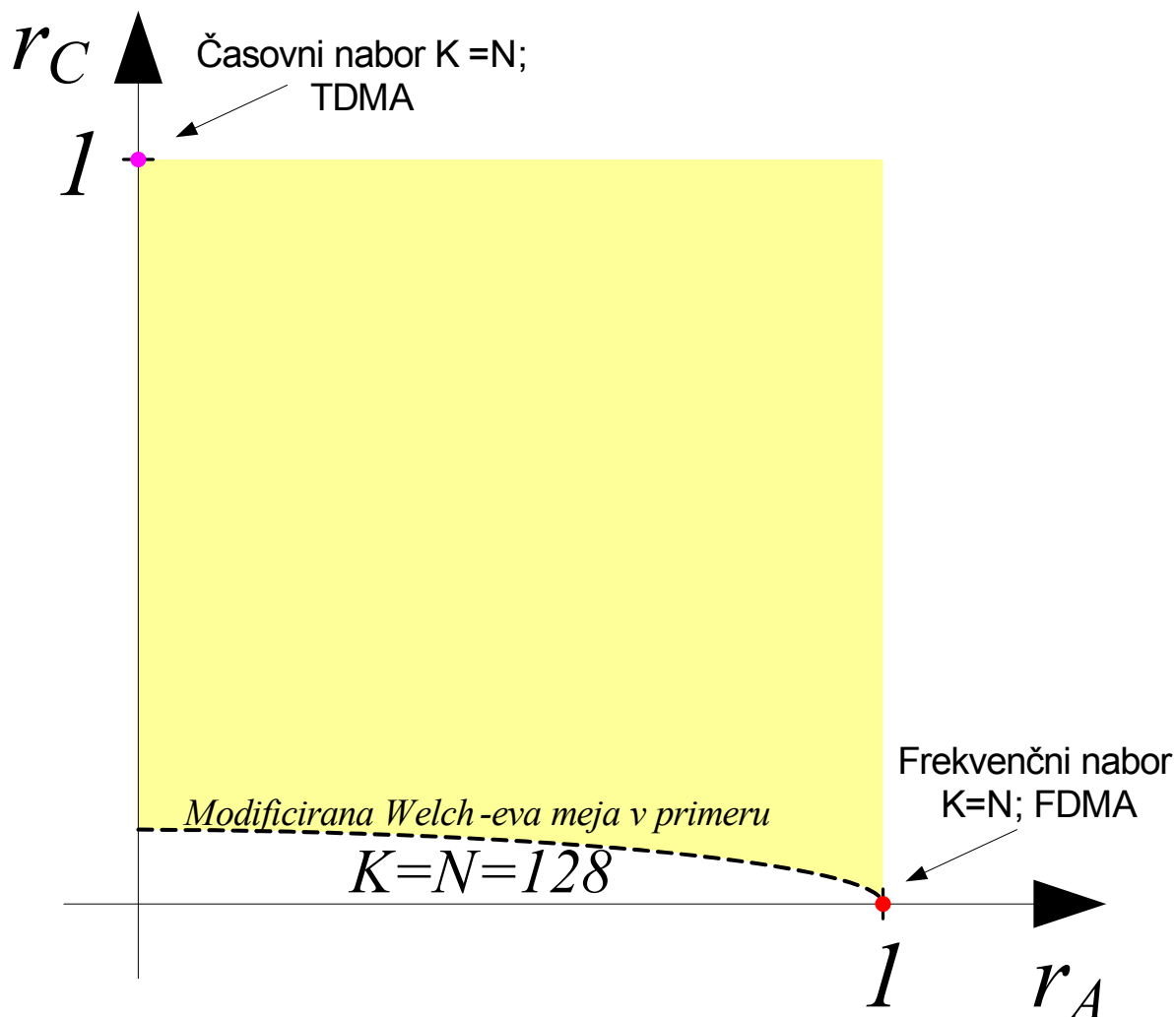
Predpostavimo, da imamo nabor kod, sestavljen iz K različnih kod $\{c_i[n]; 1 \leq i \leq K\}$. Prvi od pogosto uporabljenih kriterijev (ocen) je maksimalna absolutna križna korelacija med kodami:

$$r_c = \max\{|r_{i,j}[\tau]|; i \neq j; 1 \leq i, j \leq K; 0 \leq \tau \leq N-1\}$$

Drugi kriterij, ki pogosto nastopa pri analizi zahtev do družin kod, predstavlja maksimalna absolutna izvenfazna avtokorelacija:

$$r_A = \max\{|r_{i,i}[\tau]|; 1 \leq i \leq K; 1 \leq \tau \leq N-1\}$$

Vrednosti r_C in r_A lahko zavzameta vrednosti med 0 in 1. Za obe vrednosti želimo, da sta karseda blizu vrednosti 0. Vrednosti obeh veličin običajno rišemo v korelacijski graf (Slika 7).



Slika 7: Graf možnih naborov kod.

V korelacijskem grafu nam vsaka točka predstavlja svojo družino kod. Omenili smo, da idealni primer $r_C=0$ in $r_A=0$ ne obstaja. Različni avtorji so analitično izpeljali meje, pod katere se pri optimizaciji kod ni mogoče spustiti. Najbolj poznana je modificirana Welch-eva meja. Ta meja je odvisna od števila kod K , ki sestavljajo družino (torej od števila potencialnih uporabnikov sistema). Za različne K se meja spreminja tako v horizontalni kot tudi v vertikalni smeri (spreminja se najmanjši možni r_C kot tudi najmanjši možni r_A). V Slika 7 je ponazorjena meja za primer, ko je število kod družine (K) enako periodi naših kod N . Krivulja prikazuje spodnjo mejo, kar pomeni, da družine kod pod to mejo ne obstajajo. Nad

to mejo, pa določijo družine (točke v grafu) obstajajo, ni pa nujno, da obstajajo vse točke nad to mejo (lahko se zgodi, da družina kod ne obstaja, čeprav se točka, ki ustreza tej družini nahaja nad mejno črto).

V grafu lahko opazujemo ločeno tri različna področja:

1. **Področje $r_C=0$:** Ponazarja med sabo popolnoma nekorelirane kode. V primeru $K=N$ je možen obstoj ene same točke $r_C=0, r_A=1$. Ta družina kod je v smislu avtokorelacijske funkcije čisto neprimerna in idealna v smislu križno korelacijske funkcije. Točka $r_C=0, r_A=1$ nam predstavlja FDMA sodostop. Posamezni frekvenčni pasovi so namreč pri FDMA popolnoma nekorelirani med seboj, v smislu avtokorelacijske funkcije pa so harmonične funkcije slabe.
2. **Področje $r_A=0$:** Ponazarja družine kod, ki jim pravimo tudi kode belega spektra, saj je spekter avtokorelacijske funkcije teh kod bel. Avtokorelacijska funkcija je idealna medtem, ko križno korelacijska funkcija lahko zavzame različne vrednosti (r_C lahko zavzame vrednosti od Welch-eve meje pa do 1). Poseben primer je družina kod $r_C=1$ in $r_A=0$, ki predstavlja TDMA sodostop.
3. **Področje $r_C \neq 0$ in $r_A \neq 0$:** Na tem področju (šrafirano na Slika 7) se nahajajo družine kod, ki se nahajajo nad mejo, vendar ni nujno da vse tudi obstajajo. Poročje je zanimivo, ker lahko dosegamo tudi $K \gg N$, kar pomeni veliko število možnih uporabnikov. Družine kod iz tega področja, ki se pogosto uporabljajo so Goldove, Kasamijeve in Walsh-Hadamard-ove kode.

Graf sem torej razdelil na tri značilna področja. Pokazal sem tudi, da sta TDMA in FDMA sodostopa pravzaprav le posebna primera CDMA sodostopa. Zato pravimo, da smo kodni sodostop posplošili. Frekvenčni in časovni sodostop sta namreč predstavljena kot posebna primera posplošenega kodnega sodostopa.

