

# Savremeni pravci razvoja širokopojasnih optičkih mreža i njihovi potencijalni servisi

Dejan M. Gvozdić

**Apstrakt** — U radu je prikazan i analiziran primer širokopojasnog test-okruženja u kome je sproveden niz aktivnosti u cilju razvoja širokopojasnih optičkih mreža i servisa, koje ove mreže treba da ponude. Reč je o švedskom nacionalnom test-okruženju, gde se kao dominantne aktivnosti izdvajaju proučavanje transmisije optičkih signala pri velikim bitskim protocima (40Gb/s i 100Gb/s) na rastojanjima od nekoliko stotina kilometara i razvoj *triple-play* IP servisa.

**Ključne reči** — širokopojasne optičke mreže, *triple-play*, FTTH, IP-TV

## I. UVOD

DANAŠNJA ekonomija se u velikoj meri oslanja na posedovanje, razmenu i prodaju informacija i znanja. S druge strane, razmena i prenos informacija u savremenim uslovima ima sve više globalni karakter, što podrazumeva transfer velike količine informacija na vrlo velika rastojanja. Zbog toga se intenzivira potreba za novim vidovima prenosa informacija i servisima. U ovom trenutku nešto više od 80% komunikacionog saobraćaja, koji se odnosi na prenos glasa i podataka na velikim rastojanjima, realizuje se putem optičkih vlakana [1].

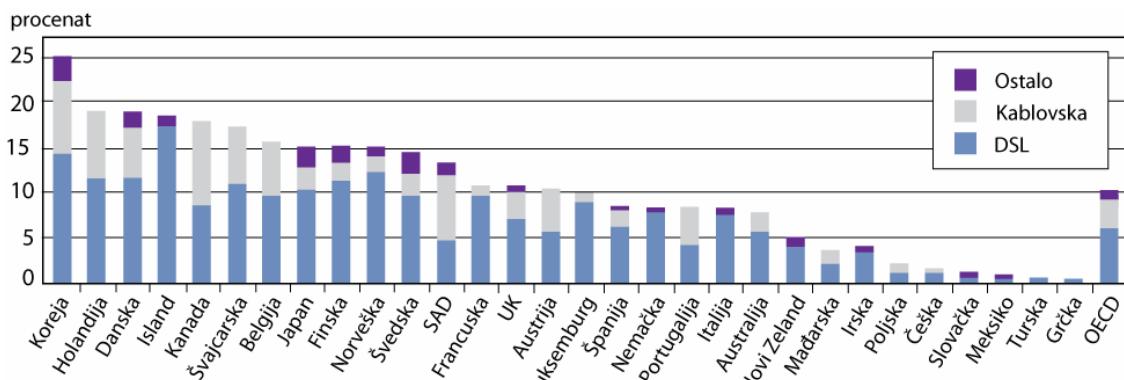
Brzina kojom se danas informacije prenose putem jednog optičkog kanala (tzv. bitski protok) limitirana je brzinom elektronskih komponenti koje se primenjuju u optičkim predajnicima i prijemnicima. Međutim, tehnika multipleksiranja po talasnim dužinama (WDM) omogućuje da se jednim vlaknom prenosi nekoliko kanala, svaki na različitoj talasnoj dužini. Postojeći WDM sistemi već neko duže vreme koriste i do 80 kanala. Poslednjih godina, pojavili su se sistemi koji podržavaju prošireni spektar talasnih dužina koji obuhvata do 192 talasne dužine [2]. Primenom sistema koji obezbeđuju bitske protoke od 10Gb/s po kanalu (talasnoj dužini) omogućena je brzina prenosa signala čiji red veličine dostiže ili prevazilazi 1Tb/s. Pri tome se prenos može ostvariti na rastojanjima koja prevazilaze nekoliko hiljada kilometara, što ukazuje na izuzetno veliki proizvod bitskog protoka (B) i rastojanja (L). Rekordna vrednost ovog proizvoda je  $B \times L = 36 \text{ Pb} \times \text{km/s}$ , [3] što je za nekoliko redova veličine veće od onoga što nudi bilo koja druga tehnologija danas. Poslednjih godina postala su dostupna elektronska kola koja podržavaju rad na 40Gb/s i time podstakla interes za razvojem optičkih sistema koji svoj rad na jednom kanalu baziraju na ovom bitskom protoku.

Dejan M. Gvozdić zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73b, 11120 Beograd Srbija; (e-mail: gvozdic@etf.bg.ac.yu).

Pri ovim brzinama dolazi do pojave niza nelinearnih efekata u vlaknu koji u velikoj meri komplikuju prenos, ali koji se određenim tehnikama mogu kompenzovati. Pojedini operateri kao što su British Telecom i Deutsche Telecom su već započeli instalaciju ovakve opreme u okviru svojih transportnih mreža. Sa stanovišta IP mreža i standarda, mnogo je interesantnija činjenica da se bitski protok po kanalu može podići sa 10Gb/s na 100Gb/s. Naravno, u tom slučaju, svi problemi koji su prisutni na 40Gb/s postaju izraženiji i komplikovaniji za kompenzaciju, ali su eksperimenti pokazali da se protok od 100Gb/s može uspešno ostvariti na rastojanjima od nekoliko stotina kilometara.

Proboj na planu povećanja bitskog protoka po kanalu za red veličine stvorio je jednu novu i na neki način paradoksalnu situaciju, koja otvara pitanje da li je ovaj informacioni kapacitet mreža uopšte potreban i ako jeste, kako ga iskoristiti. Da bi se dao odgovor na ovo pitanje u mnogim tehnološki visokorazvijenim zemljama u svetu formirana su nacionalna širokopojasna optička test-okruženja, takozvani *testbed*-ovi, projekti čiji je cilj da se sa već postojećom infrastrukturom širokopojasne mreže ispita mogućnost primene novih servisa uz povećanje bitskog protoka korišćenjem novih komponenti, novih tehnika modulacije signala i protokola. U pojedinim slučajevima, razlog za ovakav projekat bila je potreba da se sačuva kompetentnost nacionalnih kompanija i istraživačkih centara u oblasti širokopojasnih mreža. Jedan od važnih povoda bila je potreba da se na jednom mestu okupe svi učešnici na tržištu širokopojasnih komunikacionih sistema i komponenti, koji bi kroz *testbed* mogli da demonstriraju, promovišu i provere svoje nove proizvode u okruženju koje odgovara standardnim uslovima. Najčešće ovakvi projekti kao jedan od glavnih problema razmatraju tehnološke aspekte mreža. Pri tome se, pre svega, ima u vidu kvalitet prenosa signala, koji osim bitskog protoka, uzima u obzir njegovu degradaciju i učestanost greške (BER). Osim ovog zadatka, često se u okolnostima koje nudi postojanje *testbed*-a pribegava procesu standardizacije. Takođe se pribegava proceni ukupne vrednosti lanca koji čine svi elementi od tehnologije do mrežnih servisa, čime se ostvaruje identifikacija potreba mrežne implementacije sa stanovišta servisa.

