

# Vloga VDSL v dostopovnih omrežjih naslednje generacije

Anton Umek, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

**Abstract** — Broadband wired access should be accelerated to at least 30Mbit/s in the next seven years.

A migration to an all-fiber network infrastructure requires a massive investment and will take time to complete.

Hybrid fiber-copper network topology is cheaper and faster to deploy. The latest DSL technologies will play a key role in transition to the final all-fiber access network.

**Keywords** — NGA, FTTP, VDSL, FEXT, vectoring,

## I. UVOD

Digitalna Agenda [1] postavlja dva glavna cilja za doseganje razpoložljivosti prenosnih kapacitet dostopovnih omrežij v državah EU:

- osnovni dostop do leta 2013 za vse državljane v EU,
- hitri širokopasovni dostop, ki omogoča pretok najmanj 30Mbit/s za vse državljane EU do leta 2020.

Po podatkih raziskovalnega poročila, ki podaja sistematični pregled razpoložljivosti različnih tehnologij širokopasovnega dostopa v različnih državah EU za leto 2011 [2] je standardni dostop razpoložljiv v 96%, več kot 50% državljanov pa ima tudi že razpoložljiv hitri dostop- NGA.

Glavna naloga je modernizacija ruralnega omrežja. Po kriteriju mejne gostote poseljenosti 100 prebivalcev na kvadratni kilometer skoraj petina prebivalcev EU stanuje na podeželju. Hitro dostopovno omrežje NGA je v povprečju na podeželju razpoložljivo le za vsako osmo domovanje.

DSL je trenutno najpomembnejša tehnologija za vrvični dostop. Pokritost z DSL je logična posledica velike pokritosti z analognim telefonskim omrežjem. Povprečna razpoložljivost DSL v EU je 93% , na podeželju pa 73%.

Pomen različnih tehnologij vrvičnega hitrega širokopasovnega dostopa NGA lahko razvrstimo po izmerjeni povprečni razpoložljivosti:

- Docsis3 omrežja dosegajo razpoložljivost 37%,
- VDSL omrežja v celoti 21% , na podeželju pa 4%
- in v celoti optična omrežja FTTP le 12%.

Po podatkih istega vira je ocenjeno tudi stanje v naši državi. Pokritost s širokopasovnim omrežjem je v Sloveniji nekoliko nižja od povprečja EU, medtem ko je razpoložljivost NGA nad povprečjem:

- kablenska omrežja Docsis3 so na EU povprečju 36%,
- VDSL omrežja dvakrat višje kot v EU 42%
- in podobno tudi optična omrežja FTTP 21%.

Tudi v Sloveniji nastopa izrazita razlika v pokritosti NGA mest in podeželja.

Države v EU imajo postavljene tudi različne lastne cilje v obdobju do skupnega cilja Digitalne Agende 2020:

- Nemčija: prenosna kapaciteta 50Mbit/s v dotoku, 75% razpoložljivost do leta 2014,
- Finska: simetrična prenosna kapaciteta 100Mbit/s, 100% razpoložljivost do leta 2015,
- UK: prenosna kapaciteta v dotoku 25Mbit/s, 90% razpoložljivost do leta 2015,
- Avstrija in Danska: prenosna kapaciteta v dotoku 100Mbit/s, 100% razpoložljivost do leta 2020,
- Švedska: prenosna kapaciteta v dotoku 100Mbit/s, 90% razpoložljivost do leta 2020,
- Francija: prenosna kapaciteta v dotoku 100Mbit/s, 100% razpoložljivost do leta 2025.

Potrebe po prenosni kapaciteti v dostopovnih omrežjih še vedno naraščajo eksponentno. Po Nielsenovem zakonu je ocenjena letna rast 50%. To bi lahko pomenilo, da VDSL2 tehnologija že leta 2016 ne bo mogla zadostiti potrebam najbolj zahtevnih uporabnikov. Tudi VDSL.vector lahko to obdobje podaljša le za nekaj let. Povsem jasno je, da ob nadaljevanju istega trenda lahko čez deset let zadovoljijo potrebe najbolj zahtevnih uporabnikov le popolnoma optična dostopovna omrežja.

