

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
Zavod za telekomunikacije

DIPLOMSKI RAD br. 2148

**Analiza performansi mreže za prijenos IP datagrama preko
optičke transportne mreže s valnim multipleksiranjem**

Marko Lacković

Zagreb, veljača 2002.

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Prijenos IP datagrama optičkom mrežom s valnim multipleksom	2
2.1	Paradigma prijenosa IP datagrama preko WDM mreže	2
2.2	Komponente optičke mreže s valnim multipleksom	2
2.2.1	Optičko vlakno	2
2.2.2	Optički predajnici	3
2.2.3	Optički prijemnici.....	5
	Fotodetektori	6
2.2.4	Optička pojačala	8
	Pojačala s erbijem dopiranim vlaknom	8
	Poluvodička optička pojačala	10
2.2.5	Multiplekseri i demultiplekseri.....	11
2.2.6	Add/Drop multiplekseri i filtri	12
2.2.7	Prostorni komutatori	12
2.2.8	Pretvorba valnih duljina	14
2.3	Problem korisničkog stoga	16
2.3.1	IP preko (Sonet)/SDH, Packet over Sonet (POS).....	17
2.3.2	IP preko Gigabit Ethernet za WDM	18
2.3.3	IP izravno preko WDM	18
2.3.4	Poželjna obilježja enkapsulacije IP prometa preko WDM - a.....	18
2.3.5	Usporedba protokolnih složajeva	19
2.4	Problem usmjeravanja	20
2.5	Problem zaštite i obnavljanja.....	21
2.5.1	Mehanizmi zaštite i obnavljanja	22
	Bez zaštite	23
	1+1 zaštita.....	23
	Obnavljanje puta (<i>Path</i>).....	24
	Obnavljanje linka (<i>Span</i>)	25
	Dinamičko obnavljanje (SPAF)	25
2.5.2	Struktura WDM čvorova	26
	Bez zaštite	26
	1+1 zaštita.....	27
	Obnavljanje puta (<i>Path</i>).....	28
	Obnavljanje linka (<i>Span</i>)	28
2.5.3	Usporedba mehanizama zaštite	29
2.6	Sveoptička mreža	30
2.6.1	Mrežne arhitekture prijenosa IP datagrama preko WDM.....	30
	IP preko WDM mreže od točke do točke	31
	IP preko WDM mreže s prospajanjem	31
	IP i WDM mreža s komutacijom paketa	34
3	Programsko pomagalo Cosmos	36
3.1	Problem simuliranja i optimiziranja.....	36
3.2	Motivacija i ideja.....	36
3.3	Namjena.....	36
3.4	Zahtjevi	37
3.5	Osnovne mogućnosti	37
3.6	Struktura pomagala	38
	3.6.1 Struktura simulacijske jezgre.....	38
3.7	Opis topologije.....	39

3.7.1 Moduli	39
3.7.2 Portovi i logičke veze	40
3.7.3 Slojevi	41
3.7.4 Podgrafovi	41
3.7.5 Sustav	42
3.8 Opis ponašanja	42
3.8.1 Ponašanje modula	42
3.9 Simulacijski mehanizmi	43
4 Strukturalno i funkcionalno modeliranje	45
4.1 Modeliranje sveoptičke mreže	45
4.1.1 WDMPoP modul	45
Optičko pojačalo	46
Pretvarač valnih duljina	49
Optički rasprednik/spreznik	50
Optički prospojnik	50
WDM multiplekser i demultiplekser	52
4.1.2 Modeliranje prijenosa signala između čvorova	54
Optičko vlakno	55
Optički link	55
Optički kabel	56
Linijska kartica	57
4.2 Modeliranje IP sloja	57
4.2.1 Modeliranje IP prometa	57
Generiranje samosličnog prometa agregacijom prometa	58
Generiranje samosličnog prometa uporabom generatora Gaussovog šuma	61
4.2.2 IPPoP modul	62
4.2.3 IPNode modul	63
4.2.4 IPRouter modul	64
4.3 Odnos IPPoP i WDMPoP čvorova	66
4.4 Logičke strukture za opis putova u WDM mreži	67
4.4.1 Valni kanal	67
4.4.2 Valni put	70
4.4.3 Logički kanal	71
4.4.4 Logička veza	77
5 Optimizacija	78
5.1 Genetički algoritam	78
5.2 Ulazni podaci	79
5.3 Optimizacija topologije	81
5.3.1 Najkraći putovi i model cijene	82
5.4 Optimizacija cijene linijskih kartica	84
5.5 Optimizacija cijene WDM opreme	88
6 Performanse sveoptičke mreže	93
6.1 Raspoloživost	93
6.1.1 Izračun raspoloživosti	93
6.2 BER	97
6.2.1 Modeliranje šuma spontane emisije	97
6.2.2 Modeliranje šuma preslušavanja	98
6.2.3 Izračun BER-a	101
7 Zaključak	108
8 Popis slika i tablica	110
9 Reference	114

*"Woods are lovely, dark and deep,
but I have promises to keep,
and many miles to go before I sleep,
and many miles to go before I sleep."*

R. Frost

Svima koji su me znali podržati.

1 Uvod

Rastuća popularnost Interneta osnovni je pokretač suvremenih komunikacija. Konzervativne procjene predviđaju udvostručenje Internet prometa svakih 6 mjeseci u sljedećih nekoliko godina. Uz takav rast ukupan kapacitet potreban za Internet promet u SAD dostići će 35 Tbit/s prije kraja 2002. godine, što je red veličine ukupnog svjetskog telefonskog prometa. Buduća komunikacijska mreža će zbog većeg rasta podatkovnog prometa u odnosu na telefonski (eksponencijalno prema linearnom) morati biti optimizirana za prijenos podataka. Ako se uzme u obzir da Internet protokol (IP) predstavlja osnovu prijenosa u suvremenoj telekomunikacijskoj mreži, te da su izgledi za njegovu uporabu u budućnosti još i veći, razumno je pretpostaviti da bi buduća mreža trebala biti optimizirana za prijenos IP prometa.

U vrijeme kada podatkovni promet nadmašuje telefonski, optičko vlakno se pokazuje kao jedino prijenosno sredstvo koje može zadovoljiti potrebe za kapacitetom kako danas tako i u budućnosti. Za razliku od ostalih prijenosnih medija, optičko vlakno jedino još ima golemi neiskorišteni kapacitet koji se može umnogostručiti primjenom prijenosa s valnim multipleksiranjem (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). U daljnjem tekstu će se pojmovi valno multipleksiranje i valni multipleks koristiti ravnopravno.

Korištenjem valnog multipleksa prijenosni spektar se dijeli na niz nepreklapajućih frekvencijskih pojaseva kojima se mogu prenositi signali neovisno o korištenom formatu (protokolu) ili brzini prijenosa. Razvojem WDM tehnologije (povećanje broja kanala i kapaciteta prijenosa svakog kanala) povećava se i kapacitet već postavljenog optičkog vlakna. Stoga se često ova tehnologija naziva i *grow-as-you-go* tehnologijom. Iako je primjena valnog multipleksa danas ograničena na jezgrena i metropolitansku mrežu, u budućnosti se može očekivati i u regionalnim i pristupnim mrežama.

U drugom je poglavlju teorijski obrađen problem prijenosa IP datagrama sveoptičkom mrežom s valnim multipleksom koji se može podijeliti na problem korisničkog stoga i problem usmjeravanja. Prvi se odnosi na korištenje međuprotokola između IP i WDM sloja koji nadopunjuje njihovu funkcionalnost. Problem usmjeravanja odnosi se na integraciju IP i WDM upravljačkih ravnina. Opisane su 4 arhitekture IP/WDM mreže. U ovom je dijelu opisana i paradigma sveoptičke mreže u pogledu njezinog razvoja i uvjeta koje mora zadovoljiti za efikasan prijenos IP datagrama.

Treće poglavlje daje pregled osnovnih ideja programskog pomagala *Cosmos* korištenog u ovom radu. *Cosmos* je u potpunosti razvijen na Zavodu za telekomunikacije, te daje unificiranu osnovu za opis mrežnih struktura koja se nadopunjuje simulacijskim i optimizacijskim algoritmima, te analitičkim postupcima.

U četvrtom se dijelu ukratko opisuju modelirane komponente sveoptičke mreže kao i komponente koje služe za generiranje prometa koji ulazi u mrežu, i to sa stanovišta strukturalnog i funkcionalnog modeliranja.

Peti dio daje pregled koncepata genetičkog algoritma korištenog u procesu optimizacije mreže. Rađena je minimizacija cijene dodanih linijskih kartica koje podržavaju zadane prometne zahtjeve, te minimizacija cijene topologije WDM mreže koja dalje ulazi u simulacije postupke. Predložen je i algoritam smanjenja cijene dodane WDM opreme.

U šestom se poglavlju analiziraju dvije performanse WDM mreže – raspoloživost i učestalost pogreške (BER – *Bit Error Ratio*). Raspoloživost se računa korištenjem Monte Carlo simulacije, dok se pri proračunu BER-a analizira utjecaj šuma spontane emisije i šuma preslušavanja.

2 Prijenos IP datagrama optičkom mrežom s valnim multipleksom

Kako je izravan prijenos IP datagrama WDM mrežom još daleka budućnost, mnoge od izloženih arhitektura prijenosa u ovom dijelu predstavljaju jedno od viđenja mogućeg razvoja sveoptičke mreže. Na taj razvoj prije svega utječe razvoj tehnologije, i to prvenstveno optičkih logičkih sklopova i optičke memorije, te korisničke potrebe za uslugama koje zahtijevaju visoki prijenosni kapacitet. Ovaj drugi uvjet određuje i granice sveoptičke mreže koja se može završavati na granicama jezgrene mreže, no u konačnici će vjerojatno dosizati i metropolitanska područja, odnosno krajnjeg korisnika.

2.1 Paradigma prijenosa IP datagrama preko WDM mreže

Uzimajući u obzir neizbježnost IP-a i veliki kapacitet koji pruža WDM, jasno je da će razvoj telekomunikacijske mreže ići u smjeru prijenosa IP datagrama WDM fizičkom infrastrukturom. Osnovni problemi leže u činjenici da IP i WDM ne posjeduju neke važne mogućnosti za funkcioniranje mreže. To se prije svega odnosi na mehanizme zaštite i obnavljanja, odnosno efikasnog usmjeravanja prometa na fizičkoj razini. Današnji WDM sustavi od točke do točke nemaju mogućnost preusmjeravanja valnih putova u stvarnom vremenu. To znači da se promet ne može automatski preusmjeriti oko točke kvara. WDM također ne može agregirati i razdvajati promet različitog tipa (govor, podaci, video, ...) u stvarnom vremenu, što je nužno za efikasno korištenje resursa. IP je usmjeren na prijenos podataka te je stoga manje pogodan za prijenos govor i drugih aplikacija u stvarnom vremenu. Zbog toga je potrebno koristiti protokole koji osiguravaju potrebnu raspoloživost i kvalitetu usluge (kao npr. ATM). Da bi se funkcionalnost WDM sloja nadopunila navedenim mehanizmima koriste se različiti protokoli (primarno Sonet/SDH) između IP i WDM sloja. Taj problem se naziva problemom korisničkog stoga i obrađen je u dijelu 2.3.

Drugi problem je problem usmjeravanja koji se svodi na način podjele funkcionalnosti između IP i WDM sloja, te je obrađen u dijelu 2.4.

2.2 Komponente optičke mreže s valnim multipleksom

Prije opisa problema integracije funkcionalnosti protokola pri prijenosu IP datagrama WDM prijenosom dan je pregled komponenti koje se koriste u WDM prijenosu.

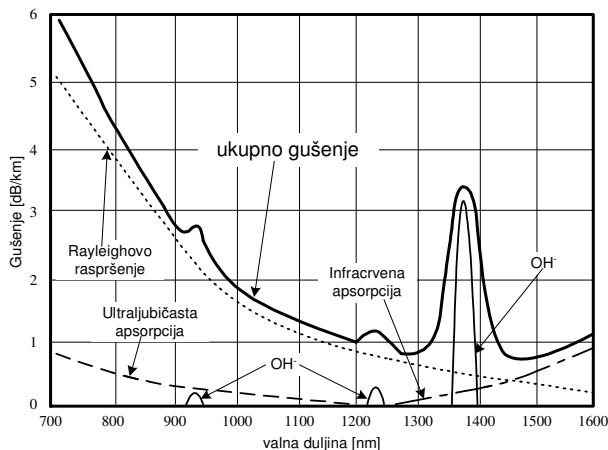
2.2.1 Optičko vlakno

Pri prijenosu valno multipleksiranog signala koristi se u principu jednomodno vlakno (SMF - *Single Mode Fiber*) ili jednomodno vlakno s pomaknutom disperzijom čiji je minimum (~ 1 ps/kmnm) pomaknut u odnosu na područje prijenosa (NZDSF - *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*). Taj je pomak nužan zbog izbjegavanja nelinearnih efekata (miješanje 4 vala). Za prijenos u cijelom području (vlakna koja se koriste u pristupnom dijelu mreže za pristup WDM čvorovima) može se koristiti i obično DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) vlakno ili vlakno koje ima malu disperziju preko cijelog područja valnih duljina koje se potencijalno koriste (DFP - *Dispersion Flattened Fiber*), ili čak multimodno vlakno (*multimode gigabit fiber*).

U nastavku se analizira samo gušenje optičkog signala, dok su nelinearni efekti izostavljeni jer njihov utjecaj nije analiziran tijekom modeliranja ove komponente.

Gušenje je signala (prigušenje optičke snage) posljedica različitih uzroka od kojih su dominantni Rayleighovo raspršenje, ultraljubičasta i infracrvena apsorpcija, apsorpcija uslijed primjesa, te mikrosavijanje i makrosavijanje (slika 2.1). Rayleighovo raspršenje

($\sim 1/\lambda^4$) najznačajnije doprinosi gušenju signala u području valnih duljina koje se koriste pri valnom multipleksu (3. optički prozor). Ultraljubičasta apsorpcija (dominantna na 200 nm), te infracrvena apsorpcija (dominantna na 1000 nm) imaju mali utjecaj na gušenje, a položaj optičkih prozora je tako odabran da bi se minimizirao utjecaj apsorpcije uslijed primjesa (primarno OH^- ionima). Gubici uslijed mikro i makrosavijanja posljedica su geometrijskih obilježja vlakna (savijanje ili nesavršenost geometrije optičkog vlakna) koja dovode do neispunjenja uvjeta totalne refleksije.

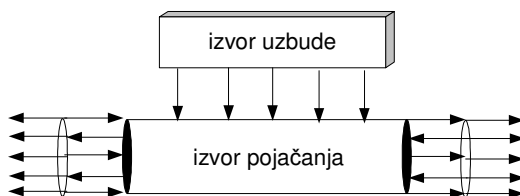


Slika 2.1 Ovisnost koeficijent gušenja optičkog vlakna o valnoj duljini signala

U dijelu 4.1.2 opisano je modeliranje optičkog vlakna u ovom radu.

2.2.2 Optički predajnici

Najčešći optički predajnici u transmisijskim sustavima (sustavi visokog kapaciteta) su laseri. U osnovi se radi o optičkom pojačalu koje je uloženo u reflektivnu šupljinu, što uslijed pozitivne povratne veze uzrokuje oscilacije. Poluvodički laseri koriste poluvodiče kao izvor pojačanja (*gain medium*), dok laseri s dopiranim vlaknima (najčešće erbijem dopirano vlakno) koriste optičko vlakno kao izvor pojačanja. Poluvodički laseri su zbog svoje kompaktnosti, jednostavnosti i niske cijene proizvodnje najrašireniji tip lasera. Radi se o jednostavnom *pn* spoju koji ne zahtijeva posebne laserske pumpe kao laseri s dopiranim vlaknima, a pokazuje visoku efikasnost pri pretvorbi električne energije u optičku. Na slici 2.2 prikazana je osnovna struktura lasera.

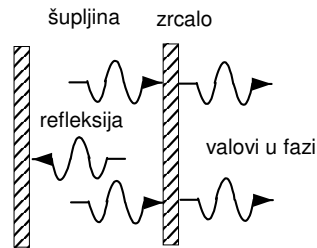


Slika 2.2 Osnovna struktura lasera

Kao izvor pojačanja može služiti električni izvor (poluvodička pojačala) ili optički izvor (pojačala s dopiranom niti).

Dio optičke energije reflektira se na krajevima medija za pojačanje, koji su izvedeni kao paralelno postavljene ravnine (zrcala). Takav se struktura naziva Fabry - Perot rezonantna šupljina, a optičko pojačalo Fabry - Perot - ovim pojačalom. Posljedica postavljanja medija za pojačanje u Fabry - Perot rezonantnu šupljinu je visoko pojačanje samo za rezonantne

valne duljine u šupljini. Dio valova se nakon prolaska kroz rezonantnu šupljinu reflektira, dok dio prolazi kroz rubna zrcala. Valovi koji prođu kroz zrcalo, a odgovaraju rezonantnoj valnoj duljini šupljine podudaraju se u fazi, što dovodi do velikog povećanja amplitude vala te valne duljine u usporedbi s valovima ostalih valnih duljina (slika 2.3). Posljedica polureflektirajućih zrcala je ovisnost pojačanja o valnoj duljini.



Slika 2.3 Reflektiranje i prolazak valova na rubovima rezonantne šupljine

Ukoliko je kombinacija pojačanja pojačala i reflektivnosti zrcala dovoljno visoka, pojačalo će početi oscilirati, tj. proizvoditi izlaz i bez prisutnosti ulaznog signala. Iznad tog praga se više ne govori o pojačalu, već o laseru. To se događa jer spontana emisija koja je uvijek prisutna na svim valnim duljinama unutar pojasa pojačanja pojačala, biva pojačana i bez ulaznog signala, te se pojavljuje na izlazu kao svjetlosni signal. Kako je proces pojačanja posljedica stimulirane emisije, izlazna svjetlost iz lasera je koherentna (u fazi).

Potrebna su dva uvjeta da bi laser oscilirao na jednoj valnoj duljini:

1. valna duljina mora biti unutar pojasa valnih duljina koje pojačava medij za pojačanje, i
2. širina šupljine mora biti cjelobrojni višekratnik polovine valne duljine u šupljini.

Sve valne duljine koje zadovoljavaju drugi uvjet nazivaju se longitudinalnim modovima lasera. Tako će Fabry–Perot-ov laser istovremeno oscilirati na nekoliko valnih duljina, tj. imati će nekoliko longitudinalnih modova. Takvi laseri imaju veliku spektralnu širinu (tipično oko 10 nm, slika 2.4a). Za prijenosne sustave velike brzine prijenosa spektralna širina mora biti što uža, a idealno bi odgovarala jednom modu (slika 2.4b).



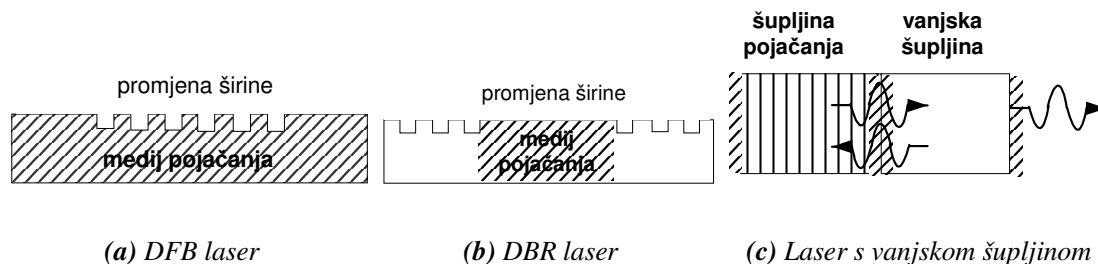
(a) Laser s više longitudinalnih modova **(b)** Laser s jednim longitudinalnim modom (idealno)

Slika 2.4 Tipični izlazni spektri lasera

Jedan longitudinalni mod može se postići filtriranjem željenih valnih duljina i potiskivanjem ostalih. Za takve je lasere važna veličina faktora potiskivanja sporednih modova, koja tipično iznosi oko 30 dB.

Jedan je od načina potiskivanja modova korištenje distribuirane povratne veze koja se postiže nizom usko poredanih reflektivnih površina. To se postiže periodičkom varijacijom

širine šupljine. Ukoliko je varijacija širine u dijelu šupljine koji se odnosi na medij pojačanja takav se laser naziva DFB laser (*Distributed Feedback Laser*, slika 2.5a), a ako se nalazi izvan medija pojačanja laser se naziva DBR laser (*Distributed Bragg Reflector*).



Slika 2.5 Laseri s potiskivanjem modova

U dijelu s promjenjivom širinom val prolazi niz refleksija. U fazi će se podudarati valovi za koje vrijedi da je interval promjene širine šupljine cjelobrojni višekratnik polovice valne duljine u šupljini (Braggov uvjet).

DFB laseri danas se koriste u gotovo svim prijenosnim sustavima velikog kapaciteta. Na ulazu u laser obično se stavlja optički izolator da bi se spriječile refleksije u laser, te fotodetektor koji mjeri gubitak snage kroz stražnju reflektivnu površinu. Često se više DFB lasera pakira u jednu cjelinu pri čemu se dobiva ugodni optički izvor (u diskretnim koracima valnih duljina).

Drugi način potiskivanja valnih duljina koji će ovdje biti razmotren sastoji se u korištenju vanjske šupljine (*External Cavity Laser*) koja se nastavlja na primarnu šupljinu u kojoj se dešava pojačanje (slika 2.5c). Vanjska šupljina ima svoje longitudinalne modove što se postiže korištenjem reflektivnih površina i u vanjskoj šupljini. Laser može oscilirati samo na onim valnim duljinama koje su rezonantne za obje šupljine. Umjesto Fabry - Perot - ove šupljine može se koristiti i ogibna rešetka. Kao izlaz medija za pojačanje prema rešetki koristi se nereflektirajuća površina, pa su refleksije valova određene samo širinom otvora rešetke i njezinim kutom. Vanjska šupljina obično koristi zrcalo koje propušta samo određene valne duljine.

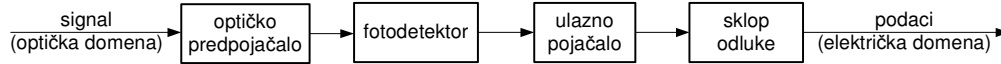
U WDM sustavima često je poželjno imati lasere s ugodivom izlaznom valnom duljinom (*tunable lasers*). To se kod lasera s vanjskom šupljinom može postići promjenom centralne valne duljine rešetke (promjena kuta rešetke i udaljenosti od primarne šupljine – mehaničko namještanje) i selektivnog optičkog zrcala. Na ovaj način se može postići područje promjene od oko 100 nm. Brži način ugađanja poluvodičkih pojačala postiže se promjenom gustoće pobudne struje pri čemu se mijenja indeks loma poluvodiča.

Optički predajnik u ovom je radu opisan korištenjem izlaznih snaga signala, spontane emisije i preslušavanja što je analizirano u dijelu 4.1.2 u opisu linijske kartice i u dijelu 6.2 u opisu načina izračuna BER-a.

2.2.3 Optički prijemnici

Optički prijemnici pretvaraju optički signal u iskoristivi električni signal. Slika 2.6. prikazuje općenitu građu optičkog prijemnika. Fotodetektor stvara električnu struju proporcionalnu ulaznoj optičkoj snazi. Ulazno pojačalo povećava snagu proizvedenog optičkog signala na iskoristivu razinu. U digitalnim komunikacijama ulazno pojačalo slijedi sklop odluke koji pretvara analogni izlaz pojačala u digitalni signal. Odluka ovisi o

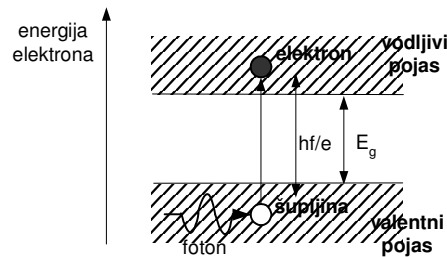
modulaciji korištenoj u prijenosu. Ispred fotodetektora može se koristiti i optičko predpojačalo.



Slika 2.6 Općenita građa optičkog prijemnika u digitalnom komunikacijskom sustavu

Fotodetektor

Slika 2.7. prikazuje osnovni princip rada fotodetektora. Fotodetektor su izrađeni od poluvodičkog materijala. Fotone koji dolaze na poluvodič apsorbiraju elektroni u valentnom pojasu, dobivajući dovoljno energije za prijelaz u vodljivi pojas i ostavljajući šupljina u valentnom pojasu. Pod utjecajem vanjskog napona ovaj par elektron - šupljina proizvodi fotostruju.



Slika 2.7 Princip rada fotodetektora

Da bi elektron prešao iz vodljivog u valentni pojas apsorbirani foton mora imati energiju koja je jednaka ili veća od razlike energetske razina u vodljivom i valentnom pojasu, što daje ograničenje

$$hf_c = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g, \quad (2.1)$$

pri čemu je f_c frekvencija fotona, λ valna duljina fotona, a E_g energetska razina koja dijeli vodljivi i valentni pojas. Najveća vrijednost valne duljine za koju je gornji izraz zadovoljen naziva se graničnom valnom duljinom.

Efikasnost η fotodetektora omjer je apsorbirane snage koja utječe na porast fotostruje i ukupne upadne svjetlosne snage. U prijenosnim sustavima na velike udaljenosti je bitno da taj faktor bude što bliži 1 zbog niskih razina optičke snage. Snaga koja se apsorbira u poluvodiču debljine L može se izraziti kao

$$P_{abs} = (1 - e^{-\alpha L})P_{in}, \quad (2.2)$$

gdje je P_{in} ulazna optička snaga, a α apsorpcijski koeficijent materijala. Slijedi

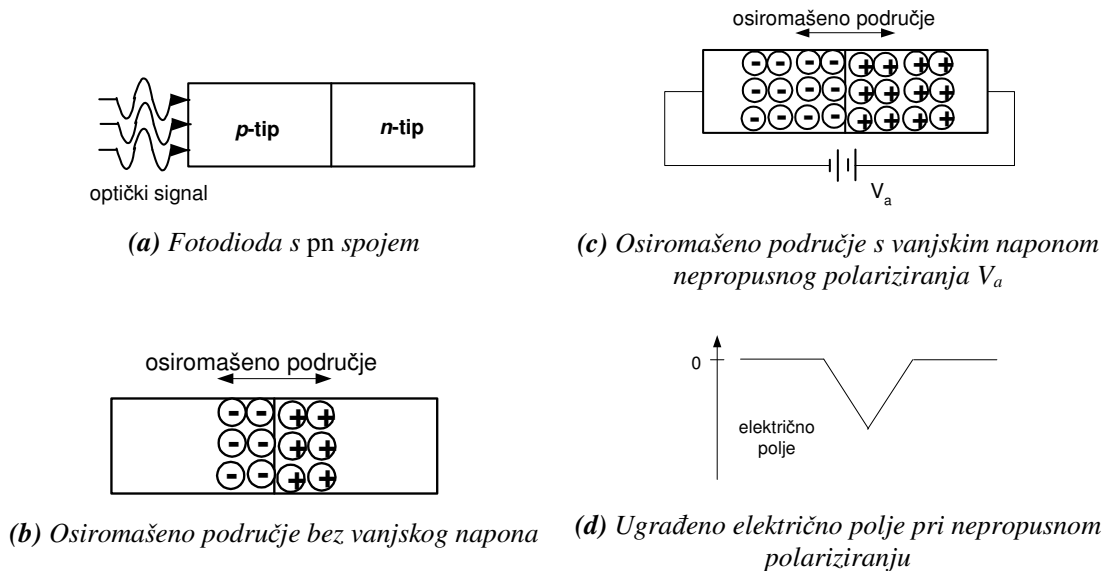
$$\eta = \frac{P_{abs}}{P_{in}} = 1 - e^{-\alpha L}. \quad (2.3)$$

Apsorpcijski koeficijent ovisi o valnoj duljini i jednak je 0 za sve valne duljine veće od granične. Druga vrijednost koja se definira za fotodetektore je osjetljivost R definirana kao

$$R = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{e\eta}{hf_c} = \frac{e\eta\lambda}{hc}, \quad (2.4)$$

pri čemu je I_p generirana fotostruja.

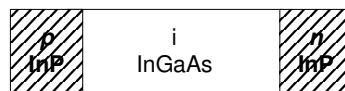
U praksi se običan sloj poluvodiča ne koristi kao fotodetektor zbog male efikasnosti, jer se puno stvorenih elektrona iz vodljivog pojasa rekombinira sa šupljinama u valentnom pojasu prije nego što stignu do vanjskog kruga. Zbog toga je poželjno te elektrone što prije usmjeriti iz poluvodiča, što se postiže stvaranjem električnog polja u području gdje elektroni nastaju. To je najlakše ostvariti korištenjem nepropusno polariziranog *pn* spoja (slika 2.8a - d). Takva se struktura naziva fotodiodom.



Slika 2.8 Princip rada pn fotodiode

Osiromašeno područje stvara ugrađeno električno polje, koje se može pojačati primjenom napona nepropusnog polariziranja. U tom će slučaju elektroni koji su stvoreni u blizini ili u osiromašenom području biti usmjereni u *n*-tip poluvodiča prije nego što rekombiniraju sa šupljinama iz *p*-tipa. Analogno šupljine bivaju usmjerene u *p*-tip poluvodiča. Ovaj proces se naziva *drift*. Parovi elektron - šupljina stvoreni daleko od osiromašenog područja putuju uglavnom pod utjecajem difuzije i mogu rekombinirati pri čemu ne daju doprinos struji u vanjskom krugu. Kako je difuzija puno sporiji proces od drifta, difuzijska struja neće brzo reagirati na promjene ulazne optičke snage, što povećava vrijeme odgovora fotodiode.

Kako bi se povećala efikasnost fotodetektora, između *n* i *p* tipa poluvodiča unosi se blago dopirani intrinzični sloj, a takve fotodiode se nazivaju *pin* fotodiodama. Osiromašeno područje se u ovom slučaju podudara s intrinzičnim slojem. Širina intrinzičnog sloja je veća od širine *n* i *p* sloja, što povećava efikasnost i vrijeme odgovora fotodiode. Efikasniji način za postizanje istog cilja je korištenje poluvodičkog materijala koji je transparentan za željenu valnu duljinu. U tom slučaju je ta valna duljina veća od granične valne duljine tog poluvodiča, što znači da nema apsorpcije. Na slici 2.9 prikazana je takva dvostruka heterostruktura koja se sastoji od poluvodiča InP i InGaAs.



Slika 2.9 Dvostruka heterostruktura pin diode

Osjetljivost fotodiode ograničena je činjenicom da jedan apsorbirani foton može stvoriti samo jedan elektron. Ukoliko je elektron pod utjecajem jakog električnog polja, on može skupiti dovoljno energije da potakne druge elektrone na prijelaz u vodljivi pojas. Ovi

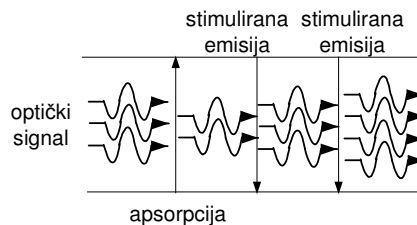
sekundarni parovi elektron - šupljina mogu stvoriti druge nove parove ukoliko su dovoljno ubrzani, što dovodi do lavinske multiplikacije, a odgovarajuća fotodioda zove se lavinskom fotodiodom (APD - *Avalanche PhotoDiode*).

Optički prijemnik u ovom radu služi isključivo kao detektor snage ulaznog signala, snage šuma spontane emisije i šuma preslušavanja. Na temelju parametara prijemnika računa se BER promatranog valnog puta. Taj je proračun analiziran u dijelu 6.2.3.

2.2.4 Optička pojačala

Pojava optičkih pojačala bitno je promijenila proračun optičkog prijenosa, jer je prije njih jedini način obnavljanja optičkog signala bila elektronička regeneracija, tj. primanje signala i ponovno slanje, tj. primjena opto - električne pretvorbe. Regeneratori su bili netransparentni s obzirom na brzinu prijenosa i oblik modulacije, za razliku od optičkih pojačala. Optička pojačala također imaju širok pojas pojačanja što ih čini primjenjivim na WDM signal u cijelosti.

Osnovni mehanizam koji koriste sva optička pojačala je stimulirana emisija u prisutnosti optičkog signala. Pod utjecajem ulaznog signala frekvencije f_c atomi prelaze iz nižeg energetskog stanja E_1 u više energetsko stanje E_2 ako je zadovoljen uvjet $hf_c = E_2 - E_1$. Pri prelasku $E_1 \rightarrow E_2$ dolazi do apsorpcije fotona, a pri prelasku $E_2 \rightarrow E_1$ do emisije fotona iste frekvencije f_c što se naziva stimulirana emisija. Ako stimulirana emisija (prelasci $E_2 \rightarrow E_1$) dominira nad apsorpcijom (prelasci $E_1 \rightarrow E_2$) doći će do pojačanja signala.



Slika 2.10 Stimulirana emisija

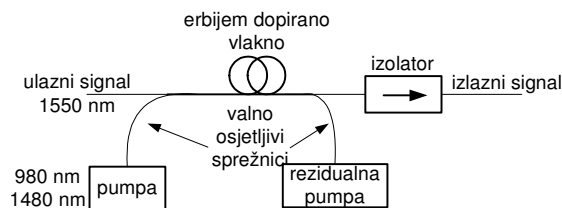
U stanju toplinske ravnoteže je omjer prelazaka $E_1 \rightarrow E_2$ i $E_2 \rightarrow E_1$ jednak je 1 i označava se s r . Ako se populacija atoma u stanju E_1 označi s N_1 , a u stanju E_2 s N_2 , tada će povećanje energije sustava u jedinici vremena biti jednako $(N_2 - N_1)rhf_c$, a pozitivan predznak ovog izraza je preduvjet pojačanja signala. Za to je potrebno $N_2 > N_1$ što se naziva populacijskom inverzijom, i ostvaruje se dovođenjem vanjske energije.

Ukoliko se prijelaz iz stanja E_2 u stanje E_1 desi bez vanjskog utjecaja emitira se foton frekvencije f_c (stanja su jednaka predhodno razmatranom slučaju) što se naziva spontanom emisijom. Spontana emisija ne pridonosi pojačanju signala, jer su emitirani fotoni različiti po smjeru, polarizaciji i fazi (nekoherentnost), za razliku od stimulirane emisije gdje se ove veličine podudaraju s ulaznim fotonom (koherentnost). Spontana emisija je nepoželjna u pojačalu jer se ona tretira kao novi signal koji se pojačava pridonoseći izlaznom signalu u obliku šuma spontane emisije što je analizirano u dijelu 6.2.

Pojačala s erbijem dopiranim vlaknom

Struktura pojačala s erbijem dopiranim vlaknom (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) prikazana je na slici 2.11. Sastoji se od optičkog vlakna čija je jezgra dopirana Er^{3+} ionima. Vlaknu se dovodi optička energija iz optičke pumpe valne duljine 980 nm ili 1480 nm. Na početku dopiranog vlakna nalazi se valno osjetljivi sprežnik koji spreže ulazni signal i

signal iz optičke pumpe. Na izlasku iz vlakna nalazi se rasprežnik koji razdvaja pojačani signal od ostatka signala iz optičke pumpe. Izolator sprječava refleksije signala u pojačalo.

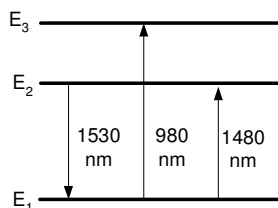


Slika 2.11 Pojačalo s erbijem dopiranim vlaknom (osnovni model)

EDFA je danas dominantno korišteno optičko pojačalo zahvaljujući

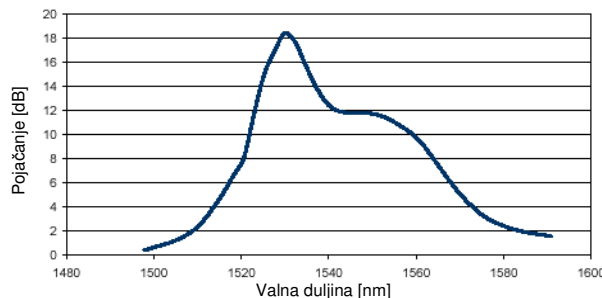
- kompaktnim i pouzdanim poluvodičkim optičkim pumpama visoke snage,
- polarizacijskoj neovisnosti s obzirom da se radi o cjelovitom dijelu vlakna,
- jednostavnosti uređaja, te
- odsutnosti preslušavanja pri pojačanju WDM signala.

Slika 2.12. prikazuje energetske razine Er^{3+} iona. U slučaju toplinske ravnoteže za populacije razina E_1 , E_2 i E_3 vrijedi $N_1 > N_2 > N_3$. Apsorpcijom fotona valnih duljina 980 nm, ili 1480 nm pod utjecajem signala iz optičke pumpe atomi prelaze iz osnovnog stanja E_1 u stanja E_2 i E_3 . Atomi iz stanja E_3 prelaze u stanje E_2 puno brže nego iz stanja E_2 u E_1 . Atomi koji su se vratili u stanje E_1 bivaju vrlo brzo vraćeni nazad u stanje E_2 ili E_3 ovisno o valnoj duljini pumpe. Zbog toga će većina atoma biti u stanju E_2 , čime je postignuta približno ista populacijska inverzija u oba slučaja. Pumpanje na 980 nm proizvodi manji šum spontane emisije (ASE noise - *Amplified Spontaneous Emission noise*), dok su na 1480 nm raspoložive pumpe veće snage.



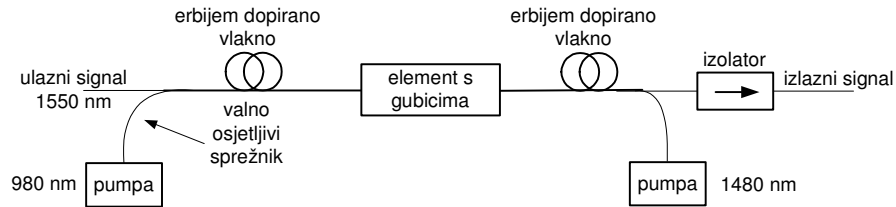
Slika 2.12 Tri energetska stanja u Er^{3+} ionima

S obzirom da su razine populacije na različitim energetske nivoima za ulazne valne duljine unutar pojasa pojačanja različite, tako će se i pojačanje na različitim valnim duljinama razlikovati. Na slici 2.13 prikazan je pojas pojačanja i ovisnost pojačanja o valnoj duljini za starije EDFA kod kojih je ta ovisnost puno izraženija nego kod današnjih pojačala.



Slika 2.13 Pojas pojačanja i ovisnost pojačanja o valnoj duljini za starije EDFA

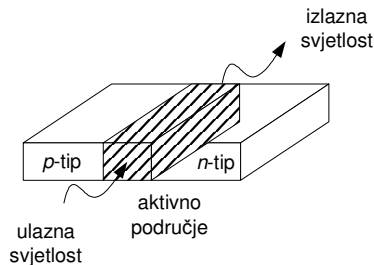
U stvarnim sustavima koriste se složenije strukture EDF pojačala. Najčešće se primjenjuje dizajn u dva stupnja kako prikazuje slika 2.14. Obilježja prvog stupnja su veliko pojačanje i mali šum, a drugog stupnja velika izlazna snaga. Drugo važno obilježje ovog dizajna je visoka pouzdanost koja se postiže korištenjem dvije pumpe. Kvar jedne pumpe (jedini aktivan element u pojačalu) ima mali utjecaj na performanse sustava. Između dva stupnja može se staviti i element s gubicima koji ima mali utjecaj na performanse. Može se raditi o filtru za ujednačavanje pojačanja, *add/drop* multiplekseru ili modulu za kompenzaciju disperzije.



Slika 2.14 EDFA s dva stupnja

Poluvodička optička pojačala

Poluvodička optička pojačala (SOA - *Semiconductor Optical Amplifiers*) pojavljuju se prije EDFA, ali ne pokazuju tako dobra svojstva, te se mnogo rjeđe upotrebljavaju kao pojačala. Njihova glavna uporaba je u optičkim prospojnicima i pretvaračima valnih duljina. Na slici 2.15 prikazan je blok dijagram poluvodičkog optičkog pojačala. U osnovi se radi o *pn* spoju, gdje se osiromašeno područje ponaša kao aktivno područje pojačala. Svjetlost se pojačava uslijed stimulirane emisije prolaskom kroz aktivno područje. Na krajevima aktivnog područja nalazi se antirefleksivni sloj koji uklanja promjene u iznosu pojačanja koje se dešavaju zbog promjene valne duljine.



Slika 2.15 Blok dijagram poluvodičkog optičkog pojačala

Osnovna prednost poluvodičkih optičkih pojačala je pojas pojačanja koji je širi nego kod EDFA (oko 100 nm). Signali u drugom i trećem optičkom prozoru mogu se istovremeno pojačavati korištenjem SOA. EDFA su ipak puno raširenija u uporabi jer poluvodička pojačala unose značajno preslušavanje kada se koriste u WDM sustavima. Drugi razlog je veće pojačanje EDFA i manji gubici ovisni o polarizaciji (PDL - *Polarization - Dependent Loss*). Poluvodička pojačala su tehnološki zahtjevnija za izradu zbog potrebe za vrlo kvalitetnim antirefleksivnim premazima. U protivnom dolazi do izražene ovisnosti pojačanja o valnoj duljini i temperaturi.

Optičko pojačalo je sa stanovišta ovisnosti pojačanja o valnoj duljini i ovisnosti šuma spontane emisije o valnoj duljini detaljnije analizirano u dijelu 4.1.1. Utjecaj pojačala na šum spontane emisije analiziran je u dijelu 6.2.

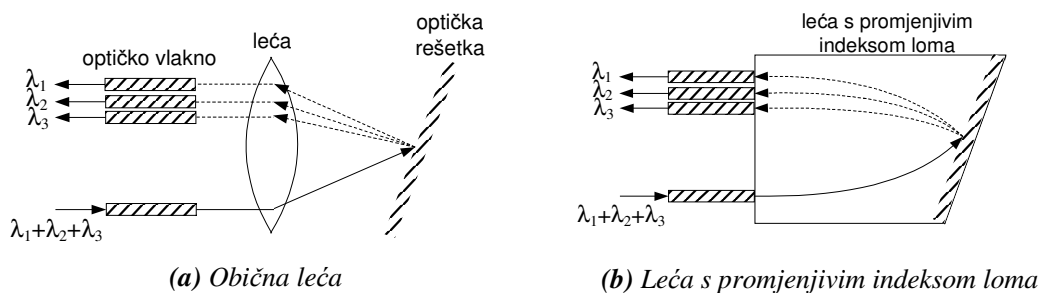
2.2.5 Multiplekseri i demultiplekseri

Multiplekseri i demultiplekseri su temeljni dijelovi WDM sustava.

Demultiplekseri kao i optički filtri zahtijevaju mehanizam osjetljiv na valnu duljinu, te se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine:

1. demultipleksere temeljene na ogibu, te
2. demultipleksere temeljene na interferenciji.

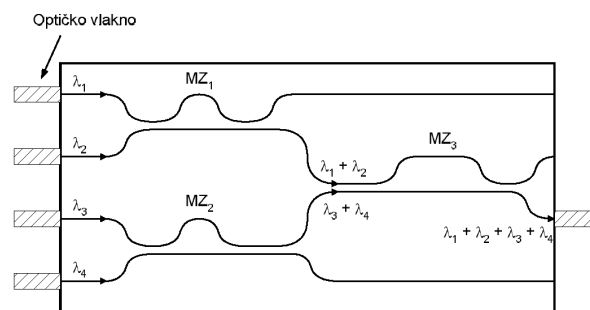
Prvi koriste kutno disperzivni element (npr. ogibnu rešetku), koja vrši prostornu disperziju ulaznog signala s obzirom na valnu duljinu. Pri tom se koristi Braggov ogib na ogibnoj rešetki. Slika 2.16a prikazuje princip rada ovakvog demultipleksera. Ulazni signal se usmjerava na rešetku koja prostorno razdvaja valne duljine, koje se zatim lećom fokusiraju na izlazna vlakna. Kompaktnosti uređaja može doprinijeti korištenje leće s promjenjivim indeksom loma (slika 2.16b).



Slika 2.16 Demultiplekserski uređaji s ogibnom rešetkom

Problem ovog pristupa je ovisnost propusnog pojasa o dimenzijama ulaznih i izlaznih vlakana. Veličina jezgre izlaznih vlakana mora biti dovoljno velika da omogući iste uvjete za sve radne valne duljine, te niske unesene gubitke. Prvi uređaji su koristili multimodna izlazna vlakna, dok su kasnije ti problemi riješeni korištenjem mikroleća.

Demultiplekseri koji koriste interferenciju temelje se na uporabi optičkih filtara i sprežnika. Ovi se uređaji mogu koristiti i kao multiplekseri ovisno o smjeru uporabe. Najviše se koriste Mach Zehnderovi (MZ) filteri. Nekoliko MZ interferometara se međusobno koristi kako je prikazano na slici 2.17 na primjeru multipleksiranja 4 signala.



Slika 2.17 Multiplekserski uređaj s MZ interferometrom

Za ostvarivanje demultipleksera neovisnih o obilježjima izlaznog medija mogu se koristiti i Braggove rešetke. U tom pristupu $1 \times N$ sprežnik je pretvoren u demultiplekserski uređaj korištenjem rešetke za pomak faze na svakom od izlaza.

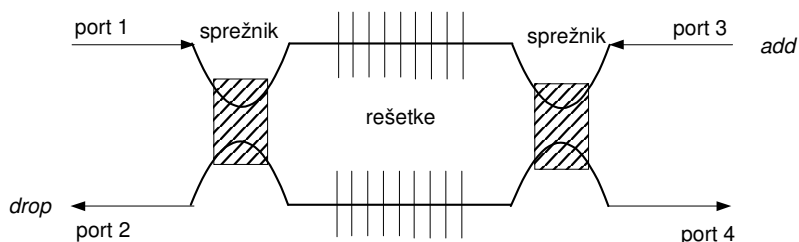
Za multipleksere je poželjno da imaju što niži iznos unesenih gubitaka, što se može postići integracijom multipleksera u optički predajnik. Kod demultipleksera je važna neosjetljivost na polarizaciju ulaznog WDM signala te odsutnost preslušavanja između demultipleksiranih signala.

Modeliranje multipleksera i demultipleksera provedeno je sa stanovišta njihove funkcionalnosti, a ne tehnološke izvedbe što je opisano u dijelu 4.1.1.

2.2.6 Add/Drop multiplekseri i filtri

Add/drop multiplekseri su potrebni za uklanjanje/dodavanje jedne valne duljine iz/u multipleksiranog signala. Takav se postupak može usporediti s demultipleksiranjem WDM signala, odgovarajućim preinakama demultipleksiranih signala, i ponovnim multipleksiranjem. Kako neki tipovi demultipleksera mogu služiti kao multiplekseri u obratnom smjeru, ovakav se uređaj može načiniti pravilnim slaganjem dva demultipleksera.