U ovom radu biće prikazani rezultati razvoja savremenih širokopojasnih mreža koji su postignuti u okviru nacionalnog *testbed*-a Švedske, jedne od vodećih zemalja sveta u pogledu primene širokopojasnih mrežnih tehnologija. U prvom delu rada data je definicija širokopojasne mreže, kao i kraći pregled stanja i tržišta



Sl.1. Procenat zastupljenosti širokopojasnih servisa po glavi stanovnika u pojedinim zemljama sveta

širokopojasnih tehnologija u Švedskoj. Drugi deo rada posvećen je tehnološkim aspektima *testbed-a* koji se bave transmisijom optičkih signala na velikim bitskim brzinama (40Gb/s i 100Gb/s). Treći deo rada bavi se novim servisima koje standardna i buduća širokopojasna mreža može da ponudi. Posebna pažnja je posvećena pristupnim mrežama baziranim na tehnologiji optičkih vlakana do kuće-FTTH (*fiber to the home*).

## II. POJAM ŠIROKOPOJASNIH MREŽA I NJIHOV STATUS U ŠVEDSKOJ

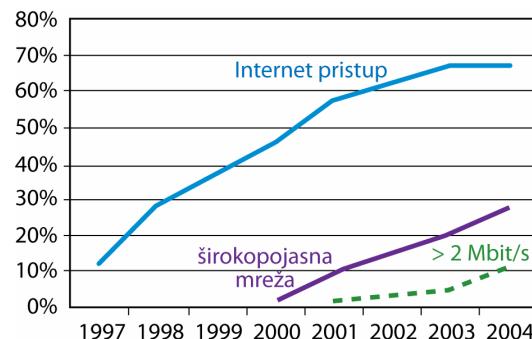
U principu ne postoji opšte prihvaćena definicija širokopojasne mreže, ali postoje pokušaji da se ona definiše. Preporuka I.113 Međunarodne Telekomunikacione Unije, (International Telecommunication Union - ITU) definiše širokopojasnu mrežu kao mrežu u kojoj je transmisioni kapacitet veći od osnovnog nivoa ISDN-a na 1.5-2Mb/s [4]. Prema Organizaciji za ekonomsku saradnju i razvoj (Organization for Economic Co-operation and Development - OECD) širokopojasna mreža se definiše kao tehnologija koja omogućava protok ka korisniku od 256kb/s a od korisnika 128kb/s. S druge strane Atlantika, Savezna Komunikaciona Komisija SAD-a, (US Federal Communications Commission - US FCC) definiše širokopojasnu mrežu kao konekciju od najmanje 200kb/s u jednom pravcu. U slučaju Švedske, širokopojasna mreža se definiše kao servis brze Internet konekcije, koji ima potencijal permanentnog priključenja. U principu, tačna definicija menja se sa vremenom i u velikoj meri zavisi od toga ko postavlja pitanje: IT tehničar, političar, napredni korisnik ili menadžer. Osim toga definicije se mogu razlikovati od zemlje do zemlje.

Švedska je jedna od prvih zemalja koja je prihvatile Internet i razvoj pristupne mreže bazirane na optičkim vlaknima. U pogledu pristupnih mreža koje koriste FTTH, Švedska je prva zemlja u Evropi, gde oko 20% svih širokopojasnih konekcija čini FTTH, što je ujedno najveći procenat u svetu. U pogledu prodora FTTH tehnologije, koji se procenjuje na osnovu procenta populacije koji je koristi, takođe je vodeća u svetu sa 2.5% [4]. Iza nje slede Južna Koreja i Japan sa 2.3% i 2.2%, respektivno [4]. Ipak i pored vrlo velikog prodora FTTH tehnologije, ukupan prodor širokopojasnih mreža dovodi Švedsku na poziciju broj 11, sa 15% preplatnika. Sl.1 prikazuje procentualnu zastupljenost širokopojasnih tehnologija unutar populacije pojedinih zemalja u svetu. Pri tome se zastupljenost deli

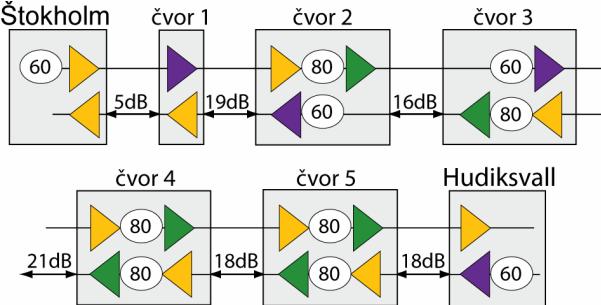
na DSL tehnologiju (koja koristi telefonsku infrastrukturu), kablovsku (koja koristi TV infrastrukturu) i konačno druge tehnologije u koje se ubraruju FTTH, satelitske komunikacije, energetske komunikacije, fiksni bežični pristup. Poslednje analize pokazale su da Švedsku širokopojasnu mrežu u velikoj meri određuje potreba za *triple-play* servisima što podrazumeva prenos podataka, glasa i TV preko Internet protokola (*TV over IP*). Pored toga, Švedska ima najveći procenat konekcija od 2Mb/s i više u Evropi i to sa najnižom cenom. U Švedskoj postoji veliki broj gradskih mreža koje funkcionišu kao takozvane otvorene mreže. Kada su u pitanju FTTH tehnologije, dominantna arhitektura određena je *point to point* (P2P) Ethernet-om i kao takva dominira nad pasivnim optičkim mrežama, PON (*Passive Optical Networks*).

Skoro 70% domaćinstava u Švedskoj ima Internet konekciju [4]. Od onih koji imaju Internet konekciju 28% ima širokopojasni pristup. Na Sl.2 može se videti kako se iz godine u godinu menja procenat domaćinstava u Švedskoj koji imaju Internet konekciju, širokopojasni pristup i pristup koji prevaziđa 2Mb/s.

Švedska je do kraja 2004. imala 150 Internet servis provajdera (ISP) [4] od kojih je većina nudila širokopojasnu konekciju. Uglavnom su to bili lokalni ili regionalni provajderi, ali je u principu bilo oko 20 nacionalnih provajdera. Najveći provajder je TeliaSonera sa 39% učešća u tržištu [4]. Oni dominantno nude DSL (uglavnom ADSL). Iako drže najveći deo bakarne pristupne mreže, zakonom su obavezni da jedan njen deo ponude konkurenčiju. Sledeći veliki provajder je B2 sa 23% učešća u tržištu. Ovaj provajder poseduje najveću FTTH mrežu u Švedskoj ali takođe nudi i DSL. Treći po redu je kablovski operater, ComHem koji drži oko 10% tržišta [4].



Sl.2. Procenat švedskih domaćinstava sa Internet konekcijom, decembar 2004.



Sl.3. Transmisioni link između Štokholma i Hudiksvalla. Krugovima su predstavljeni DCF moduli koji vrše kompenzaciju na 60 i 80 km standardnog monomodnog vlakna. Link je dizajniran za 10Gbit/s i disperzionalno je podkompenzovan. U Hudiksvallu signal se vraća ka Štokholmu i ukupna dužina transmisije iznosi 820km.

