

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

SANDRO PERMAN

UPORABA CWDM PRIJENOSNOG SUSTAVA U
TELEKOMUNIKACIJSKOJ MREŽI

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2014.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

**UPORABA CWDM PRIJENOSNOG SUSTAVA U
TELEKOMUNIKACIJSKOJ MREŽI**
**USAGE OF CWDM TRANSMISSION SYSTEM IN A
TELECOMMUNICATION NETWORK**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Optoelektronički sustavi
Mentor: Dr.sc. Irena Jurdana
Student: Sandro Perman
Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu
JMBAG: 0112026554

Rijeka, rujan, 2014.

Student: Sandro Perman

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112026554

IZJAVA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom UPORABA CWDM PRIJENOSNOG SUSTAVA U TELEKOMUNIKACIJSKOJ MREŽI izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Irene Jurdane.

U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s objavom diplomskog rada na službenim stranicama.

Student

Sandro Perman

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu istražena je i proučena uporaba tehnologije multipleksiranja s grubom valnom podjelom (engl. Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) kao dio prijenosnog sustava u gradskoj i pristupnoj telekomunikacijskoj mreži. Sve veća potreba za propusnosti zahtjeva nova, cjenovno prihvatljiva rješenja te je u ovom radu CWDM predložen kao rješenje. CWDM prenosi više optičkih signala preko jednog optičkog vlakna na različitim valnim duljinama, odnosno „bojama“ svjetlosti te se na taj način povećava propusnost vlakna. Takav se način povećanja propusnosti temelji na što jeftinijim komponentama, a pritom se uklanja potreba za polaganjem dodatnih optičkih kabela, vlakana i prateće infrastrukture. Prezentirane su različite primjene CWDM-a u gradskoj te pristupnoj mreži gdje se CWDM pokazao kao jednostavno i cjenovno prihvatljivo rješenje za pristupne mreže nove generacije.

Ključne riječi:

CWDM, gradska i pristupna mreža, ideja jeftinog sustava, optičko vlakno, valno multipleksiranje.

SUMMARY

In this thesis, it has been researched and studied usage of coarse wavelength division multiplexing - CWDM as a part of transmission system in metro and access telecommunication network. All increasing need for bandwidth requires new, cost-effective solutions; in this thesis CWDM is proposed as a solution to increase bandwidth of optical fiber. CWDM transmits multiple optical signals on different wavelengths, “colors” of light over single optical fiber, by which it is possible to increase bandwidth of optical fiber. That approach is simpler and more cost-efficient than deployment of more optical cables, fibers and other parts of infrastructure. There are presented different applications of CWDM in metro and access network where CWDM is simple and cost efficient solution for next generation access networks.

Keywords:

CWDM, metro and access network, optical fiber, wavelength multiplexing

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD.....	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA	1
1.2. RADNA HIPOTEZA I POMOĆNE HIPOTEZE	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	1
1.4. ZNANSTVENE METODE	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	2
2. CWDM STANDARDI	4
2.1. CWDM VALNE DULJINE	5
2.1.1. Optički pojasevi.....	7
2.1.2 CWDM plan kanala.....	7
2.3. CWDM OPTIČKA SUČELJA.....	8
2.3.1. Model „crne kutije“.....	8
2.3.2. Model „crne veze“	9
3. CWDM KOMPONENTE I PODSUSTAVI.....	10
3.1. CWDM PREDAJNICI.....	11
3.1.1. CWDM laseri.....	11
3.1.1.1. FP laser	12
3.1.1.2. VCSEL	12
3.1.1.3. DFB laseri	13
3.1.1.4. FGL laseri.....	15
3.1.1.5. Laseri s vanjskim modulatorom	15
3.1.1.6. Laserski niz	15
3.2. CWDM PRIJAMNICI	17
3.2.1. PIN fotodioda	18
3.2.2. APD fotodioda.....	19
3.3. CWDM PRIMOPREDAJNICI	20
3.3.1. Vrste CWDM primopredajnika	22
3.3.1.1. SFF	22
3.3.1.2. GBIC	22
3.3.1.3. SFP	23

3.3.1.4. Ostale vrste primopredajnika	24
3.4. OPTIČKO VLAKNO KAO PRIJENOSNI MEDIJ U CWDM SUSTAVIMA.....	25
3.4.1. Gubici u CWDM optičkim vlaknima.....	25
3.4.1.1. Prigušenje vlakna	26
3.4.1.2. Kromatska disperzija	28
3.4.2. Vrste optičkih vlakana u CWDM sustavima	29
3.4.2.1. Optička vlakna s uklonjenim „vodenim vrhom“	30
3.4.2.2. Vlakna sa smanjenim gubitkom savijanja.....	30
3.4.2.3. Vlakna s pomaknutom disperzijom.....	31
3.4.2.4. Kompenzacijsko disperzijsko vlakno.....	32
3.4.3. Optičko vlakno u Hrvatskoj.....	32
3.5. OPTIČKI FILTRI ZA CWDM MUX/DEMUX UREĐAJE	33
3.5.1. Filtar s Braggovom rešetkom u vlaknu.....	34
3.5.2. Rešetka s poljem valovoda	36
3.5.3. Filtri s tankim filmom	37
3.5.3.1. Rubni filtri	38
3.5.3.2. Filtri s propusnim pojasom	40
3.5.4. CWDM MUX/DEMUX uređaji s TFF filtrom.....	41
3.5.4.1. Spreznici.....	42
3.5.4.2. CWDM moduli	43
3.5.4.3. Zigzag moduli	47
3.5.4.4. OADM uređaji	50
4. SVJETLOVODNA MREŽA	51
4.1. SVJETLOVODNA GRADSKA MREŽA.....	52
4.1.1. P2P topologija.....	53
4.1.2. Prstenasta topologija.....	54
4.1.3. Zahtjevi metro mreža	56
4.1.4. Primjeri uporabe CWDM prijenosnog sustava u gradskoj mreži.....	57
4.2. SVJETLOVODNA PRISTUPNA MREŽA.....	60
4.2.1. Pristupne mreže nove generacije	63
4.2.2. Topologija u FTTH arhitekturi	66
4.2.3. TDM-PON mreža.....	68
4.2.4. CWDM-PON pristupna mreža	71
4.2.5. Hibridni CWDM/TDM-PON.....	73
4.2.6. Kompatibilnost CWDM/TDM-PON sustava s postojećom tehnologijom.....	77
4.2.7. Različiti primjeri CWDM prijenosnog sustava u FTTH modelu.....	79
4.2.8. Problem upstream prijenosa	82
4.2.9. Više pružatelja usluga preko jedne infrastrukture	84

5. ZAKLJUČAK.....	87
LITERATURA	89
KAZALO KRATICA.....	95
POPIS TABLICA	97
POPIS SLIKA.....	98

1. UVOD

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Problem istraživanja je potreba za sve većim internet brzinama i propusnošću postojećih i budućih svjetlovodnih mreža i infrastrukture. Dok su mreže velikih udaljenosti povezane svjetlovodom velikih brzina reda TB/s, gdje se koristi skupo i precizno multipleksiranje s gustom valnom podjelom (engl. Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) i dalje postoji problem „uskog grla“ ili tkz. zadnja milja (engl. last mile) koja se proteže od lokalne centrale pa sve do krajnjih korisnika. Predmet istraživanja je CWDM prijenosni sustav u telekomunikacijskoj mreži. Objekt istraživanja je primjena CWDM-a u postojećoj i budućoj svjetlovodnoj infrastrukturi.

1.2. RADNA HIPOTEZA I POMOĆNE HIPOTEZE

Novim spoznajama o uporabi CWDM prijenosnog sustava u telekomunikacijskoj mreži moguće je jednostavno i efikasno povećati propusnost već postojeće svjetlovodne mreže bez potrebe za postavljanjem novih optičkih vlakana i ostale prateće infrastrukture.

Sustavnom analizom i sintezom CWDM tehnologije moguće je predložiti nova rješenja za dovođenje svjetlovoda do svakog kućanstva, poslovnog objekta ili zgrade po najpovoljnijoj cijeni uz maksimalnu propusnost.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i ciljevi istraživanja u ovom diplomskom radu očituju se u sljedećemu: istražiti i objasniti način rada CWDM-a te svih potrebnih komponenti i dijelova koji su dio CWDM prijenosnog sustava i koji kao takvi sudjeluju u svjetlovodnoj mreži ostvarenoj korištenjem CWDM tehnologije. Potrebno je detaljno odgovoriti na pitanje što je CWDM, kako je realiziran, te koji su njegovi ključni dijelovi. Potrebno je istražiti u čemu su prednosti i nedostaci CWDM-a u odnosu na ostale tehnologije kao što je DWDM. Treba istražiti kompatibilnost CWDM-a s postojećim protokolima i standardima koji se koristi u gradskoj i pristupnoj mreži te mogućnost korištenja CWDM-a za realizaciju pristupnih mreža nove generacije (engl. Next Generation Access network, NGA).

1.4. ZNANSTVENE METODE

U ovom diplomskom radu korištene su sljedeće znanstvene metode: metoda indukcije i dedukcije, metoda analize i sinteze, metoda apstrakcije i konkretizacije, metoda specijalizacije i konkretizacije, metoda dokazivanja i opovrgavanja, metoda klasifikacije, metoda deskripcije, metoda kompilacije, statistička metoda i matematička metoda.

1.5. STRUKTURA RADA

Diplomski rad podijeljen je na nekoliko međusobno povezanih dijelova. U prvom dijelu, Uvodu, navedeni su problem, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza i pomoćne hipoteze, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metoda i obrazložena je struktura rada.

Naslov drugog dijela rada su CWDM standardi. U tom dijelu rada analizirani su relevantni CWDM standardi, prikazana je spektralna rešetka i plan kanala koje koristi CWDM, osim toga obrađena su i sučelja za CWDM sustav koja osiguravaju kompatibilnost različitih protokola i standarda.

CWDM komponente i podsustavi naslov je trećeg dijela rada. U tom dijelu prikazane su pojedine komponente i dijelovi koji čine CWDM prijenosni sustav, od osnovnih dijelova komponenti kao što su izvori svjetla i fotodiode pa sve do predajnika, prijammnika i kombinacije to dvoje, primopredajnika. Osim toga, analiziran je i prijenosni medij, te utjecaj različitih optičkih vlakana na gubitke u CWDM prijenosnom sustavu. Predložena su rješenja koja pružaju maksimalnu iskoristivost CWDM kanala. Istražena je vrsta optičkog vlakna koja se koristi u Hrvatskoj prema važećem pravilniku. Na kraju trećeg dijela rada analizirani su optički filtri koji su dio MUX/DEMUX uređaja i kao takvi čine ključnu komponentu u CWDM prijenosnom sustavu. Predočene su različite vrste filtara koji bi se mogli koristiti za CWDM te je donesen zaključak o najpogodnijem.

Četvrti dio rada s naslovom Svjetlovodna mreža je moguće i najvažniji iz razloga što se u tom dijelu istražuje praktična primjena CWDM-a na gradske i pristupne mreže. Na početku četvrtog dijela prikazana je podjela mreža, od najveće razine pa sve do krajnjeg korisnika. Kod gradskih mreža analizirane su razne topologije i moguće primjene CWDM-a u takvom okruženju. Za svjetlovodne pristupne mreže prezentirana je osnovna topologija te podjela mreža prema različitim parametrima. Analizirani su različiti modeli NGA mreža, od kombinacije bakrene i svjetlovodne infrastrukture pa sve do modela kod kojih se koristi

samo svjetlovodna mreža te je proučena i prikazana primjena CWDM-a na takve module. Istraženi su postojeći i budući standardi te kompatibilnost CWDM-a s takvim standardima. Osim toga prezentirani su problemi u pristupnom dijelu mreže vezani uz općenitu primjenu WDM-a pa tako i CWDM-a, te su dana moguća rješenja. Prikazani su projekti u Hrvatskoj po pitanju svjetlovoda i primjena CWDM-a kod mreža gdje postoji više pružatelja usluga. Analizirani su mogući modeli pristupne mreže u budućnosti te primjena CWDM-a na njih.

U posljednjem dijelu, Zaključku, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazivana postavljena radna hipoteza.

2. CWDM STANDARDI

ITU-T je sektor za standardizaciju i kao takav dio ITU-a (engl. International Telecommunication Union). Glavni je cilj ITU-T sektora donošenje raznih tehničkih standarda koji predlažu tehničke osobine telekomunikacijskih mreža i komponenti koje su sastavni dio te mreže. Standardi su vrlo bitni jer omogućuju kompatibilnost između optičkih uređaja i komponenti različitih kompanija [1]. ITU-T standardi definirani su u obliku preporuka (engl. recommendation) te nisu obvezujući, ali se generalno poštuju zbog visoke kvalitete i garancije kompatibilnosti [2]. Od svih ITU-T preporuka najvažnije za CWDM [3,p.2] su:

- ITU-T preporuka G.694.2 (2003), Spektralne rešetke za WDM aplikacije: CWDM valna rešetka (engl. Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength Grid).
- ITU-T preporuka G.695 (2010), Optička sučelja za aplikacije kod multipleksiranja s grubom valnom podjelom (engl. Optical interfaces for Coarse Wavelength Division Multiplexing applications).
- ITU-T preporuka G.671 (2012), Prijenosna svojstva optičkih komponenti i podsustava (engl. Transmission characteristics of optical components and subsystems).

U navedenim preporukama donesene su brojne specifikacije: valne duljine, raspored CWDM kanala, parametri optičkih sučelja za CWDM mrežne aplikacije, jednosmjerne i dvosmjerne veze, budžet (engl. power budget) i udaljenost prijenosnog puta. Određeni su parametri optičkih komponenti: prigušivača (engl. attenuator), spreznika (engl. splitter/combiner), konektora, filtara, spojeva, preklopnika (engl. switch), kompenzatora disperzije (engl. dispersion compensator), multipleksera, demultipleksera te optičkih multipleksera koji imaju mogućnost dodavanja i ispuštanja valnih duljina (engl. Optical Add and Drop Multiplexer, OADM). Osim ove tri preporuke postoje i brojne druge koje direktno ili indirektno imaju utjecaja na CWDM. Neke od njih su: preporuka G.652: karakteristike standardnog jednomodnog optičkog vlakna (engl. Standard Single Mode Fiber, SSMF), preporuka G.653: karakteristike vlakna s pomaknutom disperzijom (engl. Dispersion Shifted Fiber, DSF), preporuka G.655: karakteristike SSMF vlakna s

pomaknutom nultom disperzijom (engl. Non-Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF) i preporuka G.664: sigurnosne mjere i zahtjevi za optičke sustave [8].

2.1. CWDM VALNE DULJINE

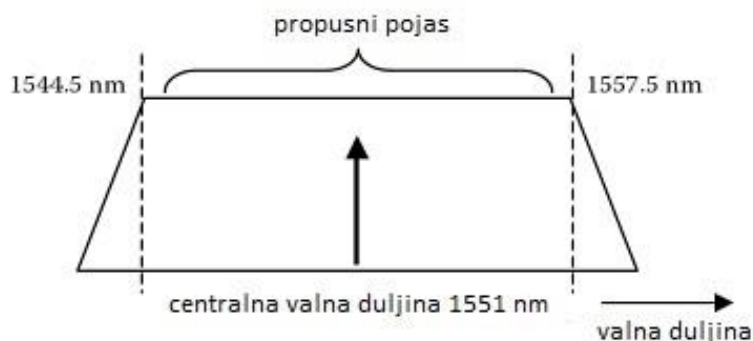
Prema ITU-T preporuci G.694.2 određene su valne duljine i broj kanala u CWDM sustavima. Dogovoren je razmak od 20 nm između pojedinih kanala te ukupno 18 kanala različitih valnih duljina u području od 1271 – 1611 nm [4]. Zahvaljujući razmaku kanala od 20 nm CWDM laseri ne zahtijevaju preciznu kontrolu valnih duljina, pa je time omogućeno korištenje nehlađenih lasera i ostalih jeftinijih komponenti nego što je to kod DWDM-a koji zahtjeva skupe, precizne lasere i ostale komponente. Zbog razmaka od 20 nm mogući je broj kanala kod CWDM-a puno manji nego kod DWDM-a koji ima razmak između kanala 200, 100, 50 ili 25 GHz¹ [4, p.136].

CWDM kanali su definirani na ovaj način tek nakon revizije 2003. godine dok su u prvom izdanju 2002. godine bili definirani od 1270 – 1610 nm, što je ujedno i pojas CWDM lasera koji su kreću na nominalnim valnim duljinama 1270, 1290, 1310, 1330 nm itd. Međutim, kako nehlađeni laseri koje koristi CWDM sustav imaju odstupanja ± 3 nm pri temperaturi od 25°C, kad se tome dodaju odstupanja od +0.1 nm/°C u rasponu od 0 do 70°C dolazi se do varijacije zadane valne duljine u rasponu od 13 nm. To znači da bi odstupanje na temperaturama manjim od 25°C bilo maksimalno do -5.5 nm (kod 0°C) dok bi kod temperatura većih od 25°C odstupanje bilo maksimalno +7.5 nm (kod 75°C). U cilju sprečavanja asimetričnog propusnog pojasa filtera donesena je odluka o korištenju +1 nm odmaka te je na taj način odstupanje postalo simetrično ± 6.5 nm [3, p.2]. Tolerancije od ± 6.5 nm se dozvoljavaju u cilju jednostavnije proizvodnje CWDM lasera i uporabe nehlađenih lasera čime se smanjuju troškovi komponenti CWDM-a [5, p.3].

Na slici 1. prikazan je slučaj odstupanja valne duljine. Radi se o valnoj duljini 1551 nm te je prikazano odstupanje ovisno o temperaturi i tvorničkoj izvedbi nehlađenog lasera. Odstupanje je ± 6.5 nm, sljedeći kanal je valne duljine 1571 nm te on također ima odstupanje od ± 6.5 nm. To znači sljedeće, ako bi kanal na 1551 nm imao +6.5 nm, a kanal na 1571 nm -6.5 nm dolazi do razmaka od 7 nm između kanala, pa je to i minimalni razmak koji postoji između kanala. CWDM valne duljine, odnosno kanali koji su definirani preporukom G.694.2 nalaze se u tablici 1. Osim ovih valnih duljina moguće je korištenje i

¹ DWDM umjesto valnih duljina koristi frekvenciju, pa su navedene frekvencije u valnim duljinama istim redoslijedom.

drugih valnih duljina koje nisu navedene u tablici 1., ali nije preporučljivo iz razloga što se povećava atenuacija signala, odnosno prigušenje (engl. attenuation) ispod 1270 nm i iznad 1610 nm [3, p.3].



Slika 1. Odstupanje CWDM valne duljine

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: <http://www.fiberstore.com/CWDM-Technology-Transceivers-Wiki-aid-397.html> (09.08.2014)

Tablica 1. Raspored valnih duljina kod CWDM-a

Redni broj kanala	Nominalna centralna valna duljina [nm]
1	1271
2	1291
3	1311
4	1331
5	1351
6	1371
7	1391
8	1411
9	1431
10	1451
11	1471
12	1491
13	1511
14	1531
15	1551
16	1571
17	1591
18	1611

Izvor: Izradio Sandro Perman prema ITU-T 2003, Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid

2.1.1. Optički pojasevi

CWDM kanali se nalaze unutar nekoliko optičkih pojaseva. Svaki pojas ima drukčije karakteristike. Njihova podjela prikazana je u tablici 2.

Tablica 2. Optički pojasevi

Optički pojas	Valna duljina [nm]
O – izvorni pojas (engl. original)	1260 – 1360
E – prošireni pojas (engl. extended)	1360 – 1460
S – kratki pojas (engl. short)	1460 – 1530
C – konvencionalni pojas (engl. conventional)	1530 – 1565
L – dugi pojas (engl. long)	1565 – 1625

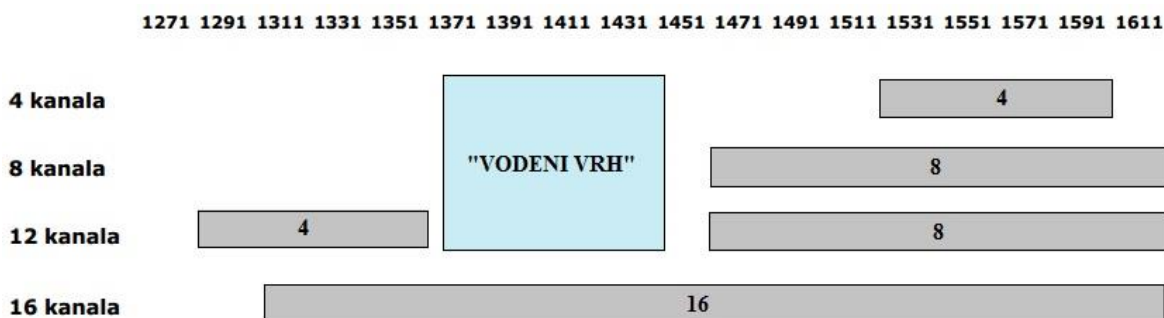
Izvor: Izradio Sandro Perman prema International Telecommunication Union 2009, *Optical fibres, cables and system*, online: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf (10.08.2014.)

Pojasevi se nalaze u infracrvenom (engl. infrared) dijelu spektra koji nije vidljiv ljudskim okom, pa se iz tog razloga trebaju poštivati sigurnosne mjere pri radu s optičkim sustavima. Od cijelog CWDM valnog spektra definiranog prema G.694.2 najkvalitetnije valne duljine za propagaciju svjetla su oko 1300 nm i 1550 nm, tkz. drugi i treći „prozor“ O i C pojasa. Kod tih su valnih duljina idealni uvjeti za prijenos signala. Od ostalih je pojaseva najzanimljiviji E pojas koji se dugo vremena izbjegavao zbog velikog prigušenja uzrokovanog OH⁻ ionima, tj. vodi koja ima svoj vrhunac na oko 1383 nm te se naziva „vodenim vrhom“ (engl. water peak).

2.1.2 CWDM plan kanala

CWDM koristi skupine od 4, 8, 12 ili 16 kanala različitih valnih duljina prema preporuci G.695. Kanali su birani izbjegavajući E pojas korištenjem kanala na valnim duljinama gdje je prigušenje i gubljenje signala najmanje. Jedino 16 kanalni CWDM ide od 1311 do 1611 nm te prolazi kroz E pojas. Na slici 2. prikazan je plan CWDM kanala te spomenuti „vodeni vrh“. Kanali su organizirani na taj način jer iako se danas koriste

optička vlakna sa smanjenim ili uklonjenim „vodenim vrhom“ i dalje postoje optički kabeli koji nisu optimizirani na taj način. Većina optičkih kabela položena prije 2000 godine ima „vodeni vrh“ [3,p.12].



Slika 2. Plan CWDM kanala

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Mikac, B. 2013, Fotoničke telekomunikacijske mreže, online: http://www.fer.unizg.hr/download/repository/P5_FTM_2013_10_28_CWDM.pdf (11.08.2013)

2.3. CWDM OPTIČKA SUČELJA

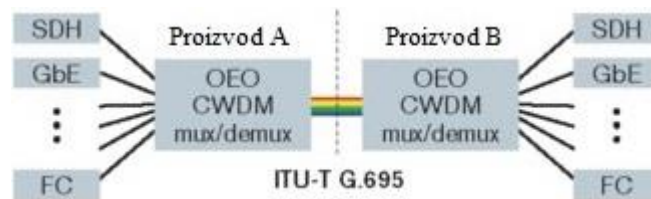
Optička sučelja za CWDM uređaje definirana su prema ITU-T preporuci G.695. U njoj je dana preporuka optičkih sučelja CWDM mreža od točke do točke (engl. point-to-point, P2P), mreža prstenaste topologije, jednosmjernih i dvosmjernih veza te način označavanja CWDM aplikacija u obliku kodova [8]. Osim toga određene su dvije arhitekture CWDM sustava koje omogućuju interoperabilnost različitih proizvođača odnosno protokola kao što je SONET, Ethernet, Fiber Channel, PSD, to su:

- „crna kutija“ (engl. „black box“)
- „crna veza“ (engl. „black link“)

2.3.1. Model „crne kutije“

Kod arhitekture crne kutije CWDM laseri i filtri za multipleksiranje nalaze se u jednoj kutiji, a filtri za demultipleksiranje i prijammnici u drugoj kutiji. Crna kutija podrazumijeva da se radi o višekanalnom CWDM sučelju. Ova arhitektura je vrlo važna jer omogućuje kompatibilnost na način da ulazne signale koji nisu u skladu s G.695 pretvara u signale G.695 standarda, te multipleksira nekoliko takvih signala i šalje na zajednički izlaz u prvotnom obliku. Na slici 3. prikazan je jedan takav sustav koji u sebi ima optičko-električno-optički pretvarač (engl. Optical-Electrical-Optical, OEO). OEO pretvara optički

signal u elektronički i onda ponovno u optički signal koji je usklađen s G.695 standardom te zajedno s ostalim signalima šalje na izlaz. Integracijom OEO-a moguće je ponuditi jednostavan sustav koji nema valna specifična sučelja, primopredajnike, filter module i sl. Model crne kutije radi na principu plug-and-play što znači da tehničar može rasporediti sustav bez dodatnih kompliciranih optimizacija [3, 9].

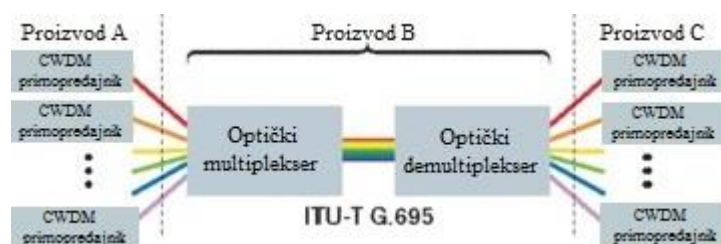


Slika 3. Crna kutija CWDM

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Dr. Lauder, R. 2004, CWDM, GFP technologies for service networks, online: <http://www.lightwaveonline.com> (12.08.2014)

2.3.2. Model „crne veze“

Arhitektura crne veze također je definirana G.695 standardom i podrazumijeva da se radi o jednokanalnom sučelju. U crnoj vezi ulančani su optički multiplekser, optičko vlakno i optički demultiplekser zajedno s optičkim konektorima, spojnim kabelima i ostalim spojevima. Model crne veze definira optičke karakteristike na jednokanalnom sučelju između CWDM primopredajnika i ulaznih signala optičkog multipleksera ili izlaznih signala optičkog demultipleksera. Omogućuje optimizaciju gubitaka umetanja (engl. Insertion Loss, IL) kojeg uzrokuje svaki dodatni uređaj na spojnem putu optičkog signala. Negativna strana crne veze je što za maksimalnu učinkovitost treba napraviti određene izračune za svaku CWDM vezu [3, p.7]. Na slici 4. prikazan je model crne veze gdje CWDM sustav preuzima signale koji su u skladu s G.695 i multipleksira ih na zajednički izlaz.



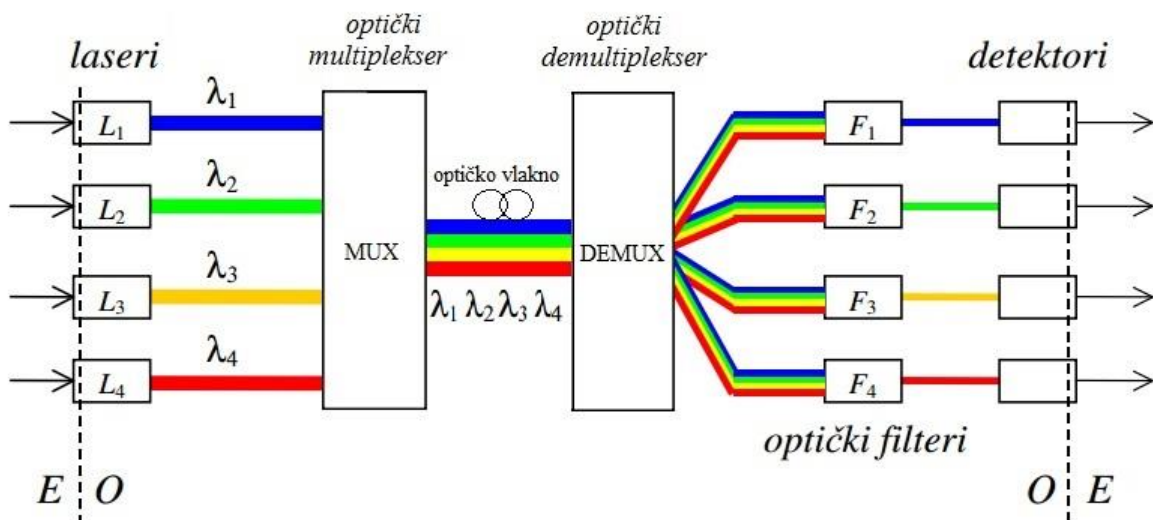
Slika 4. Crna veza CWDM

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Dr. Lauder, R. 2004, CWDM, GFP technologies for service networks, online: <http://www.lightwaveonline.com> (12.08.2014)

3. CWDM KOMPONENTE I PODSUSTAVI

Glavne komponente CWDM prijenosnog sustava su: predajnici, prijenosni medij i prijammnici. Glavni dio predajnika je izvor svjetla koji je obično laser, a ponekad svjetlosna dioda (engl. Light-Emitting Diode, LED). Za prijenosni medij se obično koristi SSMF vlakno definirano preporukom ITU-T G.652 [4] ili jednomodno vlakno s uklonjenim „vodenim vrhom“ definirano prema G.652D. Optički prijammnici sastoje se od više komponenti od kojih je najvažniji detektor svjetlosnog signala - fotodetektor (engl. photodetector). U CWDM prijenosnom sustavu najčešće se koriste primopredajnici koji u sebi sadrže predajnik i prijammnik. Osim navedenih komponenti u prijenosnom sustavu sudjeluju i brojne druge kao što su filtri, sprežnici, multiplekseri/ demultiplekseri i sl.

Na slici 5. prikazan je princip jednog takvog sustava. Na predajničkoj strani laseri emitiraju svjetlost na različitim valnim duljinama, dolaskom u multiplekser signali se spajaju (multipleksiraju) i zajedno prenose jednim optičkim vlaknom do optičkog demultipleksera koji razdvaja (demultipleksira) signale različitih duljina svjetlosti i šalje u optička vlakna. Podešeni optički filtri propuštaju odgovarajući signal prema fotodetektoru te signal dalje putuje prema krajnjem korisniku. Na svakom kraju optičke veze nalaze se elektro-optički i opto-električni uređaji.



Slika 5. Primjer CWDM sustava

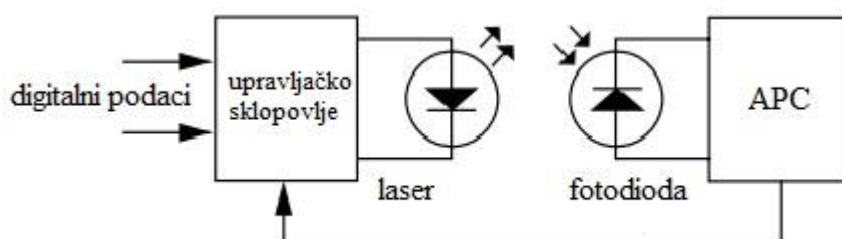
Izvor: Uredio Sandro Perman prema Mikac, B., *Telekomunikacijski sustavi i mreže*, predavanje 5-6, FER

3.1. CWDM PREDAJNICI

CWDM predajnici kao izvor svjetla obično koriste lasere. Ako se radi o vrlo malim udaljenostima od nekoliko stotina metara gdje je dovoljna manja propusnost, moguća je uporaba i LED-a. Kod CWDM prijenosnog sustava obično se koriste direktno modulirani laseri (engl. Directly Modulated Lasers, DML) jer se radi o mrežama malih udaljenosti, za razliku od magistralnih mreža velikih udaljenosti gdje dolazi do degradacije signala uzrokovane kromatskom disperzijom (engl. Chromatic Dispersion, CD), pa je kod takvih mreža potrebna uporaba vanjskog modulatora [3, 10].

Osim laserskog izvora svjetla dio predajnika je i nadzorna fotodioda, sklopovlje za automatsko upravljanje snagom (engl. Automatic Power Control, APC) i upravljačko sklopovlje za modulaciju lasera. APC prima informacije generirane od nadgledajuće fotodiode te pruža povratne informacije upravljačkom sklopovlju kako bi se prilagodila modulacija i jačina struje [3, 11].

Osim ovih dijelova predajnik može imati i temperaturni regulator za nadziranje i podešavanje temperature – termoelektrični hladnjak (engl. ThermoElectric Cooler, TEC) koji se koristi u DWDM sustavima. U CWDM sustava koristi se nehlađeni laser, pa TEC nije potreban. Iz tog razloga je CWDM predajnik jednostavniji u odnosu na DWDM, a dijelovi CWDM predajnika koji koristi laser s distribuiranom povratnom vezom (engl. Distributed Feedback Laser, DFB) kao izvor svjetla prikazani su na slici 6.



Slika 6. CWDM predajnik

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

3.1.1. CWDM laseri

Postoji više vrsta lasera različitih karakteristika i parametara kao što su cijena, izlazna snaga, modulacija lasera ili raspon valnih duljina koje mogu emitirati. O

navedenim parametrima ovisi i namjena lasera. Usporedba različitih vrsta lasera prikazana je u tablici 3. Svi navedeni laseri u tablici 3. su nehlađeni, tj. nemaju TEC zbog čega dolazi do odstupanja zadane valne duljine s porastom ili smanjenjem radne temperature, a također su i direktno modulirani, osim EA-EML lasera koji ima vanjsku modulaciju.

Tablica 3. Karakteristike različitih izvora svjetla

Izvor svjetla	Relativna cijena	Izlazna snaga [dBm]	Raspon valne duljina [nm]	Modulacija	Primjena
LED	vrlo niska	<0	850	155 Mb/s	LAN
FP	niska	3	850, 1310	2.5 Gb/s	pristupna mreža
VCSEL	niska	0	850, 1310, 1550	Do 10 Gb/s	pristupna mreža
DFB	srednja	6	1270-1610	2.5-10 Gb/s	CWDM, gradska
FGL	srednja	3	1550	2.5 Gb/s	gradska
EA-EML	visoka	0	1310, 1550-1590	2.5-40 Gb/s	gradska, regionalna

Izvor: Izradio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

3.1.1.1. FP laser

FP (engl. Fabry-Perot) laseri su jedni od najjednostavnijih u optičkom komunikacijskom sustavu. Spadaju u mehaničko podesive lasere te se željena valna duljina unaprijed namješta fizičkim mijenjanjem razmaka između zrcala. Primjena u CWDM sustavu im je ograničena zbog velike temperaturne ovisnosti, povećanjem radne temperature od 1°C promjeni se valna duljina za 0.4 nm. Osim toga, problem im predstavlja i kromatska disperzija. Iz tih je razloga uporaba FP lasera u CWDM sustavu moguća jedino kod sučelja na strani klijenta ili u nekom drugom obliku prijenosa podataka gdje je potrebna niska cijena [3, p.63].

