

Lastnosti žičnega kanala in prenosna kapaciteta

Anton Umek , Fakulteta za elektrotehniko

Povzetek — Hitrost prenosa informacije po žičnem kanalu je navzgor omejena. Največja hitrost je odvisna od dolžine vodov in razmer na prenosni poti. V članku so na kratko predstavljene osnovne fizikalne značilnosti žičnega prenosnega medija in tehnike učinkovitega izkoriščanja prenosne kapacitete.

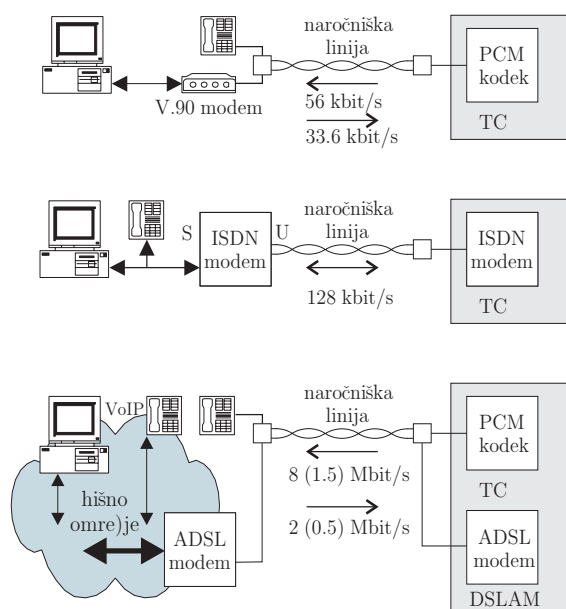
Gljučne besede — žični prenosni kanal, naročniški vodi, slabljenje, disperzija, presluh, prenosna kapaciteta,

I. UVOD

Največje komunikacijsko omrežje na svetu je telefonsko omrežje. Po približni oceni povezuje več kot 800 milijonov uporabnikov. Največji del omrežja in s tem tudi največjo ekonomsko vrednost predstavljajo žične povezave med naročniki in lokalno telefonsko centralo. Omrežje takšnih povezav imenujemo naročniško omrežje.

Naročniško omrežje je bilo načrtovano tako, da je primerno za prenos govora z zmanjšano, vendar zadovoljivo kvaliteto. Osnovna kriterija pri načrtovanju telefonskih žičnih povezav sta bila omejevanje upornosti in omejevanje slabljenja v govornem pasu, ki ga določa območje frekvenc od 300Hz do 3400Hz. Jasna pravila načrtovanja omrežja so omogočila uporabo preprostih telefonskih aparatov, ki lahko delujejo še danes. V sto letih se način delovanja telefonskega aparata zaradi preprostosti ni bistveno spremenil, zelo pa je naraslo število uporabnikov telefona. Glavni dosežki telekomunikacij so bili zato predvsem na področju izgradnje hrbtencičnih omrežij. Hitra vzpostavitev zvez med milijoni uporabnikov in ohranjanje kvalitete prenosa govornega signala na velikih razdaljah sta glavni izboljšavi, ki jih uporabniku telefona zagotavlja sodobno digitalno telefonsko omrežje.

Anton Umek je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegovo pedagoško in raziskovalno delo je usmerjeno na področje telekomunikacij. E-pošta: anton.umek@fe.uni-lj.si



Slika 1. Razpoložljive tehnologije za digitalni prenos po naročniškem vodu.