### III. OPTIČKA TRANSMISIJA PRI VELIKIM BITSKIM PROTOCIMA

U okviru švedskog nacionalnog širokopojasnog *testbed*a posebna pažnja posvećena je istraživanju transmisije na velikim bitskim protocima, na 40Gb/s i na 100Gb/s [5]. Nositelj ovog dela projekta bio je istraživački institut ACREO. Projekat se realizovao u nekoliko faza od kojih je prva bila dizajniranje i upostavljanje WDM linka između Štokholma i Hudiksvalla na rastojanju od 410km. U drugoj fazi izведен je veći broj eksperimenta sa ciljem ispitivanja optičke transmisije pri velikim bitskim protocima. U trećoj fazi link je služio kao *testbed* korisnicima u Hudiksvallu. Poslednja faza projekta odnosila se na eksploataciju rezultata i infrastrukture u bliskoj saradnji sa Švedskom industrijom koja je omogućila komercijalizaciju istraživačkih rezultata.

#### A. Upostavljanje ERON-DWDM između Štokholma i Hudiksvalla

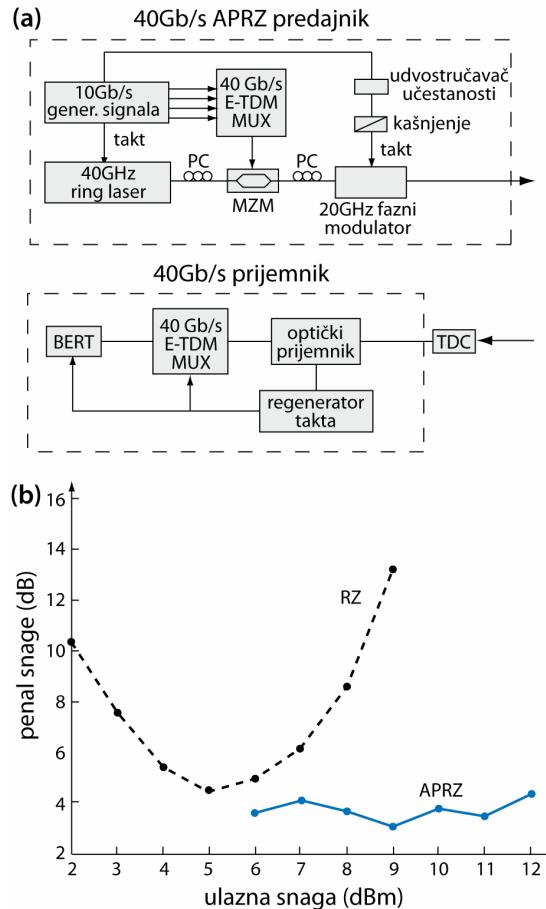
Kao polazna faza u *testbed* projektu bio je DWDM sistem instaliran između Štokholma i Hudiksvalla [3], [5]. Podaci o osnovnom linku zajedno sa konfiguracijom DWDM sistema prikazani su na Sl.3. DWDM sistem obezbeđen je od Ericssona i konfiguracija je bazirana na standardnom komercijalnom dizajnu za sisteme koji rade na 10Gb/s. To uključuje erbijumski dopirane optičke pojačavače (EDFA) u cilju kompenzacije gubitaka u vlaknu i disperzionalno-kompenzaciona-vlakna (DCF) u cilju kompenzacije hromatske disperzije. Ukupna disperzija sistema je pod-kompenzovana sa približno 1550ps/nm (što je ekvivalentno dužini od 95km standardnog monomodnog vlakna (SSMF)) u oba pravca. Da bi sistem radio na 40Gb/s potrebna je potpuna kompenzacija disperzije. Na predajniku je postavljen jedan 80 kilometarski DFC modul, obzirom da je numerička simulacija pokazala da je to optimalna prekompenzacija, kojom se postiže potiskivanje unutar-kanalne unakrsno-fazne modulacije (IXPM). Na prijemniku, ukupna disperzija je dovedena na nulu uz pomoć 90-kilometarskog DCF modula i naprave za podešavajuću disperzionu kompenzaciju (TDC), bazirane na Bragovoj rešetki na optičkom vlaknu. Pojačavač u prvom čvoru nije deo originalnog 10Gb/s –dizajna i dodat je ekskluzivno za podršku transmisije na 40Gb/s. Međukanalno rastojanje je

100GHz i pojačavač podržava 16 kanala od 1547nm do 1559nm.

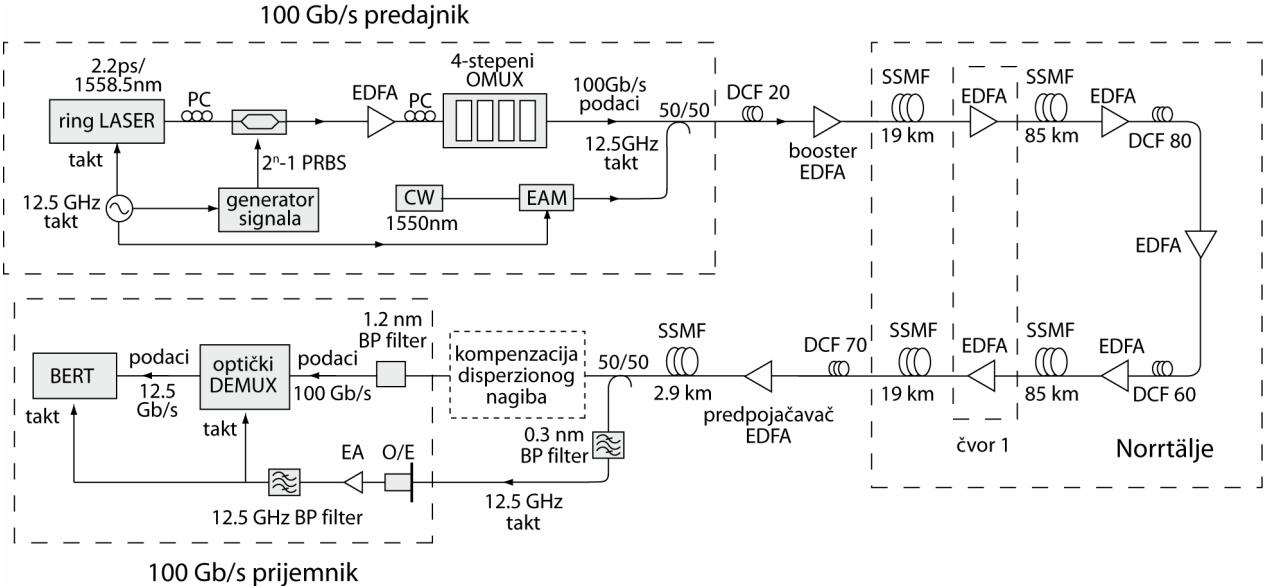
#### B. Transmisijska linija na 40Gb/s na rastojanjima od 520km i 820km

Prvi eksperiment koji je obavljen na 40Gb/s na rastojanju od 520km imao je za cilj prvu verifikaciju nelinearne tolerancije modulacionog formata APRZ (*alternate phase return to zero*). U tu svrhu korišćen je elektroabsorpcioni modulator koji je modulisan sinusoidalnim signalom na 40GHz dajući impulse dužine od 7ps. APRZ format pokazao je povećanu nelinearnu toleranciju što se moglo dobiti optimizacijom prekompenzacije. Pokazalo se da je optimalni fazni pomeraj između susednih bitova  $\pi/2$  (Sl.4).

