

Željko Popović

Ericsson Nikola Tesla d.d., Zagreb, Hrvatska
Ericsson Nikola Tesla d.d., Zagreb, Croatia

SLJEDEĆA GENERACIJA PASIVNIH OPTIČKIH MREŽA

NEXT GENERATION OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS

Sažetak

Gigabitna pasivna optička mreža (GPON – eng. Gigabit Passive Optical Network) je trenutačno na tržištu jedna od najbrže rastućih pristupnih tehnologija. Ovaj rad opisuje aktualno stanje i buduće mogućnosti GPON-a. Evolucija i standardizacija GPON-a nudi mnoge nove mogućnosti koje će podržati buduće širokopojasne pristupne mreže i usluge. Migracija će biti omogućena planiranjem valnih duljina dopuštajući koegzistenciju više GPON-a ili koegzistenciju postojećeg GPON sustava i 10G GPON sustava u istoj optičkoj distribucijskoj mreži. Većina se slaže da će u bližoj budućnosti pristupne mreže temeljene na multipleksiranju s valnom podjelom (WDM – eng. Wavelength-division multiplexing) omogućiti nove generacije optičkih širokopojasnih pristupa. Ericsson razvija sljedeću generaciju tehnologija pasivnih optičkih mreža (PON – eng. Passive Optical Network), uključujući 10G GPON i WDM-PON.

Abstract

Gigabit Passive Optical Network (GPON) is currently one of the fastest access technologies to attract market interest. This paper describes the current status and future possibilities with GPON. The GPON evolution and standardization offers many new capabilities that will support broadband access networks and services for the future. Migration will be enabled by wavelength planning allowing for co-existence of multiple GPON's and/or 10G GPONs in the same optical distribution network. In the near future, it is in general agreed that WDM based access networks will be enabling the next-generation optical broadband access. Ericsson is developing next generation PON technologies, including 10G GPON and WDM-PON.

KLJUČNE RIJEČI:	KEY WORDS:
Gigabitne pasivne optičke mreže (GPON)	Gigabit Passive Optical Network (GPON)
Multipleksiranje s valnom podjelom (WDM)	Wavelength-division multiplexing (WDM)
Sljedeća generacija PON-a (NG-PON)	Next generation PON (NG-PON)

1 Uvod

Procjenjuje se da su današnje potrebe privatnih korisnika za komunikacijom podacima 100 Mbit/s u dolaznom smjeru (eng. downstream) te 30 Mbit/s u dolaznom smjeru (eng. upstream). Ti zahtjevi uglavnom proizilaze iz triple play usluga koje objedinjavaju prijenos govora, podataka i videa.

Nove usluge kao što su video na zahtjev (VoD – eng. Video on Demand), interaktivna IPTV, HDTV (eng. High Definition Television), 3D TV, videokonferencija više sudionika, telemedicina i ostale aplikacije koje zahtijevaju značajniji kapacitet, zasigurno će biti glavni pokretač razvoju sljedeće generacije pristupnih mreža koje će moći zadovoljiti sve veće zahtjeve u pogledu brzine prijenosa. Sasvim su realne procjene da će u skoroj budućnosti zahtijevana brzina po kućanstvu biti 1 Gbit/s.

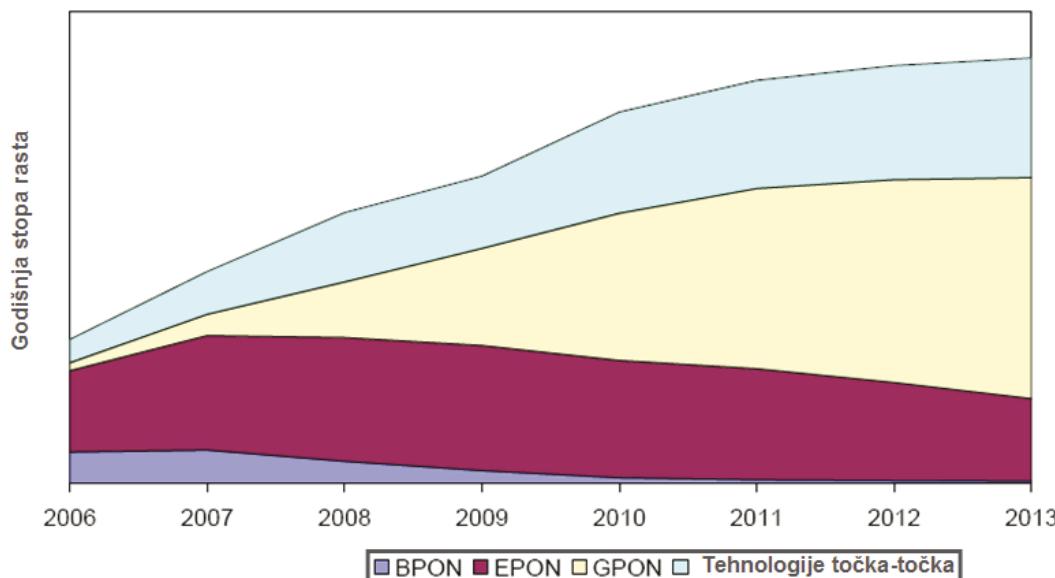
Nadalje, sve su veći zahtjevi i na simetričnost (dolazni i odlazni smjer prijenosa).

Prevladavajuća, danas implementirana rješenja širokopojasnih pristupnih mreža su mreže temeljene na digitalnoj pretplatničkoj liniji (DSL – eng. Digital Subscriber Line) i kabelskoj TV (CATV). Međutim, obje ove tehnologije imaju ograničenja jer su temeljene na infrastrukturi koja je primarno namijenjena prijenosu govora i analognog TV signala.

S obzirom na ograničenja postojećih bakrenih parica, nemoguće je svim paricama u nekom kabelu pridijeliti neku DSL tehnologiju, jer bi u takvom scenariju međusobni štetni utjecaji (tzv. preslušavanja) između parica u kabelu bili preveliki i dodatno bi ograničili domet i kvalitetu prijenosa. Nadalje, zbog zasićenosti, svi korisnici nemaju istu kvalitetu usluge širokopojasnog pristupa internetu i IP televizije te pojedine bakrene parice čak ni ne podržavaju navedene usluge.

U narednom je razdoblju za očekivati da će operatori ulagati u optičku pristupnu infrastrukturu, a sve s ciljem zadovoljenja potreba korisnika, odnosno kako bi bili u mogućnosti ponuditi široki opseg usluga kao što su prijenos višekanalskog HDTV-a, videa na zahtjev i videokonferencija te usluga prijenosa govora putem internetskog protokola (VoIP).

Predviđanja su da će u sljedećih par godina u svijetu značajno porasti broj pasivnih optičkih mreža (PON) uz dominaciju sustava GPON (Gigabit Passive Optical Network) kao optičke pristupne tehnologije. Ostale tehnologije kao što su BPON (Broadband PON) i EPON (Ethernet PON) bit će u narednim godinama prisutne na tržištu ali uz znatno manji porast (Slika 1.).



Slika 1: Predviđanja porasta različitih optičkih pristupnih tehnologija

Prihvaćenost GPON tehnologije uzrokovana je sljedećim razlozima:

- » GPON podržava najveće brzine prijenosa te široki raspon aplikacija i usluga, a naročito je pogodan za video i TV usluge.
- » GPON se može primijeniti u različitim mrežnim arhitekturama: u kombinaciji s VDSL2 (eng. Very high speed Digital Subscriber Line 2) u arhitekturi FTTC (eng. Fiber to the Curb) ili u arhitekturi FTTH (eng. Fiber to the Home) za rezidencijalni pristup.

Međutim, i postojeće optičke pristupne mreže imaju ograničenja u pogledu garantiranog propusnog pojasa i kvalitete usluge pa u doglednoj budućnosti neće moći zadovoljiti rastuće zahtjeve na kapacitet koji je potreban za nadolazeće usluge. Stoga je važno definirati jednostavan i efikasan evolucijski put od postojećih PON sustava ka sljedećoj generaciji PON sustava, bez značajnijih promjena u instaliranoj optičkoj infrastrukturi.

U Ericssonovom rješenju GPON je integralni dio Full Service Broadband arhitekture, koja je dizajnirana da bi se zadovoljile potrebe fiksno-mobilne konvergencije i sljedeće generacije mreža za rezidencijalne i poslovne segmente.

Evolucija i standardizacija GPON-a nudi nove mogućnosti za buduće širokopojasne pristupne mreže i usluge. Sljedeći korak u evoluciji GPON-a je povećanje brzine prijenosa sa sadašnjih 2.5 Gbit/s na 10 Gbit/s u dolaznom smjeru te s 1.2 Gbit/s na 2.5 Gbit/s u odlaznom smjeru. Migracija je omogućena planiranjem valnih duljina koje dozvoljavaju koegzistenciju više GPON sustava ili koegzistenciju postojećeg GPON sustava i 10G GPON sustava u istoj optičkoj distribucijskoj mreži (ODN – eng. Optical Distribution Network).