4 LASTNOSTI SISTEMOV CDMA IN PRENOSA Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM

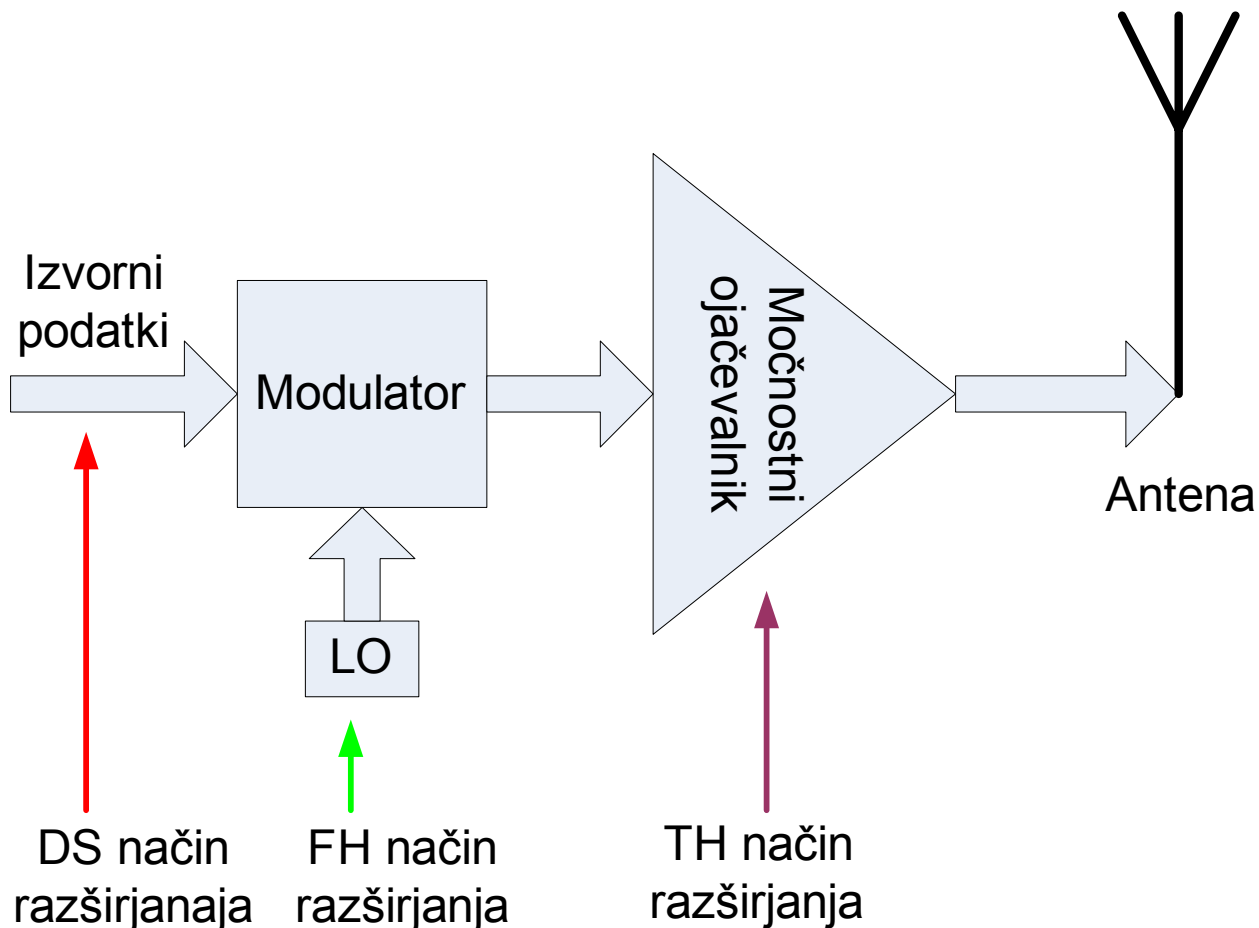
Prenos z razširjenim spektrom ima nekaj prednosti pred ostalimi načini prenosa. Glavne prednosti, zaradi katerih je tak način prenosa vse bolj uveljavljen so:

1. **Prenos z razširjenim spektrom je odporen na ozkopasovne motnje.** Ponovno množenje z kodo $c^*[t-\tau_i]$ v sprejemniku (Slika 5) namreč povzroči, da se ozkopasovne motnje, ki se uporabnemu signalu prištejejo na prenosnem kanalu razširijo. Posledica razširjanja je, da moč motenj v območju pasovne širine koristnega signala močno upade (Slika 11). Po filtriranju je prispevek ozkopasovnih motenj majhen in takšne vrste motnje komunikacije torej ne motijo. To je tudi eden od razlogov, da so prenos z razširjenim spektrom sprva uporabljali v vojaške namene, saj je komunikacijo težko namerno motiti.
2. **Sistemi z razširjenim spektrom so neobčutljivi na razširjanje signala po večih poteh.** Avtokorelacijska funkcija kod je namreč blizu idealne (pulzne) in prispevki odbitih signalov, ki pridejo z drugačno zakasnitvijo kot direktni signal, zato ne motijo. Razširjanje po večih poteh se da v sistemih z razširjenim spektrom celo izkoristiti za izboljšanje sprejema. V sprejemniku se namreč lahko nahaja več korelatorjev, od katerih je vsak sinhroniziran na določen odbiti val. Izhode teh korelatorjev nato seštejemo in tako z pomočjo sprejema odbitih valov sprejem izboljšamo. Takšne sprejemnike imenujemo RAKE sprejemniki.
3. **V sistemih z kodnim sodostopom zlahka implementiramo statistični multipleks uporabnikov, ki dostopajo do skupnega prenosnega medija.** V sistemih z časovnim in frekvenčnim dostopom so uporabniki bodisi časovno ali frekvenčno ločeni. Vsakemu uporabniku je dodeljen svoj kanal za ves čas trajanja zveze. Večinoma pa uporabniki v času zveze določen procent časa ne oddajajo ničesar. Tak primer je naprimer prenos govora. V primeru TDMA in FDMA sodostopa torej kanal ni optimalno izkoriščen. V sistemih z kodnim sodostopom pa uporabniki ne zasedajo kanala. Število uporabnikov sistema je omejeno samo z stopnjo interference, ki si jo medsebojno povzročajo. V primeru da nek uporabnik trenutno ne oddaja ničesar, tudi ne povzroča interference ostalim uporabnikom, torej v takem primeru ne zaseda zmogljivosti sistema.
4. **V sistemih z razširjenim spektrom frekvenčno planiranje ni potrebno,** saj vsi uporabniki oddajajo v celotni pasovni širini ki je na voljo.
5. **Pri prenosu z razširjenim spektrom je zagotovljena določena stopnja varnosti.** Vsak uporabnik namreč uporablja neko drugim (potencialno škodljivim) uporabnikom neznano psevdo-naključno kodo, to pa pomeni, da je za dekodiranje sporočil potreben dodaten trud.
6. **Prenos z razširjenim spektrom in z tem obstoj komunikacije je težko zaznati.** V primeru zelo velikega dobitka procesiranja se signal zelo močno razširi, njegov močnostni spekter pa dobi izredno majhno amplitudo. Signal tako postane podoben šumu in njegov obstoj je težko zaznati. Tudi to je eden od vzrokov, da je prenos z razširjenim spektrom sprva uporabljala vojska.

Glavna **slabost sistemov z kodnim sodostopom je potreba po zelo natančni kontroli moči posameznih uporabnikov.** Vsi uporabniki namreč oddajo v istem frekvenčnem pasu. Ker križno-korelacijska funkcija ni idealna, se uporabniki med seboj motijo. V mobilnih sistemih se nekateri uporabniki lahko nahajajo zelo blizu bazne postaje, spet drugi pa so zelo oddaljeni. Če nek bližnji in nek daljni uporabnik oddajata z isto močjo, bo signal bližnjega uporabnika na mestu bazne postaje veliko močnejši kot signal daljnega uporabnika. Ker pa se signala zaradi neidealne križno-korelacijske funkcije motita, bo sprejem signala oddaljenega uporabnika zelo moten. Temu pojavu pravimo bližnje-daljni efekt (ang. Near-Far). V mobilnih celičnih sistemih, ki za prenos uporabljajo razširjeni spekter je torej nujna zelo natančna kontrola moči uporabnikov glede na njihovo trenutno lokacijo, kar poveča kompleksnost sistema.

