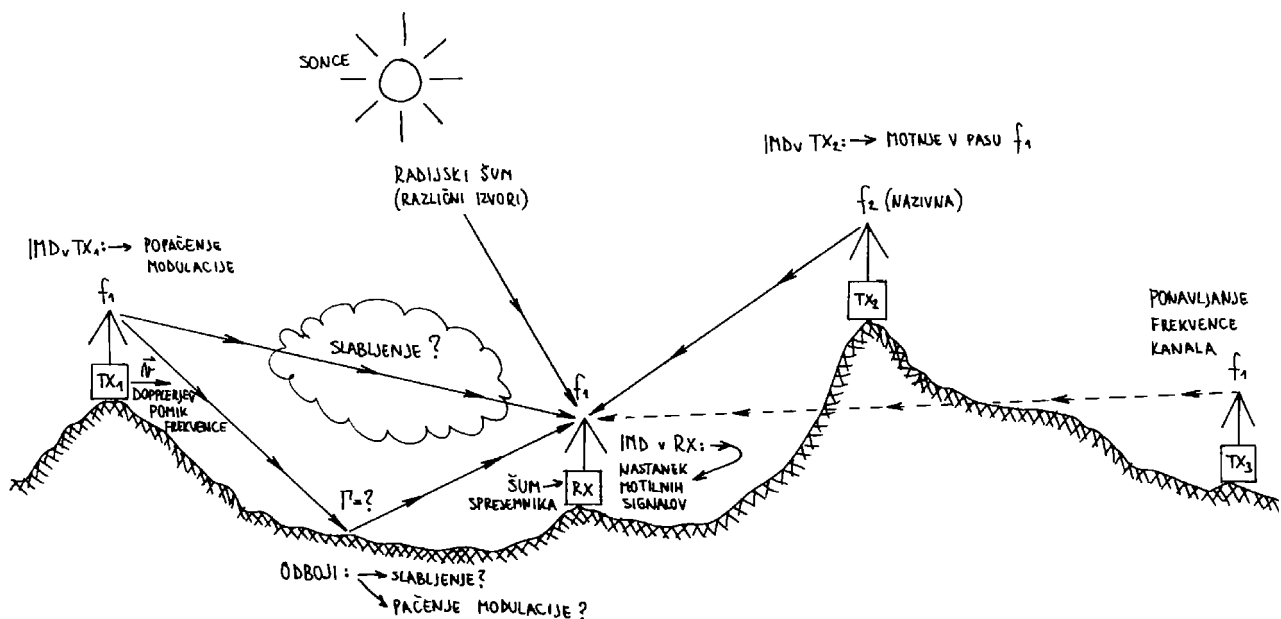


6. Razdelitev radiofrekvenčnega spektra

6.1. Motnje v radijskih zvezah

Radijske zveze uporabljajo elektromagnetno valovanje, ki se prosto razširja po prostoru. En in isti prostor si torej delijo med sabo vsi uporabniki, kot je to prikazano na sliki 6.1. Pri načrtovanju radijskih zvez najprej pomislimo na naravne omejitve, kot so slabljenje radijske poti, odboji, Doppler-jev pomik ter toplotni šum antene in sprejemnika.



Slika 6.1 - Motnje v radijskih zvezah.

Resnično radijsko zvezo hkrati omejujejo tudi drugi uporabniki radiofrekvenčnega spektra in to na različne načine. Oddajnik TX_2 naprimer uporablja radiofrekvenčni kanal f_2 , vendar zaradi njegove tehnične nedovršenosti seva nekaj motenj tudi v kanalu f_1 . Oddajnik TX_3 ponovno uporablja isti radiofrekvenčni kanal f_1 kot oddajnik TX_1 in izkorišča slabljenje naravnih ovir, da omejuje motnje sprejema TX_1 .

Končno, motnje sprejema lahko nastanejo tudi zaradi tehnične nedovršenosti sprejemnika, običajno pojačenj znotraj sprejemnika. Motnje sprejema so posebno hude, ko isti uporabnik hkrati sprejema in oddaja. Sprejem tedaj v glavnem moti lastni oddajnik.

Vprašanje medsebojnih motenj se je pojavilo kaj kmalu po izumu radijske zveze pred dobrim stoletjem. Zmanjševanje medsebojnih motenj zahteva dvoje: tehnično dovršenost radijskih oddajnikov in sprejemnikov ter dogovor o delitvi radiofrekvenčnega spektra med samimi uporabniki. Obe zahtevi sta se zaostrovali vzporedno z razvojem radijske tehnike in večanjem števila uporabnikov.