Postoji nekoliko vrsta add/drop multipleksera, od kojih su najjednostavniji oni koji se sastoje od niza sprežnika/rasprežnika tvoreći MZ lanac. Drugi je način korištenje Braggove rešetke i njezine selektivnosti s obzirom na valne duljine. Rešetka se postavlja između dva sprežnika, tvoreći dvije grane MZ interferometra (slika 2.18). Jedan kanal čija valna duljina odgovara onoj koja mora biti ispuštena pada u pojas nepropuštanja rešetke i reflektira se na port 2. Ostali kanali prolaze kroz rešetku i pojavljuju se na portu 4. Isti uređaj se može koristiti za dodavanje iste valne duljine ukoliko taj kanal ulazi na port 3.



Slika 2.18 Add/drop filter s MZ interferometrom i Braggovom rešetkom

2.2.7 Prostorni komutatori

Prostorni komutatori su sastavni dio optičkih prospojnika, no koriste se i u nizu drugih primjena u optičkim mrežama. Glavna razlika između primjena je potrebno vrijeme prospajanja kako prikazuje tablica 2.1.

Primjena	Vrijeme prospajanja
Prospajanje primarnog puta	1-10 ms
Zaštitno prospajanje	1-10 μ s
Komutacija paketa	1 ns
Vanjska modulacija	10 ps

Tablica 2.1 Primjena prospojnika i vrijeme prospajanja

Pri prospajanju primarnog valnog puta prospojnici zamjenjuju ručno prospajanje, i ovdje je relativno veliko vrijeme prospajanja posljedica velike dimenzije prospojnika. Zaštitno prospajanje zahtijeva komutatore manjih dimenzija (tipično 2x2). Pri komutaciji paketa u optičkoj domeni (tehnologija u razvoju) potrebno je brzo prospajanje kraće od duljine jednog paketa. Komutatori se mogu koristiti kao vanjski modulatori laserskih predajnika, pri čemu vrijeme prospajanja mora biti mali dio vremena trajanja jednog bita.

Uz vrijeme prospajanja za komutatorske elemente karakteristični su sljedeći parametri:

1. omjer izlazne snage *on* i *off* stanja kod *on* - *off* komutatora (*extinction ratio*). Poželjno je da ovaj omjer bude što veći, posebno za vanjsku modulaciju. Jednostavni mehanički komutatori imaju ovaj omjer u granicama 40 - 50 dB, a vanjski modulatori visoke brzine u granicama 10-15 dB,
2. uneseni gubitak (*insertion loss*) je dio snage koji se gubi zbog prisutnosti komutatora, i poželjno je da bude što manji. Neki komutatori imaju različite gubitke za različito prospajanje, što je nepoželjno obilježje,
3. preslušavanje je prijenos snage prospojenog kanala na neki drugi izlaz komutatora i definira se kao omjer snage na tom izlazu i snage svih ostalih ulaza. Kao preslušavanje komutatora obično se navodi najveći iznos ovog omjera u cijelom komutatoru,
4. gubitak ovisan o polarizaciji (PDL) mora kao i kod ostalih optičkih komponenata biti što manji. Kod vanjskih modulatora ovaj se gubitak može tolerirati s obzirom da se prospojnik nalazi odmah iza lasera, te da se polarizacija izlaza lasera može regulirati.

Postoji niz tehnoloških načina izvedbe komutatora čija su obilježja dana u tablici 2.2.

Tip	Veličina	Gubici (dB)	Preslušavanje (dB)	PDL (dB)	Vrijeme prospajanja
mehanički	8×8	3	55	0.3	10 ms
termo - optički					
silicij	8×8	10	15	niski	2 ms
polimer	8×8	10	30	niski	2 ms
elektro - optički					
LiNbO3	4×4	8	35	1	10 ps
SOA	4×4	0	40	niski	1 ns

Tablica 2.2 Usporedba obilježja prospojnika izvedenih različitim tehnologijama

Kod mehaničkih komutatora funkcija prospajanja obavlja se na mehanički način. Primjer je korištenje zrcala s promjenjivim položajima. Ovakvi komutatori imaju niske unesene gubitke, PDL i preslušavanje, te nisku cijenu, no njihova je brzina prospajanja reda ms. Zbog toga su pogodni jedino za prospajanje primarnog valnog puta. Ova tehnologija je u usporedbi s ostalim tehnologijama dovoljno sazrela, no ipak treba uzeti u obzir dugoročnu pouzdanost mehaničkih komponenata. Veliki komutatori se mogu izrađivati kaskadiranjem manjih ili izravno.

2×2 elektro - optički komutator koristi sprežnik čiji se omjer mijenja promjenom indeksa loma u području sprežanja. Najčešće se koristi litijev niobat. Ovakvi komutatori mogu mijenjati stanje vrlo brzo (manje od 1 ns), a vrijeme promjene ograničeno je kapacitivnošću konfiguracije elektroda. Zbog ovog obilježja ovi su komutatori pogodni kao vanjski modulatori. Korištenje litijevog niobata omogućuje integraciju umjerene razine u usporedbi s mehaničkim komutatorima. Nedostatak su im visoki gubici i PDL, te visoka cijena.

Termo - optički komutatori su najčešće 2×2 integrirani Mach - Zehnderovi interferometri izrađeni u materijalu čiji je indeks loma proporcionalan temperaturi. Promjena indeksa loma jedne grane interferometra dovodi do promjene fazne razlike, što uzrokuje prospajanje signala. Ovi uređaji mogu biti napravljeni na silicijevom ili polimer supstratima. Nedostatak je visok iznos preslušavanja i mala brzina.

Poluvodička pojačala se mogu koristiti kao *on - off* komutatori promjenom pobudne struje. Njezinim smanjenjem ispod neke granice ne dolazi do populacijske inverzije i pojačalo apsorbira ulazni signal. Zbog ovog obilježja poluvodički optički komutatori imaju visoki omjer izlazne snage u *on* i *off* stanju. Brzina prospajanja je reda veličine ns, a komutatori većih dimenzija se mogu izraditi povezivanjem pojačala sprežnicima. Ovakvi komutatori su skupi i osjetljivi na polarizaciju.

Strukturiranje optičkih prospojnika pomoću prostornih komutatorskih elemenata dana je u dijelu 4.1.1, a analiza šuma preslušavanja u dijelu 6.2.2.

2.2.8 Pretvorba valnih duljina

Pretvorba valnih duljina u WDM sustavima može se podijeliti u dvije skupine s obzirom na ulaznu valnu duljinu:

1. pretvorba optičkog signala bilo koje valne duljine na WDM definiranu valnu duljinu, i
2. pretvorba optičkog signala s neke definirane WDM valne duljine na neku drugu WDM definiranu valnu duljinu.

Uređaji koji rade prvi tip pretvorbe nazivaju se transponderima i pretpostavljaju opto - električnu pretvorbu, dok se drugi uređaji nazivaju pretvaračima valnih duljina i pretvorbu mogu vršiti u optičkoj domeni. Jasno je da svaki transponder ujedno može biti i pretvarač valnih duljina. U nastavku će se koristiti naziv pretvarač valnih duljina u općenitom smislu ukoliko ovakva razlika nije bitna.

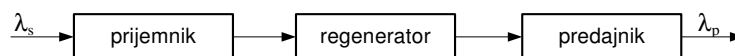
Pretvorba valnih duljina je u WDM mrežama potrebna iz tri osnovna razloga:

1. ulazni signal u WDM mrežu (signal iz optičkog predajnika) može biti u nekom drugom optičkom prozoru, ili se ne mora podudarati s predefiniranom WDM valnom duljinom,
2. povećanja iskorištenja postojećih valnih duljina,
3. povezivanja različitih mreža u kojima transportni entiteti (prvenstveno valni putovi) nisu međusobno kompatibilni u pogledu valnih duljina.

Pretvarači valnih duljina mogu imati ulaze sa stalnom ili promjenjivom valnom duljinom, i izlaze sa stalnom ili ugodivom valnom duljinom. Mehanizmi koji se koriste za pretvorbu mogu se podijeliti na

1. optoelektroničke,
2. optička vrata, te
3. miješanje četiri vala.

Optoelektronički optički pretvarači (transponderi) danas predstavljaju najjednostavniji način pretvorbe valnih duljina. Kako je vidljivo sa slike 2.19 ulazni se signal prvo pretvara u električnu domenu, regenerira i šalje u izlazni krug korištenjem laserskog predajnika na drugoj valnoj duljini. Uglavnom se radi o ulazu promjenjive valne duljine (najčešće ne - WDM valna duljina, široko područje 1310-1550 nm), i izlazu stalne valne duljine (najčešće WDM valna duljina). Ovisno o tipu regeneracije ovakav pretvarač može biti transparentan s obzirom na modulacijske postupke (samo pojačanje signala, 1R), transparentan s obzirom na digitalne signale (pojačanje + oblikovanje, 2R), ili potpuno ovisan o tipu signala (pojačanje + oblikovanje + uvođenje vremenskih odnosa, 3R).



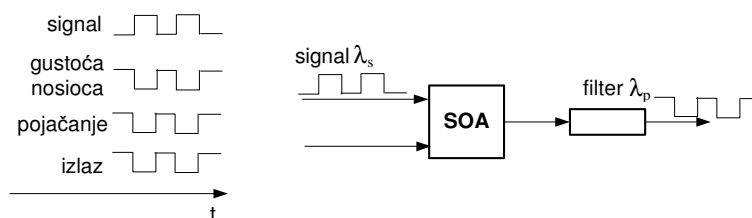
Slika 2.19 Opto - električna pretvorba valnih duljina

Optička vrata (*optical gating*) koriste optičke uređaje čija se obilježja mijenjaju s intenzitetom ulaznog signala. Ta se promjena može iskoristiti za oblikovanje nemoduliranog signala na drugoj valnoj duljini koji prolazi kroz isti uređaj. Transparentnost ovih uređaja je ograničena jer se mogu pretvarati samo signali modulirani na principu intenziteta (amplitude). Postoje dvije uporabe ovog principa:

1. CGM (*Cross Gain Modulation*), i
2. CPM, XPM (*Cross Phase Modulation*).

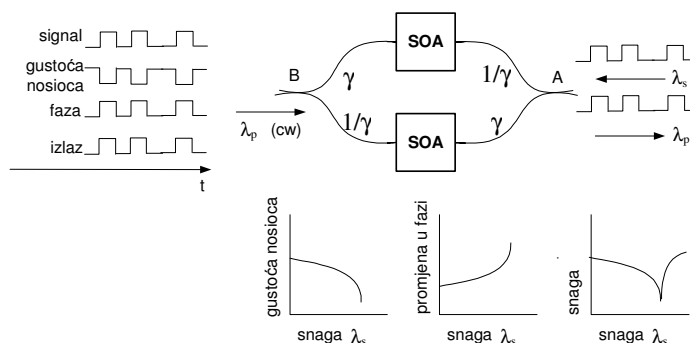
Oba pristupa koriste nelinearne efekte u poluvodičkim optičkim pojačalima (SOA), te kao ulaz mogu primati signale u širokom području valnih duljina koje odgovaraju njegovom pojasu pojačanja (oko 100 nm).

CGM pristup koristi ovisnost pojačanja optičkog pojačala o ulaznom intenzitetu kako pokazuje slika 2.20. Povećanje ulazne snage dovodi do smanjenja pojačanja, što u kombinaciji s brзом reakcijom nosioca u pojačalu u odnosu na promjenu ulaznog signala daje mogućnost reakcije na osnovi bita ulaznog signala. Malo pojačanje će biti na mjestima bita 1 ulaznog signala, a veliko na mjestima 0. Nedostaci su potrebna visoka ulazna snaga signala (oko 0 dBm), te niska razina izlaznog signala na mjestima pojave 1 na ulazu.



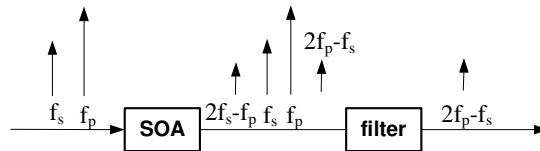
Slika 2.20 Pretvorba valnih duljina korištenjem CGM

CPM se temelji na promjeni indeksa loma s promjenom gustoće nosioca u pojačalu, odnosno s promjenom intenziteta ulaznog signala, što uzrokuje promjenu u fazi izlaznog signala. Fazna se modulacija može pretvoriti u amplitudnu korištenjem Mach-Zehnderovog interferometra (MZI). Na slici 2.21 prikazana je mogućnost ostvarenja pretvorbe na ovom principu. Oba kraka MZI sadrže poluvodičko pojačalo, ali imaju različiti omjer sprezanja signala ($\gamma \neq 0.5$). Zbog toga će se u prisustvu ulaznog signala na ulazu B dobiti amplitudno modulirani signal na izlazu A. Prednost je ovog pristupa manja ulazna snaga signala potrebna za faznu modulaciju.



Slika 2.21 Pretvorba valnih duljina korištenjem CPM

Miješanje četiri vala je način pretvorbe valne duljine u optičkoj domeni, a posljedica je nelinearnih efekata u prijenosnom mediju. Na slici 2.22 prikazan je princip rada ovakvog pretvarača s ulaznim signalima frekvencije f_s i f_p . Na izlazu se javljaju signali frekvencija $2f_s - f_p$ i $2f_p - f_s$ koji se pojačavaju korištenjem poluvodičkog pojačala (te frekvencije se moraju nalaziti unutar pojasa pojačala). Filterom se odabire jedna izlazna frekvencija. Prednost ovog pristupa je potpuna transparentnost s obzirom na modulaciju i prijenosnu brzinu, a nedostatak je potreba optičkog filtra na izlazu.



Slika 2.22 Pretvorba valnih duljina korištenjem miješanja valova

Implementacija pretvarača valnih duljina opisana je u dijelu 4.1.1.

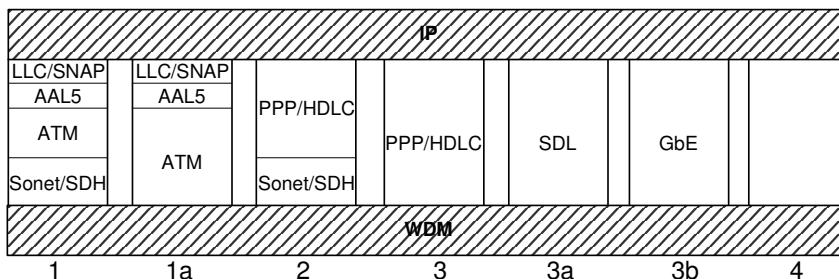
2.3 Problem korisničkog stoga

Problem korisničkog stoga se svodi na efikasno korištenje protokolnog složaja bez preklapanja funkcionalnosti protokola. Današnja višeslojna mreža bila je prvobitno zamišljena za prijenos telefonskog prometa preko linkova čiji je kapacitet bio skup, te je stoga neprimjerena za podatke. Slojevi su uglavnom neovisni jedan o drugom što dovodi do preklapanja funkcionalnosti i povećanja zaglavlja udvostručenim podacima. Primjer je zaštita od pogrešaka koja se može primijeniti više puta nad istim podacima, ili TCP kontrola toka s kraja na kraj koja može utjecati na ATM kontrolu toka. Neki od nedostataka IP i WDM sloja nestaju razvojem tehnologije (npr. pojavom usmjerenja koji mogu podržati ulazni promet od 10 Gbit/s Sonet/SDH agregacija prometa postaje nepotrebna).

Postoji nekoliko prijedloga protokolnih složajeva za prijenos IP datagrama WDM mrežom:

1. IP preko AAL/ATM preko Sonet/SDH preko WDM (slika 2.23.1),
2. IP preko AAL/ATM preko WDM (slika 2.23.1a),
3. IP preko PPP/HDLC preko Sonet/SDH preko WDM (slika 2.23.2),
4. IP preko PPP/HDLC preko WDM (slika 2.23.3),
5. IP preko SDL preko WDM (slika 2.23.3a),
6. IP preko GbE preko WDM (slika 2.23.3b), i
7. IP izravno preko WDM (slika 2.23.4).

Mogući protokolni složajevi prikazani su na slici 2.23.

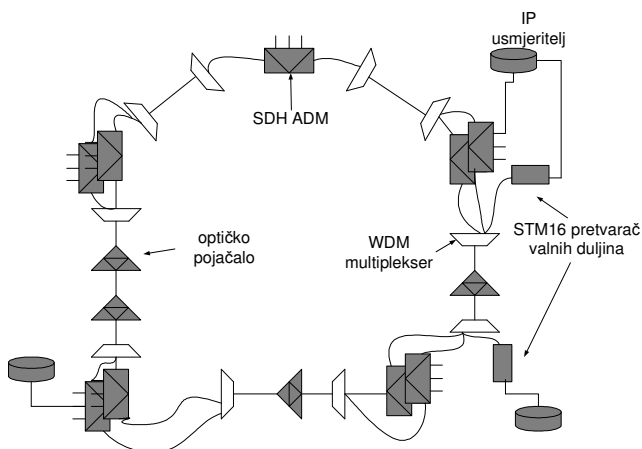


Slika 2.23 Protokolni složajevi za prijenos IP datagrama preko WDM

U sljedećim je dijelovima opisan mehanizam prijenosa IP datagrama korištenjem Sonet/SDH protokola (slučaj 2), te prijenos korištenjem Gigabit Ethernet uokvirivanja (slučaj 3b) koji su korišteni u ovom radu. Usporedba se vrši na temelju efikasnosti iskorištenja prijenosnog pojasa i pogodnosti za prijenos u WDM mreži.

2.3.1 IP preko (Sonet/SDH, *Packet over Sonet (POS)*)

Na slici 2.24 prikazan je prijenos IP korištenjem SDH okvira i WDM mreže.



Slika 2.24 Primjer IP preko SDH preko WDM mreže

Moguće je korištenje SDH formata za uokvirivanje IP datagrama za prijenos WDM mrežom (uz korištenje valnih pretvarača), ili prijenos SDH uokvirenih datagrama SDH mrežom korištenjem WDM linkova. U ovom radu je implementiran prvi način prijenosa, tj. SDH promet se optičkim linkom (prijenos u temeljnom području) dovodi izravno do WDM multipleksera.

SDH se može koristiti za zaštitu IP prometa od kvarova u opremi korištenjem automatskog zaštitnog komutiranja (APS – *Automatic Protection Switching*).

Linjska kartica u IP usmjeritelju obavlja PPP/HDLC (*Point - To - Point Protocol/High Level Data - Link Control*) uokvirivanje, nakon čega je optički signal spreman za prijenos optičkim vlaknom izravno na SDH mrežni element, na susjedni IP usmjeritelj ili na pretvarač valnih duljina pa na WDM prijenos. Postoje dva osnovna tipa *IP over SDH* sučelja:

- VC4 ili ulančeni VC4 (*Concatenated VC4 “fat pipes”*) koje pružaju agregirani način prijenosa bez razlika s obzirom na različite IP usluge koje mogu postojati unutar toka datagrama, i
- kanalirana sučelja (*channelised interfaces*), gdje STM16 optički izlaz može sadržavati 16 neovisnih VC4, s mogućnošću razdvajanja usluge za svaki VC4. Različiti VC4 mogu zatim u SDH mreži biti usmjereni prema različitim odredišnim usmjeriteljima.

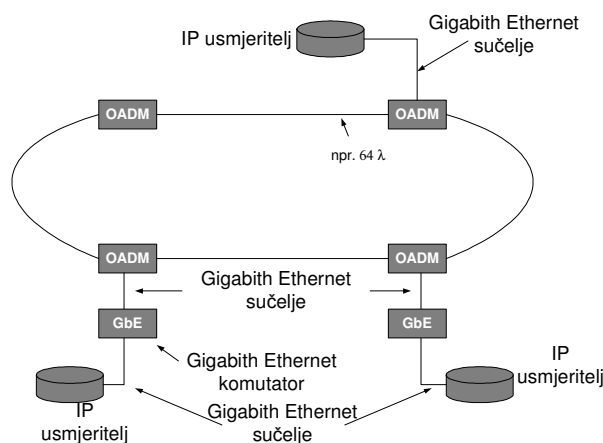
U ovom slučaju je razmotren prijenos korištenjem PPP enkapsulacije i HDLC uokvirivanja, što se naziva i *Packet Over Sonet (POS)* prijenosom. PPP je uobičajeni način enkapsuliranja IP datagrama za prijenos fizičkim medijem. HDLC uokvirivanje se sadrži razgraničavajuće nizove zastavica na početku i kraju okvira, te CRC (*Cyclic Redundancy Check*) zaštitnu sumu za kontrolu grešaka.

2.3.2 IP preko Gigabit Ethernet za WDM

Gigabit Ethernet (GbE) standard je proširio dominantno korišteni Ethernet prijenos s lokalnih mreža na metropolitanske i jezgrene mreže korištenjem GbE linijskih kartica u usmjeriteljima, koje su i do 5 puta jeftinije od SDH ekvivalenata. Ovakav pristup postaje još popularniji pojavom 10 Gigabit Ethernet sučelja.

Na slici 2.25 prikazan je primjer IP mreže temeljen na Gigabit Ethernet linijskim karticama koje se mogu koristiti u IP usmjeriteljima, ili brzim *layer 2* Ethernet komutatorima koji umrežavaju nekoliko IP usmjeritelja.

Half-duplex način prijenosa i CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect*) pristup koji se koristi u Ethernet LAN-ovima, ograničava fizički raspon mreže, jer vrijeme prijenosa s kraja na kraj ne smije prijeći vrijeme jednog vremenskog odsječka (*slot - time*). GbE standard koristi *half-duplex* i *full-duplex* način prijenosa te se svodi na način enkapsulacije i uokvirivanja IP datagrama, jer se ne koristi CSMA/CD enkapsulacija.



Slika 2.25 Primjer prijenosa IP datagrama WDM prstenom korištenjem GbE uokvirivanja

Ovaj način prijenosa pruža podršku definiranju klasa usluge (CoS, IEEE 802.1Q i 802.1p.) i to obilježavanjem datagrama oznakom prioriteta ili klase usluge koja se za njega očekuje. Može se koristiti RSVP i DiffServ podrška njezinim prilagođavanjem na 802.1p klase usluga.

2.3.3 IP izravno preko WDM

Ovo rješenje je najjednostavnije i ne zahtjeva nikakvo uokvirivanje na sloju podatkovne veze. Najsličnije je POS rješenju, ali ne zahtijeva prilagodbu Sonet/SDH prometa na WDM valnu duljinu. U ovom slučaju se IP datagrami izravno šalju u optičku domenu na optičko vlakno korištenjem jedne valne duljine. Nedostatak je potreba za ugodivim laserskim predajnicima umjesto fiksnim kako je to bilo kod Sonet/SDH kartica.

2.3.4 Poželjna obilježja enkapsulacije IP prometa preko WDM - a

Optički signal u WDM mreži podložan je nizu utjecaja koji mogu uzrokovati greške u prijenosu ili gubitak usluge, a uključuju

- aditivni šum,
- disperziju,
- nelinearne efekte u vlaknu
- akumulaciju *jittera* (npr. u valnim pretvaračima),
- pogrešno prospajanje

- tranzijente i varijacije u optičkoj snazi, te
- rezanje vlakna i kvarove opreme.

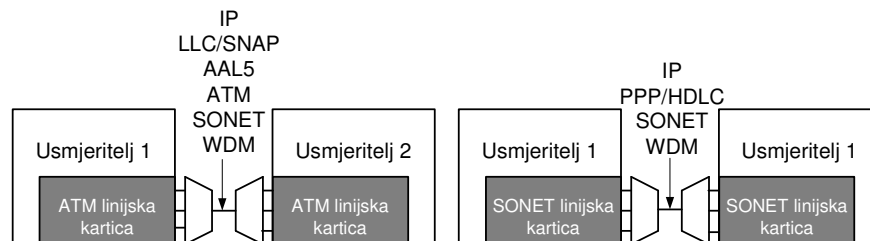
Da bi se navedeni utjecaji izbjegli ili ispravili poželjne su sljedeća obilježja enkapsulacijskih protokola:

- kontrola puta za osiguranje da je primljena ispravna valna duljina,
- ispravljanje pogrešaka u odlasku (npr. FEC - *Forward Error Correction*),
- robusna sinkronizacija,
- dozvola protokola za komutiranje u slučaju pogreške,
- mogućnosti nadziranja grešaka,
- prijenos podataka za upravljanje,
- malo zaglavlje.

SDH okvir pruža većinu ovih mogućnosti, bilo da se koristi ATM ili PPP prilagodba. GbE preko WDM pruža samo dio mogućnosti što ga ograničava na manje optičke mreže.

2.3.5 Usporedba protokolnih složajeva

Protokolni složajevi 1 i 2 (slika 2.23) će se koristiti ako su u usmjeriteljima ATM linijske kartice (koje obično koriste Sonet/SDH kao niži sloj) ili Sonet/SDH kartice (POS rješenje) kao prikazuje slika 2.26. Ako kartice ne implementiraju ATM ili Sonet/SDH mogu se koristiti rješenja 3 ili 4. U rješenju 3 uporaba PPP/HDLC osigurava kontinuirani tijek okvira, što znači da prijemnik ne treba imati mogućnost primanja usnopljenog prometa (*burst-mode capability*). Na predajnoj strani izvori moraju moći slati kontinuirani tijekom okvira. U slučaju 4 na predajnoj strani se može koristiti jedan ili više ugodivih laserskih izvora, dok je jedan ili više prijemnika s mogućnošću primanja usnopljenog prometa potrebno na određenoj strani.



Slika 2.26 ATM ili Sonet zasnovani sustavi na WDM linkovima od točke do točke

Usporedbom ove 4 osnovne mogućnosti vidljivo je da su slučajevi 3 i 4 efikasniji što se tiče prijenosnog pojasa od slučajeva 1 i 2, jer izbjegavaju dodatno zaglavlje i probleme vezanosti uz zrnatost prometa (polupopunjeni okviri ili podjela datagrama na manje dijelove). ATM tako zaglavlja utječe na povećanje prometa od 20% pri prijenosu IP prometa (uzimajući u obzir da TCP segment potvrde ne stane u jednu ATM ćeliju). U slučaju 2. izbjegava se ATM zaglavlje, ali se pojavljuje problem zrnatosti prometa, koja se pojavljuje i u slučaju 1. ako se Sonet/SDH koristi ispod ATM-a. Ukoliko je zaštitno komutiranje osigurano u WDM sloju, a kvaliteta usluge samim IP-em rješenja 1 i 2 nemaju prednosti nad rješenjima 3 i 4. Razlika između rješenja 3 i 4 je u cijeni prijemnika s mogućnošću primanja kontinuiranog prometa i usnopljenog prometa.

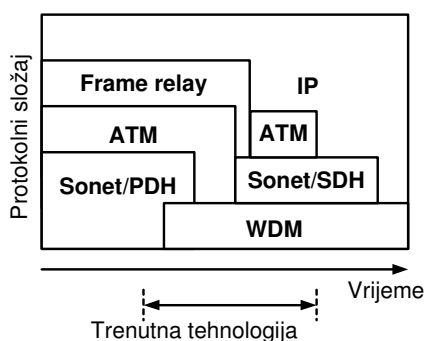
Ukoliko su veze između usmjeritelja izravni fizički linkovi, problem usmjeravanja se svodi na IP sloj jer nema WDM elemenata.

Općenito se može zaključiti da će kombinacija IP izravno nad WDM biti uspješna ako IP uspije podržati zahtijevanu kvalitetu usluge, te ako WDM ponudi robusnost (zaštita i

obnavljanje) kao što ih nudi Sonet/SDH. Neki aspekti problema kvalitete usluge mogu biti riješeni IETF standardom za uvođenje koncepta konekcijski orijentirane usluge u IP korištenjem MPLS-a (*Multiprotocol Label Switching*). Korištenjem MPLS-a definira se logički put (slijed adresa čvorova koje sadrži) kojeg koriste svi IP paketi u toj sesiji (svi paketi imaju istu oznaku - labelu koju dobivaju ulaskom u MPLS mrežu). U svakom čvoru svaki se paket usmjerava prema trenutnoj oznaci, te mu se pridjeljuje oznaka za usmjeravanje na sljedećem čvoru. Zbog toga je bolje koristiti pojam komutacije oznaka (*label switching*).

Na WDM sloju se koncept MPLS-a proširuje na MPLS da bi uključio komutaciju oznaka u valno usmjeravane putove. Pri tome svaka valna duljina služi kao posebna oznaka.

Za očekivati je da će se u konačnici IP promet prenositi WDM mrežom bez međuprotokola, no u sadašnjem trenutku zbog nedostatka funkcionalnosti na IP i WDM sloju takvi su protokoli još uvijek potrebni. Najčešće se koristi kombinacija ATM-a i starog PDH ili novijeg Sonet/SDH protokola drugog sloja (slika 2.27).



Slika 2.27 Evolucija IP protokolnog složaja

2.4 Problem usmjeravanja

Problem usmjeravanja biti će razmotren preko problema prilagodbe MPLS-a na kontrolu optičkih prospojnika (OXC - *Optical CrossConnect*) što vodi k integraciji upravljačkih ravnina IP i WDM sloja (*peer-to-peer* model opisan u kasnijim dijelovima).

Pri adaptaciji MPLS-a na OXC potrebno je razmotriti problem usmjeravanja. Optička mreža mora posjedovati inteligenciju da bi omogućila usmjeravanje i dodjelu valnih duljina (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*), otkrivanje kvarova i preusmjeravanje prometa u slučaju kvara, te prospajanje optičkih putova u realnom vremenu. Takva se mreža naziva automatski prospajana optička mreža. Usmjeravanje u optičkoj domeni temelji se na MPLS-u kojim se označava put koji zadovoljava nametnuta ograničenja. To se postiže korištenjem RWA algoritama nad bazom koja sadrži podatke o raspoloživosti mrežnih elemenata i topologiji.

Dva su osnovna načina uspostave valnih putova (*lightpath*) – statički i dinamički. Treba naglasiti da se valni put ovdje koristi u općenitom smislu, te opisuje jednosmjernu komunikaciju između dva rubna čvora u optičkoj domeni, no on odgovara logičkoj strukturi valnog puta korištenog u ovom radu, o kojoj će biti riječi kasnije (dio 4.4.2). Statička uspostava je rješenje koje koristi stanje mreže u nekom određenom trenutku na koje primjenjuje optimizacijske procedure pri rješavanju RWA problema s ciljem minimizacije troškova. Dinamički pristup koristi teoriju grafova, te se može upotrijebiti na mreži koja je u radu, no općenito daje slabija rješenja u pogledu vjerojatnosti blokiranja od statičkog pristupa.

Usmjeravanje može biti centralizirano ili raspodijeljeno. Centralizirani pristup zahtjeva da se putovi računaju i implementiraju na jednom mjestu, te se njime pojednostavnjuje upravljanje i omogućuje optimalno korištenje mrežnih resursa, no problemi nastaju povećanjem mreže. U raspodijeljenom se pristupu upravljanje i usmjeravanje vrši u svakom komutatoru ili usmjeritelju, što pruža dobru skalabilnost, ali zahtjeva razmjenu podataka između čvorova, jer operacije u jednom čvoru mogu ovisiti o onima u drugim čvorovima.

U današnjim se mrežama usmjeravanje valnih putova radi puno rjeđe nego usmjeravanje putova s komutiranjem oznaka (*label - switched path routing*) koje se vrši na IP sloju, što znači da skalabilnost još uvijek nije velika prepreka pa se koristi uglavnom centralizirani pristup.

U ovom je radu upravljanje mrežom izvedeno centralizirano korištenjem statičkog pristupa, tj. putovi se proračunavaju na stacionarnoj slici mreže korištenjem optimizacijskih postupaka s ciljem minimizacije duljine puta (kašnjenja), ili minimizacije cijene dodane WDM opreme koja podržava valne putove.

Dodatna analiza problema usmjeravanja napravljena je u sljedećem dijelu na primjerima modela sveoptičke mreže s usmjeravanjem.

Valni kanali uspostavljeni s kraja na kraj mogu služiti kao IP linkovi (komutacija paketa u optičkoj domeni) ili kao kanali koji se komutiraju prema valnoj duljini (komutacija kanala u optičkoj domeni). Usmjeravanje valnih kanala može se izvesti primjenom nekog protokola usmjeravanja sličnog OSPF protokolu na IP sloju (*Open Shortest Path First*). Razlika u IP i WDM usmjeravanju je što IP usmjeravanje može biti izvedeno bez obzira na promet (logičke IP veze imaju "beskonačni" kapacitet), dok se WDM kanali moraju usmjeravati s obzirom na promet koji prenose (vlakno na kojem su iskorištene sve raspoložive valne duljine ne može primati nove valne kanale). Također treba uzeti u obzir i raspored valnih duljina (*wavelength loading*) ili koristiti pretvarače valnih duljina koji smanjuju vjerojatnost blokiranja, koji su još uvijek najskuplji dio mreže.

Problem usmjeravanja rješava se IP protokolima usmjeravanja samo ako su IP usmjeritelji izravno spojeni fizičkim (WDM) linkovima, no ako se koristi više mrežnih tehnologija (npr. optički prospojnici) tada to postaje vezano uz problem korisničkog stoga, jer se funkcionalnost proširuje na više protokola. U slučaju da su usmjeritelji povezani optičkim putovima koji prolaze s kraja na kraj kroz WDM mrežu problem usmjeravanja se unosi na WDM sloj. Kako valni putovi zapravo nose logičke IP veze, tako oni postaju dio podataka potrebnih za usmjeravanje na IP sloju, što se naziva IP/WDM problem usmjeravanja.

2.5 Problem zaštite i obnavljanja

Drugi ključni korak u prilagodbi MPLS-a na kontrolu optičkih prospojnika je sposobnost mreže da preživi kvarove (*survivability*) koja se može postići zaštitom i/ili obnavljanjem. U prvom slučaju obnavljanje mreže od kvarova je predviđeno dizajnom, dok drugi pristup zahtjeva dinamičke postupke.

Mehanizmi zaštite se općenito mogu podijeliti u dvije skupine – one koji koriste primarni i zaštitni put istovremeno za slanje istog signala, te one koji primarni put koriste za slanje signala, a zaštitni samo u slučajevima kvarova. U drugom pristupu se zaštitni put može koristiti za prijenos prometa manjeg prioriteta ako taj put nije dijeljen između više primarnih putova. Takav način se ne koristi u ovom radu.

Mehanizmi obnavljanja zaštitne putove uspostavljaju tek nakon što je nastupio kvar, što znači da je obnavljanje skuplje od zaštite (najduže dopušteno vrijeme obnavljanja je u Sonet protokolu ograničeno na 50 ms).

Za automatsku zaštitu uspostavljenih valnih putova potrebno je detektirati i lokalizirati kvarove. Detektirani kvar mora biti lokaliziran na određenoj valnoj duljini, vlaknu, linku ili čvoru prije obnove.

Postoje tri tipa arhitektura zaštite i obnavljanja s obzirom na kvarove od kojih štite:

- zaštita od prekida kabela (WDM sustavi s optičkom zaštitom),
- zaštita od kvarova na prijenosnoj opremi i prekida kabela (većina SDH arhitektura, te neki WDM sustavi sa zaštitom optičkih kanala (OCHP - *Optical Channel Protection*), te
- zaštita od kvarova usmjeritelja.

2.5.1 Mehanizmi zaštite i obnavljanja

Mogućnost preživljavanja mreže dakle znači sposobnost ispravnog rada mreže i u slučaju kvarova mrežnih elemenata. To se postiže udvostručavanjem fizičkih ili logičkih struktura, ili definiranjem mehanizama (protokola) preusmjeravanja prometa u slučaju kvara. Primjena ovih mehanizama na WDM sloju zamjenjuje takve mehanizme viših slojeva (npr. APS kod Sonet/SDH) i predstavlja korak u izbacivanju međuprotokola između IP i WDM sloja kako je raspravljeno u dijelu 2.2.

Osnovna razlika između zaštite i obnavljanja je u tome što je kod zaštite zaštitni put rezerviran prije nego što se dogodio kvar u mreži, tj. tolerancija kvarova je postignuta redundancijom, bilo u fizičkim elementima (npr. dvostruki prijemnici i predajnici), bilo u logičkim strukturama (npr. primarni i zaštitni valni put koji je rezerviran prije samog kvara na primarnom putu). Obnavljanje podrazumijeva korištenje svih raspoloživih kapaciteta između dva para čvorova da bi se održala komunikacija u slučaju kvara što implicira postojanje upravljivih elemenata u mreži i upravljačke ravnine.

Mehanizmi zaštite imaju 4 osnovna podtipa:

- *1+1 zaštita* – primarnim i zaštitnim valnim putom prenosi se isti promet, iako nije uvjet da se istovremeno koriste i primarni i zaštitni valni put. Svaki primarni valni put ima jedan zaštitni valni put,
- *1:1 zaštita* – isto kao i 1+1 zaštita, ali se zaštitni valni put može koristiti za prijenos prometa manjeg prioriteta u slučaju ispravnosti primarnog valnog puta,
- *1:N zaštita* – jedan zaštitni valni put se koristi za zaštitu N primarnih valnih putova,
- *M:N zaštita* – M zaštitnih valnih putova se koriste za zaštitu N primarnih valnih putova.

1+1 i 1:1 zaštite nazivaju se još i zaštitnim arhitekturama s pridjeljenim resursima (jednom primarnom valnom putu odgovara jedan zaštitni valni put), dok se 1:N i M:N nazivaju zaštitnim arhitekturama s dijeljenim resursima (više primarnih valnih putova odgovara jedan zaštitni valni put).

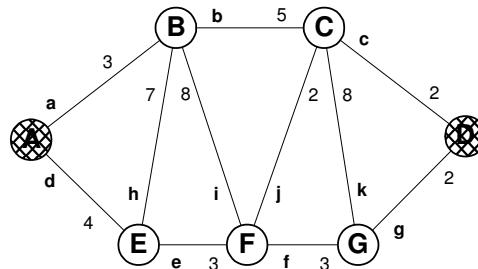
U ovom radu analizirani su sljedeći mehanizmi:

- 1+1 zaštita,
- obnavljanje puta (*path restoration*),

- obnavljanje linka (*span restoration*), te
- dinamičko obnavljanje (SPAF - *Shortest Path After Failure*).

Analiziraju se isključivo jednostruki kvarovi, tj. cilj primjene mehanizama je da raspoloživost mreže bude jednaka 1 u slučaju jednostrukih kvarova. Mreža može ostati raspoloživa i u slučaju višestrukih kvarova ukoliko se oni događaju na nezavisnim primarnim putovima čiji zaštitni putovi nisu u istoj domeni (dio 6.1.1). Pretpostavka jednostrukih kvarova je opravdana zbog male vjerojatnosti istovremene pojave višestrukih kvarova koja proizlazi iz kratkog vremena popravka elemenata (tipično 21 h).

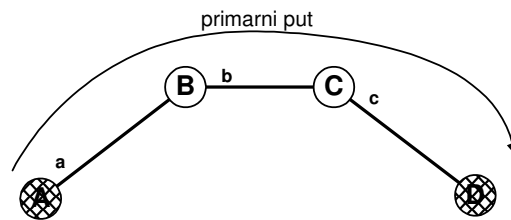
Slijedi opis protokola zaštite i obnavljanja za svaki od ova 4 slučaja. Analizira se mreža sa slike 2.28 u kojoj komuniciraju čvorovi A i D. Primarni put je odabran po kriteriju najkraćeg puta i u svim slučajevima odgovara putu koji se sastoji od grana a, b i c. Mehanizmi se razlikuju u načinu ponašanja nakon što se dogodio kvar.



Slika 2.28 Analizirana mreža za mehanizme zaštite i obnavljanja

Bez zaštite

Ovaj slučaj predstavlja WDM mrežu koja svoju mogućnost preživljavanja temelji na mehanizmima zaštite i obnavljanja viših slojeva. Ova mreža predstavlja najjeftiniji slučaj što se tiče cijene WDM čvorova i WDM linkova, jer nema redundancije opreme, niti upravljivih dijelova.



Slika 2.29 Korišteni dio mreže u slučaju bez zaštite

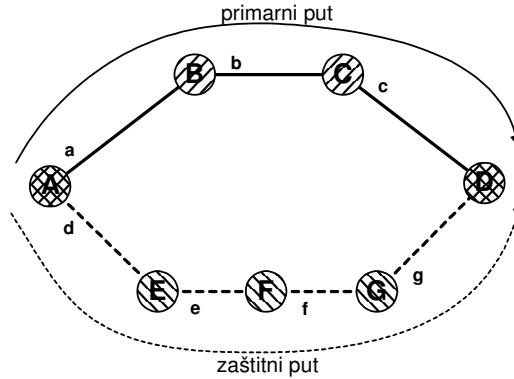
Mehanizam se u osnovi svodi na primarni put, kako prikazuje slika 2.29. U slučaju kvara bilo kojeg dijela primarnog puta ne postoji protokol na WDM sloju koji bi preusmjerio promet, jer ni ne postoji potrebna infrastruktura u WDM čvorovima.

U svim mehanizmima se pojam primarnog puta podudara s pojmom valnog puta. Ukoliko dolazi do pretvorbe valne duljine na putu takav se put naziva virtualnim valnim putom. Analiza valnog puta i njegovog položaja u logičkoj hijerarhiji dana je u dijelu 4.4.2.

1+1 zaštita

U ovom mehanizmu svakom primarnom valnom putu pridijeljen je jedan zaštitni valni put, tj. zaštita se postiže jednostavnim udvostručavanjem korištenih fizičkih resursa. U ovom slučaju je primarnom putu pridružen zaštitni put koji se sastoji od grana d, e, f i g. Zaštitni

put ima sve karakteristike primarnog, dakle nije dijeljen i rezerviran je isključivo za tu uporabu, a od primarnog se razlikuje slabijim performansama koje nudi (npr. veća duljina).



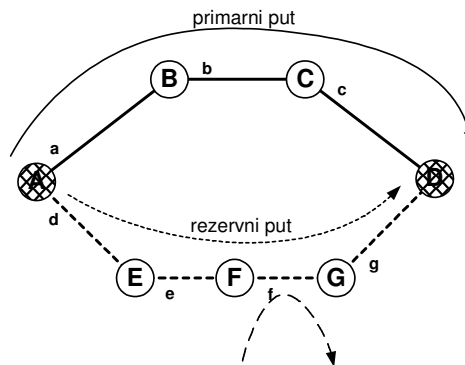
Slika 2.30 Primarni i zaštitni put u slučaju 1+1 zaštite

U ovom slučaju zaštite zaštitni se put može koristiti za prijenos prometa i u slučajevima kada je primarni put ispravan korištenjem optičkih raspreznika. Jasno je da takav prijenos predstavlja redundanciju u slučaju ispravnog rada mreže, no osigurava trenutnu zaštitu u slučaju kvara.

Obnavljanje puta (*Path*)

1+1 mehanizam zaštite uvodi veliku redundanciju i stoga nepotrebno povećava cijenu mreže. Efikasnije korištenje resursa je moguće uporabom optičkih prospojnika kojima se signal u slučaju kvara usmjerava na zaštitni put. Kod mehanizama obnavljanja se umjesto pojma zaštitni put koristi pojam rezervni put, jer on nije prospojen prije nego što se kvar dogodio. Rezervni put kao i u prethodnom slučaju postoji s kraja na kraj, no ne koristi se za prijenos prometa u slučaju ispravnog rada mreže. Zbog toga ovaj mehanizam spada u skupini mehanizama obnavljanja, a ne zaštite, jer se rezervni put aktivira tek nakon kvara.

Takav način rada implicira mogućnost dijeljenja rezervnih resursa ukoliko su primarni putovi neovisni, jer je vjerojatnost istodobnog kvara dva nezavisna primarna puta vrlo mala. U primjeru sa slike 2.31 rezervni WDM link *f* koriste dva rezervna puta. Ukoliko je korištena valna duljina na tom linku za oba rezervna puta ista govori o preklapanju domena rezervnih putova što je detaljnije analizirano u dijelu o proračunu raspoloživosti mreže (dio 6.1).

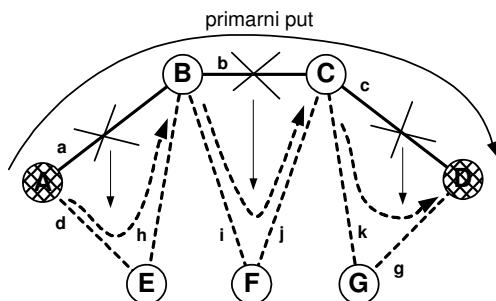


Slika 2.31 Obnavljanje puta

Proračun rezervnog puta može se izvršiti unaprijed uz pretpostavku jednostrukih kvarova, ili nakon što se kvar dogodi uporabom nekog algoritma usmjeravanja (npr. proračunom najkraćeg puta koji zamjenjuje neispravan). U principu se radi o statičkom ili dinamičkom pristupu kontroli. U prvom slučaju rezervni je put određen prije pojave kvara nekim analitičkim postupkom, a u drugom je određen nakon pojave kvara na temelju raspoloživosti putova u tom trenutku, te strukture WDM čvorova koji utječu na skup mogućnosti koje su na raspolaganju.

Obnavljanje linka (*Span*)

Obnavljanje puta je mehanizam koji se odnosi na obnavljanje cijelog valnog puta, tj. veze s kraja na kraj, pri čemu je zrnatost obnavljanja svedena na valnu duljinu. Obnavljanje linka se ne odnosi na obnavljanje s kraja na kraj, već na prospajanje cijelog multipleksiranog signala u slučaju kvara nekog WDM linka.

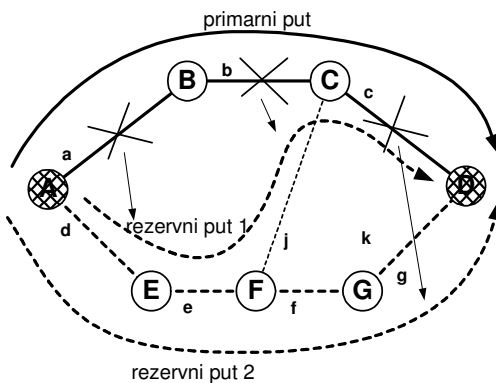


Slika 2.32 *Span* obnavljanje

Na slici 2.32 prikazano je *Span* obnavljanje u slučaju kvara svakog od linkova primarnog puta (*a*, *b*, ili *c*). Preusmjeravanje cjelokupnog WDM prometa između dva čvora vrši se najkraćim raspoloživim putem koji zaobilazi link u kvaru (u slučaju kvara linka *a* znači cijeli promet koji iz čvora *A* odlazi prema čvoru *B* će se preusmjeriti preko čvora *E*, tj. korištenjem putova *d* i *h*). Radi se dakle o obnavljanju koje promatra kvarove između dva WDM čvora.

Dinamičko obnavljanje (SPAF)

Dinamičko obnavljanje [10] predstavlja najslženiji način obnavljanja u kojem se pri svakom kvaru proračunava najkraći put koji ovisi o trenutnom stanju mreže. U ovom radu je taj proračun napravljen statički i to tako da su proračunati najkraći putovi s kraja na kraj za svaki kvar WDM linka i WDM čvora, te su zatim ti putovi prikazani u obliku grafa (dio 0, slika 4.41)



Slika 2.33 SPAF obnavljanje

Na slici 2.33 prikazano je SPAF obnavljanje. U slučaju kvara linkova a i b koristi se rezervni put 1 koji se sastoji od linkova d , e , i j , a u slučaju kvara linka c rezervni put 2 koji se sastoji od grana d , e , f i g . Proračun rezervnog puta temelji se na najkraćem putu između rubnih čvorova. Može se zaključiti da se kvar WDM čvorova može opisati pomoću kvara linka (ili više linkova). Tako bi u ovom slučaju kvar čvora B odgovarao kvaru linka a , b i h , dok bi kvar čvora C odgovarao kvaru linkova b , c i j .

