

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

PODIPLOMSKI ŠTUDIJ ELEKTROTEHNIKE

Predmet: Digitalne komunikacije (2.del)

Načini sodostopa do skupnega prenosnega medija

Seminarska naloga

Avtor: Andrej Hrovat
Mentor: prof. dr. Sašo Tomažič

Ljubljana, Maj 2005

Kazalo:

1. UVOD.....	1
2. DELITEV POSTOPKOV SODOSTOPA.....	2
2.1. NADZOROVANI SODOSTOP	3
2.2. NAKLJUČNI SODOSTOP	3
2.3. CDMA NAČIN SODOSTOPA	4
3. POSTOPKI SODOSTOPA S FIKSNIM DODELJEVANJEM.....	4
3.1. FREKVENČNO PORAZDELJEN SODOSTOP	4
3.2. ČASOVNO PORAZDELJEN SODOSTOP	6
3.2.1. <i>Kombinirani sodostop FDMA/TDMA.....</i>	<i>8</i>
3.3. PROSTORSKO PORAZDELJEN SODOSTOP.....	9
4. KODNO PORAZDELJEN SODOSTOP	10
4.1. DS-CDMA	12
4.2. FH-CDMA	15
4.3. TH-CDMA	17
4.4. HIBRIDNI CDMA	18
5. POSTOPKI SODOSTOPA Z DODELJEVANJEM NA ZAHTEVO	18
5.1. POSTOPKI S POZIVANJEM (POLLING).....	19
5.2. POSTOPKI Z ŽETONOM (TOKEN PASSING).....	20
6. POSTOPKI NAKLJUČNEGA DOSTOPA.....	21
6.1. ALOHA.....	22
6.2. RAZSEKANA ALOHA	23
6.3. REZERVACIJSKA ALOHA	24
6.4. SODOSTOP Z ZAZNAVANJEM NOSILCA – CSMA	25
6.4.1. <i>Nevztrajni CSMA</i>	<i>26</i>
6.4.2. <i>P-vztrajni CSMA.....</i>	<i>26</i>
6.4.3. <i>Zakasnitev razširjanja</i>	<i>27</i>
6.5. SODOSTOP Z ZAZNAVANJEM NOSILCA IN Z ODKRIVANJEM TRKOV – CSMA/CD	28
6.6. SODOSTOP Z ZADRŽEVANJEM - ISMA	29
6.7. PAKETNI SODOSTOP Z REZERVACIJO - PRMA	31
7. ZAKLJUČEK.....	32
8. SEZNAM UPORABLJENIH VIROV.....	33

Kazalo slik:

<i>Slika 1: Razvrstitev potopkov sodostopa</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2: Ločitev kanalov pri frekvenčno porazdeljenem sodostopu.....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 3: Ločitev uporabnikov pri časovno porazdeljenem sodostopu znotraj okvira</i>	<i>6</i>
<i>Slika 4: TDMA s fiksnim dodeljevanjem in paketno komutiranje.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 5: Ločitev uporabnikov pri FDMA/TDMA sodostopu</i>	<i>9</i>
<i>Slika 6: Prostorsko porazdeljen sodostop</i>	<i>10</i>
<i>Slika 7: Ločitev uporabnikov pri kodno porazdeljenem sodostopu</i>	<i>10</i>
<i>Slika 8: Blok diagram DS-CDMA oddajnika.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 9: Prikaz množenja informacijskega signala s psevdonaključno kodo.....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 10: Blok diagram DS-CDMA sprejemnika</i>	<i>13</i>
<i>Slika 11: Razširjanje kot zaščita pred ozkopasovnimi motnjami.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 12: Izločevanje širokopasovnih motenj – signali drugih uporabnikov</i>	<i>14</i>
<i>Slika 13: Vpliv frekvenčno selektivnega presiha na ozkopasovni in razširjeni (širokopasovni) signal.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 14: Zasedenost frekvence pri sodostopu FH-CDMA</i>	<i>15</i>
<i>Slika 15: Blok diagram FH-CDMA oddajnika (a) in sprejemnika (b)</i>	<i>16</i>
<i>Slika 16: Hibridni DS-FH oddajnik.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 17: Primer sistema, ki uporablja postopek sodostopa s pozivanjem</i>	<i>19</i>
<i>Slika 18: Vzajemno delovanje sporočil pozivanja in prenosa pri postopku pozivanja.....</i>	<i>19</i>

<i>Slika 19: Obroč z žetonom</i>	20
<i>Slika 20: Vodilo z žetonom</i>	21
<i>Slika 21: ALOHA</i>	22
<i>Slika 22: S-ALOHA</i>	23
<i>Slika 23: Primerjava izkoriščenosti prenosnih zmogljivosti čiste in razsekane ALOHE</i>	24
<i>Slika 24: R-ALOHA</i>	24
<i>Slika 25: Nevztrajni CSMA</i>	26
<i>Slika 26: 1-vztrajni(zgoraj) in p-vztrajni CSMA (spodaj)</i>	27
<i>Slika 27: Problem zakasnitve razširjanja pri postopku CSMA</i>	28
<i>Slika 28: Zaznavanje trka pri CSMA/CD</i>	29
<i>Slika 29: Časovno usklajevanje pri ISMA</i>	30
<i>Slika 30: Struktura okvirja PRMA v navzgornji povezavi in princip delovanja</i>	31

1. Uvod

V telekomunikacijah, zlasti sodobnih, pogosto nastopi situacija, ko hoče več uporabnikov za komunikacijo uporabljati skupni prenosni medij oziroma kanal. To se dogaja tako v brezžičnih omrežjih, ki uporabljajo radijski komunikacijski kanal, kot tudi v žičnih omrežjih, kjer komunikacijski kanal predstavlja npr. skupni koaksialni kabel. Da pri tem ne bi prihajalo do trkov in medsebojnih motenj, kar bi povzročilo popačenje signalov in njihov nepravilni sprejem, so torej nujni določeni postopki in sporazumi, ki omogočajo uspešen prenos informacij. Postopki sodostopa so torej definirane kot funkcije razporejanja oziroma deljenja skupnih prenosnih virov med uporabniki (terminali) v omrežju.

V večuporabniških telekomunikacijskih sistemih je potrebno zagotoviti učinkovit način sodostopa uporabnikov do skupnega prenosnega medija. Obstaja več različnih načinov deljenja postopkov sodostopa. Postopke sodostopa lahko delimo na [1]:

- sodostop z zaseganjem kanala in
- sodostop z delitvijo zmogljivosti.

Pri sodostopu z zaseganjem kanala uporabniki zasegajo medij v celoti. To se največkrat dogaja naključno (ne pa vedno – zaseganje na osnovi žetona), kar povzroča konflikte, zmanjšuje učinkovitost pri večjih obremenitvah in otežuje zagotavljanje kakovosti storitev. Najosnovnejša postopek sodostopa z zaseganjem zmogljivosti je ALOHA, kjer uporabniki naključno po potrebi oddajajo podatkovne pakete in pogosto prihaja do konfliktov. Pri sodostopu z delitvijo zmogljivosti pa se kapaciteta medija razdeli na več delov, kar omogoča sočasno komunikacijo več uporabnikov. Zaradi tega konfliktov pri teh postopkih praviloma ni, saj je določen kanal v nekem trenutku dodeljen enemu samemu uporabniku. Med postopke sodostopa z delitvijo zmogljivosti spadajo FDMA, TDMA, CDMA in SDMA. Pogosto pa se uporablja tudi kombinacija obeh načinov sodostopa (GSM).

Eden od delitve načinov sodostopa, ki bo podrobneje predstavljen v nadaljevanju in na podlagi katerega je sestavljena tudi vsebina naloge, je delitev na naključni in nadzorovani sodostop do skupnega prenosnega medija. Pri slednjih postopkih praviloma ne prihaja do konfliktnih situacij in medsebojnih motenj, saj mora vsak uporabnik pred samo komunikacijo pridobiti pravico za dostop do skupnega prenosnega medija. To je urejeno bodisi z uporabo žetona, tehnikami pozivanja (dodeljevanje zmogljivosti na zahtevo) ali s fiksnim dodeljevanjem (FDMA, TDMA) komunikacijskih virov. Pri naključnem sodostopu je verjetnost, da pride do konfliktnih situacij zelo velika, saj poskušajo uporabniki naključno, brez nadzora in dovoljenja, zasegati celotne zmogljivosti kanala.

Posopki sodostopa se med seboj močno razlikujejo, vendar morajo vsi čim boljše izpolnjevati nekatere splošne zahteve:

- Prva in glavna naloga večine postopkov sodostopa je delitev skupnega prenosnega medija med uporabniki sistema. Da bi dosegli to, morajo postopki nadzorovati način dostopa uporabnikov do kanala z zahtevanjem da se uporabniki prilagodijo določenim pravilom. Postopki torej določajo način dodeljevanja kapacitet kanala uporabnikom.
- Postopki morajo izvajati dodeljevanje virov tako, da je prenosni medij učinkovito uporabljen. Učinkovitost se ponavadi meri v pretoku kanala in zakasnitvi prenosa.
- Dodeljevanje naj bi bilo, glede na posamezne uporabnike, pravično: to pomeni, da se prioritete dodeljen posameznim uporabnikom ne upoštevajo, vsak uporabnik naj bi dobil enako dodeljeno kapaciteto virov.
- Postopki naj bi bili prilagodljivi in naj bi podpirali različne tipe prometa (govor, podatki).

- Postopki morajo biti stabilni. Torej, če je sistem uravnotežen, mora ob povečanju prometa preiti v novo ravnotežno točko. Pri nestabilnih postopkih pa povečani promet prisili sistem, da vedno bolj leze proti vedno večjemu prometu, pretok pa se zmanjšuje.
- Postopek mora biti odporen na napake opreme in na spremenljive razmere. Če nek uporabnik ne deluje pravilno to ne sme občutneje vplivati na delovanje ostalega sistema.

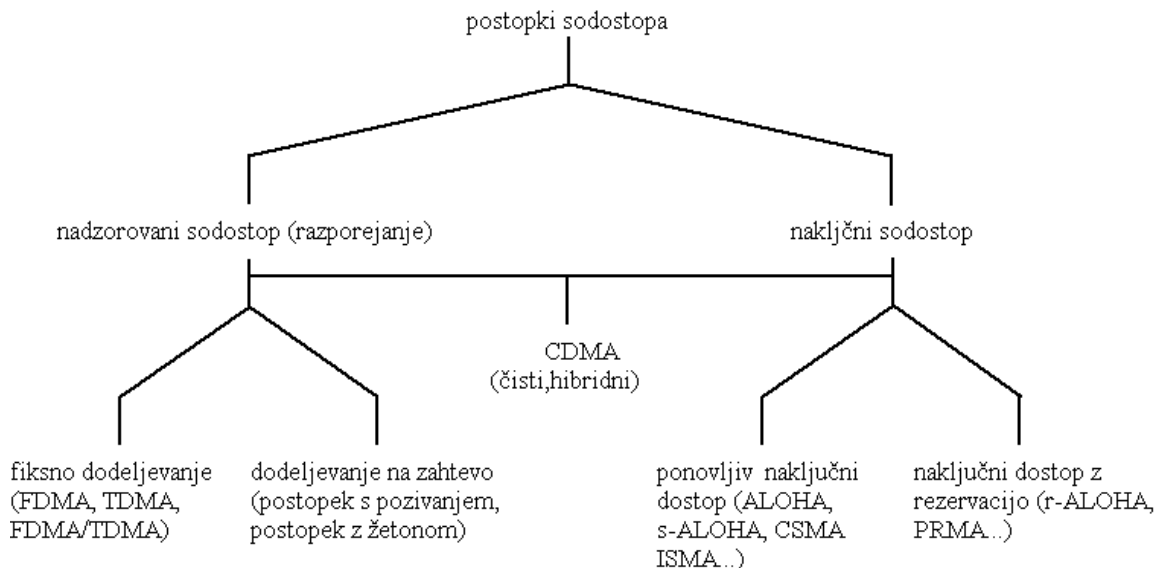
V brezžičnem okolju morajo imeti postopki sodostopa še določene dodatne lastnosti, ki upoštevajo spremenljive razmere kanala. V brezžičnem mobilnem okolju se morajo postopki sodostopa spopasti s pojavom skrite in izpostavljene postaje, učinkom večpotnega presihanja, učinkom sokanalne interference, ki je prisotna v celičnih sistemih in je posledica uporabe istih frekvenčnih pasov v različnih celicah in pojavom bližnjo-daljnjega učinka (prenos oddaljenih postaj je bolj slabljen kot prenos bližnjih postaj).

Seveda pa postopki sodostopa ne izpolnjujejo vseh predhodno omenjenih lastnosti, saj so medsebojno konfliktne. Torej je pri postopkih sodostopa nujno potrebno medsebojno usklajevanje različnih lastnosti. Le te pa imajo v različnih postopkih različno prioriteto, kar je odvisno od namembnosti posameznih postopkov in okolja v katerem naj bi delovali.

2. Delitev postopkov sodostopa

Razvitih je bilo mnogo različnih principov, ki omogočajo hkraten dostop večih uporabnikov do skupnega prenosnega kanala. Predlaganih je bilo kar nekaj načinov delitev postopkov sodostopa v skupine. Že v uvodu smo omenili dva načina delitve. V tej nalogi so postopki sodostopa razporejeni v tri osnovne skupine (Slika 1):

- naključni sodostop,
- nadzorovani sodostop in
- CDMA način sodostopa.



Slika 1: Razvrstitev potopkov sodostopa

Postopki razporejenega oziroma nadzorovanega sodostopa se izogibajo situacijam kjer hoče več uporabnikov hkrati dostopati do prenosnih kapacitet z razporejanjem in urejanjem prenosa posameznih uporabnikov. To dosežejo bodisi na fiksen način, kjer je vsakemu uporabniku

vnaprej dodeljen del prenosne kapacitete, ali na način dodeljevanja na zahtevo, kjer razporejanje poteka le med uporabniki, ki hočejo v danem trenutku dostopati do skupnega kanala.

Pri uporabi postopkov naključnega dostopa uporabniki ne morejo biti prepričani, da med samim prenosom ne bo prišlo do trkov, ki bi jih lahko povzročili drugi, trenutno morebiti aktivni uporabniki. Torej morajo biti ti postopki sposobni razrešiti nastale konfliktna situacije.

Postopke naključnega sodostopa lahko delimo v nadaljevanju na ponovljivi naključni dostop in na naključni dostop z rezervacijo. Pri slednjem uporabnik na začetku za dostop do kanala uporabi naključen način dostopa, v nadaljevanju pa je prenos tega uporabnika urejen dokler nima ničesar več za prenašati. Pri tem obstajata dva osnovna načina znana kot implicitna (PRMA) in eksplicitna (R-ALOHA) rezervacija. Pri eksplicitni rezervaciji se uporabljajo kratki rezervacijski paketi, ki zaprošajo za pravico prenašanja ob določenih časih. Implicitni način pa ne uporabljajo nikakršnih rezervacijskih paketov.

Način oziroma postopek sodostopa CDMA (Code Division Multiple Access) ne moremo uvrstiti v nobeno prej omenjeno skupino. V principu je to postopek nadzorovanega sodostopa, kjer je omogočen hkraten dostop večim uporabnikom do prenosnih kapacitet brez konfliktov. Če pa število uporabnikov, ki istočasno uporabljajo isti prenosni kanal, naraste nad določen prag, pa se pojavijo trki in motnje. CDMA načine sodostopa lahko razdelimo na čiste CDMA in hibridne postopke CDMA.

2.1. Nadzorovani sodostop

Postopki nadzorovanega sodostopa se z urejanjem prenosa vseh uporabnikov izogibajo situacijam v katerih poskuša več uporabnikov istočasno dostopati do istega prenosnega kanala. Uporabniki prenašajo na urejen načrtovan način tako, da je vsak prenos uspešen. Poznamo dve vrsti razporejenega oziroma nadzorovanega sodostopa:

- *Sodostop s fiksnim dodeljevanjem.* Pri teh postopkih je razpoložljiva kapaciteta kanala razdeljena med uporabniki tako, da ima vsak uporabnik na razpolago nespremenljivi del kapacitete, ne glede na njegovo aktivnost. To lahko pomeni tudi slab izkoristek prenosnih virov, saj se lahko zgodi, da uporabnik, ki mu je bil kanal dodeljen, nima podatkov za prenos. Ta delitev je narejena po času ali frekvenci. Pri *časovno porazdeljenim sodostopu* (TDMA – Time Division Multiple Access) je celotno frekvenčno območje namenjeno vsem uporabnikom, ki pa ga ne uporabljajo ves čas, pač pa samo v vnaprej predpisanih periodično ponavljajočih časovnih intervalih. V *frekvenčno porazdeljenem sodostopu* (FDMA – Frequency Division Multiple Access) je pasovna širina kanala (frekvenčni pas) razdeljena na neprekrivajoče frekvenčne pasove in vsakemu uporabniku je dodeljen nespremenljiv pas, ki je na voljo le temu uporabniku.
- *Sodostop z dodeljevanjem na zahtevo.* Ti postopki dovoljujejo prenašanje uporabnikom le v primeru, da so aktivni, torej imajo nekaj za prenašati. Aktivni uporabniki prenašajo na metodičen urejen način. Pri postopkih dodeljevanja na zahtevo razlikujemo med centraliziranim in porazdeljenim nadzorom. Pri centraliziranem nadzoru en sam osebek ureja prenose (postopek s pozivanjem), pri porazdeljenem nadzoru pa so vsi uporabniki vključeni v proces urejanja sodostopa (postopek z žetonom).