Na začetku novega tisočletja nam samo govorne komunikacije ne zadoščajo več. Če izvzamemo teleprinter in fax, so prve večje potrebe po negovorni komunikaciji nastopile z razvojem računalništva, kar je vzpodbudilo razvoj modemov za prenos po telefonskem kanalu. Z razvojem interneta so potrebe po prenosni kapaciteti povezav do uporabnika v povprečju narasle za faktor več kot tisoč! Kako omogočiti hiter in zanesljiv prenos podatkov po obstoječih telefonskih vodih je bil zato verjetno eden največjih izzivov telekomunikacij v zadnjih desetih letih. Slika 1 podaja različne trenutno razpoložljive prenosne tehnologije, ki omogočajo telefonskim naročnikom podatkovni dostop do interneta [1]:

- Hitrost prenosa informacije, ki je ne more preseči noben V.90 modem, je omejena na 64kbit/s. Naročniško linijo izkoriščamo le v 4kHz širokem frekvenčnem pasu. Spektralna učinkovitost sodobnih modemov je približno 15bit/s/Hz !
- Razvoj DSL tehnologij se je začel pred 15 leti z ISDN modemi. ISDN povezave

omogočajo prenosno hitrost, ki je danes le še dva do trikrat večja od hitrosti V.90 modemov. Naročniško linijo izkoriščamo v frekvenčnem pasu do 80kHz. Spektralna učinkovitost pri ISDN je približno 2bit/s/Hz.

- Hitri digitalni prenos omogoča vrsta novih tehnologij: ADSL, SDSL, VDSL. Te so namenjene za različne storitve in za različne grupe uporabnikov. Prenosne hitrosti so tudi nastavljive in se lahko prilagajajo glede na razdaljo in razmere na prenosni poti.

II. LASTNOSTI PRENOSNEGA MEDIJA

Prepleteni kovinski dvovod nudi v primerjavi z optičnim vlaknom in tudi s koaksialnim vodom zelo slabe pogoje za hitri prenos digitalnih signalov. Prenosno zmogljivost naročniškega voda določajo predvsem naslednje lastnosti:

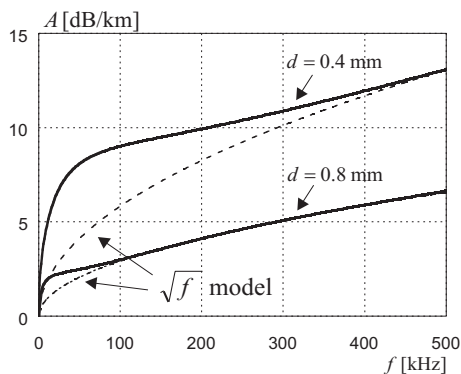
- slabljenje in disperzija,
- odboji,
- različne vrste šuma, od katerih ima prevladujoč vpliv presluh iz sosednih dvovodov.

A. Slabljenje

Slabljenje naročniških vodov s frekvenco narašča, kar je posledica izriva toka proti površini vodnika in dielektričnih izgub izolatorja. Slabljenje simetričnega dvovoda narašča linearno z dolžino in približno s kvadratnim korenem frekvence. Takšen približek se pogosto uporablja kot preprosti model:

$$A(f) = A(f_0, l_0, d_0) \frac{d_0}{d} \frac{l}{l_0} \sqrt{\frac{f}{f_0}} \quad (1)$$

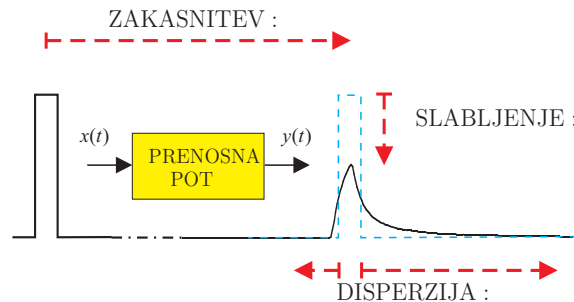
Približni in natančni potek slabljenja za nekaj primerov vodov podaja slika 2.



Slika 2. Dejanski potek in \sqrt{f} model slabljenja.