Drugi eksperiment na 820km imao je za cilj da pokaže mogućnost uspešne transmisije signala na 40Gb/s na sistemu koji je dizajniran za 10Gb/s, kao i da dokaže povećanu nelinearnu toleranciju APRZ formata u instaliranom sistemu. APRZ transmiter je implementiran kao RZ transmiter (laser koji generiše impulse od 2.7ps u kombinaciji sa Mach-Zehnder-ovim modulatorom (MZM)) na koji se kaskadno nadovezuje fazni modulator kontrolisan sa napajanjem  $V_{\pi/2}$  i učestanostu takta 20GHz za generaciju APRZ signala, sa varijacijom faze od  $\pi/2$ . Signal podataka od 40Gb/s bio je dat u formi pseudoslučajne sekvenca bitova (PRBS) dužine  $2^{31}-1$ . Osetljivost



Sl.4. (a) Šematski prikaz 40Gb/s-predajnika i prijemnika koji su korišćeni u eksperimentu. b) Penal snage u funkciji ulazne snage u standardno monomodno vlakno za RZ format (isprekidana linija) i  $\pi/2$ -sinusni-APRZ format (puna linija).



Sl.5. Eksperimentalni setup za transmisiju signala na 100 Gb/s.

prijemnika pri BER=10<sup>-5</sup> iznosi -32.2dBm.

Uticaj nelinearnih efekata je ispitana postepenim povećavanjem ulazne snage transmitera od 2dBm do 12dBm. Performanse su procenjene preko penala snage. Pri snagama manjim od 6dBm nema značajnije promene u osjetljivosti kada se primjenjuje fazna modulacija zbog čega je prikazan samo RZ penal snage. Kako šum spontane emisija pojačavača (ASE) limitira rad sistema, njegove performanse postaju bolje sa porastom ulazne snage. Za veće ulazne snage nelinearni efekti počinju da postaju izraženiji pa poboljšanje performansi koje pruža APRZ u poređenju sa RZ postaje vidljivo. To sugerire da ASE šum iz pojačavača i nelinearni efekti nisu limitirajući faktor za APRZ format signala.

Treći eksperiment koji je obavljen na 40Gb/s realizovan je komercijalnim transmisionim sistemom kompanije Mintera Corp. (US) na jednoj talasnoj dužini preko ERION sistema. ERION sistem je simultano prenosio 8 talasnih dužina na 2.5Gb/s. Minterini transponderi koriste CSRZ format (*carrier-suppressed return to zero*) i podešavajuću kompenzaciju disperzije na kraju prijemnika. Korišćenjem EFEC (*enhanced forward error correction*) sistema korekcije, postignuta je uspešna transmisija signala na 820km.

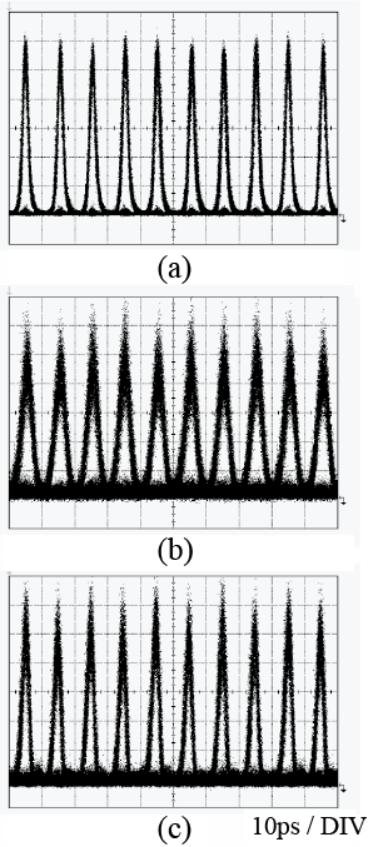
### C. Transmisija na 100Gb/s na rastojanju od 208km

U toku 2005. godine Acro je zajedno sa TeliaSonerom sproveo eksperiment transmisije signala na 100Gb/s na rastojanju od 208km preko standardnog monomodnog vlakna [3], [5]. Razlog za ovakav jedan eksperiment leži u velikom interesu za Ethernet servise i Ethernet-u kao tehnologiji prenosa. Ovaj interes je pokrenut potencijalnim prednostima u ceni koju Ethernet tehnologija može da pruži. Tradicionalno, bitski protok svake Ethernet generacije rastao je sa faktorom 10: 10Mb/s, 100Mb/s (*Fast Ethernet*), 1Gb/s (*Gigabit Ethernet*) i od skora 10Gb/s. Zbog toga će sledeća generacija Ethernet transmisione tehnologije raditi na 100Gb/s. Ethernet je standardizovan od strane IEEE i prvi standard za 10Gb/s

Ethernet donesen je 2002. godine. Proces standardizacije za 100Gb/s Ethernet je započeo prošle godine (2006).

Signal koji je transmitovan kroz vlakno na 100Gb/s, podleže istim onim procesima degradacije kao i signal koji je transmitovan na manjim brzinama (pojačavački šum, hromatska disperzija, polaraciona modna disperzija i nelinearnosti). Naravno, uticaj ovih destruktivnih efekata postaje izraženiji sa porastom bitskog protoka. Prenos signala na 100Gb/s zahteva u većem broju slučajeva nova unapredena rešenja i dizajn u poređenju sa sistemima koji rade na 10Gb/s.

Postavka ovog eksperimenta prikazana je na Sl.5 [3], [5]. Na strani predajnika koristi se aktivni erbijumski mode-locked dopirani ring laser (ML-FRL) koji generiše impulse na 12.5GHz. Talasna dužina i širina impulsa generisanog signala je 1558.5nm i 2.2ps, respektivno. Pseudo-slučajna sekvenca bitova -PRBS (2<sup>31</sup>-1) se generiše pomoću LiNbO<sub>3</sub> MZM-a. Dobijeni osnovni bitski protok od 12.5Gb/s se multipleksira do 100Gb/s, sa svim kanalima koji imaju istu polarizaciju. Ipak PRBS se ne može garantovati na 100Gb/s zbog prirode optičkog multipleksera. U eksperimentu se signal takta generiše pomoću CW lasera na 1550nm, na koji se kaskadno povezuje elektroabsorpcioni modulator, koji se moduliše na 12.5GHz. Pomoću 3-dB sprežnjaka kombinuje se korisni i takt signal, koji se zatim šalje u 208km dug optički link na relaciji Štokholm-Norrtalje. Pre- i post-kompenzacija ukupne disperzije je realizovana kao što je prikazano na Sl.5. Na strani gde je prijemnik, nakon dela kojim se kompenzuje disperzija, primenjuje se 3-dB sprežnjak u cilju razdvajanja takta od korisnog signala. Nakon sprežnjaka primenjuje se filter propusnik opsegom širine 0.3nm i 1.2nm u cilju filtriranja takta i signala podataka. Preneseni takt signal se regeneriše i konvertuje u električni domen korišćenjem fotodetektora, koji se kaskadno povezuje sa električnim pojačavačem, a dobijeni signal na 12.5GHz se korisiti za kontrolu optičkog multipleksera i trigerovanje BER-analizatora. Preneseni signal na 100Gb/s konvertuje se na osnovni bitski protok