Izgradnja v celoti optičnih omrežij je v povprečju zelo draga in tudi časovno zamudna. V večini evropskih držav je delež povezav FTTH nižji od 5%. Izgradnja FTTH omrežij do pomembnega deleža pomeni deset let dolg projekt. Ilustrativen primer je Japonska, ki je ob relativno nizkih stroških izgradnje in podpori regulatorja v desetih letih dosegla 45% delež optičnih povezav. Večina držav EU bo predvidoma dosegla 20% razpoložljivost dostopa preko popolnoma optičnih omrežij do leta 2016, več kot 50% razpoložljivost pa po ocenah analitikov ni verjetna pred letom 2020.

Cena izgradnje hibridnega omrežja optika/baker je nekajkrat nižja od popolnoma optičnih povezav. Nove DSL tehnologije lahko razumemo kot vmesno, hitro izvedljivo in cenovno učinkovito rešitev, ki omogoča doseganje zastavljenih ciljev do leta 2020. Pričakujemo lahko, da bosta DSL tehnologiji VDSL.vector in morda tudi G.fast naslednje desetletje igrali pomembno vlogo ob prehodu na popolnoma optična dostopovna omrežja.

## II. VDSL Z IZLOČANJEM PRESLUHA FEXT

VDSL.vector je oznaka za tehniko prenosa po bakreni parici, ki uporablja postopek izločanja motenj daljnega presluha FEXT. Prenosni sistem sicer uporablja enak postopek modulacije (DMT) kot starejši DSL sistemi. Izboljšava prenosnega sistema VDSL2 se odraža na povečanju prenosne kapacitete in dosega povezav [3], [4]. Tipična prenosna kapaciteta VDSL.vector je 100Mbit/s na razdalji 400 metrov, kar je približno dva do trikrat več kot pri VDSL2. Tudi rezultati meritev na razdalji 500 metrov v testnih omrežjih različnih operaterjev v EU potrjujejo doseganje prenosnih kapacitet med 60Mbit/s in 100Mbit/s.

Glavna prednost uporabe tehnik izločanja FEXT ni samo povečanje prenosne kapacitete, pač pa tudi zmanjšanje variacij prenosnih kapacitet zaradi sicer nepredvidljivega presluha. VDSL.vector zato omogoča v primerjavi z VDSL2 ne le hitrejšo, ampak tudi bolj stabilno povezavo. Stabilnost povezave zelo vpliva zlasti na kvaliteto storitve IPTV.

Postopek izločanja presluha iz sosednih paric temelji na poznavanju sosednih signalov, zato potrebuje naprava tudi dostop do signalov na vseh paricah v kablu. To je zagotovljeno le v primeru če upravlja vse parice v kablu isti operater. V nasprotnem primeru je presluh FEXT le delno izločen, preostali del presluha (alien-crosstalk) pa prevzame prevladujoči vpliv na omejevanje prenosne kapacitete. V najslabšem primeru lahko tudi zelo majhno število nekontroliranih »tujih« parov skoraj izniči učinke izločanja presluha na preostalih kontroliranih parih.

Prenosne kapacitete v sistemu z delnim izločanjem presluha lahko v najslabšem primeru zelo malo odstopajo od prenosnih kapacitet sistema brez izločanja presluha, kar pomeni, da je učinek izločanja skoraj nič. Problem je mogoče rešiti s povezovanjem DSLAM naprav (cross-vectoring), za kar potrebujemo standardizirani postopek. Implementacije takšnih sistemov zato lahko pričakujemo najprej na opremi istega proizvajalca.

Dejansko je z ustrežno dodatno obdelavo vseh dostopnih signalov na DSLAM-u v dotoku tehnično mogoče izločiti tudi daljni presluh iz nekontroliranih tujih paric [5], [6]. V dotoku v modemu na strani naročnika tujega daljnega presluha ni mogoče izločiti in edini način omejevanja je na izvoru. Učinek tujega presluha je mogoče zmanjšati s primerno tehniko dinamičnega upravljanja spektrov DMT sistemov (DSM). Optimalna rešitev zahteva centralizacijo funkcije upravljanja spektra. Najbolj preprost način zmanjševanja škodljivega vpliva tujega presluha je zmanjšanje oddajne moči in s tem tudi prenosnih kapacitet na tujih paricah. V vsakem primeru je najslabše prepustiti del paric znotraj kabla brez vsake kontrole.