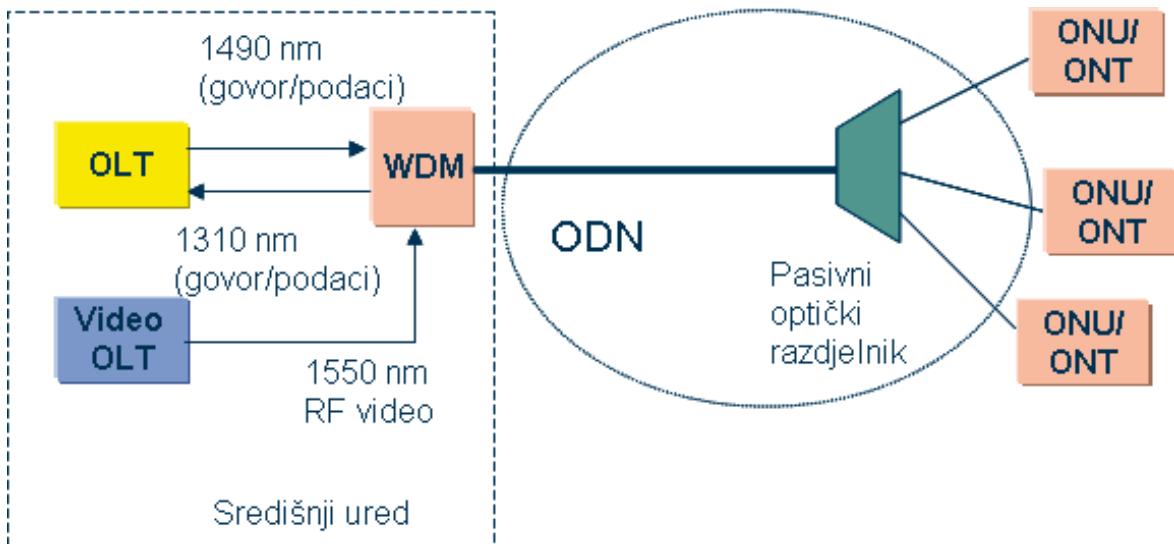
Mnogi operatori i proizvođači opreme smatraju da je dugoročno najpogodnija tehnologija za pasivne optičke mreže WDM-PON (eng. Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network), gdje topologija PON-a podržava logičke veze od točke do točke (P2P – eng. Point-to-Point). WDM-PON ima velike prednosti u pogledu brzine prijenosa, fleksibilnosti i sigurnosti, međutim, zbog visoke cijene u odnosu na GPON, danas je na tržištu mali broj instalacija. Prisutna su intenzivna istraživanja i razvoj optičkih komponenata što će u doglednoj budućnosti značajno smanjiti troškove i cijenu WDM-PON sustava.

Sve više operatora danas razmatra konsolidaciju središnjih ureda (CO – eng. Central Office), odnosno smanjenje broja središnjih ureda u pristupnoj mreži. Na taj način bi se znatno smanjili operativni troškovi (OPEX) i pojednostavila pristupna mreža. Prisutne su mnoge razvojne aktivnosti za proširenje dometa u postojećim GPON mrežama.

2 Svojstva PON mreža

Općenita karakteristika pasivnih optičkih mreža je nepostojanje aktivnih komponenti u distribucijskoj mreži. Optičko linijsko zaključenje (OLT – eng. Optical Line Termination) je aktivna komponenta smještena u središnjem uredu CO, dok se na strani korisnika nalaze optičke mrežne jedinice (ONU – eng. Optical Network Unit) ili optički mrežni terminali (ONT – eng. Optical Network Terminal).

Osnovna prednost korištenja pasivnih optičkih mreža pred optičkim poveznicama od točke do točke leži u uštedama pri izgradnji kabelske infrastrukture, jer uporaba PON-a smanjuje potrebnu količinu optičkih vlakana. Snaga signala koji se šalju prema krajnjim korisnicima dijeli se u omjeru 1:N, pri čemu je N broj krajnjih korisnika vezanih na pasivni optički razdjelnik (eng. passive optical splitter). Optički razdjelnici se mogu smjestiti u blizini OLT-a ili bliže krajnjim korisnicima, ovisno o raspoloživosti optičke infrastrukture ili o operatorskoj strategiji implementacije PON-a. Općenito, pasivne optičke mreže se temelje na tri mrežne topologije: FTTH (eng. Fiber To The Home), FTTB (eng. Fiber To The Building) i FTTC (eng. Fiber To The Curb). Generička arhitektura PON sustava prikazana je na slici 2.



Slika 2: Generička arhitektura PON-a.

Kod pasivnih optičkih mreža utemeljenih na vremenskom multipleksiranju (TDM-PON) podaci se u smjeru prema krajnjem korisniku prenose načelom razašiljanja (broadcast), dok se u smjeru od korisnika prema mreži podaci prenose višestrukim pristupom TDMA (Time Division Multiple Access), tj. ukupni raspoloživi pojas poveznice koja povezuje OLT s ONU-om dijeli se između krajnjih korisnika. O broju krajnjih korisnika ovisi kolika će im prijenosna brzina biti na raspolaganju (nije definirana gornja granica na krajnji broj korisnika). Međutim, praktično ograničenje na krajnji broj korisnika predstavlja maksimalno pristupno kašnjenje (eng. access delay). Sukladno tome broj krajnjih korisnika po jednom razdjelniku obično ne prelazi 64.

Kod odlaznog smjera sve jedinice ONU/ONT međusobno su sinkronizirane. Taj se proces naziva rangiranje (eng. ranging). Jedinica OLT određuje vremenski odsječak u kojem će njoj pridružena jedinica ONU/ONT slati svoje informacije. Rangiranje se obavlja za vrijeme aktivacije optičkih jedinica ONU/ONT, a može se obavljati i za vrijeme rada.

Jedno od velikih prednosti PON-a je činjenica da može podržati razne brzine prijenosa i razne usluge bez promjena optičkih komponenti između središnjeg ureda CO i preplatničkih krajnjih uređaja. Ovo predstavlja jednostavno rješenje za optičku distribucijsku mrežu (ODN – eng. Optical Distribution Network). Nadalje, nema zahtjeva za napajanje, kontrolu temperature i održavanje kabinetra, što znatno smanjuje operativne troškove (OPEX).

Sva tri PON standarda su slična. Svi koriste jednostavni valni multipleks za rad u potpunom dupleksu (istovremeni promet u dolaznom i odlaznom smjeru) preko jednog optičkog vlakna, gdje se za dolazni smjer koristi valna duljina od 1490 nm, a za odlazni smjer valna duljina od 1310 nm. Za razašiljanje (eng. broadcast) TV signala rezervirana je dodatna valna duljina od 1550 nm.

Ovisno o mehanizmu korištenom za prijenos podataka optičkim vlaknima, definirano je nekoliko vrsta sustava TDM-PON, a to su BPON, GPON i EPON. Iako sva tri sustava rade na istim principima, postoji nekoliko razlika (tablica 1).

	EPON	BPON	GPON
Standard	IEEE 802.3ah	ITU-T G.983	ITU-T G.984
Protokol	Ethernet	ATM	Ethernet, TDM
Brzine (Mbit/s)	100, silazno i uzlazno	622 silazno, 155 uzlazno	2488 silazno, 1244 uzlazno
Razmak (km)	10	20	20
Odnos dijeljenja	16 ili 32	32	32 ili 64

Tablica 1: Usporedba PON sustava

Dva glavna tijela za standardizaciju pasivnih optičkih mreža su IEEE (Institute of Electrical & Electronics Engineers) i ITU-T. IEEE je odgovoran za standardizaciju EPON-a, a ITU-T (International Telecommunication Union - The Telecommunication Standardization Sector) je odgovoran za standardizaciju GPON-a. Iako je ITU službeno standardizacijsko tijelo odgovorno za standardizaciju BPON-a i GPON-a, većina aktivnosti na standardizaciji se odvija unutar grupe FSAN (Full Service Access Network). FSAN je grupa telekomunikacijskih operatera i proizvođače opreme koji su aktivno angažirani u definiranju zahtjeva i pripremi standarda za GPON, a koje ITU prihvata i ratificira.

Jedan od razloga veće prihvaćenosti GPON tehnologije na tržištu u odnosu na EPON je upravo u tome što GPON standardi odražavaju potrebe operatora.

2.1 Arhitektura GPON-a

Gigabitna pasivna optička mreža GPON (Gigabit Passive Optical Network) je evolucija BPON standarda, a standardizirana je serijom preporuka ITU-T G.984.x.

GPON podržava veće brzine prijenosa, povećanu sigurnost i veću efikasnost kod prijenosa različitih usluga.

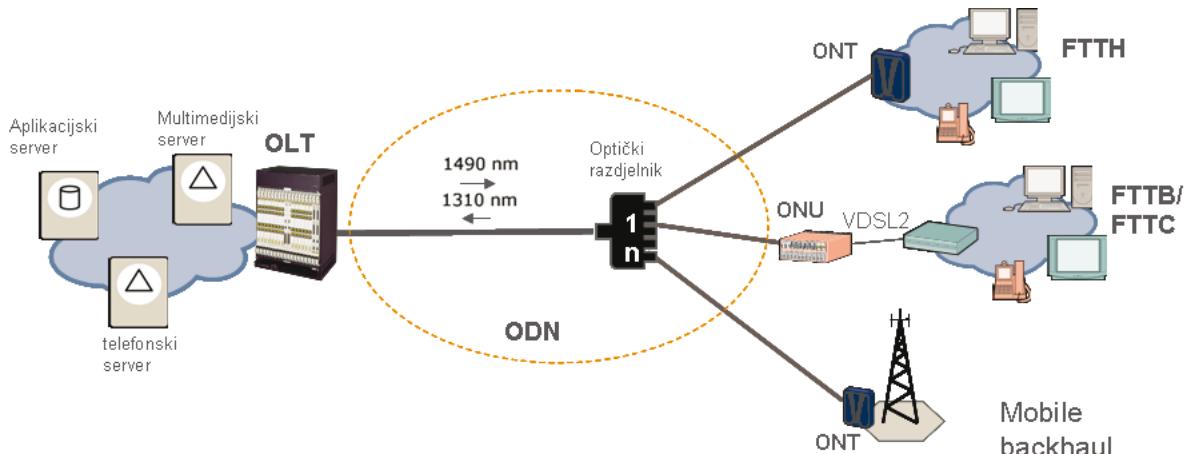
Iako standardi G.984.x dozvoljavaju izbor različitih brzina, uobičajeno brzina u dolaznom smjeru je 2.488 Gbit/s, a u odlaznom smjeru 1.244 Gbit/s.

