

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 3213

**Analiza troškova primjene DWDM/CWDM
tehnologije u optičkoj mreži**

Tomislav Habljak

Zagreb, siječanj 2010.

ORIGINAL DIPLOMSKOG ZADATKA

Zahvala,

svojoj obitelji na konstantnoj potpori tokom školovanja,

svojoj djevojci Aniti na beskonačnom strpljenju,

svojim prijateljima na vjerovanju u mene.

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Multipleksiranje s valnom podjelom u optičkim mrežama	2
1.1 Multipleksiranje s grubom podjelom kanala (CWDM)	3
1.2 Multipleksiranje s gustom podjelom kanala (DWDM).....	7
2. Razine optičkih mreža.....	13
2.1 Gradske optičke mreže	14
2.2 Pristupne optičke mreže.....	17
2.2.1 Ethernet pasivne optičke mreže	19
2.3 Lokalne optičke mreže	24
2.3.1 <i>Multi-hop</i> mreža.....	25
2.3.2 <i>Single-hop</i> mreža	27
3. Komponente WDM mreža.....	30
3.1 WDM čvor.....	30
3.1.1 WDM predajnici	31
3.1.2 WDM prijamnici	33
3.1.3 Primopredajnici.....	36
3.1.4 Optički filtri	37
3.1.4.1 Filter s Braggovom rešetkom u vlaknu	37
3.1.4.2 Polja valovoda	39
3.1.4.3 Filtri s tankim filmom.....	40
3.2 Optička vlakna.....	45
3.2.1 Prigušenje vlakna	45
3.2.2 Kromatska disperzija	47
3.3 Optički rasprežnik.....	49
4. Troškovi primjene CWDM/DWDM tehnologije	51
4.1 Struktura gradske mreže	53
4.2 Struktura pristupne mreže	56
4.3 Usporedba troškova za različite strukture mreža	61
4.3.1 Troškovi gradske mreže	61
4.3.1.1 Trošak gradske mreže s WDM PON mrežom	62
4.3.1.2 Trošak gradske mreže s hibridnom WDM TDM PON mrežom.....	69
4.3.2 Troškovi pristupnih mreža	73
4.3.2.1 Troškovi WDM PON pristupne mreže	73
4.3.2.2 Troškovi hibridne WDM TDM PON pristupne mreže	78

4.3.3	Troškovi lokalnih mreža	84
4.3.3.1	Troškovi <i>multihop</i> lokalne mreže	84
4.3.3.2	Troškovi <i>singlehop</i> lokalne mreže	87
	Zaključak	90
	Literatura	92
	Popis slika i tablica	95
	Popis stranih izraza	97
	Popis skraćenica	98

Uvod

Razvojem optičkih komunikacijskih tehnologija dolazi do strahovitog razvoja telekomunikacijske mreže, jer optičko vlakno nudi značajne prednosti u odnosu na bakrene vodove.

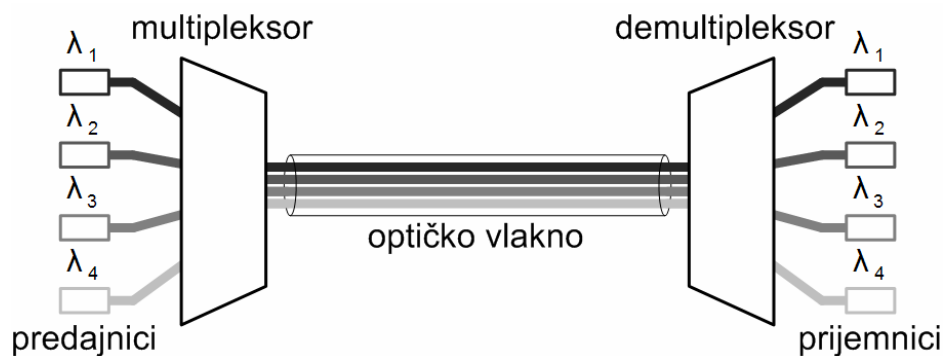
Podijelimo li cijelu optičku mrežu na nekoliko razina, vidjet ćemo da je u prekontinentalnim, transkontinentalnim, kontinentalnim i regionalnim optičkim mrežama optičko vlakno u potpunosti izbacilo iz upotrebe bakrene vodove, te su ti dijelovi mreže u potpunosti već izgrađeni na bazi optičkog prijenosa. Manji dijelovi optičkih mreža, kao što su gradske (engl. *metro*), pristupne i lokalne mreže, još nisu u potpunosti doživjele primjenu optičkog prijenosa informacija. Iako se sve više gradskih mreža prilagođava takvoj metodi komunikacije, kod pristupnih i lokalnih mreža ta prilagodba ide mnogo sporije za što je glavni razlog cijena, odnosno, isplativost takve investicije.

Također, da bi postigli maksimalnu efikasnost u prijenosu informacija položenim optičkim kabelima, signale koji se njima prenose potrebno je multipleksirati jednom od dostupnih tehnika. Najčešće korištena tehnika je multipleksiranje s valnom podjelom (engl. *Wavelength Division Multiplexing*, skraćeno WDM), odnosno, prijenos više signala na različitim valnim duljinama kroz jedno optičko vlakno. Multipleksiranje s valnom podjelom se može podijeliti na dvije osnovne podvrste, a to su multipleksiranje s grubom valnom podjelom (engl. *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, skraćeno CWDM) te multipleksiranje s gustom valnom podjelom (engl. *Dense Wavelength Division Multiplexing*, skraćeno DWDM).

Koju metodu valnog multipleksiranja ćemo koristiti u pojedinim dijelovima mreže? DWDM tehnologija u odnosu na CWDM tehnologiju nudi ogroman kapacitet prijenosa informacija, te je ona prvi i jedini izbor za mreže velikih udaljenosti. No kod manjih mreža, kao što su gradske, pristupne i lokalne, dolazi do izražaja manji trošak izgradnje optičke mreže bazirane na CWDM tehnologiji, te ćemo se u ovome radu baviti tehno-ekonomskom usporedbom tih dvaju tehnologija u izgradnji gradskih, pristupnih i lokalnih optičkih mreža.

1. Multipleksiranje s valnom podjelom u optičkim mrežama

Multipleksiranje s valnom podjelom je tehnologija koja predstavlja sadašnjost i budućnost u optičkim mrežama bilo koje vrste. WDM je tehnologija koja multipleksira više optičkih nosioca signala na jedno optičko vlakno koristeći različite valne duljine laserskih izvora svjetla za prijenos različitih informacija - optički nosioci signala se multipleksiraju na vlakno pomoću multipleksora i predajnika, a demultipleksiraju pomoću demultipleksora i prijmnika.



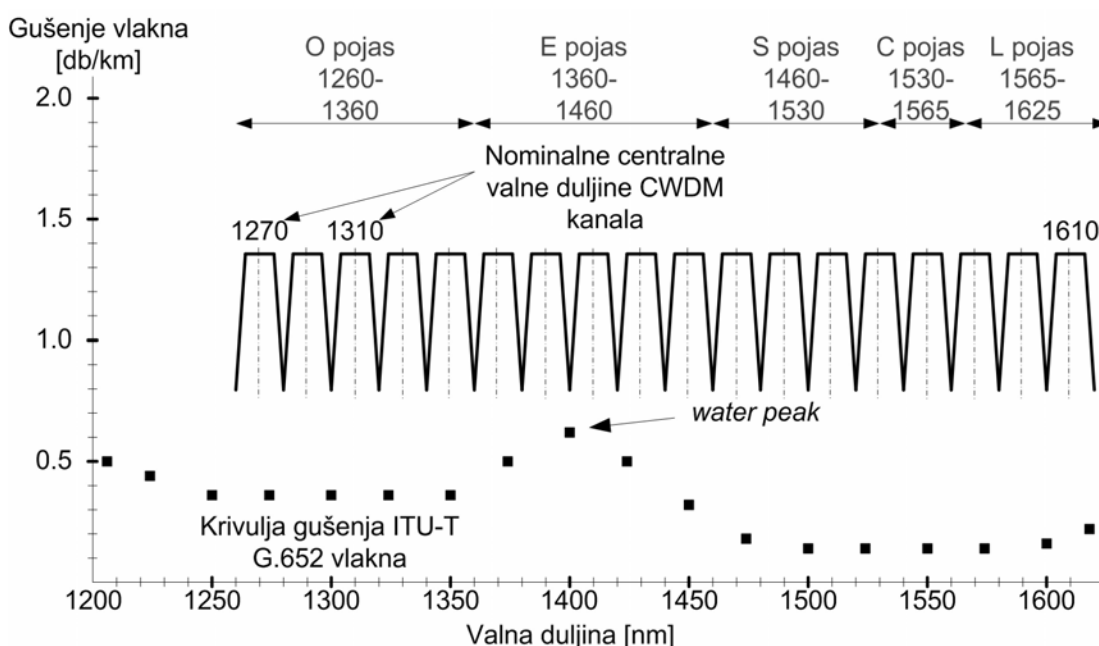
Slika 1.1 Princip multipleksiranja s valnom podjelom

WDM sustavi su popularni među telekomunikacijskim kompanijama jer omogućavaju proširenje postojećih kapaciteta bez polaganja dodatnih optičkih kabela te daju mogućnost dvosmjernog prijenosa informacija po jednom optičkom vlaknu. S WDM-om i optičkim pojačalima moguće je uskladiti postojeću mrežu s nekoliko generacija novih tehnologija. Kapacitet postojećeg linka je moguće jednostavno proširiti nadogradnjom multipleksora i demultipleksora na krajevima linka.

Kao što smo već i spomenuli, razlikujemo dvije osnovne vrste multipleksiranja s valnom podjelom, a to su valno multipleksiranje s grubom podjelom kanala ili CWDM, te valno multipleksiranje s gustom podjelom kanala ili DWDM. U nastavku ćemo ukratko opisati osnovne značajke tih dvaju tehnologija.

1.1 Multipleksiranje s grubom podjelom kanala (CWDM)

Kao što samo ime kaže, to je multipleksiranje u kojemu su multipleksirani kanali grubo, odnosno, kao što se u nekim prijevodima može naći, rijetko raspoređeni uzimajući u obzir njihove centralne valne duljine. Ovo ćemo najlakše pojasniti grafičkim prikazom kojeg možemo vidjeti na slici (**Slika 1.2**).



Slika 1.2 CWDM kanali u odnosu na optičke pojaseve

CWDM valne duljine su standardizirane u ITU-T G.694.2 preporuci i nalaze se unutar širokog područja u rasponu od 1270 do 1610 nm, što su takozvani II. i III. optički prozori ili O, E, S, C i L pojasevi. Maksimalan broj kanala koje ta preporuka dozvoljava je 18, i s 20 nm razmakom između pojedinih kanala – broj kanala kod DWDM-a dostiže brojku i do 160, s razmakom između kanala od samo 0.2 nm, te nam ova usporedba najbolje pokazuje zašto se ovaj tip multipleksiranja zove grubo, odnosno rijetko valno multipleksiranje.

Na slici (**Slika 1.2**) također vidimo i krivulju gušenja standardnog jednomodnog vlakna, koje ima svoj lokalni maksimum na valnoj duljini od otprilike 1400 nm – taj maksimum se zove vodeni vrh (eng. *water peak*) i

nastaje zbog molekula vode unutar vlakna koje povećavaju gušenje signala. S izumom naprednijih vlakana kao što su G.652.C, tj., vlakno sa smanjenim vodenim vrhom (eng. *low water peak*, skraćeno LWP) i G.652.D, tj., vlakno s uklonjenim vodenim vrhom (eng. *zero water peak*, skraćeno ZWP), postalo je moguće spojiti II. i III. optički prozor, odnosno koristiti taj vrlo široki pojas valnih duljina za prijenos informacija uz minimalno gušenje signala.

Veliki razmak između susjednih kanala omogućuje korištenje jeftinijih, manje preciznih lasera, koji svojim tehničkim karakteristikama zadovoljavaju potrebne CWDM standarde a istovremeno dovode do značajnih ušteda pri izgradnji optičkih mreža s valnim multipleksiranjem. Budući da su takvi laseri projektirani s većim tolerancijama pomaka valnih duljina te operativnim temperaturnim rasponom od 0 do 70°C, ITU-T preporuka G.694.2 propisuje raspored 18 kanala s centralnim valnim duljinama navedenim u tablici (**Tablica 1.1**).

Tablica 1.1 Raspored CWDM kanala

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

Tvornička tolerancija CWDM lasera iznosi ± 3 nm a temperaturni koeficijent iznosi $0.1^\circ\text{C}/\text{nm}$ – taj temperaturni koeficijent nam govori koliki je pomak valne duljine u odnosu na promjenu temperature. Budući da su laserske valne duljine specificirane za temperaturu od 25°C , stvarna valna duljina pri 0°C je pomaknuta za 2.5 nm u lijevo, ka nižim valnim duljinama. Kada tom pomaku pribrojimo tvornički pomak od ± 3 nm, dobiti ćemo pomak od 5.5 nm prema nižim valnim duljinama. Analogno, s porastom temperature, dobiti ćemo pomak od 7.5 nm prema većim valnim duljinama, što na kraju rezultira

s asimetričnim prozorom pomaka valnih duljina. Kako bi se taj prozor napravio simetričnim, CWDM filtri se izrađuju s pomakom od 1 nm koji rezultira simetričnim prozorom od ± 6.5 nm, te su zato i sve nominalne centralne valne duljine u G.694.2 preporuci uvećane za 1 nm, što je vidljivo u tablici (**Tablica 1.1**).

CWDM predajnici koriste ili laserske diode ili svjetleće diode (eng. *Light Emitting Diode*, skraćeno LED) kao izvore svjetla – LED izvori se obično koriste za primjene na kratkim relacijama do nekoliko stotina metara dok se laseri koriste kod srednjih i velikih udaljenosti. No, čak i kod različitih tipova laserskih dioda postoje značajne razlike u radnim svojstvima i potreban je oprez prilikom njihova odabira u ovisnosti o mjestu primjene.

Najčešće korišteni laseri u CWDM predajnicima su FP laser (eng. *Fabry Perot laser*), VCSEL laser (eng. *Vertical Cavity Surface Emitting laser*) i laser s distribuiranom povratnom vezom (eng. *Distributed FeedBack laser*, skraćeno DFB), dok se visoko učinkoviti, FGL (eng. *Fiber (Bragg) Grating Laser*) i EA-EML (eng. *Electro-Absorption-based Externally Modulated Laser*) laseri koriste jako rijetko. U današnjim se CWDM sustavima najviše koriste nehlađeni DFB laseri.

DFB laseri su prave radilice u WDM sustavima, bilo da su hlađeni ili nehlađeni. Koriste se za sve primjene, od *metro* do *long-haul* mreža. Za slučaj kada su potrebne visoke performanse sustava, koristi se vanjska modulacija zasebnim modulatorom, što je tehnika korištena u mrežama velikih udaljenosti s velikim brojem dionica (eng. *long-haul*), dok se u *metro* i CWDM sustavima koristi direktna modulacija pogonskom strujom, što je puno jednostavniji i jeftiniji dizajn. DFB laseri se obično koriste za valne duljine u C pojasu (1530 – 1565 nm), no mogu se proširiti i na sve valne duljine u rasponu od 1310 nm do 1610 nm, te su zbog toga glavni izbor za većinu CWDM sustava.

Budući da pružatelji usluga u gradskom području konstantno traže troškovno učinkovita rješenja kako bi zadovoljili svoje transportne potrebe, CWDM postaje sve više prihvaćen kao važna transportna arhitektura. Za razliku od

DWDM-a, kao što smo rekli, sustavi bazirani na CWDM tehnologiji koriste nehlađene DFB lasere te širokopojasne (eng. *wideband*) optičke filtre. Nehlađeni DFB laseri daju CWDM sustavima velike prednosti u pogledu manje potrošnje energije, manjih dimenzija komponenti, te na kraju, manju cijenu istih [1].

Optički filtri za CWDM sustave su uglavnom filtri s tankim filmom (eng. *Thin-Film Filters*, skraćeno TFF) koji pružaju pouzdanost pasivnog uređaja, te najbolji omjer cijene po izdvojenom, odnosno filtriranom kanalu. Budući da se TFF izrađuju od materijala s različitim indeksom loma koji se slažu po alternirajućem rasporedu u obliku dielektričnih slojeva, očito je da broj slojeva određuje maksimalni broj kanala koji se može demultipleksirati, te je jasna njihova upotreba u CWDM sustavima gdje broj kanala ne prelazi više od 16 pa je stoga i njihova cijena prihvatljiva.

Zbog svojeg relativno malog kapaciteta, odnosno upotrebe CWDM tehnologije na mjestima gdje se ne traže veliki kapaciteti i brzine prijenosa, CWDM omogućava dvosmjerni prijenos informacija po jednom vlaknu, što je dovelo do integracije predajnika i prijarnika u jedan modul nazvan primopredajnik (eng. *transceiver*). Primopredajnici su u današnje vrijeme također standardizirani, te su jedan od sastavnih blokova CWDM sustava.

Jedina mana CWDM sustava je izostanak optičkog pojačanja signala. DWDM tehnologija ima svoje dobro znano pojačalo s erbijem dopiranom niti (eng. *Erbium Doped Fiber Amplifier*, skraćeno EDFA), dok za CWDM tehnologiju nije predviđeno nikakvo pojačanje. Postoje neki pokušaji i teorijska razmatranja pojačanja CWDM signala pomoću poluvodičkog pojačala (eng. *Semiconductor Optical Amplifier*, skraćeno SOA), no uzimajući u obzir da je CWDM mreža bazirana na niskim troškovima izgradnje (eng. *low-cost*) te da su udaljenosti u njoj jako male u odnosu na DWDM mreže, nedostatak pojačanja signala i ne moramo smatrati manom.

Primjenom CWDM tehnologije u pojedinim mrežama ćemo se baviti u sljedećim poglavljima.

1.2 Multipleksiranje s gustom podjelom kanala (DWDM)

Kada govorimo o gustom valnom multipleksiranju, prva i najočitija razlika u odnosu na CWDM leži u broju kanala. Dok smo kod CWDM tehnologije imali maksimum od 16 kanala po jednom vlaknu, s 18 mogućih nominalnih centralnih valnih duljina, kod DWDM-a je taj broj puno veći i ovisi o razmaku između multipleksiranih kanala. CWDM tehnologija ima jedan standardizirani razmak koji iznosi 20 nm, dok DWDM može koristiti nekoliko različitih razmaka između kanala (eng. *channel spacing*), definiranih u ITU-T preporuci G.964.1.

Tablica 1.2 Razmaci između kanala u DWDM tehnologiji

Razmak između kanala [GHz]	Razmak između kanala na 1550 nm [nm]
12.5	0.1
25	0.2
50	0.4
100	0.8
200	1.6

U toj preporuci, kao i u drugim dokumentima, razmak između kanala se vrlo često definira kao frekvencija, a ne kao valna duljina. Razlog tome leži u činjenici da je frekvencija signala neovisna o prijenosnom mediju dok se valne duljine mijenjaju unutar prijenosnog medija. Zadani razmak između kanala se mijenja zajedno s valnom duljinom, što znači da će razmak između kanala od 100 GHz imati drugačije vrijednosti u nanometrima na valnim duljinama od 1530 nm i 1550 nm.

Matematičke relacije koje pokazuju pretvorbu iz frekvencije u valnu duljinu te iz valne duljine u frekvenciju su:

$$\text{razmak}[nm] = \frac{(\text{valna_duljina}[nm])^2}{\text{brzina_svjetlosti}} * \text{razmak}[GHz]$$

$$\text{razmak}[GHz] = \frac{\text{brzina_svjetlosti}}{(\text{valna_duljina}[nm])^2} * \text{razmak}[nm]$$

Pokažimo ukratko i par primjera:

- razmak od 100 GHz na valnoj duljini od 1530 nm jednak je

$$\frac{1530[nm] * 1530[nm]}{300000000[m/s]} * 100[GHz] = 0,78[nm]$$

- razmak od 100 GHz na valnoj duljini od 1550 nm jednak je

$$\frac{1550[nm] * 1550[nm]}{300000000[m/s]} * 100[GHz] = 0,80[nm].$$

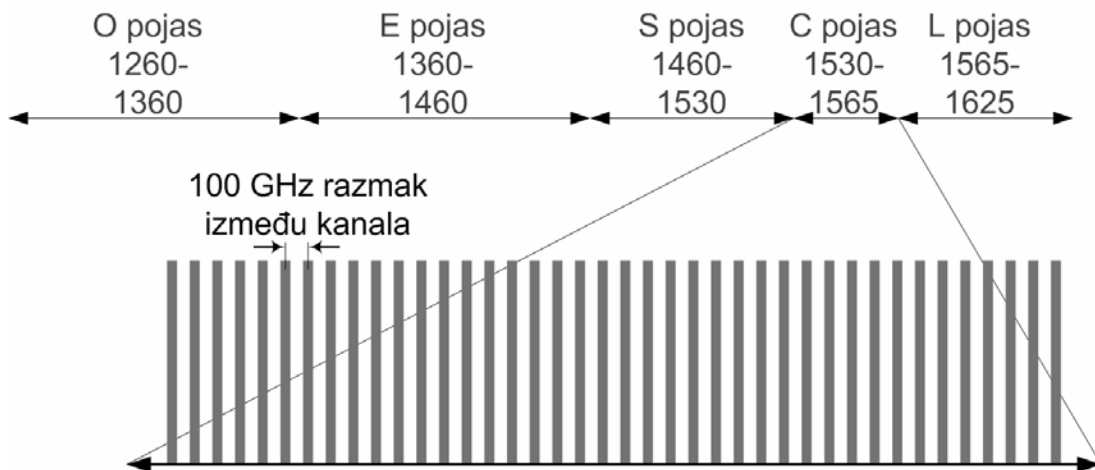
Dakle, kod DWDM-a, broj kanala ne možemo unaprijed odrediti dok ne definiramo razmak između kanala. Kao što smo već rekli, frekvencije i valne duljine u DWDM sustavima su određene u ITU-T G.694.1 preporuci, te neke od njih možemo vidjeti na tablici (**Tablica 1.3**). Zbog prevelikog broja potencijalnih kanala, prikazan je samo dio originalne tablice. Također je važno napomenuti da se DWDM valne duljine nalaze unutar C i L valnog pojasa, a zašto baš tamo ćemo objasniti malo kasnije.

Tablica 1.3 Djelomični prikaz rasporeda DWDM kanala

Nominalne centralne frekvencije [THz] za razmake od:				Približne nominalne centralne valne duljine [nm]
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	≥100 GHz	
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
195,9375	/	/	/	1530,04
195,9250	195,925	/	/	1530,14
195,9125	/	/	/	1530,24
195,9000	195,900	195,90	195,9	1530,33
195,8875	/	/	/	1530,43
195,8750	195,875	/	/	1530,53
195,8625	/	/	/	1530,63
195,8500	195,850	195,85	/	1530,72
195,8375	/	/	/	1530,82
195,8250	195,825	/	/	1530,92
195,8125	/	/	/	1531,02
195,8000	195,800	195,80	195,8	1531,12
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
184,6000	184,600	184,60	184,6	1624,01
184,5875	/	/	/	1624,12
184,5750	184,575	/	/	1624,23
184,5625	/	/	/	1624,34
184,5500	184,550	184,55	/	1624,45
184,5375	/	/	/	1624,56
184,5250	184,525	/	/	1624,67
184,5125	/	/	/	1624,78
184,5000	184,500	184,50	184,5	1624,89
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*

Već smo prije spomenuli kako se u mrežama dugog dometa, gdje se zahtijeva ogroman kapacitet, koristi DWDM tehnologija – kada uzmemo u obzir da broj kanala u DWDM sustavima može biti i veći od 160 po jednom vlaknu, tada nam je jasno zašto je to tako. No DWDM tehnologija se može primijeniti i u mrežama manjeg dometa ukoliko za to postoji potreba i ukoliko je takva investicija financijski isplativa.

Grafički prikaz smještaja 40 DWDM valnih duljina, s 100 GHz razmakom između kanala, prikazan je na slici (**Slika 1.3**). Vidimo da se 40 valnih duljina nalazi samo unutar C pojasa, dok su za smještaj CWDM valnih duljina bili potrebni svi prikazani pojasevi [3].



Slika 1.3 Grafički prikaz smještaja DWDM valnih duljina za 40-kanalni sustav

Iako je C pojas područje minimalnog gušenja, to nije razlog korištenja tog pojasa za DWDM kanale, premda je to naravno ogromna prednost. Razlog korištenja tog relativno uskog valnog pojasa leži u činjenici da EDFA pojačalo, koje se koristi u DWDM sustavima, može pojačati bilo koji signal čija se valna duljina nalazi unutar tog raspona valnih duljina. EDFA pojačalo je zapravo vlakno koje je dopirano s rijetkim zemljanim metalom erbijem (eng. *erbium*) koji ima to svojstvo da pojačava svjetlost na valnim duljinama u gore spomenutom pojasu. Uz optičke izolatore, koji onemogućavaju da svjetlost putuje u neželjenom smjeru, jedino što mu je još potrebno za rad je

optička pumpa, koja u to vlakno šalje svjetlost na valnim duljinama od 980 ili 1450 nm koja pobuđuju ione erbija te koji potom vrše pojačanje originalnog signala. EDFA pojačala su visoko učinkovite komponente i jeftinije od primjerice optičkih obnavljača, ali su uglavnom ograničena dometom od otprilike 10 dionica s ukupnom udaljenosti od oko 800 km, nakon koje se mora upotrijebiti optički obnavljač kako bi se signal ponovo oblikovao (eng. *reshape*) i sinkronizirao (eng. *retime*), odnosno kako bi se signal očistio od akumuliranog šuma nastalog različitim oblicima disperzije.

U tablici (**Tablica 1.3**) također vidimo i neke valne duljine koje se ne nalaze unutar operativnog pojasa EDFA pojača, a to su one iznad 1565 nm – za takve slučajeve razvijeno je L-pojasno pojačalo s erbijem dopiranom niti (eng. *L band Erbium Doped Fiber Amplifier*, skraćeno EDFA-L band) koje dakle pojačava signale unutar L pojasa, a u čije detalje nećemo sada posebno ulaziti.

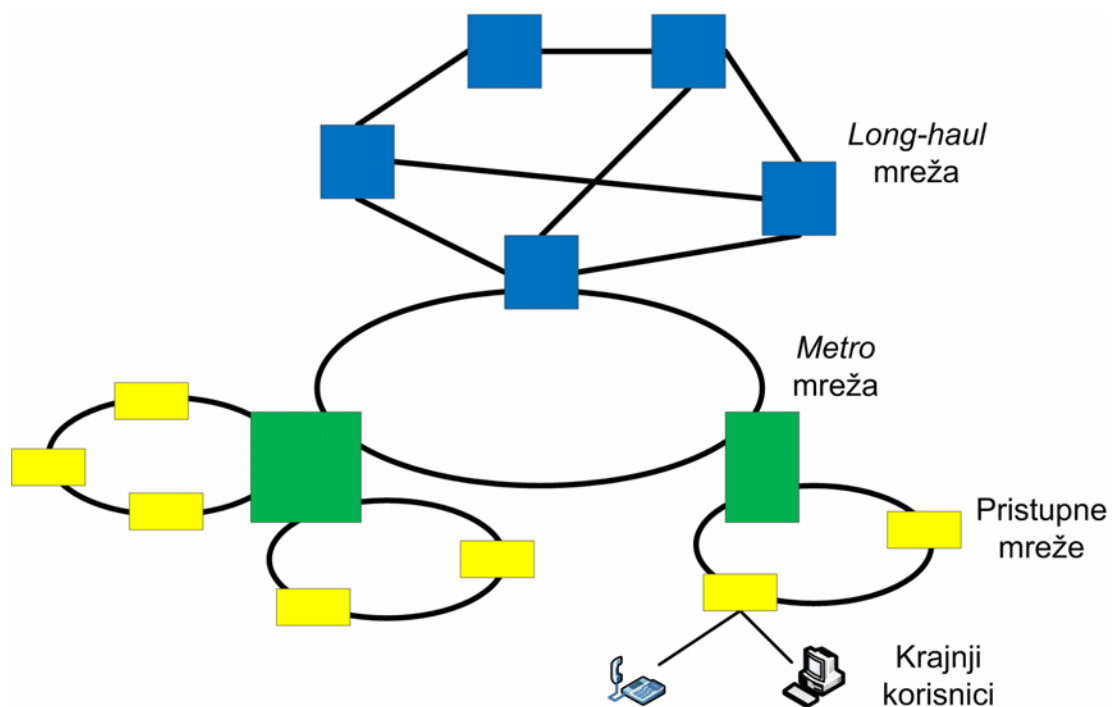
Uzimajući u obzir sve gore navedeno, očito je da zbog jako malih razmaka između kanala laseri za DWDM sustave moraju imati jako male tvorničke tolerancije valnih duljina, te konstantno hlađenje i nadziranje temperature njihova rada kako ne bi došlo do interferencije između susjednih kanala uslijed pomaka valnih duljina. Takvi zahtjevi dovode do većih dimenzija samih lasera, te do većih troškova izrade i nadziranja rada DWDM lasera. Također, zbog potrebe za hlađenjem povećava se i potrošnja energije, odnosno, potrebna je aktivna oprema kako bi laser ispravno radio. Najčešće korišteni laseri u DWDM sustavima su hlađeni DFB laseri koji podržavaju samo jedan longitudinalni mod – to je nužnost u DWDM sustavima. Također je nužno izbjeći frekvencijsko cvrkutanje lasera (eng. *chirp*), koje za posljedicu ima pomak valne duljine signala na niže valne duljine pri prednjem kraju signala, odnosno pomak na više valne duljine pri stražnjem dijelu signala. Cvrkutanje se izbjegava korištenjem vanjske modulacije signala, za razliku od CWDM sustava gdje se zbog nižih cijena i tolerancije spram takvih pomaka valnih duljina koristi direktna modulacija. Rezultat vanjske modulacije je vrlo malo ili nikakvo frekvencijsko cvrkutanje lasera, veliki

domet signala, ali i veća cijena takvih sklopova budući da sadrže veći broj komponenti i zahtijevaju upravljanje.

Detaljnije o svim komponentama ćemo pisati u sljedećim poglavljima, u ovom poglavlju je namjera bila ukazati na bitne razlike tih dvaju tehnologija valnog multipleksiranja. DWDM pruža ogroman kapacitet, s brzinama prijenosa do 40 Gbit/s po jednom kanalu, no s druge strane, cijene pojedinih DWDM komponenti su 2 do 5 puta skuplje nego njihov CWDM ekvivalent. U mrežama dugog dometa, DWDM je jedina moguća opcija i njegova relativno visoka cijena se vrlo brzo isplati kroz velike količine prometa koje omogućava, no pitanje je da li se isplati graditi gradsku ili pristupnu optičku DWDM mrežu. CWDM sa svojim relativno niskim cijenama komponenti i niskim troškovima održavanja se čini kao idealno rješenje za manje optičke mreže, pogotovo za nove telekomunikacijske operatore, no nije uvijek sigurno da li će njegovih maksimalnih 16 kanala biti dovoljno kako bi zadovoljio potrebe za kapacitetom takvih mreža. U sljedećem poglavlju ćemo pokušati definirati razlike između tih mreža koje nas zanimaju, odnosno, razlike i karakteristike *metro*, pristupnih i lokalnih optičkih mreža.

2. Razine optičkih mreža

Kako bi lakše shvatili odnose između pojedinih razina optičke mreže, pomoći će nam slika (**Slika 2.1**), a u nastavku ovoga poglavlja ćemo opisati neke osnovne razlike između gradskih (eng. *metro*), pristupnih (eng. *access*) i lokalnih mreža, koje se ne nalaze na ovoj slici budući da se one izgrađuju unutar rezidencijalnih, sveučilišnih i poslovnih prostora koje u ovom slučaju možemo shvatiti kao krajnje korisnike.



Slika 2.1 Grafički pregled razina optičke mreže

Dio optičke mreže koji nećemo obrađivati, a nalazi se na slici (**Slika 2.1**), su *long-haul* mreže. Takve mreže spajaju više dionica na velike udaljenosti, primjerice od nekoliko stotina do nekoliko tisuća kilometara te se koriste ili za nacionalnu ili globalnu pokrivenost. Takve mreže su nekad bile većinom izvedene u obliku prstena, dok se danas zbog male učinkovitosti u iskorištenju skupog kapaciteta takve mreže koriste isprepletene (eng. *mesh*) topologije. Isprepletene mreže koje se sastoje od proizvoljnog međuspojnog uzorka danas predstavljaju osnovnu topologiju u *long-haul* mrežama. Budući

da smo već spomenuli kako je u njima DWDM jedino valno multipleksiranje koji dolazi u obzir, primjena CWDM-a se uopće ne treba razmatrati.