3.1.1.2. VCSEL

VCSEL (engl. Vertical Cavity Surface Emitting Laser) laseri imaju sličnu cijenu kao i FP laseri, ali uz bolju učinkovitost. Prikladni su za uporabu gdje god je prihvatljiva niska

izlazna snaga. Moguća je direktna modulacija od 55 Mb/s do 2.5 Gb/s, a u određenim eksperimentima postignut je prijenos signala preko 8.8 km pri modulaciji od 10 Gb/s kroz SSMF vlakno [3, p.63]. Uporaba za CWDM sustave im je kao i kod FP lasera ograničena jer mogu emitirati valne duljine oko 850, 1310 i 1550 nm, čime se ne može iskoristiti cijeli CWDM spektar valnih duljina od 1270 do 1610 nm. Mogu se koristiti u manjoj mreži kao što je lokalna mreža (engl. Local Area Network, LAN) ili u mrežama za pohranu podataka (engl. Storage Area Networks, SAN). Osim toga koriste se i za datacom aplikacije gdje se prije koristio LED s brzinom do nekoliko stotina Mb/s, ali kako te brzine više nisu dovoljne potrebna je uporaba lasera, a VCSEL se pokazao kao dobro rješenje [12]. Osim navedenih uporaba razmišlja se o korištenju VCSEL-a kao jeftinog izvora svjetla i za CWDM pasivne optičke mreže (engl. Passive Optical Network, PON) [11, p.64].

3.1.1.3. DFB laseri

DFB laseri su jedni od najvažnijih lasera u WDM sustavu te se koriste bilo da se radi o CWDM ili DWDM sustavu, s razlikom da u DWDM sustavu imaju TEC.

DFB laseri imaju ogibnu rešetku unutar laserskog medija koja se sastoji od valovoda u kojem indeks refrakcije periodično mijenja dvije vrijednosti. Valne duljine koje se podudaraju s periodom i kutom upada će propagirati, a ostale se valne duljine poništavaju destruktivnom interferencijom. DFB laser direktno modulira signal, pa se modulacija signala vrši uključivanjem – isključivanjem lasera. Uključen laser znači „1“ bit, a isključen „0“ bit. Ovakav način modulacije može uzrokovati, tkz. „cvrkut“ (engl. chirp) zbog kojeg može doći do disperzije [13, p.66]. „Cvrkut“ je pojava pri kojoj spektar valnih duljina izvora varira tijekom impulsa, što uzrokuje širenje impulsa, a takva širenja impulsa utječu na veću mogućnost pojave disperzije nego što je to kod signala bez „cvrkuta“ [15, p.7]. Direktna modulacija DFB lasera zadovoljavajuća je za metro mreže i CWDM sustave, a u slučaju korištenja DFB lasera u mrežama velikih udaljenosti kao što je DWDM sustav potrebna je uporaba vanjskog modulatora. DFB laseri su prvi izbor za CWDM prijenosne sustave, a spomenute karakteristike DFB lasera prikazane su u tablici 4. Prema vrijednostima iz tablice 4. vidljivo je kako se tolerancija disperzije smanjuje s povećanjem brzine modulacije, pa o tome treba voditi računa pri odabiru vlakana i prijenosnih komponenti.

Tablica 4. Parametri DFB lasera

Parametar	Uobičajena vrijednost
Valna duljina	1300-1600 nm
Izlazna snaga	Do 40 mW
Temperaturna ovisnost	0.1 nm/°C
Brzina modulacije	2.5-10 Gb/s, moguće 40 Gb/s
Tolerancija disperzije	2000-3000 ps/nm kod 2.5 Gb/s 150-200 ps/nm kod 10 Gb/s
Spektralna širina	<10 MHz
Spajanje	Konektori ili „Pigtail“ kabel, optički izolator

Izvor: Izradio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Na sljedećoj slici 7. prikazan je laserski modul predviđen za brzinu modulacije do 2.5 Gb/s. Ima jednomodno „pigtail“ optičko vlakno, DFB laser diodu, nadzornu fotodiodu i optički izolator. Podržava 1310 nm i CWDM: 1470 ~1610 nm valne duljine. U pravilu se kod CWDM sustava koristi primopredajnik koji već u sebi ima integriran izvor svjetla, odnosno laser, a slika 7. služi za okvirni prikaz izgleda samostalnog CWDM laserskog modula.



Slika 7. DFB laserski modul

Izvor: online: http://www.furukawa.co.jp/fitel/english/active/pdf/Uncooled/ODC-9K001B_FOL1xxxMWI-OH2_Digital_B.pdf (14.08.2014)

3.1.1.4. FGL laseri

FGL (engl. Fiber Grating Laser) laser kao i DFB ima direktnu modulaciju, ali za razliku od DFB lasera nije ograničen niskom disperzijskom tolerancijom uzrokovanu laserskim „cvrkutom“. Kod FGL lasera ogibna se rešetka nalazi izvan laserskog medija [13, p.65], a FGL je direktno moduliran preko pogonske struje. Loša strana FGL lasera je preskakanje modova do koje dolazi zbog promjene indeksa refrakcije i povećanja pogonske struje. Glavne su karakteristike FGL lasera mala ovisnost valne duljine o temperaturi (samo 0.01 nm/°C u nehladenim uvjetima), brzina modulacije do 2.5 Gb/s (u laboratorijskim uvjetima do 10 Gb/s), manje od 1 nm spektralne širine generiranog svjetla (engl. linewidth) i niski laserski „cvrkut“. Uporaba FGL lasera je u CWDM sustavu moguća zbog male temperaturne ovisnosti valne duljine, čime bi se mogao smanjiti razmak između CWDM kanala. Zbog spomenutog preskakanja modova za vrijeme rada potreban je TEC [3, p.65], što poskupljuje laser te je to glavni nedostatak.

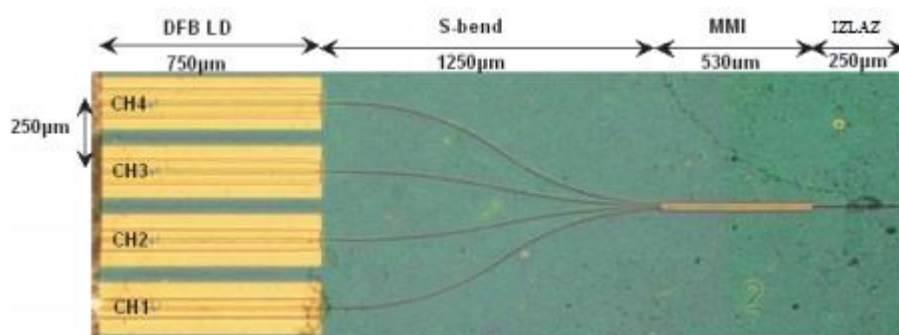
3.1.1.5. Laseri s vanjskim modulatorom

DFB laser je moguće modulirati vanjskim modulatorom koji se temelji na elektroapsorpcijskom efektu (engl. Electro Absorption – Externally Modulated Laser, EA-EML). Iako se radi o dva uređaja, oni su integrirani u jedan. EA-EML omogućuje neovisnu kontrolu lasera i modulaciju što utječe na bolje performanse u odnosu na DML, ali ga i čini skupljim izborom. EA-EML može se koristiti za nadogradnju postojećih CWDM prijenosnih sustava u cilju poboljšavanja performansi korištenjem dužih valnih duljina C i L pojasa, gdje je disperzija najveća. Pomoću vanjskog modulatora moguće je postići modulacije od 10 Gb/s preko jednomodnog vlakna na udaljenostima od 10 do 80 km [3, p.66].

3.1.1.6. Laserski niz

U CWDM sustavima koristi se više individualnih (diskretnih) primopredajnika koji imaju ugrađen laser, međutim postoje razna istraživanja hibridnih integracija lasera na jednom InP čipu, čime se eliminira trošak pakovanja. S druge strane, takva monolitska integracija zahtjeva kompleksniju proizvodnju, što uzrokuje veću cijenu. Cilj je ovakvih istraživanja pronaći ravnotežu između dobitka na pakiranju i gubitka proizvodnje [15]. Na

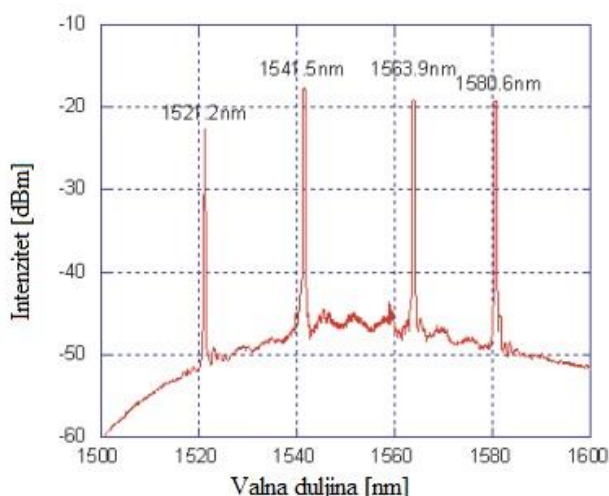
slici 8. prikazan je jedan takav monolitski integrirani laserski niz s razmakom između lasera samo 250 μm . Niz koristi četiri DFB lasera.



Slika 8. CWDM DFB laserski niz s integriranim MMI sprežnikom

Izvor: *Four channel DFB laser array with integrated combiner for 1.55 μm CWDM systems by MOVPE selective area growth* 2006., IEICE Electronics Express, online: www.researchgate.net (16.08.2014)

DFB laseri istovremeno emitiraju svjetlosne signale koji se preko višemodnog sučelja sprežnika (engl. multimode interference combiner, MMI) spajaju i ulaze iz više vlakana u jednomodno optičko vlakno svaki na različitoj valnoj duljini. Na slici 9. prikazan je laserski spektar svih četiriju kanala različitih valnih duljina s razmakom oko 20 nm koji se istovremeno emitiraju. Iako postoje obećavajuća istraživanja monolitskih više valnih laserskih nizova, kao što je i ovaj navedeni primjer, još uvijek nije komercijalno dostupan, ali se radi na istraživanju i budućoj proizvodnji [15, p.118].



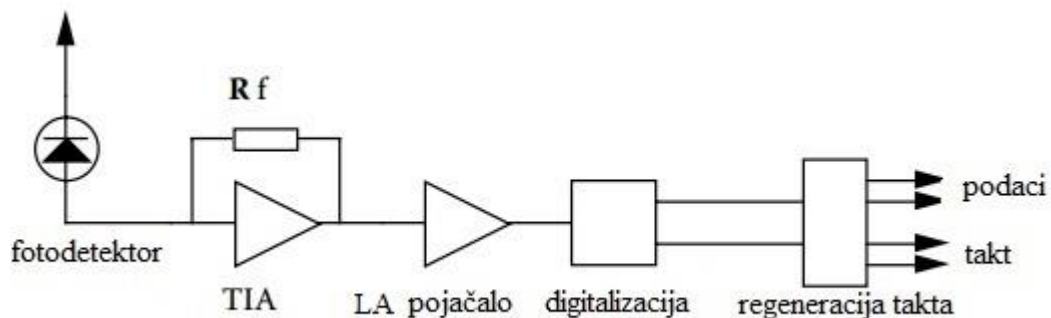
Slika 9. Spektar valnih duljina laserskog DFB niza

Izvor: *Four channel DFB laser array with integrated combiner for 1.55 μm CWDM systems by MOVPE selective area growth* 2006., IEICE Electronics Express, online: www.researchgate.net (16.08.2014)

Od svih prikazanih izvora svjetla, DML DFB laseri su trenutno najbolji izbor za CWDM prijenosne sustave gdje su brzine modulacije od 2.5 Gb/s sasvim dovoljne. Pri takvoj modulaciji dopušteni gubitak signala od 2 dB preko G.652 optičkog vlakna vrijedi za udaljenosti do 100 km, što je sasvim dovoljno za svjetlovodne pristupne mreže. Što se tiče modulacija većih od 10 Gb/s i udaljenostima većih od 10-15 km pri toj brzini, vrlo je mala vjerojatnost korištenja DML-a te je potrebno pristupiti nekim drugim rješenjima [11, p.80].

3.2. CWDM PRIJAMNICI

Glavna je zadaća optičkog prijamnika pretvaranje signala iz optičke domene u električnu. Sastoji se od jedinice za detekciju, pojačanje, digitalizaciju i podešavanje frekvencije. Radi na sljedećem principu: fotodetektor prihvaća dolazeći tok svjetla i pretvara ga u električni signal proporcionalan jačini svjetla kojim je fotodioda osvijetljena. Signal dalje putuje u transimpedantno pojačalo (engl. TransImpedance Amplifier, TIA), odnosno strujno/naponski pretvarač čiji je izlazni naponski signal proporcionalan ulaznoj struji. Ako je signal preslab, tada se pojačava preko limitirajućeg pojačala (engl. Limiting Amplifier, LA) i dalje nastavlja put u digitalizacijsko sklopovlje. U digitalnom se sklopovlju nalazi analogno/digitalni pretvarač koji signal pretvara u logičku „1“ ili „0“, ovisno o tome je li signal iznad ili ispod određene granice [11, p.139]. U zadnjem se koraku podešava takt i signal izlazi iz prijamnika. Prijamnik s takvom integracijom svih navedenih dijelova naziva se 3R prijamnik.



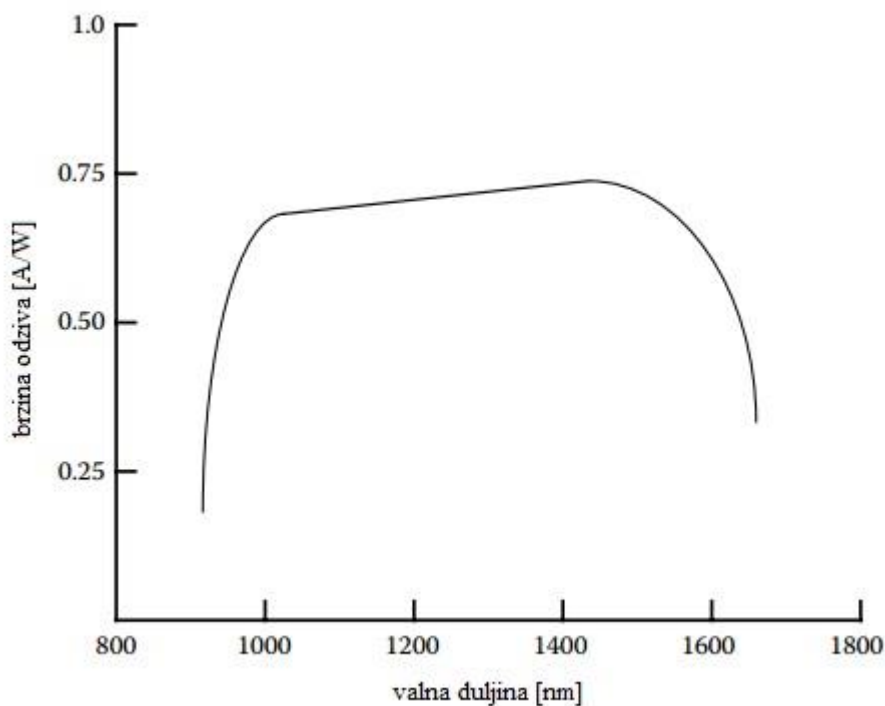
Slika 10. Shema CWDM prijamnika

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Kao fotodetektor se u CWDM sustavima najčešće koriste PIN (engl. P-intrinsic-N) fotodiode ili lavinske fotodiode (engl. Avalanche PhotoDiode, APD) koje se izrađuju od sličnog kvalitetnog poluvodičkog materijala.

3.2.1. PIN fotodioda

PIN fotodiode apsorbiraju ulazno svjetlo i generiraju struju proporcionalnu intenzitetu apsorbiranog svjetla. Dva su glavna parametra koja utječu na učinkovitost PIN dioda: brzina odziva i kapacitet. Brzina odziva opisuje konverzijsku efikasnost diode, tj. opisuje količinu proizvedene fotostruje kao funkciju ulazne optičke snage. Ta se vrijednost obično kreće od 0.5 do 0.9 A/W. U CWDM sustavima najčešće korišteni GaAs/InP fotodetektorima imaju širok spektralni odziv od 900 pa sve do 1650 nm. Takav široki spektar osigurava sličnu učinkovitost fotodiode preko cijelog spektra. Time se omogućava uporaba bilo kojeg prijamnika s bilo kojim predajnikom koji emitira svjetlost u CWDM pojasnom spektru, to je posebno važno u dvosmjernom prijenosu podataka preko jednog optičkog vlakna. Na slici 11. prikazana je brzina odziva u ovisnosti o valnom spektru.



Slika 11. Brzina odziva u ovisnosti o valnoj duljini PIN fotodiode

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Kapacitet utječe na brzinu prijenosa PIN fotodiode. Ukoliko je veća aktivna površina, utoliko je veći i kapacitet, a s većim kapacitetom smanjuje se brzina prijenosa. PIN fotodiode mogu raditi na brzinama prijenosa do 100 Gb/s [3, p.70] te su obično integrirane zajedno s TIA pretvaračem prikazanim na slici 10. Neka od najvažnijih svojstava prijamnika s PIN fotodiodom su:

- podržavaju detekciju velikih brzina prijenosa, preko 10 Gb/s, a obično se koriste za brzine prijenosa od 1.25 do 2.5 Gb/s za CWDM prijenosni sustav
- uobičajena im je uporaba u jeftinijim prijamnicima gdje se tolerira manja osjetljivost, -16 dBm pri 10 Gb/s i -22 dBm pri 2.5 Gb/s
- koriste se u kompaktnim prijamnicima sa strujno/naponskim pretvaračima malog šuma i često integriranim pojačalom

3.2.2. APD fotodioda

APD fotodiode koriste lavinski efekt unutar jakog električnog polja, unutar kojeg ulazna svjetlost stvara slobodne nosioce koji stvaraju još dodatnih nosioca, a to rezultira većom osjetljivošću nego kod PIN fotodiode. Zahvaljujući visokoj osjetljivosti, APD fotodioda idealan je izbor za CWDM prijenosni sustav u kojem se ne koriste pojačala, što rezultira jeftinijim prijenosnim sustavom. Najveća je brzina komercijalno dostupnih APD fotodioda 10 Gb/s što je manje nego kod PIN fotodioda, ali sasvim dovoljno za CWDM sustave.

Mana je APD fotodioda mala maksimalna ulazna optička snaga koja iznosi oko 0 dBm i relativno visoki suprotni istosmjerni prednapon, od 20 do 100 V, koji je potreban za rad APD fotodioda [3, p.77]. Neka od najvažnijih svojstava prijamnika s APD fotodiodom su:

- omogućuju izgradnju jeftinijeg prijenosnog sustava bez optičkih pojačala čime su idealne diode za CWDM prijamnik
- ostvaruju idealnu detekciju valnih duljina u mrežama bez optičkih pojačala ili gdje je potrebna mreža sa što manjim troškom
- osjetljivost veća od -30 dBm za 2.5 Gb/s i veća od -24 dBm za 10 Gb/s

U tablici 5. prikazana je usporedba APD i PIN fotodioda koje se koriste u optičkim CWDM primopredajnicima. Vidljivo je iz tablice kako češće korištena PIN fotodioda ima

veću brzinu, ali manju cijenu i osjetljivost nego što je to kod APD fotodiode, pa je to razlog češće uporabe PIN fotodiode.

Tablica 5. Usporedba PIN i APD fotodiode

	Osjetljivost	Brzina	Cijena
PIN	+	++	\$
APD	++	+	\$\$

Izvor: Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

3.3. CWDM PRIMOPREDAJNICI

Primopredajnik (engl. transceiver) je uređaj koji se sastoji od kombinacije predajnika i prijamnika te predstavlja jednu od ključnih komponenti optičkog prijenosnog sustava. Povijesno gledano, primopredajnici su proizašli iz sustava linijskih kartica. U takvim sustavima zajedno su se koristili izvori svjetla i detektori za slanje signala u slučaju predajnika i detekciju te procesiranje signala u slučaju prijamnika. Danas se koriste primopredajnici koji imaju integrirane diskretne lasere (DFB, VCSEL ili FP), upravljačko sklopovlje, PIN ili APD fotodiode te prijamničko sklopovlje u sklopu modula sa standardiziranim sučeljem.

Najveća je korist primopredajnika, tj. integriranog predajnika i prijamnika u dvosmjernim vezama iz razloga što svaka strana veze ima predajnik i prijamnik. Osim ove prednosti primopredajnika vrlo je važna i njihova modularnost, tj. mogućnost jednostavnog priključenja na električno sklopovlje. Ta modularnost omogućuje razdvajanje optike od elektroničkog dijela sustava i na taj način ostvaruje se cjenovno učinkovit dizajn sustava. Jedan je od zahtjeva te modularnosti usvajanje relevantnih standarda za primopredajnike [3, p. 79].

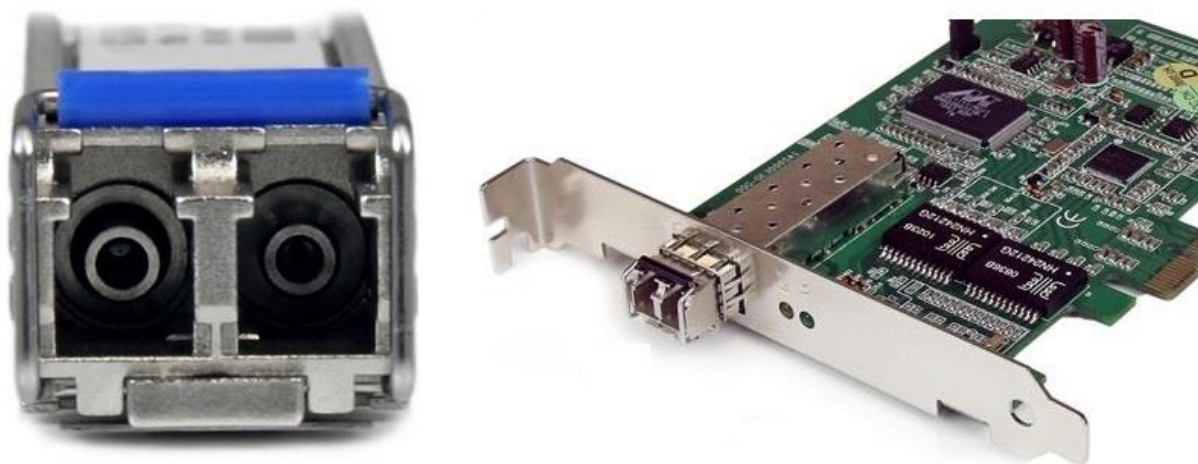
Na slici 12. prikazana je jedna skupina takvih primopredajnika (engl. pluggable transceivers) s mogućnošću jednostavnog priključenja na elektroničko sklopovlje. Primopredajnici su označeni bojama, a svaka boja predstavlja određenu valnu duljinu primopredajnika definiranu prema standardima, 1470 nm siva, 1490 nm ljubičasta, 1510 nm plava itd.



Slika 12. CWDM primopredajnički moduli

Izvor: online: <http://www.lightemsystems.com/list.php?categoryid=1&subid=18&dirlink=11> (18.08.2014)

CWDM primopredajnici najčešće koriste DFB laser zbog visoke učinkovitosti u gradskim i pristupnim mrežama kraćih udaljenosti. Kao fotodetektor najčešće koriste PIN fotodiodu zbog svoje jednostavnosti i male cijene [3, p.79]. Primopredajnici se nalaze unutar kaveza na tiskanoj pločici te su na taj način povezani s elektroničkim sklopovljem. Jedan takav primjer prikazan je na desnoj strani slike 13., a na lijevoj se nalazi CWDM primopredajnik s predajnikom i prijammnikom.



Slika 13. Prednja strana CWDM primopredajnika i tiskana pločica

Izvor: online: http://sgcdn.startech.com/005329/media/products/gallery_large/SFPGLCLHSMST.B.jpg,
http://sgcdn.startech.com/005329/media/products/gallery_large/SFPGESST.E.jpg (18.08.2014)

Najčešće se koriste SC i LC tip duplex konektora koji jednostavno „škljocnu“ (engl. snap in) u primopredajnički modul, takav tip konektora prikazan je na slici 14. Na lijevoj strani slike je SC, a na desnoj manji i više korišteni LC konektor.



Slika 14. Najčešće korišteni CWDM konektori

Izvor: online: <http://www.directindustry.com> (18.08.2014)

3.3.1. Vrste CWDM primopredajnika

S razvojem manjih konektora poput LC-a prikazanog na slici 14., počela je uporaba manjih *pluggable* primopredajnika. Takvi primopredajnici su postali široko dostupni oko 2002. godine [3], a ideja iza tih primopredajnika bila je smanjenje troškova i veličine primopredajnika.

3.3.1.1. SFF

Prvi takav komercijalno dostupan primopredajnik bio je SFF (engl. Small Form Factor) predviđen za valne duljine od 850, 1310 i 1550 nm [11, p.144]. SFF se koristio za brzine od 100 Mb/s pa sve do 2.5 Gb/s. To je bio prvi primopredajnik proizveden po MSA (engl. Multi-Source Agreement) dogovoru između glavnih proizvođača, sve u cilju veće interoperabilnosti primopredajnika.

3.3.1.2. GBIC

Nakon SFF-a uslijedila je proizvodnja GBIC primopredajnika (engl. GigaBit Interface Converter) koji se primarno koristio u djeliteljima i routerima za potrebe Gigabit Ethernet (GbE). GBIC je bio jedan od prvih primopredajnika koji je koristio prijamnik s APD fotodiodom umjesto PIN fotodiode, a razlog tome bila je potreba za povećanjem osjetljivosti [3, p.84]. Jedan takav CWDM GBIC primopredajnik predviđen za 1490 nm valnu duljinu prikazan je na slici 15.



Slika 15. CWDM GBIC primopredajnik

Izvor: online: <http://www.solid-optics.com/category/optical-modules/gbic/2/cwdm-gbic-1490-32db-so>

(18.08.2014)

3.3.1.3. SFP

SFP primopredajnik je bio manji od GBIC-a, ali GBIC je imao prednost veće fleksibilnosti. Iz ta dva primopredajnika proizašao je SFP primopredajnik (engl. Small Form Pluggable), veličine SFP primopredajnika, a funkcionalnošću GBIC-a. SFP primopredajnik se još naziva i mini-GBIC, iako takav naziv nije definiran prema MSA. U odnosu na GBIC, SFP ima manje rasipanja snage s obzirom da radi na manjoj voltaži, a osim toga SFP pruža mogućnost nadziranja razine snage, temperature i voltaže [3, p.85]. Danas su dostupni CWDM i DWDM SFP primopredajnici s brzinama prijenosa do 5 Gb/s [11, p.144].

U CWDM sustavima koriste se SFP primopredajnici koji podržavaju 16/18 kanala s prijenosnim brzinama do 2.5 Gb/s. SFP primopredajnici predstavljaju temelj CWDM prijenosnih sustava te omogućavaju jednostavan i cjenovno isplativ sustav. Koriste se za sinkrone optičke mreže (engl. Synchronous Optical Networks, SONET), Gigabit Ethernet, gradsku i svjetlovodnu pristupnu mrežu i sl.

Na slici 16. prikazan je CWDM SFP primopredajnik koji ima nehlađeni DFB laser i PIN fotodiodu. Dostupan je za različite valne duljine od 1471 do 1611 nm, ukupno 8 valnih duljina s razmakom od 20 nm prema ITU-T G.694.2 standardu. Ima metalno kućište za smanjenje elektromagnetskih smetnji (engl. electromagnetic interference, EMI). Namijenjen je za gradske i pristupne mreže, P2P mreže, SONET i GbE protokole. Brzina prijenosa mu je maksimalno 2.67 Gb/s, radna temperatura 0 do 70°C, te ima LC tip konektora [16]. Ovo je jedan primjer tipičnog CWDM primopredajnika.



Slika 16. CWDM SFP primopredajnik

Izvor: online: <http://www.finisar.com/products/optical-modules/sfp/FWLF15217Dxx> (18.08.2014)

3.3.1.4. Ostale vrste primopredajnika

Sljedeći iskorak za uporabu primopredajnika većih brzina može se potražiti u 10 Gb/s primopredajnicima. Neki od takvih uređaja su SFP+, XFP, XENPAK i X2. XENPAK ima zanimljiv koncept osmišljen prema standardu IEEE 802.3ae-2002 od strane Instituta za elektroniku i elektrotehniku (engl. Institute of electronic and electrical engineering, IEEE) za potrebe 10 Gb/s CWDM sustava. Riječ je o 10GBASE-LX4 prema kojem XENPAK radi na način da predaje i prima četiri optička signala u razmaku od 25 nm na valnim duljinama 1275, 1300, 1325 i 1350 nm. Ima brzinu prijenosa po kanalu 3.125 Gb/s, pa je ukupna brzina prijenosa 4 x 3.125 Gb/s, odnosno 12.5 Gb/s. Prednost je takvog dizajna što svaki kanal ima relativno malu brzinu, pa time i bolju disperzijsku toleranciju što omogućuje uporabu jeftinijih lasera i detektora [3, p.88]. Za razliku od većeg XENPAK optičkog primopredajnika, X2 je manji pluggable primopredajnik za 10 Gb/s primjenu. Također je kao i XENPAK izrađen po MSA dogovoru [17]. Primopredajnici s brzinama 10 Gb/s većinom se koriste u DWDM sustavima, gdje postoji potreba za većom brzinom i skupljim, preciznijim primopredajnicima. Mogu se koristiti i u CWDM sustavima, ali pitanje je koliko bi takav sustav bio cjenovno efikasan s obzirom da cijeli koncept CWDM-a počiva na maloj cijeni. Na slici 17. prikazan je X2 primopredajnik koji ima hladeni laser i ADP fotodiodu. Podržava cijeli ITU-T G.694.2 valni spektar i ima domet do 80 km preko SSMF vlakna.



Slika 17. 10 Gb/s primopredajnik

Izvor: online: <http://fibertop.manufacturer.globalsources.com> (18.08.2014)

3.4. OPTIČKO VLAKNO KAO PRIJENOSNI MEDIJ U CWDM SUSTAVIMA

U početnom razvoju optičkih vlakana najviše se pažnje poklanjalo razvijanju vlakana za magistralne mreže i DWDM sustave velikih brzina. Nakon pronalaska kvalitetnih rješenja za takve mreže velikih udaljenosti, stvorio se problem u manjim gradskim i pristupnim mrežama. To je potaknulo ulaganja u CWDM prijenosne sustave koji su cjenovno povoljniji i prihvatljiviji za takve mreže. Zahvaljujući ulaganjima u CWDM sustave i napretku proizvodnje optičkih vlakana, postalo je moguće uklanjanje OH^- apsorpcijskog „vodenog vrha“ oko 1385 nm. To je dovelo do uporabe optičkih vlakana punog valnog spektra (engl. full spectrum fibers) koja imaju male gubitke kroz cijeli valni CWDM spektar [3, p.20].

3.4.1. Gubici u CWDM optičkim vlaknima

Gubici su u optičkim vlaknima uzrokovani linearnim i nelinearnim efektima. Kod CWDM prijenosnih sustava utjecaj na propagaciju optičkog signala kroz vlakno imaju linearni efekti, dok nelinearni nemaju nekog efekta zbog malih duljina prijenosa i umjerenih razina snage bez korištenja pojačala [3, p.34]. Od linearnih efekata najveći utjecaj na gubitak signala u CWDM sustavima ima prigušenje i kromatska disperzija.

3.4.1.1. Prigušenje vlakna

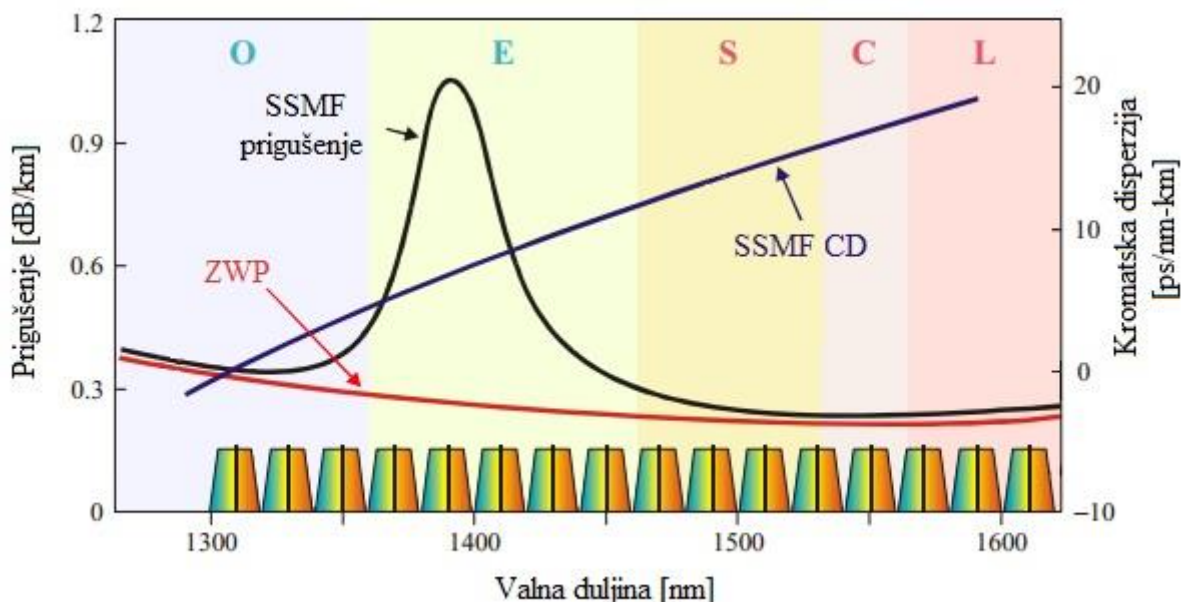
Utjecaji koji uzrokuju prigušenja u optičkim vlaknima korištenim u CWDM sustavima su sljedeći:

- Rayleighovo raspršenje
- Apsorpcija svjetla
- Nečistoće unutar materijala silicijevog vlakna
- Makro i mikro savijanja

Rayleighovo raspršenje je uzrokovano malom promjenom refrakcijskog indeksa vlakna na mikroskopskoj razini, manjoj od valnih duljina svjetla. To je neizbježna posljedica do koje dolazi prilikom proizvodnje optičkog vlakna. Proporcionalno je λ^{-4} , gdje je λ oznaka za valnu duljinu [11, p.9].

Gubitak zbog Rayleighovog raspršenja nastaje kad se svjetlost sudara s pojedinačnim molekulama optičkog vlakna. Dio raspršene svjetlosti izlazi iz jezgre i apsorbira se u plašt, a dio se vraća prema izvoru svjetla (engl. backscattering). Glavni su uzrok apsorpcije svjetla OH^- molekule vode i nečistoće unutar vlakna koje utječu na pretvaranje svjetla u toplinsku energiju. Dominanta OH^- apsorpcija koja se događa u optičkom vlaknu najizraženija je na valnim duljinama oko 950, 1385 i iznad 1600 nm [18].

Na slici 18. prikazana je tipična krivulja prigušenja SSMF vlakna i za jednomodna vlakna s uklonjenim „vodenim vrhom“ (engl. Zero Water Peak, ZWP). Oblik krivulje prvenstveno je određen Rayleighovim raspršenjem. Na valnoj duljini oko 1385 nm, vidljivo je povećanje gubitaka iznad Rayleighovog raspršenja uzrokovano „vodenim vrhom“, odnosno OH^- apsorpcijom. Na području povećane OH^- apsorpcije gubici su jako veliki i protežu se kroz cijeli E pojas, iznose preko 1 dB/km. ZWP krivulja prikazuje prigušenje modernih optičkih vlakana s uklonjenom OH^- apsorpcijom i bez „vodenog vrha“.



