

TEHNOLOŠKE IZVEDBE FTTx KABELSKIH SUSTAVA

Sažetak

U radu se analiziraju različite tehnološke i topološke izvedbe FTTx optičkih kabelskih sustava za suvremeno "broadband" okruženje namjenjeno Triple Play usluživanju. Dokazuje se njihova tehnička superiornost u odnosu na ostale širokopojasne komunikacijske tehnologije (xDSL, wireless i dr.) Detaljnije se analiziraju mogućnosti i ograničenja primjene različitih izvedbenih varijanti FTTx sustava (FTTH, FTTB, FTTC i dr.). Predlažu se različiti modeli realizacije FTTx sustava; kao PTP, PON, AON itd. i obrazlažu se mogućnosti i opravdanosti njihove primjene u realnim okruženjima. Analiziraju se tehničke osobine pojedinih varijanti i rješenja, ali i pripadajući ekonomski aspekti. Posebna pažnja posvećena je trenutnom stanju važećih međunarodnih normi i trendovi razvoja istih. Prikazuje se konačna usporedba pojedinih tehnoloških izvedbi FTTX sustava. Izlaže se trenutno stanje implementacije FTTx kabelskih sustava u svijetu i kod nas.

Na kraju rada objašnjeni su novi tipovi korisničkih usluga obuhvaćeni pojmom Triple Play, koji će iz temelja izmijeniti dosadašnje komunikacijske standarde.

Summary

The article deals with the analysis of the various technology and topology realizations of FTTx optical cabling systems for "broadband" communications targeted to Triple Play servicing. FTTx technology supremacy was proffered comparing to other high speed communication techniques (xDSL, WiFi etc). The detailed analysis off advantages and disadvantages of different realizations of FTTx systems was explained (FTTH, FTTB, FTTC etc). The various FTTX models are proposed: PTP, PON, AON etc., and some technical and economical analysis of each model was done. More detailed consideration was dedicated to the existing international FTTx standards and its developing trends. The final comparison table of various FTTx solutions is explained. The momentary level of FTTx implementation in the world as well in Croatia is exposed.

At the end of the article, the Triple Play services are explained, which will significantly change the comfort and the style of the people everyday living, today and in the future.

1. UVOD

Ulaskom u 21. stoljeće, postali smo svjedoci ultrabrzog razvoja telekomunikacijskih tehnologija, koji je uslijedio kao rezultat nastojanja za pružanjem novih usluga korisnicima, koje iz temelja mijenjaju komfor i stil života običnih ljudi. U kompresiji digitalnog signala postignut je također snažan napredak, tako da su do nedavno prezahtjevne usluge, naročito video, postale prihvatljive za efikasan prijenos danas poznatim komunikacijskim tehnologijama. Svijet je kročio u novu informacijsku eru čija je osnovna osobina globalna prespojenost, što danas objedinjavamo jednom riječju: "broadband" ili širokopojasna konvergentna mreža. Mogli bi reći da se pod "broadband" pojmom krije napredna ideja da se usluge distribuiraju do svakog korisnika sa istom kvalitetom, bez obzira na lokaciju korisnika i njegovu stvarnu udaljenost od davatelja usluga (providera). Smatra se da "broadband" kreće od par Mbit/s, a prema gore je ograničen samo osobinama prijenosnih medija, što je danas i nekoliko stotina Gbit/s. Naravno da su navedene brzine u funkciji ekonomičnosti, dakle cijene prijenosa, ali i stvarnih potreba korisnika. Dakle, onaj koji želi izuzetnu uslugu i ima je čime i platiti, može je i realizirati danas dostupnim komunikacijskim tehnologijama.

Na "broadband" se odmah nadovezuje pojam "Triple Play", na razini informacijske usluge, a uključuje pojam konvergentne mreže po kojoj se istovremeno obavlja prijenos govora, podataka i videa – naravno, sve u digitaliziranom obliku. Triple Play je danas sveprisutan diljem svijeta, pa i kod nas, što pokazuju primjeri domaćih davatelja usluga, npr. Vodatel FTTH i T-Com MAXtv. Za ilustraciju koliko su koje od navedenih usluga interesantne korisnicima, podaci za Austriju za g.2005 su da je vrijednost tržišta telefonije bila 1,63 mlrd \$, Internet tržišta 1,38 mlrd \$, a TV i videa 0,63 mlrd \$. Za ovo se tržište danas bore i Telco kuće, sa iskorakom prema prijenosu videa, i privatni davatelji Triple Play usluga, ali i CATV operateri koji se pomicu iz analognog videa ka integriranim digitalnim rješenjima.

U svijetu se danas lome kopila kojom komunikacijskom tehnologijom dostaviti Triple Play uslugu do krajnjeg korisnika, a na vagi su aspekti efikasnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti. Rješenja prijenosnog puta su različita, a danas se uglavnom koriste tri dominantne tehnologije: svjetlovodno vlakno (FTTx sustavi), brzi bakreni kabeli (xDSL sustavi) i širokopojasni bežični prijenos (npr. WiMAX sustav). Ovdje će se detaljnije razmotriti FTTx rješenje, obzirom na izrazitu superiornost prema ostalim dvjema tehnologijama, ali će se

pokazati i kombinacija svih triju tehnologija i njihova međurelacija, kada je iz različitih razloga potrebno kombinirati dva ili čak sva tri navedena rješenja.

2. Što zahtjeva Triple Play od komunikacijske infrastrukture?

Već iz uvođenja se može zaključiti da uvođenje Triple Play usluga znači "broadband" okruženje svima i svugdje. Uprkos izuzetno efikasnim kompresijskim postupcima, očito je da su potrebne brzine prijenosa reda par Mbit/s, do par desetaka Mbit/s, uskoro i par stotina Mbit/s. U **Tabeli 1** prikazane su neke od Triple Play usluga koje se nude i pripadajući zahtjevi na prijenosni pojas danas i u skoroj budućnosti.

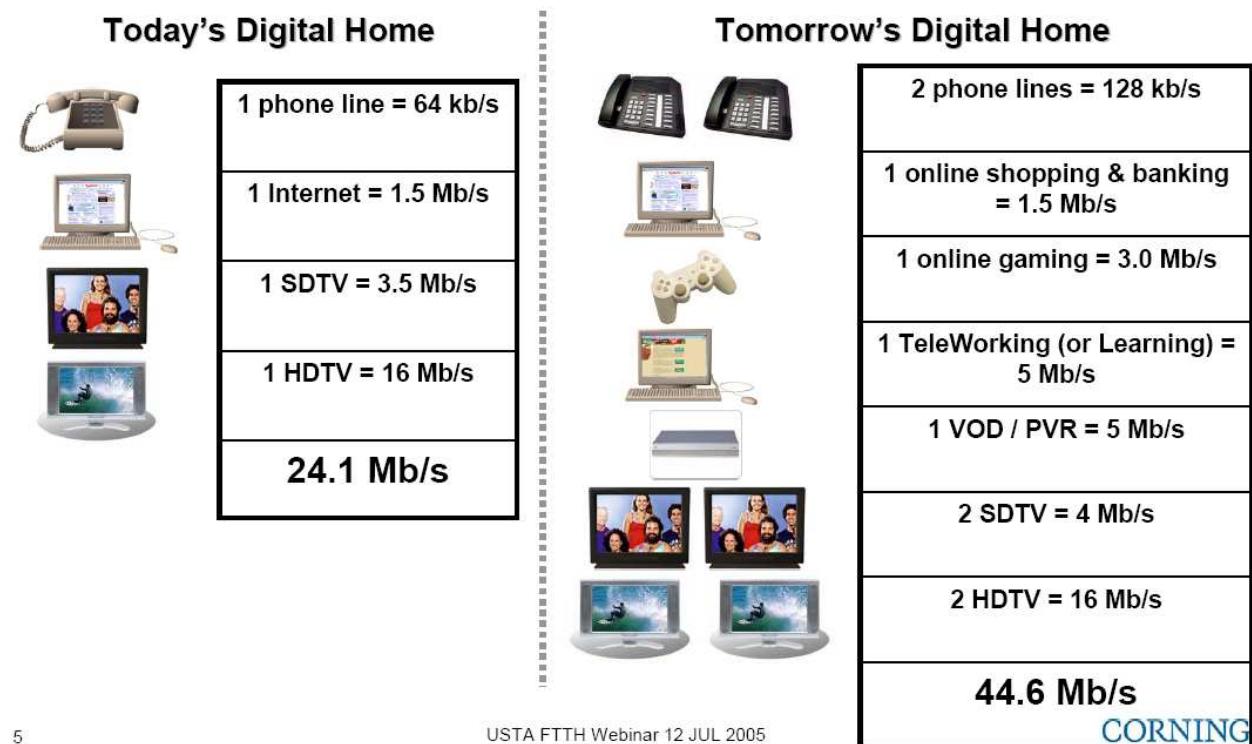


Tabela 1: Zahtjevane prijenosne širine kanala za pojedine Triple Play usluge

Prijenos VoIP telefonije zahtjeva 64kbit/s po kanalu, pa ukoliko se traži veći broj kanala (npr. za poslovne korisnike tipično 30 kanala po PDH normi – 2 Mbit/s) dolazimo i do brzine od par Mbit/s, dok za kućne korisnike ova usluga nije zahtjevna, tipična potreba su 2 kanala brzine 64 Kbit/s.

Prijenos podataka koji se danas još uvijek najviše svodi na korištenje Internet je već bitno zahtjevnija usluga, i kreće se par Mbit/s, što sa stajališta Triple Play posluživanja traži umjerene komunikacijske zahtjeve. Usluga prijenosa podataka se međutim brzo šir na poslovne mreže Metro tipa, sa vezama "point-to-point" gdje su zahtjevane brzine 10Mbit/s (npr. Ethernet) ili čak 100Mbps, a postoje i zahtjevi i na 1Gbit/s. Time se situacija bitno mijenja, iako će se većina korisnika složiti sa "ogromnih" 10Mbit/s u odnosu na donedavne modemske ili ISDN podatkovne veze, čak i u odnosu na skupi Frame Relay. Da li je to uvijek dovoljno, ostavljamo da prosudite sami, jer tu su i nove usluge bazirane na prijenosu podataka npr. telebanking, teleworking, različite igrice, "shopping over Internet" itd.