2.1 Gradske optičke mreže

Gradska optička mreža predstavlja svojevrsni most između *long-haul* i pristupne optičke mreže. Ona se razlikuje od pristupne mreže uglavnom po veličini, odnosno po ukupnoj duljini prijenosa koja u gradskim mrežama iznosi od 100 do 300 kilometara. Većina danas izgrađenih gradskih mreža ima prstenastu topologiju kao posljedica migracije s prstenova sinkrone digitalne hijerarhije (eng. *Synchronous Digital Hierarchy*, skraćeno SDH). Zašto je odabrana prstenasta topologija je i danas tema rasprava među akademskim krugovima. Iako zagovaratelji isprepletene topologije ističu kapacitet kao veliku prednost isprepletene prstenova (eng. *mesh rings*), ostaje činjenica da su prstenaste topologije otpornije i jeftinije alternative.

Gradske mreže se mogu opisati kao višečvorišne mreže u kojima neki čvorovi imaju sučelje prema pristupnim čvorovima *long-haul* mreže dok neki čvorovi imaju sučelje prema prstenovima pristupnih mreža. Dakle, *metro* mreže služe kao posredni sloj za obje maloprije spomenute mreže. Gradske jezgrene mreže imaju također i pomoćne (eng. *subsidiary*) mreže znane i kao sakupljačke mreže (eng. *collector networks*) koji skupljaju promet iz pristupnih mreža i dostavljaju ih regionalnih prstenovima. Veličina prstena je uglavnom manja od 200 kilometara u opsegu, a kapacitet prijenosa je do 40 valnih duljina. Budući da takve mreže uglavnom nasljeđuju svoju arhitekturu od SDH prstenova one se uglavnom zasnivaju na dva jednosmjerna prstena (naravno, s vlaknom kao medijem) od kojih svaki prenosi promet u suprotnom smjeru.

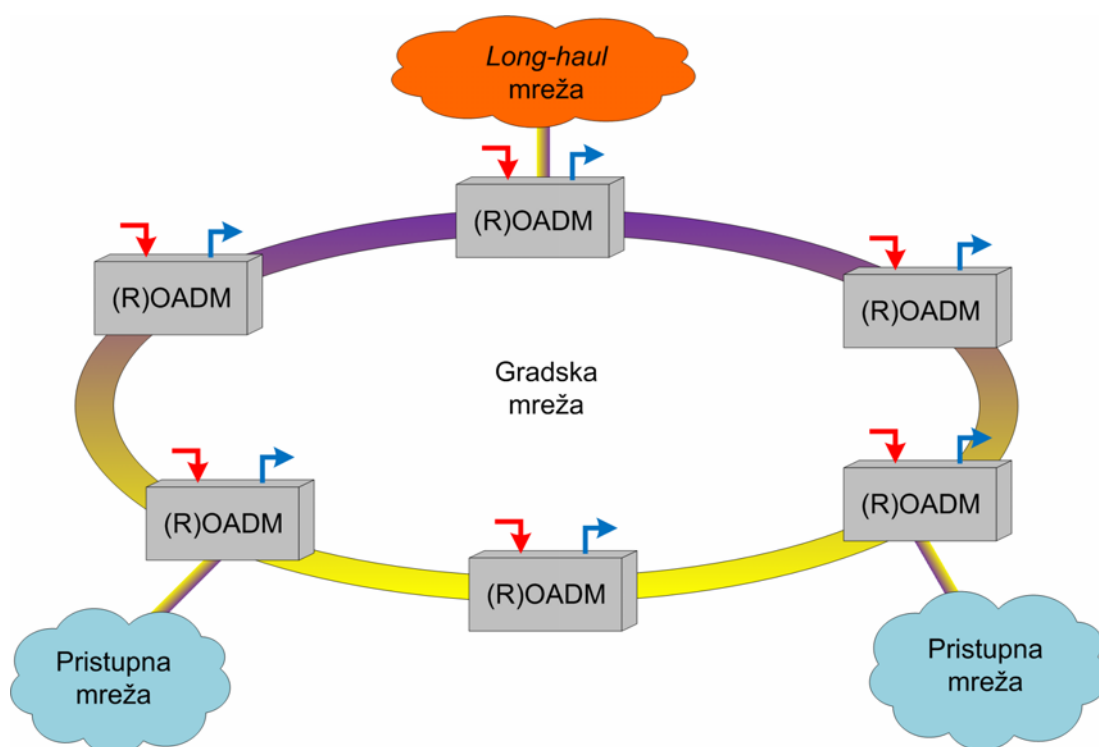
Velika važnost ovakvih mreža se nalazi u činjenici da se većina Internet i glasovnog prometa nalazi u ovom segmentu telekomunikacijske mreže. Kao što smo spomenuli, ove mreže se zasnivaju na prstenastim topologijama koje su razvijene iz tradicionalnih SDH prstenova. U takvim tradicionalnim

prstenovima postojao je problem u neoptimalnom iskorištavanju vlakna zbog jedne valne duljine. Stavljajući SDH multipleksor s mogućnošću dodavanja i ispuštanja valnih duljina (eng. *add and drop multiplexer*, skraćeno ADM) na svaki čvor, mreža je funkcionirala izrazito dobro, ali se signal morao ispuštati na svakom čvoru i ADM je morao prebacivati individualne tokove podataka na brzini od jedne trećine STM-1 modula (eng. *Synchronous Transport Module level 1*), koja iznosi 51.84 Mbit/s.

Prometni zahtjevi u prstenu su se drastično povećali kako se povećavao i broj pristupnih prstenova spojenih na gradski prsten. WDM *metro* prstenovi rješavaju taj slučaj upotrebom optičkih ADM-ova koji mogu dodati i ispustiti ili propustiti određenu valnu duljinu odnosno promet na svakom čvoru gdje su postavljeni. Takvi ADM-ovi mogu biti proizvedeni i na način da djeluju kao valni usmjerivači, odnosno da usmjeravaju valne duljine s jednog vlakna na drugo u optičkoj domeni, dakle bez pretvorbe u električnu domenu. Takva tehnika, iako troškovno učinkovita, ima nekih nedostataka po pitanju prijenosne udaljenosti. Uobičajeni broj valnih duljina koje se mogu ostvariti u gradskim prstenovima je 40, a prijenosne udaljenosti su dovoljne kako bi pokrile duljinu, odnosno širinu tipičnog gradskog područja. Današnji klasični zahtjevi za takvim mrežama podrazumijevaju opseg mreže u veličini od 100 do 300 kilometara, s 6 do 14 čvorova u svakom takvom prstenu.

Glavno označje gradske mreže su optički ADM-ovi u prstenu (eng. *optical ADM*, skraćeno OADM). OADM arhitektura se može opisati kao optička multipleksna sekcija koja sadrži prospojne elemente kao i opremu za lokalni pristup. Kompozitni WDM signal se kompletno demultipleksira i pušta kroz prospojnu matricu. Prospojna matrica ima nekoliko hijerarhijskih razina ili tako jednostavnih da samo dodaju i ispuštaju valne duljine ili tako složenih da mogu prospajati kanale i provoditi neku vrstu valne konverzije. Današnje gradske mreže uglavnom zahtijevaju čistu dodaj/ispusti funkcionalnost tako da ovisno o prometu u čvoru možemo ispuštati i dodavati individualne valne duljine.

Kako smo spomenuli, većina današnjih gradskih mreža se zasniva na OADM komponentama, koje su po svom karakteru fiksne. No, podesivi optički dodaj i ispusti multipleksor (eng. *reconfigurable optical add and drop multiplexer*, skraćeno ROADM) je puno moćnija komponenta iz razloga što se mreža bazirana na podesivom OADM-u može lagano prilagoditi promjenjivim prometnim zahtjevima, te se ta komponenta počinje sve više koristiti u gradskim mrežama [13].



Slika 2.2 Gradska mreža bazirana na (R)OADM komponentama

Prstenasta topologija, kao i svaka druga, ima svoje prednosti koje ju čine idealnom opcijom u gradskim mrežama. Isprepletana arhitektura nam se možda čini boljom solucijom za takve mreže jer garantira maksimalni promet između dva proizvoljna čvora u mreži. Naspram isprepletene topologije prstenasta nam se može činiti inferiornijom jer ne pruža takav stupanj povezanosti. Današnje analize pokazuju da ogromni kapacitet kojeg isprepletene mreže nude nije potreban [17]. U jednoj od njih je pokazano da prstenaste mreže mogu djelovati jednako učinkovito kao i isprepletene a uz značajnu uštedu u troškovima. Naravno, ako je opterećenje mreže nisko.

Štoviše, međusobno spojeni prstenovi su se pokazali kao originalno rješenje u izradi kvazi-isprepletenih arhitektura ublažujući mučne tablice usmjeravanja i probleme zaštite. Zaštita i usmjeravanje u isprepletenim mrežama je dosta zamršen zadatak zbog većeg stupnja povezanosti u mreži.

2.2 Pristupne optičke mreže

Pristupna mreža može imati prstenastu topologiju, topologiju sabirnice ili hijerarhijsku topologiju. Takve mreže su obično duljine od 40 do 75 kilometara, odnosno, ako su rađene u prstenastom obliku, opseg im je obično manji od 75 kilometara. Pristupne mreže su rađene na način kako bi dosegnule krajnjeg korisnika, i trenutno su najbrže rastuće mreže u gradskim područjima. Glavne zadaće pristupnih mreža su usmjeravanje, prikupljanje i prijenos prometa, iako se usmjeravanje može smatrati nižim prioritetom od prikupljanja jer su pristupne mreže spojene na gradske mreže koje obavljaju glavni dio prijenosa podataka.

Tipična pristupna mreža se sastoji od nekoliko WDM kanala, obično od 8 do 16 kanala, i ne brine previše oko izobličenja optičkog signala iz dva razloga. Prvi je taj da su udaljenosti manje od otprilike 75 kilometara što ima za posljedicu minimalan utjecaj gušenja i disperzije na signal, a drugi je što su brzine prijenosa relativno male, s maksimumom od 10 Gbit/s po kanalu.

Nacrt prometa u pristupnim mrežama je vrlo dobro definiran. Iako postoji određen postotak prometa koji nastaje i završava unutar pristupnog prstena ili sabirnice, odnosno, pristupnog dijela mreže, velika većina prometa je namijenjena odredištu u gradskoj ili *long-haul* mreži. Promet unutar mreže je ono što određuje pristupnu topologiju. Uglavnom zbog takve prometne matrice najčešće se koristi topologija centralnog čvora, gdje pojedini čvorovi imaju logičku vezu s roditeljskim čvorom, koji u konačnici imaju vezu s gradskom mrežom. Optički gledajući, u centralnom čvoru svjetlosni signali se mogu demultipleksirati i prebaciti u električni oblik, ili se signal može pretvoriti u valnu duljinu gradske mreže. Arhitektura čvorova može sadržavati

konvencionalne OADM-ove s kompletnom multipleksnom sekcijom ili ekonomičnije rješenje s pasivnim uređajima poput raspreznika i filtera.

Centralni čvor ima potpuno drugačiju arhitekturu nego pojedini pristupni čvorovi. To je zato što nije potrebno demultipleksirati cijeli signal na svakom pojedinom čvoru, dok s druge strane WDM signal mora proći kroz kompletni postupak demultipleksiranja na centralnom čvoru. Zato taj čvor sadrži kompletnu OADM strukturu, a pojedinačni čvorovi, zbog male potrebe za dodavanjem i izuzimanjem valnih duljina moraju samo osigurati niske gubitke za kanale koji prolaze kroz njih i imati strukturu koja omogućava niske troškove. Jedna takva struktura pristupnih čvorova bazira se na upotrebi filtra s tankim filmom (eng. *Thin Film Filters*, skraćeno TFF). TFF ima tri otvora (eng. *port*) – ulazni otvor, izlazni otvor, te otvor za odbacivanje. Cjelokupni signal dolazi na ulazni otvor i, ovisno o konfiguraciji filtra, neke valne duljine (skup valnih duljina ili samo jedna valna duljina) se ispuštaju kroz otvor za odbacivanje. Preostali signal, odnosno preostale valne duljine izlaze na izlazni otvor filtra. Tipični gubitak pri prolazu signala za takve filtre iznosi oko 2 dB, što je zanemariv gubitak u odnosu na OADM komponente u gradskim mrežama.

U pristupnim mrežama prstenasta topologija nije jedina dominantna topologija – topologija sabirnice i hijerarhijska topologija su sasvim uobičajene. Ako se koriste takve topologije, mrežni elementi ili čvorovi su obično pasivni elementi, kao što su npr. razdjelnici (eng. *splitters*). Klasična pristupna mreža je definirana s mnogo čvorova, otprilike 4 do 18, a svaki čvor ima male prometne zahtjeve za dodavanjem i izuzimanjem prometa. Također, zbog malih zahtjeva za kapacitetom takvih mreža, ponovno korištenje neke valne duljine nije nužnost, već je samo učinkovit način povećanja kapaciteta valno limitirane mreže na način da se ponovljena valna duljina smije koristiti na takvom valnom putu da niti jedan drugi valni put s istom valnom duljinom ne smije dijeliti isto vlakno.

Kada se pristupne mreže rade u sabirničkoj ili hijerarhijskoj (eng. *tree*) topologiji s pasivnim elementima, tada se za njih obično kaže da su to

pasivne optičke mreže (eng. *passive optical network*, skraćeno PON). U takvim mrežama rasprežnik dijeli snagu optičkog signala iz vlakna i svaki pristupni čvor dobiva dio te snage – sustav zapravo stvara višeodredišnu grupu s izvorištem u centralnom čvoru (eng. *central office*, skraćeno CO) i odredištem kod krajnjih korisnika. Dijeljenje snage se može i matematički jasno objasniti - ako rasprežnik dijeli ulaznu snagu na N čvorova, i ako je P ulazna snaga, tada je snaga koja se prosljeđuje do svakog krajnjeg korisnika jednaka:

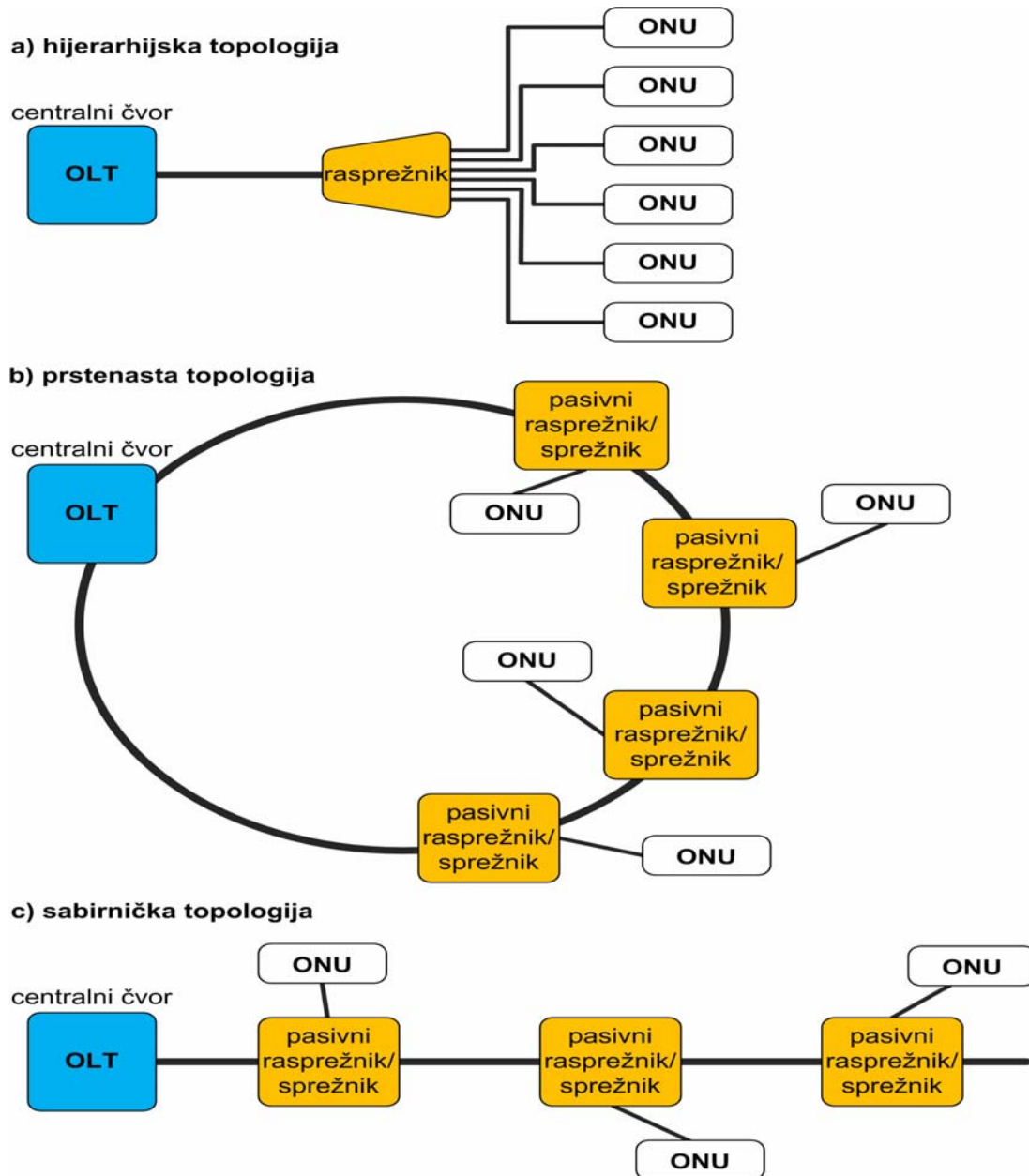
$$\text{Izlazna snaga} = P(\text{dB}) - 10\log N.$$

2.2.1 Ethernet pasivne optičke mreže

Budući da su zahtjevi za glasovnim, video i audio prometom sve veći, a postojeća bakrena infrastruktura najviše bazirana na xDSL (eng. *x Digital Subscriber Line*) tehnologiji pruža brzinu usluge do nekog prosječnog maksimuma od 10 Mbit/s, očito je da je moralo doći do nekih promjena u pristupnoj infrastrukturi. Također, novije tehnologije kao što su video na zahtjev (eng. *Video On Demand*, skraćeno VOD) i televizija visoke rezolucije (eng. *High Definition TeleVision*, skraćeno HDTV) dodatno guše već ionako maksimalno iskorišten kapacitet bakrene parice te se kao idealno rješenje za povećanje kapaciteta krajnjeg korisnika pokazuje optičko vlakno koje je sposobno dovesti ogroman kapacitet do krajnjeg korisnika na udaljenostima i većima od 20 kilometara. Takva udaljenost kod bakrene infrastrukture nije moguća jer je duljina bakrenog voda ograničena visokim faktorima gušenja i pun lošijim faktorom omjera kapaciteta i duljine.

PON je optička mreža koja spaja jednu točku u mreži s više njih (eng. *point-to-multipoint*, skraćeno P2MP) i sadrži pasivne komponente duž cijelog puta signala od izvora do odredišta. Postoji nekoliko izvedbi PON mreža, a najviše pozornosti privlači Ethernet PON (skraćeno EPON) izvedba zbog logične primjene Ethernet protokola u prijenosu IP prometa.

Postoji nekoliko različitih topologija u višespojnom (eng. *multipoint*) pristupnom segmentu mreže kao što su sabirnička, hijerarhijska i prstenasta. PON se može izvesti u bilo kojoj topologiji koristeći optičke rasprežnike i sprežnike, što možemo vidjeti na slici (Slika 2.3). Redudancija se može dodati u nekom određenom dijelu mreže, kao i u cjelokupnoj mreži.

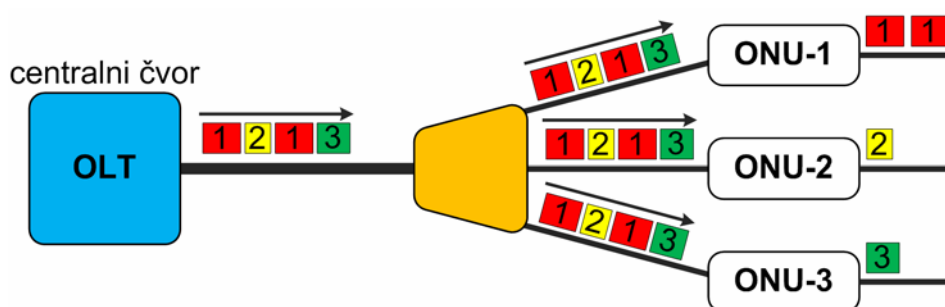


Slika 2.3 Prikaz različitih PON topologija

PON općenito definira dva tipa mrežnih elemenata. Jedan tip elementa se nalazi u centralnom čvoru i poznat je pod nazivom terminal optičke linije (eng. *Optical Line Terminal*, skraćeno OLT). Drugi element se nalazi u

korisničkim prostorijama ili na javnim površinama, ovisno o izvedbi, i naziva se optička mrežna jedinica (eng. *Optical Network Unit*, skraćeno ONU). U dolaznom smjeru, od OLT do ONU jedinice, PON je višespojno rješenje, dok je u odlaznom smjeru, od ONU do OLT jedinice PON višestruko jednospojno rješenje.

EPON mreže kao pristupne mreže su atraktivna solucija zbog sveprisutnosti protokola Ethernet i niskih troškova. Korištenjem pasivnih komponenti stvaramo jeftin i visokokapacitetni transportni mehanizam. Također, EPON mreže su takve da ih ne možemo smatrati samo kao dijeljene ili samo kao mreže za vezu od točke do točke (eng. *point-to-point*, skraćeno P2P), već za njih kažemo da su mješavina tih dvaju pristupa. U dolaznom smjeru one su višespojne. Pasivni raspoređivač s omjerom dijeljenja 1:R (gdje je R broj između 4 i 64, ovisno o potrebama) dijeli glavno vlakno u R ogranaka. Signal koji prolazi glavnim vlaknom dolazi i u svaki od ogranaka zahvaljujući raspoređivaču. Sposobnost razoštiljanja Ethernet protokola se odlično uklapa u dolazni smjer PON mreža. Ethernet paket se razoštilje i prima od strane ciljanog ONU-a usporedbom MAC adrese, gotovo isto kao i kod klasične Ethernet upotrebe. Tok dolaznog prometa prikazan je na slici (**Slika 2.4**).

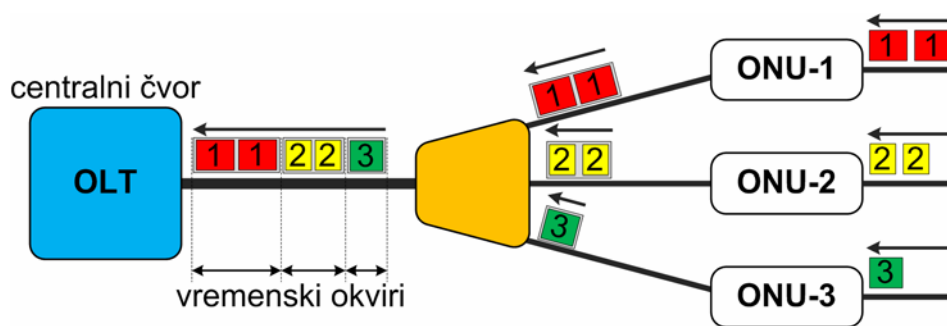


Slika 2.4 Dolazni promet PON mreže

Odlazni promet je kao što smo već rekli, višestruko jednospojno rješenje. Sprežnik kombinira sve optičke signale na jedno vlakno. Zbog same prirode sprežnika, ONU može vidjeti samo OLT – ne može vidjeti druge ONU točke, te je iz toga razloga nemoguće koristiti Ethernet razoštiljanje jer će se okviri

sudariti ako ONU jedinice istovremeno pošalju svoje okvire. ONU ne zna da je došlo do sudara ukoliko se ne uvede mehanizam kojim će OLT obavijestiti ONU da je došlo do sudara i da je potrebno ponovo poslati okvir [14]. No taj tip mehanizma smanjuje učinkovitost mreže za 30 do 40%.

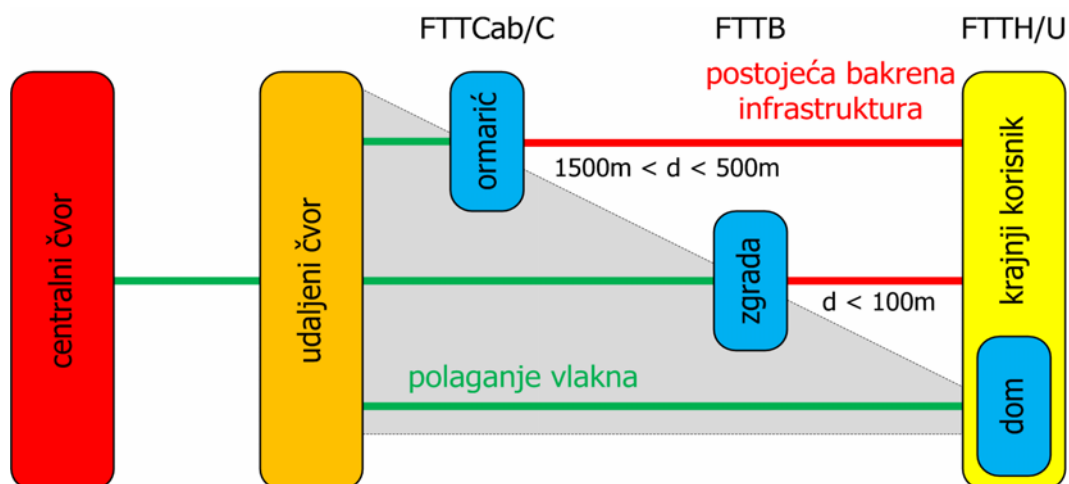
Problem odlaznog prometa se može riješiti vremenskim dijeljenjem optičkog kanala gdje je svaki ONU sinkroniziran u odnosu na zajedničku vremensku referentnu točku. Svaki ONU ima dodjeljen svoj vremenski okvir. On sprema sve podatkovne okvire i čeka na dolazak svog vremenskog okvira te tada šalje sve podatkovne okvire punom brzinom linije. Taj slučaj je prikazan na slici (**Slika 2.5**) [14].



Slika 2.5 Vremensko dijeljenje kanala za PON odlazni promet

Također, WDM se pokazuje kao jedna od kvalitetnih i jednostavnih solucija za rješavanje problema odlaznog prometa, gdje je svakoj ONU jedinici dodjeljena jedna odlazna valna duljina. Mana ovakve arhitekture su potrebe za podesivim laserima, ili velikom broju laserskih predajnika, što u konačnici dovodi do povećanja troškova.

Važno je spomenuti da, kada govorimo o optičkim pristupnim mrežama, zasigurno je rašireniji naziv vlakno do X (eng. *Fiber To The X*, skraćeno FTTX). Vlakno do doma (eng. *Fiber To The Home*, skraćeno FTTH) koncept se sastoji od upotrebe sveoptičke infrastrukture u *last-mile* segmentu mreže. To je kategorija unutar FTTX modela, koji definira doseg, odnosno udaljenost vlakna od krajnjeg korisnika.



Slika 2.6 FTTX modeli s obzirom na udaljenost od krajnjeg korisnika

Vlakno do ormarića (eng. *Fiber To The Cabinet*, skraćeno FTTCab), vlakno do rubnika (eng. *Fiber To The Curb*, skraćeno FTTC), vlakno do zgrade (eng. *Fiber To The Building*, skraćeno FTTB), vlakno do doma i vlakno do korisnika (eng. *Fiber To The User*, skraćeno FTTH/U) su glavne opcije unutar tog modela, razlikovane u udaljenosti vlakna od krajnjeg korisnika, što se vidi na slici (Slika 2.6).

FTTX model je dakle model nadogradnje (zamjene) postojeće bakrene infrastrukture na sveoptičku, dolazeći do krajnjeg cilja, FTTH/U, gdje postoji sveoptički put do krajnjeg korisnika. Primjene, usluge i prijenosni kapaciteti su različiti u pojedinim slučajevima. Prisutnost bakra ograničuje dostupni kapacitet zbog preslušavanja i frekvencijsko ovisnih efekata.

Iako je FTTH idealno rješenje za strahovito povećanje kapaciteta krajnjeg korisnika, zbog isplativosti takvog scenarija trenutno se optika baš i ne koristi u takvom modelu. Rješenje je postepeno uvođenje optike u pristupne mreže preko jednog od drugih FTTX modela. FTTH/H su jedini sveoptički modeli, s razlikom što se kod FTTH modela optička oprema nalazi u podrumu zgrade, i tada se preko postojeće bakrene mreže unutar zgrade signal prenosi do konačne točke, najčešće standardnim CAT-5 kabelima. U FTTH slučaju, svaki dom ima svoj zasebni optički prijamnik, a u još razvijenijem modelu,

FTTU (ili FTTHDesktop) optika ulazi u dom kroz unutarnje ožičenje gdje postoji optička terminacija u zasebnom mrežnom utoru.

FTTH pruža mnoge pogodnosti, kao što su:

- veliki kapacitet (GPON Standard s 2.5 Gbit/s, >100 Mbit/s planirano za rezidencijalne objekte)
- povećan doseg (do 20 km)
- transparentnost i buduća proširivost
- sigurni i robusni transportni medij

Sa optičkim vlaknima kao prijenosnim medijem, gigabitne brzine prijenosa se mogu lako ostvariti na udaljenostima od nekoliko desetaka kilometara gdje su zahtjevi na performanse optičkih komponenti zaista mali u odnosu na one komponente u optičkom transportnom sustavu. Transparentnost i buduća proširivost se odnose na činjenicu da je optička infrastruktura vlakana i razdjelnika, ako su pasivni, totalno brzinski (eng. *bitrate*) neovisna, što znači da je buduća nadogradnja brzine prijenosa savršeno podržana u postojećoj optičkoj infrastrukturi. Još jedna važna karakteristika optičkog vlakna je ta da je u potpunosti imuno na elektromagnetske pojave. U odnosu na bakrene sustave, ovo pojednostavljuje predajničku i prijamničku elektroniku i čini mrežu robusnijom.

2.3 Lokalne optičke mreže

Lokalne mreže koje koriste vlakno umjesto bakrene parice, baziraju se uglavnom na WDM tehnologiji koja, kao što znamo, omogućuje prijenos nekoliko različitih i neovisnih signala kroz jedno vlakno.

Zbog malih udaljenosti prijenosa u lokalnim mrežama, izvori svjetla (signala) mogu biti i svjetleće diode (eng. *Light Emitting Diode*, skraćeno LED) ili jeftiniji laseri, kao što su VCSEL ili Fabry-Perot laseri, s naravno direktnom modulacijom. Detektor korišten u lokalnim mrežama (eng. *Local Area*

Network, skraćeno LAN) je P-intrinsično-N fotodioda (eng. *P-intrinsic-N photodiode*, skraćeno PIN) koja ima manju osjetljivost nego lavinska dioda (eng. *Avalanche Photodiode*, skraćeno APD) ali i manju cijenu. Kao što smo rekli, male udaljenosti u LAN mrežama ne zahtijevaju detektore s većom osjetljivošću, a cijena je uvijek bitan faktor, pa je zato detektor baziran na PIN diodi logičan izbor. Valne duljine na kojima funkcionira LAN mreža su obično 1310 nm i 850 nm – iako postoje valne duljine na kojima je gušenje manje nego na ovim valnim duljinama, opet su male udaljenosti odlučujući faktor koji određuje korištene valne duljine.