Sl.6. (a) Dijagram oka na 100Gb/s (a) pre transmisije, (b) nakon transmisije bez kompenzacije disperzionog nagiba (izmereno nakon 1.2nm-filtra propusnika opsega), (c) nakon transmisije sa kompenzacije disperzionog nagiba (izmereno pre 1.2nm-filtra propusnika opsega).

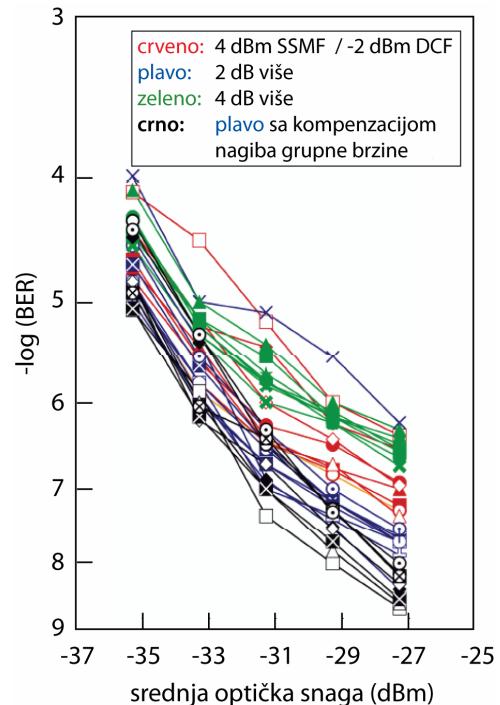
od 12.5GHz korišćenjem optičkog multipleksera, koji svoj rad bazira na unakrsno-faznoj modulaciji u 100m dugom visoko-nelinearnom vlaknu. Demultiplexirani kanali na osnovnom bitskom protoku sa šalju na BER-analizator radi BER merenja.

Na Sl.6 prikazan je “dijagram oka“ za RZ signal od 100Gb/s pre i posle transmisije, bez i sa kompenzacijom disperzionog nagiba [3], [5]. Dijagram je izmeren primenom optičkog sampling osciloskopa (Agilent Terascope) sa vremenskom rezolucijom od 1.1ps. Očigledno je da je nakon prenosa SNR značajno degradiran. Na Sl.6(c). može se videti da nema širenja signala nakon kompenzacije disperzionog nagiba, koja istovremeno deluje kao širokopojasni filter propusnik opsega, što demonstrira skoro perfektnu disperziju kompenzaciju. Treba naglasiti da zbog polarizacione osetljivosti Terascopa, izmereni dijagram oka ne registruje širenje signala usled polarizacione disperzije. Na Sl.7 prikazana su sva BER merenja za različite nivoje ulazne snage sa i bez kompenzacije disperzionog nagiba. U svim slučajevima je moguće postići transmisiju sa  $\text{BER} < 10^{-5}$ , koja dozvoljava regeneraciju signala primenom standardne Reed-Solomon-ove tehnike korekcije greške. Ovakav BER se može postići pri snagama koje na demultiplexiranom signalu idu ispod -30dBm. Optimalni nivo snage za standardno monomodno vlakno iznosi 6dBm, dok za slučaj vlakna sa kompenzovanom disperzijom, ta snaga iznosi 0 dBm. Pri ovim snagama

BER se približava vrednosti  $10^{-8}$  bez kompenzacije disperzionog nagiba, dok sa kompenzacijom dostiže  $10^{-9}$ . Interesantno je da se uklanjanjem filtera pre optičkog demultiplexera signal značajno degradira zbog polarizacione disperzije.

#### IV. NOVI SERVISI U ŠIROKOPOJASnim MREŽAMA

Buduće i deo savremenih širokopojasnih mreža baziraće se na *triple-play* pristupu koji podrazumeva: prenos glasa preko internet protokola (VoIP), prenos podataka preko IP-a (Internet konekcija) i prenosu TV i video signala preko IP-a (IP-TV) [5]. Od pomenutih servisa najizazovniji sa tehničkog i ekonomskog aspekta je set servisa koji se odnosi na prenos TV i video signala. U tom smislu, ovaj servis mora biti ekonomičan, što podrazumeva interes korisnika i njihovu spremnost da plate za razne vidove ovog servisa kao što su: Internet protokol TV (IP-TV), *Video-on-demand* (VoD) i interaktivni TV. Tehnički aspekt podrazumeva probleme obezbeđivanja ovog servisa sa prihvatljivim kvalitetom. Razlog tome je činjenica da je distribucija video signala preko digitalne mreže veoma zahtevna po pitanju širine propusnog opsega, posebno u slučaju implementacije TV servisa visoke rezolucije (HD-TV). Postojanje tehnika za kompresiju signala čini ovaj zahtev nešto blažim. Ipak, prevelika kompresija može dovesti do distorzije slike i samim tim, do njenog nižeg kvaliteta. U ekonomskom pogledu, poželjno je da se raspoloživ propusni opseg mreže najefikasnije iskoristi. Zbog toga je važno distribuirati sliku koja je u najvećoj mogućoj meri komprimovana uz zadovoljavajući kvalitet. Jedna strana problema je kontrola kvaliteta slike kada je primenjen određen stepen kompresije. Ovo je izuzetno predviđljiva stvar, te je relativno lako imati kontrolu nad ovim



Sl.7. Merenja BERa demultiplexiranog kanala bez kompenzacije disperzionog nagiba pri različitim ulaznim snagama (crveno, plavo i zeleno) i sa kompenzacijom disperzionog nagiba pri optimalnoj snazi ulaznog signala (crno).

problemom. Drugi problem leži u samoj video distribuciji do krajnjeg korisnika. Nažalost, kvalitet distribucije nije moguće predvideti. U zavisnosti od opterećenja mreže, greške usled transmisije mogu biti različite. Na primer, IP-paketi se mogu izgubiti usput. Uticaj izgubljenog paketa na kvalitet slike na ekranu će zavisiti od toga, koji deo podatka se izgubio u kombinaciji sa tekućom šemom kodiranja i od mogućnosti sakrivanja greške. Nekada će to uticati na kvalitet veoma malo, dok će u drugim situacijama uzrokovati ozbiljne posledice.

