

Razvoj i primjena svjetlovodnih prijenosnih sustava s valnim multipleksiranjem

Antunović, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:539574>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Ivan Antunović

**RAZVOJ I PRIMJENA SVJETLOVODNIH
PRIJENOSNIH SUSTAVA S VALNIM
MULTIPLEKSIRANJEM**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2016.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 19. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Arhitektura telekomunikacijske mreže**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3800

Pristupnik: **Ivan Antunović (0135208843)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Razvoj i primjena svjetlovodnih prijenosnih sustava s valnim multipleksiranjem**

Opis zadatka:

Usporediti TDM i WDM prijenosne sustave. Opisati elemente WDM prijenosnih sustava. Navesti primjenu DWDM sustava u gradskim i regionalnim mrežama. Opisati arhitekturu WDM mreža.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2016.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

prof. dr. sc. Slavko Šarić

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**RAZVOJ I PRIMJENA SVJETLOVODNIH
PRIJENOSNIH SUSTAVA S VALNIM
MULTIPLEKSIRANJEM**

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF
OPTICAL FIBER TRANSMISSION SYSTEMS WITH
WAVELENGTH MULTIPLEXING**

Mentor:

prof. dr. sc. Slavko Šarić

Student:

Ivan Antunović,

0135208843

Zagreb, kolovoz 2016.

RAZVOJ I PRIMJENA SVJETLOVODNIH PRIJENOSNIH SUSTAVA S VALNIM MULTIPLEKSIRANJEM

SAŽETAK:

Svjetlovodni prijenosni sustavi s valnim multipleksiranjem (WDM) imaju dvije izvedbe: CWDM i DWDM. CWDM se koristi u pristupnim i gradskim mrežama, a DWDM u gradskim, regionalnim i mrežama velikog dometa.

Ovisno o vrsti WDM sustava razlikuju se uređaji za njegovo ostvarenje, ali najvažnije komponente WDM mreže čine: predajnici, prijemnici, optičko vlakno, filtri, multiplekseri i demultiplekseri. Temelj DWDM-a su OADM uređaji, a u novoj generaciji ROADM, koji su prvi korak prema sveoptičkoj mreži.

Analizirane su i mrežne topologije i različite arhitekture WDM sustava, kao i primjena DWDM-a u metro i regionalnim mrežama.

KLJUČNE RIJEČI: WDM, CWDM, DWDM, valno multipleksiranje, OADM, ROADM, gradske, regionalne mreže, sveoptička mreža.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF OPTICAL FIBER TRANSMISSION SYSTEMS WITH WAVELENGTH MULTIPLEXING

SUMMARY:

Optical fiber transmission systems with wavelength multiplexing come in two different implementation: CWDM and DWDM. CWDM is used in acces and metropolotan networks, while DWDM is used in metro, regional and long-haul networks.

Depending on type of WDM system used, thera are different components of WDM system implementation. Key component of DWDM is OADM, and next generation ROADM, which makes the first step towards all-optical network.

Also analyzed are different network topologies and WDM system architecture, as DWDM application in metro, regional and long-haul networks.

KEYWORDS: WDM, CWDM, DWDM, wavelength multiplexing, OADM, ROADM, metropolitan networks, regional networks, all-optical networks.

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	USPOREDBA TDM I WDM PRIJENOSNIH SUSTAVA	2
3	RAZVOJ DWDM TEHNOLOGIJE	9
3.1	Multipleksiranje s grubom podjelom kanala - CWDM	9
3.2	Multipleksiranje s gustom podjelom kanala (DWDM)	12
3.3	Prednosti i nedostaci WDM tehnologija	16
4	ELEMENTI WDM PRIJENOSNIH SUSTAVA	18
4.1	Optičko vlakno	18
4.1.1	<i>Prigušenje vlakna</i>	21
4.1.2	<i>Kromatska disperzija</i>	23
4.2	WDM predajnici	25
4.3	WDM prijamnici	27
4.4	Primopredajnici	29
4.5	Optički filtri	29
4.5.1	<i>Filtar s Braggovom rešetkom u vlaknu - FBG</i>	31
4.5.2	<i>Polje valovoda</i>	33
4.5.3	<i>Filtri s tankim filmom</i>	34
4.6	Multiplekseri i demultiplekseri	35
4.6.1	<i>Tehnike multipleksiranja/demultipleksiranja</i>	36
4.6.2	<i>OADM</i>	38
4.6.3	<i>ROADM</i>	39
4.6.3.1	<i>Colorless ROADM</i>	40
4.6.3.2	<i>Directionless ROADM</i>	41
4.6.3.3	<i>Contentionless ROADM</i>	41
4.6.3.4	<i>Gridless ROADM</i>	42
4.7	Optička pojačala	43
5	ARHITEKTURA WDM MREŽA	46
5.1	Broadcast-and-Select mreže	46
5.2	Mreže s valnim usmjeravanjem	48
5.3	ROADM arhitekture	50
6	PRIMJENA DWDM SUSTAVA U GRADSKIM I REGIONALNIM MREŽAMA	52
7	ZAKLJUČAK	57
	LITERATURA	58
	POPIS SLIKA	60
	POPIS TABLICA	62
	POPIS KRATICA	63

1 UVOD

Optičko vlakno je prekretnica u tehnologiji telekomunikacijskih mreža s obzirom da se prijenos ne vrši gibanjem elektrona kroz fizički medij, već provodom svjetlosti. Svjetlovodni medij izrađen od sveprisutnog silicija, točnije SiO_2 – silicijev dioksid.

Kako je otpor u vlaknu nepostojeći, a gubici jako mali omogućen je prijenos velikim brzinama na velikim udaljenostima.

U ovom radu je opisan prijenos signala u optičkoj infrastrukturi, arhitektura optičkih mreža i tehnologije multipleksiranja valnom podjelom.

Svrha završnog rada je pregled osnovnih tehnologija i elemenata svjetlovodnih sustava važnih za funkcionalan rad optičke mreže.

Cilj Završnog rada je na temelju dostupne i relevantne literature prikazati arhitekturu i primjenu WDM mreže.

Naslov završnog rada je:

„RAZVOJ I PRIMJENA SVJETLOVODNIH PRIJENOSNIH SUSTAVA S VALNIM MULTIPLEKSIRANJEM“.

Rad je podijeljen na sedam cjelina:

1. Uvod
2. Usporedba TDM i WDM prijenosnih sustava
3. Razvoj DWDM tehnologije
4. Elementi WDM prijenosnih sustava
5. Arhitektura WDM mreža
6. Primjena DWDM sustava u gradskim i regionalnim mrežama
7. Zaključak

U drugom poglavlju ovog rada je napravljena usporedba TDM i WDM prijenosnih sustava, razlike u podjeli kanala i opisani kritični faktori kvalitete usluga.

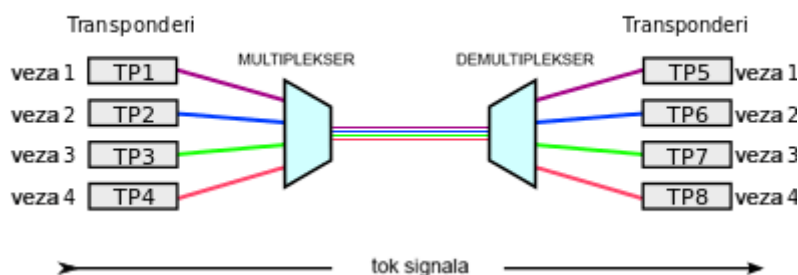
Treće poglavlje obrađuje razvoj DWDM tehnologije, prednosti u odnosu na CWDM tehnologiju, razmaci između kanala u tehnologiji, kao i kapaciteti prijenosa.

Četvrto poglavlje opisuje elemente sustava, gdje se detaljnije opisuje optičko vlakno, predajnici, prijamnici, primopredajnici, optički filtri, multiplekseri i demultiplekseri te optička pojačala.

Peto i šesto poglavlje opisuju arhitekturu i primjenu optičkih mreža

2 USPOREDBA TDM I WDM PRIJENOSNIH SUSTAVA

Multipleksiranje s valnom podjelom (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) označava prijenos više signala na različitim valnim duljinama kroz jedno optičko vlakno. Različite valne duljine svjetlosti lasera na slici 2.1. označene su različitim bojama. Uobičajena notacija za valnu duljinu je grčko slovo lambda, λ , [2].



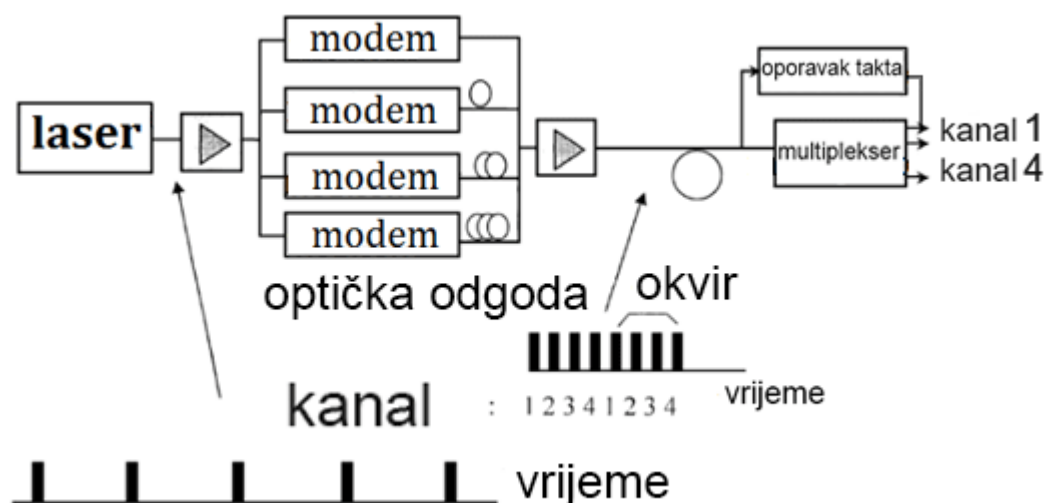
Slika 2.1. Princip rada WDM-a, [1]

Ova tehnika omogućuje dvosmjernu komunikaciju preko jedne niti optičkog vlakna kao i multiplikaciju kapaciteta. Kao analogni proces, WDM je baziran na tehnici multipleksiranja frekvencijskom podjelom kanala (FDM - *Frequency Division Multiplexing*). Kod FDM-a čitav prijenosni pojas (eng. *bandwidth*) je podijeljen u više kanala, a svaki kanal zauzima dio frekvencijskog spektra.

Kod WDM-a svaki se kanal naziva valnom duljinom (eng. *wavelength*). Svaki kanal radi na različitoj frekvenciji i različitoj optičkoj valnoj duljini. Valne duljine kanala su u vlaknu razdvojene dijelom nekorištenog spektra kako bi se spriječila njihova međusobna interferencija, [1].

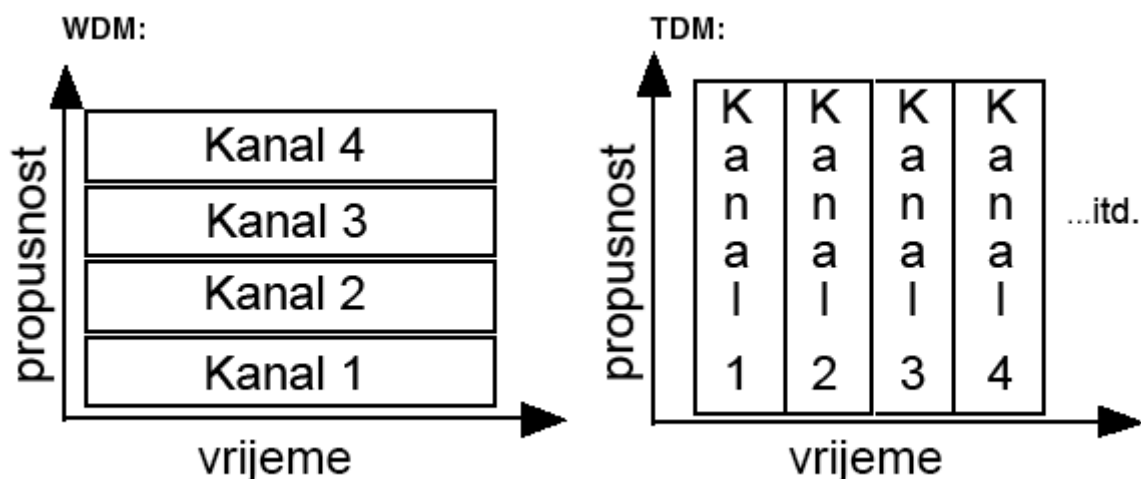
Multipleksiranje vremenskom podjelom kanala (TDM – *Time Division Multiplexing*) predstavlja tehnologiju prijenosa (odašiljanja i primanja) međusobno neovisnih signala preko zajedničkog puta signala pomoću sinkroniziranih prebacivanja na svakom kraju prijenosne linije, tako da se svaki signal pojavljuje na prijenosnoj liniji samo određeni vremenski odsječak, kako je prikazano na slici 2.2.

TDM je vrsta digitalnog multipleksiranja gdje se dva signala prenose istovremeno kao podkanali preko jednog komunikacijskog kanala. Vremenska domena je podijeljena u više vremenskih odsječaka (eng. *time slots*), po jedan za svaki podkanal. Blok podataka podkanala 1 se prenosi za vrijeme trajanja vremenskog odsječka 1, podkanal 2 za vrijeme trajanja vremenskog slot 2 i tako dalje. Jedan TDM okvir sastoji se od jednog vremenskog slot po podkanalu, sinkronizacijskog kanala i ponekad kanala za ispravak pogreški (eng. *error correction channel*). Nakon što završi posljednji podkanal, ispravak pogreški i sinkronizacija čitav ciklus se ponavlja s novim okvirom, počevši od drugog bloka podataka podkanala 1, zatim drugog bloka podataka podkanala 2 i tako dalje, [1].



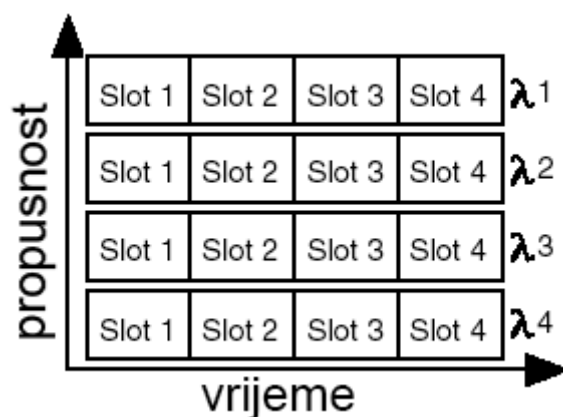
Slika 2.2. Princip rada TDM-a, [1]

Ove osnovne razlike u načinu multipleksiranja prikazane su slikom 2.3., gdje je vidljivo da kanali kod TDM-a, odnosno vremenski slotovi, ovise o vremenskoj domeni, dok kod WDM-a to nije slučaj.



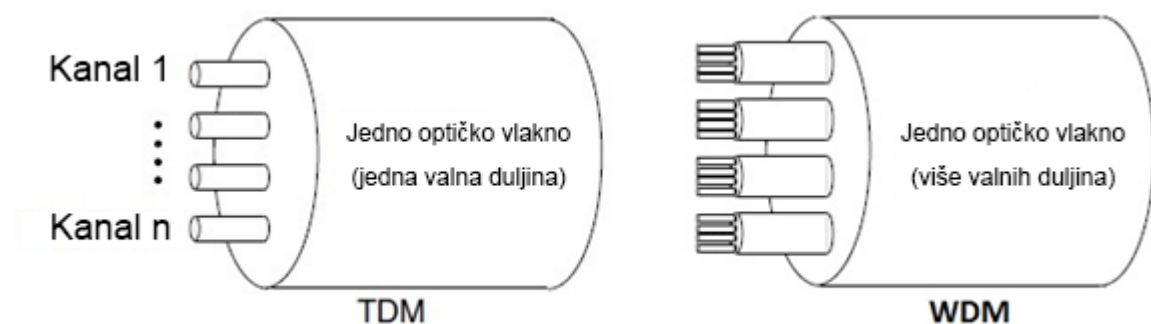
Slika 2.3. Usporedni prikaz WDM i TDM principa multipleksiranja, [2]

Većina optičkih mreža koristi kombinaciju WDM i TDM multipleksiranja tako da vremenske slotove multipleksira na određenu valnu duljinu, kako je prikazano slikom 2.4. Ovaj koncept omogućuje da više korisnika istovremeno dijele kapacitet jedne WDM valne duljine, koji je, uz neke iznimke, veći od potreba za kapacitetom pojedinačnog korisnika, [2].



Slika 2.4. Kombinacija TDM-a i WDM-a u optičkim mrežama, [2]

WDM povećava kapacitet optičkog medija. Dodjeljuje jedinstvene frekvencije svjetla unutar određenog pojasa različitim dolaznim optičkim signalima te svi kanali šalju istovremeno na različitim frekvencijama. Drugim riječima, WDM višestruke optičke signale mapira u individualne valne duljine i multipleksira ih preko jednog optičkog vlakna. U TDM-u se podatkovni paketi multipleksiraju i šalju koristeći istu frekvenciju, što znači da ako postoje 2 kanala, a svaki prenosi 4,8 kbit/s i ti kanali se vremenski multipleksiraju tada će rezultirajući potrebni kapacitet za ta dva kanala biti agregirani kapacitet od 9.6 kbit/s. Kako je prikazano slikom 2.5., u TDM-u se više kanala vremenski multipleksira i šalje preko optičkog vlakna koristeći samo jednu valnu duljinu, dok se kod WDM-a višestruko vremenski multipleksirani kanali mogu prenositi preko optičkog vlakna koristeći različite valne duljine, [2], [3].



Slika 2.5. Usporedba iskorištenja kapaciteta za TDM i WDM, [3]

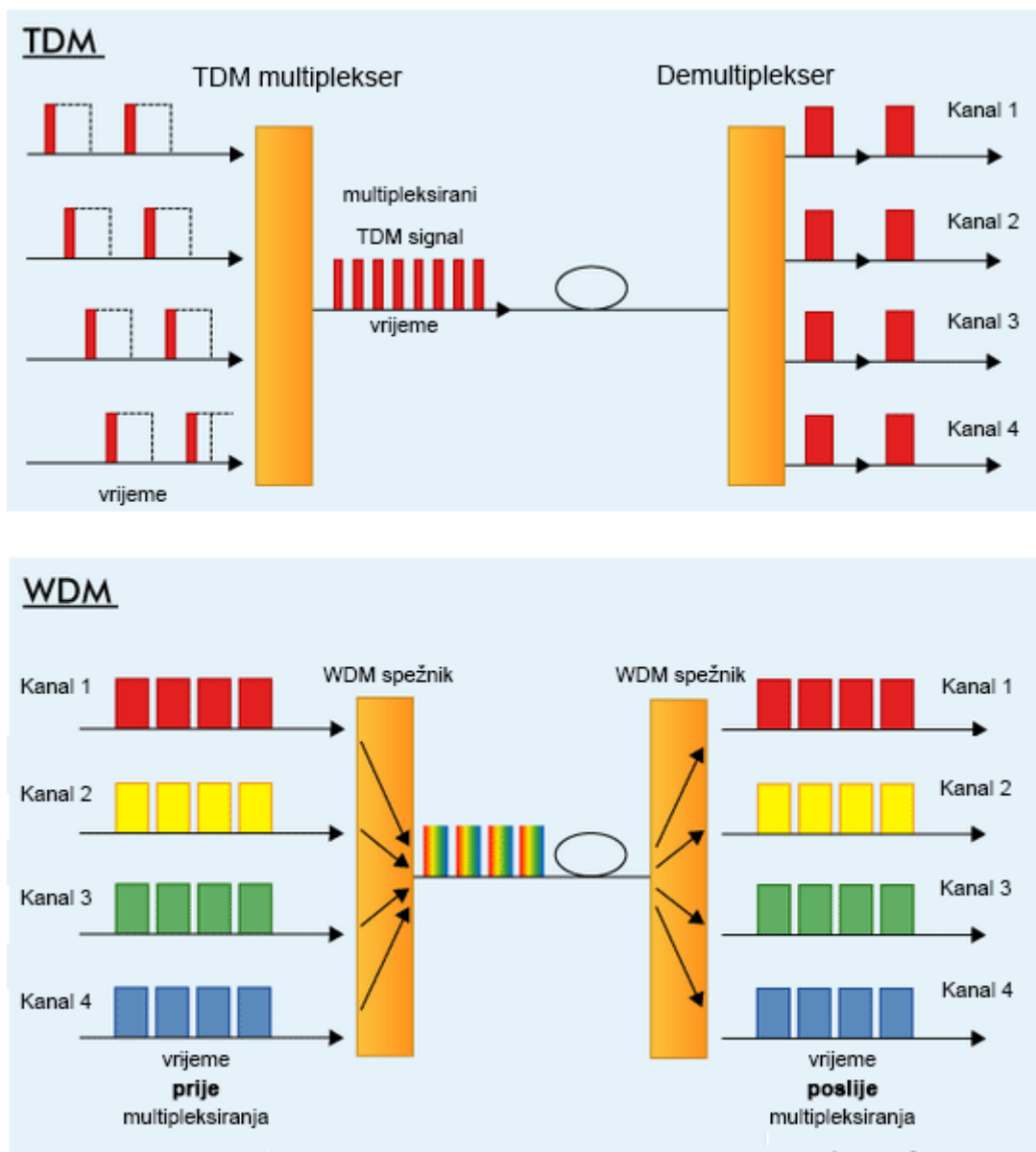
WDM ima mogućnost čuvanja resursa optičkog vlakna. Za prijenos signala putem optičkog vlakna potreban je par optičkih vlakana. Kako TDM koristi samo jednu valnu duljinu za prijenos signala on koristi jedan par optičkih vlakana za prijenos tog jednog signala, dok WDM, koji također treba par optičkih vlakana za prijenos, koristi taj par za prijenos svih signala neovisno koliko ih ima.

WDM, u usporedbi s TDM-om, predstavlja optimalan način proširenja kapaciteta jer to obavlja jednostavnim dodavanjem valne duljine dok TDM za to treba nova optička vlakna i mrežne uređaje velike brzine,[1].

Osnovna razlika između TDM-a i WDM-a je u načinu podjele kanala. WDM dijeli kanale pomoću dvije ili više valnih duljina koje se ne preklapaju dok TDM svakom kanalu dodjeljuje vremenski slot. Kod TDM-a svaki signal koristi sav raspoloživ prijenosni pojas određeno vrijeme, dok kod WDM-a svaki signal koristi određeni dio raspoloživog prijenosnog pojasa čitavo vrijeme.

TDM omogućuje veću fleksibilnost jer može dinamički alocirati više vremenskih perioda onim signalima kojima je to potrebno dok drugim signalima može smanjiti vremenski period. WDM nema ovakvu fleksibilnost jer ne može dinamički promijeniti širinu dodijeljene valne duljine.

