

Lastnosti brezžičnega kanala in prenosna kapaciteta

Mitja Štular, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani

Povzetek — V članku so predstavljene lastnosti brezžičnega prenosnega kanala ter analiza spektralne učinkovitosti, ki jo dosegamo v praktičnih brezžičnih sistemih. Tematika je predstavljena na enostaven in razumljiv način, ki bralcem omogoča osnovno razumevanje obravnavanega področja.

Ključne besede — brezžične komunikacije, brezžični prenosni kanal, prenosna kapaciteta, spektralna učinkovitost

I. UVOD

Pri načrtovanju sodobnega digitalnega komunikacijskega sistema je pomembna pravilna izbira postopkov obdelave signala. Vendar, kaj je "pravilna izbira"? To je odvisno od več dejavnikov. Med njimi je še zlasti pomembna kvaliteta, ki jo želimo dosegati pri prenosu informacije. Npr. če napak pri prenosu ne sme biti (prenos podatkovne datoteke), moramo uporabiti bistveno močnejše postopke kot v primeru, ko si določeno število napak lahko privoščimo (prenos govora ali slike).

Kako enostavno je doseči določeno kvaliteto pri prenosu, pa je najbolj odvisno od razmer na prenosni poti. Zato je poznavanje prenosnega kanala ključnega pomena za načrtovanje in razumevanje vsake komunikacije. Če so razmere na prenosnem kanalu bolj zapletene, moramo uporabiti močnejše in praviloma bolj zapletene postopke kot v primeru enostavnejšega kanala. To z drugimi besedami pomeni, da prenosni kanal določa celoten sistem in napravo ter tudi praktično dosegljivo učinkovitost izrabe frekvenčnega spektra.

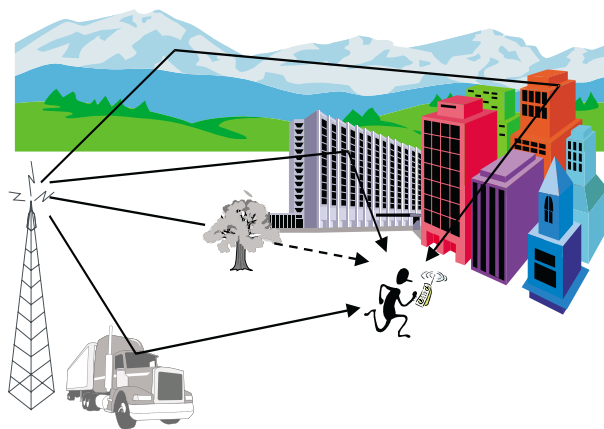
V tem prispevku se bomo omejili na brezžično komunikacijo. V poglavju II tako podajamo lastnosti brezžičnega prenosnega kanala. Prav zapletenost kanala je tista, ki določa spektralno učinkovitost sistema. Zato v poglavju III podajamo analizo spektralne učinkovitosti brezžičnih sistemov, pri čemer se naslanjamo na znane praktične sisteme.

Mitja Štular je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, Katedra za telekomunikacije - Laboratorij za komunikacijske naprave. Ukvarja se z raziskovalnim in pedagoškim delom na področju telekomunikacij. Njegovo glavno raziskovalno področje so mobilne in brezžične komunikacije. Elektronska pošta: mitja.stular@fe.uni-lj.si.

II. LASTNOSTI BREŽIČNEGA PRENOSNEGA KANALA

Če želimo razumeti delovanje brezžičnih sistemov, si moramo bolj podrobno ogledati lastnosti brezžičnega prenosnega kanala. Brezžični prenosni kanal je v primerjavi z žičnimi ali optičnimi vodi bolj zahteven za prenos signala. To še posebej velja takrat, kadar imamo opraviti z mobilno komunikacijo (npr. v mobilnem sistemu GSM), pri kateri se giblje vsaj en udeleženec in/ali okolica. Takrat govorimo o mobilnem prenosnem kanalu. V primeru fiksnih brezžičnih zvez (npr. v sistemu LMDS) so razmere prijaznejše, vendar še vedno slabše kot pri žičnem mediju. Ker je mobilni prenosni kanal najbolj splošen primer brezžičnega kanala, si ga bomo v nadaljevanju podrobneje ogledali.