ITU-T standard	Datum donošenja	Opis
G.984.1	03-2003 03-2008	Osnovna svojstva GPON mreža
G.984.2	03-2003	Specifikacije fizičkog sloja
G.984.3	03-2004 03-2008	Specifikacije prijenosnog sloja
G.984.4	06-2004 02-2008	Specifikacije sučelja za upravljanje i kontrolu ONT-ova
G.984.5	09-2007	Napredni pojas valnih duljina
G.984.6	03-2008	Produljenje dometa

Tablica 2: GPON standardizacija

Sustav GPON se sastoji od optičkog linijskog zaključenja OLT koje je obično smješteno u središnjem uredu CO, i većeg broja optičkih mrežnih terminala ONT koji se smještaju kod korisnika. Moguće je koristiti i optičku mrežnu jedinicu ONU u slučajevima kombiniranja s ostalim pristupnim tehnologijama (VDSL2, radio, kategorija kabela 5 i 6). Ove komponente GPON sustava su aktivne jer zahtijevaju električno napajanje. Optička distribucijska mreža ODN sadrži optička vlakna i optičke djelitele, a ove komponente su potpuno pasivne te ne zahtijevaju električno napajanje. Ovo znatno smanjuje kapitalne troškove (CAPEX) kao i operativne troškove (OPEX).

Na slici 3. prikazan je tipičan GPON sustav i korištenje različitih arhitektura (FTTH, FTTC, FTTB i Mobile Backhaul).



Slika 3. Arhitektura GPON sustava

Središnji terminal (OLT) s pasivnim optičkim razdjelnikom povezuje jedno optičko vlakno. Optički razdjelnik je uređaj koji ima jedan ulaz te 2^n (tipično 32) izlaza. Optička snaga signala na ulazu u razdjelnik raspodjeljuje se jednakom među izlazima razdjelnika pri čemu je optička snaga na svakom izlazu u odnosu na ulaz reducirana za faktor $n \times 3.5 \text{ dB}$ ($10 \log 2^n = n \times 10 \log 2$; 0.5 dB dodano je kako bi se uključili gubici u razdjelniku). Od optičkog razdjelnika do svakog korisnika dolazi po jedna optička nit. Prijenos podataka putem optičke niti od središnjeg ureda do pojedinog korisnika može se ostvariti na udaljenostima do 20 km.

Optička distribucijska mreža ODN je sastavljena od optičkih vlakana i pasivnih optičkih razdjelnika. Pasivna optička mreža omogućuje dijeljenje jedne svjetlovodne niti između više korisnika, s tim da se u takvoj mreži nalaze isključivo pasivni elementi. Omogućeno je da signal na optičkom vlaknu bude razdijeljen na više optičkih vlakana, kao i obrnuti slučaj, da se više optičkih signala kombinira u jedno optičko vlakno. Ako se za dvostruku komunikaciju koristi jedno optičko vlakno, dolazni i odlazni signali se razlikuju u valnim duljinama.

Preporuke G.983.3 i G.984.2 klasificiraju optičke distribucijske mreže u klase A do C, ovisno o iznosu gubitaka, odnosno optičkom prigušenju. Preporuke specificiraju parametre za optičko sučelje za svaku klasu. Maksimalni gubici za klase A, B i C su definirani kao 20, 25 i 30 dB.

Donedavno je klasa B+ imala najveće gubitke od 28 dB. U sustavu BPON specificirana je maksimalna udaljenost prijenosa od 20 km za broj dijeljenja 16 ili 32. Za sustav GPON udaljenost prijenosa je 20 km, a opcionalno 10 km, a broj dijeljenja je 16, 32 i 64. Ako odnos između broja dijeljenja i klase ODN-a nije izričito specificiran, klase A i B otprikljike odgovaraju broju dijeljenja od 16, dok klase B+ i C odgovaraju broju dijeljenja od 32 i više.

U sustavu GPON, danas je raspoloživa klasa C+ za ODN, koja osigurava omjer dijeljenja 1:64 na udaljenostima od 20 km.

U optičkoj distribucijskoj mreži postoje više izvora prigušenja. U sustavu GPON najveći izvori gubitaka su u pasivnom optičkom razdjelniku. U idealnom razdjelniku gubitak snage je 3 dB za svako dijeljenje, što u najčešćem slučaju, kod korištenja razdjelnika s omjerom dijeljenja 1:32, rezultira ukupno unesenim gubicima razdjelnika od 17,5 dB. U taj su iznos uračunati i gubici zbog starenja komponenti razdjelnika te gubici zbog promjene temperature.

Ostali izvori gubitaka u ODN-u su konektori, spojevi (eng. splices), gubici u optičkom vlaknu i gubici u WDM sprežniku. Gubici u ODN-u uglavnom ovise o udaljenosti (tj. o duljini optičkog vlakna) i broju dijeljenja na optičkom razdjelniku. Tipične vrijednosti gubitaka snage u ODN-u prikazane su u Tablici 3.

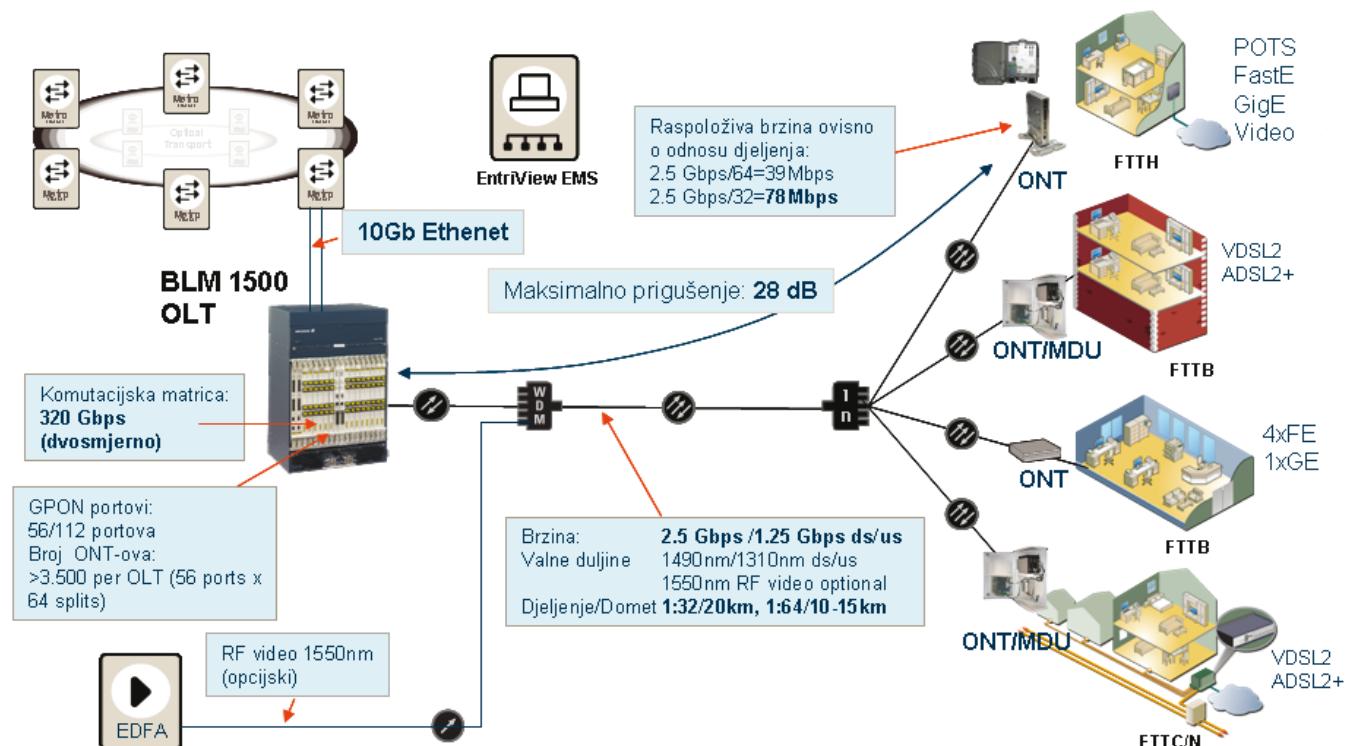
KOMPONENTA ODN-a	PRIGUŠENJE (dB)
Optički razdjelnik	17,5
Konektori, spojevi	1,5
Sprežnik	1,0
Optičko vlakno (SMF) 1310 nm 1490 nm 1550 nm	0,35/km 0,22/km 0,19/km

Tablica 3. Tipične vrijednosti gubitaka snage u ODN-u

Podaci se odnose za jednomodno optičko vlakno SMF (Single Mode Fiber) koje se u praksi najčešće koristi. Gubici ovise o valnoj duljini signala, tako da su ukupni gubici manji u dolaznom smjeru.

2.1.1 Ericssonovo rješenje GPON-a

Ericssonovo rješenje za GPON, sustav EDA 1500, dio je FSB (Full Service Broadband) arhitekture (slika 4), dizajnirane da bi se zadovoljile potrebe fiksno-mobilne konvergencije i sljedeće generacije mreža za rezidencijalne i poslovne segmente [2].