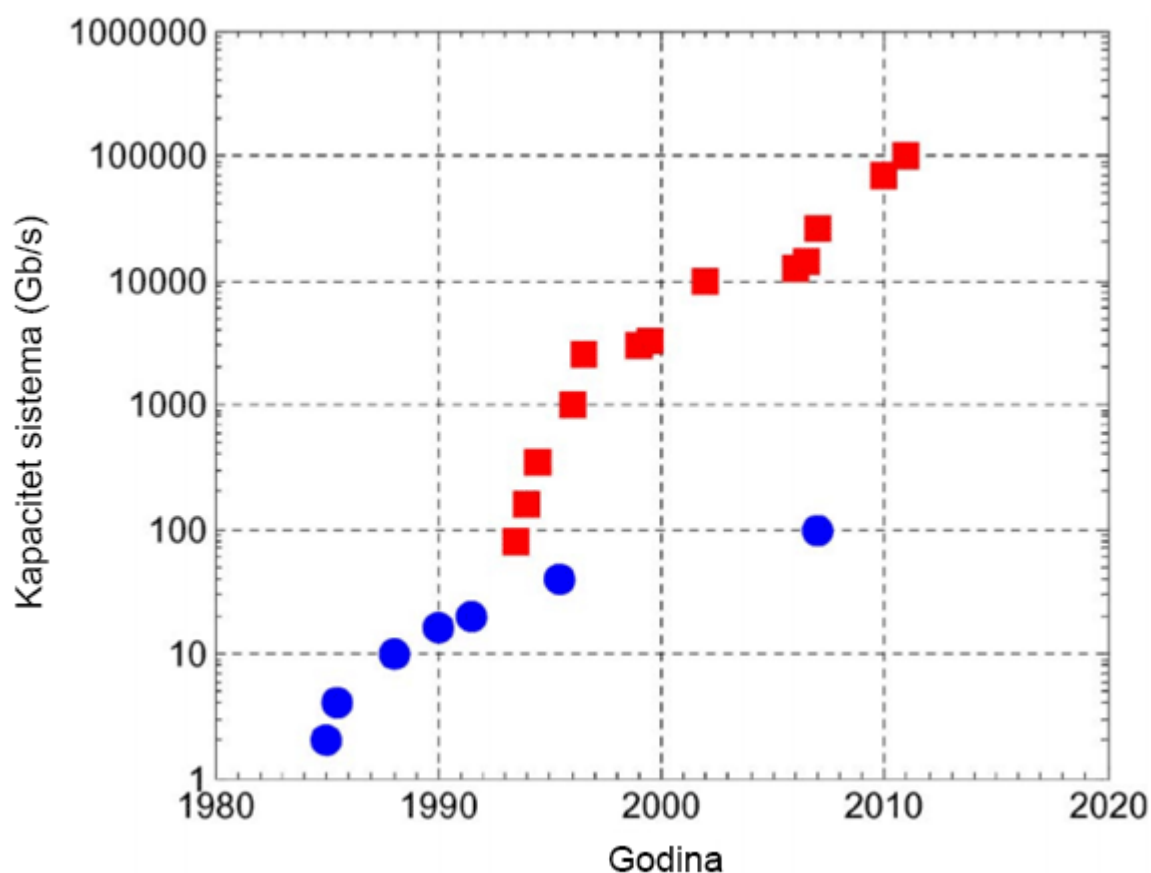
Jedan od kritičnih parametara kvalitete usluge (QoS – *Quality of Service*), posebno za usluge u stvarnom vremenu (eng. *real-time service*) je kašnjenje (eng. *latency*). Bolje vrijednosti ovog parametra osigurava WDM. TDM radi na način da samo jedan signal može u određenom vremenskom odsječku prenositi podatke što znači da ostali moraju čekati te se povećava kašnjenje. S druge strane, kod WDM-a svi kanali šalju podatke istovremeno te je kašnjenje manje, [1].



Slika 2.6. Vrijeme dolaska paketa za TDM i WDM, [4]

Kako je prikazano na slici 2.6., kod WDM-a svi signali na odredište stižu istovremeno dok kod TDM-a stižu jedan iza drugoga. To se može zahvaliti tome što se kod TDM-a podaci signala dijele na manje dijelove i vremenski multipleksiraju prije prijenosa, odnosno manji dijelovi podataka iz više signala, tj. od različitih korisnika, se slažu u jedan TDMA okvir, te se prenose, [3].

Po pitanju kapaciteta, kod TDM-a rezultirajući potreban kapacitet je agregirana suma (zbroj) potrebnog kapaciteta svih signala (kanala). Kod WDM-a se svaki signal prenosi zasebno i svaki kanal ima svoj dodijeljeni dio prijenosnog pojasa koji ne dijeli s drugim korisnicima (eng. *dedicated bandwidth*). Dakle, veći prijenosni kapacitet osigurava WDM, kako je i prikazano na slici 2.7.



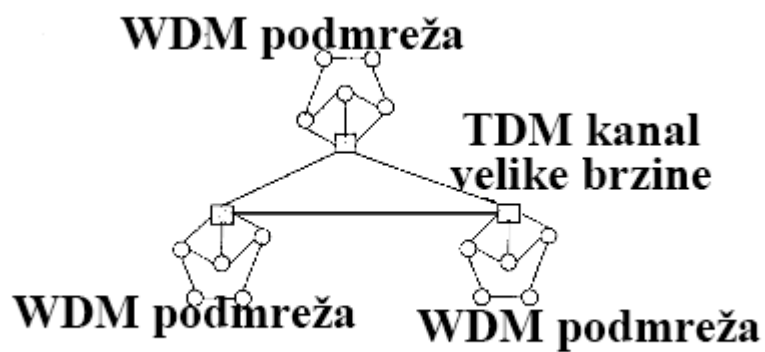
Slika 2.7. Usporedba kapaciteta za TDM i WDM, [5]

Na slici 2.7. točke prikazuju ukupni kapacitet za jedno optičko vlakno (eng. *single fiber*). Plave točke prikazuju TDM, a crveni kvadratići WDM. Svaka točka na grafu prikazuje novi rekord u povećanju kapaciteta. Može se uočiti relativno stabilan rast kroz promatrani vremenski period. Povećanje kapaciteta određeno je razvojem tehnologija pojedinih elemenata. Tako se primjećuje da krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća počinje rast kada su optički sustavi bili ograničeni brzinom svojih komponenti te je napredak nastao i bio kontroliran tehnološkim razvojem tranzistora.

Slijedeći veliki skok u pogledu povećanja kapaciteta nastaje 1993. Kada postaju dostupna optička pojačala te postaje moguće uvođenje WDM-a. broj kanala u raspoloživom spektru je rastao do 1996. kada je bio gotovo iscrpljen, a provedeni su i prvi eksperimenti s brzinama od 1 Tbit/s. Od tada pa prema današnjem vremenu primjećuje se sporiji rast kapaciteta.

Također se može uočiti da je rast kapaciteta za TDM stao na vrijednosti od 100 Gbit/s, dok se rast kapaciteta za WDM nastavio i predviđa se rast preko 100 Tbit/s, [5].

TDM i WDM se mogu koristiti zajedno i koegzistirati u prijenosnim mrežama.



Slika 2.8. Primjer TDM/WDM optičke prijenosne mreže, [1]

Kako je prikazano slikom 2.8., moguće je izgraditi veću optičku prijenosnu mrežu koristeći TDM kanale za povezivanje WDM podmreža. Kada se WDM koristi u podmreži može znatno povećati pouzdanost i fleksibilnost mreže.

3 RAZVOJ DWDM TEHNOLOGIJE

Multipleksiranje s valnom podjelom se može podijeliti na dvije osnovne podvrste:

- multipleksiranje s grubom valnom podjelom (CWDM - *Coarse Wavelength Division Multiplexing*)
- multipleksiranje s gustom valnom podjelom (DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*).

DWDM tehnologija u odnosu na CWDM tehnologiju nudi ogroman kapacitet prijenosa informacija, te je ona bolji izbor za mreže velikih udaljenosti, dok je kod manjih mreža, kao što su gradske, pristupne i lokalne, bolji izbor CWDM jer je trošak izgradnje optičke mreže bazirane na CWDM tehnologiji manji.

3.1 Multipleksiranje s grubom podjelom kanala - CWDM

Multipleksiranje s grubom podjelom kanala je vrsta multipleksiranja u kojemu su multipleksirani kanali grubo, odnosno, rijetko raspoređeni uzimajući u obzir njihove centralne valne duljine.

CWDM je standardiziran od strane Međunarodne telekomunikacijske unije (ITU - *International Telecommunication Union*)¹ odnosno njenog ITU-T sektora. Za CWDM, prema [17], najvažniji su slijedeći standardi:

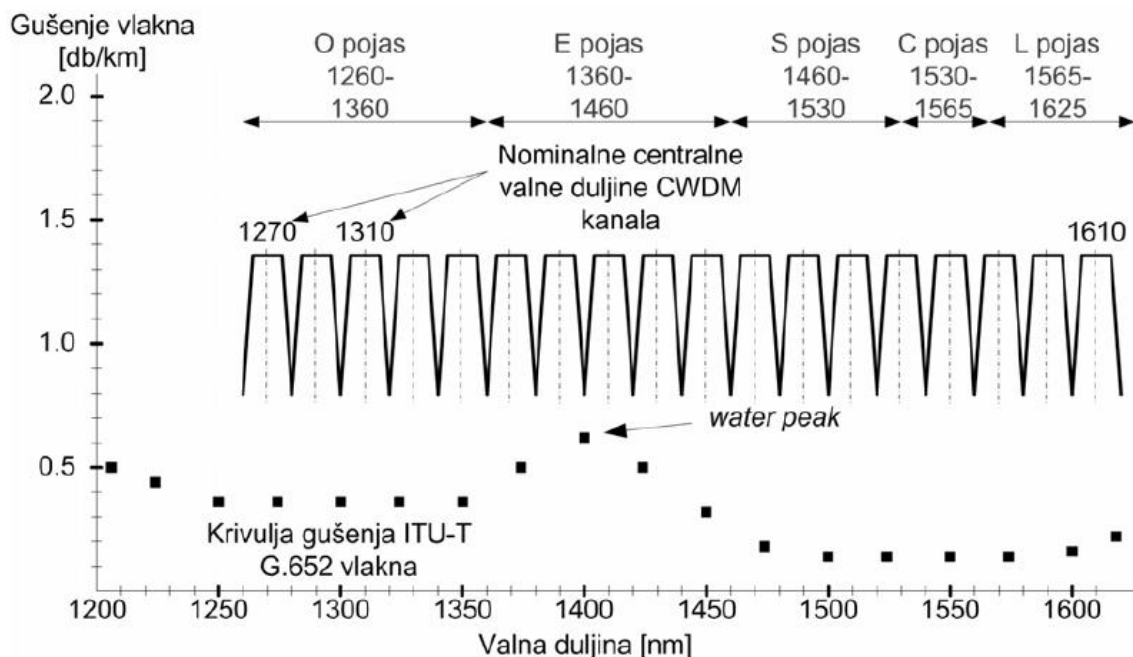
- ITU-T preporuka G.694.2 (2003), Spektralne rešetke za WDM aplikacije: CWDM valna rešetka (engl. *Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength Grid*).
- ITU-T preporuka G.695 (2010), Optička sučelja za aplikacije kod multipleksiranja s grubom valnom podjelom (engl. *Optical interfaces for Coarse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

U navedenim preporukama donesene su specifikacije koje se tiču: valne duljine, rasporeda CWDM kanala, parametara optičkih sučelja za CWDM mrežne aplikacije, jednosmjerne i dvosmjerne veze, budžet (engl. *power budget*) i udaljenost prijenosnog puta. Također su određeni parametri optičkih komponenti: prigušivača (engl. *attenuator*), sprežnika (engl. *splitter/combiner*), konektora, filtara, spojeva, preklopnika (engl. *switch*), kompenzatora disperzije (engl. *dispersion compensator*), multipleksera, demultipleksera te optičkih multipleksera koji imaju mogućnost

¹ Cilj ITU-T sektora je donošenje tehničkih standarda koji predlažu tehničke osobine telekomunikacijskih mreža i njihovih sastavnih komponenti. Standardi omogućuju kompatibilnost između optičkih uređaja i komponenti različitih proizvođača, a definirani su u obliku preporuka (engl. *recommendation*) i nisu obvezujući.

dodavanja i ispuštanja valnih duljina (OADM - *Optical Add and Drop Multiplexer*). Osim ove tri preporuke postoje i brojne druge koje direktno ili indirektno imaju utjecaja na CWDM, [19].

Na slici 3.1. prikazane su CWDM valne duljine koje su standardizirane u ITU-T G.694.2 preporuci. One se nalaze 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, koji su prikazani tablicom 1. Maksimalan broj kanala koje ta preporuka dozvoljava je 18 kanala, i s 20 nm razmakom između pojedinih kanala².



Slika 3.1. CWDM kanali u odnosu na optičke pojaseve, [18]

Tablica 1. Optički pojasevi

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

Izvor: [13]

CWDM kanali se nalaze unutar nekoliko optičkih pojaseva, a svaki od njih ima drukčije karakteristike. Pojasevi se nalaze u infracrvenom (engl. *infrared*) dijelu spektra. Od cijelog CWDM valnog spektra definiranog prema G.694.2 najkvalitetnije valne duljine za propagaciju svjetla su oko 1300 nm i 1550 nm, odnosno drugi i treći

² Broj kanala kod DWDM-a je i do 160 kanala, s razmakom između kanala od samo 0.2 nm, te je iz toga vidljivo zašto se CWDM naziva rijetko valno multipleksiranje (op.a.)

„prozor“ O i C pojasa, je su kod tih valnih duljina idealni uvjeti za prijenos signala. Od ostalih je pojaseva najzanimljiviji E pojas koji se dugo vremena izbjegavao zbog velikog prigušenja uzrokovanog OH^- ionima, tj. vodi koja ima svoj vrhunac na oko 1383 nm te se naziva „vodenim vrhom“ (engl. *water peak*), [17], [18].

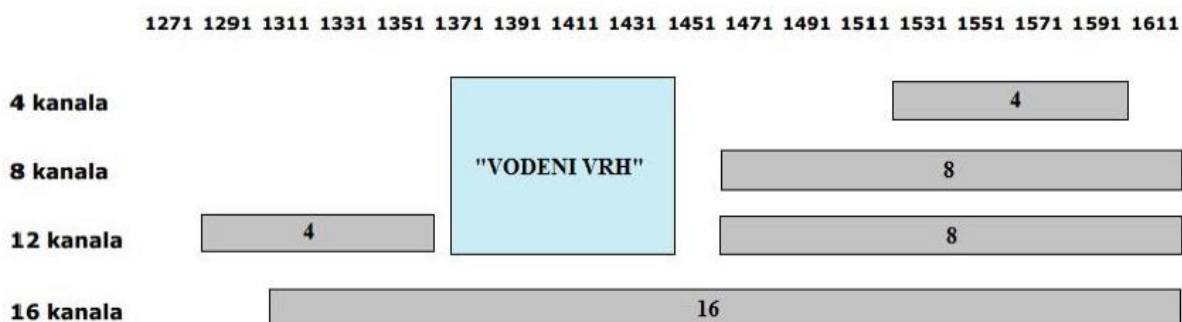
Veliki razmak između susjednih kanala, prema [17], [18], omogućuje korištenje jeftinijih, manje preciznih lasera, koji dovode do značajnih ušteda pri izgradnji optičkih mreža s valnim multipleksiranjem. Za korištenje takvih lasera ITU-T preporuka G.694.2 propisuje raspored 18 kanala s centralnim valnim duljinama navedenim u tablici 2.

Tablica 2. 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

Izvor: [18]

Na slici 3.1. je vidljiva i krivulju gušenja standardnog jednomodnog vlakna, koje ima svoj lokalni maksimum na valnoj duljini od otprilike 1400 nm – taj maksimum se zove vodeni vrh i povećava gušenje signala. S izumom naprednijih vlakana kao što su G.652.C, tj., vlakno sa smanjenim vodenim vrhom (LWP - *low water peak*) i G.652.D, tj., vlakno s uklonjenim vodenim vrhom (ZWP - *zero water peak*), postalo je moguće koristiti taj vrlo široki pojas valnih duljina za prijenos informacija uz minimalno gušenje signala.



Slika 3.2. Plan CWDM kanala, [18]

Na slici 3.2. prikazan je plan CWDM kanala te „voden vrh“. Kanali su organizirani na ovaj način jer “ i dalje postoje optički kabeli koji ne koriste optička vlakna sa smanjenim ili uklonjenim „vodenim vrhom“³.

CWDM koristi skupine od 4, 8, 12 ili 16 kanala, kako je prikazano slikom 3.2., različitih valnih duljina prema preporuci G.695. Kanali su birani izbjegavajući E pojas korištenjem kanala na valnim duljinama gdje je prigušenje i gubljenje signala najmanje. Jedino 16 kanalni CWDM ide od 1311 do 1611 nm te prolazi kroz E pojas, [17], [18].

3.2 Multipleksiranje s gustom podjelom kanala (DWDM)

Sredinom devedesetih godina prošlog stoljeća razvijen je DWDM koji omogućuje implementaciju 16-40 kanala s razmakom od 100 – 200 GHz-a, krajem devedesetih godina sposoban je prenositi 40 – 160 paralelnih kanala s razmakom od 25 – 50 GHz. DWDM tehnologija namijenjena je povećanju propusnosti preko postojećeg optičkog vlakna.

Kod DWDM-a je najveća razlika u odnosu na CWDM u broju kanala. Dok kod CWDM tehnologije postoji 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, [18].

Tablica 3. 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

Izvor: [18]

U ITU-T preporuci G.964.1 razmak između kanala se vrlo često definira kao frekvencija, a ne kao valna duljina. Frekvencija signala je 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. Primjerice razmak od 100 GHz na valnoj duljini od 1530 nm jednak je 0,78 [nm], dok je razmak od 100 GHz na valnoj duljini od 1550 nm jednak 0,80 [nm]. Kod DWDM-a, broj kanala nije moguće unaprijed odrediti već se prvo mora odrediti razmak između kanala, [18].

³ Većina optičkih kabela položena prije 2000 godine ima „voden vrh“, [17].

Sve frekvencije i valne duljine u DWDM sustavima su određene u ITU-T G.694.1 preporuci, te su neke od njih prikazane tablicom 4.

Tablica 4. Djelomični prikaz rasporeda DWDM kanala

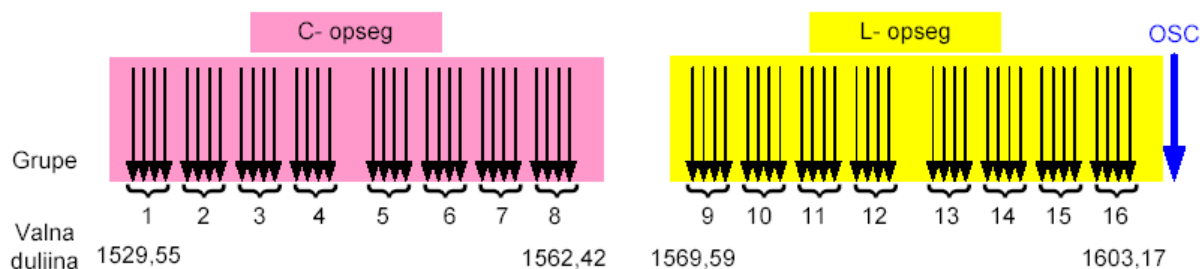
Nominalne centralne frekvencije [THz] za razmake od:				Približne nominalne centralne valne duljine [nm]
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	≥100 GHz	
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
195,9375	/	/	/	1530,04
195,9250	195,925	/	/	1530,14
195,9125	/	/	/	1530,24
195,9000	195,900	195,90	195,9	1530,33
195,8875	/	/	/	1530,43
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
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*

Izvor: [20]

U gornjoj tablici prikazan je samo dio originalne tablice zbog prevelikog broja potencijalnih kanala. Važno je naglasiti da se DWDM valne duljine nalaze unutar C i L valnog pojasa.

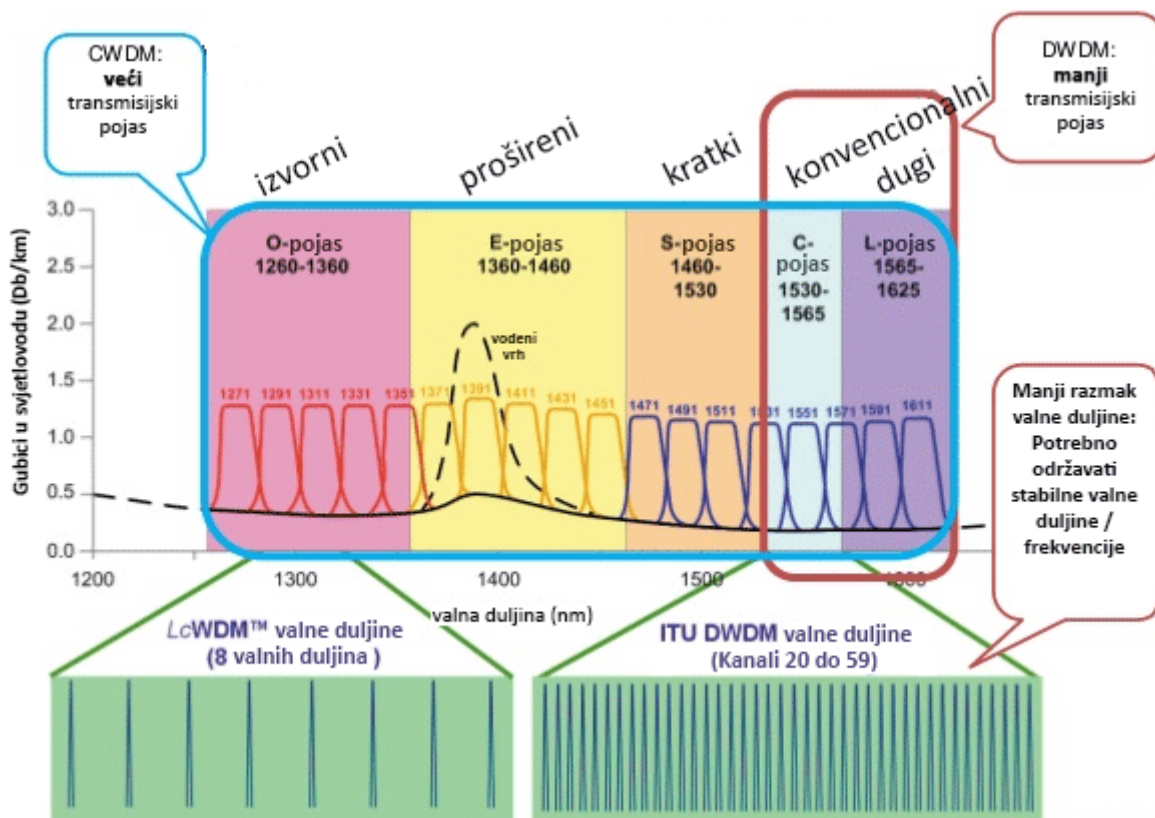
Prema preporuci ITU-T G.694.1 i primjenom optičkih vlakana ITU-T G.652 DWDM omogućuje 64 valne duljine po svjetlovodnom vlaknu, kako je prikazano slikom 3.3. Prema istoj preporuci su 64 valne duljine raspodijeljene u 16 skupina po 4 valne duljine. Razmak između valnih duljina ili kanala je 100GHz ili 0,8nm. Valne duljine su podijeljene po skupinama kako bi se u pojedinim uređajima omogućilo jednostavnije izdvajanje odnosno umetanje grupe od 4 valne duljine u promet. Kod

ubacivanja signala u optičku nit kod DWDM-a je potrebno voditi računa o izjednačavanju razina signala koji se trenutno prenose i onih koji se ubacuju u vlakno, [17], [20].



Slika 3.3. Raspored valnih duljina za DWDM, [17]

Vidljivo iz slike 3.3. te slike 3.4., skupine valnih duljina 1-8 smještene su u C pojas (1529,55nm – 1562,42nm), dok su skupine 9-16 smještene u L pojas (1569,59nm – 1603,17nm).



Slika 3.4. DWDM kanali u odnosu na optičke pojaseve, [21]

Valne duljine u prostoru između C i L pojasa se namjerno ne koriste.

Na slici 3.4. vidljivo je da se DWDM valne duljine nalaze samo unutar C i L pojasa, dok su za smještaj CWDM valnih duljina bili potrebni svi prikazani pojasevi. Razlog korištenja C pojasa za DWDM, prema [17], [18], [20] i [21], su slijedeće:

- C pojas je područje minimalnog gušenja,

- Korištenje EDFA⁴ (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*) pojačala,

EDFA pojačalo može pojačati bilo koji signal čija se valna duljina nalazi unutar tog raspona valnih duljina. EDFA pojačala su visoko učinkovite, ali su 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*)⁵.

U tablici 4. te na slici 3.4. vidljivo je da su neke valne duljine unutar L pojasa, odnosno koje se ne nalaze unutar operativnog pojasa EDFA pojača. To su one valne duljine iznad 1565 nm, a za njih je razvijeno razvijeno je L-pojasno pojačalo s erbijem dopiranom niti (EDFA-L band - *L band Erbium Doped Fiber Amplifier*) koje pojačava signale unutar L pojasa, [18], [21].

DWDM tehnologija je smanjila trošak prijenosa podataka, a dalje se razvija kako bi zadovoljila zahtjeve potrebne za osvajanje sveoptičke mreže.

Glavni pokretač razvoja 100G DWDM mreža je rast prometa, kao što je to bio i slučaj s prijelazom s 2.5G na 10G i s 10G na 40G te sada na 100G brzine optičkog kanala. Predviđanja su da će rast prometa svake godine biti između 50 i 60%, što je povezano s brojem Internet korisnika. Kako raste broj korisnika, tako raste i količina prijenosnog pojasa po korisniku, što predstavlja ogroman pritisak na regionalne, gradske i jezgrene mreže.

Drugi pokretač razvoja su primjene u mrežnoj arhitekturi. U prošlosti su davatelji usluga imali odvojene mreže za svaku vrstu pristupne tehnologije ili usluge, dok se danas prati trend spajanja usluga i tehnologija na jednu IP jezgru, što opet znači da jezgra mreže mora prenositi puno više prometa.