2.2. Naključni sodostop

Pri postopkih naključnega sodostopa uporabnik, ki je pripravljen na prenos, ne ve kdaj natanko lahko prične s prenosom, da pri tem ne bi prišlo do motenj in trkov s prenosi, ki jih

izvajajo ostali uporabniki. Uporabnik lahko zazna (z zaznavanjem kanala) trenutno potekajoč prenos ali pa ne, vendar pa nima nobene točne informacije o uporabnikih pripravljenih za prenos. Torej, če več uporabnikov pripravljenih za prenos začnejo svoje prenose ob približno enakih časih, bo prišlo do trkov in noben uporabnik ne bo mogel uspešno prenesti svojih informacij. Možne napake v prenosu povzročajo, da je pojav uspešnega prenosa bolj ali manj naključen proces. Postopki naključnega dostopa so zasnovani tako, da so sposobni reševati trke, ki se pojavijo ko hoče več uporabniki hkrati prenašati.

Kot je razvidno iz slike 1, delimo postopke naključnega sodostopa do skupnega prenosnega medija v dve skupine, na *ponovljiv naključni dostop* med katere spadajo ALOHA, razsekana ALOHA, CSMA, ISMA in na *naključen dostop z rezervacijo* kamor spada rezervacijska ALOHA in PRMA. Pri uporabi postopkov ponovljivega naključnega dostopa je možnost da pride do trkov pri vsakem prenosu, medtem ko pri uporabi druge skupine postopkov uporabnik le za prvi prenos ne ve kako bi se izognil morebitnimi trki. Ko pa enkrat uporabnik uspešno zaključi svoj prvi prenos (ima dostop do kanala), bo nadaljnji prenos potekal načrtovano na urejen način tako, da ne bo prihajalo do trkov. Torej je po uspešnem prenosu uporabniku dodeljena celotna oziroma del kapacitete kanala, ki pa jo izgubi, če nek vnaprej določen čas ne prenaša ničesar.

2.3. CDMA način sodostopa

Kodno porazdeljeni sodostop (CDMA – Code Division Multiple Access) je zasnovan na komunikaciji z razširjenim spektrom (SS – Spread Spectrum), kjer je celotno frekvenčno območje ves čas na voljo vsem uporabnikom, med seboj pa se ločijo po uporabljenih kodah. Ko sprejemnik sprejme širokopasovni signal, mora s pomočjo dodeljene kode uporabnika pretvoriti širokopasovni signal nazaj v originalni signal. Med tem procesom je moč zelenega signala skrčena v pasovno širino izvirnega signala, širokopasovni signali drugih uporabnikov pa ostane širokopasovni signali in so, v primerjavi z zelenim signalom, videti kot šum.

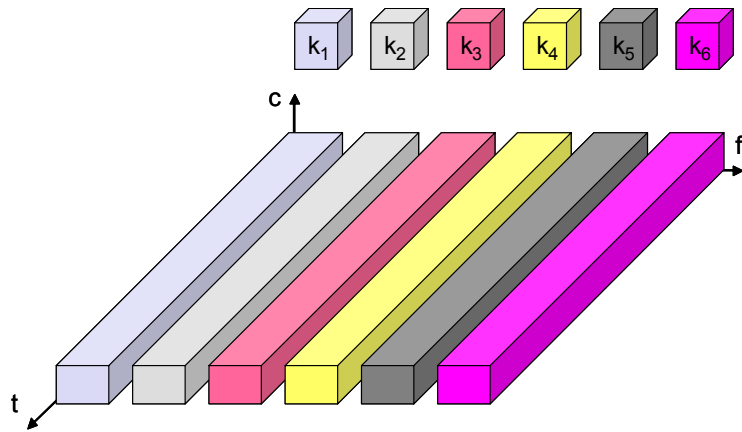
Dokler je število uporabnikov, ki se lahko motijo med seboj (sočasno prenašajo informacije), pod določenim pragom, je razmerje signal/šum dovolj veliko za izločanje zelenega signala ne da bi pri tem prišlo do napak in posledično napačnega prenosa in motenj. V tem primeru se postopek CDMA obnaša kot postopek nadzorovanega sodostopa. Če pa število uporabnikov, ki sočasno dostopajo do skupnega prenosnega kanala, naraste nad določeno mejo, postanejo motnje prevelike in ni več mogoče izločiti zelenega signala, kar privede do nepravilnih prenosov. Torej postopek v osnovi spada med postopke nadzorovanega sodostopa le dokler je število uporabnikov, ki sočasno dostopajo do skupnega prenosnega kanala, dovolj majhno. Zaradi tega postopke CDMA ne moremo uvrstiti niti med postopke nadzorovanega sodostopa niti naključnega sodostopa.

Obstaja več različnih izvedb postopka CDMA, ki jih delimo na čiste CDMA in hibridne postopke CDMA. Med prve spada DS-CDMA, FS-CDMA in TH-CDMA, ki bodo podrobneje opisani v nadaljevanju.

3. Postopki sodostopa s fiksnim dodeljevanjem

3.1. Frekvenčno porazdeljen sodostop

Frekvenčno porazdeljen sodostop (FDMA – Frequency Division Multiple Access) razdeli celotni frekvenčni pas na več individualnih pasov oziroma kanalov ločenih z varovalnim pasom.



Slika 2: Ločitev kanalov pri frekvenčno porazdeljenem sodostopu

Za preprečitev motenj med posameznimi kanali se med sosednjimi kanali nahaja neka varnostna razdalja imenovana varovalni pas. Motnje povzročajo predvsem neidealni kanalni filtri in spreminjanje nosilne frekvence zaradi toleranc in doplerjevih premikov. Količina medkanalnih motenj je torej odvisna od kvalitete uporabljenih kanalnih filtrov, frekvenčne nenatančnosti in širine varovalnih pasov. Za široke varovalne pasove so zahteve po natančnosti nižje ali pa nastane manj medkanalnih motenj. Pri ozkih varovalnih področjih morajo biti uporabljeni kanalni filtri višje kvalitete, frekvence pa morajo biti natančnejše. Tako je dosežena učinkovitejša izraba razpoložljive pasovne širine. Tipična širina varovalnega pasa je približno ena desetina zelenega pasa.

Razpoložljiva pasovna širina W je razdeljen na M kanalov enake pasovne širine B . Tako je vsakemu uporabniku dodeljen kanal s pasovno širino, ki je enaka $B = W/M$. Torej je kapaciteta vsakega kanala enaka:

$$R_{FDMA} = (W/M) \log_2(1 + S/N) = R/M. \quad (3.1)$$

V enačbi 3.1 predstavlja S/N razmerje signal/šum, oznaka R pa označuje kapaciteto celotnega kanala v bitih na sekundo (bit/s) in je podana za enačbo:

$$R = W \log_2(1 + S/N). \quad (3.2)$$

Torej je kapaciteta posameznega kanala, pri konstantnem razmerju signal/šum, razdeljena med M uporabniki. Vendar pa ima vsak uporabnik dejansko na razpolago pasovno širino, ki je nekoliko manjša od teoretično izračunane, saj del celotne pasovne širine zasedejo varovalni pasovi, ki se nahajajo med posameznimi kanali. Torej je uporabna pasovna širina kanala B_{ch} manjša od pasovne širine B za širino varovalnega pasa B_g kot je to razvidno v sledeči enačbi:

$$B_{ch} = B - B_g. \quad (3.3)$$

Učinkovitost postopka sodostopa FDMA je definirana s spodnjo enačbo:

$$\eta_{FDMA} = \frac{\text{uporabna pasovna širina}}{\text{celotna pasovna širina}} = \frac{MB_{ch}}{W} = \frac{B_{ch}}{B_{ch} + B_g}. \quad (3.4)$$

Uporabniški signali so pri FDMA nekorelirani. To pomeni, da je za vsak par signalov x_1, x_2 njuna korelacijska funkcija enaka 0, in sicer pri vsakem časovnem zamiku τ , kot je to podano v enačbi 3.5.

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t+\tau)dt = 0, \quad \text{za } \forall \tau \quad (3.5)$$

FDMA ima določene dobre in slabe lastnosti. Prednosti FDMA so:

- neproblematična in zrela tehnologija,
- nizka prenosna moč terminalov (nepretrgano prenašanje),
- ni potrebe po izanačevanju (nizke hitrosti prenosa, ozkopasoven sistem),
- ni potrebe po sinhronizaciji med uporabniki.

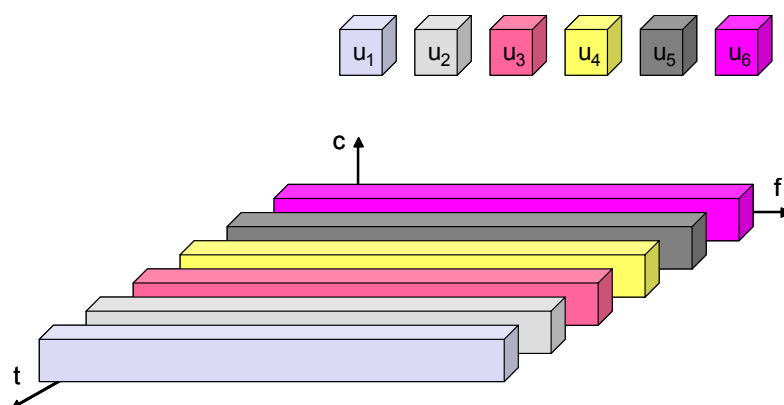
Med slabe lastnosti FDMA-ja pa spadajo:

- FDMA je neprilagodljiv in se ne prilagaja različnim podatkovnim hitrostim (prenosna hitrost je konstantna in dokaj majhna) – to je možno rešiti s povečanjem števila stanj uporabljenih simbolov ali z dodeljevanjem uporabnikom večih frekvenčnih oken, katerih pasovna širina je lahko tudi spremenljiva,
- FDMA je občutljiv na frekvenčno selektivno presihanje,
- izguba kapacitete močno narašča z številom kanalov (povečanje števila varovalnih pasov),
- za omejevanje motenj med sosednjimi kanali in vpliva nelinearnosti je potreben nadzor moči v navzgornji povezavi (bližnji-daljni efekt),
- za omejitev motenj med kanali je potreben natančen nadzor frekvence,
- potrebni ozkopasovni filtri (povečajo stroške).

3.2. Časovno porazdeljen sodostop

V digitalnih sistemih ni potrebe po nepretrganem prenosu, saj uporabniki ne uporabljajo dodeljene pasovne širine ves čas. V takih sistemih je *časovno porazdeljen sodostop* (TDMA – Time Division Multiple Access) komplementarna sodostopovna tehnika FDMA-ju.

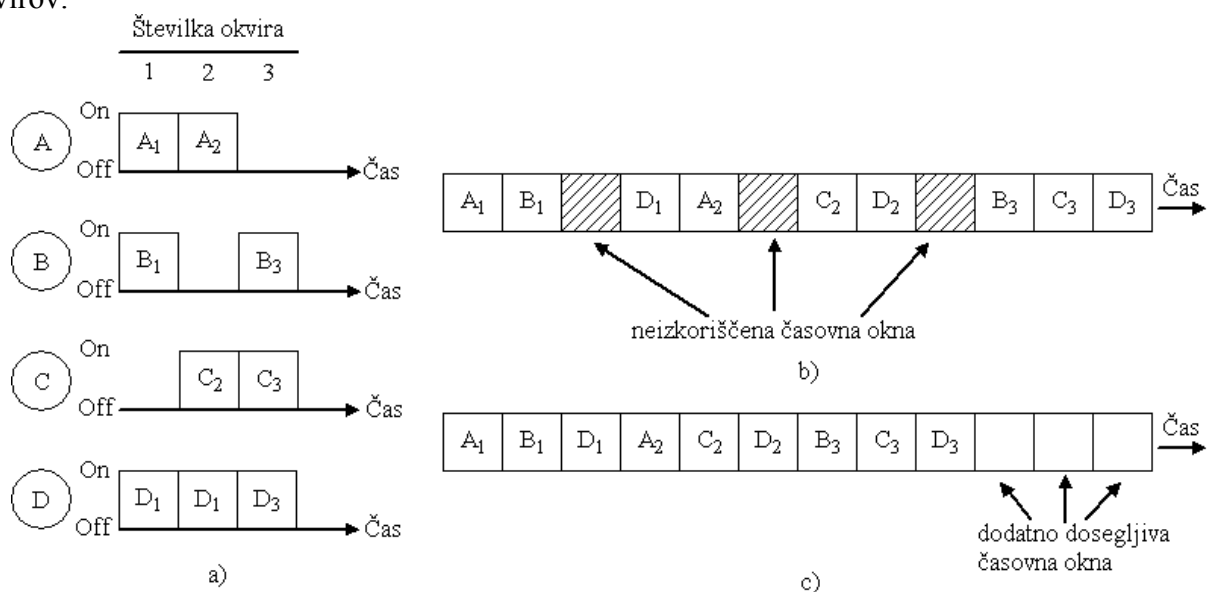
Pri TDMA je za razliko od FDMA celotno frekvenčno območje namenjeno vsem uporabnikom, ki pa ga ne uporabljajo ves čas, pač pa samo v naprej predpisanih časovnih okvirih. Pri TDMA-ju je čas razdeljen v enakomerne časovne intervale, ki se imenujejo okviri. Vsak okvir je deljen na časovna okna, ki so dodeljena uporabnikom (Slika 3). Uporabnik lahko nemoteno prenaša v dodeljenem časovnem oknu. V tem času ima na voljo celotne vire sistema.



Slika 3: Ločitev uporabnikov pri časovno porazdeljenem sodostopu znotraj okvira

Neuporabljena časovna področja med posameznimi dodeljenimi okni se imenujejo varovalni časi, ki so potrebni, ker signali oddaljenih uporabnikov potrebujejo več časa, da prispejo do cilja (bazne postaje, drugega terminala) kot pa signali uporabnikov, ki so bližje (bližnji-daljni efekt). Torej varovalni čas prilagaja spremenljive zakasnitve med bližnjimi in daljnimi uporabniki in na ta način zmanjšuje motnje. Bližnji daljni efekt povzroča tudi nestabilnost moči signala (kot pri FDMA), vendar ne povzroča motenj med sosednjimi kanali, saj je v danem trenutku aktiven le en uporabnik.

Najpreprostejša shema TDMA se imenuje *TDMA s fiksnim dodeljevanjem*, kar pomeni, da je M časovnih oken, ki sestavljajo vsak okvir, vnaprej (dolgoročno) dodeljeno posameznim uporabnikom. Ta shema je izjemno učinkovita v primerih, ko so zahteve uporabnikov predvidljive in v primeru velikega prometa (časovna okna so večina časa zapolnjena). Za rafalen in raztresen promet pa je omenjen pristop potraten. To je lepo razvidno iz spodnje slike (Slika 4), kjer so v vsakem okviru na razpolago štiri časovna okna. Vsako okno je vnaprej individualno dodeljeno uporabnikom A , B , C in D . Na sliki 4a vidimo tipični profil delovanja štirih uporabnikov. V času prvega časovnega okvira uporabnik C ne komunicira; v času drugega okvira je neaktiven uporabnik B in v času tretjega okvira je neaktiven uporabnik A . Torej so časovna okna znotraj okvira pri TDMA s fiksnim dodeljevanjem vnaprej dodeljena, kar povzroča tratenje časovnih oken v primeru neaktivnosti uporabnika (Slika 4b). Ko so zahteve uporabnikov nepredvidljive, kot v predhodnem primeru, je princip dinamičnega dodeljevanja oken primernejši. Take sheme so znane kot različni paketno komutirani sistemi. Učinek takega pristopa dodeljevanja oken se vidi na sliki 4c, kjer so uporabljena vsa časovna okna v okviru. Na ta način privarčujemo kapaciteto komunikacijskih virov.