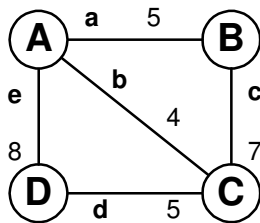
Vidljivo je da se radi o obnavljanju s kraja na kraj, jer se nastoji na optimalan način (u ovom slučaju najkraćim putem) zaobići mjesto kvara. Razlika prema *Span* obnavljanju je u tome što je ovdje znatnost obnavljanja na razini valnog puta (tj. valne duljine) a ne više cijelog WDM linka, te se pri proračunu zaštitnog puta uzima u obzir cjelokupna mreža, a ne samo najkraći put između para čvorova gdje se dogodio kvar.

2.5.2 Struktura WDM čvorova

Na strukturu WDM čvorova utječu tri ulazna parametra:

1. topologija WDM mreže,
2. prometni zahtjevi između WDM čvorova, te
3. odabrani mehanizam zaštite ili obnavljanja.

Kao ulazni podatak odabrana je mreža sa slike 2.34 uz koju su dani najkraći putovi i najkraći nezavisni putovi. Pretpostavka je da postoje prometni zahtjevi između svakog para WDM čvorova.



	najkraći put	nezavisan put
A - B	a	bc
A - C	b	ac
A - D	e	bd
B - C	c	ab
B - D	cd	ae
C - D	d	be

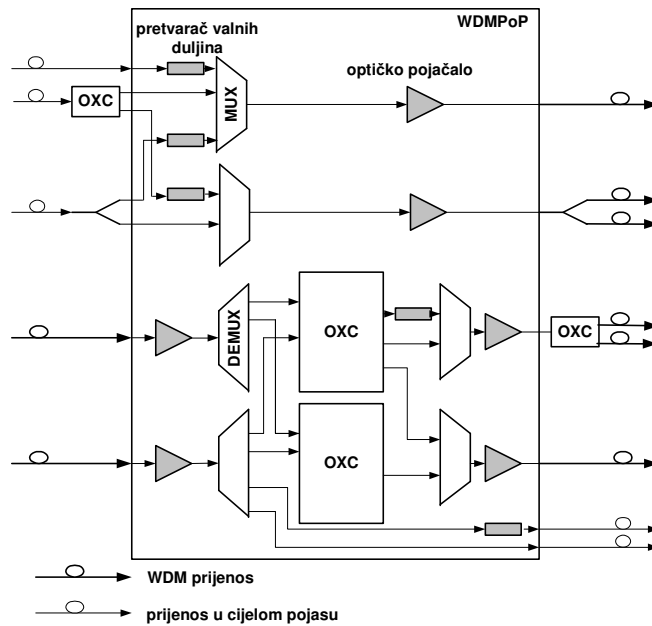
Slika 2.34 Analizirana mreža za strukturu WDM čvorova

U nastavku su dane strukture čvorova ovisno o odabranom mehanizmu zaštite ili obnavljanja.

Bez zaštite

U ovom mehanizmu zaštite ne postoji potreba za dinamičkim prospajanjem pa se ne koriste optički prospojnici što bitno pojednostavljuje dizajn. Treba ipak uzeti u obzir da ovakav slučaj ipak u budućnosti neće biti realan, jer će se izbacivanjem uporabe mređuprotokola (npr. SDH) mehanizmi zaštite i obnavljanja morati implementirati na WDM sloju.

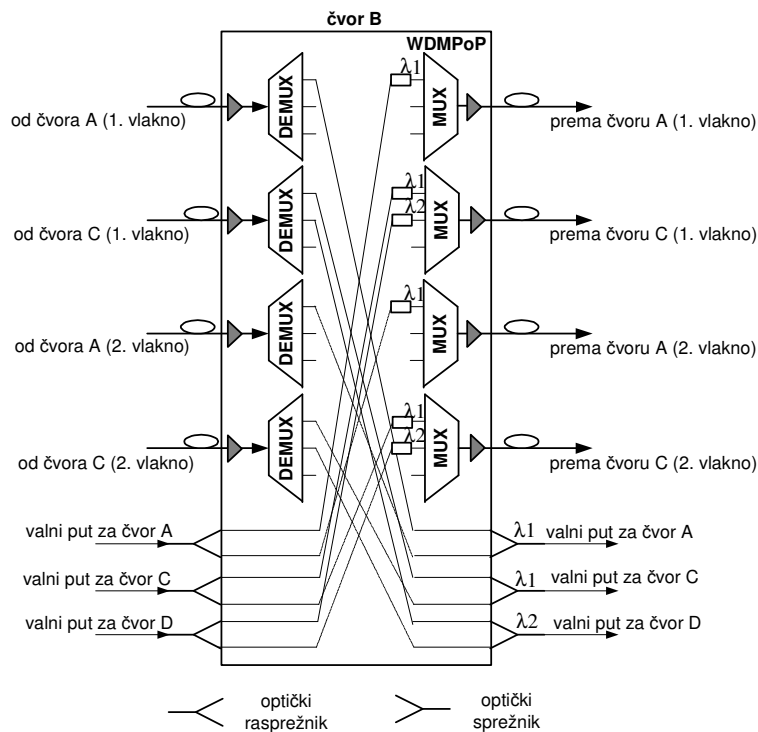
Izgled WDM čvora B iz primjera prikazan je na slici 2.35.



Slika 2.35 WDM čvor B (bez zaštite)

1+1 zaštita

1+1 zaštita temelji se na udvostručavanju komponenti koje se nalaze na dva neovisna puta. Kako je cilj analiza mehanizama zaštite i obnavljanja WDM mreže pretpostavlja se da se udvostručenje odnosi samo na WDM mrežu, a ne i na pristupnu mrežu. To znači da nema udvostručenja predajnika i prijemnika, jer bi to značilo udvostručenje broja linijskih kartica, a time i povećanje broja IP usmjeritelja. Izgled WDM čvora B iz mreže sa slike 2.34 je za ovaj slučaj prikazan na slici 2.36.



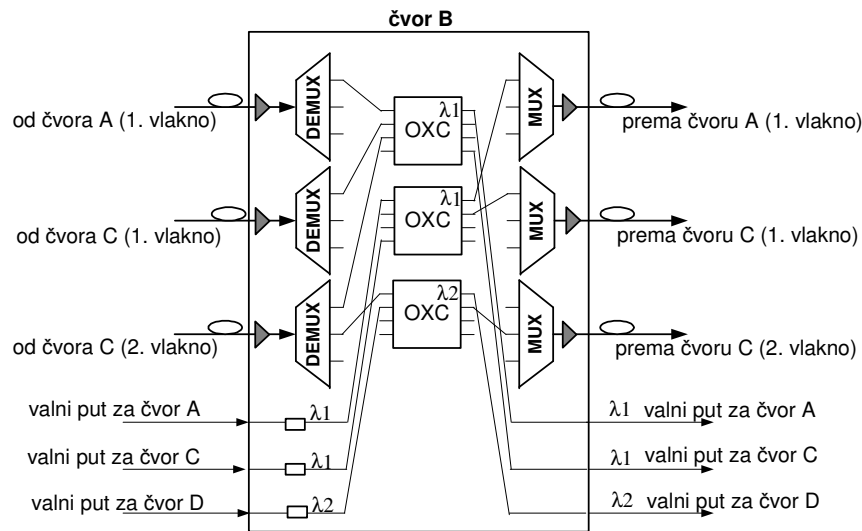
Slika 2.36 WDM čvor B (1+1 zaštita)

S obzirom da redundancija opreme ne postoji izvan WDM čvora potrebno je koristiti sprežnike i raspredžnike. Umjesto njih se mogu koristiti i optičke sklopke. Razlika je u brzini reakcije i upravljanju, jer se u prvom slučaju zaštitnim putem stalno šalje primarni signal pa nisu potrebne nikakve preinake nakon kvara u mreži.

Treba naglasiti da se radi o najjednostavnijem i vrlo neefikasnom mehanizmu zaštite jer se u normalnom režimu radu najmanje pola valnih putova (tj. svi zaštitni valni putovi ne koriste).

Obnavljanje puta (*Path*)

Opisano obnavljanje se odnosi na jedan valni put, a korištenje rezervnog puta u slučaju kvara omogućuje veliku fleksibilnost, no ona za sobom povlači cijenu prospojnika i potrebu za upravljanjem. Na slici 2.37 prikazana je struktura čvora. Koristi se slojeviti pristup dizajnu, tj. svakoj valnoj duljini je pridružen jedan ili više optičkih prospojnika standardne dimenzije (na slici 4×4, tipično 8×8). Ukoliko je dopuštena pretvorba valnih duljina na izlaz prospojnika može se dodati pretvarač valnih duljina.

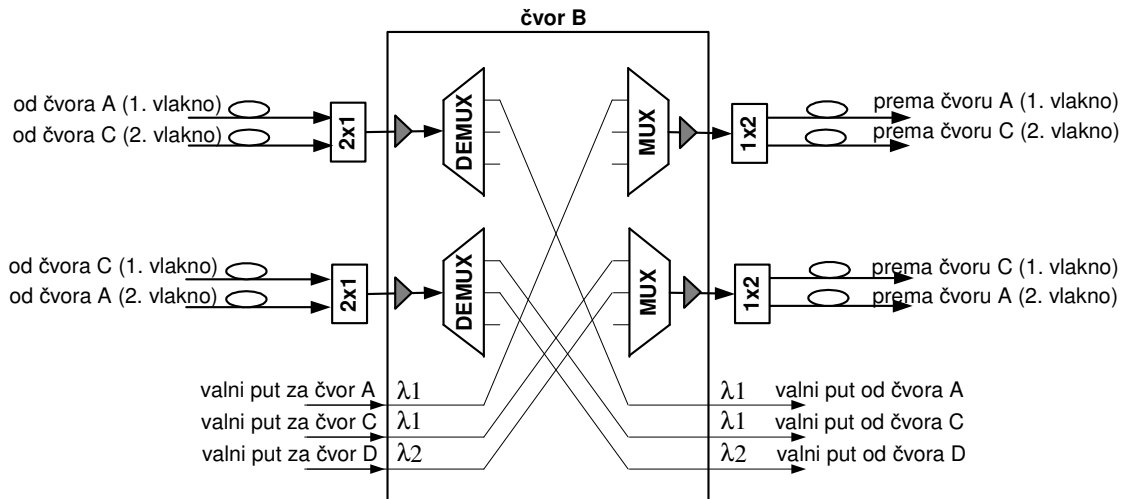


Slika 2.37 WDM čvor B (*Path* obnavljanje)

U ovom mehanizmu je dopušteno dijeljenje zaštitnih putova samo u slučaju neovisnih primarnih putova, zbog prvobitnog zahtjeva potpune raspoloživosti mreže u slučaju jednostrukih kvarova. Uz tu je pretpostavku nemoguće da u istom trenutku neovisni primarni putovi budu neraspoločivi.

Obnavljanje linka (*Span*)

Znatost ovog obnavljanja je krupnija u usporedbi sa zrnatošću *Path* obnavljanja i odnosi se na cijeli WDM signal. Posljedica je da se umjesto optičkih prospojnika koriste optičke sklopke (1×2/2×1), ali i manja fleksibilnost. Struktura čvora B prikazana je na slici 2.38.



Slika 2.38 WDM čvor B (Obnavljanje linka)

Zaštitni likovi prolaze najkraćim putem nezavisnim o linku primarnog puta koji se zaobilazi.

2.5.3 Usporedba mehanizama zaštite

U tablici 2.3 prikazani su rezultati dizajna WDM mreže u obliku ukupne duljine optičkih linkova, broja multipleksera i broja optičkih prospojnika. Rezultati se odnose na topologiju opisanu u poglavlju 5.3, uz korištenje faktora $K=2.5/1000$ u PD modelu (dio 4.2.2).

Mehanizam	Ukupna duljina optičkih linkova [km]				Broj multipleksera				Broj optičkih prospojnika/optičkih sklopki			
	4	8	16	32	4	8	16	32	4	8	16	32
NO	64570	55980	54230	54230	92	76	75	75	0	0	0	0
1+1	116970	90580	76410	75320	169	129	107	106	0	0	0	0
Path	95660	75090	73050	73050	137	110	103	103	124	157	175	175
Span	163480	120260	101780	97340	170	126	106	102	148	108	92	88
SPAF	157820	156030	156030	156030	229	226	226	226	44	67	67	67

Tablica 2.3 Ovisnost količine WDM opreme o mehanizmu zaštite (bez pretvorbe valnih duljina)

Mehanizam	Ukupna duljina optičkih linkova [km]				Broj multipleksera				Broj optičkih prospojnika/optičkih sklopki			
	4	8	16	32	4	8	16	32	4	8	16	32
NO	53280	40900	36640	34900	74	54	46	44	0	0	0	0
1+1	99030	56110	37420	34900	140	77	48	44	0	0	0	0
Path	86180	64750	57260	56390	122	90	78	77	117	150	174	175
Span	163480	120260	101780	97340	170	126	106	102	148	108	92	88
SPAF	137470	121560	116970	116970	200	177	171	171	44	84	122	124

Tablica 2.4 Ovisnost količine WDM opreme o mehanizmu zaštite (pretvorba valnih duljina)

Vidljivo je da su sve vrijednosti najmanje za mrežu bez zaštite, što upućuje i na najmanju cijenu takve mreže s obzirom na WDM opremu. Ovdje treba uzeti u obzir da je potreban međuprotokol prijenosa koji umjesto WDM sloja osigurava zaštitu. Mogu se uočiti

ovisnosti između *Path* obnavljanja i 1+1 zaštite, te *Span* i SPAF obnavljanja. Općenito je vidljiva tendencija smanjenja količine dodane opreme i smanjenja razlika između rezultata za pojedine scenarije s povećanjem broja WDM kanala. To je posljedica činjenice da 4-kanalna WDM mreža ima vrlo visoku iskoristivost komponenti, što upućuje da 4 WDM kanala ne mogu pružiti dovoljan kapacitet između dva para WDM čvorova, te je u tom slučaju potrebno dodavanje nove opreme. Kako broj kanala raste količina opreme se smanjuje jer je manji broj linkova između para čvorova dovoljan za prijenos svih prometnih zahtjeva. U ovom konkretnom slučaju 16-kanalni WDM sustav pruža optimum, jer povećanje na 32 kanala donosi malo smanjenje količine dodane opreme.

Najveće vrijednosti u količini dodane opreme imaju 1+1 zaštita *Span* i SPAF obnavljanje. U prvom slučaju to je posljedica udvostručavanja svih primarnih valnih putova na najkraći nezavisni zaštitni put. Ovakav dizajn je opravdan jedino u slučaju visoke cijene optičkih prospojnika. Visoke vrijednosti *Span* zaštite proizlaze iz samog načina proračuna rezervnog puta nekog linka koji može koristiti čvor primarnog puta, tj. može doći do vraćanja u putu. SPAF obnavljanje pretpostavlja dodavanje velike količine WDM opreme zbog osiguravanja mogućnosti prospajanja na rezervni put u slučaju kvara, što je dodatno potencirano činjenicom da se obnavljanje radi na razini valnog puta.

U usporedbi ovih rezultata svakako treba uzeti u obzir optičke prospojnike. U slučaju *Span* obnavljanja radi se o optičkim sklopkama koje su bitno jeftiniji od prospojnika većih dimenzija u SPAF i *Path* obnavljanju. Porast broja multipleksera kod SPAF i *Span* obnavljanja s porastom broja valnih duljina je posljedica slojevitog dizajna u kojem je svakom prospojniku pridružena valna duljina valnih putova koje može prospajati.

Može se zaključiti da primjena valnih pretvarača smanjuje ukupnu količinu dodane opreme zbog veće fleksibilnosti pridruživanja valnog puta fizičkom putu te veće postignute iskoristivosti WDM opreme.

2.6 Sveoptička mreža

Sveoptička mreže (*All - Optical Network - AON*) je mreža u kojoj je i prijenos i prospajanje izvedeno u optičkoj domeni, što znači da nema opto - električne pretvorbe signala između dvije rubne točke mreže. Time se kašnjenje u prijenosu značajno smanjuje i povećava se propusnost čitave mreže.

Evolucija sveoptičke mreže može se opisati u nekoliko koraka od optičkog prijenosa od točke do točke, do optičkog prijenosa s kraja na kraj. Takav razvoj znači proširenje optičke mreže prema metropolitanskim (gradskim) mrežama (MAN) i pristupnim mrežama.

Postoji četiri ključna čimbenika u razvoju sveoptičke mreže:

- sveoptičko prospajanje – transparentni sustavi prospajanja koji pretvaraju prstenaste mreže i mreže od točke do točke u dinamičke mreže,
- prijenos na velike udaljenosti – transportni sustavi koji omogućuju prijenos podataka preko cijele mreže bez potrebe za skupom regeneracijom.
- inteligentno upravljanje – optički sustav upravljanja pruža mogućnosti konfiguracije i upravljanja optičke opreme, te rekonfiguraciju mrežne topologije, te
- sveoptička zaštita i obnavljanje – mogućnost automatske zaštite valnih putova rezerviranih u optičkoj mreži.

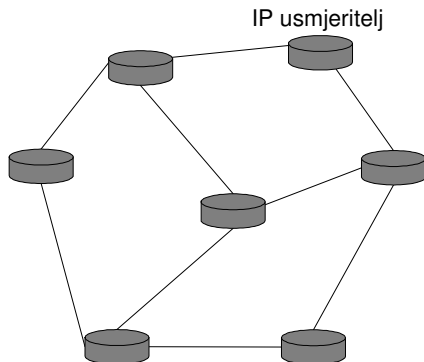
2.6.1 Mrežne arhitekture prijenosa IP datagrama preko WDM

Razvoj IP/WDM tehnologije i mrežne arhitekture može se klasificirati u tri generacije:

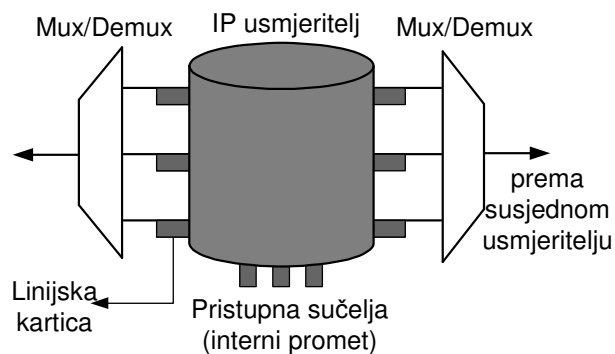
- *prva generacija* – (D)WDM sustavi se koriste za ostvarivanje linkova velikog kapaciteta od točke do točke između IP usmjeritelja, pri čemu se obično koristi Sonet/SDH (POS) za uokvirivanje i prijenos podataka WDM kanalom (slika 2.24),
- *druga generacija* – WDM kanali se usmjeravaju u WDM mrežu korištenjem WDM prospojnika što omogućuje efikasnije korištenje WDM prijenosnog pojasa i sučelja na IP usmjeriteljima. S obzirom na mogućnost rekonfiguracije, zaštitno prospajanje i obnavljanje se mogu izvesti izravno na optičkom sloju što uklanja potrebu za Sonet/SDH uokvirivanjem,
- *treća generacija* – IP datagrami se izravno prenose i komutiraju u WDM komutatorima paketa, što omogućuje puno finiju zrnatost pri multipleksiranju prometa u valne kanale. Uvjet za ovu generaciju čini proučavanje optičke komutacije paketa (OPS - *Optical Packet Switching*), te razvoj optičkih komponenti kao što su optički prospojnici i optičke memorije. Ova generacija je još u dalekoj budućnosti i u ovom radu neće biti detaljnije razmatrana.

IP preko WDM mreže od točke do točke

U prvoj generaciji sveoptičkih mreža, IP usmjeritelji su izravno međusobno spojeni preko optičkih vlakana koji nose više valnih duljina. Na slici 2.39 susjedni je usmjeritelj fiksno za određenu linijsku karticu. Isti primjer izravne povezanosti usmjeritelja je detaljnije prikazan na slici 2.41.



Slika 2.39 Arhitektura IP preko WDM mreže od točke do točke



Slika 2.40 Povezivanje usmjeritelja u WDM mreži od točke do točke

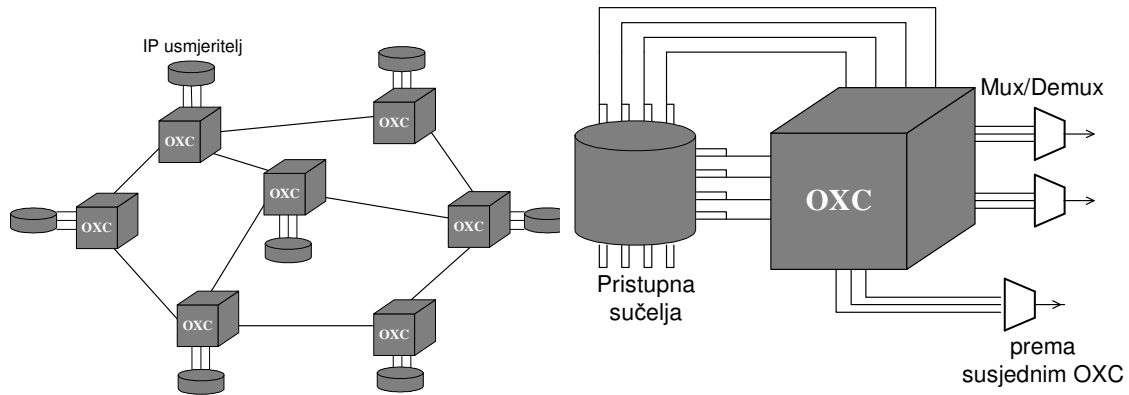
U ovoj je generaciji mrežna topologija fiksna, a mrežne konfiguracije su sve statične. Sustav upravljanja ovakve mreže je uglavnom centraliziran s minimalnom interakcijom između IP i WDM sloja.

Ovakav slučaj odgovarao bi npr. slučaju bez zaštite ili 1+1 mehanizmu zaštite u kojem se sve IP veze mogu ostvariti preko izravnih fizičkih WDM veza, ili pak preko nekoliko WDM čvorova (WDMPOP čvorovi, dio 4.1.1) što u funkcionalnom pogledu ne mijenja puno s obzirom da se radi o fiksnom prospajanju valnih putova, tj. WDM čvorovi nemaju mogućnost dinamičkog prospajanja (optički prospojnici).

IP preko WDM mreže s prospajanjem

U ovoj su generaciji optička sučelja u IP usmjeriteljima spojena na optičke prospojnike (u ovom radu je to kasnije analizirano, a svodi se na dodavanje funkcije prospajanja, tj. optičkih prospojnika WDM čvorovima). Na slici 2.42 dan je primjer takve mreže s prospajanjem u kojoj WDM prospojnik može prospojiti svaki ulazni port na svaki izlazni (ali ne nužno i svaku ulaznu valnu duljinu na svaku izlaznu). Slika 2.43 prikazuje

povezanost IP usmjeritelja s optičkim prospojnikom. Prospojnici su međusobno povezani u mrežu preko WDM linkova (korištenjem WDM multipleksera i demultipleksa). Pravilnom konfiguracijom prospojnika bilo koje optičko sučelje jednog usmjeritelja može biti povezano s bilo kojim optičkim sučeljem drugog usmjeritelja, tj. bilo koji usmjeritelj može biti susjedan odabranom.



Slika 2.41 Arhitektura IP preko WDM mreže s prospajanjem

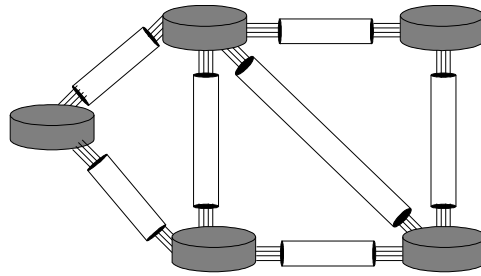
Slika 2.42 Veze između usmjeritelja u WDM mreži s prospajanjem

Za veću integraciju protokola viših slojeva (primarno IP-a) potrebno je rukovanje upravljačkim signalima neovisno od podatkovnog prometa, tj. moraju se uspostaviti neovisne upravljačka i podatkovna ravnina. Razvoj MPLS-a otvorio je nove mogućnosti za razvoj arhitekture za optičku kontrolnu ravninu temeljenu na IP-u. Takva bi uniformna kontrolna ravnina pružila značajne mogućnosti u upravljanju prometom potrebne za mreže s više usluga. Pri prilagođavanju MPLS-a na kontrolu optičkih prospojnika potrebno je razmotriti četiri problema – adresiranje, signalizacija, usmjeravanje i mogućnost preživljavanja kvarova. Usmjeravanje i mogućnost preživljavanja kvarova su razmotreni u dijelovima 2.4 i 2.5.

S obzirom na različite signalne mehanizme mogu se definirati četiri mrežna modela [18] – *big fat router*, *client-server*, *augmented* i *peer-to-peer*.

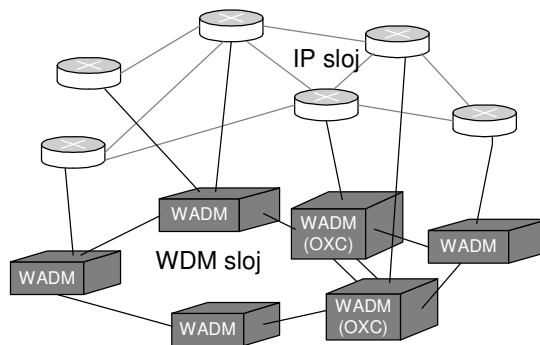
Slijedi kratak opis četiri navedena modela:

- *big-fat router model* – ova arhitektura svu funkcionalnost prepušta IP sloju čime se izbjegava preklapanje funkcionalnosti između inteligentnog optičkog sloja i IP sloja (kao kod *client-server* modela opisanog kasnije). WDM mreža samo pruža niz paralelnih optičkih kanala između izravno spojenih usmjeritelja, odnosno podudara se s mrežama prve generacije bez prospajanja (slike 2.40, 2.43). Posljedica je jednostavan optički sloj koji pruža samo usluge prijenosa. Nedostatak je udvostručavanje kapaciteta (elektroničke i optičke komponente) i povećanje broja usmjeritelja kroz koje mora proći promet (*hop count*) s obzirom da ne postoje putovi s kraja na kraj. Ovo može biti ograničavajući faktor s obzirom da kapacitet optičkih komponenti raste puno brže nego elektroničkih,

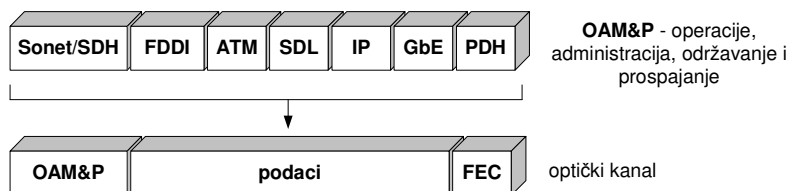


Slika 2.43 Big - fat router model

- *client-server (overlay) model* – temeljna zadaća ovog modela je definiranje sučelja između protokola WDM sloja i protokola viših slojeva, a s ciljem pružanja usluge komutacije kanala protokolima viših slojeva (kao npr. IP-u) kako prikazuje slika 2.44. WDM mreža se tretira kao odvojeni inteligentni mrežni sloj. Kontrolne ravnine u optičkim (poslužiteljskim) i klijentskim domenama djeluju odvojeno bez izmjene podataka o usmjeravanju. Optička mreža je crna kutija sa sučeljima kroz koja protokoli viših slojeva (klijentski protokoli) zahtijevaju valne kanale (komutacija kanala). Postoje dva osnovna načina implementacije ovog modela – *optical internetworking* i *optical data networking*. Optical internetworking je mrežna infrastruktura optimizirana za prijenos podataka, u kojoj su prospojnici i usmjeritelji integrirani u jednu jedinicu, a optička sučelja izravno spojena na WDM mrežne elemente. U tom slučaju se IP promet uokvirava u Sonet/SDH okvire i prenosi preko Sonet/SDH infrastrukture koja koristi WDM linkove od točke do točke. U *optical data networking* IP promet se izravno prenosi na optički kanal korištenjem digitalnog omotača (*digital wrapper*) – slika 2.45. Pri tome je prednost da su mnogi protokoli transparentno podržani. Ovaj model unosi dodatnu složenost integracije, povećava troškove upravljanja i probleme interoperabilnosti.



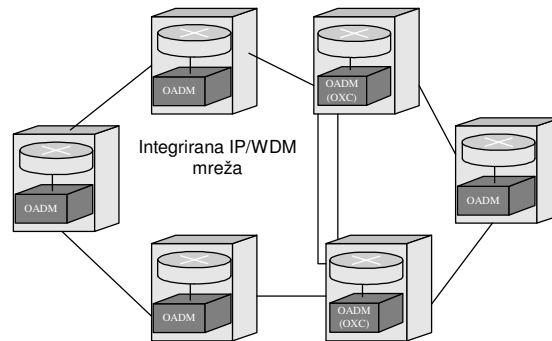
Slika 2.44 Client - server model (koncept)



Slika 2.45 Digital wrapper

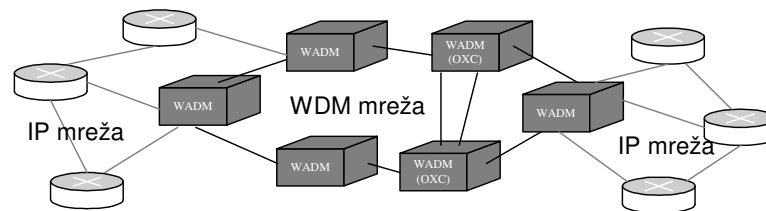
- *augmented (integrated) model* – s obzirom na integraciju usmjeravanja između optičke i IP domene ovaj se model nalazi između neovisnosti koju pruža *client-*

server model i čvrste integracije u *peer-to-peer* modelu. Zadržane su odvojene upravljačke ravnine, no dozvoljena je ograničena izmjena podataka o usmjeravanju između slojeva (npr. rubni optički prospojnici izmjenjuju podatke o usmjeravanju s rubnim klijentima). Ovaj model je prikazan na slici 2.46.



Slika 2.46 Augmented model

- peer-to-peer (peering) model* – ovaj model gradi WDM mrežu oko IP-a (slika 2.47). Optički prospojnici i usmjeritelji na principu komutacije oznaka slobodno izmjenjuju sve podatke te koriste iste protokole usmjeravanja i signalizacije. Optički prospojnici su programibilni i podržavaju pretvorbu valnih duljina. Mrežna arhitektura je podijeljena na podatkovnu ravninu i jednu jedinstvenu upravljačku ravninu. Kako usmjeritelji i optički prospojnici izmjenjuju u potpunosti podatke, usmjeritelji poznaju cijelu topologiju optičke mreže i mogu proračunavati putove kroz nju. Jedinstvena upravljačka ravnina uklanja administrativnu složenost koja postoji kod hibridnih optičkih sustava s odvojenim upravljačkim semantikama. Omogućen je mrežni model orijentiran uslugama, te je ponuđena skalabilna i mrežna arhitektura otporna na kvarove. Najveći nedostaci su problemi u podršci za tradicionalne ne-IP usluge (iznajmljene linije i telefonija), te duži period standardizacije u usporedbi s prethodnim modelima



Slika 2.47 Peer - to - peer model (koncept)

Uzimajući u obzir razvoj optičke tehnologije postaje jasno da je *big fat router* model zastario, te se samo preostala tri rješenja trebaju ozbiljno razmatrati za sadašnje i buduće IP/WDM mreže. Prvi korak prema IP/WDM integraciji će vjerojatno biti *client - server* model, koji će u konačnici migrirati prema *peer-to-peer* modelu.

IP i WDM mreža s komutacijom paketa

U trećoj generaciji sveoptičkih mreža WDM mreža posjeduje mogućnost komutacije paketa. Predložena su dva pristupa ovom problemu:

- optical burst switching (OBS)*, te
- optical label switching (OLS)*,

no tehnologija potrebna za njihovo ostvarivanje (optičko logičko procesiranje i spremanje optičkih podataka) je još u razvoju, te se neće detaljnije razmatrati u ovom radu. Današnji WDM sustavi ne posjeduju mogućnost memoriranja u optičkoj domeni, te se oslanjaju na elektroničko procesiranje zaglavlja paketa.

U inteligentnoj optičkoj mreži potrebno je podržati i komutaciju kanala i komutaciju paketa, što implicira mogućnost rekonfiguracije korištenih valnih duljina u optičkim prospojećima, te inteligentno pakiranje raspoloživih valnih duljina.

Osnovne prednosti komutacije paketa kao tehnologiji prema kojoj se kreće sveoptička mreža u uspoređbi s trenutnom (ručnom) komutacijom kanala su:

- smanjenje broja mrežnih slojeva,
- efikasna agregacija prometa i finija zrnatost usluga,
- dinamička kvaliteta usluge, te
- odvajanje usluge od optičke transportne mreže.

3 Programsko pomagalo *Cosmos*

3.1 Problem simuliranja i optimiziranja

Simulacijska i optimizacijska pomagala su danas neizostavni dio procesa dizajna i analize telekomunikacijskog sustava zbog složenosti problema i cijene konačnog sustava, odnosno mreže. Složenost mreže onemogućava korištenje egzaktnih (analitičkih) metoda.

Danas postoji veliki broj pomagala iz različitih izvora (akademski, komercijalni) i različite namjene (usko ili široko područje uporabe). Postoje dva osnovna parametra usporedbe – mogućnosti i cijena – s obzirom na njihovo široko područje uporabe od edukacijskih i prezentacijskih, pa do komercijalnih namjena.

Pomagalo *Cosmos* je dizajnirano da zadovolji potrebe projektiranja, analize i optimizacije suvremene telekomunikacijske mreže, primarno optičkih mreža.

3.2 Motivacija i ideja

Postojeća programska pomagala uglavnom su usmjerena na usko područje uporabe što prisiljava telekomunikacijske inženjere da se prilagođavaju na nekoliko različitih pomagala i njihova obilježja (npr. jezik za opis mrežnih struktura, ili način prikaza elemenata u mreži i njihovih veza). To je bio jedan od glavnih motivacijskih faktora za pokretanje projekta, s obzirom na potrebu za jednim pomagalom koje bi zadovoljavalo različite potrebe, a primarno projektiranje telekomunikacijske mreže. Uz mogućnost projektiranja u pomagalo su ugrađeni i algoritmi za analizu i optimizaciju. Dodatan poticaj je bila visoka cijena postojećih komercijalnih pomagala koje zadovoljavaju postavljene zahtjeve, te koja uglavnom nisu dostupna akademskim krugovima.

Osnovna ideja je bila stvaranje jedinstvenog mrežnog opisa koji bi omogućio izgradnju biblioteka mrežnih i optimizacijskih algoritama. Cilj je stvoriti jednostavno, stabilno pomagalo kojim se može riješiti široki raspon problema, što su nužni faktori za privlačenje programera. Ti bi programeri dodavali svoj kod postojećim bibliotekama što dodatno olakšava korištenje pomagala. *Cosmos* dakle pruža platformu s osnovnom funkcionalnošću na kojoj se dalje izgrađuju aplikacije. Iz tog razloga je upravo način opisa mreže (sustava) ključni dio pomagala.

Uz mogućnost mrežnog opisa *Cosmos* sadrži i simulacijske mehanizme koji omogućuju simulaciju opisanog modela u odabranoj simulacijskoj domeni. Kao ulazni podaci služe topologija mreže (odnosno struktura sustava), te korisnički kod koji opisuje funkcionalnost modela. Simulacijski mehanizmi mogu međudjelovati s mrežnim i optimizacijskim algoritmima, koji se s druge strane mogu koristiti i samostalno u nekoj analitičkoj ili optimizacijskoj orijentiranoj aplikaciji.

3.3 Namjena

Cosmos je skraćenica od *COmplex System Modelling, Optimization and Simulation* (modeliranje, optimizacija i simulacija složenih sustava). Može se koristiti u nizu telekomunikacijskih, i općenito inženjerskih procesa projektiranja, analize, simulacije i optimizacije. Osnovna namjena *Cosmosa* je projektiranje telekomunikacijskih sustava (mreže).

Tako široki zahtjevi su postavljeni zbog različitih potreba u telekomunikacijama, pa je potrebna prilagodba alata na različite probleme. Zbog toga *Cosmos* koristi jedan način opisa strukture sustava i simulacijskog modela koji je dovoljno fleksibilan da se može

primijeniti na različite probleme, te stoga ubrzava procese projektiranja ili analize te povećava njihovu efikasnost rada.

3.4 Zahtjevi

Na pomagalo su postavljene sljedeći zahtjevi [16]:

- *općenamjenska orijentacija (all - purpose orientation)* – *Cosmos* nije orijentiran na neko određeno područje. Sveobuhvatnost pomagala postignuta je fleksibilnošću opisa strukture sustava i korištenjem simulacijskih domena što omogućuje opis i simulaciju različitih tipova sustava,
- *efikasnost* – pomagalo je efikasno u rješavanju kako jednostavnih tako i složenih problema. Skalabilnost je jedno od ključnih zahtjeva postavljenih tijekom razvoja jer većina postojećih pomagala to ne omogućava. Efikasnost se temelji na uniformnom pristupu projektiranju sustava korištenjem tri osnovna strukturalna dijela (moduli, slojevi i sustav),
- *jednostavnost uporabe* – ovo je jedno od uvjeta efikasnosti, te implicira kratko vrijeme učenja i brzu prilagodbu na pomagalo. Jednostavna uporaba dozvoljava korisniku da brzo riješi neke jednostavnije probleme, ali ne smije ograničiti kompleksnost problema koji se mora riješiti. Jednostavan prijenos problema iz govornog jezika (neformalne specifikacije) i/ili neke formalne specifikacije u način prikaza u *Cosmosu* predstavlja osnovu za široko korištenje pomagala. Jednostavnost je postignuta enkapsuliranjem simulacijskih mehanizama (domena), te mrežnih i optimizacijskih algoritama u objekt sustava. Ipak ostaje mogućnost korisničkih promjena nad njima,
- *portabilnost koda* – korisnički kod mora biti portabilan između različitih računalnih platformi, primarno Windows NT (Win32), Sun Solaris i Linux zasnovanih sustava, kao i različitih procesorskih arhitektura, od IBM kompatibilnih osobnih računala do SUN radnih stanica. Portabilnost koda je postignuta besplatnim, lako dostupnim C++ prevodiocima na različitim platformama,
- *mrežna distribucija* – označava izmjenu memorijskih struktura između računala s ciljem raspodjele opterećenja procesora i memorije, te omogućavanja ili ubrzanja analitičkih ili optimizacijskih postupaka.

Pomagalo je cijelo izvedeno u C++ programskom jeziku na *Windows NT* zasnovanoj platformi. C++ je odabran jer njegova objektna orijentacija pruža dovoljno fleksibilnosti za razmatrane probleme, a općenamjenska orijentacija dozvoljava da svi dijelovi pomagala, od simulacijskih mehanizama do grafičkog sučelja, budu kodirani u jednom jeziku. Široka uporaba C++ - a implicira lako dostupne prevodioce i veliku programersku zajednicu što su osnovni preduvjeti široke uporabe pomagala.

3.5 Osnovne mogućnosti

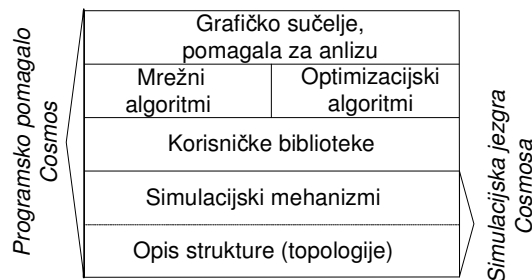
- opis strukture sustava (opis topologije) omogućava korisniku definiranje mrežne strukture. U ovom se radu pojam mreže koristi kao viši pojam pojma sustava, tj. sustav je specijalni slučaj mreže. Zbog toga opis mreže ne znači samo opis telekomunikacijske mreže, već i opis bilo kakvog sustava,
- opis ponašanja ovisi o odabranom simulacijskom modelu. Korisnik daje opis mrežnog ponašanja (funkcije) ili ponašanja mrežnog elementa (funkcije),
- simulacija temeljena na strukturi mreže i primijenjenom modelu, i

- optimizacija temeljena na optimizacijskim i mrežnim algoritmima i/ili simulacijskim rezultatima. Može se dakle koristiti u sprezi sa simulacijom ili analitičkim algoritmima.

3.6 Struktura pomagala

Cosmos se sastoji od sljedećih osnovnih dijelova (slika 3.1):

- *simulacijska jezgra* je temeljni dio pomagala koja omogućuje minimalnu funkcionalnost potrebnu za opis i simuliranje sustava,
- *korisničke biblioteke* sadrže korisničke opise simulacijskih modela (npr. *on - off* model koji se koristi u *Monte Carlo* simulaciji raspoloživosti ili dijelove WDM mreže). Korisničke biblioteke olakšavaju proces projektiranja sustava jer korisnik ne mora opisivati modele korištene pri projektiranju. Zbog toga se može izbjeći faza opisivanja ponašanja,
- *biblioteke mrežnih i optimizacijskih algoritama* koriste se u procesu analize i optimizacije sustava s različitim optimizacijskim varijablama. Preduvjet za velike biblioteke algoritama je dovoljno velika zajednica korisnika,
- *grafičko sučelje i pomagala za analizu* osnova su za jednostavnost korištenja pomagala i analizu rezultata. Grafičko sučelje olakšava dizajn topologije, no nameće i ograničenja u fleksibilnosti.



Slika 3.1 Struktura *Cosmosa*

3.6.1 Struktura simulacijske jezgre

Simulacijska jezgra *Cosmosa* ima dva dijela:

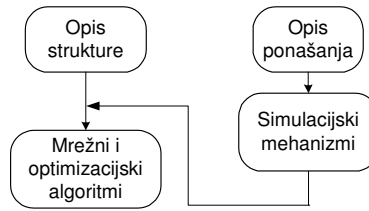
1. opis mreže, i
2. simulacijski mehanizmi.

Jezgra omogućuje opis mreže, odnosno sadrži osnovne elemente mrežne topologije (npr. čvorove WDM mreže), te paradigmu za opis ponašanja. Simulacijski mehanizmi određuju pozive predefiniranih funkcija jezgre, čiji sadržaj mora napisati korisnik (kod za inicijalizaciju ili pokretanje).

Dva su osnovna koraka u opisu mreže korištenjem *Cosmosa*:

1. opis topologije, i
2. opis ponašanja.

Opis topologije definira pasivnu mrežnu strukturu, dok opis ponašanja ovisi o odabranom simulacijskom modelu. Sama topologija je dovoljna za neke analitičke i optimizacijske procese, no simulacija zahtijeva oba koraka. Rezultati simulacije mogu služiti kao ulazni podaci za analitičke i optimizacijske algoritme kako prikazuje slika 3.2.



Slika 3.2 Koraci u opisu mreže u Cosmosu

U sljedećim dijelovima ukratko su opisane strukture jezgre koje se koriste za opis topologije. Jezgrene strukture su kodirane kao C++ apstraktne klase, te je mehanizmom nasljeđivanja (dodavanje novih atributa i metoda) omogućen daljnji razvoj. Jezgrene strukture su stoga najapstraktniji pogled koji se nasljeđivanjem približava stvarnim mrežnim elementima.

3.7 Opis topologije

Mrežna topologija (struktura sustava) sastoji se od dva dijela:

1. skupa mrežnih elemenata, i
2. skupa veza između mrežnih elemenata,

koji zajedno čine graf.

Topologija je pasivna struktura (u pogledu simulacijskog modeliranja) i nije nužno vezana uz simulaciju, no može poslužiti kao ulazni podatak u simulacijski mehanizam (slika 3.2). Uz simulacijske mehanizme na topologiju se mogu primijeniti i analitičke procedure. Analiza i optimizacija se mogu temeljiti na simulacijskim rezultatima, ali to zahtjeva i opis ponašanja uz opis topologije.

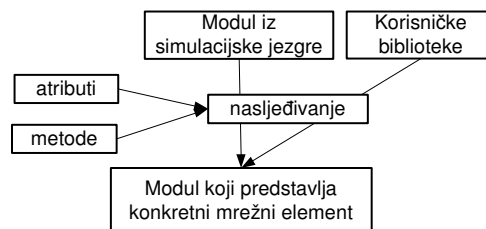
Elementi mreže sadrže

- *atribute* – obilježja stvarnih elemenata koje predstavljaju (npr. pojačanje optičkog pojačala),
- *portove* – dozvoljavaju vezu i komunikaciju između elemenata,
- *ponašanje* – opis modela koji nužan samo za proces simulacije.

3.7.1 Moduli

Moduli su osnova opisa mrežne topologije i pružaju osnovnu funkcionalnost koja se nadopunjuje korisničkim kodom (atributi, metode) da bi se dobili predlošci (C++ klase) ta stvaranje elemenata (C++ objekti). Moduli su mrežni elementi opisani u *Cosmosu*.

Postoje dva načina dobivanja modula koji predstavlja konkretni element mreže. Prvi koristi standardni C++ mehanizam nasljeđivanja, a drugi module iz korisničkih biblioteka (slika 3.3). Nasljeđivanje se može primijeniti i na drugi slučaj.



Slika 3.3 Stvaranje predloška konkretnog elementa mreže

Moduli se mogu gnijezditi u proizvoljnoj dubini. Modul može sadržavati proizvoljan broj modula iz dva razloga, tj. agregacija može imati dva značenja:

1. logička (topološka) agregacija, i
2. funkcionalna agregacija.

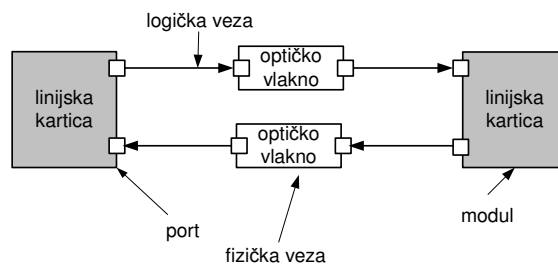
Funkcionalna agregacija je povezana s načinom opisa ponašanja, a logička se temelji na ideji podgrafova. Oba slučaja su opisana u narednim dijelovima.

3.7.2 Portovi i logičke veze

Moduli (elementi mreže) sadrže portove koji omogućuju stvaranje veza prema drugim elementima. Portovi mogu biti jednosmjerni (*in*, *out*) ili dvosmjerni (*inout*). Oni ne mogu imati opis ponašanja i služe samo kao potpora u stvaranju topologije (veze).