Kada je tvrtka AT&T spojila svoje mreže (SBC i BellSouth) to je dovelo do prelijevanja integriranih mreža na jednu jezgrenu mrežu koja je odmah zahtijevala nadogradnju na brzine od 40G, a sada je sposobna prenositi i do 100G.

Veliki broj svjetskih telekomunikacijskih tvrtki je prešao na 40G mreže:

Comcast ima jednu od najvećih IP-over-WDM 40G mreža koju je implementirao za svoju nacionalnu mrežu

U Japanu NTT nudi 40G mrežnu uslugu preko WAN Ethernet mreže

Verizon je pustio u rad „live“ promet na 40G linkovima

Deutsche Telekom (DT) je također pustio u rad 40G mrežu, a u Republici Hrvatskoj je pokrenut pilot projekt terabitne TeraStream mreže

⁴ Vlakno koje je dopirano s rijetkim zemljanim metalom erbijem (eng. *erbium*) koji ima svojstvo da pojačava svjetlost na valnim duljinama u C pojasu, [18].

⁵ Ovi postupci su potrebni kako bi se signal očistio od akumuliranog šuma nastalog različitim oblicima disperzije (op.a.).

Sprint Nextel nadograđuje svoju mrežu na 40G koristeći opremu tvrtke Cisco

DWDM tehnologija se stalno razvija, a konačan cilj je sveoptička mreža nove generacije. Prvi korak prema tome razvoju ogleda se u razvoju inteligentnih i softverski konfigurabilnih uređaja koji omogućuju velike brzine prijenosa velikih količina podataka na velike udaljenosti. Područje razvoja obuhvaća multipleksere, optička pojačala, polarizaciju, modulaciju i mnoga druga.

Uz razvoj uređaja i tehnologije, potrebna je i standardizacija kako bi oprema različitih proizvođača bila kompatibilna. Posljednji iskorak u pogledu standardizacije je napravila ITU 2012. kada je standardizirala DWDM kanala s 50 GHz razmakom. Međutim, razvojem NG ROADM uređaja, o kojima će više riječi biti u četvrtom poglavlju, to već nije zadovoljavajuće, već se traži proširenje C pojasa radi ostvarenja većeg kapaciteta.

3.3 Prednosti i nedostaci WDM tehnologija

Kada se govori o prednostima i/ili nedostacima pojedine promatrane WDM tehnologije važno je napomenuti da one jedna drugu ne isključuju niti su jedna drugoj konkurencija. Upravo zbog svojih različitosti svaka od njih ima svoje prednosti koje će najviše doći do izražaja ako ih se primjeni na pravom mjestu, odnosno, na pravom dijelu mreže gdje mogu pokazati sve svoje funkcionalnosti. U nastavku su navedene od najvažnijih prednosti i nedostataka svake WDM tehnologije.

Kod DWDM sustava 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. U suprotnom može doći do interferencije između susjednih kanala uslijed pomaka valnih duljina. Takvi zahtjevi nužno vode do većih dimenzija samih lasera, te do većih troškova izrade i nadziranja njihovog rada, a zbog potrebe za hlađenjem povećava se i potrošnja energije, [2].

Kod WDM sustava dolazi do pojave frekvencijskog cvrkutanja lasera (eng. *chirp*). Ono za posljedicu ima pomak valne duljine signala. Cvrkutanje se kod DWDM-a izbjegava korištenjem vanjske modulacije signala, dok se kod CWDM-a, zbog nižih cijena i tolerancije spram takvih pomaka valnih duljina, koristi direktna modulacija. Rezultat vanjske modulacije, prema [2], [18], je slijedeće:

- vrlo malo ili nikakvo frekvencijsko cvrkutanje lasera,
- veliki domet signala,
- veća cijena sklopova
- veći broj komponenti i
- zahtjev za upravljanjem komponentama.

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 od CWDM komponenti. 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 korištenje DWDM-a u gradskoj ili pristupnoj mreži je upitno. CWDM ima relativno niske cijene komponenti i niske troškove održavanja, te je idealan kandidat za manje optičke mreže. Problem leži u broju kanala koje CWDM omogućuje, jer se ne može unaprijed predvidjeti hoće li tih 16 kanala biti dovoljno za zadovoljenje potreba za kapacitetom tih mreža.

Iz svega do sada navedenog mogu se uočiti osnovne razlike između WDM tehnologija koje su sintetizirane i prikazane tablicom 5.

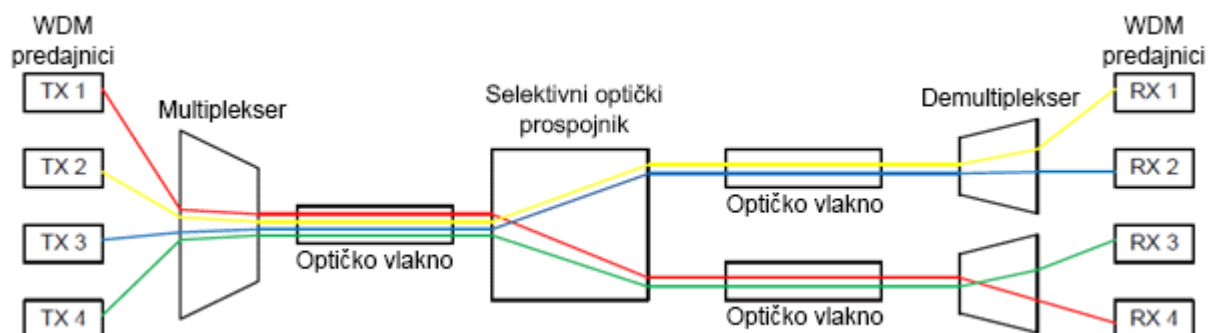
Tablica 5. Usporedba WDM tehnologija

CWDM	DWDM
16 aktivnih valnih duljina po vlaknu	160 aktivnih valnih duljina po vlaknu
Određen valnim duljinama	Određen valnim duljinama i frekvencijama
Dizajniran za kraće udaljenosti	Dizajniran za velike udaljenosti
Valne duljine rijetko raspoređene	Valne duljine gusto raspoređene
Nema pojačavanja signala – kraći domet	Mogućnost pojačavanja signala – veći domet
Jeftinija oprema	Skuplja oprema
Moguć prijenos do 16 kanala u spektru od 1270 nm do 1610 nm sa 20 nm razmakom između kanala	Moguć prijenos do 80 kanala sa 100 GHz razmakom ili 160 kanala sa 50 GHz razmakom u C pojasu sa svim kanalima smještenim u području 1550 nm
Koristi sve pojaseve	Koristi C i L pojas
Razdvaja spektar na veće dijelove	Razdvaja spektar na manje dijelove
Nije potrebno hlađenje lasera	Potrebno hlađenje lasera
Manja potrošnja energije	Veća potrošnja energije

Izvor: izradio autor prema [2], [10], [17], [18], [21], [20], [19]

4 ELEMENTI WDM PRIJENOSNIH SUSTAVA

WDM prijenosni sustavi, ovisno radi li se o CWDM ili o DWDM sustavima, mogu imati velik broj različitih komponenti. Zbog dostupnosti literature ovaj rad će se ograničiti na osnovne dijelove WDM sustava, odnosno njegove najvažnije komponente koje su prikazane slikom 4.1.



Slika 4.1. Jednostavan WDM prijenosni sustav, [26]

Kako je vidljivo sa slike 4.1., osnovni elementi WDM prijenosnog sustava su slijedeći:

- WDM predajnici (eng. *WDM transmitters*)
- multiplekseri (*multiplexers*)
- optičko vlakno (eng. *optical fibers*)
- WDM prijamnici (eng. *WDM receivers*)
- Demultiplekseri (eng. *Demultiplexers*)
- Optički prospojnik (eng. *Optical Cross Connect*)

Osim njih, moguće su još i druge osnovne komponente, kao što su:

- Optički filtri
- Optička pojačala (eng. *Amplifiers*)
- Pretvarač valnih duljina (eng. *wavelength converters*)

U nastavku ovog poglavlja bit će objašnjene navedene komponente WDM sustava.

4.1 Optičko vlakno

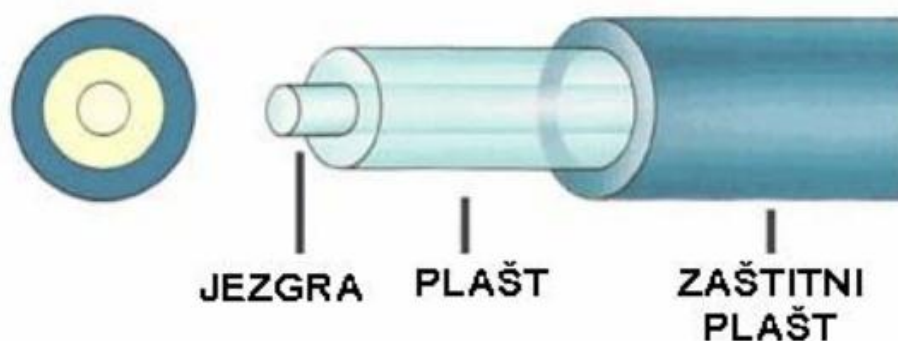
Optičko vlakno ili svjetlovod (engl. *optical fiber*) je tanka staklena ili plastična nit sa svojstvom vođenja svjetla. Kako bi se optičko vlakno koristilo za prijenos signala potrebno je obaviti pretvorbe signala iz električkog u svjetlosni na predajnoj strani, te iz svjetlosnog u električki na prijemnoj strani.

Neke osnovne prednosti upotrebe svjetlovoda, prema [8], su slijedeće:

- mala je mogućnost pogreške,
- na prijenos optičkim vlaknom ne djeluju smetnje električnih uređaja,

- ne emitira smetnje u okolinu,
- tanko je i lagano.

Osnovni izgled svjetlovoda prikazuje slika 4.2., gdje je vidljivo da se svjetlovod sastoji od jezgre, plašta i zaštitnog plašta.



Slika 4.2. Izgled svjetlovoda, [7]

Jezgra služi za prijenos signala, dok plašt oko jezgre služi samo za vraćanje svjetlosnog signala natrag u jezgru pomoću totalne refleksije.

Dobre strane svjetlovoda, prema [7], su slijedeće:

- prijenos velikog broja kanala, odnosno velike brzine prijenosa
- niska cijena materijala
- nije vodljiv
- nije osjetljiv na elektromagnetske utjecaje pa ne dolazi do preslušavanja ni ometanja
- malo prigušenje pa su mogući veliki razmaci između regeneratora
- male dimenzije i težine
- velika savitljivost što omogućuje lakšu manipulaciju
- otporan na visoke temperature

Loše strane svjetlovoda, prema [7], su slijedeće:

- mala mehanička čvrstoća
- osjetljivost na ionizantna zračenja
- složeno nastavljanje

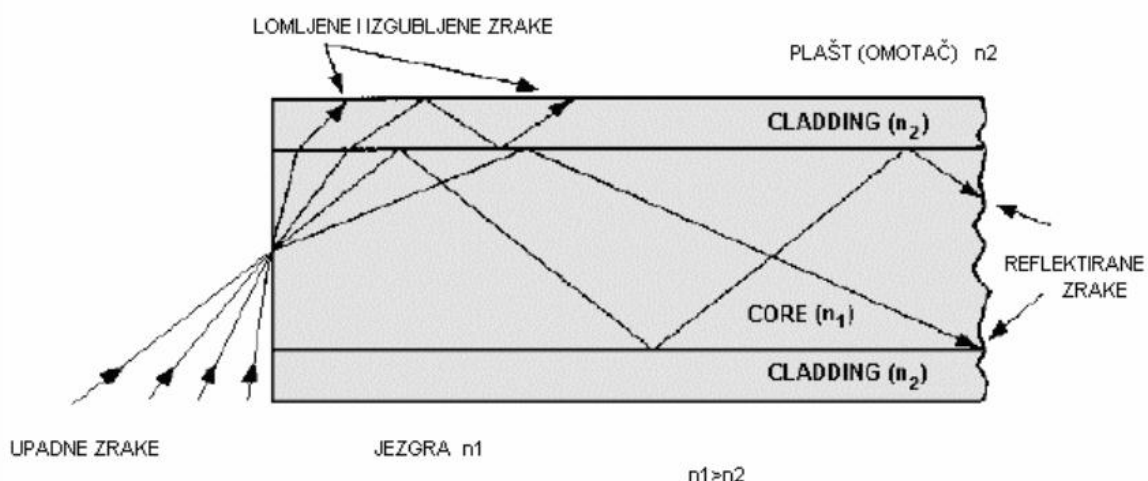
Putovanje svjetlosti kroz optička vlakna, temelji se na dva zakona geometrijske optike:

- zakon odbijanja (refleksije) svjetlosti $\alpha = \beta$
- Snelliusov zakon loma (refrakcije) svjetlosti

Jezgra svjetlovoda ima veći indeks loma svjetlosti od omotača. Princip rada je slijedeći:

- zraka upada na jezgru i dolazi do prvog lomljenja zrake,
- kad zraka stigne na granicu jezgre i omotača, ona se reflektira zbog snellovog zakona
- kut upada jednak je kutu odbijanja zbog zakona refleksije.
- važno je da je kut upada na granicu dvaju sredstava veći od kritičnog jer u tom slučaju svjetlost nastavlja putovati kroz svjetlovod.

Teoretski, zraka može beskonačno dugo putovati kroz svjetlovod, ali tada se radi o idealnom svjetlovodu. Svjetlovodi sadrže nečistoće i upravo zbog tih nečistoća dolazi do loma zrake te se dio zrake se gubi u omotaču, kako je prikazano slikom 4.3.

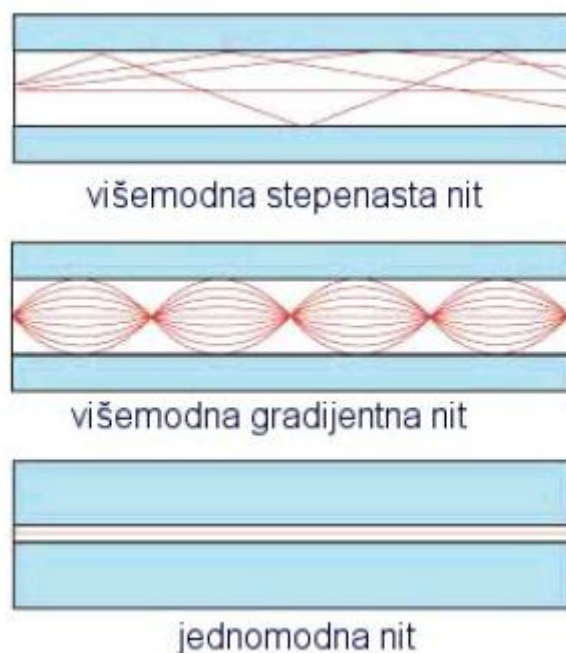


Slika 4.3. Prolazak zrake kroz svjetlovod, [7]

Upravo radi ovog svojstva dolazi do prigušivanja zrake te se ona nakon nekog vremena potpuno gubi. Iz tog razloga je potrebno postavljanje optičkih pojačala koja će obnoviti, odnosno pojačati, oslabljenu zraku kako bi ona mogla dalje putovati svjetlovodom, [7].

Svjetlovodi se mogu podijeliti, prema [7], obzirom na različite aspekte:

- vrsta materijala za jezgru odnosno odrazni plašt:
 - oboje od kvarcnog stakla (SiO_2)
 - oboje od višekomponentnog stakla (smjesa SiO_2 s alkalnim, zemnoalkalnim i kovinskim oksidima Na_2O , SiO_2 i dr.)
 - jezgra od kvarcnog stakla, a odrazni plašt od plastične mase (PCS - *Plastic Clad Silica*)
 - oboje od plastičnih masa (polimeri)
- promjena indeksa loma:
 - skokovit
 - kontinuiran - gradijentni
- broj modova koji se mogu prenositi (slika 4.4.):
 - jedno(mono)modni (SMF – *Single Mode Fiber*)
 - više(multi)modni (MMF – *Multi Mode Fiber*)



Slika 4.4. Vrste svjetlovoda s obzirom na broj modova koje mogu prenositi, [7]

Karakteristike svjetlovoda mogu se, prema [9], podijeliti na linearne i nelinearne. U linearne spadaju:

- prigušenje (atenuacija),
- kromatska disperzija (CD),
- polarizacijski mod disperzije (PMD),
- optički odnos signal - šum.

Nelinearne pojave na svjetlovodu su sljedeće:

- vlastita modulacija faze (SPM – *Self Phase Modulation*)
- križna modulacija faze (XPM – *Cross Phase Modulation*)
- miješanje 4 vala (FWM – *Four Wave Mixing*)
- Ramanovo raspršenje (SRS – *Stimulated Raman Scattering*)
- Brillouinovo (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*)
- Kerrov efekt.

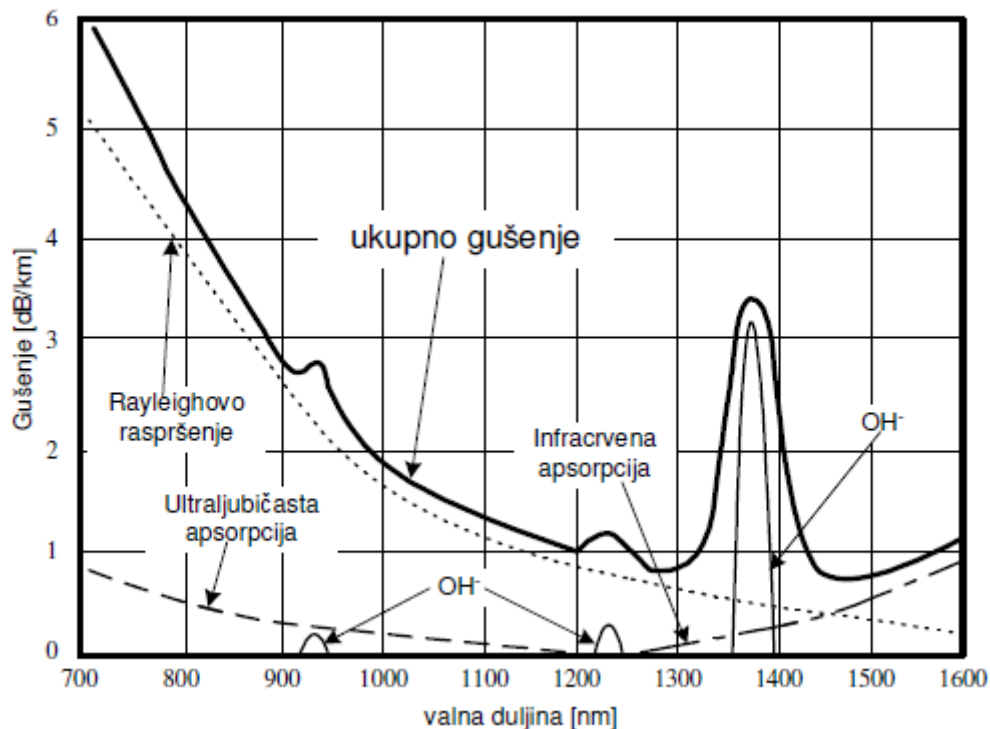
Na karakteristike svjetlovoda najveći utjecaj imaju linearni efekti prigušenja i kromatske disperzije, te će upravo oni biti razmatrani u nastavku.

4.1.1 Prigušenje vlakna

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

- Rayleighovo raspršenje
- Apsorpcija svjetla (ultraljubičasta i infracrvena)
- Nečistoće unutar materijala silicijevog vlakna
- Makro i mikro savijanja

Ovi utjecaji prikazani su slikom 4.5. te slikom 4.6.

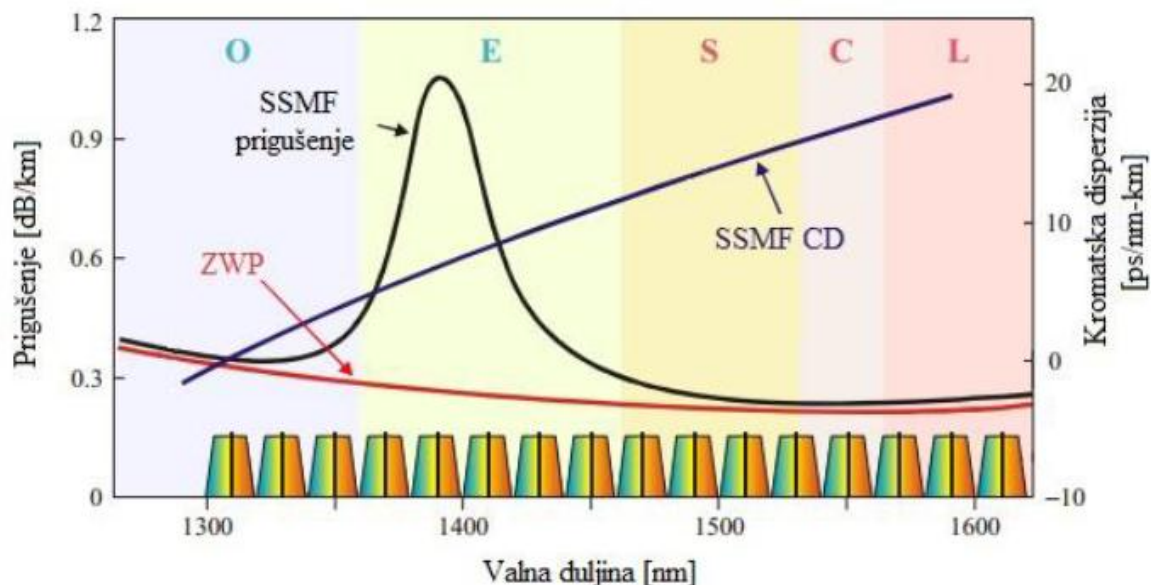


Slika 4.5. Ovisnost koeficijent gušenja optičkog vlakna o valnoj duljini signala, [12]

Rayleighovo raspršenje je uzrokovano malom promjenom refrakcijskog indeksa vlakna na mikroskopskoj razini, manjoj od valnih duljina svjetla. To je neizbježna posljedica do koje dolazi prilikom proizvodnje optičkog vlakna. Proporcionalno je λ^{-4} , gdje je λ oznaka za valnu duljinu, [10].

Gubitak zbog Rayleighovog raspršenja nastaje kad se svjetlost sudara s pojedinačnim molekulama optičkog vlakna. Dio raspršene svjetlosti izlazi iz jezgre i apsorbira se u plašt, a dio se vraća prema izvoru svjetla (engl. *backscattering*). Glavni su uzrok apsorpcije svjetla OH^- molekule vode i nečistoće unutar vlakna koje utječu na pretvaranje svjetla u toplinsku energiju. Dominanta OH^- apsorpcija koja se događa u optičkom vlaknu najizraženija je na valnim duljinama oko 950, 1385 i iznad 1600 nm, [11].

Rayleighovo raspršenje najznačajnije doprinosi gušenju signala u području valnih duljina koje se koriste pri valnom multipleksu (3. optički prozor). Ultraljubičasta apsorpcija te infracrvena apsorpcija imaju mali utjecaj na gušenje. Gubici uslijed mikro i makro savijanja posljedica su geometrijskih obilježja vlakna (savijanje ili nesavršenost geometrije optičkog vlakna) koja dovode do neispunjenja uvjeta totalne refleksije, [12].



Slika 4.6. Atenuacijska i disperzijska krivulja jednomodnog optičkog vlakna, [13]

Prije razvitka vlakana sa smanjenim ili uklonjenim OH^- „vodenim vrhom“ bila je uobičajena uporaba optičkih „prozora“ na oko 1300 nm i 1550 nm [18]. Optički se „prozori“ nalaze između apsorpcijskih pojaseva, a razlog tome je vidljiv iz slike 3.5. gdje je na valnom području oko 1550 nm najmanji gubitak i iznosi oko 0.185 dB/km, dok na oko 1310 nm krivulja ima svoj lokalni minimum i gubici iznose oko 0.325 dB/km. Nakon 1550 nm krivulja lagano raste, a uzrok tome su infracrveni apsorpcijski gubici, OH^- , makro i mikro savijanja.

Makro i mikro savijanja su dosta čest problem za već položene kabele jer uzrokuju dodatne troškove. Do njih dolazi prilikom proizvodnje, polaganja kabela i raznih vanjskih utjecaja za vrijeme životnog vijeka optičkog vlakna kao što su temperatura, vlaga ili tlak zraka. Razlika je između njih što su makro savijanja ona koja se vide golim okom, dok su mikro savijanja nevidljiva oku. Za isto makro savijanje od 25 mm, na valnoj duljini od 1625 nm gubitak je 2 dB/km, dok je na 1550 nm gubitak 0.4 dB/km, iz čega se jasno vidi ovisnost gubitaka makro savijanja i valne duljine, [14].