Slika 4: TDMA s fiksnim dodeljevanjem in paketno komutiranje

Dodeljena časovna okna morajo biti dovolj široka in dovolj pogosta, da se zagotovi zahtevana prenosna kapaciteta. Če je po analogiji iz prejšnjega poglavja maksimalna prenosna hitrost celotnega frekvenčnega področja, ki je na voljo, R in če želimo, da bo vsakemu uporabniku zagotovljena prenosna hitrost R_{TDMA} , potem je po enačbi 3.6 možno maksimalno število uporabnikov M , s tem pa tudi toliko enakomernih časovnih oken, ki se periodično ponavljajo.

$$M = R / R_{TDMA} \quad (3.6)$$

Torej je celoten čas T razdeljen med M uporabniki. Vsak od njih ima na voljo časovno okno znotraj okvira dolžine $T/M=T_f$, kjer je T_f dolžina časovnega okna. Predhodna trditev pa ne drži v celoti, saj se med posameznimi časovnimi okni nahaja tako imenovani varovalni čas T_g , ki je potreben zaradi nepredvidenih zakasnitev posameznih signalov. Zaradi tega je sama učinkovitost TDMA-ja manjša od teoretično možne. Učinkovitost je podana z enačbo 3.7, v kateri je upoštevan tudi čas trajanja glave paketa T_h , ki je prenesen v časovnem oknu:

$$\eta_{TDMA} = \frac{\text{uporabni čas}}{\text{trajanje okvira}} = 1 - M \frac{T_g + T_d}{T_f} \quad (3.7)$$

Z natančnejšo sinhronizacijo med uporabniki (časovna usklajenost uporabnikov), ki je pri sodostopu TDMA nujno potrebna, je možno varovalni čas T_g zmanjšati (uporaba boljših sprejemnikov ali uporaba diferenčne ali nekoherentne modulacije). Če je sinhronizacija med uporabniki dovolj natančna, se je možno varovalnim časom popolnoma izogniti. Tako se multipleksirani TDMA signali pojavijo kot nepretrgani bitni tok. V primerjavi s postopkom FDMA, je pri TDMA zmanjševanje pretoka zaradi povečevanja uporabnikov manjše.

V primerjavi z nepretrganem prenosom, morajo terminali pri TDMA prenašati (v dodeljenem časovnem oknu) pri višjih prenosnih hitrostih (rafalne hitrost) $R_B \approx M \cdot R_{cont.}$, kjer je R_B rafalna hitrost znotraj okna in $R_{cont.}$ hitrost nepretrganega prenosa. Povprečna prenosna moč ostaja enaka. Vendar pa mora biti, za vzdrževanje enakega razmerja signal/šum, temenska prenosna moč večja: $P_{TDMA} \approx M \cdot P_{cont.}$.

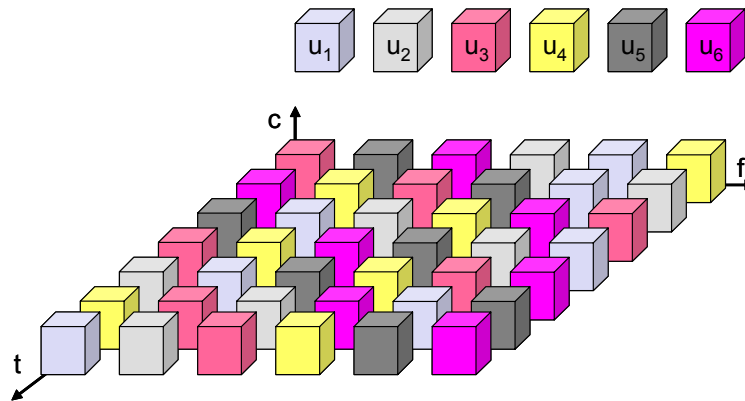
Med dobre lastnosti sodostopa TDMA spadajo predvsem spremenljiva hitrost prenosa, saj je možno enemu samemu uporabniku dodeliti več časovnih oken znotraj okvira, lahko pa je tudi enemu uporabniku dodeljeno različno število časovnih oken znotraj vsakega okvira. Tu ni potrebne po varovalnem pasu (učinkovitejša izraba spektra) in nadzoru prenosne moči terminalov. Vendar pa morajo terminali zaradi visoke rafalne hitrosti zagotavljati višjo temensko moč prenosa. Zaradi zmanjšanja motenj med sosednjimi uporabniki, morajo biti med časovnimi okni (med posameznimi kanali) tako imenovani varovalni čas. Zaradi časovne usklajenosti pa je nujno potrebna sinhronizacija med uporabniki, kar močno povečuje režijo.

3.2.1. Kombinirani sodostop FDMA/TDMA

Postopek FDMA razdeli razpoložljiv frekvenčni pas na več manjših pasov, medtem ko TDMA razdeli čas na časovna okna. Slika 5 prikazuje bolj splošno dodeljevanje skupnega prenosnega medija. V tem primeru je določen del frekvenčnega pasa na razpolago uporabniku le predpisano periodo časa – za razliko od FDMA, kjer ima uporabnik ves čas na razpolago del celotnega frekvenčnega pasa. Tak način sodostopa se imenuje *kombinirani* FDMA/TDMA, ki je zlasti uporaben v primerih, ko hoče veliko število terminalov dostopati do bazne postaje ali satelita.

Pri dodeljevanju frekvenčnih pasov predvidevamo enako porazdelitev celotne pasovne širine W med M uporabniki (kanali) tako, da je M razdeljenih frekvenčnih pasov širine $B=W/M$ [Hz] nepretrgano na voljo določeni skupini uporabnikov. Podobno je pri dodeljevanju časovnih oken, kjer je časovna os razdeljena na okvire dolžine T , okviri pa so razdeljeni na N časovnih oken dolžine T/N . Predvidevamo, da so uporabniki med seboj časovno sinhronizirani, dodeljena okna pa se periodično nahajajo znotraj vsakega okvira. Vsak uporabnik v vsakem frekvenčnem pasu širine B ima dovoljenje za uporabo časovnega okna, ki mu je dodeljen in se periodično ponavlja. V tem času (čas trajanja okna) ima dovoljenje za uporabo celotno pasovne širine dodeljenega kanala.

Pristop zagotavlja zelo dobro zaščito pred prisluškovanjem in frekvenčno selektivnimi motnjami, vendar pa je zahtevana tvorba okvirjev in sinhronizacija.



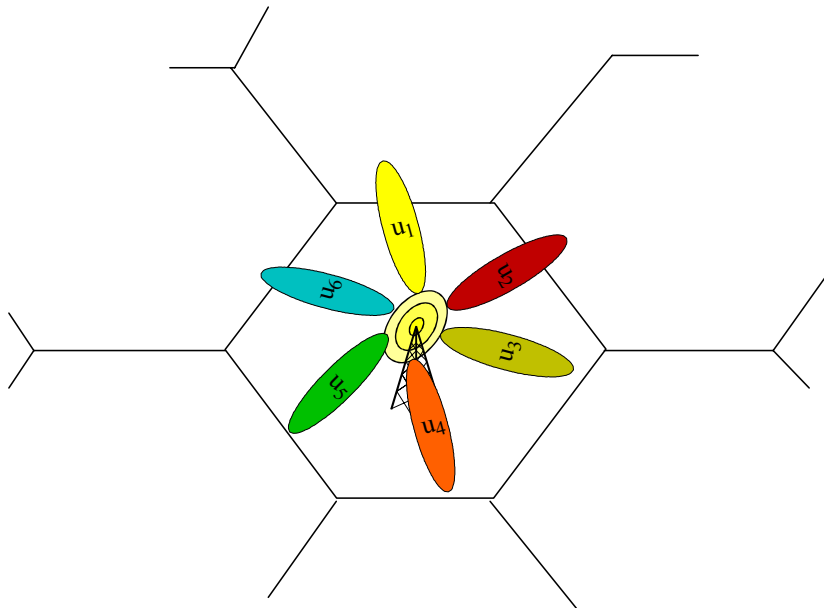
Slika 5: Ločitev uporabnikov pri FDMA/TDMA sodostopu

Opisani pristop uporablja *globalni sistem mobilnih komunikacij* (GSM – Global System for Mobil communications). To je tako imenovan sistem TDMA z več nosilci. Frekvenčni pas širine 25 MHz je razdeljen na 124 nosilnih frekvenc pasovne širine 200 kHz. Vsak frekvenčni kanal pa vsebuje 8 TDMA pogovornih kanalov.

Postopek sodostopa FDMA/TDMA uporablja tudi *prizemni snopovni radio* (TETRA – Terrestrial Trunked Radio) je standard za *profesionalni mobilni radio* (PMR – Professional Mobil Radio) in *mobilni radio z zasebnim dostopom* (PAMR- Privat Access Mobil Radio). Razmak med nosilci je 25 kHz, vsak nosilec pa vsebuje štiri časovna okna, ki omogočajo prenos govornega in podatkovnega prometa. Maksimalna možna hitrost prenosa podatkov je 7,2 kbit/s v enem časovnem oknu. Z združitvijo vseh štirih časovnih oken pa je možno doseči podatkovno hitrost 28,8 kbit/s pri popolnoma nezavarovanem prenosu.

3.3. *Prostorsko porazdeljen sodostop*

V primeru prostorsko porazdeljenega sodostopa (SDMA) so signali različnih uporabnikov ločeni prostorsko. To je v radijskih sistemih možno doseči z delitvijo geografskega področja na celice in sektorizacijo le teh (Slika 6). Signali, ki se prostorsko ne prekrivajo, se ne motijo. Pri delitvi območja na celice je možno v neki celici ponovno uporabiti že uporabljen nabor frekvenc v drugi celici. Da bi preprečili motnje pa sosednje celice ne smejo uporabljati enakega nabora frekvenc. Sektorizacija celic je možno doseči z uporabo anten z ozkimi usmerjenimi žarki, kar omogoča ustvariti več prostorsko ločenih kanalov znotraj iste celice, ki uporabljajo isto frekvenco in se med seboj ne motijo. Torej je možno z drobljenjem celičnih sistemov in z uporabo zmogljivih antenskih sistemov potencialno močno povečati kapacitete sistemov.

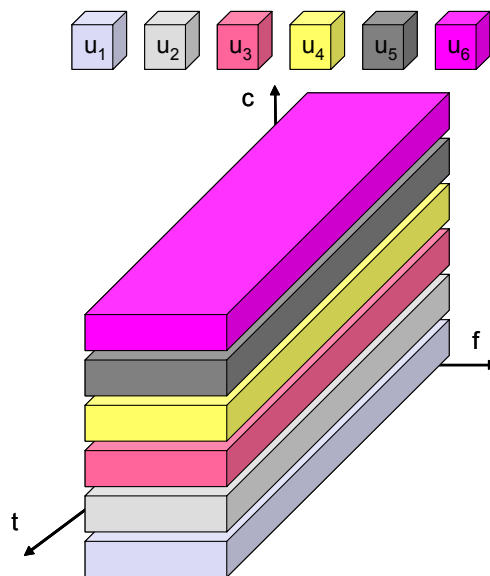


Slika 6: Prostorsko porazdeljen sodostop

Prostorsko porazdeljeni sodostop se uporablja tudi v satelitskih sistemih, kjer se uporablja sprejemna antena z več žarki, ki omogoča sočasen dostop do satelita večim uporabnikom z različnih geografskih področij. Pri tem je uporabljen isti frekvenčni pas, saj so signali prostorsko ločeni.

4. Kodno porazdeljen sodostop

Princip *kodno porazdeljenega sodostopa* (CDMA – Code Division Multiple Access) je zasnovan na komunikaciji z razširjenim spektrom (SS – Spread Spectrum), kjer je celotno frekvenčno območje in celoten čas na voljo uporabniku, med seboj pa se ločijo po uporabljeni kodi (Slika 7).



Slika 7: Ločitev uporabnikov pri kodno porazdeljenem sodostopu

Za ločitev med različnimi uporabniki postopki CDMA uporabljajo različne kode. Vsakemu uporabniku je dodeljen unikatni kodni niz, ki ga uporablja za zakodiranje informacijskega signala. Sprejemnik pozna kodni niz uporabnika in dekodira sprejeti signal ter na ta način obnovi originalni podatek. Postopek kodiranja razširi spekter signala, zato je pasovna širina kodiranega signala veliko večja od informacijskega signala. Dobljeni kodirani signal se imenuje signal z razširjenim spektrom in način CDMA je pogosto imenovan sodostop z razširjenim spektrom (SSMA).

Tehnike z razširjenim spektrom so bile razvite za vojaške aplikacije, saj so odporne na motnje in zagotavljajo majhno možnost detekcije signala oziroma prenašanih podatkov. V civilnih aplikacijah se uporabljajo šele v zadnjih letih.

Modulacija z razširjenim spektrom pretvori signal, ki nosi informacijo, v prenosni signal z veliko širšo pasovno širino. Ta transformacija je dosežena z kodiranjem informacijskega signala s kodnim signalom, ki je neodvisen od podatkov in ima veliko večjo spektralno širino kot podatkovni signal. To razširi moč originalnega signala preko veliko širše pasovne širine, kar se odraža v manjši gostoti moči. Razmerje med prenosno pasovno širino in informacijsko pasovno širino se imenuje *ojačanje obdelave PG* sistema z razširjenim spektrom in je enako $PG=B_t/B_i$, kjer je B_t prenosna pasovna širina in B_i informacijska pasovna širina. Da sprejemnik obnovi originalni informacijski signal, mora sprejeti signal kolelirati s sinhorno generirano kopijo kodnega signala. To pomeni, da mora sprejemnik poznati kodni signal, ki je bil uporabljen pri modulaciji podatkov.

Zaradi kodiranja in posledično povečane pasovne širine, imajo signali z razširjenim spektrom veliko lastnosti, ki se razlikujejo od lastnosti ozkopasovnih signalov. Med te spada predvsem zmožnost sodostopa, saj lahko več uporabnikov hkrati prenaša signal z razširjenim spektrom, sprejemnik pa lahko kljub temu razlikuje med različnimi uporabniki, saj vsak uporabi unikatno kodo, ki ima dovolj nizko križno korelacijo z drugimi kodami. Korelacija sprejetega signala s kodnim signalom določenega uporabnika bo edina skrčila signal tega uporabnika, medtem ko bodo signali ostalih uporabnikov ostali razširjeni preko velike pasovne širine. Tako je znotraj informacijske pasovne širine moč zelenega uporabnika veliko večja kot motilna moč. Torej ni prisotnih veliko motenj in zeleni signal je lahko izločen. Pri radijskih kanalih pa obstajajo tudi motnje, ki nastanejo zaradi večjih možnih poti širjenja signala med oddajnikom in sprejemnikom, ki so posledica različnih odbojev. Signal je lahko sprejet s številnih različnih poti in predstavljajo zakasnjeno kopije prenesenega signala, ki se razlikujejo v fazi in amplitudi. Seštevanje teh signalov na sprejemni strani je na določenih frekvencah konstruktivno na drugih pa destruktivno. V časovnem področju se to kaže kot razpršen signal. Tehnike z razširjenim spektrom pa z določenimi postopki izločijo vpliv večjih poti. Sistem je odporen tudi na najrazličnejše namerne in nenamerne motnje saj križna korelacija med kodnim signalom in ozkopasovnim signalom razširi moč ozkopasovnega signala. Torej, če signal z razširjenim spektrom vsebuje ozkopasovno motnjo, je le ta na sprejemni strani, ko je razširjen signal skrčen, razširjena. Na ta način je zmanjšana moč motnje v pasovni širini informacijskega signala in motnja predstavlja v primerjavi z originalnim signalom le šum ozadja. Zaradi majhne moči, je signale z razširjenim spektrom tudi izredno težko zaznati. Omogočena pa je tudi dokaj visoka zasebnost in varnost, saj je lahko preneseni signal skrčen, le če sprejemnik pozna kodno zaporedje.

Obstajajo trije različni načini za razširjanje pasovne širine signala:

- *Frekvenčno skakanje* (FH – Frequency Hopping): nosilna frekvenca, pri kateri se prenaša informacijski signal, se vseskozi spreminja. Spreminjanje nosilne frekvenc pa določa kodni signal oziroma koda, ki je generirana psevdonaključno.
- *Neposredno zaporedje* (DS – Direct Sequence): informacijski signal je neposredno pomnožen oziroma kodiran s hitrim kodnim signalom, ki je generiran psevdonaključno. Sprejemnik v tem primeru ve, kako generirati enako kodo in izloči

podatke oziroma informacijski signal s pomočjo korelacije med sprejetim signalom in kodo (kodnim signalom).

- *Časovno skakanje* (TH – Time Hopping): V tem primeru se informacijski signal ne prenaša neprekinjeno. Namesto tega se podatki prenašajo v kratkih rafalih, kjer je čas rafala določen z kodnim signalom.

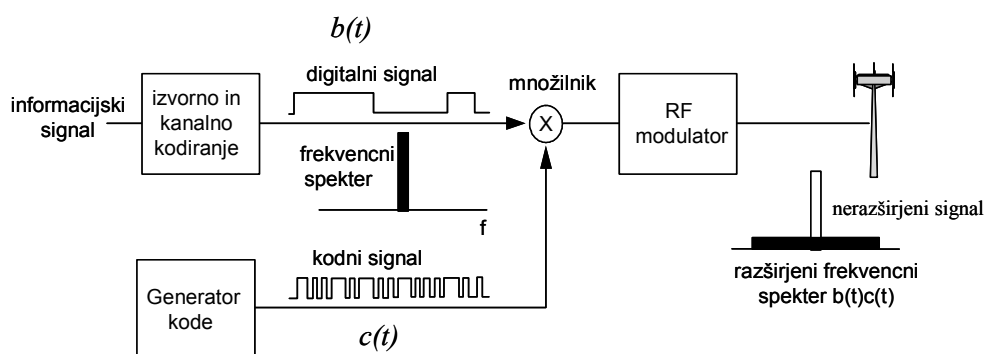
Postopke CDMA lahko razvrstimo glede na način razširjanja spektra na FH-CDMA, DS-CDMA, TS-CDMA in hibridne CDMA postopke.