Signal se med oddajnikom in sprejemnikom širi po več poteh. Na poti prihaja do slabljenja, odbojev signala, uklonov na ovirah in sipanja. Sprejemnik je pogosto, v primeru mobilnih komunikacij v urbanih okoljih pa celo praviloma, v senci, kar pomeni, da direktna pot (line of sight) med oddajnikom in sprejemnikom ne obstaja. Hkrati pa se tako mobilni uporabnik kot tudi objekti v okolici, npr. vozila, lahko gibljejo. Predstavljamo si lahko, da takšne razmere za prenos signala niso ugodne. Razmere so simbolično prikazane na sliki 1.



Slika 1. Širjenje signala v mobilnem prenosnem kanalu po več poteh

Obravnava mobilnega prenosnega kanala je kombinacija teorije elektromagnetnega valo-

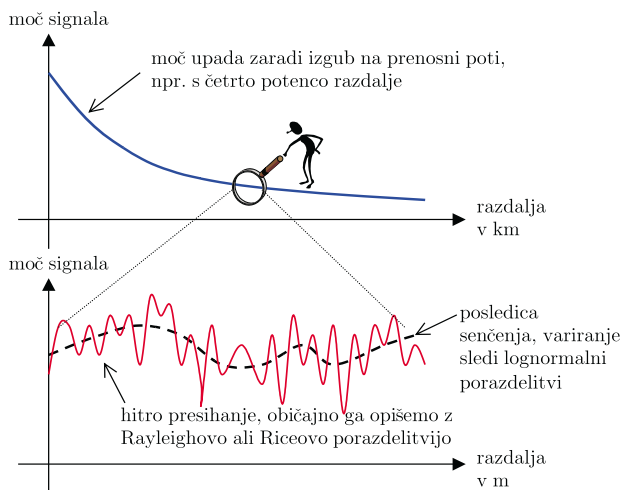
vanja in statistične teorije. Mi bomo podali le določene rezultate, ki so koristni za razumevanje dogajanj v mobilnem prenosnem kanalu. Obravnavo delimo v dva dela. Najprej bomo opisali spreminjanje moči signala na poti od oddajnika do sprejemnika. Sklepamo seveda, da moč z razdaljo pada. To je res, vendar so prisotni še drugi efekti, ki ustvarjajo dodatna lokalna in kratkoročna nihanja. Zatem si bomo ogledali, na kakšen način in s kakšnimi popačenji, se razširjanje preko mobilnega prenosnega kanala odraža na obliki signala, ki ga sprejema sprejemnik.

A. Slabljenje signala na poti

Moč signala na poti od oddajnika do sprejemnika se spreminja. Vse to je posledica pojavov slabljenja, odbojev, lomov in sipanja v okolju, kjer potuje signal. Spreminjanje moči lahko poenostavljeno strnemo v tri točke:

- izgube na prenosni poti (path loss),
- senčenje (shadowing) in
- hiter presih (fast fading).

Prvi efekt je opazen pri večjih dimenzijah, to je pri razdaljah nekaj 100 m in več, drugi že pri manjših razdaljah nekaj 10 m (50 do 200 valovnih dolžin) in zadnji v mikrokolju razdalje nekaj valovnih dolžin (5 do 40 valovnih dolžin). Na izgube na poti vplivajo naravne značilnosti terena, npr. hribovitost, mesto, podeželje, ravnina, na senčenje bližnja okolica, npr. zgradbe, drevesa, medtem ko je hiter presih občutljiv že na razmere v neposredni okolici sprejemnika. Pregled je podan na sliki 2.



Slika 2. Moč signala v odvisnosti od razdalje. Vidimo vpliv izgub na prenosni poti, senčenja in hitrega presihanja.