Takoj zatem, ko so inženirji dokazali praktično uporabnost

radijskih zvez, so se radijski oddajniki smatrali za močno orožje, namenjeno izključno državni uporabi. Znatno del radiofrekvenčnega spektra je še danes namenjen izključno državni (vojaški) uporabi v večjem delu sveta. Preostali radiofrekvenčni spekter je sicer namenjen drugim uporabnikom, državni organi pa naj bi tudi tu skrbeli za preprečevanje medsebojnih motenj med uporabniki. Uporaba radijskih zvez in radiofrekvenčnega spektra je zato v večjem delu sveta obdavčena kljub temu, da gre za naravno dobrino, ki je načeloma vsem dostopna. S ciljem preprečevanja medsebojnih motenj so v večini držav tudi predpisane tehnične zahteve, katerim morajo ustrezati radijski oddajniki in sprejemniki.

6.2. Mednarodni in državni predpisi

Mednarodni dogovori o delitvi radiofrekvenčnega spektra so se začeli že v času po prvi svetovni vojni. Po drugi svetovni vojni je pod okriljem Organizacije Združenih Narodov nastala tudi Mednarodna telekomunikacijska zveza ITU (International Telecommunication Union), ki se med drugim ukvarja tudi z razdelitvijo radiofrekvenčnega spektra na meddržavni ravni. Kot radiofrekvenčni spekter se smatra sevano elektromagnetno valovanje v frekvenčnem pasu med 9kHz in 400GHz.

Osnovni pravni akt ITU, ki ureja razdelitev radiofrekvenčnih pasov, se imenuje Radio Regulations. Ta akt deli svet na tri področja (region-e). Prvo področje zajema Evropo, Afriko in države bivše Sovjetske Zveze, drugo področje zajema Ameriki ter tretje področje zajema preostalo Azijo in Oceanijo. Tri področja so med sabo zemljepisno dovolj oddaljena, da so radijske motnje omejene in je v vsakem področju možna drugačna razdelitev radiofrekvenčnih pasov.

Danes je večina držav članic OZN in članic ITU, ki v svojih državnih predpisih v dobri meri povzemajo vsebino Radio Regulations v državnih načrtih razporeditve radiofrekvenčnih pasov. Ker je državne predpise težko spreminjati in še težje mednarodne dogovore, so vse spremembe zakonodaje na področju radijskih zvez silno počasne. To je tudi ena osnovnih pomanjkljivosti radijske zveze: zakonodaja hudo zavira razvoj, vendar ta trenutek nihče na svetu ne najde boljše rešitve.

Radio Regulations in državni načrti razporejajo radiofrekvenčne pasove med različne storitve ali službe (services). Storitve zajemajo radijske komunikacije različnih vrst kot tudi uporabo radijskih valov v druge namene, naprimer radionavigacija ali daljinsko zaznavanje. Končno zakonodaja predpisuje uporabo radiofrekvenčnega spektra tudi za naprave, katerih namen ni sevanje elektromagnetnega valovanja v prostor, vendar lahko zaradi tehnične nedovršenosti povzročajo radijske motnje drugim uporabnikom.

Primer (odsek) načrta razporeditve radiofrekvenčnih pasov je prikazan na sliki 6.2. Isti frekvenčni pas je lahko dodeljen več različnim storitvam. Načrt deli storitve na primarne (napisane z velikimi črkami) in sekundarne (napisane z malimi črkami). Dodatna pojasnila so navedena v številnih oštevilčenih opombah.

RADIOFREKVENČNI PAS	RADIOKOMUNIKACIJSKA STORITEV
432–438 MHz	RADIOAMATERSKA RADIOAMATERSKO SATELITSKA RADIOLOKACIJSKA Storitev satelitskega raziskovanja Zemlje (aktivno) 5.279A Mobilna 5.138, 5.280, 5.282
438–440 MHz	RADIOAMATERSKA RADIOLOKACIJSKA MOBILNA razen zrakoplovne mobilne 5.275 FIKSNA 5.275
440–450 MHz	MOBILNA razen zrakoplovne mobilne Radiolokacijska 5.286
450–455 MHz	MOBILNA 5.209, 5.286, 5.286A
455–456 MHz	MOBILNA 5.209, 5.286A
456–459 MHz	MOBILNA 5.287
459–460 MHz	MOBILNA 5.209, 5.286A
460–470 MHz	MOBILNA Meteorološka satelitska (vesolje-Zemlja) 5.287, 5.289
470–790 MHz	RADIODIFUZNA Mobilna Radioastronomska 5.149, 5.306, 5.311
790–862 MHz	RADIODIFUZNA Mobilna 5.317A
862–870 MHz	MOBILNA 5.317A
870–876 MHz	MOBILNA 5.317A
876–880 MHz	MOBILNA 5.317A
880–890 MHz	MOBILNA 5.317A
890–915 MHz	MOBILNA 5.317A
915–921 MHz	MOBILNA 5.317A Radiolokacijska
921–925 MHz	FIKSNA MOBILNA 5.317A Radiolokacijska
925–935 MHz	MOBILNA 5.317A Radiolokacijska
935–942 MHz	MOBILNA 5.317A Radiolokacijska
942–960 MHz	MOBILNA 5.317A
960–1164 MHz	ZRAKOPLOVNA RADIONAVIGACIJSKA 5.328
1164–1215 MHz	ZRAKOPLOVNA RADIONAVIGACIJSKA 5.328 ZRAKOPLOVNA RADIONAVIGACIJSKA SATELITSKA 5.328A, 5.328B

Slika 6.2 – Načrt razporeditve radiofrekvenčnih pasov.