Rezultati laboratorijskih testov na kablu s 25 paricami na kažejo drastično zmanjšanje prenosnih kapacitet za 45% v primeru, če je pet tujih paric brez kontrole. S primernim upravljanjem spektra na tujih paricah je bilo izmerjeno zmanjšanje prenosnih kapacitet na ostalih 20 paricah zaradi tujega presluha med 5% in 10% [6].

Omejevanje razvezane zanke zaradi problema izločanja presluha v sistemu VDSL.vector samo iz tehničnih razlogov ni upravičeno. Mogoče pa je spremeniti model razvezane zanke iz fizične v virtualno. V virtualno razvezani zanki kontrolira vso opremo na kablu isti operater, zato ni problemov z izločanjem »tujega« presluha. Novi ponudniki

storitev v tem primeru dostopajo v omrežje prvotnega operaterja preko virtualnega linka, ki omogoča širok nabor hitrosti, QoS, prioritet itn.

Prenosne kapacitete VDSL sistemov je mogoče dodatno povečati še z nekaj komplementarnimi tehnikami. V mnogo primerih je do mesta naročnika priključen kabel z dvema pari. Uporaba drugega neizkoriščenega para lahko podvoji kapaciteto povezav ob ustreznem združevanju podatkovnih pretokov (bonding). Še iz zgodnje dobe analogne telefonije je znan tudi princip uporabe tretjega »fantomskega« voda na dveh paricah. Združevanje dveh parov in uporaba fantomskega voda (bonding+phantom mode) lahko v najboljšem primeru trikrat poveča prenosno kapaciteto VDSL sistema.

## III. PRENOSNE KAPACITETE VDSL

Prenosno kapaciteto VDSL sistema najbolj omejuje slabljenje signalov, daljni presluh v kablu FEXT in šum iz okolice.

Slabljenje kabla podaja enačba (1).

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

Vrednost konstante slabljenja  $K_f=1.5$  podaja model kabla s premerom 0.6mm, ki ima pri frekvenci 1MHz na razdalji  $d=1$ km slabljenje 13dB.

Moč daljnega presluha iz sosednih paric narašča s kvadratom frekvence in linearno z dolžino sklopa, hkrati pa nastopi tudi slabljenje zaradi izgub na poti [7]:

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

Skupna moč DMT signala je omejena na  $P_0$  in enakomerno porazdeljena na DMT podkanale s skupno pasovno širino  $B$ . Signal v sprejemniku podaja enačba:

$$S(f, d) = \frac{P_0}{B} |H_L(f, d)|^2 \quad (3)$$

Pri VDSL2 sistemu je motilni signal vsota daljnega presluha in belega šuma ozadja:

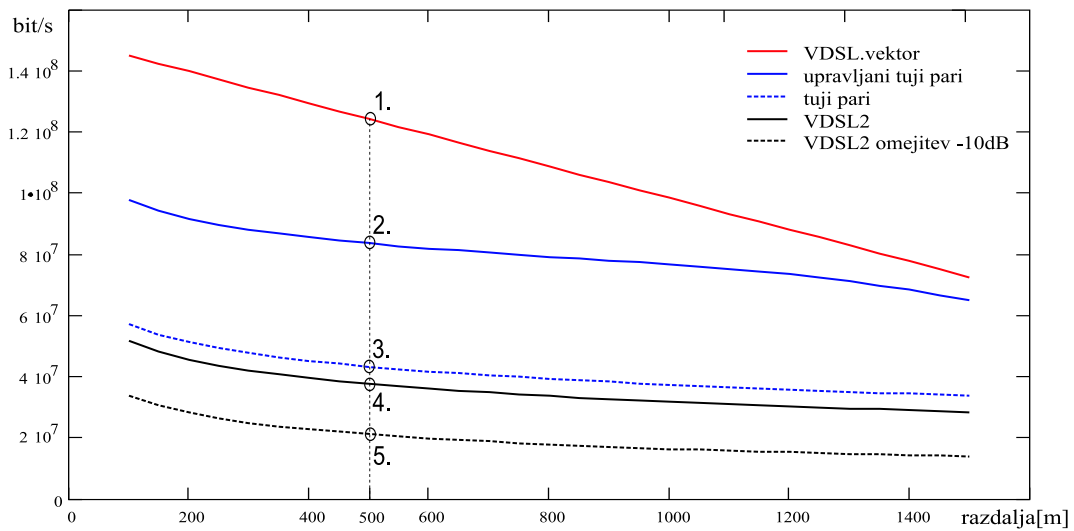
$$N(f, d) = \frac{P_0}{B} |H_{FEXT}(f, d)|^2 + N_0 \quad (4)$$