CDMA postopke pa lahko razdelimo tudi na postopke *povprečenja* in postopke *izogibanja*. Postopki povprečenja, med katere spada DS-CDMA, zmanjšujejo motnje z povprečenje le tih preko širokega časovnega intervala. TH-CDMA in FH-CDMA pa spadata med postopke izogibanja, ki zmanjšujejo motnje tako, da se jim izognejo.

4.1. DS-CDMA

DS-CDMA razširi ozkopasovni informacijski signal z množenjem le tega s signalom zelo široke pasovne širine. To je storjeno tako, da je vsak simbol informacijskega signala množen z psevdonaključno (PN) kodo, ki je v bistvu dolgo zaporedje bitov. Bitna hitrost PN kode se imenuje hitrost *chip*-a, kjer *chip* pomeni en bit PN kode. Kode različnih uporabnikov morajo biti različne (ortogonalne ali vsaj približno ortogonalne), kar zagotavlja ločljivost signalov v sprejemniku in omogoča hkraten dostop večih uporabnikov do skupnega prenosnega kanala.

Blok diagram oddajnika je prikazan na sledeči sliki (Slika 8). Informacijski signal je množen z unikatno, periodično (perioda je enaka trajanju enega ali večih simbolov podatkovnega signala), hitro digitalno kodo, ki ima PG -krat večjo hitrost (chip rate) v primerjavi z hitrostjo simbola podatkovnega signala. Dobljeni razširjeni signal je nato le še moduliran in poslan na skupni prenosni kanal.

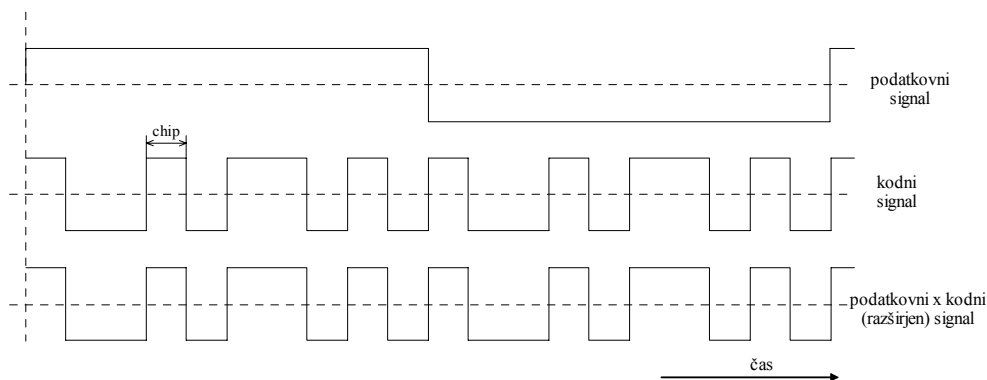


Slika 8: Blok diagram DS-CDMA oddajnika

Faktor PG se imenuje ojačanje obdelave ali tudi faktor razširjenja in je podan kot razmerje med hitrostjo *chipa* oziroma frekvenco kodnega signala (kode) in hitrostjo simbola informacijskega signala in je vedno celo število. Torej lahko faktor razširjenja definiramo tudi kot število kodnih bitov (chip-ov) na informacijski simbol. Hitrost kodnega signala je bistveno višja, kar pomeni krajši čas trajanja bita (chipa-a), krajši čas pa v frekvenčnem prostoru pomeni širši pas in ker množenje v časovnem prostoru pomeni konvolucijo v frekvenčnem prostoru, iz tega sledi, da se je širina osnovnega spektra tolikokrat povečala, kolikorkrat je hitrost kode večja od hitrosti simbola izvornih podatkov (informacije). Torej se širina spektra poveča za faktor ojačanja obdelave oziroma faktor razširjenja PG .

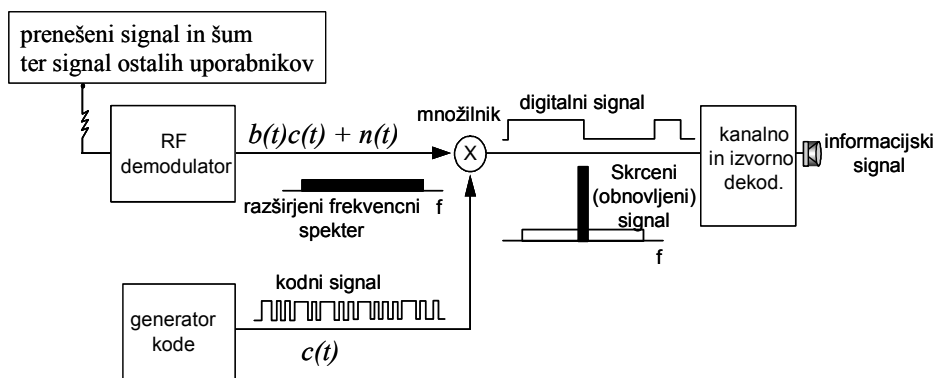
Slika 9 prikazuje preprost postopek generiranja razširjenega signala. Informacijski signal je množen z psevdonaključno generiranim kodnim signalom z veliko večjo hitrostjo. Na tej sliki pripada deset kodnih bitov na en prenešeni informacijski simbol. Torej je hitrost (chip rate)

kode desetkrat večja od hitrosti informacijskega signala. Iz tega sledi, da je ojačanje obdelave oziroma faktor razširjenja PG enak deset. V praksi je faktor razširjenja veliko večji, običajno je med 10^2 in 10^3 .



Slika 9: Prikaz množenja informacijskega signala s psevdonaključno kodo

Na sprejemni strani je potrebno sprejeti signal, ki vsebuje tudi signale drugih uporabnikov in šum, demodulirati in pridobiti originalni informacijski (podatkovni) signal. Za pridobitev originalnega signala in medsebojne ločitve signalov različnih uporabnikov, je potrebno demodulirani signal množiti s sinhronizirano kopijo originalne kode (Slika 10).



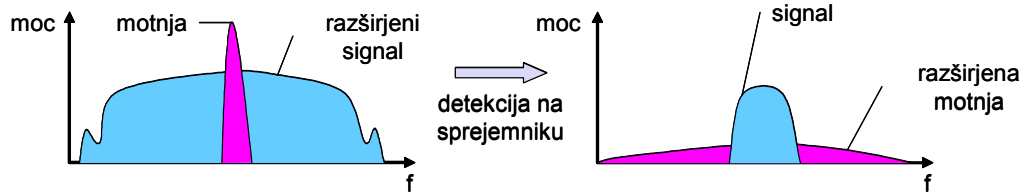
Slika 10: Blok diagram DS-SS sprejemnika

Za pravilno rekonstrukcijo signala želenega uporabnika mora sprejemnik poznati kodo s katero je bil signal razširjen. Koda, ki jo generira sprejemnik, mora biti sinhronizirana z sprejetim signalom (koda sprejemnika je fazno zaklenjena na sprejeti signal). Sinhronizacija mora biti dosežena na začetku sprejema in vzdrževana dokler ni sprejet celoten signal.

Po sinhronizaciji je sprejeti signal pomnožen z lokalno generirano PN kodo. Za ločitev signala določenega uporabnika od signalov ostalih uporabnikov, sprejemnik uporablja križno korelacijo. Če je vrednost križne korelacije enaka 1, sprejeti signal pripada želenemu uporabniku. Križna korelacija dveh različnih signalov pa je zelo majhna vrednost. Signala, ki nimata ničesar skupnega pa imata križno korelacijo enako 0.

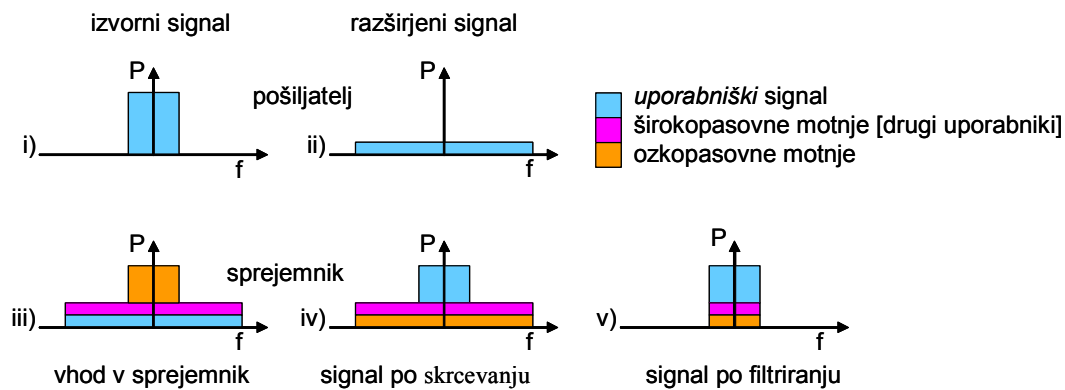
Kot smo omenili DS-SS omogoča hkraten dostop do istega prenosnega kanala večim uporabnikom, ki pa uporabljajo za razširitev spektra različne kode. Poleg omenjenega DS-SS izloča motnje, ki nastanejo zaradi širjenja signala po različnih poteh in pridejo do sprejemnika različno zakasnjene. Za izločevanje teh motenj sprejemnik uporablja avtokorelacijsko funkcijo, ki je korelacija signala z njegovo zakasnjeno različico, in mora biti enako nič za vse zakasnitve različne od nič.

Na sprejemniku je signal pridobljen z množenjem sprejetega signala z lokalno generirano PN kodo. Kot pa je to vidno na sprejemniku, množenje ozkopasovnega signala z širokopasovnim kodnim zaporedjem razširi spekter ozkopasovnega signala in tako se moč v informacijski pasovni širini zmanjša za faktor razširjenja PG . Na ta način se ozkopasovna motnja v sprejemniku po množenju s kodo razširi in njena moč se ustrezno zmanjša (Slika 11).



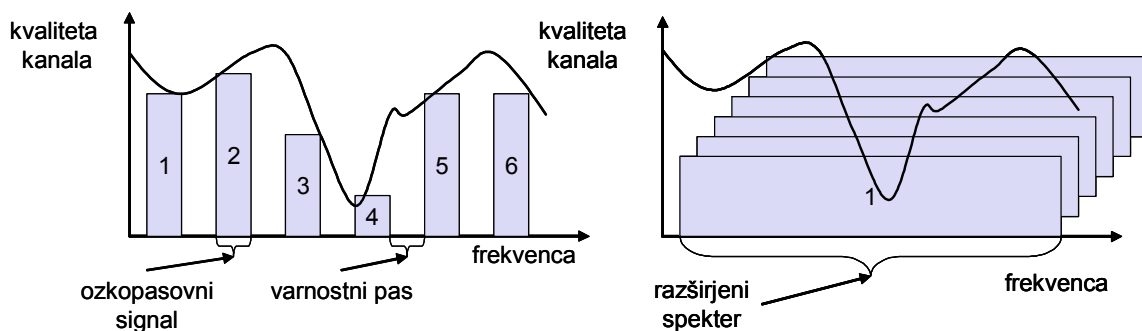
Slika 11: Razširjanje kot zaščita pred ozkopasovnimi motnjami

Poleg odpornost na ozkopasovne motnje, DS-CDMA izloča tudi širokopasovne motnje, ki so predvsem posledica hkratnega oddajanja drugih uporabnikov, kar je prikazano tudi na sledeči sliki (Slika 12).



Slika 12: Izločevanje širokopasovnih motenj – signali drugih uporabnikov

Pri razširjenju z neposrednim zaporedjem signal vseskozi uporablja celoten spekter, kar omogoča zelo nizko prenosno moč na hertz. Torej je DS signal zelo težko zaznati. Razširjeni širokopasovni signal je odporen tudi na frekvenčno selektivno presihanje, oziroma ima presih zelo majhen vpliv na sprejeti signal, saj večina energije razširjenega signala pade izven zarez presiha. Medtem ko ima presih pri ozkopasovnih signalih močan vpliv na kanalih kjer se pojavi zarez presiha (Slika 13).



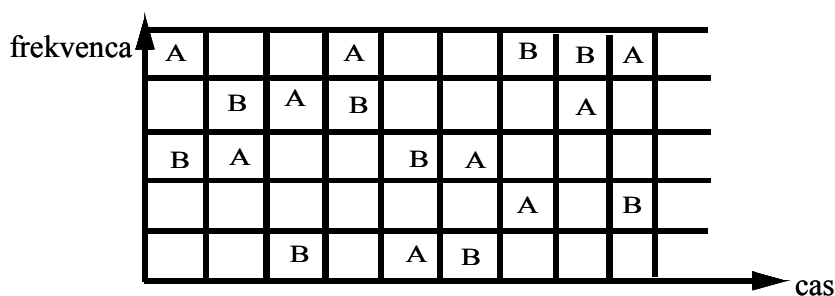
Slika 13: Vpliv frekvenčno selektivnega presiha na ozkopasovni in razširjeni (širokopasovni) signal. Pri DS-CDMA je prisoten bližnji-dalnji (near-far) problem. Ker je sprejeta moč uporabnikov, ki so bližje sprejemniku (bazni postaji) večja od sprejete moči bolj oddaljenih

uporabnikov in uporabniki nepretrgano prenašajo preko celotne pasovne širine, uporabniki blizu sprejemnika vseskozi povzročajo veliko motenj (imajo večjo sprejeto moč - glej sliko 12) za oddaljene uporabnike in onemogočajo sprejem njihovega signala. Za rešitev tega problema se uporablja algoritem za nadzor moči, ki omogoča sprejemanje uporabniških signalov pri isti povprečni moči.

V teoriji je možno ne glede na tip sodostopa (sodostop s fiksnim dodeljevanjem - FDMA, TDMA, ali sodostop DS-CDMA) vedno enako maksimalno število M medseboj ortogonalnih signalov, ki je definirano s parametri prostora. M je torej vnaprej določena dimenzija prostora (število uporabnikov) in iz tega stališča DS-CDMA ni nič boljši od TDMA ali FDMA. Je pa res, da je število možnih kod pri DS-CDMA mnogo večje od dimenzije prostora M , kar pomeni tudi več hkratnih uporabnikov. S tem kode med seboj sicer niso več popolnoma ortogonalne, pač pa semi-ortogonalne. Tako lahko vsak uporabnik dobi svojo lastno kodo. Seveda v tem primeru pomeni večje število hkrati komunicirajočih uporabnikov tudi več medsebojnih motenj oziroma šuma kar lahko privede do nepravilnih prenosov. V tem primeru postopek CDMA ne moremo več prištevati k postopkom nadzoranega sodostopa, saj prenos ni več zanesljiv.

4.2. FH-CDMA

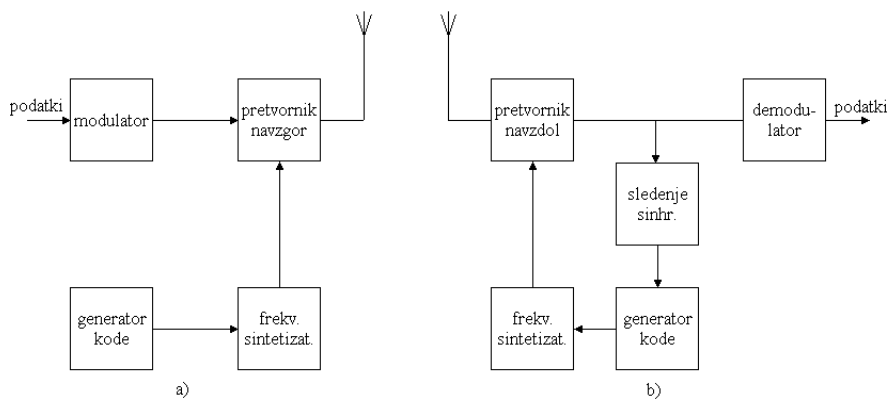
FH-CDMA temelji na ozkopasovnem FDMA sistemu, kjer se frekvenca nosilca moduliranega informacijskega signala periodično spreminja. V času enega časovnega intervala T je frekvenca nosilca konstanta. Vendar pa nosilec po vsakem časovnem intervalu skoči na drugo frekvenco. Vzorec skakanja določa kodni signal (koda).



Slika 14: Zasedenost frekvence pri sodostopu FH-CDMA

Sistemi, ki uporabljajo FH-CDMA postopek sodostopa, uporabljajo med prenosom le majhen del razpoložljive pasovne širine, vendar se položaj tega dela časovno spreminja (Slika 14). V času prve periode uporabnik A zaseda frekvenčni pas 5, uporabnik B pa pas 3. Po končanem časovnem intervalu oba uporabnika, glede na generirano kodo, prenašata v drugem pasu (A v pasu 3, B v pasu 4) in tako naprej.

Slika 15 prikazuje blok diagram FH-CDMA sprejemnika in oddajnika. Podatkovni signal je najprej moduliran v osnovnem pasu. Uporablja se več različnih modulacijskih tehnik. Za analogne signale se ponavadi uporablja FM modulacija, za digitalne pa FSK (modulacija s frekvenčnim pomikom). Nato je z hitrim frekvenčnim sintetizatorjem, ki je nadzorovan s kodnim signalom, nosilna frekvenca pretvorjena navzgor na prenosno frekvenco.