A.1 Izgube na prenosni poti

Kot rečeno opazujemo ta efekt pri večjih razdaljah. Zaradi izgub na poti se moč signala z

oddaljenostjo od oddajnika manjša. Če postavimo širjenje signala v praznem prostoru, vemo, da moč pada s kvadratom razdalje in s kvadratom frekvence signala. Če razdaljo ali frekvenco podvojimo, pade moč za faktor 4. Ne da bi šli v podrobnosti lahko to zapišemo:

$$P_S \propto P_O d^{-2} f^{-2} \quad (1)$$

kjer je P_S sprejeta moč povprečena preko večje razdalje, npr. 100 m, P_O oddana moč, d razdalja med oddajnikom in sprejemnikom ter f frekvenca signala. O povprečni moči govorimo zato, ker sicer moč varira okrog povprečne vrednosti zaradi različnih razmer v neposredni okolici sprejemnika.

Primer praznega prostora je seveda le teoretičen, zato relacija v praksi ne velja. V praksi so razmere mnogo slabše. Potek moči je zelo odvisen od značilnosti terena, na katerem zveza poteka. Prav tako moč ni odvisna le od razdalje in frekvence, temveč tudi od višine oddajne antene, višine sprejemne antene in še česa. Za splošen primer nimamo analitične rešitve, ki bi vsaj približno veljala. V preteklosti so raziskovalci predlagali kar nekaj modelov (npr. model za odprt teren, Egliev, Okumura-Hata, Lee-jev, Ikegami-jev, Walfisch-Ikegami,...). Nekateri, to je empirični modeli, so bili razviti na podlagi izmerjenih podatkov, drugi, to je deterministični modeli, na podlagi teorije razširjanja elektromagnetnega valovanja ter tretji s kombinacijo obojega. Modeli so tudi omejeno veljavni le za določen razpon parametrov in določeno okolje. Vemo, na primer, da so signali od nekaj GHz naprej močno občutljivi tudi na vremenske razmere (dež, megla) in absorpcijo nekaterih plinov. Prav tako denimo vemo, da je lom pri frekvencah nad približno 5 GHz praktično zanemarljiv, kar pomeni, da je komunikacija zanesljiva le, če obstaja direktna pot. Večina znanih modelov obravnava izgube na poti kot funkcijo oddaljenosti od oddajnika d , frekvence f , višine oddajne antene h_o in višine sprejemne antene h_s .

Zgolj za osnovno razumevanje lahko zapišemo:

$$P_S \propto P_O d^\gamma f^\alpha h_o^\beta h_s^\delta \quad (2)$$

kjer so α , β , γ in δ ustrezne potence. Vrednosti γ je Potence γ pri razdalji d se gibljejo med -2 in -5. -2 velja za prazen prostor, sicer pa je v praksi vrednost v urbanih področjih najpogosteje okrog -4.

Za ilustracijo zapisanega podajamo nekaj grobih ocen za urbano področje in frekvence okrog 1GHz:

- Če se razdalja med oddajnikom in sprejemnikom podvoji, se moč zmanjša (ali slabljenje poveča) za faktor 16.

TABELA I
OKVIRNE VREDNOSTI POTENC, S KATERIMI SE
SPREMINJA POVPREČNA MOČ SPREJETEGA
SIGNALA

parameter	potenca	vrednosti
d	γ	-2 do -5
f	α	-2 do -3
h_o	β	1.8 do 2
h_s	δ	1 do 2

- Če se frekvenca podvoji, se moč zmanjša (ali slabljenje poveča) najmanj za faktor 4.
- Če višino katerekoli antene podvojimo, se sprejeta moč poveča (ali slabljenje zmanjša) za faktor 4.

Relacija (2) predstavlja zelo poenostavljen zapis. Med drugim ne zajema slabljenja signala, ki nastane zaradi vremenskih vplivov (dež, megla) in absorpcije posameznih plinov (O_2 , H_2O). Ti pojavi so pri nižjih frekvencah zanemarljivi, pri frekvencah nad nekaj GHz pa se njihov vpliv močno poveča. Npr. pri padavinah intenzivnosti 50 mm/h in frekvenci 30 GHz se izgube povečajo za približno 10 dB/km.