Slika 18. Atenuacijska i disperzijska krivulja jednomodnog optičkog vlakna

Izvor: Uredio Sandro Perman prema International Telecommunication Union 2009, *Optical fibres, cables and system*, online: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf

(18.08.2014)

Prije razvitka vlakana sa smanjenim ili uklonjenim OH^- „vodenim vrhom“ bila je uobičajena uporaba optičkih „prozora“ na oko 1300 nm i 1550 nm [18]. Optički se „prozori“ nalaze između apsorpcijskih pojaseva, a razlog tome je vidljiv iz slike 18. gdje je na valnom području oko 1550 nm najmanji gubitak i iznosi oko 0.185 dB/km, dok na oko 1310 nm krivulja ima svoj lokalni minimum i gubici iznose oko 0.325 dB/km. Nakon 1550 nm krivulja lagano raste, a uzrok tome su infracrveni apsorpcijski gubici, OH^- , makro i mikro savijanja.

Makro i mikro savijanja su dosta čest problem za već položene kabele jer uzrokuju dodatne troškove. Do njih dolazi prilikom proizvodnje, polaganja kabela i raznih vanjskih utjecaja za vrijeme životnog vijeka optičkog vlakna kao što su temperatura, vlaga ili tlak zraka. Razlika je između njih što su makro savijanja ona koja se vide golim okom, dok su mikro savijanja nevidljiva oku. Za isto makro savijanje od 25 mm, na valnoj duljini od 1625 nm gubitak je 2 dB/km, dok je na 1550 nm gubitak 0.4 dB/km [19, p.19], iz čega se jasno vidi ovisnost gubitaka makro savijanja i valne duljine.

3.4.1.2. Kromatska disperzija

Osim prigušenja signala, kromatska disperzija drugi je po redu ograničavajući faktor komunikacija preko optičkih vlakana. Nastaje kao posljedica različite brzine propagacije optičkih signala čija brzina ovisi o valnoj duljini, što znači da svjetlost na različitim valnim duljinama ne putuje jednakom brzinom. Zbog toga će svjetlost koja propagira optičkim vlaknom na različitim valnim duljinama pristizati na cilj u različitim vremenskim razmacima, što se u vremenskoj domeni manifestira kao širenje impulsa odnosno disperzija [20, p.3].

Na prošloj stranici, na slici 18. prikazana je krivulja kromatske disperzije za SSMF optičko vlakno čija disperzija na valnoj duljini od oko 1310 nm iznosi nula, odnosno nema disperzije svjetla. Također, vidljiva je i ovisnost kromatske disperzije o valnoj duljini svjetlosti koja raste povećanjem valne duljine. Kromatska se disperzija kod jednomodnih optičkih vlakana može podijeliti na tri tipa [3, 11]:

- materijalna disperzija (engl. material dispersion)
- valovodna disperzija (engl. waveguide dispersion)
- profilna disperzija (engl. profile dispersion)

Materijalna disperzija nastaje zbog ovisnosti indeksa refrakcije optičkog vlakna o valnoj duljini te je glavni izvor disperzije u jednomodnim vlaknima. Do nje dolazi prilikom interakcije propagirajuće svjetlosti s elektronima vezanim na okolnu materiju [11, p.12].

Valovodna disperzija je povezana s geometrijskim svojstvima vlakna i nastaje kad svjetlo putuje vlaknom promjera većeg nego što je promjer jezgre, dio tog svjetla rasprostire se jezgrom, a dio plaštem. Taj promjer vlakna naziva se MFD (engl. Mode Field Diameter). Kako jezgra ima veći indeks refrakcije nego plašt, svjetlo u plaštu putuje brže nego u jezgri. Ukoliko se poveća valna duljina svjetlosti, utoliko se povećava i MFD, što znači da se povećanjem valne duljine povećava i valovodna disperzija [21].

Profilna disperzija nastaje kao posljedica različite materijalne disperzije pojedinih primjesa u vlaknu što je obično jako mali iznos, pa se može zanemariti [3, p.27]. Osim navedenih utjecaja, postoji i disperzija polarizacijskih modova (engl. polarization mode dispersion, PMD), ali ona ne predstavlja problem u CWDM sustavima zbog malih brzina prijenosa i kratkih udaljenosti [3, p.31].

3.4.2. Vrste optičkih vlakana u CWDM sustavima

Karakteristike optičkih vlakana imaju velik utjecaj u optičkim prijenosnim sustavima i kao takvi utječu na cijenu sustava te su jedan od uvjeta izgradnje troškovno isplativog i efikasnog sustava. Prema transmisijskim karakteristikama razlikujemo dvije vrste optičkih vlakana: SSMF vlakna koja su već spomenuta u prethodnim poglavljima i višemodna vlakna (engl. multimode fiber, MMF). Razlika je između njih što kod jednomodnih vlakana istodobno propagira samo jedan diskretni snop svjetlosti, koji predstavlja jedan mod, dok kod višemodnih vlakana može propagirati i više tisuća modova [22].

Višemodnost kod MMF vlakana uzrokuje interferenciju svjetlosnih zraka što jako ograničava brzinu prijenosa podataka i maksimalni doseg. Fizičke karakteristike višemodnog vlakna omogućuju prijenos signala do oko 550 m, ovisno o korištenom protokolu i tipu vlakna. Višemodna se vlakna mogu nalaziti na mjestima gdje se još nije napravio prelazak na jednomodna vlakna kao što su neke kratke udaljenosti unutar zgrada, kampusa, odnosno LAN mreže [23]. U tom slučaju postoje CWDM rješenja nekih proizvođača s kojima se može povećati prijenos do oko 2 km i pritom se ostvaruju zadovoljavajuće brzine, čime se produžuje vijek takve infrastrukture [23, 24]. Osim u takvim specifičnim slučajevima, u pravilu se danas koristi silicijevo jednomodno vlakno za prijenos signala putem svjetlovodne mreže, što uključuje i CWDM prijenosne sustave.

Sva jednomodna optička vlakna koja se koriste u CWDM sustavima definirana su prema standardima ITU-T iz G. serije preporuka. Jednomodna vlakna korištena u CWDM prijenosnim sustavima mogu se podijeliti na sljedeće:

- Standardno jednomodno vlakno (SSMF), ITU-T G.652A-D
- Vlakna s pomaknutom nultom disperzijom (NZDSF), ITU-T G.655
- Disperzijsko kompenzacijsko vlakno (engl. Dispersion Compensation Fiber, DCF)

SSMF je najraširenije jednomodno vlakno korišteno u telekomunikacijskim sustavima. Određeno je preporukom ITU-T G.652 u kojoj su definirani razni parametri kao što je promjer jezgre, MFD, gubitak zbog makro/mikro savijanja itd. [25]. Osim toga navedene su i preporuke za više vrsta jednomodnih vlakana koja se razlikuju po tehnološkim i proizvodnim procesima. Od definiranih vrsta vlakana, za potrebe CWDM prijenosnih sustava najvažnija su vlakna sa smanjenim „vodenim vrhom“ (engl. low water

peak fiber, LWP) i već spomenuta ZWP vlakna definirana prema preporuci G.652C i G.652D.

3.4.2.1. Optička vlakna s uklonjenim „vodenim vrhom“

ZWP vlakna su vrlo značajna za CWDM sustave iz razloga što omogućuju korištenje cijelog valnog spektra. Prije početka komercijalne uporabe ovih vlakana telekomunikacijske tvrtke su izbjegavale E pojas u kojem se nalazi „vodenog vrh“. Za proizvodnju ovih vlakana bio je potreban veliki tehnološki napredak za uklanjanje OH^- molekula. Uklanjanje i smanjenje „vodenog vrha“ u ZWP i LWP vlaknu, bio je ključni element u razvijanju CWDM prijenosnog sustava. Zbog navedenih prednosti, jeftin CWDM sustav zajedno sa ZWP/LWP SSMF vlaknom idealno je rješenje za prijenos sve većeg generiranog prometa između pristupnih i magistralnih mreža. Osim samog uklanjanja „vodenog vrha“ bilo je potrebno i osigurati da ZWP/LWP vlakno zadrži svoje karakteristike tijekom cijelog životnog vijeka jer iako su takva vlakna bila bez „vodenog vrha“ s vremenom su se počeli stvarati gubici uzrokovani pojavom OH^- molekula [3, p.42].

3.4.2.2. Vlakna sa smanjenim gubitkom savijanja

Osim za LWP/ZWP optička vlakna, postoji interes i za proizvodnju vlakana koja imaju smanjeni gubitak zbog makro i mikro savijanja. To je posebno bitno kod instalacije optičkih kabela kod krajnjih korisnika, pogotovo ako se radi o ugradnji optičkog vlakna u samoj zgradi ili kući. U takvim sustavima kabele trebaju biti što manji, što posljedično uzrokuje manje zaštite za vlakna. Isto tako postoji problem rukovanja kabelima u takvim skućenim prostorima jer ima puno uglova i savijanja. U cilju rješavanja takvih problema razvijena su posebna vlakna s malim gubitkom i osjetljivošću na makro i mikro savijanja, što je posebno bitno u CWDM sustavima koja koriste cijeli valni spektar [3, p.39].

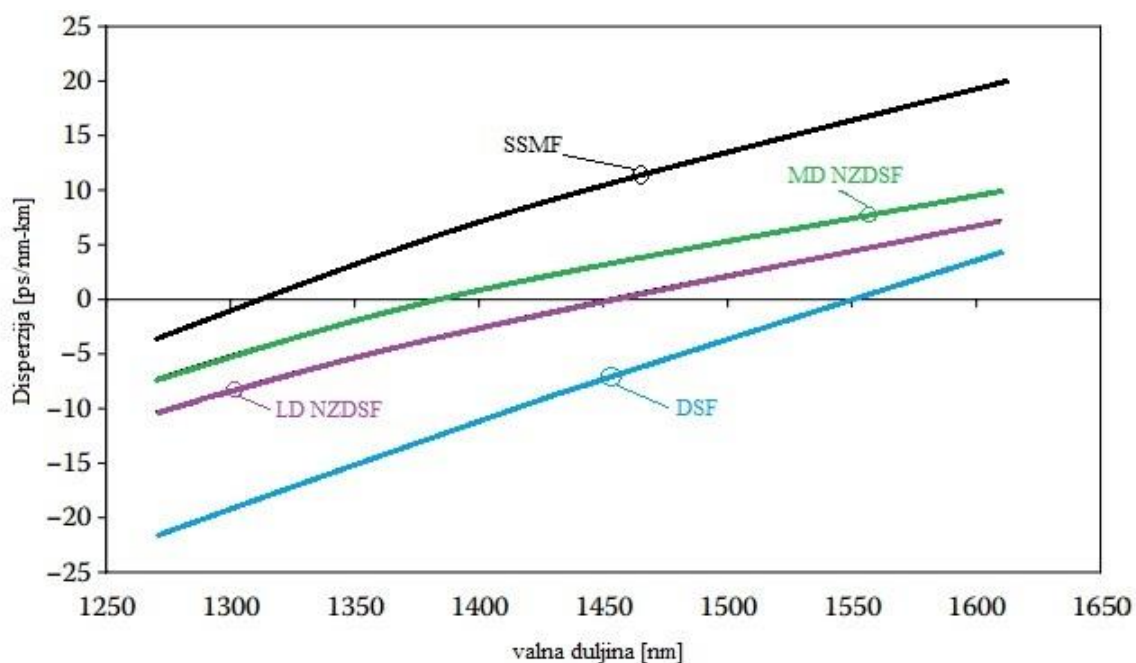
Karakteristike takvih vlakana određene su preporukom G.657. Danas postoje ZWP vlakna koja su dodatno optimizirana za smanjene gubitke zbog savijanja, što je vrlo dobro rješenje za navedene probleme u CWDM prijenosnim sustavima [26].

3.4.2.3. Vlakna s pomaknutom disperzijom

U ovoj skupini postoji dva tipa vlakna:

- vlakno s pomaknutom disperzijom (DSF)
- vlakno s pomaknutom nultom disperzijom (NZDSF)

Na slici 19. prikazane su različite krivulje vlakana s pomaknutom disperzijom. Na slici se nalazi i krivulja SSMF G.652 vlakna s nultom disperzijom oko 1310 nm, riječ je o istoj krivulji koja je bila prikazana na slici 18. Za razliku od SSMF vlakna, ostala vlakna imaju pomaknutu disperziju, tako DSF G.653 vlakno ima nultu disperziju na valnoj duljini od oko 1550 nm, vlakno s pomaknutom nultom malom disperzijom (engl. low dispersion non-zero dispersion shifted fiber, LD NZDSF) G.655 ima nultu disperziju oko 1450 nm, a vlakno s pomaknutom nultom srednjom disperzijom (engl. medium dispersion non-zero dispersion shifted fiber, MD NZDSF) G.656 ima nultu disperziju na oko 1375 nm.



Slika 19. Disperzija za različite vrste vlakana

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Navedena vlakna mogu naći primjenu u CWDM sustavima u slučaju potrebe za manjom disperzijom na određenim valnim duljinama. Korištenjem ovakvih vlakana

omogućuje se uporaba tog valnog spektra s boljim propagacijskim svojstvima. U tablici 6. prikazane su relevantne karakteristike jednomodnih vlakana za CWDM sustave.

Tablica 6. Disperzijske karakteristike jednomodnih vlakana

Vrste vlakna	D @ 1550 nm [ps/(nm*km)]	Nulta disperzija [nm]
G.652A/C	16 – 21	1311.5 ± 10
G.652B/D	16 – 21	1311.5 ± 10
G.655A	0.1 – 6.0	1480 ± 30
G.655B	1.0 – 6.0	1480 ± 30
G.655C	1.0 – 6.0	1480 ± 30
G.655E	5.5 – 10	1440
G.656	2.0 – 14	1480 ± 30
G.657A	16 – 21	1312 ± 12

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Grobe, K., Eiselt, M. 2014, *Wavelength division multiplexing, A practical engineering guide*, John Wiley & Sons, New Jersey.

3.4.2.4. Kompenzacijsko disperzijsko vlakno

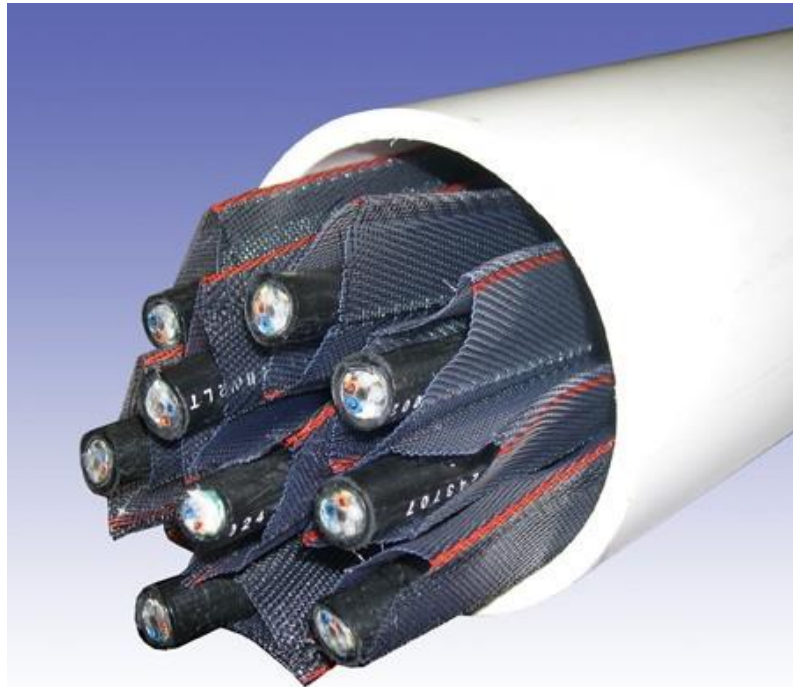
Postoji mogućnost kompenzacije disperzije korištenjem optičkog vlakna čiji je ukupan iznos disperzije jednak po iznosu, ali ima suprotan predznak ukupnoj disperziji standardnog vlakna. Taj se dio kompenzacijskog vlakna dodaje u postojeće optičke sustave koji koriste SSMF vlakna te se s njim može regulirati ukupna disperzija koja je suma materijalne i valovodne disperzije. Kako ukupna disperzija može imati negativan ili pozitivan predznak, kompenzacijskim disperzijskim vlaknom nastoji se dobiti nultu disperziju [20, p.7]. Kod CWDM sustava se koristi ova metoda kako bi kroz sve valne pojaseve bila približno ista kvaliteta propagacije optičkog signala [3].

3.4.3. Optičko vlakno u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je prema Pravilniku o svjetlovodnim i distribucijskim mrežama [56], definirana uporaba vlakana čije karakteristike moraju biti u skladu s ITU G.652D i G.657 preporukama. Također je definirana uporaba nemetalnih konstrukcija kabela malog vanjskog promjera koje se mogu postavljati klasičnim načinom (uvlačenjem) ili tehnologijom upuhivanja u cijevi malog promjera, odnosno mikrocijevi. To je osobito

važno u urbanističkim planovima uređenja gdje je sve manje prostora u izgrađenim kanalizacijama, pa je tehnologija mikrocijevi namijenjena za mikro optičke kabele idealno rješenje [56].

Na slici 20. prikazan je jedan primjer nove tehnologije mikrokabliranja s kojom se postiže jednostavna instalacija kabela u zauzetu cijevi i na taj način se može ugraditi velik broj optičkih kabela.



Slika 20. Primjer tehnologije mikrokabliranja

Izvor: online: <http://www.americanteledata.com/images/cableguidepic.jpeg> (04.09.2014)

3.5. OPTIČKI FILTRI ZA CWDM MUX/DEMUX UREĐAJE

Razlog za prevlast optičkog vlakna u odnosu na ostale prijenosne medije je ogromna količina informacija koju jedno vlakno može prenijeti. Međutim, za potpunu iskoristivost tog potencijala potrebno je implementirati valno multipleksiranje. Filtriranje valnih duljina zahtjeva korištenje selektivnih uređaja, odnosno filtara valnih duljina. Između brojnih funkcionalnosti koje filtri obnašaju u CWDM prijenosnim sustavima neke od njih su: izdvajanje jednog ili više kanala iz veće skupine kanala različitih valnih duljina, odvajanje jednog kanala od neželjenih šumova na različitim valnim duljinama i selektivno dodavanje-ispuštanje kanala u mrežnim čvorovima. Filtri trebaju podržavati usmjeravanje,

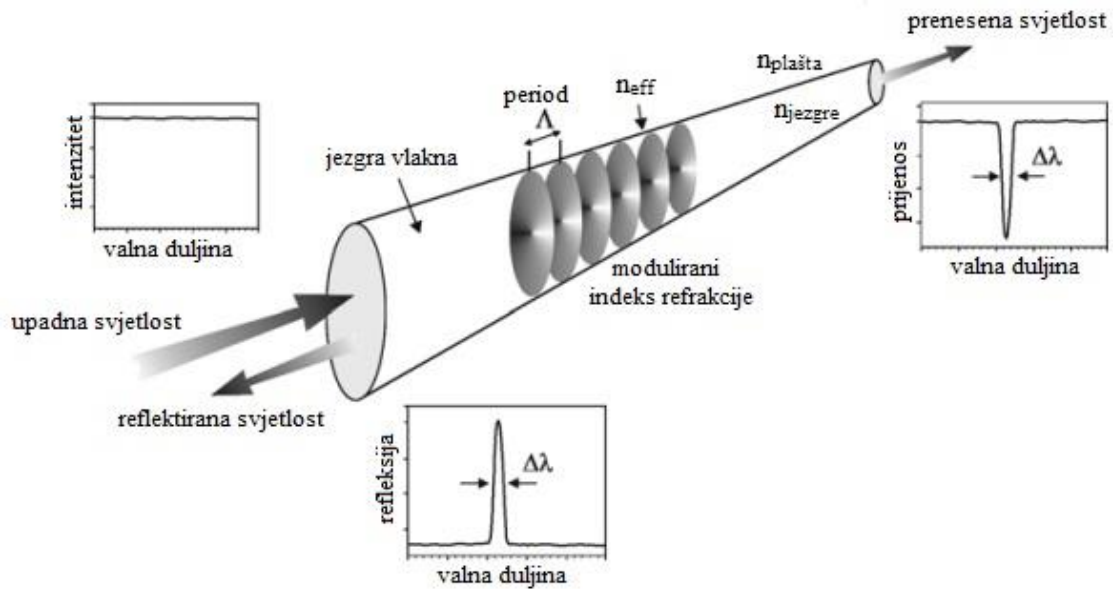
omogućiti kombiniranje valnih duljina bez proizvedenih gubitaka (ili vrlo malih gubitaka), a osim navedenih zadaća trebaju imati mogućnost kompenzacije učinaka disperzije na valne duljine svjetlosti [27].

Optička komunikacija temeljena na filtrima može biti jednostavna kao što je P2P veza, gdje se jedan podatkovni kanal koristi za prijenos informacija između dvije točke, a može biti i kompleksnija mreža kao što su: mreže zvjezdaste arhitekture, prstenaste ili isprepletene (engl. mesh) mreže [3, p.93]. Filtri mogu biti proizvedeni prema više različitih tehnika ovisno o broju korištenih kanala, temperaturnoj i polarizacijskoj ovisnosti uređaja, fizičkoj veličini i cijeni [27]. Za valno kombiniranje i odvajanje različitih valnih duljina ključnu ulogu imaju multiplekseri i demultiplekseri zajedno s filtrima. U sljedećim poglavljima istraženi su optički filtri koji bi se mogli koristiti za potrebe CWDM prijenosnog sustava.

3.5.1. Filtar s Braggovom rešetkom u vlaknu

Filtar s Braggovom rešetkom u vlaknu (engl. Fibre Bragg Gratings, FBG), nastao je zahvaljujući mogućnosti promjene refrakcijskog indeksa jezgre u optičkom jednomodnom vlaknu. To se čini pomoću apsorpcije UV svjetla koja se temelji na foto osjetljivosti optičkih vlakana. Foto osjetljivost optičkih vlakana omogućuje ugradnju, „upis“, periodičkih struktura direktno u jezgru vlakna [27, p.189]. Strukture su sastavljene od segmenata niskih i visokih refrakcijskih indeksa koji propuštaju ili odbijaju svjetlost zavisno o valnoj duljini [3, p.94]. Zahvaljujući foto osjetljivosti vlakna moguće je trajno promijeniti indeks refrakcije jezgre prilikom izlaganja svjetlu s karakterističnom valnom duljinom i intenzitetom koji ovisi o materijalu od kojeg je jezgra napravljena.

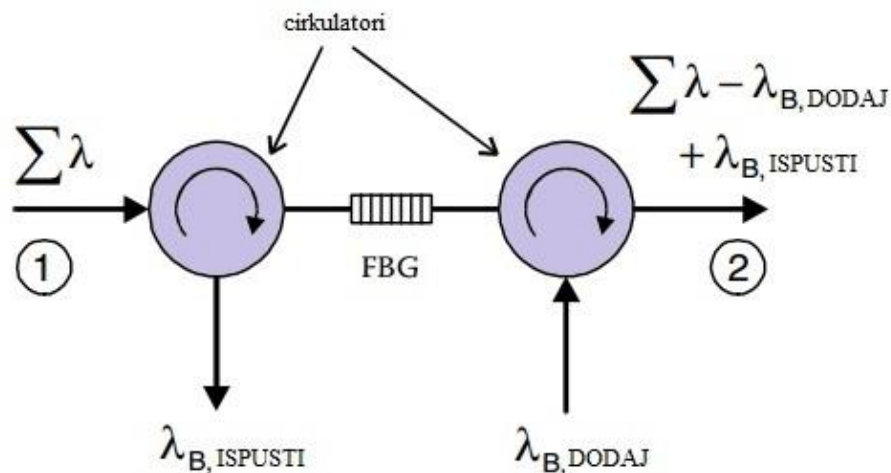
Na slici 21. nalazi se shematski prikaz „upisa“ Braggove rešetke u jezgru optičkog vlakna. Period između struktura različitih indeksa refrakcije označen je s Λ . Svjetlo na različitim valnim duljinama upada u jezgru optičkog vlakna. Dio svjetlosti se reflektira, a dio se propušta i prenosi dalje kroz vlakno. Propusnost reflektiranog i prenesenog svjetla ovisi o karakteristikama Braggove rešetke, duljini rešetke i modulaciji [27, p.190].



Slika 21. Shematski prikaz „upisa“ Bragove rešetke u jezgu optičkog vlakna

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin

Fiksni ili podesivi optički dodaj-ispusti multiplekseri (engl. optical add-drop multiplexers, (R)OADM) omogućavaju statičko ili dinamičko usmjeravanje u mrežama gdje se koristi valno multipleksiranje. Takav jedan primjer OADM-a s FBG filtrom prikazan je na slici 22., gdje se FBG nalazi između dva optička cirkulatora.



Slika 22. OADM temeljen na FBG filtru

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin

Radi na sljedećem principu: svjetlost različitih valnih duljina ulazi kroz priključno mjesto (1) te prolazi kroz prvi cirkulator. Prilikom nailaska na FBG, reflektira se Braggova valna duljina (λ_B) i usmjerava preko prvog optičkog cirkulatora te izlazi na ispusti izlaz, gdje se dalje procesira O/E pretvaračem. Za to vrijeme ostale valne duljine prolaze kroz FBG i izlaze kroz (2). Na ulaz dodaj, može se dodati novi optički kanal na istoj valnoj duljini (λ_B) koji također izlazi na izlaz (2) [3, 27, p.229].

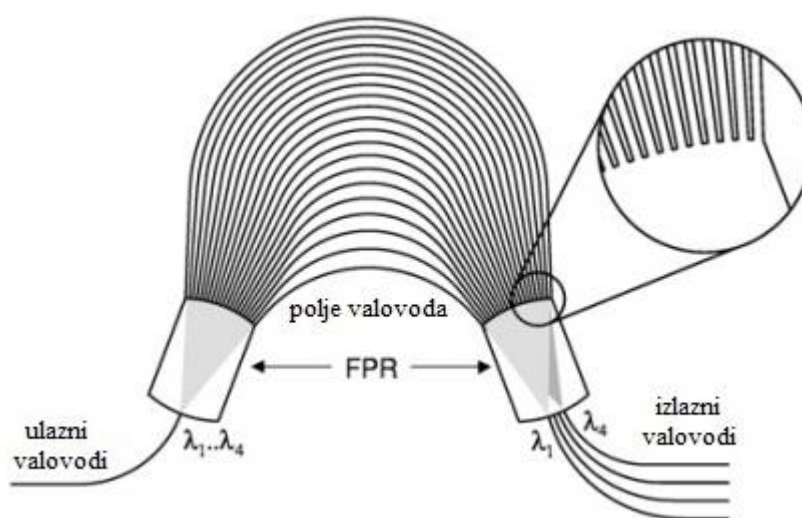
FBG filtri imaju široku uporabu u DWDM sustavima, kao filtri za optička pojačala i kao disperzijski kompenzatori. Za razliku od DWDM-a, u CWDM prijenosnim sustavima se ne koriste tako često zbog dva razloga [3, p.98]:

- širokog CWDM valnog spektra s malo kanala u odnosu na DWDM
- prevelike cijene koja se ne uklapa u ideju jeftinog CWDM sustava

Iz tih je razloga potrebno potražiti rješenja u nekim drugim filterima koji nemaju navedene nedostatke.

3.5.2. Rešetka s poljem valovoda

Filtar koji koriste rešetku s poljem valovoda (engl. Arrayed Waveguide Grating) prikazan je na slici 23.



Slika 23. Shematski prikaz AWG demultipleksera

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin

Filtar ima dva područja slobodne propagacije (engl. Free Propagation Regions, FPR). Svjetlo na različitim valnim duljinama $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \dots \lambda_n$, ulazi u valovod koji dalje vodi prema prvoj FPR regiji u kojoj se optička snaga jednako raspoređuje na polja valovoda. To uzrokuje interferenciju različitih optičkih signala u drugoj FPR regiji. Pomak u fazi je dizajniran na način da se zbog interferencije centralna valna duljina svakog komunikacijskog kanala raspoređuje na različiti izlaz valovoda, tako da se svaki kanal prosljeđuje na različito vlakno. Na taj se način demultipleksiraju valne duljine putem AWG filtra [3, 27].

AWG se obično koristi u magistralnim DWDM mrežama iz razloga što može multipleksirati/demultipleksirati velik broj DWDM kanala sa relativno malim troškovima [11, p.115]. Osim te primjene, postoje određeni modeli pristupnih mreža u kojima se koriste upravo AWG filtri.

AWG filtri imaju veliku temperaturnu ovisnost što utječe na odstupanja valnih duljina. Za postići temperaturnu neosjetljivost kod AWG filtara, potreban je visok stupanj kontrole što poskupljuje takav sustav [27, p.138]. Za ispravan rad s nehladenim DFB laserima, CWDM multiplekseri i demultiplekseri zahtijevaju odstupanje valnih duljina unutar 13 nm što nije jednostavno ostvariti na isplativ način koristeći AWG. S obzirom na navedeno u CWDM gradskim i pristupnim mrežama, AWG filtri nemaju značajnu ulogu [3, p.101].

3.5.3. Filtri s tankim filmom

Filtri s tankim filmom (engl. Thin-Film Filters, TFF) spadaju u filtre s više dielektričnih slojeva (engl. dielectric multilayer filters). To su prvi optički filtri korišteni za potrebe valnog multipleksiranja, još početkom 1990-ih godina [27, p.288]. Tehnologija dielektričnih slojeva se koristi u razne svrhe kao što su filtri za selektivno uklanjanje viška energije (engl. gain-flattening filters, GFF), kao pojačala vlakana dopiranih erbijem (engl. erbium-doped fibre amplifiers, EDFA), kao širokopojasni djelitelji za razdvajanje grupa kanala na raznim valnim duljinama, a koriste se i kao jeftino rješenje za MUX/DEMUX module kod CWDM sustava [27, p.288].

TFF filtri u odnosu na FBG i AWG filtre dominiraju optičkim tržištem. Razlog tome je što TFF filtri pružaju pouzdanost pasivnog uređaja, a cjenovno su prihvatljivi. MUX/DEMUX uređaji dobro projektiranog dizajna i proizvodnog procesa temeljeni na TFF filtru, ne zahtijevaju napajanje i kompleksno upravljanje alarmnim sustavom. Osim

toga, imaju skalabilnost koja im omogućava održavanje bilo kakvih planova kanala. Jednostavan dvokanalni WDM sustav koji koristi 1310 i 1550 nm valne duljine može biti nadograđen na više kanalni sustav kombinacijom spreznika i uskopojasnih filtara. To omogućava jeftiniju početnu investiciju s mogućnošću ugradnje dodatnih kanala prema potrebi. U usporedbi s ostalim filtrima, TFF ima vrlo povoljnu cijenu prema kanalu. FBG filtri su skuplji jer zahtijevaju korištenje cirkulatora za ispuštanje i dodavanje valnih duljina kod OADM uređaja. AWG filtri imaju jeftiniju cijenu po kanalu u odnosu na TFF, ali to je točno samo u slučaju uporabe više od 16 kanala, što nije od važnosti za CWDM sustave [3, p.101].

TFF filtri se sastoje od tankih dielektričnih slojeva različitih debljina i indeksa refrakcije. Da bi se ostvario željeni spektralni odziv ključno je kontrolirati debljinu slojeva prilikom proizvodnog procesa [27, p.290]. Dielektrični slojevi se obično sastoje od nekoliko Fabry-Perot šupljina koje određuju performanse optičkog filtra. Pojasne karakteristike TFF-a mogu se kontrolirati promjenom broja šupljina. U CWDM sustavima TFF filtri imaju dielektrične slojeve debljine od oko 30-40 μm . Zadnja strana dielektričnog filtra treba imati širokopojasni premaz protiv refleksije (engl. anti-reflection coating, AR) za smanjenje gubitaka jer inače dolazi do unutarnje refleksije. Za CWDM filtre AR premaz treba imati širok spektralni opseg od 1260 do 1620 nm [3, p.106].

Jedna od ključnih prednosti TFF filtara u odnosu na ostale filtre u telekomunikacijskim prijenosnim sustavima je mogućnost dizajniranja tako da imaju vrlo dobre spektralne performanse koje su stabilne pri promjeni temperature, što je vrlo bitno za CWDM sustave [27, p.310]. U CWDM sustavima koriste se dvije varijante TFF filtara, to su:

- rubni filtri (engl. edge filters)
- filtri s propusnim pojasom (engl. bandpass filters)

3.5.3.1. Rubni filtri

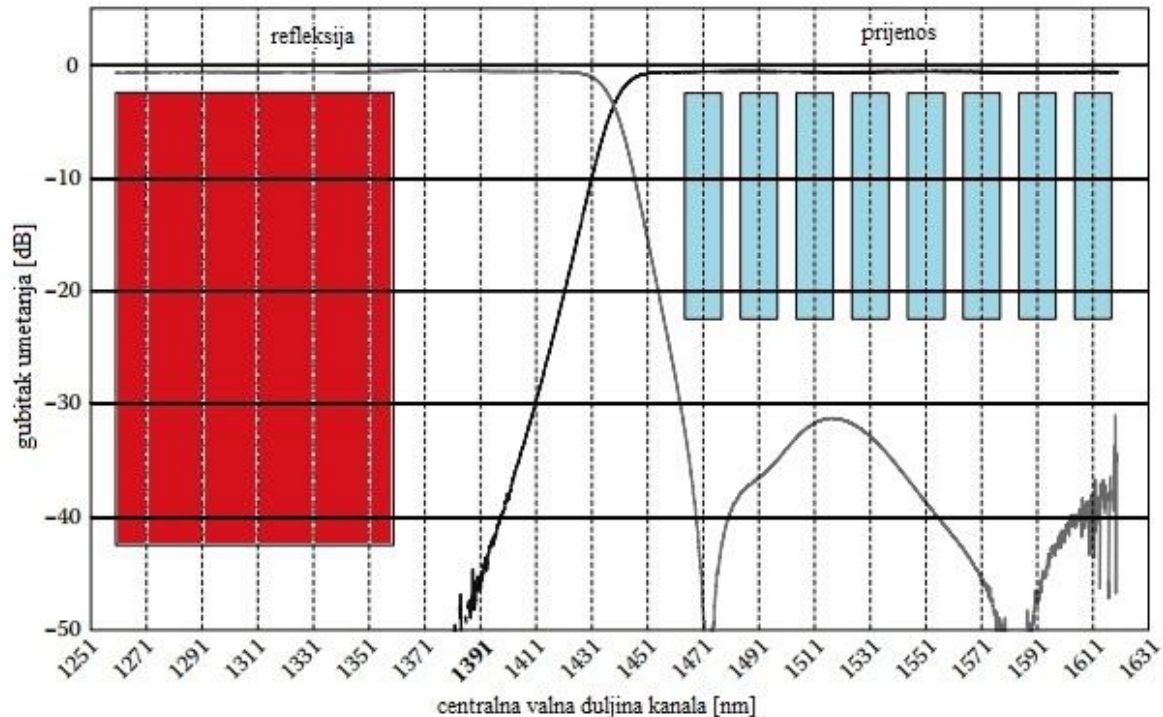
Rubni filtri koriste visoko reflektirajući premaz (engl. high reflector coating, HR). Temeljna struktura rubnih filtara su dielektrični slojevi s HR premazom koji imaju naizmjenično, sloj većeg refrakcijskog indeksa, pa sloj manjeg refrakcijskog indeksa. Fizička je debljina svakoj sloja određena preko $\lambda_0/(4n)$, gdje je λ_0 željena centralna valna duljina, a n je refrakcijski indeks materijala od kojeg je neki sloj izrađen. Slojevi s

ovakvom debljinom se još nazivaju četvrtinski valni slojevi (engl. quarterwave layers) [27, p.293].