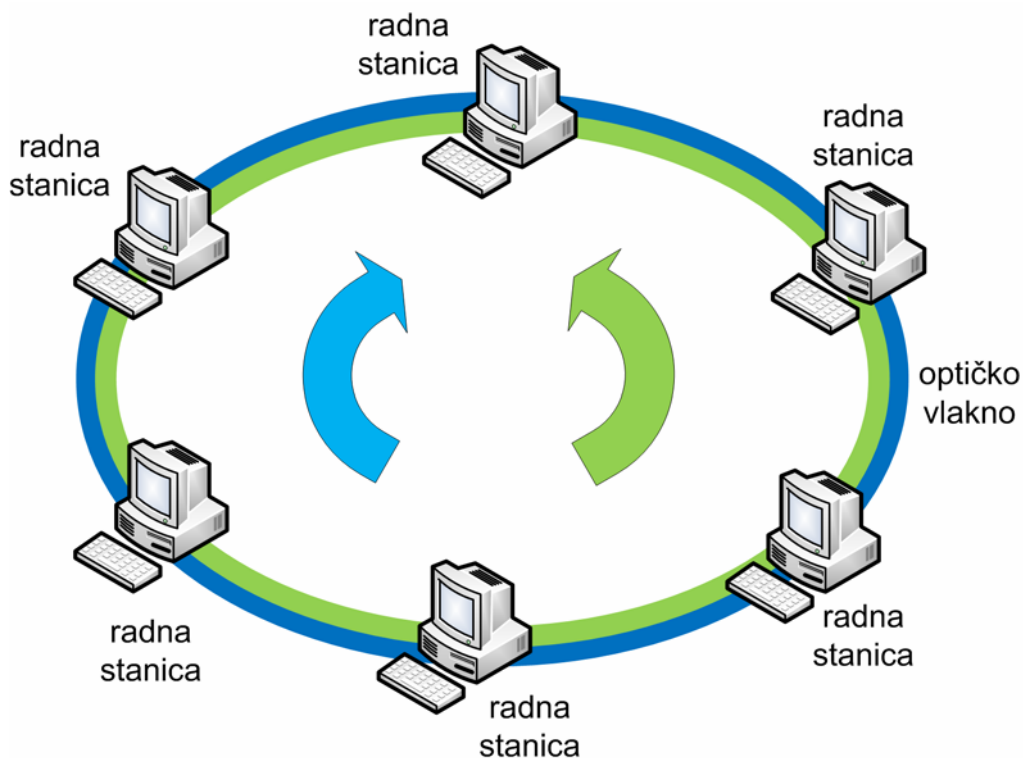
Kod lokalnih mreža bih izdvojio jednu podjelu koja određuje arhitekturu i način rada lokalne mreže. Mreže u kojima su svi čvorovi spojeni na jedan centralni čvor koji dalje ima vezu s višom razinom optičke mreže, nazivaju se mreže s jednim skokom (eng. *single-hop networks*). U mrežama s više skokova (eng. *multi-hop networks*) paket iz izvorišta do svog odredišta može proći kroz 0 ili nekoliko posrednih čvorova.

2.3.1 Multi-hop mreža

Najpopularnija WDM LAN mreža je ona s topologijom pasivne zvijezde, bazirana na pasivnom zvjezdastom raspredniku (eng. *passive star coupler*). Sposobnost razošivanja takvog rasprednika zajedno s višestrukim kanalima koje omogućuje WDM, omogućuje korištenje širokog raspona protokola za pristup mediju. No, korištenje takvog pasivnog sustava od čvorova može zahtijevati dodatno procesiranje signala i dodatne uređaje kako bi se obavilo usmjerenje i raspored slanja signala.

Druga solucija može biti prstenasta WDM LAN arhitektura sa "žetonom" za pristup (eng. *token ring architecture based WDM LAN*) koja koristi vlakno kao primarni prijenosni medij te P2P multipleksiranje kako bi eliminirala potrebu za dodatnim uređajima za prosipanje i usmjerenje te podržava ponovnu upotrebu valne duljine [5].

Multi-hop LAN na slici (Slika 2.7) je baziran na IEEE 802.5 tehnologiji prstena sa žetonom i daje brzinu od 4 do 16 Mbit/s, a u čije detalje rada nema potrebe ulaziti.



Slika 2.7 WDM prstenasta *multi-hop* lokalna mreža

Kao što znamo, postoje jednomodna i multimodna vlakna. U ovom slučaju korišteno je standardno jednomodno vlakno, iako se kod lokalnih mreža mogu koristiti i multimodna vlakna, i to ne samo staklena (eng. *glass optical fiber*, skraćeno GOF) nego i novija polimerna vlakna (eng. *polymer optical fiber*, skraćeno POF).

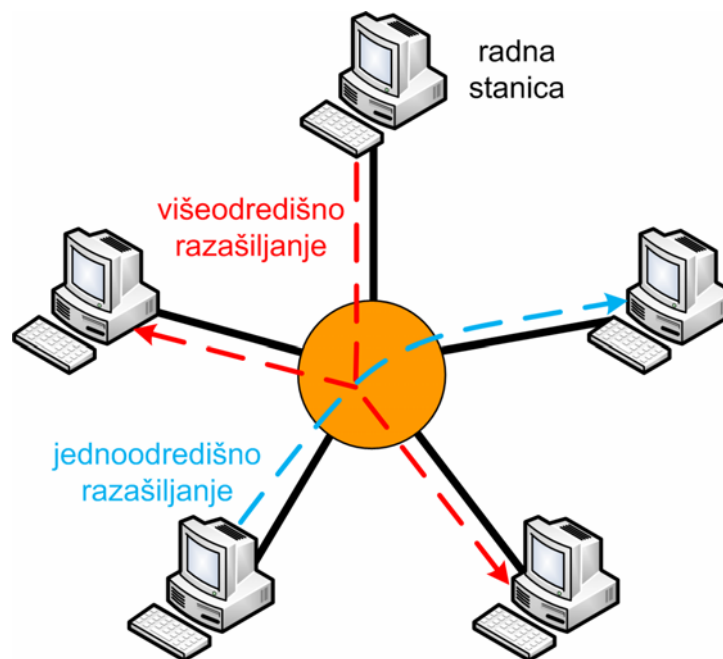
Svaki se čvor sastoji od dva primopredajnička modula koja ga spajaju sa susjednim čvorovima. Svaki primopredajnički modul se sastoji od predajnika, prijamnika i sklopa za prilagodbu signala. Predajnik je uređaj zadužen za pretvorbu električnog informacijskog signala u optički signal pogodan za prijenos preko vlakna. Ovdje korišteni predajnici su VCSEL laseri na operativnim valnim duljinama od 1310 nm i 850 nm s direktnom modulacijom i sposobni za brzine prijenosa od 1 Gbit/s. Direktno modulirani laseri su

prikladni za relativno male brzine modulacije signala i za male udaljenosti – primjerice, Fabry-Perot laser se može koristiti na udaljenosti od 20 kilometara i brzinom prijenosa od 565 Mbit/s sa zadovoljavajućim iznosom disperzije, ili čak većom brzinom ali na manje udaljenosti.

Cjelokupni WDM modul je zadužen za multipleksiranje i demultipleksiranje svjetlosnog signala u i iz vlakna na svakom čvoru. Primopredajnik ima na svakom čvoru dva svjetlosna puta – predajničku valnu duljinu i prijamničku valnu duljinu. Budući da je P2P veza dvosmjerna, ti svjetlosni putovi propagiraju u suprotnim smjerovima kroz vlakno i terminiraju se u čvorovima u mreži. Cijela mreža sadrži samo dvije valne duljine, ponovno ih koristeći za svaki P2P spoj između čvorova i tako eliminira potrebu za usmjerivačkim sklopovljem.

2.3.2 Single-hop mreža

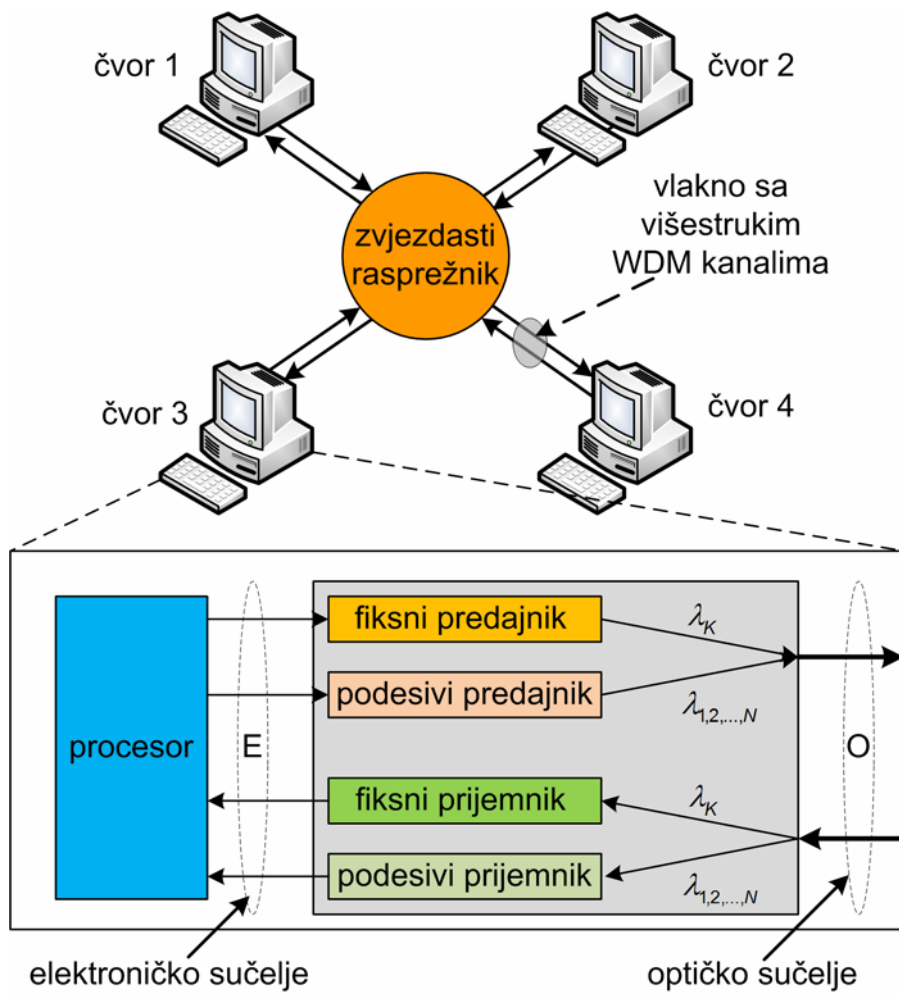
LAN WDM mreža se može izgraditi i jednostavnim spajanjem mrežnih čvorova dvosmjernim vlaknom s pasivnom zvijezdom (pasivni zvjezdasti raspoređnik), kako vidimo na slici (**Slika 2.8**). Čvor pomoću lasera šalje svoj promet zvijezdi na jednoj njemu dostupnoj valnoj duljini. Informacijski tokovi iz više izvora se optički kombiniraju pomoću zvijezde i signalna snaga svakog signala se ravnomjerno dijeli te se proslijeđuje svakom čvoru po njegovom primateljskom kanalu. Prijamnik unutar čvora je, koristeći optički filter, prilagođen za primanje jednog informacijskog toka. Također, ako neki predajnik emitira signal na valnoj duljini X, više prijamnika se može podesiti na tu valnu duljinu X, te tako omogućiti višeodredišno razošiljanje podataka što je i prednost pasivne zvijezde. Budući da je ta komponenta pasivna, pouzdanost joj je prilično velika.



Slika 2.8 WDM lokalna mreža s pasivnom zvijezdom

Ovisno o protokolima, stupnju pristupa i željene povezanosti, te cijene, svaki čvor u mreži može pristupiti bilo kojoj valnoj duljini na vlaknu. To se postiže podesivim prijamnicima i predajnicima. Naravno, minimalan zahtjev za svaki čvor je da sadrži barem jedan predajnik i jedan prijamnik. Ako koristimo više predajnika i prijarnika, tada imamo sljedeće slučajeve. Ako su i predajnici i prijarnici fiksni, odnosno podešeni samo na određenu valnu duljinu za svaki par predajnik/prijarnik, tada se preko pasivne zvijezde radi statička *multi-hop* topologija stvarajući veze između parova čvorova na zadanim valnim duljinama.

Prikladniji pristup sadrži podesive predajnike i/ili podesive prijarnike, koji omogućavaju dinamičko konfiguriranje mreže ovisno o prometnim zahtjevima u mreži te primjenu *single-hop* protokola. Prikaz jednog takvog čvora vidimo na slici (**Slika 2.9**).



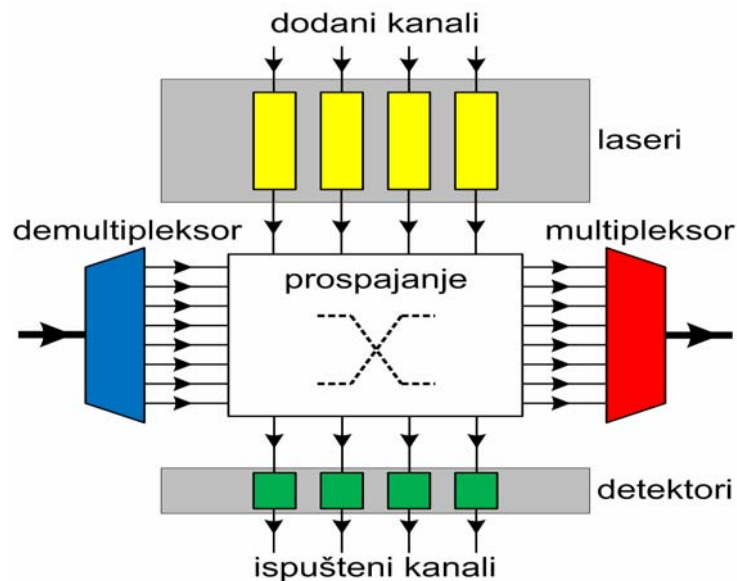
Slika 2.9 Čvor s fiksnim i podesivim predajnikom i prijemnikom

3. Komponente WDM mreža

Iako WDM mreže, bilo da su rađene na CWDM ili DWDM tehnologiji, zbog svoje kompleksnosti mogu sadržavati veliki broj različitih komponenti, kako bi izvršile valnu konverziju, usmjeravanje, ponovno korištenje valne duljine i drugo, mi ćemo se, ponajviše zbog nedostupnosti informacija, u ovom radu usredotočiti na one najvažnije komponente.

3.1 WDM čvor

WDM čvor se najčešće sastoji od multipleksno demultipleksne sekcije, prospojne sekcije, te sekcije s lokalnim sučeljem. Lokalno sučelje se sastoji od primopredajnika, koji se nadalje dijele na optičke izvore, optičke detektore te složeno elektroničko sklopovlje. Multipleksna i demultipleksna sekcija, kao što nam samo ime govori, se sastoji od optičkih multipleksora i demultipleksora. Prospojna sekcija obično ima polje optičko-električno-optičkih (skraćeno O-E-O) ili optičko-optičko-optičkih (skraćeno O-O-O) sklopki i to u ili dodaj/ispusti konfiguraciji ili međuspojnoj (bilo koji ulaz/izlaz na bilo koji ulaz/izlaz) konfiguraciji.



Slika 3.1 Prikaz osnovnog WDM čvora

WDM čvor prikazan na slici (**Slika 3.1**) se može sastojati od mnogo različitih komponenti i tehnologija, a odabir istih je prepušten odgovornom konstruktoru WDM sustava, odnosno njegovim potrebama. Mi ćemo u ovom poglavlju opisati najčešće korištene komponente i tehnologije.

3.1.1 WDM predajnici

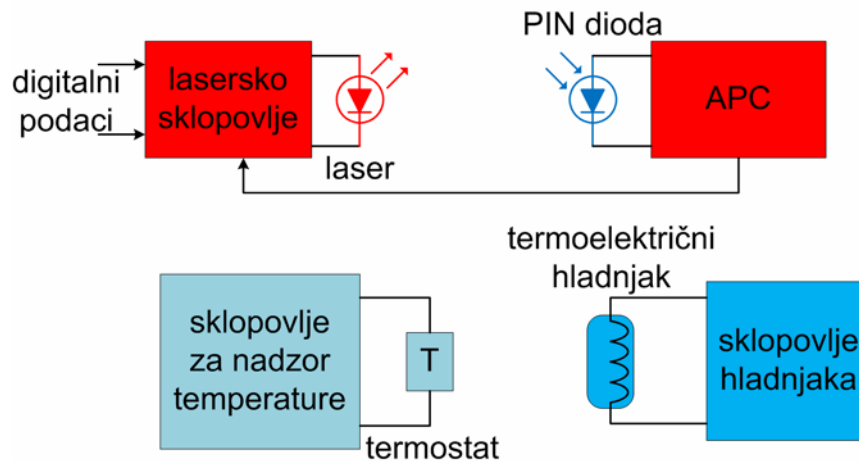
WDM sustavi zahtijevaju nadzor nad valnim duljinama lasera korištenim u prijenosnom linku. Za razliku od jednokanalnih sustava gdje postoji velika tolerancija na pomicanje valne duljine lasera, prisutnost susjednih kanala određuje raspon valne duljine svakog lasera. Ukoliko se prekorači dozvoljeni raspon, može doći do preslušavanja između kanala ili pojačanog gubitka zbog valno selektivnih multipleksora.

Uobičajeno za CWDM sustave je korištenje lasera s direktnom modulacijom. Za *long-haul* i ostale DWDM sustave, direktno modulirani signali postaju degradirani prilikom prijenosa zbog kromatske disperzije nastale širenjem spektra, efekta koji je više izražen kod direktno moduliranih lasera, te se u njima koriste laseri s vanjskom modulacijom (eng. *externally modulated*, skraćeno EM).

Kao što smo već spomenuli na početku ovoga rada, CWDM sustavi mogu koristiti bilo LED, bilo laserske izvore svjetla, dok DWDM sustavi dozvoljavaju upotrebu samo laserskih dioda. Zato će naš izbor biti DFB laser, s jedinom razlikom što će on kod CWDM sustava biti nehlađeni, a kod DWDM sustava hlađeni.

Uobičajeni laserski predajnik se sastoji od pokretačkih strujnih krugova za modulaciju lasera (lasersko sklopovlje), nadzorne fotodiode i sustava automatske kontrole snage (eng. *automatic power control*, skraćeno APC), koji šalje povratni signal pokretačkim strujnim krugovima u svrhu prilagodbe modulacije i struje praga. U DWDM sustavima, za razliku od CWDM sustava, valna duljina lasera mora biti precizno kontrolirana zbog jako uskog razmaka između kanala i zbog uskog propusnog pojasa filtra korištenih u

multipleksorima i demultipleksorima transmisijskog linka. Dakle, uz sustav automatske kontrole snage, u predajnicima za DWDM sustave postoji i dodatno sklopovlje za temperaturni nadzor i podešavanje. Takav predajnik je prikazan na slici (**Slika 3.2**). CWDM predajnik ima strukturu sličnu kao i DWDM predajnik osim što nema potrebu za nadzorom temperature i hlađenjem, pa je njegova struktura mnogo jednostavnija.



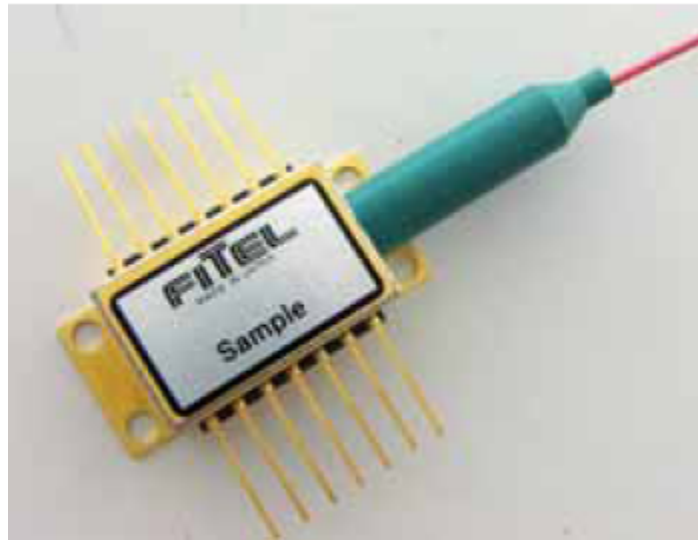
Slika 3.2 Struktura DWDM predajnika

Još jednom istaknimo prednosti CWDM lasera u odnosu na DWDM ekvivalente:

- ne postoji potreba za integracijom hladnjaka u predajnik
- mala složenost kontrolne elektronike
- smanjena potrošnja snage, potrebna samo struja lasera
- niža cijena uređaja

Istovremeno, nedostaci su da se moramo pobrinuti oko pomicanja valnih duljina, efekta kojeg smo već opisali, te varijacije izlazne snage zbog povećanja temperature. Naime, porastom temperature raste struja praga lasera a smanjuje se i efikasnost lasera. Taj se efekt djelomično može ublažiti APC sklopom već ugrađenim u te CWDM predajnike.

Također, brzina modulacije kod CWDM lasera ima maksimum od 2.5 Gbit/s, dok se kod DWDM lasera brzina modulacije signala penje i do 40 Gbit/s [8].



Slika 3.3 DWDM laserski modul s DFB laserom

Modul na slici (**Slika 3.3**) preuzet iz [7] je klasični DWDM predajnik s integriranim optičkim izolatorom, termoelektričnim hladnjakom, termistorom te fotodiodom za nadzor snage, uz maksimalnu izlaznu snagu od 40 mW. Operativne valne duljine odgovaraju ITU-T G.694.1 standardu, odnosno DWDM rasporedu valnih duljina s odstupanjem od centralne valne duljine za ± 0.1 nm.

3.1.2 WDM prijamnici

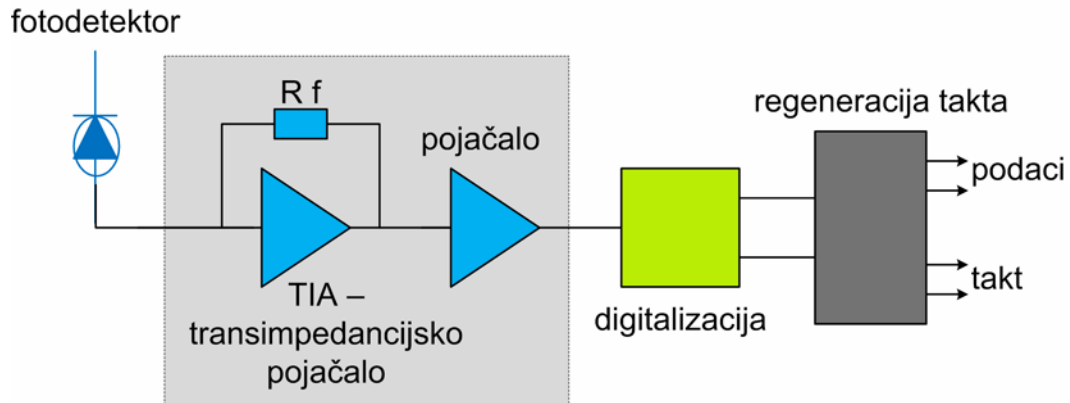
Osnovna funkcija optičkog prijamnika je da detektira svjetlost i pretvori je u koristan električni signal. PIN fotodioda i APD fotodioda su dva najčešće korištena detektora u optičkim komunikacijama. Fotodetektor se mogu promatrati kao izvori struje, na način da PIN fotodetektor ima linearnu vezu između količine svjetla koje dolazi i struje koja izlazi, te se taj parametar definira kao brzina odziva. APD detektor su malo drugačiji jer je ta veza nelinearna, što dalje implicira parametar pod nazivom osjetljivost.

Kod PIN dioda, ulazno svjetlo se apsorbira i generiraju se nosioci proporcionalno intenzitetu tog ulaznog svjetla. Glavna dva parametra koja opisuju PIN diodu su brzina odziva i kapacitet. Brzina odziva opisuje

konverzijsku učinkovitost diode, odnosno, količinu proizvedene fotostruje kao funkciju ulazne optičke snage. Ta se vrijednost obično kreće u iznosu od 0.5 do 0.9 A/W. GaAs/InP fotodetektor koji se najčešće koriste u CWDM sustavima imaju širok spektralni odziv, u rasponu do 900 do 1650 nm. Sposobnost optičkih prijamnika da imaju slične performanse na širokom spektru ulaznih valnih duljina omogućuje dizajnerima sustava korištenje bilo kojeg prijamnika s bilo kojim predajnikom (naravno, s valnim duljinama unutar CWDM pojasa). Važnost ovoga se ponajviše očituje u dvosmjernim linkovima kroz jedno vlakno. Kapacitet utječe na *bit-rate* pod kojim je PIN dioda sposobna raditi – što je veća aktivna površina, kapacitet je veći – što je kapacitet veći, operativni *bit-rate* je manji. PIN diode su se pokazale sposobnima raditi i na brzinama od 100 Gbit/s, ali su također dostupne i one na manjim brzinama.

APD diode koriste lavinski efekt unutar jakog električnog polja gdje ulazno svjetlo generira slobodne nosioce, koji potom generiraju dodatne slobodne nosioce, što rezultira većom osjetljivošću nego kod PIN dioda. Analogno, idealne su za CWDM sustave koji ne koriste pojačala. Maksimalni *bit-rate* kod APD dioda iznosi 10 Gbit/s, što je, iako puno manji nego kod PIN dioda, u potpunosti dovoljan za sve CWDM primjene. Praktični problemi oko APD dioda su niska maksimalna ulazna optička snaga od oko 0 dBm i relativno visoki reverzni istosmjerni prednapon od oko 20 do 100 V potreban za rad tih dioda.

Osnovni optički prijamnik se sastoji od dva dijela – dio za detekciju i dio za pojačanje. Funkcijski blokovi prijamnika su prikazani na slici (**Slika 3.4**). Fotodetektor kao prednji dio prijamnika pretvara dolazeće svjetlo u električne podatkovne signale. U ovisnosti o tipu detektora, razlikujemo dvije vrste prijamnika, one bazirane na PIN diodama i one bazirane na APD diodama. Nakon detekcije, slijedi dio za pojačanje čija je zadaća obnoviti originalni signal (2R), a vrlo često napraviti i vremensku obnovu signala (3R). Ovdje prikazani prijamnik koristi direktnu detekciju i radi s NRZ modulacijskim formatom.



Slika 3.4 Osnovna struktura WDM prijmnika

Budući da performanse prijmnika strogo ovise o prednjem optičkom dijelu, navesti ćemo neka svojstva onih s PIN diodama kao i onih s APD diodama.

APD prijmnici:

- podržavaju prijenos signala bez potrebe za pojačalima i time znatno smanjuju trošak izgradnje linka, što je idealno za CWDM sustave
- idealni za detekciju valnih duljina na kojima optičko pojačanje nije moguće ili kada postoje zahtjevi za što manjim troškom izgradnje linka
- osjetljivost veća od -30 dBm za 2.5 Gbit/s, -24 dBm za 10 Gbit/s prijmnike
- veća cijena nego PIN dioda

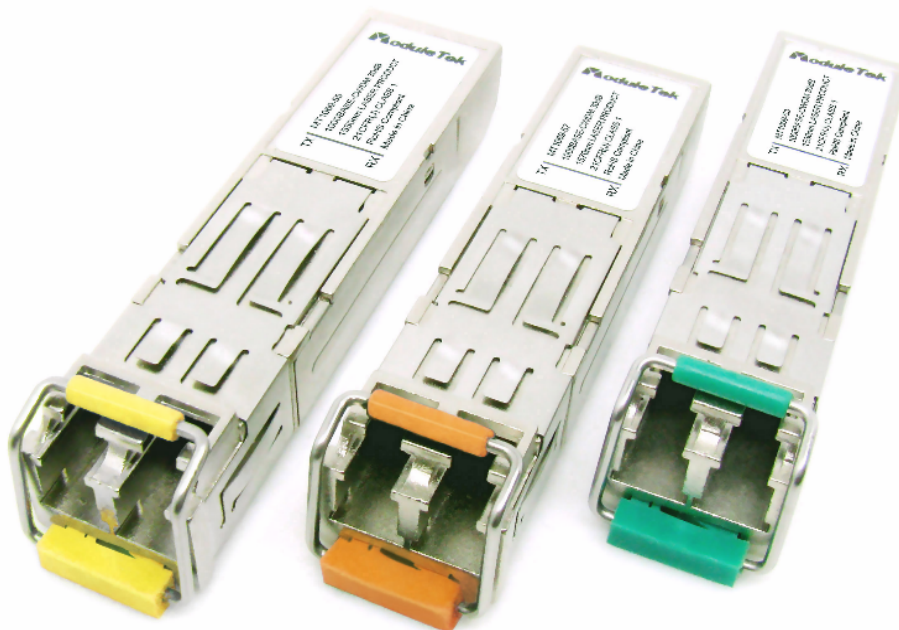
PIN prijmnici:

- podržavaju detekciju brzina većih od 10 Gbit/s, iako najčešće brzina od 1.25 Gbit/s i 2.5 Gbit/s, odnosno CWDM brzina
- većinom se koriste u jeftinijim prijmnima, gdje se tolerira niža osjetljivost, primjerice -16 dBm pri 10 Gbit/s i -22 dBm pri 2.5 Gbit/s
- kompaktni prijmnici s tihim električnim pojačalima

3.1.3 Primopredajnici

Umjesto korištenja diskretnih lasera, pogonskog sklopovlja, PIN/APD detektora i prijamničkog sklopovlja ugrađenih na ploče, ove funkcije postaju sve više integrirane u module. Ovaj viši stupanj integracije je doveo do novog koncepta koji se zove primopredajnik (eng. *transceiver*) i sve više se koristi kako u CWDM sustavima, tako i u DWDM sustavima.

Ti uređaji su posebno korisni kod dvosmjernih linkova, jer svaka strana sadrži i predajnik i prijamnik. Laser, detektorska dioda te nužna elektronika potrebna za pogon lasera i oblikovanje primljenog signala su integrirani u modul sa standardiziranim sučeljem. Još jedno jako svojstvo primopredajnika je njihova modularnost, odnosno mogućnost ukapčanja na elektroničko sklopovlje. Ta modularnost omogućuje odvajanje optike od elektroničkog dijela sustava i na taj način omogućuje troškovno učinkovit dizajn sustava.



Slika 3.5 CWDM primopredajnički modul

Primopredajnik preuzet iz [9] i prikazan na slici (**Slika 3.5**) podržava dvosmjernan prijenos prometa na brzinama od 125 Mbit/s do 2.67 Gbit/s, s operativnim valnim pojasevima od 1270 do 1450 nm, te 1470 do 1610 nm.

Također, radi s duljinama prijenosnog linka od 40 pa do 120 kilometara i u temperaturnom rasponu od 0 do 70°C. Dakle, to je klasični CWDM primopredajnik, uz naravno opasku da postoje i drugačije izvedbe takvih modula s drugačijim performansama bilo za CWDM ili DWDM sustave.

3.1.4 Optički filtri

Optičke komunikacije mogu biti jednostavne kao i P2P linkovi ukoliko se jedan podatkovni kanal prenosi između dvije strane. No, zahtjevi za sve većim kapacitetom i fleksibilnošću su doveli do evolucije linearnih linkova u sve složenije mreže, kao što su zvjezdaste, prstenaste ili isprepletene (mesh) mreže. Kako se povećava složenost, tako se povećavaju i zahtjevi za dodatnim uređajima koji će podržavati i održavati funkcionalnost mreže.

Najvažnija svojstva koja omogućavaju korištenje WDM tehnologije su multipleksiranje i demultipleksiranje svih optičkih kanala kao i selektivni *add-and-drop* princip uzimanja i ispuštanja kanala u mrežnim čvorovima, čineći optičke filtre jednom od ključnih komponenti u multivalnim WDM sustavima.

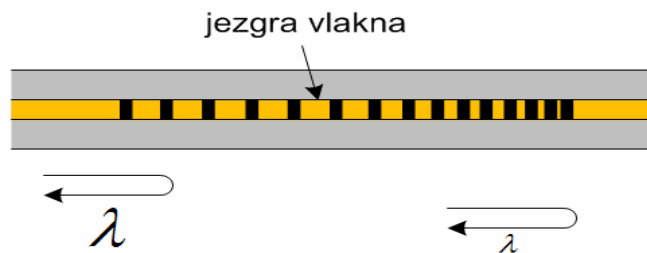
WDM omogućava kombiniranje više kanala različitih valnih duljina na jedno vlakno, gdje valno selektivne komponente kao što su (de)multipleksori i filtri igraju ključnu ulogu u kombiniranju i odvajanju tih kanala. U WDM mrežama, filtri koje ćemo opisati su oni najčešće korišteni.

3.1.4.1 Filter s Braggovom rešetkom u vlaknu

Slika 3.6 prikazuje pogled na filter s Braggovom rešetkom koja je ugrađena u jezgru optičkog vlakna (eng. *fiber Bragg grating filter*, skraćeno FBG filter) .