Prijenos videa i TV signala je daleko najzahtjevnija usluga glede prijenosnog pojasa, ali i glede "real time" karaktera ove informacije. Sa druge strane, ovo je danas baš najtraženija usluga, jer Triple Play okruženje je u najvećem broju slučajeva (npr. kućni korisnici!) namjenjeno raznovrstanim igrama, dakis, prijenosu slika, filmova, računalnih igrica, kockarskih scenarija, vizualiziranom televiziju i dr. Tu su i novi normativni ultrakvalitetni video: HDTV – televizija visoke rezolucije koja zahtjeva "samo" 16 Mbit/s, VOD – video na zahtjev, VVR- virtualni videorekorder, "time shifted TV" i dr.

Jednostavnom matematikom iz **Tabele 1** se može izračunati da je već danas minimalni zahtjev prosječnog korisnika na pojas od 25 Mbit/s, a već sutra od 45 Mbit/s. U stručnom svijetu se smatra da bi minimalna prijenosna širina suvremene "broadband" mreže trebala iznositi 40 Mbit/s, a sve češće se inzistira na brzini Fast Etherneta, dakle 100 Mbit/s. Da to nije samo teorija, na **Slici 1** je prikazan cjenovnik usluga jednog domaćeg Triple Play operatera, pod uvjetom da imate optički priključak.

Cjenik TriplePlay paketa

OSNOVNI TRIPLE PLAY PRIKLJUČAK		
<ul style="list-style-type: none"> Dvije telefonske linije 120 minuta besplatnog razgovora 30% niže cijene 	<ul style="list-style-type: none"> 2 Mbps download 2 Mbps upload 2 GB prometa 	<ul style="list-style-type: none"> 20 digitalnih TV programa FREE PC Media Centar softver
199kn (mjesečno)		
Dodatne opcije		
TELEFON	INTERNET	TELEVIZIJA
LINIJA	5 Mega	TV Box
Dodata telefonska linija	<ul style="list-style-type: none"> 5 Mbps download / upload 5 GB prometa 199kn (mjesečno)	Video-on-Demand 60 FTA TV kanala eTV vodič 50kn (mjesečno)
60kn (mjesečno)		
10 Mega	299kn (mjesečno)	Pay TV
	<ul style="list-style-type: none"> 10 Mbps download / upload 10 GB prometa 	20+ kriptiranih programa 50kn (mjesečno)
FLATE RATE	100kn (mjesečno)	VVR
	<ul style="list-style-type: none"> Promet neograničeno 	Virtualni video recorder 50kn (mjesečno)
Osnovni paket TriplePlay Vam za 199kn mjesečno omogućuje najniže cijene telefoniranja u fisknoj mreži, uvjerljivo najbrži Internet te Vas uvodi u svijet digitalne televizije...		

Slika 1: Tipičan cjenovnik davatelja Triple Play usluga

Iz priloženog se vidi da neke prijenosne tehnologije koje su još do jučer bile ultrabrзе, otpadaju zbog preuskog pojasa, ili ih možemo smatrati samo privremenim rješenjem.

3. "Broadband" tehnologije po bakrenim paricama

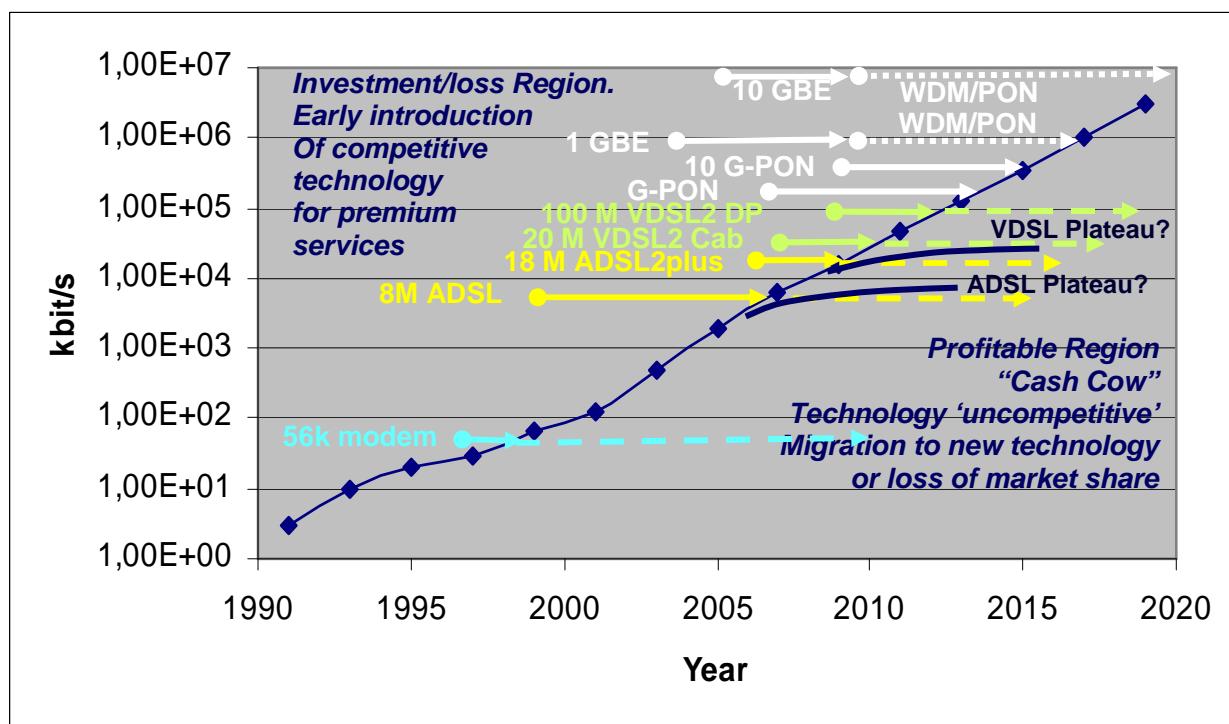
"Broadband" dakle znači 40 Mbit/s, a sutra već možda 100 Mbit/s ili više. Time se broj raspoloživih komunikacijskih tehnologija sužava na vrlo uzak izbor, pogotovo obzirom na zahtjevanu kvalitetu prijenosa. Ukoliko se, međutim, želimo unaprijed odreći nekih usluga, npr. smanjiti broj video kanala, tada možemo koristiti i neke uvjetno rečeno starije tehnologije. Npr. ADSL ćemo često biti prisiljeni koristiti jer je to često jedini raspoloživi kabel na koji se možemo prikopčati. U praksi su česta hibridna rješenja optika-bakar, gdje se magistrala ("backbone") izvodi optički, a problem zadnjeg kilometra, tzv. "last mile" izvodi xDSL tehnologijama po tf parici, a ako je nema onda je jedina alternativa bežični prijenos. Zbog činjenice da je "last mile" najveći investicijski zahvat u izgradnji "broadband" mreže, jer se tu nalazi ogroman broj korisnika, hibridna rješenja su česta jer su najefтинija. Mnogi autoriteti smatraju međutim, a i ja osobno, da je krajnji cilj čista optička mreža tipa FTTH ili FTTB, pogotovo u Metro okruženju, što očekujem daće se na kraju i desiti. Trenutno se u mnogim zemljama izgrađuje takve optičke mreže, prednjače Japan, Koreja i SAD. Time bi se u korijenu riješili svi problemi prijenosnog pojasa za dulje razdoblje. Do tog trenutka, međutim, treba sagledati sva danas raspoloživa i ekonomski prihvatljiva rješenja po bakru, prema **Tabeli 2:**

	ADSL G.992.1	SDSL	SHDSL G.991.2	ADSL2 G.992.3-4	ADSL2+ G.992.5	VDSL G.993.1	VDSL2 G.993.2
Upstream (mbps) brzina <u>od</u> korisnika	16 – 768 kbs	1.5 - 2	1.5 - 2	1 – 3.5	1 – 3.5	12	100
Downstream (mbps) brzina <u>prema</u> korisniku	1.5 - 9	1.5 - 2	1.5 - 2	12	24	52	250
Maks. duljina parice u km	1.2 – 5.5	2 – 3	3 – 4	3 – 7	3 – 7	0.5 – 1	1 – 5
Frekvenčijski opseg	cca. 1 MHz	cca. 240 kHz	cca. 240 kHz	cca. 1.1 MHz	cca. 2.2 MHz	cca. 30 MHz	do cca. 30 MHz

Tabela 2: Pregled raspoloživih "broadband" tehnologija po bakrenim paricama

Treba odmah napomenuti da su navedene maksimalne brzine uglavnom teorijske i da ih teško možemo očekivati koristeći postojeće parice, posebno ako se odlučimo za VDSL2 protokol (gdje je realno postići 50% maksimuma, dakle 50Mbit/s). Za primjer ćemo navesti da je velika većina instalacija u RH izvedena NF paricama promjera svega 0,4mm, a prosječna starost parica je iznad trideset godina – dakle, paricu je potrebno pažljivo odabrati, a jednom postignutu brzinu omesti će vam novi korisnici preslušavanjem. Dakle, penetracijom Triple Play usluge realno je očekivati sve više problema sa bakrenom mrežom.

Na **Slici 2** prikazane su maksimalne brzine-plafoni xDSL tehnologija, te očekivano područje primjene optičkih FTTx tehnologija.



