

Širokopasovni DSL sistemi

Anton Umek

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: anton.umek@fe.uni-lj.si

Next Generation Broadband DSL

Wired broadband access technology is evolving from copper based to hybrid fiber-copper architecture. FTTH is available a long time, but the required investments do not suit well the market demand. A new DSL technology can offer a competitive high-speed gigabit access to the last distribution point.

The most important cable capacity-range limiting parameters are: signal attenuation, near-end crosstalk NEXT, far-end crosstalk FEXT and cable ingress noise. The evolution of DSL systems followed a step by step elimination of the most disturbing signal sources, which limit the channel capacity.

Capacity gains are possible only by using wider spectrum band, which is viable by shortening the line length and always by some inventions in transmission method. DMT concept make possible all further improvements in DSL signal processing: DSM, vectoring and MIMO.

1 Uvod

Bakrena doba je obdobje med 4000 p.n.š. in 2300 p.n.š., ki označuje začetek uporabe kovine v zgodovini razvoja človeka. Mnogo kasneje z Bellovim izumom telefona in prepletenega dvovoda leta 1881 je postal baker glavni prevodni material v telekomunikacijah.

Število vseh povezav z bakrenimi paricami je ocenjeno na približno 1.3 milijarde, od tega pa jih več kot 300 milijonov uporablja različne tehnologije za digitalni prenos - DSL (Digital Subscriber Line). Infrastruktura žičnih povezav v dostopovnem telefonskem omrežju predstavlja veliko premoženje kljub slabim prenosnim karakteristikam medija.

Telefonski prepleteni dvovod je bil načrtovan za prenos ozkopasovnega analognega zvokovnega signala. Hitra in zanesljiva digitalna komunikacija je mogoča le s kompleksno digitalno obdelavo signalov. V zadnjih treh desetletjih smo bili priča razvoju in uporabi treh generacij tehnologij v digitalni naročniški zanki: ISDN (1G), ADSL (2G) in VDSL (3G).

Razvoj širokopasovnih multimedijskih storitev je pogojen z razpoložljivostjo hitrih dostopovnih omrežij. Topologije vrvičnih dostopovnih omrežij postopoma prehajajo iz popolnoma bakrenih v hibridna optična in bakrena omrežja. Cena izgradnje popolnoma optičnega dostopovnega omrežja FTTH je še vedno v mnogo primerih precej večja od cene hibridnega omrežja z uporabo obstoječe tehnologije VDSL. Po ocenah Swiss Telecoma nastopa približno 75% stroškov pri gradnji FTTH omrežij na zelo kratkem segmentu povezav, približno 100 do 200 metrov od naročnika. To dejstvo še vedno zelo motivira uporabno obstoječe bakrene infrastrukture vsaj v zadnjih nekaj 100 metrih povezav od naročnikov do zadnjega kableskega razdelilnega mesta. Številni tehnični izumi in izboljšave so pomembno povečali prenosno kapaciteto bakrenega dvovoda na kratkih razdaljah. Prenosne kapacitete najnovjših VDSL sistemov že dosegajo 100Mbit/s, ki je bilo do sedaj značilno le za optične povezave.

Vse kaže da bo naslednja, zelo verjetno tudi zadnja generacija sistemov 4G-DSL omogočila izjemno hiter prenos do 1Gbit/s, kar presega trenutne potrebe uporabnikov. Izjemno povečanje prenosne kapacitete je izvedljivo le pod določenimi pogoji:

- s krajšanjem bakrenih povezav na razdalje do 200 metrov,
- z izkoriščanjem celotnega uporabnega frekvenčnega pasu in
- z uporabo kompleksnih postopkov digitalne obdelave signalov.

Širokopasovni dostop preko hibridnih omrežij trenutno nudi operaterjem velike prihranke v primerjavi s popolnoma optičnimi omrežji. Migracija iz hibridnega v celoti optično dostopovno omrežje zahteva izjemne finančne vložke, zato bo trajalo še kar nekaj časa, da bo popolnoma končana. Bakrena doba v telekomunikacijah bo torej trajala daljši čas kot smo pričakovali.