Rešetka (eng. *grating*) je periodička struktura sastavljena od segmenata niskih i visokih indeksa loma koji odbijaju svjetlost određene valne duljine a propuštaju svjetlost neke druge valne duljine. Rasterski period te rešetke određuje koje će se valne duljine odbijati. Moguće je također napraviti

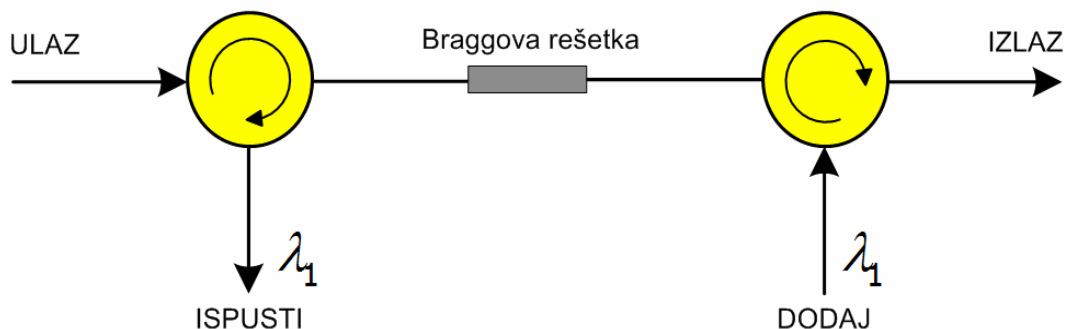
rešetke s promjenjivim periodom (eng. *chirped grating*) i varijabilnom snagom indeksa loma u svrhu postizanja optimalnih rezultata.



Slika 3.6 Filter s Braggovom rešetkom

Također, struktura prikazana na slici (**Slika 3.6**) se može koristiti za kompenzaciju disperzije, gdje se veće valne duljine odbijaju prve, dok one manje kasnije. No nama nije važna struktura za kompenzaciju disperzije, već struktura koja ima jednoliku rešetku i gdje se sve valne duljine unutar propusnog pojasa rešetke odbijaju jednako.

Još jedno važno svojstvo FBG filtra je da se naša željena valna duljina odbija od te periodičke strukture i putuje nazad u smjeru odakle je došla. Budući da je rešetka uređaj sa samo dva otvora, ulaznim i izlaznim, to čini nužnim kombiniranje rešetke s dodatnim optičkim uređajem kako bi se pristupilo željenoj valnoj duljini. **Slika 3.7** prikazuje OADM konstruiran za jednu valnu duljinu. Koristi jednu rešetku i dva optička cirkulatora.



Slika 3.7 Optički ADM s Braggovom rešetkom i dva cirkulatora

Multikanalni WDM signal na ulaznom otvoru prolazi kroz prvi cirkulator i dolazi do Braggove rešetke. Kako je FBG dizajniran za valnu duljinu 1, ta se

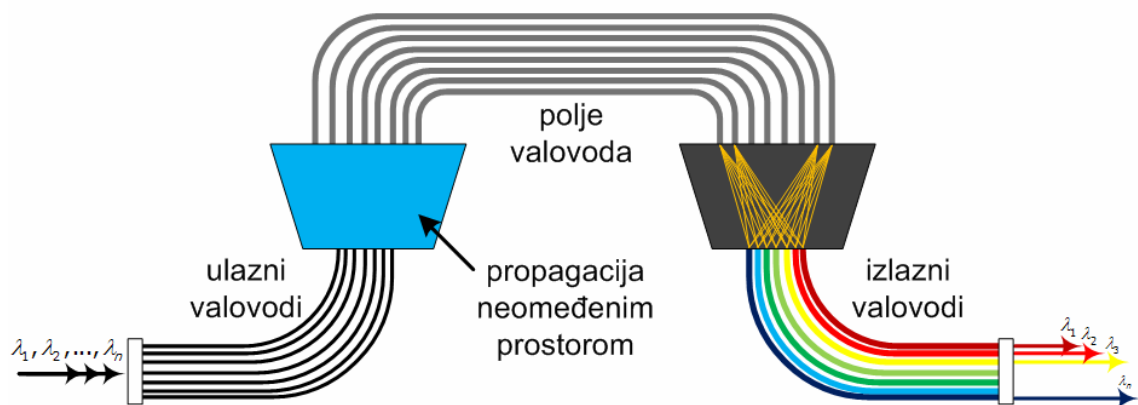
valna duljina reflektira, dok sve ostale valne duljine prolaze kroz rešetku, dolaze do drugog cirkulatora i kroz izlazni otvor izlaze van. Kanal 1 se vraća do prvog cirkulatora i pojavljuje se na otvoru za ispuštanje gdje se dalje može obrađivati, pretvarati, itd. Otvor za dodavanje unosi novi promet koji je moduliran na valnoj duljini 1. Budući da rešetka može reflektirati tu valnu duljinu iz oba smjera, ona se može koristiti i za multipleksiranje novog prometa na vlakno. Kanal 1 iz ulaza za dodavanje dolazi do FBG izlaza drugog cirkulatora i propušta se do rešetke – ona ga reflektira tako da sad i on putuje u istom smjeru kao i ostali kanali koje su pušteni odmah na početku prema izlaznom otvoru.

FBG filtri imaju velik broj primjena u DWDM mrežama [4], no u CWDM mrežama se oni jako rijetko koriste iz dva razloga – prvi je da je spektralna širina CWDM mreža vrlo velika, i s vrlo malim brojem kanala, a drugi je trošak – kombinacija FBG rešetki s cirkulatorima ne zadovoljava uvjete niskih troškova CWDM sustava.

3.1.4.2 Polja valovoda

Polje valovoda (eng. *arrayed waveguides*, skraćeno AWG) je metoda izdvajanja valnih duljina pomoću valovoda ugrađenih u polje koji zadovoljavaju određene kriterije po pitanju dužine i udaljenosti.

Kao što vidimo na slici (**Slika 3.8**), višekanalni signal se rasprednikom dijeli na više signala koji ulaze u ulazni valovod. Nakon njega dolaze do neomeđenog prostora (eng. *free-space*) gdje se optička snaga jednoliko distribuira u polje valovoda - u tom polju, signal u svakom valovodu ima drugačiji pomak u fazi zbog različitih duljina samih valovoda. Također, pomak u fazi je ovisan i o valnoj duljini jer se propagacijske konstante razlikuju. Različite valne duljine se tako fokusiraju na različite prostorne točke na izlazu polja i ulaze u različita izlazna vlakna.

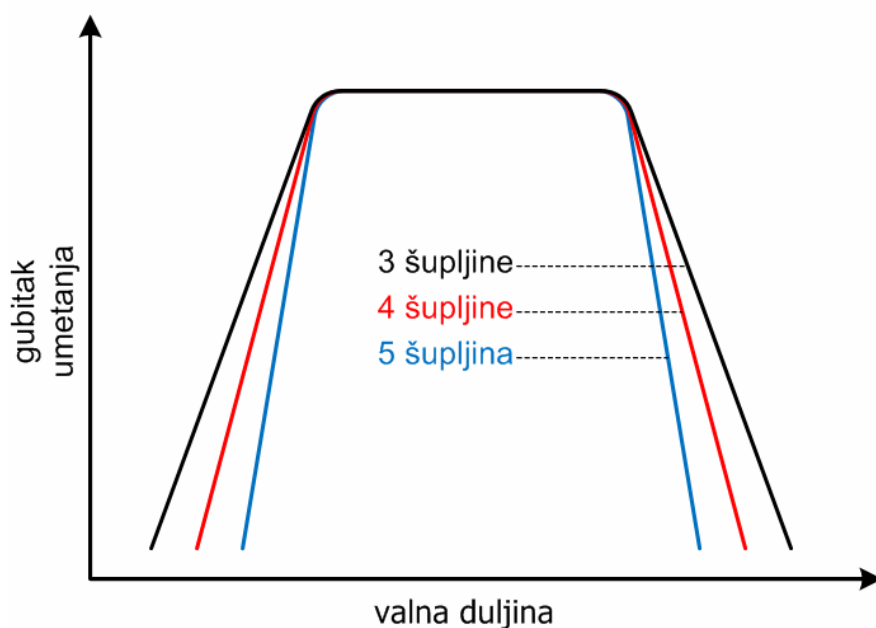


Slika 3.8 Izdvajanje valnih duljina pomoću polja valovoda

Što se tiče upotrebe u CWDM *metro* ili pristupnim mrežama, ovi filtri ne igraju veliku ulogu jer za ispravan rad s nehlađenim laserima, od CWDM multipleksora/demultipleksora se zahtijeva propusni pojas veći od 13 nm što nije praktično moguće izvesti u smislu očuvanja niskih troškova. U DWDM sustavima ovakve metode se primjenjuju [4].

3.1.4.3 Filtri s tankim filmom

Filtri s tankim filmom (eng. *Thin Film Filters*, skraćeno TFF) se izrađuju od materijala s različitim indeksom loma koji se slažu po alternirajućem rasporedu u obliku dielektričnih slojeva. Svaki sloj se obično sastoji od nekoliko Fabry-Perot šupljina, koje određuju performanse optičkog filtra. Utjecaj broja šupljina na propusnost i kvalitetu filtra vidimo na slici (**Slika 3.9**).



Slika 3.9 Odnos broja šupljina i propusnosti filtra

Postoje dvije vrste dielektričnih filtera koje TFF uređaji koriste – *edge* i *bandpass*. *Edge* filtri razdvajaju cijeli jedan spektralni raspon, primjerice, propuštaju gornjih 8 valnih duljina CWDM sustava a reflektiraju ostale valne duljine. *Bandpass* filtri omogućuju pristup samo željenoj valnoj duljini, dok sve ostale reflektiraju.

Za tipične CWDM filtere, cijela dielektrična struktura je debljine od oko 30 do 40 μm , a broj dielektričnih slojeva se kreće između 130 i 160, dok za zahtjevnije uređaje može biti i 200. U usporedbi za drugim metodama, TFF metoda pruža pouzdanost pasivnog uređaja, skalabilnost za rad s bilo kakvim rasporedom kanala i puno privlačniju cijenu po kanalu te je stoga prvi izbor za CWDM sustave.

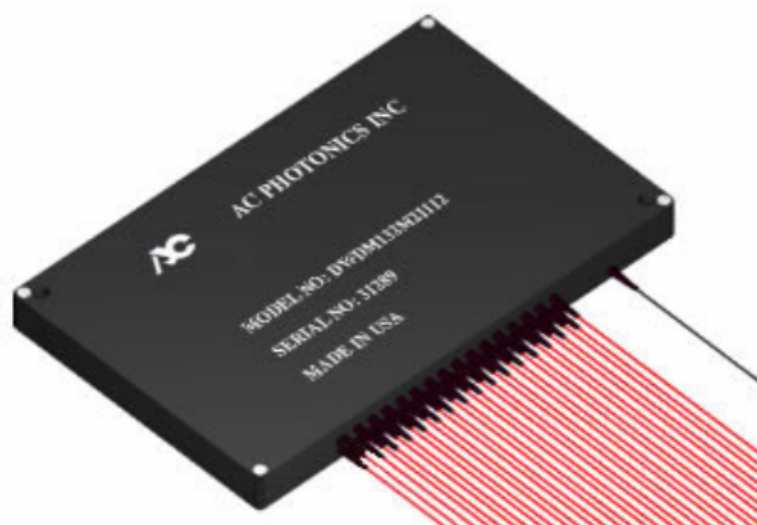
Kao što je bio slučaj i s predajnicima i prijamicima, multipleksne i demultipleksne komponente se također integriraju u jedan zajednički modul.



Slika 3.10 Primjer CWDM MUX/DEMUX modula s 16 kanala [10]

Tablica 3.1 Karakteristike CWDM modula sa Slike 3.10

Parametar		MUX	DEMUX
Operativna valna duljina [nm]		1310,1330,1350,1370,1390,1410,1430,1450 1470,1490,1510,1530,1550,1570,1590,1610	
Točnost centralne valne duljine [nm]		± 0.5	
Razmak između kanala [nm]		20	
Propusni pojas kanala [nm]		≥ 13	
Izolacija kanala [dB]	Susjedni	N/A	≥ 30
	Udaljeni	N/A	≥ 40
Operativni temperaturni raspon [°C]		0 ~ 70	



Slika 3.11 Primjer DWDM MUX/DEMUX modula s 32 kanala [11]

Tablica 3.2 Karakteristike DWDM modula sa Slike 3.11

Parametar		MUX	DEMUX
Operativna valna duljina [nm]		ITU-T G.694.1 raspored kanala	
Točnost centralne valne duljine [nm]		± 0.05	
Razmak između kanala (min) [nm]		0.8	
Propusni pojas kanala [nm]		≥ 0.22	
Gubitak umetanja [dB]		≤ 5.4	
Izolacija kanala [dB]	Susjedni	N/A	≥ 25
	Udaljeni	N/A	≥ 35
Operativni temperaturni raspon [°C]		0 ~ 70	

U ovom poglavlju ćemo, jer je također vezana uz optičke filtre, još jednom spomenuti i jednu od glavnih WDM komponenti, a to je optički dodaj i ispusti multipleksor (skraćeno OADM), kojeg smo već ukratko opisali kod objašnjavanja principa rada FGB filtra.

Koristi se u prstenastoj ili linearnoj mreži, ispušta valne duljine iz prijenosnog linka i ubacuje valne duljine nazad u prijenosni link. Sve druge valne duljine prolaze kroz OADM netaknute kao tzv. ekspresni kanali. Važno je napomenuti da ako se primjerice izbacuje valna duljina na kanalu 1, tada se nova valna duljina može ubaciti samo na taj kanal. Zbog toga je vrlo važno znati koja valna duljina se nalazi na kojem ulazu. Prosječni gubitak na OADM ulazima iznosi 1.5 do 2.5 dB, dok je gubitak zbog prolaska kroz ADM oko 1

do 2 dB po kanalu. Izolacija između susjednih kanala iznosi minimalno 30 dB, dok je kod onih kvalitetnijih uređaja veća i iznosi 50 dB. WDM OADM komponente se obično proizvode u jednokanalnim ili četverokanalnim izvedbama, te mogu biti fiksne ili podesive. Kod fiksne OADM komponente je unaprijed definirano koji kanal se izbacuje ili ubacuje, a kod podesive se dinamički konfiguriraju kanali koji se izbacuju i ubacuju, u ovisnosti o potrebama u mreži.



Slika 3.12 Primjer optičkog dodaj/ispusti multipleksora [12]

Tablica 3.3 Karakteristike modula sa Slike 3.12

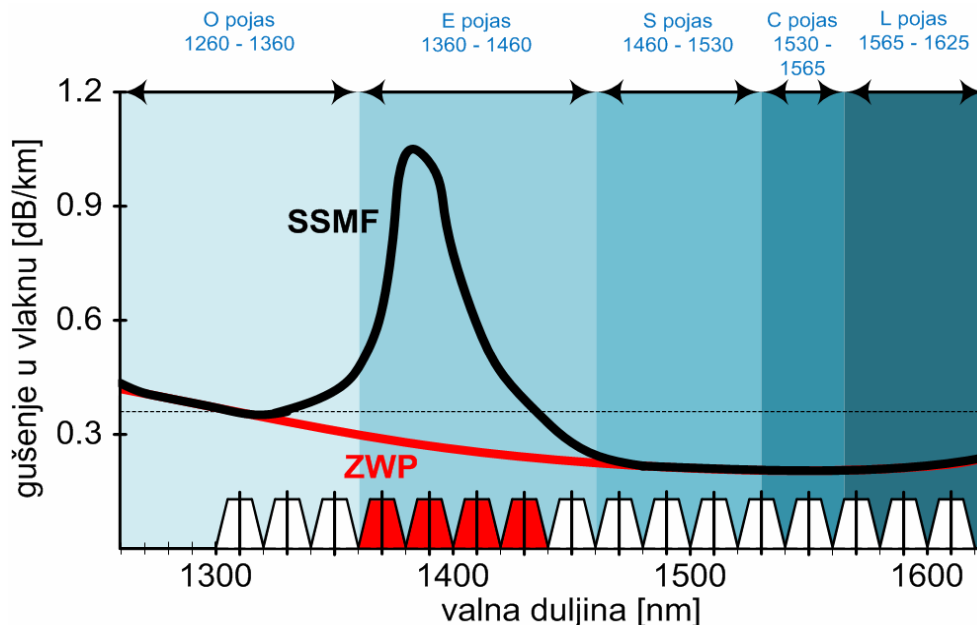
Parametar [OADM 100 GHz 2x2]		Min	Srednja	Max
Operativni valni raspon [nm]		1528~1640		
Centralna valna duljina [nm]		ITU-T G.694.1 raspored		
Razmak između kanala (min) [GHz]		100		
Propusni pojas kanala [nm]		$\lambda_c \pm 0.11$		
Gubitak umetanja [dB]	Dodaj/ispusti		0.75	0.85
	Ekspresni		0.80	0.90
Izolacija susjednog dodaj/ispusti kanala		30		
Izolacija udaljenog dodaj/ispusti kanala		40		
Izolacija ekspresnog kanala		28		
Operativni temperaturni raspon [°C]		0 ~ 70		

3.2 Optička vlakna

S pomicanjem telekomunikacijskog uskog grla s *long-haul* mreža, što je vrlo uspješno riješila DWDM tehnologija, na metro i pristupne mreže, investicije u mrežne sustave su se također pomaknule u područje metro i pristupnih mreža. Posljedica toga je da se i u razvoju vlakana žarište prebacilo iz podrške DWDM sustava vrlo velikog kapaciteta na CWDM sustave koji su isplativiji za prijenos *metro* i pristupnog prometa. Veća usredotočenost na CWDM sustave dovela je do masovnog prihvaćanja vlakana punog spektra (eng. *full spectrum fiber*) koja imaju minimalna prigušenja duž širokog valnog pojasa. Takva vlakna su nastala zbog tehnološkog uspjeha u eliminiranju *OH* molekula iz vlakna, odnosno eliminiranja prigušenja uzrokovanog tih molekulama čiji se maksimum nalazio na valnoj duljini od ~1385 nm.

3.2.1 Prigušenje vlakna

Spektralna krivulja prigušenja u rasponu od 1000 do 1700 nm, za tipično GeSi (germanij-silicij) optičko vlakno na bobini promjera 150 mm, prikazana je na slici (**Slika 3.13**). U blizini 1550 nm krivulja gubitaka dostiže minimum od oko 0.185 dB/km. Na 1310 nm, krivulja gubitaka ima lokalni minimum od približno 0.325 dB/km. Na valnim duljinama većim od 1550 nm, gubici rastu zbog učinaka pakiranja, kao što je npr. gubitak makrosavijanja, odnosno zbog namotaja od 150 mm.



Slika 3.13 Atenuacijska krivulja za SSMF i ZWP vlakno

Atenuacijska krivulja standardnog jednomodnog vlakna (eng. *Standard Single Mode Fiber*, skraćeno SSMF) prikazuje povećanje gubitaka iznad nivoa Rayleighovog raspršenja na području od oko 1385 nm što je tipično za SSMF vlakno. Krivulja vlakna s nultim vodenim vrhom (eng. *Zero Water Peak*, skraćeno ZWP) prikazuje gušenje tog modernog vlakna sa smanjenim OH^- onečišćenjem i s efektivno uklonjenim vodenim vrhom (eng. *water peak*). Nadalje, **Slika 3.13** prikazuje raspored 16 CWDM kanala u odnosu na atenuacijsku krivulju. Kao što smo već rekli, ITU-T preporuka definira 18 CWDM kanala s 20 nm razmakom u rasponu valnih duljina od 1270 do 1610 nm. ZWP vlakna imaju malo gušenje i na području od 1360 do 1440 nm, odnosno u E pojasu, što omogućuje efektivni prijenos 4 CWDM kanala i u tom dijelu spektra što prije nije bilo moguće. Dakle, moderna vlakna punog spektra omogućuju prijenos 16 CWDM kanala minimalnog gušenja u području od 1310 nm do 1610 nm.

3.2.2 Kromatska disperzija

Kromatska disperzija ima kritičnu ulogu u propagaciji optičkih signala jer spektralne komponente povezane s individualnim impulsima putuju različitim brzinama kroz vlakno. Čak i kada se gušenje u vlaknu nadjača kvalitetno proračunatim linkom i pojačanjem, disperzivno širenje impulsa ostaje i dalje ograničavajući faktor u WDM sustavima.

Ova disperzija se u jednomodnim vlaknima može podijeliti na tri tipa:

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

Materijalna kromatska disperzija nastaje zbog ovisnosti indeksa loma jezgre o valnoj duljini i dominantan je izvor disperzije u jednomodnim vlaknima.

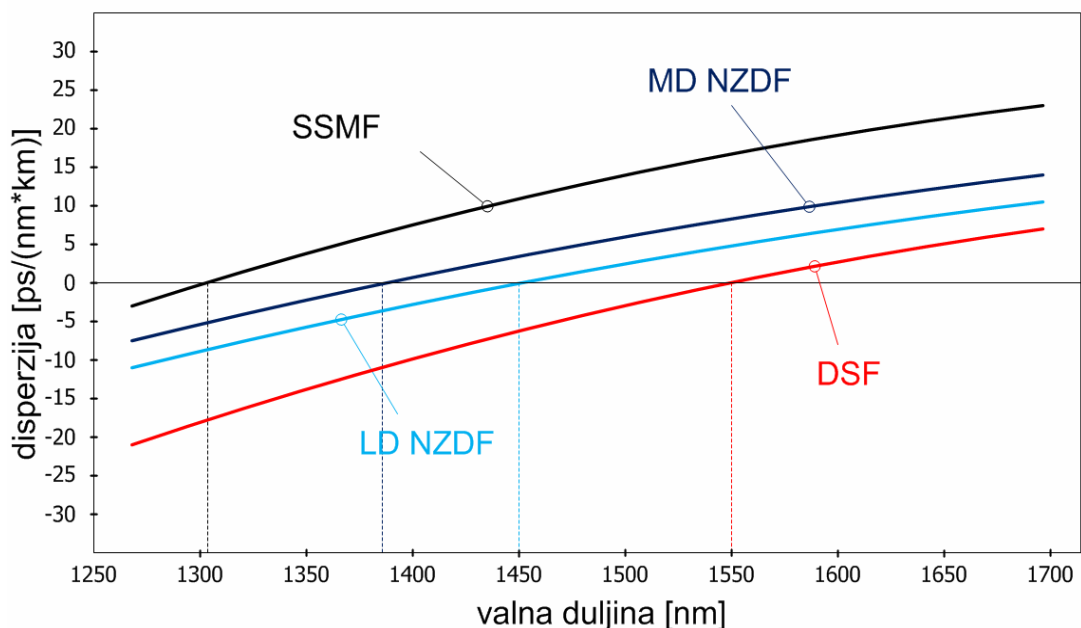
Valovodna kromatska disperzija nastaje također zbog različite propagacije različitih valnih duljina kroz vlakno, ali na način da su valne duljine manjih iznosa više "vezane" uz jezgru, dok se veće valne duljine više šire uz omotač. Budući da je indeks loma jezgre veći nego indeks loma omotača, ovo uzrokuje razlike u brzini propagacije između različitih valnih duljina.

Profilna disperzija je vezana uz različitu materijalnu disperziju pojedinih primjesa u vlaknu i po iznosu je vrlo mala te se uglavnom može zanemariti.

Najdostupnije jednomodno vlakno za upotrebu u telekomunikacijskim sustavima je standardno jednomodno vlakno (eng. *standard single mode fiber*, skraćeno SSMF), specificirano u ITU-T G.652 preporuci. Ta preporuka obuhvaća vlakna nekoliko različitih dizajna, proizvedena po većini mogućih tehnoloških procesa. Različita vlakna navedena u ovoj preporuci označavaju se drugačijim slovom iza broja oznake vlakna, pa tako imamo G.652.A i G.652.B koja su *mokra* vlakna, te novija G.652.C i G.652.D *suha* vlakna s niskim ili nultim udjelom OH^- nečistoća. Kako bi omogućili korištenje svih 16 kanala CWDM sustava, preporuka je korištenje G.652.C ili G.652.D vlakana, jer u CWDM sustavima zbog relativno malih udaljenosti i brzina prijenosa, disperzija nije ograničavajući faktor.

Preporuka G.653 opisuje jednomodno vlakno s pomaknutom disperzijom (eng. *dispersion shifted fiber*, skraćeno DSF) koje ima nultu disperziju na valnoj duljini od ~1550 nm, i koeficijent disperzije koji monotono raste s valnom duljinom. Ovo vlakno je optimizirano za rad na valnoj duljini od 1550 nm, no može se koristiti i na valnoj duljini od ~1310 nm ukoliko se pridržavamo uputa iz ove preporuke.

G.655 preporuka opisuje DSF vlakno s niskim iznosom disperzije (eng. *low dispersion non-zero dispersion fiber*, skraćeno LD NZDF). To vlakno ima koeficijent kromatske disperzije takav da mu je apsolutna vrijednost veća od nule na valnim duljinama većim od 1530 nm. G.655 vlakno je prvenstveno razvijeno za primjene gdje se koristi EDFA pojačalo, kao npr. *long-haul* prijenosni sustavi.



Slika 3.14 Iznosi disperzije za različite tipove vlakana

Preporuka ITU-T G.656, za DSF vlakno sa srednjim iznosom disperzije (eng. *medium dispersion non-zero dispersion fiber*, skraćeno MD NZDF) te prije spomenuta G.655 preporuka, specifikacije su razvijene kako bi obuhvatile širok spektar danas komercijalno dostupnih NZDSF vlakana. Na 1550 nm,

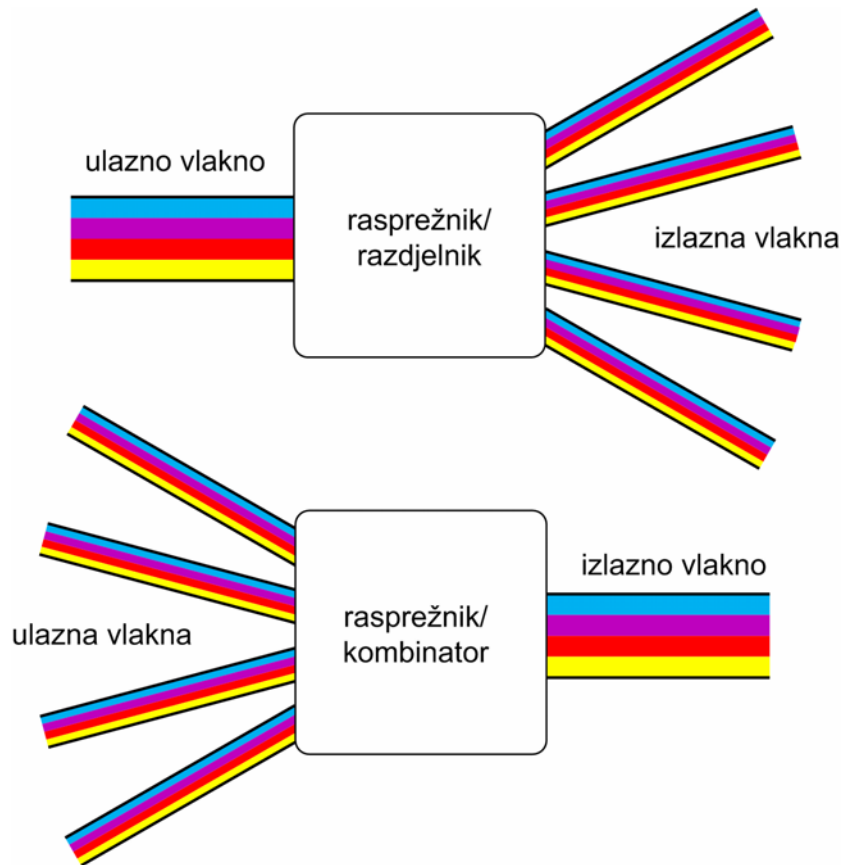
magnituda disperzije iznosi oko 4 do 8 ps/(nm*km), što je puno manje nego ~17 ps/(nm*km) kod SSMF vlakna.

Zbog toga, doseg 10 Gbit/s sustava prije potrebe za kompenzacijom disperzije može biti 2 do 4 puta veći korištenjem NZDSF vlakana. Taj povećan doseg je stoga atraktivan za DWDM prstenaste metro mreže gdje se obujam prstenova može protegnuti na nekoliko stotina kilometara. Budući da će se i CWDM sustavi ugrađivati u metro mreže, velika je vjerojatnost da će i CWDM sustavi uz SSMF vlakna koristiti i NZDSF vlakna.

3.3 Optički rasprežnik

Kako smo već spominjali kod PON mreža, one koriste pasivan (ne zahtijeva energiju za rad) uređaj kako bi razdijelile optički signal (snagu) iz jednog vlakna u više vlakana, i obrnuto, kako bi spojile (kombinirale) optičke signale iz više vlakana u jedno vlakno. Takav uređaj se naziva rasprežnik (eng. *coupler*).

U svom najjednostavnijem obliku, optički rasprežnik se sastoji od dva staljena (eng. *fused*) vlakna i snaga signala primljenog na ulaznom otvoru se dijeli na oba izlazna otvora. Omjer dijeljenja razdjelnika ovisi o dužini staljenog dijela dvaju vlakana te je taj omjer konstantan.



Slika 3.15 Rasprežnik kao razdjelnik i kombinator

Također, rasprežnik sa samo jednim ulazom se naziva razdjelnik (eng. *splitter*), a rasprežnik sa samo jednim izlazom se naziva sprežnik (eng. *combiner*), kao što možemo vidjeti na slici (**Slika 3.15**).

4. Troškovi primjene CWDM/DWDM tehnologije

U ovom ćemo poglavlju pokušati analizirati i usporediti troškove izgradnje metro i pristupne mreže, te lokalnih mreža, koristeći u jednom slučaju DWDM tehnologiju, a u drugom slučaju CWDM tehnologiju.

Prije same analize, važno je navesti najvažnije pretpostavke na kojima se temelji ta usporedba, a koje su dobivene prema dostupnosti odnosno nedostupnosti potrebnih informacija.

1. *Sve veze su bez pojačanja signala i kompenzacije disperzije a nelinearni efekti ne utječu na kvalitetu prijenosa signala.*

Glavni faktor kod gore navedenih pretpostavki je udaljenost između pojedinih čvorova, neovisno da li oni čine vezu između čvorova u *metro* mreži ili vezu između *metro* čvora i krajnjeg korisnika. Budući da ćemo pretpostaviti izgradnju mreže unutar manjeg gradskog područja od maksimalno 100,000 potencijalnih korisnika s ravnomjerno raspoređenim čvorovima, naše pretpostavljene dužine veza će sve biti manje od 20 kilometara, uzimajući tu dužinu kao minimalnu referencu, kao što je i duljina za FTTH mrežu prema [16]. U [6] je čak predstavljena pristupna mreža dugog dometa (eng. *long reach access*) s duljinom od 100 kilometara bez pojačanja. U [15] je navedeno da je prosječna duljina dionice nakon koje se stavlja optičko pojačalo jednaka 80 kilometara, pa iz tog razloga nećemo razmatrati upotrebu optičkih pojačala.

Nelinearni efekti nastaju direktno kao posljedica jačine signala, odnosno, što je signal jači, nelinearni efekti postaju sve izraženiji i na više načina slabe kvalitetu signala. Iz toga razloga nije moguće slati signale velike snage kako bi eventualno izbjegli potrebu za korištenjem optičkih pojačala. No, u našem slučaju, prema [17], nelinearni efekti nisu problematičan faktor za dionice kraće od 30 kilometara.

Za kraj, budući da kod CWDM-a brzine modulacije ne prelaze vrijednost od 2.5 Gbit/s po multipleksiranom kanalu, a kod DWDM-a ćemo se zadržati na brzini od 10 Gbit/s po kanalu, kompenzacija disperzije nije potrebna, što potvrđuje i eksperiment [18] koristeći NZDSF vlakno. Također, razliku u cijeni vlakana ćemo zanemariti¹.