Slika 2. Raspoložive "broadband" tehnologije za bakar i optiku

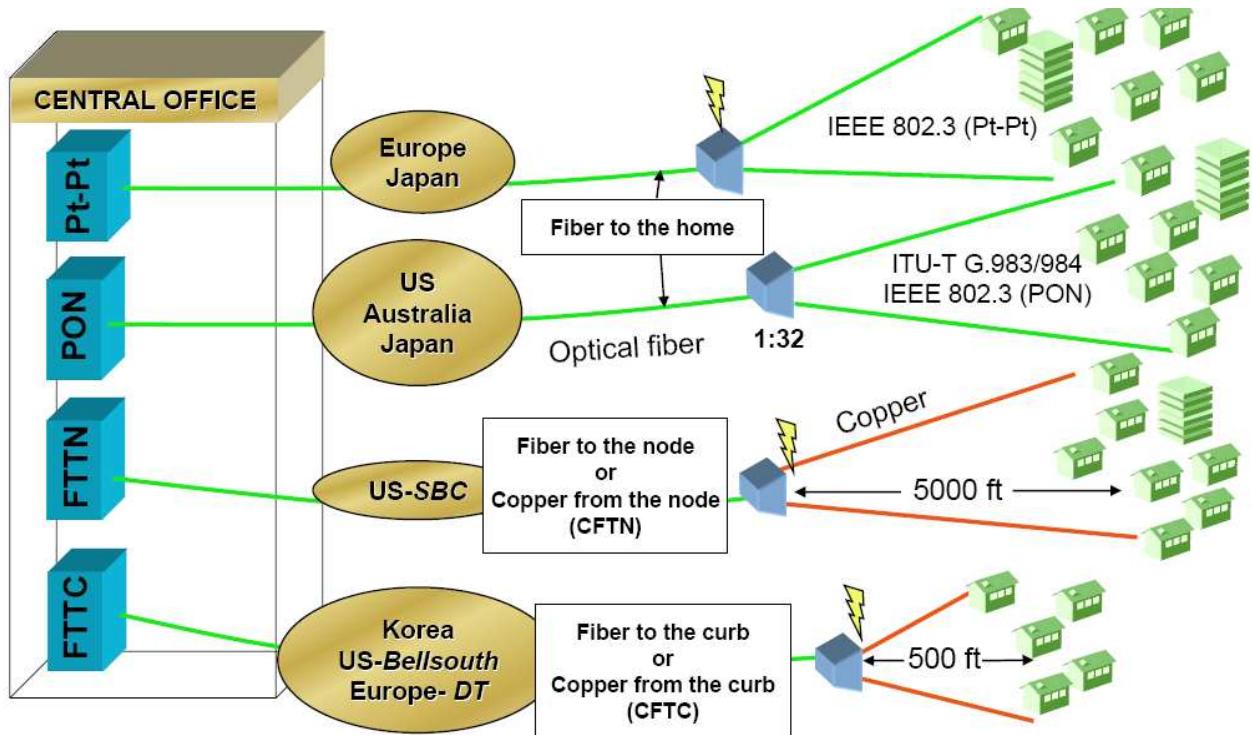
Sa druge strane, svjetlovodna vlakna i njima izvedene optičke mreže prosto mame izvanrednim prijenosnim pojasom, često i iznad 100 Gbit/s po kilometru i velikim premostivim distancama, i par stotina km bez repetitora. Moglo bi se reći da je to idealan "broadband" medij, kada bi odlučivali samo tehnički aspekti. Međutim, još uvijek viša cijena optičke tehnologije, te zatečeno stanje bakrene komunikacijske infrastrukture usporavaju primjenu ove tehnologije, posebice u "last mile" području. Tamo se često koriste hibridna rješenja optika-xDSL, iako osobno smatram takva rješenja kompromisnim i privremenim. U magistralama svih suvremenim mreža već se koriste isključivo svjetlovodna vlakna, iz jednostavnog razloga što je to jedino moguće rješenje za ultrabrze sabirnice. Trenutak kada prijeći sa vlakna na bakrenu paricu je stvar diskusije, a i fizičkog stanja na terenu, pa razlikujemo više rješenja FTTx (Fiber To The x) sustava, od čisto optičkih do pretežito bakrenih, pri čemu oznaka "x" u FTTx označava točku demarkacije između optičke mreže i mreže bakrenih (primarno paričnih) kabela. Iznimak čine HFC (Hybrid Fibre Coaxial) kabelski sustavi, koji su nastali kao napor postojećih CATV operatera da pruže Triple Play usluge hibridnom optičko-koaksijalnom tehnologijom (što nije predmet ovog rada, osobno HFC smatram "vatrogasnim" rješenjem).

Na **Slici 3** prikazane su do danas prihvaćene topološke izvedbe FTTx kabelskih sustava. Prve dvije izvedbe ,PON i PTP(ili Pt-Pt) su čisto optičke, tj. monolitne, o čemu je riječ u slijedećem podnaslovu.

FTTN rješenje (Fiber To The Node) prepostavlja rješenje u kojem se pertvorba optika-bakar ostvaruje u postojećem telefonskom komutacijskom čvorишtu, tako da su udaljenosti do krajnjih korisnika i do 1.500 metara, pa prema tome treba odabrati sofisticiraniju xDSL tehnologiju. Napajanje prijenosne opreme i njen fizički smještaj, međutim, ovdje nisu problem, iz očitih razloga.

FTTC rješenje (Fiber To The Curb) je znatno povoljnije sa gledišta zahtjeva na xDSL, jer se demarkacija obavlja u uličnom prespojnom ormariću, koji se nalazi do max 150 metara od krajnjeg korisnika. Ovakav scenario omogućuje veće prijenosne brzine, ali je smještaj aktivne komunikacijske opreme upitan, kao i njen napajanje.

U svakom slučaju, i FTTC i FTTN su primamljive operaterima sa stajališta primjene, jer koriste postojeću "last mile" kabelsku strukturu, dakle investicija je umjerena. Nedostatak je očigledan – brzina ovih sustava limitirana je brzinom na bakrenom dijelu instalacije, koja pogotovo u FTTN sustavima (traži se pojaz od 40Mbit/s po korisniku!) često nije dovoljna.

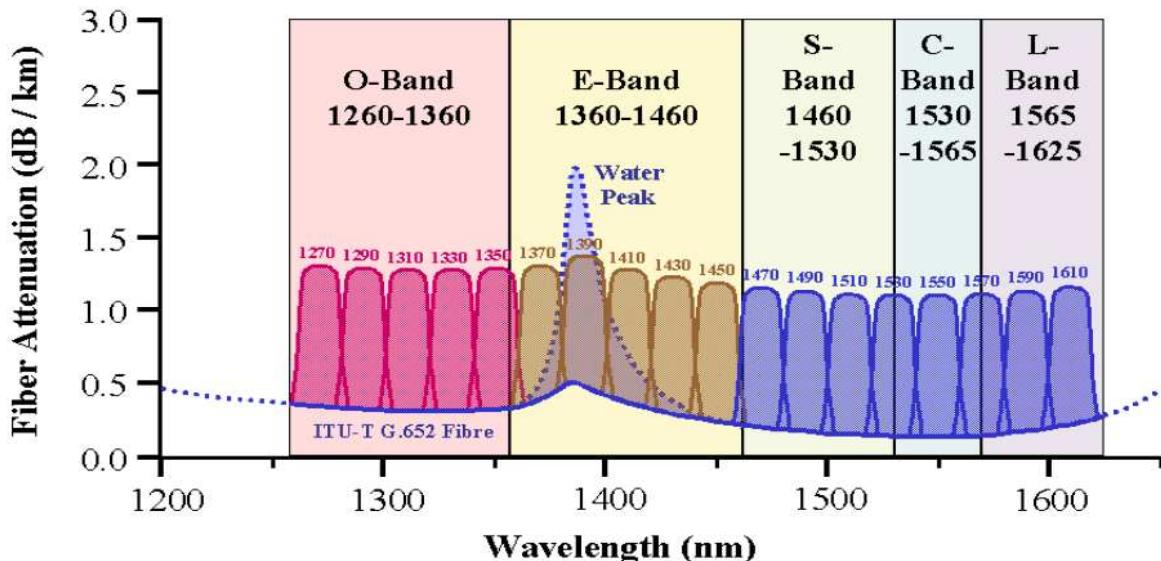


Slika 3. Topološke izvedbe FTTx sustava

4. Čiste (monolitne) optičke "broadband" tehnologije

Najjednostavniji, ali i najskuplji način povezivanja optičkim kabelom svodi se na trivijalno povlačenje svjetlovodne parice između korisnika i davatelja usluga. Takav način izgradnje optičke infrastrukture povezivanja je poznat pod **nazivom PTP ili Pt-Pt (Point To Point Fiber)**. Česta inačica PTP je da se umjesto optičke parice koristi samo jedna svjetlovodna nit, uporabom jednostavnog WDM sprežnika/rasprežnika na obje strane. Takvi WDM uređaji sprežu/rasprežu u dva prozora Tx1310/Rx1550nm i obratno, jeftini su i najčešće su integrirani u terminalnu opremu, pa se njima najčešće ostvaruje ušeda u odnosu na parični PTP. U obje varijante problem ovakvog rješenja je visoka cijena u odnosu na hibridne tehnologije, koja se nastoji opravdati praktično nelimitiranim prijenosnim pojasmom. Problem ogromnog broja vlakana u magistrali (PTP "backbone") je ipak najveći nedostatak ovakvih rješenja, i često nepremostiva prepreka, obzirom na limitiran kapacitet podzemnih cijevi i kanala, naročito u urbanim područjima (gdje se zapravo optika i najčešće primjenjuje).

Zagovornici **PTP topologije** tvrde da je ona zapravo jedino pravo "broadband" rješenje, koje može odgovoriti na sve potrebe Triple Play okruženja. Prijenosni kanal od 100 Mbit/s ili čak 1 Gbit/s ovdje nije problem, kao niti premostive distance reda više desetaka km. Sva prespajanja se mogu izvršiti pasivno, i najčešće se izvode varenjem vlakana, tako da je pouzdanost ovakvih sustava vrlo velika, a održavanje jeftino. Sustav je tehnički jednostavan i intuitivan. Uporabom nasuvremenijih izvedbi "micro" optičkih kabela, ili čak upuhivanjem golih vlakana u prethodno postavljene mikro-tubice, proširivanje mreže je jednostavno i donekle ekonomski prihvatljivo, ali opet pod uvjetom da je magistrala dovoljno moćna i proširiva. Dodatno povećanje broja kanala može se postići korištenjem multipleksera valnih duljina tipa CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) na oba kraja, po preporuci ITU-T G.694.2, za faktor 8-18 puta. Preuvjet za korištenje CWDM jeste da je kabelska instalacija izvedena "dehidriranim" vlaknom, tkzv. "low water peak fiber" po ITU-T G.652d, koje ima linearnu karakteristiku u cijelom području 1270-1625 nm. Kanali međusobno razmaknuti tipično 20-25nm, imaju ogromnu prijenosnu širinu- iznad 200 Gbit/, prema **Slici 4**. Obzirom na Pt-Pt veze u PTP mrežama, protokol prijenosa je popularni i skalabilni Ethernet.