5 NAČINI RAZŠIRJANJA SPEKTRA

Obstajajo trije osnovni načini razširjanja spektra: neposredno razširjanje z nizom, frekvenčno skakanje in časovno skakanje. V osnovi se razlikujejo po tem, na katerem mestu sistema v izvorni signal vključimo psevdo-naključni niz (Slika 8).



Slika 8: Shematski prikaz različnih načinov razširjanja spektra

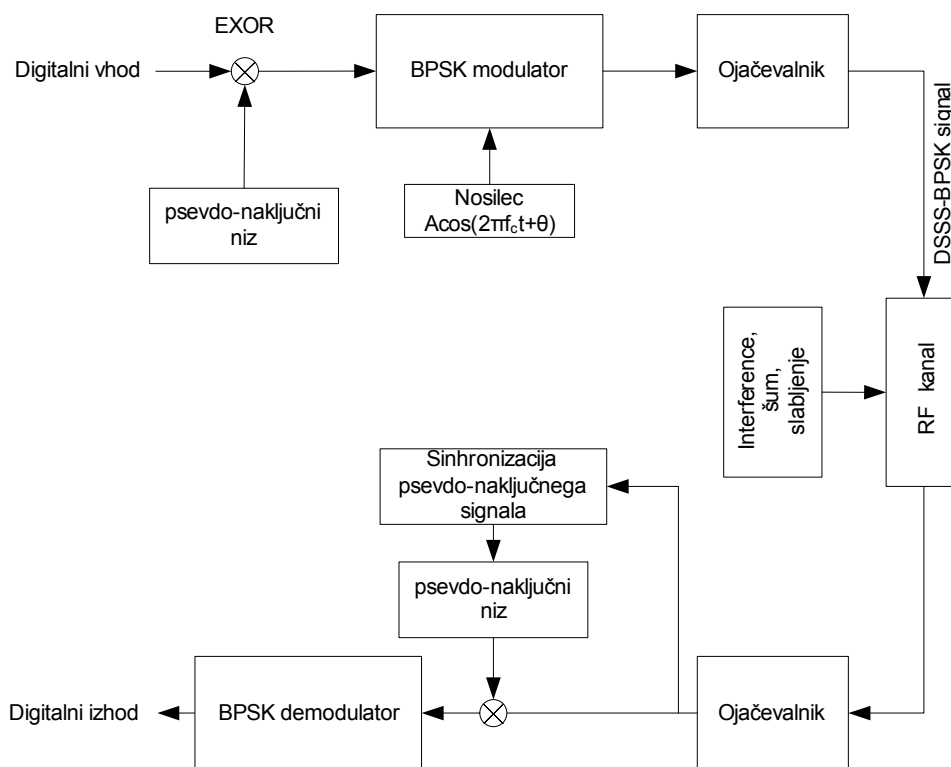
V primeru, da se psevdo-naključni niz vstavlja na **vhodu oddajne verige**, govorimo o neposrednem razširjanju z nizom. Če se psevdo-naključni niz aplicira na **nivoju frekvence nosilca**, imamo opravka z frekvenčnim skakanjem. Sistemi s frekvenčnim skakanjem torej dosežejo razširjanje spektra s tem, da frekvenca nosilca skače po nekem naboru frekvenc po psevdo-naključnem vzorcu. Če se psevdo-naključni niz dodaja signalu na **izhodu** in sicer v smislu oddajanja v psevdo-naključnih časovnih rezinah, potem imamo opravka z časovnim skakanjem. Poleg tega poznamo tudi načine, ki razširjanja spektra ne dosežejo z pomočjo uporabe psevdo-naključnih nizov. Ena od takih metod je naprimer **pulzna frekvenčna modulacija**, ki se uporablja v t.i. "Chirp" sistemih.

Vsak od zgoraj naštetih načinov ima svoje prednosti in slabosti in zato se je vsak uveljavil na svojem, specifičnem področju. Najpogosteje se uporablja neposredno razširjanje z nizom, sledi frekvenčno skakanje, časovno skakanje pa se v komercialnih sistemih ni uveljavilo. V sodobnih telekomunikacijskih sistemih se zelo pogosto uporablja kombinacija

zgoraj naštetih načinov. Pogosta kombinacija je naprimer kombinacija neposrednega razširjanja z nizom in frekvenčnega skakanja. Z kombiniranjem načinov dosežemo ugodne lastnosti, ki pripadajo enemu in drugemu načinu.

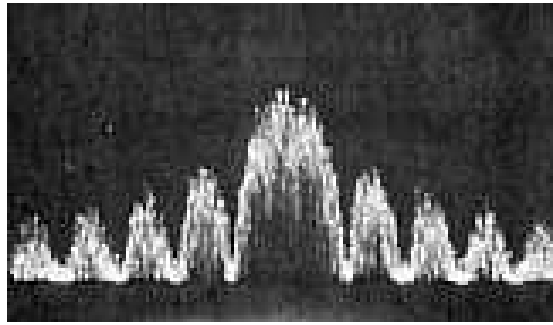
5.1 Neposredno razširjanje z nizom

Ime odraža dejstvo, da se izvorni informacijski signal neposredno množi (EXOR operacija) z psevdo-naključnim nizom, še preden se signal modulira z radiofrekvenčnim nosilcem. Koda torej direktno določa pasovno širino oddanega radiofrekvenčnega signala. Dolžine kod so različne in v praksi dolge od 11 pa do $2^{89}-1$ bitov. Tipičen sistem z neposrednim razširjanjem z nizom je prikazan na Slika 9.



Slika 9: Oddajno sprejemna veriga v primeru DSSS-BPSK sistema

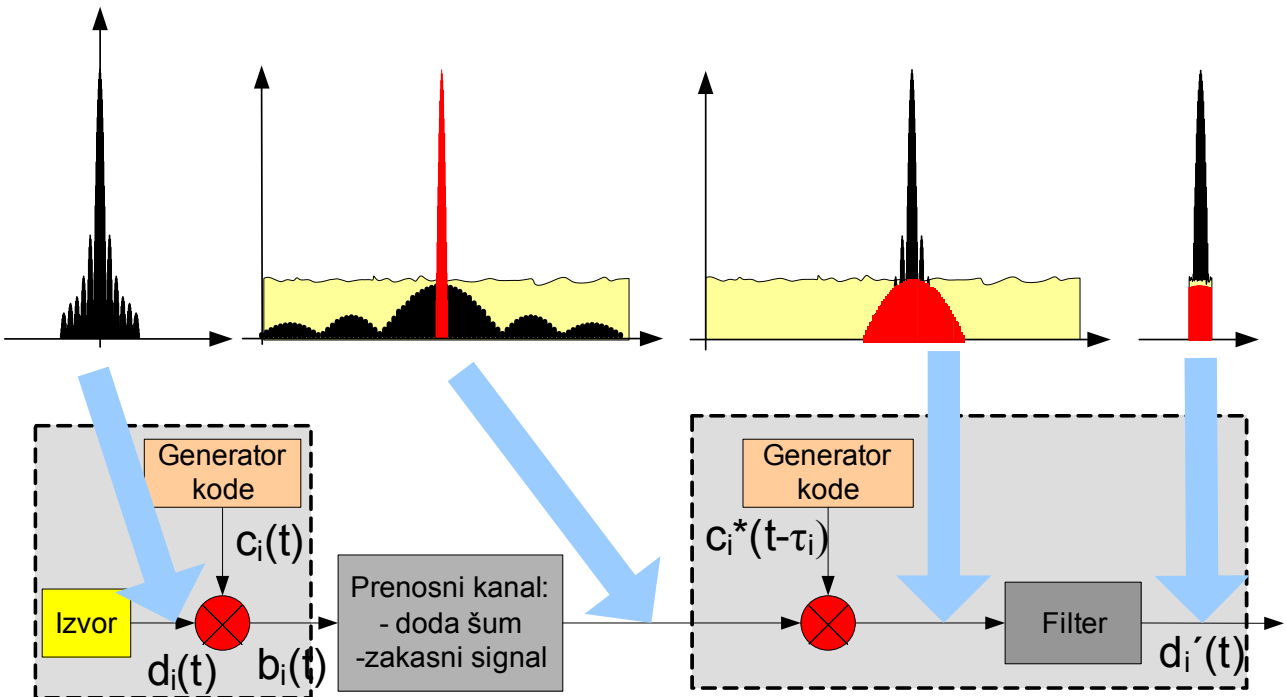
Rezultat moduliranja radiofrekvenčnega nosilca z kodno sekvenco je signal z frekvenčnim spektrom v okolici frekvence nosilca in z ovojnico oblike $\sin x/x$ (Slika 10). Glavni snop tega spektra ima pasovno širino enako dvakratni bitni hitrosti modulacijske kode. Stranski snopi imajo pasovno širino enako enkratni bitni hitrosti modulacijske kode. Dejanska oblika spektra je odvisna tudi od nosilca in tipa modulacije, ki je bila uporabljena. Spekter ilustriran na Slika 10 je za primer BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulacije, ki je najpogosteje uporabljena modulacija v DSSS sistemih.