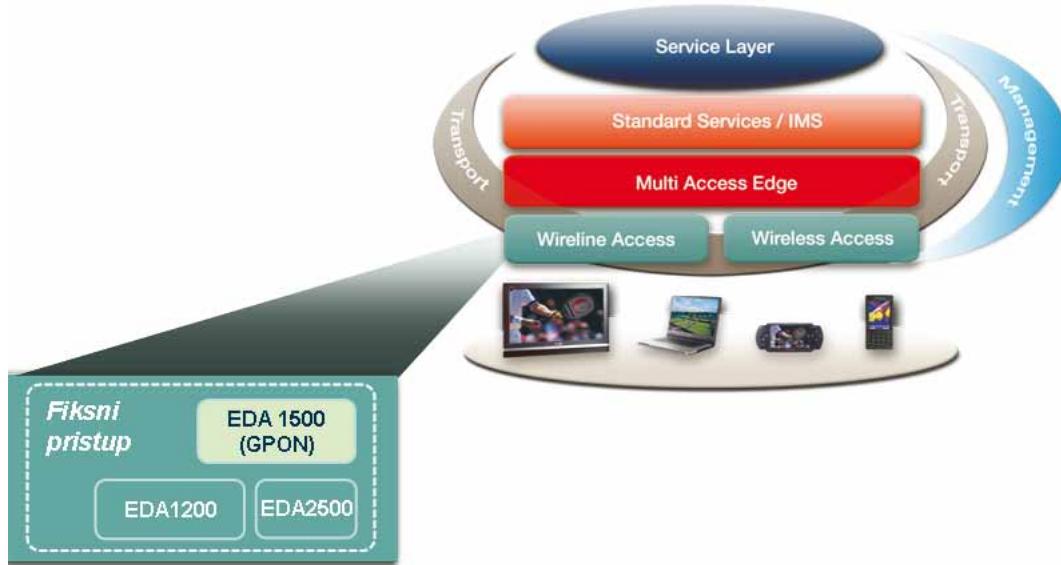
Slika 4. Full Service Broadband arhitektura

Rješenje EDA 1500 je u potpunosti uskladeno i temeljeno na specifikacijama standarda ITU-T G.984.x.

EDA 1500 osigurava skalabilno rješenje pristupne optičke mreže i omogućava jednostavnu evoluciju ka sljedećoj generaciji pasivnih optičkih pristupnih mreža.

Sustav se sastoji od optičke linijske jedinice BML 1500 i raznih tipova optičkih mrežnih terminala ONT/ONU [15]. Osnovne karakteristike EDA 1500 prikazane su na Slici 5.

Rješenje EDA 1500 se može primjeniti za sve scenarije: FTTH, FTTC, FTTB i aplikacije za poslovne korisnike. FTTC/FTTB se može unaprijediti s VDSL2 i Cat 5-6.



Slika 5. GPON rješenje EDA 1500

3 Sljedeća generacija PON-a

Gigabitne pasivne optičke mreže poput G-PON (ITU-T G.984 serija) i EPON (IEEE 802.3ah) su standardizirane i već se implementiraju. Najopćenitiji zahtjev za nove generacije PON (NG-PON) jest osiguranje znatno većih kapaciteta od G-PON i E-PON. S obzirom da su sustavi G-PON i E-PON već implementirani i u radu, a NG-PON još nije raspoloživ te s obzirom na velika potrebna ulaganja za implementaciju pasivne optičke mreže, drugi važan zahtjev se odnosi na potpunu migraciju korisnika s GPON na NG-PON. Nove tehnologije trebale bi podržati postojeće usluge kupcima te, još važnije nove tehnologije trebaju biti jeftine.

Postoji više migracijskih scenarija ovisno o različitim potrebama operatora. Najvjerojatniji scenarij je postupno uvođenje NG-PON-a u kojem mrežni operatori u početku mogu ponuditi novu uslugu koristeći NG-PON. Dio korisnika u sustavu GPON koji su zainteresirani za veće brzine prijenosa i napredne usluge mogu se migrirati na NG-PON, dok ostali korisnici koji su zadovoljni s postojećim uslugama ostaju na postojećim GPON sustavu. Iako neki mrežni operateri mogu raditi "prisilne migracije" iz GPON na NG-PON, vjerojatno će u posljednjoj fazi, kada broj preplatnika GPON-a postane mali, oba sustava, GPON i NG-PON, i u ovom scenariju koegzistirati relativno dugo vremena.

Opći zahtjevi za ovaj scenarij su:

- » koegzistencija između GPON i NG-PON sustava u istoj optičkoj distribucijskoj mreži,
- » minimalan prekid usluga korisnicima u slučaju nadogradnje sustava na NGPON,
- » NG PON mora podržavati sve postojeće usluge u slučaju potpune migracije.

NG-PON će ponuditi veće prosječne brzine po preplatniku u odnosu na GPON.

Sasvim drugačiji scenarij može biti u kojem je operator motiviran proširenjem broja korisnika (veći omjer dijeljenja) i smanjenjem operativnih troškova pristupne mreže što postiže uvođenjem sustava NG-PON. Operator može instalirati NG-PON sustav kao potpuno novu mrežu ili kao zamjenu postojeće GPON mreže. U ovom slučaju, koegzistencija sa postojećim GPON-om možda neće biti zahtijevana, jer zamjena može biti sustavno obavljena u relativno kratkom vremenu.

4 Evolucija GPON-a

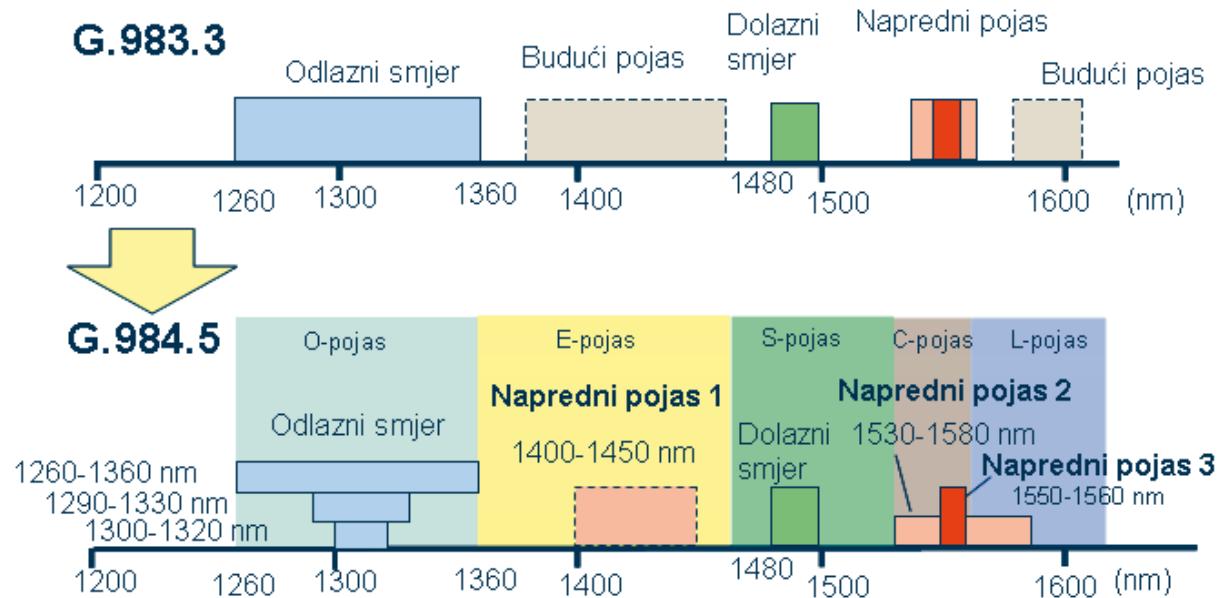
Standardizacijska tijela IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) i ITU su trenutačno aktivno uključena u razvoj sljedeće generacije PON-a. IEEE standardizacija za NGPON se razvija unutar grupe 802.3, a posebno unutar 802.3av. IEEE NGPON aktivnosti su usmjerene na 10G PON kao sljedeću evolucijsku izvedenicu iz postojeće 1G PON. Standard 802.3av je kompletiran i ratificiran u rujnu 2009.godine, a komercijalna rješenja bi se mogla pojaviti na tržištu već 2010. godine.

Unutar FSAN, postoje dvije razvojne faze na NGPON. Prvi razvojni staza (NG-PON1) sadrži razvoj NGPON-a koji mogu koegzistirati s trenutačnim GPON sustavom. Ovaj model prepostavlja da operatori nemaju svjetlovodnu infrastrukturu potrebnu za podršku kompletne prekrivajuće mreže. Druga, dugoročna razvojna faza (NG-PON2) istražuje mogućnosti poput DWDM-PON i brzine do 40 Gbits/s. Ovaj model prepostavlja da će se implementirati potpuno nova distribucijska mreža ODN.