Slika 4. CWDM multiplekser po ITU-T G.694.2

Još "gušće" pakiranje kanala (i preko 100-njak) može se ostvariti DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) multiplekserom, prema **Tabeli 3.**, ali vrlo visoka cijena i vrlo složeno i osjetljivo održavanje ovog uređaja čini ga neupotrebljivim u Metro okruženju, za razliku od "long haul" aplikacija gdje se često koristi kao akcelerator.

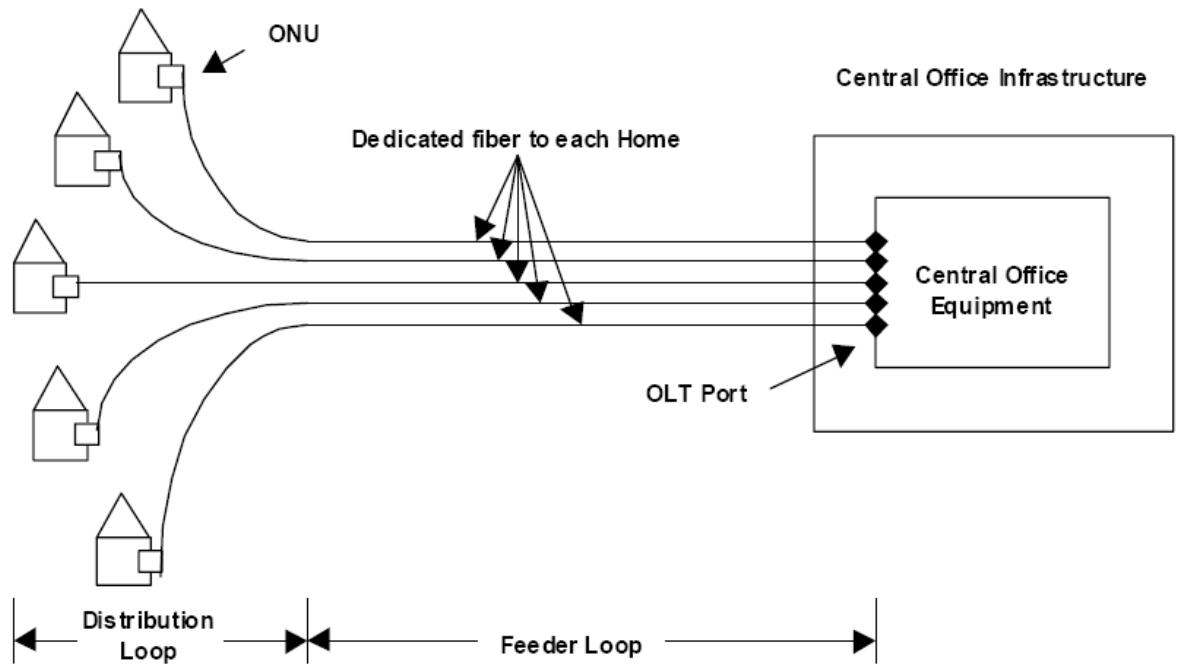
	Coarse WDM (includes WWDM)	WDM	DWDM (includes ultra dense WDM)
Channel Spacings	Large, from 1.6 nm (200 GHz) to 25 nm	1310 nm lasers used in conjunction with 1550 nm lasers	Small, 200 GHz and less
Number of bands used	O,E,S,C and L	O and C	C and L
Cost per channel	Low	Low	High
Number of channels delivered	17-18 at most	2	Hundreds of channels possible
Best Application	Short-haul, Metro	PON	Long-haul

Tabela 3. Usporedba osobina WDM, CWDM i DWDM multipleksera valnih duljina

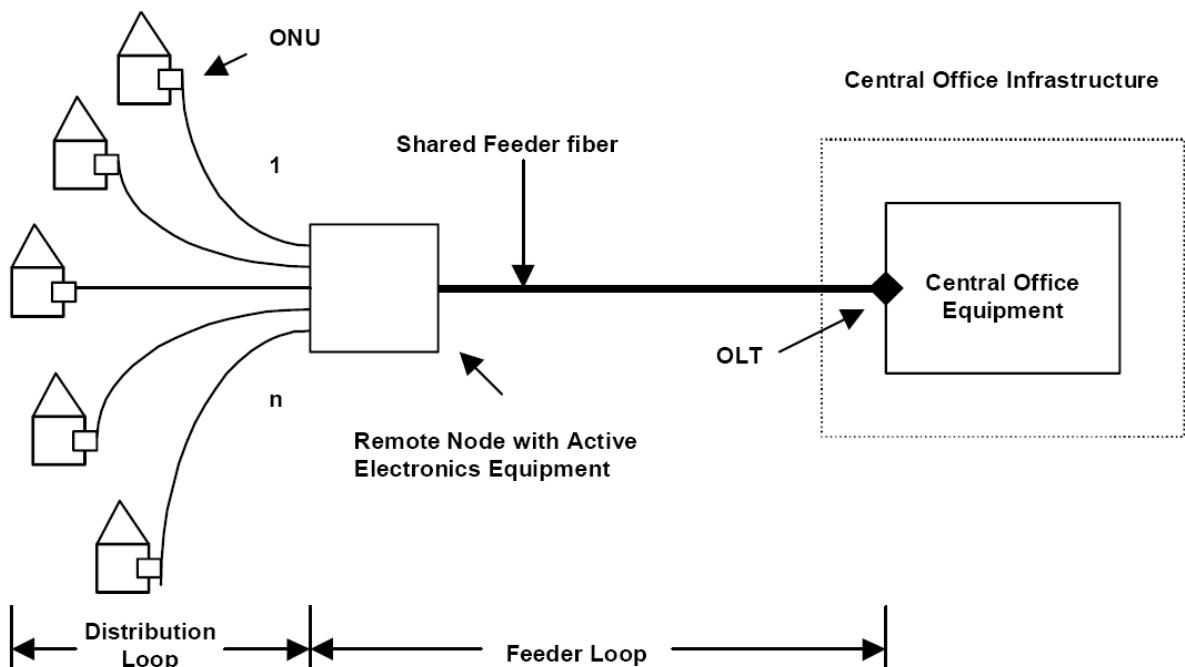
Na **Slici 5.** prikazana je PTP toploška izvedba širokopjasnog kabelskog sustava. Treba reći, da usprkos činjenici što mnogi Triple Play davatelji usluga odabiru baš ovakav kabelski sustav, da je njegova implementacija često nepredvidljivo skupa. Cijena priključka je to skuplja što je populacija na određenom području rjeđa, pa takva rješenja na kraju vode u neekonomičnu "slijepu ulicu". Ukoliko se pak ograničite samo na Metro mrežu u gusto naseljenim urbanim područjima, i imate dovoljno prostora u kanalizaciji, PTP je rješenje koje treba odabrati.

Problem prepunjivanje kanalizacije može se rješiti uporabom **AON rješenja (Active Optical Network)**, tkzv. Aktivnom Optičkom Mrežom prema **Slici 6.** Ukoliko se na mjestu spajanja magistrale na korisničke linije postavi aktivna oprema (optički preklopniči, često i CWDM multiplekseri), magistrala može biti bitno "tanja", pa kanalizacija više nije problem. Održavanje AON mreža je međutim složenije, a pouzdanost upitna zbog uporabljenih aktivnih uređaja i kvalitete njihovog napajanja.

Primjena AON mreža je stoga ograničena na manje mreže, ili ih susrećemo u početnih fazama razvoja mreže, kada se zamjenjuje bitno pouzdanijim **PON sustavima (Passive Optical Network)**. PON je potpuno pasivna optička kabelska struktura, gdje za razliku od AON-a, na mjesto spojista umjesto aktivne opreme postavljamo pasivne optičke sprežnike, koji razdjeljuju ulazni optički informacijski tok na veći broj fizičkih puteva, najčešće 8-64, kako je prikazano na **Slici 7**. Zbog složenosti PON-a, posvetit ćemo mu novo poglavlje.



Slika 5. PTP "Point To Point Fiber" pasivna širokopojasna mreža



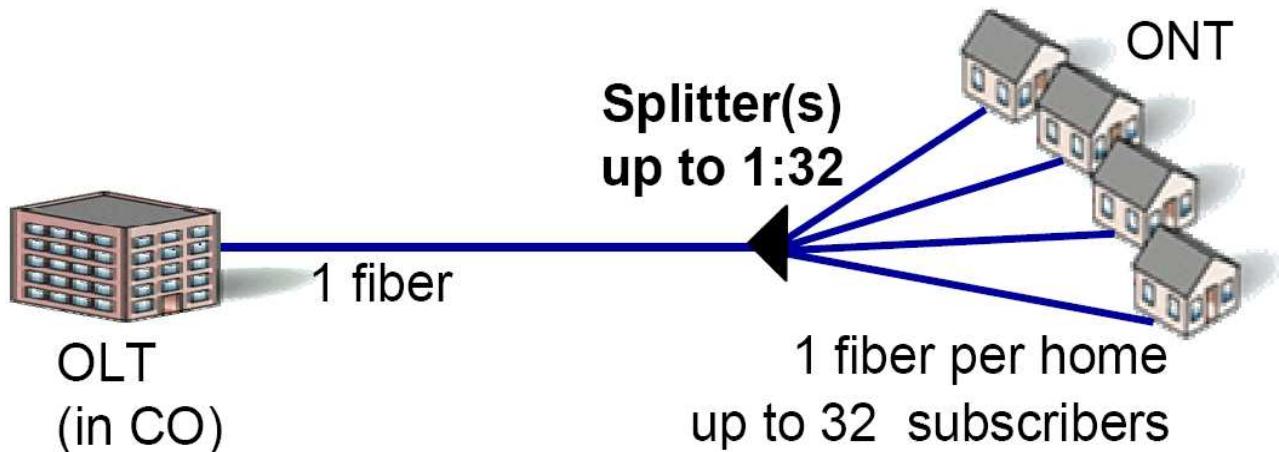
Slika 6. AON aktivna optička širokopojasna mreža

5. Tehnološke izvedbe PON-ova (pasivnih optičkih mreža)

PTP i AON rješenja predstavljaju trivijalno rješenje kabelskog sustava za širokopojasni prijenos Triple Play usluga, i oba rješenja imaju jedan nedostatak, i to velik, a to je nemogućnost efikasnog proširivanja na rastući broj korisnika, što se tehnički zove loša skalabilnost sustava. Gomilanje "point to point" vlakana ili pak AON aktivnih čvorišta je jednostavno ograničeno fizičkom propusnošću kanalizacije, odnosno pouzdanošću aktivne opreme.