Vodeća kompanija u oblasti IP-TV je "PCCW/Now TV" iz Hong Konga, koja je u decembru 2005 imala oko 550 000 preplatnika [6]. U unutrašnjosti Kine se u 6-8 različitih gradova sa nekoliko stotina hiljada preplatnika sprovode testiranja IP-TVa. Kompanija "Fastweb" u Italiji je bila začetnik IP-TV u Italiji i prema poslednje dostupnim podacima imaju više od 150 000 IP-TV preplatnika [7] u infrastrukturi koja se sastoji od 80% DSL i 20% FTTH preplatnika. U Francuskoj operator "Free" ima 200 000 preplatnika preko xDSL infrastrukture [7].

IP-TV se brzo širi svetom, ali počinje od malog broja preplatnika. Postoje mnoge prognoze o razvoju IP-TVa koje se međusobno dosta razlikuju, ali sve one predviđaju eksponencijalan rast broja preplatnika. Statistika iz Bussines Week-a [8] prikazuje 1.6 miliona preplatnika širom sveta u 2005., zatim 4.5 miliona preplatnika za 2006., a zatim predviđa 37.8 miliona preplatnika za 2010. godinu.

Švedska spada u vodeće zemlje sveta u pogledu prodora IPTVa, ali je ovo tržište i dalje nerazvijeno. Samo 2% stanovišta gleda TV preko širokopojasne konekcije, a većina od tih 2% gledaju IPTV preko FTTH sistema [5]. U okviru švedskog nacionalnog testbeda u pogledu IPTV, ACREO je imao ulogu integratora, mrežnog operadora, servisnog provajdera i pored svega toga predstavlja je prvi i drugi red podrške, sve to u isto vreme. Aktivnosti ACREOA povezane sa IPTV su u početku bile fokusirane na dizajniranje i izgradnju pristupnih širokopojasnih mreža sa skupom različitih tehnologija koje treba da omoguće IPTV prenos do velikog broja korisnika, učesnika pilot projekta. U sledećoj fazi akcenat je bio na proceni kvaliteta TV prenosa i to sa dva stanovišta: sa stanovišta tehnologije (kvaliteta usluge), i sa stanovišta korisnika (doživljaj kvaliteta). Deo ove faze je i održavanje i administracija mreže kao i podrška krajnjim korisnicima.

IPTV u *testbed*-u zasnovan je na metro infrastrukturi optičkih vlakana u Hudiskvallu. Komercijalna i skoro komercijalna transmisiona oprema različitih proizvođača korišćena je za povezivanje udaljenih delova mreže ili delova sa zahtevima za velikim kapacitetom. Same širokopojasne pristupne mreže dizajnirane su na bazi komercijalne opreme IP slojeva 2 i 3 (Ethernet komutatori i Internet ruteri), i takođe potiču od različitih proizvođača. Korisnicima u projektu bio je obezbeđen *triple-play* paket: telefonija (VoIP), Internet pristup i IP-TV. Usluga koja je do sad imala najviše zahteve u širokopojasnim pristupnim mrežama je IP-TV, s obzirom na kombinaciju potrebnog velikog propusnog opsega, *real-time* zahteva i zahteva za visokim vizuelnim kvalitetom. Skoro je primećeno da ljudi mogu da žive bez VoIP ili Interneta nekoliko sati ili čak

dana, dok nedostatak TV brzo dovodi do neprilika i velikog pritiska na servisere TV-distributera. IP-TV je testiran na raznim pristupnim tehnologijama:

- Na IP sloju 2 - aktivna optička mreža sa FTTH rešenjem (AON, *point-to-point* Ethernet ili aktivni Ethernet).
- Na IP sloju 3 - aktivna optička mreža sa FTTH rešenjem.
- Ethernet - pasivna optička mreža (EPON), sa FTTH rešenjem.
- ADSL2+ sa DSL rešenjem.

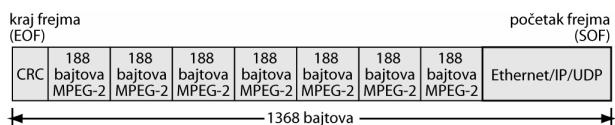
Ukupno 100 test korisnika je bilo priključeno na IP-TV u periodu ispitivanja. Korišćene su različite pristupne tehnologije (prvenstveno dva različita AON, ali i ADSL2+), a IP-TV je nabavljan od dva različita TV-proizvođača (po jednom korisniku primenjivan jedan tip IP-TVa). Svim korisnicima nuđen je sveobuhvatan paket od 40-50 kanala uključujući i nekoliko filmskih kanala. TV-paketi su identični onima koje TV-distributeri komercijalno nude, ali su korisnici imali besplatan IP-TV u dužem periodu trajanja projekta.

#### A. Kvalitet IP-TV

Kvalitet slike na IP-TV nije samo funkcija mrežnog protoka (xDSL ili FTTH) ili prenesenih podataka, već većeg broja parametara koji doprinose opštem utisku korisnikove percepcije da li je slika dobra ili loša. Kada video signal dode do procesora, koji obezbeđuje dvosmernu komunikaciju mreže i IP-TVa, tzv. *set-top-box*-a (STBa), a zatim i do IP-TVa, on prolazi kroz različite slojeve protokola (fizički sloj, ATM, IP, transportni sloj itd.). Interakcija između ovih slojeva i spoljašnjih efekata utiče na kvalitet percepcije korisnika, što se definiše kao *quality of experience* (QoE). Drugi set parametara koji utiče na QoE podrazumeva pikselizaciju slike, ivičnu distorziju, zamućenje slike, vreme promene kanala (*zap-vreme*) itd.

Kao što je već pomenuto, kvalitet signala koji je distribuiran preko mreže može biti narušen na samom izvoru. Procesi kodiranja i kompresije obično zahtevaju kompromis između kvaliteta video signala i nivoa kompresije. U zavisnosti od tehnika koje su korišćene za kodiranje i kompresiju, varira količina informacija po IP paketu. Zbog toga gubitak IP paketa može da predstavlja dugačak period u degradaciji i pikselizaciji slike. Prema tome, gubitak IP paketa predstavlja dodatni faktor kvaliteta slike.

Tipičan IP paket koji nosi MPEG-2 sastoji se od 7 MPEG transportnih paketa, od kojih svaki sadrži 184 bajtova korisnog sadržaja i 4 bajta zaglavљa (Sl. 8). To daje 1316 bajtova, uz koji dolaze paketski *overhead* od 8 bajtova za UDP zaglavљe, 20 bajtova IP zaglavљa, 14 bajtova za Ethernet zaglavљe i 10 bajtova ATM zaglavљa, što konačno daje 1368 bajtova. Kratke varijacije u dolasku paketa usled zagušenja mreže ili servera, koje se nazivaju



Sl.8. Frame MPEG-2 formata.

*jitter*, takođe utiču na kvalitet slike. Ako Ethernet okviri pristižu na STB brzinom koja je veća ili manja, što je određeno stanjem u mreži, potrebno je vršiti baferisanje signala da bi se postigao uravnotežen prijem. U zavisnosti od veličine bafera postoje uslovi koji dovode do prekoračenja veličine bafera, što dovodi do degradacije signala i primljene slike.