	IEEE 802.3av 10G EPON	ITU-T/FSAN 10G GPON
Brzina u dolaznom smjeru	10 G	10G
Brzina u odlaznom smjeru	1G ili 10G	2.5 G (XGPON1) ili 10G (XGPON2)
Silazna valna duljina	1575-1580 nm	1575-1580 nm
Uzlazna valna duljina	1G: 1260-1360 nm (ista kao EPON) 10G: 1260-1280 nm	2.5G: 1260-1280 nm 10G: u razmatranju

Tablica 4: Usporedba 10G EPON i 10G GPON

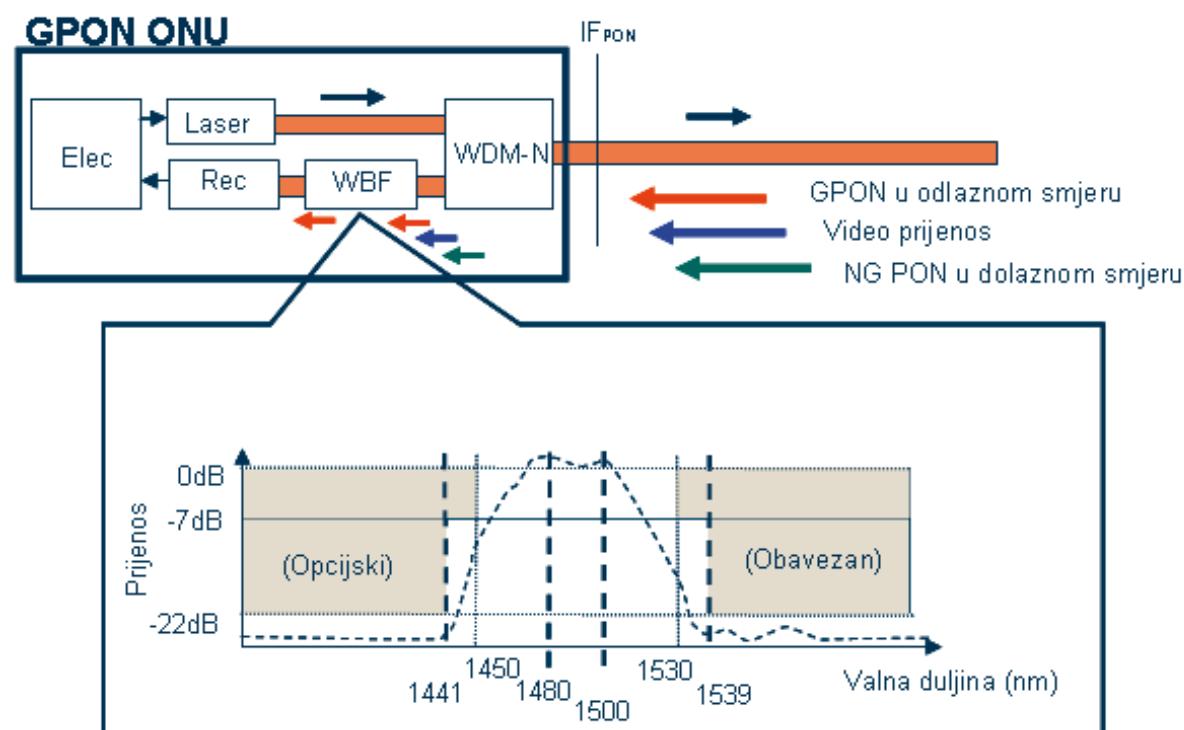
Područje valnih duljina u GPON sustavu specificirano je u preporuci G.984.2 Za dolazni signal specificirane su valne duljine od 1480 nm do 1500 nm a za odlazni signal 1260 nm do 1360 nm. Preporuka G.984.5 definira rezervirani pojedinačne valne duljine te specificira odstupanje za interferencije signala za optičke mrežne jedinice (ONU) kako bi se omogućila koegzistencija GPON-a i dodatne usluge, uključujući sljedeću generaciju pristupa i video usluge. Plan dodjeljivanja valnih duljina, uključujući pojaseve rezervirane za dodatne usluge, prikazan je na slici 6.



Slika 6. Raspodjela valnih duljina prema ITU-T G.984.5

Raspon valne duljine u GPON-u za dolazni signal je naveden kao „temeljni pojas“. Rezervirani opsezi su navedeni kao „napredni pojasi“. Aplikacije za napredni pojase uključuju video usluge i usluge sljedeće generacije pristupa. Raspon valne duljine za video usluge ostaje isti kako je definirano u preporuci G.983.3.

Postoji nekoliko tipova ODN arhitekture koje omogućavaju koegzistenciju G-PON sustava i dodatnih usluga uključujući sljedeću generaciju pristupa (NGA – eng. Next Generation Access) kao i usluge video distribucije. Na slici 7. prikazana je referentna arhitektura jedinice ONU gdje je pretpostavljeno korištenje filtera za blokiranje valnih duljina (WBF) u slučaju kada G-PON i NGA koriste istu optičku distribucijsku mrežu.



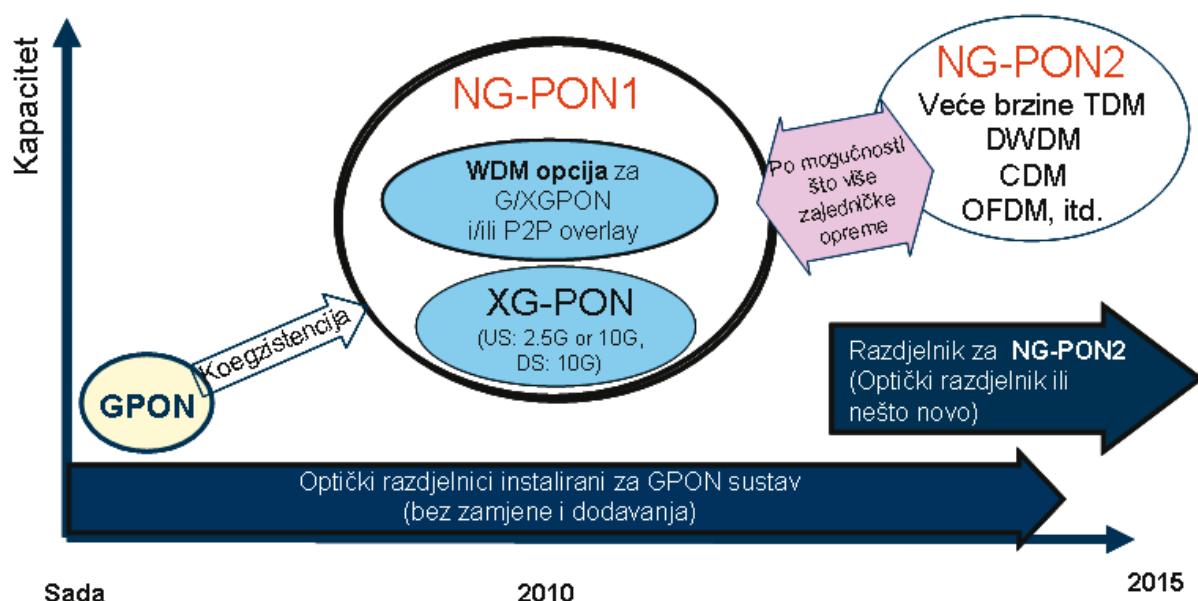
Slika 7: Filter za blokiranje valne duljine u ONU

Razmatrajući mogući scenarij koji dozvoljava koegzistenciju GPON-a, NGA i video usluga, pretpostavljeno je da su potrebni dodatni zaštitni opsezi.

Iako se smatra da će nekoliko sljedećih godina sustav GPON ponuditi dovoljno kapaciteta da bi se zaštitila ulaganja u današnje implementacije GPON sustava i svjetlovodne infrastrukture, već se razvijaju i GPON sustavi sljedeće generacije (NG-PON).. Osnovni zahtjev na NG-PON je veći kapacitet u odnosu na GPON, uz maksimalno korištenje postojećih GPON protokola, komponenti i infrastrukture.

Evolucija GPON-a prikazana je na slici 8, a definira dvije razvojne faze:

- » NG-PON1: NG-PON koegzistira na istoj distribucijskoj mreži ako je implementirana GPON mreža uskladjenja s preporukom G.984.5 (napredni plan valnih duljina). Ova faza definira sljedeće slučajeve:
 - XG-PON1: brzina prijenosa u dolaznom smjeru je 10 Gbit/s, i 2.5 Gbit/s u odlaznom smjeru,
 - XG-PON2: brzina prijenosa od 10 Gbit/s u dolaznom i odlaznom smjeru,
 - WDM opcija preklapanja više GPON sustava i/ili NG-PON na različitim valnim duljinama uz korištenje iste optičke infrastrukture, kao što je definirano u G.984.5,
 - Planovi za korištenje optičkih komponenti viših optičkih klasa od klase B +.
- » NG-PON2: znatno veći kapaciteti, bez zahtjeva za koegzistenciju s postojećim GPON sustavom. Predviđa se kompletiranje standarda oko 2015. godine.



Slika 8: Evolucija GPON-a

FSAN je izradio specifikacije za NG-PON1 krajem 2009. godine, a standardizacija od strane ITU bi trebala biti kompletirana krajem 2010. godine. Oba standardizacijska tijela, ITU i IEEE su usmjerena na povećanje brzine u sljedećoj generaciji PON-a i smatraju da je povećanje brzine na 10 Gbit/s za dolazni smjer prvi sljedeći logičan korak u evoluciji PON-a.

Tehnološki izazovi za povećanje dolazne brzine na 10 Gbit/s su upravljanje disperzijom, osjetljivost prijemnika i problemi koji se odnose na veću predajnu snagu.

Ericsson i ostali proizvođači opreme su u laboratorijskim uvjetima već demonstrirali brzinu od 10 Gbit/s. Ostali su izazovi u komercijalizaciji i smanjenju troškova.

Prva faza NG-PON 1 se odnosi na razvoj standarda koji će omogućiti koegzistenciju XG-PON sustava i postojećeg GPON sustava na istoj distribucijskoj mreži.

Iako su ove tehnologije raspoložive i sada, one su značajno skuplje i zahtijevaju povećanje snage u odnosu na postojeće PON tehnologije. To znači da bi NG-PON oprema temeljena na današnjoj tehnologiji bila veća, manje gustoće i zahtijevala bi puno više snage u odnosu na postojeći PON.

NG-PON2 je dugoročno ciljana pristupna arhitektura, a razvoj i kompletiranje standarda se očekuje poslije 2015. godine.

4.1 10G GPON

Da bi zadovoljio povećan zahtjev za brzinom prijenosa, sadašnji GPON sustavi bit će nadograđeni na sustav za potporu 10Gbps u dolaznom smjeru. Predviđa se da će 10G GPON naći svoje prve primjene u arhitekturama FTTB i FTTC.

U tijeku je razvoj serije preporuka G.987 od strane ITU-T, a kompletiranje preporuka 987.1 – 987.3 se planira do kraja 2010. godine. U početnoj fazi, ove preporuke definiraju samo sustav XG-PON1, jer na tržištu još nema zahtjeva za sustave XG-PON2.