Najpomembnejše radiokomunikacijske storitve zajemajo fiksno, mobilno in radiodifuzno storitev. Pri tem fiksna storitev pomeni enosmerno ali dvosmerno radijsko zvezo točka-točka, kjer sta obe

radijski postaji nepremični in običajno opremljeni z usmerjeni antenami. V takšnih pogojih je razmeroma preprosto omejiti medsebojne motnje različnih zvez s predpisovanjem položaja radijskih naprav ter smernih diagramov anten.

Mobilna storitev pomeni radijsko zvezo točka-točka do ali med premikajočimi uporabniki, ki imajo običajno neusmerjene antene. V takšnih pogojih je težje preprečiti medsebojne motnje. Predpisi naprej delijo mobilno storitev na kopensko, pomorsko in zrakoplovno. S pojavom umetnih satelitov predpisi delijo večino storitev na satelitske in zemeljske. Radiodifuzna storitev (broadcast) pomeni radijsko zvezo od enega oddajnika do številnih sprejemnikov.

Namen radiolokacije in radionavigacije je določanje položaja, hitrosti oziroma lege s pomočjo radijskih valov. Radiolokacija pomeni določanje položaja, hitrosti oziroma lege nekega drugega predmeta, primer je radar. Radionavigacija pomeni določanje lastnega položaja, hitrosti oziroma lege, primer je GPS. Radioastronomska storitev pomeni daljinsko zaznavanje s pomočjo radijskih valov, dodeljeni frekvenčni pasovi so pogosto vezani na naravne pojave (spektralne črte) v vesolju.

Določene storitve so si v dolgoletnem razvoju priborile privilegiran položaj, čeprav gre le za radijske komunikacije v ožjem pomenu besede. V to skupino sodijo storitev meteorološke podpore, storitev vesoljskih raziskav ter storitev standardne frekvence in časovnih signalov. Končno, radioamaterska storitev je namenjena raziskavam in izobraževanju, pri tem zajema vse načine uporabe radijskih valov.

Iz časov, ko so se radijske zveze obravnavale izključno kot orožje, izhaja tudi zahteva, da mora imeti vsak radijski oddajnik in celo vsak radijski sprejemnik dovoljenje za uporabo radijske postaje. Radijsko dovoljenje je lahko skupno za naprave, ki delujejo v določenem omrežju. Tako ima operater mobilne telefonije eno samo radijsko dovoljenje za vse mobilne telefone v svojem omrežju, saj lahko daljinsko nadzira delovanje vseh teh naprav.

Nekoč so bile dovoljene le redke izjeme brez dovoljenja za uporabo radijske postaje, naprimer radiodifuzni sprejemniki. Z razvojem preprostih in cenjenih radijskih naprav se tudi seznam naprav, ki ne potrebujejo radijskega dovoljenja, počasi širi. Nelicenčna uporaba je danes dovoljena v določenih frekvenčnih pasovih za oddajnike malih moči od preprostih telekomand do malih radarjev za samodejno odpiranje vrat in brezvrvičnih računalniških omrežij.

Posebnost so tudi ISM pasovi (Industrial, Science, Medical). Ti pasovi so namenjeni napravam, ki uporabljajo visokofrekvenčno moč v omejenem prostoru, običajno za ogrevanje (mikrovalovne pečice). Neželjeno sevanje teh naprav se kljub skrbni izdelavi ne da omejiti v takšni meri, da ne bi povzročalo škodljivih motenj radijskim komunikacijam. ISM uporaba je zato omejena na ozke frekvenčne pasove, kjer radijske zveze niso varovane pred tovrstnimi motnjami. ISM pasovi sicer pogosto sovpadajo s pasovi, ki so dodeljeni nelicenčni uporabi.