Rubni filtri se dijele na dvije kategorije:

- kratkopojasni filtri
- dugopojasni filtri

Kratkopojasni filtri prenose svjetlo kraćih valnih duljina, a reflektiraju dulje. Za razliku od njih dugopojasni filtri djeluju na suprotan način, prenose duže valne duljine a reflektiraju kraće. Taj princip propuštanja i reflektiranja može se primijeniti na CWDM sustave, npr. moguće je propustiti 8 gornjih valnih duljina određenih prema ITU-T G.694.2, a reflektirati sve ostale. Jedan takav princip rada dugopojasnog filtra prikazan je na slici 24., gdje je vidljivo razdvajanje 1310 nm optičkog „prozora“ od 1550 nm optičkog „prozora“. Prikazana je i ovisnost o gubitku umetanja koji je vrlo bitan faktor prilikom planiranja troškova za izgradnju prijenosnog sustava.

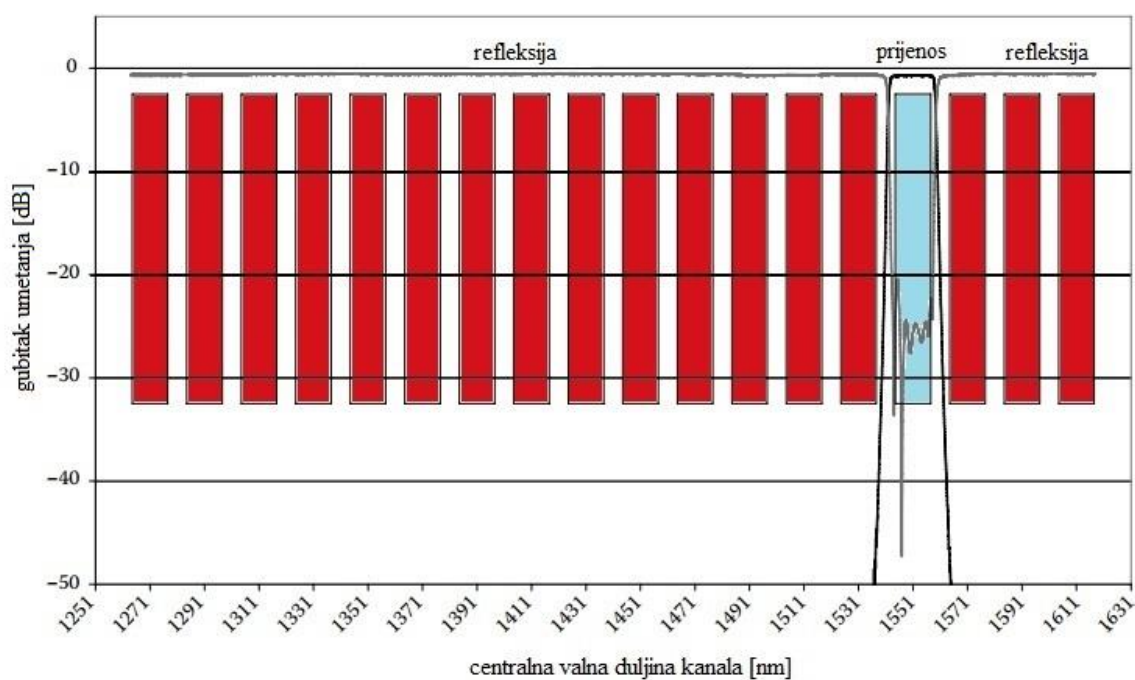


Slika 24. Rubni dugopojasni filter

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

3.5.3.2. Filtri s propusnim pojasom

U odnosu na rubni filter, ovaj tip filtra s propusnim pojasom se češće koristi u telekomunikacijskim sustavima [27, p.293]. Kod CWDM prijenosnih sustava, filtri s propusnim pojasom omogućuju selektivan odabir valne duljine, odnosno CWDM kanala. To se ostvaruje na način da filter propušta jedan kanala, a reflektira sve ostale valne duljine [3, p.107]. Jedan takav princip rada prikazan je na slici 25., filter s propusnim pojasom podešen je tako da propušta valnu duljinu na 1551 nm, a sve ostale valne duljine reflektira i ne propušta.

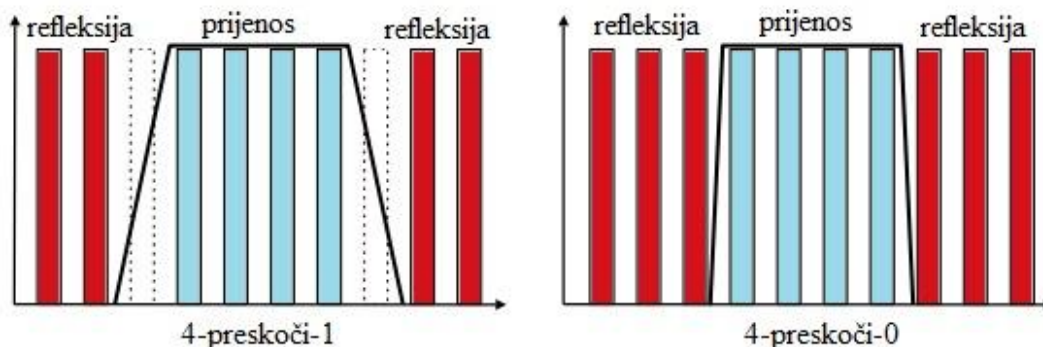


Slika 25. Filter s propusnim pojasom

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Osim navedenih dizajna postoji još jedan kompleksniji tip filtra s propusnim pojasom koji se koristi u modernim CWDM mrežama. Dva takva primjera prikazana su na slici 26. Na lijevoj strani slike, prikazan je 4-preskoči-1 (engl. 4-skip-1) filter koji omogućava prijenos četiri kanala, a izolaciju između reflektiranih i prenesenih kanala ostvaruje preskakanjem po jednog kanala s lijeve i desne strane valnog spektra. Za razliku od takvog filtra, 4-preskoči-0 (engl. 4-skip-0) prikazan na desnoj strani slike isto prenosi 4 kanala, ali ne preskače kanale. Preskakanje kanala nije preporučljivo iz razloga što se smanjuje broj

kanala i ukupna propusnost sustava zato 4-preskoči-0 ima bolje performanse nego 4-preskoči-1, ali i veću cijenu zbog kompleksnijih proizvodnih procesa [27, p.322]. Takav se princip rada može primijeniti na CWDM sustave, gdje se četiri kanala npr. 1511 – 1571 nm prenose, a susjedni kanali na 1471 i 1491 nm s lijeve strane te 1591 i 1611 nm s desne strane reflektiraju. Takva vrsta uređaja korisna je za kasniju nadogradnju sustava i koristi se za potrebe DWDM i CWDM prijenosnog sustava [3, p.107].



Slika 26. Prikaz 4-preskoči-0/1 filtra

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin

3.5.4. CWDM MUX/DEMUX uređaji s TFF filtrom

Da bi se TFF filtri koristili u optičkim prijenosnim sustavima potrebno ih je na neki način povezati preko sučelja s optičkim vlaknom. Uređaji koji imaju takva sučelja su multiplekseri i demultiplekseri (MUX/DEMUX), koji predstavljaju ključnu komponentu pasivne mreže. Za MUX/DEMUX uređaje postoje i drugi nazivi ovisno o namjeni i izvedbi, pa su neki od naziva paketi (engl. packages), sprežnici, optički bulk paketi (engl. bulk optic packages), micro-optički uređaji (engl. micro-optic devices) itd. [13].

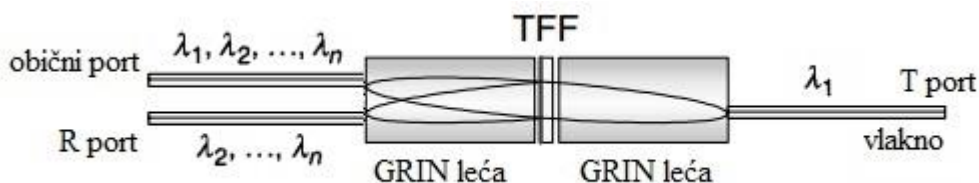
MUX/DEMUX uređaji temeljeni na TFF filtrima imaju široku uporabu za multipleksiranje i demultipleksiranje više kanalnih optičkih signala kako u DWDM, tako i CWDM sustavima. To je najviše zahvaljujući jednostavnosti, visokoj izolaciji, tehnološkoj zrelosti i širokopojasnoj propusnosti. MUX/DEMUX uređaji za potrebe WDM mreža trebaju zadovoljiti vrlo zahtjevne standarde vezano za vanjske uvjete kao što je visoka temperatura, vlaga i razni ostali utjecaji. Radni vijek takvih uređaja treba biti barem 25

godina prema standardu donesenom od strane Telcordie (standardi GR-1209 i GR-1221) [28, p.42]. U sljedećim su poglavljima obrađeni takvi uređaji.

3.5.4.1. Sprežnici

Sprežnici su jedna vrsta MUX/DEMUX uređaja korištenog u CWDM prijenosnim sustavima, a i ostalim optičkim prijenosnim sustavima. Najjednostavniji oblik je sprežnik s tri priključna mjesta (engl. 3-port coupler). Ovi uređaji su obično duljine od 30 do 50 mm, a promjer im je od 5 do 6 mm [3, 28]. Na ulaze i izlaze sprežnika spojena su optička vlakna tipa „pigtail“. Na slici 27. prikazan je shematski dijagram jednog takvog sprežnika s tri priključna mjesta, koji služi za razdvajanje jednog kanala od grupe ostalih kanala koristeći leće s gradijentnim indeksom (engl. gradient index lens, GRIN). Sastoji se od tri priključna mjesta: obično (engl. common port, COM), refleksijsko (engl. reflection port, R) i propusno (engl. passband port, T).

Radi na sljedeći način: optički signali na različitim valnim duljinama ulaze u sprežnik preko COM ulaza. Optički signal valne duljine λ_1 prolazi kroz TFF filtar te izlazi na T izlaz. Ostale valne duljine $\lambda_2 \dots \lambda_n$ reflektirane su pri doticaju s TFF filtrom te izlaze na R izlaz [28, p.48].



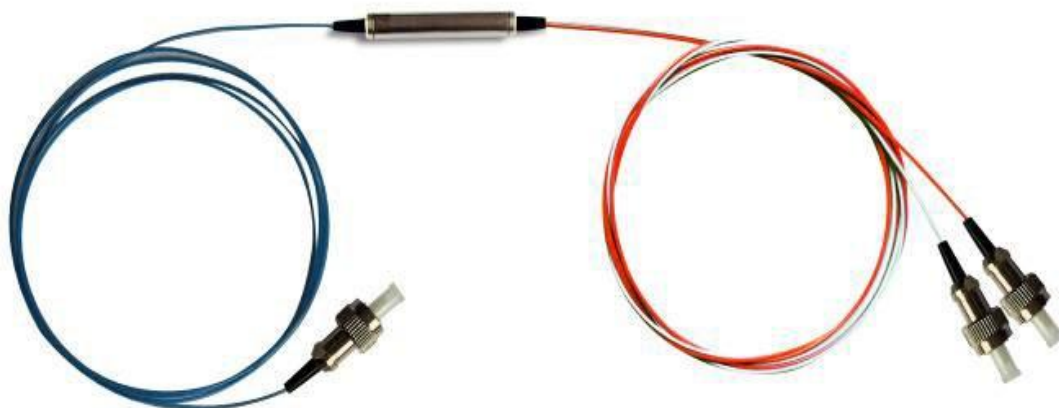
Slika 27. Shematski dijagram sprežnika temeljenog na GRIN lećama

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin

Sprežnik kao na slici 27. razdvaja svjetlo različitih valnih duljina koje ulaze kroz isto priključno mjesto, pa se može reći da se radi o DEMUX uređaju. U obrnutom smjeru, uređaj kombinira svjetlo različitih valnih duljina u jedno vlakno, pa kažemo da se radi o MUX uređaju. Pri proizvodnom procesu, centralna valna duljina koju filtar propušta može se jednostavno regulirati mijenjanjem udaljenosti optičkog vlakna COM i R priključnog mjesta, te pomicanjem vlakna T priključnog mjesta na odgovarajući način. To za posljedicu mijenja kut upadnog svjetla na filtar, čime se mijenja valna duljina [27, p.317].

Osim naziva sprežnik s tri priključna mjesta, koristi se termin 1x2 (1:2) sprežnik, što označava jedan zajednički ulaz te dva različita izlaza.

Na slici 28. prikazan je jedan takav CWDM 1x2 sprežnik koji zadovoljava ITU-T G.694.2 plan kanala i koristi TFF filtar. Osim toga zadovoljava i relevantne standarde Telcordie GR-1221/1209-CORE i direktivu od strane EU 2002/95EC o nekorištenju opasnih tvari (engl. Restriction of Hazardous Substances, RoHS) koja je navela proizvođače na korištenje stakla – ljepila, umjesto mesing – lem [3].



Slika 28. 1x2 CWDM MUX/DEMUX uređaj

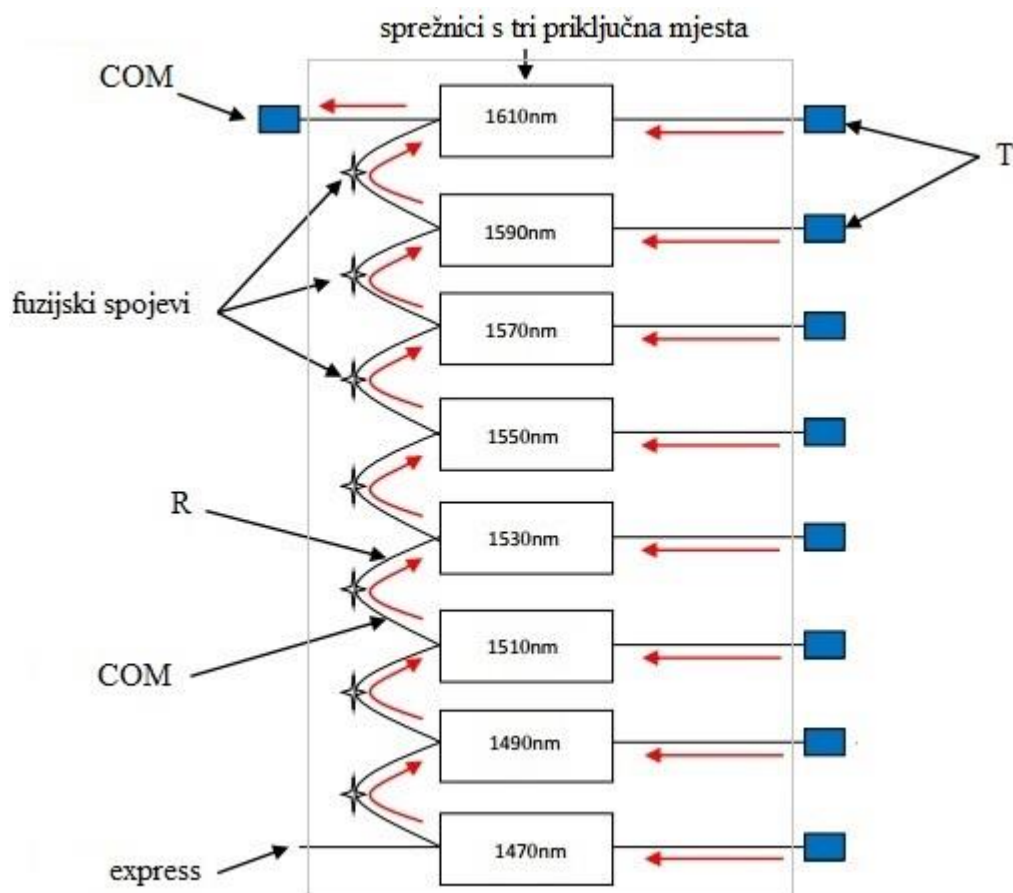
Izvor: online: <http://www.dkphotonics.com/product/1X2-cwdm.html> (24.08.2014)

3.5.4.2. CWDM moduli

U slučaju više kanalnog MUX/DEMUX uređaja potrebno je spojiti nekoliko sprežnika s tri priključna mjesta. Kod standardnog 8-kanalnog MUX/DEMUX CWDM uređaja potrebno je spojiti osam sprežnika. Seriju takvih sprežnika smješta se u posebno dizajnirane module u kojima su sprežnici povezani posebnim fuzijskim spojevima. Veličina modula ovisi o kompleksnosti sustava i broju kanala, npr. 8-kanalni CWDM modul koji koristi ulančane sprežnike ima dimenzije oko 100x80x10 mm³. Prilikom povezivanja sprežnika dolazi do gubitka umetanja po svakom kanalu koji raste za svaki sljedeći kanal u seriji. Ukoliko se MUX i DEMUX koriste u paru moguće je taj gubitak smanjiti tako da se napravi obrnuti redoslijed kanala u jednom od njih [3, 29].

Na slici 29. prikazan je 8-kanalni CWDM MUX modul koji se sastoji od ulančanih sprežnika s tri priključna mjesta. Ulančani niz kreće s najdužom valnom duljinom od 1610 nm pa sve do 1470 nm. Priključno mjesto R svakog sprežnika fuzijski je spojeno sa

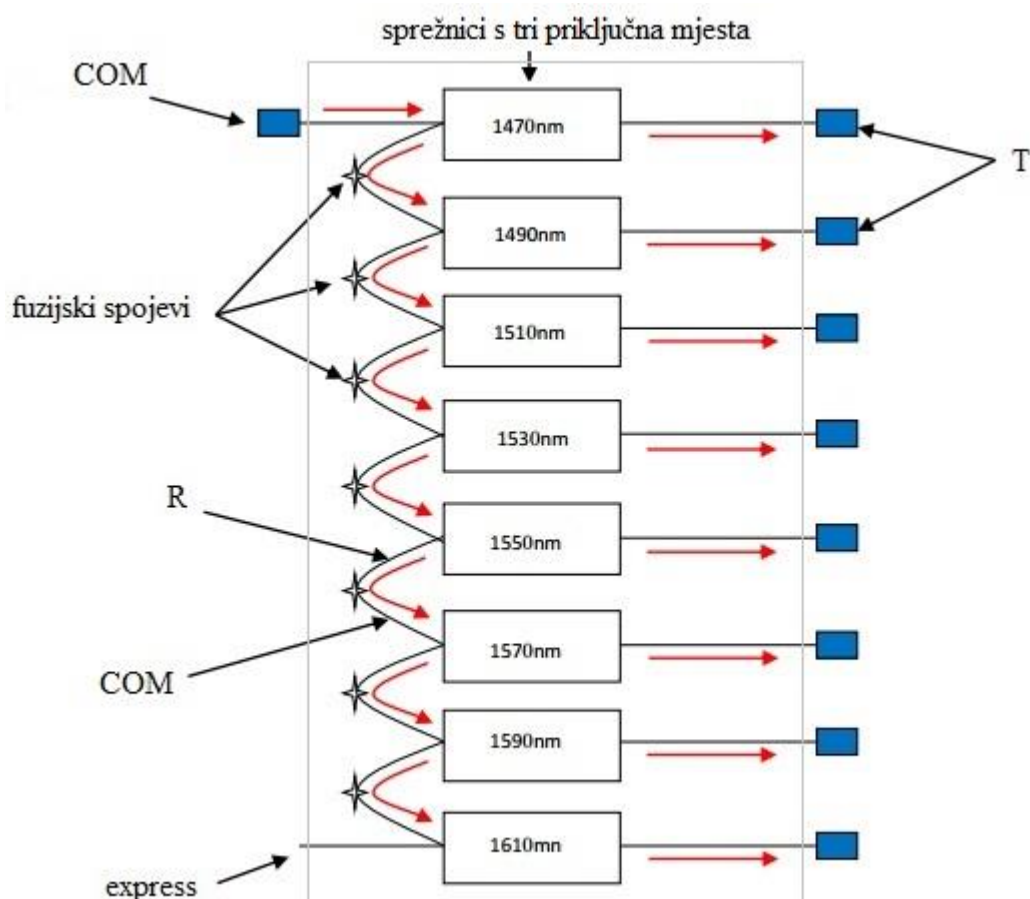
sljedećim COM priključnim mjestom. Express služi za dodavanje dodatnih kanala/valnih duljina u modul. T ulazi s desne strane predstavljaju konektore na koje se spajaju optička vlakna. U ovom slučaju se radi o MUX izvedbi tako da optički signali različitih valnih duljina idu prema zajedničkom COM izlazu i dalje nastavljaju propagaciju kroz isto optičko vlakno.



Slika 29. CWDM 8-kanalni MUX modul

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.clearfieldconnection.com/downloads/smart-tips/Clearfield_CWDM_Document.pdf (25.08.2014)

Na slici 30. prikazan je DEMUX modul. U slučaju DEMUX-a, optički signali različitih valnih duljina ulaze kroz COM ulaz te se određena valna duljina propušta kroz TFF filtar koji se nalazi u svakom sprežniku, dok se ostale reflektiraju i tako do kraja ulančanog niza. Na svaki je T izlaz preko konektora spojeno optičko vlakno kroz koje dalje propagiraju optički signali propuštenih valnih duljina. Ulančani niz kreće od kanala s najkraćom valnom duljinom 1470 nm , te se dalje nastavlja do najduže valne duljine 1610 nm [29].



Slika 30. CWDM 8-kanalni DEMUX modul

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.clearfieldconnection.com/downloads/smart-tips/Clearfield_CWDM_Document.pdf (25.08.2014)

U tablici 7. nalaze se prije spomenuti gubici umetanja koji se povećavaju sa svakim sljedećim kanalom. U slučaju ulančanog modula prikazanog u stupcu: valna duljina kanala, gubici će biti kao što je prikazano u ostatku tablice. Zahvaljujući obrnutom redoslijedu kanala MUX-a i DEMUX-a ukupni gubitak po istom kanalu ne prelazi 4.1 dB.

Osim navedenog 8-kanalnog MUX/DEMUX uređaja, u CWDM prijenosnim sustavima se koriste i moduli s 4 kanala, pa sve do modula s 16 kanala. Kod najčešće korištenih 8-kanalnih MUX/DEMUX-a koristi se raspon valnih duljina kao što je prikazano u prethodnim primjerima od 1471 do 1611 nm. Na slici 31. prikazan je 4-kanalni CWDM modul koji se nalazi u plastičnom kućištu, što se naziva ABS box pakiranje.

Tablica 7. MUX/DEMUX gubici

Valna duljina kanala [nm]	MUX gubitak [db]	DEMUX gubitak [dB]	Ukupni gubitak veze [dB]
1471	1.0	3.1	4.1
1491	1.3	2.8	4.1
1511	1.6	2.5	4.1
1531	1.9	2.2	4.1
1551	2.2	1.9	4.1
1571	2.5	1.6	4.1
1591	2.8	1.3	4.1
1611	3.1	1.0	4.1

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.



Slika 31. 4-kanalni CWDM modul u ABS pakiranju

Izvor: online: <http://www.networktop.com/networktop-cwdm-mux-demux-module-4-channel-dual-fiber-with-abs-plastic-box-p-1982.html> (25.08.2014)

Osim ovog načina pakiranja, CWDM MUX/DEMUX moduli se pakiraju u rack metalna kućišta (engl. rack mount box chassis) i LGX kućišta (engl. LGX box) čime se omogućuje jednostavna i brza ugradnja takvih modula u kompatibilne police i komunikacijske ormare. Na slici 32. prikazani su spomenuti načini pakiranja pa je tako na lijevoj strani slike prikazano LGX kućište, a na desnoj rack kućište.



Slika 32. CWDM LGX i rack kućište

Izvor: online: <http://www.fiberstore.com> (25.08.2014)

U tablici 8. nalazi se primjer jednog CWDM MUX/DEMUX modula, gdje su navedeni neki od najvažnijih parametara.

Tablica 8. Parametri CWDM 8-kanalnog modula

Parametar		MUX	DEMUX
Centralna valna duljina, λ_c [nm]		1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611	
Propusni pojas kanala [nm]		$\lambda_c \pm 6.5$	
Maksimalni gubitak umetanja [dB]		2.9 dB	3.2 dB
Izolacija kanala [dB]	susjedni	>15	>30
	udaljeni	>15	>50
Usmjerenost [dB]		>50	
Gubitak refleksije [dB]		>45	
Gubitak zbog polarizacije, PDL [dB]		<0.2	
Raspon operativne temperature [°C]		-40 do +75	
Tip vlakna		SSMF-28 ili ekvivalentno vlakno	

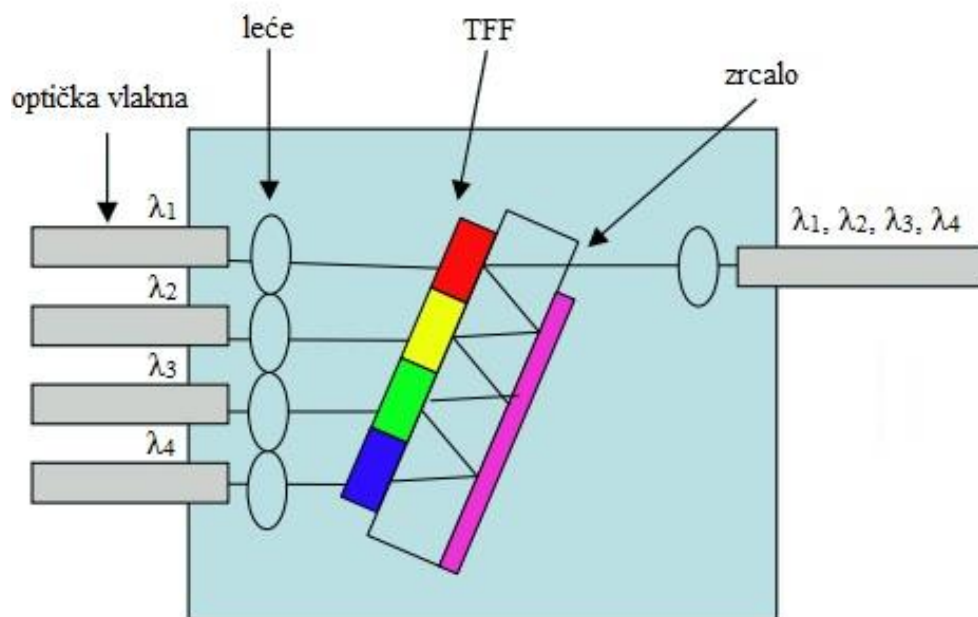
Izvor: Izradio Sandro Perman prema Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin

3.5.4.3. Zigzag moduli

Osim navedene arhitekture u kojoj se koriste ulančani sprežnici s načinom rada gdje reflektirane zrake izlaze i ponovno ulaze u sprežnike te se tako multipleksira/demultipleksira optički signal, postoji i zigzag arhitektura, odnosno koncept višestrukog

odbijanja (engl. multiple bounce concept) [27]. U zigzag arhitekturi se zraka svjetlosti reflektira od svakog filtra bez ponovnog vraćanja u vlakno, a filtri su ugrađeni u optičkom bloku. Takva zigzag arhitektura smanjuje gubitke koji su prisutni kod ulančane arhitekture jer reflektirana svjetlost ne izlazi ponovno u vlakno, već se unutar optičkog bloka odbija.

Na slici 33. prikazana je jedna takva 4-kanalna zigzag arhitektura. Svjetlost različitih valnih duljina ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$) ulazi kroz jedno optičko vlakno (COM ulaz). Prilikom kontakta s TFF filtrom optički signal valne duljine λ_1 prolazi kroz TFF filtar i izlazi iz uređaja u optičko vlakno. Ostatak valnih duljina odbija se od filtra, pa od zrcala i pri doticaju s TFF filtrom λ_2 prolazi kroz filtar, dok se ostatak ponovno odbija i tako do kraja niza [30]. Prema načinu rada navedeni primjer je DEMUX uređaj jer razdvaja valne duljine.



Slika 33. Zigzag arhitektura

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.ieee802.org/3/ba/public/jul08/paatzsch_01_0708.pdf
(25.08.2014)

Ovakav zigzag koncept nudi mogućnost dodatnog smanjenja dimenzija uređaja, a samim time i jeftiniji uređaj zbog manjeg broja dijelova, npr. za 8-kanalni uređaj potrebno je 9 leća, dok je kod ulančanog niza spreznika potrebno 16 leća. Nedostatak je zigzag uređaja u odnosu na ulančani niz spreznika zahtjevniji i osjetljiviji proizvodni proces.

Pravi je proboj zigzag koncepta zaživio pojavom CWDM sustava. Razlog tome je što CWDM sustav dopušta veća odstupanja i nema toliko stroge zahtjeve kao npr. DWDM, čime se omogućio jednostavniji proizvodni proces i veća tolerancija. Svi zigzag dizajni

imaju veći upadni kut (engl. angle of incidence, AOI) u odnosu na dizajn sa sprežnicima. Tipična je AOI vrijednost između 10° i 14°. AOI povećava gubitak zbog polarizacije (engl. polarization dependent loss, PDL) što je prihvatljivo za CWDM sustave, ali ne i za DWDM [3, p.121]. Jedan takav uređaj koji radi na zigzag principu prikazan je na slici 34., a njegovi parametri u tablici 9.



Slika 34. CWDM zigzag MUX/DEMUX

Izvor: online: <http://www.cubeoptics.com> (25.08.2014)

Tablica 9. Parametri 8-kanalnog zigzag MUX/DEMUX uređaja

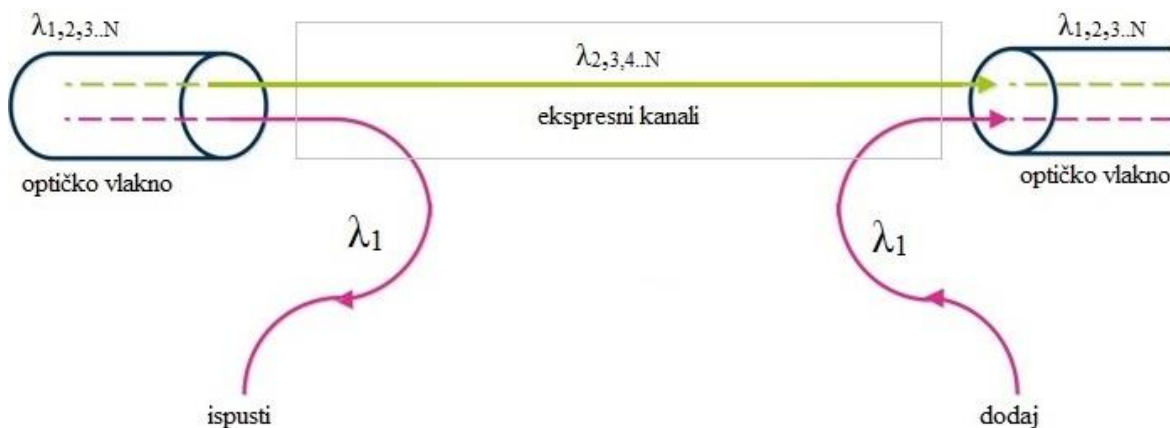
Parametar		MUX/DEMUX
Centralna valna duljina, λ_c [nm]		1471, 1491,.....,1591, 1611
Propusni pojas kanala [nm]		$\lambda_c \pm 6.5$
Gubitak umetanja[dB]		1.3
Ukupni gubitak veze, MUX i DEMUX u paru [dB]		2.6
Izolacija kanala [dB]	susjedni	>30
	udaljeni	>40
Usmjerenost [dB]		>50
Gubitak refleksije [dB]		>45
Gubitak zbog polarizacije, PDL [dB]		<0.2
Raspon operative temperature [°C]		-40 do +75

Izvor: Izradio Sandro Perman prema online: <http://www.cubeoptics.com> (25.08.2014)

Zigzag na slici 34. ima dimenzije $19 \times 15.5 \times 9 \text{ mm}^3$, što je neusporedivo manje nego kod MUX/DEMUX modula temeljenih na ulančanim sprežnicima s tri priključna mjesta. Takav uređaj može obnašati funkciju multipleksera ili demultipleksera, a ako se koristi u paru vrlo je mali gubitak umetanja. Kao i MUX/DEMUX moduli koji koriste sprežnike, zadovoljava RoHS direktivu i standarde Telcordia GR-1209/1221.

3.5.4.4. OADM uređaji

U poglavlju o FBG filtrima spomenuti su optički dodaj-ispusti multiplekseri. To su vrlo bitne komponente u CWDM prijenosnom sustavu, pa su iz tog razloga dodatno objašnjene u ovom dijelu rada. Optički dodaj-ispusti multiplekseri mogu biti fiksni kao što je OADM ili podesivi (engl. reconfigurable, ROADM). ROADM se većinom koristi kod DWDM sustava, dok je za potrebe CWDM prijenosnog sustava dovoljan OADM uređaji [31, p.79]. Ovi uređaji se nalaze u čvorovima (engl. nodes) i koriste se za distribuciju CWDM kanala, odnosno za ispuštanje ili dodavanje valnih duljina u mrežu. Valne duljine koje prolaze nepromijenjene kroz OADM nazivaju se ekspresni kanali. Na kanalu gdje je ispuštena valna duljina, dodaje se nova prema potrebi mreže. Princip rada prikazan je na slici 35. na kojoj OADM uređaj ispušta i dodaje jednu valnu duljinu. Sve valne duljine prolaze kroz filter, dok se optički signal valne duljine λ_1 ispušta. Ispušteni kanal λ_1 može biti zamijenjen novim kanalom koji mora biti iste valne duljine. Gubitak signala do kojeg dolazi u ispusti/dodaj ulazima i izlazima je od 1.5 do 2.5 dB. OADM uređaji koji se koriste u CWDM sustavu imaju obično 1-kanalne ili 4-kanalne konfiguracije [3, p.256].