Kao što zahtijeva FSAN, sustav 10G GPON mora raditi zajedno s već postojećim GPON sustavom na istoj mreži ODN.

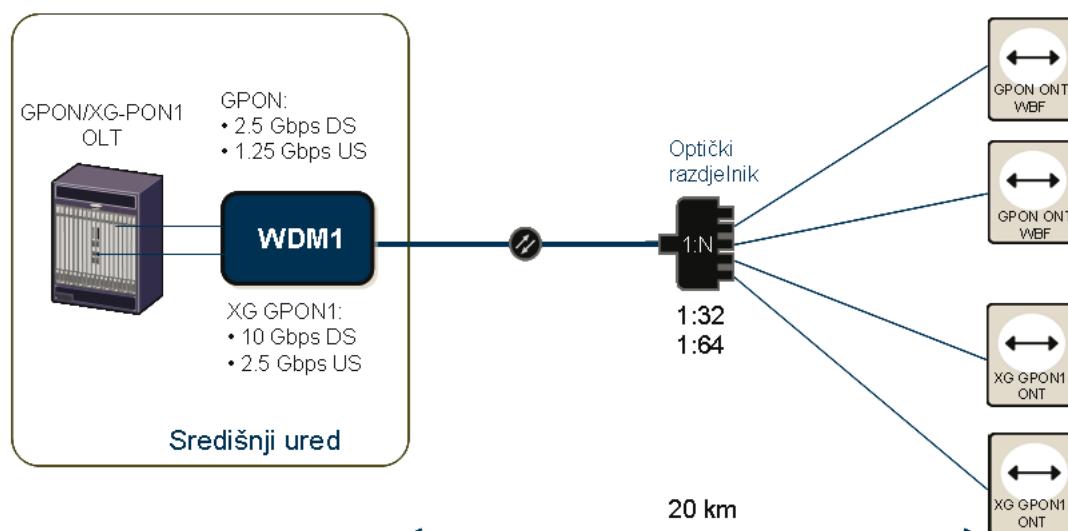
Jednostavan način dodavanja 10 Gbit/s postojećoj instalaciji sustava GPON je dodjela različitih valnih duljina u dolaznom smjeru. Za ovaj scenarij svi postojeći ONT-ovi moraju blokirati novu valnu duljinu. Ovo zahtjeva dodavanje filtera za blokiranje WBF u svaki ONT, a prema preporuci G.984.5. Koegzistencija se postiže stavljanjem 10G GPON sustava na drugoj valnoj duljini u odnosu na GPON sustav.

Raspon valnih duljina za XG-PON1 sustav u dolaznom smjeru je od 1575nm do 1580 nm, a u odlaznom smjeru je od 1260 nm do 1280 nm.

Na strani OLT-a, dva sustava se kombiniraju s WDM1 filtrom. Na strani jedinica ONT koriste se filtri WBF koji blokiraju neželjene valne duljine (slika 9).

Prepreka uvođenju sustava XG-PON1 zajedno s GPON-om u istoj distribucijskoj mreži je nepostojanje filtera za blokiranje u starijim tipovima ONT-ova. To se uglavnom odnosi na ONT-ove u BPON sustavima kao i na starije tipove ONT-ova za GPON. U zadnje vrijeme većina ONT-ova ima integrirane WBF filtere te je nadogradnja postojećeg GPON-a s XG-PON1 vrlo jednostavna. U ostalim slučajevima operator će morati promjeniti ODN ili instalirati WBF filtre na starije ONT-ove.

Jedan od problema kod nadogradnje na XG-PON1 je i prijenos RF video signala. Kako XG-PON1 zahtjeva veću snagu, s obzirom na veće brzine prijenosa, to će dovesti i do većih smetnji na RF video signal.



Slika 9: Koegzistencija GPON i 10G GPON

GPON standard je definirao integrirane tehnike ublažavanja smetnji iz podatkovnog kanala na RF video kanal, ali ove tehnike nisu učinkovite ni dovoljne kod većih snaga koje su zahtijevane u XG-PON1.

Jedno od rješenja je odvajanje signala odnosno fizičko dodavanje još jednog optičkog vlakna od središnjeg ureda do optičkog razdjelnika, gdje se obavlja rekombinacija signala. Ova nadogradnja će zahtijevati promjene u ODN-u (novo optičko vlakno do razdjelnika, nadogradnja na razdjelniku).

Ipak, najbolji način da se izbjegnu smetnje RF video signala je da se distribucija videa obavlja preko IP protokola, naročito u sljedećoj generaciji PON-a gdje je sve manje ograničenja na brzinu prijenosa.

4.2 WDM-PON

Mnogi operatori i proizvođači opreme smatraju da će se sustav NG-PON2 temeljiti na valnom multipleksiranju s gustom podjelom valnih duljina (DWDM – eng. Dense WDM). DWDM je prijenosna tehnologija gdje različite usluge i mreže mogu zajedno postojati na istom optičkom vlaknu pomoću različitih valnih duljina. Glavna razlika između WDM-PON i 10G GPON-a je da WDM-PON ne može koristiti GPON protokol.

Glavna prepreka za masovniju implementaciju WDM-PON-a je visoka cijena, jer je potrebno da predajnici emitiraju na određenoj valnoj duljini. To je osobito kritično za jedinice ONT, jer taj trošak izravno utječe na svaku korisničku liniju. Na strani središnjeg ureda, cijena može biti smanjena optičkom integracijom. Na strani korisnika potrebno je rješenje s malim brojem jedinstvenih tipova ONT-ova da bi se smanjili troškovi inventara i instalacija. Ovaj tip ONT-a se često naziva „colorless“ i do sada je predloženo nekoliko arhitektura koje su bile istraživane tijekom proteklih godina.

Rješenje s podesivim laserom (eng. tunable laser) pokazuje se kao najprirodnije: valna duljina u ONT-u može jednostavno biti konfigurirana kada se uključuje u mrežu, a nudi visok stupanj fleksibilnosti i performansi (domet, brzina i slično). Predložene su i ostale manje ili više egzotične WDM-PON tehnike, ali je često utvrđeno da te tehnologije imaju ograničenja u pogledu karakteristika (domet, kapacitet i sl.) ili cijene.

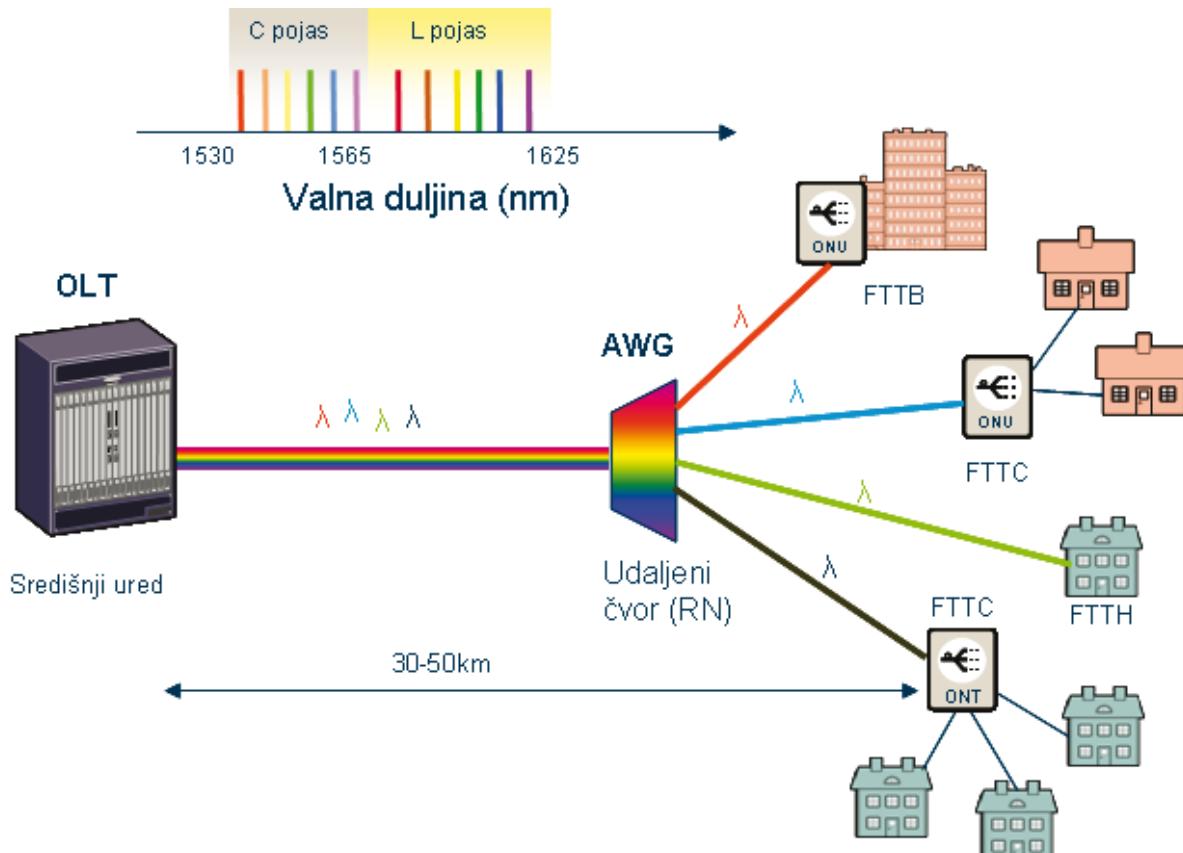
4.2.1 WDM-PON arhitektura

Arhitektura WDM-PON-a je identična FTTH arhitekturi EPON-a i GPON-a. Udaljeni čvor (RN – eng. Remote Node) u WDM-PON-u može biti izведен ili s optičkim razdjelnikom ili pasivnim usmjeriteljem valnih duljina. Optički razdjelnik distribuira sve dolazne signale na sve izlazne portove, što zahtjeva upotrebu filtra valnih duljina u svakom ONU. Iako je optički razdjelnik jednostavan uređaj, jeftin i distribuirane strukture, ova izvedba zahtjeva optičke filtere s različitim središnjim valnim duljinama u svakom ONU. Osim toga, veći su gubici u optičkom razdjelniku u odnosu na usmjeritelj valnih duljina.