4.1.2 Kromatska disperzija

Kromatska disperzija drugi je ograničavajući faktor komunikacija preko optičkih vlakana u WDM sustavima. Nastaje kao posljedica različite brzine propagacije optičkih signala čija brzina ovisi o valnoj duljini, što znači da svjetlost na različitim valnim duljinama ne putuje jednakom brzinom. Zbog toga će svjetlost pristizati na cilj u različitim vremenskim razmacima, što se u vremenskoj domeni manifestira kao širenje impulsa odnosno disperzija, [14].

Ova disperzija se u jednomodnim vlaknima, prema [15], može podijeliti na tri tipa:

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

Materijalna disperzija nastaje zbog ovisnosti indeksa loma jezgre optičkog vlakna o valnoj duljini te je glavni izvor disperzije u jednomodnim vlaknima. Do nje dolazi prilikom interakcije propagirajuće svjetlosti s elektronima vezanim na okolnu materiju, [10].

Valovodna disperzija je povezana s geometrijskim svojstvima vlakna i nastaje kad svjetlo putuje vlaknom promjera većeg nego što je promjer jezgre, dio tog svjetla rasprostire se jezgrom, a dio plaštem. Budući da je indeks loma jezgre veći nego indeks loma omotača, ovo uzrokuje razlike u brzini propagacije između različitih valnih duljina, odnosno svjetlo u plaštu putuje brže nego u jezgri. Valovodna kromatska disperzija nastaje 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. Povećanjem valne duljine povećava i valovodna disperzija, [16].

Profilna disperzija nastaje kao posljedica različite materijalne disperzije pojedinih primjesa u vlaknu što je obično jako mali iznos, pa se može zanemariti, [15].

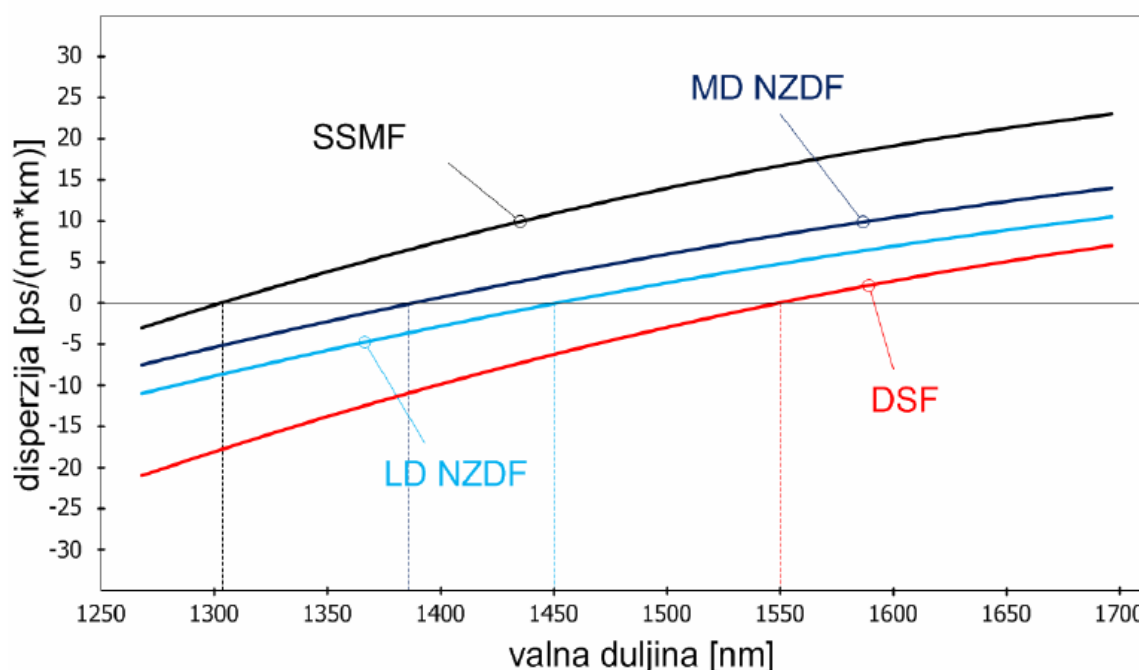
Kako postoje različite vrste optičkih vlakana, tako ona imaju i različitu disperziju. Najdostupnije jednomodno vlakno opisano je u ITU-T G. 652, a to je standardno jednomodno vlakno (SSMF - *Standard Single Mode Fiber*). Međutim, u istom dokumentu se navode i druge vrste vlakana, te su različita vlakna označena drugačijim slovom iza broja oznake vlakna:

- G.652.A i G.652.B su *mokra* vlakna,
- novija G.652.C i G.652.D *suha* vlakna s niskim ili nultim udjelom -OH nečistoća.

Druga ITU – T preporuka, G.653, opisuje jednomodno vlakno s pomaknutom disperzijom (DSF - *Dispersion Shifted Fiber*) koje ima nultu disperziju na valnoj duljini od ~1550 nm, i iako je optimizirano za rad na valnoj duljini od 1550 nm, može se koristiti i na valnoj duljini od ~1310 nm.

G.655 preporuka opisuje DSF vlakno s niskim iznosom disperzije (LD NZDF - *Low Dispersion Non-Zero Dispersion Fiber*). Koeficijent kromatske disperzije je takav da mu je apsolutna vrijednost veća od nule na valnim duljinama većim od 1530 nm. G.655 vlakno je razvijeno za primjenu uz upotrebu EDFA pojačala, kao što su *long-haul* prijenosni sustavi.

Preporuka ITU-T G.656 uvodi DSF vlakno sa srednjim iznosom disperzije (MD NZDF - *Medium Dispersion Non-Zero Dispersion Fiber*). Sva navedena vlakna i njihove disperzije prikazane su slikom 4.7.



Slika 4.7. Iznosi disperzije za različite tipove vlakana, [18]

Preporuka ITU-T G.656 te Preporuka ITU – T G.655 obuhvaćaju širok spektar danas komercijalno dostupnih NZDSF vlakana. Kako je vidljivo sa slike 4.7., na 1550 nm, magnituda disperzije NZDFS vlakana iznosi oko 4 do 8 ps/(nm·km), što je puno manje nego ~17 ps/(nm·km) kod SSMF vlakna. Upravo 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, [23], [24].

4.2 WDM predajnici

Odašiljači, predajnici ili izvori svjetlosti su uređaji na predajnoj strani koji konvertiraju električne signale u svjetlosne impulse. To su uređaji za slanje govornih, podatkovnih i drugih informacija u obliku svjetlosnog signala putem svjetlovoda.

Kao predajnici u WDM sustavima se koriste laseri⁶. Međutim, CWDM sustavi mogu koristiti LED⁷ (LED - *Light Emitting Diode*) ili laserske izvore svjetla. DWDM sustavi, s druge strane, dozvoljavaju upotrebu samo laserskih dioda.

⁶ LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

⁷ Ako se radi o vrlo malim udaljenostima od nekoliko stotina metara gdje je dovoljna manja propusnost, moguća je uporaba i LED-a.

Laser generira koherentno svjetlo, odnosno svjetlo koje se sastoji od konačnog broja valnih duljina na istoj fazi. Kod WDM sustava potreban je nadzor nad valnim duljinama lasera jer 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, [2], [10].

Kod CWDM sustava obično se koriste laseri s direktnom modulacijom, dok se kod DWDM sustava koriste laseri s vanjskom modulacijom (EM - *externally modulated*). Razlog tome što za *long-haul* i ostale DWDM sustave, direktno modulirani signali postaju degradirani prilikom prijenosa (zbog kromatske disperzije nastale širenjem spektra), a taj efekt je izraženiji kod direktno moduliranih lasera, [23].

Za upotrebu u WDM sustavima postoje različiti tipovi lasera od kojih se neki mogu koristiti samo u CWDM sustavima. Neki tipovi lasera koji se koriste, zajedno s njihovim osnovnim karakteristikama prikazani su tablicom 6.

Tablica 6. Karakteristike različitih izvora svjetla

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

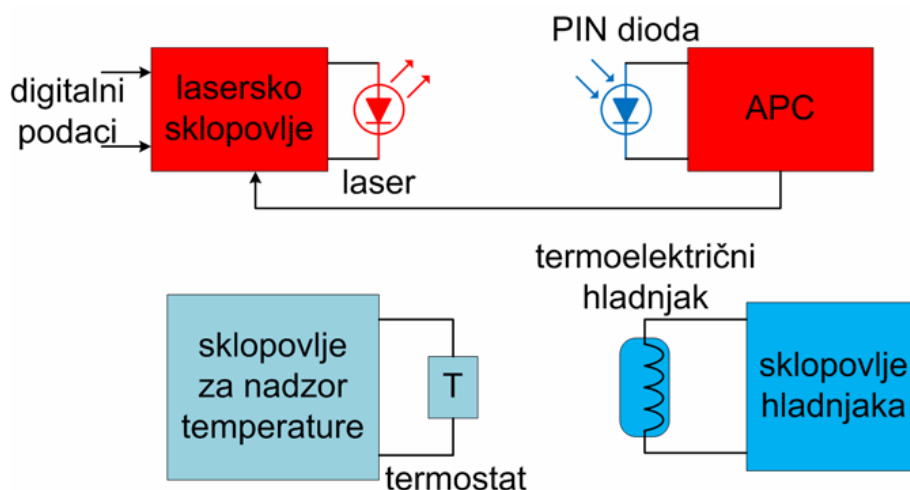
Izvor: [27]

FP (FP - Fabry-Perot) laseri su jedni od najjednostavnijih u optičkom komunikacijskom sustavu. Spadaju u mehaničko podesive lasere. Primjena u WDM sustavima im je ograničena zbog velike temperaturne ovisnosti, povećanjem radne temperature od 1°C promjeni se valna duljina za 0.4 nm. Osim toga, problem im predstavlja i kromatska disperzija. Iz tih je razloga uporaba FP lasera u CWDM sustavu moguća jedino kod sučelja na strani klijenta ili u nekom drugom obliku prijenosa podataka gdje je potrebna niska cijena, [27].

DFB laser (DFB - *Distributed Feedback*) je moguće modulirati vanjskim modulatorom koji se temelji na elektro apsorpcijskom efektu (EA-EML - Electro Absorption – *Externally Modulated Laser*). EA-EML omogućuje neovisnu kontrolu lasera i modulaciju što utječe na bolje performanse u odnosu na DML (DML – *Directly Modulated Laser*), ali ga i čini skupljim. EA-EML može se koristiti za nadogradnju postojećih CWDM prijenosnih sustava u cilju poboljšavanja performansi

korištenjem dužih valnih duljina C i L pojasa, gdje je disperzija najveća. Pomoću vanjskog modulatora moguće je postići modulacije od 10 Gb/s preko jednomodnog vlakna na udaljenostima od 10 do 80 km, [27].

Kako bi se bolje objasnio sam rad laserau WDM sustavima u nastavku će se prikazati DFB laser, s tom razlikom što će on kod CWDM sustava biti nehladeni, a kod DWDM sustava hlađeni.



Slika 4.8. Struktura DWDM predajnika, [21]

Kako je prikazano slikom 4.8., uobičajeni laserski predajnik se sastoji od laserskog sklopovlja⁸, nadzorne fotodiode i sustava automatske kontrole snage (APC - *Automatic Power Control*), koji šalje povratni signal laserskom sklopovlju u svrhu prilagodbe modulacije i struje praga. U DWDM sustavima valna duljina lasera mora biti precizno kontrolirana zbog jako uskog razmaka između kanala. Zbog toga u predajnicima za DWDM sustave postoji i dodatno sklopovlje za temperaturni nadzor i podešavanje. CWDM predajnik ima strukturu sličnu kao i DWDM predajnik osim što nema potrebu za nadzorom temperature i hlađenjem, pa je njegova struktura jednostavnija, [24], [27].

Uz već navedene prednosti CWDM lasera, kao što su niža cijena, manja potrošnja energije, jednostavnija struktura i odsutnost potrebe za hlađenjem, moraju se spomenuti i njegovi nedostaci. Ti nedostaci su briga oko pomicanja valnih duljina, te varijacije izlazne snage zbog povećanja temperature. Porastom temperature raste struja praga lasera, a smanjuje se efikasnost lasera. Taj se efekt djelomično može ublažiti APC sklopom. Osim toga, 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, [25], [27].

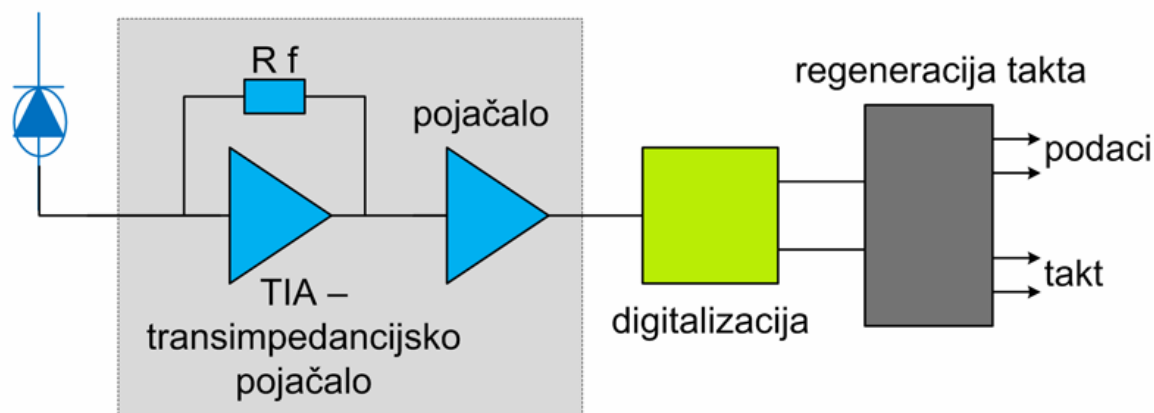
4.3 WDM prijamnici

Osnovna funkcija optičkog prijamnika je da detektira svjetlost i pretvori je u koristan električni signal.

⁸ Čine ga pokretački strujni krugovi koji obavljaju modulaciju

Osnovni optički prijamnik se sastoji od dva dijela – dio za detekciju i dio za pojačanje. Funkcijski blokovi prijamnika su prikazani na slici 4.9.

fotodetektor



Slika 4.9. Osnovna struktura WDM prijamnika

Princip rada WDM prijamnika sa slike 4.9. , prema [17], je slijedeći:

- Fotodetektor kao prednji dio prihvaća dolazeći tok svjetla i pretvara ga u električne podatkovne signale, odnosno u električni signal proporcionalan jačini svjetla kojim je fotodioda osvijetljena.
- Signal dalje putuje u transimpedancijsko pojačalo (TIA - *TransImpedance Amplifier*) koji je u biti strujno/naponski pretvarač.
- Ako je signal preslab, tada se pojačava preko limitirajućeg pojačala (LA - *Limiting Amplifier*) i dalje nastavlja put u digitalizacijsko sklopovlje.
- U digitalnom se sklopovlju nalazi analogno/digitalni pretvarač koji signal pretvara u logičku „1“ ili logičku „0“,
- Nakon detekcije, slijedi dio za pojačanje čija je zadaća obnoviti originalni signal (2R), a vrlo često napraviti i vremensku obnovu signala (3R). Prijamnik s takvom integracijom svih navedenih dijelova naziva se 3R prijamnik.

PIN fotodioda (PIN - *P-intrinsic-N*) i lavinska APD fotodioda (AP - *Avalanche PhotoDiode*) su dva najčešće korištena detektora u optičkim komunikacijama. Ovisno o tome razlikuju se dvije vrste prijamnika: prijamnici bazirani na PIN diodama i prijamnici bazirani na APD diodama.

Kako performanse prijamnika ovise o prednjem optičkom dijelu, u nastavku se navode neka svojstva PIN i APD prijamnika, koja su prikazana i tablicom 7.:

▪ APD prijamnici:

- 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 prijamnike
- veća cijena nego PIN dioda
- PIN prijamnici:
 - 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 prijamnicima, gdje se tolerira niža osjetljivost, primjerice -16 dBm pri 10 Gbit/s i -22 dBm pri 2.5 Gbit/s
 - kompaktni prijamnici s tihim električnim pojačalima

Tablica 7. Usporedba PIN i APD fotodioda

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

Izvor: [27]

4.4 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.

Primopredajnik je uređaj koji se sastoji od kombinacije predajnika i prijamnika te predstavlja jednu od ključnih komponenti optičkog prijenosnog sustava. Najveća je korist primopredajnika u dvosmjernim vezama iz razloga što svaka strana veze ima predajnik i prijamnik. Osim ove prednosti primopredajnika vrlo je važna i njihova modularnost, tj. mogućnost jednostavnog priključenja na električno sklopovlje. Ta modularnost omogućuje razdvajanje optike od elektroničkog dijela sustava i na taj način ostvaruje se cjenovno učinkovit dizajn sustava, [26], [24], [27].

4.5 Optički filtri

Optički filtri omogućuju odvajanje i selekciju signala na određenoj valnoj duljini i obavezna su komponenta WDM sustava. Neke važne uloge koje optički filtri u WDM sustavima obavljaju su, prema [24], [26], slijedeće:

- izdvajanje jednog ili više kanala iz veće skupine kanala različitih valnih duljina,
- odvajanje jednog kanala od neželjenih šumova na različitim valnim duljinama i
- selektivno dodavanje-ispuštanje kanala u mrežnim čvorovima,

- trebaju podržavati usmjeravanje,
- omogućiti kombiniranje valnih duljina bez proizvedenih gubitaka (ili vrlo malih gubitaka),
- trebaju imati mogućnost kompenzacije učinaka disperzije na valne duljine svjetlosti.

Prema [26], poželjna svojstva koja optički filtri moraju imati su slijedeća:

- široki raspon podešavanja kako bi maksimizirali broj kanala koje možemo odabrati
- malo preklapanje (eng. *crosstalk*) od susjednih kanala
- visoka brzina podešavanja (eng. *tuning time*) kako bi minimizirali vrijeme pristupa (eng. *access time*)
- mali gubitak zbog umetanja (eng. *insertion loss*)
- mala osjetljivost na polarizaciju
- stabilnost prilikom promjena u okolini (temperatura, vlažnost, vibracije)
- niska cijena

Svi filtri moraju imati neki mehanizam odabira valnih duljina te se grubo mogu podijeliti na dvije skupine prema temeljnim mehanizmima koje koriste, a to su:

- optička interferencija
- optička difrakcija

Prema mogućnosti podešavanja valnih duljina koje je potrebno filtrirati, odnosno prema mogućnosti da mijenjaju karakteristike frekvencija kroz vrijeme, filtri se mogu podijeliti na podesive filtre i fiksne filtre.

Važni parametri kod podesivih filtera, prema [17], [26], su slijedeći:

- Raspon podešavanja (eng. *tuning range*):
 - Određuje raspon valnih duljina koje filter može izvući
 - Širi raspon - više kanala
- Brzina podešavanja (eng. *tuning time*)
 - Vrijeme potrebno da filter podesi s jedne na drugu valnu duljinu

Fiksni filtri su slijedeći:

- filter s Braggovom rešetkom koja je ugrađena u jezgru optičkog vlakna (FBG filter - *fiber Bragg grating filter*)
- filtri s tankim filmom (TFF - *Thin Film Filters*)
- polje valovoda (AWG - *Arrayed Waveguides*)

Podesivi filtri su slijedeći:

- Fabry-Perot etalon
- Mach-Zehnder interferometar
- Elektro-optički filter

- akusto-optički filter
- Fabry-Perot filter s tekućim kristalom (LC FP filter - Liquid-Crystal Fabry-Perot filter)

Tablica 8. Najvažnije značajke podesivih optičkih filtera

Podesivi filter	Raspon podešavanja [nm]	Brzina podešavanja
Fabry-Perot	500	1-10 msec.
Acousto-optic	250	10 μ sec.
Electro-optic	16	1-10 nsec.
LC Fabry-Perot	30	0.5-10 μ sec.

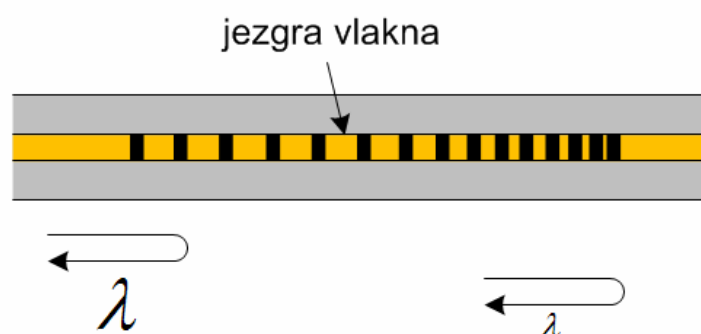
Izvor: [28]

Tablicom 8. dan je pregled najvažnijih značajki podesivih filtera ovisno o njihovoj brzini i rasponu podešavanja dok se u nastavku opisuju najčešće korišteni filtri u WDM mrežama.

4.5.1 Filtar s Braggovom rešetkom u vlaknu - FBG

FBG filter nastao je zahvaljujući mogućnosti promjene refrakcijskog indeksa jezgre u optičkom jednomodnom vlaknu.

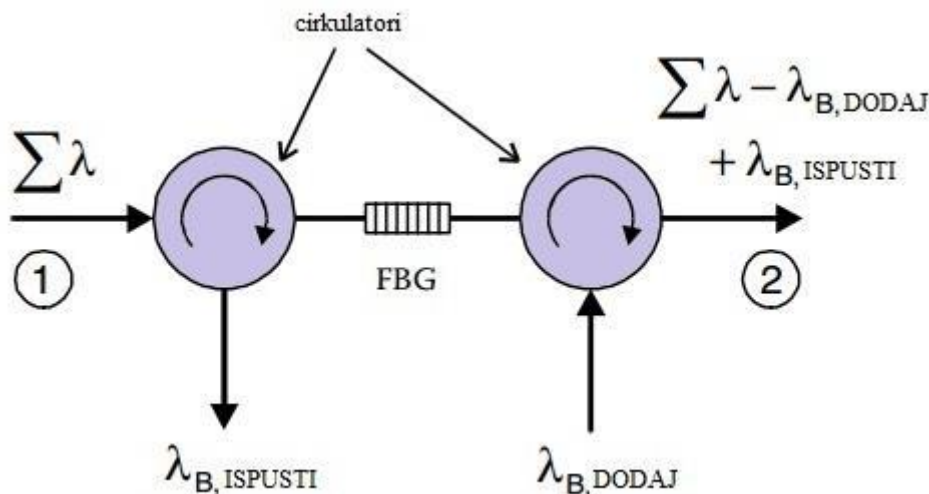
Rešetka (eng. *grating*) je periodička struktura sastavljena od segmenata niskih i visokih indeksa loma koji odbijaju svjetlost određene valne duljine a propuštaju svjetlost neke druge valne duljine. Rasterski period te rešetke određuje koje će se valne duljine odbijati. Moguće je također napraviti rešetke s promjenjivim periodom (eng. *chirped grating*) i varijabilnom snagom indeksa loma u svrhu postizanja optimalnih rezultata, [29].



Slika 4.10. FBG filter, [29]

Na slici 4.10. nalazi prikaz filtra s Braggovom rešetkom. Period između struktura različitih indeksa refrakcije označen je s λ . Svjetlo na različitim valnim duljinama upada u jezgru optičkog vlakna. Dio svjetlosti se reflektira, a dio se propušta i prenosi dalje kroz vlakno. Propusnost reflektiranog i prenesenog svjetla ovisi o karakteristikama Braggove rešetke, duljini rešetke i modulaciji, [29].

Struktura prikazana na slici 4.10. se može koristiti za kompenzaciju disperzije, gdje se veće valne duljine odbijaju prve, dok one manje kasnije. Međutim za WDM sustave je važna ona struktura koja ima jednoliku rešetku i gdje se sve valne duljine unutar propusnog pojasa rešetke odbijaju jednako. Drugo važno svojstvo je da se željena valna duljina odbija od te periodičke strukture i putuje nazad u smjeru odakle je došla. Kako je rešetka uređaj sa samo dva otvora, ulaznim i izlaznim, potrebno ju je kombinirati s dodatnim optičkim uređajem kako bi se pristupilo željenoj valnoj duljini.