Slika 10: Oblika ovojnice spektra po neposrednem razširjanju z nizom. Uporabljena je bila BPSK modulacija.

Psevdonaključni niz se običajno generira s pomočjo pomikalnih registrov, ki imajo ustrezne povratne vezave. Obstajajo različni nabori (družine) psevdonaključnih nizov, kar sem podrobneje predstavil v poglavju 3.3.3.

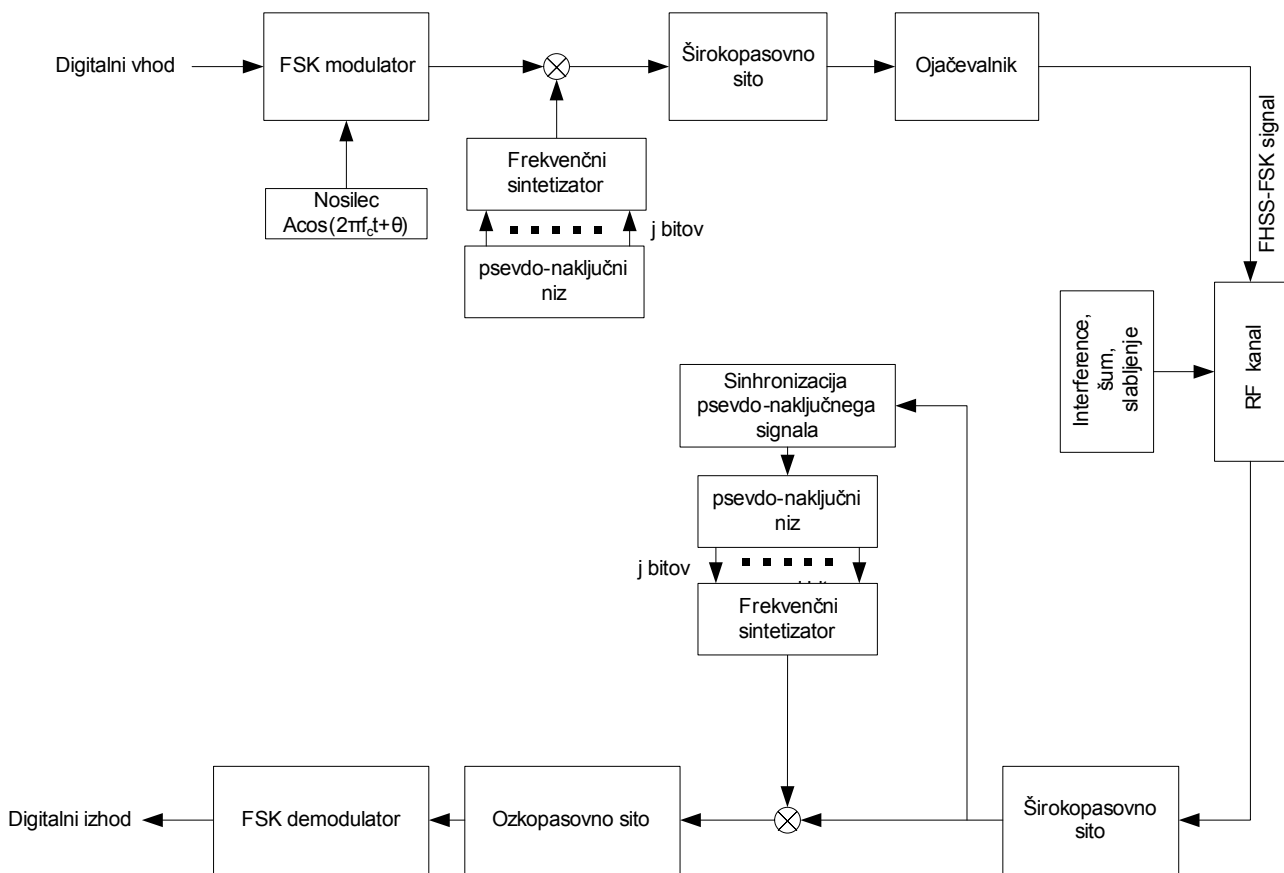
Ideja neposrednega razširjanja z nizom je v tem, da signal pred oddajo razširimo z psevdonaključnim nizom (Slika 6), ker pa moč signala ostaja enaka kot pred razširjanjem, se amplituda močnostnega spektra zmanjša. Dobimo signal podoben šumu. V sprejemniku nato signal ponovno množimo s sinhroniziranim psevdonaključnim nizom, kar signal zopet zoža. Ozkopasovne motnje, ki se prištevajo na prenosni poti, pa množenje z kodo v sprejemniku razširi, kar pomeni zmanjšanje amplitude močnostnega spektra in po filtriranju je prispevek ozkopasovnih motenj majhen (Slika 11).



Slika 11: Princip neposrednega razširjanja z nizom. Slika prikazuje odpornost na ozkopasovne motnje.