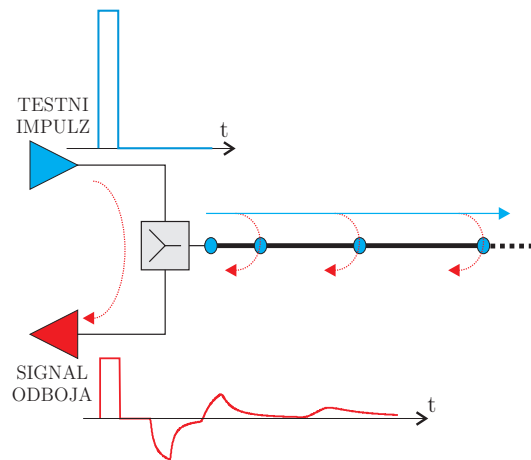
B. Disperzija

Disperzija signalov pri prenosu je posledica razlik v fazni hitrosti. Slika 3 podaja primer slabljenja in razpršitve pravokotnega impulza na naročniški liniji. Na prenosnem kanalu z zelo spremenljivim slabljenjem imamo vedno tudi izrazit pojav disperzije. Glavni učinek disperzije pri digitalnem prenosu je intersimbolna interferenca, ki jo lahko kompenziramo z izravnalnikom (angl. equaliser) v sprejemniku.



Slika 3. Popačenje impulza pri prenosu.

C. Odboji

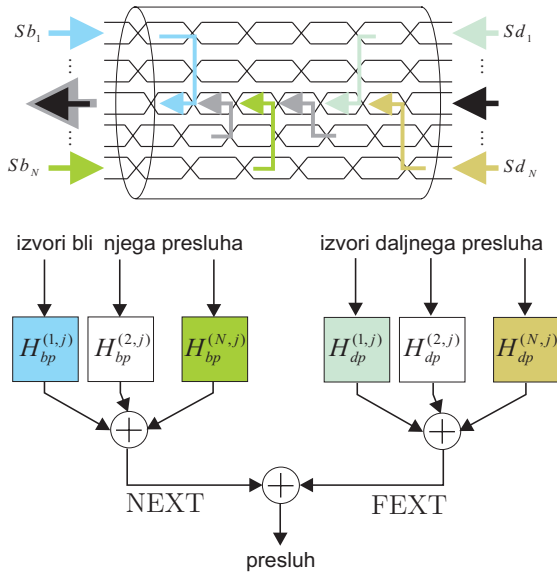


Slika 4. Odboji na naročniškem vodu

Odboji nastopajo zaradi sprememb karakteristične impedance, ki jih povzročajo različne nehomogenosti na naročniški liniji. Težava zaradi odbojev ni samo izguba moči signala, ki potuje v želeni smeri, pač pa tudi neželeni odbiti signal v sprejemniku. Na vходу sprejemnika dobimo množico različno zakasnenih in oslabiljenih komponent signala iz oddajnika. Primer odbitega signala v sprejemniku podaja slika 4. Odboje izločamo z adaptivnim sitom v sprejemniku, ki ga imenujemo izločevalnik odbojev.

D. Presluh

Presluh med dvovodi je posledica elektromagnetnega sklopa, ki nastopa zaradi bližine parov dvovodov. Presluh med paricami močno zmanjšamo s prepletanjem žic dvovodov. Postopek kompenzacije presluha s prepletanjem je učinkovit predvsem pri nizkih frekvencah, zato presluh narašča s frekvenco. Ker je v enem kablu mnogo dvovodov, uporabljamo za mero presluha v kablu slabljenje moči vsote preslušnih signalov iz vseh sosednjih aktivnih izvorov. Model za presluh med dvovodi podaja slika 5. Glede na kraj nastopanja