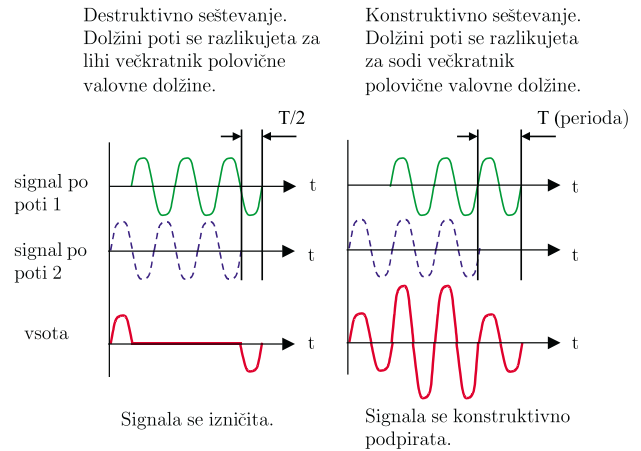
A.2 Senčenje

Iz tega, kar smo zapisali v prejšnjem razdelku, bi lahko napačno sklepali, da je moč sprejetega signala odvisna le od razdalje, frekvence in višin anten. To bi pomenilo, da je moč sprejetega signala na neki fiksni razdalji popolnoma neodvisna od bližnje okolice. V resnici ni tako. Moč signala se v odvisnosti od okolice spreminja. Npr. razmere sredi velikega križišča so gotovo drugačne kot v ulici, ki je na obeh straneh obdana z visokimi zgradbami. Kaj je v nekem trenutku v okolici sprejemnika, pa je popolnoma nepredvidljivo, naključno. Posledično je tudi variacije moči signala zaradi senčenja moč opisati z neko verjetnostno porazdelitvijo. Izkaže se, da najbolj ustreza log-normalna verjetnostna porazdelitev z variancami od 4 do 12 dB. To porazdelitev dobimo, če v Gaussovo (normalno) porazdelitev vstavimo logaritmirane vrednosti, to je vrednosti v decibelih (dB).

A.3 Hitro presihanje

Ugotovili smo že, da se signal med oddajnikom in sprejemnikom širi po več poteh. Na vsaki poti signal oslabi, zakasni in se fazno premakne. V sprejemniku se ti signali nato seštevajo. Signal na sprejemniku je tako vsota oslabljenih, zakasnjenih in fazno premaknjenih ponovitev oddanega signala. Signali se lahko seštevajo konstruktivno ali pa destruktivno.

To je odvisno od razlike dolžin posameznih poti. Pri konstruktivnem seštevanju je moč vsote večja od moči najmočnejše komponente, pri destruktivnem seštevanju pa manjša. Mehанизem je prikazan na sliki 3.



Slika 3. Destrktivno in konstruktivno seštevanje signalov, ki so prišli v sprejemnik časovno zamaknjeni zaradi različnih dolžin poti

Za lažje razumevanje si lahko predstavljamo, da signal v prostoru ustvarja neke vrste stoječe valovanje. Pri stoječem valovanju pa vemo, da nas premik za pol valovne dolžine (približno 17 cm pri 900 MHz) pripelje iz maksimuma v minimum ali obratno. Potek valovanja je močno odvisen od okolice sprejemnika. Hkrati pa se razmere na posameznih poteh tudi časovno spreminjajo, saj se lahko giblje tako sprejemnik kot njegova okolica. Vse to se odraža v hitrem nihanju moči signala v odvisnosti od mikrolokacije sprejemnika. Nihanje, imenujemo ga hitro presihanje, je zelo izrazito, saj doseže vrednosti do 40 dB.

Kot v primeru senčenja je tudi hitro presihanje opisljivo le statistično. Razmere najbolj natančno popisuje Reyleighjeva statistična porazdelitev za primer, ko ni direktne poti med oddajnikom in sprejemnikom, in Rice-ova statistična porazdelitev, kadar direktna pot obstaja.