Slika 35. OADM princip rada

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: <http://www.transmode.com/en/technologies/wdm-the-transmode-way/wdm-the-transmode-way.html/3-creating-the-topology#wdm-3.4.2> (26.08.2014)

4. SVJETLOVODNA MREŽA

Cijeli prijenosni sustav može se podijeliti u nekoliko dijelova. Svaki dio mreže razlikuje se po udaljenosti, propusnoj brzini, topologiji, protokolima, broju čvorova, opreme i korištenom broju valnih duljina, osim toga svaki dio svjetlovodne mreže ima posebnu grupu zahtjeva koje treba ispuniti. Svjetlovodne se mreže mogu podijeliti na četiri razine:

- magistralne mreže (engl. long haul)
- regionalne ili jezgrene mreže (engl. core)
- gradske mreže (engl. metro)
- pristupne mreže (engl. access)



Slika 36. Podjela svjetlovodnih mreža

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online http://www.transmode.com/images/html_pdf/wdm-the-transmode-way/Bild04-web.jpg (26.08.2014)

Magistralne mreže čine svjetlovođi velikih udaljenosti koji povezuju različite regije i države, odnosno glavna naseljena područja kontinenta [36]. Udaljenosti koje takve mreže pokrivaju mogu biti od nekoliko stotina do nekoliko tisuća kilometara. Takve mreže čine „kralježnicu“ (engl. backbone) globalnih mreža [34]. U takvim se mrežama koriste DWDM sustavi s 64 do 160 valnih duljina po jednom optičkom vlaknu. Koriste se pojačala i oprema temeljena na SONET/SDH platformi. Propusnost koja se ostvaruje u tim

mrežama je 10, 40 ili čak 100 Gb/s [3, 32]. Danas su magistralne mreže većinom izgrađene, pa je za očekivati mala do srednja ulaganja u takve mreže [3, p.252]. Primjer jednog takvog magistralnog svjetlovoda od 100 Gb/s je veza između Splita i Varaždina duljine 600 km, ostvarena DWDM sustavom u pilot projektu TeraStream [33].

Jezgrena ili regionalna mreža direktno je povezana s magistralnim vodovima, preko niza čvorova. Jezgrene mreže imaju isprepletenu prstenastu topologiju koja se sastoji od međusobno povezanih centralnih čvorova na području jednog grada ili više manjih gradova u regiji. Jezgrene mreže pokrivaju udaljenosti od 50 do 300 km. Koristi se oprema koja podržava SONET/SDH i Ethernet protokole, a brzine prijenosa su od 2.5 do 10 Gb/s. Za razliku od magistralnih mreža, u jezgrenim mrežama ima više ulaganja zbog sve veće potrebe za povećanjem propusnosti u pristupnim mrežama [3, p.252].

4.1. SVJETLOVODNA GRADSKA MREŽA

Gradske mreže pokrivaju područja gradova i okolnih naseljenih prostora. Unutar gradskog područja postoje razni spojni putovi prema mobilnim stanicama, poslovnim subjektima, industrijskim područjima, stambenim naseljima i drugim objektima. Takvi spojni putovi čine agregacijsku transportnu mrežu koja akumulira promet prema središnjim dijelovima strukture. Gradske mreže pokrivaju područja od nekoliko desetaka pa do stotinjak kilometara [32, 35]. Područje pristupa unutar gradskih čvorova ima mogućnost velikog rasta i inovacija. Karakteristike gradskih pristupnih mreža su kratke udaljenosti i potreba za različitom opremom koja podržava razne protokole. Topologije su prstenaste (engl. ring) i P2P preko kojih se prenosi 4 – 16 valnih duljina. Propusnosti su od 100 Mb/s pa do 2.5 Gb/s. Protokoli koji se koriste su T1, SONET, Fiber Channel, Ethernet, ATM i ESCON.

CWDM se dobro uklapa u takve mreže jer uklanja potrebu za polaganjem dodatnih optičkih kabela što je vrlo skupo u gradu, već umjesto toga omogućava povećanje propusnosti, npr. između dvije zgrade jednostavnim korištenjem dodatnih valnih duljina. Osim toga, CWDM omogućuje korištenje različitih protokola što je vrlo bitno s obzirom na broj protokola koji se koriste u jednoj takvoj mreži. Osim navedenih razloga, vrlo je bitno i to što je CWDM jeftino rješenje koje je moguće nadograditi čime se smanjuje početno ulaganje [3, p.253].

4.1.1. P2P topologija

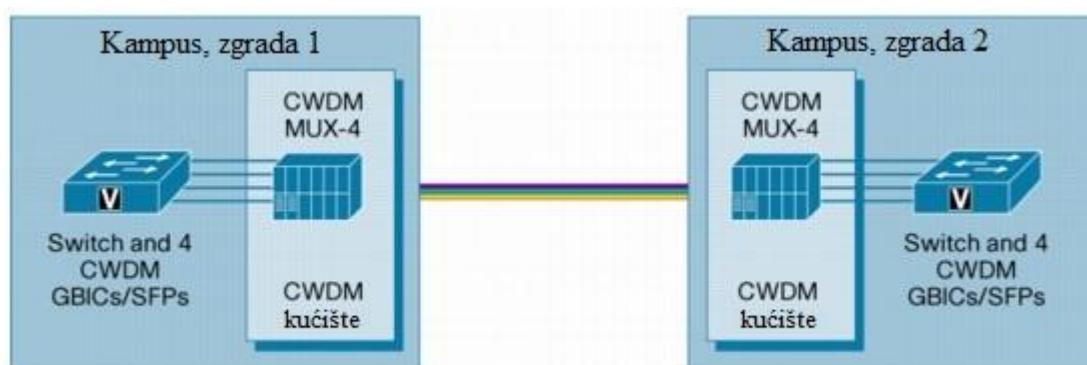
P2P mrežna topologija sastoji se od dva čvora i veze preko koje neposredno komuniciraju [37]. Na slici 37. prikazana je takva topologija o osnovnom obliku.



Slika 37. Točka-točka topologija

Izvor: Izradio Sandro Perman

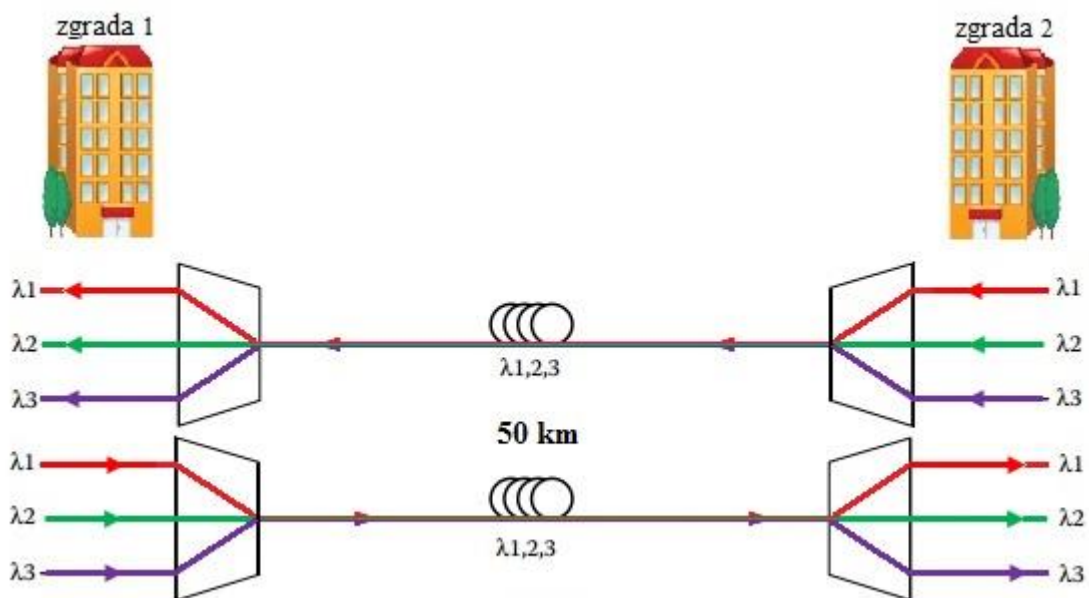
Preko P2P topologije moguće je povezivanje zgrada, kampusa ili čvorišta koji se nalaze u gradskom području. Na slici 38. prikazana je P2P veza gdje je potrebno koristiti različite valne duljina za slanje (Tx) i primanje (Rx) optičkih signala s obzirom da se koristi samo jedno optičko vlakno.



Slika 38. CWDM P2P veza s jednim vlaknom

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: <http://www.cisco.com> (27.08.2014)

Tipični CWDM P2P gradski spojni put koristi MUX i DEMUX u paru na svakom kraju veze. Jedan takav princip spajanja prikazan je na slici 39. gdje se radi o dvosmjernoj vezi s dva optička vlakna koja su međusobno neovisna. Uporaba optičkih vlakana u paru omogućuje korištenje istih valnih duljina za slanje podataka po jednom i po drugom optičkom vlaknu.



Slika 39. CWDM P2P veza s dva vlakna

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

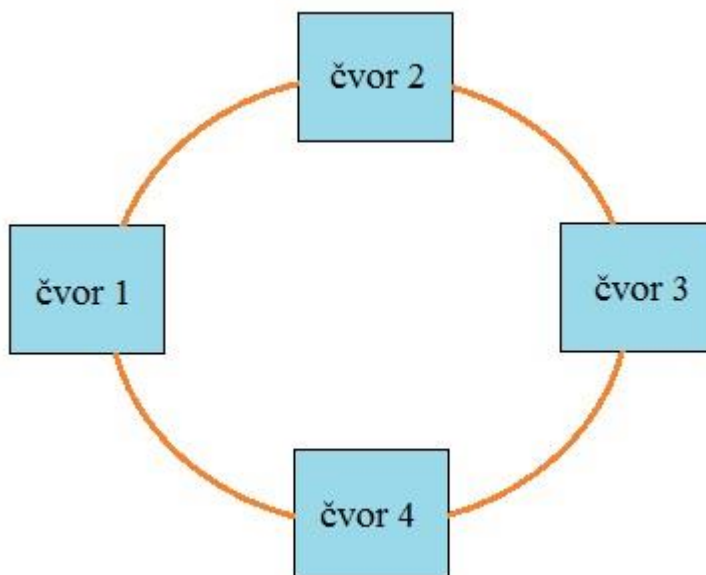
4.1.2. Prstenasta topologija

Današnje gradske mreže temeljene su na sinkronoj digitalnoj hijerarhiji (engl. Synchronous Digital Hierarchy, SDH) i sinkronom optičkom umrežavanju (engl. Synchronous Optical Networking, SONET). To su dva ista standardizirana protokola samo što se SONET koristi u SAD-u i Kanadi, a SDH u Europi. Razlike između njih su pretežito po pitanju korištene terminologije [55]. Takve klasične telefonske mreže imaju više čvorova u kojima se nalaze dodaj-ispusti multiplekseri (engl. Add-Drop Multiplexer, ADM)².

Sve veća potreba za povećanjem propusnosti utjecala je na razvoj sveoptičkih komponenti. Optički prsten temeljen na CWDM tehnologiji pruža izvrsnu propusnost i prijenos optičkih signala bez O-E-O pretvorbe, također eliminira potrebu za poznavanjem elektronike i donosi značajnu uštedu u odnosu na tradicionalne prstenove s ADM i DXC (engl. digital crossconnect) čvorovima [31, p.278]. Korištenjem sveoptičkih pasivnih uređaja kao što su CWDM MUX/DEMUX i OADM, optički signal ostaje u optičkoj domeni prilikom propagacije kroz čvorove. Čvorovi su potrebni za realizaciju prstenastih mreža i P2P linkova. CWDM prsten može povezivati nekoliko zgrada preko različitih

² Za razliku od ADM, OADM djeluje samo u optičkoj domeni, tako da je riječ o različitim uređajima

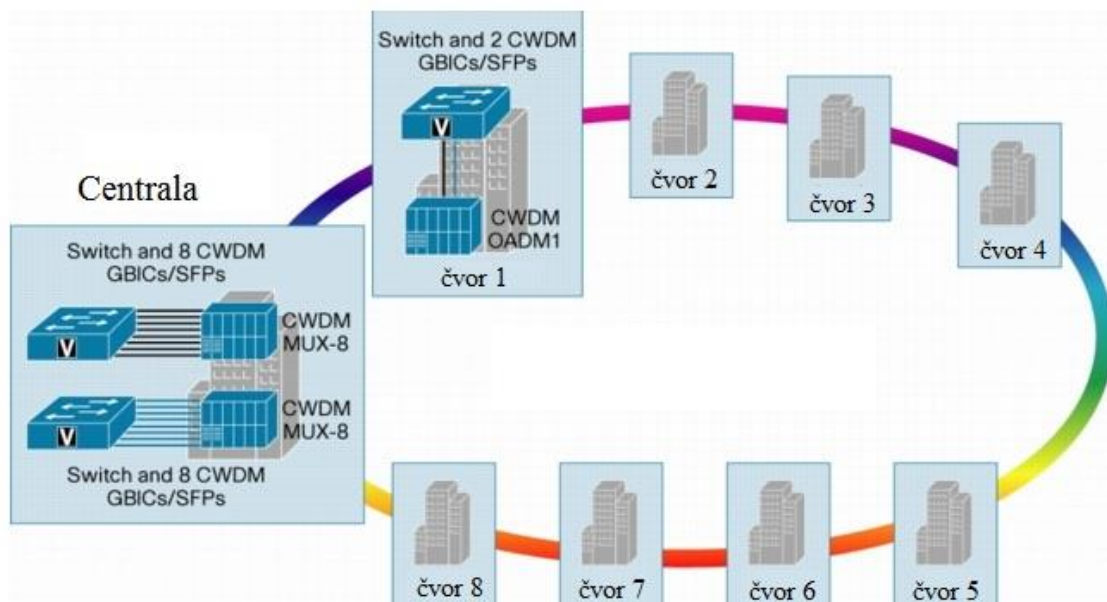
spojnih putova [3, p.254]. Na slici 40. prikazana je takva prstenasta topologija s četiri čvora, međusobno povezanih preko spojnih putova.



Slika 40. Prstenasta topologija

Izvor: Izradio Sandro Perman

Na slici 41. prikazana je prstenasta mrežna arhitektura u kojoj se koristi CWDM tehnologija. U centrali se nalaze MUX/DEMUX uređaji, a u čvorovima CWDM OADM-i. Na krajevima prijenosne linije nalaze se primopredajnici i preklopnici. Sve valne duljine svjetlosti kreću od glavnog čvora, odnosno centrale te dalje nastavljaju propagaciju do prvog čvora, drugog itd. OADM uređaj u svakom čvoru ispušta ili dodaje valnu duljinu svjetlosti dok ostale valne duljine nastavljaju propagaciju prema sljedećem čvoru, odnosno OADM uređaju. Moguće je koristiti samo jedan MUX/DEMUX u centrali tako da optički signali propagiraju u jednom smjeru prstena što može prouzročiti probleme u slučaju prekida veze ili zatajenja opreme. Za rješavanje tog problema moguće je koristiti dodatni zaštitni prsten. Zaštitnim se prstenom povezuju čvorovi na osnovu prethodnog konfiguriranja, prije pojave kvara. Na taj način moguće je ostvariti zaštitu spojnih putova i čvorova [35]. Za implementaciju takvog zaštitnog prstena potrebno je koristiti dodatni MUX/DEMUX uređaj, a preko Ethernet preklopnika povezanog s OADM uređajem prebaciti propagaciju optičkih signala na drugi prsten [38].



Slika 41. Prstenasta arhitektura u CWDM metro pristupnoj mreži

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: <http://www.cisco.com> (27.08.2014)

4.1.3. Zahtjevi metro mreža

Pri planiranju i izgradnji gradskih pristupnih mreža ključni zahtjevi su mogućnost nadogradnje sustava, redundantnost, korištenje različitih protokola i dovoljno velike prijenosne udaljenosti.

CWDM je tehnologija koja pruža mogućnost nadogradnje i naknadnog povećanja propusnosti prijenosnih putova. Kod npr. P2P prijenosne veze, moguća je uporaba 16-kanalnog CWDM MUX/DEMUX uređaja. U početku nije potrebno koristiti svih 16 kanala već se mogu koristiti dvije valne duljine, a naknadno kad se pokaže potreba za većom propusnošću može se dodati još valnih duljina.

CWDM također podržava primjenu zaštite mreže koristeći redundantne putove kao što je spomenuto kod prstenaste topologije. U slučaju da dođe do prekida optičkog vlakna unutar prstena, a nema dodatnog osiguravajućeg vlakna, može doći do prestanka prijenosa prometa.

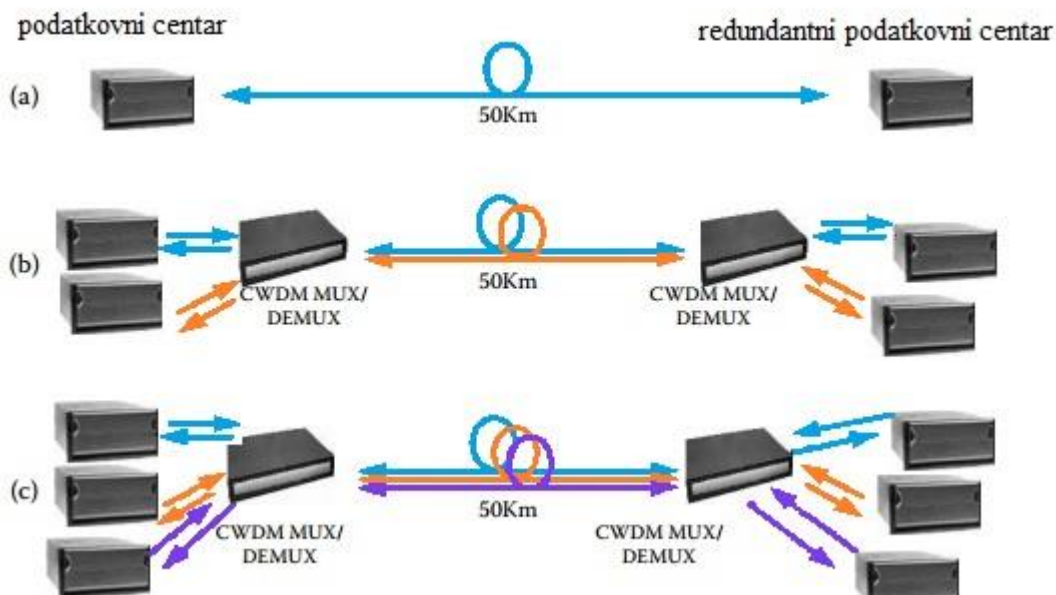
Sljedeća je važna stavka u gradskoj mreži velik broj različitih protokola. Umjesto pretvorbe svakog signala različitog protokola u jedan, jednostavnije je koristeći CWDM, svaki signal prenositi na posebnoj valnoj duljini.

Osim navedenih zahtjeva važno je uzeti u obzir gubitke mreže i maksimalne udaljenosti prijenosnih putova. Maksimalna pokrivenost CWDM prijenosnog prstena je 56

km, uz određene pretpostavke kao 2.5 dB gubitak umetanja po uređaju (MUX/DEMUX, OADM) i 0.25 dB/km gubitak atenuacije [3, p.263].

4.1.4. Primjeri uporabe CWDM prijenosnog sustava u gradskoj mreži

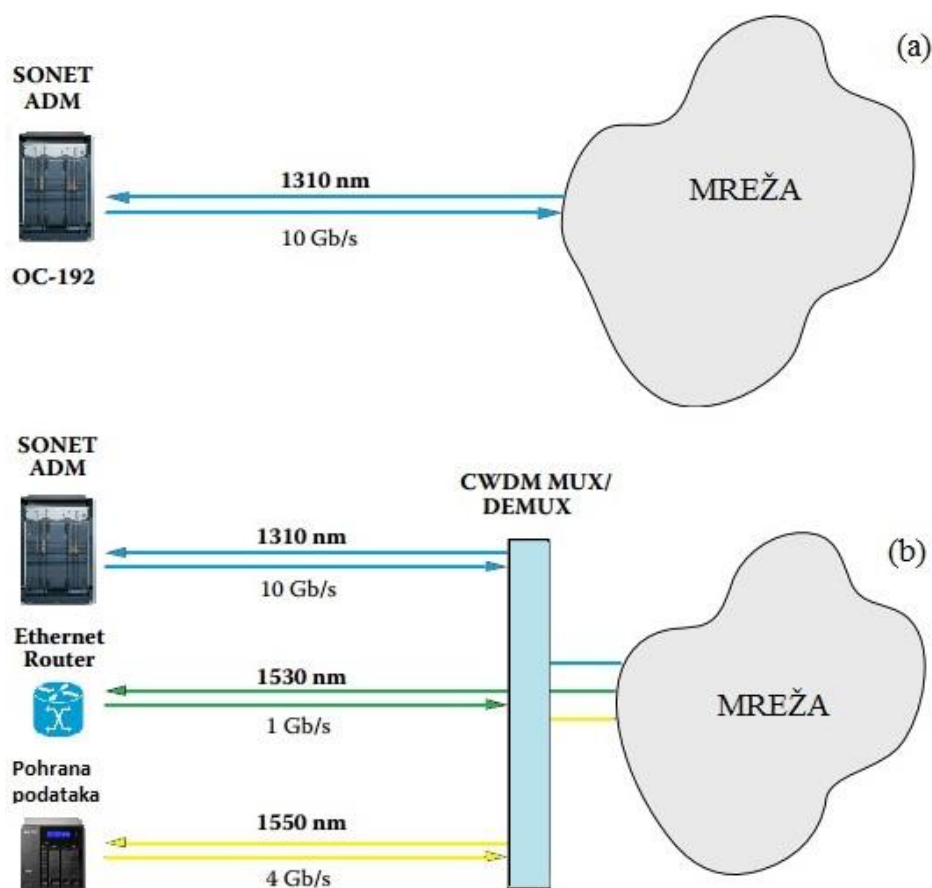
Mnoge organizacije koriste podatkovne centre za pohranu podataka te je stalna dostupnost podatkovnog centra od iznimne važnosti, prestanak njegovog rada, makar i na par sati može nanijeti velike štete. Uz sve sigurnosne kopije, dvojna napajanja, sustave za hlađenje i sl., koriste se i dodatni redundantni podatkovni centri koji su predviđeni kao osiguranje u slučaju požara, poplava ili većih prirodnih katastrofa poput potresa. Takvi se redundantni podatkovni centri smještaju na veće udaljenosti od glavnog kako ne bi bili zahvaćeni nepogodom. Zbog veće isplativosti primjenjuju se tehnike korištenja oba centra istovremeno, tako da u slučaju prestanka rada jednog, drugi normalno nastavi s radom [39]. CWDM prijenosni sustav može se koristiti za povezivanje takva dva podatkovna centra, što je prikazano na slici 42. Na (a) dijelu slike vidljiva je „obična“ veza između glavnog i redundantnog podatkovnog centra bez korištenja CWDM sustava, udaljenost je 50 km



Slika 42. Primjena CWDM-a kod podatkovnih centara

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Pod 42.b) i 42.c) koristi se CWDM MUX/DEMUX na jednoj i drugoj lokaciji čime se povećava propusnost. Na taj je način moguće povezati više podatkovnih poslužitelja (engl. server) u podatkovnim centrima gdje svaki od njih dobiva svoj CWDM kanal. To je velika prednost u odnosu na 42.a) gdje se koriste pojedinačna optička vlakna. Osim toga korištenjem CWDM-a moguće je naknadno dodati još kanala i povećati kapacitet mreže [3, p.264]. Na sljedećoj slici 43. prikazana je implementacija CWDM sustava gdje se koristi samo jedna valna duljina u dvosmjernom prijenosu podataka. Povećanje propusnosti SONET OC-192 spojnog puta može biti skup i težak zadatak koristeći neke druge tehnike, kao što je ugradnja dodatnih vlakana i sl. Primjenom CWDM primopredajnika i CWDM MUX/DEMUX-a koji imaju 1310 nm priključno mjesto, povećanje propusnosti može biti vrlo jednostavno i jeftino rješenje.



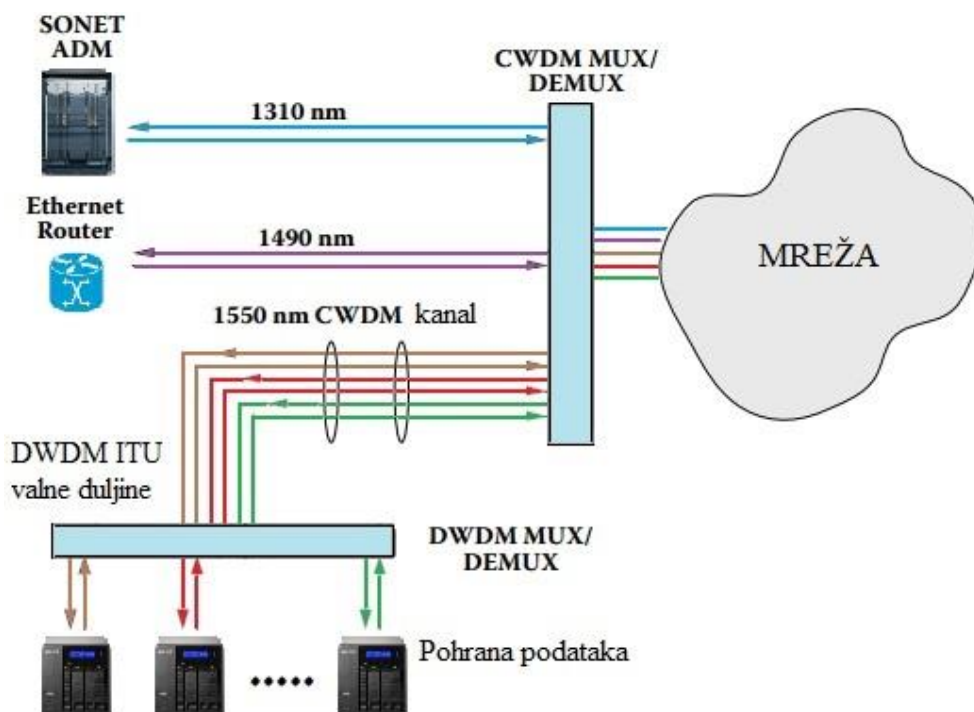
Slika 43. Dodavanje CWDM valnih duljina vezi s jednom valnom duljinom

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Na 43.a) dijelu slike prikazan je SONET ADM uređaj koji koristi 1310 nm valnu duljinu. Nakon ugradnje CWDM MUX/DEMUX uređaja, što je prikazano na b.) dijelu slike, 1310 nm valna duljina neometano prolazi kroz CWDM MUX/DEMUX zajedno s

ostalim valnim duljinama koje prenose različite protokole. Za ugradnju MUX/DEMUX uređaja potrebno je prekinuti prijenos podataka, pa to može predstavljati problem. Međutim, nakon prve ugradnje naknadna dodavanja valnih duljina ne prekidaju prijenos podataka te se tako može povećati propusnost [3, p.265].

Osim navedenih primjena CWDM prijenosnog sustava u gradskim mrežama, postoji još jedna koja može biti od velikog značaja za CWDM. Iako se čini kako se putem CWDM-a kapacitet može povećati za maksimalno 16 valnih duljina čime bi se ograničilo prstenaste strukture na 16 čvorova, to nije tako. Moguće je kombinirati CWDM zajedno s DWDM-om i na taj način nadograditi sustav na više od 64 valne duljine [3]. To se ostvaruje primjenom 8 do 10 DWDM valnih duljina umjesto jednog CWDM kanala. Takav princip integracije DWDM kanala u CWDM prijenosni sustav prikazan je na slici 44. gdje je umjesto kanala 1550 nm dodan DWDM MUX/DEMUX uređaj. Na ovakav način moguće je višestruko povećati propusnost u odnosu na primjer prikazan na slici 43.



Slika 44. Kombinacija DWDM i CWDM prijenosnog sustava

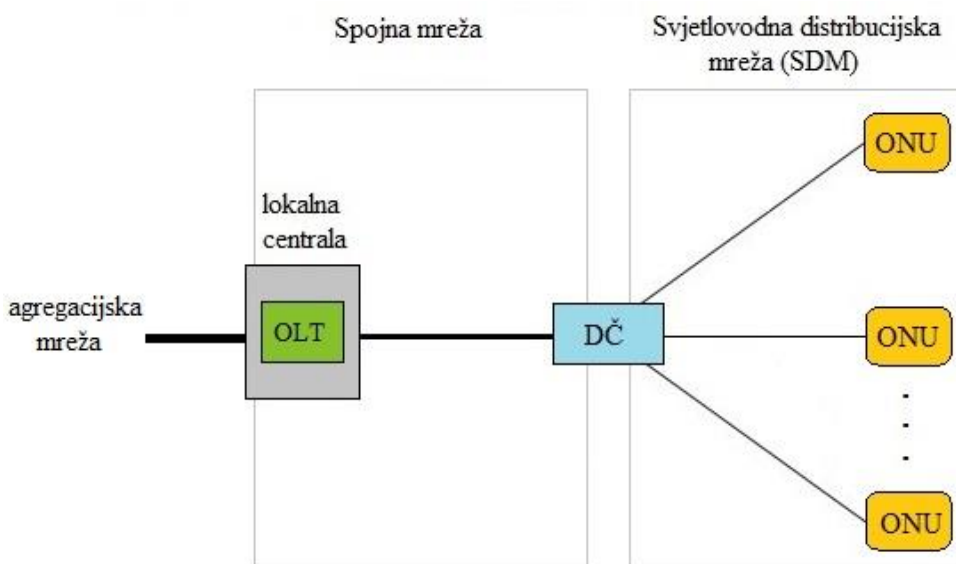
Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Ovakav način integracije DWDM-a u CWDM sustav daje uvid u mogućnosti koje se mogu ostvariti korištenjem CWDM-a u gradskim mrežama. Kao što se moglo vidjeti u

prikazanih primjerima, CWDM je fleksibilno rješenje koje omogućuje izgradnju mreže prema trenutnim potrebama s jednostavnom mogućnošću nadogradnje, što je jedan od glavnih kriterija gradskih mreža.

4.2. SVJETLOVODNA PRISTUPNA MREŽA

Svjetlovodna pristupna mreža označava zadnji dio mreže koji povezuje čvorove agregacijske mreže s jedne strane i pretplatnike, kao krajnje korisnike, s druge strane. Sastoji se od dva dijela: spojne mreže koja se sastoji od jednog ili više optičkih vlakana koja povezuje dionicu između lokalnog čvora – LČ (prvi agregacijski čvor) i distribucijskog čvora - DČ (pristupni čvor) te s druge strane svjetlovodne distribucijske mreže koja povezuje distribucijski čvor i sučelje na strani vanjske pristupne elektroničke mreže zgrade ili nekog objekta (engl. External Network Interface, ENI) [42]. Spojna mreža obično iznosi od 70 do 90% pristupnog dijela mreže [3]. Na slici 45. prikazani su glavni dijelovi svjetlovodne pristupne mreže.



Slika 45. Grafički prikaz podjele svjetlovodne pristupne mreže

Izvor: Izradio Sandro Perman

Lokalni čvor čini lokalna centrala (centrala ili LC) u kojoj se nalazi razna oprema: optički distribucijski razdjelnik (engl. Optical Distribution Frame ODF), UPS, klimatizacijski i alarmni sustav te jedno ili više optičkih linijskih zaključnja. U daljnjem

radu najviše će se spominjati upravo optičko linijsko zaključenje (engl. Optical Line Termination, OLT) što označava opremu mrežnog zaključenja pristupne mreže unutar centrale. Prema europskoj regulativi za lokalnu centralu se koristi termin „točka priključenja na jezgrenu mrežu (engl. Main Point of Presence, MPoP) [42], međutim u ovom radu će se koristiti termin centrala koji ima isto značenje.

Distribucijski čvor je najčešće smješten u tipskom uličnom ormaru ili kontejneru, a može biti smješten i u tehničkom prostoru neke zgrade koja služi za smještaj slične opreme. U distribucijskom čvoru se obično nalazi aktivna ili pasivna oprema, kao što su preklopnici, sprežnici, pasivni CWDM multiplexeri i sl. Prema [42] DČ se treba projektirati za mogućnost priključenja najmanje 300 korisničkih jedinica, a svjetlovodna distribucijska mreža treba imati za svaku korisničku jedinicu minimalan kapacitet od 1.2 optičkih vlakana.

Na strani korisnika nalazi se ENI, kojeg sačinjava optička mrežna jedinica (engl. Optical Network Unit, ONU) ili optičko mrežno zaključenje (engl. Optical Network Termination, ONT). ONU i ONT u principu označavaju isti uređaj, a prema [42] kod IEEE terminologije se uvijek koristi ONU. U slučaju ITU-a, ONU označava općeniti termin, a ONT se koristi kad se želi opisati ONU koji posluhuje jednog pretplatnika. Jedno i drugo je u redu, a u daljnjem radu će se koristiti termin ONU kao dio krajnjeg zaključenja svjetlovoda na strani korisnika. ONU može ukazivati na jednog ili više korisnika, ovisno kod kojeg objekta se nalazi. Može biti riječ o objektu s jednim kućanstvom (engl. Single Dwelling Unit, SDU), više kućanstava (engl. Multi Dwelling Unit, MDU) ili neki drugi objekt za različitu namjenu [57].

Pristupna mreža se u literaturi često označava kao zadnji dio mreže, tkz. „zadnja milja“ (engl. last mile), iako se obično ne radi o jednoj milji, nego više njih. U nekim izvorima se koristi i termin „prva milja“ (engl. first mile), kao što je npr. u [13]. Zadnja milja označava „usko grlo“ telekomunikacijskih mreža jer iako su magistralni putovi, jezgrene mreže i agregacijski dijelovi pokriveni svjetlovodom, problem predstavlja dio mreže do krajnjih korisnika, koji je ujedno i najskuplji dio mreže. Najskuplji je zato što se povrat uloženog novca ostvaruje isključivo preko pretplatnika te je iz toga razloga potrebno koristiti najjednostavnija i najisplativija rješenja koja istovremeno pružaju dobru propusnost, a cjenovno su prihvatljiva.

Sve više se povećava potreba za većim brzinama i propusnošću vodova, uzrok tome je višestruki. Privatni korisnici zahtijevaju pristupnu mrežu koja ima veliku propusnost te im omogućuje razne usluge preko internet protokola, kao što je govorna usluga (engl.

Voice over Internet Protocol, VoIP), podatkovni prijenos i televizija (engl. Internet Protocol TV, IPTV). Poslovni korisnici također zahtijevaju širokopojasnu infrastrukturu preko koje mogu povezati svoje LAN mreže na magistralne pravce.

U posljednje vrijeme kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj, sve se više koriste „Triple Play“ paketi koji sadržavaju sve tri usluge. Osim toga, sve su veći zahtjevi i za ostalim uslugama kojima treba velika propusnost, kao što je video na zahtjev (engl. VoD), TV visoke razlučivosti (engl. high-definition TV, HDTV), interaktivne igre i sl. Neke od usluga traže simetričan prijenos podataka, što znači da postoji jednaka potreba za brzinom prijenosa od mreža većih razina prema korisniku (engl. downstream) i prijenosa od korisnika prema mrežama većih razina (engl. upstream), a neke asimetričan prijenos podataka. U tablici 10. prikazana je usporedba različitih usluga. Uobičajene potrebe korisnika zahtijevaju veću downstream nego upstream propusnost, a razlog je tome što se kod većine usluga podaci prenose prema korisniku u većoj mjeri.