Slika 15: Blok diagram FH-CDMA oddajnika (a) in sprejemnika (b)

Na sprejemni strani je realiziran obraten postopek (Slika 15b). Z uporabo lokalno generiranega kodnega niza je sprejeti signal pretvorjen navzdol v osnovnem pasu. Podatki so pridobljeni po demodulaciji. Sinhronizacijski/sledilni krog zagotavlja, da je skakanje lokalno generiranega nosilca sinhronizirano z vzorcem skakanja sprejetega nosilca. Na ta način je možno pravilno pridobivanje informacijskega signala.

Postopek FH-CDMA ločimo glede na hitrost skakanja nosilne frekvence. Če je hitrost skakanja (veliko) večje od hitrosti simbola podatkov, se imenuje *hitro skakanje po frekvenci* (F-FH – Fast Frequency Hopping). V tem primeru se frekvenca nosilca v času prenosa enega simbola večkrat spremeni, torej je en bit prenesen na različnih frekvencah. V primeru, da je hitrost skakanja (veliko) manjša od hitrosti simbola podatkov, govorimo o *počasnem skakanju po frekvenci* (S-FH – Slow Frequency Hopping). V tem primeru je več simbolov prenesenih pri isti frekvenci.

Na zasedeno pasovno širino signala na eni od frekvenc skakanja vpliva poleg pasovne širine informacijskega signala tudi oblika signala skakanja in frekvenca skakanja. Če je frekvenca skakanja veliko manjša od informacijske pasovne širine (v primeru S-FH), potem je pasovna širina informacijskega signala osrednji faktor, ki določa zasedenost pasovne širine. V primeru veliko večje frekvence skakanja v primerjavi z informacijsko pasovno širino, pa zasedenost pasovne širine določa oblika impulza signala skakanja.

F-FH in S-FH CDMA postopka sodostopa omogočata hkraten prenos večim uporabnikom na istem prenosnem kanalu. Pri F-FH načinu je vsak simbol prenesen v različnih frekvenčnih pasih. Če v večina frekvenčnih pasov prenaša le en uporabnik, je sprejeta moč zelenega signala veliko večja od moči motenj in signal je sprejet pravilno. V primeru S-FH je prenesenih več bitov pri eni frekvenci. Če je verjetnost, da ostali uporabniki prenašajo v istem frekvenčnem pasu dovolj majhna, je signal zelenega uporabnika večino časa pravilno sprejet. V primerih ko v istem frekvenčnem pasu prenašajo tudi drugi uporabniki (motilni), je obnovitev prenesenih podatkov dosežen z uporabo kod za odpravljanje napak.

Kot smo omenili se pri F-FH CDMA načinu frekvenca nosilca, v času prenosa enega simbola, večkrat spremeni. Torej je določena frekvenca signala modulirana in prenesena na večih frekvencah nosilca. Učinek večih poti je različen na različnih frekvencah nosilca. Kot rezultat so frekvence signala ojačane na eni frekvenci nosilca in dušene pri drugih in obratno. Sprejemnik odzive pri različnih frekvencah skakanja povpreči in na ta način zmanjša motnje, ki nastanejo zaradi širjenja signala po različnih poteh od oddajnika do sprejemnika.

FH-CSMA zmanjšuje ozkopasovne motnje. Predvidevamo, da ozkopasovni signal moti na eni od frekvenc skakanja. Če obstaja PG frekvenc skakanja, kjer je PG ojačanje obdelave ali faktor razširjenja, bo uporabnik uporabljal frekvenco skakanja kjer se nahaja motnja le $1/PG$ procentov časa. Torej so ozkopasovne motnje zmanjšane za faktor PG . Poleg tega pa je FH-CDMA odporen tudi na namerne motnje, saj zaporedje skakanja po frekvenci ni znano in je

težko locirati motnjo na pravo mesto. Za učinkovito motenje bi bilo potrebno motiti z PG -krat višjo močjo na celotnem frekvenčnem področju.

FH signal je zelo težko prestreči oziroma zaznati. Vzrok temu je nizka prenosna moč, saj se med prenosom uporablja toliko moči na hertz kot pri neprekinjenem prenosu. Poleg tega pa je frekvenca, pri kateri je signal oddan, nepoznana. Hkrati pa je tudi čas trajanja prenosa na določeni frekvenci dokaj majhen.

FH-CDMA ima še nekatere dodatne prednosti:

- Ni potrebno, da so frekvenčni pasi, ki so lahko zasedeni, blizu oziroma sosednji, saj frekvenčni sintetizator omogoča preskok nekega dela spektra.
- Možnost, da bi več uporabnikov hkrati prenašalo v istem frekvenčnem pasu (medsebojno motenje uporabnikov) je majhna – skakanje po frekvenci, zaradi tega pravimo, da je FH-CDMA tudi sistem z izogibanja (izogibanje tako ozkopasovnim motnjam kot prenašanju ostalih uporabnikov). Če uporabnik daleč od sprejemnika prenaša, sprejemnik sprejme njegov signal tudi če uporabniki, ki so blizu sprejemnika, oddajajo, kajti vsak uporabnik prenaša na drugi frekvenci. Torej FH-CDMA ni podvržen bližnje-daljnjemu učinku.
- Zmanjšan je tudi učinek frekvenčno selektivnega presihanja, saj se frekvenca vseskozi spreminja, kar zagotavlja, da se signal uporabnika ne bo dolgo nahajal v področju presiha.
- Večja ko je pasovna širina, ki jo lahko FH-CDMA uporablja, učinkovitejše je možno zmanjšati ozkopasovne motenje.
- Ker frekvenca skače naključno je zagotovljena tudi odpornost na namerne motnje, saj ne vemo kam bi dali frekvenčno motnjo.

Obstajajo pa tudi določene slabosti, med katere spada predvsem potreba po zahtevnem frekvenčnem sintetizatorju in povečevanje zasedenosti frekvenčnega pasa zaradi nenadne spremembe signala v času spremembe frekvenčnega pasa. Temu se izognemo z izključevanjem signala v času spreminjanja frekvence.

FH-CDMA se uporablja predvsem v vojaških komunikacijah, medtem ko se v modernih civilnih sistemih uporablja predvsem DS-CDMA, ki je opisan v predhodnem poglavju.

4.3. TH-CDMA

Pri postopku TH-CDMA je podatkovni signal prenesen v časovnih intervalih, ki jih naključno določa koda dodeljena uporabniku. Časovna os je razdeljena na okvire in vsak okvir je razdeljen na M oken. V času vsakega okvira uporabnik prenaša v enem izmed M časovnih oken. V katerem oknu prenaša je odvisno od kode signala, ki je dodeljen uporabniku. Ker uporabnik prenese vse svoje podatke le v enem oknu (namesto v M), je frekvenca potrebna za prenos večja za faktor M . TH-CDMA uporablja celotno pasovno širino le v kratkih periodah, medtem ko FH-CDMA vseskozi uporablja dele spektra.

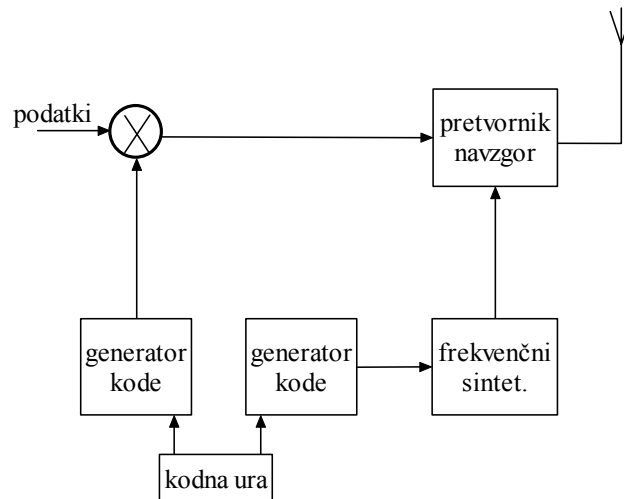
V primeru časovnega skakanja, potekajo vsi prenosi v istem frekvenčnem pasu. Možnost, da več uporabnikov hkrati prenaša so dokaj majhne, kar je možno doseči, da so uporabnikom dodeljene čim bolj različne kode. V osnovi gre torej za postopek časovnega sodostopa, le da položaj časovnega okna določenega uporabnika v okviru ni stalen, ampak se naključno spreminja. Postopek ni odporen na večpotne motnje. Pri TH-CDMA je frekvenca pri kateri uporabnik prenaša konstantna vendar je čas prenosa uporabnika neznan, hkrati pa je trajanje prenosa zelo kratko. Zaradi tega je izjemno težko razločiti med začetkom in koncem prenosa. To je še posebno težko pri prenosu večih uporabnikov, kjer je potrebno odločiti tudi kateri prenos pripada kateremu uporabniku. Signali TH-CDMA so preneseni v skrčenih časih. To skrčenje je enako $1/PG$. Sprejemnik sprejme signal motnje le v času sprejemanja želenega

signala. Torej je motilni signal sprejet le $1/PG$ procentov časa, kar zmanjša moč motnje za faktor PG .

Postopek je uporaben v primerih, ko je povprečna moč oddajnika omejena, ni pa omejena temenska moč. Poleg omenjenega je implementacija dokaj preprosta. TH-CDMA je postopek izogibanja, kar pomeni, da ni izpostavljen bližnje-daljnemu problemu, saj večino časa terminali daleč od sprejemnika prenašajo sami in jih ne ovirajo oddajniki bližje sprejemnika. Za sinhronizacijo kode pa je potrebno precej časa, medtem ko je čas za sinhronizacijo, ki ga ima na voljo sprejemnik, dokaj kratek. Poleg tega pa je potrebno zagotoviti tudi kodo za odpravljanje napak, ki nastanejo zaradi hkratnega prenosa večih uporabnikov.

4.4. Hibridni CDMA

Hibridni postopki CDMA vsebujejo kombinacijo dveh ali več predhodno omenjenih tehnik razširjanja spektra. Namen hibridnih postopkov je združiti določene prednosti različnih tehnik. Na sliki 10 je prikazana hibridni DS-FH oddajnik, kjer je podatkovni signal razpršen z uporabo DS kod. Nato je razpršeni signal moduliran na nosilec, ki skače po frekvenci glede na drugo kodno zaporedje. Kodna ura pa je potrebna za zagotavljanje nespremenljive relacije med obema kodama. Slabost takih postopkov je predvsem v povečani kompleksnosti oddajnika in sprejemnika.



Slika 16: Hibridni DS-FH oddajnik

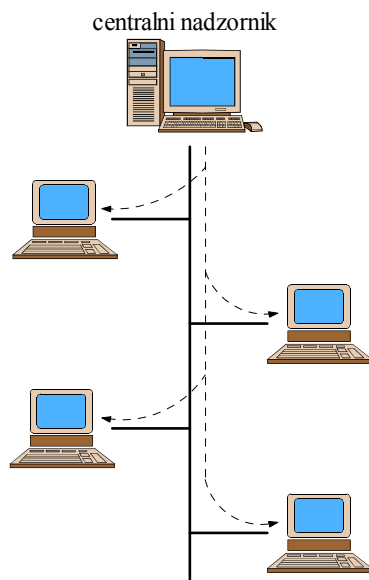
5. Postopki sodostopa z dodeljevanjem na zahtevo

Postopki sodostopa z dodeljevanjem na zahtevo spadajo med postopke nadzorovanega sodostopa. Postaja, ki pridobi pravico za prenos, v celoti zasede prenosne kapacitete. Zaradi tega jih imenujemo tudi postopke z zaseganjem kanala oziroma prenosnih zmogljivostih. Pri teh postopki praviloma ne prihaja do motenj in trkov, zaradi tega je potrebno po skupnem kanalu prenašati nekaj več signalizacije (režije), ki oddajanje paketov med seboj ustrezno usklajuje. To je predvsem primerno pri močnejšem prometu, saj ne prihaja do neprestanih trkov. Pri šibkejšem prometu pa to usklajevanje ni več nujno potrebno, saj je verjetnost trkov dokaj majhna, vendar kljub vsemu poteka.

V splošnem ločimo centralizirane (postopki z pozivanjem) in distribuirane (postopki z žetonom) postopke sodostopa z dodeljevanjem na zahtevo.

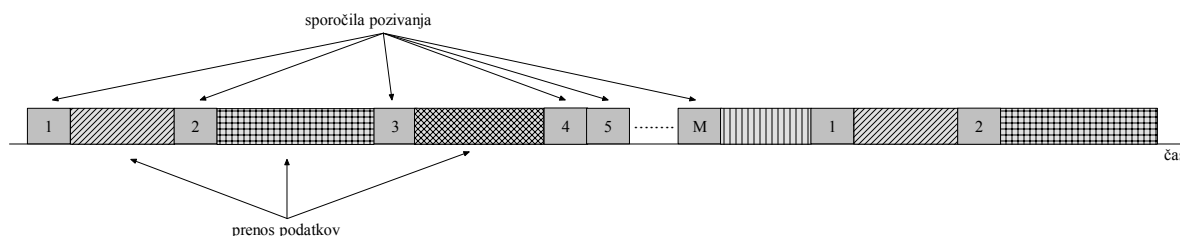
5.1. Postopki s pozivanjem (polling)

Postopki pozivanja dovoljujejo, da ima ob določenem času le ena postaja oziroma uporabnik pravico dostopa do skupnega prenosnega medija in s tem pravico do prenašanja. Ko postaja konča s prenosom, je s pomočjo nekega mehanizma pravica za prenos predana drugi postaji. Pri postopkih s pozivanjem mora obstajati neko centralno vozlišče imenovano centralni nadzornik, ki v določenem zaporedju kliče postaje, te pa v odgovoru pošljejo podatke (Slika 17). Če postaja ni bil poklican ne sme oddajati, če pa določena postaja, potem ko je bil poklican, nima podatkov za oddajo, centralni nadzornik preprosto pokliče naslednjo postajo. V slednjem primeru je bilo izvedene nekaj nepotrebne komunikacije, ki tako znižuje učinkovitost omrežja.



Slika 17: Primer sistema, ki uporablja postopek sodostopa s pozivanjem

Slika 18 prikazuje zaporedje sporočil pozivanja in prenosa podatkov pri postopku s pozivanja. Najprej je pozvana postaja 1. Od razširjenja sporočila pozivanja in njegovega sprejema do začetka prenosa postaje 1 poteče določen čas imenovan *čas koraka* (walk time). Nato nek določen čas razpoložljivi del komunikacijskega vira zaseda prenos postaje ena. Času prenašanja postaje ena sledi čas koraka, ki poteče med pozivom in prenašanjem postaje 2, ki je naslednja v vrsti za prenašanje. Ta postopke se ponavlja do poziva in prenosa postaje M . Nato se cikel pozivanja in prenašanja ponovi s pozivanjem postaje ena. V določenih sistemih lahko postaje prenašajo dokler ne prenesejo vseh podatkov. Pri drugih sistemih pa je čas prenosa omejen na nek maksimalen čas trajanja.



Slika 18: Vzajemno delovanje sporočil pozivanja in prenosa pri postopku pozivanja

Čas koraka, ki je potreben za predajo nadzora dostopa do skupnega prenosnega medija, predstavlja neke vrste režijo in je odvisen od večih faktorjev. Prvi med njimi je čas širjenja signala od postaje do postaje. Ta čas je funkcija razdalje. Naslednji faktor predstavlja čas, ki

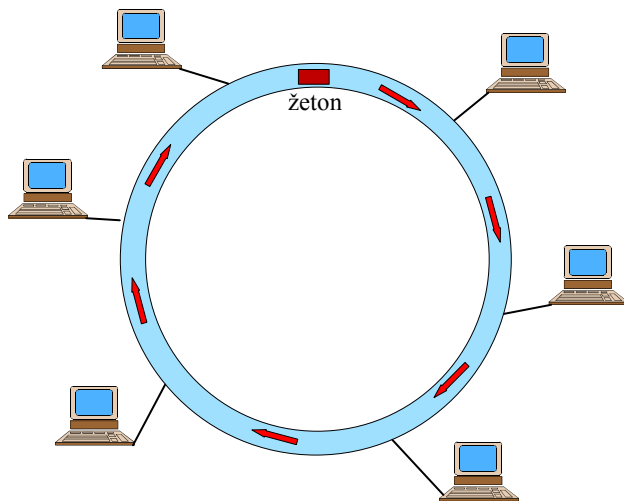
poteče od prihoda poziva do postaje in začetkom prenosa te postaje . Na čas koraka pa vpliva tudi čas potreben za oddajo sporočila pozivanja. *Celotni čas koraka* je seštevek časov koraka v enem ciklu in predstavlja minimalni čas pozivanja vseh postaj v enem krogu. *Čas cikla* je celotni čas, ki preteče med dvema pozivoma iste postaje in je vsota vseh časov koraka in časov prenosa. Režija, ki nastane znotraj enega cikla, je tako podana kot razmerje med celotnim časom korakov in časom enega cikla.

Postopek s pozivanjem je dokaj preprost in zagotavlja pravičnost. Ker pa je celoten nadzor nad omrežjem oziroma delom omrežja implementiran v eni sami fizični postaji, je omrežje zelo občutljivo na napake. Poleg tega pa je tudi zakasnitev pri pridobivanju pravic za prenos dokaj velika.