2. *DWDM sustav je ograničen na maksimum od 40 kanala, CWDM sustav koristi svojih maksimalnih 16 kanala.*

3. *Metro čvor sadrži multipleksnu i prospojnu sekciju, te elemente centralnog čvora iz pristupne mreže, a udaljeni čvor pruža vezu sa samo jednom PON mrežom.*

Pretpostavljena struktura čvora gradske mreže sadrži multipleksno / demultipleksnu sekciju, prospojnu sekciju baziranu na OADM komponentama kao i naravno predajnu i prijamnu sekciju [15], te elemente centralnog čvora koji se u nekim slučajevima može smatrati dijelom pristupne mreže². Grafički prikaz opisanog čvora ćemo kasnije priložiti. Udaljeni čvor (eng. *remote node*, skraćeno RN) u pristupnoj mreži, pruža vezu od gradskog čvora prema samo jednoj PON mreži³, neovisno o tome da li se radi hibridna WDM-TDM PON ili WDM PON mreža. Njegov grafički prikaz ćemo također priložiti u nastavku rada.

4. *Korisnici su jednoliko naseljeni unutar gradskog područja, te svaki gradski čvor poslužuje jednak broj udaljenih čvorova, a svaki udaljeni čvor poslužuje jednak broj korisnika.*

¹ Zbog nedostupnosti cijena pojedinih vlakana, smatrati ćemo te troškove jednakima, uz napomenu da ćemo u CWDM sustavima obavezno koristiti G.652.C ili G.652.D vlakna, dok ćemo za gradski DWDM sustav koristiti NZDSF vlakno.

² Navedena struktura je izvedena iz [15], [6], [16] i [17] jer u dostupnoj literaturi nije bilo moguće saznati konkretne podatke o stvarnoj strukturi čvora u primjerima izgradnje mreža sa većim brojem korisnika.

³ Također, zbog manjka konkretnih informacija oko složenosti udaljenog čvora, njegova struktura je preuzeta iz [16].

5. *Troškovi komponenti su iskazani u relativnom omjeru.*

Poznavajući omjere cijena pojedinih komponenti u jednoj tehnologiji u odnosu na te iste komponente u drugoj tehnologiji možemo procijeniti trošak izgradnje optičke mreže pod traženim uvjetima. U ovom radu koristiti ćemo omjere cijena⁴ za predajnike i optičke filtre koji su osnovni dio multipleksora, demultipleksora, te OADM komponenti.

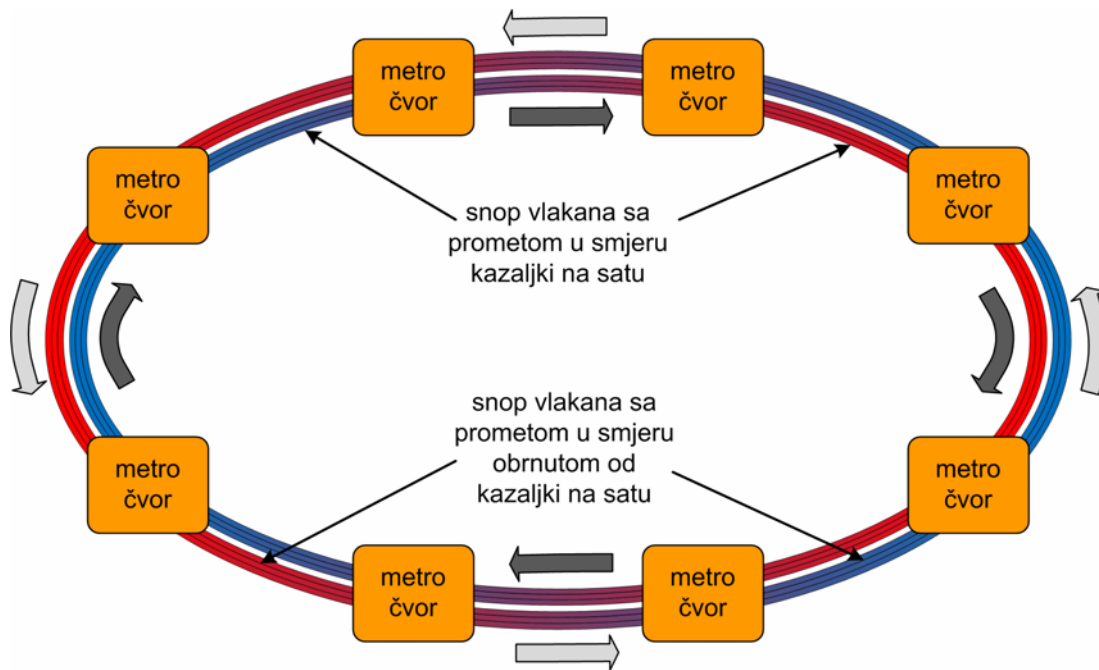
4.1 Struktura gradske mreže

Najvažniji dio gradske mreže je čvor, odnosno čvorovi čija je zadaća agregacija prometa iz pristupne mreže i njegovo prosljeđivanje drugim čvorovima u mreži. Iako je u čvorovima *long-haul* mreža optički prospojnik (eng. *optical cross connect*, skraćeno OXC) obavezna komponenta koja prospaja bilo koji svjetlosni put (eng. *lightpath*) s bilo kojeg vlakna na bilo koje vlakno [16], u metro čvorovima ona nije neophodna pa ćemo je ovdje zbog jednostavnosti izostaviti⁵.

Također, kako smo već pisali, pretpostaviti ćemo prstenastu dvosmjernu topologiju s 8 čvorova, što je broj koji odgovara prosječnim vrijednostima za gradske mreže.

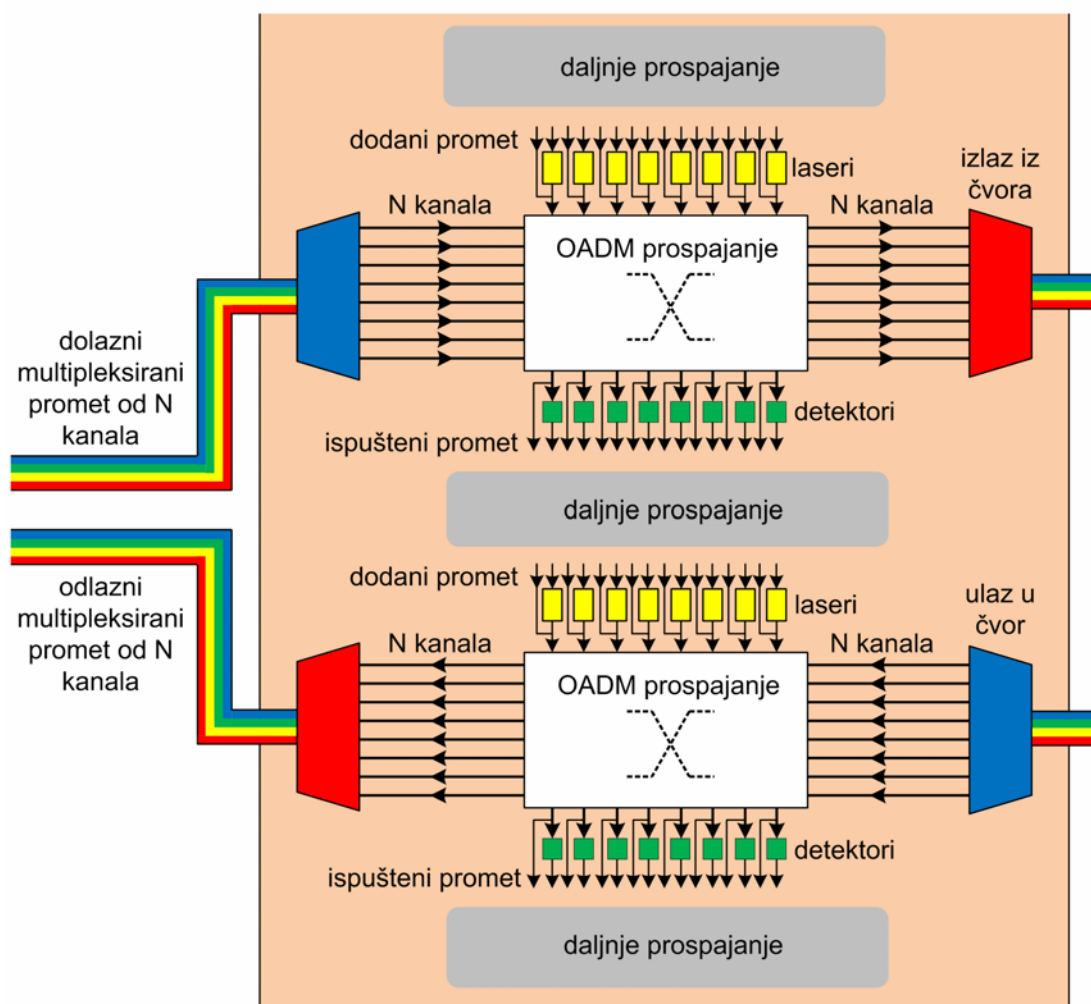
⁴ Stvarne cijene optičkih komponenti su dostupne samo povlaštenim korisnicima.

⁵ OXC komponenta, odnosno potreba za OXC komponentom ovisi o kompleksnosti čvora – jer nema raspoloživih informacija o točnoj primjeni takvih komponenti, one su ovdje izostavljene.



Slika 4.1 Struktura gradske prstenaste mreže s 8 čvorova

Dio strukture gradskog čvora koji poslužuje jedan udaljeni čvor iz pristupnog dijela mreže prikazan je na slici (Slika 4.2). Važno je napomenuti da ćemo mi koristiti pristup s dva vlakna (eng. *double fiber approach*), prema [16], što znači da će odlazni promet multipleksiran s maksimalnim brojem kanala za danu tehnologiju ići po jednom vlaknu, a isti takav dolazni promet će ići po drugom vlaknu. Mana ovakvog pristupa je da se sva oprema od centralnog čvora (kojeg smo mi integrirali unutar gradskog čvora) pa do korisnika udvostručuje, ali mu je velika prednost to što nam omogućuje da s manjim brojem udaljenih čvorova poslužujemo više korisnika i da korisnicima omogućujemo veće brzine prijenosa.



Slika 4.2 Struktura gradskog čvora za posluživanje jednog udaljenog čvora

Dolazni multipleksirani promet iz udaljenog čvora ulazi u gradski čvor gdje se demultipleksira. Demultipleksirani kanali ulaze u prospojnu matricu koja se sastoji od optičkih AD multipleksora i tamo se pojedini kanali ili propuštaju prema izlazu iz čvora u multipleksiranom obliku ili ispuštaju kako bi se dalje mogli prospajati. Nakon ispuštanja ti kanali mogu ostati u optičkoj domeni te dalje idu na optičko prospajanje, ili dolaze do detektora koji ih pretvaraju u električne signale pogodne za prospajanje u električnoj domeni. Također, ukoliko su neki kanali ispušteni u OADM sekciji, na njihovo mjesto, odnosno, na iste valne duljine ispuštenih kanala dolaze dodani kanali s nekih drugih ulaza u čvor ili ispušteni iz neke druge prospojne matrice. Naravno, ako su u električnoj domeni, prije ulaza u OADM sekciju moraju proći konverziju u

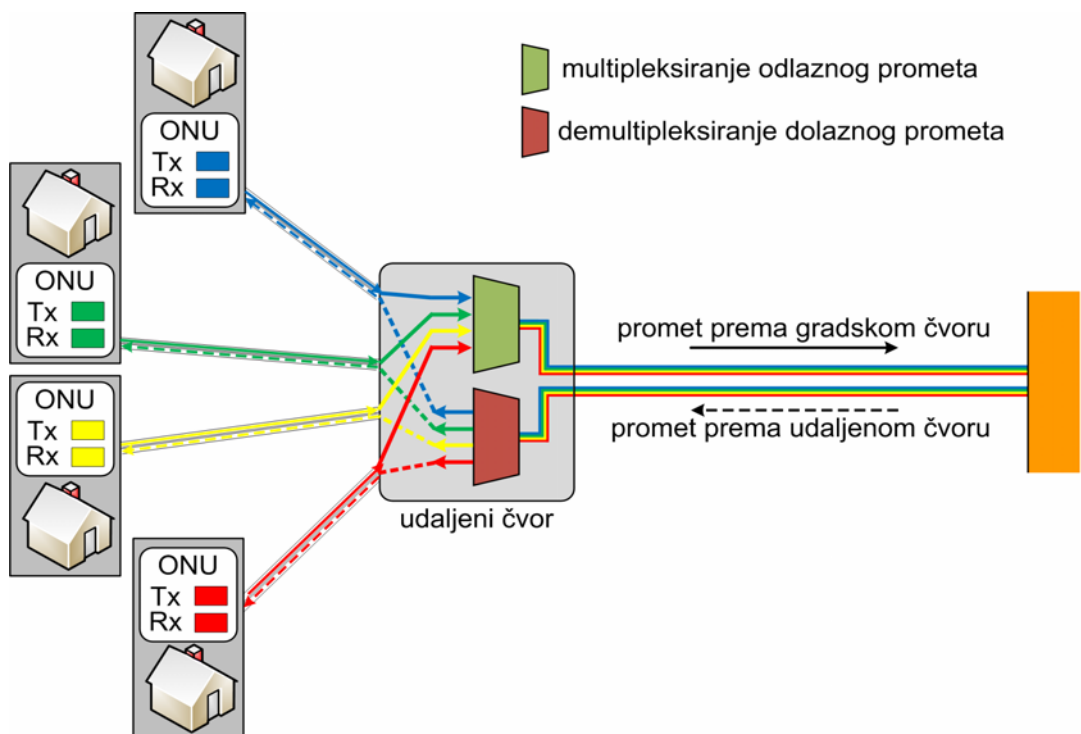
optičku domenu pomoću lasera. Na istom principu, samo u reverznom smjeru, funkcionira struktura čvora za odlazni multipleksirani promet, odnosno za promet prema udaljenom čvoru.

Broj takvih struktura unutar jednog čvora ovisiti će o broju vlakana koja ulaze u čvor, odnosno broju udaljenih čvorova pristupne mreže, što je u direktnoj vezi s tipom pristupne mreže i korištenom tehnologijom valnog multipleksiranja. Isto tako, o tome ovisi i ukupan broj vlakana u gradskom prstenu.

4.2 Struktura pristupne mreže

Razmatrati ćemo dva slučaja, odnosno dva tipa pristupnih PON mreža.

Prvi slučaj je čisti WDM pristup gdje se svakom korisniku dodjeljuje po jedna valna duljina za odlazni i po jedna valna duljina za dolazni promet. Takva mreža se zove WDM PON mreža ili λ -PON mreža, i možemo je vidjeti na slici (Slika 4.3).



Slika 4.3 Princip WDM PON mreže

Promet između gradskog i udaljenog čvora se odvija pomoću dva vlakna jer smo odabrali pristup s dva vlakna. Jedno vlakno prenosi promet u smjeru od udaljenog čvora prema gradskom čvoru, a drugo od gradskog čvora prema udaljenom čvoru. U udaljenom čvoru imamo dvije komponente, jedan multipleksor koji na jedno vlakno multipleksira kanale dobivene od korisnika i šalje ih gradskom čvoru, te jedan demultipleksor koji multipleksirane kanale dobivene iz gradskog čvora demultipleksira i šalje korisnicima. Od udaljenog čvora prema svakom korisniku promet se prenosi s dva vlakna od kojih jedno vlakno nosi dolazni promet a drugo odlazni promet. Na taj način je eliminirana potreba za dodatnim demultipleksiranjem signala u korisničkim prostorijama i moguće je koristiti istu valnu duljinu za slanje i primanje prometa.

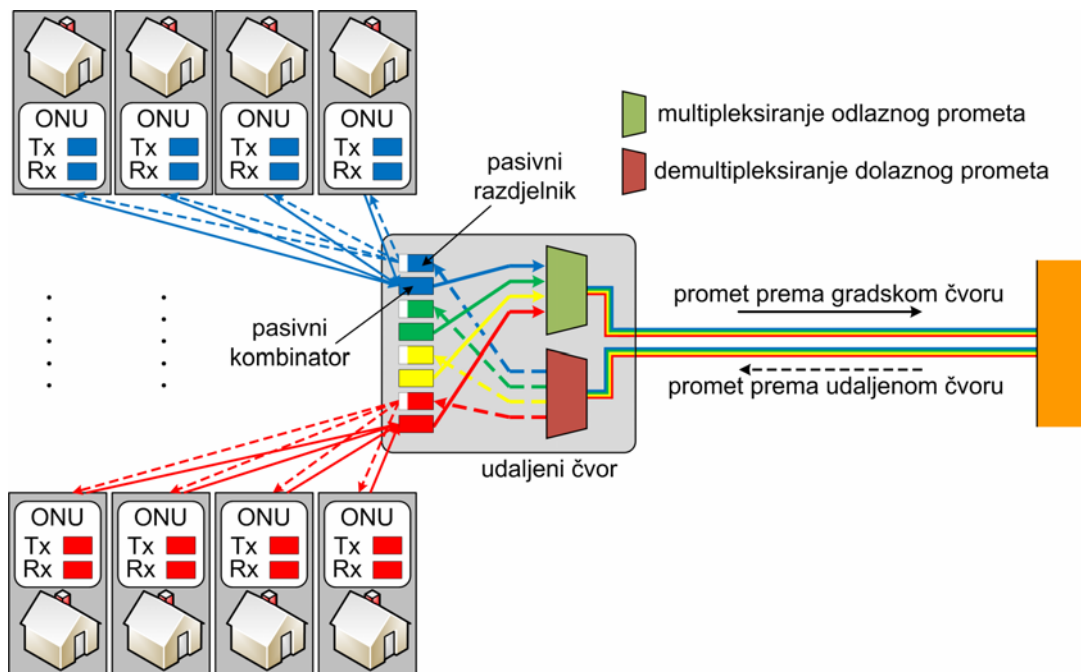
WDM PON mreže pružaju krajnjim korisnicima gotovo beskonačan kapacitet u oba prometna smjera. Koristeći CWDM tehnologiju s 16 kanala i već navedeni pristup s dvostrukim vlaknom, moguće je svakom korisniku pružiti maksimalnu brzinu prijenosa od 2.5 Gbit/s u svakom prometnom smjeru. 40 kanalni DWDM sustav može pružiti još i veće brzine prijenosa, do 10 Gbit/s u našem slučaju. Te brzine su, ako pogledamo tablicu (**Tablica 4.1**) preuzetu iz [16] koja donosi pregled potrebnog kapaciteta (eng. *bandwidth*), za današnje potrebe korisnika i više nego zadovoljavajuće. Čak i ako uzmemo u obzir i neke buduće prometne zahtjeve, mala je vjerojatnost da i tada kapacitet WDM PON mreže neće biti dovoljan. Zato kažemo da WDM mreže pružaju gotovo beskonačan kapacitet korisnicima.

Tablica 4.1 Trenutni prometni zahtjevi pojedinih usluga

Usluga	Potrebna propusnost
HDTV	20 Mbit/s
Digitalna televizija	4-6 Mbit/s
HQ Audio <i>Streaming</i>	500 kbit/s
HQ Video <i>Streaming</i>	1 Mbit/s
Virtualne usluge	2-5 Mbit/s
Online igre	1-10 Mbit/s
Udaljena kontrola uređaja	<500 kbit/s
Pretraživanje Interneta	2-5 Mbit/s
Dijeljenje datoteka i P2P	5-10 Mbit/s

Mana WDM PON mreže je njezina cijena, ponajviše gledajući trošak izgradnje takve strukture. Koristeći WDM tehnologiju, maksimalan broj korisnika koje jedan izgrađeni udaljeni čvor može posluživati jednak je broju kanala koje dotični sustav koristi. Kod CWDM-a je broj korisnika po udaljenom čvoru jednak 16, a kod DWDM-a je u našem slučaju 40. Takav pristup drastično povećava broj udaljenih čvorova koje je potrebno izgraditi.

Drugačiji pristup izgradnji pasivnih pristupnih mreža, koji zahtijeva puno manje udaljenih čvorova je kombinacija valnog i vremenskog multipleksiranja (eng. *time division multiplexing*, skraćeno TDM). Primjer takve PON mreže možemo vidjeti na slici (**Slika 4.4**) i naziva se hibridna WDM TDM PON mreža [19].



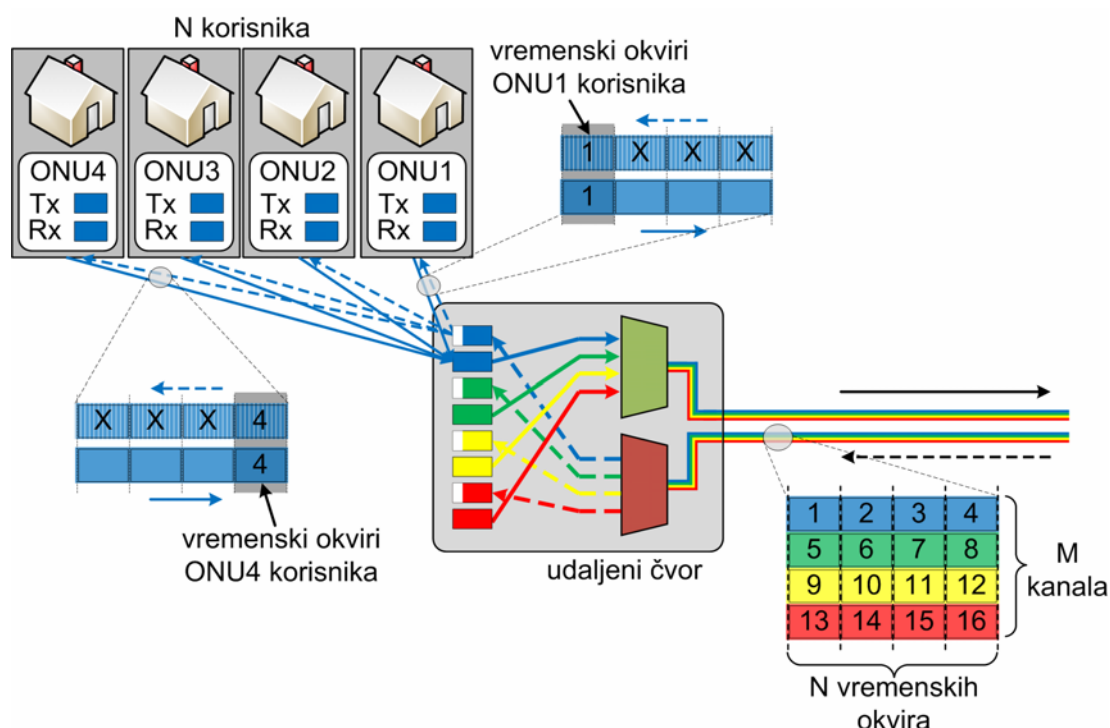
Slika 4.4 Hibridna WDM TDM PON mreža

Distribucijski dio mreže koji povezuje gradski čvor s udaljenim čvorom je nepromjenjen u odnosu na WDM PON mrežu. Promet prema korisniku ulazi u udaljeni čvor te se demultipleksira. Nakon demultipleksiranja pojedini kanali više ne ulaze direktno u vlakno prema korisniku već svaki kanal dolazi do svojeg unaprijed definiranog pasivnog razdjelnika. Na tom pasivnom

razdjelniku snaga kanala se ravnomjerno dijeli na N korisničkih dolaznih vlakana. Broj N je omjer dijeljenja pasivnog razdjelnika i on obično iznosi od 4 do 64. Mi ćemo uzeti da je taj omjer jednak 32 (na slici (**Slika 4.4**) on iznosi 4).

Na sličan način funkcionira odlazni promet, odnosno promet u smjeru od korisnika prema gradskom čvoru. Svaki od N korisnika šalje po svom odlaznom vlaknu promet prema udaljenom čvoru, točnije, njegovo odlazno vlakno je spojeno s unaprijed definiranim pasivnim kombinatorom. Pasivni kombinator spaja N dolaznih signala u jedan, te takav signal, zajedno s ostalih M-1 spojenih signala iz drugih kombinatora ulaze u multipleksor gdje se u multipleksiranom obliku prenose prema gradskom čvoru. M je broj kanala u pojedinom valnom multipleksu. U našem primjeru taj broj je isto 4.

Postavlja se pitanje da gdje u ovoj mreži postoji primjena vremenskog multipleksa, i da kako je moguće da N korisnika na istoj valnoj duljini šalju svoje signale u jedan kombinator. Objašnjenje se nalazi na slici (**Slika 4.5**).



Slika 4.5 Vremensko multipleksiranje u WDM TDM PON mreži

Svaki od M valno multipleksiranih dolaznih kanala je vremenski multipleksiran s N vremenskih okvira. Takvo vremensko multipleksiranje je tip simetričnog multipleksiranja u kojem svaka korisnička jedinica ima jednak broj vremenskih okvira, dakle i jednaku brzinu prijenosa. Nakon pasivnog razdjelnika takav signal se dijeli u N dolaznih vlakana koji vode do svakog ONU-a. Budući da razdjelnik samo dijeli snagu signala, svi okviri će doći do svake od ONU jedinica, no isto tako pojedina ONU jedinica zna u kojem vremenskom okviru se nalazi njen podatkovni okvir te će njega primiti a ostale odbaciti. Na isti način se vrši slanje podatkovnih okvira jer svaka ONU jedinica zna koji je njen odlazni vremenski okvir.

Nakon svega navedenoga, možemo zaključiti da broj korisnika ovisi o faktoru dijeljenja razdjelnika i broju valno multipleksiranih kanala.

Ako odaberemo da razdjelnik ima faktor dijeljenja signala 32, tada uz 16 kanala koje nam pruža CWDM tehnologija možemo posluživati 512 korisnika, i to u oba smjera jer smo odabrali takvu strukturu. Uz faktor dijeljenja 32, i 40 kanala iz DWDM sustava broj korisnika koje jedan udaljeni čvor može posluživati iznosi 1280. Uz simetrično vremensko multipleksiranje i dijeljenje jednog valnog kanala na 32 jednaka vremenska okvira, brzine prijenosa pojedinih korisnika iznose 78.125 Mbit/s za CWDM sustav brzine 2.5 Gbit/s, te 312.5 Mbit/s za DWDM sustav brzine 10 Gbit/s.

Za faktor dijeljenja razdjelnika koji iznosi 64, te vremenski multipleksiran kanal na 64 okvira, broj korisnika po jednom udaljenom čvoru jednak je 1024 u CWDM slučaju, a u DWDM slučaju je 2560. Tada, CWDM brzina prijenosa za pojedinog korisnika iznosi 39 Mbit/s, a DWDM brzina 156.25 Mbit/s i to u oba smjera.

4.3 Usporedba troškova za različite strukture mreža

4.3.1 Troškovi gradske mreže

Gradsku mrežu smo, neovisno o korištenoj tehnologiji, podijelili na 8 gradskih čvorova. Broj tih čvorova će uvijek biti isti, ali ovisno o broju korisnika i korištenoj tehnologiji, mijenjati će se njihova struktura. Također, pošto struktura na slici (**Slika 4.2**) poslužuje samo jedan udaljeni čvor, tip pristupne mreže direktno utječe na složenost jednog gradskog čvora zbog različitog broja korisnika kojeg jedan udaljeni čvor poslužuje.

Komponente koje ćemo uzeti u obzir su laserski predajnici, filtri, optički dodaj/ispusti multipleksori i vlakna.

CWDM sustav koristi nehlađene DFB lasere, dok DWDM sustav koristi hlađene DFB lasere. Prema [2], nehlađeni DFB laseri iznose 1/3 cijene hlađenih. Također prema [2], osnovni dio multipleksora i demultipleksora, optički filter, je za 50% jeftiniji po kanalu kod CWDM sustava zato jer je u CWDM sustavu on baziran na TFF tehnologiji, a u DWDM sustavu se radi pomoću AWG ili FBG metode.

OADM komponente ćemo uključiti u trošak samo na temelju njihove brojnosti, budući da ćemo koristiti njihove 2x2 izvedbe koje rade na principu ispuštanja i dodavanja samo jednog kanala.

Također, na isti način ćemo uključiti i vlakna, uz napomenu da se u CWDM sustavima s 16 kanala mora koristiti G.652.C ili G.652.D vlakno, dok je u DWDM sustavima za naš primjer preporuka koristiti jedno od vlakana s pomaknutom disperzijom.

U obzir ćemo uzeti još i potrošnju energije, jer DWDM DFB laseri zahtijevaju hlađenje, odnosno, toplinsku kontrolu rada, te iz tog razloga i potrebu za većom količinom električne energije. Potrošnja kod CWDM lasera se kreće između 0.5 do 0.8 W po kanalu, dok je kod DWDM lasera potrošnja energije od 4 do 8 W, također po kanalu.

4.3.1.1 Trošak gradske mreže s WDM PON mrežom

Gledajući sliku (Slika 4.2), vidimo da nam za posluživanje jednog udaljenog čvora CWDM tehnologijom s 16 kanala trebaju dva vlakna (koja ćemo uračunati u trošak pristupne mreže), 32 laserska predajnika, 32 prijamnika, 32 OADM-a, dva multipleksora za 16 kanala, dva demultipleksora za 16 kanala, te dva vlakna za izlaz iz čvora zbog pretpostavke da svih 16 kanala iz udaljenog čvora može biti usmjereno prema drugim gradskim čvorovima. Broj udaljenih čvorova određuje koliko ćemo takvih struktura imati u jednom gradskom čvoru, a tip pristupne mreže određuje koliko udaljenih čvorova (eng. *remote node*, skraćeno RN) nam je potrebno. Osnovne informacije o strukturi gradskog čvora za CWDM slučaj i uz WDM PON pristupnu mrežu nalaze se u tablici (Tablica 4.2).

Tablica 4.2 Detaljan opis CWDM strukture gradskog čvora za WDM PON

CWDM (WDM PON)				
Broj korisnika	100 000	50000	10000	
Broj gradskih čvorova	8	8	8	
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250	
Broj korisnika/RN	16	16	16	
Broj RN/gradski čvor	782	391	79	
Max brzina/korisnik [Gbit/s]	2,50	2,50	2,50	
Broj komponenti i potrošnja energije unutar gradskog čvora po jednom RN-u				
Laserski predajnici [komada]	32			
Potrošnja [W] (0.65 W/laser)	20,80			
Prijamnici [komada]	32			
Filtri	Multipleksori	2 x 16 kanala		
	Demultipleksori	2 x 16 kanala		
	OADM	32 x 1 kanal		
Ukupno kanala za filtriranje	96			
Vlakna [komada]	2			
Ukupan broj komponenti i potrošnja energije po jednom gradskom čvoru				
Laserski predajnici [komada]	25024	12512	2528	
Potrošnja [W] (0.65 W/laser)	16265,60	8132,80	1643,20	
Prijamnici [komada]	25024	12512	2528	
Filtri	Multipleksori	1564 x 16 kanala	782 x 16 kanala	158 x 16 kanala
	Demultipleksori	1564 x 16 kanala	782 x 16 kanala	158 x 16 kanala
	OADM	25024 x 1 kanal	12512 x 1 kanal	2528 x 1 kanal
Ukupno kanala za filtriranje:	75072	37536	7584	
Vlakna [komada]	1564	782	158	

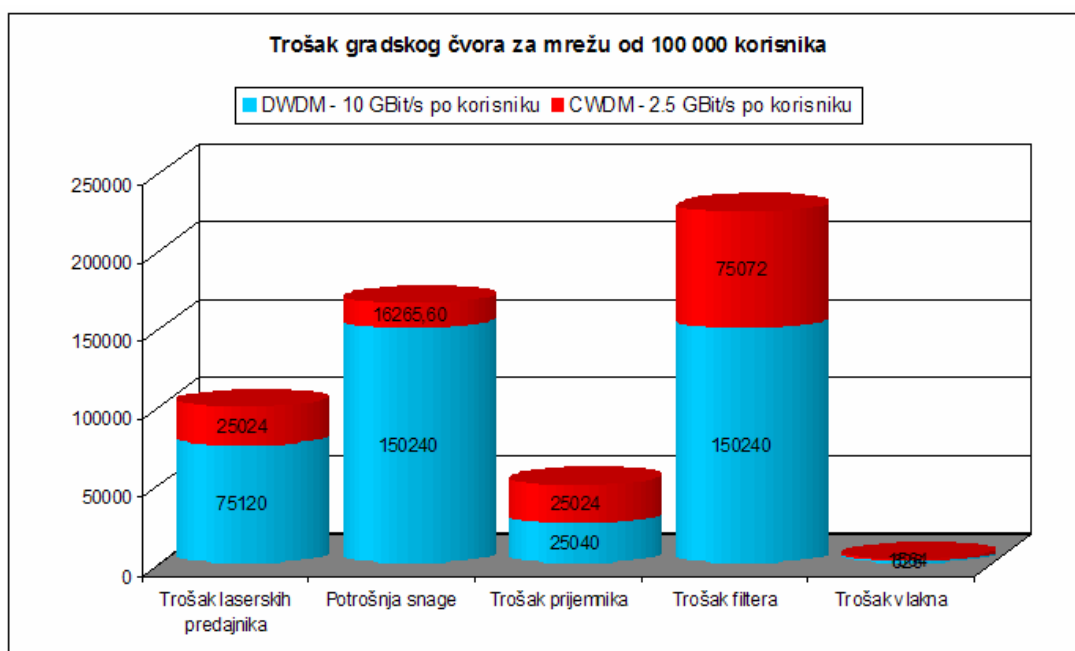
DWDM struktura sadrži nešto drugačiji broj komponenti, što možemo vidjeti na tablici (**Tablica 4.3**). Maksimalan broj korisnika po jednom RN-u je sada 40, odnosno jednak broju kanala DWDM sustava. Također, smanjen je i broj RN-ova, ali taj trošak ćemo uračunati u troškove pristupne mreže. Utrošak snage za DWDM lasere iznosi 6W/laseru, što je sredina između navedene minimalne i maksimalne potrošnje lasera. Isto smo primijenili i za CWDM lasere.