Tablica 10. Usporedba propusnosti za različite usluge

Usluga	Potrebna propusnost	Simetričnost usluge
HDTV	20 – 24 Mb/s	Asimetrična
DTV (digitalna TV)	4 – 6 Mb/s	Asimetrična
Video konferencija visoke kvalitete	1 Mb/s	Simetrična
Virtualne usluge (e-učenje, virtualni doktor i sl.)	2 – 5 Mb/s	Simetrična
Online igre	1 – 10 Mb/s	Simetrična
Surfanje internetom	2 – 5 Mb/s	Asimetrična
Dijeljenje podataka i P2P	5 – 10 Mb/s	Simetrična

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton

CWDM je dobro rješenje za takve usluge jer omogućuje prijenos usluga na različitim valnim duljinama različitih brzina. Video prijenos, HDTV su pretežito downstream usluge i zahtijevaju najviše propusnosti, pa se takve usluge može prenositi preko zasebnih valnih duljina. Što se tiče poslovnih korisnika, potrebna im je simetrična propusnost, a uobičajeni pristup bi bio omogućavanje različitih kanala za pristup internetu i intranet komunikaciju, kao što je virtualna privatna mreža (engl. virtual private network, VPN) [3].

Dominante tehnologije koje se još uvijek koriste u pristupnom dijelu mreže su digitalna pretplatnička linija (engl. Digital Subscriber Line, DSL) i kabela televizija (engl. cable TV, CATV). Obje tehnologije imaju nedostatke i ograničene su infrastrukturom koja je predviđena za prijenos glasovnog i analognog TV signala, pa kada je riječ o prijenosu podatkovnog prometa takva infrastruktura nije idealna. Osim toga udaljenost DSL pretplatnika od centrale bi trebala biti unutar 5.5 km jer kod većih udaljenosti dolazi do iskrivljenja signala. Uobičajena udaljenost koja se primjenjuje iznosi do 4 km [31, p.224]. Postoje različite verzije DSL-a, kao što je asimetrični DSL (engl. asymmetric digital subscriber line, ADSL) ili još brži VDSL (engl. very high bit-rate DSL). VDSL omogućuje downstream propusnost od 50 Mb/s i upstream od 15 Mb/s za pojedinog korisnika, ali postoji jedan problem, a to je udaljenost. Naime, maksimalna udaljenost od centrale pri kojoj su moguće navedene propusnosti preko VDSL-a iznosi 500 m, a pri većim udaljenostima moguća propusnost naglo pada. Zbog navedenih razloga stvorila se potreba za implementaciju svjetlovodne infrastrukture u pristupnom dijelu mreže s obzirom da se infrastruktura temeljena na bakru sve teže nosi s novonastalim izazovima. Naravno, implementacija optičke infrastrukture mora biti postepena iz razloga što polaganje optičkih kabela i ostalih potrebnih komponenti iziskuje velika novčana sredstva [3].

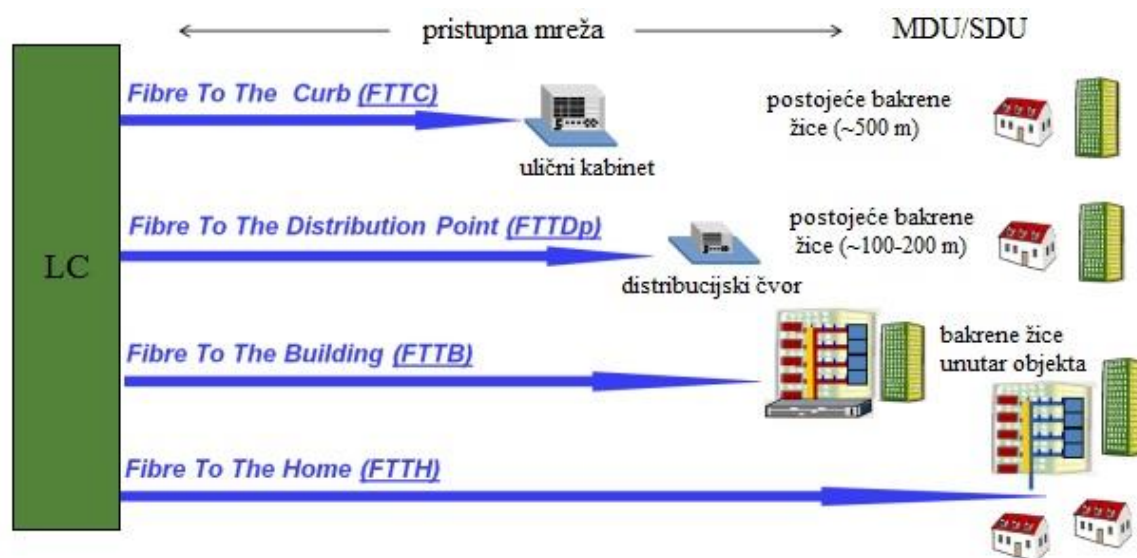
4.2.1. Pristupne mreže nove generacije

Pristupne mreže nove generacije (engl. next generation access networks, NGA) označavaju termin kojim se opisuju mreže koje su djelomično ili u potpunosti eliminirale bakrenu infrastrukturu iz pristupnog dijela mreže. Prema [58], NGA mreže su definirane ovako:

„Pristupne mreže nove generacije (NGA) označavaju žičane (za razliku od bežičnih) pristupne mreže koje se u potpunosti ili djelomično sastoje od svjetlovodne mreže te su sposobne pružiti širokopolasne pristupne usluge s poboljšanim karakteristikama (kao što je veća propusnost) u usporedbi s uslugama koje se pružaju preko postojećih bakrenih mreža. U većini slučajeva NGA je rezultat nadogradnje već postojeće bakrene ili koaksijalne pristupne mreže“.

Prema europskoj regulativi [58] donesene su brojne preporuke vezane za izgradnju mreža, korištenje mreža, tržišno natjecanje i sl., te preporuke su prihvaćene i u Hrvatskoj prema [56]. Ovisno o tome u kolikoj mjeri sudjeluje bakrena infrastruktura na pristupnom

dijelu mreže, koriste se razni termini za opis svjetlovodne pristupne mreže. Općeniti termin je „optičko vlakno do x“ (engl. fiber to the x, FTTx), gdje x može biti kuća, zgrada, ulični kabinet/ormar ili distribucijski čvor [57], skraćenice su redom FTTH, FTTB, FTTC, FTTP. Na slici 46. prikazana je usporedba različitih modela NGA mreža.



Slika 46. Usporedba FTTx modela

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf (28.08.2014)

FTTC model je dizajniran tako da se preklopnik ili DSL pristupni multiplekser (engl. DSL access multiplekser, DSLAM) nalazi u uličnom kabinetu, te je povezan s centralom preko jednog ili više pari vlakana. FTTP je rješenje predlagano zadnjih par godina, optička vlakna idu do distribucijskog čvora, a dalje bakrena žica na koju se primjenjuje VDSL tehnologija. Kod FTTH modela svaki je pretplatnik povezan s dediceranim, samo njemu dodijeljenim, vlaknom spojenim preko ONU-a, dok se kod FTTB-a ONU nalazi obično u podrumu zgrade, a dalje ide bakrena žica, osim u slučaju kad optičko vlakno ide do radnog stola, tada se radi o verziji „vlakno do radnog stola“ (engl. fiber to the desktop, FTTD) [57]. Jedino je u slučaju FTTH i FTTB modela riječ o „sveoptičkoj“ infrastrukturi, pa se takva infrastruktura preporučuje prema pravilniku donesenom od strane Hrvatske agencije za poštu i elektroničke komunikacije (HAKOM) [56], te Europske Unije [58].

FTTH/FTTB omogućuje najbolju moguću propusnost i najstabilniju internet vezu. Kod ostalih se primjera djelomično koristi bakrena žica čime se smanjuje ukupna propusnost zbog preslušavanja (engl. crosstalk) i frekventno-ovisnih smetnji. Osim toga,

udaljenost koja se može prijeći preko bakra ograničena je zbog visokog prigušenja [3, p.286]. Iako je FTTH idealno rješenje, isto tako je i skupo rješenje, pa je najjednostavnije implementirati FTTH u novogradnjama dok se u postojećim objektima nerijetko pribjegava ostalim navedenim rješenjima koristeći dio bakrene infrastrukture. U tablici 11. prikazane su udaljenosti i moguće propusnosti kod pojedinih modela.

Tablica 11. Udaljenosti i propusnosti za različite NGA modele

Model	Maksimalna udaljenost bakrenog dijela	Komercijalne prijenosne tehnologije	Propusnost za pojedinog korisnika
Bakreni medij	5 km	ADSL	128...1500 Kb/s (asimetrično)
FTTN	1.5 km	ADSL/VDSL/CATV	1...13 Mb/s (asimetrično)
FTTC	300 m	VDSL/CATV	36...52 Mb/s
FTTB/FTTH	0...100 m (FTTB)	EPON/GPON	1...2.5 Gb/s (zajedničko)

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

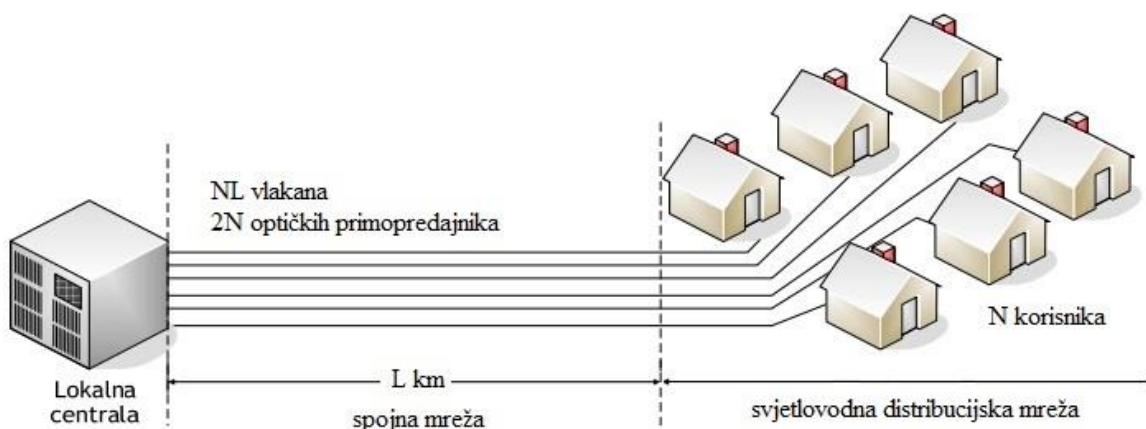
Kako je FTTH/B dugoročno najisplativije rješenje koje predstavlja budućnost svjetlovodne mreže, primjeri uporabe CWDM-a biti će orijentirani na takvu mrežu. FTTH i FTTB su u principu jako slični, razlika je jedino radi li se o SDU ili MDU objektu, pa će se u primjerima koristiti FTTH termin.

4.2.2. Topologija u FTTH arhitekturi

U sveoptičkom FTTH pristupu uobičajeno je koristiti P2P ili točka-više točaka (engl. point-to-multipoint, P2MP) topologiju. Na slici 47. prikazana je P2P topologija gdje postoji direktna veza između centrale i korisnika te svaki korisnik dobiva pripadajuće vlakno koje je neovisno o ostatku mrežnog prometa.

S tehnološkog aspekta, prednost P2P modela je jednostavnost i praktički neograničena propusnost između centrale i korisnika s dobrom zaštitom i neovisnošću o protokolima.

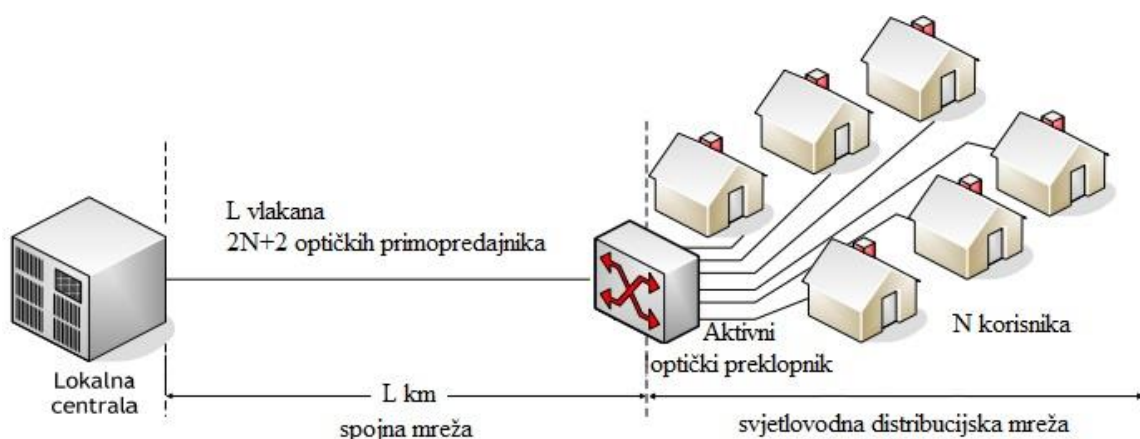
Nedostatak ovakvog pristupa je u većini slučajeva previsoka cijena jer zahtjeva veliku količinu položenih optičkih kabela na cijeloj dionici mreže. To zahtjeva kopanje i polaganje optičkog kabela od centrale do svakog korisnika, a osim toga potreban je i veliki broj sučelja za svakog korisnika u centrali jer svakom korisniku treba pripadajući predajnik [3, 31]. Ako pretpostavimo da je N korisnika spojeno na centralu na nekoj udaljenosti od L kilometara, P2P topologija prikazana na slici 47. zahtjeva $2N$ optičkih primopredajnika i NL optičkih vlakana (uz pretpostavku da se jedno vlakno koristi za dvosmjerni prijenos podataka).



Slika 47. FTTH P2P mreža

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.fer.unizg.hr/download/repository/P7-2_TSM_2011_Drugi_dio.pdf (01.09.2014)

Na sljedećoj slici 48. prikazana je P2MP topologija s aktivnom mrežnom opremom za dijeljenje kanala, pa se takva mreža zove aktivna optička mreža (engl. active optical network, AON).



Slika 48. FTTH AON P2PM mreža

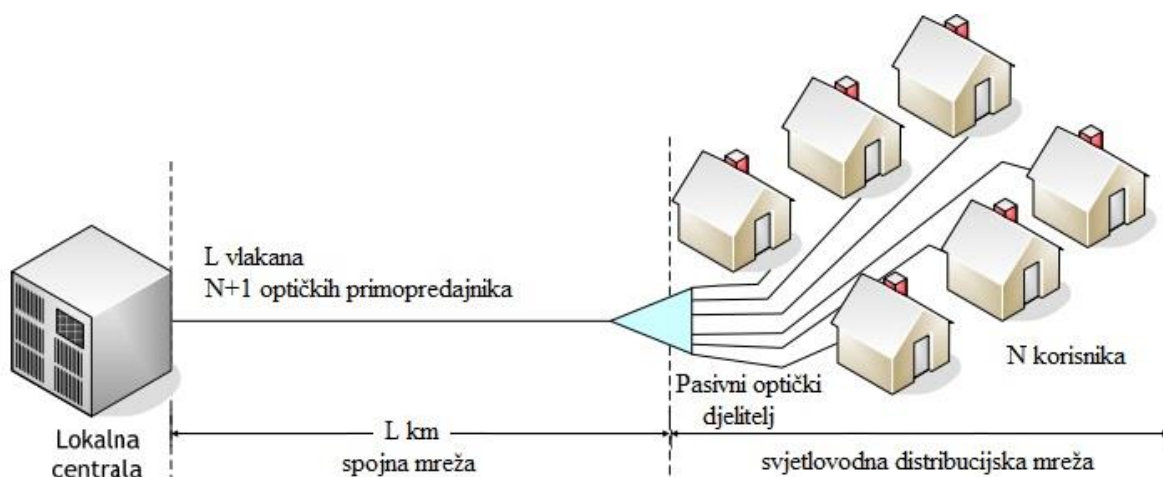
Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.fer.unizg.hr/download/repository/P7-2_TSM_2011_Drugi_dio.pdf (01.09.2014)

Implementiran je aktivni preklopnik (engl. switch) koji služi za usmjeravanje optičkih signala, a nalazi se u distribucijskom čvoru, za razliku od P2P topologije gdje se preklopnik nalazi u lokanoj centrali. Ovim pristupom u odnosu na sliku 47. smanjila se količina optičkog vlakna u spojnoj mreži na L vlakana, duljine L km (uz pretpostavku da je DČ vrlo blizu krajnjih korisnika).

Negativna je strana ovakvog pristupa povećanje potrebnih primopredajnika na $2N+2$ iz razloga što je dodan još jedan spojni put na dionici spojne mreže. Osim toga ovakav pristup zahtjeva napajanje optičkog preklopnika, kao i uređaj za besprekidno napajanje (engl. uninterruptible power supply, UPS) u distribucijskom čvoru. Iz navedenih razloga logičan je potez zamijeniti aktivni preklopnik s pasivnim optičkim sprežnikom (engl. passive optical splitter) kao što je prikazano na slici 49. Takva se mreža zove pasivna optička mreža (engl. passive optical network, PON) [13, p.226].

PON koristi samo pasivnu opremu u distribucijskom čvoru, odnosno na teretnu, između centrale i krajnjih korisnika, pa takvi sustavi ne zahtijevaju napajanje u distribucijskim čvorovima. Pasivna oprema koja se koristi su optički sprežnici i/ili pasivni multiplekseri. PON smanjuje broj optičkih primopredajnika i položenih vlakana, pa tako PON mreža prikazana na slici 49. zahtjeva uporabu $N+1$ primopredajnika te L vlakana, duljine L km na dionici spojne mreže. Velika je prednost PON mreža što korištenjem potpuno pasivne opreme i infrastrukture imaju mogućnost održavanja većih brzina i propusnosti, što je vrlo važno za buduće nadogradnje sustava. PON mreža se prema mnogim izvorima smatra kao dobro rješenje za zadnju milju i predstavlja održivo rješenje

za budućnost [3, 13, p.227]. Primjena CWDM prijenosnog sustava ima smisla samo kod P2MP topologije, pa će P2MP topologija biti obrađena u ostatku rada.

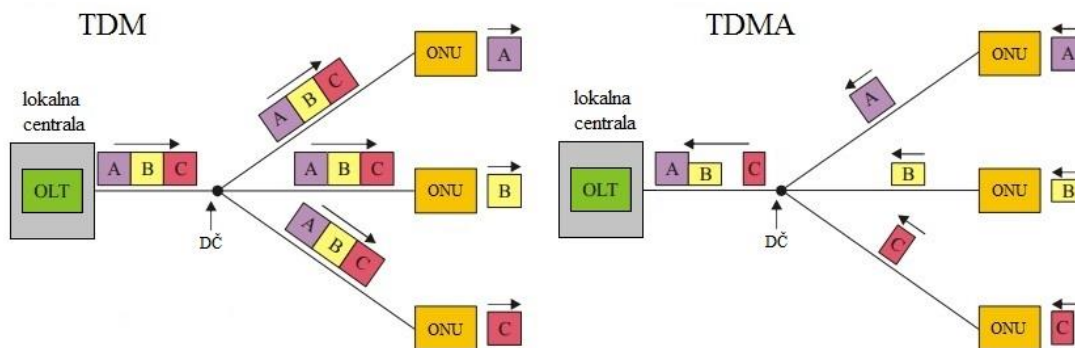


Slika 49. FTTH PON P2PM mreža

Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: http://www.fer.unizg.hr/download/repository/P7-2_TSM_2011_Drugi_dio.pdf (01.09.2014)

4.2.3. TDM-PON mreža

Sve vrste PON mreža definiranih prema različitim standardima koriste vremensko multipleksiranje (engl. Time Division Multiplexing, TDM). Na slici 50. prikazan je princip TDM/TDMA multipleksiranja. Podaci se u downstream smjeru prenose svim ONU-ima, a filtriraju se temeljem identifikacije priključnog mjesta (engl. port ID) [57].



Slika 50. TDM/TDMA multipleksiranje

Izvor: Uredio Sandro Perman prema International Telecommunication Union 2009, *Optical fibres, cables and system*, online: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf

Kod upstream smjera, podaci se prenose višestrukim pristupom TDMA (engl. time division multiple access) na način da se paketi koje šalju ONU-i vremenski multipleksiraju za prijenos preko zajedničkog vlakna prema OLT-u [44]. Ukupni raspoloživi okvir spojnog puta između OLT-a i ONU-a dijeli se između krajnjih korisnika. Kako je sprežnik pasivna komponenta koja ne može vršiti vremensko slaganje paketa, vremenski trenuci u kojima ONU-i šalju pakete određeni su od strane lokalne centrale, takav protokol se naziva medijem za kontrolu pristupa (engl. Medium Access Control, MAC) [44].

Postoji nekoliko PON standarda definiranih preko ITU-T preporuka, to su: BPON (engl. broadband PON), GPON (engl. gigabit PON), XG-PON (engl. 10-gigabit PON) i NG-PON2 (engl. 40-gigabit PON) [40]. Doseg navedenih PON-ova ograničen je budžetom prijenosnog puta, pod budžet se misli na maksimalno moguće prigušenje optičkog signala na prijenosnom putu, pri kojem će signal još uvijek biti dostatan prilikom dolaska u ONU. Upotrebom različitih klasa primopredajnika moguće je povećati domet PON-a. U tablici 12. prikazana je usporedba različitih varijanti GPON-a.

Tablica 12. Usporedba različitih GPON sustava

Varijante GPON-a	GPON B+	GPON C+	XG-GPON
Domet	20 km	30 km	60 km
Broj dijeljenja	32	64	128

Izvor: Izradio Sandro Perman prema online: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf (01.09.2014)

Prema [57], iako GPON pruža dovoljno propusnosti u dolazećim godinama, XG-PON predstavlja prirodni tijek evolucije PON-a s kojim će se povećati domet mreže i smanjiti količina potrebne vanjske infrastrukture.

Osim ITU-T standarda postoje i standardi definirani od strane IEEE instituta koji se temelje na Ethernet protokolu. Riječ je o starijem EPON-u definiranom prema standardu 802.3ah te novijem 10G-EPON-u (engl. 10-Gigabit Ethernet PON) definiranom prema 802.3av standardu.

Sljedeći je korak u razvoju PON-a NG-PON2 za koji je već donesena preporuka s općenitim zahtjevima G.989.1, a osim te preporuke radi se na donošenju ostalih preporuka vezanih za NG-PON2. NG-PON2 će podržavati korištenje svih prethodnih PON-ova s različitim brzinama i specifikacijama [59] te će pružiti dugoročno rješenje sve većoj potrebi za propusnošću. Nakon njega moguće je donošenje standarda propusnosti 100

Gb/s, dosega preko 100 km i omjera dijeljenja 1:1024 [57]. Kako je trenutno optimalno rješenje Gigabitni PON (EPON i GPON) koji se smatra tržišnim liderom u pristupnom dijelu mreže [60], fokus će biti na tim standardima u ovom radu.

U tablici 13. prikazana je usporedba GPON i EPON mreža. GPON je asimetričan, tako da nije ista downstream i upstream propusnost, dok je EPON simetričan te ima istu propusnost u oba smjera. Navedena propusnost dijeli se između svakog korisnika, odnosno ONU-a. Osim propusnosti u tablici 13. prikazana je različita valna duljina za downstream i upstream prijenosni kanal. Takva različita prijenosna valna duljina omogućuje dvosmjerni prijenos preko jednog vlakna, što je velika prednost u odnosu na korištenje dva vlakna.

Tablica 13. Usporedba GPON i EPON standarda

Parametri		GPON	EPON
Propusnost	Downstream	2.5 Gb/s	1.2 Gb/s
	Upstream	1.2 Gb/s	
Valna duljina	Downstream	1480 – 1500 nm	1490 nm
	Upstream	1260 – 1360 nm	1310 nm
Maksimalni broj dijeljenja		128	32

Izvor: Izradio Sandro Perman prema online:

http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf (02.09.2014)

Valne duljine za downstream i upstream prijenos nalaze se u području O i S pojasa, a osim tih valnih duljina, prema ITU-T G.984.5 određeni su dodatni rezervirani pojasevi (engl. enhancement band) za video i NGA usluge, pa je područje C pojasa oko 1550 nm predviđeno za prijenos radijsko-frekvencijskih video signala [56].

Prikazane TDM-PON mreže su relativno jednostavne i ne pretjerano skupe za implementirati, međutim TDM-PON mreže ne iskorištavaju svu propusnost koju pružaju optička vlakna i ne pružaju dovoljno veliku skalabilnost. TDM-PON pruža veću propusnost nego bakrena infrastruktura, ali za maksimalnu iskoristivost optičkih vlakana potrebno je primijeniti valno multipleksiranje.

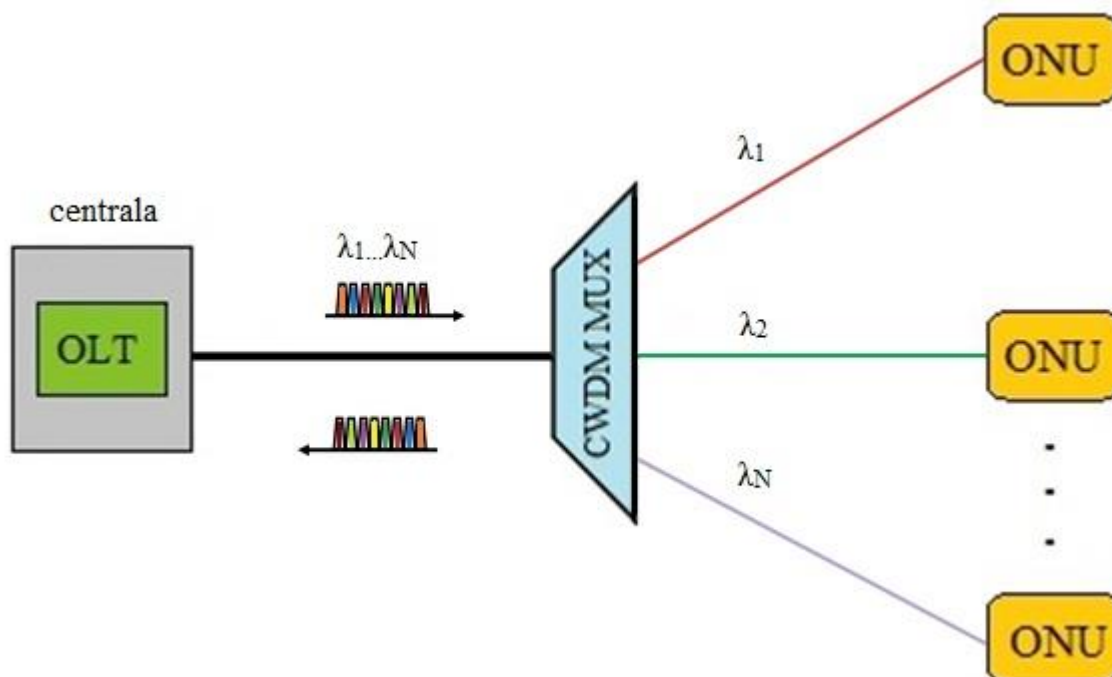
Postoje dvije PON arhitekture u kojima se može primijeniti CWDM, to su: CWDM-PON i hibridni CWDM/TDM-PON. Ta dva modela nisu standardizirana od strane relevantnih tijela, ali pružaju uvid u mogućnosti koje se mogu ostvariti valnim multipleksiranjem. Od svih PON standarda jedino se u G.989.1, za budući NG-PON2, spominju ovi modeli valnog multipleksiranja. Konkretno radi se o PtP (engl. point to point)

WDM-u i TWDM PON-u [59], što odgovara primjerima koji će biti prikazani u ovom radu.

4.2.4. CWDM-PON pristupna mreža

CWDM-PON mreža odgovara PtP WDM modelu predviđenom za budući NG-PON2. U postojećoj literaturi, ovakav tip modela zove se još i WDM-PON [3, 13], a u ovom radu ćemo koristiti termin CWDM-PON iako se prikazani primjeri mogu primijeniti općenito na WDM te nisu striktno vezani uz CWDM.

CWDM-PON mreža se za razliku od TDM-PON mreža temelji na valnom multipleksiranju. Iako se koristi P2MP topologija, takva se mreža može shvatiti kao P2P mreža jer se koriste virtualne P2P veze, odnosno kanali na P2MP PON infrastrukturi. Prijenos optičkih signala vrši se na različitim valnim duljinama između OLT-a u lokalnoj centrali i pojedinog ONU-a kod korisnika. Kod ovakve izvedbe PON mreže, svaka ONU jedinica prima jednu ili više njemu dediceranih valnih duljina [3, 59]. Primjer takvog CWDM-PON modela prikazan je na slici 51. gdje svaki pretplatnik dobiva svoju valnu duljinu koja je neovisna o korištenom protokolu i brzini prijenosa. Ako je potrebno jedan pretplatnik može dobiti valnu duljinu s Gigabitnim Ethernet signalom, a drugi pretplatnik SDH.



Slika 51. CWDM-PON mreža

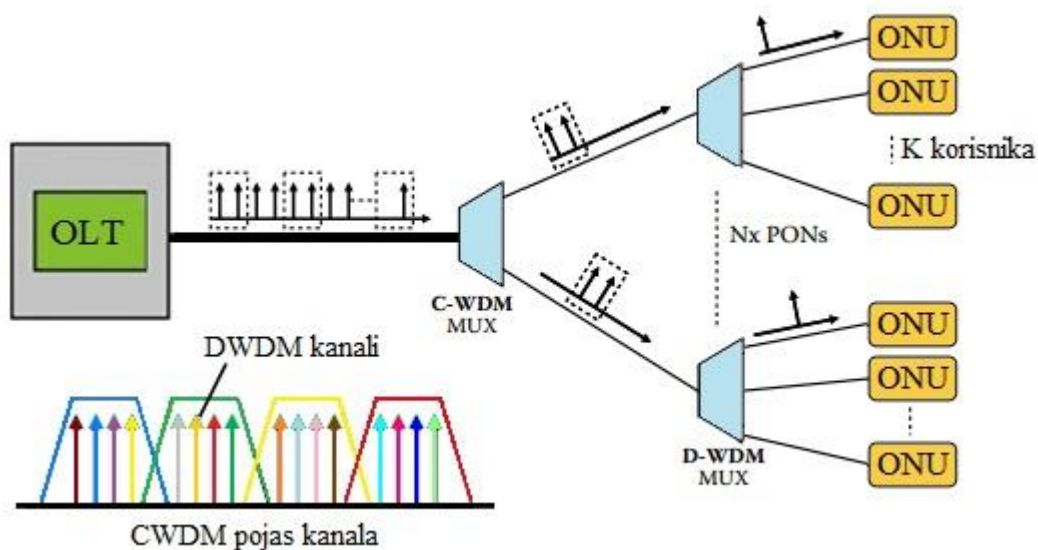
Izvor: Izradio Sandro Perman

Kako CWDM ima ukupno 18 kanala (obično se koristi 16) na ovakav se način može poslužiti maksimalno 9, odnosno 8 korisnika s obzirom na downstream/upstream prijenos, što je relativno mali broj korisnika. Zbog toga se CWDM-PON može primijeniti na manju PON infrastrukturu gdje se radi o vrlo važnim korisnicima ili poslovnim korisnicima, a za mogućnost posluživanja većeg broja korisnika potrebno je potražiti druga rješenja.

Jedno rješenje koje ne uključuje CWDM, može biti primjena DWDM-a kod kojeg se u distribucijskom čvoru koristi AWG filtar za razdvajanje/kombiniranje optičkih signala. DWDM može poslužiti oko 80 korisnika, međutim problem je kod DWDM-a visoka cijena, pa je to potrebno uzeti u obzir [3, 61]. Primjeri mogućih verzija DWDM-PON-a s različitim izvedbama obrađeni su u [45, 46, 47].

Iako CWDM-PON ima prednost u odnosu na TDM-PON modele, to vrijedi jedno u slučaju malog broja korisnika pojedine PON mreže. Osim toga, problem predstavlja iskoristivost valnih duljina. U slučaju da jedan ONU nije u upotrebi, valne duljine koje pripadaju tom ONU uređaju su neiskorištene, a također i oprema u lokalnoj centrali čime se ne postiže maksimalni učinak ugrađene opreme. Iako dobro rješenje, ovakva primjena CWDM nije idealno rješenje te ne iskorištava sve mogućnosti koje pruža CWDM.

Postoji još jedna drukčija varijanta korištenja ovakvog modela s virtualnim P2P vezama od OLT-a do ONU-a, a to je kombinacijom DWDM-a i CWDM-a [3] prikazanoj na slici 52.



Slika 52. Kombinacija DWDM/CWDM sustava kod PtP WDM-a

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Takva je ideja već analizirana kod poglavlja o gradskim mrežama te se može primijeniti i kod FTTH-a. Riječ je o korištenju nekoliko DWDM kanala na području jednog CWDM kanala, što je moguće jer oko svakog CWDM kanala postoji veliki razmak u koji se može smjestiti nekoliko gusto posloženih DWDM kanala.

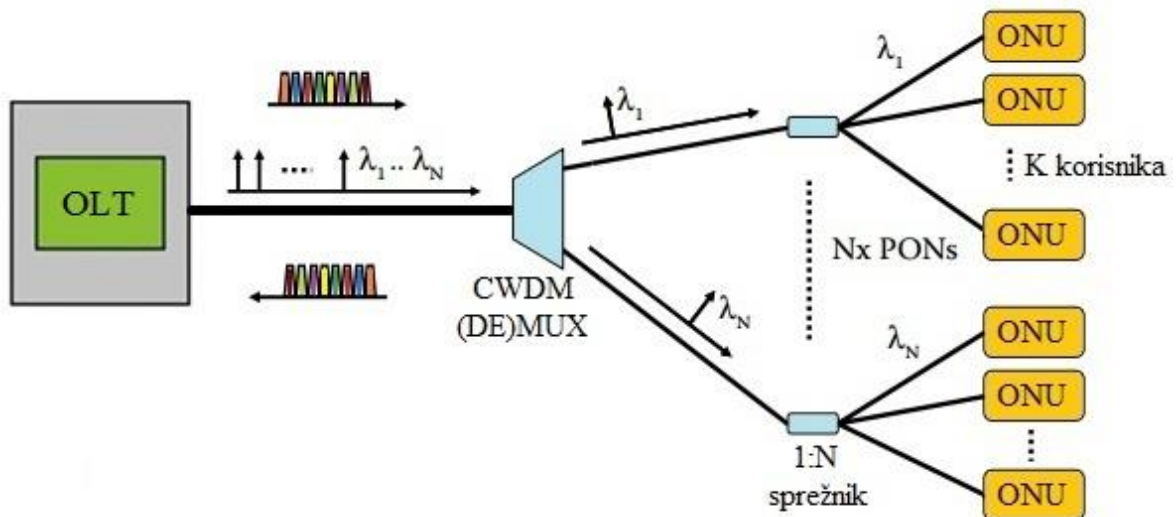
Moguće su dvije izvedbe: u prvoj se na spojnom dijelu mreže koristi CWDM, a na distribucijskom dijelu DWDM, dok je kod druge izvedbe obrnuto. Na slici 52. prikazana je izvedba s CWDM MUX-om na prvom dijelu pristupne mreže. Međutim, takav je sustav još uvijek preskup zbog DWDM komponenti pa ako se u budućnosti smanji cijena, razvojem novih tehnologija, moguća je i ovakva primjena.

Kod obrnute izvedbe, gdje se na prvom dijelu nalazi DWDM, a na drugom CWDM iskorištava se slobodni spektralni pojas (engl. free spectral range, FSR) i periodičnost AWG filtra. Podudaranjem FSR-a s razmakom kanala CWDM-a, DWDM valne duljine se distribuiraju na CWDM dio mreže te se odvajaju prema različitim ONU-ima [3]. Takav model ima prednost u odnosu na prvu izvedbu zato što je potrebno manje DWDM opreme, što za posljedicu ima jeftiniji sustav.