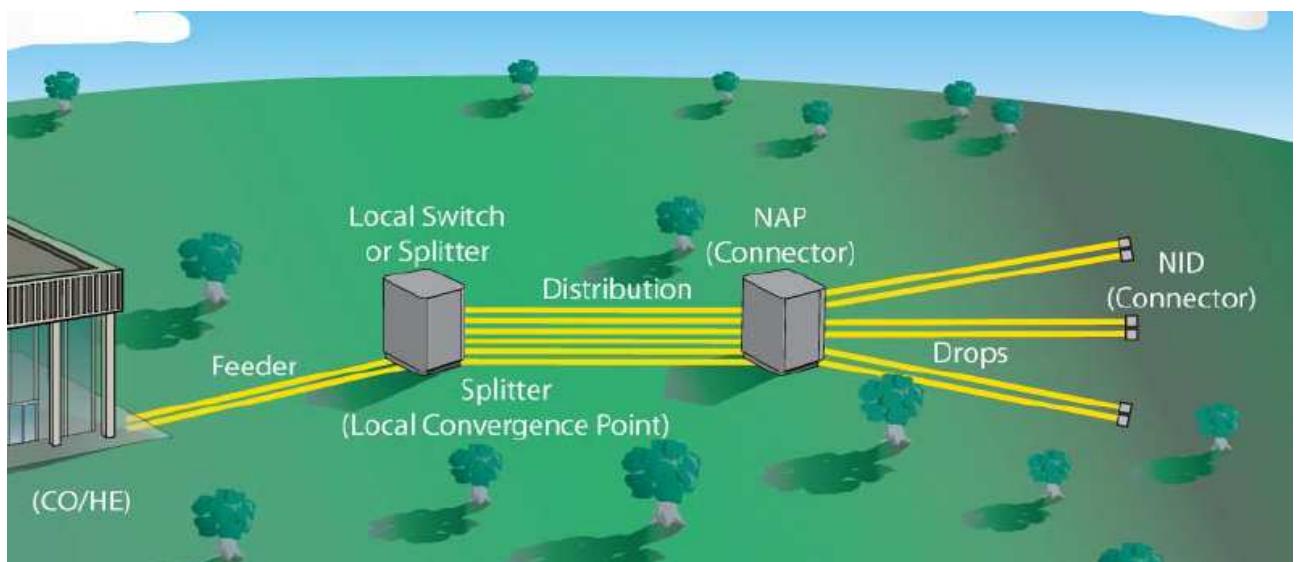
Osnovna zamisao PON-a je P2MP (Point To Multi Point) okruženje, u kojem se kičmeni dio kabelskog sustava efikasnije iskorištava određenim metodama multipleksiranja, npr. vremenskim/paketnim multipleksiranjem ili

multipleksiranjem po valnim duljinama. Spajanje magistrale na korisničke optičke linije izvodi se pasivnim optičkim sprežnicima, tipično u omjeru 1:32, što znači da se kod PON-a korisnički signal za isti omjer dijeli na putu od centralnog čvora davatelja usluga (OLT – Optical Line Terminal) do krajnjeg korisničkog priključka ONT (Optical Network Terminal). Sprežnik može biti izведен centralno, kao jedan element 1:32, kada govorimo o centraliziranom PON-u, a sprežnici se mogu i dislocirano kaskadirati npr. $1:8 + 1:4 = 1:32$, kada govorimo o distribuiranom PON-u. Centralizirani i distribuirani PON prikazani su na **Slikama 8 i 9**.



Slika 7. PON pasivna optička širokopojasna mreža

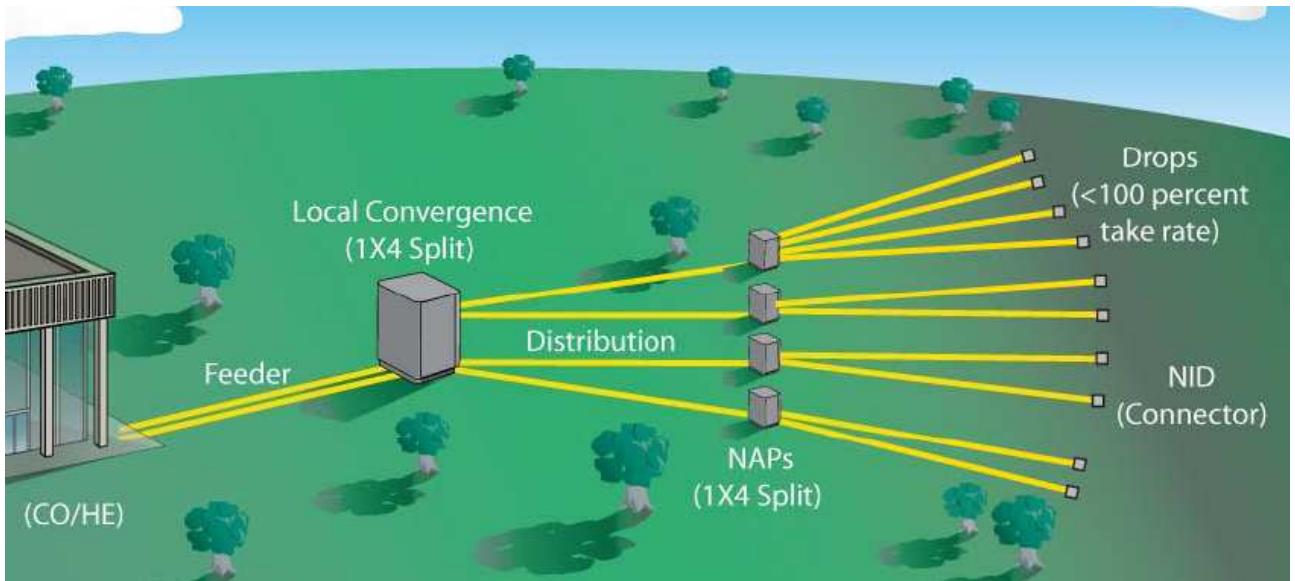
Kada primjeniti koju vrstu PON-a, ovisi ponajviše o fizičkom rasporedu korisnika i postojećoj kanalizacijskoj mreži i općenito o strategiji razvoja širokopojasne mreže. Davatelji usluga skloniji su centralizaciji u OLT čvoru, čime se minimizira potreban broj optičkih sprežnika, ali i aktivne komunikacijske opreme u centralnom čvorištu. Dijagnostika kvara u pasivnom dijelu mreže je brža i jednostavnija, a ukupno gušenje PON-a manje, po principu manji broj sprežnika – manje intrinskično gušenje i manje kvarova.



Slika 8. Centralizirani PON

U distribuiranom PON-u, sprežnici su pomaknuti bliže ONT opremi, dakle korisnicima. Centralno čvorište OLT je jednostavnije, a broj novih uličnih kabinetova se smanjuje, jer se najčešće koriste već postojeći manji komunikacijski ormarići. Dijagnostika i pouzdanost su manje efikasna u odnosu na centralizirani PON.

Glavne prednosti PON-a u odnosu na ostala optička rješenja su ekonomičnost i pouzdanost. Pouzdanost je očito velika jer se radi o potpuno pasivnoj strukturi. Ekonomičnost proizlazi već i same uštede na količini optičkog kabela i jednostavnosti topologije, te izostanku potrebe za napajanjem opreme duže prijenosnog puta. Pored toga, PON raspodjeljuje (multipleksira) prijenosnu širinu svjetlovodnih vlakana u magistrali.



Slika 9. Distribuirani (kaskadirani) PON

Dodatno pojeftinjenje postiže se time što PON koristi samo jedno vlakno za dvosmjerni prijenos korištenjem WDM multipleksera, najčešće 1310nm za "upstream" prijenos, odnosno 1550nm za "downstream" prijenos. Prednost PON-a je i skalabilnost, jer je magistrala "fizički tanka" iz razloga multipleksiranja, pa se može pojačavati. PON-u se zamjeraju dva nedostatka: ograničeni domet i ograničen prijenosni pojaz, dakle sama srž širokopojasnosti dovodi se u sumnju. Radi ilustracije, i da vidimo da li je to stvarno tako, provest ćemo analizu za tipični PON kod kojeg se sprezanje/rasprezanje vrši u omjeru 1:32.

Proračun Gušenja

- gušenje sprežnika ili kaskade sprežnika u konačnom omjeru 1:32 iznosi cca 13-14 dB (sa intrinsičnim gušenjem od cca 1 dB)
- dinamika osrednje standardizirane linijske opreme iznosi cca $Tx = -5 \text{ dBm}$ minus $Rx = -40 \text{ dBm} = 35 \text{ dB}$
- dakle, uz rezervu snage od 3dB, ostaje $35 - 14 - 3 = \text{cca } 18 \text{ dB}$ za gušenje vlakna, dakle za cca 50 km vlakna G.652d u prozoru 1310nm (umanjeno za varene spojeve, cca 0,050 dB/spojištu)
- u slučaju izgradnje PON-a sa sprežnicima 2:32=64, rezerva snage iznosi $35 - 2 \times 14 - 3 = 4 \text{ dB}$, dakle za cca 10 km vlakna G.652d u prozoru 1310nm (umanjeno za varene spojeve, cca 0,05dB/spojištu)

Može se suprotno kritikama reći da PON ima više nego dovoljnu dinamiku za urbana područja, gdje se smatra da u krugu radiusa 20km živi 98% populacije, a i u omjeru sprezanja 1:64 može se protegnuti na krug radiusa do 10km. PON nije primjenjiv niti projektiran za rijetko naseljena ruralna područja.