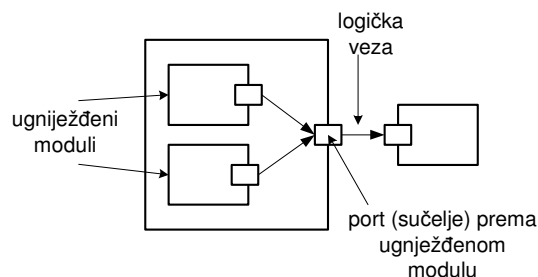
Logička veza povezuje dva porta čiji tip određuje njezin smjer. Na jedan port istovremeno može biti povezan proizvoljan broj veza. Opis topologije čini lista elemenata i veza. Logičke veze su važne za mehanizam izmjene poruka što predstavlja osnovu u simulacijama telekomunikacijske mreže.

Logičke veze dakle nisu ostvarene kao mrežni elementi, niti implementiraju ikakva fizikalna obilježja. Fizičke veze se stoga stvaraju kao novi moduli povezani za rubne module koji se moraju spojiti. Slika 3.4 prikazuje dva modula (linijske kartice) povezane optičkim vlaknima koja su implementirana kao novi moduli.



Slika 3.4 Logičke i fizičke veze

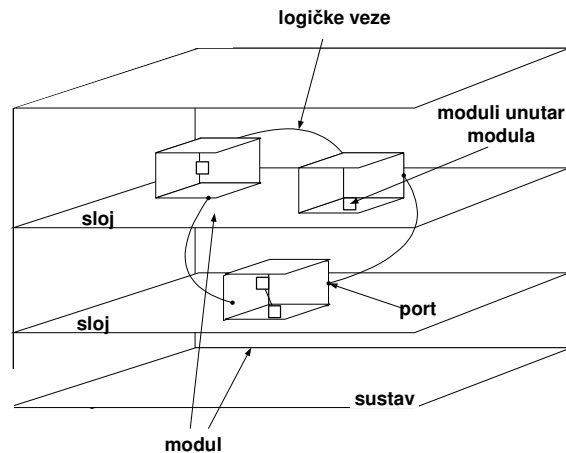
Logičke veze mogu postojati samo između modula koji pripadaju istom modulu, ili koji nisu dio nijednog modula već se nalaze izravno u sustavu. Modul koji agregira druge module sadrži portove koji predstavljaju sučelja i omogućuju agregiranim modulima vezu s vanjskim svijetom (slika 3.5). Takvi su portovi jednaki svim ostalim, samo što dozvoljavaju da se na njih vežu portovi s unutarnje i vanjske strane modula.



Slika 3.5 Gniježđenje modula i portovi

3.7.3 Slojevi

Slojevi služe kao logička agregacija za module, te ne mijenjaju module na bilo koji način i ne dodaju ništa njihovoj funkcionalnosti. Moduli koji imaju nešto zajedničko mogu biti dio istog skupa, odnosno



Slika 3.6 Moduli, slojevi i sustav

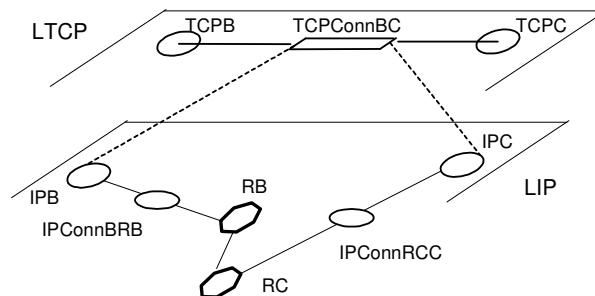
sloja. Pri projektiranju telekomunikacijske mreže slojevi se uglavnom koriste za prikaz iste topologije s obzirom na različite OSI slojeve.

Mrežni i optimizacijski algoritmi mogu se primjeniti na module jednog sloja s obzirom na različite topologije koje može imati ista mreža u odnosu na različite OSI slojeve (potpuna povezanost na TCP sloju i prstenovi na SDH sloju).

Slojevi ne posjeduju mogućnost opisa ponašanja.

3.7.4 Podgrafovi

Podgrafom se smatra logička ili funkcionalna agregacija. Njime se rješava problem složenih modula sa složenom funkcionalnošću (funkcionalna agregacija), ili problem nepovezanih modula kada se promatra samo jedan sloj (logička agregacija). Tipičan primjer je OSI složaj gdje TCP entiteti nisu izravno fizički spojeni, ali gdje postoje logičke TCP veze koje čine potpuno povezanu mrežu (*mesh*). U *Cosmos* načinu prikaza to znači da logičke veze (*Cosmos* terminologija) povezuju module različitih slojeva (kao TCP entitet koji pripada TCP sloju i IP entitet koji pripada IP sloju). Povezana topologija udaljenih klijenata bi u takvom pristupu postojala jedino na najnižem (fizičkom) sloju. Stoga je korisno stvoriti nove objekte koji pripadaju jednom sloju ali predstavljaju skup modula iz drugog sloja, npr. modul koji predstavlja TCP logičku vezu, ali sadrži module iz IP sloja (IP usmjernitelje i IP veze) kako prikazuje slika 3.7.



Slika 3.7 Ideja podgrafova

Logička agregacija ne implicira neke promjene na modulima koji su sadržani u drugom modulu. Novi modul (logička agregacija) ne postoji kao stvarni fizički element mreže i stvoren je zbog efikasnijeg prikaza mreže na različitim slojevima. Novi modul ne dodaje novu funkcionalnost, te se stoga ovakva agregacija može izbjeći korištenjem algoritama koji za utvrđivanje veza između dva modula istog sloja uzimaju u obzir module u drugim slojevima.

U slučaju funkcionalne agregacije podgrafom se opisuje stvarni fizički element mreže (kao npr. IP usmjernik koji uključuje linijske kartice, prospojnu matricu, i sl.), kojem je pridjeljena funkcionalnost koja se ostvaruje pomoću modula koje sadrži.

3.7.5 Sustav

Sustav je najviši dio topološke hijerarhije. Pri definiranju topologije i agregiranju modula u slojeve (proizvoljan korak) korisnik dodaje module i slojeve u roditeljski sustav. Sustav ne mijenja obilježja modula, te je u tom pogledu sličan sloju, no uz logičku agregaciju sustav sadrži i simulacijske mehanizme koji daju značenje opisu ponašanja.

Moduli, slojevi i sustav su tri osnovna dijela opisa strukture (slika 3.6). Portovi se koriste pri stvaranju logičkih veza. Logičke veze između modula se ne implementiraju kao objekti, već su implicitno opisane preko referenci. Opis strukture sustava se može načiniti na dva načina:

1. korištenjem C++ -a, ili
2. korištenjem jezika za opis topologije CSDL (*Complex System Description Language*).

CSDL ima C++ strukturu, ali sadrži samo nekoliko ključnih riječi, te stoga čini opis strukture jednostavnijim za (C++) ne - programere, no nameće i ograničenja na fleksibilnost opisa.

3.8 Opis ponašanja

U prethodnom je koraku korisnik definirao mrežne strukture koje su dovoljne za analitičke ili specifične optimizacijske postupke (slika 3.3). Simulacija zahtjeva simulacijski model kojim je predstavljeno ponašanje modula. To ponašanje odgovara više ili manje pojednostavljenom ponašanju elementa predstavljenom tim modulom.

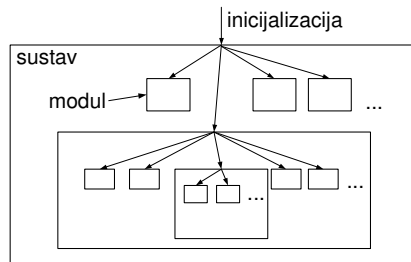
3.8.1 Ponašanje modula

Opis ponašanja modula (*module behavior*) nije moguć bez uporabe C++ -a, te je stoga ova faza komplicirana za korisnike koji nisu C++ programeri. Ova poteškoća se može izbjeći korištenjem gotovih modula iz biblioteke modula pri čemu je potrebno samo opisati topologiju.

Ponašanje modula se može podijeliti u dva skupa s obzirom na vrijeme izvršenja [17]:

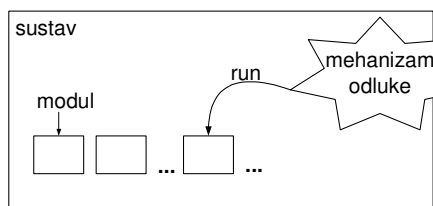
1. inicijalizacija (*initialization*), i
2. pokretanje (*run*).

Inicijalizacijski kod se pokreće prije pokretanja same simulacije i zadaća mu je postavljanje modula (njihovih atributa) u neko početno stanje (npr. ispravno ili neispravno stanje u simulaciji raspoloživosti). Prije pokretanja simulacije korisnik poziva inicijalizacijsku metodu nad sustavom koja poziva inicijalizacijske metode svih sadržanih modula, koji opet inicijalizira sve module koje sadrži do proizvoljne dubine gniježđenja (slika 3.8). Inicijalizacijska metoda svakog modula mora biti pozvana.



Slika 3.8 Poziv inicijalizacije sustava

Tijekom simulacije simulacijski mehanizmi (određeni simulacijskom domenom) pokreću (poziv *run* metode) određeni modul. Odabir modula ovisi o nekom korisnički definiranom mehanizmu, uvjetu ili isteku događaja u domeni diskretnih događaja (slika 3.9). Kod unutar *run* metode ovisi o simulacijskoj domeni, te o načinu interakcije modula.



Slika 3.9 Pokretanje modula

Ponašanje modula se može opisati na dva načina:

1. korištenjem jednog koda, i
2. podjelom funkcionalnosti modula na nekoliko funkcionalnih cjelina koje su implementirane u modulima sadržanim u njemu.

Pri opisu nekog složenog ponašanja prvi način rezultira velikim i nerazumljivim kodom koji nije transparentan u procesu simuliranja. Ako se složeno ponašanje može podijeliti na nekoliko funkcija pogodnije je te funkcije pridijeliti različitim modulima. Modul sa složenim ponašanjem će biti tada prikazan kao funkcionalna agregacija nekoliko modula. Pokretanjem tog modula se mora ustanoviti koji se modul sadržan u njemu mora pokrenuti. *Run* metoda modula predstavljenim logičkom agregacijom nije vezana uz *run* metode modula koje sadrži, niti je uopće zamišljeno da se on pokreće.

Korisnički kod se može izvoditi na dva načina:

1. kao objektni kod, i
2. korištenjem C++ interpretera

Prvi način pruža brzinu, a drugi interaktivnost tijekom simulacije. Korištenje interpretera (u razvoju) će sigurno ograničiti korisnički kod na neki podskup C++ zbog kompleksnosti C++ sintakse.

3.9 Simulacijski mehanizmi

Simulacijski mehanizmi predstavljaju temelj simulacije. Zasnivaju se na korisničkom opisu ponašanja kojem daju određeno značenje ovisno o odabranoj domeni.

Simulacijska domena implementira simulacijski mehanizam. Različiti projekti zahtijevaju različite simulacijske domene, s obzirom na efikasnost rješavanja određenog problema. Domena diskretnih događaja zadovoljava većinu potreba na području simuliranja

telekomunikacijske mreže, ali npr. simulaciju elektroničkih sklopova najbolje zadovoljava uporaba diferencijalnih jednažbi. Vrsta problema dakle implicira uporabu simulacijske domene koja mora biti tako odabrana da najefikasnije rješava zadani problem.

Ponašanje mreže se temelji na ponašanju njihovih modula, te na njihovoj međusobnoj komunikaciji. Proces komunikacije se može ostvariti na tri načina:

1. *izravni pozivi metoda* su najjednostavniji način komunikacije. Jedan modul izravno poziva metodu (korisnički definiranu akciju nad modulom) drugog modula,
2. *dogadjaji (events)* su karakteristični za simulaciju diskretnih događaja, te su stoga vezani za tu domenu, i
3. *izmjena poruka* koja predstavlja najčešće korišteni način komunikacije pri simulaciji telekomunikacijske mreže.

Mehanizmi komunikacije nisu nužno vezani uz neku domenu. Izravni pozivi metoda tako mogu biti korišteni u bilo kojoj domeni, dok je komunikacija događajima ograničena na simulacije diskretnih događaja. Mehanizam izmjene poruka se uglavnom koristi s događajima, ali nije ograničen samo na tu domenu.

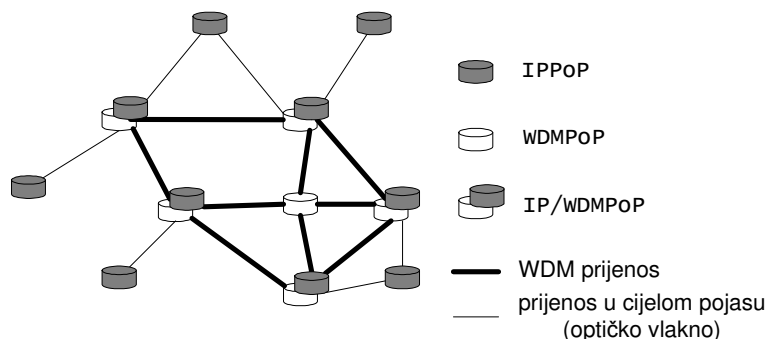
Proces izmjene poruka temelji se na principu distribucije poruka svim modulima spojenima na jedan port. Modul pri primitku poruke stoga mora utvrditi da li je poruka poslana njemu. U suprotnom poruka se odbacuje (Ethernet princip).

Ovo pomagalo je prije svega namijenjeno projektiranju telekomunikacijske mreže. Domena diskretnih događaja je jedina koja je za sada implementirana, no ne postoje ograničenja razvoju drugih.

4 Strukturalno i funkcionalno modeliranje

4.1 Modeliranje sveoptičke mreže

Pod pojmom dizajna sveoptičke mreže podrazumijeva se modeliranje čvorova takve mreže kao i veza između čvorova. Dizajn je moguće napraviti s različitim ulaznim parametrima i pretpostavkama, kao što su mehanizmi zaštite ili optimizacijski kriteriji. U radu su obrađena 4 osnovna mehanizma zaštite, te je predložen algoritam smanjenja cijene redundantnih (zaštitnih) putova.



Slika 4.1 Prikaz temeljne strukture sveoptičke mreže

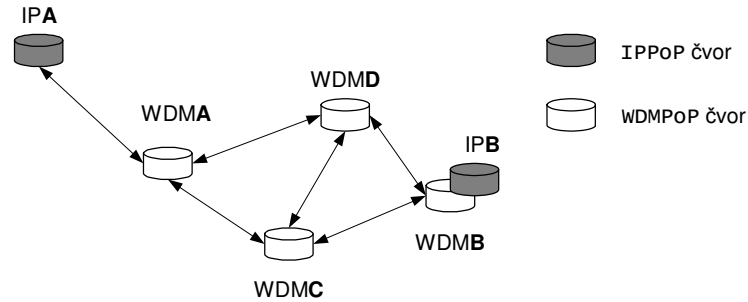
Sveoptička mreža se može promatrati kao skup optičkih komponenti povezanih u mrežu kroz koje prolazi signal od ulaza do izlaza u optičkoj domeni. Kao ulazni promet za sveoptičku mrežu služe generatori IP prometa. Sasvim općenito, generator IP prometa može biti IP sloj koji ubacuje novi IP promet u mrežu, ili već postojeći IP promet koji se samo preusmjerava na usmjeritelju, te ponovno vraća u sveoptičku mrežu. Ti slučajevi su modelirani jednim modulom IPPoP (*IP Point of Presence*). Kao ulazna točka u sveoptičku mrežu služi modul WDMPoP (*WDM Point of Presence*) kao što prikazuje slika 4.1.

4.1.1 WDMPoP modul

WDMPoP modul predstavlja ulaznu točku IP prometa u sveoptičku mrežu, i njime je modelirana sva funkcionalnost čvora u sveoptičkoj mreži. Struktura WDMPoP čvora ovisi o primijenjenom mehanizmu zaštite. U principu se čvor sastoji od sljedećih tipova komponenata:

1. WDM multiplekser,
2. WDM demultiplekser,
3. optičko pojačalo,
4. pretvarač valnih duljina,
5. optički (prostorni) komutator,
6. optički rasprednik/spreznik.

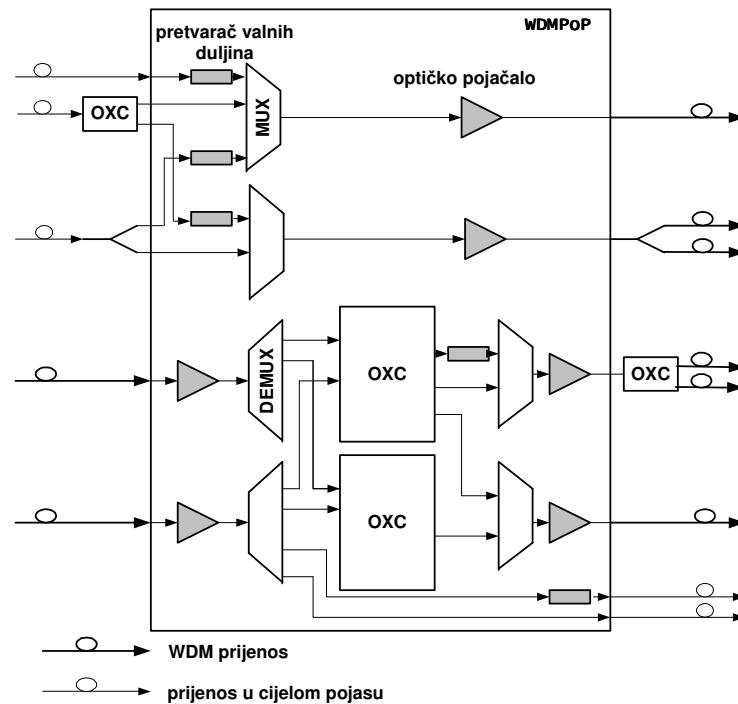
Broj i povezanost komponenata ovisi o funkcionalnosti WDMPoP čvora te mehanizmu zaštite. Funkcionalnost WDMPoP čvora ovisi o položaju čvora unutar mreže, tj. o tome da li čvor služi samo za prospajanje prometa unutar mreže, ili služi kao ulazno/izlazna točka za IP promet kao što prikazuje slika 4.2.



Slika 4.2 Dva osnovna tipa WDMPOP čvorova

Čvorovi *WDMA* i *WDMB* se nalaze na rubu sveoptičke mreže i predstavljaju ulazno/izlazne točke za IP promet. Međusobni položaj koji mogu zauzeti IPPoP i WDMPOP čvorovi analiziran je u dijelu 4.3.

Općenita struktura WDMPOP čvora prikazana je na slici 4.3.



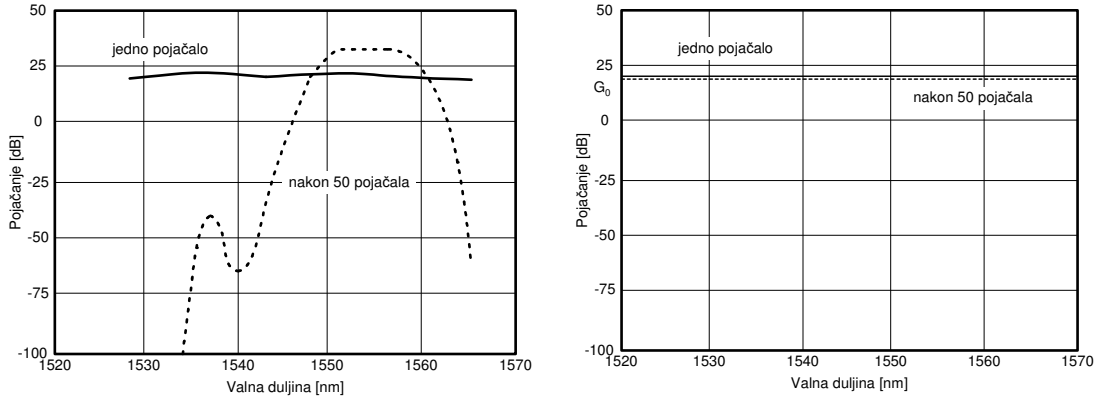
Slika 4.3 Općenita struktura WDMPOP čvora

Optičko pojačalo

Optičko pojačalo služi za pojačavanje snage optičkog signala u optičkoj domeni bez konverzije u električnu, čime se osigurava transparentnost prijenosa i omogućuje modeliranje sveoptičke mreže. Danas se dominantno koriste pojačala s erbijem dopiranom niti (EDF pojačala ili EDFA) koja omogućuju pojačanje cijelog dijela spektra koji odgovara trećem optičkom prozoru, odnosno pojačanja signala u temeljnom pojasu, kao i WDM signala bez demultipleksiranja. U ovom radu implementirano je EDF pojačalo klasom oAmp.

Općenito pojačanje EDFA ovisi o valnoj duljini signala te se malo mijenja s promjenom valne duljine. Takva promjena nije od značaja u jednom pojačalu, no kaskadiranjem pojačala u optičkom linku može zbog kumulativnog efekta doći do znatne razlike u

pojačanju signala različitih valnih duljina. Slika 4.4a prikazuje ovisnost pojačanja o valnoj duljini za pojačala s izravnatim pojačanjem (*gain flattened amplifiers*). Model se može i pojednostaviti pretpostavkom konstantnog pojačanja G_0 u cijelom rasponu valnih duljina od interesa, ukoliko to ne utječe na mjerene performanse (slika 4.4b).



(a) Model s ovisnošću pojačanja o valnoj duljini (gain flattened model) (b) Model s konstantnim pojačanjem (idealno)

Slika 4.4 Ovisnost pojačanja EDFA o valnoj duljini

Područje valnih duljina na koje se može primijeniti pojačalo naziva se pojasom (*bandwidth*) pojačala B_o . Modelirano pojačalo je moguće postaviti u dva moda rada. U prvom je pojačanje funkcija valne duljine ulaznog signala, dok je u drugom pojačanje konstantno za sve valne duljine. Korisnik odabirom prvog načina mora unijeti vrijednosti pojačanja za WDM valne duljine od interesa.

Dodatani faktor koji se može uzeti u obzir pri modeliranju je i ovisnost pojačanja o snazi signala.

Odnos ulazne i izlazne snage optičkog signala na optičkom pojačalu iznosi

$$G_{dB}(\lambda) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} = 20 \log \frac{A_{out}^2}{A_{in}^2} \quad (4.1)$$

gdje je $G_{dB}(\lambda)$ pojačanje signala izraženo u dB. Snage koje se navode u izrazima mogu odgovarati ukupnoj snazi signala (u obzir se uzima i šum koji ulazi u pojačalo), no u tom slučaju treba uzeti u obzir i šum koji se dodaje signalu jer uz pojačanje signala, EDFA dodaje i šum spontane emisije (ASE šum). U tom slučaju će ukupna izlazna snaga biti jednaka

$$P_{outTOT} = GP_{inTOT} + P_{ase} \quad (4.2)$$

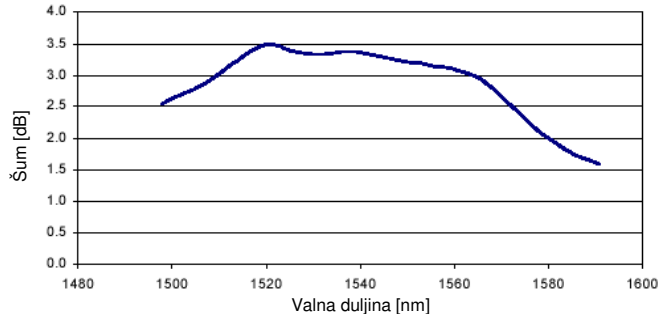
gdje je P_{ase} šum spontane emisije dodan u promatranom pojačalu. Kako je šum spontane emisije uz šum preslušavanja jedini koji se analizira u ovom radu može se koristiti sljedeći izraz

$$P_{inTOT} = P_{in} + P_{asein} + P_{xin} \quad (4.3)$$

Dodani šum spontane emisije se može aproksimirati izrazom [15]

$$P_{ase} = 2n_{sp} [G(\lambda_i) - 1] h \nu_i B_o \quad (4.4)$$

gdje je n_{sp} faktor spontane emisije ili parametar inverzije naseljenosti, $G(\lambda_i)$ pojačanje koje odgovara valnoj duljini ulaznog signala ($G(\lambda_i)=G_0$ za *gain flattened* model), ν_i frekvencija ulaznog signala, a h Planckova konstanta. Na slici 4.5 prikazana je ovisnost šuma o valnoj duljini za EDFA. Ova ovisnost se kod modeliranog pojačala uvijek uzima u obzir, a konačna vrijednost dodanog šuma će ovisiti i o odabranoj ovisnosti pojačanja o valnoj duljini signala.



Slika 4.5 Ovisnost šuma o valnoj duljini za EDFA

Faktor spontane emisije ovisi o tehnološkoj izvedbi optičkog pojačala, te je kod dopiranih pojačala jednak

$$n_{sp} = \frac{\sigma_e(\lambda)N_2}{\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1}, \quad (4.5)$$

pri čemu su $\sigma_e(\lambda)$ i $\sigma_a(\lambda)$ područja emisije i apsorpcije koja jako ovise o valnoj duljini signala, a N_2 i N_1 populacije u gornjem i donjem energetsom području (dvostupanjski model) [14].

Općenito se ovisnost šuma o valnoj duljini kod dopiranih pojačala računa sumiranjem doprinosa šuma spontane emisije uzduž vlakna.

Kod Ramanovih pojačala faktor spontane emisije iznosi

$$n_{sp} = \frac{1}{1 - \exp\left[\left(\nu_s - \nu_{sp}\right)\frac{h}{kT}\right]}, \quad (4.6)$$

gdje je ν_s frekvencija signala, ν_p frekvencija pumpe, a T temperatura na kojoj se nalazi pojačalo [15].

Vidljivo je dakle da se optičko pojačalo u promijenjenom modelu zadaje skupom parametara

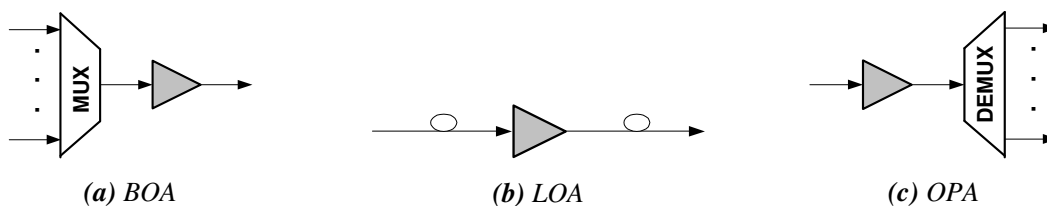
$$\{G(\lambda), B_0, n_{sp}\}. \quad (4.7)$$

Uz to je moguće zadati i duljinu vlakna dopiranog erbijem kod EDFA, no efekti koji nastaju na tom vlaknu (npr. kašnjenje) se zbog kratkoće (desetak km) mogu zanemariti.

S obzirom na položaj koje pojačalo može imati u mreži moguća je funkcionalna podjela na

1. pojačala snage (BOA - *Booster Optical Amplifier*),
2. linjska pojačala (LOA - *Line Optical Amplifier*), te
3. predpojačala (OPA - *Optical PreAmplifier*)

koja se razlikuju s obzirom na ulaznu snagu signala i na vrijednosti parametara modeliranja.



Slika 4.6 Položaji optičkih pojačala u mreži

Na slikama 4.6a-c prikazani su tipični položaji pojačala u optičkoj mreži. Pojačala snage koriste se da bi se kompenzirali gubici koji nastaju višestrukim multipleksiranjem signala tj. da bi se razina snage optičkog signala podigla na razinu koja nije moguća samim optičkim predajnikom. Osnovna karakteristika takvih pojačala je visoka izlazna snaga signala. Pri modeliranju WDMPOP čvorova ovakva se pojačala dodaju na izlaz svakog WDM multipleksera, tj. prije dolaska signala na WDM link. Linijska pojačala kompenziraju gubitke koji nastaju gubicima u optičkom vlaknu, a predpojačala da bi povećala osjetljivost prijammnika ili povećala snagu multipleksiranog signala prije demultipleksiranja. Takvo se pojačalo u dizajnu WDMPOP čvora dodaje prije svakog demultipleksera, te ima uzak frekvencijski pojas i mali šum spontane emisije.

Pojačanja svih pojačala su tako podešena da kompenziraju gubitke nastale pri prijenosu kroz komponente koje prethode pojačalu (multiplekseru kod BOA, optičkom vlaknu kod LOA) ili slijede iza njega (demultiplekserser kod OPA).

Tipične vrijednosti za optička pojačala (*gain flattened model*) iznose [13]:

Izvedba pojačala	Pojas pojačanja	Širina pojasa	Pojačanje
poluvodič	bilo koje	40 nm	25 dB
EDF	1525-1560 nm	35 nm	25 - 51 dB
PDF*	1280-1330 nm	50 nm	20 - 40 dB

*PDF – praseodimijem dopirano vlakno

Za faktor spontane emisije n_{ASE} obično se uzima vrijednost 1.5 prema [15].

Pretvarač valnih duljina

Pretvarač valnih duljina pretvara valnu duljinu ulaznog signala bez promjene informacije koju taj signal prenosi. Najjednostavnija izvedba je ona koja koristi opto - električnu pretvorbu, no takav način unosi značajna kašnjenja zbog korištenja elektroničkih komponenti i narušava ideju sveoptičke mreže, odnosno optičke transparentnosti. Puno su zanimljiviji pretvarači koji ne vrše konverziju, a u principu rade ili na temelju zasićenja ili miješanja 4 vala [10].

Pretvarač valnih duljina u ovom radu nije uzet u obzir pri analizi performansi, tj. pretpostavljeno je da su gušenje i dodani šum zanemarivi. Pretvarači su modelirani klasom σ_{Trans} , i nije pravljena razlika između opto - električne (transponder) i sveoptičke pretvorbe valnih duljina (pretvarač valnih duljina), jer nisu analizirana kašnjenja na komponentama. Ukoliko je to potrebno razlika se može načiniti analizom valne duljine ulaza. Ukoliko se radi o ne - WDM valnoj duljini (ulaz signala u WDM mrežu) podrazumijeva se transponder, a ukoliko se radi o pretvorbi unutar WDM mreže podrazumijeva se pretvarač valnih duljina. Modelirana komponenta prima kao ulaz signal bilo koje valne duljine, a na kao izlaz se pojavljuje neka predefinirana valna duljina. Izlazna valna duljina se može mijenjati tijekom rada.

Korištenje pretvarača valnih duljina može znatno olakšati dizajn, jer omogućuje pretvorbu valne duljine signala tijekom puta. Njegova uporaba mora ipak biti opravdana zbog visoke cijene, što se analizira u dijelu 4.4.1.

Pri proračunu BER-a čvorovi se dizajniraju bez uporabe pretvarača valnih duljina, da bi se minimizirala greška koja nastaje iz zanemarivanja njegovog utjecaja na signal. Iznimka je točka ulaska optičkog signala u optičku mrežu, gdje je najčešće potrebna pretvorba valne duljine signala koju koristi predajnik na optičkoj kartici u neku od standardnih WDM valnih duljina na multiplekseru.

Optički rasprežnik/sprežnik

Optički razdjelnik razdvaja optički signal na dvije komponente, a sprežnik spaja dva optička signala iste valne duljine. Radi se o jednoj komponenti koja ovisno o načinu uporabe ima neku od ove dvije funkcije (slika 4.7a i b).



Slika 4.7 Komponenta optičkog sprežnika/rasprežnika

Odnos ulazne snage i snage jednog od izlaznih signala na idealnom optičkom rasprežniku (bez gubitaka) je 3dB, tj. pretpostavka je da je zbroj snaga izlaznih signala jednak snazi ulaznog signala.

Ova komponenta modelirana je klasom *osplitter*, čiji su portovi dvosmjerni, tj. svaki može poslužiti kao ulaz i kao izlaz. Ovisno o načinu spajanja ova se komponenta ponaša kao sprežnik ili kao rasprežnik kako je analizirano.

Optički prospojnik

Optički prospojnik je najvažnija komponenta oko koje se izgrađuje suvremena i planira buduća sveoptička mreža kako je raspravljeno u dijelu 2.4. Njegova važnost leži u upravljivosti i načinu povezivanja optičke upravljačke ravnine s onom na višim slojevima. Za sada su optički prospojnici upravljivi samo ručnim prospajanjem u slučaju kvara, jer je transmisijska mreža početno zamišljena kao mreža vrlo niske zrnatosti prometa i veoma velike inertnosti što se tiče povećanja zahtjeva, promjene u matrici zahtjeva, ili uvođenja novih usluga odnosno tipova prometa. Ta su obilježja vrijedila za jezgenu mrežu koja je posluživala isključivo telefonski promet. Danas se pojavom podatkovnog prometa i aplikacija s bitno različitim zahtjevima na kvalitetu usluge ta slika mijenja iz potreba za statičkom mrežom prema potrebi za dinamičkom mrežom koja se prilagođava trenutnim prometnim parametrima i pruža veću zrnatost, odnosno različito poslužuje prometne zahtjeve različitog tipa. Ta je dinamičnost moguća primjenom upravljivih optičkih prospojnika. Stupanj integracije funkcionalnosti optičkog prospojnika i IP usmjeritelja ovisi o razvoju optičke tehnologije i povećavati će se tijekom vremena. Također se i uporaba optičkih prospojnika povećava tijekom vremena (tablica 4.1, prema [19]) tako da je ova komponenta vrlo važna iz funkcionalnih razloga za mrežu.

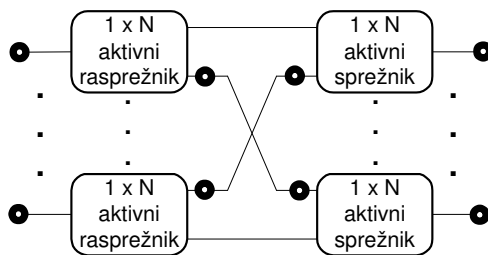
Veličina (broj portova)	2000. godina	2001. godina	2004. godina
< 250	94	109	33
251 – 500	140	180	65
501 – 1000	0	154	284
1001 – 1500	0	105	999
1501 – 2000	0	0	2198
> 2000	0	0	3866
Ukupno	234	549	7445

Tablica 4.1 Troškovi za optičke prospojnike (SAD, milijuni \$)

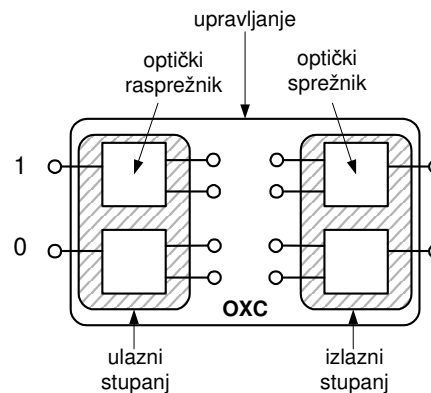
Komutatorska matrica u prospojniku je izvedena kao strogo neblokirajuća s potpunom dostupnošću. To znači da je svaki izlaz dostupan svakom ulazu u bilo kojem trenutku.

Model prospojnika preuzet je iz [15] jer osigurava jednostavnu implementaciju i jednostavan proračun šuma preslušavanja. Radi se o modelu ATM prospojnika koji se sastoji od stupnjeva raspredžnika i sprežnika, samo u ovom slučaju u optičkoj domeni (slika 4.9). Ukoliko se radi o $N \times N$ prospojniku (prospojnik stupnja N) potrebno je $\log_2 N$ stupnjeva raspredžnika i isto toliko stupnjeva sprežnika. Ukupno se koristi $2N(N-1)$ komutatorskih elemenata. Treba naglasiti da sprežnici i raspredžnici koji se koriste u ovom modelu ne odgovaraju potpuno funkcionalno onima opisanim u prošlom dijelu jer se signal ne dijeli na dva dijela u raspredžniku, već to ovisi o upravljačkoj informaciji ovisi na koji izlaz izlazi signal. Dakle ne govori se o gubicima od 3dB. Na slici 4.9 prikazana je ideja ovog dizajna na primjeru 2×2 optičkog prospojnika.

Ovaj model se odnosi na prospojnike iste horizontalne i vertikalne dimenzije ($N \times N$). Prospojnici dimenzija $M \times N$ ($M \neq N$) se ne modeliraju na ovaj način, jer ne utječu na dodavanje šuma preslušavanja (prospojnici dimenzija $1 \times 2/2 \times 1$).



Slika 4.8 Arhitektura $N \times N$ neblokirajućeg prostornog prospojnika



Slika 4.9 2×2 optički prospojnik

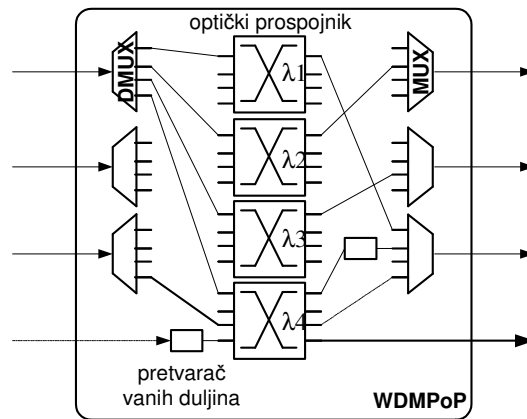
Optički prospojnici u principu mogu djelovati u optičkoj domeni (OXC - *Optical CrossConnect*), ili s opto - električnom pretvorbom (OEXC - *Opto-Electrical CrossConnect*). U ovom radu su razmatrani isključivo optički prospojnici u optičkoj domeni, pa će se nazivi XC i OXC dalje koristiti ravnopravno.

Upravljanje je u ovom radu izvedeno implicitno preko logičkih struktura (dio 4.4) i trenutnog stanja raspoloživosti elemenata mreže. Modeliranje blokiranja na prospojniku je važno pri proračunu raspoloživosti, no ono je riješeno preko interferencije valnih duljina na izlaznim optičkim vlaknima (dio 6.1.1).

Za prospojnike je važan način njihove uporabe unutar WDMPOP čvorova. Postoje prospojnici koji bilo koju ulaznu valnu duljinu mogu prospojiti na bilo koju izlaznu valnu duljinu, što

pruža veliku fleksibilnost dizajna, ali unosi (nekad nepotrebnu) kompleksnost i (nekad neopravdano) visoku cijenu zbog pretvorbe valnih duljina. U ovom radu se koriste optički prospojnici koji nemaju ugrađenu mogućnost pretvorbe valnih duljina, tj. signal je samo prostorno preusmjeren. Takvi se prospojnici nazivaju prostornim optičkim prospojnicima (SXC - *Space CrossConnect*). Ukoliko je potrebna pretvorba valne duljine to je moguće napraviti dodavanjem pretvarača valne duljina na izlaz prospojnika.

U modeliranju WDMPOP čvorova koji koriste optičke prospojnike koristi se slojeviti pristup u kojem se na jedan prospojnik dovode signali iste valne duljine. Tako će za mux/demux sustave s 8 valnih duljina biti minimalno potrebno 8 komutatora (slika 4.10). Kako su dimenzije prospojnika standardizirane (broj ulaza/izlaza su potencije broja 2) za jednu valnu duljinu može biti potrebno nekoliko prospojnika. Prospojnici velikih dimenzija zahtijevaju optička pojačala, jer pri povezivanju stupnjeva u prospojniku dolazi do gubitka snage signala. Signal ukupno prolazi kroz broj komutatorskih elemenata koji odgovara stupnju prospojnika. Kako se u ovom radu koriste prospojnici malih dimenzija (tipično 8×8) u dizajnu nisu uključena optička pojačala.



Slika 4.10 Slojeviti pristup modeliranju WDMPOP čvorova s optičkim prospojnicima

Signal se guši prolaskom kroz optički prospojnik zbog unesenih gubitaka u svakom komutatorskom elementu L_s , te zbog prolaska signala kroz sam element (gubici zbog Fresnelove refleksije i polarizacijskih modova) L_w . Gubici L_w se događaju pri prijelazu između komutatorskih stupnjeva. Svaki signal ukupno prolazi kroz $2\log_2 N$ komutatorskih elemenata te 4 puta ulazi ili izlazi iz komutatorskog stupnja, pa za ukupne unesene gubitke u optičkom prospojniku slijedi

$$L_{sw} = 2\log_2 NL_s + 4L_w. \quad (4.8)$$

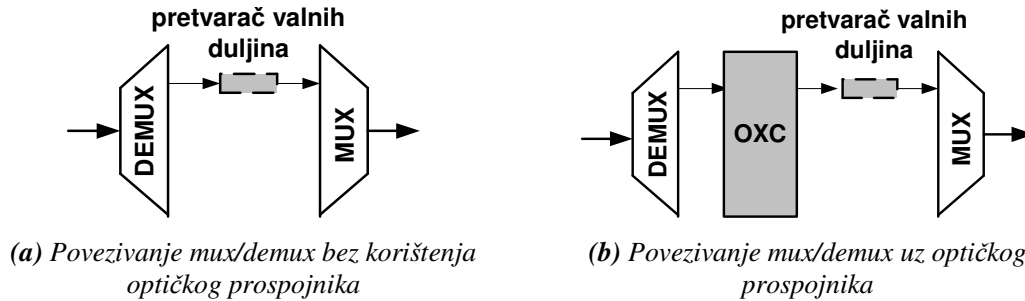
Modeliranje šuma preslušavanja u optičkom prospojniku opisano je u dijelu 6.2.2.

Optički prospojnik modeliran je klasom oXC, te sadrži komutatorsku matricu koja nije modelirana od zasebnih elementa. Opisani način modeliranja se uzima u obzir prilikom proračuna preslušavanja i gubitaka, no za samu funkcionalnost elementa (upravljivo prostorno spajanje demultipleksiranog WDM signala) nije potrebno zasebno modeliranje komutatorskih elemenata što bi usporilo simulaciju.

WDM multiplekser i demultiplekser

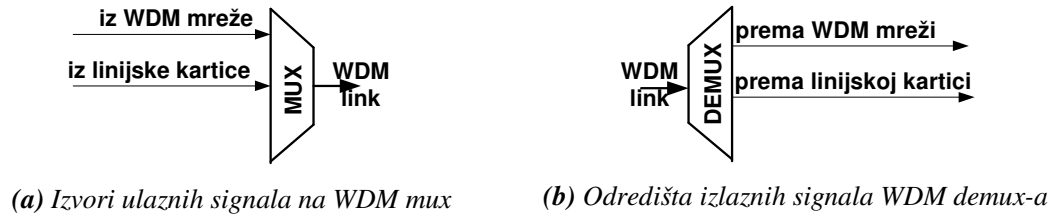
WDM multiplekseri i demultiplekseri (WDM mux/demux) su jedini obvezni dio WDMPOP čvora. Ostale WDM komponente ovise o funkcionalnosti čvora, tj. o odabranom mehanizmu zaštite, te tako i povezanost WDM mux i WDM demux ovisi o tim faktorima. Općenito oni mogu biti povezani na dva osnovna načina – korištenjem optičkog

prospojnika (slika 4.11b) ili bez njega (slika 4.11a). U oba slučaja je moguće korištenje pretvarača valnih duljina, što ovisi o tome da li je odabran dizajn uz dopuštanje pretvorbe valnih duljina ili bez nje.



Slika 4.11 Načini povezivanja mux/demux

Ulazni signali WDM multipleksera su u optičkoj domeni i mogu dolaziti izravno iz linijske kartice optičkim linkom s prijenosom u osnovnom pojasu, ili iz WDM mreže, odnosno iz demultipleksiranog signala (slika 4.12a). Analogno tome izlazi iz WDM demultipleksera mogu ići prema linijskoj kartici (prijenos u osnovnom pojasu), ili u WDM mrežu, tj. WDM multiplekser (slika 4.12b). Izlaz multipleksera i ulaz demultipleksera je WDM signal.



Slika 4.12 Povezanost mux/demux s linijskim karticama

Valne duljine koje ulaze u multiplekser su strogo definirane (ITU preporuke), te je stoga najčešće potreban pretvarač valnih duljina pri ulasku signala u WDM mrežu. U tablici 4.2 je dano 6 područja frekvencija uz rubne vrijednosti frekvencija i valnih duljina (*ITU grid*). Frekvencijski razmak između frekvencija istog područja je 0.1 THz, a različitih područja 0.05 THz. Pretpostavka je da je optički prijammnik u linijskoj kartici dovoljno osjetljiv na cijelo frekvencijsko područje koje se koristi u WDM prijenosu, pa da na izlasku signala iz zadnjeg demultipleksera nije potrebna pretvorba valne duljine.

Područje	Frekvencijski raspon [THz]	Raspon valnih duljina [nm]
L_{α}	186.00 – 190.90	1611.79 – 1570.42
L_{β}	186.05 – 190.95	1611.35 – 1570.01
C_{α}	191.00 – 195.90	1569.59 – 1530.33
C_{β}	191.05 – 195.95	1569.18 – 1529.94
S_{α}	196.00 – 200.90	1529.55 – 1492.25
S_{β}	196.05 – 200.95	1529.16 – 1491.88

Tablica 4.2 Dopuštene valne duljine u WDM prijenosu

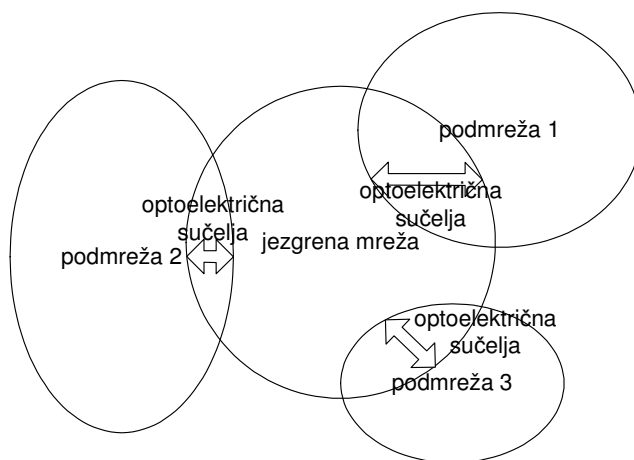
WDM multiplekser implementiran je klasom `WDMmux`, a demultiplekser klasom `WDMdemux`. Prilikom inicijalizacije multipleksera potrebno je navesti broj ulaznih portova, te pojas valnih duljina koje se žele koristiti. Nakon toga se automatski proračunavaju valne duljine

pridružene svakom ulazu multiplexera. Na ulaz multiplexera se ne može dovesti signal valne duljine koja ne odgovara valnoj duljini ulaza.

4.1.2 Modeliranje prijenosa signala između čvorova

Optički signal prijenosom u optičkoj domeni prolaskom kroz niz komponenti doživljava degradaciju u smislu aditivnog šuma i gušenja. Tijekom prijenosa je stoga potrebno napraviti 3R regeneraciju, da bi informacija koja se prenosi signalom ostala interpretabilna. Potpuna 3R regeneracija (*Re-shaping, Re-timing, Re-amplifying*) moguća je za sada samo konverzijom u električnu domenu i ponovnim vraćanjem signala u optičku. Kako se u ovom radu promatra sveoptička mreža koja je optički transparentna s kraja na kraj, ne promatraju se pretvorbe signala u električnu domenu i potpuna regeneracija. Ovakav zaključak je moguć jer se pri analizi promatra samo jezgrena mreža COST 239 studijskog slučaja (slika 5.7) gdje se radi o manjim udaljenostima između WDMPOP čvorova nego što je to u potpunom primjeru (slika 5.6). Zbog toga je moguće zanemariti utjecaje 3R regeneracije na performanse mreže i promatrati samo 1R regeneraciju u obliku pojačanja.