V izračunu kapacitete VDSL2 sistema upoštevamo bližnji presluh iz sosednih 24 paric v kablu. Kapaciteto prenosnega sistema VDSL.vector računamo za idealni primer popolne izločitve daljnega presluha z nivojem šuma ozadja  $N_0=-140$ dBm/Hz. Prenosna kapaciteta je zmanjšana v primeru delne izločitve presluha, kjer ostaja dominantna motnja presluh iz tujih paric:

$$N(f, d) = N_0 + FEXT_{alien}(f, d) \quad (5)$$

V izračunu razpoložljive prenosne kapacitete upoštevamo faktor odmika od Shannonove kapacitete  $\Gamma=16$  in faktor spektralne učinkovitosti  $\eta=0.9$ :

$$r = \eta \cdot \int_{band} \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\Gamma} \cdot \frac{S(f)}{N(f)} \right) df \quad (6)$$



Slika 1: Prenosne kapacitete VDSL v dotoku.

Rezultate izračunov prenosnih kapacitet v dotoku za prenosna sistema VDSL2 in VDSL.vector podaja slika 1. V izračunih je upoštevan enak frekvenčni profil 17 in omejitev oddajne moči  $P_0=14\text{dBm}$ . Rezultati so podani za kabel s 25 pari, kjer se upošteva vseh 24 izvorov presluha iz sosednjih paric. Pomen krivulj na grafu je podan zaporedno s podatki o prenosnih kapacitetah v točkah na izbrani razdalji  $d=500\text{m}$ :

1. VDSL.vector sistem s popolno izločitvijo daljnega presluha:  $r_1=125\text{Mbit/s}$ ,
2. VDSL.vector sistem, kjer upravljamo moči tudi na osmih tujih paricah. Skupno zmanjšanje presluha iz tujih parov 20dB je kombinacija zmanjšanja oddajne moči za 10dB in ustrezne izbire tujih parov v kablu. Prenosna kapaciteta idealnega VDSL.vector sistema  $r_1$  se zmanjša za 33% na  $r_2=84\text{Mbit/s}$ ,
3. VDSL.vector sistem, kjer pustimo osem tujih parov brez vsake kontrole. V najslabšem primeru se moč daljnega presluha zmanjša samo 3dB. Izboljšanje prenosne kapacitete v primerjavi z VDSL2 je zato razmeroma majhno:  $r_3=43\text{Mbit/s}$ ,
4. VDSL2 sistem s 24 motilnimi izvori FEXT:  $r_4=38\text{Mbit/s}$ ,
5. VDSL2 sistem s 24 izvori presluha FEXT interferers ob zmanjšani oddajni moči (-10dB), prenosna kapaciteta se zato zmanjša na  $r_5=22\text{Mbit/s}$ .

Rezultat simulacije uporabe robustnega postopka zmanjšanja tujega presluha na osnovi redukcije moči ilustrira učinek na prenosni kapaciteti obeh sistemov. Na račun omejevanja prenosne kapacitete tujih paric  $r_5$  je mogoče ohraniti velik del pridobljene prenosne kapacitete sistema z izločanjem FEXT  $r_1 \rightarrow r_2$ . Upravljanje moči tujih izvorov mora biti v praksi kontrolirano tako, da zagotovimo dogovorjene prenosne kapacitete.

Prenosna kapaciteta idealnega sistema z izločanjem FEXT  $r_1$  je v danem primeru na razdalji 500m 3.3- krat večja od prenosne kapacitete VDSL2 sistema  $r_4$ . Faktor povečanja prenosne kapacitete označimo z  $G_{vector}$ :

$$G_{vector} = \frac{r_{VDSL.vector}}{r_{VDSL2}} = \frac{r_1}{r_4} \quad (7)$$

Na faktor povečanja prenosne kapacitete zaradi izločitve bližnjega presluha vpliva predvsem nivo šuma ozadja, v precej manjši meri pa vplivata tudi slabljenje in učinkovitost prenosnega sistema. Na slikah 2a,2b,in 2c so podani poteki faktorja povečanja prenosne kapacitete pri izločanju FEXT za različne nivoje šuma ozadja (-140, -120, -100)dBm/Hz, za različne premere paric (0.8,0.6,0.4)mm in za različno učinkovite prenosne sisteme  $\text{Gama}=(12\text{dB-polna črta, } 6\text{dB-prekinjena črta})$ .