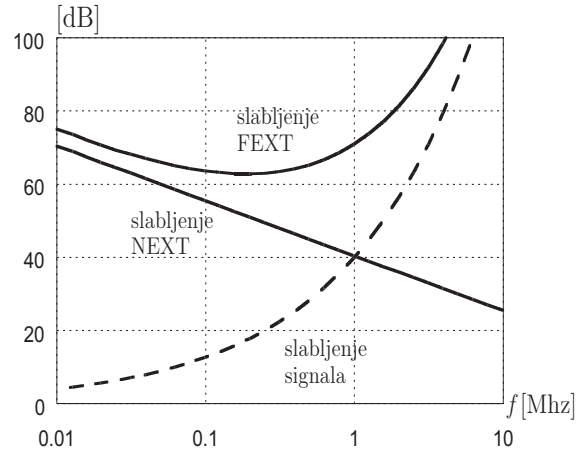
Slika 5. Bližnji in daljni presluh.

ločimo bližnji presluh (NEXT) in daljni presluh (FEXT).

Ker je presluh med dvovodi predvsem posledica spremenljive geometrije in nenatančnega prepletanja, je potek slabljenja presluha v kablu vnaprej nedoločljiv. Pri analizi razmer uporabljamo statistične modele, ki določajo pričakovani potek slabljenja moči vsote množice preslušnih signalov. Natančni model za bližnji in daljni presluh med naročniškimi vodi v lokalnem telefonskem omrežju lahko dobimo le na osnovi meritev presluha za veliko število naključno izbranih vodov. Za naročniške vode se pogosto uporabljata preprosta statistična modela [3], ki ju določata enačba za slabljenje bližnjega (2) in daljnega presluha (3):

$$H_N(f) = K_n - 15 \log \frac{f}{f_0} \quad (2)$$

$$H_F = A(f) + K_f - 20 \log \frac{f}{f_0} - 10 \log \frac{l}{l_0} \quad (3)$$



Slika 6. Slabljenje signala in slabljenje presluha.

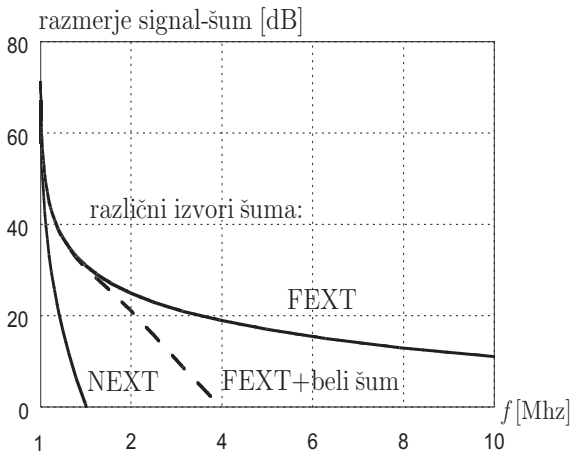
Konstanta K_n določa slabljenje bližnjega presluha pri frekvenci $f_0 = 1\text{MHz}$ in je odvisna od števila izvorov presluha znotraj kabla. Če imamo v kablu 49 izvorov presluha, je tipična vrednost $K_n = 40\text{dB}$ [2]. Večina signala bližnjega presluha prehaja na kratki razdalji, zato je v modelu preslušno slabljenje neodvisno od celotne dolžine linije.

Konstanta K_f določa razmerje med zelenim signalom v sprejemniku in signalom presluha iz izvorov $l_0 = 1000\text{m}$ oddaljenega kraja pri frekvenci $f_0 = 1\text{MHz}$. Pri 49 izvorihih presluha je tipična vrednost $K_f = 37\text{dB}$ [2].

Slika 6 podaja model slabljenja presluha za navedene vrednosti konstant K_n in K_f . Za zgled je izbran 2km dolg naročniški kabel s 50 paricami in premerom žice 0.5 mm. Dejansko slabljenje presluha je lahko v enem odstotku primerov tudi manjše od slabljenj, kot jih predpisujeta statistična modela (2) in (3).