2 Razvoj DSL tehnologij

Prva generacija DSL sistemov je bila žal načrtovana s popolnoma napačno predpostavko o potrebah in željah uporabnikov. ISDN je bil pač načrtovan primarno s ciljem digitalizacije govornega signala, kakšne bodo potrebe po podatkovni komunikaciji pa v prvi fazi razvoja verjetno še nihče ni slutil. Razvoj prvega DSL sistema je poleg tega trajal predolgo in ponujena kapaciteta 160kbit/s uporabniku ni dala nove kvalitete. ISDN je bil zato finančna izguba za operaterje, hkrati pa tudi razlog za posmeh ožji inženirski stroki. Ni čudno, da si je kratica ISDN zaslužila po svetu mnogo kritičnih in šaljivih zamenjav¹. Največji izziv pri razvoju prve generacije DSL je bil kako doseči dvosmerno komunikacijo po eni parici. Poleg frekvenčnega dupleksiranja FDM in časovnega dupleksiranja TDM je bil na izbiro tudi sočasni dvosmerni prenos s izločanjem odbojev EC (echo cancelling). Posledica ločenega razvoja so bili različni standardi v ZDA, na Japonskem in v Evropi.

Ekspertno znanje množice raziskovalcev in razvijalcev ISDN tehnologije je omogočilo takojšen razvoj prvega zmogljivejšega DSL sistema HDSL (High-speed DSL), ki pa je bil načrtovan predvsem za vzpostavitev primarnega linka E1 oziroma T1. Prvi HDSL sistemi so uporabljali enako linijsko kodo (2B1Q) kot ISDN in tudi enak koncept prenosa z adaptivnim izločanjem odbojev in adaptivno izravnavo prenosne karakteristike kanala. Glavni omejevalni dejavnik dosega HDSL povezav je bil bližnji presluch med sosednimi paricami v kablu- NEXT (Near End Crosstalk).

V naslednji generaciji DSL sistemov je bila že predlagana nesimetrična kapaciteta povezav v smeri proti uporabniku (downlink) in v smeri od uporabnika (uplink). Za doseganje večjih prenosnih hitrosti je bilo nujno izboljšati spektralno učinkovitost z izbiro primernejšega modulacijskega in kodirnega postopka. Konkurenčni skupini sta predlagali dve različni modulacijski shemi: QAM modulacijo, oziroma njeno optimizirano izvedbo CAP (Carrierless Amplitude Phase) in prenos z več nosilci DMT (Discrete Multi Tone), ki ga je mogoče učinkovito implementirati z uporabo diskretnega Fourierovega transformata FFT. Čeprav je bil DMT sistem že v času razvoja zelo prepričljivo predstavljen kot boljši, to ni prepričalo zagovornikov CAP sistema [1]. V ozadju nasprotujočih strokovnih mnenj je bilo predvsem nasprotje med korporacijo in relativno šibkejšim podjetjem, ki pa je podpiralo boljši koncept. Po obsežnih primerjalnih laboratorijskih testih obeh prototipov so bili rezultati DMT sistema boljši in DMT sistem je bil zato tudi izbran v prvem ITU standardu za ADSL G.992.1.

Konkurenčna tekma med telekomi in kabelskimi operaterji je motivirala razvoj tretje generacije DSL sis-

temov (3G). Moderno hibridno kabelsko omrežje HFC (hybrid fiber coax) je kljub zvezdasti topologiji že omogočalo enake prenosne zmogljivosti kot prvi ADSL sistemi. Operaterji telefonije so bili zato zelo motivirani poiskati zmogljivejšo tehnično rešitev. Nov izziv je zahteval zamenjavo daljšega dela povezave med naročniško centralo in končnim vozliščem z optičnim kablom. Na preostalem krajšem delu poti je bilo tako mogoče doseči mnogo večji podatkovni pretok, vendar v mnogo širšem frekvenčnem pasu s tehnologijo VDSL (Very High Speed DSL). Koncept VDSL sistema je lahko zelo podoben konceptu ADSL-DMT sistema, bistvena je razlika v številu nosilcev in s tem tudi v širini frekvenčnega pasu, ki se uporablja za prenos. Proces standardizacije VDSL.dmt sistema je potekal z zakasnitvijo do leta 2006 (ITU G.933.2), vendar zopet zaradi boja dveh vplivnih skupin, ki sta predlagali različna koncepta (DMT in CAP) [1]. Tudi pri testiranju VDSL sistemov se je prenos z več nosilci DMT izkazal kot najboljša izbira.