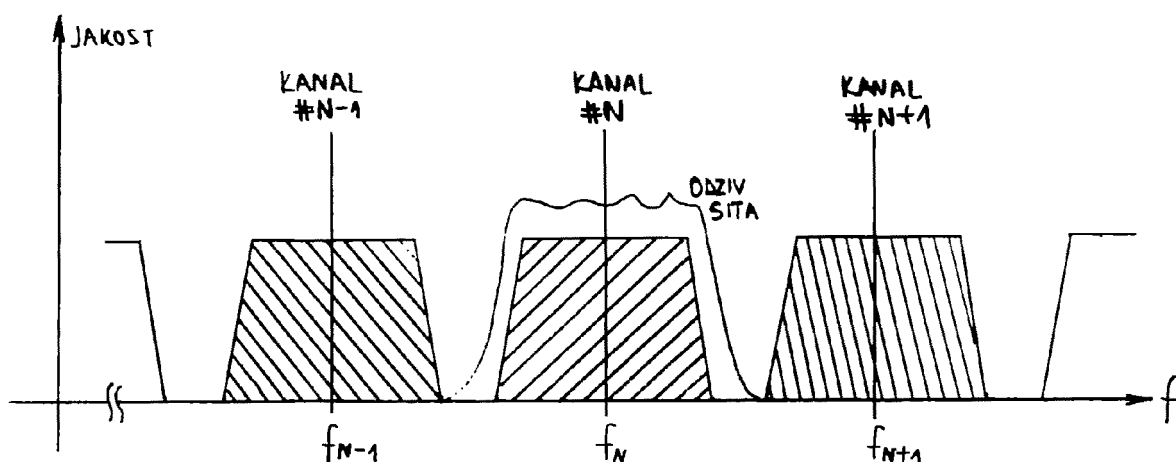
V določenih primerih se dovoljuje nelicenčna uporaba radijskih oddajnikov zelo malih moči tudi v frekvenčnih pasovih, ki so sicer dodeljeni drugim storitvam ali službam. V tem slučaju je nujno zagotoviti, da je spektralna gostota moči nelicenčnih uporabnikov dovolj majhna. Nelicenčni uporabniki morajo tedaj namenoma razporediti svojo moč po dovolj širokem delu spektra, bodisi z uporabo tehnike razširjenega spektra oziroma zelo kratkih impulzov. Naprave kratkega doseganja z zelo širokim spektrom (preko 10% osrednje frekvence) označimo s kratico UWB (Ultra wide Band).

6.3. Radiofrekvenčni kanali in celice

Frekvenčni pas, ki je dodeljen določeni storitvi, je treba naprej razdeliti med večje število uporabnikov. Osnovna delitev frekvenčnega pasu gre še vedno v frekvenčnem prostoru (FDMA) in sicer dodeljeni pas razdelimo na večje število radiofrekvenčnih kanalov. Prednost delitve v frekvenčnem prostoru je v tem, da ne zahteva sodelovanja med različnimi uporabniki.

Znotraj radiofrekvenčnih kanalov lahko razpoložljivo zmogljivost delimo še naprej v časovnem (TDMA) ali kodnem (CDMA) prostoru. Časovna delitev pri tem zahteva sinhronizacijo časa oddaje med uporabniki, kodna delitev pa skupno uravnavanje oddajne moči posameznih udeležencev. Časovna in kodna delitev torej zahtevata sodelovanje med uporabniki oziroma centralnega nadzornika, ki določa čas oziroma moč oddaje posameznega udeleženca.

Pri delitvi pasu na radiofrekvenčne kanale moramo seveda upoštevati možnosti in omejitve razpoložljivih oddajnikov in sprejemnikov. Frekvenčni razmak med kanali mora biti dovolj velik, da poleg frekvenčnega spektra modulacije dopušča še odstopanja frekvenc sprejemnikov in oddajnikov ter neidealnosti frekvenčnih pasovnih sit. Med posameznimi kanali moramo imeti zaščitne pasove, kot je to prikazano na sliki 6.3.