4.2.5. Hibridni CWDM/TDM-PON

Hibridni CWDM/TDM-PON odgovara budućem TWDM-PON-u koji će se koristiti u NG-PON2 standardu [59], međutim kako se u ovom radu obrađuje CWDM, koristiti će se termin CWDM/TDM-PON.

Ključna primjena CWDM-a u FTTH modelu je hibridna CWDM/TDM PON mreža u kojoj se povezuje tehnologija vremenskog i valnog multipleksiranja. Na slici 53. prikazan je hibridni CWDM/TDM PON model koji se sastoji od OLT-a u centrali, spojne mreže s jednim ili više optičkih vlakana, prvog distribucijskog čvora, N distribucijskih čvorova i K ONU-a kod SDU, MDU i sličnih objekata. U prvom distribucijskom čvoru nalaze se CWDM MUX/DEMUX-i, a u ostalim distribucijskim čvorovima 1:N sprežnici. Kombinacijom CWDM-a i TDM-a nekoliko se TDM-PON podatkovnih signala na različitim valnim duljinama (N valnih duljina) prenosi istim spojnim putem. CWDM MUX/DEMUX razdvaja/spaja signale, ovisno je li riječ o downstream ili upstream prijenosu, te se dalje preko 1:N sprežnika signali distribuiraju različitim grupama kao i u klasičnom TDM-PON pristupu.



Slika 53. Hibridni TDM/CWDM PON

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

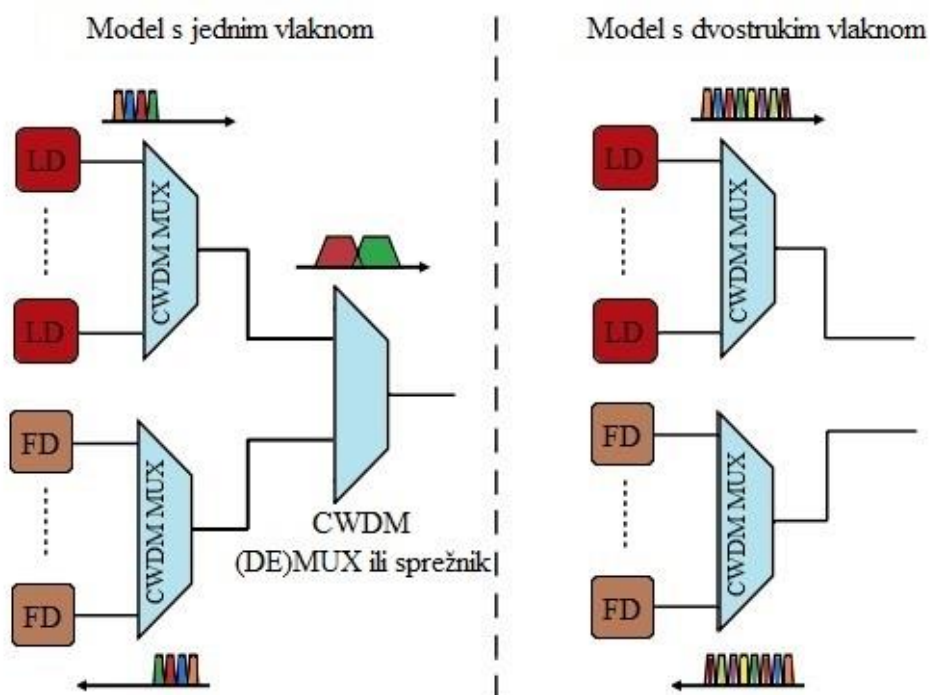
Distribucijski čvorovi imaju određeni broj krajnjih korisnika te se u ovom modelu takve grupe korisnika hijerarhijski zovu podmrežni TDM-PON (engl. sub-network TDM-PONs) [3]. Svaki podmrežni TDM-PON ima dodijeljenu downstream valnu duljinu i u potpunosti je neovisan o ostalim TDM-PON podmrežama. Stoga je downstream prijenos vrlo jednostavan jer se svi predajnici nalaze u lokalnoj centrali. Upstream prijenos je nešto kompliciraniji iz razloga što svaka podmreža zahtjeva posebnu valnu duljinu, a za to su potrebni različite ONU jedinice, kao i kod CWDM-PON-a.

Multipleksiranjem nekoliko TDM-PON-ova na isto prijenosno vlakno moguće su N puta veće grupe korisnika koje su povezane preko istog vlakna na spojnoj mreži, N predstavlja broj CWDM valnih duljina koje se koriste u oba smjera. Ovakav pristup omogućuje smanjenje broja lokalnih centrala iz razloga što svaka centrala može posluživati veće područje svjetlovodne distribucijske mreže. Takav pristup podržava sve prisutniju težnju za spajanje gradske i pristupne mreže u cilju smanjenja radnih troškova i povećanja dugoročnih investicija [35].

Ako se koriste dva vlakna, jedno za upstream, a drugo za downstream prijenos, tada se mogu koristiti iste valne duljine, što znači da se može koristiti maksimalnih 16 valnih duljina, a to povećava broj grupa korisnika (TDM-PON-ova) koje se mogu posluživati preko istog vlakna za 16 puta. Maksimalni omjer dijeljenja kod TDM-PON-a koristeći EPON standard iznosi 32, dok za GPON 64, stoga je u hibridnom CWDM/TDM-PON sustavu moguće poslužiti 512 korisnika koristeći EPON standard ili 1024 koristeći GPON

standard. Negativna strana ovakvog hibridnog pristupa je smanjenje dozvoljenih gubitaka u mreži za 5 dB, koliko iznose gubici u raznim CWDM fazama multipleksiranja. Za manje gubitke moguće je smanjiti broj dijeljenja signala ili se može koristiti oprema s većom osjetljivošću na prijamnoj strani veze. Osim toga, mogu se koristiti različiti omjeri dijeljenja za različite kanale. Najveći omjeri dijeljenja mogu se koristiti tamo gdje postoji mogućnost korištenja pojačala ili opreme s većom osjetljivošću, a najmanji gdje ne postoji takva mogućnost ili su prisutni veći gubici na prijenosnom putu [3].

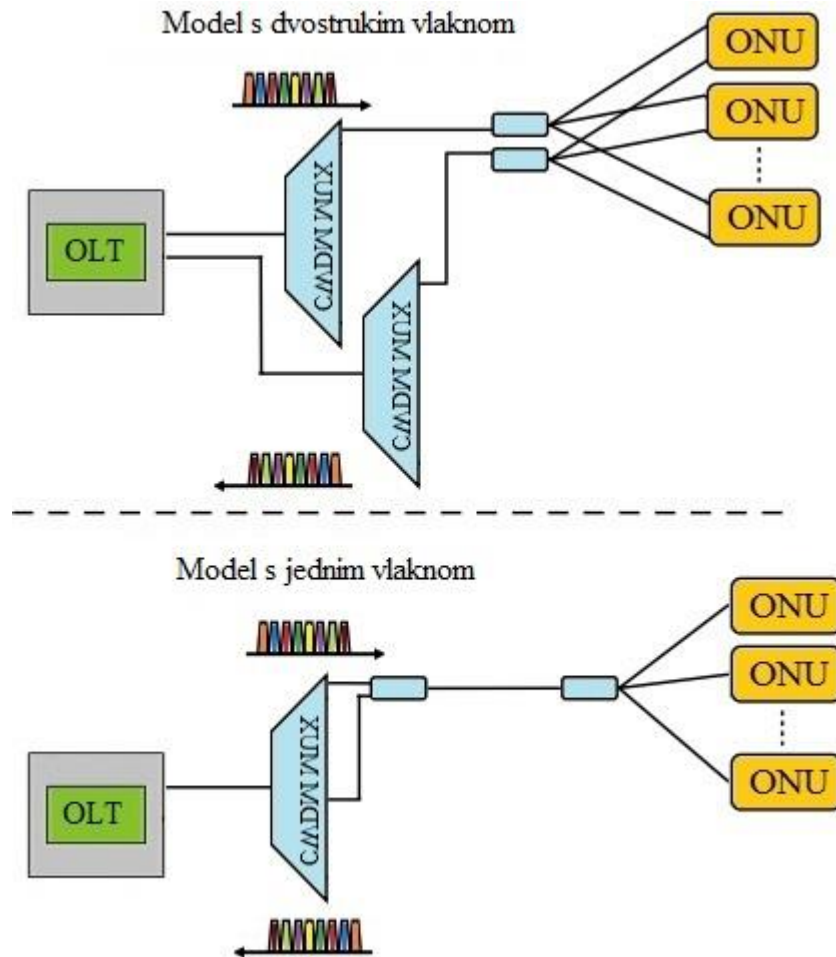
Dizajn optičke opreme koja se koristi u lokalnoj centrali prikazan je na slici 54. Model jednog vlakna koristi CWDM multiplekser s tri priključna mjesta ili sprežnik koji razdvaja upstream i downstream prijenos podataka. Kod takve je izvedbe moguće implementirati 8x TDM-PON podmreža. U drugom slučaju kada se koristi model dvostrukog vlakna, nije potreban dodatni CWDM multiplekser ili sprežnik, ali je zato potrebna dvostruka vanjska infrastruktura koja omogućuje dvosmjerni prijenos. Moguće je poslužiti 16x TDM-PON mreža. U jednom i drugom slučaju koristi se isti dizajn koji se sastoji od niza CWDM lasera (označenih s LD na slici), gdje svaki laser emitira optički signal na različitoj valnoj duljini koji se dalje multipleksiraju i prenose istim vlaknom na dijelu spojne mreže [3].



Slika 54. Dizajn lokalne centrale koristeći jedno ili dva vlakna

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Na slici 55. prikazana je struktura svjetlovodne distribucijske mreže gdje se vidi kako je kod modela s dvostrukim vlaknom potreban jedan dodatni MUX/DEMUX, a potrebno je i više optičkog vlakna i prateće infrastrukture. Kod jednog vlakna, potrebno je manje opreme, ali je zato i broj mogućih TDM-PON podmreža manji.

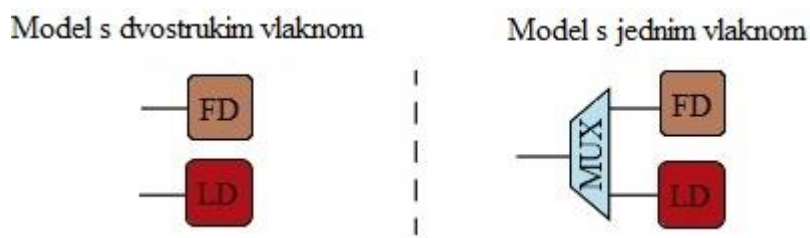


Slika 55. Prikaz svjetlovodne distribucijske mreže CWDM/TDM-PON

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division*

Multiplexing, CRC Press, Boca Raton.

Što se tiče ONU jedinica, odnosno prijemne strane, njihov dizajn također ovisi je li riječ o modelu s jednim vlaknom ili dvostrukim. Na slici 56. su prikazani različiti dizajni. U slučaju jednog vlakna, koriste se različite valne duljine za upstream i downstream prijenos podataka, a potreban je i sprežnik ili MUX/DEMUX za razdvajanje dolazećeg i odlazećeg signala. U takvom slučaju, ONU jedinica sadrži jednostavan fotodetektor i CWDM primopredajnik koji šalje upstream podatke na unaprijed određenoj valnoj duljini [3].



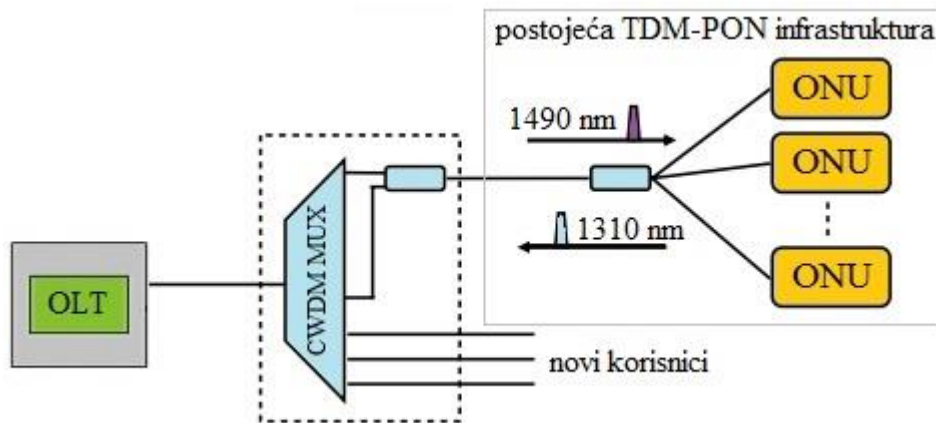
Slika 56. ONU dizajn koristeći jedno ili dva vlakna

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

4.2.6. Kompatibilnost CWDM/TDM-PON sustava s postojećom tehnologijom

Kod pitanja kompatibilnosti postojeće infrastrukture s CWDM prijenosnim sustavom, prvenstveno je važno ispuniti dva zahtjeva. Prilikom ugradnje CWDM sustava, potrebno je utvrditi koristi li postojeća infrastruktura SSMF ili ZWP optičko vlakno jer o tome ovisi može li se primijeniti cijeli spektar CWDM valnih kanala ili samo dio. Osim toga vrlo je važno prilikom ugradnje CWDM-a ne prekidati rad postojećeg sustava i ne remetiti postojeće prijenosne kanale. Treba utvrditi koje kanale koristi postojeći sustav i prema tome prilagoditi dodavanje novih CWDM kanala.

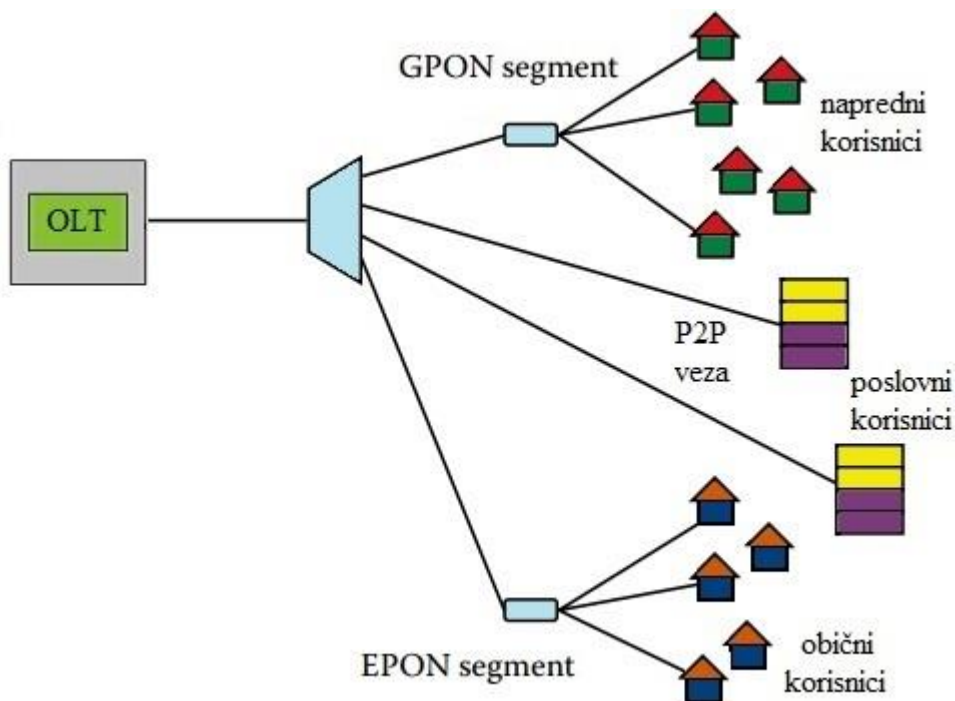
Za povećanje propusnosti postojećeg TDM-PON sustava, ako se želi izbjeći ugradnja novih vlakana idealno je rješenje CWDM. Ugradnjom CWDM multipleksera prije postojećeg spreznika i odabirom kanala različitih od već korištenih, nadogradnja može biti jednostavna i bez utjecaja na postojeće korisnike [3]. Jedan takav primjer ugradnje preko dva dodatna multipleksera prikazan je na slici 57. gdje postojeća infrastruktura temeljena na EPON standardu koristi 1490 i 1310 nm valne duljine. S nadogradnjom CWDM-a moguće je dodatno povećati kapacitet mreže uvođenjem $(N-1)/2$ dodanih TDM-PON-ova preko jednog vlakna u distribucijskim čvorovima, N je broj priključnih mjesta u CWDM multipleksoru. Ovakva nadogradnja predstavlja značajnu uštedu s obzirom da se distribucijski čvorovi obično nalaze vrlo blizu krajnjih korisnika. Naravno, kod ovakvih nadogradnja sustava uvijek treba voditi računa o najvećoj vrijednosti dozvoljenih gubitaka jer dodatna oprema uzrokuje i dodatne gubitke umetanja.



Slika 57. Nadogradnja CWDM-a na postojeću infrastrukturu

Izvor: Uredio Sandro Perman prema: Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Fleksibilnost CWDM prijenosnog sustava omogućava prijenos različitih protokola i vrsta signala na različitim valnim duljinama koje su neovisne jedna od druge preko istog vlakna, zahvaljujući tome moguće su i drukčije primjene. Jedna takva primjena prikazana je na slici 58., gdje se CWDM koristi kod kombinacije različitih segmenata korisnika.



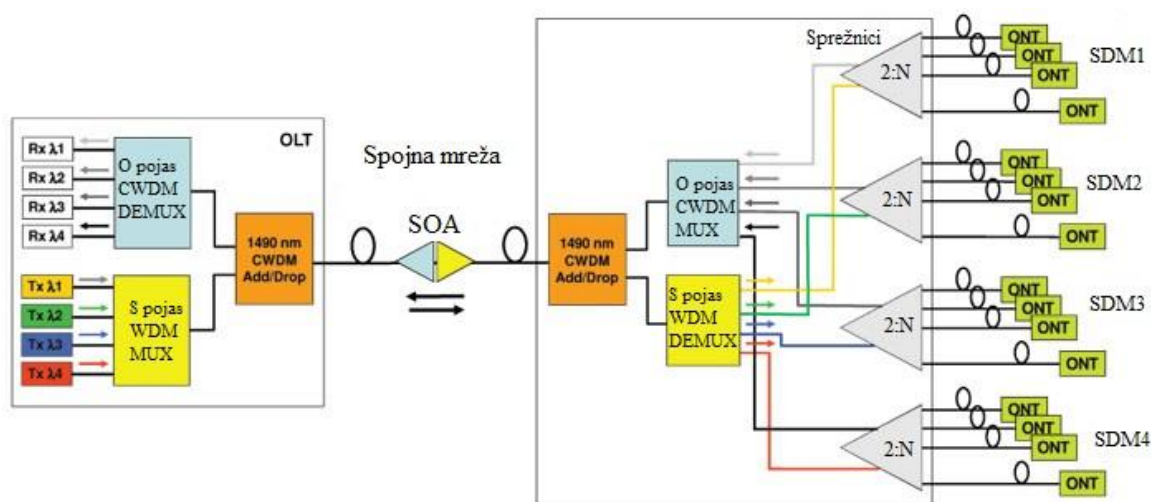
Slika 58. CWDM prijenosni sustav za različite segmente korisnika

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Moguće je koristiti P2P topologiju za poslovne korisnike, a TDM-PON za privatne korisnike, također se može kombinirati GPON i EPON za različite segmente privatnih korisnika, ovisno o njihovim zahtjevima.

4.2.7. Različiti primjeri CWDM prijenosnog sustava u FTTH modelu

Jedno rješenje je ponuđeno prema [60] koje je slično CWDM/TDM PON-u obrađenom u ovom radu. Razlika je u dizajnu OLT-a, ONU-a (u konkretnom primjeru se koristi termin ONT), korištenju pojačala na prijenosnom putu, te je distribucijski čvor nešto drukčijeg dizajna. Udaljenost od centrale do distribucijskog čvora je 58 km s time da se koriste poluvodička optička pojačala (engl. semiconductor optical amplifiers, SOA) nakon 50 km spojnog puta. Primjer iz [60] prikazan je na slici 59. U OLT-u se koriste četiri lasera (Tx) koji prenose valne duljine na 1482, 1487, 1492 i 1497 nm. Kanali se multiplexiraju preko S pojasnog WDM MUX-a i 1x2 1490 nm dodaj-ispusti CWDM filtra. Isti dodaj-ispusti filter prilikom upstreama propušta kanale prema 1x4 O pojasnom CWDM DEMUX-u. S druge strane spojne mreže je također 1x2 1490 nm dodaj-ispusti CWDM filter koji usmjerava downstream i upstream kanale. Downstream kanali se usmjeravaju prema četiri svjetlovodne distribucijske mreže (SDM1-4) preko S pojasnog WDM DEMUX-a.



Slika 59. Primjer hibridnog TWDM PON-a

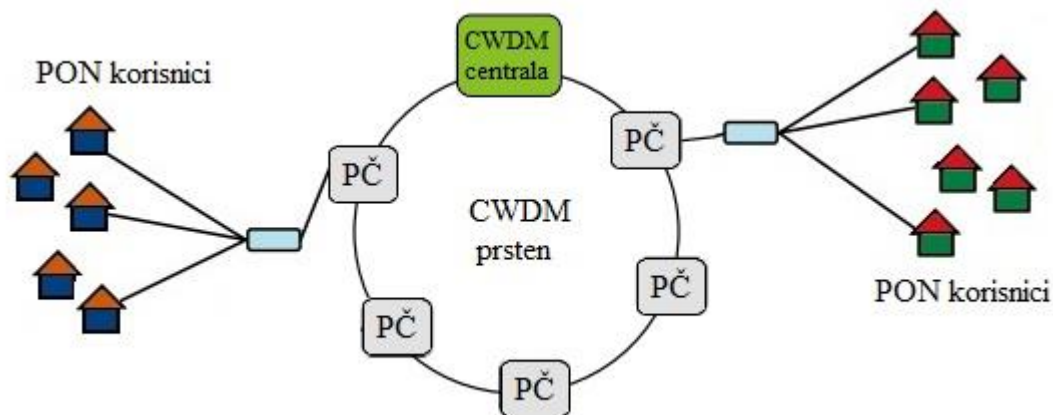
Izvor: Uredio Sandro Perman prema online: <http://www.scielo.br/img/revistas/jmoea/v11n1/a02fig03.jpg>

(03.09.2014)

Kod upstream prijenosa, svi ONU (ONT) uređaji šalju upstream signale na specifičnim CWDM valnim duljinama: 1270, 1290, 1310 i 1330 nm. Upstream kanali se nakon prolaza kroz sprežnike multipleksiraju preko 1x4 O pojasnog CWDM MUX-a te dalje propagiraju prema spojnoj mreži preko 1x2 1490 nm dodaj-ispusti CWDM filtra. Kod OLT-a 1x2 1490 nm dodaj-ispusti CWDM filtar usmjerava upstream signale prema 1x4 O pojasnom CWDM DEMUX-u i konačno do optičkih prijamnika (Rx). Cilj ovakvog modela je povećanje svjetlovodnih distribucijskih mreža spojenih na jedno vlakno na spojnoj mreži i pri tome zadržavanje dobre propusnosti za krajnje korisnike. Prikazane su dobre performanse po pitanju BER-a (engl. bit-error-rate) te je dokazana poželjnost ovakvog sustava [60].

Prema [63] također je predloženo rješenje koristeći CWDM prijenosni sustav, prikazana je kompatibilnost standardnih TDM-PON-ova zajedno s NGA TWDM/PON-om.

Postoji i zanimljivo rješenje temeljeno na prstenastoj topologiji prema [3], prikazano na slici 60. Svaki pristupni čvor (PČ) ima OADM komponentu preko koje dodaje i ispušta valne duljine na sekundarna stabla preko kojih se krajnji korisnici povezuju na mrežu. CWDM ima dovoljne prijenosne kapacitete za prijenos nekoliko kanala na primarnom prstenu na ekonomičan način. Korištenjem zaštitnog prstena ostvaruje se veću redundantnost u slučaju oštećenja vlakna [3].



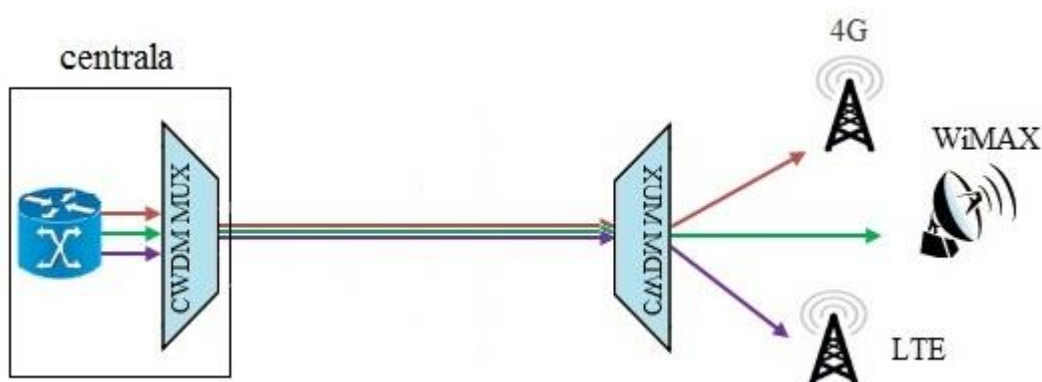
Slika 60. CWDM prstenasta topologija za FTTH model

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Postoje i druge varijante TDM-PON-a u kombinaciji s valnim multipleksiranjem, a ne odnose se na CWDM. Jedna od njih je već spomenuta uporaba DWDM-a s AWG

filtrima u distribucijskom čvoru, osim takve uporabe DWDM-a, prema [62] predložena su rješenja gdje se koriste preklopnici za selektiranje valnih duljina (engl. wavelength selective switches, WSS) u distribucijskom čvoru. Prema [62], takav model s WSS-om je najbolja kombinacija cijene, fleksibilnosti, sigurnosti i dometa u usporedbi s ostalim DWDM/TDM rješenjima. Postoje razni koncepti i ideje o budućem TWDM/PON-u, a zasigurno će i prema novom standardu za NG-PON2 biti donesena zanimljiva standardizirana rješenja.

CWDM se može koristiti i za povećanje propusnosti kod mobilnih mreža, za tkz. mobilni backhaul, koje zahtijevaju sve veću propusnost koristeći 4G, Wi-Max, LTE standarde i radio signali preko vlakna (engl. radio over fiber, RoF). Slika 61. prikazuje jedan primjer korištenja CWDM-a. Pomoću CWDM-a moguće je multipleksirati RF kanale na istom vlaknu na različitim valnim duljinama i distribuirati ih na udaljene bazne stanice (engl. remote base station). Pri tome je uspostavljena virtualna P2P veza između centrale i pojedine udaljene bazne stanice [53].



Slika 61. CWDM za bežične mreže

Izvor: Izradio Sandro Perman prema online: <http://www.cubeoptics.com/en/solutions/cwdm-relieves-wireless-backhaul-bottlenecks/> (31.08.2014)

Postoje i druge tehnike te je jedna od njih prikazana u [54] gdje se koristi hibridni WDM/TDM PON za prijenos RoF-a. U radu [64] prikazana je kombinacija bežičnog sustava (WiMAX, LTE) RF spektar, propusnosti 2.5 Gb/s downstream i 1.25 Gb/s upstream koristeći GPON-CWDM i RoF. Prezentirano je rješenje za smanjenje kromatske disperzije te je uspostavljen prijenos na udaljenosti od 600 km preko RoF tehnologije sa zadovoljavajućim BER-om te omjerom signala-šuma (engl. optical signal-to-noise ratio, OSNR). Ovo su samo neki od brojnih primjera korištenja CWDM prijenosnog sustava za bežičnu primjenu.

4.2.8. Problem upstream prijenosa

Problem upstream prijenosa odnosi se općenito na primjenu WDM-a u pristupnoj mreži, što uključuje i CWDM i DWDM. Radi se o sljedećem: za prijenos podataka od OLT-a u lokalnoj centrali do ONU-a kod korisnika, postoji jednostavno rješenje kao što su primopredajnici na različitim valnim duljinama koji se nalaze u lokalnoj centrali, međutim kod upstreama nastaje problem. Svaki ONU uređaj treba koristiti dodijeljenu valnu duljinu za slanje upstream podataka što znači da se ne mogu ugrađivati isti ONU uređaji kod svakog korisnika, već svaki ONU treba imati predajnik na različitoj valnoj duljini. U slučaju CWDM-PON-a, za N korisnika potrebno je N različitih ONU jedinica, dok je kod CWDM/TDM-PON-a potrebno za K podmrežnih TDM-PON-ova, K ONU-a. Postoji nekoliko načina rješavanja tog problem kao što je uporaba bezbojnog (engl. colorless) ONU-a, podesivih lasera ili uporaba modularnog ONU-a [3, 31].

Uporaba podesivih CWDM lasera kao što su primjeri [48, 49, 50], iako idejno vrlo dobro i poželjno rješenje ipak predstavlja preveliki trošak za PON mrežu [3, p.299, 31, p.346], a pogotovo CWDM sustave koji se temelji na jeftinim komponentama. CWDM podesivi laseri su još uvijek u razvojnog stadiju jer nema puno prisutnih uređaja koji zahtijevaju takvu vrstu lasera [3, p.299].

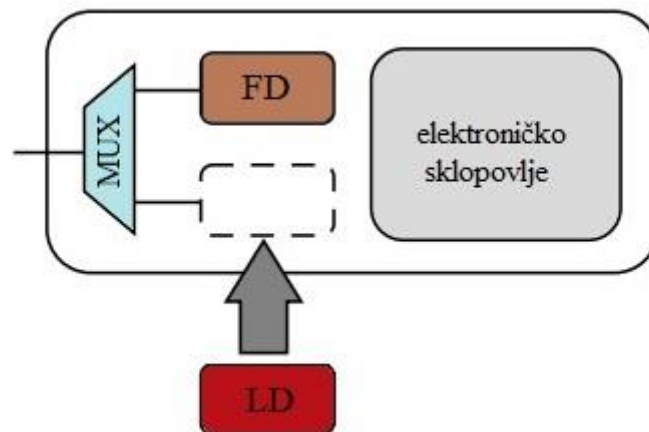
Uporaba bezbojnih ONU jedinica je naprednije rješenje te je u G.989.1 standardu (NG-PON2) to jedan od zahtjeva za buduće ONU uređaje u PON mrežama s valnim multipleksiranjem. Prema [59] zahtjev za bezbojne ONU-e definiran je ovako:

„Kako bi se povećala fleksibilnost i smanjili operativni troškovi zbog upravljanja zalihama, ugrađeni ONU-i moraju biti bezbojni, tj. nisu predodređeni za specifičnu valnu duljinu. Bezbojni ONU-i ne zahtijevaju upravljanje različitim tipovima ONU-a koji su proporcionalni broju valnih duljina korištenih u PON mreži. Ovakav pristup će znatno smanjiti vrijeme planiranja, ugradnje i cijene u usporedbi s obojanim ONU-ima (predviđenim za određenu valnu duljinu)“.

Pomoću takvog bezbojnog dizajna ONU-a moguće je u potpunosti eliminirati izvor svjetla na korisnikovoj strani veze. Postoji nekoliko pristupa izvedbi bezbojnosti ONU-a koje su mogu podijeliti u dvije grupe: bezbojnost rezanjem spektra (engl. spectrum slicing) i ponovna upotreba silaznog signala (engl. optical loopback). ONU jedinice koje se temelje na dizajnu ponovne upotrebe silaznog signala još se nazivaju i reflektirajuće ONU jedinice, a glavni načini dizajna su: korištenje FP lasera s zaključanim ubrizgavanjem, reflektirajuća

optička poluvodička pojačala (engl. reflective semiconductor optical amplifiers, RSOA) i reflektirajući elektro-apsorpcijski modulatori (engl. reflective electroabsorption modulators, REAM) [31, p.344]. Takvi su dizajni još uvijek u fazi istraživanja te imaju veliki nedostatak, a to je valni odaziv samo u C i L pojasu, pa je potrebno razviti tehnologiju koja će omogućiti cijeli CWDM valni spektar [3, p.300]. U literaturi [46, 47] prikazana se zanimljiva rješenja za dizajn bezbojnih ONU jedinica.

Treće rješenje je uporaba modularnih ONU-a te je takvo rješenje prema [3] i najjednostavnije. Umjesto korištenja N različitih ONU jedinica (N je broj upstream valnih duljina) moguće je koristiti uobičajenu ONU jedinicu koja ima sve isto kao i inače s jednom bitnom razlikom, a to je priključno mjesto u koje se mogu priključiti različiti predajnici prilikom ugradnje ONU jedinice kod korisnika. Ovakav pristup ne zahtjeva korištenje različitih ONU jedinica i nije tehnološki zahtjevan, te omogućuje masovnu proizvodnju jednakih ONU jedinica sa priključnim mjestom za predajnike. Dizajn modularne ONU jedinice prikazan je na slici 61.



Slika 62. Modularni ONU dizajn

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

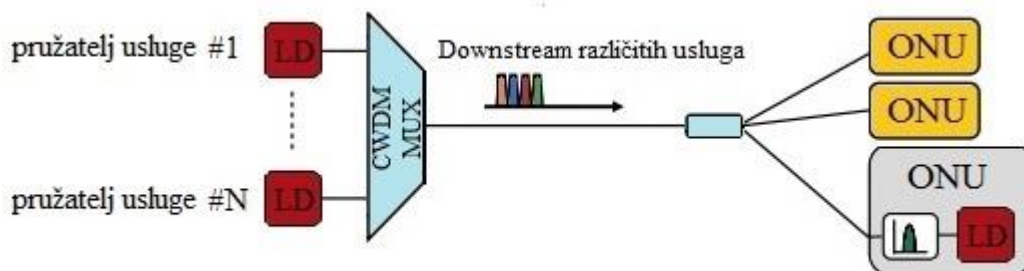
4.2.9. Više pružatelja usluga preko jedne infrastrukture

Osim što CWDM omogućuje prijenos različitih usluga koristeći različite valne duljine na istoj PON infrastrukturi, još zanimljivije je dijeljenje iste infrastrukture između različitih pružatelja usluga (engl. Internet Service Provider, ISP). Kod FTTH-a je najveća otežavajuća okolnost visoka cijena izgradnje svjetlovodne infrastrukture, pa je zato dijeljenje izgrađene infrastrukture između različitih ISP-a dobra opcija, takav model zove se model otvorenog pristupa fizičkoj infrastrukturi. Primjer je takvog modela projekt svjetlovodnih distribucijskih mreža Grada Zagreba te je glavni cilj tog projekta definiran ovako:

„Potrebno je realizirati model otvorenog pristupa fizičkoj infrastrukturi svjetlovodnih distribucijskih mreža Grada Zagreba kojim se svakom krajnjem korisniku omogućuje slobodan izbor najpovoljnijeg operatora, a svakom operatoru usluga pristup krajnjem korisniku po jednakim i transparentnim uvjetima. Rezultat toga je promjena fokusa natjecanja na tržištu telekomunikacija iz domene natjecanja u infrastrukturi u domenu natjecanja u uslugama, osiguravajući time krajnjim korisnicima veći izbor kvalitetnijih i jeftinih usluga“ [51].