Prenos z več nosilci omogoča popolno prilagodljivost pri oblikovanju spektra z izjemno ločljivostjo zaradi majhne pasovne širine posamičnih kanalov (cca 4kHz). Algoritmi za dinamično upravljanje spektra DSM (Dynamic Spectrum Management) lahko na različne načine povečajo skupno prenosno kapaciteto vseh paric v kablu:

- DSM Level 1 definira prilagajanje spektra DSL sistema pri nastopanju različnih šumnih virov,
- DSM Level 2 omogoča povečanje povprečne kapacitete po principu delovanja z minimalno oddajno močjo, ki še omogoča doseganje zelene kapacitete na posamičnem paru znotraj skupnega kabla,
- DSM Level 3 omogoča izločanje daljnega preslucha FEXT (Far End Crosstalk). Adaptivna izločitev preslucha je mogoča zaradi poznavanja signalov na vseh parih znotraj istega kabla. Koncept je standardiziran od leta 2010 (ITU G.993.5) in je znan tudi pod imenom je vektorski VDSL.

Po uspešnem startu tretje generacije VDSL sistemov VDSL.vector in VDSL.phantom je na vrsti zadnja četrta generacija DSL sistemov z delovnim imenom G.Fast.²

V naslednji generaciji DSL sistema se obljublja skoraj neverjetno visoke prenosne kapacitete. Ob upoštevanju Shannonove formule za kapaciteto frekvenčno omejenega šumnega kanala je več kot očitno, da bo nujna velika razširitev frekvenčnega pasu. Za doseg maksimalne prenosne kapacitete 1Gbit/s bo po ocenah različnih raziskav potrebno razširiti frekvenčni pas do 70MHz ali celo 140 MHz.

²Posebna delovne skupine znotraj ITU pripravlja standardizacijo G.Fast

¹Innovation Subscribers Didn't Need, Imeli Smo Dober Namen, itn.

3 Širjenje meja prenosnih kapacitet

Telefonski kabel s prepletenimi bakrenimi dvovodi je bil načrtovan za analogni telefon. Pri načrtovanju naročniškega omrežja se je upoštevalo predvsem pravilo omejitve serijske upornosti žične povezave. Nadzorovana parametra analognih povezav sta še vnešeno slabljenje akustičnega signala in slabljenje presluhov, ki nastopajo med dvovodi znotraj istega kabla.

Pri hitrem digitalnem prenosu so popačitve signala mnogo večje, predvsem zaradi povečanja slabljenja signala in tudi zaradi mnogo večjega presluha med dvovodi. Najbolj pomembni parametri, ki vplivajo na razmerje med kapaciteto in dosegom zveze so: slabljenje signala, bližnji presluh NEXT, daljni presluh FEXT in šum iz okolice [2]. Prvi parameter določa moč signala v sprejemniku, medtem ko zadnji trije parametri v padajočem zaporedju magnitude vplivajo na moč šuma. Za preprost matematični opis slabljenja dvovoda lahko uporabimo enoparameterski \sqrt{f} model:

$$|H_L(f, d)| = e^{-K_L d \sqrt{f}} \quad (1)$$

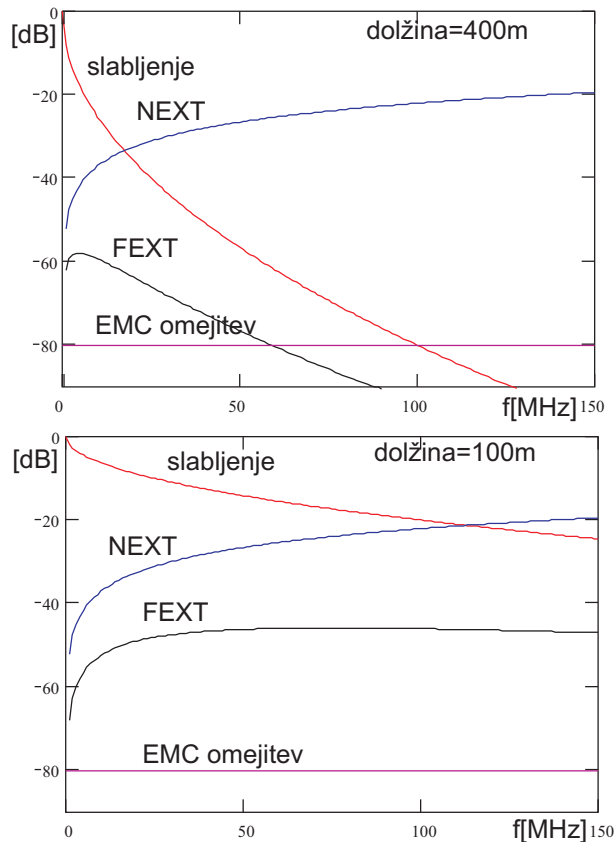
Vrednost konstante $K_L = 2.3 \cdot 10^{-6}$ ustreza modelu prepletenega dvovoda, ki ima na dolžini 100 metrov pri frekvenci 100MHz tipično slabljenje 20dB. Model ustreza dejanskim razmeram v območju frekvenc tipično nad 100kHz, kjer je mogoče dvovod skoraj idealno zaključiti z realnim bremenom in pod pogojem, da so izgube v dielektriku majhne v primerjavi s serijskimi izgubami zaradi kožnega pojava.