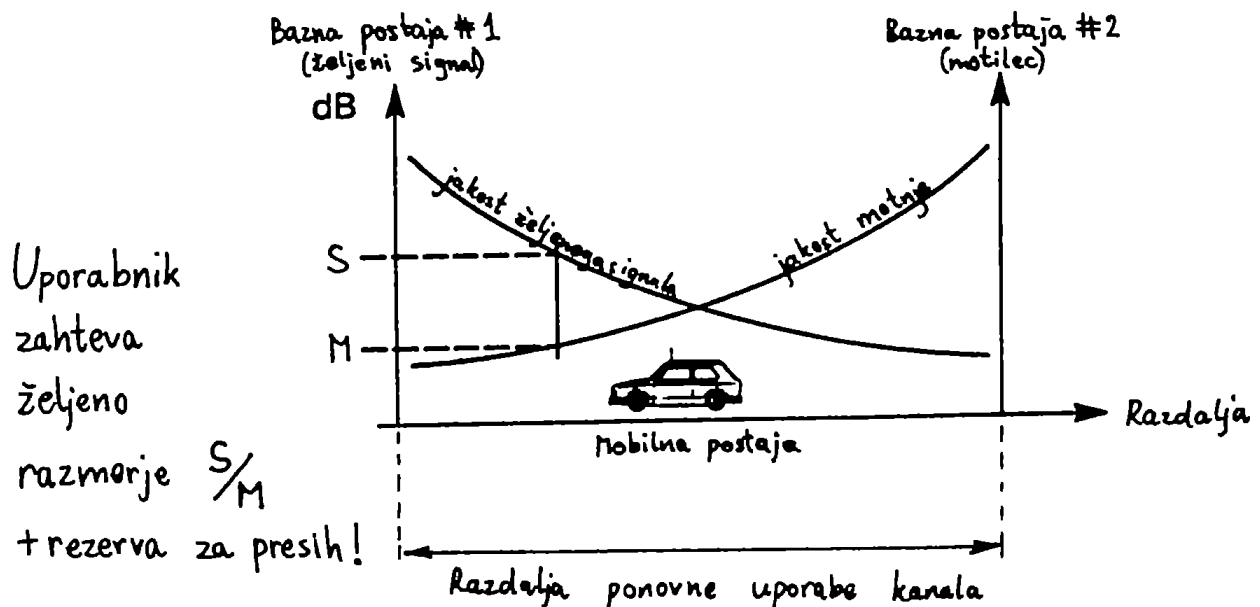
Slika 6.3 - Delitev pasu na radiofrekvenčne kanale.

Preprost primer je prenos človeškega govora s pomočjo

frekvenčne modulacije v analogni radiotelefoniji. Človeški govor vsebuje frekvence do 3kHz, frekvenčni koleb izberemo ± 5 kHz. Po Carson-ovem pravilu ima takšen frekvenčno moduliran visokofrekvenčni signal pasovno širino 16kHz.

Odziv pasovnega siva širine 16kHz ima boke, ki se spuščajo vsaj 5kHz na vsako stran, preden dosežejo dovolj veliko slabljenje. Frekvenca oddajnika lahko odstopa ± 1 kHz, prav tako frekvenca sprejemnika. Smiselna izbira je zaščitni pas širine 9kHz med kanali, kar daje kanalski razmik osrednjih frekvenc 25kHz.

Ker je domet radijskih oddajnikov omejen, se takoj postavi vprašanje, na kateri oddaljenosti lahko isti radiofrekvenčni kanal dodelimo nekemu drugemu uporabniku in pri tem med obema ne pride do medsebojnih motenj. Razlaga ponovne uporabe radiofrekvenčnega kanala je prikazana na sliki 6.4. Vsakemu uporabniku moramo zagotoviti dovolj veliko razmerje signal/motnja ob upoštevanju najslabše možnosti presiha: minimum signala in maksimum motnje.



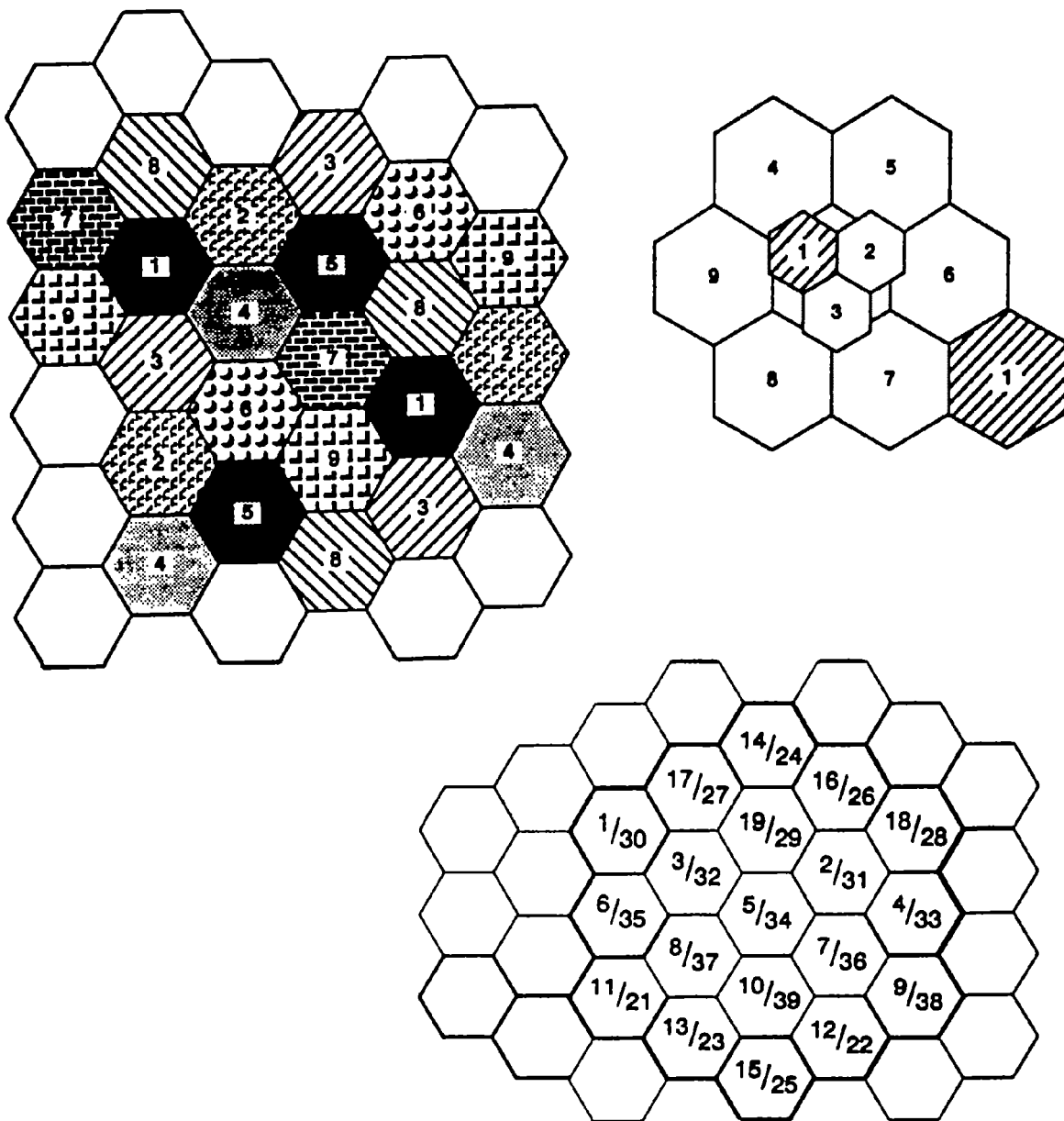
Slika 6.4 – Ponovna uporaba radiofrekvenčnega kanala.