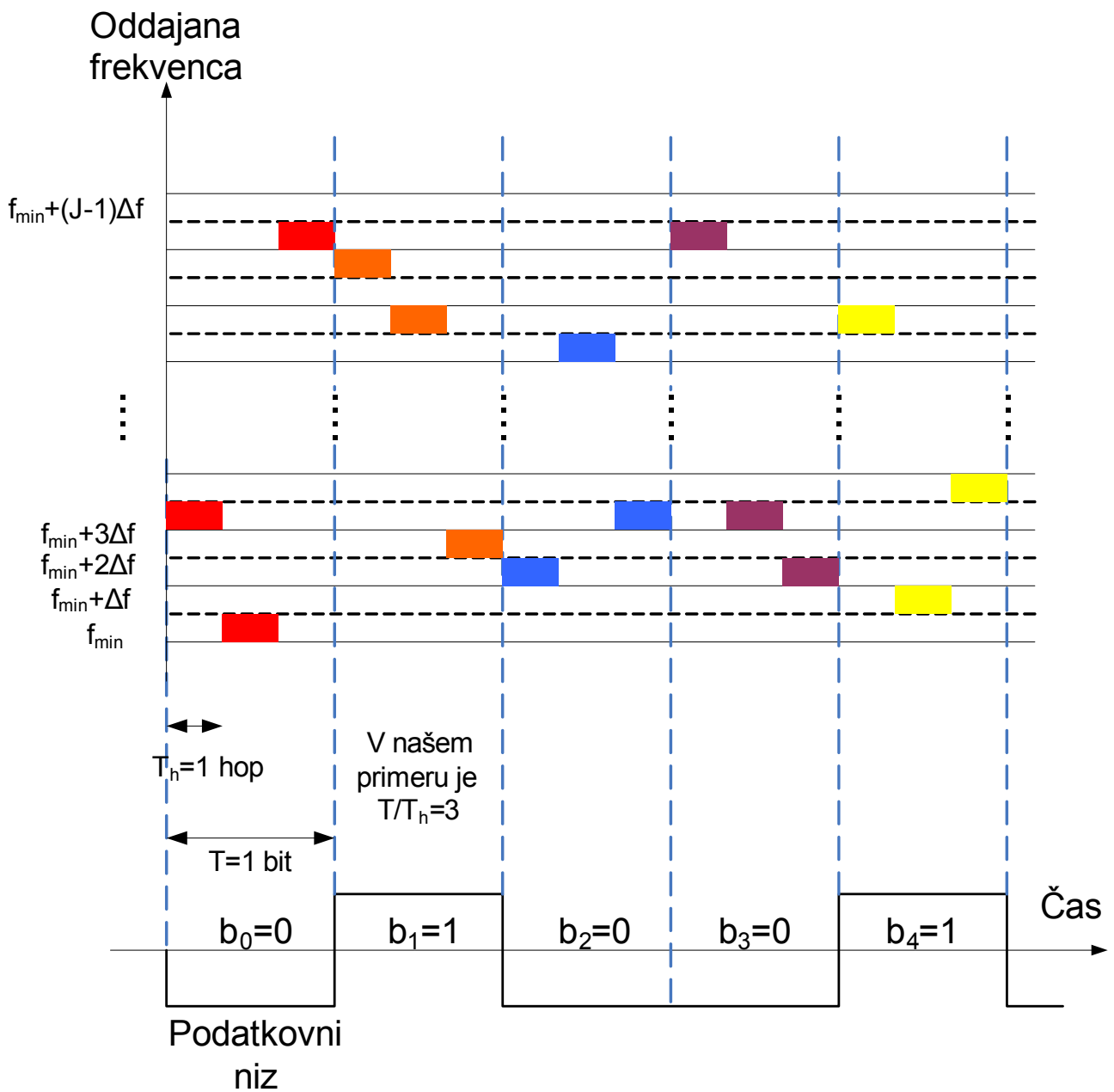
5.2 Frekvenčno skakanje

V primeru razširjanja z frekvenčnim skakanjem spreminjamo frekvenco nosilca v skladu z psevdo naključnim nizom (Slika 13). Ker so frekvence po katerih skačemo različne, pride do razširjanja spektra (Slika 14). Če je trajanje skoka manjše od trajanja enega podatkovnega bita, potem načinu razširjanja pravimo hitro frekvenčno skakanje (FHSS-Fast Frequency Hopping Spread Spectrum). V tem primeru se vsak podatkovni bit prenese z uporabo večih frekvenc nosilca. Če pa je trajanje skoka večje od trajanja podatkovnega bita, sistemu pravimo sistem z počasnim frekvenčnim skakanjem (SFHSS-Slow frequency Hopping Spread Spectrum). V tem primeru se več podatkovnih bitov prenese z eno samo frekvenco nosilca. Digitalna modulacije, ki se najpogosteje uporablja v kombinaciji z frekvenčnim skakanjem je FSK (Frequency Shift Keying). Oddajno sprejemna veriga FHSS-FSK sistema je predstavljena na Sika 12.



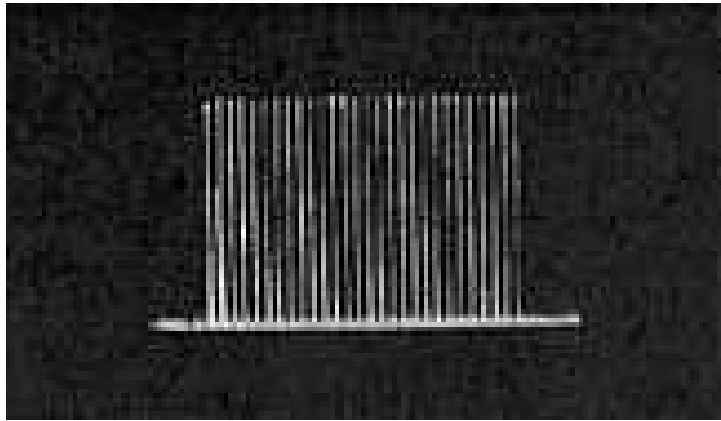
Sika 12: Oddajno sprejemna veriga v primeru FHSS-FSK sistema.

V primerjavi z DSSS načinom je FHSS način manj občutljiv na bližnje-daljini (Near-Far) efekt. Sekvence (oziroma zaporedja frekvence nosilca) imajo namreč v periodi le neko omejeno število kolizij med uporabniki, kar pomeni, da bližnji uporabnik (ob oddajanju z enako močjo kot oddaljeni uporabnik) z svojim signalom moti samo neko omejeno število frekvenčnih skokov oddaljenega uporabnika. Z pomočjo metod za odpravljanje napak lahko torej rekonstruiramo celoten signal oddaljenega uporabnika.



Slika 13: Princip skakanja po frekvenčnih pasovih v skladu z psevdonaključnim nizom.

Frekvenčni spekter ima po razširjanju z pomočjo frekvenčnega skakanja popolnoma drugačno obliko ovojnice kot frekvenčni spekter, ki ga dobimo pri neposrednem razširjanju z nizom. Pri neposrednem razširjanju z nizom je bila ovojnica oblike $\sin x/x$ pri frekvenčnem skakanju pa je amplituda močnostnega spektra konstantna čez celotno pasovno širino uporabljenih frekvenc (Slika 14).



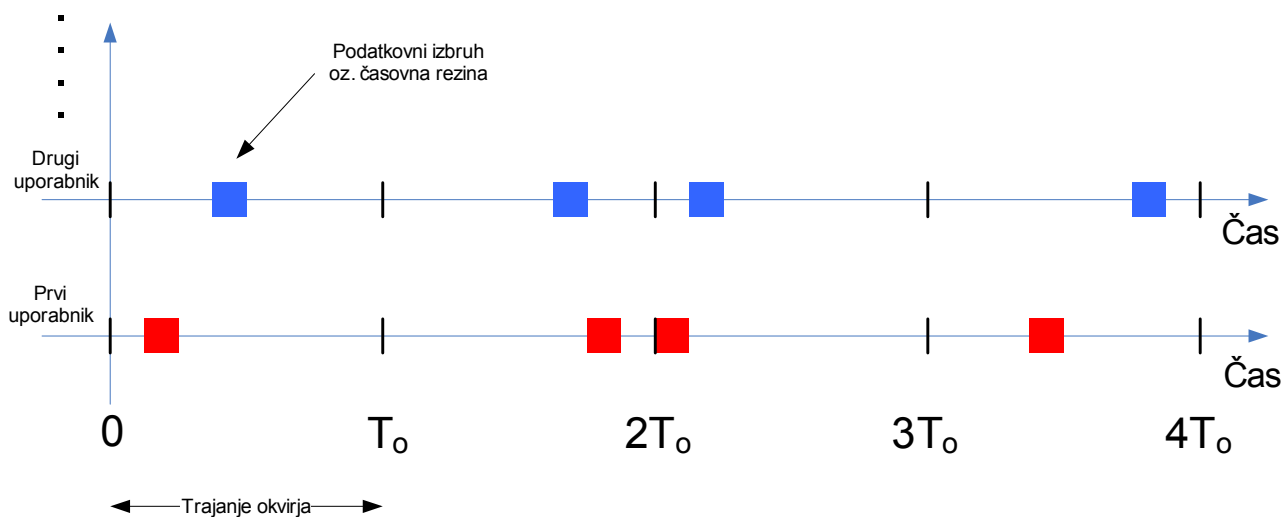
Slika 14: frekvenčni spekter po razširjanju z FH metodo

V primeru sistemov z frekvenčnim skakanjem problem predstavlja dejstvo, da težko dosežemo velik dobitok procesiranja (processing gain). V sistemu namreč potrebujemo frekvenčni sintetizator, ki je sposoben hitrega skakanja po naboru nosilnih frekvenc. Čimveč bo teh frekvenc, temvečji bo dobitok procesiranja, vendar bo zato potreben tudi bolj zahteven frekvenčni sintetizator. Ta problem v praksi pomeni manjši dobitok procesiranja kot pri DSSS načinu razširjanja. Pri isti oddajni moči (moči so predpisane z strani regulatornih organov) bo imel DSSS sistem boljše razmerje signal-šum, oziroma manjši BER. Ali obratno: za doseganje enake pogostnosti napak, bo moral FHSS oddajnik oddajati z večjo močjo.