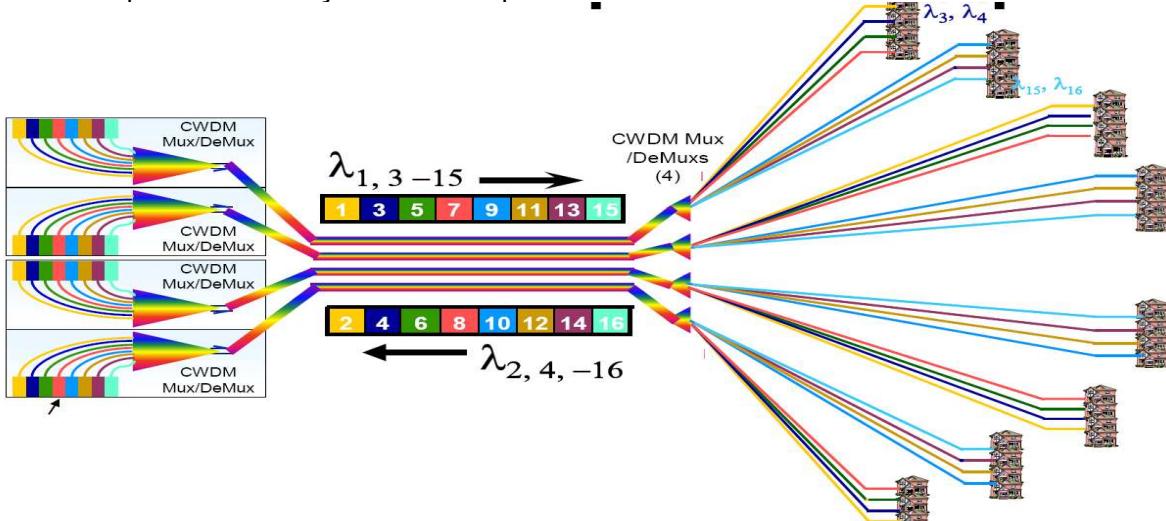
Proračun prijenosne širine

- korisniku na ONT kraju potrebno je isporučiti kapacitet od 25-45 Mbit/s digitalizarnog signala, da bi se zadovoljili zahtjevi na Triple Play usluge (analiza sa početka ovog rada)
- kroz pasivnu zvjezdastu strukturu PON-a svaki signal širi zrakasto ka svim korisnicima ("multicasting"), što znači da je potrebno osigurati svakom korisniku kanal navedene širine (to se najčešće rješava tehnikama Etherneta, TDM-a ili ATM-a), dakle za PON 1:32 brzina PON-a mora biti najmanje 32 kanala \times (25-40) Mbit/s = 800-1280 Mbit/s, što i jesu standardizirane agregatne brzine magistrale na koju emitira NLT centralni čvor
- uz pretpostavku korištenja npr. GPON-a standardizirane brzine od 1,25 Gbit/s, a i stohastičke prirode prometa na sustavu (može se gotovo isključiti mogućnost da svi korisnici u istom trenutku maksimalno koriste PON), brzina po korisniku će iznositi barem $1,25 / 32 = 39 \text{ Mbit/s}$ (zajamčeno), u praksi najčešće u rasponu iznad 50Mbit/s (prosječno)

Može se zaključiti da je prijenosna širina PON-a 1:32 zadovoljavajuća, iako manja od PTP mreže. Agresivni zahtjevi na brzine 100 Mbit/s po korisniku, pa i veće, mogli bi ugroziti budućnost PON-ova. Utoliko je konačna maksimalna prijenosna širina glavni razlog upitnosti primjene PON-ova u širokopojasnim mrežama, a glavne prednosti relativno niska instalacijska cijena po priključku (bitno niža od PTP sustava), te jednostavno i jeftino održavanje uz visoku pouzdanost.

Mišljenje je autora da bi u **realnim mrežama topologiju PON-a trebalo kombinirati sa CWDM multipleksiranjem, tkzv WDM/PON**. Time bi se mogla osigurati dedicirana valna duljina po svakom

korisniku, npr. uporabom 16 kanalnog CWDM-a prema **Slici 10**. U WDM/PON-u, logički se ostvaruje "point-to-point" komunikacija na relaciji OLT-ONT kao i u PTP mrežama, samo je razlika što sada logički put određene valne duljine (tkzv. "logical path") u biti zamjenjuje fizičko vlakno (tkzv. "physical path"). Naravno da bi to vodilo do izmjene postojećih PON standarda, jer je potrebno vrlo vješto raspodijeliti i iskombinirati valne duljine. Bitno je napomenuti da WDM/PON ne povećava broj vlakana u magistrali, što je osnovna zamjera PTP sustava. Ovakav PON nudi na prvi pogled idealno rješenje za Metro mreže, a ovaj dobitak dodatno se plaća se investicijom u CWDM opremu.



Slika 10: Primjer primjene CWDM-a za ubrzanje PON sustava za faktor 8

6. PON standardi i klasifikacija PON-ova

PON-ovi su standardizirani ITU-T preporukama serije G.982, G983 i G.984 i IEEE 802.3ah. Sa stajališta Triple Play operatera, normizacija je prvenstveno motivirana smanjenjem troškova instalacije i održavanja. Sa stajališta Triple Play korisnika, normizacija jamči kvalitet i dijapazon usluga koje oni žele.

OLT centralni čvor šalje informacijske sadržaje ONT korisnicima u modu P2MP (Point To Multi Point) na predefiniranoj valnoj duljini "downstream" (1490–1550nm). To znači da zbog pasivne zvjezdaste topologije PON-a, korisnički signal dolazi do svih krajnjih ONT-a, iz čega i proizlazi dijeljenje prijenosnog kapaciteta glavnog čvora na predefinirani broj korisnika. Informaciju će, međutim, pročitati samo onaj čvor koji je adresiran, a od ostalih korisnika informacija je zaštićena kriptografskim algoritmima (mnogi smatraju da je zbog toga zaštićenost informacije u PON-u slaba).

"Upstream" promet, dakle od korisnika ka OLT čvorištu, koji se odvija na 1310nm, potrebno je međutim vremenski odijeliti od ostalih korisnika. Očito je da svaki ONT mora imati svoj odsječak u vremenu kada smije emitirati prema OLT-u, tipično 1/32 % vremena, odnosno 1/32 % prijenosnog pojasa (za PON 1:32). Potrebno je primijeniti neki od postupaka multipleksiranja, a koriste se ATM, TDM ili Ethernet rješenja. U **Tabeli 4.** prikazani su PON protokoli i pripadajući standardi.

	BPON	EPON	GPON
<i>Standard</i>	ITU-T G.983	IEEE803.2ah	ITU-T G.984
<i>Bandwidth</i>	Downstream up to 622Mbps Upstream 155Mbps	Up to symmetric 1.25Gbps	Downstream up to 2.5Gbps Upstream up to 2.5 Gbps
<i>Downstream λ (nm)</i>	1490 and 1550	1550	1490 and 1550
<i>Upstream λ (nm)</i>	1310	1310	1310
<i>Transmission</i>	ATM	Ethernet	ATM, Ethernet, TDM

Tabela 4. PON protokoli i standardi

Najstariji PON, tkzv. APON (ATM PON)-od g.1998., evoluirao je u **BPON (Broadband PON)**-od g.2001., i normiran je preporukama ITU-T G.983, te koristi ATM preklapanje za pridjeljivanje vremenskog otvora. U "downstream" smjeru brzine 622 MBit/s, BPON prenosi govor i podatke na 1490nm koristeći IP protokol na razini L3, a za prijenos videa rezervirana je posebna valna duljina od 1550nm. U "upstream" smjeru BPON je

asimetričan kao i ADSL, brzina je reducirana na 155 Mbit/s. Dozvoljeno je rasprezanje u omjeru 1:16 ili 1:32 uz pripadajuće domete od 20km, odnosno 20km. Nedostaci BPON-a su danas premašena brzina po korisniku (20-30 Mbit/s), veliki "overhead" ATM protokola i cijena. U razmatranju su, međutim, ubrzana rješenja BPON-a sa CWDM multipleksiranjem sa 16, odnosno 32 valne duljine (zbog dvosmjernog prijenosa, ubrzanje je dakle 8 puta, odnosno 16 puta!)

EPON (Ethernet PON)-od g.2004., je vjerojatno najprimamljiviji izbor, jer koristi najpopularniji protokol multipleksiranja, tzv. EFM (Ethernet in the First Mile), normiran po IEEE 802.3ah. EPON koristi samo dvije valne duljine, 1310-1550nm uz isključivo IP komunikacijski protokol na razini L3, na agregatnoj brzini od 1,25 Gbit/s. Odabirom Etherneta i IP kao komunikacijskih protokola ostvaruje se jednostavna i intuitivna integracija sa krajnjom korisničkom opremom, odnosno mreža postaje integrirana na razini L2-L3 protokola, a i upravljačka informacija je manje zahtjevna (svega 2-3% "overhead"). Moglo bi se reći da EPON zadovoljava trenutne informacijske potrebe, garantirajući pojaz od 80 Mbit/s po korisniku za normirano max 16 kanalno rasprezanje, a uz prosječno prometno opterećenje postiže se i do 100 Mbit/s i domet do 10km. Glad za prijenosnim pojasmom iznjedrila je najsuvremeniji **GPON (Gigabit PON)**-od g.2003., normiran preporukama ITU-T G.984. GPON ima agregatnu brzinu od 1,25-2,5 Gbit/s koju dijeli na 32-128 korisnika, jamčeći prijenosnu širinu od cca 20 – 80 Mbit/sec, u praksi prosječne vrijednosti najčešće premašuju 100 Mbit/s. Koristi se isti raspored valnih duljina kao i za BPON, što otežava primjenu CWDM rješenja. Za raspodjeljivanje pojasa na raspolaganju je izbor između paketnih ATM i Ethernet, odnosno vremenskog TDM protokola. Radi velikih agregatnih brzina, GPON koristi sprežnike u rasponu 1:32 do 1:128 (za razliku od EPON-a!), i domet mu je do 20km. Može se reći da je GPON iskombinirao najbolje osobine BPON/EPON-a.