Razdalja ponovne uporabe je torej odvisna od treh veličin: zahtevanega razmerja signal/motnja, statistike presiha in poteka slabljenja radijske zveze z razdaljo. Najpreprostejši zgled je zveza med mobilno in bazno postajo. Zaradi odboja od tal in uklonskega slabljenja ovir upada moč sprejetega signala s četrto potenco razdalje. Analogna frekvenčna modulacija zahteva razmerje signal/motnja vsaj 15dB zaradi praga FM demodulatorja, dodatnih 15dB izberemo kot rezervo za presih pri Rayleigh-ovi statistiki.

Vključno z rezervo za presih potrebujemo razmerje signal/motnja najmanj 30dB oziroma 1000 v linearnih enotah. Četrty koren iz tega števila je 5.623, kar nam daje razmerje med oddaljenostjo motilca in koristnim dometom radijske zveze. Isti radiofrekvenčni kanal je torej smiselno ponavljati na razdalji, ki je 5.623-krat večja od koristnega dometa radijske zveze.

Koristni domet bazne postaje preprosto predstavimo s krogom na zemljevidu. Ker s krogi ne moremo pokriti celotne površine, površino razdelimo na šesterokotne celice, kot je to prikazano na sliki 6.5. Posameznim celicam nato dodeljujemo radiofrekvenčne kanale tako, da zagotavljamo dovolj veliko razmerje signal/motnja za vse uporabnike.

V opisanem primeru analogne frekvenčne modulacije in Rayleigh-ovega presiha je smiselno ponavljati isti radiofrekvenčni kanal vsake tri celice, kar približno ustreza izračunanemu razmerju oddaljenosti motilca in koristnega dometa. Skupno potrebujemo v tem slučaju devet različnih radiofrekvenčnih kanalov za pokrivanje celotnega zemljevida v dveh dimenzijah.



Slika 6.5 – Razdelitev prostora na šesterokotne celice.

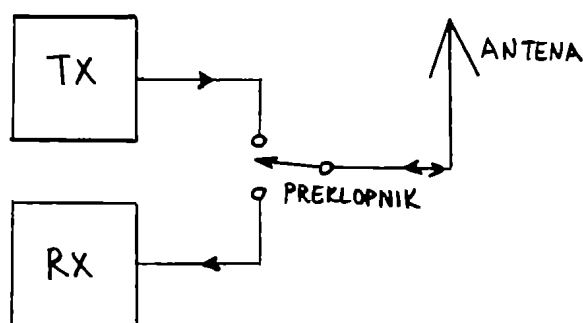
Zahteva po ponavljanju istega radiofrekvenčnega kanala postavlja hkrati omejitev za spektralno učinkovitost oddaje. Oddaja z visoko spektralno učinkovitostjo (naprimer analogna zemeljska televizija z amplitudno modulacijo) zahteva visoko razmerje signal/motnja, kar pomeni zelo veliko razdaljo do naslednjega oddajnika na istem radiofrekvenčnem kanalu. Visoka spektralna učinkovitost torej pomeni slabo prostorsko učinkovitost ponavljanja kanala.