5.2. Postopki z žetonom (token passing)

Pri porazdeljenih postopkih sodostopa z dodeljevanjem na zahtevo običajno med terminali kroži neka podatkovna struktura, ki ima lahko funkcijo rezervacijskega paketa ali funkcijo žetona (angl. *token*). Žeton je podatkovna struktura, ki daje terminalu, ki trenutno ta žeton ima, ekskluzivne pravice za dostop do skupnega kanala. Žeton vsebuje paket s posebnim vzorcem bitov (11111111), ki sistematično prehaja med terminali po omrežju. Torej, terminal, ki želi rezervirati prenosne vire, zavzame žeton. To stori na dva možna načina bodisi z zadrževanjem žetona – token bus, ali s spremembo bitnega vzorca na vrednost, ki pove, da je žeton zaseden – token ring (11111110).

V primeru obroča z žetonom, (Slika 19), postaja, ki želi prenašati zavzame žeton in podatki se prenašajo skupaj z žetonom oziroma so *natovorjeni* na žeton. Da pa se nebi zaporedje bitov žetona pojavljalo v prenesenih podatkih se uporablja tehnika *natovarjanja bitov*. V primeru 8-bitnega žetona algoritem natovarjanja bitov vstavi ničlo v podatkovni tok po vsakem nizu zaporednih sedmih enic. Na sprejemni strani mora biti za pravilen sprejem uporabljen enak algoritem.

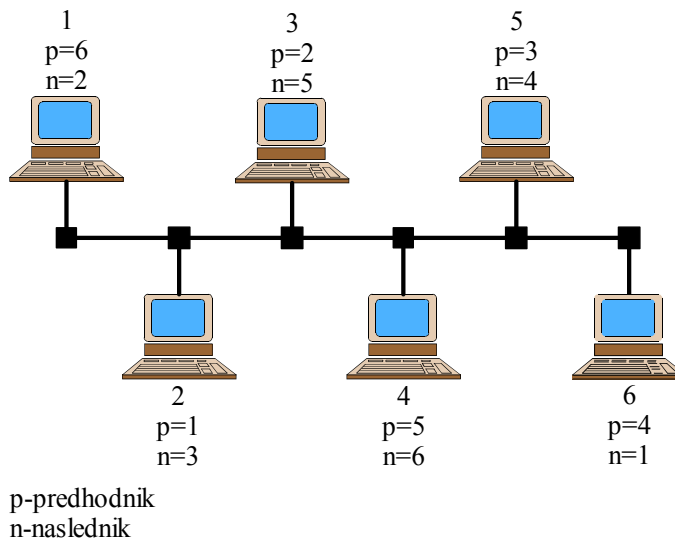


Slika 19: Obroč z žetonom

Po prenosu podatkov je potrebno žeton regenerirati oziroma spremeniti v stanje nezasedenosti. To lahko stori terminal, ki sprejme prenos ali pa postaja, ki je generirala promet, vendar šele ko podatki pridejo nazaj po obroču – obkrožijo cel obroč. V slednjem primeru lahko sprejemna postaja postavi primerne potrditvene bite v paket in tako potrdi pravilen sprejem. Ta pristop tudi omogoča oddajniku, da obdrži žeton in pošlje več paketov zaporedoma. Lahko je določen tudi čas oddajanja terminala, ki ima v lasti žeton in je lahko neomejen, kar zmanjšuje zakasnitve paketov. Vendar pa je čas, ki poteče med dvema

zaporednima prihodoma prostega žetona do terminala neomejen. Zaradi tega je možno omejiti ali čas oddajanja ali število oddanih paketov.

Pri vodilu z žetonom (Slika 20) ima terminal, ki trenutno zadržuje žeton, ekskluzivno pravico za dostop do skupnega kanala. Ko terminal odda želene podatke na vodilo, žeton preda naslednjemu terminalu, ki pa ni nujno, da se nahaja neposredno za predhodnikom. Torej ni nujno, da je logični vrstni red enak fizičnemu. Vsak terminal vsebuje informacije o predhodniku in nasledniku.



Slika 20: Vodilo z žetonom

V primeru velike zasedenosti prenosnih zmogljivosti pri postopkih zaseganja prenosnih kapacitet na osnovi žetona ne prihaja do zasičen, le čakalne vrste za žeton se podaljšajo. Poleg tega tudi ne prihaja do težav zaradi medsebojne oddaljenosti uporabnikov (kot pri postopkih naključnega dostopa), saj v nobenem primeru ne prihaja do trkov. Z ustrezno dodelitvijo prioritet pri dodeljevanju žetona in z omejevanjem števila hkratnih uporabnikov, je pri tem načinu možno zagotavljati kvaliteto storitev. Edina pomanjkljivost načina zaseganja zmogljivosti na osnovi žetona nastopi pri relativno majhni zasedenosti omrežja, ko morajo uporabniki čakati, da pride žeton do njega, kljub temu, da nihče ne oddaja.

6. Postopki naključnega dostopa

Značilnost postopkov naključnega dostopa je, da so trki paketov dovoljeni in celo predvideni, vendar tako, da se jih pod določenim pravilom kontrolira ali pa se jim poskuša, po najboljših močeh, tudi izogniti. Ta razred postopkov dostopa do skupnega prenosnega medija se bolje obnese pri šibkejšem prometu, kjer je kapaciteta kanala dosti večja od dejanskega prometa.

Najbolj znan postopek naključnega dostopa do skupnega prenosnega medija je ALOHA, ki je močno podvržena trkom med paketi. Postopek CSMA zagotavlja večjo kapaciteto, vendar pa na njegovo zmogljivost močno vpliva problem *skrite postaje*. Z omenjenima problemoma pa se dokaj dobro spopada postopek ISMA.

Omenjeni postopki in njihove izpeljanke so opisani v nadaljevanju poglavja.

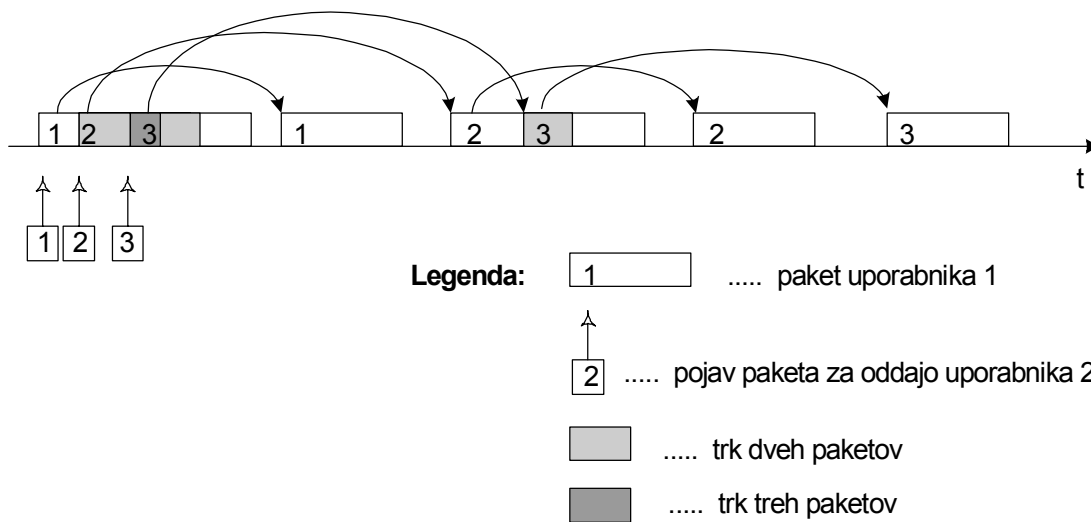
6.1. ALOHA

Leta 1970 so na univerzi Hawaii razvili sistem ALOHA, ki je služil za povezavo med različnimi otoki Havajskega otočja. To je bil prvi postopek, ki je bil namenjen paketnim radijskim omrežjem. ALOHA je klasičen postopek dostopa do skupnega prenosnega medija in je služil kot osnova za nadaljnji razvoj postopkov naključnega dostopa, kot na primer danes izjemno popularnega CSMA/CD, ki se uporablja v omrežjih ethernet.

Princip delovanja postopka ALOHA je preprost:

- Postaja odda paket v poljubnem trenutku.
- Če je bila edina ni prišlo do trka in paket se je uspešno prenesel. Sprejemna postaja to potrdi s potrditvenim paketom ACK.
- Če je v istem času oddajala tudi druga ali več drugih postaj, je prišlo do trka in oddajnik v vnaprej določenem času (time out) ne prejme nobene potrditve uspešnega sprejema paketa:
 - a) V tem primeru vsaka od postaj po naključnem času ponovno oda isti paket.
 - b) Če je znova prišlo do trka, se zopet ponovi korak a) in se ga ponavlja toliko časa, dokler niso vsi paketi oddani brez trkov.

Primer komunikacije s pomočjo postopka ALOHA v primeru trka treh paketov prikazuje slika 21.



Slika 21: ALOHA

Zgoraj opisano delovanje je bilo praktično doseženo tako, da je bilo poleg sekundarnih postaj, ki so želele med seboj komunicirati, prisotna tudi glavna postaja, ki je v ločenem frekvenčnem pasu v primeru kolizije ostalim to sporočila z ustreznim signalom.

Prednost ALOH-e je njegova enostavnost, iz katere sledi tudi nizka cena izvedbe, slabost pa izredno slaba izkoriščenost prenosnih zmogljivosti kanala oziroma dosežen pretok S , ki je podan z enačbo:

$$S = Ge^{-2G} . \quad (6.1)$$

V zgornji enačbi predstavlja parameter G normiran (s kapaciteto kanala) celotni ponujan promet vključno s ponovnimi prenosi paketov in e^{-2G} možnost uspešnega prenosa. Maksimalna izkoriščenost prenosnih zmogljivosti je pri $G=0,5$ in znaša samo 18,4 %. Povprečno število poizkusov prenosa na paket pa je podano kot:

$$N = G/S = e^{2G} = \frac{1}{\text{možnost uspeha}} \quad (6.2)$$

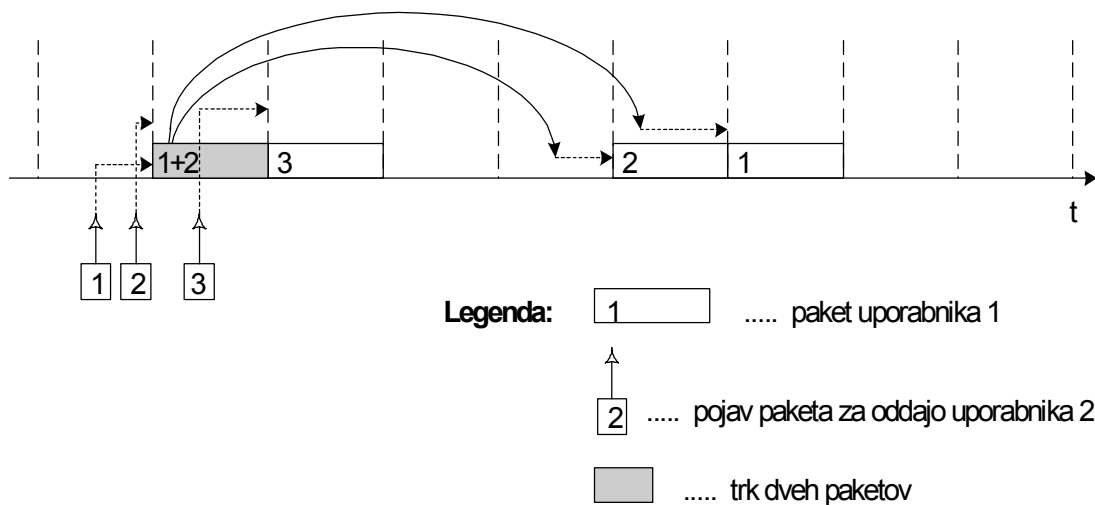
Pri največji možni izkoriščenosti kanal oziroma pretoku je povprečno število poizkusov prenosa na paket enako 2,72.

6.2. Razsekana ALOHA

Razsekana ALOHA (S-ALOHA - Slotted ALOHA) je izboljšana verzija osnovne ALOHE. Princip delovanja je enak, edina razlika je v tem, da postaje tu ne morejo več pričeti z oddajo v poljubnem časovnem trenutku, pač pa se paket lahko pošlje samo v točno določenih časovnih razmakih (oknih), ki so dolgi toliko, kolikor so dolgi prenašani paketi. Sekundarne postaje se morejo zato sinhronizirati z urnim signalom glavne postaje. To je lahko v primeru izpada glavne postaje velika slabost razsekane ALOHE, saj brez sinhronizacija komunikacija ni več mogoča.

Do trkov med paketi in s tem posledično neuspešnega prenosa pride, če hoče več postaj prenašati v istem časovnem intervalu imenovanem časovno okno. V primeru da oddajna postaja v določenem času ne sprejme potrditve pravilnega sprejema od sprejemne postaje (ACK) je potrebno paket ponovno prenesti. Uporabnik ponovno prenese paket po preteku nekega naključnega števila časovnih oken.

Primer komunikacije po principu razsekane ALOHE v primeru trka dveh paketov prikazuje slika 22.



Slika 22: S-ALOHA

Torej mora biti paket oddan na začetku časovnega okna in le takrat lahko pride do trka med paketi večih uporabnikov. To pa seveda zmanjša verjetnost trkov med paketi za polovico, saj je v primeru, ko se je paket že začel uspešno prenašati, le ta do konca prenosa varen.

Izkoriščenost prenosnih zmogljivosti oziroma učinkovitost sheme sodostopa S-ALOHA je bistveno boljša v primerjavi z običajno ALOHO in je podana z enačbo:

$$S = Ge^{-G}. \quad (6.3)$$

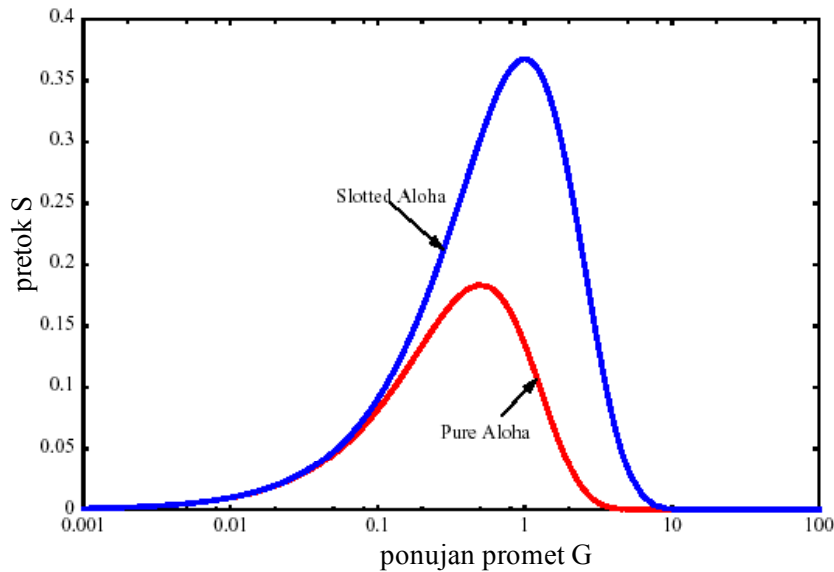
V zgornji enačbi predstavlja parameter G normiran celotni ponujen promet vključno s ponovnimi prenosi paketov in e^{-G} možnost uspešnega prenosa. Maksimalna izkoriščenost

prenosnih zmogljivosti je dosežena pri $G=1$ in znaša 36,8 %. Povprečno število poizkusov prenosa na paket pa je podano kot:

$$N = G/S = e^G = \frac{1}{\text{možnost uspeha}} \quad (6.4)$$

Pri največji možni izkoriščenosti oziroma pretoku je povprečno število poizkusov prenosa na paket enako kot pri čisti ALOHI in znaša 2,72.

Razsekana ALOHA se torej pri večjem prometu obnese veliko bolje od osnovne različice (Slika 23), nekoliko slabša pa je glede na osnovno ALOHO zgolj pri izredno nizkem prometu, saj mora v tem primeru paket čakati na začetek novega časovnega intervala, tudi če je prenosni kanal prazen.

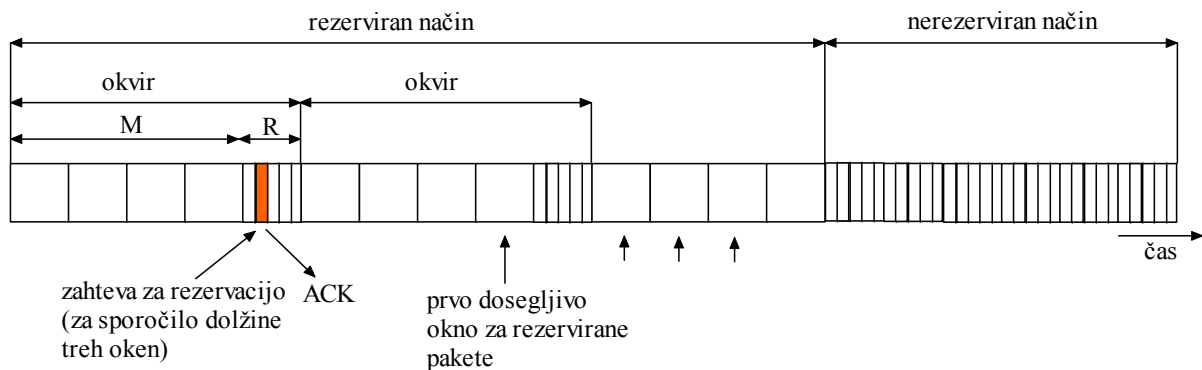


Slika 23: Primerjava izkoriščenosti prenosnih zmogljivosti čiste in razsekane ALOHE

6.3. Rezervacijska ALOHA

Veliko izboljšanje postopkov ALOHA predstavlja rezervacijska ALOHA (R-ALOHA - Reservation ALOHA). R-ALOHA ima dva osnovna načina:

- nerezerviran način in
- rezerviran način.