Ukoliko se dijeljenje kapaciteta medija odabere Gigabit brzine po IEEE 802.3ah, tada govorimo o **GEPON-u (Gigabit Ethernet PON)**. Moglo bi se reći da GPON otklanja glavnu zamjerku PON-a, a to je brzina, pogotovo zato što se za prijenos videa koristi posebna valna duljina. Upitna postaje međutim investicijska vrijednost uvođenja GPON-a u odnosu na trivijalno PTP rješenje. Mišljenje autora ovog rada je da je GEPON najbolji izbor zbog efikasnosti Ethernet protokola i njegove univerzalnosti, ali i niže cijene od ATM/TDM GPON rješenja (zbog čega je najjači razvoj danas i usmjeren ka GEPON mrežama). Poštenja radi, treba ipak reći da su GEPON/EPON rješenja optimizirana za prijenos podataka, te da imaju veliki "overhead" (i do 25%) u konverziji TDM-a (E1/T1 & POTS), koji je danas još uvijek dominantan protokol u globalnoj telefonskoj mreži Telco operatera. U takvom okruženju bolje je primjeniti TDM GPON.

U **Tabeli 5:** prikazane su širine pojasa po PON korisniku koje se ostvaruje za različite varijante PON-a, sa i bez uporabe CWDM-a.

	Conventional PON Option 0		Lower split ratio PON Option 1		Full Spectrum CWDM/PON Hybrid Options 2 and 3		Full Spectrum CWDM PON Option 4	
Bandwidth Split ratio	32		8		4		1	
Feeder fibers per 32 HP	1		4		1		4	
Mb/s per Subscriber	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up
BPON	17	4	70	17	140	35	622	155
EPON	28	28	112	112	224	224	1,000	1,000
GPON*	70	35	280	140	560	280	2,422	1,244
10G PON (future?)	281	281	1,125	1,125	2,250	2,250	10,000	10,000

Tabela 5: Širine pojasa po korisniku za različite varijante PON-a

"Zastarjeli" BPON sa rasprezanjem 1:32 jamči inicijalno samo 17 Mbit/s "downstream", odnosno 4Mbit/s "upstream", a situacija je zadovoljavajuća ukoliko se smanji broj spregnutih korisnika na 8. Dodatnim umetanjem CWDM-a sa recimo 4 kanala, dobiva se hibridno rješenje sa ubrzanjem još 2x, dakle postiže se

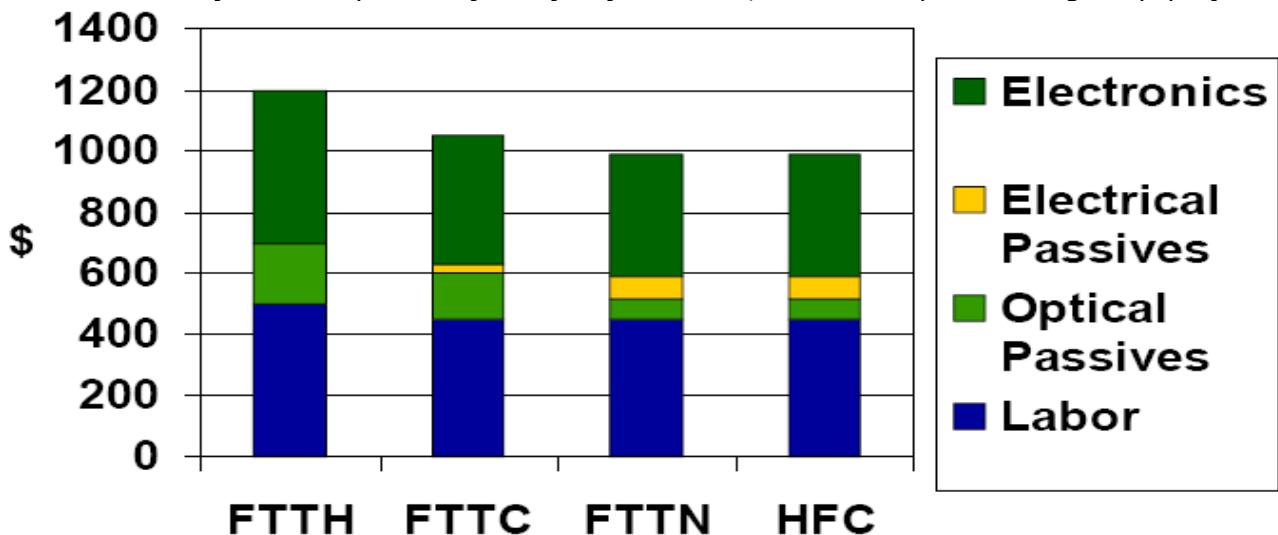
čak 140 Mbit/s. Ukoliko i to nije dovoljno, treba koristiti "čisti" 32 kanalni CWDM koji će svima omogućiti "logical path", dakle i punu brzinu BPON-a od 622/155 Mbit/s. Analogijom se mogu postići zavidne željene brzine za EPON, GPON (čak nevjerljivije za možda budući 10G PON!), pa primjedba na sporost PON-a postaje bespredmetna. Mišljenje je autora da od svih navedenih zamjernika PON-ovima ostaje samo jedna: kompleksnije projektiranje PON-a u odnosu na PTP trivijalno rješenje, i zatećeno stanje na terenu gdje se širokopojasna mreža obično počne razvijati kao "point-to-point" topologija (pa se tako i nastavi razvijati dokle ide, što je najčešće politika kratkog daha).

7. Ekonomска analiza implementacije pojedinih modela širokopojasnih mreža

Iz prethodnih analiza je očito da cijena "broadband" priključka raste sa stupnjem penetracije optičkog kabela od davaljatelja usluga prema korisniku usluga, ali i sa željenom širinom prijenosnog pojasa. Svim tehnologijama je zajednička prisutnost svjetlovodnog vlakna u manjoj ili većoj mjeri, osim možda ako se odlučite za bežično prenošenje (npr. sustav WiMAX normiran preporukom IEEE 802.16, kojeg smatram komplementarnim, a ne konkurentnim rješenjem, ostvaruje brzine i do 70 Mbit/s u dometu 10km).

Na **Slici 11.** prikazana je ekonomski usporedba pojedinih širokopojasnih tehnologija. Čiste optičke tehnologije, dakle **FTTH (Fiber To The Home)** i njegova inačica **FTTB (Fiber To The Building)** su još uvijek najskuplje, ali tehnički superiorne, sa globalnim trendom smanjenja cijene, naročito ako se mreža razvija kao PON. Sa stajališta zaštite investicije, FTTH/FTTB je najbolji izbor, ali treba reći da je rastuća primjena xDSL-a u osjetnoj mjeri usporila primjenu čistih optičkih mreža. Usprkos najvećoj cijeni i neskalabilnosti, davaljatelji usluga se vrlo često odlučuju za FTTH PTP optičke mreže tipa "point-to-point".

FTTB topologije također najčešće koriste "point-to-point" rješenje u magistrali, osiguravajući dedicirano vlakno zgradi ili skupini zgrada, koje su pak međusobno povezane strukturalnim kabelskim sustavom po ISO 11801 normi. Ovdje se radi o povezivanju zahtjevnijih korisnika, unutar većih poslovnih ili gusto popunjениh



Slika 11. Ekonomski usporedba pojedinih širokopojasnih tehnologija

stambenih objekata, kojima treba brzi priključak. Ovakvi objekti već imaju izведен strukturalni kabelski sustav brzine barem 100 Mbit/s (najmanje Cat5e), tako da distribuiranje informacije unutar zgrada nije problem. Idealna FTTB situacija jeste ukoliko je u zgradi izvedena monolitna optička kabelska instalacija sa optikom do radnog stola, tzv. "Fiber to the Desk", po normi IEEE TSB67- tada je moguće ostvarivati i Gigabitne brzine priključka. Druga krajnost su stare zgrade sa postojećim NF telefonskim paricama, kada treba lokalno ugraditi DSLAM sa odgovarajućim xDSL protokolom, sve naravno na uštrbu brzine krajnjeg korisnika. U svakom slučaju, FTTB izvedbe očito najčešće osiguravaju nižu cijenu priključka od FTTH, a davaljatelji usluga vole FTTB jer se radi o velikim korisnicima, pa je investicija u optičku magistralu opravdana. Približavanjem optičke magistrale na 150 metara do najčešće residualnih korisnika dobivamo **FTTC rješenje** kao hibridnu tehnologiju optika-bakar, gdje je uporaba bakrenih linija minimizirana. Ovo je najskuplja hibridna tehnologija, jer je potrebno vlakno povući daleko prema krajnjim korisnicima, ali su zato ostvarene veće prijenosne širine kanala. FTTC je zgodno primjeniti u nizovima vila i stambenih zgrada koje su relativno blizu, gdje je klijentela imućnija i može platiti skuplji, ali i brži priključak. Tipičan broj korisnika koje poslužuje

jedan FTTC ogrank je svega 8-12, iz razloga prostorne usmjerenosti (radius do 150 met!), a i zbog kratkih bakrenih dionica zahtjeve na pojas zadovoljavaju jeftinije ADSL, 2,2+ tehnologije, tipično 10-100Mbit/s. Ukoliko se ne može, ili ne želi optikom bliže prići do krajnjih korisnika, prestaje **FTTN rješenje**, kada se dozvoljavaju lokalne bakrene petlje duge i do 1.500 met. Ovo rješenje je ekonomičnije od FTTC, jer se najvećim dijelom koriste već postojeće telefonske parice, a grananje optičke magistrale je minimizirano. Jednim ogrankom FTTN-a poslužuje se veći broj korisnika, tipično par desetaka do par stotina, a za to je potrebno koristiti najbrže xDSL tehnologije: VDSL i VDSL2 (što vrlo često nije moguće, a praktične brzine rijetko prelaze 10-15 Mbit/s po priključku). Hibridne optičko-koaksijalne tehnologije HFC tipa čine najjeftinije rješenje, zato jer koriste postojeće koaksijalne CATV puteve.

8. ZAKLJUČAK

U zbirnoj **Tabeli 6.** prikazana je usporedba brzina svih navedenih "broadband" tehnologija u Mbit/s. Tabela ne uključuje PTP trivijalno rješenje jer ono daje istu brzinu kao i PON/CWDM kombinacija, dakle maksimalno 10 Gbit/s. Što dalje isturen optički kabel će uvjek rezultirati većom prijenosnom širinom i većom pouzdanošću komplettnog kabelskog sustava, uz veću kapitalnu investiciju. Odabir FTTH/FTTB osigurava i davatelju i primatelju Triple Play usluga miran san i zadovoljstvo u eksploataciji.