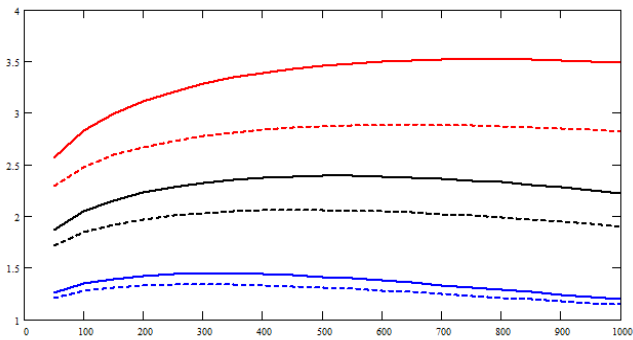
Iz primerjav grafov na sliki 2b za primer kabla s premerom parice 0.6mm lahko ugotovimo, da je faktor povečanja prenosne kapacitete zaradi izločanja FEXT pri povečanem nivoju šuma ozadja  $N_{\theta}=-120\text{dBm/Hz}$  zmanjšan iz 3,3 na 2,2. Pri zelo visokem nivoju šuma ozadja  $N_{\theta}=-100\text{dBm/Hz}$  izločanje FEXT skoraj ni smiselno, saj je povečanje prenosne kapacitete le 28%.

Povečanje prenosnih kapacitet je nekoliko večje v manj učinkovitih sistemih z večjim odklikom predvsem na račun manjši kapacitet VDSL2 sistemov. Parica z manjšim premerom žice ima večje slabljenje in s tem tudi manjši presluh, zato je učinek izločanja FEXT manjši kot v kablu z večjim premerom parice.

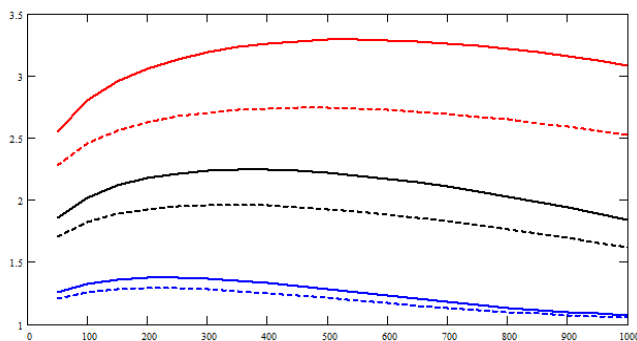
#### IV. ZADNJI DSL ?

Poleg tretje generacije DSL sistema VDSL.vector se pripravlja tudi verjetno zadnja, četrta generacija z oznako G.Fast. Glavni del cene izgradnje FTTH omrežja izhaja iz zadnjih 100-200 metrov povezav in G.Fast je načrtovan ravno z namenom zmanjšanja teh stroškov. Tehnologija je še vedno v fazi standardizacije in potrditev standarda se pričakuje v prvi četrtini 2014. Tehnologija G.Fast je načrtovana za doseganje maksimalnih kapacitet do 1Gbit/s na razdalji pod 100m. Dodatno povečanje prenosnih kapacitet v primerjavi z VDSL.vector je na zelo kratkih razdaljah mogoče na račun izjemne širitve frekvenčnega spektra do 100MHz ali več.