Važan faktor kvaliteta slike je propusni opseg servisa, jer određuje količinu podataka koja može biti uspešno prosleđena korisniku. Propusni opseg IP-TV kanala u Švedskoj diktiraju vlasnici kanala, pa je propusni opseg određen kroz kompromis sa doživljajem kvaliteta slike. Švedska državna televizija, SVT, zahteva od TV distributera da za programe SVT-a koriste propusni opseg od 10 Mbit/s (za MPEG2) [5], dok su dečiji kanali uglavnom kodirani na duplo manjem propusnom opsegu – samim tim su znatno slabijeg kvaliteta. Televizija visoke rezolucije HDTV zahteva oko 20Mbit/s za MPEG2 i možda 15Mbit/s za MPEG4 [5]. Ove vrednosti su procenjene za HD-IPTV koji još nije razvijen u Švedskoj. U drugim zemljama propusni opseg može biti manji, što dovodi i do lošijeg kvaliteta (U SAD takođe postoje ponude za komercijalnu HD-IPTV). Video kompresija je aktuelna tema širom sveta i u budućnosti se može očekivati efikasnija kompresija sa očuvanim doživljajem kvaliteta.

Parametar koji u velikoj meri utiče na kvalitet IP-TV-a odnosi se na *zap-vreme* potrebno za promenu kanala na IP-TV. Za IP-TV postoje tri važna faktora koja određuju *zap-vreme*:

- Vreme povezivanja - Vreme potrebno da STB ostvari povezivanje ili pronalaženje određenog kanala u pristupnoj mreži, naziva se vreme povezivanja (*join time*). Vreme povezivanja najviše zavisi od dizajna mreže – koliko raspoloživih kanala ima u blizini korisnika. Grubo rečeno, STB će pretražiti rutere po hijerarhiji da bi pronašao željeni kanal. Popularni kanal će biti pristupačan blizu korisnika, dok će kanali koji se redje gledaju biti pristupačni tek dublje u mreži. Što je kanal hijerarhijski bliži, to je vreme potrebno za povezivanje manje.
- Obnavljanje kanala i otvaranje. Vreme potrebno da bi se potvrdilo da korisnik ima pristup određenom kanalu kao i vreme potrebno za uvođenje opisa. Ovo vreme veoma puno zavisi od snage procesora u STBu i od verzije softvera.
- Sinhronizacija dekodera sa TV prenosom. Sinhronizacija zavisi od toga kako je tok video prenosa komponovan u celinu i na kom delu tog toka se posmatrač uključuje. Za standardni skandinavski TV-prenos vreme sinhronizacije danas varira između 0.1 i 0.6 sekundi. Ako bi se redukovalo maksimalno vreme sinhronizacije, bio bi potreban veći propusni opseg da bi se transmitovao isti video protok. Za MPEG-4 vreme sinhronizacije je obično duže od vremena sinhronizacije za MPEG-2.

Ograničavajući faktor za IP-TV *zap-vreme* je vreme sinhronizacije koje zavisi od toga kako su TV-proizvođači dizajnirali video protok. Za HD-IPTV i MPEG-4 ovo

postaje još izraženije i zapravo MPEG-4 više odgovara za VoD koji nije toliko ograničen vremenom kao TV. Pošto je neprihvatljivo da vreme čekanja pri promeni kanala bude nekoliko sekundi, vrlo je verovatno da će proizvođači IP-TV-a i/ili STB-a razviti alternativna rešenja koja unapređuju proces promene kanala. Studije su pokazale da ukoliko je za promenu kanala potrebno više od 0.5 sekundi, da to izaziva nezadovoljstvo kod korisnika.

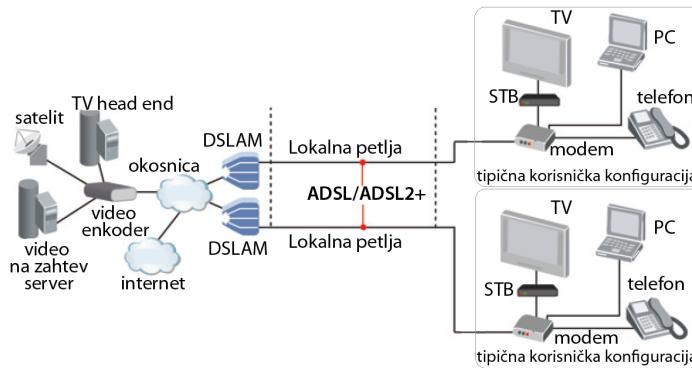
Tehnička iskustva koja su stečena u okviru švedskog nacionalnog testbeda sa IP-TV u osnovi se mogu podeliti na iskustva stečena u pristupnim mrežama baziranim na unapređenoj asinhronoj digitalnoj pretplatničkoj liniji, ADSL2+ i na FTTH. Takođe je ispitivan i HD-IPTV u ADSL2+ mrežama. Pretplatnici su u svakom trenutku imali samo jedan TV-kanal. Promenom kanala na STBu, tekući kanal se oslobađa, a od najbližeg rutera u pristupnoj mreži zahteva se novi kanal. Proses promene kanala povećava *zap-vreme*. Pri tome su parametri koji utiču na ovo vreme jednaki kod mreža baziranih na FTTH i xDSL (opšti DSL kome pripadaju ADSL i ADSL2+). Moguće je primati višestruke TV-kanale, ali to zahteva višestruki STB koji nije detaljnije ispitivan u *testbed-u*.

Kao što je već pomenuto, prvobitni cilj *testbed-a* bio je da se napravi mreža koja bi mogla da nosi *triple-play* uslugu i posebno IP-TV. Mnogi instrumenti za testiranje su primenjivani u toku faze konstrukcije kako bi se pronašle greške i kako bi se napravila funkcionalna mreža. Za TV testiranje najviše je korišćen *Agma* instrument koji upoređuje TV kvalitet u mreži sa referentnim signalom, koji je obično izlazni signal iz TV-a. Instrument prikazuje različite nivoje izobličenja signala koji su se pojavili u tački između merene vrednosti i referentne vrednosti. Protok saobraćaja, Ethernet i IP gubitak paketa meren je drugim instrumentima. Još jedna poznata i zapravo poslednja metoda testiranja je fizičko ispitivanje vizuelnog kvaliteta TV signala kod korisnika. Grubo rečeno, kada TV signal izgleda besprekorno, mreža je dovoljno dobra.

#### B. IP-TV preko ADSL

Na Sl.9 je prikazna tipična IPTV konfiguracija koja se ostvaruje preko pristupnog multipleksera digitalne pretplatničke linije DSLAM (*digital subscriber line access multiplexer*), [9]. Video signal se isporučuje preko ADSL2+ od IP baziranog DSLAMA ka korisničkom ADSL2+ ruteru. Ruter istovremeno sa video signalom koji prosleđuje STB-u radi dekodovanja, obezbeđuje telefonsku i internet konekciju. Dekodovani signal od STB ide ka korisničkom IP-TV-u.