Upravo sada smo svjedoci strmog porasta implementacija FTTx rješenja u svijetu, pa i kod nas. Optički kabeli se polažu masovno i svakodnevno, koristi se svaki slobodan fizički put, bilo da se radi o kanalizaciji, direktnom ukopavanju, zračnome vodu ili se jednostavno koristi eter. Komunalna poduzeća sa razvijenom sebi svojstvenom specijalnom infrastrukturom pokušavaju naći tehničku mogućnost polaganja optičkog kabela i pružanja komunikacijskih usluga, iako im to nije primarna djelatnost. Svježe položeni kilometri

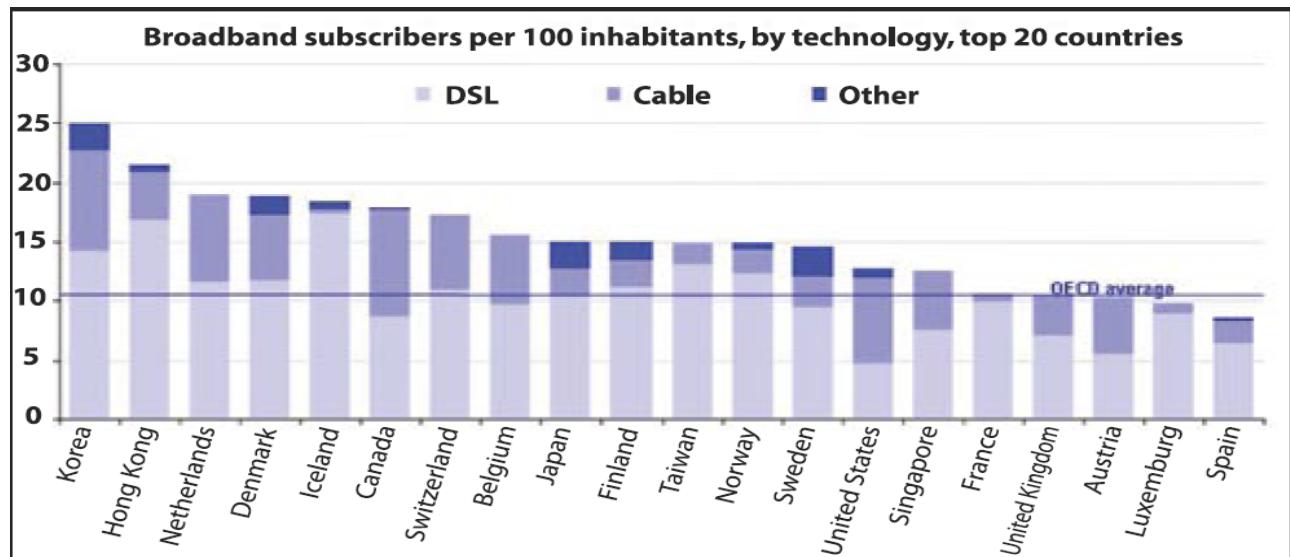
		Standard Service		Premium Service		Maximum Potential	
		Down	Up	Down	Up	Down	Up
FTTN	ADSL 5,000 ft	1.5	0.2	4	0.4	8	1
	ADSL2 5,000 ft	3	0.4	6	0.7	12	3.5
	ADSL 2+ 3000 ft	6	0.7	10	1.5	25	3.5
	VDSL 4500 ft	4	0.4	10	1	20	2
	VDSL 1500 ft	8	1	20	2	50	5
HFC	Cable Modem DOCSIS 1.0	2.1	0.1	6	0.4	10	0.6
	Cable Modem DOCSIS 2.0	5	0.2	10	0.5	30	1.5
	Cable Modem DOCSIS 3.0	NA	NA	NA	NA	200	100
FTTC	FTTC (500 ft Copper UTP)	1.5	0.2	10	1	100	100
FTTH	BPON 1:32 20 KM (60,000 FT)	9	2	26	7	10,000	10,000
	GPON 1:32	35	17	105	52	10,000	10,000
	EPON 1:32	14	14	42	42	10,000	10,000

Tabeli 6. Usporedba brzina svih navedenih "broadband" tehnologija u Mbit/s po korisniku

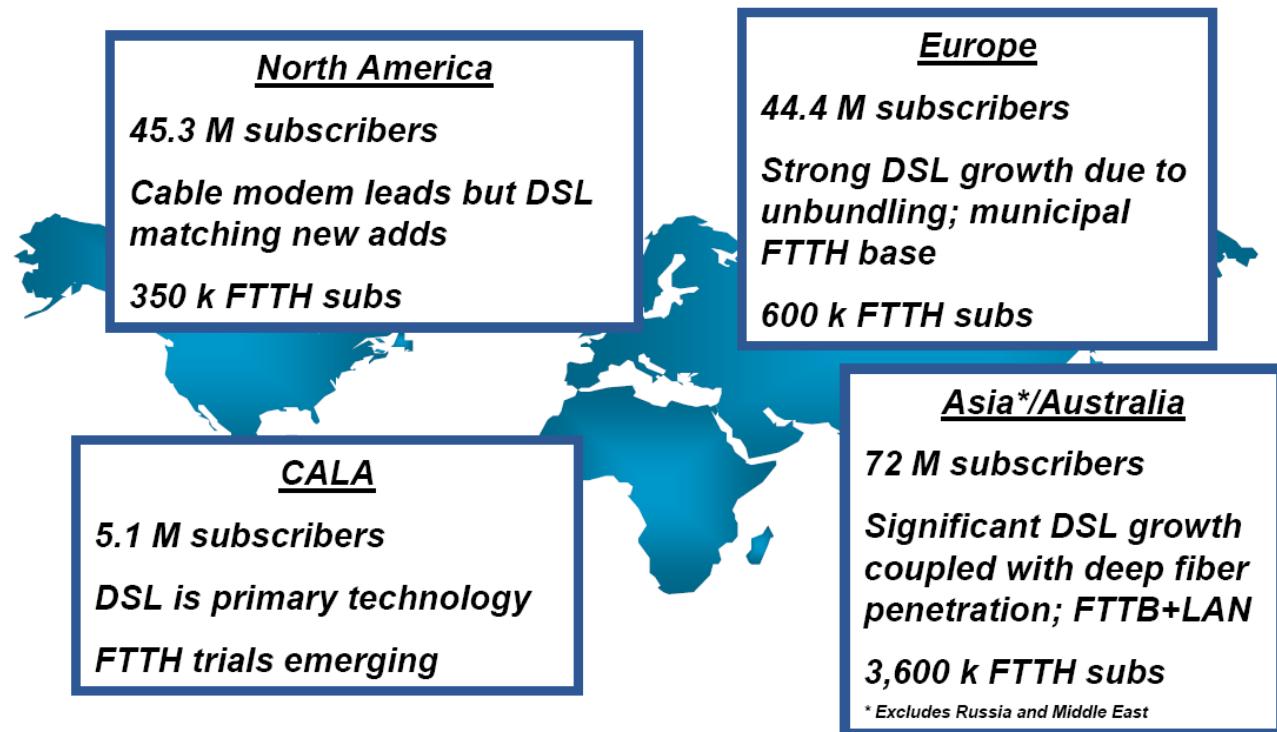
optičkog kabela uz želježničke šine ili energetske dalekovode, a sutra već i unutar izljevnih kanalizacijskih kolektora, svjedoče o ovoj gladi za prijenosnim pojasom i u Hrvatskoj. Reklamiraju se svakodnevno novi davatelji usluga. Na **Slikama 12. i 13.** prikazana je rasprostranjenost širokopojasnih mreža u svijetu, po državama i po kontinentima. Prednjače razvijene zemlje dalekog istoka i zatim zapadne Evrope, te SAD-a. Čistih FTTH korisnika ima najviše u Aziji, trenutko oko 4 miliona, dok u Evropi tradicionalni xDSL usporava širu primjenu optike.

Prave Triple Play i FTTx mreže u Hrvatskoj nastaju tek sa integracijom usluge video prijenosa uz već postojeće VoIP i Internet veze. U ovom trenutku kod nas postoji par tisuća FTTx priključaka različitih pružatelja usluga, npr. "T-Com" MAXtv koji koristi FTTN-ADSL tehnologiju ili "Vodatel"-ov Triple Play paket, koji se isporučuje jednim jedinim svjetlovodnim vlaknom u tehnologiji FTTB/FTTH-PTP WDM tipa. Iako se

radi o početnim instalacijama, biti će interesantno napraviti analizu prisutnosti "broadband"-a već krajem g.2007.



Slika 12. Rasprostranjenost širokopojasnih mreža po državama svijeta uprosječeno na 100 stanovnika



Slika 13. Rasprostranjenost širokopojasnih mreža po kontinentima i tehnologijama

LITERATURA

- /1/ *Sead Dubravić "Primjena optičkih kabela u lokalnim računalnim mrežama po standardima ISO"*, , KOM'95: Zbornik radova sa Savjetovanja, 1995
- /2/ *Sead Dubravić "Projektiranje i izgradnja monolitnih optičkih kabelskih sustava"*, KOM'97: Zbornik radova sa Savjetovanja, 1995
- /3/ *Bob Lund "A Comparison of PON and Point-to-Point Optical Acecess Networks"*, www.opticalsolutions.com, 2000
- /4/ *M. Klimek, "ATM Passive Optical Network"*, Alcatel Telecommunications Review", 2002
- /5/ *Paul Whittlesey "Fiber to the Curb and Beyond"*, WaveOptics, 2002
- /6/ *W.J.Goralski, "SONET – a Guide to Synchronous Optical Networks"*, Macgraw Hill, pp. 371-439,

Podaci o autoru:

mr Sead Dubravić

**NETIKS d.o.o. za telekomunikacije i informatiku , E-mail: sdubravic@netiks.hr , www.netiks.hr,
Sarajevska cesta 60, 10.000 ZAGREB, tel (01)6652940, 6652920, fax (01)6652902**