B. Popačitve sprejetega signala

Signal v sprejemniku je poleg tega, da je njegova moč bistveno manjša od oddane, tudi popačen. To popačenje se odraža tako v časovnem kot v frekvenčnem prostoru. Govorimo o časovni in frekvenčni disperziji sprejetega signala, ki ju bomo podali v nadaljevanju.

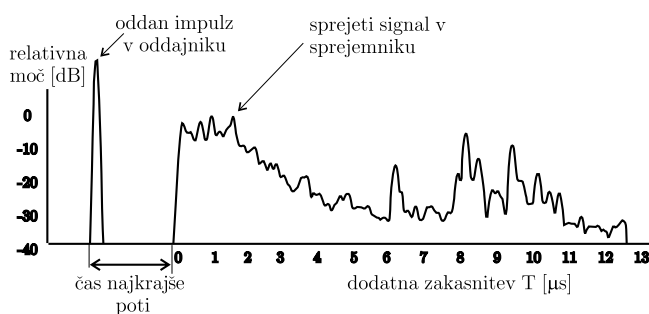
B.1 Časovna disperzija

Zaradi širjenja po več poteh dobimo na vhodu sprejemnika vsoto več signalov, ki so

se širili po različnih poteh. Ker so poti na splošno različno dolge in ker pride na poti tudi do popačitev, so ti signali med seboj zamaknjeni ter popačeni. To se na signalu odraža v dveh oblikah.

- Oblika sprejetega signala je zaradi časovnih zakasnitev časovno razmazana, pojavi se časovna disperzija. Dobimo prekrivanje sosednjih simbolov, ki mu rečemo intersimbolna interferenca.
- Če bi pogledali signal v frekvenčnem prostoru, bi ugotovili, da določene komponente v frekvenčnem spektru manjkajo, čeprav so bile v oddanem signalu prisotne. Rečemo, da jih je izločil kanal. Dobimo presih, o katerem smo že govorili. Kadar je frekvenčni pas prenašanega signala tako ozek, da v celoti pade v takšen frekvenčni minimum, govorimo o frekvenčno neselektivnem presihu. Če je frekvenčni pas širši, pa minimum prizadene le del signala. Govorimo o frekvenčno selektivnem pojemanju.

Primer časovne disperzije je prikazan na sliki 4. Oddani signal je bil kratek impulz. Primer



Slika 4. Primer časovne disperzije. Oddajnik je oddal ozek impulz. Vidimo precejšnjo časovno razmazanost glede na prvo prispelo komponento.

na sliki kaže veliko razpršenost dodatnih zakasnitev. Takšen kanal je za prenos dokaj neugoden. Vidimo, da je zadnja komponenta prišla več kot $10 \mu s$ za prvo. Iz zakasnitev lahko dokaj točno ugotovimo razlike v dolžinah poti med posameznimi komponentami signala. Upoštevati je potrebno le hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja, ki je nekoliko nižja od svetlobne. Če poenostavljeno vzamemo svetlobno hitrost, potem signal napravi pot 1 km v $3.3 \mu s$. $10 \mu s$ torej ustreza razliki v dolžinah poti 3 km .

Razpršenost dodatnih zakasnitev je v precejšnji meri odvisna od okolja, v katerem komunikacija poteka. V hribovitih predelih so vrednosti visoke, v urbanem okolju že nižje, v ruralnem in v notranjosti zgradb pa najnižje. Približne vrednosti so podane v tabeli II.

TABELA II

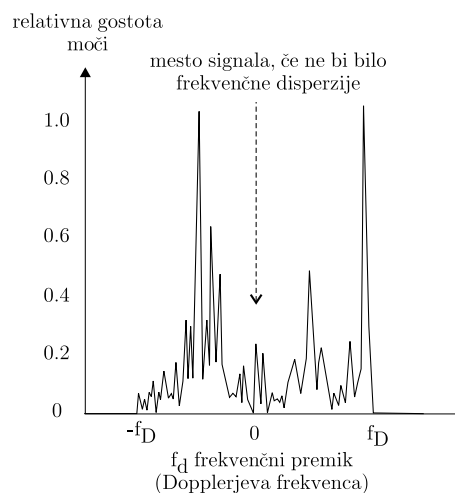
OKVIRNE VREDNOSTI RAZPRŠITEV ZAKASNITVE

okolje	razpršitev dodatne zakasnitve [μs]
gorato	do 100
hribovito	5 do 10
mestno	1 do 3
vaško	0.2 do 0.5
ruralno	do 0.2
notranjost zgradb	do 0.1