Ukoliko takav zaključak nije moguć (npr. dizajnira se geografski raspršena mreža s velikim udaljenostima između čvorova) može se primijeniti metoda podjele mreže na podmreže između kojih bi postojala sučelja u kojima bi se vršila opto - električna pretvorba i 3R regeneracija kako prikazuje slika 4.13.



Slika 4.13 Podjela mreže na podmreže i opto - električna sučelja

Signal pri svakom izlasku iz optičke domene (npr. pri dolasku prometa na usmjeritelj zbog razdvajanja agregiranog toka na tokove prema različitim odredištima) prolazi kroz 3R regeneraciju, no takvi slučajevi nisu analizirani kao ni slučajevi pretvorbe isključivo zbog regeneracije. Utjecaj pretvorbe između domena može znatno utjecati na kašnjenje i druge performanse mreže. Svakako dolazi do smanjenja raspoloživosti zbog novih komponenti koje čine fizički put kroz koji signal prolazi, ali i smanjenje BER zbog regeneracije signala kojoj se uklanja dodani šum.

U nastavku će se pretpostavljati da 3R regeneracija nije potrebna, te će se analizirati isključivo 1R regeneracija i to pojačanje signala.

Pojačanje signala se vrši na komponenti koja modelira optičko pojačalo, te se razlikuju dva slučaja – pojačanje signala u cijelom pojasu i pojačanje valno multipleksiranog signala. Razlika ne proizlazi iz građe optičkog pojačala već iz razmaka između optičkih pojačala na dionicama koje povezuju čvorove u mreži.

Optičko vlakno

Modeliranje optičkog vlakna nije provedeno na fizikalnom nivou (promatranje utjecaja disperzije i nelinearnih efekata, tj. utjecaja snage na indeks loma), već je modeliran utjecaj prijenosa na degradaciju performansi i to preko

1. gušenja i
2. kašnjenja signala.

Ukupno gušenje se može opisati eksponencijalnim zakonom

$$P(d) = P_0 e^{-\alpha d} \quad (4.9)$$

pri čemu je $P(d)$ optička snaga na udaljenosti d , P_0 snaga na ulazu u optičko vlakno, a α koeficijent prigušenja koji se obično izražava u dB/km

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{d} \log\left(\frac{P(d)}{P_0}\right) = 4.343\alpha. \quad (4.10)$$

Pri modeliranju gušenja obično se uzima $\alpha=0.22$ dB/km.

Gušenje djeluje na prigušenje snage i samog signala koji prenosi korisnu informaciju i dodanog šuma (šuma spontane emisije i šuma preslušavanja, dio 6.2).

Kašnjenje optičkog signala, tj. vrijeme koje je potrebno da signal propagira kroz vlakno duljine d iznosi

$$\Delta t = \frac{d}{v}, \quad v = \frac{c}{n} \quad (4.11)$$

gdje je v brzina širenja signala u vlaknu, za koju se može u prvoj aproksimaciji uzeti tipična vrijednost $300000/1.5=200000$ km/s.

Vidljivo je da je za modeliranje oba parametra dovoljno zadati

1. duljinu optičkog vlakna,
2. koeficijent gušenja α , te
3. indeks loma n .

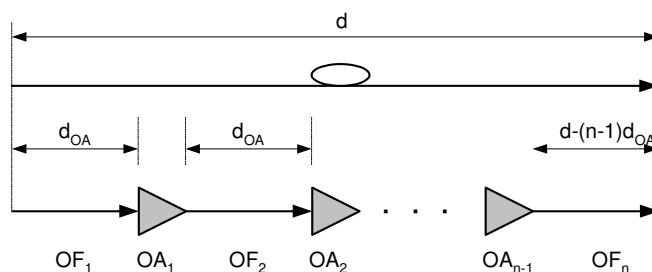
Optičko vlakno modelirano je klasom `ofiber` koja se ne koristi kao zaseban modul, već se uvijek nalazi unutar optičkog linka. Tri gore navedena parametra su ujedno i jedini parametri klase.

Optički link

Optički link je struktura koja se sastoji od niza optičkih vlakana međusobno povezanih optičkim pojačalima koja osiguravaju 1R regeneraciju u obliku kompenzacije gubitaka snage koje nastaju zbog gušenja optičkom vlaknu. Optički link je zadan s dva osnovna parametra

1. duljina d i
2. razmak između optičkih pojačala d_{OA} ,

kako prikazuje slika 4.14.



Slika 4.14 Modeliranje optičkog linka

Na temelju ta dva podatka se može izračunati ukupan broj potrebnih dionica optičkih vlakana

$$n = \left\lceil \frac{d}{d_{OA}} \right\rceil, \quad (4.12)$$

pri čemu sve dionice imaju duljinu d_{OA} , osim zadnje duljine $d - (n-1)d_{OA}$.

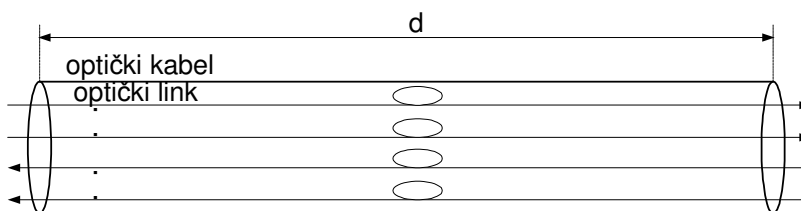
Potreban broj optičkih pojačala je $n-1$.

Udaljenost optičkih pojačala ovisi da li se radi o linku s prijenosom u cijelom pojasu (pristupni link) ili o prijenosu WDM signala. U prvom slučaju se u principu ne koriste optička pojačala (optički link se modelira jednim optičkim vlaknom) zbog kratkih udaljenosti, dok je tipična vrijednost za WDM prijenos $d_{OA} \in [40, 160]$ km.

Klasa oLink implementira optički link i parametrizirana je s ukupnom duljinom linka i udaljenošću između pojačala. Postoje dvije vrste linkova – oni koji služe za prijenos u cijelom pojasu (*baseband link*), te oni koji prenose WDM signal. Kod ovih prvih nije potrebno navesti udaljenost između pojačala, jer se podrazumijeva da za prijenos u cijelom pojasu (ukoliko on služi samo kao pristup WDM mreži) nije potrebno koristiti pojačala. Nakon inicijalizacije optičkog linka stvara se potreban broj optičkih pojačala i dionica optičkih vlakana koja ih povezuju (kod prijenosa u cijelom pojasu radi se o jednom neprekinutom segmentu).

Optički kabel

Optički kabel služi samo za agregaciju optičkih linkova kako prikazuje slika 4.15, te ne unosi nikakvu dodatnu funkcionalnost.



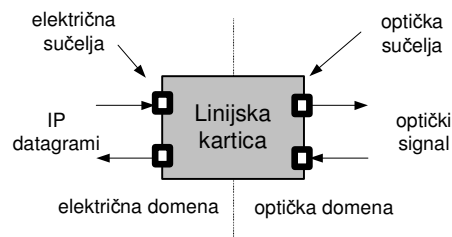
Slika 4.15 Optički kabel i optički linkovi

Osnovni razlog uvođenja ove komponente je stvaranje zavisnosti između optičkih linkova koji su fizički smješteni na istom putu. Prvenstveno se to odnosi na istu raspoloživost, jer je oko 80% kvarova optičkog linka predstavlja djelovanje vanjskog utjecaja (npr. presijecanje građevinskim strojem).

Optički kabel je modeliran klasom oCable i nema nikakve parametre osim liste optičkih linkova koje se nalaze u njemu.

Linijaska kartica

Linijaska kartica ima višestruku ulogu u modeliranom sustavu. Ona sadrži prijemnik/predajnik u električnoj i optičkoj domeni, te vrši opto - električnu pretvorbu. Ta se pretvorba odnosi na promjenu poruka iz IP datagrama (*Cosmos* modeliranje) u optički signal. Očito je da bi trebalo doći i do promjene u simulacijskoj domeni iz diskretne u kontinuiranu (npr. frekvencijski prikaz) koja je pogodnija za opis širenja optičkog signala. Takva domena bi zaista i bila nužna ukoliko bi se modelirali fizikalni efekti na razini samog signala u optičkim komponentama, no u ovom radu takav pristup nije korišten. Na slici 4.16 prikazan je izgled modula linijske kartice i njezina osnovna funkcionalnost.



Slika 4.16 Modeliranje linijske kartice

Linijaska kartica određuje format (npr. SDH, GbE, 10GbE) i brzinu prijenosa koja ovisi o odabranom formatu (razine SDH brzina ili fiksne brzine za GbE/10GbE). Odabir korištenog protokola i brzine prijenosa utječu na cijenu kartice, te je taj faktor analiziran u dijelu 5.4.

Linijaska kartice se mogu nalaziti samo u dva modula – IPNode modulu gdje služe kao sučelja za generatore/ponore prometa, te u IPRouter modulu gdje služe kao sučelja prema komutatorskoj matrici kako je opisano u sljedećem dijelu.

Optički predajnik i prijemnik modelirani su s obzirom na performanse mreže koje su se željele mjeriti. Za mjerenje BER je dovoljno predajniku pridružiti izlaznu snagu signala, a prijemniku ulaznu snagu signala i snage dodanog šuma spontane emisije i preslušavanja koje ulaze sa signalom, te šumove koji se dodaju u samom prijemniku (šum sačme – *shot noise*, te toplinski šum – *thermal noise*). Detaljnija analiza optičkog predajnika je dana u dijelu 6.2.3. pri računanju BER-a.

Linijaska kartica s optičkim mrežnim sučeljima implementirana je klasom `oIPLC`, dok je kartica s nedefiniranim sučeljima implementirana klasom `IPLC`. Kod klase `oIPLC` postoje predefinirane brzine prijenosa na izlazu koje ovise o protokolu (Sonet/SDH, GbE, 10GbE).

4.2 Modeliranje IP sloja

Modeliranje IP sloja je u ovom radu svedeno na osnovnu funkcionalnost potrebnu za opis prometnih zahtjeva i generiranje odgovarajućeg prometa. Odnos IP sloja s WDM slojem općenito ovisi o korištenom protokolnom složaju, te o načinu nadopunjavanja i podjele funkcionalnosti između ova dva sloja, odnosno implementaciji upravljačke ravnine.

4.2.1 Modeliranje IP prometa

IP promet koji ulazi u sveoptičku mrežu predstavlja agregaciju prometa iz mnogo IP izvora (npr. svih računala u nekom gradu), no uporaba Poissonovog procesa pri modeliranju agregiranog IP prometa je upitna. Stvarna mjerenja IP prometa naime pokazuju da Poissonov proces koji se koristi za prikaz međudolaznih vremena IP paketa ne daje zadovoljavajuće simulacijske rezultate u usporedbi s mjerenjima u stvarnoj mreži, jer se općenito međudolazna vremena IP paketa i na nižim razinama agregacije (npr. lokalna

mreža) ne podudaraju s eksponencijalnim [4][5][6][7]. Bolje simulacijski rezultati se dobivaju korištenjem samosličnog procesa [8] pri modeliranju međudolaznih vremena, koji ima bitno drugačije pretpostavke od Poissonovog procesa. Osnovna razlika između samosličnog i Poissonovog prometnog modela je što samosličan model ukazuje na sličnost prometnog opterećenja koja se pojavljuje kroz duži vremenski period promatranja, što nije slučaj kod Poissonov modela. Duljina snopa (*burst*) je kod samosličnog procesa nepredvidljiva i nema neku podrazumijevanu (srednju) vrijednost, već se pojavljuje u širokim vremenskim rasponima, što rezultira dugim periodima zagušenja mreže, velikim koncentracijama gubitka paketa, te slaboj ovisnosti između povećanja veličine međuspremnika i učestalosti gubitka paketa. Zbog poteškoća u predviđanju vremenskog trajanja opterećenja mreže prometom, nije moguće efikasno projektiranje mreže u smislu optimalnog smanjenja zagušenja. Vršna opterećenja su u usporedbi s Poissonovim prometnim modelom učestalija.

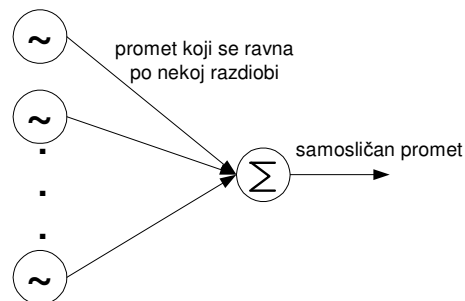
Implementirana su dva načina generiranja samosličnog procesa:

1. pomoću Pareto razdiobe, ili
2. pomoću razlomljenog Gaussovog šuma

U ovom radu je pretpostavljeno da se duljina IP paketa ravna prema eksponencijalnoj razdiobi.

Generiranje samosličnog prometa agregacijom prometa

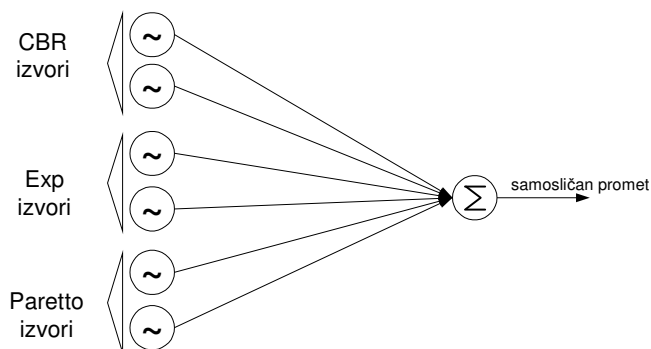
Ovaj način polazi od pretpostavke da je samosličan proces moguće generirati polazeći od same prirode nastanka agregiranog IP prometa, a to je generiranje IP paketa iz velikog broja međusobno neovisnih IP izvora (slika 4.17).



Slika 4.17 Ideja agregacije prometa

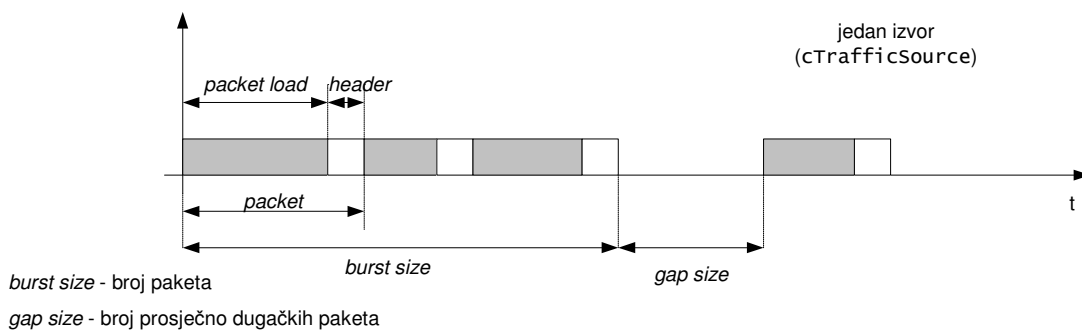
Svaki od izvora može koristiti jedan od tri načina generiranja međudolaznog vremena paketa koji iz njega izlaze (*interpacket gap size*), odnosno vremena između snopova (slika 4.18):

1. CBR,
2. eksponencijalni, ili
3. Pareto.



Slika 4.18 Vrste pojedinačnih izvora koje čine agregirani promet

Duljina paketa (*packet load*) se ravna u sva tri slučaja po eksponencijalnoj razdiobi, a veličina zaglavlja (*header*) je konstantna. Na slici 4.19 prikazan je izlaz iz pojedinačnog IP izvora.



Slika 4.19 Izlaz iz pojedinačnog izvora

Ulazni parametri ovise o tipu korištenog prometa. Kod CBR prometa nije potrebno parametrizirati pojedinačni IP izvor, kod eksponencijalnog prometa se navodi srednja duljina snopa iz koje se eksponencijalnom razdiobom s tom srednjom vrijednošću dobivaju pojedinačne duljine snopova, dok je kod Pareto prometa potrebno navesti parametre oblika (*onShape* i *offShape*) kao što prikazuje tablica 4.3.

Tip prometa	Ulazni parametri
CBR	-
eksponencijalni	srednja duljina snopa (<i>meanBurstSize</i>)
Pareto	<i>onShape</i> , <i>offShape</i> parametar

Tablica 4.3 Ulazni parametri potrebni za modeliranje IP prometa

U sva tri slučaja potrebno je navesti i srednju duljinu paketa, duljinu zaglavlja, opterećenje izlaznog linka, te brzinu generiranja prometa svakog od izvora.

Prema postavljenom opterećenju izlaznog linka i tipu prometa računaju se ostali parametri od kojih su najvažniji

1. veličina snopa (tablica 4.5), te
2. vremenski razmak između snopova (tablica 4.6)

Tablica 4.4 prikazuje parametre koji su potrebni za izračunavanje gore navedenih, a koji se računaju iz ulaznih vrijednosti.

Tip prometa	Parametar koji se računa iz ulaznih parametara
CBR	Veličina razmaka između snopova (<i>gap</i>) $gap = \frac{1}{load - 1} * (meanLoadLength + headerLength) * MIN_BURST$
eksponencijalni	Srednja veličina razmaka između snopova (<i>meanGap</i>) $meanPctSize = meanLoadLength + headerLength$ $meanGap = meanBurstSize * \left(\frac{meanPctSize}{load} - meanPctSize \right)$
Pareto	Minimalna veličina razmaka između snopova (<i>minGap</i>) $on_coef = \frac{1 - SMALL_VAL^{1 - \frac{1}{onShape}}}{1 - \frac{1}{onShape}}$ $off_coef = \frac{1 - SMALL_VAL^{1 - \frac{1}{offShape}}}{1 - \frac{1}{offShape}}$ <p><i>SMALL_VAL</i> – proizvoljna konstanta male vrijednosti $meanPctSize = meanLoadLength + headerLength$ $min\ Gap = \frac{on_coeff}{off_coeff} * MIN_BURST * \left(\frac{meanPctSize}{load} - meanPctSize \right)$ $meanBurst = MIN_BURST * on_coeff$ $meanGap = min\ Gap * off_coef$ <i>MIN_BURST</i> – najmanja dozvoljena duljina snopa</p>

Tablica 4.4 Parametri pojedinačnih izvora koji se računaju iz ulaznih parametara

Tip prometa	Veličina snopa (<i>burst size</i>) u broju paketa (rezultat se zaokružuje na prvi veći cjeli broj)
CBR	<i>MIN_BURST</i>
eksponencijalni	$EXP(1) * \left(\frac{meanBurstSize}{MIN_BURST} - MIN_BURST \right) + MIN_BURST$
Pareto	$PAR(off_shape) * minGap$

Tablica 4.5 Veličina snopa kod pojedinačnih izvora

Tip prometa	Veličina razmaka između snopova (<i>gap size</i>) u oktetima	Veličina paketa u oktetima
CBR	<i>gap</i>	$EXP(meanLoadLength) + headerLength$
eksponencijalni	$EXP(1) * meanGap$	$EXP(meanLoadLength) + headerLength$
Pareto	$PAR(on_shape) * MIN_BURST$	$EXP(meanLoadLength) + headerLength$

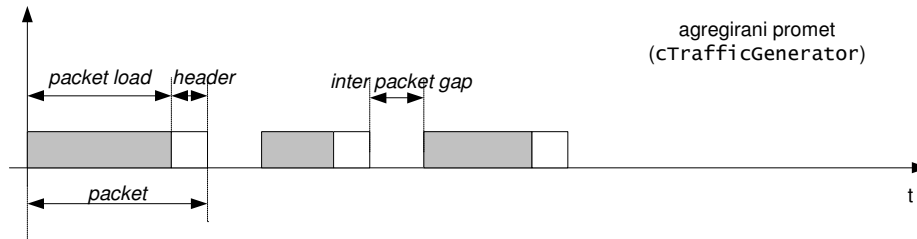
Tablica 4.6 Veličina razmaka između snopova (*gap*) kod pojedinačnih izvora

Promet iz pojedinačnih izvora se agregira u konačan izlazni promet iz generatora IP prometa. Generator je parametriziran

1. brojem i tipom pojedinačnih izvora s njihovim parametrima,
2. brzinom generiranja paketa, te
3. razmakom između paketa izraženim u oktetima (modeliranje dodavanja zaglavlja na nižim slojevima).

Osnovni problem agregacije paketa je razrješavanje situacije u kojem dolazi do preklapanja paketa u kojoj jedan izvor započinje slati paket za vrijeme slanja paketa iz

nekog drugog izvora. Vrijeme sljedećeg paketa koji će biti generiran iz izvora računa se kao



Slika 4.20 Izlaz iz generatora prometa (agregirani promet)

$$nextPctTime = \max\left(\frac{curPctLength}{speed1}, \frac{nextPctLength}{speed2}\right), \quad (4.13)$$

pri čemu je

curPctLength – duljina paketa koji se upravo odašilje iz generatora,
nextPctLength – duljina paketa koji iz izvora koji je sljedeći spreman za slanje,
speed1 – brzina generatora,
speed2 – brzina izvora koji će sljedeći poslati paket.

Korisnička klasa koja implementira funkcionalnost generatora samosličnog prometa s idejom agregacije prometa je `gTrafficGenerator`. Klasa sadrži listu pojedinačnih generatora (klasa `gTrafficSource`) koji su parametrizirani razdiobom, brzinom izlaznog linka, srednjom duljinom paketa i ostalim parametrima koji ovise o odabranoj razdiobi.

Generiranje samosličnog prometa uporabom generatora Gaussovog šuma

Razlomljeni Gaussov šum (*Fractional Gaussian Noise*) je samosličan stohastički proces koji služi kao osnova za generiranje niza samosličnih uzoraka ([1]).

Algoritam je prvi opisao Vern Paxton u radu [2].

Ulazi u algoritam:

1. željeni Hurstov parametar (H , iz perioda $[1/2, 1]$), i
2. broj uzoraka u generiranom izlaznom slijedu (n)

Potrebni algoritmi:

1. Gamma funkcija (uzeto je prvih 7 članova asimptotskog niza koji izlazi iz Stirlingove formula za računanje Eulerove gamma funkcije definirane integralom

$$G(x) = \int_0^{\infty} (t^{x-1} * e^{-t}) dt, \quad \text{Re}(z) > 0, \quad (4.14)$$

2. brza Fourierova transformacija (FFT – *Fast Fourier Transform*), i
3. inverzna brza Fourierova transformacija (iFFT)

Koraci algoritma:

1. konstruira se slijed vrijednosti $\{f_1, \dots, f_n/2\}$, gdje je $f_j = f(2\pi j/n; H)$, koji odgovara spektru snage FGN procesa za frekvencije u rasponu $2\pi/n$ do π . $f(\lambda; h)$ je funkcija spektra snage za FGN proces,
2. svaka od vrijednosti $\{f_i\}$ se množi sa neovisnom slučajnom varijablom koja se ravna po eksponencijalnoj razdiobi srednje vrijednosti 1 ("*Fuzzing*"),

3. konstruira se slijed kompleksnih vrijednosti $\{z_1, \dots, z_{n/2}\}$, pri čemu je $|z_i| = \sqrt{f_i}$, a faza od z_i jednoliko raspodijeljena između 0 i 2π ,
4. konstruira se slijed $\{z_0', \dots, z_{n-1}'\}$ kao proširena verzija $\{z_1, \dots, z_{n/2}\}$ pri čemu je

$$\begin{aligned} &0, && \text{ako } j = 0, \\ &z_j' = z_j, && \text{ako je } 0 < j \leq n/2, \text{ i} \\ &\text{conj}(z_{n-j}), && \text{ako je } n/2 < j < n, \end{aligned}$$

5. nad $\{z_j'\}$ se obavi inverzna Fourierova transformacija, pri čemu se dobiva aproksimativni FGN slijed uzoraka $\{x_i\}$.

Funkcija spektra snage FGN izrađena je prema [3]. Proračun je ubrzan Stirlingovom aproksimacijom Gamma funkcije i Paxtonovom aproksimacijom β dijela Beranove formule.

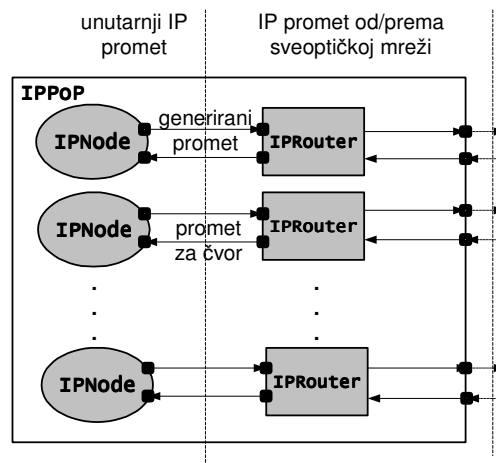
4.2.2 IPPoP modul

IPPoP modulom modelira se osnovna funkcionalnost IP sloja potrebna za generiranje ulaza u sveoptičku mrežu, a koja uključuje:

1. generator IP prometa, i
2. IP usmjeritelj.

Modul se sastoji od dva osnovna dijela:

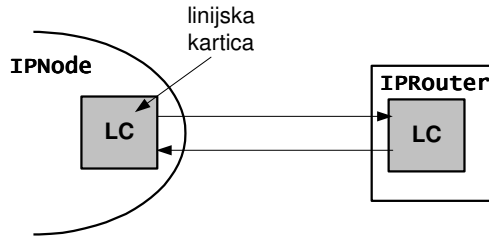
1. IPNode klasa koja služi kao izvor i ponor IP prometa, te
2. IPRouter klasa koja modelira funkcionalnost IP usmjeritelja.



Slika 4.21 Struktura IPPoP modula

Drugi dio prometa koji dolazi na usmjeritelj čini izlazni promet iz sveoptičke mreže kako prikazuje slika 4.21.

IP usmjeritelj povezan je s izvorom IP prometa preko linijskih kartica (LC - Line Card) što prikazuje slika 4.22. Veze unutar IPPoP čvora nisu funkcionalno modelirane, tj. pretpostavljeno je da su udaljenosti između izlaznog IP entiteta (IPNode modula) i IP usmjeritelja dovoljno male da bi se zanemarili unutar analize performanse mreže.



Slika 4.22 Veza između IPNode modula i IPRouter modula

Položaji IPPoP čvorova se podudaraju s položajem gradova što je bitno pri zadavanju IP prometnih zahtjeva, odnosno modeliranju IPNode modula unutar IPPoP čvora.

4.2.3 IPNode modul

IPNode modul sadrži generatore IP prometa čiji je broj i kapacitet određen veličinom IP zahtjeva između IPPoP čvorova (tj. gradova u ulaznoj topologiji). Prometni zahtjevi mogu biti određeni na dva načina:

1. matricom prometnih zahtjeva, te
2. podacima o broju stanovnika svakog od gradova i matricom udaljenosti gradova.

Prometni zahtjevi se između grada A s populacijom N_A i grada B s populacijom N_B , te udaljenošću D_{AB} računaju prema PD (*Population - Distance*) prometnom modelu

$$C_{AB} = K \frac{N_A N_B}{D_{AB}}, \quad (4.15)$$

pri čemu je $K=2.5$ faktor koji služi za procjenu dugoročnih zahtjeva [9]. Postoji složeniji PFD model (*Population - Factor - Distance*) model koji u obzir uzima obilježja zemlje (površina, bruto nacionalni proizvod, ...) preko penetracijskih faktora F_s i F_t :

$$C_{AB} = K F_s F_t \frac{N_A N_B}{D_{AB}}, \quad (4.16)$$

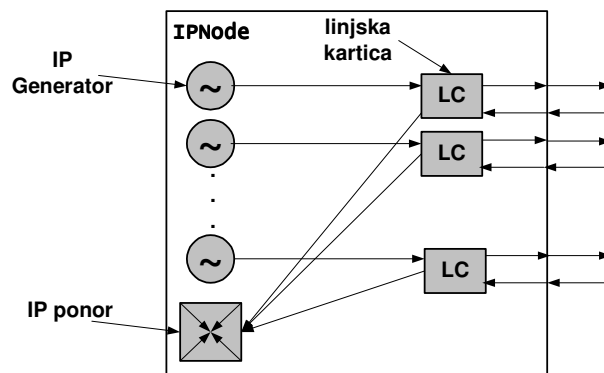
koji daje bolje podudaranje sa stvarnim prometnim zahtjevima u usporedbi s PD modelom.

Broj generatora IP prometa koji modeliraju prometne zahtjeve od čvora A prema čvoru B određuju se prema

$$N_{GA,B} = \left\lceil \frac{C_{AB}}{C_{\max}} \right\rceil, \quad (4.17)$$

pri čemu je C_{\max} najveći raspoloživi kapacitet linijske kartice (npr. STM - 64/OC-192 ako se koristi Sonet/SDH uokvirivanje, 1 Gbit/s ako se koristi Gigabit Ethernet,...). Svaki generator je spojen s linijskom karticom koja ga dalje povezuje s IP usmjeriteljem i sveoptičkom mrežom. IPPoP čvor sadrži onoliko IPNode čvorova koliko izlazni promet IP promet ima odredišta.

Uz generatore IP prometa IPNode modul sadrži i ponor prometa na koji dolazi sav IP promet čije je odredište promatrani IPPoP čvor. Na slici 4.23 prikazana je struktura IPNode modula.



Slika 4.23 Struktura IPNode modula

4.2.4 IPRouter modul

IPRouter modul služi za usmjeravanje prometa na IP razini korištenjem komutatorske matrice (*switched backplane*). Usmjeritelj se sastoji od dva osnovna tipa modula:

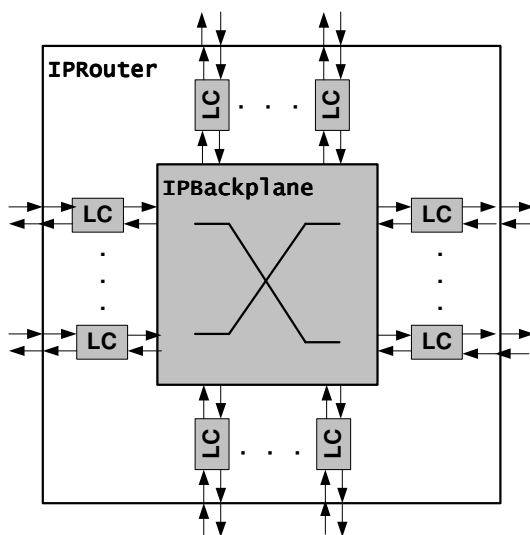
1. komutatorska matrica, i
2. linijske kartice.

Komutatorska matrica određena je s dva parametra:

1. broj ulaza (dimenzija), i
2. najveći ukupni kapacitet prospajanja.

Najveći dopušteni broj linijskih kartica određen je dimenzijom komutatorske matrice.

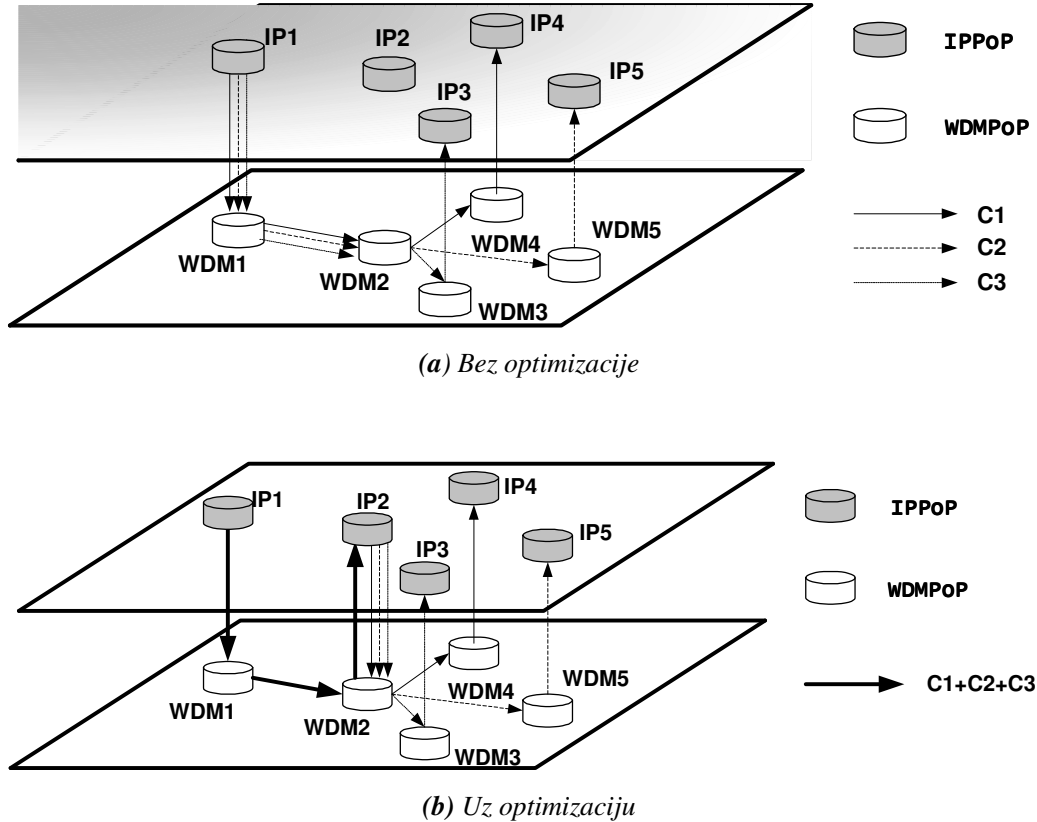
Slika 4.24 prikazuje strukturu IPRouter modula.



Slika 4.24 Struktura IPRouter modula

Usmjeritelj nije potreban ukoliko se IPPoP čvor modelira tako da se svakom pojedinom IP prometnom zahtjevu (elementu u matrici prometnih zahtjeva) pridruži odgovarajući broj generatora IP prometa, tj. jedan IPNode modul. U tom slučaju će jednom valnom putu u optičkoj mreži biti pridružen IP tok s jednim odredištem, te nema potrebe za izlaskom tog toka iz optičke domene do dolaska na odredište. Ukoliko se međutim vrši optimizacija u

kojoj se minimizira cijena pridruženih linijskih kartica [10], tada će jednom valnom putu biti općenito pridružen agregirani IP promet koji se sastoji od tokova s različitim odredištem, no koji dijele dio puta. U tom slučaju će biti potrebno usmjeravanje na IP sloju koje će razdvojiti promet. Na slikama 4.25a i b prikazani su slučajevi jednostavnog pridjeljivanja linijskih kartica bez optimizacije (a) i s optimizacijom (b).



Slika 4.25 Dodjeljivanje linijskih kartica

U oba slučaja matrica prometnih zahtjeva (dio koji je od interesa) izgleda kao

$$\begin{matrix} & IP2 & IP3 & IP4 & IP5 \\ IP1 & \begin{bmatrix} 0 & C1 & C2 & C3 \end{bmatrix} \\ IP2 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

U slučaju *a* matrica prometnih zahtjeva služi izravno kao predložak za stvaranje 3 IPNode modula unutar *IP1* čvora, te 2*3 linijske kartice koje se pridodaju poslužitelju. Formiraju se dakle tri neovisna toka koja ulaze u sveoptičku mrežu u čvoru *WDM1*, i ne izlaze iz optičke domene do dolaska do odredišta, odnosno čvorova *WDM3*, *WDM4* i *WDM5*.

Slučaj *b* temelji se na činjenici da sva tri toka dijele dio puta između čvorova *WDM1* i *WDM2*, te da se stoga matrica prometnih zahtjeva može napisati kao

$$\begin{matrix} & IP2 & IP3 & IP4 & IP5 \\ IP1 & \begin{bmatrix} C1+C2+C3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ IP2 & \begin{bmatrix} 0 & C1 & C2 & C3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

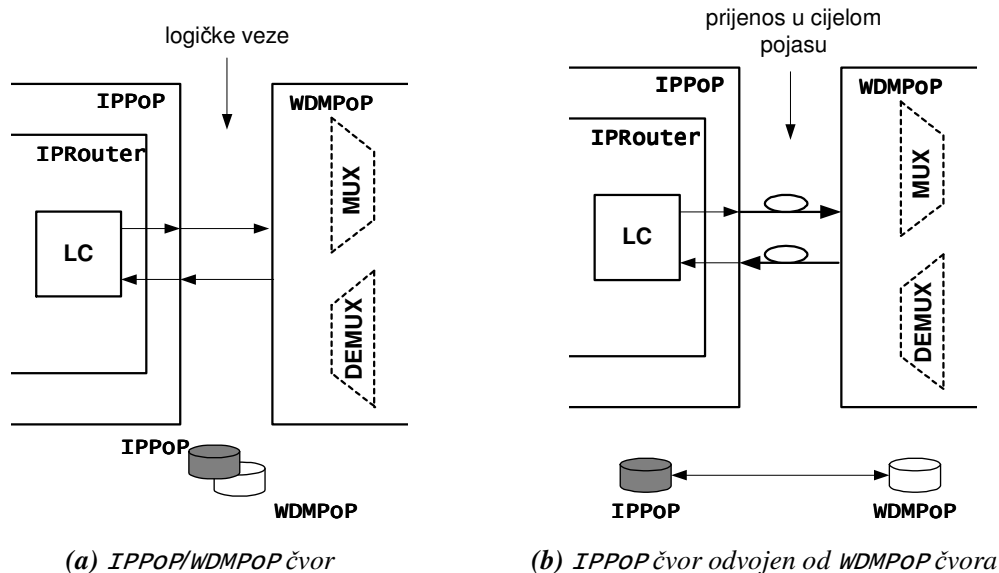
Treba naglasiti da će se pritom formirati IPNode modul u čvoru *IP1* s izlaznim kapacitetom *C1+C2+C3*, ali da se u čvoru *IP2* neće formirati 3 IPNode modula, jer su prometni zahtjevi između čvorova *IP2* i *IP3*, *IP4* te *IP5* posljedica ulaznog prometa u čvor *IP2* iz čvora *IP1*, a ne nekog internog prometa generiranog u samom čvoru *IP2*. Posljedica

ove transformacije je napuštanje optičke domene u čvoru WDM2 zbog potrebe za razdvajanjem agregiranog toka na dijelove, jer ti tokovi u daljnjem dijelu puta nemaju zajedničkih fizičkih elemenata (WDM linkova). Optimizacija cijene linijskih kartica se razmatra u dijelu 5.4.

4.3 Odnos IPPoP i WDMPoP čvorova

IPPoP i WDMPoP čvorovi mogu biti u dva osnovna položaja

1. IPPoP čvor fizički je realiziran na istom mjestu kao i WDMPoP čvor (slika 4.26a), i
2. IPPoP čvor realiziran je kao izdvojeni (zasebni) čvor (slika 4.26b)



Slika 4.26 Mogući odnosi IPPoP i WDMPoP čvorova

U prvom slučaju se dakle radi o jednom čvoru sastavljenom od IPPoP i WDMPoP modula (IPPoP/WDMPoP čvor). Kako se radi o maloj udaljenosti između modula (ista geografska pozicija) nije potrebno modelirati vezu između čvorova optičkim linkom, već je dovoljno module povezati idealnim logičkim vezama. Treba naglasiti da su sučelja optičke kartice u stvarnosti zaista povezana optičkim vlaknom s ulazom u sveoptičku mrežu, no kako se radi o malim udaljenostima efekti koji bi mogli utjecati na performanse mreže (npr. gušenje) se mogu zanemariti.

U drugom slučaju je IPPoP čvor izdvojen te je potrebno modelirati optički link između IPPoP čvora i WDMPoP čvora. U ovom slučaju se radi o prijenosu u cijelom pojasu (bez valnog multipleksa), pa je potrebno razlikovati takav optički link od optičkog linka koji se koristi u WDM prijenosu. U ovom slučaju nije potrebno stavljati optička pojačala na standardnim WDM udaljenostima (80-160 km), već je u principu moguće cijeli link modelirati samo jednim optičkim vlaknom, jer nema potrebe za pojačavanjem signala pri prijenosu u cijelom pojasu na udaljenostima koje su tipične za ovaj slučaj i koje ne premašuju nekoliko stotina kilometara. To je posljedica činjenice da se općenito svakom IPPoP čvoru kao ulazna točka u WDM mrežu dodjeljuje najbliži WDMPoP čvor. Preliminarni dizajn u kojem se određuju položaji WDMPoP čvorova (IPPoP čvorovi određeni su najčešće položajem gradova) neće dozvoljavati prevelike udaljenosti od IPPoP čvora do prvog WDMPoP čvora iz funkcionalnih razloga. Nema naime smisla graditi transportnu mrežu daleko od izvora prometa.

Svi optički linkovi između jednog IPPoP i WDMPoP čvora pripadaju istom pristupnom kabeu, pa se stoga dijele istu raspoloživost.

Signal se u cijelom pojasu prenosi valnom duljinom koja odgovara valnoj duljini sučelja na linijskoj kartici. Općenito se ne radi o predefiniciranoj WDM valnoj duljini, osim ako sučelje nije obojeno. Stoga se pri ulazu signala u sveoptičku mrežu najčešće radi valna konverzija.

4.4 Logičke strukture za opis putova u WDM mreži

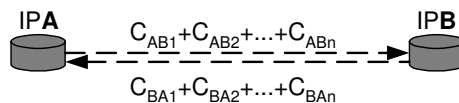
Jedan od ulaznih parametara optimizacije i simulacije sveoptičke mreže su podaci položaju IPPoP čvorova i njima pridruženih WDMPoP čvorova. Prometni zahtjevi između IPPoP čvorova se zadaju eksplicitno u obliku prometne matrice ili se računaju iz populacije pridružene IPPoP čvoru (gradu) prema nekom algoritmu (npr. PD algoritmu). Treba naglasiti da je prometna matrica u najvećem broju slučajeva dijagonalno simetrična, odnosno da su prometni zahtjevi između čvorova A i B najčešće jednaki onima između čvorova B i A . Simetričnost je opravdana činjenicom da se radi o širokopojasnoj mreži, odnosno o prometu koji je agregiran iz puno izvora IP prometa.

Zadane prometne zahtjeve između čvorova A i B treba opisati pogodnim logičkim strukturama koje će omogućiti

1. rezervaciju fizičkog puta (komponentata) u WDM mreži, i
2. jednostavan proračun performansi uspostavljene veze

Predložena je hijerarhija od 4 razine logičkih struktura (od nižih prema višim):

1. valni kanal (WCH – *Wavelength Channel*),
2. valni put (WP – *Wavelength Path*),
3. logički kanal (LCH – *Logical Channel*), i
4. logička veza (LC – *Logical Connection*).



Slika 4.27 Prometni zahtjevi između čvorova IPA i IPB

Navedeni pojmovi će biti objašnjeni u narednim dijelovima na primjeru veze između IPPoP čvorova IPA i IPB . Prometni zahtjevi između čvorova izraženi su u obliku sume kapaciteta $C_{AB1} + C_{AB2} + \dots + C_{ABn}$ od čvora IPA prema čvoru IPB , odnosno $C_{BA1} + C_{BA2} + \dots + C_{BAn}$ od čvora IPB prema čvoru IPA (slika 4.28). Kapaciteti odgovaraju brzinama prijenosa sučelja linijskih kartica pridruženih usmjeriteljima u tim čvorovima na koja se usmjerava promet prema čvoru IPB (u čvoru IPA) odnosno IPA (u čvoru IPB).

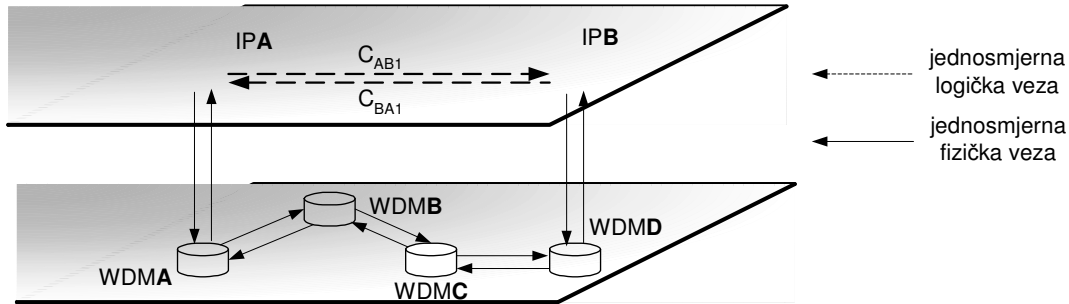
4.4.1 Valni kanal

Valni kanal je najjednostavnija logička struktura i ujedno veza logičke hijerarhije s fizičkim komponentama. On predstavlja jednosmjernu vezu između rubnih čvorova. Ukoliko se mijenja valna duljina signala unutar jednog valnog kanala govori se o virtualnom valnom kanalu.

Prvi korak u određivanju niza optičkih linkova, WDMPoP čvorova i komponentata (pojačala, multipleksa, demultipleksa, valnih pretvarača i prospojnika) kroz koje prolazi promet između dva IPPoP čvora predstavlja određivanje najkraćeg puta u WDM mreži između rubnih WDMPoP čvorova koji su pridruženi IPPoP čvorovima, odnosno koji predstavljaju

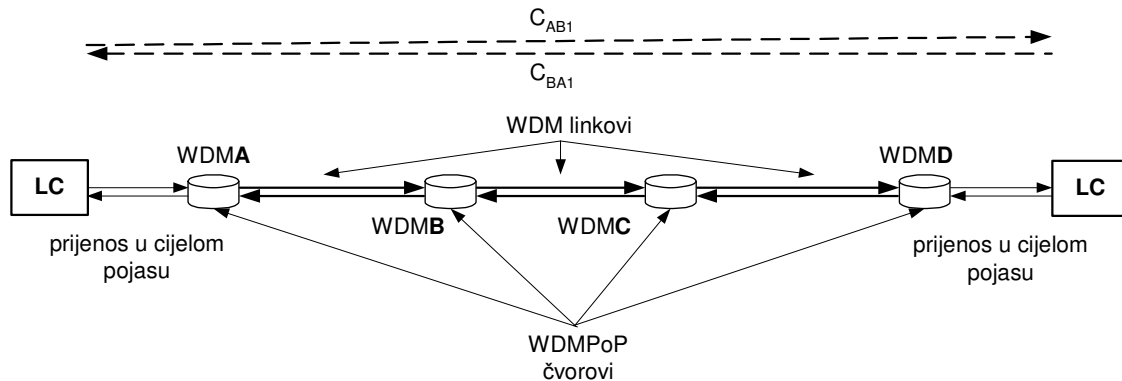
ulaznu točku IP prometa u WDM mrežu. To pridruživanje može biti eksplicitno (IP/WDMPoP čvor) ili se može IPPoP čvoru pridružiti najbliži WDMPoP čvor. U primjeru (slika 4.28) je čvoru *IPA* pridružen čvor *WDMA*, a čvoru *IPB* čvor *WDMD*.

Analizira se samo jedan od parcijalnih kapaciteta (C_{AB1} odnosno C_{BA1}) u zadanim prometnim zahtjevima. Postupak za ostale kapacitete je analogan. Najčešće vrijedi da su prometni zahtjevi simetrični, tj. da vrijedi $C_{AB1} = C_{BA1}$.