Slika 4.11. OADM temeljen na FBG filtru, [29]

Fiksni ili podesivi optički dodaj-ispusti multiplexeri (ROADM – *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers*) omogućavaju statičko ili dinamičko usmjeravanje u WDM mrežama. Na slici 4.11. prikazan je primjer OADM-a s FBG filtrom. Ovaj OADM je konstruiran za jednu valnu duljinu, a koristi jednu rešetku i dva optička cirkulatora. Princip rada je sljedeći:

- Multikanalni WDM signal na ulaznom otvoru (na slici označeno s 1) prolazi kroz prvi cirkulator i dolazi do Braggove rešetke.
- Prilikom nailaska na FBG, reflektira se Braggovalna valna duljina (λ_B) i usmjerava preko prvog optičkog cirkulatora te izlazi na ispusti izlaz, gdje se dalje procesira O/E pretvaračem
- Kako je FBG dizajniran za valnu duljinu B, ta se valna duljina reflektira, dok sve ostale valne duljine prolaze kroz rešetku, dolaze do drugog cirkulatora i kroz izlazni otvor izlaze van.
- Na ulaz dodaj, može se dodati novi optički kanal na istoj valnoj duljini (λ_B) koji također izlazi na izlaz (2), [29].

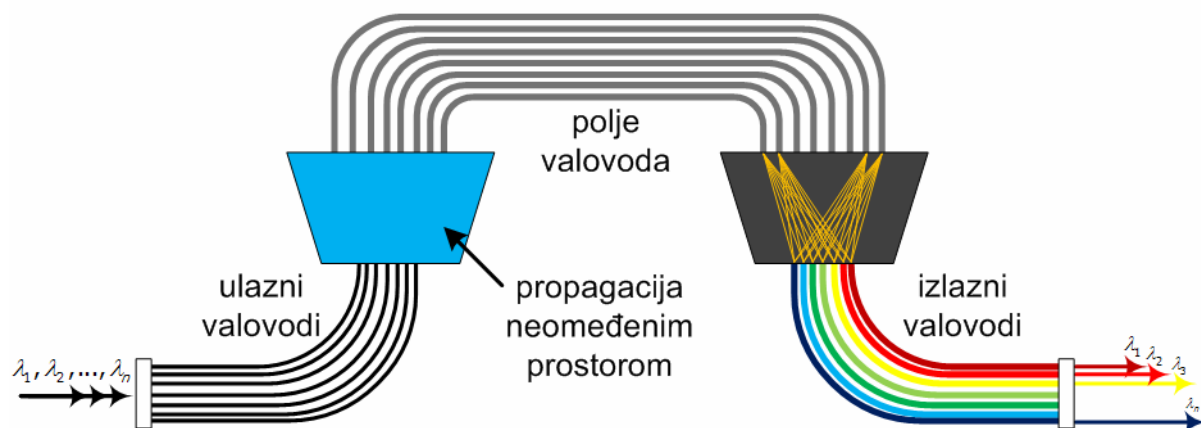
FBG filtri imaju široku uporabu u DWDM sustavima, kao filtri za optička pojačala i kao disperzijski kompenzatori. U CWDM prijenosnim sustavima se ne koriste tako često, prema [27], zbog dva razloga:

- spektralna širina CWDM mreža vrlo velika, i s vrlo malim brojem kanala,

- trošak je prevelik te se kombinacija FBG rešetki s cirkulatorima ne uklapa u uvjete niskih troškova CWDM sustava.

4.5.2 Polje valovoda

Polje valovoda je metoda izdvajanja valnih duljina pomoću valovoda ugrađenih u polje koji zadovoljavaju određene kriterije po pitanju dužine i udaljenosti.



Slika 4.12. Shematski prikaz AWG demultipleksera, [29]

Na slici 4.12. prikazano je izdvajanje valnih duljina pomoću polja valovoda.

Filtar ima dva područja slobodne propagacije (FPR - *Free Propagation Regions*). Višekanalni signal se raspoređuje na više signala koji ulaze u ulazni valovod te svjetlo na različitim valnim duljinama $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \dots \lambda_n$, ulazi u valovod koji dalje vodi prema prvoj FPR regiji. Tamo 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. To uzrokuje interferenciju različitih optičkih signala u drugoj FPR regiji. Pomak u fazi je dizajniran na način da se zbog interferencije centralna valna duljina svakog komunikacijskog kanala raspoređuje na različiti izlaz valovoda. Različite valne duljine se tako fokusiraju na različite prostorne točke na izlazu polja i ulaze u različita izlazna vlakna. Na taj se način demultipleksiraju valne duljine putem AWG filtra, [29].

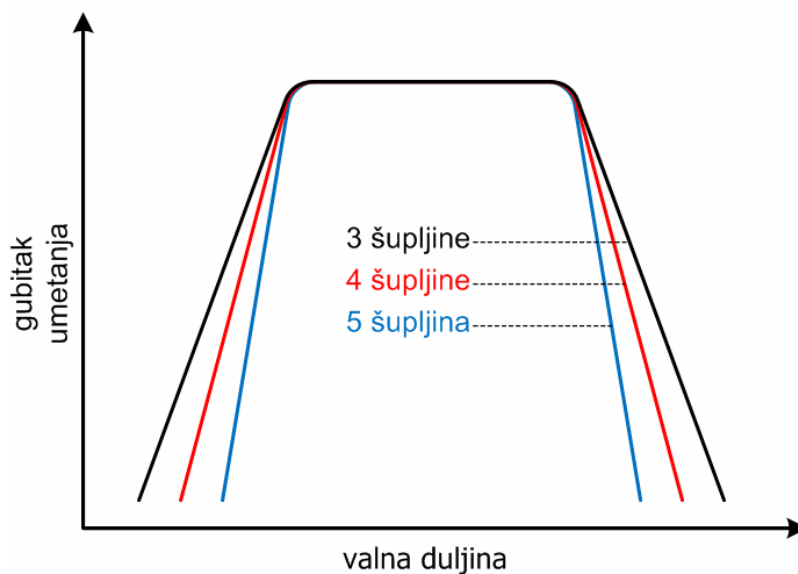
AWG filtri svoju primjenu nalaze u magistralnim DWDM mrežama jer se može multipleksirati/demultipleksirati velik broj DWDM kanala sa relativno malim troškovima, ali je moguća i njihova primjena u određenim modelima pristupnih mreža.

AWG filtri imaju veliku temperaturnu ovisnost što utječe na odstupanja valnih duljina. Kako bi se to izbjeglo kod AWG filtara je potreban visok stupanj kontrole što poskupljuje takav. S obzirom na navedeno u CWDM gradskim i pristupnim mrežama, AWG filtri nemaju značajnu ulogu, [27], [29].

4.5.3 Filtri s tankim filmom

Filtri s tankim filmom (TFF - *Thin Film Filters*) su filtri s više slojeva. Izrađuju se od materijala s različitim indeksom loma koji se slažu po alternirajućem rasporedu u obliku dielektričnih slojeva (engl. dielectric multilayer filters).

Dielektrični slojevi se sastoje od nekoliko Fabry-Perot šupljina koje određuju performanse optičkog filtra. Pojasne karakteristike TFF-a mogu se kontrolirati promjenom broja šupljina. Utjecaj broja šupljina na propusnost i kvalitetu filtra prikazano je na slici 4.13. Da bi se ostvario željeni spektralni odziv ključno je kontrolirati debljinu slojeva prilikom proizvodnog procesa. Zadnja strana dielektričnog filtra treba imati širokopojasni premaz protiv refleksije (AR - anti-reflection coating,) za smanjenje gubitaka jer inače dolazi do unutarnje refleksije.



Slika 4.13. Odnos broja šupljina i propusnosti filtra, [29]

TFF filtri se mogu, prema [29], podijeliti na dvije vrste:

- rubni filtri (engl. edge filters) - razdvajaju cijeli jedan spektralni raspon, primjerice, propuštaju gornjih 8 valnih duljina CWDM sustava a reflektiraju ostale valne duljine
- filtri s propusnim pojasom (engl. bandpass filters) - omogućuju pristup samo željenoj valnoj duljini, dok sve ostale reflektiraju.

Prednosti TFF-a, prema [24], [29], su slijedeće:

- pružaju pouzdanost pasivnog uređaja,
- cjenovno su prihvatljivi
- mogućnost dizajniranja na način da imaju vrlo dobre spektralne performanse koje su stabilne pri promjeni temperature
- skalabilnost za rad s bilo kakvim rasporedom kanala

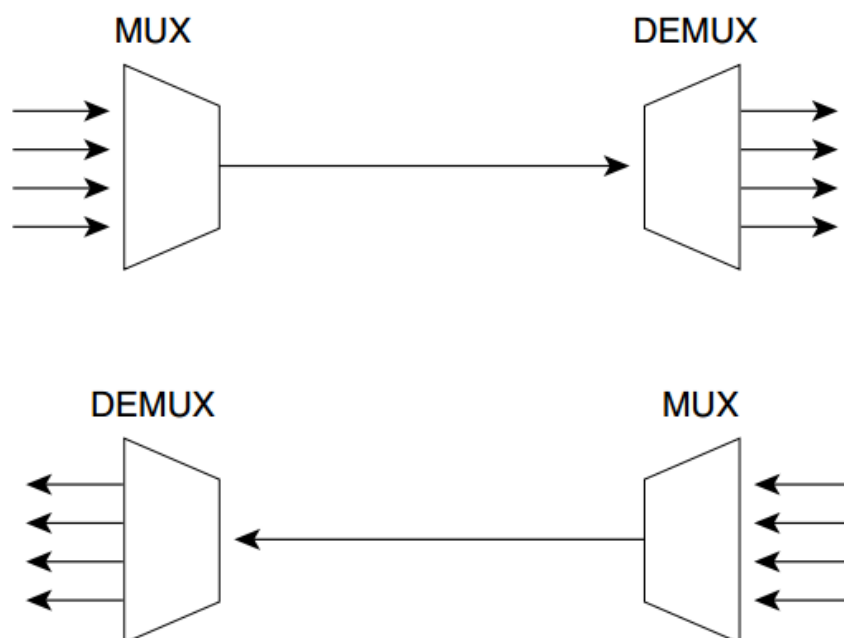
4.6 Multiplekseri i demultiplekseri

Kako DWDM sustavi šalju signale iz nekoliko izvora preko jednog optičkog vlakna mora postojati način kombiniranja dolaznih signala, a upravo tu funkciju obavljaju multiplekseri (eng. MUX). Oni optičke valne duljine iz više optičkih izvora spajaju u jednu zraku. Također na drugom kraju, kod primatelja, mora biti moguće razdvajanje komponenti svjetla kako bi se mogle diskretno detektirati, a tu funkciju obavljaju demultiplekseri (eng. DEMUX). Demultiplekseri razdvajaju primljenu zraku svjetla na komponente valnih duljina i sprežu ih na individualna optička vlakna. Demultipleksiranje se obavlja prije nego što je svjetlost detektirana jer fotodetektor ne mogu detektirati samo jednu valnu duljinu.

Mux-demux su ključni elementi u WDM mrežama (isti se uređaj može koristiti za mux i za demux ovisno o smjeru propagacije). Mux spaja izlaze iz više predajnika u jedan signal koji se prenosi optičkim vlaknom. Demux razdvaja preneseni signal u pojedine kanale koji odlaze do odgovarajućih prijemnika.

Prema [24], sustavi mogu biti dizajnirani kao jednosmjerni (eng. unidirectional system) i kao dvosmjerni sustavi (eng. bidirectional system).

Na slici 4.14. prikazan je jednosmjerni sustav gdje je vidljivo da je u takvom sustavu potrebno imati multiplekser na predajnoj strani, a demultiplekser na prijemnoj strani. Kako bi se omogućila dvosmjerna komunikacija potrebna su dva takva sustava, kao i dva optička vlakna.



Slika 4.14. Multipleksiranje i demultipleksiranje u jednosmjernom sustavu, [24]

Na slici 4.15. prikazan je dvosmjerni sustav gdje je vidljivo da u ovom slučaju je potrebno samo dva uređaja, po jedan na svakoj strani, a svaki od njih obavlja funkciju i multipleksiranja i demultipleksiranja preko jednog optičkog vlakna.



Slika 4.15. Multipleksiranje i demultipleksiranje u dvosmjernom sustavu, [24]

MUX/DEMUX uređaji mogu biti izvedeni kao pasivni ili kao aktivni uređaji. Pasivni uređaji bazirani su na prizmama, ogibnim rešetkama ili filterima, dok aktivni uređaji kombiniraju pasivne uređaje s podesivim filtrima. Glavni izazovi u ovim uređajima su:

- smanjenje preslušavanja (eng. Cross-talk)
- povećanje razdvajanja kanala

Cross-talk je mjera koja pokazuje koliko je dobro razdvajanje kanala, dok se razdvajanje kanala odnosi na mogućnosti razlikovanja pojedinih valnih duljina, [24].

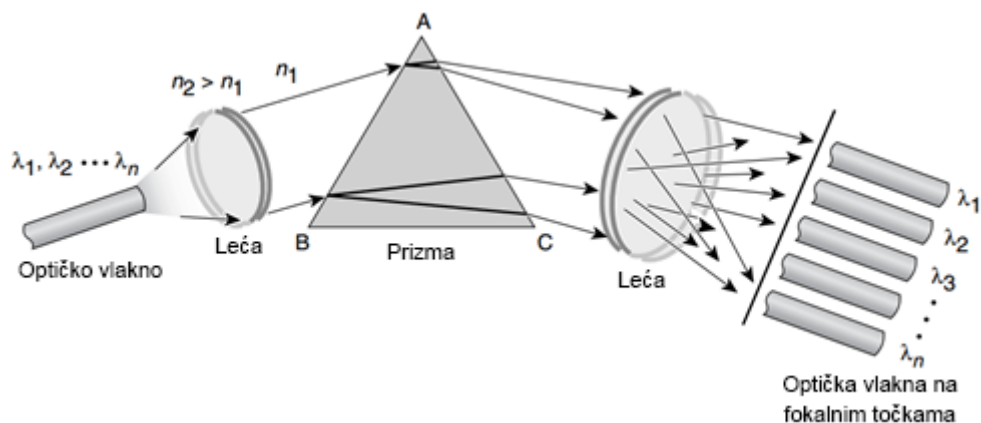
4.6.1 Tehnike multipleksiranja/demultipleksiranja

Tehnike multipleksiranja/demultipleksiranja su slijedeće:

- pomoću prizmi
- pomoću gibne rešetke i leće
- pomoću polja valovoda

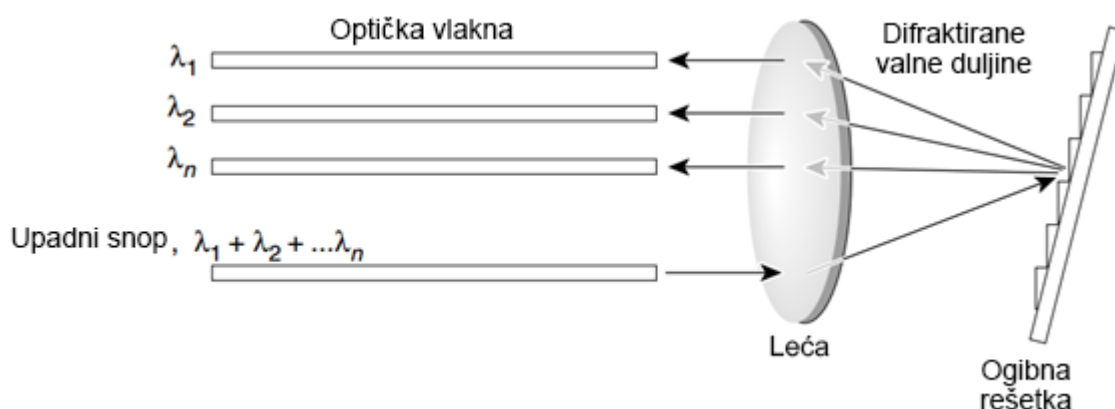
Prva i najjednostavnija tehnika multipleksiranja/demultipleksiranja zrake svjetlosti je raspršenje svjetlosti pomoću prizme. Na slici 4.16. je prikazan slučaj demultipleksiranja. Princip je slijedeći:

- paralelne zrake polikromatske svjetlosti dolaze na površinu prizme
- svaka komponenta svjetlosti, odnosno svaka valna duljina ima drukčiju refrakciju i taj efekt je poznat kao efekt duge
- na izlaznoj strani je svaka pojedina valna duljina razdijeljena od druge pod određenim kutom
- leća fokusira svaku pojedinu valnu duljinu na točno određeno mjesto gdje treba ući u vlakno



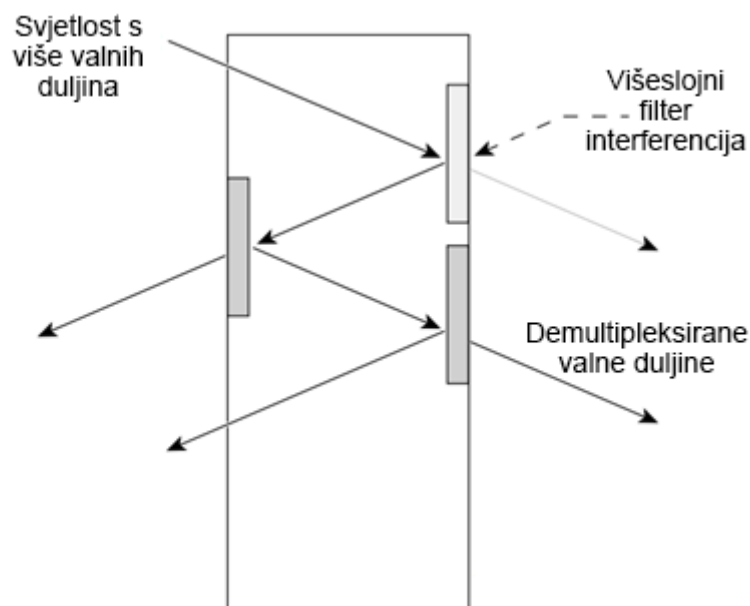
Slika 4.16. Demultipleksiranje pomoću prizme, [24]

Druga tehnika se bazira na principu difrakcije i optičke interferencije i prikazana je slikom 4.17. kada polikromatski izvor svjetlosti stigne do ogibne rešetke dolazi do difrakcije svake valne duljine, i to pod različitim kutem. Valne duljine su na taj način usmjerene u različite točke u prostoru. Korištenjem leća, te valne duljine se fokusiraju na individualno vlakno, [24], [26].



Slika 4.17. Demultipleksiranje pomoću ogibne rešetke i leće, [24]

Demultipleksiranje pomoću TFF-a se obavlja na način da se svaki filter podesi tako da odašilje jednu valnu duljinu dok druge reflektira. Spajajući te uređaje u kaskadu moguće je demultipleksirati velik broj valnih duljina, kao što je prikazano slikom 4.18.

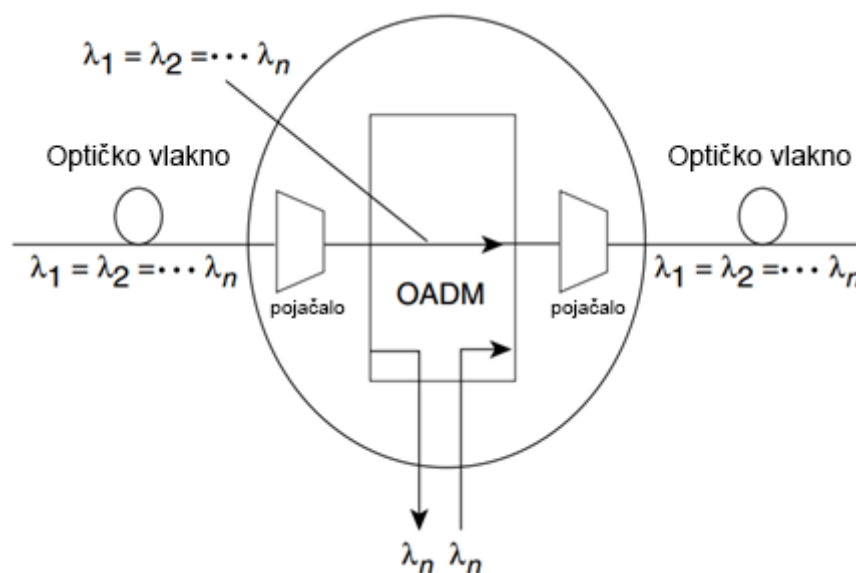


Slika 4.18. Demultipleksiranje pomoću TFF-a, [24]

4.6.2 OADM

Između točki multipleksiranja i demultipleksiranja, u DWDM sustavima, nalazi se prostor u kojem postoje višestruke valne duljine, kako je i prikazano na slici 4.19.

Često je poželjno imati mogućnost dodati ili maknuti neku valnu duljinu. Tu funkciju obavlja optički dodaj/odbaci multiplekser (OADM – Optical Add/Drop Multiplexer). OADM omogućuje dodavanje (add) / odbacivanje (drop) određenih kanala (valnih duljina).



Slika 4.19. OADM, [24]

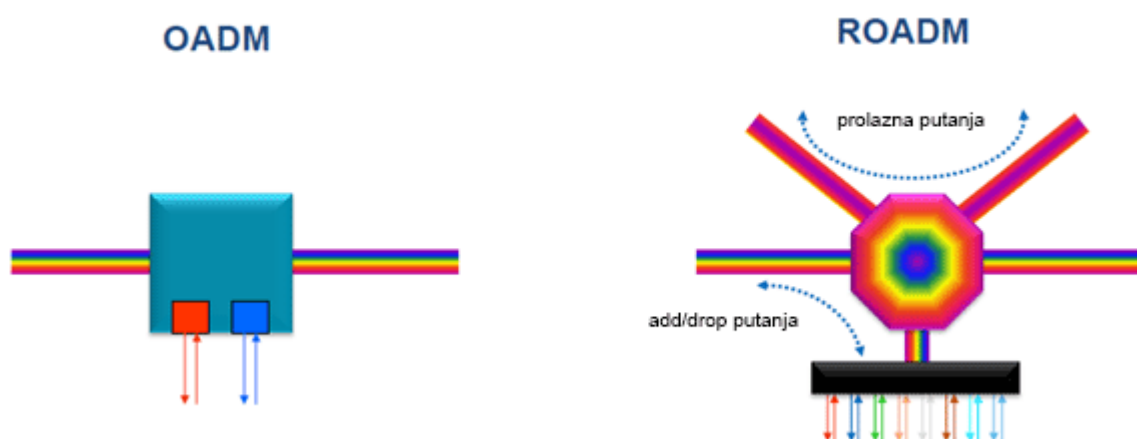
OADM su ključni dijelovi u napredovanju prema sveoptičkim mrežama. U mnogočemu su slični SONET ADM-ovima, s razlikom što se dodaju i odbacuju samo optičke valne duljine, bez potrebe za optoelektričkom pretvorbom.

Na slici 4.19. prikazan je proces odbacivanja/dodavanja prometa, te uključuje preamplifikaciju i postamplifikaciju signala.

Dva su glavna tipa OADM-a:

- Fiksni (FOADM)
- Rekonfigurabilni (ROADM)

FOADM je fizički konfiguriran da određene valne duljine i/ili odbacuje. Druga generacija se može konfigurirati i moguće je dinamički odabirati koje će se valne duljine dodavati i odbacivati, kako je i prikazano na slici 4.20.



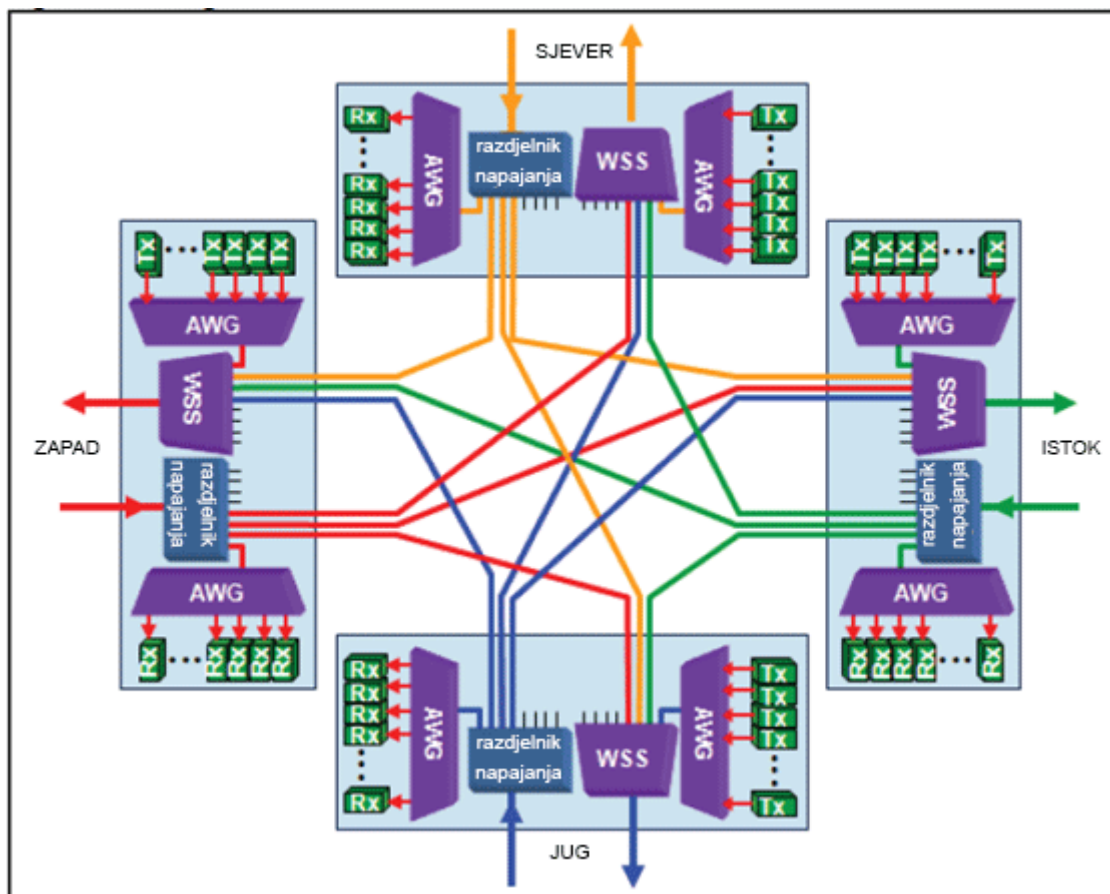
Slika 4.20. OADM i ROADM, [25]

Kako se može uočiti sa slike 4.20., tradicionalni OADM je ograničen fiksnim brojem kanala, fiksnim valnim duljinama i smjerom. ROADM nudi poboljšanja, a neka od njih su omogućen bilo koji broj kanala (0 do 40/80), bilo koje valne duljine, [25].