Prostorsko učinkovitost ponavljanja kanalov lahko v nekaterih primerih znatno izboljšamo v uvedbo polovičnih kanalov, še posebno v primerih, ko imamo med posameznimi kanali široke zaščitne pasove. Motnje med dvema oddajama na polovični frekvenčni razdalji kanalskega razmika (naprimer 12.5kHz pri 25kHz kanalih) so v vsakem primeru dosti manjše od motenj na istem kanalu. Primer delitve prostora na 2-krat 19 polovičnih kanalov je prikazan na sliki 6.5.

V praksi seveda upoštevamo pri ponavljanju radiofrekvenčnih kanalov tudi gostoto uporabnikov in naravne ovire, ki nam v določenih smereh povečujejo slabljenje. Gostoti uporabnikov se prilagajamo z različnim dometom baznih postaj in različno velikimi celicami, kar običajno dosežemo s primerno višino anten baznih postaj.

6.4. Motnje lastnega oddajnika

Pri praktični uporabi radijskih zvez pogosto zahtevamo dvosmerno zvezo, to se pravi možnost, da vsak udeleženec hkrati sprejemna in oddaja. Moči radijskih oddajnikov, tudi tistih v malih prenosnih napravah z baterijskim napajanjem, so ponavadi tako velike, da v bližnjem sprejemniku ne povzročijo le nelinearnih pojavov, pač pa lahko tudi poškodujejo in uničijo vhodne stopnje sprejemnika.



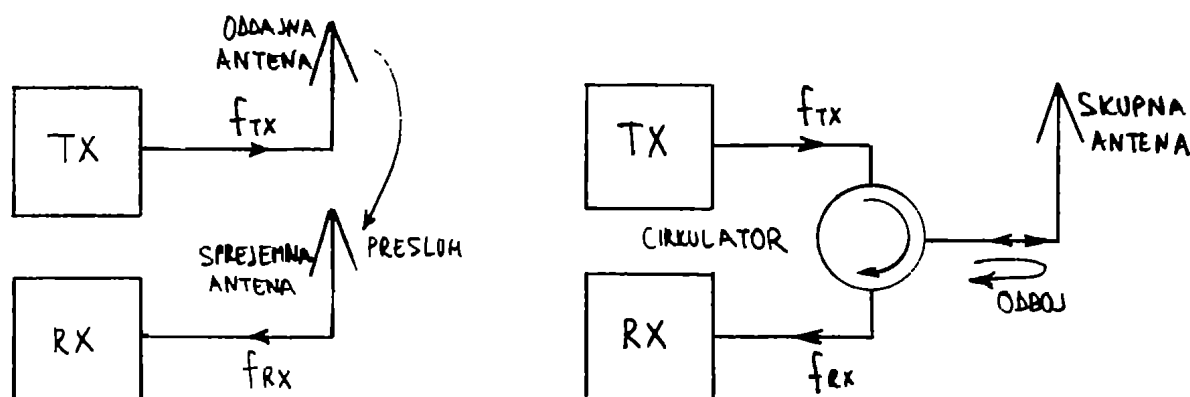
Slika 6.6 – Preklop sprejem/oddaja.

Motnjam oddajnika v lastnem sprejemniku se lahko izognemo na več različnih načinov. Najpreprostejša rešitev je prikazana na sliki 6.6. Oddajnik in sprejemnik nikoli ne delata istočasno, stikalo pa poskrbi za preklapljanje ene same antene med sprejemnikom in oddajnikom. Če je antenski preklopnik izveden brez

mehanskih sestavnih delov, lahko anteno preklaplja več stokrat v sekundi in uporabnik pojava sploh ne opazi, kot naprimer v GSM telefonu.

Elektronski preklopniki so poceni, majhni, zanesljivi in ceneni. Zato skuša dober inženir načrtovati dvosmerno radijsko zvezo tako, da ni potrebe po bolj komplicirani rešitvi. V analognih radijskih zvezah kot tudi pri marsikateri številski zvezi ni dopustno prekinjajoče delovanje sprejemnika niti oddajnika. V tem primeru moramo ločitev med sprejemnikom in oddajnikom zagotoviti drugače.