Slika 4.28 Prijenos IP prometa kroz sveoptičku mrežu

Zadani prometni zahtjevi prenose se kroz sveoptičku mrežu, odnosno niz optičkih linkova i WDMPoP čvorova. Na slici 4.29 prikazana je veza između logičkog puta između čvorova *IPA* i *IPB*, te fizičkog puta koji prolazi čvorovima *WDMA*, *WDMB*, *WDMC* i *WDMD* u sveoptičkoj mreži. Treba naglasiti da se pojam logičke veze odnosi na IP sloj gdje čvorovi *IPA* i *IPB* mogu izravno komunicirati, što se odražava u mogućnosti izravnog adresiranja čvora *IPB* u čvoru *IPA* i obratno preko IP adrese. Kako je pretpostavka da nema agregacije prometa, tako nema niti potrebe za dodatnim razdvajanjem, odnosno usmjeravanjem prometa na putu između čvorova *IPA* i *IPB* (promet ne napušta optičku domenu dok ne stigne do odredišta), tako da se topologija IP sloja podudara s topologijom na sloju podatkovne veze.

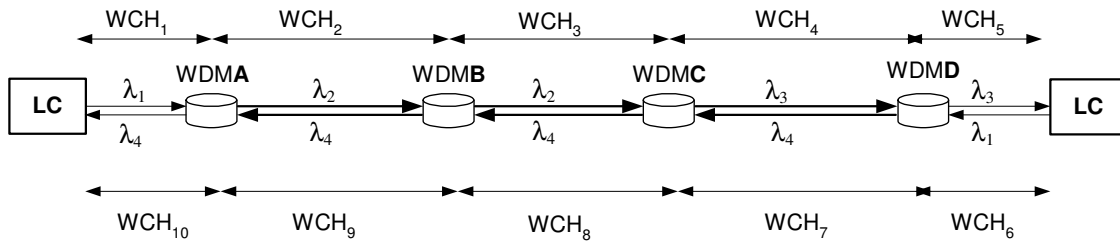


Slika 4.29 Logički i fizički putovi između čvorova *IPA* i *IPB*

Takva logička veza se dakle sastoji od dva jednosmjerna puta kojima odgovara niz fizičkih komponenti na fizičkom sloju. Ključne podatke za opis puta rezerviranog za prijenos signala čine

1. WDM linkovi,
2. WDMPoP čvorovi, i
3. mehanizam zaštite.

Analiza ovisnosti strukture WDMPOP čvorova i mehanizma zaštite biti će dana u kasnijim dijelovima. Treba naglasiti da je osnovni podatak za opis WDM link i korištena valna duljina za prijenos prometa, jer je pomoću tog podatka moguće odrediti WDMPOP čvorove kroz koje promet prolazi, a uz zadani mehanizam zaštite i WDM komponente unutar čvorova koje poslužuju promet. Iz ovih razloga je kao veza logičke hijerarhije i fizičke strukture odabran upravo par podataka (optički link, valna duljina) koji se naziva valnim kanalom (*WCH - wavelength channel*). Na slici 4.30 prikazani su valni kanali koji služe u ostvarivanju veze između čvorova *IPA* i *IPB*.

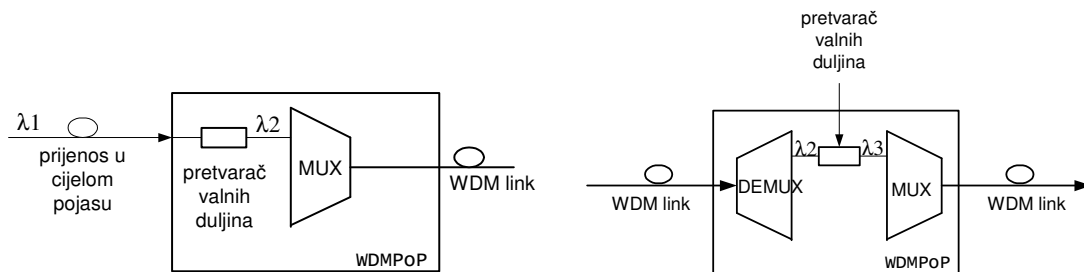


Slika 4.30 Valni kanali u ostvarivanju veze između čvorova *IPA* i *IPB*

Treba naglasiti da se cijelo vrijeme promatra prijenos u oba smjera i to u isto vrijeme, odnosno ne analizira se pasivna optička mreža. Uz to je najčešći slučaj simetričnosti zahtjeva, pa će i prijenos najčešće ići istim komponentama, ali u suprotnim smjerovima. Općenito to ne mora biti slučaj, tj. može se raditi o razdvojenim putovima, ukoliko npr. postoje ograničenja u ukupnom kapacitetu prometa kojeg opslužuje WDMPOP čvor, a prometni zahtjevi su asimetrični. U tom slučaju pridružuje se linijska kartica poslužitelju s kapacitetom sučelja $\max(C_{AB1}, C_{AB2})$. Takav se slučaj u ovom radu neće razmatrati, jer ne unosi nikakve konceptualne promjene, a i nije u skladu sa stvarnim prometnim zahtjevima, odnosno paradigmom širokopojasne mreže.

Iz ovog primjera je vidljivo da valna duljina koja se koristi nije konstantna. Sasvim općenito do promjene valne duljine signala dolazi na pretvaraču valnih duljina (*transponder*) koja može nastati

1. pri ulasku signala u WDM mrežu, tj. prije multipleksiranja (slika 4.31a), ili
2. nakon demultipleksiranja (slika 4.31b)



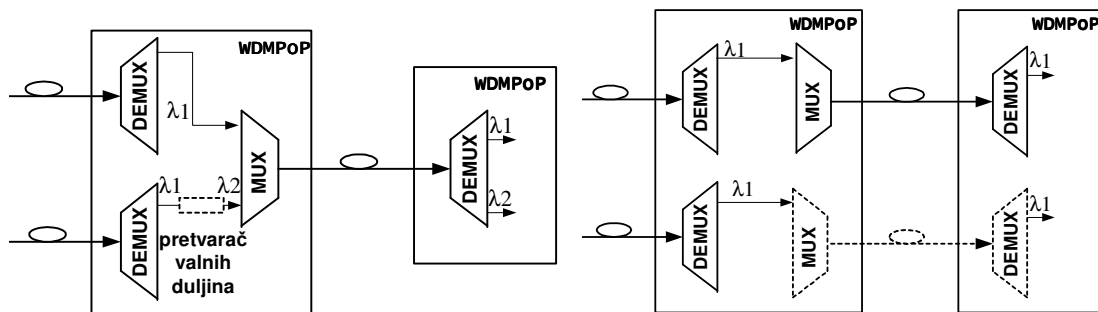
(a) Pretvorba valne duljine signala pri ulasku u WDM mrežu

(b) Pretvorba valne duljine signala nakon demultipleksiranja

Slika 4.31 Mjesta pretvorbe valnih duljina

Prvi slučaj je puno učestaliji, jer su valne duljine signala pri ulasku na ulaz WDM multipleksera strogo određene, pa je potrebno izvršiti pretvorbu iz valne duljine laserskog izvora na linijskoj kartici u odgovarajuću valnu duljinu koja ovisi o tome na koji se ulaz multipleksera signal privodi. Takva se pretvorba može izbjeći upotrebom obojenih sučelja (*colored interfaces*) u linijskim karticama koje emitiraju signal na nekoj od standardnih WDM valnih duljina.

Drugi slučaj pretvorbe nakon demultipleksiranja je opcionalan i može se izbjeći u fazi strukturne sinteze WDMPoP čvora. Valni pretvarači unose veliku fleksibilnost u fazu dizajna, no njihova uporaba nije u svim slučajevima pogodna zbog njihove relativno visoke cijene i komplicirane izvedbe. Ukoliko njihova uporaba ne unosi bitna poboljšanja što se tiče funkcionalnosti (performansi) ili cijene, faza dizajna se provodi bez korištenja pretvarača u ulozi predloženoj ovim slučajem. Tada će signal cijelu sveoptičku mrežu prijeći na jednoj valnoj duljini (uz vjerojatnu pretvorbu samo pri ulazu).



(a) S uporabom valnog pretvarača

(b) Bez uporabe valnog pretvarača

Slika 4.32 Strukturiranje WDMPoP čvorova

Na slikama 4.32a i b su prikazani slučajevi dizajna s i bez primjene valnog pretvarača. Vidljivo je da je u *a* slučaju u čvor dodan jedan pretvarač valnih duljina čije ispuštanje u *b* slučaju implicira dodavanje jednog multipleksera i demultipleksera što može značiti i znatno povećanje cijene. Problem optimalnog dodjeljivanja valnih duljina uz kriterije optimizacije minimalne cijene ukupne WDM opreme, te minimalnog skupa dodijeljenih valnih duljina koje opslužuju zadanu prometnu matricu predstavlja problem za sebe i nije razmatran u ovom radu.

Ove slike predstavljaju najjednostavniji slučaj sinteze čvora. Između WDM demultipleksera i multipleksera najčešće se nalazi optički prospojnik čija funkcija ovisi o mehanizmu zaštite.

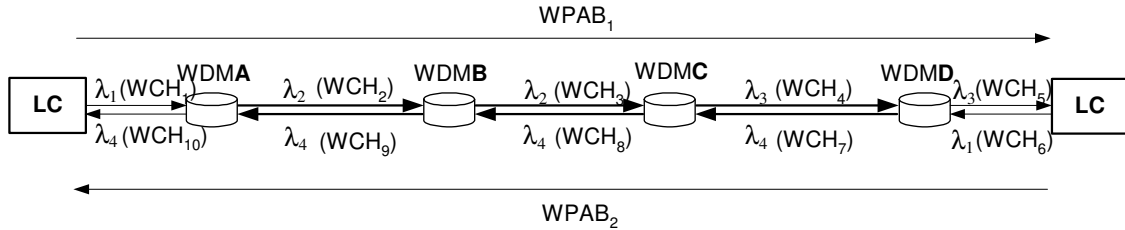
Pretvorba valne duljine je moguća i pri izlasku signala iz WDM mreže, no pretpostavka je da je prijemnik osjetljiv na cijeli dio spektra koji se koristi u WDM prijenosu.

4.4.2 Valni put

Iz prethodne je analize vidljivo da signal sasvim općenito prolaskom kroz optičku mrežu mijenja valnu duljinu. Treba naglasiti da promjena valne duljine nije tako česta, te da se uglavnom dešava samo pri ulasku signala u WDM mrežu (pretvorba valne duljine u WDM valnu duljinu na transponderu).

Logička struktura koja opisuje jednosmjerni put između dvije linijske kartice, tj. put s kraja na kraj se naziva valnim putem (WP - *wavelength path*). Valni put se sastoji od valnih

kanala koji povezuju logičku hijerarhiju s fizičkim komponentama. U najjednostavnijem slučaju valni put se sastoji od tri valna kanala – ulaznog i izlaznog valnog kanala u, odnosno iz WDM mreže koji opisuje prijenos u cijelom pojasu, te valnog kanala koji opisuje prijenos signala između dva WDMPoP čvorova. Ukoliko se mijenja valna duljina, tj. svi valni kanali nemaju istu valnu duljinu tada se takav valni put naziva virtualnim.



Slika 4.33 Valni putovi

Na slici 4.33 prikazani su valni putovi korišteni u rezervaciji puta koji opslužuje prometne zahtjeve kapaciteta C_{AB1} odnosno C_{BA1} između čvorova IPA i IPB .

Valni put	Valni kanali	Valna duljina
$WPAB_1$	WCH_1	λ_1
	WCH_2, WCH_3	λ_2
	WCH_4, WCH_5	λ_3
$WPAB_2$	WCH_6	λ_1
	$WCH_7, WCH_8, WCH_9, WCH_{10}$	λ_4

Tablica 4.7 Valni putovi i odgovarajući valni kanali s valnim duljinama

U tablici 4.7. je prikazan skup valnih putova kojima se opisuje dio WDM mreže kroz koji prolazi signal s pridruženim valnim kanalima. Valni putovi se mogu dakle prikazati kao logički presjek valnih kanala

$$WP_x = \bigcap_{i=0}^n WC_i, \quad (4.18)$$

odnosno u ovom primjeru

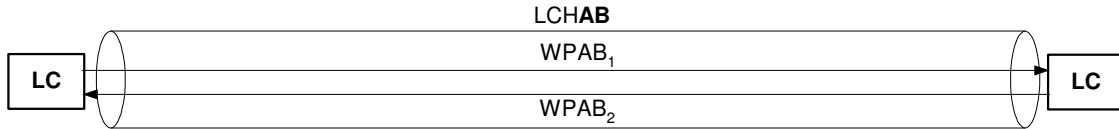
$$WPAB_1 = WCH_1 \cap WCH_2 \cap WCH_3 \cap WCH_4 \cap WCH_5, \quad (4.19)$$

$$WPAB_2 = WCH_6 \cap WCH_7 \cap WCH_8 \cap WCH_9 \cap WCH_{10}. \quad (4.20)$$

Treba naglasiti da se u ovakvom opisu varijabla WP može upotrijebiti na dva različita načina. Ona može predstavljati vezu s fizičkom strukturom, tj. nizom optičkih linkova kojima su pridruženi odgovarajući valni putovi. U tom pogledu je korištena skupovna relacija presjeka opravdana. Drugi način promatranja gornjeg izraza je da varijabla WP predstavlja ispravnost ili neispravnost valnog puta, tj. njegovu raspoloživost ili neraspoločivost. U tom slučaju skupovnu relaciju presjeka treba promatrati kao logičku relaciju \wedge (odnosno skupovnu relaciju unije kao logičku relaciju \vee). Analogno tome se mogu promatrati i svi izrazi koji slijede za ostale logičke strukture.

4.4.3 Logički kanal

Do sada su logičke strukture opisivale samo dio puta (valni kanal dio ograničen na optički link) ili cijeli put (valni put) u jednom smjeru. Logički kanal (LCH-Logical Channel) opisuje cijeli put s kraja na kraj i to u oba smjera. LCH se sastoji od dva valna putova kako prikazuje slika 4.34.



Slika 4.34 Valni putovi i logički kanal

Logički kanal u potpunosti opisuje vezu s kraja na kraj jer sadrži podatke o oba smjera. Bitno je primijetiti da se opis odnosi samo na primarni put, odnosno da zaštita nije uzeta u obzir što se analizira u narednim dijelovima.

Smjer	Logički kanal	Valni putovi
$IPA \rightarrow IPB$	$LCHAB$	$WPAB_1$
$IPB \rightarrow IPA$		$WPAB_2$

Tablica 4.8 Logički kanal i pripadni valni putovi

U tablici 4.8. je prikazana struktura logičkog kanala $LCHAB$.

Logički kanal se dakle može opisati pomoću presjeka valnih putova koji opisuju put s kraja na kraj u oba smjera

$$LCH = WP_i \cap WP_j, \quad (4.21)$$

odnosno u ovom primjeru

$$LCHAB = WPAB_1 \cap WPAB_2, \quad (4.22)$$

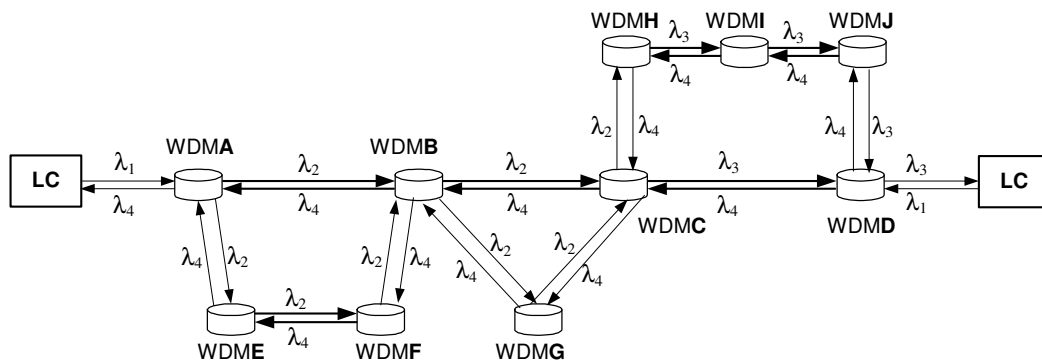
ili pomoću logičke unije unija valnih kanala

$$LCH = \left(\bigcap_{i=1}^m WCH_i \right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^n WCH_j \right), \quad (4.23)$$

što u ovom primjeru iznosi

$$LCHAB = (WCH_1 \cap WCH_2 \cap WCH_3 \cap WCH_4 \cap WCH_5) \cap (WCH_6 \cap WCH_7 \cap WCH_8 \cap WCH_9 \cap WCH_{10}) \quad (4.24)$$

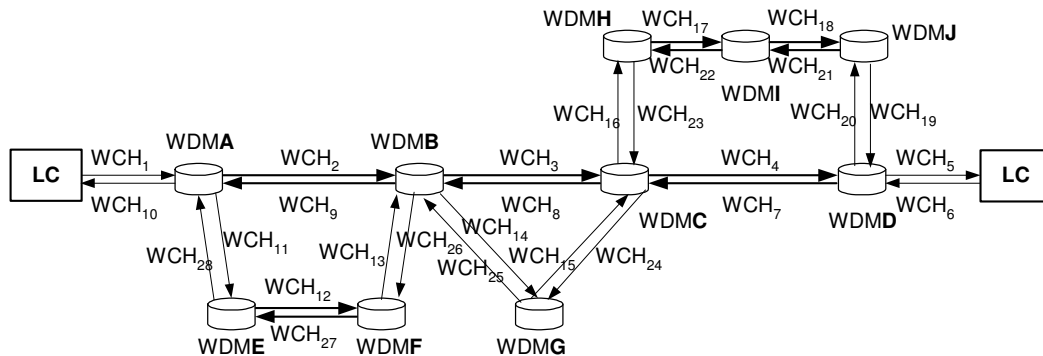
U do sada opisanim slučajevima logički je kanal opisivao samo primarni put, tj. pretpostavljao se mehanizam bez zaštite. Na slici 4.35 prikazan je isti primarni put, ali uz rezervirane dodatne WDM linkove i čvorove kojima se ostvaruje *Span* mehanizam obnavljanja.



Slika 4.35 Rezervacija fizičkog puta uz primijenjen *Span* mehanizam obnavljanja

Na slici 4.35 prikazane su fizičke komponente kroz koje opslužuju promatrane prometne zahtjeve s naznačenim valnim duljinama na pojedinim dijelovima puta. Dodjeljivanje

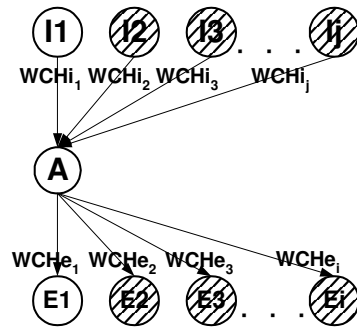
valnih kanala teče analogno kao i kod primarnog puta, tj. dodjeljuje se valni kanal svakom paru (*link, valna duljina*). Potrebno je primijetiti da valni kanali koji se odnose na rezervni dio puta ne moraju biti pridruženi samo ovom promatranom slučaju, jer jedan valni kanal može biti dio više zaštitnih putova. Jasno je da valne kanale koji pripadaju primarnom putu koristi samo jedan put, jer primarni valni kanali nisu dijeljeni. Slika 4.36 prikazuje analiziranu strukturu nakon dodjele valnih kanala.



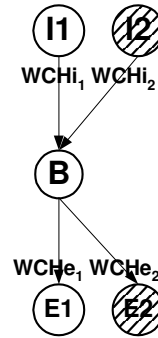
Slika 4.36 Zaštitna struktura (Span scenarij) nakon dodjele valnih kanala

Treba naglasiti da u ovom slučaju nema smisla pridjeljivati valne kanale rezervnim dijelovima putova, jer se na te dijelove (valne kanale) nastavljaju primarni dijelovi (valni kanali) ovisno o trenutnoj raspoloživosti elemenata mreže. Stoga se u ovom slučaju i ne govori o rezervnom (virtualnom) valnom putu jer njegova struktura ovisi o stanju mreže. Takav zaključak vrijedi za *Path*, *Span* i SPAF mehanizme ali ne i za 1+1 mehanizam, što će biti analizirano kasnije.

Opisana logička struktura koja se sastoji od primarnih i zaštitnih (mehanizmi zaštite) ili rezervnih (mehanizmi obnavljanja) valnih kanala, te od WDMPOP čvorova kroz koje ti kanali prolaze, može se jednostavno opisati usmjerenim necikličkim planarnim grafom kako je prikazano na slici 4.37. Za svaki smjer se formira jedan graf koji se sastoji od čvorova koji predstavljaju WDMPOP čvorove i grana koje predstavljaju valne kanale između čvorova. Graf ne uključuje pristupne optičke linkove kojima signal ulazi odnosno izlazi iz WDM mreže (prijenos u temeljnom pojasu). Pri opisu uvijek lijevi dio grafa predstavlja primarni put, dok se zaštitni/rezervni dijelovi puta granaju na desno. Čvor općenito može imati proizvoljan broj i čvorova na koje se grana, od kojih je jedan uvijek nastavak primarnog puta, a preostalih $i-1$ predstavljaju početke zaštitnih/rezervnih putova. U čvor koji pripada primarnom putu može ulaziti proizvoljan broj j valnih kanala od kojih je jedan od čvora koji pripada primarnom putu, a preostalih $j-1$ potječu od čvorova koji pripadaju zaštitnim/rezervnim putovima. Čvor zaštitnog/rezervnog puta može najviše dva izlazna valna kanala, od kojih jedan vodi prema čvoru primarnog puta (ako je $k=2$), a jedan prema nastavku zaštitnog/rezervnog puta. U slučaju $k=1$ valni kanal vodi prema čvoru zaštitnog/rezervnog puta. U čvor zaštitnog/rezervnog puta može ulaziti najviše dva valna kanala i to jedan od čvora iz primarnog puta i jedan od čvora iz zaštitnog/rezervnog puta. Slike 4.37a i b prikazuju navedena obilježja grafa. Šrafirano su označeni čvorovi koji pripadaju zaštitnom/rezervnom putu.



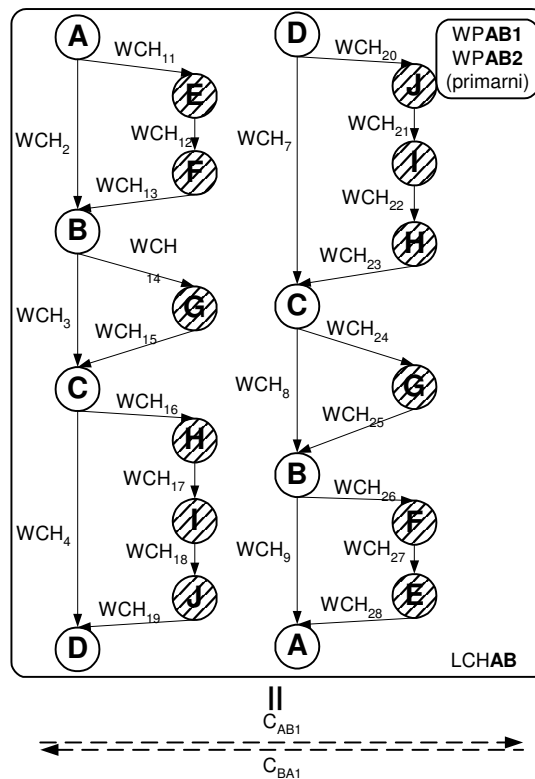
(a) Čvor primarnog puta



(b) Čvor zaštitnog/rezervnog puta

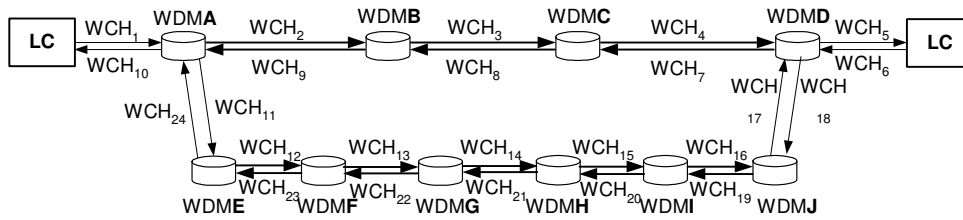
Slika 4.37 Opći slučajevi čvorova u grafu mehanizma zaštite/obnavljanja

Fizički put s kraja na kraj može se potpuno opisati pomoću predloženog opisa s dva grafa te uz navođenje primarnih (virtualnih) valnih putova. Primarni valni putovi se navode zbog bržeg pristupa primarnim dijelovima puta, ali i zbog unošenja pristupnih linkova u opis koji nisu sadržani u grafu. Takva logička struktura predstavlja potpuni prikaz logičkog kanala i za analizirani slučaj prikazana je na slici 4.38.



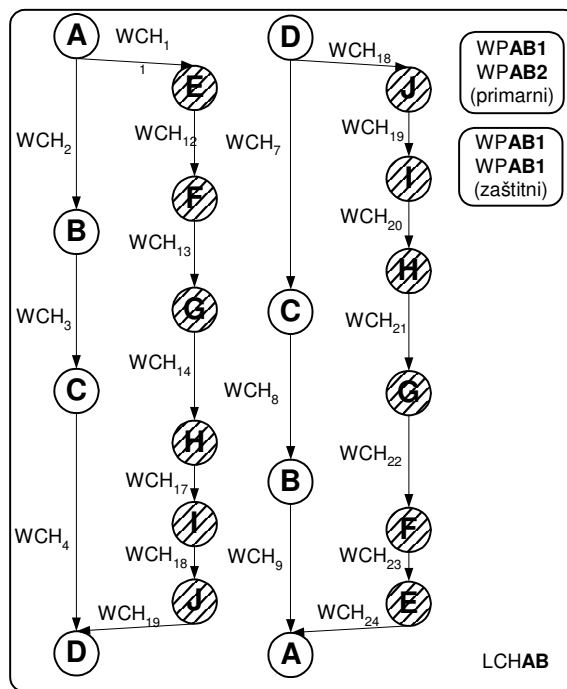
Slika 4.38 Potpuni opis logičkog kanala i prikaz logičke strukture za Span zaštitu

U prethodnom je primjeru opisan logički kanal na primjeru *Span* mehanizma zaštite. Ukoliko se koristi mehanizam zaštite s kraja na kraj (npr. 1+1) moguće je definirati i zaštitne valne putove. Analiziran je slučaj sa slike 4.29.



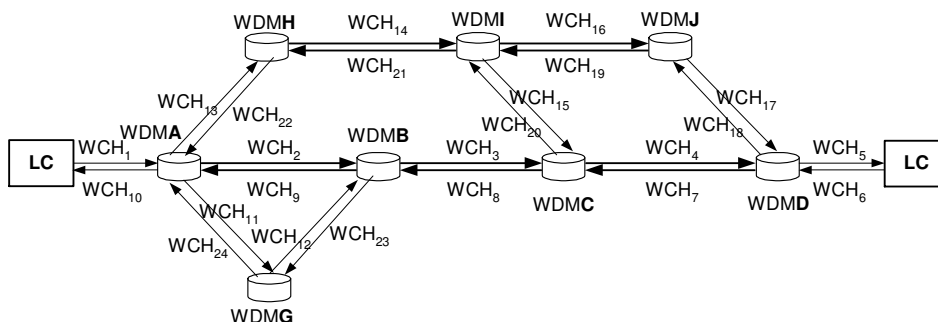
Slika 4.39 Zaštitna struktura (1+1 scenarij) nakon dodjele valnih kanala

Uzet je isti skup WDMPOP čvorova kao i u prethodnom primjeru, iako općenito različiti mehanizmi zaštite mogu implicirati i različite WDMPOP čvorove pridružene zaštitnim putovima. Kako je zaštitni put poznat u cijelosti, tj. nema slučaja da se na dijelove primarnog puta nastavlja zaštitni put definiraju se zaštitni valni putovi. Slika 4.40 prikazuje izgled grafova u 1+1 slučaju zaštite.



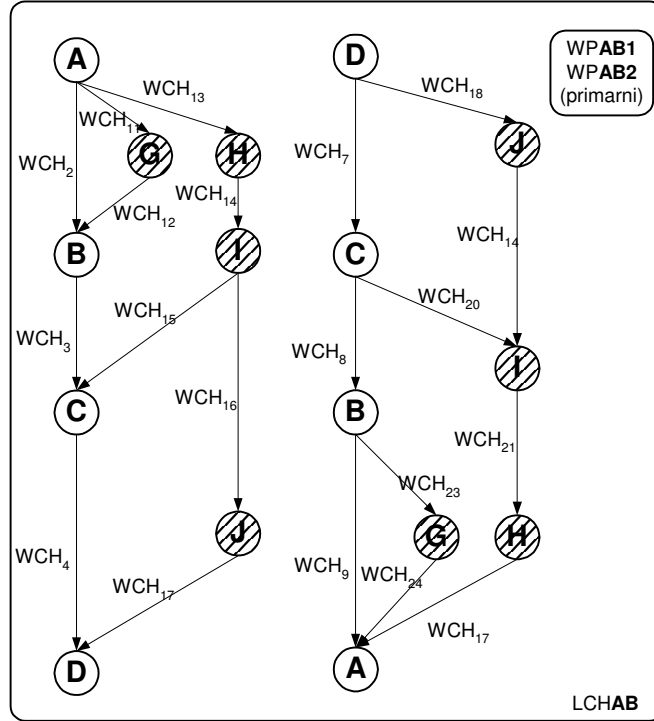
Slika 4.40 Logički kanal i prikaz logičke strukture za 1+1 zaštitu

Najkompliciraniji slučaj obnavljanja predstavlja dinamičko obnavljanje (SPAF) pri čemu se dobiva stablo s općim obilježjima analiziranim na početku ovog dijela. Logički je kanal formiran za slučaj SPAF obnavljanja prikazan na slici 4.41.



Slika 4.41 Zaštitna struktura (SPAF scenarij) nakon dodjele valnih kanala

Na slici 4.42 prikazan je logički kanal za ovaj slučaj SPAF obnavljanja. Ponovno nije moguće definirati zaštitne valne putove jer njegova struktura ovisi o trenutnoj raspoloživosti elemenata WDM mreže.



Slika 4.42 Logički kanal i prikaz logičke strukture za SPAF obnavljanje

Logički kanal služi kao osnova za proračun performansi WDM mreže (raspoloživost i BER).

Općenito se logički kanali (grafovi) mogu opisati logičkim izrazom

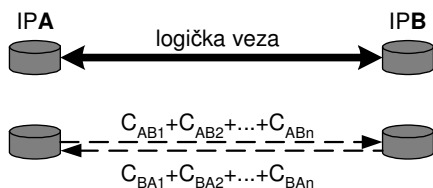
$$LCH = \bigcap_m \left\{ \left[\left(\bigcap_i WC_i \right) \cap \left(\bigcap_j N_j \right) \right] \cap \left[\left(\bigcap_k WC_k \right) \cap \left(\bigcap_l N_l \right) \right] \right\} \cap \bigcap_n \left\{ \left[\left(\bigcap_o WC_o \right) \cap \left(\bigcap_p N_p \right) \right] \cap \left[\left(\bigcap_r WC_r \right) \cap \left(\bigcap_s N_s \right) \right] \right\}, \quad (4.25)$$

koji se sastoji od dva člana u presjeku. Svaki od članova predstavlja graf. Graf je prikazan kao unija primarnog dijela puta (presjek valnih kanala i čvorova koji čine taj dio) i zaštitnog/rezervnog puta za taj dio. Jasno je da će složenost izračuna ovisiti o odabranom mehanizmu zaštite ili obnavljanja. Tako se kod 1+1 zaštite koja predstavlja najjednostavniji slučaj gornji izraz razvija u

$$LCH_{1+1} = \left\{ \left[\left(WCH_2 \cap WCH_3 \cap WCH_4 \right) \cap \left(N_A \cap N_B \cap N_C \cap N_D \right) \right] \cap \left[\left(WCH_{11} \cap WCH_{12} \cap WCH_{13} \cap WCH_{14} \cap WCH_{15} \cap WCH_{16} \cap WCH_{17} \right) \cap \left(N_E \cap N_F \cap N_G \cap N_H \cap N_I \cap N_J \right) \right] \right\} \cap \left\{ \left[\left(WCH_7 \cap WCH_8 \cap WCH_9 \right) \cap \left(N_A \cap N_B \cap N_C \cap N_D \right) \right] \cap \left[\left(WC_{18} \cap WC_{19} \cap WC_{20} \cap WC_{21} \cap WC_{22} \cap WC_{23} \right) \cap \left(N_E \cap N_F \cap N_G \cap N_H \cap N_I \cap N_J \right) \right] \right\} \quad (4.26)$$

4.4.4 Logička veza

Logička veza (LC - *Logical Connection*) je logička struktura na najvišoj razini logičke hijerarhije koja u potpunosti opisuje prometne zahtjeve između dva IPPoP čvora (slika 4.43).



Slika 4.43 Logička veza

Logički je kanal u potpunosti opisivao prometne zahtjeve koji su se odnosili na parcijalni kapacitet koji sudjeluje u sumi ukupnog kapaciteta prometnih zahtjeva, tj. na promet između dvije linijske kartice pridružene usmjerniteljima u IPPoP čvorovima između kojih se analizira promet.

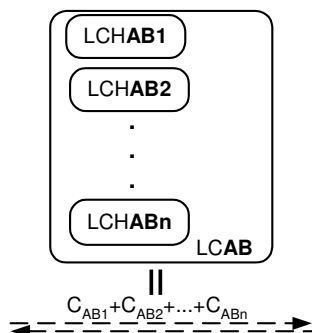
Logička veza se jednostavno može prikazati kao skup logičkih kanala pridruženih vezama između sučelja koja opslužuju zadane prometne zahtjeve. Općenito se za logičku vezu može pisati

$$LC = \bigcap_i LCH_i, \quad (4.27)$$

odnosno u ovom slučaju za logičku vezu LC_{AB} između čvorova IPA i IPB vrijedi

$$LC_{AB} = \bigcap_{i=1}^n LCHAB_i, \quad (4.28)$$

kako je prikazano na slici 4.44.



Slika 4.44 Odnos logičke veze i logičkih kanala

5 Optimizacija

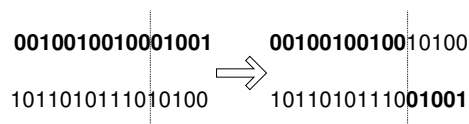
5.1 Genetički algoritam

U ovom je radu za optimizaciju korišten isključivo genetički algoritam s binarnim kodiranjem zbog svoje općenitosti i jednostavne uporabe.

Genetički algoritam je heuristička metoda koja se primjenjuje na zadani problem, što odgovara djelovanju prirodnog procesa evolucije na gene [21]. Pojedina rješenja problema nazivaju se nizovima (*strings*), i predstavljena su u obliku pogodnom za obradu. Uz niz često se koriste i nazivi individua ili kromosom. Način prikaza niza naziva se kodiranjem, te se svodi na niz 0 i 1 u slučaju binarnog kodiranja.

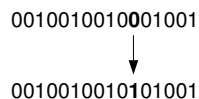
Nad nizovima se provode tri osnovne operacije kojima nastaju nove nizovi (u opisu se pretpostavlja binarno kodiranje):

1. **križanje** (*crossover*) – zamjena jednog ili više bitova jednog niza s odgovarajućim dijelom drugog niza. Izvorno je zamišljeno križanje u jednoj točki križanja koja se odabire slučajno u nizu. Križanjem nastaju dva nova niza (slika 5.1),



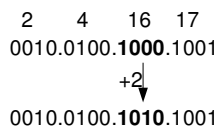
Slika 5.1 Križanje

2. **mutacija** (*mutation*) – slučajno odabrani jedan bit niza (binarno kodiranje) zamjenjuje se komplementarnom vrijednošću (ili slučajnom u slučaju drugačijeg kodiranja) – slika 5.2,



Slika 5.2 Mutacija

3. **varijacija** (*variation*) – promjena bitova tako da se vrijednost koju oni predstavljaju umanjuje ili uvećava za malu vrijednost (slika 5.3).



Slika 5.3 Varijacija

Opisanim postupcima nastaju novi nizovi, a sam proces nastanka naziva se reprodukcijom. Svi nizovi u istoj iteraciji algoritma nazivaju se generacijom. Provođenjem operacija nastaju novi nizovi. Nad svakim se nizom provodi proračun koji daje kvantitativnu procjenu pogodnosti niza za prijenos u novu generaciju, a u cilju dobivanja optimalnog rješenja nekog problema. Konačno rješenje će dakle biti jedna od individua koja daje najbolje rezultat proračuna pogodnosti. Procjena kvalitete obavlja se funkcijom cilja (*fitness function*) koja ovisi o problemu koji se mora riješiti. Jasno je da općenito nizovi u sljedećoj generaciji mogu imati lošije rezultate u funkciji cilja nego njihovi roditelji (nizovi

prošle generacije). Da bi se osigurao prijelaz najboljim nizovima u sljedeću generaciju uvodi se elitizam.

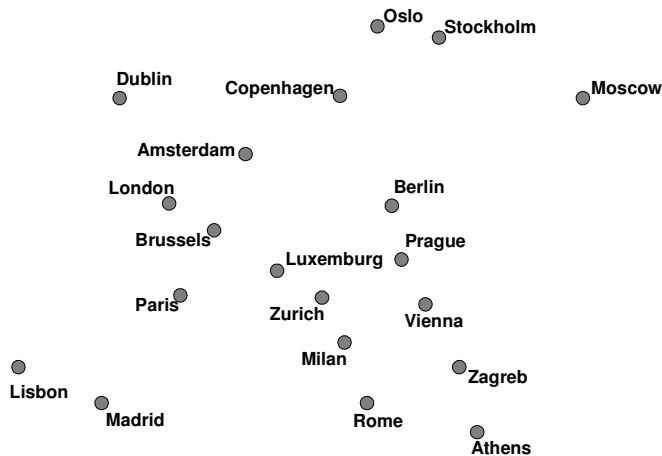
Nemoguće je dokazati da konačna populacija sadrži optimalno rješenje u cijeloj povijesti, no može se pokazati da genetički algoritam optimizira testiranje i stvaranje novih nizova. Dokaz se temelji na implicitnom paralelizmu kojim se postižu daleko bolji rezultati od slučajnog pretraživanja.

Osnovni koraci genetičkog algoritma:

1. inicijalizacija početne populacije – može se napraviti slučajno ili na temelju nekog znanja o problemu. Definira se način prikaza (kodiranje) nizova, te funkcija cilja koja daje mjeru kvalitete (podobnosti) niza. Vrijednost koju daje funkcija cilja mora biti tako formirana da najpodobniji niz ujedno predstavlja željeno (u najboljem slučaju optimalno) rješenje zadanog problema,
2. proračun funkcije cilja za sve nizove početne populacije,
3. stvaranje novih nizova – vjerojatnost reprodukcije niza (prijenosa u sljedeću generaciju) proporcionalna je relativnoj podobnosti s obzirom na trenutnu populaciju. Za stvaranje novih nizova koriste se operacije mutacije, varijacije i križanja,
4. odabir nizova koji se prenose u sljedeću generaciju. Moguće je uzeti samo nizove koji su nastali u promatranog generaciji (izvorni algoritam), ili primijeniti elitizam. Elitizam se temelji na usporedbi novih nizova i njihovih roditelja korištenjem funkcije cilja, te prijenosom najboljih u novu generaciju (broj nizova u generaciji ne mijenja se tijekom izvođenja algoritma). Time se sprječava da djeca lošije podobnosti zamjene roditelje bolje podobnosti,
5. vraćanje na korak 2 ukoliko nije dostignuta željena vrijednost funkcije cilja ili nije obavljen zadani broj iteracija.

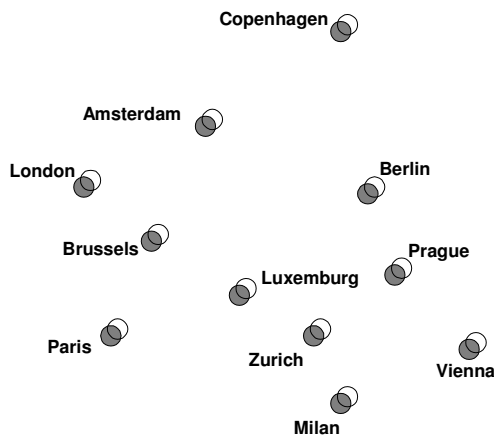
5.2 Ulazni podaci

Optimizacijski postupci, kao i mjerenje performansi provedeno je na primjeru mreže preuzetom iz projekta COST 239 [20]. Cijela se mreža sastoji od 19 europskih gradova (slika 5.4) koje treba povezati sveoptičkom mrežom.



Slika 5.4 Mreža iz COST 239 projekta

U obzir se uzima samo središnji (jezgreni) dio mreže koji se sastoji od 11 gradova (slika 5.5). Pretpostavka je da je na tom području moguće dizajnirati sveoptičku mrežu, tj. sačuvati optičku transparentnost bez potrebe za opto - električnom pretvorbom zbog 3R regeneracije.



Slika 5.5 Jezgrena mreža iz COST 239 projekta

Matrica udaljenosti između gradova jezgrene mreže odgovara

	Par	Mil	Zur	Pra	Vie	Ber	Ams	Lux	Bru	Lon	Cop
Par	0	820	600	1000	1200	1090	510	340	300	450	1240
Mil	820	0	320	870	820	1010	1140	710	930	1220	1520
Zur	600	320	0	565	730	720	720	350	580	950	1100
Pra	1000	870	565	0	320	340	910	730	910	1310	740
Vie	1200	820	730	320	0	660	1160	930	1120	1510	1040
Ber	1090	1010	720	340	660	0	660	750	780	1170	390
Ams	510	1140	720	910	1160	660	0	390	210	550	760
Lux	340	710	350	730	930	750	390	0	220	600	950
Bru	300	930	580	910	1120	780	220	220	0	390	920
Lon	450	1220	950	1310	1510	1170	600	600	390	0	1310
Cop	1240	1520	1100	740	1040	390	950	950	920	1310	0

Pretpostavka je da se na mjestu svakog grada nalazi jedan IPPoP čvor kojem je pridružen WDMPoP čvor na udaljenosti 10 km. Matrica udaljenosti WDMPoP čvorova odgovara matrici udaljenosti IPPoP čvorova, odnosno matrici udaljenosti gradova. Na slici 5.5 uz svaki grad (IPPoP čvor) je prikazan i WDMPoP čvor.

Matrica prometnih zahtjeva izračunata je po PD modelu, uz pretpostavke sljedećih populacija gradova koje odgovaraju populaciji države u kojoj se nalazi:

Grad	Broj stanovnika (10^6)
Par	55
Mil	59
Zur	7
Pra	37
Vie	8
Ber	63
Ams	15
Lux	3.6
Bru	10
Lon	57
Cop	6

Za matricu prometnih zahtjeva slijedi (uz $K=2.5$):

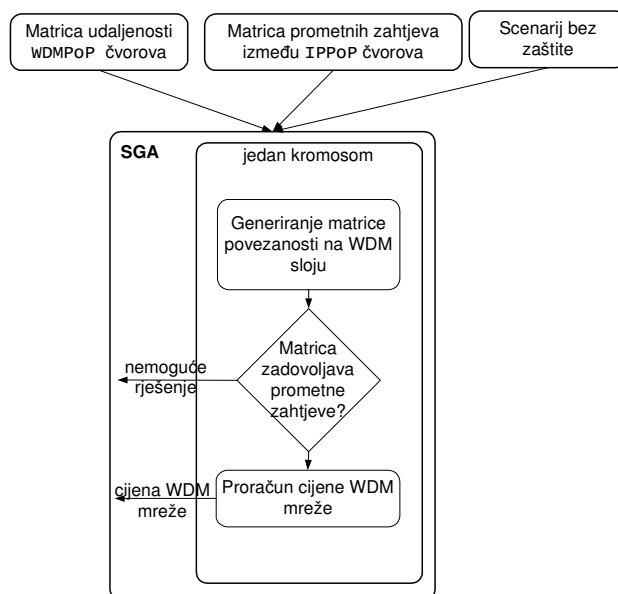
10 Gbit/s	Par	Mil	Zur	Pra	Vie	Ber	Ams	Lux	Bru	Lon	Cop
Par	0.00	791.46	128.33	407.00	73.33	635.78	323.53	11.65	366.67	1393.33	53.23
Mil	791.46	0.00	258.13	501.84	115.12	736.04	155.26	5.98	126.88	551.31	46.58
Zur	128.33	258.13	0.00	91.68	15.34	122.50	29.17	1.44	24.14	84.00	7.64
Pra	407.00	501.84	91.68	0.00	185.00	1371.17	121.98	3.65	81.32	321.99	60.00
Vie	73.33	115.12	15.34	185.00	0.00	152.73	20.69	0.62	14.29	60.40	9.23
Ber	635.78	736.04	122.50	1371.18	152.73	0.00	286.36	6.05	161.54	613.85	193.85
Ams	323.53	155.26	29.17	121.98	20.69	286.36	0.00	2.77	142.86	310.91	23.68
Lux	11.65	5.98	1.44	3.65	0.62	6.05	2.77	0.00	3.27	6.84	0.46
Bru	366.67	126.88	24.14	81.32	14.29	161.54	142.86	3.27	0.00	292.31	13.04
Lon	1393.33	551.31	84.00	321.99	60.40	613.85	310.91	6.84	292.31	0.00	52.21
Cop	53.23	46.58	7.64	60.00	9.23	193.85	23.68	0.46	13.04	52.21	0.00

5.3 Optimizacija topologije

Optimizacija topologije odnosi se na minimizaciju cijene WDM mreže uz ulazna ograničenja:

1. zadani položaju WDMPoP čvorova,
2. IP prometni zahtjevi između IPPoP čvorova, te
3. mehanizam zaštite.

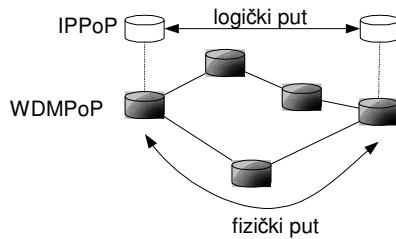
Optimizacija je provedena za slučaj minimizacije cijene primarnih virtualnih valnih putova, tj. za slučaj bez zaštite. Pri tom je korišten jednostavni genetički algoritam (*Simple Genetic Algorithm* - SGA). Na slici 5.6 prikazan je postupak proračuna cijene WDM mreže za jedan kromosom unutar populacije.



Slika 5.6 SGA i optimizacija topologije WDM mreže

Matrice povezanosti na WDM sloju pridružene su svakom kromosomu i generiraju se slučajno u početnoj populaciji. Kasnije matrice dobivaju se postupcima križanja i mutacije. Svaka matrica povezanosti neće predstavljati prihvatljivo rješenje, jer ulazna matrica IP zahtjeva implicira koje logičke veze na sloju podatkovne veze moraju postojati. Kako se te

veze ostvaruju preko WDM veza jasno je da svaka WDM topologija neće morati zadovoljavati topologiju sloja podatkovne veze. Pridruživanje logičkih veza WDM linkovima se vrši najkraćim putem korištenjem Floydovog algoritma. Slika 5.7 prikazuje postupak pridruživanja fizičkog puta logičkom putu.