E. Šum tujerodnih izvorov

Šum na naročniškem vodu povzročajo poleg signalov presluha tudi tujerodni izvori. Glavni vrsti motenj tujerodnih izvorov so signali radijskih oddajnikov in impulzni šum. Impulzni šum je inducirana motnja iz okolice, ki jo lahko povzroča strela, vklopi in izklopi močnih električnih porabnikov, nepravilno delujoča javna razsvetljava itn. Model za impulzni šum ni univerzalen in pripada specifičnemu lokalnemu okolju. Omenjeni vrsti motenj imata nasproten značaj v časovnem in frekvenčnem prostoru: RF motnje so razpršene v času in imajo



Slika 7. Potek razmerja signal-šum.

strnjen frekvenčni spekter, impulzne motnje pa so strnjene v času in ima zato široko razpršen frekvenčni spekter.

Pri uporabi različnih xDSL tehnologij znotraj istega kabla, lahko nastopi zaradi delnega prekrivanja frekvenčnih pasov kot dodatna motnja tudi presluh iz tujerodnih izvorov na bližnjem kraju. Reševanje tovrstnih problemov utegne biti zapleteno predvsem v primeru, če si naročnike znotraj istega kabla delita konkurenčna operaterja.

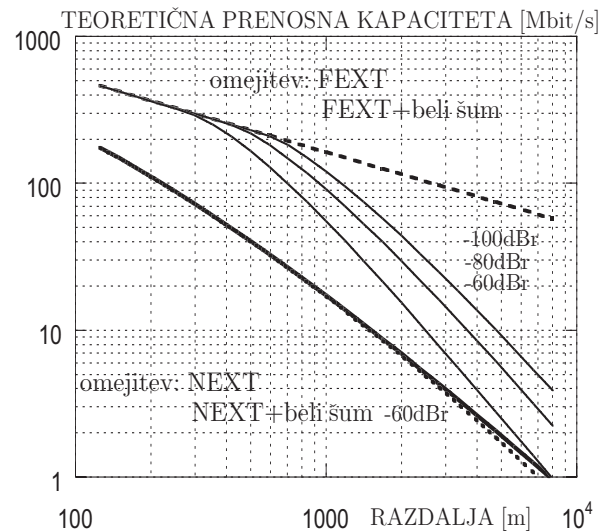
F. Prenosne kapacitete žičnih vodov

Vrste motenj, ki vplivajo na kvaliteto prenosa so odvisne tudi od načina ločevanja smeri prenosa. Ločitve smeri prenosa so podane v razdelku III-A. Pri sočasnem prenosu v obe smeri zveze je NEXT v večini primerov prevladujoč, pri FDM in TDM ločevanju smeri prenosa pa je poleg FEXT skoraj vedno potrebno upoštevati tudi impulzni šum in signale bližnjih radijskih oddajnikov. Širino frekvenčnega območja, ki prispeva k kapaciteti razberemo iz poteka razmerja med signalom in šumom, ki ga za različne izvore šuma podaja slika 7. Uporabno pasovno širino kanala določa frekvenca izenačitve, do katere se v okolju NEXT nahaja več kot 90% prenosne kapacitete. V okolju FEXT so slabljenja pri frekvenci izenačitve tako velika, da moramo upoštevati ostale šumne izvore.

Na osnovi poteka razmerja $\frac{S}{N}$ lahko naredimo tudi oceno teoretične prenosne kapacitete, ki jo določa enačba:

$$R_{max} = \int_0^{\infty} \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df \quad (4)$$

Potek teoretične prenosne kapacitete podaja slika 8.