Slika 24: R-ALOHA

V nerezerviranem načinu je časovna os razdeljena na kratka podokna enake dolžine, ki se uporabljajo za rezervacijo. Uporabnik, ki hoče poslati podatke, mora najprej z uporabo postopka S-ALOHA oddati kratko rezervacijsko zahtevo v rezervacijsko podokno. Rezervacijska zahteva lahko zaprosi za dodelitev enega ali več oken. Po oddani rezervacijski zahtevi mora uporabnik počakati na pozitivno potrditev, ki predlaga kam naj uporabnik locira svoj prvi podatkovni paket – uporabniku je dodeljeno časovno okno. Nato se sistem preklopi nazaj v rezerviran način.

V rezerviranem načinu je časovna os razdeljena na okvire nespremenljive dolžine. Vsak okvir je sestavljen iz $M+1$ oken enake dolžine, kjer je prvih M oken uporabljenih za prenos podatkov (sporočilna okna). Zadnje okno pa je razdeljeno na R kratkih rezervacijskih podoken, ki se uporabljajo za rezervacijo. Uporabnik, ki ima rezervirana okna, pošilja svoje podatke v zaporednih sporočilnih oknih, vendar preskakuje rezervacijska okna, ki se pojavljajo. Ker vse rezervacijske zahteve slišijo vsi uporabniki v omrežju, vsak uporabnik ve katero sporočilno okno mora izpustiti preden začne prenašati svoje podatke (potrditev mora vsebovati le položaj prvega okna). Če ni narejene nobene rezervacije, se sistem vrne v nerezerviran način.

R-ALOHA je v bistvu neke vrste prilagodljivi TDMA, kjer so rezervacijski prenosi, pri katerih lahko pride do trkov, omejeni na kratka rezervacijska podokna, medtem ko poteka prenos podatkov v sporočilnih oknih popolnoma brez trkov. Za ohranjanje majhne režije mora biti število rezervacijskih podoken dovolj majhno, hkrati pa mora biti še vedno dovolj veliko, da lahko izpolnjuje pričakovano število rezervacijskih zahtev.

Pri R-ALOHA je nadzor porazdeljen med vse uporabnike oziroma postaje v omrežju. Vsaka postaja vzdržuje informacije o vrsti zunanjih rezervacij za vse ostale postaje v omrežju kot tudi za svojo rezervacijo. Ko dolžina vrste pade na nič, se sistem vrne v nerezerviran način, kjer so prisotna samo rezervacijska podokna.

Slika 24 prikazuje primer, kjer postaja rezervira tri sporočilna okna. Potrditev rezervacije obvesti postajo kdaj lahko pošlje svoj prvi podatkovni paket. Poleg tega pa postaja tudi ve, da je okno poleg prvega paketnega (sporočilnega) sestavljeno iz petih rezervacijskih podoken in zato ne odda paketa v tem času. Drugi in tretji paket sta nato poslana po končanih rezervacijskih podoknih. Ker po koncu prenosa ni več rezerviranih oken, se sistem vrne v nerezerviran način.

Rezervacijska ALOHA s pomočjo vnaprejšnje rezervacije časovnih oken bistveno zmanjšuje verjetnost trkov med paketi. Pri velikem prometu se torej obnaša veliko bolje kot S-ALOHA. Pri nizkem prometu pa je S-ALOHA primernejša, saj ne zahteva dodatne režije, ki jo povzročajo rezervacijska podokna.

6.4. Sodostop z zaznavanjem nosilca – CSMA

Pri postopkih ALOHA, je zaradi pogostih trkov paketov, največja dosežena izkoriščenost prenosnih kapacitet kanala dokaj majhna. Za povečanje pretoka, se je potrebno izogniti prenosom, ki skoraj zagotovo povzročajo trke. S pomočjo zaznavanja oziroma poslušanja kanala je možno ugotoviti prisotnosti nosilnega signala. Tako lahko postaja določi ali že poteka kakšen prenos. Ta pristop uporablja *sodostop z zaznavanjem nosilca* (CSMA – Carrier Sense Multiple Access).

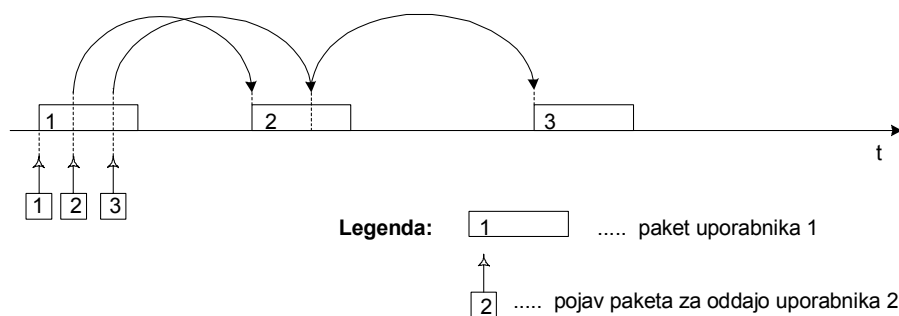
Vsi postopki CSMA uporabljajo enako pristop. Ko želi uporabnik prenesti paket mora najprej preveriti, če je prenosni kanal prost. Če je kanal prost lahko uporabnik takoj prenese paket. V primeru zasedenosti kanala pa mora s prenosom počakati. S tem trki še niso popolnoma odpravljeni, saj lahko več oddajnikov hkrati zazna prazen kanal in začne oddajati, je pa njihovo število zmanjšano in posledično izboljšana izkoriščenost kanala. Poleg tega pa se lahko pojavijo trki tudi zaradi zakasnitve razširjenje (propagation delay).

Različni načini CSMA se med seboj razlikujejo po načinu obnašanja uporabnikov, ki želijo oddajati in odkrivanju zasedenosti kanala. Ločimo:

- nevztrajni CSMA (non-persistent CSMA),
- p-vztrajni CSMA (p-persistent CSMA).

6.4.1. Nevztrajni CSMA

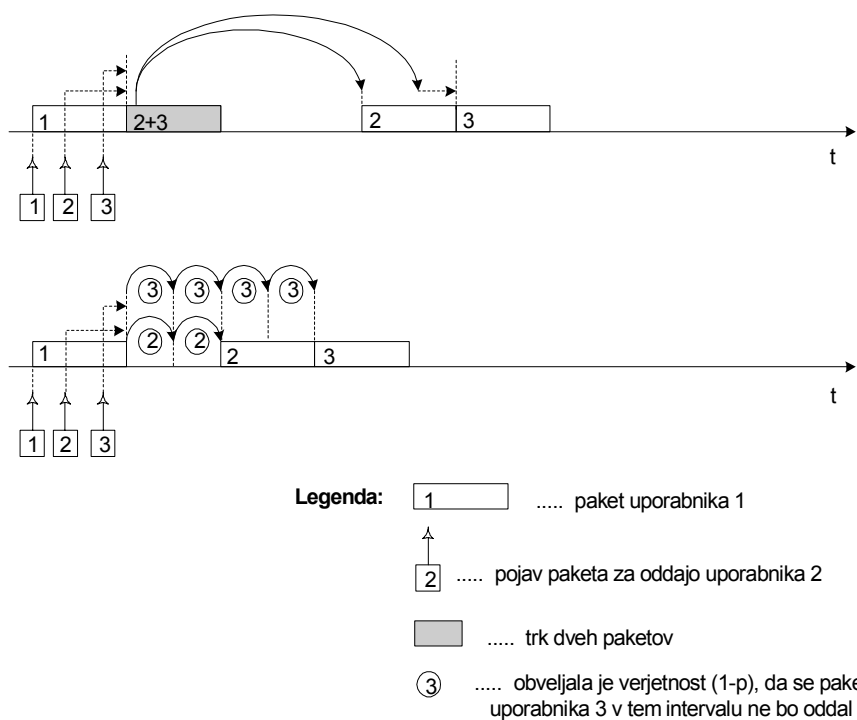
Nevztrajni CSMA potem, ko je ugotovljeno, da je kanal zaseden, določi naključno zakasnitev, po kateri bo ponovno preveril njegovo zasedenost. Če je v drugem poskusu kanal prost, se paket odda, sicer pa se postopek ponavlja. Njegova slabost je slabša izkoriščenost kanala pri manjšem prometu in velike zakasnitve, zlasti pri močnejšem prometu. Sama izkoriščenost kanala pa je v primeru močnejšega prometa pri nevztrajnem CSMA boljša. Delovanje nevztrajnega CSMA postopka na primeru na primeru grafično ponazarja slika 25. Kljub trem paketom, katerih zelene oddaje so časovno blizu, do trka ni prišlo.



Slika 25: Nevztrajni CSMA

6.4.2. P-vztrajni CSMA

P-vztrajni CSMA pri poslušanju kanala vztraja toliko časa, dokler ne ugotovi, da je le-ta prost. Nato paket odda z verjetnostjo p , z verjetnostjo $(1-p)$ pa z oddajo počaka. Če se je zgodilo slednje, ponovno poskusi z oddajo po vnaprej predpisanem času (zakasnitvi razširjanja), zopet z verjetnostjo p . Ker je ta čas vedno enak, tudi tu govorimo o t. i. razsekanosti na časovne intervale. Razlika v primerjavi z razsekano ALOHO pa je v tem, da dolžina intervala sedaj ni nujno enaka dolžini paketa, pač pa je le tolikšna, kolikor je potrebno, da postaja zazna, če je kanal zaseden. V primeru, da je po vnovičnem poskusu oddaje kanal spet zaseden ali pa če je pri oddaji paketa prišlo do trka, se ponoven poskus oddaje zakasni za naključen čas.

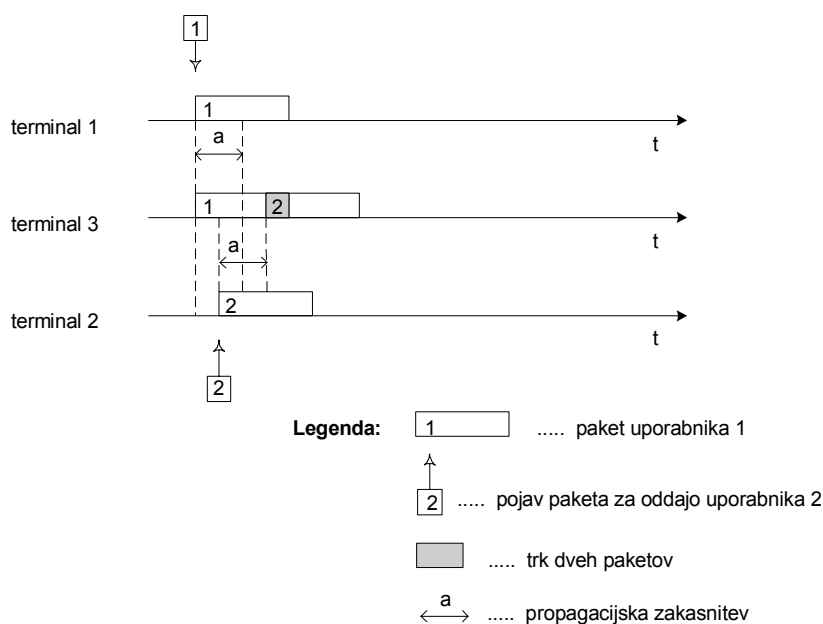


Slika 26. 1-vztrajni(zgoraj) in p-vztrajni CSMA (spodaj)

Verjetnost oddaje p se lahko določi vnaprej ali pa se jo spreminja dinamično. Manjši p pomeni manjšo verjetnost, da bi paketi postaj, ki želijo oddajati istočasno, trčili, vendar tudi večjo zakasnitev, večji p pa ravno obratno. Zato se pri majhnih prometnih obremenitvah dobro obnese velik p , pri velikih pa majhen. Če se p spreminja dinamično, se ga na začetku nastavi npr. na veliko vrednost, nato pa se ga zmanjšuje, če je trkov preveč. Delovanje p-vztrajnega CSMA protokola grafično prikazuje slika 26. Zgornja slika prikazuje poseben primer p-vztrajnostnega CSMA-ja, kjer je $p=1$. v primeru zaznanega zasedenega kanala, uporabnik vseskozi posluša kanal in takoj ko je kanal prost začne oddajati. Torej, če obstaja uporabnik, ki hoče prenašati, je kanal vedno zaseden. Vendar pa lahko obstaja več postaj, ki hkrati posluša kanal in čaka na možnost prenosa kar privede do zanesljivih trkov in ponovno zaznavanje kanala se prične po preteku naključnega časa.

6.4.3. Zakasnitev razširjanja

Zaznavanje prisotnosti drugih signalov na prenosnem kanalu pred oddajo paketa je torej metoda, s katero CSMA protokoli poskušajo preprečiti trke. Izkaže pa se, da je pri večjih razdaljah med postajami in posledično pri večjih zakasnitvah razširjanja ta metoda nekoliko slabša. Lahko se namreč zgodi, da druga postaja še ni zaznala prihajajočega paketa, ki ga je prva oddala pred časom, ki je manjši od časa razširjanja signala med postajama. Slika 27 prikazuje primer, ko postaja 1 in 2 pošiljata paket postaji 3. Pri tem sta postaji 1 in 3 blizu skupaj (zakasnitev razširjanja je majhna), postaja 2 pa je od obeh oddaljena (obstaja nezanemarljiva zakasnitev razširjanja). Postaja 2 je svoj paket oddal, saj ga paket postaje 1 še ni dosegel. Na strani postaje 3 je prišlo do trka.



Slika 27: Problem zakasnitve razširjanja pri postopku CSMA

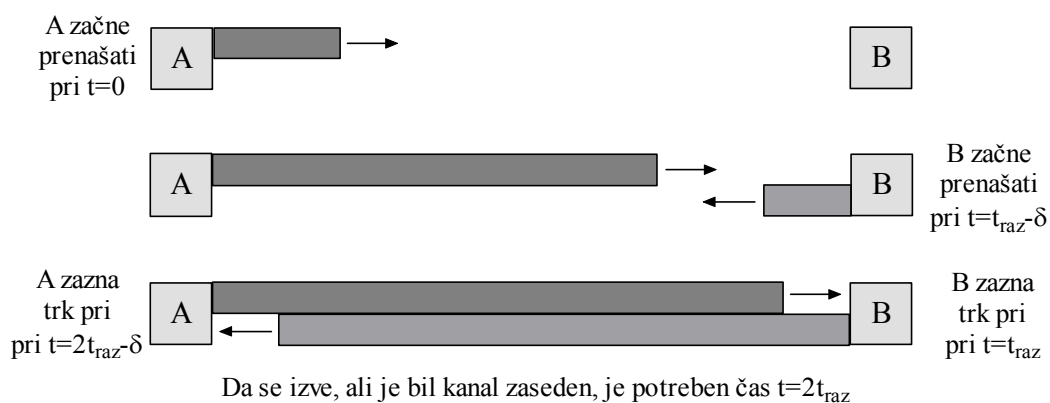
Izkoriščenost kanala je torej pri postopkih CSMA visoko korelirana z velikostjo zakasnitve razširjenja. Pri zakasnitvi razširjanja, ki znaša 10 % trajanja prenosa paketa, je izkoriščenost kanala nevztrajnega CSMA dobrih 50 %, medtem ko pri deležu zakasnitve glede na dolžino paketa 0,1 % izkoriščenost naraste na več kot 90 %.

6.5. Sodostop z zaznavanjem nosilca in z odkrivanjem trkov – CSMA/CD

Postopek CSMA zmanjša čas, v katerem lahko pride do trka iz časa prenosa enega ali dveh paketov pri načinih dostopa ALOHA, na en sam čas zakasnitve razširjenja t_{raz} paketa. V obeh primerih pa je v slučaju trka prenosni kanal nedosegljiv cel čas trajanja prenosa paketov, ki so trčili. To pa pomeni pomembno zmanjšanje prenosnih kapacitet. Če bi postaja lahko zaznala, kdaj je prišlo do trka bi bilo moč doseči bistveno boljše izkoriščenost prenosnih kapacitet. Ta pristop uporablja *sodostop z zaznavanjem nosilca in z odkrivanjem trkov* (CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection).

Ta način je v bistvu izboljšana verzija postopka CSMA. Leta 1983 je bil standardiziran kot IEEE 802.3 standard in se ga danes uporablja v omrežjih ethernet. CSMA/CD odpravlja slabost običajnega CSMA, da se oddajanje paketov nadaljuje tudi po trku in se s tem nesmiselno izgublja prenosna zmogljivost kanala. Iz tega razloga postaja pri postopku CSMA/CD hkrati z oddajanjem tudi sprejema oziroma opazuje kanal. Če ugotovi, da je prišlo do trka, takoj preneha z oddajanjem in o tem obvesti vse ostale postaje, ki za naključen čas počakajo s svojim poskusom oddaje. S tem se je čas trkov, ki je bil prej vnaprej izgubljen, zmanjšal.