Presluh med dvovodi je odvisen od kvalitete konstrukcije kabla, predvsem od izbire prepletnih dolžin in tudi od natančnosti prepletanja. Sosedni pari so prepleteni z različnimi prepletnimi dolžinami z namenom kompenzacije elektromagnetnih sklopov in zmanjšanja skupnega presluha iz sosednih dvovodov. Bližnji presluh NEXT je vsota preslušnih signalov ki prihajajo iz oddajnikov na isti-bližnji strani kabla, daljni presluh FEXT pa prihaja iz izvorov na nasprotni-daljni strani kabla. Preslušne poti iz bližnje strani so mnogo krajše, zato je skupna moč bližnjega presluha mnogo večja od moči daljnega presluha [3]. Najbolj pogosto uporabljamo statistični model, ki določa skupno moč bližnjega presluha. Model ima enosegmentni potek frekvenčne odvisnosti slabljenja presluha s strmino -15dB/dekado:

$$|H_{NEXT}(f)|^2 = K_{next} f^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Statistični model za daljni presluh FEXT podaja padajoče slabljenje s strmino -20dB/dekado. Moč signala daljnega presluha zaradi dolžine sklopa linearno narašča z razdaljo d , hkrati pa zaradi slabljenja na poti tudi eksponentno upada:

$$|H_{FEXT}(f, d)|^2 = |H_L(f, d)|^2 K_{fext} f^2 d \quad (3)$$



Slika 1: Slabljenje signala in motenj.

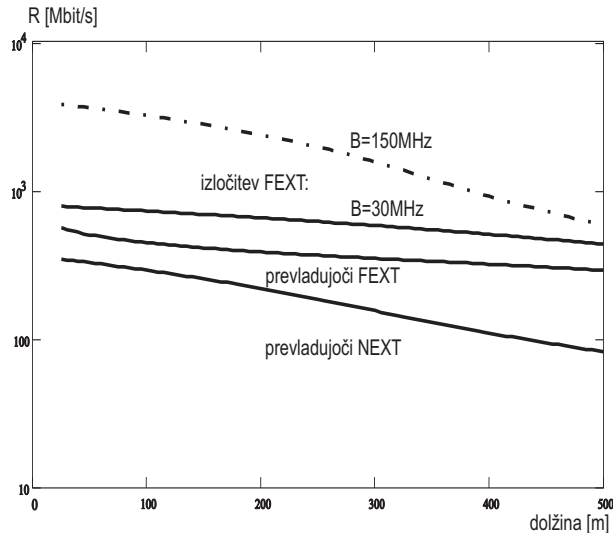
Konstanti K_{next} in K_{fext} sta odvisni tudi od števila aktivnih sosednih parov v kablu, ki povzročajo presluh.

Slika 1 podaja potek slabljenja signala (1) in potek preslušnih slabljenj NEXT (2) in FEXT (3) za tipični primer kratkega dvovoda. Moč bližnjega presluha NEXT je večja od moči daljnega presluha FEXT in oba preslušna signala imata večjo moč od inducirane šuma iz okolice.

Če želimo računsko opredeliti učinek slabljenja signala, presluha in inducirane šuma, lahko ob predpostavki, da ima šum normalno porazdelitev uporabimo Shannonovo formulo za prenosno kapaciteto kanala:

$$R(B) = \int_0^B \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df. \quad (4)$$

Razvoj generacij vedno zmogljivejših DSL sistemov poteka s postopnim izločanjem najbolj relevantnih virov motenj in hkrati z zmanjševanjem razdalj ter posledično s povečanjem pasovne širine. Razlike v kapaciteti ob različnih pogojih za različne modele prenosnega kanala lahko preprosto ocenimo iz slike 1 na podlagi primerjave površin med krivuljami slabljenja in šuma. Slika 2 podaja izračunane poteke kapacitet za različne modele komunikacijskega kanala in sicer pri pogojih kjer kot domi-



Slika 2: Prenosna kapaciteta naročniške parice.

nantni šumni signal nastopa NEXT, FEXT ali pa samo inducirani šum iz okolice. Veljavnost modelov je pogojena z načinom delovanja prenosnega sistema. Bližnji presluch je dominanten le v primeru, če v obe smeri zveze uporabljamo isti frekvenčni pas. S frekvenčnim ločevanjem signalov smeri prenosa bližnji presluch nima več vpliva in glavni dejavnik daljni postane daljni presluch FEXT.