B.2 Frekvenčna disperzija

Poti, po katerih se širi signal od oddajnika do sprejemnika, se s časom spreminjajo. To je razumljivo, saj govorimo o mobilni komunikaciji, kjer se giblje uporabnik in/ali objekti v okolici. Znano je, da pride v primeru gibanja do Dopplerjevega pojava, ki se odraža v frekvenčni razmazanosti sprejetega signala. Govorimo o frekvenčni disperziji signala. Dopplerjev frekvenčni premik signala je v bistvu merilo hitrosti spreminjanja parametrov prenosnega kanala. Če uporabnik in okolica mirujeta, frekvenčne disperzije ni.

Primer frekvenčne disperzije signala je prikazan na sliki 5. Oddajnik je oddajal čisti



Slika 5. Primer frekvenčne disperzije. Oddajnik je oddajal signal ene same frekvenca. Zaradi časovnega spreminjanja razmer na poti je prišlo do frekvenčnih premikov.

harmonični signal ene same frekvenca. Ta je na sliki pri frekvenčnem premiku 0.

Iz frekvenčnega poteka signala je moč določiti kote, pod katerimi vpada v sprejemnik posamezne komponente signala. Vemo, da je Dopplerjev efekt najmočnejši, kadar se sprejemnik oddajniku približuje ali oddaljuje pod kotom 0° . Takrat dobimo maksimalen Dopplerjev premik $f_d = f_D$. Na splošno pa

velja:

$$f_d = \frac{v}{c} f \cos \alpha \quad (3)$$

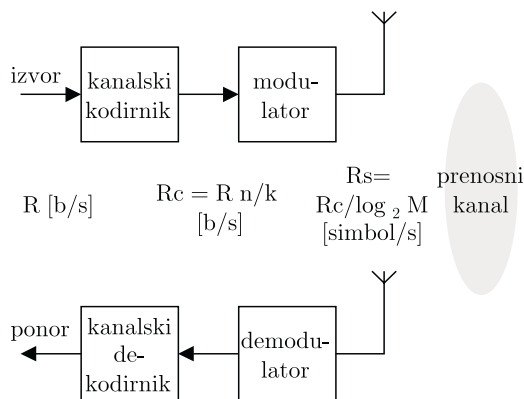
kjer je v relativna hitrost sprejemnika glede na oddajnik, c svetlobna hitrost, f frekvenca signala in α kot, pod katerim vpada valovanje.

III. SPEKTRALNA UČINKOVITOST BREŽIČNIH SISTEMOV

Razumljivo je, da je kakovost komunikacije odvisna od razmer na prenosnem kanalu. Za potrebe tega poglavja se omejimo le na prenosno hitrost in na delež bitnih napak. Slabše razmere na kanalu povzročijo več napak pri prenosu. Število napak običajno zmanjšujemo na dva načina:

- Z močnejšim kanalskim kodiranjem. Močnejše kanalsko kodiranje pomeni, da koristnemu signalu dodamo več redundantnih zaščitnih bitov. To poenostavlja pomeni, da k podatkovnim bitom priredimo n bitov, kjer je $n > k$. S tem smo, ob predpostavki, da ne povečamo prenosne širine, zmanjšali koristno prenosno hitrost.
- Z bolj robustno modulacijo. Lahko rečemo, da je postopek modulacije bolj robusten takrat, kadar je razdalja med dvema sosednjima simboloma večja. Razdaljo pa običajno lahko povečamo z višanjem moči oddanega signala, kar ni priporočljiv ukrep, ali pa z zmanjševanjem števila bitov, ki jih izrazimo z enim simbolom. To pa ima za posledico zmanjšanje prenosne hitrosti.