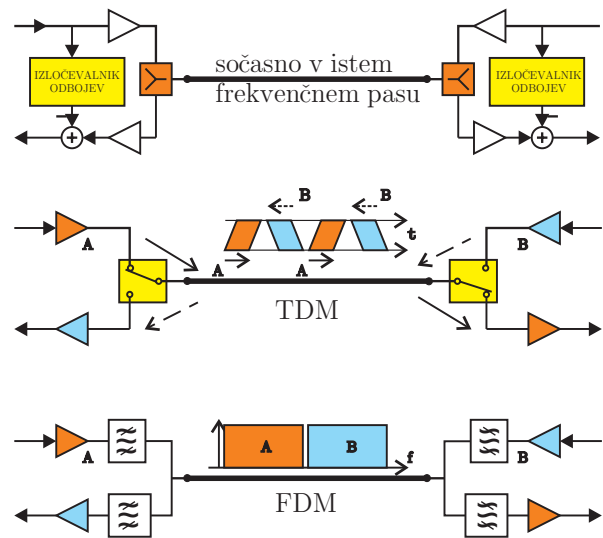


Slika 8. Prenosne kapacitete naročniškega voda.

III. PRENOSNE TEHNIKE

A. Ločitev smeri prenosa

Dvosmerni prenos po eni liniji lahko poteka na več načinov. Različne postopke ločevanja smeri prenosa ilustrira slika 9:



Slika 9. Načini izvedbe dvosmerne prenosa.

- Sočasni prenos brez frekvenčnega ločevanja zahteva izločanje signala lastnega oddajnika, za kar uporabljamo izločevalnike odbojev (angl. echo-canceller). Izločevalnik odbojev je adaptivno digitalno sito, ki ustvari kopijo signala odboja.
- Prenos s časovno ločitvijo v istem frekvenčnem pasu imenujemo TDM (Time Division Mul-

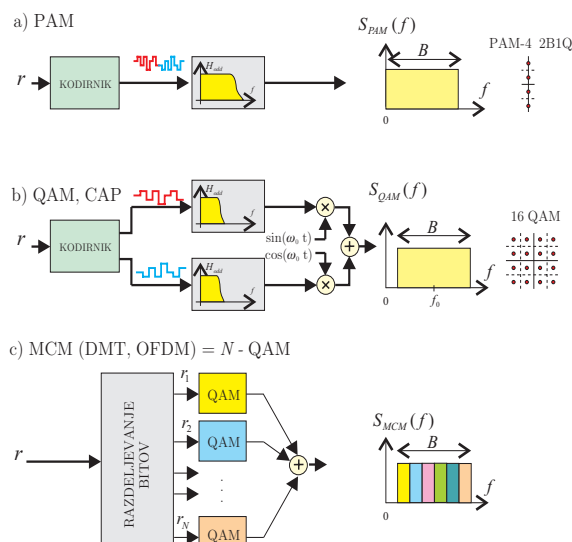
tiplexing) ali ping-pong prenos. Ker imamo za prenos v eno smer na razpolago manj kot polovico časa, mora biti prenosna hitrost več kot dvakrat večja kot pri sočasnem prenosu. Izgubljeni čas je vsota zakasnitve na liniji in varnostnega intervala.

- Sočasni prenos s frekvenčnim ločevanjem smeri zveze imenujemo FDM (Frequency Division Multiplexing). Tudi pri FDM prenosu moramo razpoložljivo prenosno kapaciteto prenosnega medija razdeliti na dva dela. Delitev prenosnih kanalov po frekvenci lahko poteka tudi z delnim prekrivanjem kanalov, kar pomeni, da moramo znotraj prekrivajočega pasu uporabiti tudi izločevalnik odbojev.

Poleg že naštetih razlik med sistemi, nam način ločevanja smeri določa vrsto šuma, ki vpliva na kvaliteto prenosa. Če poteka dvosmerni prenos s frekvenčno delitvijo smeri ali sinhrono časovno delitvijo, lahko izločimo vpliv bližnjega presluha, ki sicer predstavlja najmočnejšo motnjo.

B. Modulacijski postopki

Izbira modulacijskega postopka določa stopnjo učinkovitosti izkoriščanja prenosne kapacitete žičnih povezav. Različne modulacijske postopke podaja slika 10:



Slika 10. Modulacijski postopki, ki se uporabljajo za žični prenos.