4.6.3 ROADM

ROADM su uređaji tehnologije nove generacije koji trebaju omogućiti potpuno automatsku optičku rekonfigurabilnost. To je sveoptički podsustav koji omogućuje udaljenu konfiguraciju valnih duljina i to u svakom čvoru, a kako je softverski omogućeno, tako je moguće da mrežni operator odabere hoće li određena valna duljina biti dodana, odbačena ili propuštena kroz čvor. ROADM sustavi se koriste u gradskim/regionalnim WDM mrežama ili DWDM mrežama velikog dometa (eng. long-haul).

Kada se govori o ROADM uređajima, tada se uglavnom govori o stupnjevima prospajanja (eng. Switching), koji imaju raspon od dva pa do osam stupnjeva (eng. Degrees). Stupanj je oznaka za smjer i uglavnom se povezuje sa prijenosnim optičkim vlaknom. Tako, primjerice, dvostupanjski ROADM prospaja u dva smjera (istok i zapad), dok četverostupanjski ROADM ima četiri smjera (istok, zapad, sjever jug). U ROADM mreži baziranoj na WSS-u (WSS – Wavelength Selective Switching), svaki novi stupanj zahtijeva dodatni WSS element, što znači i povećanje cijene samog čvora. Na slici 4.21. prikazan je 4-stupanjski ROADM čvor, [25], [30].



Slika 4.21. 4-stupanjska ROADM arhitektura čvora, [30]

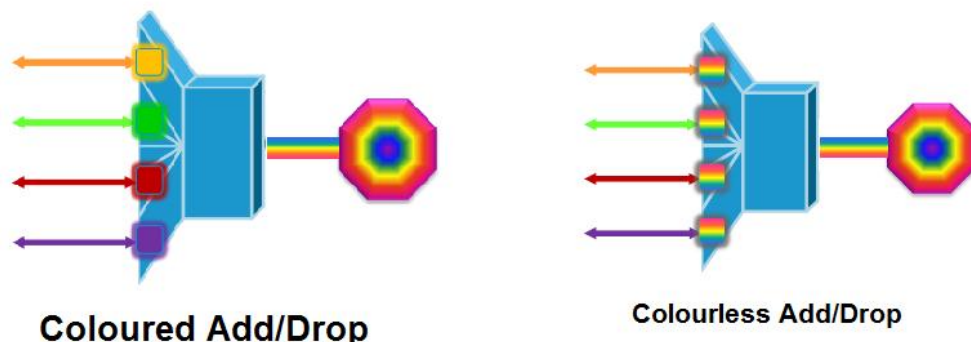
ROADM su unijeli fleksibilnost u DWDM mreže, ali je ta fleksibilnost bila statičkog karaktera. Iako su njihove funkcije bile „bilo koja valna duljina, bilo gdje“, ti klasični ROADM uređaji su imali svoja ograničenja jer je bilo koja promjena još uvijek zahtijevala fizički dolazak operatora. ROADM uređaji nove generacije nude nove funkcije, a sami uređaji su, prema [30], poznati kao:

- Bezbojni (eng. Colorless) ROADM
- Neovisni o smjeru (eng. Directionless) ROADM
- Neovisni o broju istih valnih duljina (eng. Contentionless) ROADM
- Gridless ROADM

4.6.3.1 Colorless ROADM

Prva generacija ROADM uređaja bila je ograničena fiksnim add/drop primopredajnicima i dodjelom valnih duljina. Kod njih bi pri odabiru valne duljine primopredajnik morao biti ručno spojen na odgovarajući mux/demux port. Iako su tzv. Ekspresni čvorovi imali koristi od tih ROADM-a, na add/drop mjestu se mora obaviti promjena fizičkog ožičenja pri svakoj promjeni valne duljine.

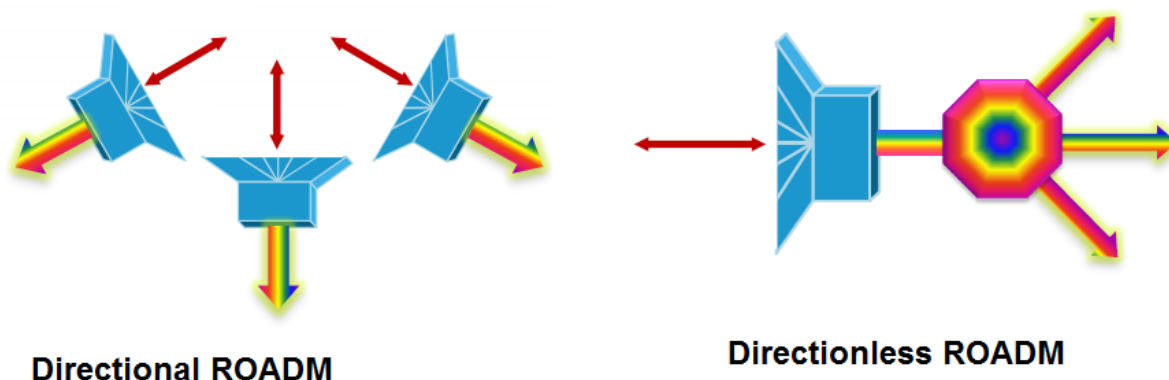
Novi "colorless" ROADM čvorovi rješavaju taj problem, odnosno omogućuju automatizaciju tog zadatka. Rezultat je mogućnost dodjele bilo koje valne duljine (boje, eng. color) bilo kojem portu, bez potrebe dolaska tehničara i fizičke promjene, kako je i prikazano slikom 4.22..



Slika 4.22. Colourless ROADM, [25]

4.6.3.2 Directionless ROADM

Directionless i colorless ROADM su u posljednje vrijeme postali uređaji koji su neophodni ako se želi postići istinska optička fleksibilnost. Kako je već spomenuto, ROADM su ovisni o smjeru što znači da su add/drop portovi upareni, a transponder fiksiran na određeni izlazni smjer (samo sjever ili samo jug i slično). Promjena smjera zahtjeva fizičku prisutnost tehničkog osoblja. Directionless ROADM dozvoljava da bilo koja valna duljina bude usmjerena prema bilo kojem smjeru, kako je i prikazano slikom 4.23., i to potpuno softverski.



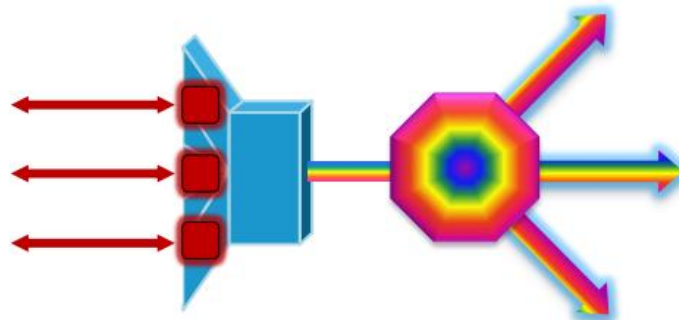
Slika 4.23. Directionless ROADM, [25]

4.6.3.3 Contentionless ROADM

Bez obzira na mogućnosti colorless i directionless ROADM uređaja, takav sustav je još imao svojih ograničenja koja su se očitovala u blokiranju istih valnih duljina, odnosno pri pojavi dvije valne duljine iste boje, istovremeno, u istom WSS-u, dolazilo bi do blokiranja. Stoga je bilo potrebno spriječiti da se dvije iste valne duljine nađu istovremeno u istom sustavu, kao i da se dvije crvene valne duljine istovremeno pojave na istoj add/drop strukturi. To sve uzrokuje žrtvovanje dinamičke fleksibilnosti.

Contentionless ROADM dozvoljava da više istih valnih duljina, istovremeno, na istoj add/drop strukturi, bez ikakvih dodatnih ograničenja, kako je i prikazano slikom 4.24. Ovakva ROADM arhitektura, kombinacija colorless/directionless arhitekture s contentionless funkcionalnosti je poznata kao CDC ROADM (CDC -

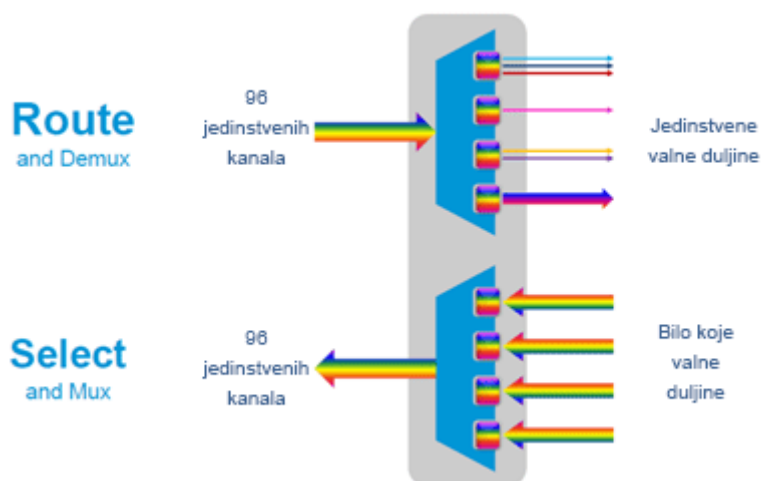
colorless/directionless/ contentionless) daje najveći stupanj fleksibilnosti optičkog sloja.



Slika 4.24. Contentionless ROADM, [25]

4.6.3.4 Gridless ROADM

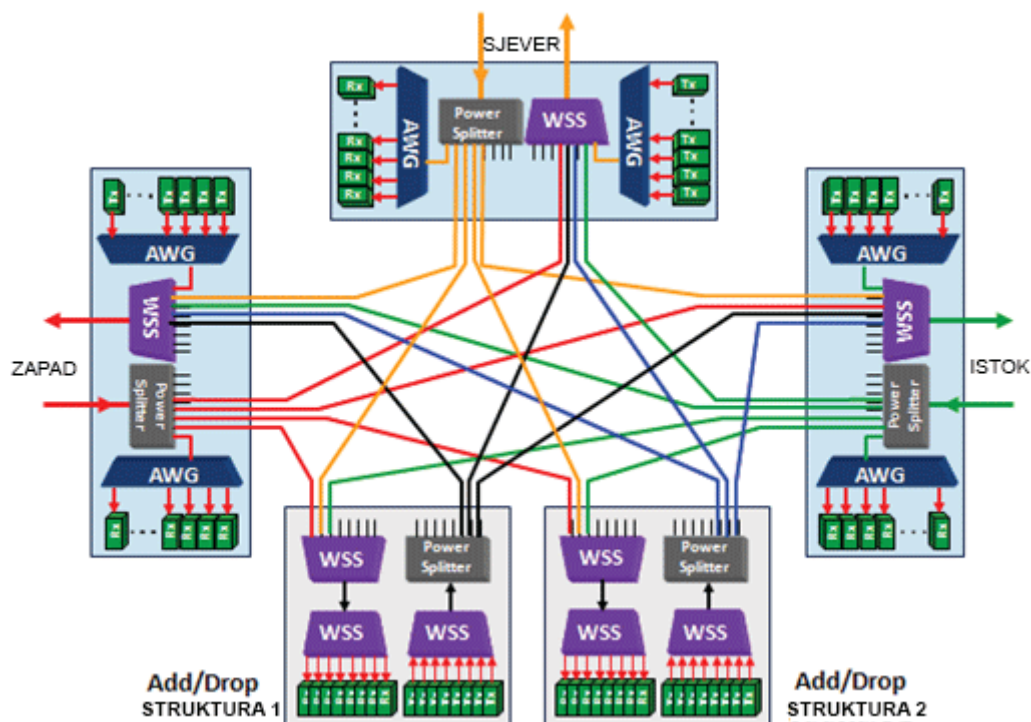
Posljednji ključni koncept ROADM arhitekture nove generacije (NG – New Generation) je koncept fleksibilne mreže kanala. Predviđa se da će u budućnosti mreže morati prenositi podatke brzinama većim od 100 Gbit/s. Za brzine od 400 Gbit/s ili 1 Tbit/s bit će potreban širi spektrum od 50 GHz, neki od postojećih prijedloga je granularnost spektra prema razdvajanju kanala od 25 GHz. NG ROADM uklanja postojeća ograničenja u pogledu razdvajanja kanala i modulacijskih formata, te se očekuje da će biti moguće miješanje valnih duljina različitih brzina, skalabilnost većih brzina po kanalu, maksimalna fleksibilnost u kontroli nelinearnih efekata.



Slika 4.25. ROADM „route and select“ arhitektura, [25]

Također se predviđa veći potreban broj kanala u DWDM mrežama te bi NG ROADM mogli podržavati i 96 kanala, kako je prikazano slikom 4.25. [25], [30].

Na slici 4.26., prikazana je primjena CDC ROADM čvora, koji je sposoban prospojiti bilo koju valnu duljinu iz bilo kojeg izvora na bilo koji izlazni port. Takav visoko efikasan čvor integrira sve funkcionalnosti unutar jednog uređaja, s naglaskom da su i sama optička pojačala integrirana unutar uređaja.



Slika 4.26. CDC ROADM čvor, [30]

4.7 Optička pojačala

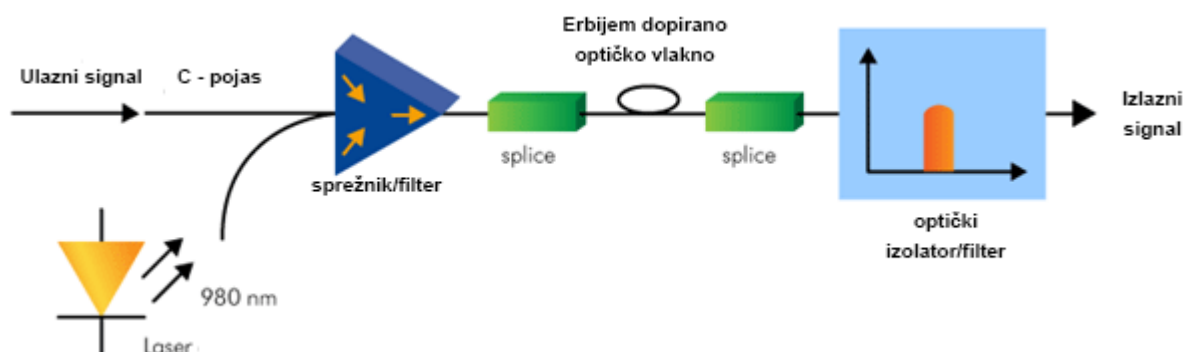
Jedno od najčešće korištenih optičkih pojačala je Erbijem dopirano pojačalo (EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier). Ono je bilo ključ za omogućavanje DWDM tehnologije u pogledu prenošenja velike količine podataka na velike udaljenosti.

Erbij je rijetki zemljani element koji u pobuđenom stanju emitira svjetlost oko 1,54 mikrometara, što je valna duljina niskog gubitka za optička vlakna u DWDM-u.

Na slici 4.27. prikazan je osnovni princip rada EDFA pojačala, gdje se vidi slijedeće:

- Slabi signal ulazi u erbijem dopirano vlakno
- U isto vlakno se upumpava svjetlo valne duljine od 980 nm ili 1480 nm pomoću laserskih pumpi
- Ovo svjetlo stimulira atome erbiju da oslobađaju nakupljenu energiju kao dodatnu svjetlost valne duljine oko 1550 nm
- Kako se ovaj proces ponavlja duž vlakna, tako se pojačava signal

Prilikom odabira optičkog pojačala mora se voditi računa i o količini šuma koji se unosi zajedno sa pojačavanjem signala, te se zajedno s pojačavanjem signala i taj šum pojačava.



Slika 4.27. EDFA princip rada, [31]

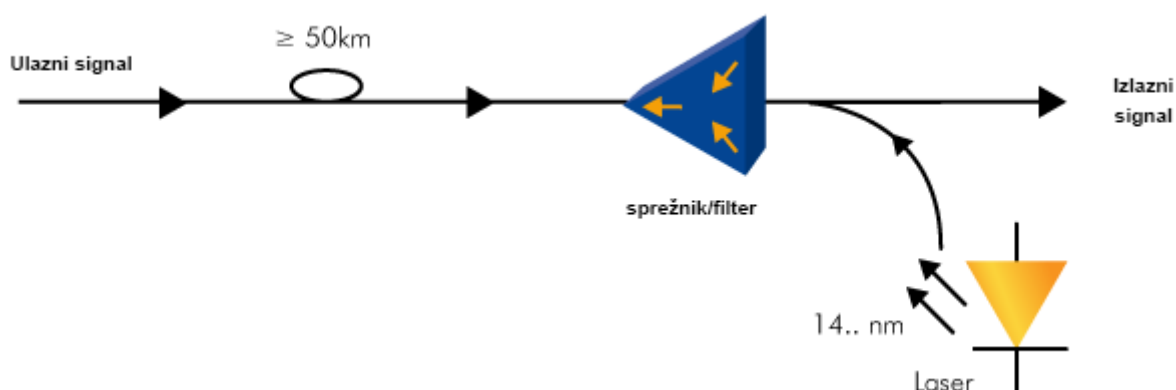
Niska razina šuma je bitan zahtjev, jer se šum pojačava zajedno sa signalom, a sam efekt je kumulativan i ne može se u potpunosti filtrirati, te je upravo iz tog razloga odnos signal-šum važan ograničavajući faktor u pogledu broja pojačala koja mogu biti konkatenirana. Na većim udaljenostima, od 600 do 1000 km signal uz pojačavanje mora biti i regeneriran, jer sama pojačala ne obavljaju 3R regeneraciju signala⁹. EDFA pojačala rade u C i L pojasu,[25], [31].

Prema [31], temeljne karakteristike EDFA pojačala su slijedeće:

- Valne duljine: C i L pojas
- Pojačavanje: 20 – 40 dB
- Izlazna snaga: 14 – 23 dBm

Drugo često korišteno pojačalo je Ramanovo pojačalo koji koristi efekt Ramanovog raspršenja, a pojačavanje snage se obavlja na kraju linka. Kako bi se omogućilo pojačavanje signala, prikazano slikom 4.28., svjetlo velike snage i odgovarajuće valne duljine se upumpava u optičko vlakno. Pojačavanje signala se događa u slučaju kada je dolazna valna duljina unutar Raman spektra dobitka (eng. Raman gain spectrum), [31].

Slika 4.28. EDFA princip rada



Slika 4.29. Princip rada Raman pojačala, [31]

⁹ 3R funkcije - reshape, retime, retransmit

Raman optičko pojačalo omogućuje pojačavanje u području valnih duljina od 1300 do 1600 nm, te pojačavanje u iznosu od 10 do 15 dB.

NG ROADM stavlja novi izazov pred optička pojačala, te je tako nastao i hibrid između EDFA pojačala, koje omogućava koncentrirano pojačavanje signala i Raman pojačala, koje omogućava distribuirano pojačavanje signala i koristi se kod velikih prijenosa na velike udaljenosti. Rezultat je Erbijem dopirano Raman pojačalo ili EDRA (EDRA - Erbium Doper Raman Amplifier), koje je integracija upravo prije navedena dva pojačala. Ovo pojačalo ima slijedeće prednosti:

- integracija dva pojačala u jednom uređaju
- jednostavnost
- veličina
- veća snaga
- veće udaljenosti
- moguće podržati 96 kanala

5 ARHITEKTURA WDM MREŽA

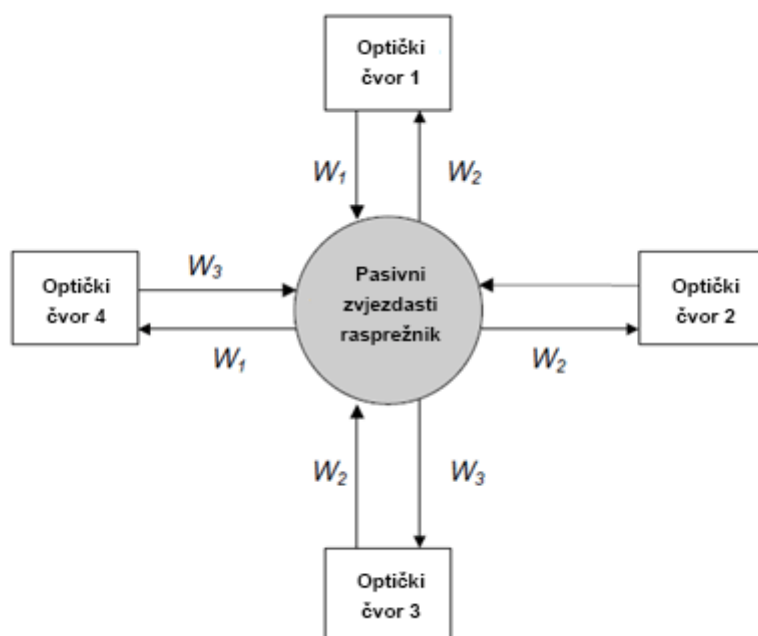
Postoje, prema [32], slijedeće vrste WDM arhitekture:

- broadcast-and-select mreže
- mreže s valnim usmjeravanjem (eng. wavelength routed networks)

5.1 Broadcast-and-Select mreže

WDM mreže koje dijele zajednički prijenosni medij i šalju signal svim čvorovima u mreži nazivaju se broadcast- and-select mreže.

Ova mreža se sastoji od pasivnog zvjezdastog raspreznika (eng. passive star coupler) na koje su dvosmjerno spojeni krajnji čvorovi mreže, kako je prikazano slikom 5.1.

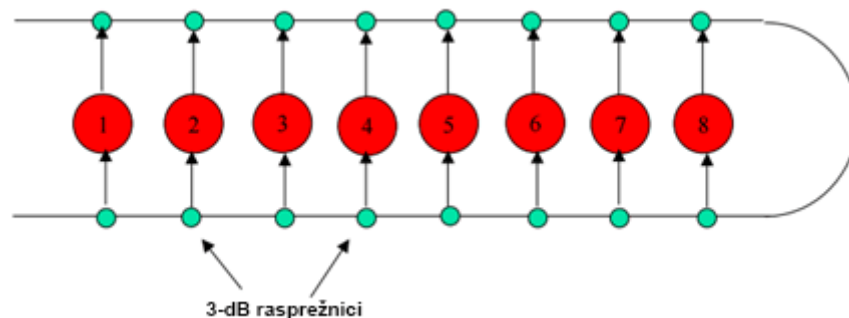


Slika 5.1. Zvjezdasta topologija broadcast-and-select mreže, [32]

Svaki čvor je opremljen s jednim ili više fiksnih ili podesivih optičkih prijemnika ili predajnika. Čvorovi šalju signale na različitim valnim duljinama simultano. Raspreznik spaja sve dobivene signale i novi kombinirani signal ponovno šalje svim čvorovima. Svaki čvor odabere koji će signal (valnu duljinu) primati podešavanjem prijamnika na točno tu valnu duljinu¹⁰.

Druga moguća topologija je sabirnička topologija (eng. Bus), koja je prikazana slikom 5.2.