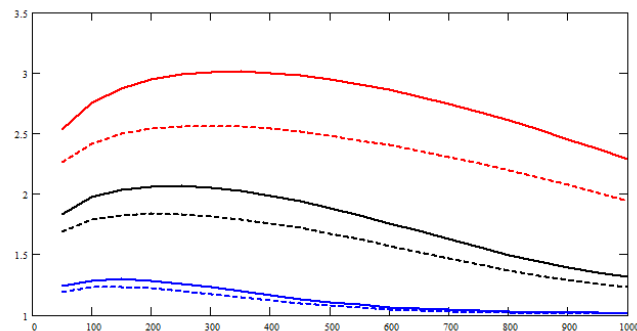
Sistem G.Fast je načrtovan za sočasno delovanje z ostalimi DSL sistemi [8], zato uporablja frekvenčni spekter s prilagodljivo startno frekvenco, ki je na koncu uporabljenega



Slika 2a: Povečanje prenosne kapacitete ob izločitvi FEXT v odvisnosti od razdalje, premer parice =0,8mm.



Slika 2a: Povečanje prenosne kapacitete ob izločitvi FEXT v odvisnosti od razdalje, premer parice =0,6mm.



Slika 2c: Povečanje prenosne kapacitete ob izločitvi FEXT v odvisnosti od razdalje, premer parice =0,4mm.

$N_0 = (-140 \text{ dBm/Hz, sredina } -120 \text{ dBm/Hz, } -100 \text{ dBm/Hz})$

ADSL2 ali VDSL2 pasu: 2.2MHz, 8.5MHz, 17.664MHz ali 30MHz. Dvosmernost povezav poteka s časovno delitvijo, zato bo enostavno uravnavanje razmerja pretokov v odtoku in dotoku od 90/10, 50/50 do 10/90. Širina DMT kanalov bo predvidoma dvanajstkrat večja kot pri VDSL. Na skupaj 2048 kanalov bo tako zagotovljena skupna pasovna širina 104,45MHz. Število bitov po kanalu je omejeno na 12. Ciljne prenosne kapacitete sistema so od 150Mbit/s na razdalji 250 metrov do 500Mbit/s na razdalji 500 metrov.

## ZAKLJUČEK

Potrebe po prenosni kapaciteti zelo strmo naraščajo in ob nespremenjenem trendu bodo za najbolj zahtevne uporabnike v bližnji prihodnosti primerna le v celoti optična dostopna omrežja. Izgradnja takšnih omrežij je še vedno zelo draga in zamudna, zato do leta 2020 verjetno ne moremo pričakovati več kot 50% razpoložljivosti FTTH.

Za doseganje cilja Digitalne Agende do leta 2020 je najbolj realističen pristop uporaba novih DSL tehnologij, predvsem VDSL.vector. Pri tem bo potrebno reševati tudi probleme, ki nastopijo ob uporabi v razvezani zanki v okolju z več operaterji.

Presluch iz tujih paric lahko zelo zmanjša učinek izločanja FEXT, vendar le v primeru, če ni zagotovljeno ustrezno upravljanje spektra. Že s preprostim omejevanjem moči na tujih paricah lahko ponazorimo, da je mogoče ohraniti povečanja prenosnih kapacitet VDSL.vector sistemov. Učinkovito izločanje FEXT je v okolju z več operaterji možno le s sodelovanjem, pri tem pa je posebej pomembna vloga regulatorja.

## LITERATURA

- [1] <http://ec.europa.eu/digital-agenda>
- [2] Broadband coverage in Europe in 2011, Mapping progress towards the coverage objectives of the Digital Agenda, Research report by Point Topic, The publication office of the EU, 2012
- [3] G. Ginis and J. M. Cioffi, Vectored Transmission for Digital Subscriber Line Systems, IEEE JSAC, vol. 20, no.5, June 2002, pp. 1085-1104.
- [4] G.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.
- [5] [http://www.assia-inc.com/DSL-technology/DSL-knowledge-center/white-papers/FASTWEB-ASSIA\ White\ Paper\ on\ Vectoring\ \(April\%202012\).pdf](http://www.assia-inc.com/DSL-technology/DSL-knowledge-center/white-papers/FASTWEB-ASSIA\ White\ Paper\ on\ Vectoring\ (April\%202012).pdf)
- [6] K. Kerpez, J. Cioffi, S. Galli, G. Ginis, M. Goldberg, M. Monseni: Compatibility of Vectored and Non-Vectored VDSL2, IEEE Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, Mar.21-23, 2012,
- [7] T. Starr, M. Sorbara, J. Cioffi, and P. Silverman, DSL Advances. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2003,
- [8] Les Brown: G.fast for FTTdp, ITU presentation september 2012, <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>