Maksimalna širina opsega xDSL veze određena je brojnim parametrima. Najvažniji parametar predstavlja udaljenost od xDSL-modema u kući do mesta razmene. Drugi parametri su kvalitet bakarne infrastrukture, kodiranje xDSL signala, prisustvo druge xDSL konekcije, saobraćaj na vezi itd. Za realno uvođenje do domaćinstva teško je teoretski predvideti koliki je informacioni kapacitet potreban. Zbog toga se on mora izmeriti, pri čemu se performanse mogu čak i pogoršati u odnosu na predviđene npr. sa povećanjem broja korisnika koji dele liniju (ista DSLAM konekcija).



Sl.9. Tipična mreža IPTVa preko DSLa.

### C. IP-TV preko FTTH

Dok je xDSL ograničen specifičnom tehnologijom i kvalitetom bakarne infrastrukture, FTTH je ograničen interfejsom postojeće opreme. Propusni opseg u slučaju optičkog vlastina je mnogo veći nego u slučaju parica, a trenutno eksperimentalno ograničenje za proizvod propusnog opsega i rastojanja je  $36\text{Pb} \times \text{km/s}$ . Ovi rezultati su još uvek daleko od komercijalnih, ali bi ih ipak trebalo uporediti sa proizvodom propusnog opsega i rastojanja za xDSL koje se kreće oko  $20\text{-}30\text{Mb} \times \text{km/s}$ . Rezultati su milijardu puta slabiji nego u slučaju FTTH. Ovo se ne može direktno primeniti na upoređivanje FTTH i xDSL sistema, ali pokazuje da je potencijalni kapacitet FTTH sistema mnogo veći od kapaciteta xDSL. Sl.10 daje poređenje različitih transmisionih tehnologija [10]. xDSL je niži i unutrašnji deo „upredenih parica“ na Sl.10. I pored toga, komercijalna upotreba FTTH danas pokriva samo daleki levi deo optičkog komunikacionog prozora na grafiku. Ključna stvar koja se može uvideti sa ovog grafika je da ograničenja postoje u slučaju xDSL, a vezana su sa rastojanjem, širinom opsega, šumom, preslušavanjem itd., što u principu ne postoji za FTTH u sličnim primenama.

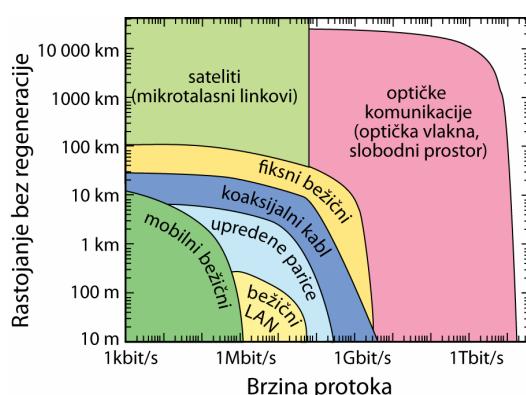
Pored istraživanja tehnoloških aspekata vezanih za veliki bitski protokol i *triple-play* servise, posebno IP-TV, švedski nacionalni *testbed* obuhvatio je daleko širi aspekt problema vezanih za širokopojasne mreže. Između ostalog, posebno je razmatran problem gradskih mreža sa *otvorenim pristupom* (tzv. *operator neutral*, ili *multi operator network*), kod kojih je uloga mrežnog operatera

odvojena od servis provajdera, pri čemu mrežni operater dozvoljava pristup mreži bez ikakve diskriminacije. Takode je razmatran problem dizajniranja kućne mreže. Značajan deo istraživanja posvećen je uspešnoj dinamičkoj kontroli mreža koja se pre svega odnosi na GMPLS (*Generalised Multi Protocol Label Switching*) tehniku. U okviru *testbed-a* realizuje se projekat karakterizacije širokopojasnih IP mreža putem merenja saobraćaja unutar mreže i vrši se akvizicija podataka o koršćenim IP aplikacijama, čime je moguće predvideti dinamičko ponašanje mreže i prepoznati buduće potrebe korisnika.

### V. ZAKLJUČAK

Analiza aktivnosti sprovedenih u okviru švedskog širokopojasnog *testbed-a* nedvosmisleno ukazuje na dalju potrebu razvoja širokopojasnih optičkih mreža, bez kojih će budući *triple-play* servisi, a pre svega IP-TV, biti teško ostvarljivi. Jedan od važnih elemenata ovog razvoja je povećanje bitskog protoka po talasnoj dužini, koji prema prikazanim rezultatima, može postići brzinu prenosa od  $40\text{Gb/s}$ , pa i  $100\text{Gb/s}$  na rastojanjima od nekoliko stotina kilometara. Iskustvo ovog test-okruženja pokazuje da se uporedno sa tehničkim pitanjima prenosa, moraju razmotriti i pitanja vezana za razvoj pristupnih mreža baziranih na FTTH infrastrukturi, čime bi se u velikoj meri mogli razrešiti problemi nagomilani primenom xDSL-a.

### LITERATURA



Sl.10. Rastojanje transmisije kao funkcija brzine protoka za različite transmisione tehnologije. Trenutno je proizvod širine opsega i rastojanja za optičke komunikacije čak bilion puta veći od istog proizvoda za DSL tehnologiju.

- [1] V. Alwayn, *Optical Network Design and Implementation*, Networking Technology, Cisco Press, 2004.
- [2] Huawei, *DWDM backbone solution, product overview*, 2007. Available at <http://www.huawei.com>
- [3] Marco Forzati, “Phase Modulation Techniques for On-Off Keying in Optical Fibre Transmission”, doktorska teza, Chalmers University of Technology, 2007.
- [4] C. P. Larsen, Ö. Mattsson, G. Jacobsen, “FTTH – the Swedish Perspective” in *Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: Systems Technologies and Deployment Strategies*, Chinlon Lin (editor) Wiley (2006), pp. 43-67.
- [5] L. Andersson et. al., “Acreo Broadband Communication Project report Y2002-Y2006: Dec. letter 2004-01780,” Acreo AB, 2007.
- [6] [www.pccw.com/eng/](http://www.pccw.com/eng/)
- [7] Kozamernik and Vermaele, “Will Broadband TV shape the Future of Broadcasting?” Available at: [http://www.w.ebu.ch/en/technical/trev/trev\\_302-kozamernik.pdf](http://www.w.ebu.ch/en/technical/trev/trev_302-kozamernik.pdf)
- [8] [www.businessweek.com/technology/tech\\_stats/IPTV050129.htm](http://www.businessweek.com/technology/tech_stats/IPTV050129.htm)
- [9] Francisco Palacios, “IPTV testing over DSL,” EXFO application note 148.
- [10] P. J. Winzer and R.-J. Essiambre, “Advanced Optical Modulation Formats”, Vol.94, No.5, May 2006., Proceedings of the IEEE.