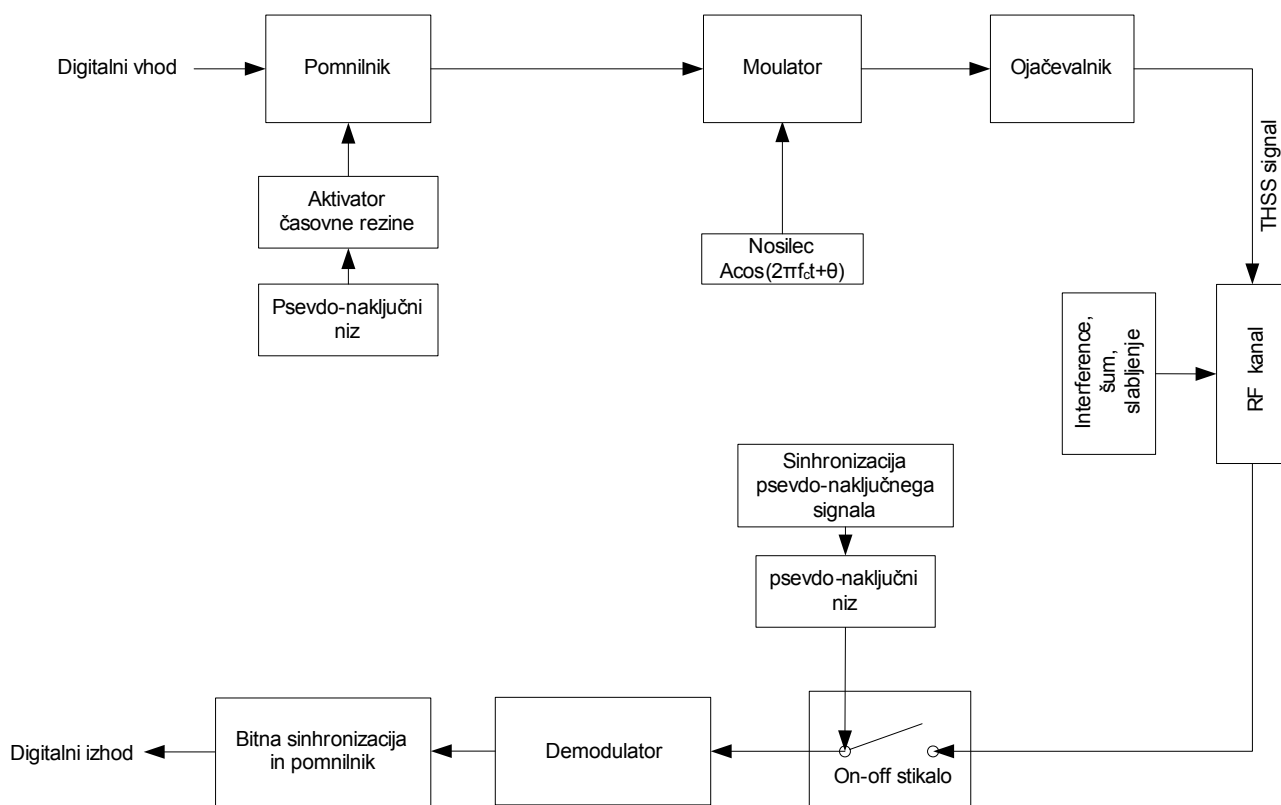
5.3 Časovno skakanje

Razširjanje z časovnim skakanjem je tehnika, pri kateri se delovna perioda radiofrekvenčnega nosilca spreminja v skladu z psevdonaključnim nizom. Izbruhi (časovne rezine) se torej pojavljajo ob psevdo-naključnih časih (Slika 15). Oddajnik se vklaplja in izklaplja pod nadzorom kodne sekvence. To v bistvu ni nič drugega kot dobro poznana pulzna modulacija, pri kateri so časi vključevanja in izključevanja psevdonaključni. Vse podatkovne bite, ki se akumulirajo v času enega okvirja moramo prenesti v eni časovni rezini, potreben je torej pomnilnik, ki za vmesni čas shrani podatkovne bite. Oddajno sprejemna veriga sistema z časovnim skakanjem je prikazana na Slika 16.

Sistemi z časovnim skakanjem so slabo odporni na namerno povzročene motnje (jamming). Interferenca z ostalimi uporabniki je manjša kot pri DSSS sistemih iz enakega razloga, kot pri FHSS sistemih. Med uporabniki ob pazljivi izbiri kode pride le do nekega omejenega števila kolizij časovnih intervalov, to pa pomeni manjšo občutljivost na bližnje-daljni efekt.



Slika 15: Razširjanje z časovnim skakanjem. Čas vsakega podatkovnega izbruha je določen z pseudo-naključnim nizom, torej se izbruhi pojavljajo pseudo naključno.



Slika 16: Oddajno sprejemna veriga v primeru THSS načina razširjanja. Stikalo preklaplja ob časovnih rezinah določenih z psevdo-naključnim nizom.

5.4 Pulzno frekvenčna modulacija

Sisteme z pulzno frekvenčno modulacijo (ang. Chirp Systems) lahko prištevamo med sisteme s prenosom z razširjenim spektrom, čeprav za razširjevanje spektra ne uporabljajo psevdo naključnega niza. V teh sistemih je na začetku vsakega oddanega pulza radiofrekvenčni nosilec frekvenčno moduliran, kar povzroči dodatno razširjanje spektra. Vzorec frekvenčne modulacije je lahko različen in je odvisen od izbrane razširjevalne funkcije. Najpogosteje je razširjevalna funkcija kar linearna, kar pomeni, da frekvenca nosilca v času enega pulza bodisi linearno narašča, ali pa linearno pada. Glavna uporaba te vrste oddajanja je v radarskih sistemih, vendar se uporablja tudi v komunikacijskih sistemih.

6 PRIMERI UPORABE PRENOSA Z RAZŠIRJENIM SPEKTROM

Sistemi z razširjenim spektrom niso novost in imajo precej dolgo zgodovino razvoja. Sprva so se uporabljali le v vojaške namene, saj so odporni na namerno motenje (jamming) zveze, poleg tega je obstoj zveze težko zazanati, saj je oddani signal podoben šumu. V zadnjih nekaj desetletjih, pa je prenos z razširjenim spektrom postal zanimiv tudi za komercialne namene. Uvedba ISM (Industrial, Scientific and Medical band) in U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) prostih frekvenčnih pasov, je še pospešila razvoj teh sistemov. Poleg tega je prenos z razširjenim spektrom v zadnjih letih postal pomemben zaradi hitrega razvoja mobilnih prenosnih sistemov. Uporaba tehnologij razširjenega spektra in kodnega sodostopa v teh sistemih ima namreč nekaj bistvenih prednosti pred frekvenčnim in časovnim načinom sodostopa. Prenos z razširjenim spektrom se tako danes uporablja predvsem za radijski prenos v satelitskih, mobilnih celičnih sistemih in brezžičnih LAN omrežjih.