- Prenos v osnovnem pasu od frekvence nič dalje uporablja različne postopke linijskega kodiranja. Postopki linijskega kodiranja so

bili v začetku razviti predvsem za enostavne prenosne sisteme. V sodobnih prenosnih sistemih uporabljamo večnivojsko kodiranje simbolov PAM (Pulse Amplitude Modulation).

- Med množico modulacijskih postopkov (amplitudnih, faznih in frekvenčnih) je za digitalni prenos v višji frekvenčni legi po žičnih vodih največkrat v rabi amplitudno-fazna modulacija QAM (quadrature amplitude modulation). Amplitudno-fazno modulacijo brez nosilca - CAP je poenostavljeni postopek širokopasovne QAM .

- Pri žičnem prenosu brezžičnem prenosu mnogokrat nastopijo razmere, kjer so določeni deli razpoložljivega frekvenčnega pasu zaradi velikega slabljenja signalov ali pa zaradi motenj izrazito neugodni za prenos. Učinkovit prenos po kanalu s spremenljivim razmerjem signal-šum omogoča le razdelitev frekvenčnega pasu na veliko število po frekvenci ozkih kanalov, kot ponazarja slika 10-c. Postopek modulacije z več nosilci MCM (multi carrier modulation) ima več imen: DMT (discrete multi-tone) in OFDM (orthogonal FDM).

Prenos z več nosilci je teoretično optimalen in edini omogoča približevanje k teoretični prenosni kapaciteti na kanalu z neenakomernim razmerjem signal-šum. Postopek je poznan že skoraj 50 let, praktično uporabo pa je omogočil šele razvoj tehnologij za hitro digitalno obdelavo signalov v zadnjih desetih letih.

C. Kanalno kodiranje

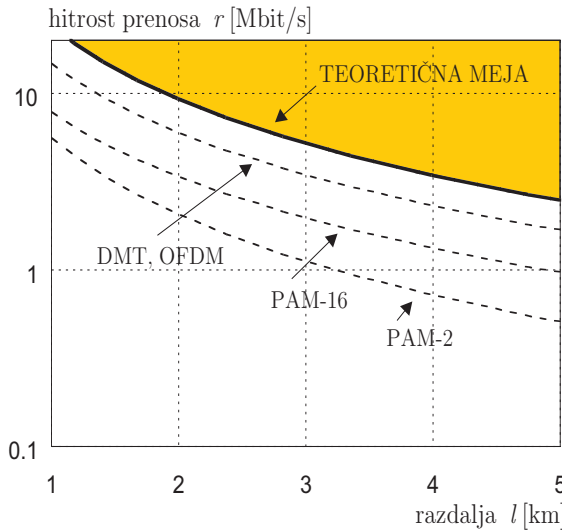
Kanalno kodiranje je postopek, ki omogoča zmanjšanje števila napak pri prenosu in s tem povečanje kvalitete zveze. Poštōpek kanalnega kodiranja je domena fizičnega nivoja zveze in ga ločimo od postopka kontrole napak na višjem nivoju. Zelo pogosto se za žični prenos uporabljajo postopki konvolucijskega kodiranja, kamor sodijo tudi mrežne (trellis) kode. V postopku kodiranja dodajamo k informacijskim bitom redundanco, na osnovi katere lahko po principu ugotavljanja najverjetnejšega sporočila v sprejemniku (Viterbijev dekodirnik) močno zmanjšamo število napak pri prenosu. Cena kodirnega postopka je poleg razmeroma zahtevne obdelave signalov tudi zmanjšanje učinkovite prenosne hitrosti.

Učinek kanalnega kodiranja izražamo s kodirnim ojačenjem. Kodirno ojačenje določa

navidezno povečanje razmerja signal-šum glede na nekodirani prenos. Praktično lahko dosežemo kodirna ojačenja, ki so večja od 4dB [3].