Tablica 4.3 Detaljan opis DWDM strukture gradskog čvora za WDM PON

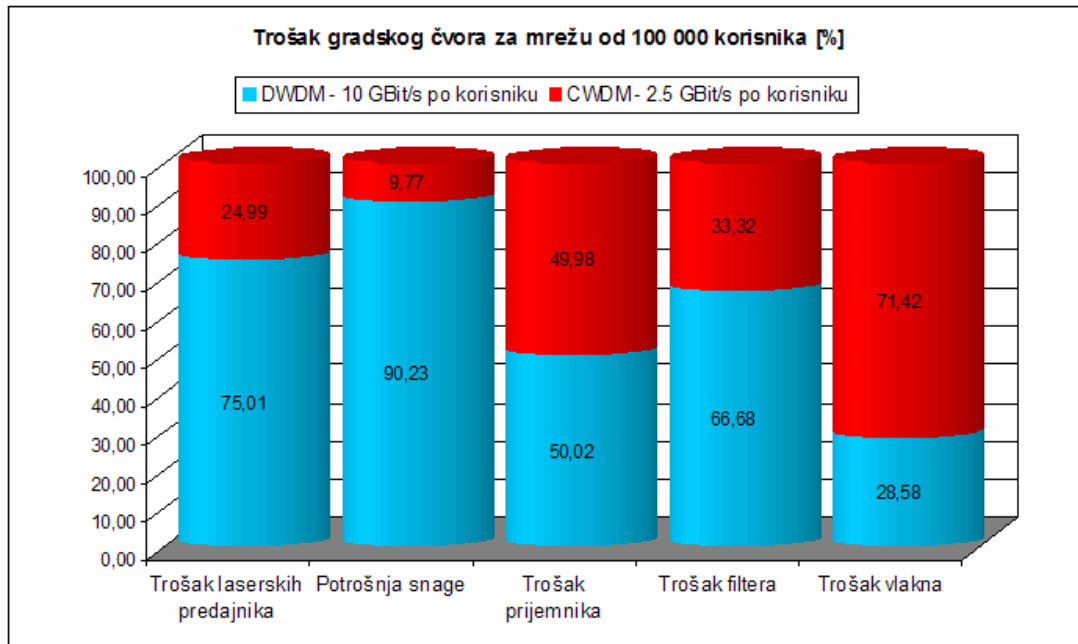
DWDM (WDM PON)			
Broj korisnika	100 000	50000	10000
Broj gradskih čvorova	8	8	8
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250
Broj korisnika/RN	40	40	40
Broj RN/gradski čvor	313	157	32
Max brzina/korisnik [Gbit/s]	10,00	10,00	10,00
Broj komponenti i potrošnja energije unutar gradskog čvora po jednom RN-u			
Laserski predajnici [komada]	80		
Potrošnja [W] (6 W/laser)	480,00		
Prijamnici [komada]	80		
Filtri	Multiplesori	2 x 40 kanala	
	Demultiplesori	2 x 40 kanala	
	OADM	80 x 1 kanal	
Ukupno kanala za filtriranje	240		
Vlakna [komada]	2		
Ukupan broj komponenti i potrošnja energije po jednom gradskom čvoru			
Laserski predajnici [komada]	25040	12560	2560
Potrošnja [W] (6 W/laser)	150240,00	75360,00	15360,00
Prijamnici [komada]	25040	12560	2560
Filtri	Multiplesori	626 x 40 kanala	314 x 40 kanala
	Demultiplesori	626 x 40 kanala	314 x 40 kanala
	OADM	25040 x 1 kanal	12560 x 1 kanal
Ukupno kanala za filtriranje:	75120	37680	7680
Vlakna [komada]	626	314	64
Ukupan broj komponenti i potrošnja energije po jednom gradskom čvoru [vs.CWDM]			
Trošak laserskih predajnika	75120	37680	7680
Potrošnja snage	150240,00	75360,00	15360,00
Trošak prijarnika	25040	12560	2560
Trošak filtera	150240	75360	15360
Trošak vlakna	626	314	64

Zadnji dio tablice (**Tablica 4.3**) sadrži uvećane troškove DWDM strukture čvora u odnosu na CWDM strukturu, i to na način da je kao što smo već prije i naveli, cijena DWDM lasera tri puta veća od CWDM ekvivalenta i da je trošak DWDM filtra po kanalu dva puta veći od CWDM troška.

Na slici (**Slika 4.6**) je grafički prikaz troškova za CWDM i DWDM strukturu gradskog čvora. Vidimo da su troškovi izgradnje CWDM gradskog čvora u skoro svim segmentima bitno manji nego u DWDM slučaju. Postotni prikaz na slici (**Slika 4.7**) detaljnije prikazuje odnos troškova za pojedine troškovne segmente.



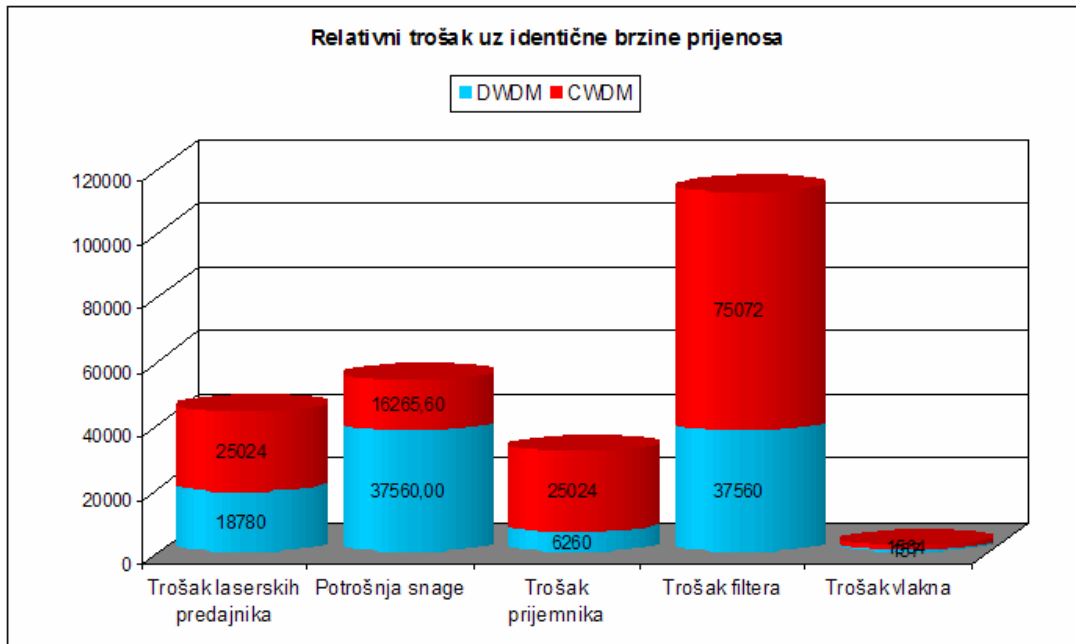
Slika 4.6 Prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM



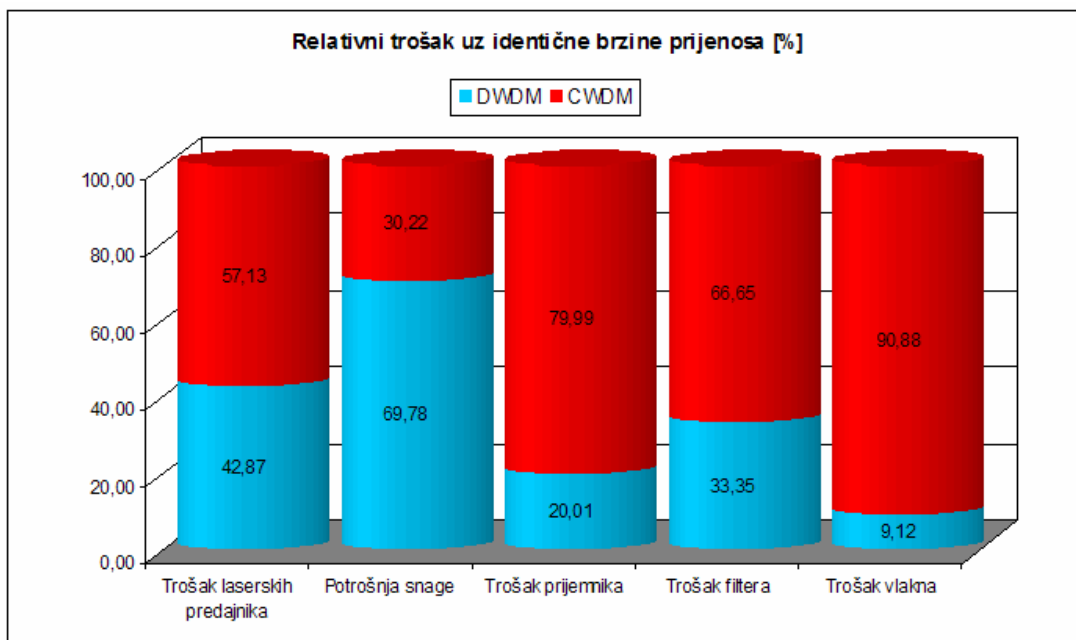
Slika 4.7 Postotni prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM

Na prvi pogled nam se čini da je CWDM tehnologija troškovno puno isplativija nego DWDM, no moramo imati na umu da smo u CWDM slučaju korisniku dali brzinu od 2.5 Gbit/s, dok je kod DWDM-a ta brzina 4 puta veća.

Ako napravimo grafički prikaz troškova (**Slika 4.8** i **Slika 4.9**) tih dvaju tehnologija na način da DWDM troškove smanjimo 4 puta kako bi relativno izjednačili brzine pristupa, vidimo da se u tom slučaju isplativost CWDM-a drastično mijenja. Sada DWDM postaje podjednako ili više isplativa opcija po gigabitu prometa, posebno uzevši u obzir da smo mi ograničili DWDM brzinu prijenosa na 10 Gbit/s iako je takav sustav sposoban i za brzine od 40 Gbit/s. Također, iako smo obradili i prikazali troškove za samo jedan od osam čvorova gradske mreže, omjer troškova bi i za 8 čvorova ostao isti.

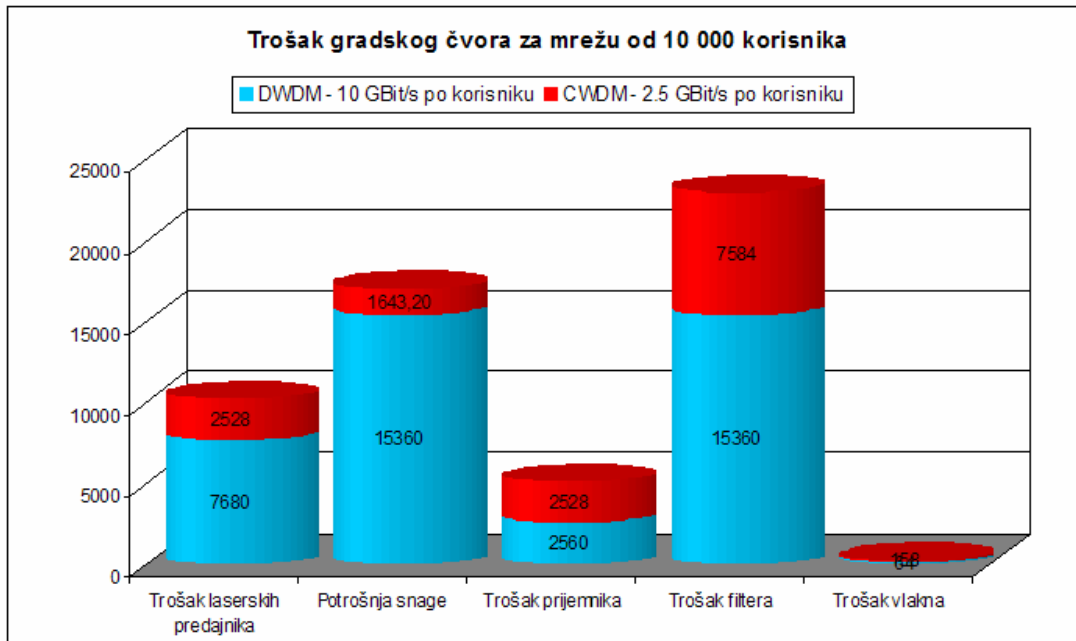


Slika 4.8 Prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM gradskog čvora

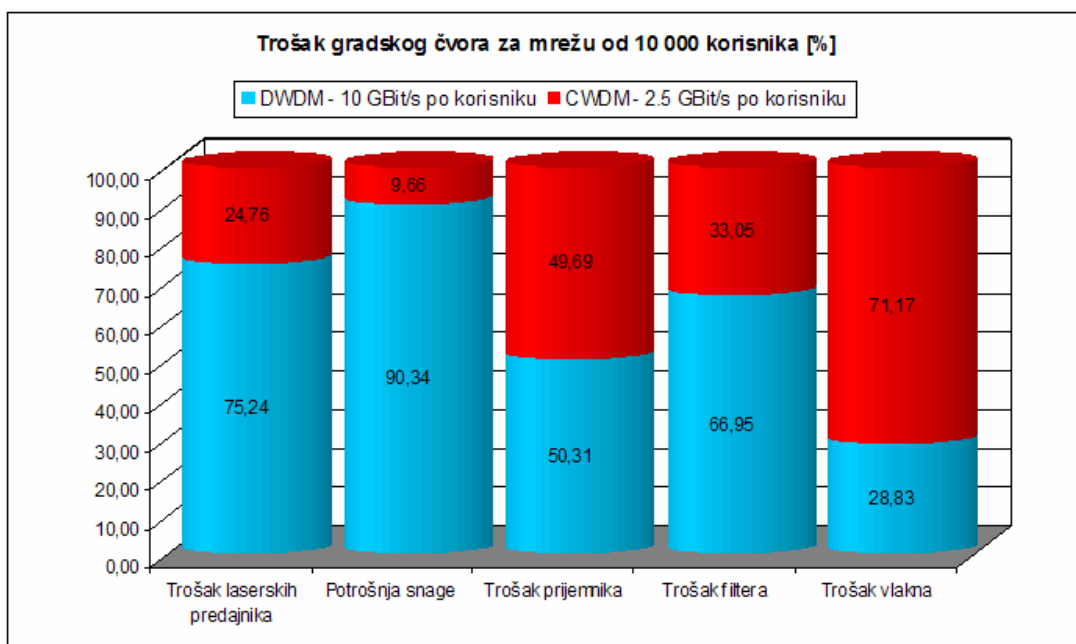


Slika 4.9 Postotni prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM gradskog čvora

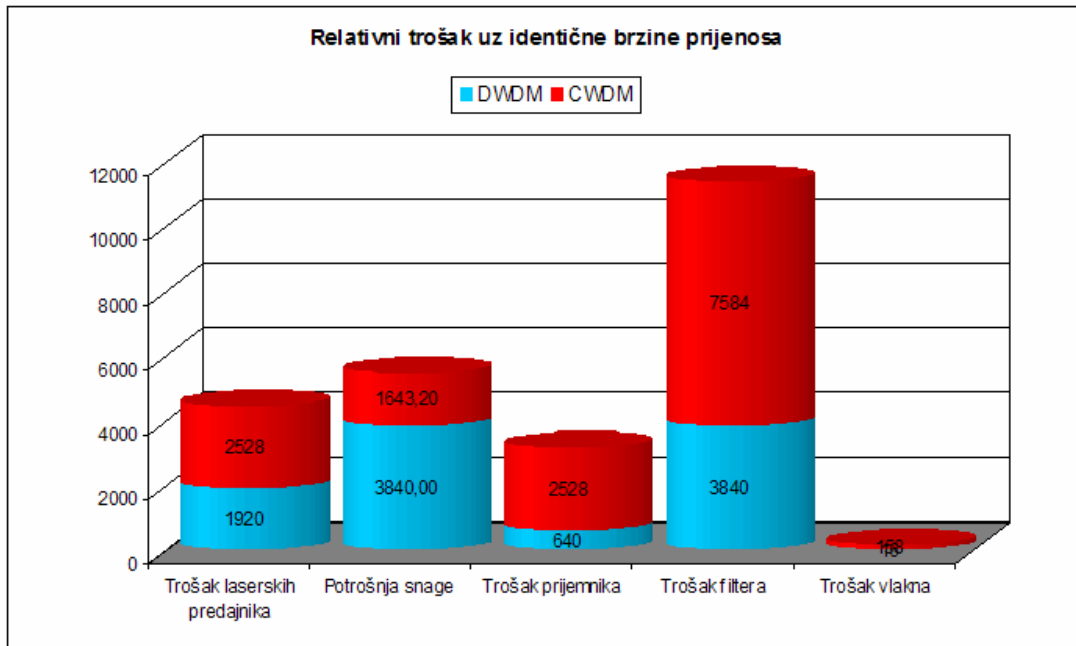
Pokažimo još grafički i odnos troškova za slučaj kada imamo gradsku mrežu s 10 000 korisnika. Na slici (Slika 4.10) i (Slika 4.11) nalazi se stvarni trošak, dok je na slici (Slika 4.12) i (Slika 4.13) relativni trošak takvog čvora.



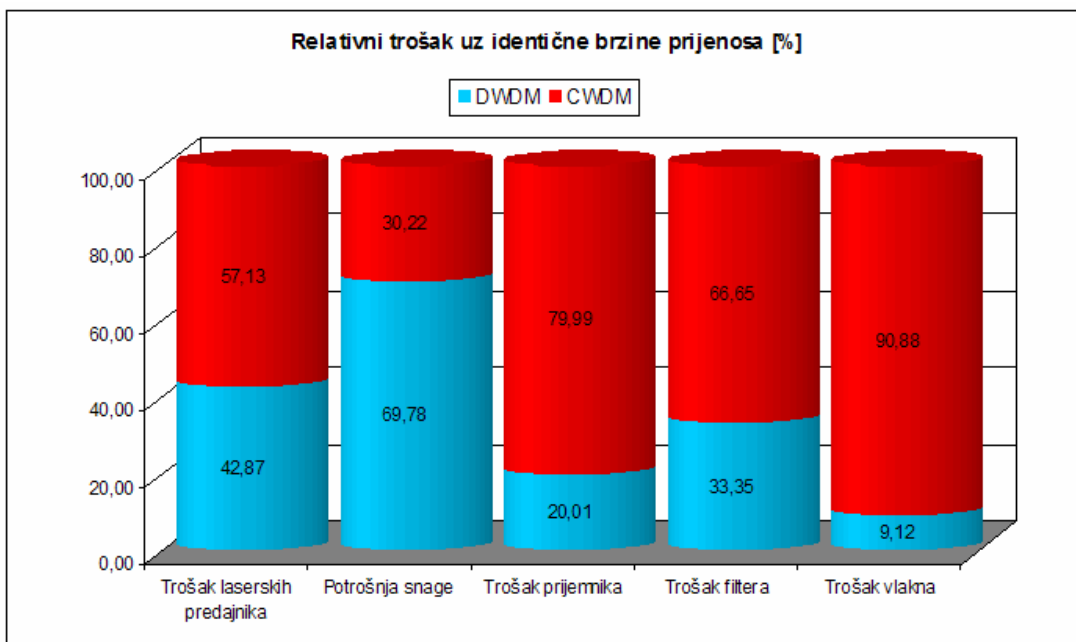
Slika 4.10 Prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika)



Slika 4.11 Postotni prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika)



Slika 4.12 Prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika)



Slika 4.13 Postotni prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika)

Osim očekivano manjeg broja potrebnih komponenti, omjeri troškova za 100 000 i 10 000 korisnika su uglavnom ostali isti, te razliku među njima možemo zanemariti.

4.3.1.2 Trošak gradske mreže s hibridnom WDM TDM PON mrežom

Drugi način izgradnje pristupne mreže o kojoj ovisi struktura gradskog čvora je hibridni WDM TDM pristup, opisan u prethodnih poglavljima. Potrebna struktura gradskog čvora za CWDM i DWDM pristup navedena je u tablicama (Tablica 4.4) i (Tablica 4.5).

Tablica 4.4 Detaljan opis CWDM strukture gradskog čvora za hibridnu WDM TDM PON

CWDM (Hibridna WDM TDM PON)				
Broj korisnika	100 000	50000	10000	
Broj gradskih čvorova	8	8	8	
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250	
Broj korisnika/RN	512	512	512	
Broj RN/gradski čvor	25	13	3	
Max brzina/korisnik [Mbit/s]	78,125	78,125	78,125	
Broj komponenti i potrošnja energije unutar gradskog čvora po jednom RN-u				
Laserski predajnici [komada]	32			
Potrošnja [W] (0.65 W/laser)	20,80			
Prijamnici [komada]	32			
Filtri	Multiplesori	2 x 16 kanala		
	Demultiplesori	2 x 16 kanala		
	OADM	32 x 1 kanal		
Ukupno kanala za filtriranje	96			
Vlakna [komada]	2			
Ukupan broj komponenti i potrošnja energije po jednom gradskom čvoru				
Laserski predajnici [komada]	800	416	96	
Potrošnja [W] (0.65 W/laser)	520,00	270,40	62,40	
Prijamnici [komada]	800	416	96	
Filtri	Multiplesori	50 x 16 kanala	26 x 16 kanala	6 x 16 kanala
	Demultiplesori	50 x 16 kanala	26 x 16 kanala	6 x 16 kanala
	OADM	800 x 1 kanal	416 x 1 kanal	96 x 1 kanal
Ukupno kanala za filtriranje:	2400	1248	288	
Vlakna [komada]	50	26	6	

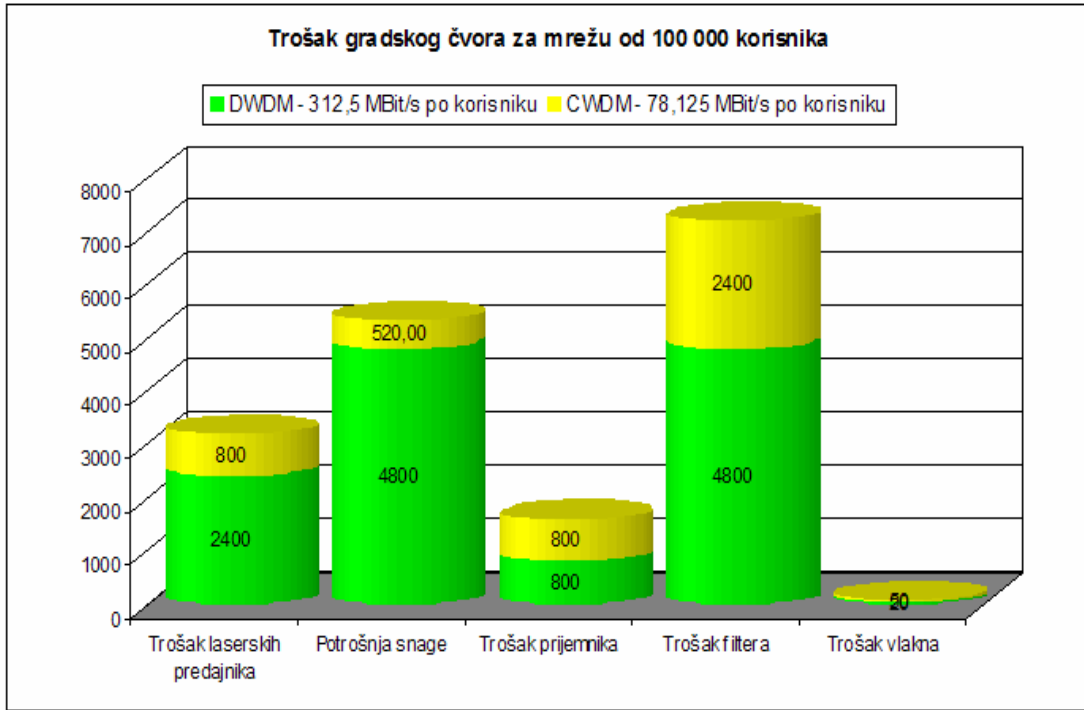
Tablica 4.5 Detaljan opis DWDM strukture gradskog čvora za hibridnu WDM TDM PON

DWDM (Hibridna WDM TDM PON)			
Broj korisnika	100 000	50000	10000
Broj gradskih čvorova	8	8	8
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250
Broj korisnika/RN	1280	1280	1280
Broj RN/gradski čvor	10	5	1
Max brzina/korisnik [Mbit/s]	312,50	312,50	312,50
Broj komponenti i potrošnja energije unutar gradskog čvora po jednom RN-u			
Laserski predajnici [komada]	80		
Potrošnja [W] (6 W/laser)	480,00		
Prijamnici [komada]	80		
Filtri	Multipleksori	2 x 40 kanala	
	Demultipleksori	2 x 40 kanala	
	OADM	80 x 1 kanal	
Ukupno kanala za filtriranje	240		
Vlakna [komada]	2		
Ukupan broj komponenti i potrošnja energije po jednom gradskom čvoru			
Laserski predajnici [komada]	800	400	80
Potrošnja [W] (6 W/laser)	4800,00	2400,00	480,00
Prijamnici [komada]	800	400	80
Filtri	Multipleksori	20 x 40 kanala	10 x 40 kanala
	Demultipleksori	20 x 40 kanala	10 x 40 kanala
	OADM	800 x 1 kanal	400 x 1 kanal
Ukupno kanala za filtriranje:	2400	1200	240
Vlakna [komada]	20	10	2
Ukupan broj komponenti i potrošnja energije po jednom gradskom čvoru [vs.CWDM]			
Trošak laserskih predajnika	2400	1200	240
Potrošnja snage	4800,00	2400,00	480,00
Trošak prijavnika	800	400	80
Trošak filtera	4800	2400	480
Trošak vlakna	20	10	2

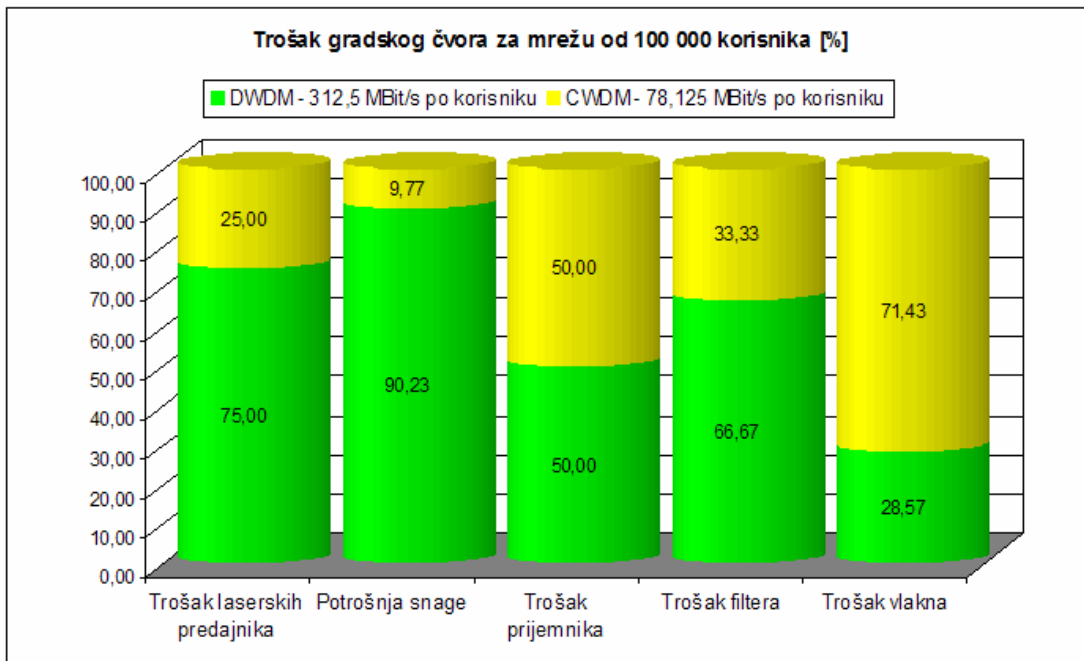
Također, kao i kod WDM PON strukture gradskog čvora, DWDM tablica (**Tablica 4.5**) na kraju sadrži troškove koji su uvećani, i to tri puta u retku koji navodi trošak predajnika i dva puta u retku koji navodi trošak filtera.

Na slici (**Slika 4.14**) vidimo usporedne troškove jednog gradskog čvora izgrađenog na CWDM i DWDM tehnologiji za mrežu od 100 000 korisnika, odnosno, u našem slučaju za 12 500 korisnika koje jedan gradski čvor

poslužuje. Slično kao i kod WDM PON slučaja, CWDM opcija nam izgleda puno isplativija u svakom segmentu troškovnika. Detaljniji omjer troškova svakog segmenta prikazan je u postotcima na slici (Slika 4.15).