6.1 Uporaba razširjenega spektra v satelitskih prenosnih sistemih

Prenos z razširjenim spektrom in CDMA način sodostopa, se v satelitskih sistemih obnese slabše, kot v zemeljskih komunikacijskih sistemih. To je posledica dveh značilnosti satelitskega prenosa in sicer velike zakasnitve (round trip delay), ki znaša 10-20ms za sisteme z sateliti v LEO orbitah in do 250ms za sisteme z sateliti v GEO orbitah in relativno majhne časovne disperzije signala, ki nastane zaradi razširjanja signala po več poteh. Velika zakasnitev signala na prenosni poti pomeni, da zaprtzančna adaptivna kontrola moči ni možna zaradi problemov s stabilnostjo in je potrebno uporabiti odprtozančni (open loop) pristop. Majhna časovna disperzija v praksi pomeni, da ne moremo izkoristiti razširjanja po večjih poteh za boljši sprejem, kot naprimer v RAKE sprejemnikih.

Uporaba razširjenega spektra in CDMA sodostopa se je uveljavila zlasti v mobilnih satelitskih sistemih z sateliti v LEO orbitah. Te sateliti se glede na uporabnika namreč gibljejo in zato so potrebne predaje (hand-off), ki pa so v primeru CDMA sodostopa enostavnejše, saj je možna t.i. mehka predaja (soft hand-off). Poleg tega CDMA sistemi omogočajo mehko kapaciteto (soft-capacity), kar je ugodna lastnost v sistemih z velikim številom uporabnikov in izbruhovnim prometom (statistični multipleks!). Proizvajalci CDMA satelitskih sistemov trdijo, da je ob uporabi takšnega načina sodostopa možno doseči boljši izkoristek pasovne širine v primerjavi z FDMA/TDMA shemo dostopa, vendar to velja le v dolčenih primerih.

6.1.1 Satelitski sistemi tipa VSAT

So sistemi katerih zemeljske postaje imajo premer anten manjši od 2.4m, so enostavni za namestitve, pa tudi licenco za obratovanje je v nekaterih državah relativno lažje dobiti. Zaradi realtivno nizke cene so takšni sistemi primerni za popolnoma privatna omrežja. Lastniki privatnih sistemov VSAT imajo zakupljen del pasovne širine satelitskega transponderja, do njega pa posamezni VSAT terminali lahko dostopajo po TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) ali kombinaciji teh načinov. Večinoma se uporablja kombinacija FDMA/TDMA vendar nekateri proizvajalci ponujajo tudi sisteme z CDMA sodostopom. Tako naprimer proizvajalec Viasat (www.viasat.com) ponuja produkt ArcLight, ki uporablja

CDMA način sodostopa. Trdijo, da v primeru izbruhovnega IP prometa dosejajo večji izkoristek pasovne širine.

6.1.2 Širokopasvni satelitski sistemi

Širokopasovni interaktivni satelitski sistemi so neke vrste nasledniki VSAT sistemov z deljeno prehodno zemeljsko postajo. Njihova glavna značilnost je, da omogočajo večje prenosne hitrosti v razredu od nekaj 100 Kbps do nekaj Mbps. Komunikacija večinoma poteka čez regionalno prehodno zemeljsko centralo (gateway), ki si jo deli veliko število uporabnikov. Ti sistemi se uporabljajo večinoma za dostop do interneta, za interaktivno televizijo, občasne podatkovne transakcije z povezovanjem na zahtevo in telefonijo v nerazvitih deželah. Večinoma uporabljajo kombinacijo FDMA/TDMA sodostopa, nekateri pa uporabljajo tudi CDMA tehnologijo. Tako naprimer StarBand sistem, ki ponuja širokopasovni dostop do Interneta (www.starband.com) uporablja CDMA sodostop na povezavi v smeri od uporabnikov do satelita (uplink), ravno zaradi enostavnega statističnega multipleksiranja uporabnikov.

6.1.3 Mobilni satelitski sistemi

So satelitski sistemi, v katerih je CDMA način sodostopa najbolj upravičen. Še zlasti je tak način sodostopa uporaben v mobilnih satelitskih sistemih z sateliti v LEO orbitah. V teh sistemih so zaradi gibanja satelitov glede na zemljo potrebne predaje (hand-off) med sateliti med časom trajanja zveze, te pa so v primeru CDMA načina enostavnejše. Obstoječi mobilni satelitski sistem, ki uporablja CDMA sodostop je Globalstar (www.globalstar.com).

6.1.4 Ozkopasovni LEO satelitski sistemi in GPS

Poleg mobilnih sistemov namenjenih prenosu govora poznamo tudi t.i. majhne (little LEO) satelitske sisteme z sateliti v LEO tirnicah. Večinoma te sateliti niso neprestano v vidnem polju uporabnika in zato omogočajo prenos sporočil po metodi shrani in posreduje (store and forward). Tipične aplikacije teh sistemov so sporočanje lokacije (ladij, avtomobilov, tovornjakov..), odčitavanje števec, paging, e-mail itd. Obstoječi sistem, ki uporablja CDMA način sodostopa je OmniTRACS (www.qualcomm.com/qwbs/solutions/prodserv/omnitrac.shtml). Ponuja sporočilne storitve (messaging) in omogoča posredovanje trenutne lokacije tovora, vozil in opreme etc.

Čeprav sistema za globalno pozicioniranje (GPS- Global Positioning System) ne moremo prištevati med telekomunikacijske sisteme, pa velja omeniti, da tudi sistem GPS uporablja prenos signala z razširjenim spektrom.

6.2 Uporaba razširjenega spektra v mobilnih celičnih sistemih

V zadnjih nekaj letih je bilo po svetu vzpostavljenih kar nekaj mobilnih celičnih sistemov tretje generacije. Najpomembnejša zemeljska standarda tretje generacije sta UMTS (Universal mobile Telecommunications System) in CDMA2000, naslednik IS-95 (oz. cdmaOne). Oba v svojem radijskem dostopovnem delu omrežja (RAN- Radio Access Network) uprabljata CDMA sodostop.

CDMA ima v mobilnih celičnih omrežjih nekaj bistvenih prednosti pred FDMA/TDMA načinom sodostopa:

1. Ob upoštevanju govorne (ne)aktivnosti in možne sektorizacije celic nam CDMA sistemi ponujajo višjo kapaciteto od FDMA in TDMA sistemov, torej boljši izkoristek prenosne pasovne širine.
2. Boljša odpornost na značilnosti mobilnega prenosnega kanala (zlasti na razširjanje po več poteh).
3. Večja odpornost na ozkopasovne motnje.
4. Dinamično zasedanje kanala, kar pomeni, da uporabnik ki trenutno ne oddaja, tudi ne porablja sistemskih virov, to pa je lastnost, ki v primeru dodeljenih FDMA ali TDMA kanalov ne drži. Ta lastnost omogoča statistični multipleks, saj lahko kode dodelimo več uporabnikom, kot jih sme zaradi nivoja medsebojne interference sočasno oddajati. Predpostavljamo namreč lahko, da ne bodo aktivni vsi hkrati.
5. Preprostejši preklopi med celicami mobilnega sistema, saj je mobilna enota sposobna sočasno sprejemati signale večih baznih postaj, z tem pa je omogočeno mehko prehajanje med celicami (soft hand-off).
6. Preprostejše frekvenčno planiranje, saj vsi uporabniki komunicirajo sočasno v istem frekvenčnem pasu, vsaka celica deluje v celotnem frekvenčnem pasu.

Največji problem DSSS CDMA sistemov je potreba po učinkoviti torej komplicirani kontroli moči (near-far efekt). V sistemu UMTS bazna postaja meri moč signala mobilnega uporabnika in mu z osveževalno frekvenco kar 1600Hz pošilja ukaze za regulacijo oddajne moči.