Razmere so simbolično prikazane na sliki 6. Vidimo torej, da slabše razmere na



Slika 6. Vrsta prenosnega kanala določa izbiro postopkov kanalskega kodiranja in modulacije

prenosnem kanalu zahtevajo močnejše kanalsko kodiranje in bolj robustne postopke modulacije, s čimer pa se zmanjša prenosna hitrost. Tako lahko prenosno hitrost povečamo le še s povečanjem prenosnega pasu. Ker pa je frekvenčni spekter pri brezžičnih komunikacijah običajno omejena in draga dobrina, se

trudimo, da bi dosegli čim boljši izkoristek dodeljenega frekvenčnega spektra. Učinkovitost izrabe frekvenčnega spektra izražamo s spektralno učinkovitostjo, ki nam pove, koliko b/s prenesemo v frekvenčnem pasu širine 1 Hz.

A. Prenosna kapaciteta kanala

Teoretično mejo prenosne hitrosti na danem kanalu dobimo iz enačbe za prenosno kapaciteto kanala ter Nyquistove relacije, po kateri lahko preko kanala širine B prenesemo največ $2B$ simbolov na sekundo. Dobimo izraz za maksimalno prenosno hitrost R_{max} v b/s , ki velja za primer aditivnega Gaussovega šuma in se v literaturi navaja pod imenom Shannonova enačba:

$$R_{max} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) \quad (4)$$

kjer je B frekvenčna širina kanala, P_s povprečna moč koristnega signala in P_n povprečna moč šuma. Relacija nam pove, da se maksimalna prenosna hitrost povečuje s širjenjem prenosnega pasu, ki ga imamo na razpolago, ter večanjem razmerja med močjo koristnega signala in močjo šuma. Pri tem velja opozoriti, da sta širina prenosnega pasu in moč šuma povezana, saj sprejemnik, ki deluje na širšem delu frekvenčnega spektra, zajame tudi več šuma.

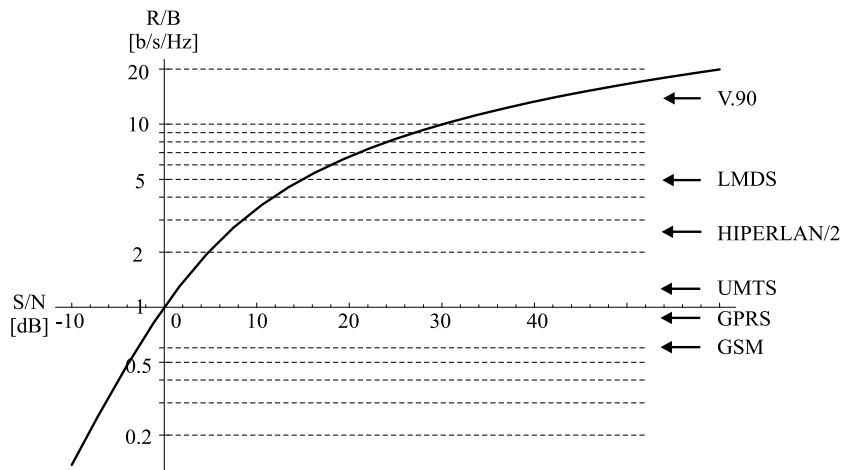
Shannonovi teoretični meji se približujemo z izboljševanjem postopkov kodiranja in modulacije. Če iz enačbe (4) izrazimo kvocient prenosne hitrosti in pasovne širine, dobimo teoretično mejo spektralne učinkovitosti. Potek je prikazan na sliki 7.

B. Spektralna učinkovitost nekaterih brezžičnih sistemov

Oglejmo si sedaj spektralno učinkovitost nekaterih praktičnih brezžičnih sistemov. Pregled je podan v tabeli III, maksimalne vrednosti pa so vrisane tudi v graf s teoretično mejo na sliki 7.