¹⁰ Zvjezdasti raspreznici su ekvivalentni radijskim sustavima: svaki predajnik šalje svoj signal na različitoj valnoj duljini, a prijemnici su podešeni za primanje željenog signala.



Slika 5.2. Sabirnička topologija broadcast-and-select mreže, [32]

Ovdje je više čvorova povezano na istu sabirnicu. Svaki čvor pomoću jednog rasprežnika šalje signal na određenoj valnoj duljini na sabirnicu i pomoću drugog rasprežnika prima signal sa sabirnice. I u predajnom i u prijemnom rasprežniku samo je jedan port korišten za slanje/primanje signala¹¹.

Ove dvije topologije se razlikuju u broju rasprežnika, kao i u načinu kako su oni povezani, a u većini slučajeva se zvjezdasta topologija pokazala kao bolja opcija.

Drugi način kako se B&S arhitektura može podijeliti je prema broju čvorova koje podaci moraju proći na svom putu, a to su, prema [32], slijedeći:

- Single-hop mreža
- Multi-hop mreža

Kod single-hop mreža signal dolazi na odredište bez OEO pretvorbe, odnosno u jednom skoku. Kako bi se podržao paketski prijenos potrebno je imati optičke prijamnike i predajnike koji se mogu brzo podešavati, jer kod paketskog prijenosa čvor mora slati/primati sukcesivne pakete od/prema različitim čvorovima na različitim valnim duljinama. Upravo koordinacija prijenosa među čvorovima predstavlja najveći izazov ovih mreža.

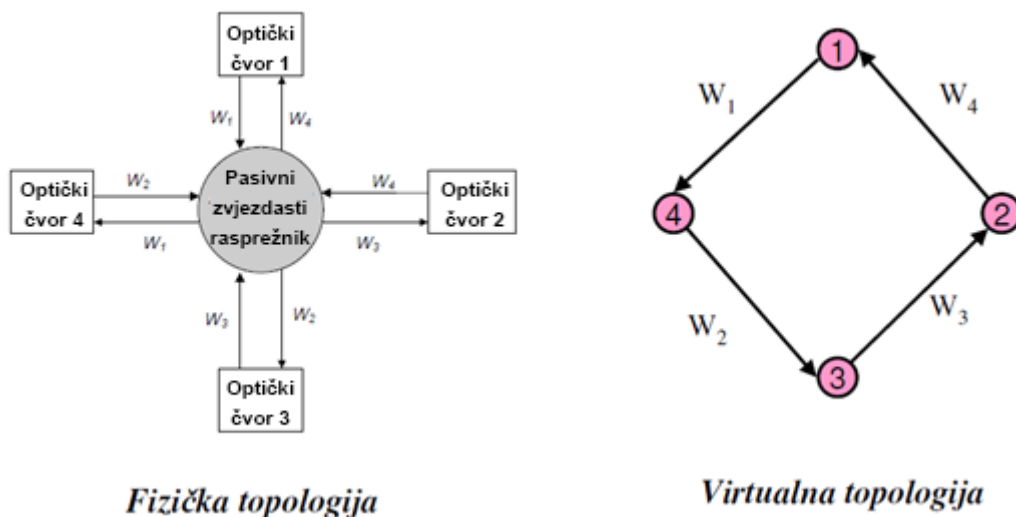
Ukoliko ne postoji koordinacija prijenosa ili efikasan protokol kontrole pristupa mediju (MAC - *Medium Access Control Protocol*), dolazi do kolizija kada dva ili više čvorova istovremeno prenose podatke na istoj valnoj duljini. Također može doći do konflikta na odredištu jer se može dogoditi da dva ili više čvora prenose na različitim valnim duljinama prema istom odredištu koji ima samo jedan podesivi prijemnik.

Kako bi se podržao paketski prijenos podataka uvodi se drugačiji pristup - multihop B&S mreže. Ovaj pristup ne zahtijeva brzo podešavanje. Poruke ponekad moraju proći više skokova do odredišta što znači da nastaju OEO konverzije signala, a što povećava propagacijsko kašnjenje i kašnjenje zbog čekanja u repu te dovodi do loše iskoristivost kapaciteta.

Svaki čvor ima mali broj fiksno podešenih optičkih prijemnika i predajnika. Svaki čvor odašilje na različitoj valnoj duljini. Na slici 5.1. prikazan je fizička

¹¹ Koriste se 2x2 rasprežnici što znači da imaju 2 ulazna i 2 izlazna porta (sučelja).

topologija B&S mreže s četiri čvora. Svaki čvor šalje/prima podatke na jednoj određenoj fiksnoj valnoj duljini. Tako primjerice čvor 1 može slati izravno čvoru 4 koristeći valnu duljinu w_1 , ali ne i prema čvoru 3. Za slanje prema čvoru 3, čvor 1 šalje prema čvoru 4 na valnoj duljini w_1 , čvor 4 prima signal, radi konverziju i šalje ga na valnoj duljini w_3 prema čvoru 3. Virtualna topologija fizičke topologije mreže sa slike 5.1. prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3. Fizička i virtualna topologija B&S mreže, [32]

Prednosti B&S mreža leže u njihovoj jednostavnosti i mogućnosti odašiljanja poruke na više odredišta istovremeno (eng. Multicast).

Međutim postoje i neka ograničenja jer je potreban velik broj valnih duljina (bar onoliko koliko ima čvorova jer nema višetrukog korištenja istih valnih duljina (eng. wavelength reuse) te ne može prenositi na velike udaljenosti jer se transmisijska snaga dijeli na sve čvorove. Svoju glavnu primjenu nalaze u lokalnim (LAN – Local Area Network) i gradskim (MAN – Metropolitan Area Network) mrežama.

5.2 Mreže s valnim usmjeravanjem

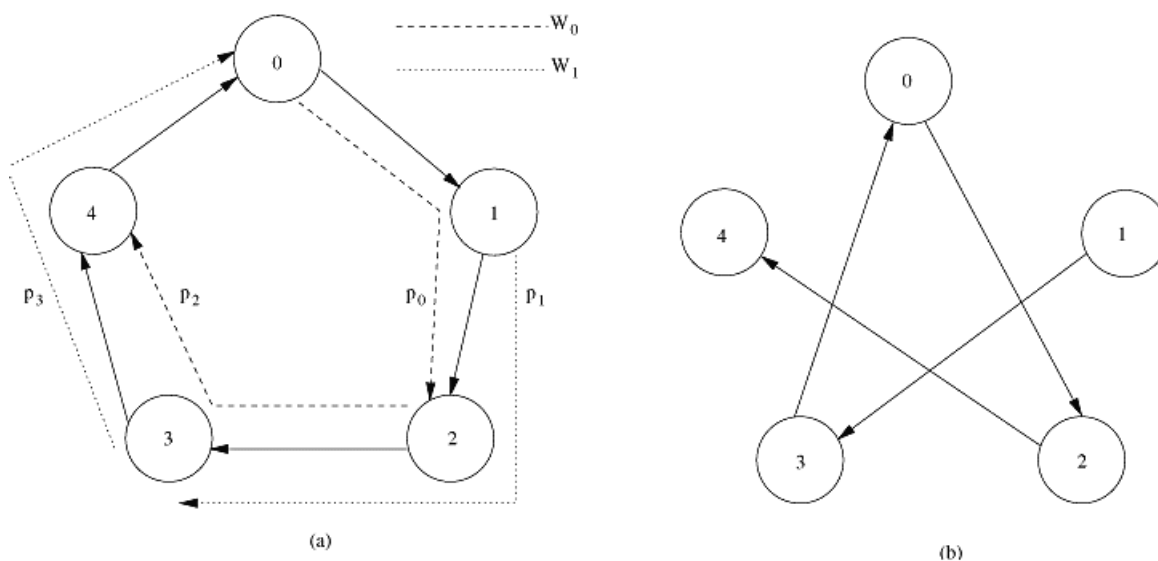
Ove mreže potencijalno rješavaju nedostatke B&S mreža:

- skalabilnost
- gubitak snage na rasprežnicima
- nedostatak višetrukog korištenja iste valne duljine za različite konekcije

Sastoje se od valnih usmjeritelja (WXC –Wavelength Cross-Connect) međusobno povezanih point-to-point optičkim linkovima. Svaki krajnji korisnik je povezan na WXC optičkim linkom. Kombinacija krajnjeg čvora i odgovarajućeg WXC-a je mrežni čvor. Svaki čvor je opremljen setom predajnika i prijemnika, i svaki može biti valno podesiv.

U ovoj mreži se poruka šalje od čvora do čvora koristeći i uspostavljajući sveoptički put (eng. Lightpath), bez potrebe za OEO konverzijom na posrednim čvorovima, odnosno prijenos signala se obavlja isključivo u optičkoj domeni. Sveoptički put je jedinstveno identificiran fizičkim putem i valnom duljinom. To donosi i neka ograničenja koja su, prema [32], slijedeća:

- Ista valna duljina se mora koristiti cijelim putem, na svim linkovima (eng. wavelength continuity constraint)
- putovima koji koriste isti fizički link ne smije se dodijeliti ista valna duljina (eng. wavelength assignment constraint)



Slika 5.4. Mreža s valnim usmjeravanjem: a) fizička topologija, b) virtualna topologija, [32]

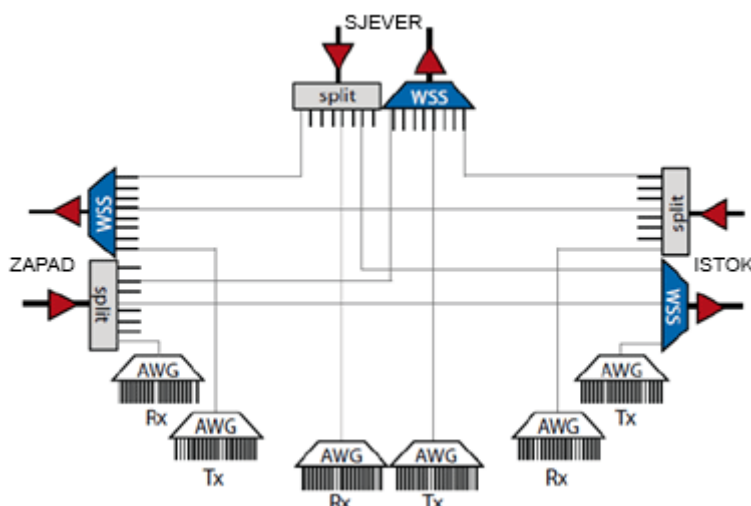
Na slici 5.4. prikazana je fizička topologija mreže s pet čvorova i dvije valne duljine po linku. Sveoptički put je uspostavljen za svaki par čvorova: $\langle 0, 2 \rangle$, $\langle 1, 3 \rangle$, $\langle 2, 4 \rangle$, $\langle 3, 0 \rangle$, i $\langle 4, 1 \rangle$. U svako paru jedan čvor je polazište jednog sveoptičkog puta, a odredište drugog, iako postoji samo jedan fizički put između bilo kojeg para čvorova. Kako je po svakom linku raspoloživo dvije valne duljine, trebalo bi biti moguće usmjeriti sve sveoptičke puteve, ali to ipak nije slučaj zbog prije navedenih ograničenja.

Kako sveoptički put p_0 koristi valnu duljinu w_0 , p_1 u tom slučaju može koristiti samo w_1 , jer p_0 i p_1 dijele isti link. Sveoptički put p_2 može koristiti samo w_0 , jer p_1 i p_2 dijele isti link. Sveoptički put p_3 može koristiti samo w_1 , jer p_2 i p_3 dijele isti link. Kao posljedica toga w_0 je slobodna na linku $4 \rightarrow 0$ dok je w_1 slobodna na linku $0 \rightarrow 1$. Sveoptički put od čvora 4 do čvora 1 nemože biti uspostavljen iako je kapacitet slobodan jer bi se dogodilo da ja na istom linku korištena ista valna duljina dva puta. Međutim, može se uočiti da su valne duljine w_0 i w_1 višestruko iskorištene što povećava broj sveoptičkih puteva uz ograničen broj valnih duljina. Upravo to omogućuje veću skalabilnost mreže s valnim usmjeravanjem u odnosu na B&S mreže, [32].

5.3 ROADM arhitekture

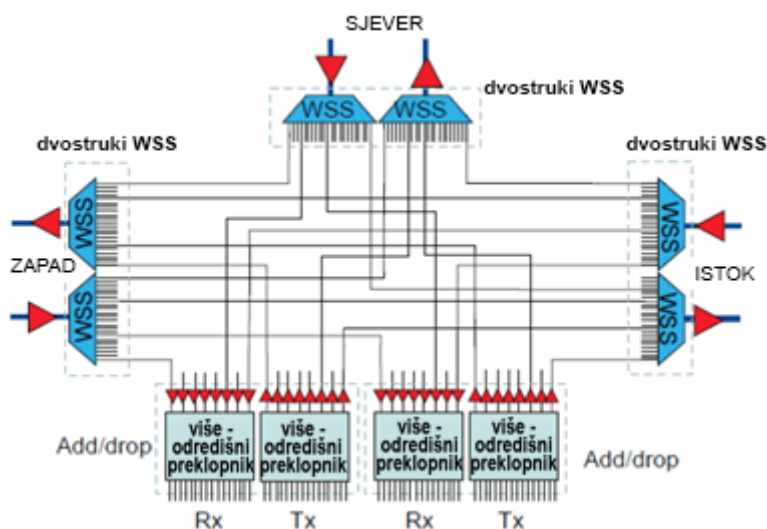
Osim navedenih arhitektura u modernim mrežama koje koriste ROADM postoje dvije moguće arhitekture: Legacy ROADM arhitektura i NG ROADM arhitektura.

Legacy ROADM arhitektura je u biti “Broadcast and Select” arhitektura, koja je prikazana slikom 5.5.



Slika 5.5. Legacy ROADM arhitektura, [25]

Vidljivo je da se na svakom stupnju (smjeru prijenosa) nalazi WSS na predajnom Mux-u. Ulazni kanali na svakom stupnju su pasivno razdvojeni (eng. passively split) te šalju podatke prema svim ostalim stupnjevima, odnosno rade broadcast, i prema svim add/drop mjestima. Tada Mux WSS blokira sve kanale koji nisu namijenjeni tom stupnju. Izolacija kanala postaje sve teža zadaća kako raste broj stupnjeva u mreži, a također dolazi i do gubitka snage s porastom broja stupnjeva, [25].

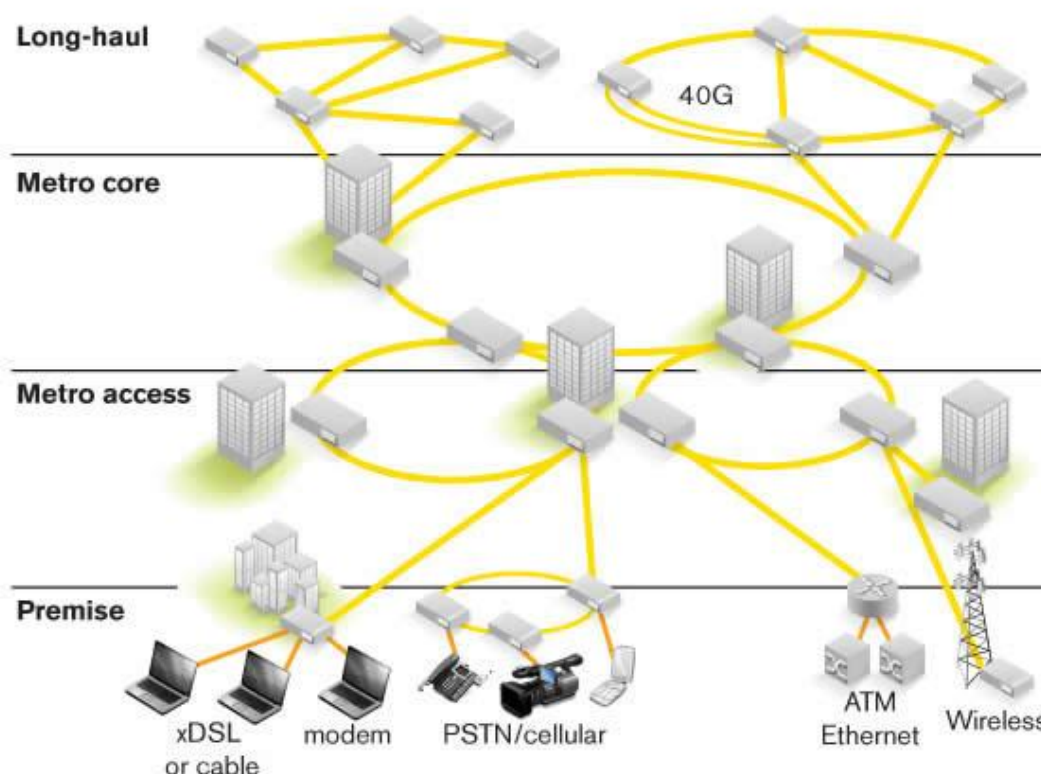


Slika 5.6. “Route and Select” arhitektura, [25]

Kao rješenje se pojavljuje NG ROADM "Route and Select" arhitektura, prikazana slikom 5.6., gdje je vidljivo da je svakom ulaznom čvoru na svakom stupnju dodan još jedan WSS. Demux WSS usmjerava bilo koju kombinaciju valnih duljina na bilo koji izlazni port dok Mux WSS odabire bilo koju kombinaciju valnih duljina sa svojih ulaznih portova. Kanali su izolirani od strane svih čvorova, i ulaznih (eng. Ingress) i izlaznih (eng. Egress) WSS-a, što poboljšava performanse. Također je vidljivo da je rasprednik (eng. Splitter) u ovoj arhitekturi eliminiran, a samim tim je smanjen gubitak (eng. insertion loss) istovremeno održavajući optički SNR na istoj razini. Također ova arhitektura omogućava sve NG ROADM funkcionalnosti (neovisnost o smjeru i Colourless) u velikoj mjeri, [32].

6 PRIMJENA DWDM SUSTAVA U GRADSKIM I REGIONALNIM MREŽAMA

Prva primjena DWDM tehnologije pojavila se u long-haul mrežama, a vremenom primjena se proširila na core mreže ili regionalne mreže, te na gradske odnosno MAN mreže. Regionalne i MAN mreže temelje se na topologiji optičkih, isprepletenih prstenova, kako je prikazano slikom 6.1.



Slika 6.1. Topologije optičkih mreža, [33]

MAN mreže čine most između infrastrukture pristupnih mreža i long-haul mreža. MAN mreža je mreža koja se proteže preko područja nekog grada ili se može protezati preko više gradova (metro regionalna). Uobičajeno ta udaljenost iznosi od 200-400 kilometara.

Man mora podržavati velik broj različitih usluga, od tradicionalnih govornih usluga i iznajmljenih vodova do novih podatkovnih usluga, kao što su usluge u stvarnom vremenu, distribuirane aplikacije i video.

Kako je položaj MAN mreže na kritičnom mjestu, mora odgovoriti na potrebe dinamike povećanja kapaciteta, kao i na porast zahtjeva za pristupom koji rezultira u zahtjevima za velikim brzinama te korisniku prilagođenim podatkovnim uslugama.

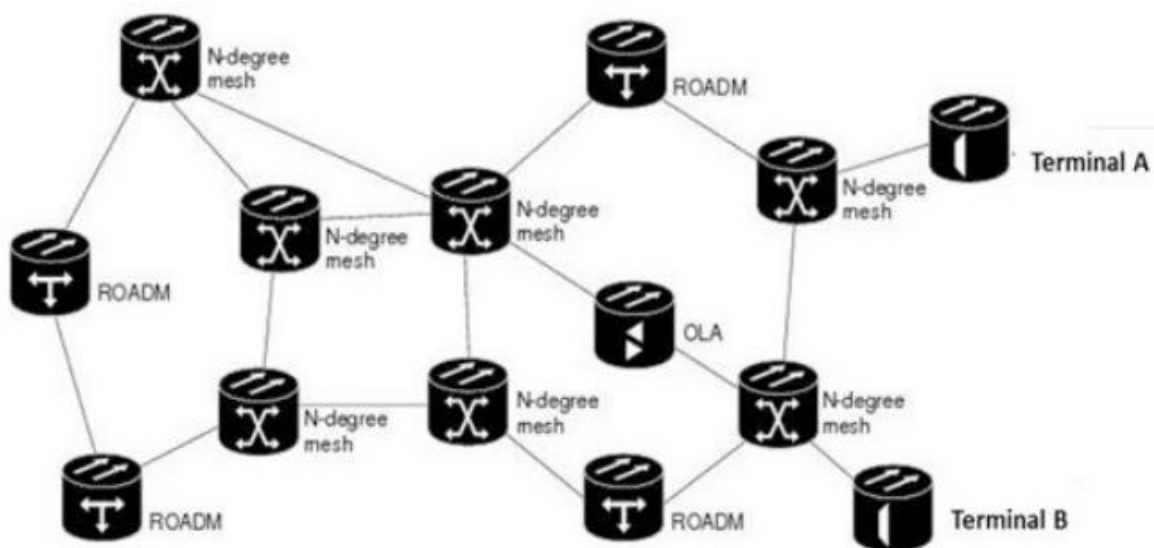
U prošlosti je temeljni element MAN mreža bila sinkrona digitalna hijerarhija (SDH - Synchronous Digital Hierarchy), odnosno SONET (SONET - Synchronous Optical Network)¹². Problemi ove tehnologije je visoka strukturiranost, specifičnost sučelja, ograničenje prijenosnog pojasa, nedostatak mogućnosti brzog prilagođavanja koje zahtijevaju poduzeća, teško i složeno je omogućiti Ethernet preko SDH jer zahtjeva visoke troškove.

DWDM se pojavila kao odgovor na ove nedostatke u metro mrežama. DWDM nudi adaptivnost, skalabilnost i fleksibilnost, te niže troškove, [34].

Metro DWDM arhitekture u cijelom svijetu imaju različite oblike, a oni se, prema [35], mogu podijeliti na dvije skupine:

- Metro-Telecomm
- Metro-DCI (DCI – Data Center Interconnect)

Metro-Telecomm je standardna metro arhitektura koju koriste tvrtke kao što su Verizon i AT&T. Danas su već počeli planovi za NG ROADM metro arhitekture, a jedan primjer dan je na slici 6.2.



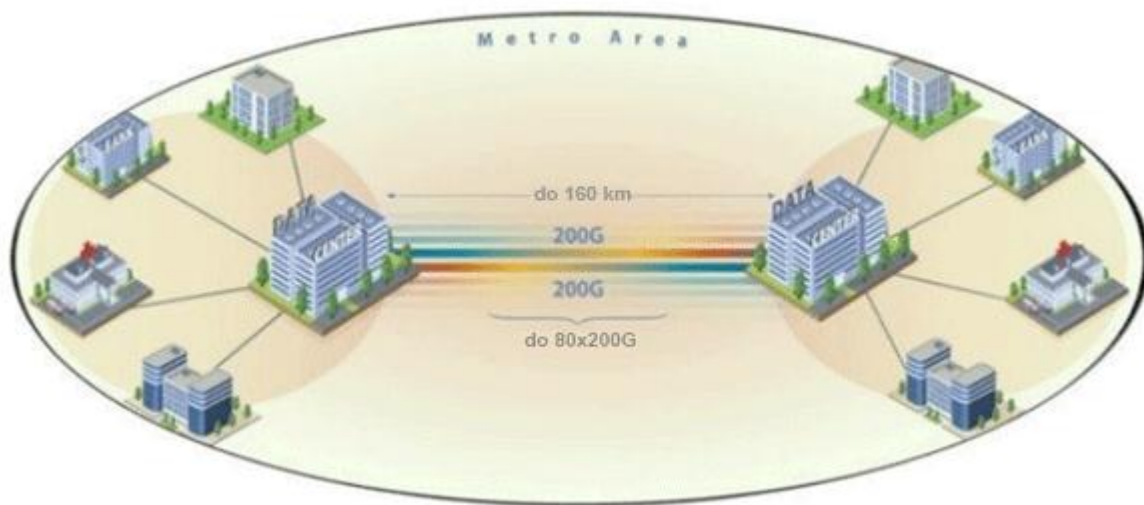
Slika 6.2. NG ROADM metro mreža, [35]

Ovakva mreža ima bolji OSNR, a što je bolji OSNR više ROADM uređaja je moguće postaviti, bez regeneracije signala. S druge strane, ovakvom mrežom je omogućena veća fleksibilnost. Važan aspekt ovih mreža omogućavanje interoperabilnosti.