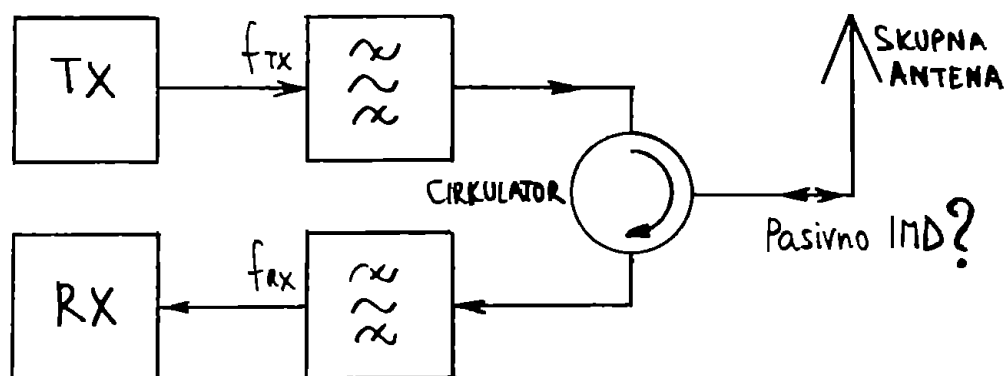
Delno ločitev med sprejemnikom in oddajnikom lahko dosežemo z ločenima antenama za sprejem in oddajo oziroma s cirkulatorjem, kot je to prikazano na sliki 6.7. Ko sta sprejemna in oddajna antena blizu skupaj, je težko zmanjšati presluh pod -20dB . Podobno je težko zmanjšati presluh v primeru uporabe cirkulatorja in ene same antene. V tem primeru povzroča presluh predvsem odbiti val na priključku antene.



Slika 6.7 - Ločeni anteni in cirkulator.

Slabljenje 20dB med sprejemnikom in oddajnikom je nezadostno v večini dvosmernih radijskih zvez. Pri moči oddajnika komaj 1W dobimo tedaj kar 10mW na vhodni priključek sprejemnika, kar zagotovo pošlje vhodne stopnje sprejemnika v zasičenje in lahko celo poškoduje občutljive polprevodnike na vhodu sprejemnika. Ločene antene oziroma cirkulator se uporabljajo edino v primeru oddajnikov zelo majhnih moči ter v primeru, ko signal oddajnika hkrati uporabljamo kot lokalni oscilator sprejemnika.

Večjo ločitev med sprejemnikom in oddajnikom lahko dosežemo edino z večanjem razdalje med antenama oziroma z uporabo frekvenčnih pasovno prepustnih in zapornih sit, kot je to prikazano na sliki 6.8. V vsakem primeru potrebujemo dve siti: da močen signal na frekvenci oddajnika f_{TX} ne zaide v sprejemnik in da širokopasovni šum oddajnika na frekvenci f_{RX} ne pokvari občutljivosti sprejemnika.



Slika 6.8 - Antenska kretnica ali duplekser.

Izdelava primernih sit je tehnično zahtevna, ker sita zahtevajo uporabo nihajnih krogov ali rezonatorjev visoke kvalitete Q. Kot primer si oglejmo analogni mobilni telefon v frekvenčnem pasu 460MHz. Razdalja med sprejemno in oddajno frekvenco znaša 10MHz, kar je 46-krat manj od osrednje frekvence. Da so izgube v frekvenčnih sitih sprejemljivo majhne, mora biti kvaliteta rezonatorjev v sitih vsaj 10-krat večja ali Q večji od 460.

Takšne kvalitete ne moremo doseči s tuljavami in kondenzatorji, za to kvaliteto potrebujemo velike in nerodne votlinske rezonatorje. Izmere antenske kretnice se da zmanjšati z uporabo dielektrika (keramike) v rezonatorjih. Kljub temu ostane antenska kretnica največji in najdražji sestavni del analognega mobilnega telefona.

Tehnične težave pri izdelavi ustreznih kretnic upoštevajo tudi zakonodajalci pri razporeditvi radiofrekvenčnih pasov. Mobilnim telefonom je naprimer dodeljen frekvenčni pas 890-915MHz za zvezo od telefona do bazne postaje in 935-960MHz za zvezo v obratni smeri. Takšna dodelitev frekvenčnih pasov z razmikom 45MHz olajša tehnično izvedbo antenskih kretnic v baznih postajah, ki morajo tudi v sistemu GSM istočasno sprejemati in oddajati.

Navkljub primerni dodelitvi radiofrekvenčnih pasov in uporabi antenskih kretnic naletimo na novo težavo, ki lahko povzroča motnje v lastnem sprejemniku. Pri uporabi iste antene za oddajo in sprejem je razmerje jakosti oddanih in sprejetih signalov v velikostnem razredu 150dB. Pri tako velikem razponu moči, ki ga ne moremo neposredno meriti z nobenim znanim merilnikom, tudi najmanjša nelinearnost povzroči dovolj intermodulacijskega popačenja, da pokvari sprejem.

Pojav imenujemo pasivno intermodulacijsko popačenje, ker ga povzročajo pasivni sestavni deli: koaksialni kabli, vtičnice in antene. Pri tako velikem razponu moči zadošča že majhna količina kovinskega oksida v koaksialni vtičnici, da tvori usmerniški spoj in s tem nelinearen sestavni del, ki proizvaja IMD.