Međutim, umjesto optičkog razdjelnika u udaljenom čvoru, koristi se usmjeritelj s valovodnom rešetkom (AWG – eng. Arrayed Waveguide Grating) koji razdvaja valne duljine i usmjerava ih na ONT-ove.

Prednosti valnog multipleksiranja su potpuno odvajanje valnih duljina u odlaznom smjeru za svakog korisnika. Ovo osigurava znatno veće kapacitete za svakog korisnika, veću sigurnost i bolju kontrolu rada jer nema smetnji između različitih valnih duljina u odlaznom smjeru.

Nadogradnja postojećeg PON sustava na WDM-PON zahtjeva zamjenu postojećeg optičkog razdjelnika s usmjeriteljem AWG. Međutim, ova nadogradnja nije naročito poželjna jer zahtjeva rad u vanjskim uvjetima i prekida rad postojećih korisnika. Kod topologije centraliziranog dijeljenja nadogradnja na WDM-PON može biti jednostavna.



Slika 10: Arhitektura WDM-PON-a

U dolaznom smjeru kod WDM-PON sustava, kanali valnih duljina se usmjeravaju od OLT na optičke mrežne jedinice pomoću usmjeritelja s valovodnom rešetkom AWG, koji je smješten u udaljenom čvoru RN (Remote Node), gdje su smješteni i optički pasivni razdjelnici koji se koriste u GPON sustavu.

AWG je pasivni optički uređaj s posebnim svojstvom cikličke periodičnosti što omogućuje da se AWG koristi i kao multipleksor i demultipleksor u isto vrijeme.

AWG je bio korišten u mnogim WDM prijenosnim sustavima kao multipleksor/ demultipleksor i kao ADM (eng. Add Drop Multiplexer). AWG usmjerava svaku pojedinu valnu duljinu na jedinstveni izlazni port, odvajajući više valnih duljina istodobno.

Uneseni gubitak (Insertion loss) u AWG-u je od oko 4-5 dB (bez obzira na broj kanala), a to je daleko manje nego kod optičkih razdjelnika. No, unatoč ovom dobrom svojstvu AWG-a, uslijed temperaturne promjene dolazi do pomaka centralne valne duljine od $0,01 \text{ nm} / ^\circ \text{C}$ što onemogućava korištenje AWG-a u RN, jer se RN nalazi u okolini velikih temperaturnih promjena gdje se granične vrijednosti mogu kretati od -40°C do $+85^\circ \text{C}$. Ova temperaturna ovisnost potječe iz indeksa promjene silicijskog valovoda, što dovodi do promjena u optičkim duljinama. Nedavno su se na tržištu pojavili atermalni usmjeritelji AWG koji su dizajnirani s termičkom kompenzacijom, a u kojima su korišteni materijali s temperaturnim koeficijentom koji imaju različitim od silicijevoj [8].

Postoji još jedan način za multipleksiranje/demultipleksiranje valnih duljina, pod nazivom tankoslojni filtri ili višeslojni filtri smetnje. Svaki filter je dizajniran da emitira jedinstvenu valnu duljinu, dok ostale reflektira. Ova vrsta filtra je pogodnija za multipleksiranje manjeg broja valnih duljina, npr. kod primjene CWDM-a, dok je AWG dobro rješenje za veliki broj kanala.

Danas su najjeftinija WDM-PON rješenja 2-3 puta skuplja od GPON sustava.

U okviru sedmog okvirnog programa FP7 (FP – eng. Framework Programme) EU je finansirala projekt GigaWam u kojem aktivno sudjeluje 9 kompanija: Ericsson AB, Danmarks Tekniske Universitet, Fraunhofer-Gesellschaft Zur Foerderung Der Angewandten Forschung E.V, Ficontec GmbH, Ignis Photonyx A/S, Ignis Photonyx Inc, Vertilas GmbH, Svedice Ab i Syntune Ab. Ulogu koordinacije i administriranje projekta preuzela je norveška R&D organizacija Nor-Tek.

Glavni cilj projekta je razvoj podsustava i visoki stupanj integracije specifičnih optičkih komponenti za WDM-PON i time značajno smanjenje troškova odnosno cijene sustava po korisniku. Cilj je da cijena bude niža u odnosu na današnji GPON sustav.

Projekt ima četiri glavna razvojna dijela:

- » Razvoj jeftinog valno ugodivog poluvodičkog lasera (Tunable laser) za optičke mrežne jedinice ONT
- » Nizovi fiksnih lasera – jeftina integracija lasera u OLT-u koji pokrivaju do 64 kanala
- » Razvoj atermalnog pasivnog usmjeritelja AWG
- » Hibridizacija fotoničkih komponenti u OLT-u i ONT-u

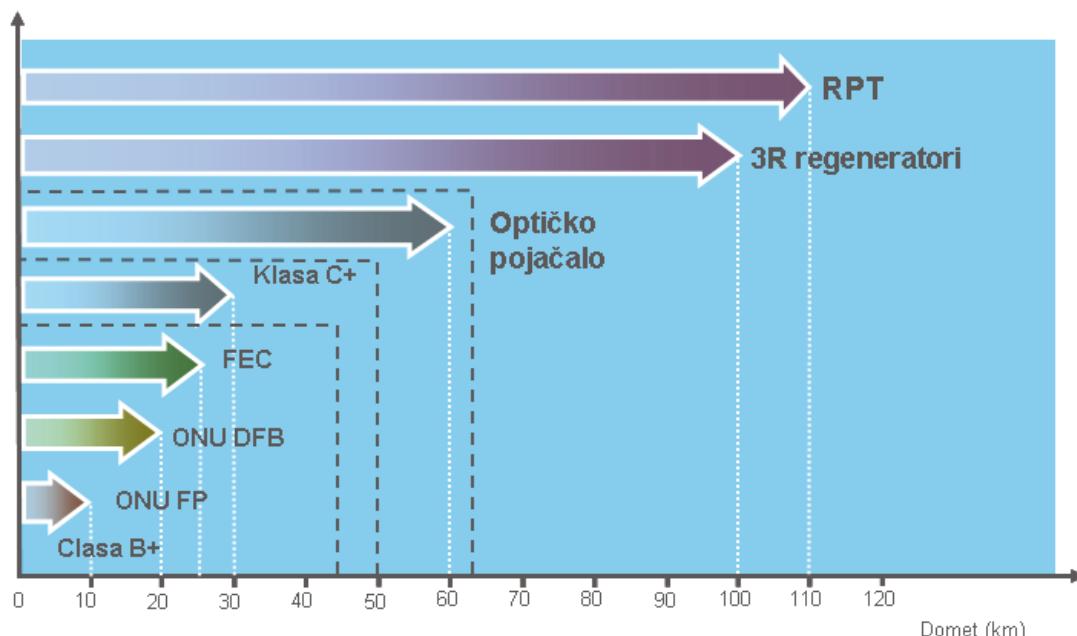
4.3 Produljenje dometa u pasivnim optičkim mrežama

Današnje standardne udaljenosti koje pokrivaju linkovi pristupne FTTH mreže su do 20 km. Svjetlovodi u pristupnim mrežama zamjenjuju klasične bakrene parice i time osiguravaju teorijski i praktično neograničen transmisijski kapacitet. To automatski vodi prema zahtjevima za većom pojasmom širinom (bandwidth) jezgrene mreže. Osim toga korisnici zahtijevaju ne samo veće brzine prijenosa nego i fleksibilnost povezivanja na pristupnu mrežu s dodatnim prijenosnim rješenjima i poboljšanim brzinama prijenosa.

Neki operatori trenutačno razmatraju valjana rješenja za implementaciju PON-a dugačkog dosega koje omogućuju smanjenje broja središnjih uređaja (OC). U već instaliranim GPON sustavima koji se temelje na TDM-u, produljenje dometa se može postići dodavanjem linijskih pojačala (extenders) na postojeću infrastrukturu.

Postoje dva osnovna načina produljenja dometa (slika 12) u mrežama GPON. Prvi način je unaprjeđenje funkcije optičkog primopredajnika uvođenjem optičkih pojačala u OLT-u ili ubacivanjem uređaja za produljenje dometa (extenders) negdje u sredini dovodnog optičkog linka (ITU-T G.984.6).