IV. RAZPOLOŽLJIVE PRENOSNE KAPACITETE V OKOLJU BLIŽNJEGA PRESLUHA

Primerjavo med razpoložljivimi prenosnimi kapacitetami in teoretično prenosno kapaciteto podajamo za primer sočasnega dvosmernega prenosa brez frekvenčnega ločevanja smeri. Analiza prenosnih hitrosti je narejena za nekodiran prenos z verjetnostjo napak $BER = 10^{-8}$ in pri pogoju $K_n = 45\text{dB}$ (2). Poleg teoretične prenosne kapacitete so na sliki 11 podani tudi poteki maksimalnih hitrosti za nekodiran prenos z različnimi modulacijskimi postopki: PAM-2, PAM-16 in DMT.



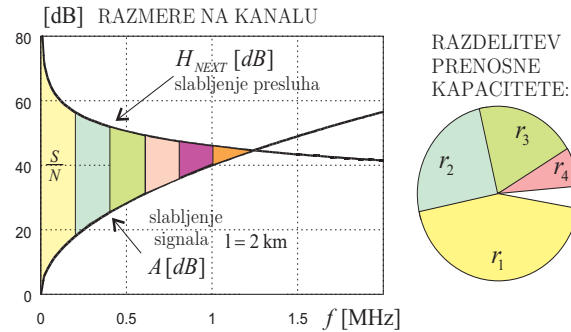
Slika 11. Odmik od teoretične prenosne kapacitete za nekodiran prenos v okolju NEXT.

A. Približevanje teoretični meji

Teoretični kapaciteti se najbolj približamo s prenosom po velikem številu frekvenčno ločenih kanalov, na katerih je razmerje signal-šum skoraj konstantno. Prenos z več nosilci lahko ponazorimo z množico telefonskih modemov, ki so priključeni na isto linijo, vendar uporabljajo različne frekvenčne kanale. Hitrost prenosa informacije r je vsota informacijskih hitrosti posameznih kanalov:

$$r = \sum_{n=1}^N f_s[n] b_s[n] \quad (5)$$

Slika 12 ilustrira razdeljevanje prenosne kapacitete za $N = 6$ frekvenčno ločenih kanalov. Informacijska hitrost na posameznem kanalu



Slika 12. DMT - razdelitev prenosne kapacitete.

je sorazmerna ploščini izreza, ki ga omejuje potek slabljenja signala in potek slabljenja presluha. Modemi, ki delujejo na višje ležečih kanalih zato zelo malo prispevajo k skupni prenosni hitrosti r .

Možnost prilagajanja na motnje je ena glavnih odlik postopka modulacije z več nosilci: število bitov na simbolov $b_s[n]$ se uravnava glede na število napak pri prenosu. Slaba lastnost modulacije z več nosilci v primerjavi z drugimi modulacijami je predvsem velika zakasnitev signalov pri prenosu, ki je obratno sorazmerna frekvenčni širini enega kanala.

V. ZAKLJUČEK

Prenosno kapaciteto žičnih povezav omejuje slabljenje in šum. Glavni izvor šuma predstavlja presluh iz dvovodov znotraj istega kabla. Prenosna kapaciteta zaradi tega zelo strmo upada z dolžino žičnih povezav. Praktično dosegljivo prenosna hitrost določajo tehnološke omejitve, ki so vezane na izbiro načina ločevanja smeri prenosa, modulijskega in kodirnega postopka.

LITERATURA

- [1] Mitja Štular, Anton Umek, Savo Leonardis *Tehnologije dostopovnih omrežij v informacijsko povezani družbi*, Elektrotehniška zveza Slovenije, 2000,
- [2] John W. Cook, R. Kirkby, M. Booth, K. Foster, D. Clarke, G. Young: *The Noise and Crosstalk Environment for ADSL and VDSL Systems*, IEEE Communications Magazine, May 1999, Vol. 37, No. 5,
- [3] Thomas Starr, John B. Cioffi, Peter Silverman *Understanding Digital Subscriber Line Technology*, Prentice Hall, 1999.