Primer CSMA/CD prikazuje slika 28, kjer začne postaja A v času $t=0$ na skrajnem koncu omrežja oddajati paket postaji B na drugem skrajnem koncu omrežja. Paket doseže postajo B po času zakasnitve razširjenja t_{raz} . Če v tem času ne začne prenašati nobena druga postaja, postaja A zavzame kanal. Če pa neka druga postaja začne z prenosom pride do trka in postaja A preneha prenašati. V primeru, da začne prenašati postaja B ravno preden prispe prenos postaje A je le ta obveščena o trku v času $2 t_{raz}$. Torej postaja A šele po času $2 t_{raz}$ izve, da je uspešno zasedla kanal.



Slika 28: Zaznavanje trka pri CSMA/CD

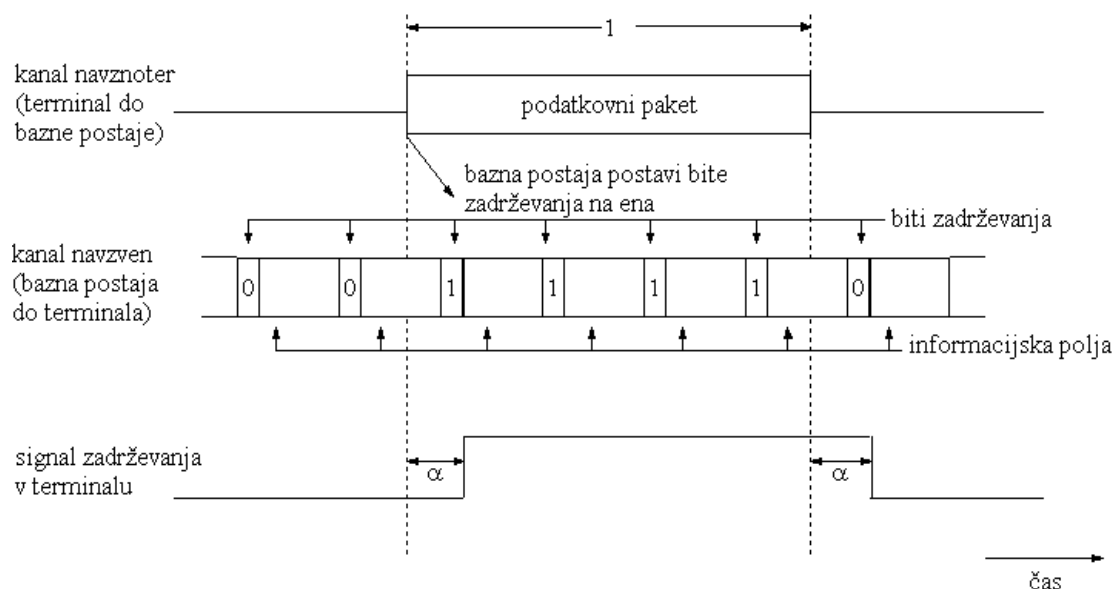
Pri uporabi CSMA/CD je možno doseči izkoriščenost kanala do 75%, vendar pri visokem prometu le ta zaradi pogostih trkov upade.

Verjetnost, da pride do trka se večja z medsebojno razdaljo med uporabniki, zato je tak način primeren le za manjše razdalje. Pri veliki zasedenosti prenosne zmogljivosti (nad 50 %) postanejo trki zelo pogosti, zato pri ponovnem poskušanju pride do ponovnih trkov, kar privede do zasičenosti prenosnih poti, ko ne more nihče več komunicirati, temveč vsi samo še poskušajo.

6.6. Sodostop z zadrževanjem - ISMA

Način CSMA zmanjšuje verjetnost trkov tako, da terminali poslušajo kanal in na ta način zaznajo prisotnost nosilnega signala. Toda CSMA se v radijskih omrežjih ne more izogniti trkom v primeru, da sta dva terminala izven medsebojnega dosega ali če jih loči neka fizična ovira nepropustna za RF signale. Tako terminali ne morejo zaznati aktivnosti vseh drugih terminalov, kar lahko privede do trkov. Ta problem imenujemo tudi *problem skritega terminala*, ki se ga je možno izogniti s postopkom *sodostopa z zadrževanjem* (ISMA – Inhibit Sense Multiple Access), kjer skupni centralni nadzornik (bazna postaja) odda signal zasedenosti na kanalu navzven takoj ko je bil sprejet paket navznoter in na ta način zadrži oddajanje vseh ostalih terminalov. Kanal navzven (outbound channel) uporablja bazna postaja za prenašanje do uporabnikov, kanal navznoter (inbound channel) pa uporabljajo uporabniki za komunikacijo z bazno postajo.

Slika 29 prikazuje časovno usklajevanje pri postopku sodostopa ISMA. Ko bazna postaja zazna podatkovni paket, postavi bite zadrževanja v kanalu navzven na ena, kar označuje stanje zasedenosti. Signal zadrževanja v terminalu se obnaša glede na opazovanje bitov zadrževanja. Terminal odda paket pripravljenosti (ready packet) ko je njegov signal zadrževanja na nizkem nivoju in zakasni svoj poizkus v primeru, da je signal zadrževanja na visokem nivoju.



Slika 29: Časovno usklajevanje pri ISMA

Povprečni čas med začetkom prenosa paketa in odkritjem stanja zasedenosti v ostalih terminalih je *čas zadrževanja*. V tem času se lahko pojavijo trki med paketi. Predvidevamo, da je ta čas normaliziran na enoto dolžine paketa in je označen z α . Perioda prenašanja po kanalu navznoter (od terminala k bazni postaji) se izmenjuje med stanjem zasedenosti (B - Busy) in stanjem nezasedenosti (I - Idle). Kanal navznoter je torej zaseden, ko je prisoten eden ali več paketov. Če z U označimo povprečni uspešni čas cikla (čas ko je kanal uporabljen ne da bi prišlo do trka), je povprečni pretok dan s splošnim izrazom:

$$S = \frac{U}{B + I}. \quad (6.5)$$

Povprečna vrednost prometa na kanalu navznoter je označena z G in je sestavljen iz prihoda novih paketov in iz prerazporejenih paketov bodisi zaradi trkov ali zadrževanja prenosov. Čas ko je kanal uporabljen brez konfliktov je enak $U = e^{-\alpha G}$. Torej je pretok oziroma izkoriščenost prenosnih zmogljivosti kanala podana z enačbo:

$$S = \frac{e^{-\alpha G}}{(1 + 2\alpha) + \frac{1}{G} e^{-\alpha G}}. \quad (6.6)$$

Izraz v imenovalcu se imenuje pričakovana dolžina cikla.

Pri razsekanemu nevztrajnemu postopku ISMA je začetek prenosa omejen na začetek časovnega okna katerega čas naj bi bil enak kot je čas prenosa posameznega paketa. Torej je možno, da ne pride do trka ali pa do popolnega trka. V slednjem primeru je neuspešno prenesen paket ponovno prenesen po preteku naključnega števila časovnih oken. Postopek prenosa in zadrževanja je enak kot pri običajnem ISMA-ju (nerazsekan nevztrajni ISMA), ki je opisan zgoraj. Dolžina periode nezasedenosti je enaka trajanju vsaj enega časovnega okna. Če je perioda nezasedenosti enaka trajanju dveh časovnih oken pomeni, da v času prvega časovnega okna ni prispel noben paket, v času drugega pa vsaj eden. Pretok razsekanega nevztrajnega ISMA-ja je enak:

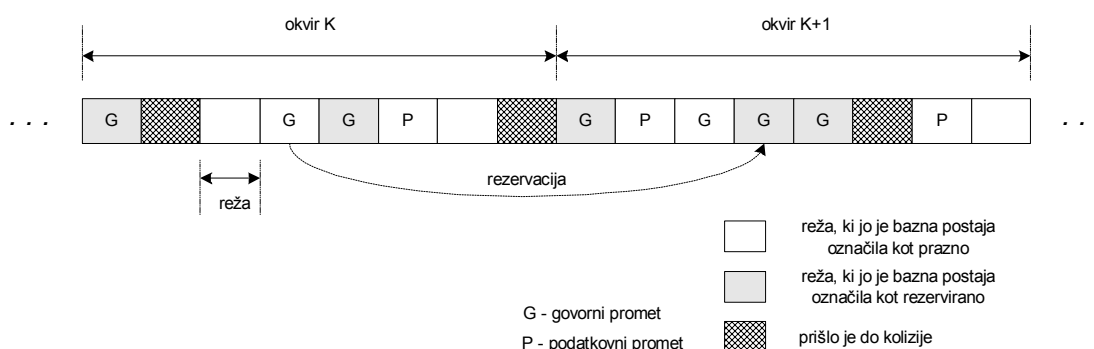
$$S = \frac{\alpha G e^{-\alpha G}}{1 + \alpha - e^{-\alpha G}}. \quad (6.7)$$

Pri nevztrajnem ISMA-ju prihaja do situacij ko je kanal nezaseden kljub temu, da imajo uporabniki pakete, ki jih želijo prenesti. 1-vztrajni ISMA je alternativa nevztrajnem ISMA-ju in se izogiba omenjenim situacijam. Ko kanal navzven pošlje terminalom signal zasedenosti, terminal, ki želi prenašati, pri poslušanju kanal vztraja toliko časa, da je le ta prost. Torej če le obstaja uporabnik, ki želi prenašati, je kanal vedno zaseden.

V tej skupini posopkov sodostopa je pretok enak razmerju med pričakovanem uporabnem času potrošenim v enem ciklu in samim trajanjem cikla. Cikel je sestavljen iz periode prenašanja in periode nezasedenosti. Skrajševanje periode nezasedenosti je možno z uporabo 1-vztrajnega ISMA-ja. Trajanje periode uspešnega prenosa mora ostati nespremenjena, saj je to čas ko je kanal najbolje uporabljen. Zmogljivost pa je možno dodatno izboljšati s skrajšanjem trajanja period neuspešnih prenosov. Pri postopku sodostopa ISMA se prenos lahko začne, če je kanal navznoter prost in kanal navzven pošlje signal nezasedenost, ki ga vsi uporabniki sprejmejo v času, ki je manjši ali enak času zadrževanja α . Po končanem času je lahko kanal že zaseden. ISMA/CD deluje enako kot ustrezni postopek ISMA, razen v primeru trka. Če bazna postaja med prenosom zazna trk, je prenos takoj prekinjen, paket pa je prerazporejen za kasnejši prenos.

6.7. Paketni sodostop z rezervacijo - PRMA

Paketni sodostop z rezervacijo (PRMA - Packet Reservation Multiple Access) deluje tako, da terminal, ki želi pošiljati podatke, pošlje prvi paket v eni izmed praznih podatkovnih oken z verjetnostjo p . Če je bil paket uspešno poslan, je to okno za uporabnika v nadaljevanju rezervirano, dokler nima več podatkov za prenos. Informacijo o zasedenosti okna pošilja bazna postaja razpršeno vsem terminalom. V primeru trka uporabniki znova poskusijo z oddajo v naslednjem okvirju. Možna je tudi ločitev govornega in podatkovnega prometa tako, da je v primeru govornega paketa rezervacija podatkovne reže realizirana, v primeru podatkovnega pa ne. Podatkovni promet mora tako v vsakem naslednjem okvirju znova tekmovati za dostop do kanala. Prioriteta govornega prometa nad podatkovnim je lahko dodatno dosežena še z večjo verjetnostjo p oddaje govornega paketa. Primer poteka komunikacije v navzgornji povezavi je prikazan na sliki 30. Uspešen prenos govornega paketa v oknu št. 4 je v naslednjem okvirju povzročil rezervacijo tega okna, medtem ko uspešen prenos podatkovnega paketa v oknu št. 6 okna ne rezervira.



Slika 30: Struktura okvirja PRMA v navzgornji povezavi in princip delovanja

Predlaganih je bilo tudi mnogo modifikacij postopka sodostopa PRMA, ki prispevajo k izboljšanju delovanja. *Okvirni sodostop z rezervacijo* (FRMA - Frame Reservation Multiple Access) ločuje okna na tiste, ki so rezervirana za govorne pakete, in tista, ki so rezervirana za podatkovne pakete. Vsak terminal lahko v odvisnosti od generiranega prometa tekmuje le za eno vrsto teh oken. Razmerje oken za govorne in podatkovne pakete je možno nastavljati

dinamično od okvirja do okvirja. PRMA++ ločuje okna na tiste, ki so rezervirane za tekmovanje uporabnikov in tiste, ki so rezervirane za prenos podatkov. Pri tem je možna dodatna izboljšava, tako, da se namesto polnih oken za tekmovanje uporablja mini okna, s čimer je dosežen večji izkoristek prenosnih kapacitet. Tak princip uporablja tudi *centraliziran PRMA* (C-PRMA - Centralized PRMA), ki pa že uporablja razvrščevalne postopke za doseganje zahtev po kakovosti storitev (QoS), ki jih pošiljajo terminali, in zato sodi v skupino postopkov dodeljevanj na zahtevo.

7. Zaključek

Ne le v komunikacijskih sistemi ampak tudi v računalniških in številnih drugih, kjer so viri v skupni uporabi večih neodvisnih uporabnikov, pogosto prihaja do situacij, ko si mora več uporabnikov deliti skupni prenosni medij. Obstajajo različne tehnike, ki omogočajo bolj ali manj učinkovit dostop do skupnih prenosnih zmogljivosti. Osnovni postopki sodostopa se lahko delijo na naključni, nadzorovani in kodni sodostop. Možno pa je razlikovanje postopkov sodostopa tudi na delitev zmogljivosti in začasnega zasedanja celotnih zmogljivosti. Pri izbiri ustreznega postopka sodostopa za določeno okolje je potrebno upoštevati predvideno število uporabnikov, zahtevan pretok, možnost nastanka trkov in motenj, zanesljivost povezav, zakasnitev pri dostopu do kanala, zagotavljanje prioritete.

V nalogi so predstavljeni osnovni postopki sodostopa, njihov princip delovanja (predvsem način delitve oziroma dostopa do skupnega prenosnega medija) in bistvene prednosti in slabosti.

Postopki sodostopa s fiksnim dodeljevanjem statično dodelijo dele prenosnih kapacitet posameznim uporabnikom, kar se pri šibkem in nekonstantnem (primeri izbruhov) prometu odraža kot dokaj neučinkovita izraba kanala, vendar pa ne prihaja do trkov in s tem do neuspešnih prenosov. Omenjeno slabost izboljšujejo dinamični postopki, ki dodeljujejo za določen čas celotne prenosne kapacitete uporabnikom glede na njihove potrebe. Pri naključnem dodeljevanju prenosnih kapacitet je možno doseči majhno zakasnitev, vendar je možnost trkov zelo velik, zlasti pri močnem prometu. Zato postopki naključnega dostopa uporabljajo različne tehnike za preprečevanje hkratnega dostopa večih uporabnikov do istega prenosnega medija.

Zaradi omejenosti komunikacijskih virov, zlasti v brezžičnih sistemih (omejena pasovna širina), je izrednega pomena uporaba učinkovitega postopka sodostopa, ki v danem okolju najbolje izkoristi prenosne zmogljivosti kanala.

8. Seznam uporabljenih virov

- [1] M. Štular, Posplošitev modela kodnega sodostopa do prenosnega kanala, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2000.
- [2] B. Skalar, Digital Communications; Fundamentals and Applications, SE, Practice Hall, 2004.
- [3] I. A. Glover, P. M. Grant, Digital Communications,
- [4] R. Prasad, Universal Wireless Personal Communications, Artech House Publisher, 1998.
- [5] E. Lutz, M. Werner, A. Jahn, Satellite Systems for Personal and Broadband Communications, Springer, 2000.
- [6] A. Vilhar, Postopki sodostopa in postopki razvrščanja v širokopasovnih brezžičnih omrežjih, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2004.
- [7] A. Bateman, Digital Communications, Addison-Wesley, 1999, <http://lkn.fe.uni-lj.si/vaje/gtk/GRADIVO/dc.zip>, april 2005.
- [8] R. Rom, M. Sidi, Multiple Access Protocols: Performance and analysis, Springer-Verlag, <http://www-comnet.technion.ac.il/rom/PDF/MAP.pdf>, april 2005.
- [9] H. Khalil: Stochastic Modelling for Wireless Communication Networks-Multiple Access Methods, U.U.D.M. Project Report, Uppsala University, maj 2003, <http://www.math.uu.se/research/pub/Khalil1.pdf>, april 2005.
- [10] Public Safety Radio Frequency Spectrum: A Comparison of Multiple Access Techniques, PSWN Program, november 2004, http://www.safecomprogram.gov/NR/rdonlyres/695E6803-4D9C-40FD-8E57-FE57C273E48A/0/SIAR_Multiple_Access_Techniques.pdf, april 2005.
- [11] Spread Spectrum & CDMA Tutorial, <http://www.bee.net/mhendry/vrml/library/cdma/cdma.htm>, april 2005.