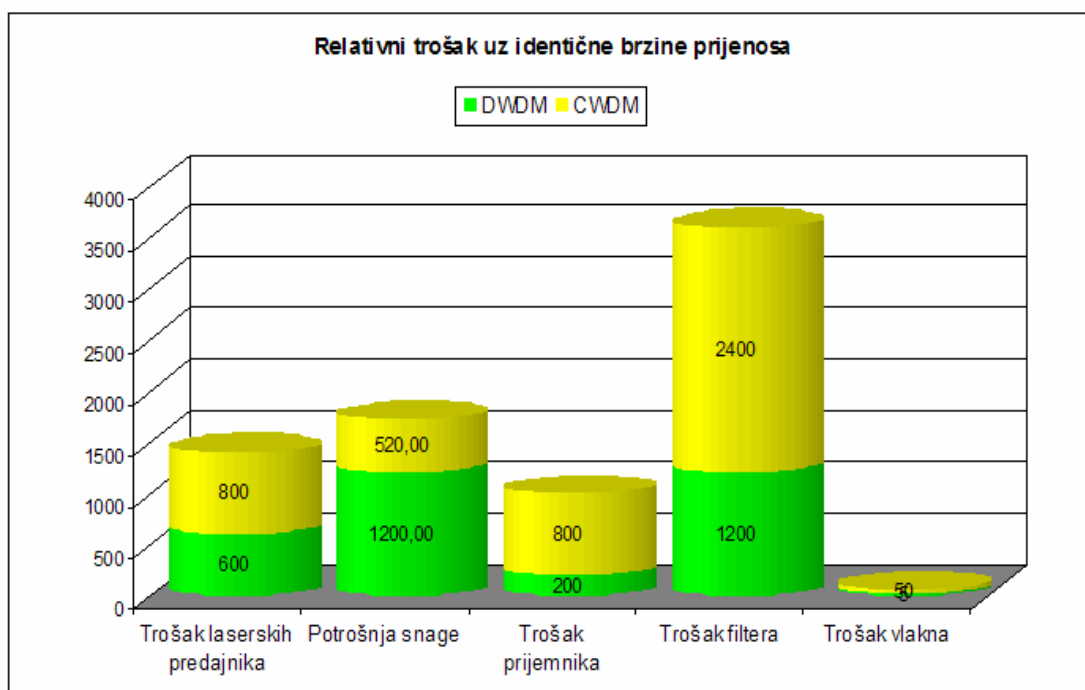


Slika 4.14 Prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)



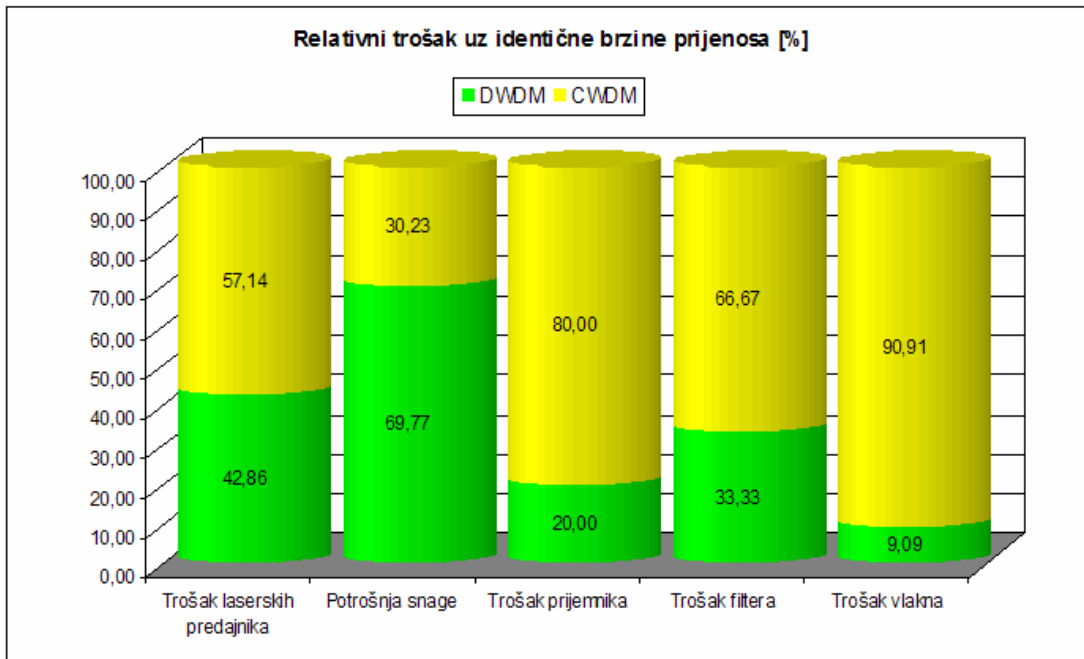
Slika 4.15 Postotni prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)

Slično kao i kod WDM PON pristupa, i ovdje imamo nerazmjer u maksimalnim brzinama krajnjih korisnika. Ako DWDM troškove smanjimo za 4 puta (jer je DWDM brzina 4 puta veća od CWDM brzine), kako bi relativno izjednačili brzine pristupa za oba korisnika, tada se omjer troškova bitno mijenja, što možemo vidjeti na slici (Slika 4.16).



Slika 4.16 Prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)

Osim u segmentu potrošnje energije, DWDM ispada relativno jeftinija opcija. U postotcima svakog segmenta se to vidi na slici (Slika 4.17).



Slika 4.17 Postotni prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)

4.3.2 Troškovi pristupnih mreža

4.3.2.1 Troškovi WDM PON pristupne mreže

Sve što smo naveli kod troškova gradske mreže, vrijedi i kod pristupnih mreža. Broj gradskih čvorova ostaje isti i iznosi 8, i svaki poslužuje jednak broj udaljenih čvorova. Koliki je taj broj ovisiti će o tipu pristupne mreže.

Također, kod proračuna pristupnih mreža vrijediti će isti omjeri troškova kao i kod gradskih mreža.

WDM PON mreža sa slike (**Slika 4.3**) u svojoj CWDM izvedbi može posluživati 16 korisnika po jednom RN-u, a broj RN-ova ovisi o ukupnom broju korisnika u mreži, ili u našem slučaju o broju korisnika po jednom gradskom čvoru što u konačnici rezultira istim omjerima troškova. Opis i troškovnik za takvu CWDM mrežu se nalazi u tablici (**Tablica 4.6**).

Tablica 4.6 Detaljan opis CWDM strukture za WDM PON

CWDM (WDM PON)			
Broj korisnika	100 000	50000	10000
Broj gradskih čvorova	8	8	8
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250
Broj korisnika/RN	16	16	16
Broj RN/gradski čvor	782	391	79
Max brzina/korisnik [Gbit/s]	2,50	2,50	2,50
Broj komponenti za jednu WDM PON mrežu			
Broj vlakana (do RN)	2		
Broj vlakana (do korisnika)	16 x 2		
Filtri	Multipleksori	1 x 16 kanala	
	Demultipleksori	1 x 16 kanala	
ONU	Predajnici	16	
	Prijamnici	16	
Ukupan broj komponenti za maksimalan broj korisnika/gradski čvor			
Broj RN/gradski čvor	782	391	79
Broj vlakana (do RN)	1564	782	158
Broj vlakana (do korisnika)	25024	12512	2528
Ukupan broj vlakana	26588	13294	2686
Filtri [kanala]	Multipleksori	12512	6256
	Demultipleksori	12512	6256
Ukupno kanala za filtriranje	25024	12512	2528
ONU	Predajnici	12512	6256
	Prijamnici	12512	6256
Potrošnja [W] (0.65W/laser)	8132,80	4066,40	821,60

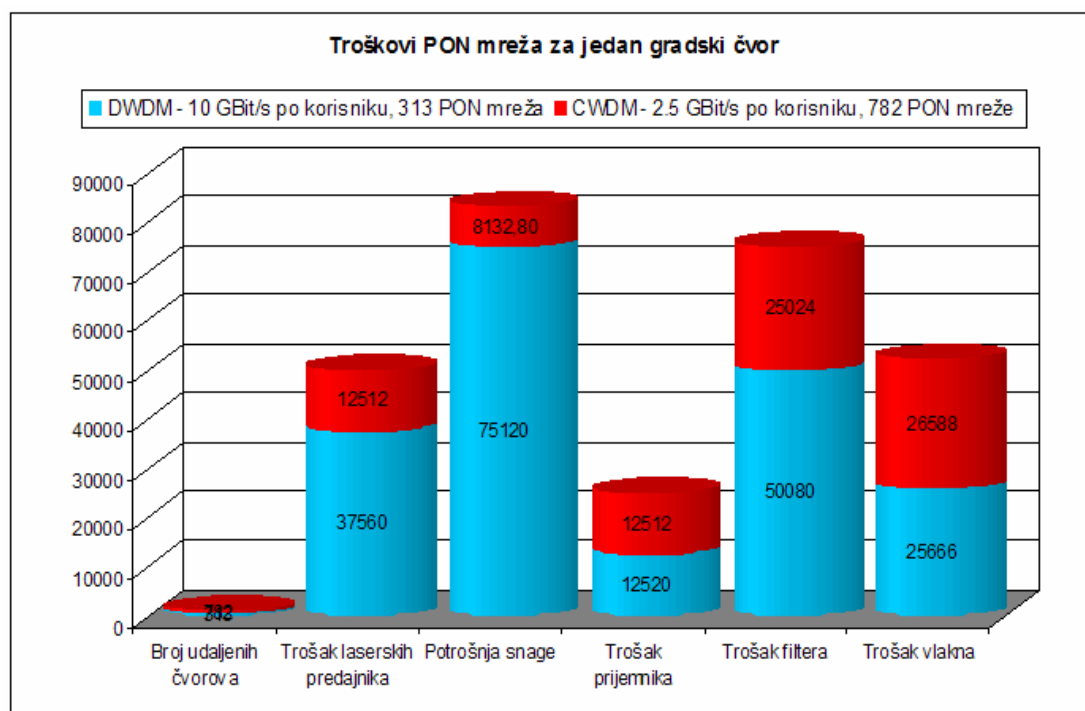
DWDM PON pristupna mreža koristi veći broj kanala te na taj način u odnosu na CWDM mrežu može posluživati više korisnika po jednom RN-u, i isto tako joj je potrebno manje udaljenih čvorova kako bi poslužila isti broj korisnika. Također, sve nužno za proračun DWDM mreže se nalazi u tablici (**Tablica 4.7**).

Tablica 4.7 Detaljan opis DWDM strukture za WDM PON

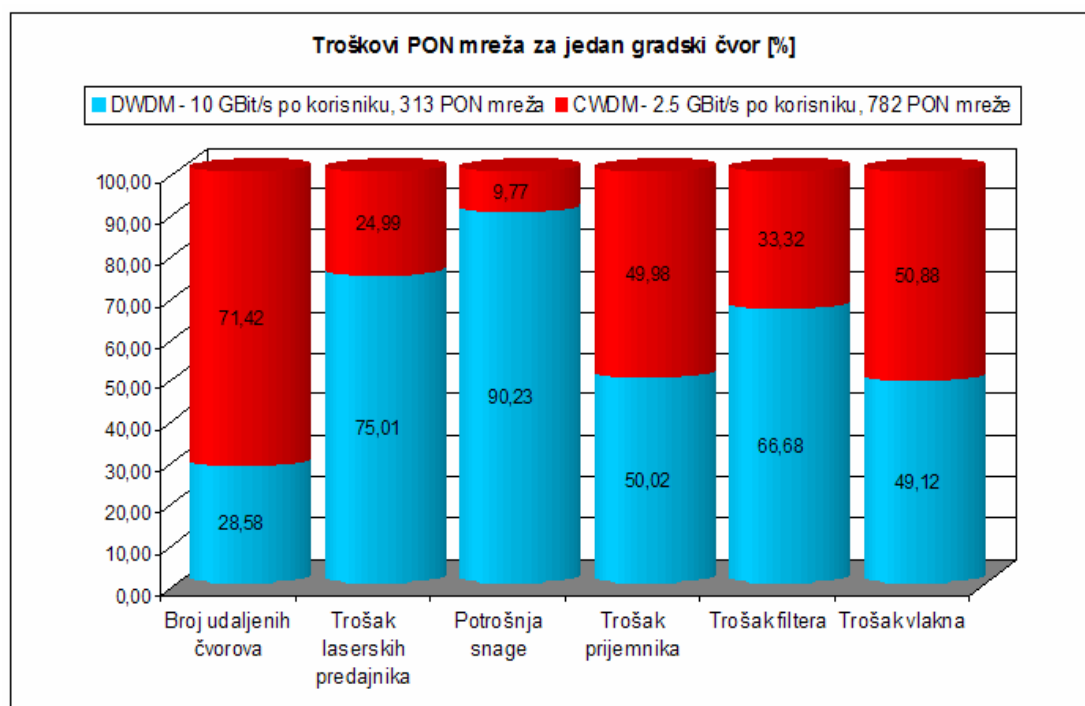
DWDM (WDM PON)			
Broj korisnika	100 000	50000	10000
Broj gradskih čvorova	8	8	8
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250
Broj korisnika/RN	40	40	40
Broj RN/gradski čvor	313	157	32
Max brzina/korisnik [Gbit/s]	10,00	10,00	10,00
Broj komponenti za jednu WDM PON mrežu			
Broj vlakana (do RN)	2		
Broj vlakana (do korisnika)	40 x 2		
Filtri	Multipleksori	1 x 40 kanala	
	Demultipleksori	1 x 40 kanala	
ONU	Predajnici	40	
	Prijamnici	40	
Ukupan broj komponenti za maksimalan broj korisnika/gradski čvor			
Broj RN/gradski čvor	313	157	32
Broj vlakana (do RN)	626	314	64
Broj vlakana (do korisnika)	25040	12560	2560
Ukupan broj vlakana	25666	12874	2624
Filtri [kanala]	Multipleksori	12520	6280
	Demultipleksori	12520	6280
Ukupno kanala za filtriranje	25040	12560	2560
ONU	Predajnici	12520	6280
	Prijamnici	12520	6280
Potrošnja [W] (6W/laser)	75120,00	37680,00	7680,00
Ukupan broj komponenti za maksimalan broj korisnika/gradski čvor [vs.CWDM]			
Broj udaljenih čvorova	313	157	32
Trošak laserskih predajnika	37560	18840	3840
Potrošnja snage	75120,00	37680,00	7680,00
Trošak prijamnika	12520	6280	1280
Trošak filtera	50080	25120	5120
Trošak vlakna	25666	12874	2624

Na slici (**Slika 4.18**) vidimo usporedbu troškova WDM PON mreže za dvije zadane tehnologije. Očekivano, jeftinija opcija je opet CWDM iako ne uvjerljivo kao u prethodnim slučajevima. Troškovi predajnika i filtera, kao i puno veća potrošnja snage idu jako u korist CWDM-a, no troškovi prijamnika i vlakana su izjednačeni. Najveća prednost DWDM-a u ovom slučaju, što se

najbolje vidi na slici (Slika 4.19), je u puno manjem broju udaljenih čvorova, odnosno puno manjim potrebama za opremom na terenu.

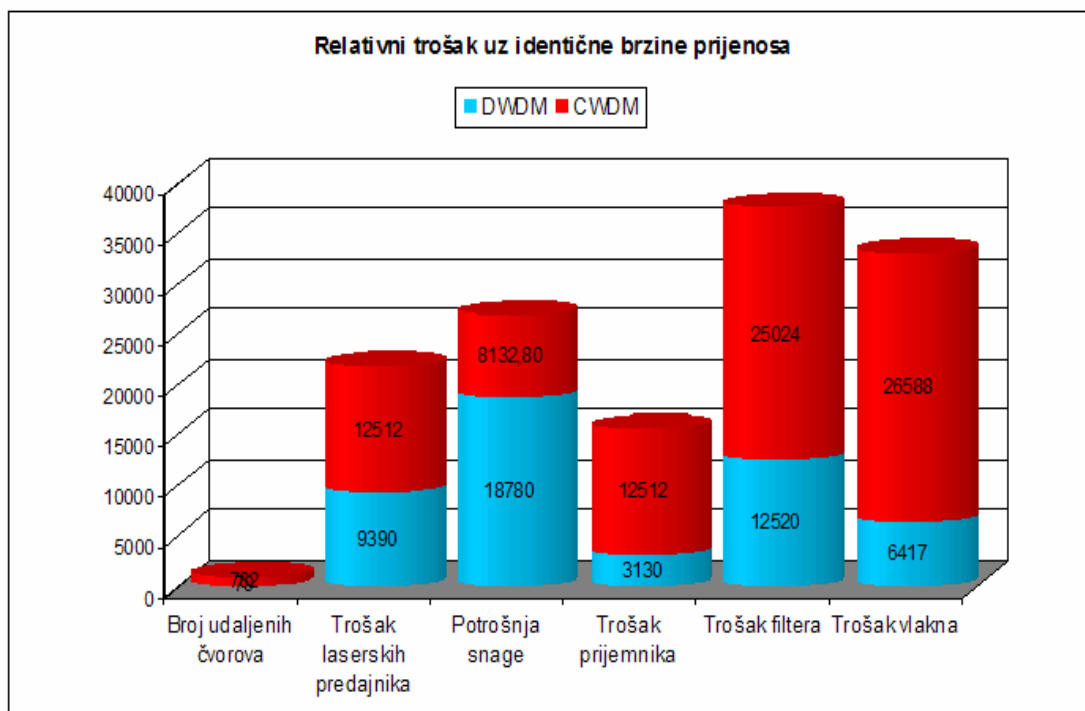


Slika 4.18 Prikaz troškova CWDM/DWDM PON strukture

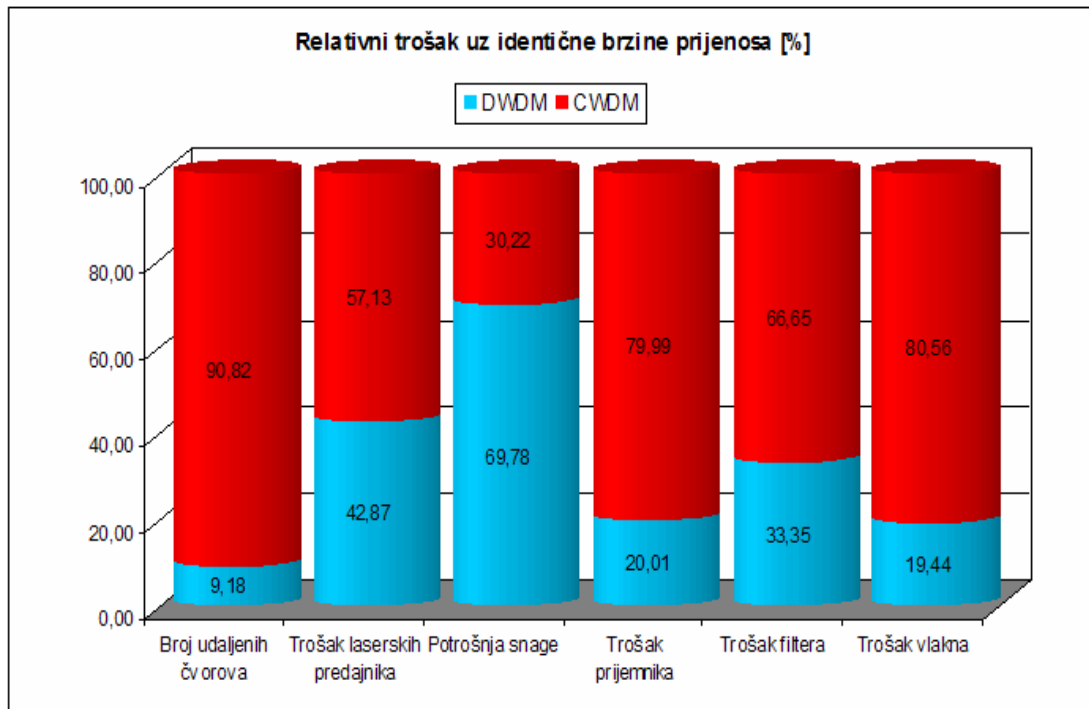


Slika 4.19 Postotni prikaz troškova CWDM/DWDM PON strukture

Budući da smo korisnicima DWDM mreže omogućili 4 puta veći kapacitet, kako bi mogli usporediti troškove na istim brzinama kao i u CWDM slučaju, smanjili smo DWDM troškove 4 puta, i prema slici (**Slika 4.20**) vidimo da bi u tome slučaju DWDM bio isplativija opcija u svim segmentima osim u potrošnji snage. Na slici (**Slika 4.21**) se detaljnije vidi da je u tom slučaju razlika između broja potrebnih udaljenih čvorova još veća.



Slika 4.20 Prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM PON strukture



Slika 4.21 Postotni prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM PON strukture

4.3.2.2 Troškovi hibridne WDM TDM PON pristupne mreže

Hibridna WDM TDM mreža sa slike (Slika 4.4) u CWDM izvedbi ima troškovnik prema tablici (Tablica 4.8). Također, u toj tablici su navedene sve potrebne komponente za izgradnju takve mreže, za slučaj mreže gradskog područja od 100 000, 50 000 i 10 000 korisnika. Isto kao i za CWDM, u tablici (Tablica 4.9) navedene su potrebne komponente i troškovi za izgradnju hibridne WDM TDM PON mreže s DWDM tehnologijom.

Tablica 4.8 Detaljni opis CWDM strukture za hibridnu WDM TDM PON

CWDM (Hibridna WDM TDM PON)			
Broj korisnika	100 000	50000	10000
Broj gradskih čvorova	8	8	8
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250
Broj korisnika/RN	512	512	512
Broj RN/gradski čvor	25	13	3
Max brzina/korisnik [Mbit/s]	78,125	78,125	78,125
Broj komponenti za jednu WDM PON mrežu			
Broj vlakana (do RN)	2		
Broj vlakana (do korisnika)	512 x 2		
Broj razdjelnika/kombinatora	32		
Filtri	Multiplesori	1 x 16 kanala	
	Demultiplesori	1 x 16 kanala	
ONU	Predajnici	512	
	Prijamnici	512	
Ukupan broj komponenti za maksimalan broj korisnika/gradski čvor			
Broj RN/gradski čvor	25	13	3
Broj korisnika/RN	512	512	512
Broj vlakana (do RN)	50	26	6
Broj vlakana (do korisnika)	25600	13312	3072
Ukupan broj vlakana	25650	13338	3078
Filtri [kanala]	Multiplesori	400	208
	Demultiplesori	400	208
Ukupno kanala za filtriranje	800	416	96
ONU	Predajnici	12800	6656
	Prijamnici	12800	6656
Potrošnja [W] (0.65W/laser)	8320,00	4326,40	998,40

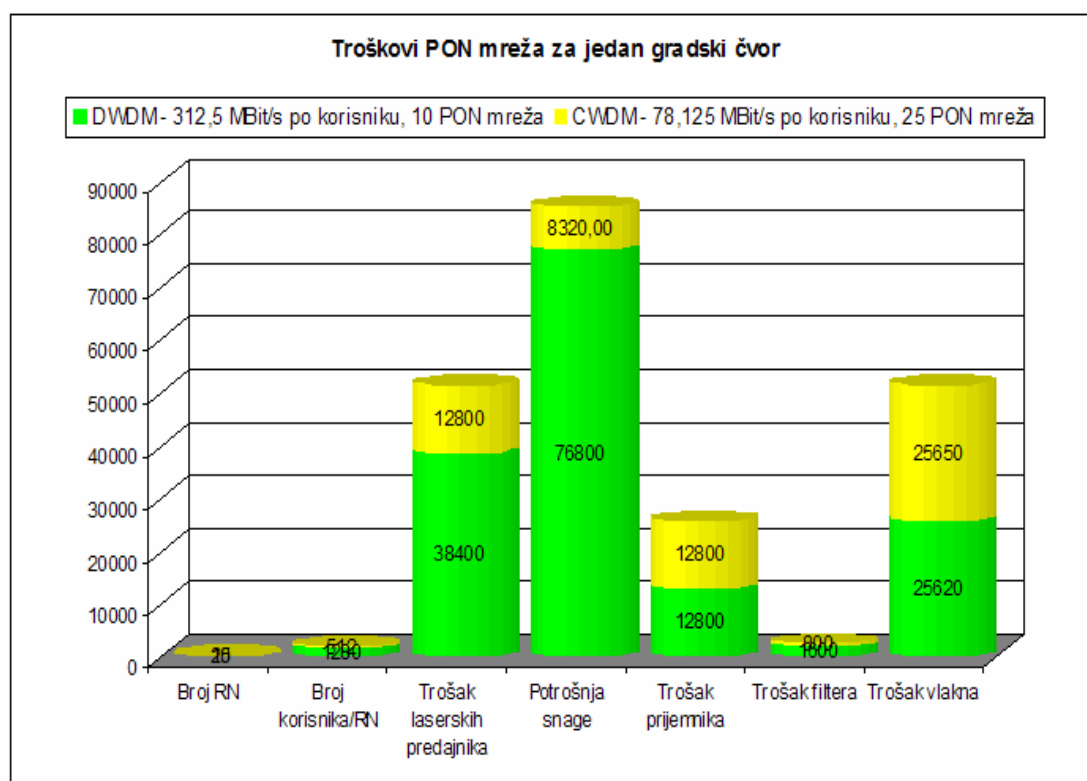
Tablica 4.9 Detaljni opis DWDM strukture za hibridnu WDM TDM PON

DWDM (Hibridna WDM TDM PON)			
Broj korisnika	100 000	50000	10000
Broj gradskih čvorova	8	8	8
Broj korisnika/gradski čvor	12500	6250	1250
Broj korisnika/RN	1280	1280	1280
Broj RN/gradski čvor	10	5	1
Max brzina/korisnik [Mbit/s]	312,50	312,50	312,50
Broj komponenti za jednu WDM PON mrežu			
Broj vlakana (do RN)	2		
Broj vlakana (do korisnika)	1280 x 2		
Broj razdjelnika/kombinatora	80		
Filtri	Multipleksori	1 x 40 kanala	
	Demultipleksori	1 x 40 kanala	
ONU	Predajnici	1280	
	Prijamnici	1280	
Ukupan broj komponenti za maksimalan broj korisnika/gradski čvor			
Broj RN/gradski čvor	10	5	1
Broj korisnika/RN	1280	1280	1280
Broj vlakana (do RN)	20	10	2
Broj vlakana (do korisnika)	25600	12800	2560
Ukupan broj vlakana	25620	12810	2562
Filtri [kanala]	Multipleksori	400	200
	Demultipleksori	400	200
Ukupno kanala za filtriranje	800	400	80
ONU	Predajnici	12800	6400
	Prijamnici	12800	6400
Potrošnja [W] (6W/laser)	76800,00	38400,00	7680,00

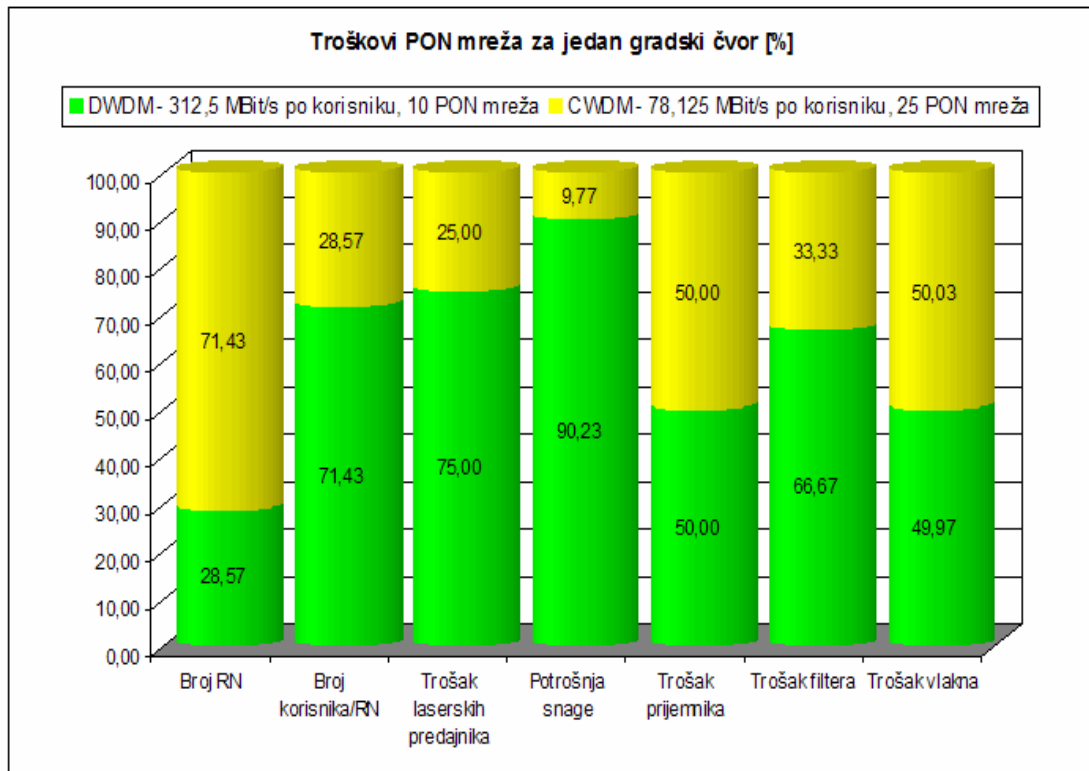
Ukupan broj komponenti za maksimalan broj korisnika/gradski čvor [vs.CWDM]			
Broj RN	10	5	1
Broj korisnika/RN	1280	1280	1280
Trošak laserskih predajnika	38400	19200	3840
Potrošnja snage	76800,00	38400,00	7680,00
Trošak prijamnika	12800	6400	1280
Trošak filtera	1600	800	160
Trošak vlakna	25620	12810	2562

Budući da su troškovi izgradnje u gotovo identičnim omjerima za različiti broj korisnika, i u ovom slučaju ćemo pokazati samo omjere troškova za slučaj od 100 000 korisnika, odnosno, za slučaj kada imamo 12 500 korisnika po jednom gradskom čvoru.

Slika (Slika 4.22) pokazuje da i u ovom slučaju možemo izgraditi jeftiniju pristupnu mrežu koristeći CWDM tehnologiju, uz naravno uvjet da nam je brzina pristupa korisnika od 78,125 Mbit/s zadovoljavajuća i da si možemo priuštiti veći trošak izgradnje udaljenih čvorova, koji je prema slici (Slika 4.23) veći za skoro tri puta.

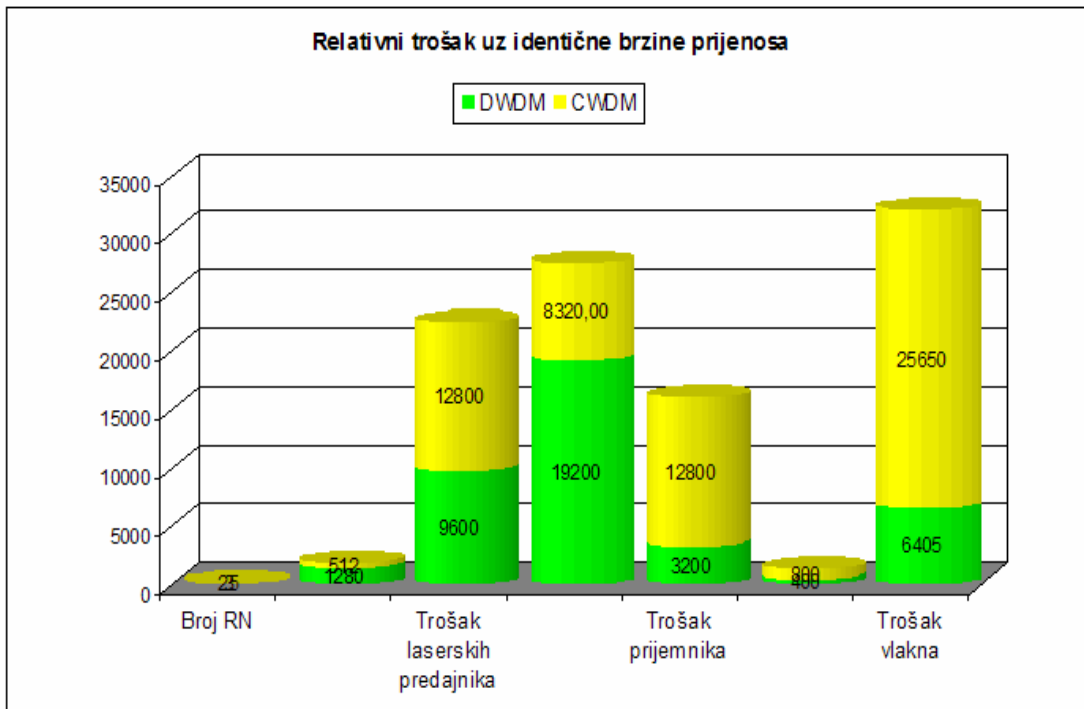


Slika 4.22 Prikaz troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture

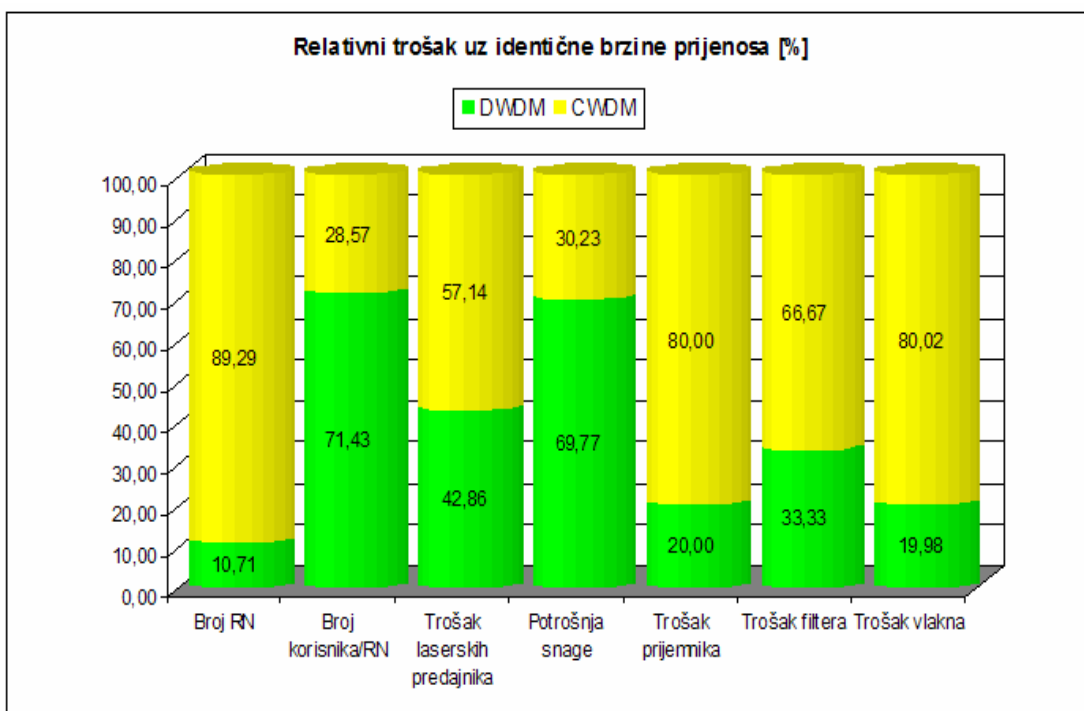


Slika 4.23 Postotni prikaz troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture

Gledajući omjer troškova uz relativno iste brzine pristupa na slici (Slika 4.24), situacija je gotovo identična kao i kod prethodnih slučajeva, i osim u potrošnji snage, DWDM je isplativija solucija. Troškovi izgradnje udaljenih čvorova su prema slici (Slika 4.25) gotovo 9 puta skuplji kod CWDM opcije hibridne WDM TDM pasivne pristupne mreže.