6.3 Uporaba razširjenega spektra v brezžičnih zemeljskih omrežjih

Sistemi z razširjenim spektrom so bili sprva namenjeni izključno vojaški uporabi. Kasneje so se začeli uporabljati tudi v komercialne namene. Uporabo teh sistemov je močno pospešila deregulacija na področju uporabe frekvenčnega spektra. Regulativna telesa so namreč sprostila in dovolila prosto oddajo z razširjenim spektrom v določenih delih uporabne pasovne širine. Frekvenčni pasovi namenjeni prosti uporabi sodijo bodisi v skupino ISM (Industrial, Scientific and Medical) ali U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure). Frekvenčna področja ISM so področja okoli frekvenc 915MHz, 2.4GHz, 5.8GHz in 24GHz. Področje U-NII obsega frekvence od 5.2 do 5.8GHz. Frekvenčna področja pa tudi zahteve do naprav, ki v teh delih spektra oddajajo (minimalni razširitveni faktor pri razširjanju spektra, maksimalna oddajna moč, maksimalna izotropična izsevana moč o.z. EIRP itd.) se med posameznimi regijami/državami nekoliko razlikujejo. V Kanadi tako naprimer velja predpis $P_{max}=1W$ in $EIRP_{max}=4W$. V Evropi je zahtevana maksimalna oddajna moč $P_{max}=100mW$, kar v praksi pomeni doomet okoli 20km. Ravno zaradi omejitev moči sistemi z razširjanjem spektra niso primerni za prenose na zelo velike razdalje.

Sistemi so možni v konfiguraciji točka-točka in točka-več točk. Sistemom, ki delujejo v konfiguraciji točka-več točki pogosto pravimo tudi brezžična lokalna omrežja (Wireless LAN).

Sistemi v konfiguraciji točka-točka so enostavni, sestavljajo jih pari modemov. Modemi omogočajo zelo različne hitrosti, večinoma od 9.6Kb/s pa do 11Mb/s, na manjše razdalje so hitrosti lahko tudi večje. Domet zvez je v grobem odvisen od delovne frekvence, izhodne moči oddajnika, usmerjenosti anten in interferenčnih pogojev. Običajno imajo zveze v nižjem frekvenčnem pasu večji domet.

Brezžična lokalna omrežja (Wireless LAN) delujejo podobno kot žična LAN omrežja, le prenosni medij je radijska zveza. To pomeni, da razširjanje spektra uporabljajo le kot način modulacije, ne uporabljajo pa kodnega multipleksa (CDMA). Sodostop v teh omrežjih poteka po eni od možnih različic sodostopa z zaseganjem medija. Delujejo torej lahko po nestandardnih proizvajalčevih protokolih ali pa po standardnih protokolih iz družine IEEE802.11. Standardi družine 802.11 so namenjeni predvsem povezovanju na majhne razdalje. Definirajo fizični sloj in dostop do medija (MAC- Media Access Control), ki predstavlja del povezavnega nivoja. Z časom se je razvilo več različic standarda, zato govorimo o družini standardov. Najpogostejši so 802.11, 802.11a, 802.11b, ter 802.11g. Razlikujejo se predvsem po nominalnih prenosnih hitrostih in frekvenčnem področju, v katerem delujejo ter tudi po načinu prenosa (modulacije). Standard 802.11 na fizičnem nivoju predvideva uporabo načina FHSS ali DSSS v 2.4Ghz frekvenčnem pasu. Standard 802.11a predvideva prenos na frekvencah okoli 5GHz in namesto FHSS/DSSS uporablja ortogonalno frekvenčno modulacijo (OFDM- Orthogonal Frequency Division Multiplex), torej ne gre za prenos z razširjenim spektrom. Standard 802.11b predvideva prenos v frekvenčnem pasu okoli 2.4GHz in uporablja DSSS način razširjanja spektra. Standard 802.11g predvideva višje prenosne hitrosti in tako DSSS kot tudi OFDM način prenosa.

7 ZAKLJUČEK

V pričujočem seminarskem delu sem predstavil različne načine prenosa z razširjenim spektrom, skupaj z njihovimi prednostmi in slabostmi in nakazal v katerih sistemih se tak način prenosa najpogosteje uporablja. Razširjanje spektra lahko služi le kot način modulacije, pri čimer izkoriščamo ugodne lastnosti, ki jih prinaša, predvsem odpornost na razširjanje signala po večih poteh in odpornost na ozkopasovne motnje. Poleg tega nam prenos z razširjenim spektrom ponuja tudi poseben način sodostopa večih uporabnikov, ki mu pravimo kodni sodostop. Ker sta prenos z razširjenim spektrom in kodni sodostop neposredno povezana, sem v prvem delu seminarske naloge na teoretičen način predstavil tako principe razširjanja spektra, kot tudi kodnega sodostopa. Pokazal sem tudi, da FDMA in TDMA načina sodostopa predstavljata le poseben primer kodnega sodostopa, zato lahko govorimo o posplošenem modelu kodnega sodostopa. Ob izpeljavi posplošenega modela in kriterijev za ocenjevanje družin kod, sem napravili kar nekaj poenostavitev, saj sem želel predstaviti le ideje, ki se skrivajo v ozadju prenosa z razširjenim spektrom. Sledil je opis različnih načinov razširjanja spektra, nato pa še nekoliko bolj praktično obarvano poglavje o uporabi razširjenega spektra in kodnega sodostopa v obstoječih telekomunikacijskih sistemih.

Frakvenčni spekter je omejena in zato tudi draga dobrina. Snovalci telekomunikacijskih sistemov so torej prisiljeni tehtati med kompleksnostjo sistema in z tem povezano višjo ceno opreme in povečanjem izkoristka prenosa, ki ga takšna oprema doprinese. Tako kot to velja za ostale načine prenosa in multipleksiranja uporabnikov, tudi kodni sodostop ni primerem za vse vrste prenosa. V seminarskem delu sem podal osnovne prednosti in slabosti sistemov z razširjenim spektrom, ki jih je potrebno pretehtati pri odločitvi ali je tak način prenosa v danem primeru upravičen ali ne. Na splošno lahko rečemo, da so sistemi z razširjenim spektrom zaradi svojih lastnosti še posebej primerni za mobilne telekomunikacijske sisteme in za sisteme, kjer je promet izbruhovne narave, saj nam kodni sodostop ponuja nekatere prednosti v primeru mobilnega prenosnega kanala, ponuja pa tudi enostavno obliko statističnega multipleksiranja. Glede na vse večjo težnjo k povečevanju izkoristka pasovne širine, in glede na dejstvo, da postaja problem višje cene zaradi kompleksnosti strojne opreme vse manjši, lahko zaključimo, da imajo sistemi z razširjenim spektrom svetlo prihodnost. To nenazadnje potrjuje tudi vedno večja uveljavljenost teh sistemov v komercialne namene. Pričakujemo torej lahko, da se bo razvoj tehnologij razširjanja spektra in kodnega sodostopa nadaljeval z nezmanjšanim tempom.

8 UPORABLJENA LITERATURA

- [1] Sawasd Tantaratana, Kazi M. Ahmed; *Wireless Applications of Spread Spectrum Systems: Selected Readings*; The Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1998
- [2] R. C. Dixon; *Spread Spectrum Systems*; John Wiley & Sons; 1976
- [3] M. Štular, A. Umek, S. Leonardis; *Tehnologija dostopovnih omrežij v informacijsko povezani družbi*; Elektrotehniška zveza Slovenije; 2000
- [4] S. Tomažič, M. Štular; *Razširjeni spekter v mobilnih komunikacijah: (1) sistemi z razširjenim spektrom*; Elektrotehniški vestnik 65(5): 303-310; 1998
- [5] M. Štular; *Posplošitev modela kodnega dostopa do prenosnega kanala*; doktorska disertacija; 2000
- [6] C. Andren; *A comparison of frequency Hopping and Direct Sequence Spread Spectrum Modulation for IEEE 802.11 Applications at 2.4GHz*; 1997
- [7] J.P. Franciscus; *Non-Cellular Wireless Communication Systems*; available at <http://cas.et.tudelft.nl/~glas/thesis/>
- [8] R.L. Pickholz, D.L. Schilling, L.B. Millstein; *Theory of Spread Spectrum Communications: A Tutorial*; IEEE Transactions on Communications; Vol. 30, No. 5, May 1982
- [9] *Direct Sequence vs. frequency Hopping*; available at <http://www.wavewireless.com/classroom/whitepapers/FHSSvDSSS.pdf>