Slika 5.7 Pridruživanje fizičkog puta logičkom

Ako fizički put ne može biti pronađen to znači da pridružena topologija promatranom kromosomu ne zadovoljava ulazne IP zahtjeve. Promatrano pridruživanje predstavlja najjednostavniji slučaj bez zaštite. Moguće je pridruživati i dva najkraća nezavisna fizička puta [10] što zadovoljava scenarije zaštite 1+1 i *Path*. U postupku optimizacije je jedini kriterij bila cijena mreže, a ne i njezina raspoloživost što bitno smanjuje složenost problema.

Opravdanost primjene genetičkog algoritma leži u složenosti problema. Ako je broj čvorova N tada je broj mogućih rješenja (topologija)

$$S_{TO} = 2^{\binom{V}{2}} \quad (5.1)$$

što ukazuje na nepolinomnu složenost.

5.3.1 Najkraći putovi i model cijene

Model proračuna preuzet je iz [11]. Osnovu proračuna čini pronalaženje najkraćih putova u WDM mreži. Opravdanost korištenja Floydovog algoritma pronalaženja najkraćih putova između svih parova čvorova leži u činjenici da je ulazna matrica IP zahtjeva generirana PD modelom, tj. radi se o potpunoj povezanosti na sloju podatkovne veze (slučaj bez optimizacije cijene linijskih kartica, tj. agregacije prometa). Pri proračunu najkraćih putova duljini WDM linkova dodaje se i duljina čvorova koja služi za unos utjecaja složenosti čvora u proračun najkraćih putova. Pretpostavka je da će taj put biti duži što je složenost WDMPoP čvora veća. Kako je složenost vezana uz broj ulazno-izlaznih grana koje su određene generiranom matricom WDM topologije, za duljinu k -tog čvora se pretpostavlja izraz

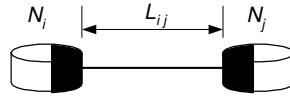
$$N_k = E + d_k F, \quad (5.2)$$

gdje je d_k stupanj k -tog čvora i odgovara broju incidentnih grana, a E i F konstante koje kontroliraju utjecaj čvora na ukupnu duljinu. U ovom radu su odabrane vrijednosti 200 km i 100 km.

Težina grane između čvorova i i j , prema kojoj se računaju najkraći putovi, iznosi

$$W_{ij} = 0.5N_i + L_{ij} + 0.5N_j, \quad (5.3)$$

pri čemu je L_{ij} duljina grane između čvorova i i j , a N_i i N_j težine čvorova i i j (slika 5.8). Težina grane odražava utjecaj složenosti čvora na duljinu puta, tj. povoljniji su oni putovi koji prolaze kroz manji broj čvorova.



Slika 5.8 Težina grane

Nakon pronalaženja najkraćih putova i pridruživanja kapaciteta granama slijedi proračun cijene WDM mreže. Model cijene preuzet je iz [11], a cijenu mreže dijeli na cijenu transmisije (cijena grana) i cijenu prospajanja (cijena čvorova) prema

$$C = \sum_{i,j \in V} C_{i,j} + \sum_{k \in E} C_k = C_L + C_N, \quad (5.4)$$

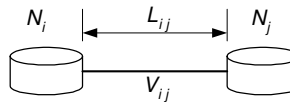
gdje je $C_{i,j}$ cijena grane (i, j) , a C_k cijena čvora k .

Cijena čvora odražava njegovi složenost uzimajući u obzir stupanj čvora i ukupan kapacitet grana prema

$$C_k = 0.5N_k V_k, \quad (5.5)$$

gdje je V_k ukupan kapacitet incidentnih grana tom čvoru. Cijene grana računaju se prema izrazu

$$C_{i,j} = L_{ij} V_{ij}, \quad (5.6)$$

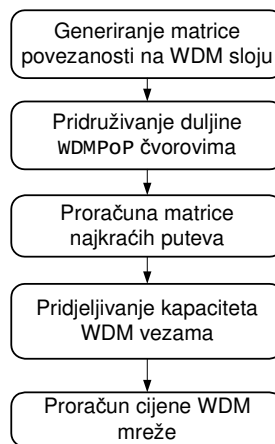


Slika 5.9 Cijena grane

gdje je L_{ij} duljina grane u km, a V_{ij} kapacitet prometa koji se prenosi granom u Gbit/s prema slici 5.9.

Kapacitet grane određuje se zbrajanjem kapaciteta svih putova (po pretpostavci primarnih) koji prolaze granom.

Na dijagramu na slici 5.10 sumirani su koraci opisnog algoritma.



Slika 5.10 Koraci u proračunu cijene WDM topologije

Pri izvođenju algoritma uzete su sljedeće pretpostavke:

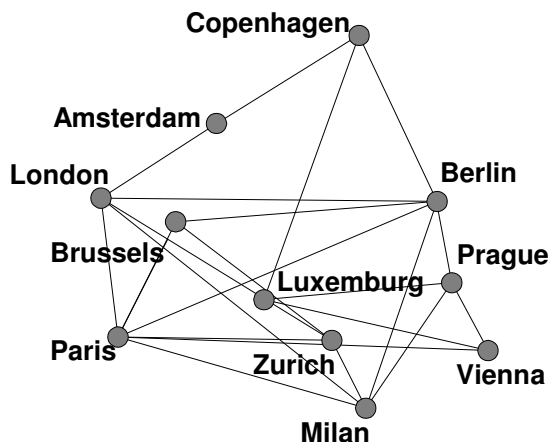
- matrica povezanosti je simetrična,
- minimalni broj grana u rješenju je $2n$ (n je broj čvorova, nužan uvjet za potpunu dostupnost), te
- minimalni stupanj čvora je 2 (posljedica simetričnosti matrice).

	Par	Mil	Zur	Pra	Vie	Ber	Ams	Lux	Bru	Lon	Cop
Par	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0
Mil	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
Zur	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Pra	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
Vie	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Ber	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Ams	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Lux	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
Bru	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Lon	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
Cop	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Prilikom optimizacije pretpostavljen je faktor $K=2.5/1000$ u PD modelu, zbog ubrzanja optimizacije cijene linijskih kartica. Dobivena cijena od

$C=572097.88$

se mora uzeti s pretpostavkom korekcije prometnih zahtjeva. Jasno je da ova pretpostavka ne utječe na konačno rješenje jer odnosi ostaju isti.



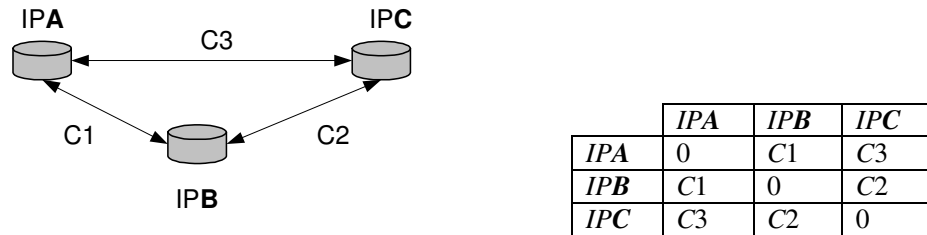
Slika 5.11 Topologija WDM sloja dobivena optimizacijskim postupkom

Vidljivo je da čvorovi s velikim populacijama (Berlin, Pariz, London i Milan) imaju najveći broj incidentnih grana, tj. u tom slučaju cijena transmisije dominira i nadmašuje cijenu komutacije. U ovom skupu najvećih izvorišta su svi parovi međusobno povezani izravnim WDM linkovima, dok je kod manjih izvorišta prisutna agregacija i slanje prometa preko posrednih WDMPOP čvorova (cijena komutacije je veća od cijene transmisije).

5.4 Optimizacija cijene linijskih kartica

Optimizacija cijene linijskih kartica svodi se na problem stvaranja optimalne topologije sloja podatkovne veze (L2 topologija) s obzirom na cijenu dodanih linijskih kartica. Ulazna matrica prometnih zahtjeva određuje tokove IP prometa koji se moraju uspostaviti u mreži. Kako je logička povezanost na IP sloju potpuna (slika 5.12), jer svaki IP entitet može izravno adresirati svaki drugi IP entitet, postavlja se problem optimalnog

pridruživanja logičke veze fizičkom putu. Logičkim vezama su pridruženi i kapaciteti zadani u matrici prometnih zahtjeva.



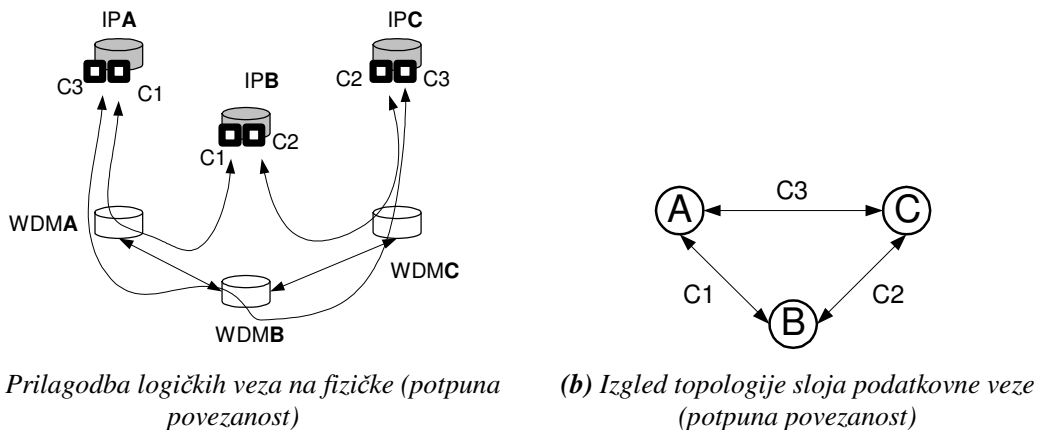
Slika 5.12 Potpuna povezanost na IP sloju uz matricu prometnih zahtjeva

Ulazni parametri algoritma su fizička topologija WDM mreže te prometni zahtjevi između IPPoP čvorova. Fizičku topologiju čine položaji WDMPoP čvorova, te matrica povezanosti s obzirom da mreža u tom trenutku nije stvorena. Pretpostavka je naime da WDM mreža može podržati sve prometne zahtjeve između bilo kojeg para WDMPoP čvorova. To je opravdano zbog činjenice da je uvijek moguće prvo napraviti dizajn sloja podatkovne veze, te zatim dizajnirati WDMPoP mrežu (strukturiranje čvorova, dimenzioniranje linkova). Taj se proces može provoditi iterativno ukoliko je cilj optimizacija neke performanse mreže ili ukupne cijene.

U sljedećoj analizi će se koristiti kao ulaz prometna matrica dana slikom 5.12., te matrica povezanosti WDM sloja dana s

	WDMA	WDMB	WDMC
WDMA	0	1	0
WDMB	1	0	1
WDMC	0	1	0

Postoje dva rubna slučaja pri dodjeli linijskih kartica. Topologija sloja podatkovne veze može u potpunosti slijediti topologiju logičkih veza IP sloja, što se u principu svodi na potpunu povezanost kod širokopolasne mreže zbog prometnih zahtjeva između svakog para čvorova. Taj slučaj implicira pridruživanje linijske kartice svakom paru prometnih zahtjeva, ili više njih ovisno o znatosti ponuđenih kapaciteta odabranog protokola (Sonet/SDH, Ethernet, ...), odnosno veći broj kartica manjeg kapaciteta (slika 5.13a i b).

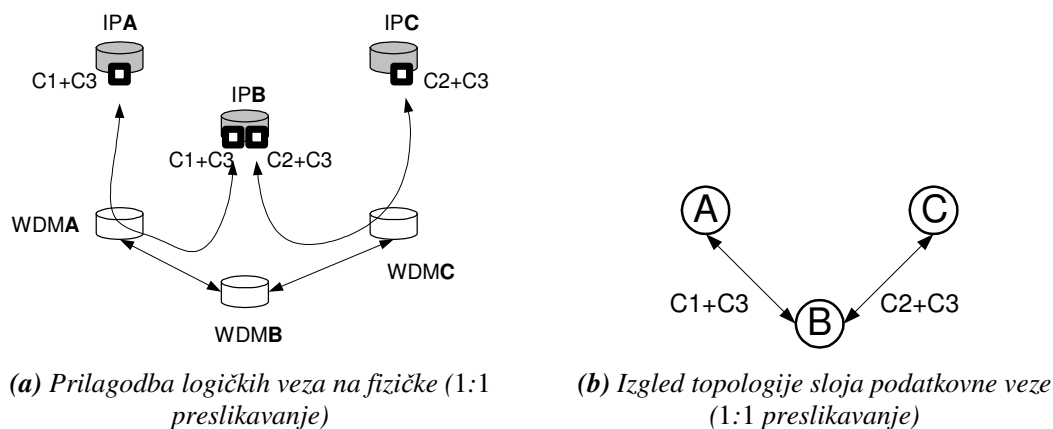


Slika 5.13 Pridruživanje linijske kartice svakom paru prometnih zahtjeva

U suprotnom slučaju topologija sloja podatkovne veze u potpunosti slijedi topologiju fizičkog sloja (1:1 preslikavanje), tj. koristi se mogućnost agregacije prometnih tokova koji

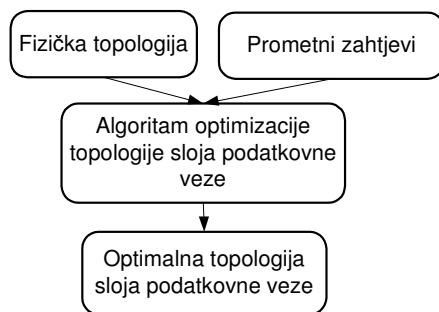
prolaze istim dijelom fizičkog puta gdje god je to moguće. Taj je slučaj prikazan na slikama 5.14a i b, te implicira dodavanje manjeg broja kartica većeg kapaciteta. Utjecaj agregacije prometa na funkciju IP usmjeritelja u mreži analiziran je u dijelu 4.2.4.

U ovom radu je pretpostavka da je svaki WDMPOP čvor povezan s nekim IPPOP čvorom, odnosno da postoji usmjeritelj kojem samo treba dodati kartice. Ukoliko to nije slučaj cijenama kartica u slučaju agregacije je potrebno dodati i cijenu dodanog usmjeritelja. Tipičan primjer je WDMPOP čvor koji služi samo za prospajanje na WDM sloju. U slučaju agregacije će u tom čvoru biti potrebno napraviti IP usmjeravanje, odnosno biti će potrebno dodati IP sloj i usmjeritelj za kojim bez agregacije ne bi bilo potrebe. Kako je cijena *backbone* usmjeritelja vrlo visoka takvo bi dodavanje zasigurno utjecalo na zaključak koji se može donijeti uz gornje pretpostavke.



Slika 5.14 Pridruživanje linijskih kartica u slučaju agregacije tokova

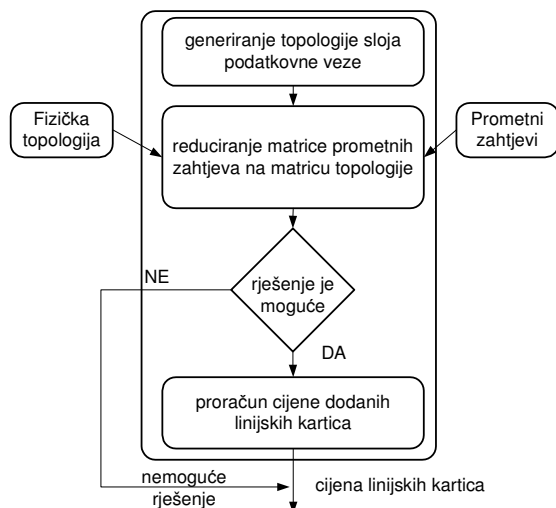
Postupak optimizacije cijene može se prikazati sljedećim dijagramom toka:



Slika 5.15 Postupak optimizacije cijene linijskih kartica

Pri procesu optimizacije koristi se jednostavan genetički algoritam, a izlaz funkcije cilja je cijena dodanih linijskih kartica (slika 5.16).

Osnovu algoritma čini reduciranje matrice prometnih zahtjeva s obzirom na generiranu matricu povezanosti na sloju podatkovne veze. Prometni zahtjev za koji ne postoji pridružena kartica pokušava se agregirati s nekim drugim tokom gdje postoji linijska kartica, ali tako da se dodaje onom toku koji prolazi najkraći put do zadanog odredišta (tokovi dijele dio puta). Ukoliko takav put ne postoji generirana matrica povezanosti ne zadovoljava prometne zahtjeve. Algoritam je prikazan na slici 5.16.



Slika 5.16 Jezgra optimizacijskog algoritma

Matrica topologije na sloju podatkovne veze bi u slučaju sa slike 5.14.b. izgledala kao

	A	B	C
A	0	1	1
B	1	0	1
C	1	1	0

dok bi reducirana matrica IP prometnih zahtjeva bila jednaka ulaznoj matrici. U slučaju sa slike 5.14.b. matrica topologije sloja podatkovne veze i reducirana matrica prometnih zahtjeva jednake su

	A	B	C
A	0	1	0
B	1	0	1
C	0	1	0

	IPA	IPB	IPC
IPA	0	$C1+C3$	0
IPB	$C1+C3$	0	$C2+C3$
IPC	0	$C2+C3$	0

U optimizaciji su korištenja sljedeća sučelja s pripadajućim kapacitetima i cijenom:

Sučelje	Kapacitet (Gbit/s)	Cijena
STM-16	2.48832	95000
STM - 64	9.48832	300000
GbE	0.850	10000
10GbE	8.540	29000

Genetički algoritam za SDH međuprotokol prijenosa, i mrežu opisanu u dijelu 5.2 kao optimalnu povezanost na sloju podatkovne veze daje sljedeću matricu

	Par	Mil	Zur	Pra	Vie	Ber	Ams	Lux	Bru	Lon	Cop
Par	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Mil	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
Zur	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0
Pra	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
Vie	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Ber	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
Ams	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
Lux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Bru	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Lon	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Cop	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0

Matrica prometnih zahtjeva s agregiranim tokovima između parova čvorova izgleda u ovom slučaju kao

Tbit/s	Par	Mil	Zur	Pra	Vie	Ber	Ams	Lux	Bru	Lon	Cop
Par	0.00	0.00	5.61	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mil	0.00	0.00	5.24	0.00	6.72	16.73	0.00	0.00	0.00	11.45	0.00
Zur	5.61	5.24	0.00	0.10	0.65	7.72	4.64	0.00	0.00	6.24	0.00
Pra	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.19	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00
Vie	0.15	6.72	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.37	0.00
Ber	0.00	16.73	7.72	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.64	36.53
Ams	0.00	0.00	4.64	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.23	0.00
Lux	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.60	6.64
Bru	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.55
Lon	0.00	11.45	6.24	0.07	2.37	19.64	3.23	25.60	0.00	0.00	0.00
Cop	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.53	0.00	6.64	8.55	0.00	0.00

Dodane linijske kartice i njihova ukupna cijena prikazane su u sljedećoj tablici

Kapacitet	Količina	Cijena
STM16	48	4560000
STM64	132	39600000
Ukupno	180	44160000

Uz linijske kartice dodano je i 18 usmjeritelja s ograničenjem od 8 linijskih kartica i najvećim dopuštenim kapacitetom prometa koji se može privesti komutatorskoj matrici od 80 Gbit/s.

5.5 Optimizacija cijene WDM opreme

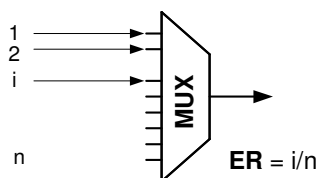
Optimizacija (minimizacija) cijene WDM opreme općenito predstavlja vrlo težak problem zbog kompleksnosti strukture i međudjelovanja brojnih faktora. U ovom slučaju nije proveden klasični postupak optimizacije korištenjem genetičkog algoritma zbog složenosti opisa problema, već je predložen algoritam koji smanjuje cijenu mreže, ali ne garantira optimalno rješenje.

Osnovna pretpostavka je da cijeni WDM opreme najviše doprinose WDM komponente koje su slabo iskorištene. Tako može biti potrebno dodati novi multiplekser i demultiplekser u WDMPOP čvor, te optičko vlakno u kabel samo zbog jednog valnog kanala, s obzirom da je jedini kriterij pridruživanja valnih kanala optičkim linkovima najkraći put. To je posljedica znatosti koju posjeduje WDM oprema s obzirom na valne duljine koje podržava. Tako se broj ulaza WDM multipleksa kreće u nekim standardiziranim koracima (potencije broja 2, ili dekadski) koji onda određuju i broj valnih duljina na optičkom vlaknu. Jasno je da se najveće promjene u cijeni uz najmanje zahvate nad putovima koje koriste virtualni valni putovi postižu ukoliko se proba ukloniti slabo iskorištena WDM oprema što znači i preusmjeravanje (virtualnih) valnih putova koji ju koriste. Uvedena su dva pojma koja opisuju navedeni problem:

- faktor iskoristivosti WDM opreme (*ER - efficiency ratio*), te
- faktor pogodnosti za preusmjeravanje (*RR - reassignment ratio*).

Faktor *ER* je definiran za WDM multiplekser i demultiplekser, ali se može definirati i za ostalu WDM opremu (npr. spojnik).

ER se kod WDM mux/demux definira kao omjer broja iskorištenih ulaza/izlaza i i ukupnog broja ulaza/izlaza n kako je prikazano na slici 5.17.



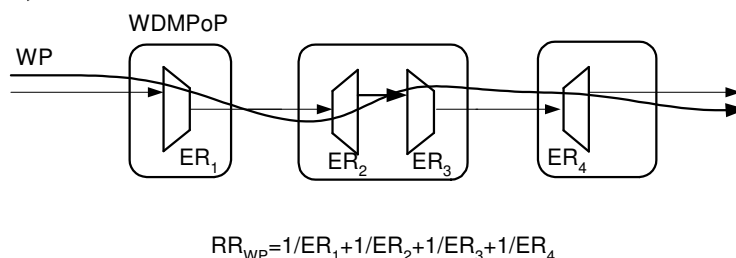
Slika 5.17 Faktor iskoristivosti multipleksera ER

Jasno je da faktor iskoristivosti mux/demux odgovara i faktoru iskoristivosti WDM linka koji je spojen na taj WDM uređaj.

Faktor pogodnosti za preusmjeravanje RR računa se za (virtualni) valni put kao suma recipročnih vrijednosti faktora iskoristivosti WDM opreme koju taj valni put koristi (slika 5.18):

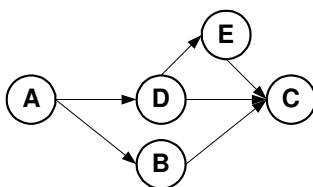
$$WP = \{WDM_1, WDM_2, \dots, WDM_n\}$$

$$RR_{WP} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{ER_{WP_i}} \quad (5.7)$$

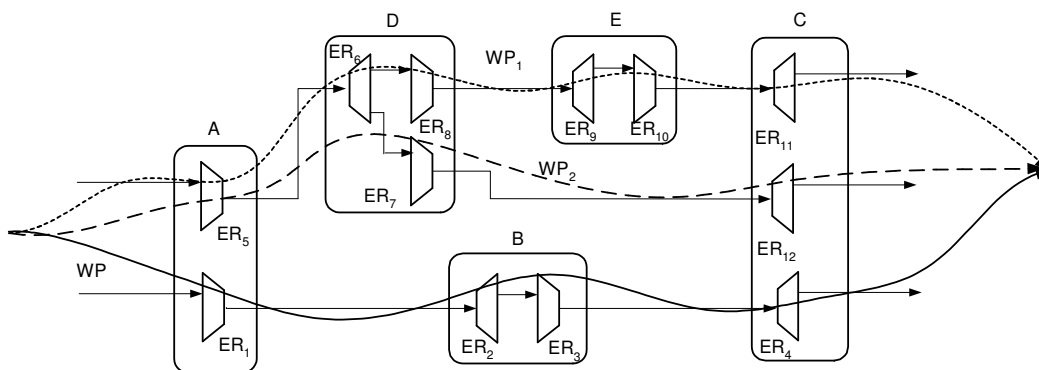


Slika 5.18 Proračun faktora RR za valni put

Ukoliko se procijeni da valni put ima dovoljno visok iznos RR (u nekom skupu ili prema zadanoj vrijednosti) proračunavaju se svi fizički putovi između rubnih para WDMPoP čvorova. Na slici 5.20 prikazani su valni putovi između para čvorova A i C za mrežu sa slike 5.19.



Slika 5.19 Mogući fizički putovi između čvorova A i C



Slika 5.20 Mogući valni putovi između čvorova A i C

Vidljivo je da je moguće postojeći valni put preusmjeriti na dva načina. Dulji fizički put neće nužno implicirati i manji iznos novog RR , iako se prolazi kroz više WDM opreme, jer je utjecaj slabo iskorištene opreme na RR veći od utjecaja dodavanja dobro iskorištene opreme u put.

Potrebno je proračunati iznose RR parametra za sva tri puta. Pretpostavljene su sljedeće vrijednosti ER parametara

ER_1	3/8	ER_4	1/8	ER_7	2/8	ER_{10}	6/8
ER_2	3/8	ER_5	3/8	ER_8	7/8	ER_{11}	6/8
ER_3	1/8	ER_6	3/8	ER_9	7/8	ER_{12}	2/8

Za RR parametre slijedi

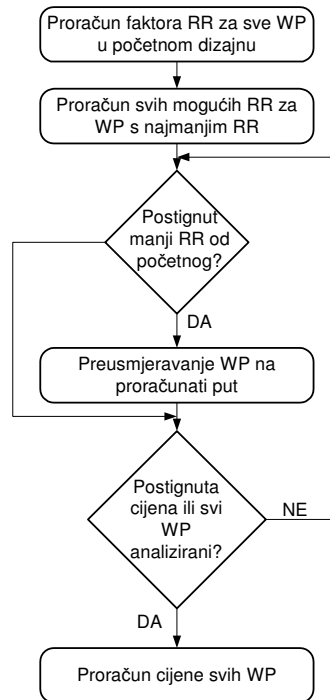
$$RR_{WP} = \frac{1}{ER_1} + \frac{1}{ER_2} + \frac{1}{ER_3} + \frac{1}{ER_4} = \frac{8}{3} + \frac{8}{3} + \frac{8}{1} + \frac{8}{1} = \frac{64}{3},$$

$$RR_{WP_1} = \frac{1}{ER_5} + \frac{1}{ER_6} + \frac{1}{ER_8} + \frac{1}{ER_9} + \frac{1}{ER_{10}} + \frac{1}{ER_{11}} = \frac{8}{3} + \frac{8}{3} + \frac{8}{7} + \frac{8}{7} + \frac{8}{6} + \frac{8}{6} = \frac{432}{42}, \text{ te}$$

$$RR_{WP_2} = \frac{1}{ER_5} + \frac{1}{ER_6} + \frac{1}{ER_7} + \frac{1}{ER_{12}} = \frac{8}{3} + \frac{8}{3} + \frac{8}{2} + \frac{8}{2} = \frac{40}{3}.$$

Vidljivo je da je iznos RR za put WP_1 najmanji. Potrebno je naglasiti da se RR_{WP} računa prema postojećem stanju u mreži (dakle broj iskorištenih ulaza/izlaza se dijeli s brojem ukupnih ulaza/izlaza na multiplekseru/demultiplekseru), dok se pri računanju RR za WP_1 i WP_2 uzima u obzir prolazak dodatnog puta WP koji bi se eventualno preusmjerio i koristio promatrane komponente, tj. proračunava se iznos RR za stanje koje bi odgovaralo preusmjerenom WP tip putom. Preusmjeravanjem valnog puta na put WP_1 dovodi do uklanjanja multipleksera kojem odgovara iznos ER_3 , te demultipleksera s iznosom ER_4 , jer kroz njih ne prolazi više ni jedan valni put.

Na slici 5.21 prikazan je algoritam minimizacije cijene WDM opreme. Konačna cijena ne mora predstavljati optimalno rješenje. Najzahtjevniji dio algoritma je proračun svih mogućih RR za valni put koji se preusmjerava, što zahtjeva utvrđivanje svih putova između para rubnih WDMPOP čvorova. Jasno je da ovaj algoritam ima smisla samo za slučajeve bez zaštite ili za zaštitu s kraja na kraj (1+1, *Path*) gdje je moguće minimizirati cijene primarnih valnih putova i/ili zaštitnih valnih putova.



Slika 5.21 Algoritam minimizacije cijene WDM opreme

U tablici 5.1 prikazana je ovisnost ukupne duljine optičkih linkova, broja multipleksera i optičkih prospojnika u ovisnosti o primijenjenoj minimizaciji. Rezultati se odnose na mrežu sa slike 5.11, uz multipleksere s 8 ulaza i faktor $K=2.5/1000$ u PD modelu (ubrzanje postupka). Minimizacija je provedena nakon početnog dizajna mreže korištenjem najkraćih putova. Minimizacija zaštitnih putova provedena je nakon minimizacije primarnih putova.

Mehanizam	Minimizacija cijene	Pretvorba valnih duljina	Ukupna duljina optičkih linkova	Broj multipleksera
NO	primarni putovi	bez	60580	62
		sa	43830	43
1+1	primarni putovi	bez	89000	114
		sa	57440	76
	zaštitni putovi	bez	88130	106
		sa	57120	74
	primarni i zaštitni putovi	bez	89930	95
		sa	58450	76

Tablica 5.1 Ovisnost WDM opreme o primijenjenoj minimizaciji

Tablica 5.2 prikazuje promjenu srednje vrijednosti iskoristivosti multipleksera i cijene WDM mreže o primijenjenoj minimizaciji.

Mehanizam	Minimizacija cijene	Pretvorba valnih duljina	Srednja vrijednost iskoristivosti multipleksera	Cijena WDM mreže
NO	bez	bez	0.35	123329400
		sa	0.50	106917000
	primarni putovi	bez	0.47	113007600
		sa	0.66	99976900
1+1	bez	bez	0.50	161453900
		sa	0.81	127813300
	primarni putovi	bez	0.55	152567300
		sa	0.81	127096700
	zaštitni putovi	bez	0.57	146930700
		sa	0.81	125553800
	primarni i zaštitni putovi	bez	0.66	138472100
		sa	0.78	126796900

Tablica 5.2 Ovisnost iskoristivosti multipleksera i cijene WDM mreže o primijenjenoj minimizaciji

Rezultati pokazuju dvije osobitosti algoritma minimizacije. U svim slučajevima dolazi do smanjenja cijene WDM mreže i smanjenja broja multipleksera uz povećanje njihove iskoristivosti, no povećanje ukupne duljine linkova. To je posljedica činjenice da je prvotni dizajn bez minimizacije proveden uz pridruživanje primarnih i zaštitnih valnih putova najkraćim fizičkim putovima. Algoritam minimizacije se pri njihovom premještanju vodi samo povećavanjem iskoristivosti opreme koju taj put koristi (tj. smanjivanjem faktora RR za promatrani put). Povećanje srednje iskoristivosti multipleksera je stoga posljedica smanjenja ukupnog broja multipleksera, ali i činjenice da jedan valni put u novoj mreži u prosjeku prolazi kroz više multipleksera. Drugi bitan zaključak je da efikasnost algoritma u pogledu smanjenja cijene raste ukoliko se dopusti pretvorba valnih duljina što je posljedica veće fleksibilnosti u odabiru puta na koji će se premjestiti promatrani valni put u tom slučaju.

6 Performanse sveoptičke mreže

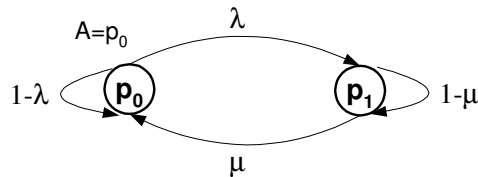
6.1 Raspoloživost

Raspoloživost nekog objekta ($A(t)$) definira se kao vjerojatnost da je objekt u nekom vremenskom trenutku t ispravan. U ovom radu se analizira raspoloživost logičke strukture logička veza (LC, dio 4.4.4) jer ona u potpunosti opisuje vezu između dva para čvorova uzimajući u obzir komunikaciju u oba smjera, te mehanizme zaštite, odnosno postupke u slučaju kvarova na elementima fizičkog puta. Raspoloživost između dva para čvorova je osnova za proračun raspoloživosti mreže, ako se ona definira kao s, t raspoloživost, tj. minimalna raspoloživost komunikacije između dva para čvorova. Potrebno je dakle odrediti raspoloživosti svih logičkih veza (tj. veza između parova čvorova koji komuniciraju).

U sljedećim dijelovima ukratko su prikazani problemi koji nastaju prilikom izračuna raspoloživosti, te način izračuna raspoloživosti mreže.

6.1.1 Izračun raspoloživosti

U ovom se radu raspoloživost mreže računa primjenom Monte Carlo simulacije kvarova. Primijenjen je *on - off* model raspoloživosti prikazan Markovljevim lancem s dva stanja kao na slici 6.1. Raspoloživost sustava jednaka je vjerojatnosti ostanka u stanju raspoloživosti (vjerojatnost p_0).



Slika 6.1 Model raspoloživosti

Intenzitet kvarova λ obrnuto je proporcionalan srednjoj vrijednosti vremena do kvara *MTTF*, dok je intenzitet popravaka μ obrnuto proporcionalan srednjoj vrijednosti vremena do popravka *MTTR* kako prikazuju sljedeći izrazi

$$\alpha = \frac{1}{MTTF}, \quad (6.1)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR}. \quad (6.2)$$

Raspoloživost se općenito sastoji od stacionarnog dijela koji se može prikazati izrazom

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (6.3)$$

te tranzijentnog dijela koji se može zanemariti. Uz te pretpostavke u prvoj aproksimaciji za raspoloživost vrijedi

$$A \approx 1 - \alpha MTTR, \quad (6.4)$$

odnosno za neraspoloživost

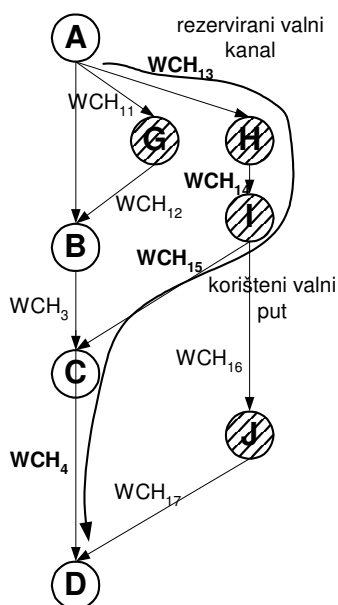
$$U \approx \alpha MTTR. \quad (6.5)$$

Tipične vrijednosti korištene pri proračunu raspoloživosti za komponente čiji su kvarovi uzeti u obzir dana je u tablici 6.1.

Komponenta	Intenzitet kvarova λ [fit]	MTTR [h]
multiplekser	200	21
demultiplekser	200	21
optički kabel	114/km	21
optički prospojnik	200	21
optičko pojačalo	6100	21

Tablica 6.1 Korišteni parametri raspoloživosti

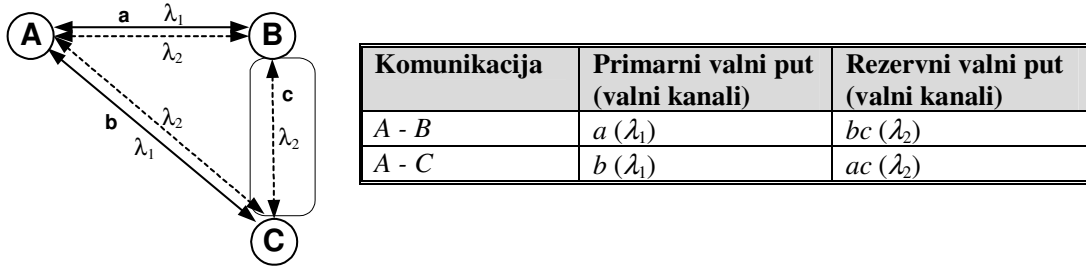
Proračun raspoloživosti komponenata svodi se na proračun raspoloživosti optičkih linkova i WDMPOP čvorova. Raspoloživost linka ovisi o raspoloživosti optičkog kabela u kojem se nalazi (raspoloživost vlakna aproksimirana je tom raspoloživošću, jer je većina kvarova uzrokovana vanjskim utjecajem), te raspoloživošću svih optičkih pojačala od kojih se sastoji. Da bi optički link bio raspoloživ potrebno je da bude raspoloživ optički kabel u kojem se nalazi, te sva pojačala. Raspoloživost WDMPOP čvora ovisi o raspoloživosti elemenata kroz koje prolaze valni putovi koje koristi logička veza. Ako su svi elementi raspoloživi i čvor je raspoloživ. Treba naglasiti da je pri proračunu raspoloživosti logičkog puta njegova stvarna struktura unaprijed nepoznata, jer ona ovisi o tome da li se koristi primarni valni, ili neka zaštitna kombinacija, što opet ovisi o raspoloživosti elemenata. Prije proračuna poznati su samo mogući elementi koji mogu sudjelovati u analiziranom logičkom kanalu što se opisuje grafom koji je njegov dio (dio 4.4.3). Proračun raspoloživosti takvog grafa svodi se na pronalaženje najkraćeg raspoloživog puta kroz graf. U osnovi se radi o putu koji koristi što više elemenata primarnog puta (zaštita po dijelovima - *Span*, SPAF), ili zaštitnom/rezervnom valnom putu (zaštita/obnavljanje s kraja na kraj - 1+1, *Path*). Prilikom pronalaženja takvog puta obilježavaju se valni kanali koji se koriste (rezervacija resursa) što je potrebno zbog uvođenja preklapanja domena rezervnih putova, odnosno nerasploživosti zbog blokiranja kod višestrukih kvarova kako je prikazano na slici 6.2.



Slika 6.2 Proračun puta i rezervacija resursa (SPAF)

Osnovni problem pri proračunu raspoloživosti obnavljanja s dijeljenim kapacitetima jest problem blokiranja koji se pojavljuje jer dijelovi rezervnog puta mogu biti dijeljeni između više primarnih putova, a blokiranje može nastati na optičkom prospojniku ako ne postoji

raspoloživi izlaz, odnosno na WDM linku ako ne postoji raspoloživa valna duljina. Ova dva slučaja su međuvizna, jer neraspoloživost izlaza prospojnika zapravo znači da je tražena valna duljina koja odgovara prospojniku na izlaznom WDM linku zauzeta. Premda svi elementi na rezervnom putu mogu biti ispravni, on ipak može biti neraspoloživ (što implicira i neraspoloživost logičkog kanala LCH, odnosno logičke veze LC) ukoliko je kvar nekog drugog primarnog puta uzrokovao korištenje dijela rezervnog puta. Jasno je da ovaj slučaj nastaje samo ako se u obzir uzmu višestruki kvarovi. U simulaciji kvarova višestruki kvarovi se pojavljuju, no mehanizmi zaštite i obnavljanja su projektirani za jednostruke kvarove. Zbog toga se i dobiva raspoloživost mreže manja od 1. Da bi se riješio problem višestrukih kvarova uvodi se pojam domene rezervnih putova. Dva primarna puta spadaju u istu domenu rezervnih putova ako im rezervni putovi dijele neki fizički resurs. Na slici 6.3 prikazan je primjer preklapanja domena rezervnih putova primarnih valnih putova u komunikacijama A - B i A - C.



Slika 6.3 Problem preklapanja zaštitnih domena

Oba primarna valna puta imaju rezervne valne putove koji koriste istu valnu duljinu λ_2 na WDM linku koji prolazi granom c, odnosno koji koriste isti valni kanal na WDM linku c. To znači da obje logičke konekcije neće biti istovremeno raspoložive u slučaju istovremenog kvara nekog od elemenata na primarnom putu za komunikaciju A - B i A - C. Kvar elementa sasvim općenito može biti kvar WDM linka ili kvar WDMPOP čvora (koji je posljedica kvara nekog WDM elementa unutar njega).

U ovakvim slučajevima preživljava ona veza koja je prva rezervirala fizičke resurse. Rezervacija je resursa u ovom radu rađena prilikom traženja najkraćeg puta u stablu sadržanom u opisu logičkog kanala (dio 4.4.3).

Raspoloživost mreže se može računati kao obična s, t raspoloživost u kojem slučaju je jednaka najmanjoj raspoloživosti u skupu logičkih veza:

$$A_{n,w} = \min_{i,j \in n, i \neq j} \{A[LC(i, j)]\}, \quad (6.6)$$

odnosno neraspoloživost mreže jednaka je najvećoj neraspoloživosti u skupu logičkih veza:

$$U_{n,w} = \max_{i,j \in n, i \neq j} \{U[LC(i, j)]\}. \quad (6.7)$$

Problem gornjeg pristupa je što se u obzir uzima samo jedna logička veza. Moguć je pristup u kojem se radi usrednjenje raspoloživosti/neraspoloživosti logičkih veza

$$A_{n,avl} = \frac{1}{N_{LC}} \sum_{i,j \in n, i \neq j} A[LC(i, j)], \quad (6.8)$$

$$U_{n,avl} = \frac{1}{N_{LC}} \sum_{i,j \in n, i \neq j} U[LC(i, j)], \quad (6.9)$$

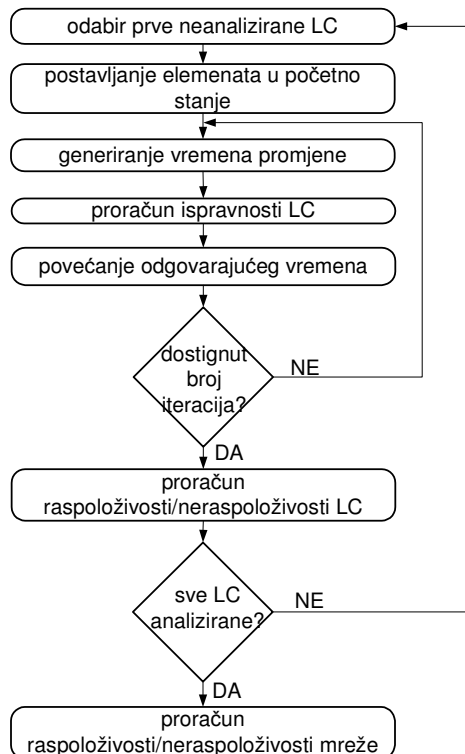
ili se svakoj logičkoj vezi pridjeljuje težinski faktor koji odgovara prometnim zahtjevima podržanim tom logičkom vezom

$$A_{n,av2} = \frac{1}{D_n} \sum_{i,j \in n, i \neq j} D(i,j)A[LC(i,j)], \quad (6.10)$$

$$U_{n,av2} = \frac{1}{D_n} \sum_{i,j \in n, i \neq j} D(i,j)U[LC(i,j)], \quad (6.11)$$

pri čemu su $D(i, j)$ prometni zahtjevi između čvorova i i j , a D_n suma svih prometnih zahtjeva (tj. jednog trokuta matrice prometnih zahtjeva).

U ovom se radu koristi Monte Carlo (MC) simulacija za proračun raspoloživosti mreže čime se izbjegava algoritamska složenost analitičkog proračuna. Ideja ovog pristupa je mjerenje ukupnog vremena u kojem je logička veza bila raspoloživa. Raspoloživost mreže jednaka je omjeru ukupnog vremena rada mreže i ukupnog vremena simulacije. Tijek MC simulacije prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4 Monte Carlo simulacija raspoloživosti mreže

Za simulaciju su potrebne vrijednosti $MTTR$ i $MTTF$ za sve komponente koje se uzimaju u obzir u pogledu kvarova. Ideja je da se proračunavaju vremena promjene u mreži, koja odgovaraju kvaru ili popravku neke komponente. To se vrijeme izračunava uz pretpostavke *on - off* modela (vjerojatnost prelaska u drugo stanje je 1), srednje vrijednosti vremena prelaska $MTTF/MTTR$ i eksponencijalne razdiobe:

vjerojatnost prelaska	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td><i>on</i></td> <td><i>off</i></td> </tr> <tr> <td><i>on</i></td> <td>0 1</td> </tr> <tr> <td><i>off</i></td> <td>1 0</td> </tr> </table>	<i>on</i>	<i>off</i>	<i>on</i>	0 1	<i>off</i>	1 0	srednje vrijeme do prelaska	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td><i>on</i></td> <td><i>off</i></td> </tr> <tr> <td><i>on</i></td> <td>0 $MTTF$</td> </tr> <tr> <td><i>off</i></td> <td>$MTTR$ 0</td> </tr> </table>	<i>on</i>	<i>off</i>	<i>on</i>	0 $MTTF$	<i>off</i>	$MTTR$ 0
<i>on</i>	<i>off</i>														
<i>on</i>	0 1														
<i>off</i>	1 0														
<i>on</i>	<i>off</i>														
<i>on</i>	0 $MTTF$														
<i>off</i>	$MTTR$ 0														

Svaka promjena stanja elementa potencijalno uzrokuje promjenu stanja logičke veze koja se promatra. Zbog toga je potrebno proračunavati raspoloživost logičke veze (pronalaženje najkraćeg puta u grafu). Prilikom svakog proračuna raspoloživosti povećava se vrijeme raspoloživosti ili nerasploživosti te logičke veze. Nakon što su analizirane sve logičke veze izračunava se raspoloživost mreže prema nekoj od definicija raspoloživosti navedenih u izrazima (6.6) - (6.11).

Točnost ovakvog proračuna ovisi o broju iteracija simulacije (jedna iteracija simulacije odgovara promjeni stanja jedne komponente). U tablici 6.2 prikazani su rezultati izvođenja simulacije na primjeru topologije s najmanjom cijenom (slika 5.11). Rezultati su izraženi preko nerasploživosti mreže.

Mehanizam zaštite/obnavljanja	Broj valnih duljina	Neraspoloživost [$\cdot 10^{-6}$]		
		$U_{n,w}$	$U_{n,av1}$	$U_{n,av2}$
NO	4	5033.43	2403.21	2255.65
	32	5251.72	2526.52	2429.88
NOMC*	4	4369.2	2908.8	2912.7
	32	4783.17	2806.81	2912.68
1+1	4	48.23	17.09	17.82
	32	67.34	41.98	43.57
1+1MC*	4	552.32	46.04	23.58
	32	178.30	64.97	58.28
Path	4	16.17	5.46	5.29
	32	10.99	5.10	4.95
Span	4	38.09	21.34	20.94
	32	40.79	21.20	20.71
SPAF	4	50.69	25.57	24.75
	32	50.71	25.72	24.67

*Oznaka MC (*minimal cost*) odnosi se na minimizaciju cijene primarnih valnih putova prema algoritmu opisanom u dijelu 5.5.

Tablica 6.2 Rezultati mjerenja nerasploživosti mreže

Proračun nerasploživosti proveden je MC simulacijom kvarova sa 100000 iteracija, uz dizajn s 4 i 32 valne duljine bez uporabe valnih pretvarača. Vidljivo je da se primjenom minimizacijskog postupka povećava nerasploživost mreže računata kao srednja vrijednost nerasploživosti. Odstupanja s,t nerasploživosti od ovog pravila su moguća jer se radi o slučajnom generiranju vremena kvarova prema zadanoj srednjoj vrijednosti i razdiobi (eksponencijalna u ovom slučaju). Zbog toga vrijednosti za $U_{n,w}$ treba promatrati s većim oprezom od onih za $U_{n,av1}$ i $U_{n,av2}$.