Tehnologija



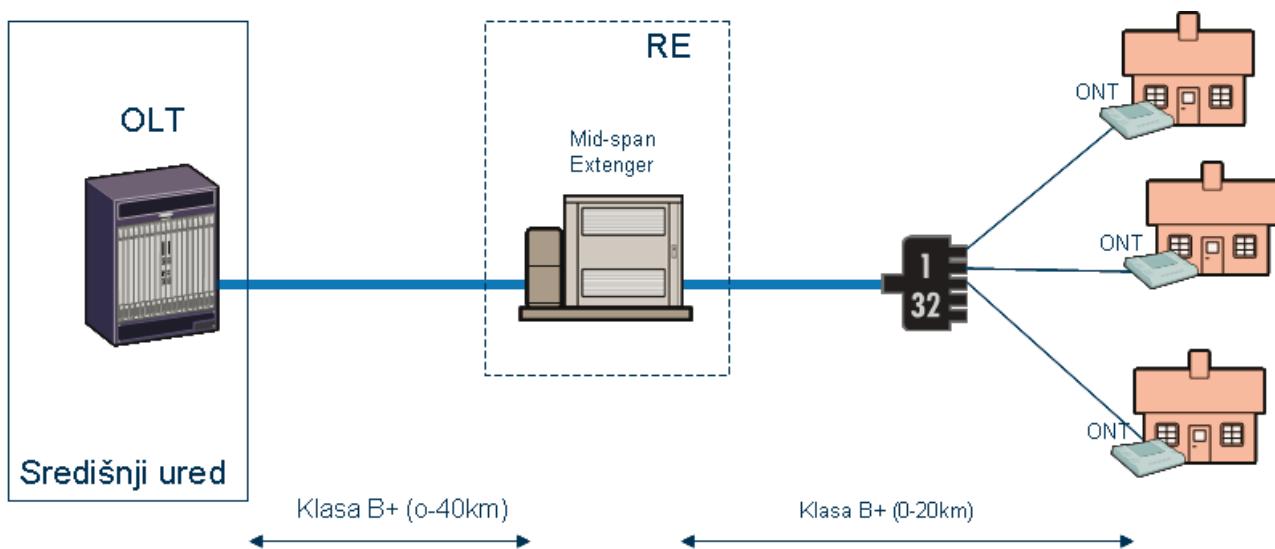
Slika 11. Razne tehnike za produljenje dometa u GPON mrežama

Slika 11 uspoređuje različite načine unapređenja performansi za produljenje dometa u PON mrežama. Tehnike ispravljanja pogrešaka u dolazu FEC (Forward Error Correction) mogu produljiti domet za tipično 5km. Isto tako, optička pojačala (vlakna, poluvodič ili distribuirana) mogu produljiti domet na 60 km ili više.

Preporuka ITU-T G.984.6 razmatra upotrebu aktivnog čvora (Mid-span extender) koji se smješta u sredini optičke mreže.

Ovaj uređaj mora biti kompatibilan s postojećim sustavom GPON tj. s optičkom distribucijskom mrežom ODN klase B+ i jedinice ONT klase B+. Moguće je da RE (eng. Reach Extender) podržava i druge klase ODN mreže, kao što je klasa C+ koji je specificiran u preporuci G.984.2 Am2.

Poluvodičke laserske diode su često korištene kao izvori svjetlosti u optičkim komunikacijskim sustavima. Glavni tipovi lasera pogodni za korištenje u PON mrežama su FP (eng. Fabry-Perot) laserske diode i DFB (eng. Distributed Feedback) laserske diode. Glavne karakteristike ovih laserskih dioda su velika optička izlazna snaga.



Slika 12. Produljenje dometa u GPON mrežama prema ITU-T G.984.5

Uređaji za produljenje dometa RE su aktivni uređaji koji se smještaju negdje u sredini optičke mreže da bi se povećala duljina optičkog vlakna i povećao odnos dijeljenja u GPON mrežama, kako je navedeno u preporuci ITU-T G.984.6. Na ovaj način moguće je produljiti domet na 60 km, što je i krajnji logički domet za GPON mreže.

Postoje dva tipa uređaja za produljenje dometa. Prvi je optičko pojačalo OA (Optical Amplifier), a drugi je optičko-električko-optički (OEO) regenerator. Moguća su i kombinirana rješenja, kao što su korištenje optičkog pojačala u dolaznom smjeru, a regeneratora u odlaznom smjeru.

Ovi uređaji zahtijevaju električko napajanje, što predstavlja problem jer se smješta u vanjskim uvjetima. Nadalje, izvor napajanja treba imati zaštitu protiv ispada glavnog izvora napajanja, obično koristeći baterije kao rezervno napajanje.

Optički regeneratori uključeni su u mrežu da bi se kompenzirali gubici snage optičkog signala. Optički regeneratori mogu se realizirati kao erbijem dopirana optička pojačala (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier), kao poluvodička optička pojačala (SOA – Semiconductor Optical Amplifier) ili kao elektro-optički regeneratori [1].

Neki telekomunikacijski operatori vide mogućnost spajanja gradske i pristupne mreže u PON-ove dugog dometa. Takve mreže uključuju i upotrebu optičkih pojačala (stoga nisu potpuno pasivne) kako bi se povećala snaga signala, pojasna širina, domet i broj odgranjavanja. PON-ovima dugog dometa se premošćuju gradske mreže te se pristupna razina zaključuje na krajnjim čvorovima jezgrene mreže. Tim pristupom omogućava se ukidanje lokalnih komutacija ili udaljenih koncentratora. U planu je i upotreba PON-ova dugog dometa za udaljenosti od stotinjak kilometara s prijenosnom brzinom 10 Gbit/s.

5 Zaključak

Zbog stalnog povećanja zahtjeva na kapacitet pristupne mreže kao i zahtjeva na nove usluge, mnogi operatori prihvatali su PON tehnologiju kao najpogodnije rješenje optičkih pristupnih mreža, pri čemu je GPON tehnologija najviše prihvaćena.

Da bi osigurala dugovječnost i zaštitila ulaganja u već instalirane GPON sustave, standardiziraju se GPON sustavi sljedeće generacije. Sljedeći logičan korak u evoluciji GPON-a je 10G GPON koji će koegzistirati s postojećim GPON sustavom na istoj optičkoj distribucijskoj mreži.

Mnogi operatori i proizvođači opreme smatraju da je dugoročno najpogodnija tehnologija za pasivne optičke mreže WDM-PON, gdje topologija PON-a podržava logičke P2P (Point-to-Point) veze. WDM-PON ima velike prednosti u pogledu brzine prijenosa, fleksibilnosti, i sigurnosti, međutim zbog visoke cijene u odnosu na GPON, kao i nepostojanja standardizacije danas je na tržištu mali broj instalacija. Intenzivna istraživanja i razvoj optičkih komponenti u doglednoj će budućnosti značajno smanjiti troškove i cijenu WDM-PON sustava.

Konačno, uz produljenje dometa GPON sustava, operateri mogu smanjiti broj središnjih ureda CO i na taj način znatno smanjiti operativne troškove (OPEX). Nekoliko tehnologija za produljenje dometa dozvoljeno je standardima, čime se može povećati udaljenost do 60 km.

Ericsson je značajno angažiran u razvoju i standardizaciji sljedeće generacije PON tehnologija, uključujući 10G GPON i WDM-PON. Ericsson je prvi u svijetu demonstrirao prototip sustava 10 G GPON na sajmu NXTcomm u Las Vegasu 2008. godine.

Literatura

- [1] Trojer, E. Dahlfort, S., Hood, D. and Mickelsson, H.: Current and next-generation PONs: A technical overview of present and future PON technology. Ericsson Review, Vol. 85(2008)2, pp. 64-69
- [2] "Full Service Broadband Architecture", Ericsson White paper, June 2008
- [3] Kyeong-Eun Han, Design of AWG-based WDM-PON Architecture with Multicast Capability
- [4] A.Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, K. Kim, B. Mukherjee, "Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (WDM-PON) Technologies for Broadband Access: A Review", Invited, J. Opt. Networking, 4 (11), 737–58, (2005).
- [5] K. Grobe, J.-P. Elbers, "PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON", IEEE Communications Magazine, Jan. (2008).
- [6] F. An, K. S. Kim, Y. Huseh, M. Rogge, W. Shaw, and L. Kazovsky, "Evolution, challenges and enabling technologies for future WDM-based optical access networks," presented at the 2nd Symposium on Photonics, Networking, and Computing, Cary, North Carolina, 26–30 September 2003.
- [7] Spiekman, Leo H. , Semiconductor optical amplifiers in access networks, OptoElectronics and Communications Conference, 2009. OECC 2009. 14th.
- [8] L. Leick, M. Boulanger, J. G. Nielsen, H. Imam, and J. Ingenhoff, "Athermal AWGs for Colourless WDM-PON with -40°C to +70°C and Underwater Operation," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper PDP31.

[9] G.984.1, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics, 2003 (2008)

[10] G.984.2, GPON: Physical Media Dependent (PMD) layer specification, 2003 as amended in 2006 and 2008

[11] G.984.3, GPON: Transmission Convergence Layer Specification, 2004, amended 2005 (2008, amended 2009)

[12] G.984.4, GPON: ONT management and control interface specification, 2004, amended 2005 and 2006 (2008, amended 2008, 2009)

[13] G.984.5, Gigabit-capable Passive Optical Networks (G PON): Enhancement band (2007, amended 2009)

[14] G.984.6, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension (2008, amended 2009)

[15] Željko Popović: Izgradnja digitalnih gradova, Revija-Ericsson Nikola Tesla, Br.1 2008.

Popis kratica

AWG Arrayed Waveguide Grating

BPON Broadband PON

CO Central Office

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier

EPON Ethernet PON

FEC Forward-error correction

FTTB Fiber To The Building

FTTC Fiber To The Curb

FTTH Fiber To The Home

FSAN Full-service access network

FSB Full Service Broadband

FSR Free Spectral Range

GPON Gigabit Passive Optical Network

HDTV High Definition TV

NG-GPON Next Generation GPON

NGA Next Generation Access

ODN Optical Distribution Network

OLT Optical Line Termination

ONT Optical Network Termination

ONU Optical Network Unit

OPEX Operating Expenditure

PON Passive Optical Network
SOA Semiconductor optical amplifier
TDMA Time Division Multiple Access
VoD Video on Demand
WBF Wavelength Blocking Filter
WDM Wavelength Division Multiplexing

Adresa autora:

Željko Popović
e-mail: zeljko.popovic@ericsson.com
Ericsson Nikola Tesla d.d.
Krapinska 45
p.p. 93
HR-10002 Zagreb
Hrvatska

Uredništvo je primilo rukopis 14. listopada 2010.