Metro-DCI mreže su prerasle tradicionalne operatere i nositelje i prešle na globalnu razinu. Najbolji primjer korisnika ovih mreža su tvrtke poput Microsofta, Googlea i Facebooka, koje imaju globalnu mrežu podatkovnih centara te isporučuju ogromne količine podataka svojim korisnicima. One su tzv. Web-scale operatori koji

¹² SDH je europski ekvivalent američkog SONET-a.

svoje podatkovne centre povezuju DWDM-om naglobalnoj razini. Međutim, većina njihovog prometa se odvija između podatkovnih centara, koji su udaljeno oko 100 km, te na taj nači čine metro mrežu. Na slici 6.3. prikazana je metro-DCI arhitektura.



Slika 6.3. Metro-DCI arhitektura, [35]

Metro-DCI mreža se razlikuje od Metro-Telecomm mreže, prema [35], na više načina:

- Topologija mreže je točka-točka (eng. Point-to-point), a ne mesh
- DWDM sustav povezuje dva podatkovna centra izravno
- Manje su udaljenosti koje signal mora proći
- Bolji je OSNR te može podržati više modulacijske sheme.

Upravo to omogućuje veće brzine (oko 70 Tb/s) ukoliko se koriste i C i L pojas.

Kako se može zaključiti iz navedenog, glavni zahtjevi koji su stavljeni pred DWDM sustave u metro i regionalnim mrežama su slijedeći:

- Podrška za različite protokole
- Skalabilnost
- Pouzdanost i raspoloživost
- Otvorenost sustava
- Jednostavnost instalacije i upravljanja
- Veličina sustava i potrošnja energije
- Troškovna efikasnost

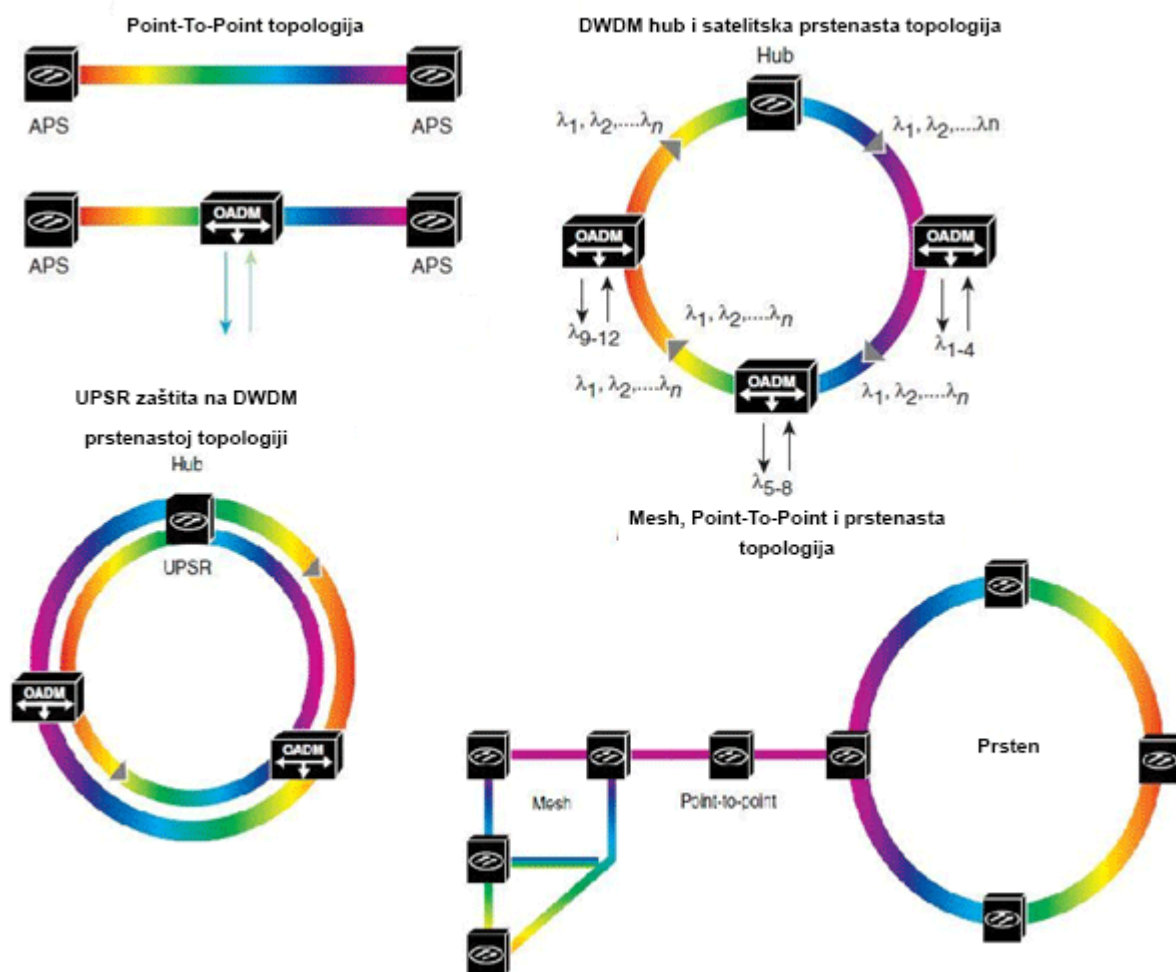
Mrežne arhitekture baziraju se na više čimbenika, kao što su vrste aplikacija i protokola u mreži, udaljenost, vrste i način pristupa, postojeće mrežne topologije. u metro mreži se point-to-point topologije koriste za povezivanje tvrtki, prstenaste topologije za povezivanje uredskih postrojenja, isprepletene (mesh) za povezivanje sa long-haul mrežom. Optički sloj mora podržavati sve topologije koje moraju biti fleksibilne.

U metro mrežama su najčešće topologije point-to-point i prsten.

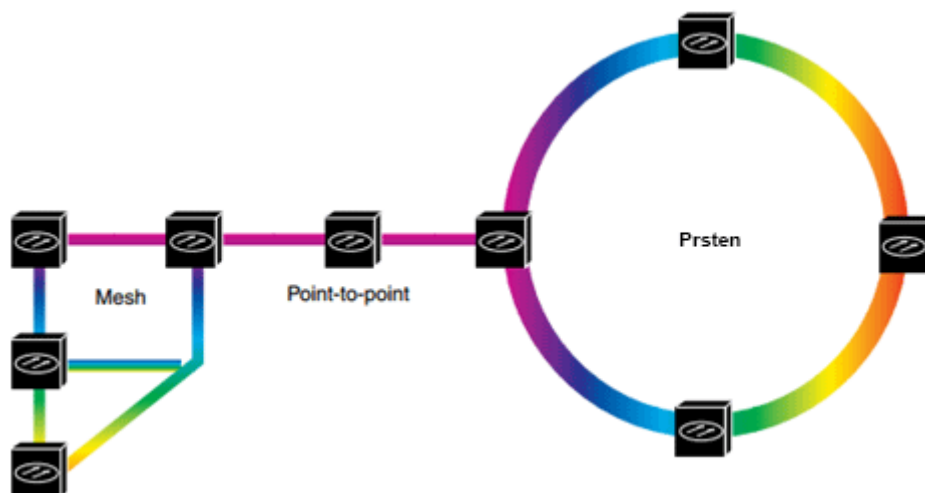
Point-to-point se može realizirati sa i bez OADM-a. To su mreže velikih brzina 10 do 40 Gb/s, velike pouzdanosti i brze restauracije puta. U MAN mreži većinom nisu potrebni OA. Zaštita, koja je potrebna kako bi se osigurala pouzdanost, integrirana je u samu DWDM opremu.

Prstenaste topologije su najčešće u metro mrežama i protežu se preko nekoliko desetina kilometara. Prsten može sadržavati malo kanala i čvorova, a brzina se kreće do 10 Gb/s po kanalu. Topologija prstena može biti implementirana s jednim ili više DWDM sustava, podržava promet svatko prema svakome, te imati jedan ili više OADM-a, ili hub i OADM. Sama zaštita se obavlja dvostrukim prstenom, tako da ako jedan prsten zakaže, promet se prebacuje na drugi.

Mesh topologija je najrobustnija od svih promatranih topologija. OADM može povezivati mesh i prsten topologije pomoću point-to-point linkova, kako je prikazano slikom 6.5. Sve topologije prikazane su slikom 6.4.

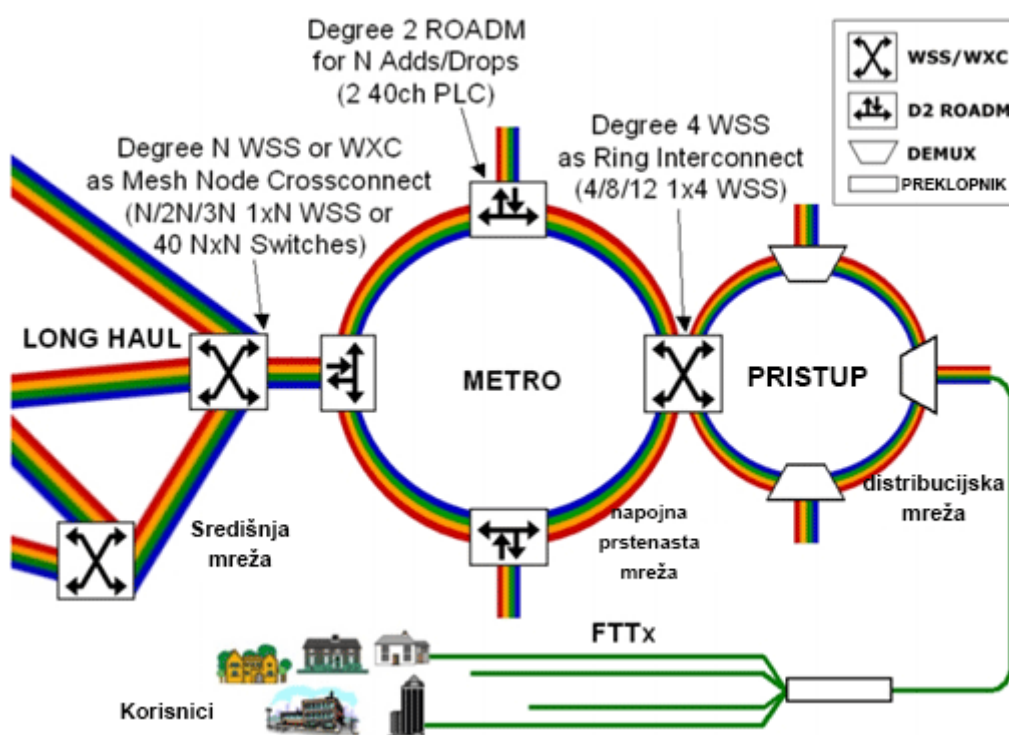


Slika 6.4, Metro topologije, [24]



Slika 6.5. povezivanje različitih topologija, [36]

Danas svaki ozbiljniji operator nudi rješenja bazirana na ROADM sustavu. Rekonfigurabilne optičke mreže su korak prema sveoptičkoj mreži, a za njihovu realizaciju potrebni su različiti ROADM uređaji, jer su CDC ROADM još uvijek u povojima. Na slici 6.6. je prikaz jedne metro i regionalne mreže sa prikazom potrebnih funkcija.



Slika 6.6. Različiti ROADM u čvorovima metro/regionalne mreže, [37]

7 ZAKLJUČAK

Optička vlakna imaju ključnu ulogu kod uspostave veze između kontinenata, država, gradova, kao i u kućnim mrežama.

Zbog malog zagušenja, velikog kapaciteta prijenosa, malih gubitaka i neinterferencije s ostalim elektroničkim komponentama sustava, optičke mreže su stekle zavidnu prednost nad ostalim tehnologijama.

U radu su opisane tehnologije i tehnike multipleksiranja, tehnike prijenosa, usporedba TDM i WDM prijenosnih sustava i arhitektura WDM mreže.

Iz rada zaključujemo da su u WDM sustavu multiplekser i demultiplekser ključni elementi u optičkom prijenosu podataka.

Kod multipleksiranja i demultipleksiranja obvezna komponenta mreža velikog dometa su optički prospoynici, koji uz predajnik i prijemnik vrši usmjeravanje signala. Uz navedene elemente optičkog sustava lako važnu ulogu imaju optička pojačala i filtri.

Primjena DWDM tehnologije u gradskim i regionalnim mrežama omogućava visoke brzine prijenosa po kanalu uz korištenje point-to-point i prstenaste topologije.

LITERATURA

- [1] <http://www.fiber-optical-networking.com/the-comparison-of-wdm-and-tdm.html> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [2] Black, U. N.: Optical Networks: Third Generation Transport Systems, Prentice Hall, 2002.
- [3] <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/TDM-vs-WDM.html> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [4] <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/what-is-tdm.html> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [5] Essiambre, R. J., Tkach, R.W.: Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks, IEEE, Vol. 100, No. 5, svibanj 2012, str. 1035. – 1055.
- [6] Mujarić E., Prijenosni mediji, Optička vlakna, Sistemac Carnet, Prosinac 2009. Dostupno na: <http://sistemac.carnet.hr/node/674> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [7] Marasović, J.: Sustavi za praćenje i vođenje procesa, FER, 2005., dostupno na: http://spvp.zesoi.fer.hr/seminari/2005/MarasovicJosko_Svietlovodi.pdf (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [8] Toš, Z.: Prijenosni sustavi i mreže u željezničkom prometu I, autorizirana predavanja, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2003., dostupno na: <http://www.fpz.unizg.hr/ztos/PRSUS/Svietlovodi.pdf> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [9] Švegović D., The autopoietic system, karakteristike svjetlovoda, Lipanj 2010. Dostupno na: <http://autopoiesis.foi.hr/wiki.php?name=Svietlovodni%20prijenosni%20sustavi&parent=NULL&page=Karakteristike%20svjetlovoda> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [10] Grobe, K., Eiselt, M.: Wavelength division multiplexing, A practical engineering guide, John Wiley & Sons, New Jersey, 2014.
- [11] FOA: Measuring Loss in Fiber Optics, 2008., dostupno na: <http://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/loss.html>
- [12] http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_2_2.htm (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [13] International Telecommunication Union: *Optical fibres, cables and system, ITU*, 2009., dostupno na : http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [14] Afrić, I.: Mjerenje kromatske disperzije pri vrlo visokim prijenosnim brzinama, diplomski rad, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2013.
- [15] Thiele, H., Nebeling, M.: Coarse Wavelength Division Multiplexing, CRC Press, Boca Raton, 2007.
- [16] FOA: Chromatic Dispersion, Polarization Mode Dispersion and Spectral Attenuation, FOA, 2010., online: http://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/CD_PMD.html (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [17] Afrić, W.: WDM tehnologija u razvoju optičkih pasivnih mreža, KOM 2008 Komunikacijske tehnologije i norme u informatici, Rijeka, 2008.
- [18] Mikac, B.: Fotoničke telekomunikacijske mreže, autorizirana predavanja, FER, 2015.

- [19] ITU-T: The leader in CWDM Recommendations, 2008, dostupno na: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/1D/01/T1D010000030002PDFE.pdf (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [20] ITU-T: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, Rec. ITU-T G.694.1, ITU-T, 2012. Dostupno na: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en> (pristupljeno: srpanj 2016.)
- [21] Udunuwara, A.: Introduction to optical backbone networks, IEEE, 2014., dostupno na: <http://www.slideshare.net/udunuwara/introduction-to-optical-backbone-networks> (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [22] Habljak, T., Organizacija telekomunikacijske mreže, IP WDM evolucija operatora, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Dostupno na: http://www.ieee.hr/download/repository/IP_WDM_Evolucija_operatora.pdf (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [23] Cisco Systems: Cisco ONS 15454 DWDM Engineering and Planning Guide, Cisco Systems, Inc., 2007.
- [24] Cisco Systems: Optical DWDM Fundamentals, Cisco Systems, Inc., 2007.
- [25] Cisco Systems: Optical Transport (DWDM) Evolution and Developments, Cisco Systems, Inc., 2013.
- [26] Furdek, M.: Optical WDM networks key components, skripta za kolegij Fotoničke telekomunikacijske mreže, FER, ak.god.2013./2014., dostupno na: https://www.fer.unizg.hr/download/repository/WDM_komponente_skripta.pdf (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [27] Thiele, H., Nebeling, M.: Coarse Wavelength Division Multiplexing, CRC Press, Boca Raton, 2007.
- [28] Borella, M. S., Jue, J. P., Banerjee, D., Ramamurthy, B., Mukherjee, B.: "Optical Components for WDM Lightwave Networks", Proceedings of the IEEE 1997., dostupno na: https://www.utdallas.edu/~jjue/publications/device_procieee97.pdf (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [29] Venghaus (Ed.), H.: Wavelength Filters in Fibre Optics, Springer, Berlin, 2006.
- [30] Perrin, S.: The Need for Next-Generation ROADMs Networks, Heavy Reading, 2010., dostupno na: <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/optical-amplifiers.html> (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [32] Siva Ram Murthy, C., Gurusamy, M.: WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms, Prentice Hall, 2001.
- [33] <http://www.exfo.com/solutions/metro-core-networks/bu2-bu3-packet-optical-transport/technology-overview> (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [34] <http://www.fs.com/dwdm-in-metro-networks-aid-482.html> (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [35] <http://www.lightwaveonline.com/content/lw/en/editorial-guides/2016/05/eye-on-the-metro.whitepaperpdf.render.pdf> (pristupljeno: kolovoz 2016.)
- [36] http://www.united.com.mu/solutions/d_dwdmsol.php
- [37] http://www.photontek.com/upfile/2014/05/27/20140527165703_242.pdf (pristupljeno: kolovoz 2016.)

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Princip rada WDM-a	2
Slika 2.2. Princip rada TDM-a	3
Slika 2.3. Usporedni prikaz WDM i TDM principa multipleksiranja	3
Slika 2.4. Kombinacija TDM-a i WDM-a u optičkim mrežama	4
Slika 2.5. Usporedba iskorištenja kapaciteta za TDM i WDM	4
Slika 2.6. Vrijeme dolaska paketa za TDM i WDM	6
Slika 2.7. Usporedba kapaciteta za TDM i WDM	7
Slika 2.8. Primjer TDM/WDM optičke prijenosne mreže	8
Slika 3.1. CWDM kanali u odnosu na optičke pojaseve	10
Slika 3.2. Plan CWDM kanala	11
Slika 3.3. Raspored valnih duljina za DWDM	14
Slika 3.4. DWDM kanali u odnosu na optičke pojaseve	14
Slika 4.1. Jednostavan WDM prijenosni sustav	18
Slika 4.2. Izgled svjetlovoda	19
Slika 4.3. Prolazak zrake kroz svjetlovod	20
Slika 4.4. Vrste svjetlovoda s obzirom na broj modova koje mogu prenositi ..	21
Slika 4.5. Ovisnost koeficijent gušenja optičkog vlakna o valnoj duljini signala	22
Slika 4.6. Atenuacijska i disperzijska krivulja jednomodnog optičkog vlakna .	23
Slika 4.7. Iznosi disperzije za različite tipove vlakana	25
Slika 4.8. Struktura DWDM predajnika	27
Slika 4.9. Osnovna struktura WDM prijamnika	28
Slika 4.10. FBG filter	31
Slika 4.11. OADM temeljen na FBG filtru	32
Slika 4.12. Shematski prikaz AWG demultiplekser	33
Slika 4.13. Odnos broja šupljina i propusnosti filtra	34
Slika 4.14. Multipleksiranje i demultipleksiranje u jednosmjernom sustavu ...	35
Slika 4.15. Multipleksiranje i demultipleksiranje u dvosmjernom sustavu	36
Slika 4.16. Demultipleksiranje pomoću prizme	37
Slika 4.17. Demultipleksiranje pomoću ogibne rešetke i leće	37

Slika 4.18. Demultipleksiranje pomoću TFF-a.....	38
Slika 4.19. OADM.....	38
Slika 4.20. OADM i ROADM	39
Slika 4.21. 4-stupanjska ROADM arhitektura čvora	40
Slika 4.22. Colourless ROADM	41
Slika 4.23. Directionless ROADM, [25].....	41
Slika 4.24. Contentionless ROADM	42
Slika 4.25. ROADM „route and select“ arhitektura	42
Slika 4.26. CDC ROADM čvor	43
Slika 4.27. EDFA princip rada	44
Slika 4.28. Princip rada Raman pojačala	44
Slika 5.1. Zvezdasta topologija broadcast-and-select mreže	46
Slika 5.2. Sabirnička topologija broadcast-and-select mreže	47
Slika 5.3. Fizička i virtualna topologija B&S mreže.....	48
Slika 5.4. Mreža s valnim usmjeravanjem: a)fizička topologija, b) virtualna topologija	49
Slika 5.5. Legacy ROADM arhitektura.....	50
Slika 5.6. “Route and Select” arhitektura.....	50
Slika 6.1. Topologije optičkih mreža.....	52
Slika 6.2. NG ROADM metro mreža.....	53
Slika 6.3. Metro-DCI arhitektura.....	54
Slika 6.4, Metro topologije	55
Slika 6.5. povezivanje različitih topologija	56
Slika 6.6. Različiti ROADM u čvorovima metro/regionalne mreže.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Optički pojasevi	10
Tablica 2. Raspored CWDM kanala	11
Tablica 3. Razmaci između kanala u DWDM tehnologiji	12
Tablica 4. Djelomični prikaz rasporeda DWDM kanala	13
Tablica 5. Usporedba WDM tehnologija	17
Tablica 6. Karakteristike različitih izvora svjetla	26
Tablica 7. Usporedba PIN i APD fotodioda	29
Tablica 8. Najvažnije značajke podesivih optičkih filtera	31

POPIS KRATICA

AP - *Avalanche PhotoDiode*

AR - *anti-reflection coating*

AWG - *Arrayed Waveguides*

CDC - *colorless/directionless/ contentionless*

CWDM - *Coarse Wavelength Division Multiplexing*

DCI – *Data Center Interconnect*

DFB - *Distributed Feedback*

DML – *Directly Modulated Laser*

DSF - *Dispersion Shifted Fiber*

DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*

EA-EML - *Electro Absorption – Externaly Modulated Laser*

EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*

EDFA-L band - *L band Erbium Doped Fiber Amplifier*

EM - *externally modulated*

FBG filter - *fiber Bragg grating filter*

FDM - *Frequency Division Multiplexing*

FP - *Fabry-Perot*

FPR - *Free Propagation Regions*

FWM – *Four Wave Mixing*

ITU - *International Telecommunication Union*

LA - *Limiting Amplifier*

LAN – *Local Area Network)*

LC FP filter - *Liquid-Crystal Fabry-Perot filter*

LD NZDF - *Low Dispersion Non-Zero Dispersion Fiber*

LED - *Light Emitting Diode*

LWP - *low water peak*

MAC - *Medium Access Control Protocol*

MAN – Metropolitan Area Network

MD NZDF - *Medium Dispersion Non-Zero Dispersion Fiber*

MMF – *Multi Mode Fiber*

NG – New Generation

OADM - *Optical Add and Drop Multiplexer*

PCS - *Plastic Clad Silica*

PIN - *P-intrinsic-N*)

QoS – *Quality of Service*

ROADM – *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers*

SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*

SDH - Synchronous Digital Hierarchy

SMF – *Single Mode Fiber*

SONET - Synchronous Optical Network

SPM – *Self Phase Modulation*

SRS – *Stimulated Raman Scattering*

TDM – *Time Division Multiplexing*

TFF - *Thin Film Filters*

TIA - *TransImpedance Amplifier*

WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

WSS – Wavelength Selective Switching

WXC –Wavelength Cross-Connect

XPM – *Cross Phase Modulation*

ZWP - *zero water peak*

METAPODACI

Naslov rada: Razvoj i primjena svjetlovodnih prijenosnih sustava s valnim multipleksiranjem

Student: Ivan Antunović

Mentor: prof. dr. sc Slavko Šarić

Naslov na drugom jeziku (engleski):

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF OPTICAL FIBER TRANSMISSION SYSTEMS WITH
WAVELENGTH MULTIPLEXING

Povjerenstvo za obranu:

- prof.dr.sc. Dragan Peraković , predsjednik
- prof. dr. sc Slavko Šarić , mentor
- Ivan Forenbacher, dipl. ing. , član
- prof.dr.sc. Zvonko Kavran , zamjena

Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: Zavod za informacijsko komunikacijski promet

Vrsta studija: Prediplomski

Studij: Promet

Datum obrane završnog rada: _____

Napomena: pod datum obrane završnog rada navodi se prvi definirani datum roka obrane.



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

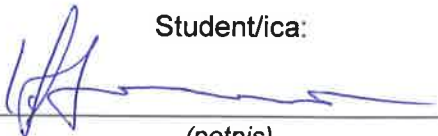
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada
pod naslovom _____

Razvoj i primjena svjetlovodnih prijenosnih sustava s valnim multipleksiranjem

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 7.9.2016

Student/ica: 
(potpis)