Grad Zagreb izgradnjom svjetlovodne distribucijske infrastrukture može njom upravljati preko poslovnog entiteta (Zagrebački digitalni grad) koji ima ulogu infrastrukturnog operatora te se bavi iznajmljivanjem optičkih vlakana svjetlovodne distribucijske mreže različitim operatorima. Osim Zagreba, takav model planiraju i drugi kao npr. Grad Krk sa svojom svjetlovodnom distribucijskom mrežom Grada Krka (SDMGK).

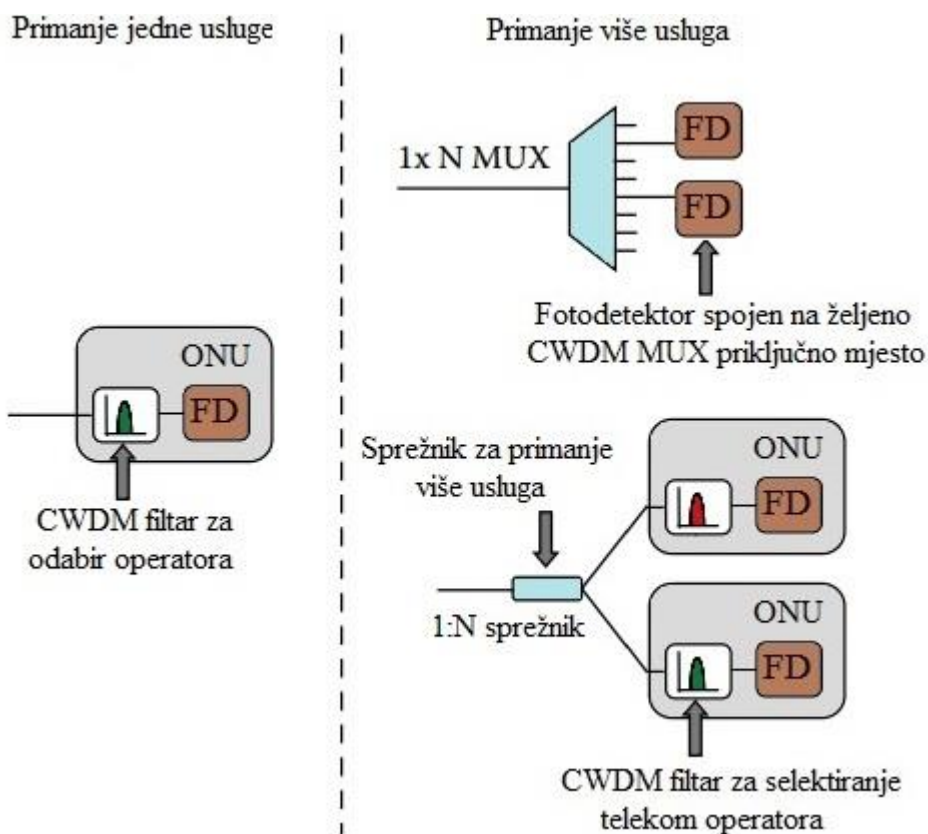
U jednom takvom modelu CWDM je idealno rješenje s time da bi se trebalo osigurati korištenje i zajedničke aktivne opreme od strane mrežnog operatora (pružatelja otvorenog pristupa). Pod aktivnu opremu misli se na pasivne sprežnike, CWDM MUX/DEMUX-e i slične uređaje koji sudjeluju u valnom multipleksiranju, djeljenju signala i sl. U tom slučaju svakom se ISP-u dodjeljuje valna duljina za upstream i downstream prijenos podataka, a krajnji korisnik može izabrati ISP-a koji najbolje ispunjavaju njegove potrebe. Prijenos podataka svih ISP-a vrši se preko istog vlakna, a izbor pojedinog ISP-a vrlo je jednostavan i odrađuje se kod korisnika ugradnjom odgovarajućih lasera i filtara, kao što je prikazano na slici 63. Još jedna prednost ovakvog modela je da su usluge u potpunosti kompatibilne, pa izbor jedne ne ograničava primanje druge usluge preko iste korisničke opreme [3].



Slika 63. CWDM u modelu s više pružatelja usluga

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.

Na korisnikovoj strani nekoliko je tehnika za istovremeno primanje više kanala od različitih ISP-a. Na slici 64. prikazana je usporedba primanja više usluga i samo jedne usluge.



Slika 64. Dizajn ONU-a za primanje jedne ili više usluga

Izvor: Uredio Sandro Perman prema Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton

Najjednostavnija tehnika je ugradnja CWDM multipleksera i povezivanje fotodetektora na priključno mjesto koje pruža usluge na koje je korisnik pretplaćen. Međutim, takvo rješenje je skupo i neefikasno jer se koristi samo nekoliko priključnih mjesta MUX-a. Takvo rješenje je isplativo jedino za zgrade ili poduzeća, s druge strane to je rješenje koje stvara najmanje gubitke linije. Drugo rješenje je nekoliko povezanih FBG-a koji ispuštaju valne duljine gdje je to potrebno. FBG rješenje je jeftinije, a gubici do kojih dolazi nisu tako veliki i mogu se tolerirati. Treće i zadnje rješenje je najjednostavnije, ali ima i najveće gubitke. Temelji se na korištenju optičkih sprežnika i CWDM filtara.

5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analizirana je uporaba CWDM prijenosnog sustava u telekomunikacijskoj mreži. Istraženi su relevantni standardi te komponente koje sudjeluju u prijenosnom sustavu, od osnovnih prema složenijima. Od analiziranih komponenti u CWDM sustavu se najčešće koriste: DFB laseri, PIN fotodiode, TFF filtri, MUX/DEMUX s 4, 8, 12 ili 16 kanala, SFP primopredajnici te kao prijenosni medij jednomodno optičko vlakno G.652D.

CWDM je relativno nova tehnologija. Prvi CWDM standardi doneseni su prije desetak godina, a CWDM je zamišljen kao jeftinija verzija DWDM prijenosnog sustava. To je omogućeno donošenjem standarda prema kojem se kod CWDM-a koristi širok razmak od 20 nm između pojedinih kanala, a ukupni je broj kanala 18. Takav široki razmak omogućio je korištenje jeftinije opreme i veća odstupanja, a to je otvorilo put CWDM-u prema gradskim i pristupnim mrežama.

Najvažniji je dio rada gradska i pristupna svjetlovodna mreža. U tim poglavljima su obrađeni praktični primjeri uporabe CWDM-a s kojima je dokazivana postavljena hipoteza o jednostavnom povećanju propusnosti bez potrebe za postavljanjem novih optičkih vlakana i ostale prateće infrastrukture. To je vrlo bitno jer se u pristupnim mrežama sve investicije vraćaju preko krajnjih korisnika, pa je jeftino rješenje od velikog značaja.

Kod gradskih mreža prikazani su primjeri gdje se uvođenjem dodatnih kanala preko jednog vlakna ostvaruje veća propusnost, to može biti riječ o dvije zgrade, poslovna objekta, kampusa ili nekom drugom objektu. Također je prikazana i uporaba CWDM-a u prstenastoj topologiji, gdje se povezuje nekoliko čvorova, a korištenjem CWDM-a jednostavno i efikasno povećava propusnost. Analizirani su primjeri povećanja propusnosti kod centara za pohranu podataka, gdje je također prikazano kako se CWDM jednostavno može nadograditi, pa tako nije potrebno odmah na početku imati velike investicije već se može naknadno povećati propusnost, jednostavnim dodavanjem kanala. Prikazana je kompatibilnost CWDM-a i mogućnost prijenosa različitih optičkih signala i protokola preko jednog vlakna, što je vrlo bitno u jednom takvom okruženju.

Kod svjetlovodnih pristupnih mreža istraženi su različiti modeli u koje se CWDM savršeno uklapa kao jeftina tehnologija za povećanje propusnosti. Prezentirana su dva glavna CWDM rješenja za pristupne mreže, jedan je korištenjem virtualne P2P veze za svakog korisnika na P2PM topologiji, a drugi je korištenjem kombinacije TDM PON-a i CWDM-a.

Upravo se ovaj drugi primjer pokazao kao idealno rješenje koje se može implementirati u već postojeće TDM PON mreže. U jednom takvom sustavu višestruko se povećava broj korisnika koji se mogu posluživati preko iste infrastrukture, a to smanjuje troškove polaganja novih kabela, vlakana i ostale opreme. Ustanovljeno je da je CWDM kompatibilan s postojećim tehnologijama te se preko CWDM-a mogu posluživati različiti segmenti korisnika preko jednog vlakna, osim toga mogu se prenositi i različite usluge preko jednog vlakna.

Prikazan je primjer otvorenog pristupa koji se može primijeniti i u Hrvatskoj. Preko CWDM-a različiti pružatelji internet usluga mogu koristiti zajedničku opremu, a svaki ISP prenosi uslugu na svojoj valnoj duljini. Takav pristup može olakšati implementaciju FTTH-a, a pogotovo je to bitno kod ruralnih područja, gdje je od još većeg značaja što jeftinija pristupna mreža. Prikazane su i kombinacije DWDM-a i CWDM-a koje su idejno jako dobro rješenje, ali trenutno ipak preskupo zbog DWDM-a, međutim i to je dokaz jedne svestranosti CWDM-a.

Što se tiče mogućih poboljšanja CWDM-a koja bi dodatno pojeftinila i pojednostavnila implementaciju CWDM postoji nekoliko pravaca za daljnja istraživanja. Prije svega to se odnosi na povećanje propusnosti po kanalu, produljenju dometa pristupnih mreža i razvoju ONU uređaja.

Istraživanja za povećanje propusnosti bi trebala ići u smjeru 10 Gb/s za koju je jedino ograničenje prevelika cijena, pa bi trebalo pronaći nova rješenja koja će omogućiti razvoj jednostavnije i jeftinije elektroničke opreme koja će omogućiti 10 Gb/s.

Povećanje dometa pristupnih mreža se odnosi na težnje telekom operatora za spajanjem gradskih i pristupnih mreža, čime bi se uklonile ili pojednostavnile lokalne centrale. Na taj način bi se posluživao veći broj korisnika, smanjila cijena, a povećala efikasnost. CWDM je idealno rješenje za takvo nešto jer već sudjeluje u gradskoj mreži pa bi spajanje gradske i pristupne mreže bilo vrlo jednostavno ako bi tehnologija dovoljno napredovala da se omogući cjenovno prihvatljivo rješenje.

U radu je spomenut i upstream problem koji je od velik značaja u pristupnim mrežama s valnim multipleksiranjem, pa bi trebalo naći efikasna i jeftina rješenja u obliku bezbojnih ONU-a, podesivih lasera ili modularnih ONU-a, time bi se omogućile jeftine i efikasne PON mreže s valnim multipleksiranjem.

Ukupno gledano, CWDM je tehnologija budućnosti, kako za gradske, tako i za pristupne svjetlovodne mreže.

LITERATURA

- [1] *ITU-T in brief*, ITU-T online: <http://www.itu.int/en/ITU-T/about/Pages/default.aspx> (10.08.2014.)
- [2] *ITU-T Recommendations and other publications*, ITU-T online: <http://www.itu.int/en/ITU-T/publications/Pages/default.aspx> (10.08.2014.)
- [3] Thiele, H., Nebeling, M. 2007, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CRC Press, Boca Raton.
- [4] International Telecommunication Union 2009, *Optical fibres, cables and system*, online: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf (10.08.2014.)
- [5] *ITU-T Recommendation G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, 2013, online: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I> (05.08.2014)
- [6] *CWDM technology transceivers wiki*, 2014, online: <http://www.fiberstore.com/CWDM-Technology-Transceivers-Wiki-aid-397.html> (13.08.2014)
- [7] *Fiber Optic Network Optical Wavelength Transmission Bands*, 2013, online: <http://fiberbit.com.tw/fiber-optic-network-optical-wavelength-transmission-bands> (13.08.2014)
- [8] 2008, *The leader in CWDM Recommendations*, ITU-T, online: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/1D/01/T1D010000030002PDFE.pdf (14.08.2014)
- [9] Dr. Lauder, R. 2004, *CWDM, GFP technologies for service networks*, online: <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-21/issue-6/industry/cw-dm-gfp-technologies-for-service-networks-53905872.html> (14.08.2014)
- [10] Dutta, K. A., Dutta, K. N., Fujiwara, M. 2002, *WDM technologies: active optical components*, Volume I, Academic Press, California.
- [11] Grobe, K., Eiselt, M. 2014, *Wavelength division multiplexing, A practical engineering guide*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [12] Wipiejewski, T. et al., *VCSELs for datacom applications*, online: http://hsi.web.cern.ch/HSI/components/parallel_optics/paroli/paroli_VCSEL.pdf (16.08.2014)

- [13] Mukherjee, B. 2006, *Optical WDM Networks*, Springer Science+Business Media, New York
- [14] Lemoff E., B. 2002, *Coarse WDM Transceivers*, OPN TRENDS, online: <http://www.osa-opn.org/Content/ViewFile.aspx?id=1163> (18.08.2014)
- [15] Darja, J. 2006, *Monolithically integrated DFB laser array by MOVPE selective area growth for coarse WDM systems*, University of Tokyo, online: <http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/bitstream/2261/44579/1/37037100.pdf> (16.08.2014)
- [16] Finisar Corp. 2013, *Multi-rate CWDM Pluggable SFP Transceiver*, online: <http://www.finisar.com/products/optical-modules/sfp/FWLF15217Dxx> (19.08.2014)
- [17] X2 MSA Group 2003, *Specification for 10 Gigabit Pluggable Optical Transceivers*, online: http://web.archive.org/web/20071011143423/http://www.x2msa.org/sp_x2MSA.pdf (19.08.2014)
- [18] FOA 2008, *Measuring Loss in Fiber Optics*, online: <http://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/loss.html> (19.08.2014)
- [19] Laferriere, J. et al. 2007, *Reference Guide to Fiber Optic Testing*, Volume 1, JDSU, Saint-Etienne.
- [20] Afrić, I. 2013, *Mjerenje kromatske disperzije pri vrlo visokim prijenosnim brzinama*, diplomski rad, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka.
- [21] *Chromatic Dispersion, Polarization Mode Dispersion and Spectral Attenuation* 2010, FOA, online: http://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/CD_PMD.html (19.08.2014)
- [22] Jurdana, I. 2008, *Primjena svjetlovodne tehnologije na brodovima*, Pomorstvo, br.2, str. 271-282.
- [23] *Multimode fiber solutions*, online: <http://www.packetlight.com/technology/multimode-fiber> (20.08.2014)
- [24] *T-series multimode CWDM*, online: <http://www.smartoptics.com/products/passive-wdm/multimode> (20.08.2014)
- [25]] ITU-T 2009, *ITU-T Recommendation G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, online: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200911-I/en> (20.08.2014)
- [26] *Bend-optimized Optical Fiber*, online: <http://fiber-optic-catalog.fofsoptics.com/viewitems/optical--fibers/bend-optimized-optical-fiber> (21.08.2014)
- [27] Venghaus (Ed.), H. 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, Berlin
- [28] Dutta, K. A., Dutta, K. N., Fujiwara, M. 2003, *WDM technologies: passive optical components*, Volume II, Academic Press, California

- [29] *Clearfield's CWDM information guide*, online: http://www.clearfieldconnection.com/downloads/smart-tips/Clearfield_CWDM_Document.pdf (25.08.2014)
- [30] Cube Optics AG, *CWDM components for 40 G and 100 G transceivers*, online: http://www.cubeoptics.com/uploads/tx_cuboproducts/D-5006-Rev.A_white_paper_WDM_100G.pdf (25.08.2014)
- [31] Mukherjee, B. et al., 2012, *WDM Systems and Networks*, Springer Science+Business Media, New York
- [32] *Optics and communications*, online: <http://www.transmode.com/en/technologies/wdm-the-transmode-way/wdm-the-transmode-way-html/1-optics-and-communications> (26.08.2014)
- [33] *Hrvatski Telekom i Deutsche Telekom potvrđuju svoje tehnološke inovacije*, T-HT, online: http://www.t.ht.hr/press/novosti_disp.asp?id=1962 (27.08.2014)
- [34] *Long Haul Terrestrial*, Acacia communications inc., online: <http://acacia-inc.com/applications/long-haul-terrestrial> (27.08.2014)
- [35] Jurdana, I., *Trendovi razvoja metoda za povećanje otpornosti svjetlovodne transmisijske mreže*, PFRI, Rijeka, online: https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Trendovi_razvoja_metoda_za_povecanje_otpornosti_svetlovodne.pdf (27.08.2014)
- [36] *Metro*, online: <http://acacia-inc.com/applications/metro> (27.08.2014)
- [37] Pralas, T. 2008, *Računalne mreže – mrežne topologije*, CARNet, online: <http://sistemac.carnet.hr/node/379> (27.08.2014)
- [38] *Cisco CWDM GBIC and SFP Solution*, online: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/cwdm-transceiver-modules/product_data_sheet09186a00801a557c.html (27.08.2014)
- [39] *Redundantni podatkovni centri*, online: <http://security.lss.hr/Novi-dokumenti/redundantni-podatkovni-centri.html> (27.08.2014)
- [40] ITU-T, *G.980-G.989 Optical line systems for local and access networks*, online: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=G> (29.08.2014)
- [41] IEEE, 2004, *802.3ah, Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*, online: http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/2006-11_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf (29.08.2014)

- [42] *Pravilnik o svjetlovodnim distribucijskim mrežama*, 2014, Narodne novine, Zagreb, 057
- [43] *Tehno-ekonomska obilježja izgradnje FTTH mreža*, 2011, Lator d.o.o, Zagreb, online: http://www.hakom.hr/UserDocsImages/2012/studije/Studija_Tehno-ekonomska%20obilje%C5%BEja%20izgradnje%20FTTH%20mre%C5%BEa-v%201%200.pdf (29.08.2014)
- [44] Mikac, B. 2010, *Telekomunikacijski sustavi i mreže*, Predavanja 6, 2. dio, FER, online: http://www.fer.unizg.hr/download/repository/P7-2_TSM_2011_Drugi_dio.pdf (29.08.2014)
- [45] *WDM-PON: A key component in next generation access*, Transmode, online: <http://www.transmode.com/sv/resource/whitepapers?task=document.download&id=112> (30.08.2014)
- [46] Xu, L. et al. 2012, *Colorless optical network unit based on silicon photonic components for WDM PON*, IEEE photonics technology letters, vol. 24, no. 16, online: <http://nanophotonics.ece.cornell.edu/upload/Colorless%20optical%20network%20unit%20based%20on%20silicon%20photonic%20components%20for%20WDM%20PON.pdf> (30.08.2014)
- [47] Maziotis, A. et al. 2011, *Colorless ONU with all-optical clock recovery for full-duplex dense WDM PONs*, IEEE photonics technology letters, vol.23, no. 20, online: http://www.photonics.ece.ntua.gr/PCRL_web_site/05930331.pdf (30.08.2014)
- [48] *2.5 Gb/s CWDM buried het laser 80 km reach LC25WC*, Bookham, online: http://datasheet.eeworld.com.cn/pdf/BOOKHAM/201454_LC25WC.pdf (30.08.2014)
- [49] *Agilent 81600B tunable laser source family*, 2013, online: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7321EN.pdf> (30.08.2014)
- [50] *JGR Optics introduces new TLS5 tunable laser source*, JGR optics inc., online: http://jgroptics.com/wp-content/themes/JGROptics/pdf/PR-New%20TLS5%20Tunable%20Laser%20Source_April%202014_v1.pdf (30.08.2014)
- [51] *Opis projekta izgradnje distribucijskih mreža Grada Zagreba*, Zagrebački holding d.o.o., online: [http://www.zgh.hr/UserDocsImages/aktualnosti/Direkcija/Sastanci%20u%20ZGH/Opis%20projekta%20izgradnje%20svjetlovodnih%20distribucijskih%20mre%C5%BEa%20\(SDM\)%20Grada%20Zagreba%20-%20projekt%20Vrbani%20III.pdf](http://www.zgh.hr/UserDocsImages/aktualnosti/Direkcija/Sastanci%20u%20ZGH/Opis%20projekta%20izgradnje%20svjetlovodnih%20distribucijskih%20mre%C5%BEa%20(SDM)%20Grada%20Zagreba%20-%20projekt%20Vrbani%20III.pdf) (30.08.2014)

- [52] *Svijetlovodna distribucijska mreža Grada Krka [SDMGK]*, Grad Krk, online: <http://www.grad-krk.hr/lijeviMenu/Programi-i-inicijative/Projekti/Analiza-isplativosti-uvo%C4%91enja-gradske-opticke-mrez.aspx> (30.08.2014)
- [53] *CWDM relieves wireless backhaul bottlenecks*, Cube optics AG, online: <http://www.cubeoptics.com/en/solutions/cwmd-relieves-wireless-backhaul-bottlenecks/> (30.08.2014)
- [54] Abdullah, O. et al., 2013, *2.5 Gb/s hybrid WDM/TDM PON using radio over fiber technique*, Elsevier
- [55] *Understanding the basic differences between SONET and SDH framing in optical networks*, Cisco, online: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical/synchronous-optical-network-sonet/16180-sonet-sdh.html> (31.08.2014)
- [56] ITU-T, 2007, *G.984.5: Enhancement band for gigabit capable optical access networks*, online: http://www.ieee802.org/3/10GEPON_study/email/pdf3FTdYNqotU.pdf (01.09.2014)
- [57] *FTTH Handbook*, Edition 6, FTTH Council Europe, online: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf (01.09.2014)
- [58] *Commission recommendation of 20 September 2010 on regulated access to Next Generation Access Networks (NGA)*, Official Journal of the European Union, 2010, online: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/%20LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:251:0035:0048:EN:PDF> (01.09.2014)
- [59] ITU-T, 2013, *G.989.1: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*, online: www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I/en (02.09.2014)
- [60] Penze, R., Rosolem, J., Filho, R. 2012, *Upgrading and extending PON by using in-band WDM overlay*, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol.11, online: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-10742012000100002&script=sci_arttext (03.09.2014)
- [61] Winerling, P. 2009, *WDM-PON and CWDM networks – Function and Measurement Tasks*, White paper, JDSU, online: http://www.jdsu.com/ProductLiterature/wdmponcwmnet_wp_fop_tm_ae.pdf (03.09.2014)

- [62] Dixit, A. et al. 2012, *Wavelength Switched Hybrid TDMA/WDM (TWDM) PON: a FLEXible Next-Generation Optical Access Solution [Invited]*, online: www.researchgate.net (03.09.2014)
- [63] Choi, K. et al. 2008, *An efficient evolution method from a TDM-PON with Video Overlay to NGA*, online: http://photonet.kaist.ac.kr/paper/international_conference/C086.An%20Efficient%20Evolution%20Method%20from%20a%20TDM-PON%20with%20a.pdf (03.09.2014)
- [64] Al Noor, M. 2011, *Green Radio Communication Networks Applying Radio-over-Fibre Technology for Wireless Access*, Middlesex University London, online: <http://eprints.mdx.ac.uk/8995/1/MazinAlNoorPhD.pdf> (03.09.2014)

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
ADM	<i>engl. Add-Drop Multiplexer</i>	dodaj-ispusti multiplexer
APC	<i>engl. Automatic Power Control</i>	automatsko upravljanje snagom
APD	<i>engl. Avalanche PhotoDiode</i>	fotodioda s lavinskim efektom
AWG	<i>engl. Arrayed Waveguide Grating</i>	filtrar s rešetkom polja valovoda
BER	<i>engl. Bit-Error-Rate</i>	omjer greške bit-a
CD	<i>engl. Chromatic Dispersion</i>	kromatska disperzija
CWDM	<i>engl. Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>	multipleksiranje s grubom valnom podjelom
DCF	<i>engl. Dispersion Compensation Fiber</i>	disperzijsko kompenzacijsko vlakno
DČ	<i>engl. Distribution Point</i>	distribucijski čvor
DFB	<i>engl. Distributed Feedback Laser</i>	laser s distribuiranom povratnom vezom
DML	<i>engl. Directly Modulated Lasers</i>	direktno modulirani laseri
DSF	<i>engl. Dispersion Shifted Fiber</i>	optičko vlakno s pomaknutom disperzijom
DWDM	<i>engl. Dense Wavelength Division Multiplexing</i>	multipleksiranje s gustom valnom podjelom
ENI	<i>engl. External Network Interface</i>	vanjsko mrežno sučelje
EPON	<i>engl. Ethernet PON</i>	Ethernet pasivna optička mreža
FBG	<i>engl. Fibre Bragg Gratings</i>	filtrar s Braggovom rešetkom u vlaknu
FGL	<i>engl. Fiber Grating Laser</i>	laser s vlaknastom šupljinom
FP	<i>engl. Fabry-Perot</i>	Fabry Perot laser
FTTB	<i>engl. Fiber To The Building</i>	optičko vlakno do zgrade
FTTC	<i>engl. Fiber To The Curb</i>	optičko vlakno do kabineta
FTTDp	<i>engl. Fiber To The Distribution Point</i>	optičko vlakno do distribucijskog čvora
FTTH	<i>engl. Fiber To The Home</i>	optičko vlakno do kuće
FTTx	<i>engl. Fiber To The x</i>	optičko vlakno do x
GbE	<i>engl. Gigabit Ethernet</i>	Gigabitni Ethernet protokol
GBIC	<i>engl. GigaBit Interface Converter</i>	primopredajnik sa gigabitnim sučeljem
GPON	<i>engl. Gigabit PON</i>	gigabitna pasivna optička mreža
IL	<i>engl. Insertion Loss</i>	gubitak umetanja
ISP	<i>engl. Internet Service Provider</i>	pružatelj Internet usluga
ITU	<i>engl. International Telecommunication Union</i>	internacionalna telekomunikacijska unija
LAN	<i>engl. Local Area Network</i>	lokalna mreža

LA	<i>engl. Limiting Amplifier</i>	limitirajuće pojačalo
LC	<i>engl. central office</i>	lokalna centrala
LED	<i>engl. Light-Emitting Diode</i>	svjetlosna dioda
LWP	<i>engl. Low Water Peak</i>	Optičko vlakno sa smanjenim "vodenim vrhom"
MDU	<i>engl. Multi Dwelling Unit</i>	objekt s više kućanstava
NGA	<i>engl. Next Generation Access network</i>	pristupne mreže nove generacije
NG-PON2	<i>engl. 40-gigabit PON</i>	40 gigabit pasivna optička mreža
NZDSF	<i>engl. Non-Zero Dispersion Shifted Fiber</i>	vlakno s pomaknutom nultom disperzijom
OADM	<i>engl. Optical Add and Drop Multiplexer</i>	optički dodaj-ispusti multiplekser
OEO	<i>engl. Optical-Electrical-Optical</i>	optičko-električno-optički pretvarač
OH ⁻	<i>engl. Hydroxide</i>	molekule vode u optičkom vlaknu
OLT	<i>engl. Optical Line Termination</i>	optičko linijsko zaključenje
ONT	<i>engl. Optical Network Termination</i>	optičko mrežno zaključenje
ONU	<i>engl. Optical Network Unit</i>	optička mrežna jedinica
P2MP	<i>engl. Point to MultiPoint</i>	topologija točka-više točaka
P2P	<i>engl. Point-to-Point</i>	topologija od točke do točke
PIN	<i>engl. P-intrinsic-N</i>	fotodioda s P, I, N regijama
PON	<i>engl. Passive Optical Network</i>	pasivna optička mreža
ROADM	<i>engl. Reconfigurable OADM</i>	podešavajući OADM
RoF	<i>engl. Radio over Fiber</i>	radio preko vlakna
SAN	<i>engl. Storage Area Networks</i>	mreža za pohranu podataka
SDH	<i>engl. Synchronous Digital Hierarchy</i>	sinkrona digitalna hijerarhija
SDU	<i>engl. Single Dwelling Unit</i>	objekt s jednim kućanstvom
SFF	<i>engl. Small Form Factor</i>	primopredajnik s malim faktorom oblika
SFP	<i>engl. Small Form Pluggable</i>	mali oblik pluggable primopredajnika
SONET	<i>engl. Synchronous Optical Networks</i>	sinkrona optička mreža
SSMF	<i>engl. Standard Single Mode Fiber</i>	standardno jednomodno optičko vlakno
TDM	<i>engl. Time Division Multiplexing</i>	vremensko multipleksiranje
TEC	<i>engl. ThermoElectric Cooler</i>	termoelektrični hladnjak
TFF	<i>engl. Thin-Film Filters</i>	filtri s tankim filmom
TIA	<i>engl. TransImpedance Amplifier</i>	transimpedantno pojačalo
VCSEL	<i>engl. Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i>	emitirajući laser s površinom vertikalnih šupljina
XG-PON	<i>engl. 10-gigabit PON</i>	10 gigabitna pasivna optička mreža
ZWP	<i>engl. Zero Water Peak</i>	vlakno s uklonjenim "vodenim vrhom"

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Raspored valnih duljina kod CWDM-a.....</i>	<i>6</i>
<i>Tablica 2. Optički pojasevi</i>	<i>7</i>
<i>Tablica 3. Karakteristike različitih izvora svjetla.....</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 4. Parametri DFB lasera</i>	<i>14</i>
<i>Tablica 5. Usporedba PIN i APD fotodioda.....</i>	<i>20</i>
<i>Tablica 6. Disperzijske karakteristike jednomodnih vlakana</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 7. MUX/DEMUX gubici.....</i>	<i>46</i>
<i>Tablica 8. Parametri CWDM 8-kanalnog modula.....</i>	<i>47</i>
<i>Tablica 9. Parametri 8-kanalnog zigzag MUX/DEMUX uređaja</i>	<i>49</i>
<i>Tablica 10. Usporedba propusnosti za različite usluge</i>	<i>62</i>
<i>Tablica 11. Udaljenosti i propusnosti za različite NGA modele.....</i>	<i>65</i>
<i>Tablica 12. Usporedba različitih GPON sustava.....</i>	<i>69</i>
<i>Tablica 13. Usporedba GPON i EPON standarda</i>	<i>70</i>

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Odstupanje CWDM valne duljine</i>	6
<i>Slika 2. Plan CWDM kanala</i>	8
<i>Slika 3. Crna kutija CWDM</i>	9
<i>Slika 4. Crna veza CWDM</i>	9
<i>Slika 5. Primjer CWDM sustava</i>	10
<i>Slika 6. CWDM predajnik</i>	11
<i>Slika 7. DFB laserski modul</i>	14
<i>Slika 8. CWDM DFB laserski niz s integriranim MMI sprežnikom</i>	16
<i>Slika 9. Spektar valnih duljina laserskog DFB niza</i>	16
<i>Slika 10. Shema CWDM prijammika</i>	17
<i>Slika 11. Brzina odziva u ovisnosti o valnoj duljini PIN fotodiode</i>	18
<i>Slika 12. CWDM primopredajnički moduli</i>	21
<i>Slika 13. Prednja strana CWDM primopredajnika i tiskana pločica</i>	21
<i>Slika 14. Najčešće korišteni CWDM konektori</i>	22
<i>Slika 15. CWDM GBIC primopredajnik</i>	23
<i>Slika 16. CWDM SFP primopredajnik</i>	24
<i>Slika 17. 10 Gb/s primopredajnik</i>	25
<i>Slika 18. Atenuacijska i disperzijska krivulja jednomodnog optičkog vlakna</i>	27
<i>Slika 19. Disperzija za različite vrste vlakana</i>	31
<i>Slika 20. Primjer tehnologije mikrokabliranja</i>	33
<i>Slika 21. Shematski prikaz „upisa“ Braggove rešetke u jezgru optičkog vlakna</i>	35
<i>Slika 22. OADM temeljen na FBG filtru</i>	35
<i>Slika 23. Shematski prikaz AWG demultipleksera</i>	36
<i>Slika 24. Rubni dugopojasni filter</i>	39
<i>Slika 25. Filter s propusnim pojasom</i>	40
<i>Slika 26. Prikaz 4-preskoči-0/1 filtra</i>	41
<i>Slika 27. Shematski dijagram sprežnika temeljenog na GRIN lećama</i>	42
<i>Slika 28. 1x2 CWDM MUX/DEMUX uređaj</i>	43
<i>Slika 29. CWDM 8-kanalni MUX modul</i>	44
<i>Slika 30. CWDM 8-kanalni DEMUX modul</i>	45
<i>Slika 31. 4-kanalni CWDM modul u ABS pakiranju</i>	46
<i>Slika 32. CWDM LGX i rack kućište</i>	47
<i>Slika 33. Zigzag arhitektura</i>	48
<i>Slika 34. CWDM zigzag MUX/DEMUX</i>	49
<i>Slika 35. OADM princip rada</i>	50
<i>Slika 36. Podjela svjetlovodnih mreža</i>	51

<i>Slika 37. Točka-točka topologija.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 38. CWDM P2P veza s jednim vlaknom</i>	<i>53</i>
<i>Slika 39. CWDM P2P veza s dva vlakna</i>	<i>54</i>
<i>Slika 40. Prstenasta topologija</i>	<i>55</i>
<i>Slika 41. Prstenasta arhitektura u CWDM metro pristupnoj mreži</i>	<i>56</i>
<i>Slika 42. Primjena CWDM-a kod podatkovnih centara</i>	<i>57</i>
<i>Slika 43. Dodavanje CWDM valnih duljina vezi s jednom valnom duljinom.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 44. Kombinacija DWDM i CWDM prijenosnog sustava</i>	<i>59</i>
<i>Slika 45. Grafički prikaz podjele svjetlovodne pristupne mreže</i>	<i>60</i>
<i>Slika 46. Usporedba FTTx modela.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 47. FTTH P2P mreža</i>	<i>66</i>
<i>Slika 48. FTTH AON P2PM mreža</i>	<i>67</i>
<i>Slika 49. FTTH PON P2PM mreža</i>	<i>68</i>
<i>Slika 50. TDM/TDMA multipleksiranje.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 51. CWDM-PON mreža</i>	<i>71</i>
<i>Slika 52. Kombinacija DWDM/CWDM sustava kod PtP WDM-a.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 53. Hibridni TDM/CWDM PON.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 54. Dizajn lokalne centrale koristeći jedno ili dva vlakna.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 55. Prikaz svjetlovodne distribucijske mreže CWDM/TDM-PON</i>	<i>76</i>
<i>Slika 56. ONU dizajn koristeći jedno ili dva vlakna</i>	<i>77</i>
<i>Slika 57. Nadogradnja CWDM-a na postojeću infrastrukturu</i>	<i>78</i>
<i>Slika 58. CWDM prijenosni sustav za različite segmente korisnika</i>	<i>78</i>
<i>Slika 59. Primjer hibridnog TWDM PON-a</i>	<i>79</i>
<i>Slika 60. CWDM prstenasta topologija za FTTH model.....</i>	<i>80</i>
<i>Slika 61. CWDM za bežične mreže.....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 62. Modularni ONU dizajn.....</i>	<i>83</i>
<i>Slika 63. CWDM u modelu s više pružatelja usluga</i>	<i>85</i>
<i>Slika 64. Dizajn ONU-a za primanje jedne ili više usluga</i>	<i>85</i>