Slika 4.24 Prikaz relativnih troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture



Slika 4.25 Postotni prikaz relativnih troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture

4.3.3 Troškovi lokalnih mreža

Lokalne mreže su jedine mreže gdje nema dileme oko korištene metode valnog multipleksiranja a to ćemo ukratko i pokazati.

Kako smo u prethodnim poglavljima naveli da takve mreže koriste većinom dvije valne duljine na 1310 i 850 nm, po toj pretpostavci bi samo jednu od tih valnih duljina mogli koristiti u našoj analizi, i to 1310 nm u CWDM slučaju, dok u DWDM slučaju ne bi mogli niti jednu jer DWDM koristi drugačiji operativni raspon valnih duljina. Zato ćemo pretpostaviti bilo koje dvije valne duljine, a trošak odnosno omjer cijena komponenti će biti isti kao i kod pristupnih i gradskih mreža.

4.3.3.1 Troškovi *multihop* lokalne mreže

Analizu radimo prema strukturi na slici (**Slika 2.7**). Popis i trošak CWDM komponenti za takvu strukturu s 8, 16 i 24 radne stanice se nalazi u tablici (**Tablica 4.10**). Budući da je broj vlakana i u CWDM i u DWDM slučaju jednak 1, ta komponenta neće ulaziti u proračun. Isti takav popis i troškovi za DWDM slučaj se nalaze u tablici (**Tablica 4.11**). Zadnji dio te tablice sadrži DWDM troškove predajnika uvećane za tri puta, te troškove filtera uvećane za dva puta.

Tablica 4.10 Opis CWDM strukture *multihop* mreže

CWDM <i>Multihop</i>			
Broj stanica u mreži	8	16	24
Broj predajnika/stanica	2		
Potrošnja predajnika [W]	0,65		
Broj prijamnika/stanica	2		
Broj filtera/stanica	2		
Broj predajnika/mreža	16	32	48
Potrošnja snage/mreža [W]	10,40	20,80	31,20
Broj prijamnika/mreža	16	32	48
Broj filtera/mreža	16	32	48

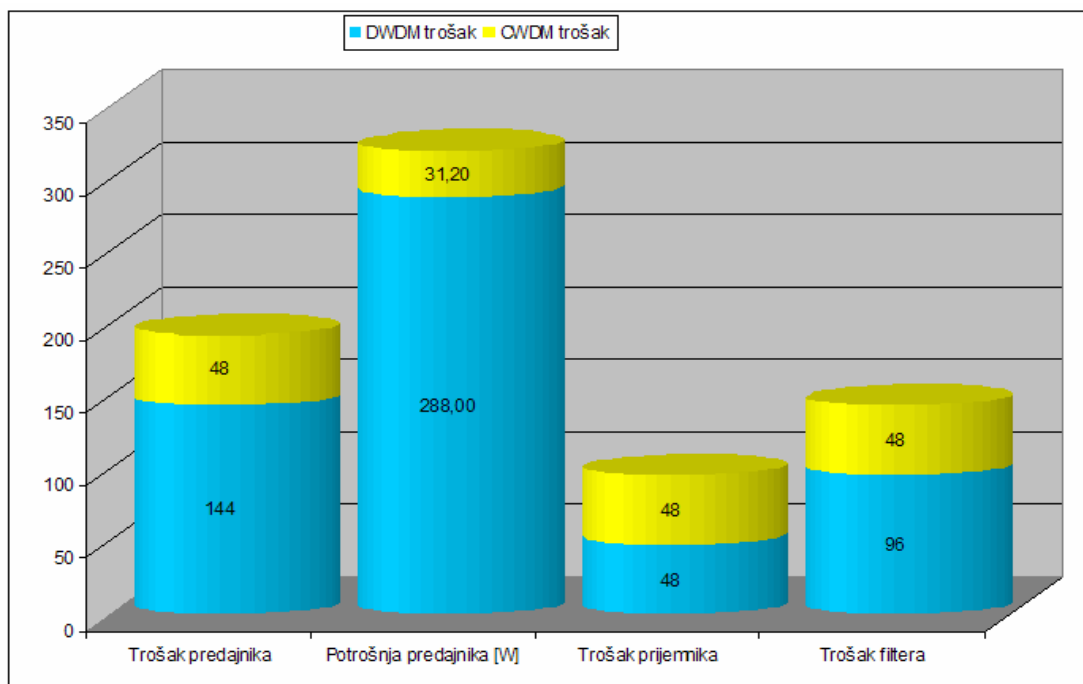
CWDM <i>Multihop</i> trošak			
Broj stanica	8	16	24
Trošak predajnika	16	32	48
Potrošnja predajnika [W]	10,40	20,80	31,20
Trošak prijamnika	16	32	48
Trošak filtera	16	32	48

Tablica 4.11 Opis DWDM strukture *multihop* mreže

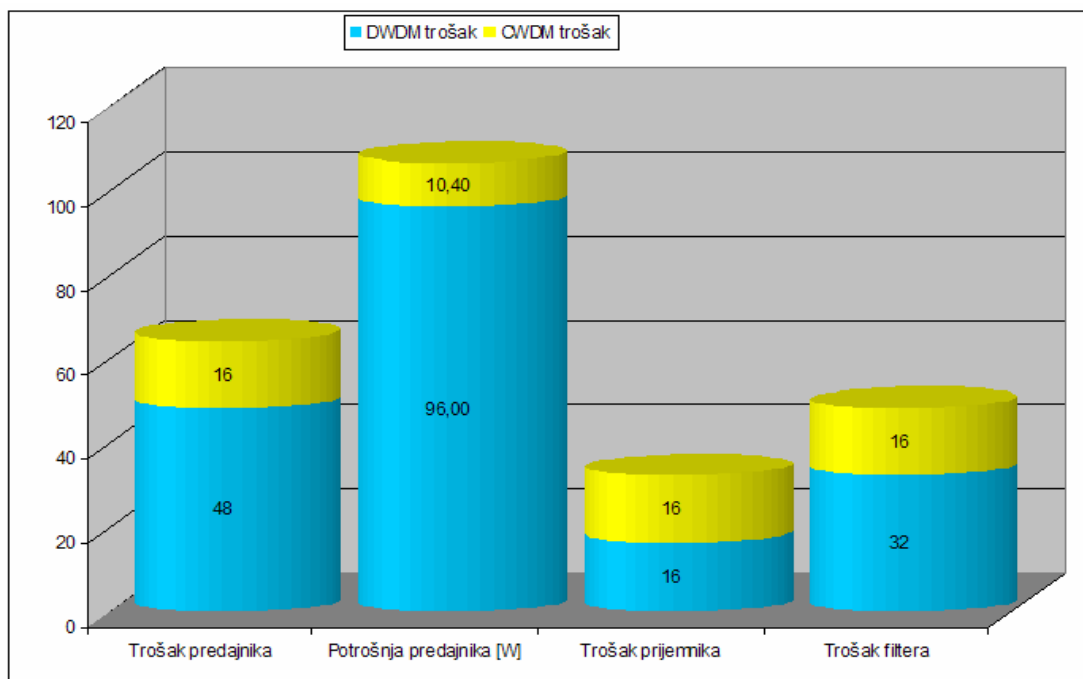
DWDM <i>Multihop</i>			
Broj stanica u mreži	8	16	24
Broj predajnika/stanica	2		
Potrošnja predajnika [W]	6		
Broj prijamnika/stanica	2		
Broj filtera/stanica	2		
Broj predajnika/mreža	16	32	48
Potrošnja snage/mreža [W]	96,00	192,00	288,00
Broj prijamnika/mreža	16	32	48
Broj filtera/mreža	16	32	48

DWDM <i>Multihop</i> Trošak [vs. CWDM]			
Broj stanica	8	16	24
Trošak predajnika	48	96	144
Potrošnja predajnika [W]	96,00	192,00	288,00
Trošak prijamnika	16	32	48
Trošak filtera	32	64	96

Usporedba troškova za lokalnu mrežu s 24 radne stanice je prikazana na slici (Slika 4.26), a za 8 radnih stanica na slici (Slika 4.27). U svim segmentima osim u troškovima prijmnika je CWDM uvjerljivo jeftinija opcija za lokalnu mrežu.



Slika 4.26 Usporedba troškova za *multihop* mrežu s 24 stanice



Slika 4.27 Usporedba troškova za *multihop* mrežu s 8 stanica

4.3.3.2 Troškovi *singlehop* lokalne mreže

Analizirati ćemo trošak *singlehop* lokalne mreže sa slike (**Slika 2.8**). Također, i u ovom slučaju nećemo uzimati u obzir trošak vlakna jer je broj vlakana isti u CWDM i DWDM slučaju, te također iz istog razloga nećemo uzimati u obzir trošak pasivnog zvjezdastog raspredžnika.

U tablici (**Tablica 4.12**) se nalaze troškovi i popis komponenti za CWDM lokalnu mrežu, a u tablici (**Tablica 4.13**) za DWDM lokalnu mrežu. Opis rada takve mreže je već prije opisan pa ga nema potrebe još jednom ponavljati.

Tablica 4.12 Opis CWDM strukture *singlehop* mreže

CWDM <i>Singlehop</i>			
Broj stanica u mreži	8	16	24
Broj predajnika/stanica	1		
Potrošnja predajnika [W]	0,65		
Broj prijarnika/stanica	1		
Broj filtera/stanica	1		
Broj predajnika/mreža	8	16	24
Potrošnja snage/mreža [W]	5,20	10,40	15,60
Broj prijarnika/mreža	8	16	24
Broj filtera/mreža	8	16	24

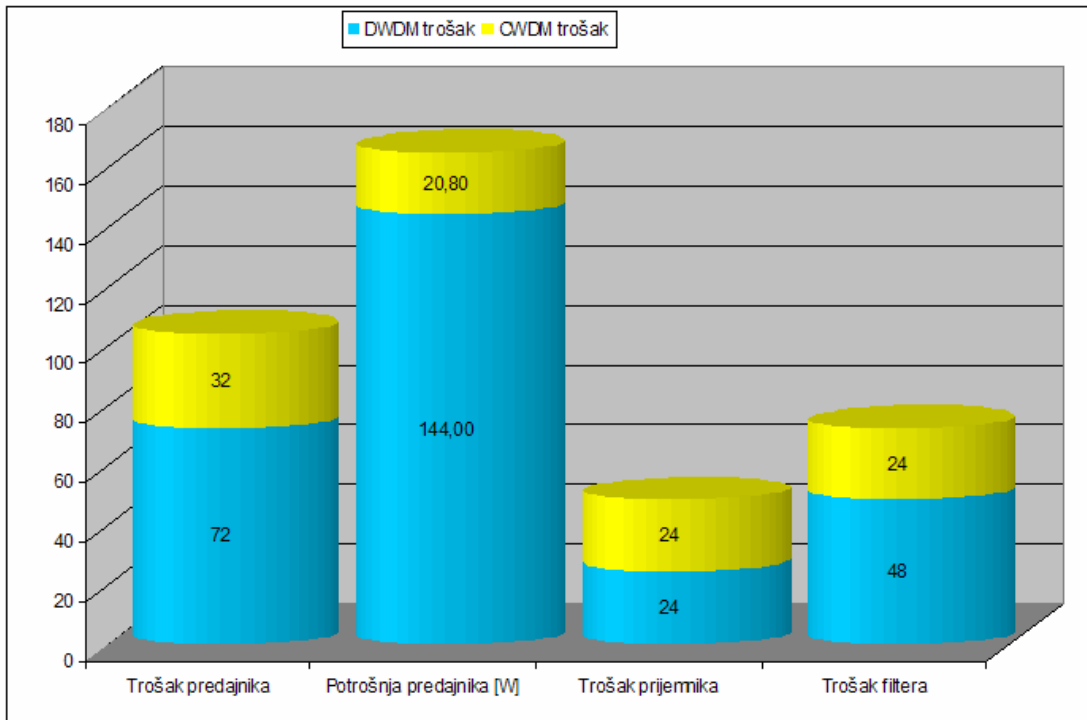
CWDM <i>Singlehop</i> Trošak			
Broj stanica	8	16	24
Trošak predajnika	8	16	32
Potrošnja predajnika [W]	5,20	10,40	20,80
Trošak prijarnika	8	16	24
Trošak filtera	8	16	24

Tablica 4.13 Opis DWDM strukture *singlehop* mreže

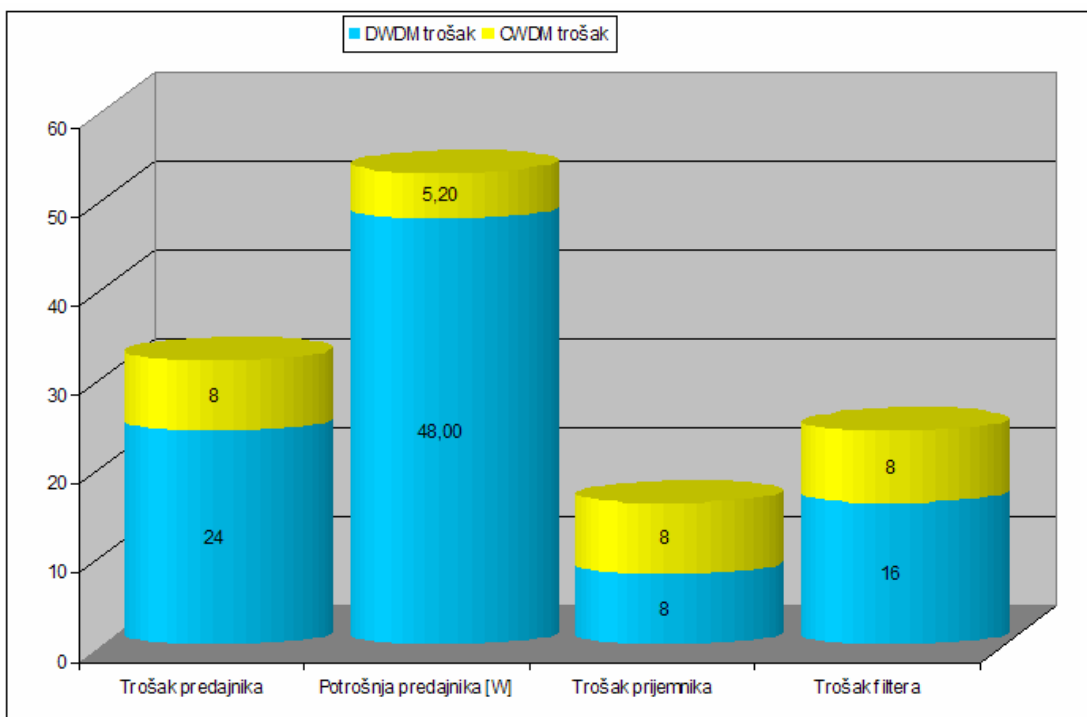
DWDM <i>Singlehop</i>			
Broj stanica u mreži	8	16	24
Broj predajnika/stanica	1		
Potrošnja predajnika [W]	6		
Broj prijamnika/stanica	1		
Broj filtera/stanica	1		
Broj predajnika/mreža	8	16	24
Potrošnja snage/mreža [W]	48,00	96,00	144,00
Broj prijamnika/mreža	8	16	24
Broj filtera/mreža	8	16	24

DWDM <i>Singlehop</i> Trošak [vs. CWDM]			
Broj stanica	8	16	24
Trošak predajnika	24	48	72
Potrošnja predajnika [W]	48,00	96,00	144,00
Trošak prijamnika	8	16	24
Trošak filtera	16	32	48

Kao i kod *multihop* lokalnih mreža, trošak lokalne DWDM mreže je puno veći nego CWDM mreže, neovisno da li koristimo 24 stanice u mreži, što se vidi na slici (**Slika 4.28**), ili manji broj stanica, npr. 8, što vidimo na slici (**Slika 4.29**).



Slika 4.28 Usporedba troškova za *singlehop* mrežu s 24 stanice



Slika 4.29 Usporedba troškova za *singlehop* mrežu s 8 stanica

Zaključak

Budućnost telekomunikacijskih mreža je bez sumnje u optičkom prijenosu informacija. Stara bakrena infrastruktura sve teže drži korak sa strahovitim rastom broja usluga koje se pružaju krajnjim korisnicima. Uz porast broja usluga, raste i potrebni prometni kapacitet za takve usluge, pa je zapravo pitanje vremena kada će optički prijenos podataka u potpunosti nadvladati električni prijenos, i to ne samo u velikim mrežama, već i u samim korisničkim prostorijama.

Ono što smo vidjeli u ovome radu je da optičko multipleksiranje s valnom podjelom, koje je jedna od metoda multipleksiranja u optičkoj domeni, nudi krajnjem korisniku gotovo beskonačan kapacitet. Takvo valno multipleksiranje ima dvije moguće izvedbe, od koji svaka ima svoje prednosti i svoje nedostatke.

Vidjeli smo da gradske mreže s rijetkim valnim multipleksiranjem omogućuju operatorima da uz relativno manje troškove izgrade optičku gradsku mrežu. No takve mreže, uz manju brzinu pristupa pojedinog korisnika, ne nude jednostavnost pri povećanju ukupnog kapaciteta jer se tada povećava broj potrebnih komponenti. Gradske mreže s gustim valnim multipleksiranjem su gledajući ukupne troškove skuplje nego one s rijetkim multipleksom, ali kao što smo vidjeli na grafu koji donosi usporedbu troškova tih dvaju mreža po jednakim brzinama prijenosa, one postaju isplativija opcija, imajući na umu da se potrebni kapacitet unutar mreže može jednostavno povećati promjenom modulacijske brzine s navedenih 10 Gbit/s na 40 Gbit/s po kanalu uz relativno male izmjene potrebne opreme. Budući da količina prometa u gradskoj mreži puno brže raste nego u drugim obrađenim mrežama, DWDM je troškovno više isplativa opcija kako za sadašnje, tako i za buduće potrebe.

Pristupne mreže za dvije navedene tehnologije valnog multipleksiranja imaju vrlo slične troškovne grafove kao i gradske mreže, no s osnovnom razlikom da je u pristupnoj mreži brzina prijenosa po korisniku koju pruža CWDM i više

nego dovoljna za sve sadašnje a i buduće potrebe pojedinih korisnika. Iako je i u ovom slučaju DWDM isplativija opcija gledajući relativne troškove po jednakim brzinama prijenosa, zbog već navedene pretpostavke o potrebnom kapacitetu krajnjeg korisnika, smatrati ćemo da su ukupni troškovi izgradnje odlučujući faktor pri odabiru metode valnog multipleksiranja, a ti troškovi su u skoro svakom troškovnom segmentu na strani rijetkog valnog multipleksiranja. Također, ukoliko će postojati potreba za povećanjem kapaciteta jednog CWDM udaljenog čvora, ista će se lako ostvariti dodavanjem nekoliko DWDM kanala unutar jednog CWDM kanala.

Odabir valnog multipleksiranja za lokalne mreže je u našem slučaju bio jednostavan zadatak. Osnovne komponente takvih mreža, kao što su laserski predajnici i optički filtri, u CWDM izvedbi su značajno jeftiniji, te samim time određuju CWDM kao odabranu metodu valnog multipleksiranja unutar lokalnih mreža.

Literatura

- [1] Nebeling M. , "cwdm_white_paper.pdf" , srpanj 2002. , "*CWDM: Lower cost for more capacity in the short-haul*" , http://www.cubeoptics.com/img/FCKeditor/File/cwdm_white_paper.pdf , prosinac 2009.
- [2] Salaj S. , "CWDM in Metro and Regional Networks.pdf" , listopad 2003. , "*CWDM: An Ideal Solution for Metro & Regional Networks*" , [http://www.sterlitetechnologies.com/pdf/Knowledgecenter/CWDM in Metro and Regional Networks.pdf](http://www.sterlitetechnologies.com/pdf/Knowledgecenter/CWDM%20in%20Metro%20and%20Regional%20Networks.pdf) , studeni 2009.
- [3] Avvio Networks , "DWDM_white_paper.pdf" , 2004. , "*What is DWDM?*" , http://www.avvionetworks.com/pdf/DWDM_white_paper.pdf , studeni 2009.
- [4] Choudhury A. D. , 2006. , "*An overview od DWDM*" , <http://www.scribd.com/doc/11524984/An-Overview-of-DWDM> , prosinac 2009.
- [5] Khayam O., Khattak W. H., Masood A., Chaudhry K. S., 2004. , "Design and implementation of WDM based multi-hop local area network" , *IEEE papers* , siječanj 2010.
- [6] Payne D. , "All Optical Networks presentation - David Payne - 27.09.07.pdf" , 2007. , "*The All Optical Network: Why we need it – how and when we get it*" , [http://www.theitp.org/UserData/root/Files/All Optical Networks presentation - David Payne - 27.09.07.pdf](http://www.theitp.org/UserData/root/Files/All%20Optical%20Networks%20presentation%20-%20David%20Payne%20-%2027.09.07.pdf) , siječanj 2010.
- [7] The Furukawa Electric CO. LTD. , siječanj 2009. , <http://furukawa.co.jp/fitel/eng/active/pdf/Cooled/FRL15DCWx-A8x-xxxxx-x,D.pdf> , siječanj 2010.
- [8] Sumitomo Electric , <http://www.excelight.com/products/laser/40geml-tosa.asp> , siječanj 2010.

- [9] ModuleTek ,
http://www.moduletek.com/en/products_end.aspx?ClassId=45 ,
 siječanj 2010.
- [10] AC Photonics , http://www.acphotonics.com/products/product_files/CWDM_1x16.htm , siječanj 2010.
- [11] AC Photonics , http://www.acphotonics.com/products/product_files/100G_1x32.htm , siječanj 2010.
- [12] Oplink , http://www.oplink.com/pdf/OADM1_2x2-S0037.pdf , siječanj 2010.
- [13] Renais O., Rouzic E., Yven G. , "B4_1_Renais_Yven_Rouzic.pdf" ,
 listopad 2008. , "*Migrating to a Next Gen WDM Network*" ,
http://www.networks2008.org/data/upload/file/Technical/B4_1_Renais_Yven_Rouzic.pdf , siječanj 2010.
- [14] Zheng J., Mouftah H. T. , "Media access control for Ethernet passive optical networks_an overview.pdf" , veljača 2005. , "*Media Access Control for Ethernet Passive Optical Networks: An Overview*" ,
[http://tsp.snu.ac.kr/BANS2005/Seminar_BAN/Media access control for Ethernet passive optical networks_an overview.pdf](http://tsp.snu.ac.kr/BANS2005/Seminar_BAN/Media_access_control_for_Ethernet_passive_optical_networks_an_overview.pdf) , siječanj 2010.
- [15] Gumaste A., Antony T. , "*DWDM Network Designs and Engineering Solutions*" , Cisco Press, prosinac 2002.
- [16] Thiele H., Nebeling M. , "*Coarse Wavelength Division Multiplexing: Technologies and Applications*" , Boca Raton , CRC Press , 2007.
- [17] Mukherjee B. , "*Optical WDM Networks*", Springer Science , 2006.
- [18] Chung H. S., Chung Y. C. , "ij81.pdf" , travanj 2004. , "*Directly modulated CWDM/DWDM system using negative dispersion fiber for metro network application*" ,
<http://optolab.kaist.ac.kr/publication/ij81.pdf> , siječanj 2010.

- [19] Shin D. J., Jung D. K., Shin H. S., Kwon J. W., Hwang S., Oh Y. J., Skim C. S. , "PDP04-1459.pdf" , 2004. , "*Hybrid WDM/TDM-PON for 128 subscribers using λ -selection-free transmitters*" , http://www.ofcnfoec.org/about_ofc/archive/2004/PDFs/PDP04-1459.pdf , siječanj 2010.

Popis slika i tablica

Slika 1.1 Princip multipleksiranja s valnom podjelom.....	2
Slika 1.2 CWDM kanali u odnosu na optičke pojaseve.....	3
Slika 1.3 Grafički prikaz smještaja DWDM valnih duljina za 40-kanalni sustav	10
Slika 2.1 Grafički pregled razina optičke mreže	13
Slika 2.2 Gradska mreža bazirana na (R)OADM komponentama	16
Slika 2.3 Prikaz različitih PON topologija	20
Slika 2.4 Dolazni promet PON mreže	21
Slika 2.5 Vremensko dijeljenje kanala za PON odlazni promet	22
Slika 2.6 FTTH modeli s obzirom na udaljenost od krajnjeg korisnika	23
Slika 2.7 WDM prstenasta <i>multi-hop</i> lokalna mreža	26
Slika 2.8 WDM lokalna mreža s pasivnom zvijezdom.....	28
Slika 2.9 Čvor s fiksnim i podesivim predajnikom i prijammikom	29
Slika 3.1 Prikaz osnovnog WDM čvora	30
Slika 3.2 Struktura DWDM predajnika.....	32
Slika 3.3 DWDM laserski modul s DFB laserom	33
Slika 3.4 Osnovna struktura WDM prijammika.....	35
Slika 3.5 CWDM primopredajnički modul.....	36
Slika 3.6 Filter s Braggovom rešetkom	38
Slika 3.7 Optički ADM s Braggovom rešetkom i dva cirkulatora	38
Slika 3.8 Izdvajanje valnih duljina pomoću polja valovoda.....	40
Slika 3.9 Odnos broja šupljina i propusnosti filtra	41
Slika 3.10 Primjer CWDM MUX/DEMUX modula s 16 kanala [10]	42
Slika 3.11 Primjer DWDM MUX/DEMUX modula s 32 kanala [11]	43
Slika 3.12 Primjer optičkog dodaj/ispusti multipleksora [12]	44
Slika 3.13 Atenuacijska krivulja za SSMF i ZWP vlakno.....	46
Slika 3.14 Iznosi disperzije za različite tipove vlakana.....	48
Slika 3.15 Rasprežnik kao razdjelnik i kombinator.....	50
Slika 4.1 Struktura gradske prstenaste mreže s 8 čvorova	54
Slika 4.2 Struktura gradskog čvora za posluživanje jednog udaljenog čvora	55
Slika 4.3 Princip WDM PON mreže.....	56
Slika 4.4 Hibridna WDM TDM PON mreža	58
Slika 4.5 Vremensko multipleksiranje u WDM TDM PON mreži	59
Slika 4.6 Prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM	64
Slika 4.7 Postotni prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM.....	65
Slika 4.8 Prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM gradskog čvora.....	66
Slika 4.9 Postotni prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM gradskog čvora	66
Slika 4.10 Prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika)...	67
Slika 4.11 Postotni prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika).....	67
Slika 4.12 Prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika).....	68
Slika 4.13 Postotni prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (10 000 korisnika).....	68
Slika 4.14 Prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON) ..	71
Slika 4.15 Postotni prikaz troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)	71
Slika 4.16 Prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)	72

Slika 4.17 Postotni prikaz relativnih troškova gradskog čvora za CWDM/DWDM (WDM TDM PON)	73
Slika 4.18 Prikaz troškova CWDM/DWDM PON strukture	76
Slika 4.19 Postotni prikaz troškova CWDM/DWDM PON strukture	76
Slika 4.20 Prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM PON strukture	77
Slika 4.21 Postotni prikaz relativnih troškova CWDM/DWDM PON strukture	78
Slika 4.22 Prikaz troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture	81
Slika 4.23 Postotni prikaz troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture...	82
Slika 4.24 Prikaz relativnih troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture.	83
Slika 4.25 Postotni prikaz relativnih troškova hibridne CWDM/DWDM TDM PON strukture	83
Slika 4.26 Usporedba troškova za <i>multihop</i> mrežu s 24 stanice.....	86
Slika 4.27 Usporedba troškova za <i>multihop</i> mrežu s 8 stanica.....	86
Slika 4.28 Usporedba troškova za <i>singlehop</i> mrežu s 24 stanice.....	89
Slika 4.29 Usporedba troškova za <i>singlehop</i> mrežu s 8 stanica.....	89
Tablica 1.1 Raspored CWDM kanala	4
Tablica 1.2 Razmaci između kanala u DWDM tehnologiji.....	7
Tablica 1.3 Djelomični prikaz rasporeda DWDM kanala	9
Tablica 3.1 Karakteristike CWDM modula sa Slike 3.10.....	42
Tablica 3.2 Karakteristike DWDM modula sa Slike 3.11	43
Tablica 3.3 Karakteristike modula sa Slike 3.12	44
Tablica 4.1 Trenutni prometni zahtjevi pojedinih usluga	57
Tablica 4.2 Detaljan opis CWDM strukture gradskog čvora za WDM PON	62
Tablica 4.3 Detaljan opis DWDM strukture gradskog čvora za WDM PON	63
Tablica 4.4 Detaljan opis CWDM strukture gradskog čvora za hibridnu WDM TDM PON	69
Tablica 4.5 Detaljan opis DWDM strukture gradskog čvora za hibridnu WDM TDM PON	70
Tablica 4.6 Detaljan opis CWDM strukture za WDM PON.....	74
Tablica 4.7 Detaljan opis DWDM strukture za WDM PON.....	75
Tablica 4.8 Detaljni opis CWDM strukture za hibridnu WDM TDM PON	79
Tablica 4.9 Detaljni opis DWDM strukture za hibridnu WDM TDM PON	80
Tablica 4.10 Opis CWDM strukture <i>multihop</i> mreže	85
Tablica 4.11 Opis DWDM strukture <i>multihop</i> mreže	85
Tablica 4.12 Opis CWDM strukture <i>singlehop</i> mreže	87
Tablica 4.13 Opis DWDM strukture <i>singlehop</i> mreže	88

Popis stranih izraza

metro

long-haul

water peak

last-mile

singlehop

multihop

bit-rate

add-and-drop

gradska

mreža velikih udaljenosti s velikim brojem dionica

vodeni vrh, označava gubitak u vlaknu zbog

molekula vode

zadnja dionica mreže na putu prema korisniku

mreža s jednim skokom

mreža s 0 ili više skokova

brzina prijenosa

dodaj i izuzmi

Popis skraćenica

ADM	<i>add-and-drop multiplexer</i>
APC	<i>automatic power control</i>
APD	<i>avalanche photodiode</i>
AWG	<i>arrayed waveguides</i>
CWDM	<i>coarse wavelength division multiplex</i>
DFB	<i>distributed feedback</i>
DSF	<i>dispersion shifted fiber</i>
DWDM	<i>dense wavelength division multiplex</i>
EDFA	<i>erbium doped fiber amplifier</i>
EPON	<i>Ethernet passive optical network</i>
FBG	<i>fiber Bragg grating</i>
FP	<i>Fabry Perot</i>
FTTB	<i>Fiber To The Building</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
FTTU	<i>Fiber To The User</i>
FTTX	<i>Fiber To The X</i>
GPON	<i>Gigabit passive optical network</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LWP	<i>Low Water Peak</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
OADM	<i>optical add-and-drop multiplexer</i>
OLT	<i>optical line terminal</i>
ONU	<i>optical network unit</i>
P2P	<i>point-to-point</i>
PIN	<i>P-intrinsic-N</i>
PON	<i>passive optical network</i>
RN	<i>remote node</i>
ROADM	<i>reconfigurable OADM</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SSMF	<i>standard single mode fiber</i>
TDM	<i>time division multiplex</i>
TFF	<i>thin film filter</i>
VCSEL	<i>vertical cavity surface emitting laser</i>
WDM	<i>wavelength division multiplex</i>
ZWP	<i>Zero Water Peak</i>