TABELA III
SPEKTRALNA UČINKOVITOST BREŽIČNIH SISTEMOV

sistem	spek. učink. [b/s/Hz]	modulacija
GSM	0.4 do 0.6	GMSK
GPRS	0.4 do 0.9	GMSK
EDGE	0.4 do 2.4	GMSK, 8PSK
UMTS FDD	do 1.2	QPSK
HIPERLAN/2	0.3 do 2.7	BPSK...64QAM
LMDS	0.7 do 5	BPSK...64QAM
V.90 modem	do 15	



Slika 7. Teoretična meja spektralne učinkovitosti z vrisanimi maksimalnimi vrednostmi posameznih sistemov

Iz podatkov v tabeli je razvidno, da imajo najslabšo spektralno učinkovitost mobilni sistemi (GSM z nadgradnjami in UMTS). Razlogi so v neugodnih razmerah na prenosnem kanalu, to je v slabem razmerju med močjo koristnega signala ter šuma in motenj, ki so posledica že opisanih pojavov v mobilnem prenosnem kanalu ter interferenc med uporabniki istega sistema. Spektralna učinkovitost 1 b/s/Hz tako predstavlja za prave mobilne sisteme razumno mejo.

V sistemih, kjer so uporabniki omejeno mobilni, lahko dosežemo višjo spektralno učinkovitost. Primer je lokalni brezžični sistem HIPERLAN/2, v katerem dosegamo vrednosti do 2.7 b/s/Hz. Še višje vrednosti dosegamo pri fiksnih usmerjenih brezžičnih zvezah, kjer se razmere v kanalu le počasi spreminjajo. Kot primer navajamo LMDS z maksimalno vrednostjo spektralne učinkovitosti 5 b/s/Hz.

Najvišje vrednosti spektralne učinkovitosti so dosegljive le pri komunikaciji preko nezahtevne kanala. Ker pa je brezžični prenosni kanal v splošnem primeru zahteven, so takšne vrednosti dosegljive le pri zvezah po žičnih ali optičnih vodih. Ko primer je prikazana žična komunikacija po standardu V.90, s katero dosegamo spektralno učinkovitost do 15 b/s/Hz.

IV. SKLEP

Spektralna učinkovitost in s tem tudi hitrost komunikacije pri dani širini frekvenčnega spektra je torej odvisna od razmer v prenosnem kanalu. Pri boljših razmerah lahko dosegamo višje prenosne hitrosti, medtem ko smo pri slabših razmerah prisiljeni uporabiti močnejše postopke kanalskega kodiranja in bolj robustno modulacijo, kar zmanjša prenosno hitrost. Naveden mehanizem predstavlja glavno ome-

jitev brezžičnih in še posebej mobilnih komunikacij, saj so zanje značilne neugodne razmere na prenosni poti. To pomeni, da pri dani širini frekvenčnega spektra ne moremo doseči hitrosti, ki bi bile primerljive s hitrostmi po žičnih ali optičnih vodih.

Seveda pa vse to ne pomeni, da z brezžično komunikacijo ne bi mogli dosegati visokih hitrosti prenosa. Hitrost prenosa lahko povečujemo z večanjem širine frekvenčnega spektra, ki ga namenimo za določeno komunikacijo. Prav tako imajo brezžične komunikacije vrsto drugih prednosti. Med njimi so zlasti enostavnost postavitve brezžičnih sistemov ter udobnost uporabe mobilnih brezžičnih sistemov. Zato bomo v prihodnjih letih nedvomno priča nadaljnjemu uveljavljanju brezžičnih sistemov, še zlasti v segmentu zadnjih metrov do uporabnika.

LITERATURA

- [1] Mitja Štular, Anton Umek, Savo Leonardis, Tehnologija dostopovnih omrežij v informacijsko povezani družbi, Elektrotehniška zveza Slovenije, 2000.
- [2] Mitja Štular, Sašo Tomažič, "Razširjeni spekter v mobilnih komunikacijah: (2) Prenosni kanal," *Elektrotehniški vestnik*, 66(1), str. 38-43, 1999, Ljubljana.
- [3] Roger L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*, John Wiley & Sons, 1997.
- [4] Bernard Sklar, *Digital Communications - Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 1988.