Izločevanje daljnega preslucha FEXT ni več tako enostavno kot izločanje NEXT. Postopek zahteva obdelavo signalov vseh sosednjih dvosvodov na strani sprejemnika ali pa na strani oddajnika. Postopek izločanja daljnega preslucha je za obe smeri komunikacije različen: signali, ki jih oddaja DSLAM v downlinku so FEXT predkodirani, na sprejetih signalih v uplinku pa DSLAM izvaja izločanje daljnega preslucha. Postopek obdelave signalov na kablu je imenovan tudi vektorski prenos [4]. Vektorski prenos dejansko vključuje MIMO obdelavo signalov, ki je bila prvič uporabljena v radijskih več antenskih sistemih. Izločanje daljnega preslucha iz vseh sosednjih dvosvodov v kablu dejansko niti ni potrebno, pač pa se izloča le dominantne izvore [5]. Postopek izločanja daljnega preslucha je omogočil dvig prenosne kapacitete VDSL sistemov na 100Mbit/s.

Po izločitvi presluchov postane glavni omejevalni dejavnik šum izvorov iz okolice kabla. Podatkovna komunikacija po žicah povzroča motne navzven in zaradi istega elektromagnetnega sklopa hkrati sprejema motnje iz okolice. Tipična gostota močnostnega spektra sprejetega šuma je -133dBm/Hz , največja dovoljena gostota močnostnega spektra oddajnika pa znaša -60dBm/Hz [6].

MIMO sistem prenosa lahko uporabimo tudi po več paricah v kablu. Vektorski prenos po več dvosvodih daje dodatno možnost povečanja kapacitet: na M-dvosvodih lahko namreč tvorimo 2M-1 neodvisnih kanalov. Na

dveh paricah lahko teoretično potrojimo kapaciteto, praktični primer je VDSL g.phantom [7].

4 Zaključek

Naročniško telefonsko omrežje z bakrenimi vodi ima zelo dolgo zgodovino, praktični vse od začetka dobe telekomunikacij. Zadnjih nekaj deset let se uporabno vrednost žičnega omrežja uspešno podaljšuje ob uporabi novih postopkov in obsežni digitalni obdelavi signalov. Povečanja prenosne kapacitete so bila mogoča vedno le na račun povečanja pasovne širine, možnosti za to pa nastopijo le s krajšanjem razdalj. V prenosni tehniki ima najpomembnejšo vlogo koncept prenosa z več nosilci DMT, ki je omogočil vse nadaljne izboljšave: dinamično upravljanje spektra DSM, vektorski prenos in nazadnje tudi uporabo MIMO v DSL.

Četrta generacija DSL sistema (G.fast) bo morda še zadnjič upočasnila načrtovanja FTTH sistemov, vse dokler potrebe uporabnikov po prenosni kapaciteti ne bodo presegle 1Gbit/s.

Literatura

- [1] J.M.Cioffi, *Lighting up copper*, Communications Magazine, IEEE, vol.49, no.5, pp.30-43, May 2011
- [2] A. Umek, *Theoretical and available transmission capacity of UTP*, TENCON. Proceedings of IEEE Region 10 International Conference on, vol.2, no., pp.698-702 vol.2, 2001
- [3] T. Starr, M. Sorbara, J. Cioffi, and P. Silverman, *DSL Advances*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2003,
- [4] G. Ginis and J. M. Cioffi, *Vectored Transmission for Digital Subscriber Line Systems*, IEEE JSAC, vol. 20, no. 5, June 2002, pp. 1085-1104.
- [5] V. Oksman, H. Schenk, A. Clausen, J.M. Cioffi, M. Mohseni, G. Ginis, C. Nuzman, J. Maes, M. Peeters, K. Fisher, and P.-E. Eriksson, *The ITU-T's new G.vector standard proliferates 100 Mb/s DSL* IEEE Communications Magazine, pp. 140-148, October 2010.
- [6] P. Ödling, T. Magesacher, S. Höst, P. O. Börjesson, M. Berg, and E. Areizaga, *The fourth generation broadband concept*, IEEE Commun. Mag., vol. 47, no. 1, pp. 62-69, Jan. 2009.
- [7] Innovation in Broadband Access: Phantom Mode, <http://www.alcatel-lucent.com/features/phantom>