Iz rezultata se može zaključiti da su iznosi nerasploživosti mreža sa zaštitom ili obnavljanjem za dva reda veličine manji od onih za mrežu bez zaštite/obnavljanja.

6.2 BER

BER (*Bit Error Rate*) definira se kao omjer broj pogrešno primljenih bitova i broja svih primljenih bitova.

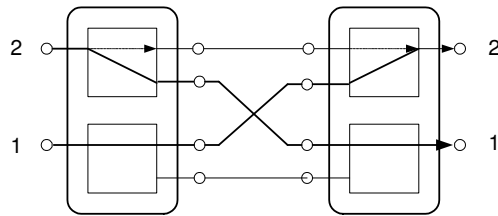
6.2.1 Modeliranje šuma spontane emisije

Šum spontane emisije karakterističan je za aktivne elemente u fizikalnom smislu načina rada, te je u ovom radu ograničen na optička pojačala (dio 4.1.1).

6.2.2 Modeliranje šuma preslušavanja

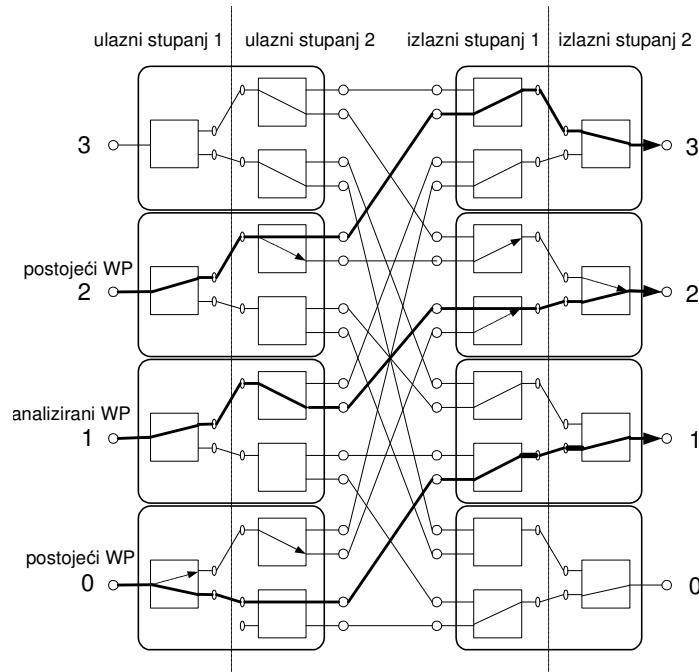
Za razliku od šuma spontane emisije koji se pojavljuje zbog fizikalnog načina rada nekog elementa, šum preslušavanja pojavljuje se zbog fizičke izvedbe neke komponente, te je stoga karakterističan i za pasivne komponente (u fizikalnom smislu načina rada) kao što su optički prospojnici.

Preslušavanje (*crosstalk*) pojavljuje se u prospojniku kada se dio signala počne miješati s drugim signalom koji istovremeno propagira komutatorskom matricom. Omjer snage signala koja odlazi na neželjeni izlaz komutatorskog elementa (raspreznika) i ulazne snage signala se naziva omjerom preslušavanja tog komutatorskog elementa. Na slici 6.5 prikazano je preslušavanje u 2×2 prospojniku pri čemu se dio signala $2 \rightarrow 1$ miješa sa signalom $1 \rightarrow 2$.



Slika 6.5 Preslušavanje u 2×2 prospojniku

U ovom radu su unesene neke pretpostavke pri proračunu šuma preslušavanja [12]. Šum preslušavanja se općenito mijenja tijekom vremena, tj. veći je prilikom uspostave virtualnog valnog puta, a smanjuje se u stacionarnom načinu rada. Ta je razlika dovoljno mala da se može zanemariti u analizi. Također se analizira samo preslušavanje prvog reda, tj. ono koje nastaje zbog pogrešnog rada jednog raspreznika i spreznika. Postoje i preslušavanja viših redova, no ona su daleko manja pa se mogu zanemariti. Omjer preslušavanja prvog reda jednak je kvadratu omjera preslušavanje jednog komutatorskog elementa s obzirom da signal mora biti pogrešno preusmjeren na dva uzastopna elementa.



Slika 6.6 Preslušavanje u 4×4 prospojniku

Na slici 6.6 analiziran je slučaj preslušavanja u 4×4 prospojniku, tj. miješanje signala 2→3 i 0→1 sa signalom 1→2.

Osnovni problem je utvrđivanje signala koji utječu na promatrani signal što se tiče preslušavanja prvog reda. U algoritmu se pronalaze svi mogući signali koji mogu interferirati s postojećim, te se tada iz tog skupa izdvajaju oni koji zaista postoje, tj. prolaze kroz prospojnik. Ukoliko se uvede sljedeća notacija:

Oznaka	Značenje
N	broj ulaznih/izlaznih portova
$S^{N \times N}$	skup mogućih promatranih (primarnih) signala kroz prospojnik, $ S^{N \times N} = N^2$
$s \rightarrow d$	signal između ulaznog porta s i izlaznog porta d $1 \leq s \leq N, 1 \leq d \leq N$
$\mathfrak{S}_{s \rightarrow d}^{N \times N}$	skup interferirajućih signala primarnom $s \rightarrow d$ signalu na $N \times N$ prospojniku
$E^{N \times N}$	skup postojećih signala na $N \times N$ prospojniku
$SI_{s \rightarrow d}^{N \times N}$	skup izvora interferirajućih signala signalu $s \rightarrow d$
$DI_{s \rightarrow d}^{N \times N}$	skup odredišta interferirajućih signala signalu $s \rightarrow d$

uz uvjet

$$a \in SI_{s \rightarrow d}^{N \times N}, i b \in DI_{s \rightarrow d}^{N \times N}, \forall (a \rightarrow b) \in \mathfrak{S}_{s \rightarrow d}^{N \times N}. \quad (6.12)$$

Uz navedene oznake moguće je uvesti kraću notaciju

$$\mathfrak{S}_{s \rightarrow d}^{N \times N} \text{ kao } SI_{s \rightarrow d}^{N \times N} \Rightarrow DI_{s \rightarrow d}^{N \times N}. \quad (6.13)$$

Cilj je određivanje vrijednosti izraza

$$E^{N \times N} \cap \mathfrak{S}_{s \rightarrow d}^{N \times N}. \quad (6.14)$$

U $N \times N$ prospojniku pogrešno usmjeravanje signala može se dogoditi u jednom (analizira se samo preslušavanje prvog reda) od $\log_2 N$ ulaznih raspredžnika i jednom od $\log_2 N$ izlaznih sprežnika, što daje ukupno $(\log_2 N)^2$ različitih načina stvaranja preslušavanja prvog reda. Uvodi se notacija za jednoznačno obilježavanje načina nastanka preslušavanja, i to tako da se slovo I stavlja na mjesto komutatorskog elementa gdje nije došlo do greške, a N na mjesto komutatorskog elementa gdje je došlo do pogrešnog preusmjeravanja. Ukupan broj slova će biti $2\log_2 N$. Tako će oznaka "IN/NI" kod 4×4 prospojnika značiti da se promatrani (primarni) signal miješa sa signalom koji je pogrešno preusmjeren na elementu drugog ulaznog stupnja i elementu prvog izlaznog stupnja. U primjeru sa slike 6.6 signal 2→3 miješa se sa (primarnim) signalom 1→2 u ulaznom stupnju 2 i izlaznom stupnju 2 što daje "IN/IN" tip preslušavanja prvog reda.

Kako je podrazumijevana dimenzija prospojnika u ovom radu 8×8 detaljnije će se analizirati pronalaženje svih signala (par ulaznog i izlaznog porta) koji se mogu miješati s nekim promatranim signalom. Analizom za signal 0→4 (signal s ulaznog porta 0 prema izlaznom portu 1) slijedi

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_{0 \rightarrow 4}^{8 \times 8} &= \{1 \rightarrow 5, 2 \rightarrow 5, 4 \rightarrow 5, \\ &\quad 1 \rightarrow 6, 1 \rightarrow 7, 2 \rightarrow 6, 2 \rightarrow 7, 4 \rightarrow 6, 4 \rightarrow 7, \\ &\quad 1 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3, \\ &\quad 2 \rightarrow 0, 2 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, \\ &\quad 4 \rightarrow 0, 4 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 2, 4 \rightarrow 3\} \\ &= \{1, 2, 4\} \Rightarrow \{0, 1, 2, 3, 5, 6, 7\} \end{aligned}$$

Skup svih interferirajućih signala svim mogućim primarnim signalima s ulaznog porta 0 u 8×8 prospojniku prikazan je u tablici 6.3.

Analizirani valni kanal	Interferirajući valni kanal								
	IIN/ NII	IIN/ INI	INI/ IIN	INI/ NII	INI/ INI	INI/ IIN	NII/ NII	NII/ INI	NII/ IIN
0→0	1→1	2→1	4→1	1→2 1→3	2→2 2→3	4→2 4→3	1→4 1→5 1→6 1→7	2→4 2→5 2→6 2→7	4→4 4→5 4→6 4→7
0→1	1→0	2→0	4→0	-	-	-	-	-	-
0→2	1→3	2→3	4→3	1→0 1→1	2→0 2→1	4→0 4→1	-	-	-
0→3	1→2	2→2	4→2	-	-	-	-	-	-
0→4	1→5	2→5	4→5	1→6 1→7	2→6 2→7	4→6 4→7	1→0 1→1 1→2 1→3	2→0 2→1 2→2 2→3	4→0 4→1 4→2 4→3
0→5	1→4	2→4	4→4	-	-	-	-	-	-
0→6	1→7	2→7	4→7	1→4 1→5	2→4 2→5	4→4 4→5	-	-	-
0→7	1→6	2→6	4→6	-	-	-	-	-	-

Tablica 6.3 Interferirajući signali odabranim primarnim signalima

Cilj je utvrditi skup interferirajućih signala primarnom u općem slučaju prospojnika $N \times N$. Problem se može podijeliti na dva neovisna problema utvrđivanja izvora (s_i) i određivanja odredišta (d_i) interferirajućeg signala uz poznato izvorište (s_p) i odredište (d_p) primarnog signala, tj. skupove

$$SI_{s \rightarrow d}^{N \times N} = \{s_i\} \text{ i } DI_{s \rightarrow d}^{N \times N} = \{d_i\}. \quad (6.15)$$

Najjednostavniji način je korištenjem binarnog prikaza izvorišnog i odredišnog porta primarnog signala za što je potrebno $M = \log_2 N$ bita. Brojevi portova su u skupu $\{0, \dots, N-1\}$, tj. enumeracija ide od 0. Izvorišni portovi interferirajućih signala određuju se samo prema izvorišnom portu primarnog signala, a odredišni portovi interferirajućih signala prema odredišnom portu primarnog signala. Analizom se dobivaju sljedeći izrazi za opći slučaj $N \times N$ prospojnika:

$$\begin{aligned}
s_{i_0} &= 0 \\
s_{i_1} &= 0 \\
&\dots \\
s_{i_{i-1}} &= 0 \\
s_{i_i} &= \overline{sp_i} \\
s_{i_{i+1}} &= sp_{i+1} \\
&\dots \\
s_{i_{M-1}} &= sp_{M-1}
\end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned}
d_{i_0} &= 0|1 \\
d_{i_1} &= 0|1 \\
&\dots \\
d_{i_{i-1}} &= 0|1 \\
d_{i_i} &= \overline{dp_i} \\
d_{i_{i+1}} &= dp_{i+1} \\
&\dots \\
0 \leq i \leq M-1, \text{ mod}(dp, 2^1) &= 0,
\end{aligned} \quad (6.17)$$

$$0 \leq i \leq M-1$$

gdje oznaka $0|1$ označava da na tom mjestu može biti bit 0 ili 1.

Treba naglasiti da se promatra samo preslušavanje između istih valnih duljina (*homowavelength crosstalk*), što ne unosi nikakva ograničenja na navedene izraze ukoliko se primjenjuje slojeviti dizajn WDMPOP čvora prikazan u dijelu 4.1.1. Ukoliko istim

prospojnikom mogu prolaziti signali različitih valnih duljina pri određivanju skupova izvora i odredišta intreferirajućih signala potrebno je uvesti i ograničenje iste valne duljine.

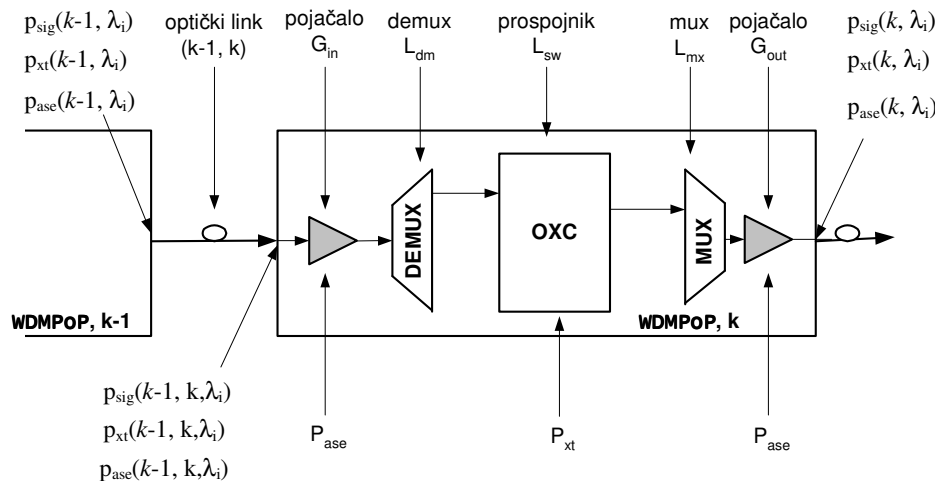
6.2.3 Izračun BER-a

BER se može izračunati iz odnosa snage signala i dodanog šuma na optičkom prijemniku, koristeći izraze za opto-električnu pretvorbu [12]. To znači da je BER moguće izračunati tek na izlasku iz sveoptičke mreže kada signal dođe do prijemnika na linijskoj kartici. Na odnos snage signala i šuma utječu optičke komponente kroz koje je signal prošao i to:

Komponenta	Utjecaj	Oznaka	Izraz
WDM multiplexer	gušenje	L_{mx}	fiksno (4dB)
WDM demultiplexer	gušenje	L_{dm}	fiksno (4dB)
optički prospojnik	gušenje	L_{sw}	$2\log_2 NL_s + 4L_w$ dB ($L_s=1$ dB, $L_w=1$ dB)
	šum preslušavanja	$p_{xt}(\lambda)$	$\sum_{j=1}^J X_{sw} p_{in}$, ($X_{sw}=25 - 30$ dB)
optičko pojačalo	pojačanje	G	fiksno (16-18 dB)
	šum spontane emisije	$p_{ase}(\lambda)$	$2n_{sp}[G(\lambda)-1]h\nu B_o$, ($n_{sp}=1.5$)
optičko vlakno	gušenje	L_f	0.22 dB/km

pri čemu su L_s uneseni gubici u optičkom prospojniku, L_w gubici na spojevima u prospojniku, λ valna duljina signala, h Boltzmannova konstanta, ν frekvencija signala, X_{sw} omjer preslušavanja prospojnika (uz uvjete navedene u dijelu 6.2.2), J ukupan broj signala koji utječu na primarni, p_{in} ulazna snaga signala u pojačalo, B_o propisni opseg pojačala, a n_{sp} faktor spontane emisije. U tablici su navedene i neke tipične vrijednosti parametara.

Proračun BER-a temelji se na proračunu snage signala (signal koji prenosi podatke, p_{sig}), šuma preslušavanja (preslušavanje prvog reda iste frekvencije, p_{xt}), te šuma spontane emisije (p_{ase}). Šum preslušavanja se signalu dodaje jedino na optičkom prospojniku, a šum spontane emisije na optičkom pojačalu. Treba napomenuti da se radi o pojednostavljenju jer šum spontane emisije nastaje u svakom aktivnom elementu (npr. pretvaraču valnih duljina), a šum preslušavanja u elementima s ogibnim rešetkama (npr. multiplexer i demultiplexer). Na slici 6.7 prikazan je utjecaj na snagu signala u WDMPOP čvoru.



Slika 6.7 Utjecaji na snagu optičkog signala unutar WDMPOP čvora

Prije proračuna izraza za snagu u WDMPOP čvoru potrebno je analizirati optički link između WDMPOP čvorova $k-1$ i k koji je modeliran od n segmenata vlakna gušenja $L(j)$ za dio j , te n -

1 pojačala pojačanja $G(j, \lambda_j)$ za pojačalo j (slika 4.14). Za snagu signala $p(k-1, k, \lambda_i)$ na izlasku linka koji se nalazi između čvorova $k-1$ i k može se pisati

$$p_{sig}(k-1, k, \lambda_i) = p_{sig}(k-1, \lambda_i) \left(\prod_{j=1}^{n-1} L_f(j) G(j, \lambda_i) \right) L_f(n), \quad (6.18)$$

pri čemu je $p_{sig}(k-1, \lambda_i)$ snaga signala na ulasku u optički link, tj. na izlasku iz $k-1$ -og WDMPOP čvora.

Navedena formula se najčešće pojednostavljuje s obzirom da je gušenje $L(j)$ najčešće za prvih $n-1$ dijelova isto zbog jednake duljine koja odgovara razmaku između optičkih pojačala. Vrijednost $L(n)$ se općenito razlikuje zbog različite duljine (analiza u dijelu 4.4.1).

Promjena šuma spontane emisije je posljedica $n-1$ pojačala u optičkom linku što se može izraziti rekurzivnim izrazom

$$p_{ase,f}(k-1, k, j, \lambda_i) = p_{ase}(k-1, k, j-1, \lambda_i) L_f(j) G(j, \lambda_i) + 2n_{sp} [G(j, \lambda_i) - 1] h \nu_i B_0, \quad (6.19)$$

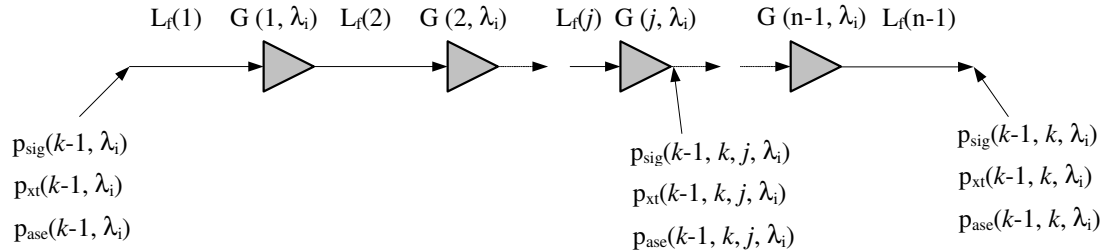
za snagu šuma spontane emisije nakon izlaska iz j -tog stupnja (j -tog vlakna) linka između WDMPOP čvorova $k-1$ i k . j je u tom slučaju iz skupa $\{2, n-1\}$.

Rubni izrazi za navedenu rekurziju su

$$p_{ase,f}(k-1, k, 1, \lambda_i) = p_{ase}(k-1, k, \lambda_i) L_f(j) G(j, \lambda_i) + 2n_{sp} [G(j, \lambda_i) - 1] h \nu_i B_0, \quad (6.20)$$

za snagu šuma spontane emisije nakon izlaska iz prvog stupnja, te snagu nakon izlaska iz vlakna označenu s $p_{ase}(k-1, k, \lambda_i)$:

$$p_{ase}(k-1, k, \lambda_i) = p_{ase,f}(k-1, k, n, \lambda_i) = p_{ase}(k-1, k, n-1, \lambda_i) L_f(n). \quad (6.21)$$



Slika 6.8 Utjecaj optičkog linka na snagu signala i snage šuma

Optičko vlakno ne dodaje šum preslušavanja, ali djeluje na njega zbog pojačavanja i gušenja prema izrazu

$$p_{xt}(k-1, k, \lambda_i) = p_{xt}(k-1, \lambda_i) \left(\prod_{j=1}^{n-1} L(j) G(j, \lambda_i) \right) L(n), \quad (6.22)$$

gdje je $p_{xt}(k-1, \lambda_i)$ šum preslušavanja na izlasku iz $k-1$ -og čvora.

U svim narednim izrazima promatra se utjecaj na snagu signala, šuma spontane emisije i šuma preslušavanja u WDMPOP čvoru.

Na sve tri snage utječe gušenje i pojačanje elemenata čvora, pa se tako za snagu signala valne duljine λ_i na izlasku iz k -tog WDMPOP čvora na putu između izvorišta i odredišta može pisati

$$p_{sig}(k, \lambda_i) = p_{sig}(k-1, k, \lambda_i) G_{in}(k, \lambda_i) L_{dm}(k) L_{sw}(k) L_{mx}(k) G_{out}(k, \lambda_i), \quad (6.23)$$

pri čemu je $p_{sig}(k-1, k, \lambda_i)$ snaga signala na ulasku u k -ti čvor, odnosno snaga signala na izlasku iz linka koji povezuje $k-1$ i k -ti čvor.

Navedeni izraz opisuje građu WDMPOP čvora sa slike 6.7. Ukoliko se na ulazi nalazi optička sklopka (gubici L_{swin}) ili običan rasprežnik (gubici u idealnom slučaju $L_{splin}=1/2$ ili 3dB), odnosno na izlazu sklopka (gubici L_{swout}) ili rasprežnik (gubici u idealnom slučaju $L_{splin}=1/2$ ili 3dB) potrebno je i njihove utjecaje uzeti u obzir preko izraza

$$p'_{sig}(k, \lambda_i) = p_{sig}(k, \lambda_i)L_{swin}(k)L_{splin}(k)L_{swout}(k)L_{splout}(k). \quad (6.24)$$

Pretpostavlja se da je optički sprežnik idealan, pa se njegov utjecaj kao ni utjecaj pretvarača valnih duljina ne uzima u obzir.

Šum preslušavanja dodaje optički prospojnik u WDMPOP čvoru. Utjecaj rubne optičke sklopke (1×2 , 2×1) se u ovoj analizi zanemaruje jer se njome širi istovremeno samo jedan optički signal. Ulazni šum spontane emisije u k -ti čvor je izlaz iz ($k-1$, k) linka prema izrazu (6.21). Slijede izrazi za snagu šuma preslušavanja u k -tom čvoru

$$p_{xt}(k, \lambda_i) = p_{xt1}(k, \lambda_i) + p_{xt2}(k, \lambda_i), \quad (6.25)$$

pri čemu je

$$p_{xt1}(k, \lambda_i) = p_{xt}(k-1, \lambda_i)L_f(k-1, \lambda_i)G_{in}(k, \lambda_i)L_{dm}(k, \lambda_i)L_{sw}(k)L_{mx}(k)G_{out}(k, \lambda_i) \quad (6.26)$$

opis utjecaja elemenata na snagu šuma koji ulazi iz linka u čvor, a

$$p_{xt2}(k, \lambda_i) = \sum_{j=1}^{J_k} X_{sw} p_{in}(j, k, \lambda_i)L_{sw}(k)L_{mx}(k)G_{out}(k, \lambda_i) \quad (6.27)$$

utjecaj na snagu šuma koji se dodaje u prospojniku u čvoru. $p_{in}(j, k, \lambda_i)$ je snaga j -tog signala koji interferira s promatranim u smislu preslušavanja prvog reda.

Ponovno ukoliko se koriste rubni sprežnici ili rasprežnici vrijedi

$$p'_{xt}(k, \lambda_i) = p_{xt1}(k, \lambda_i)L_{swin}(k)L_{splin}(k)L_{swout}(k)L_{splout}(k) + p_{xt2}(k, \lambda_i)L_{swout}(k)L_{splout}(k). \quad (6.28)$$

Za šum spontane emisije izraz se dijeli na tri dijela jer unutar čvora (potencijalno) postoje dva izvora šuma (ulazno i izlazno pojačalo):

$$p_{ase}(k, \lambda_i) = p_{ase1}(k, \lambda_i) + p_{ase2}(k, \lambda_i) + p_{ase3}(k, \lambda_i), \quad (6.29)$$

gdje je

$$p_{ase1}(k, \lambda_i) = p_{ase}(k-1, k, \lambda_i)L_f(k-1, k)G_{in}(k, \lambda_i)L_{dm}(k)L_{sw}(k)L_{mx}(k)G_{out}(k, \lambda_i) \quad (6.30)$$

opis utjecaja elemenata čvora na ulazni šum spontane emisije $p_{ase}(k-1, k, \lambda_i)$,

$$p_{ase2}(k, \lambda_i) = 2n_{sp}[G_{in}(k, \lambda_i) - 1]h\nu_i B_0 L_{dm}(k)L_{sw}(k)L_{mx}(k)G_{out}(k, \lambda_i) \quad (6.31)$$

utjecaj elemenata na šum spontane emisije koji se pribraja u prvom pojačalu (ulaznom), te

$$p_{ase3}(k, \lambda_i) = 2n_{sp}[G_{out}(k, \lambda_i) - 1]h\nu_i B_0 \quad (6.32)$$

šum spontane emisije koji nastaje u drugom (izlaznom) pojačalu.

Kao i za prijašnje izraze moguće je uzeti u obzir utjecaj ulazno - izlaznih rasprežnika i prospojnika ako oni postoje

$$p'_{ase}(k, \lambda_i) = p_{ase1}(k, \lambda_i)L_{swin}(k)L_{splin}(k)L_{swout}(k)L_{splout}(k) + [p_{ase2}(k, \lambda_i) + p_{ase3}(k, \lambda_i)]L_{swout}(k)L_{splout}(k) \quad (6.33)$$

Broj članova koji utječu na snagu signala ovisi o primijenjenom dizajnu WDMPOP čvorova. Tako ako nema optičkih prospojnika u čvorovima (npr. scenarij bez zaštite ili 1+1 zaštita)

nema ni šuma preslušavanja, dok u linku s prijenosom u cijelom pojasu koje ne koristi optička pojačala nema dodavanja šuma spontane emisije. U izrazima za gušenje i pojačanje faktori koji odgovaraju nepostojećim komponentama zamjenjuju se 1.

Nakon što su analizirani svi utjecaji na snagu signala i šumova može se pristupiti modeliranju prijemnika na kojem se računa konačni BER. Elektromagnetski val koji dolazi na prijemnik se može opisati izrazom

$$E_R(t) = A \cos(2\pi\nu_i t + \varphi(t)) + E_{xt}(t) + E_{ase}(t), \quad (6.34)$$

pri čemu prvi član izraza opisuje elektromagnetski val signala koji prenosi korisnu informaciju na frekvenciji ν_i , amplitude A i faze $\varphi(t)$, dok druga i treća komponenta opisuju signal šuma preslušavanja i šuma spontane emisije. Elektromagnetski val u prijemniku stvara fotostruju iznosa

$$i_p(t) = R_\lambda \langle E_R^2(t) \rangle + i_{sh}(t) + i_{th}(t), \quad (6.35)$$

gdje prvi član predstavlja srednju kvadratnu vrijednost odgovora fotodetektora na ulazni val $E_R(t)$, pri čemu je R_λ faktor osjetljivosti (*responsibility*) fotodetektora, drugi član opisuje šum sačme koji proizvodi upadni val, a treći toplinski šum prijemnika. Prvi član gornjeg izraza se može prikazati kao

$$R_\lambda \langle E_R^2(t) \rangle = i_s(t) + i_{sx}(t) + i_{ssp}(t) + i_{xx}(t) + i_{spsp}(t) + i_{xsp}(t), \quad (6.36)$$

pri čemu je $i_s(t)$ član koji odgovara željenoj komponenti signala, a ostali članovi komponentama *beat* šuma, i to između signala i preslušavanja ($i_{sx}(t)$), signala i ASE ($i_{ssp}(t)$), preslušavanja i preslušavanja ($i_{xx}(t)$), ASE i ASE ($i_{spsp}(t)$), te preslušavanja i ASE ($i_{xsp}(t)$). Dominantan utjecaj imaju kombinacije signal - preslušavanje i signal - ASE pa se gornji izraz može aproksimirati

$$i_p(t) = i_s(t) + [i_{sx}(t) + i_{ssp}(t) + i_{sh}(t) + i_{th}(t)] = \quad (6.37)$$

$$= I_{si} + n_i(t) = \quad (6.38)$$

$$= R_\lambda s(N, \lambda_i) b_i + n_i(t), \quad (6.39)$$

gdje indeks i označava bit 0 ili 1, I_{si} komponentu fotostruje koja odgovara signalu, $s(N, \lambda_i)$ srednju vrijednost primljene optičke snage, a $b_i=2$ ili 0 za $i=1$ ili 0 respektivno. Električni šum se modelira slučajnim Gausovim procesom sa srednjom vrijednošću 0 i varijancom jednakom

$$\sigma_i^2 = \sigma_{sxi}^2 + \sigma_{sspi}^2 + \sigma_{shi}^2 + \sigma_{th}^2, \quad (6.40)$$

pri čemu su odgovarajuće varijance šuma jednake

$$\sigma_{sxi}^2 = 2\xi_{pol} R_\lambda^2 b_i s(N, \lambda_i) p_{xt}(N, \lambda_i), \quad (6.41)$$

$$\sigma_{sspi}^2 = 4R_\lambda^2 b_i s(N, \lambda_i) p_{ase}(N, \lambda_i) B_e / B_0, \quad (6.42)$$

$$\sigma_{shi}^2 = 2qR_\lambda (b_i s(N, \lambda_i) + p_{xt}(N, \lambda_i) + p_{ase}(N, \lambda_i)) B_e, \quad (6.43)$$

$$\sigma_{th}^2 = \eta_{th} B_e, \quad (6.44)$$

$$\sigma_{th}^2 = \eta_{th} B_e. \quad (6.45)$$

Izrazi za snage korišteni u gornjim izrazima definirani su u izrazima (6.41) - (6.45). Izraz (6.41) opisuje varijancu signal - preslušavanje *beat* šuma, pri čemu je ξ_{pol} (=1/2) faktor promjene polarizacije između valova signala i preslušavanja. Izraz (6.42) opisuje varijancu signal - ASE *beat* šuma s B_0 i B_e kao širinom optičkog i električnog pojasa prijemnika ($B_e=0.7r$, r - brzina prijenosa sučelja). Izraz (6.45) daje varijancu toplinskog šuma gdje η_{th}

odgovara spektralnoj gustoći struje toplinskog šuma u optičkom prijemniku ($(n_{th})^{1/2} = 5.3 \cdot 10^{-12} \text{ A/Hz}^{1/2}$). U zgradama su dane tipične vrijednosti parametara korištene u simulaciji.

BER prijemnika se računa preko praga odluke I_{TH} . Jasno je da se optimalnim izborom praga odluke može minimizirati BER i to korištenjem izraza

$$I_{TH} = \frac{\sigma_0 I_{s1}}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (6.46)$$

no u ovom radu takva optimizacija nije provedena jer ona zahtjeva predhodno poznavanje razina snage signala, šuma preslušavanja i šuma spontane emisije na prijemniku koji se izračunavaju nakon prospajanja valnih putova i općenito ovise o fizičkom putu kojim prolaze. Zbog toga se optimizacija ne može provesti u statičkom obliku, već je potrebno dinamički određivati prag što unosi značajnu kontrolnu informaciju u mrežu. Zbog toga se uvodi aproksimacija pretpostavkom savršenog lasera ($b_0=0$, te $I_{s0}=0$), te odnosa $I_{TH}=I_{s1}/2$. Uz te pretpostavke za BER prijemnika slijedi (prema [12])

$$P_b = 0.25 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{I_{s1} - I_{TH}}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{I_{TH}}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right]. \quad (6.47)$$

U tablici 6.4 prikazane su vrijednosti BER-a za valne putove iz čvora *par* za slučaj bez mehanizma zaštite (NO), i dizajnom sa 16 raspoloživih valnih duljina bez uporabe pretvarača valnih duljina.

Valni put	BER
par↔cop	$5.63620884531 \cdot 10^{-22}$
par↔lon	$9.37311741476 \cdot 10^{-39}$
par↔bru	$6.88907998126 \cdot 10^{-42}$
par↔lux	$8.72633394059 \cdot 10^{-14}$
par↔ams	$1.32545666488 \cdot 10^{-32}$
par↔ber	$4.34022571968 \cdot 10^{-28}$
par↔vie	$1.07638209872 \cdot 10^{-24}$
par↔pra	$5.09189765324 \cdot 10^{-19}$
par↔zur	$5.37605074965 \cdot 10^{-30}$
par↔mil	$8.91103227821 \cdot 10^{-36}$

Tablica 6.4 Vrijednosti BER-a

Proračun BER-a proveden je uz pretpostavku APD InGaAs diode, s osjetljivošću 10 A/W (R), električnim frekvencijskim pojasom 7 GHz (B_e), te optičkim frekvencijskim pojasom 30 THz (B_o). Izlazna snaga u WDM sustav odgovara snazi jednog WDM kanala i iznosi 0.1 mW.

Pri modeliranju pojačanja optičkih pojačala postavljena su tako da nadoknađuju gubitke nastale u prethodnoj dionici. Tako će signal iz WDM linka izaći s nepromjenjivom snagom signala. Ulazno pojačalo podešeno je da nadoknađi gubitke koji nastaju pri demultipleksiranju, s izlazno pojačalo gubitke koji su nastali pri multipleksiranju signala. Gubici prospajanja nadoknađuju se na ulaznom ili izlaznom pojačalu (ukoliko prospojnik postoji) jer dizajnom nije predviđeno pojačalo nakon prospojnika.

Vidljivo je da se vrijednost BER-a za valni put *par↔bru* bitno razlikuje od drugih, što je posljedica kratkog izravnog WDM linka između ovih čvorova. Pokazuje se da na BER najviše utječu dugi WDM linkovi zbog dodavanja velikog iznosa šuma spontane emisije u pojačalima na putu. Šum dodan u prethodnim pojačalima dodatno se pojačava prolazeći

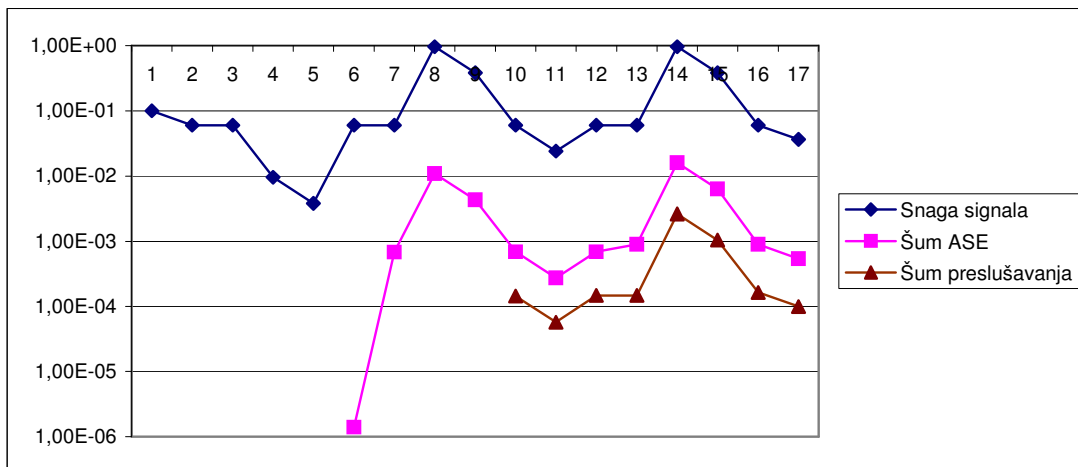
kroz pojačala koja slijede. U tablici 6.5 prikazane su promjene snage signala, šuma spontane emisije i šuma preslušavanja na ulazu i izlazu elemenata valnog puta $par \leftrightarrow cop$.

Modul	Ulazna snaga signala [mW]	Izlazna snaga signala [mW]	Ulazna snaga šuma spontane emisije [μ W]	Izlazna snaga šuma spontane emisije [μ W]	Ulazna snaga šuma preslušavanja [μ W]	Izlazna snaga šuma preslušavanja [μ W]
ulazna linijska kartica	-	0.1	-	0	-	0
pristupni link $par \rightarrow parWDM$	0.1	0.06	0	0	0	0
ulazni transponder	0.06	0.06	0	0	0	0
optički prospojnik	0.06	0.01	0	0	0	0
WDMMux	0.01	0.004	0	0	0	0
izlazno pojačalo	0.004	0.06	0	0.001	0	0
WDM link $parWDM \leftrightarrow berWDM$	0.06	0.06	0.001	0.682	0	0
ulazno pojačalo	0.06	0.955	0.682	10.816	0	0
WDMDeMux	0.955	0.38	10.816	4.304	0	0
optički prospojnik	0.38	0.06	4.304	0.683	0	0.147
WDMMux	0.06	0.024	0.683	0.272	0.147	0.057
izlazno pojačalo	0.024	0.06	0.272	0.684	0.057	0.147
WDM link $berWDM \leftrightarrow copWDM$	0.06	0.06	0.684	0.894	0.147	0.147
ulazno pojačalo	0.06	0.955	0.894	15.843	0.147	2.602
WDMDeMux	0.955	0.38	15.843	6.31	2.602	1.036
optički prospojnik	0.38	0.06	6.31	0.895	1.036	0.164
pristupni link $copWDM \rightarrow cop$	0.06	0.036	0.895	0.539	0.164	0.099
izlazna linijska kartica	0.036	-	0.539	-	0.099	-

Tablica 6.5 Ulazna i izlazna snaga signala, šuma spontane emisije i šuma preslušavanja na elementima valnog puta $par \leftrightarrow cop$

Vidljivo je da je za šum spontane emisije kritično ulazno pojačalo ukoliko ono nadoknađuje gubitke demultipleksiranja i prospajanja. Ako se radi o većem prospojniku (u ovom slučaju je prospojnik dimenzija 4×4) spomenuto pojačanje može biti vrlo veliko, što ujedno dodaje i značajan šuma spontane emisije uz pojačanje postojećeg.

Prospojnik u čvoru $berWDM$ dodaje šum preslušavanja. Iz rezultata je vidljivo da se šum preslušavanja ponaša kao signal, tj. normalno se pojačava i prigušuje ukoliko nema izvora šuma u drugim prospojnicima. Konačan iznos šuma preslušavanja u ovom slučaju je manji od šuma spontane emisije, no to ovisi o slučaju. Na dugim dionicama bez prospojnika, šum spontane emisije dominira, dok će na kraćim dionicama s puno preslušavanja na prospojnicima dominirati šum preslušavanja emisije.



Slika 6.9 Promjena snage signala, šuma spontane emisije i šuma preslušavanja

7 Zaključak

Zadatak ovog rada bila je analiza performansi prijenosa IP datagrama mrežom s valnim multipleksom. Pri tom je korišten međuprotokol prijenosa (Sonet/SDH, Gigabit Ethernet i 10 Gigabit Ethernet), no samo u ulozi uokvirivanja IP datagrama, tj. njihove prilagodbe za prijenos WDM slojem. Mehanizmi zaštite i obnavljanja implementirani su na WDM sloju.

Od interesa je bila analiza dviju bitnih obilježja svake, pa tako i WDM mreže a to su raspoloživost i BER. Kao osnova modeliranja, dizajna, optimizacije i analize korišteno je programsko pomagalo *Cosmos* i njegova objektno orijentirana paradigma.

Analiza je provedena na modelu mreže čiju osnovu čine IPPoP i WDMPoP čvorovi. IPPoP čvorovi modeliraju osnovnu funkcionalnost IP sloja, te služe kao izvorišta prometa za WDM mrežu. Implementirana su dva tipa izvora samosličnog prometa koji simuliraju agregirane tokove IP prometa iz mreža niže razine hijerarhije. Pri tom je korištena osnovna ideja agregacije prometa pomoću velikog broja pojedinačnih izvorišta čija se duljine trajanja snopova IP datagrama ravnaju po eksponencijalnoj i Pareto razdiobi ili su konstantne. U drugom pristupu korišten je stohastički proces Gaussov šum. Funkcionalnost IPPoP modula modelirana je korištenjem dva modula – IPNode modula koji ima opisanu funkcionalnost izvorišta/ponora IP prometa, te IPRouter modul koji ima funkcionalnost IP usmjeritelja. Jedan od ulaznih parametara za dizajn WDM mreže su položaji IPPoP čvorova i prometni zahtjevi između njih na temelju kojih se pridjeljuju linijske kartice. Linijske kartice dalje služe kao osnova za stvaranje transportnih entiteta. Implementiran je optimizacijski postupak minimizacije cijene dodanih linijskih kartica korištenjem jednostavnog genetičkog algoritma. Pri tom je analiziran utjecaj agregacije više IP tokova na cijenu IP usmjeritelja i cijenu linijskih kartica.

Uz IP prometne zahtjeve i položaje IP izvorišta, drugi ključan ulazni parametar je topologija, tj. moguća povezanost na WDM sloju. Optimizacijskim postupkom korištenjem jednostavnog genetičkog algoritma moguće je minimizirati cijenu topologije koja se sastoji od cijene transmisije proračunate na temelju kapaciteta i duljina linkova, te cijene komutacije proračunate na temelju stupnjeva čvorova. Dobivena topologija s minimalnom cijenom služila je kao ulazni podatak za dizajn WDM mreže.

Kao osnovni čvor WDM mreže koristi se WDMPoP čvor koji sadrži svu potrebnu funkcionalnost uključujući ulazno-izlazne točke WDM mreže te komutacijske mogućnosti čvorova unutar WDM mreže. Struktura WDMPoP čvorova općenito ovisi o položaju tog čvora unutar mreže i o korištenom mehanizmu zaštite ili obnavljanja. Čvor može služiti kao ulaz i izlaz prometa u, odnosno iz WDM mreže ili kao transportni čvor koji preusmjerava WDM promet. Jedan čvor može imati obje funkcionalnosti. Korišteni mehanizam zaštite ili obnavljanja određuje uporabu optičkih prospojnika, odnosno određuje da li se radi o mreži s fiksnim ili promjenjivim prospajanjem. Implementiran je slučaj bez zaštite, mehanizam 1+1 zaštite, te *Path*, *Span* i SPAF mehanizmi obnavljanja. Za svaki od njih proračunata je cijena WDM mreže, odnosno ukupan broj korištenih WDM komponenti. Proračun je proveden s 4, 8, 16 i 32 valne duljine po WDM signalu, te bez ili s uporabom pretvarača valnih duljina. Kao zaključak ovog dijela oblikovanja može se istaknuti da uporaba valnih pretvarača povećava fleksibilnost dizajna u pogledu smanjenja broja potrebnih multipleksa i demultipleksa, a time i WDM linkova. Povećanjem broja valnih duljina po WDM linku smanjuje se količina opreme, kao i razlike u količini opreme dodane u pojedinim scenarijima. Prag iznad kojeg se više neće isplatiti povećavati broj u slučaju analizirane mreže iznosi 16 valnih duljina.

Za dizajn WDM mreže primjenom nekog mehanizma zaštite modelirane su optičke komponente koje sudjeluju u prijenosu signala. Tu se prije svega radi o linijskim karticama s optičkim sučeljima koje služe kao izvorišta i odredišta prometa. Transmisijski je element modeliran pomoću optičkog linka koji se nalazi u kabelu. Unutar WDMPOP čvorova nalaze se WDM multiplekseri demultiplekseri, te po potrebi optički prospojnici kojima je moguće mijenjati konfiguraciju usmjeravanja mreže. Valni pretvarači su proizvoljan element u dizajnu.

Cijena oblikovane WDM mreže znatno ovisi o odabranom mehanizmu zaštite ili obnavljanja. Svi mehanizmi su implementirani korištenjem najkraćih fizičkih putova u WDM mreži što nužno ne implicira i minimalnu cijenu takve mreže. Predložen je postupak minimizacije cijene dodane WDM opreme koji se temelji na povećanju iskoristivosti WDM multipleksera i demultipleksera. Kreće se od pretpostavke da je moguće ukloniti slabo iskorištenu WDM opremu premještanjem transportnih entiteta koji ju koriste na neke druge fizičke putove. Time se uklanja slabo iskorištena oprema, te povećava iskorištenje preostale WDM opreme. Algoritam dovodi do smanjenja cijene WDM mreže, no i do povećanja ukupne duljine WDM linkova zbog preusmjeravanja valnih putova na fizičke putove koji nisu najkraći. Efikasnost algoritma raste korištenjem pretvarača valnih duljina.

Za rezervaciju resursa korištena je logička hijerarhija koja se sastoji od valnog kanala, valnog puta, logičkog kanala i logičke veze. Valni kanal predstavlja vezu fizičke i logičke hijerarhije i određen je parom (valna duljina, optički link). Valni put je logička struktura koja se sastoji od više valnih kanala i opisuje jednosmjerni put s kraja na kraj. Ukoliko se sastoji od valnih kanala koji mijenjaju valnu duljinu radi se o virtualnom valnom putu. Logički kanala je dvosmjerna struktura s kraja na kraj koja pomoću planarnog necikličkog grafa opisuje mehanizam zaštite primijenjen na neki valni put. Logički kanal u potpunosti opisuje komunikaciju između dvije linijske kartice. Logička veza u potpunosti opisuje strukture koje opslužuju prometne zahtjeve između dva rubna IPPOP čvora i sastoji se od jednog ili više logičkih kanala.

Nakon oblikovanja WDM mreže pristupilo se proračunu performanci. Raspoloživost mreže proračunata je računom raspoloživosti logičkih veza primjenom Monte Carlo simulacije. Račun je proveden za tri definicije raspoloživosti – s , t raspoloživost (logička veza s najnižim iznosom raspoloživosti), te srednje vrijednosti raspoloživosti svih logičkih veza s ili bez težinskih faktora koji odgovaraju kapacitetu logičke veze. Izračun BER temelji se na pretpostavci da se snazi optičkog signala na putu dodaju snaga šuma spontane emisije (optička pojačala) i snaga šuma preslušavanja (optički prospojnici). Snage tih tri komponenti izračunavaju se duž puta, te se na prijemniku na temelju njihovog odnosa izračunava vrijednost BER-a za promatrani valni put.

8 Popis slika i tablica

Slika 2.1 Ovisnost koeficijent gušenja optičkog vlakna o valnoj duljini signala.....	3
Slika 2.2 Osnovna struktura lasera	3
Slika 2.3 Reflektiranje i prolazak valova na rubovima rezonantne šupljine.....	4
(a) Laser s više longitudinalnih modova	4
(b) Laser s jednim longitudinalnim modom (idealno)	4
Slika 2.4 Tipični izlazni spektri lasera.....	4
(a) DFB laser.....	5
(b) DBR laser.....	5
(c) Laser s vanjskom šupljinom	5
Slika 2.5 Laseri s potiskivanjem modova	5
Slika 2.6 Općenita građa optičkog prijemnika u digitalnom komunikacijskom sustavu.....	6
Slika 2.7 Princip rada fotodetektora	6
(a) Fotodioda s pn spojem.....	7
(c) Osiromašeno područje s vanjskim naponom nepropusnog polariziranja V_a	7
(b) Osiromašeno područje bez vanjskog napona	7
(d) Ugrađeno električno polje pri nepropusnom polariziranju.....	7
Slika 2.8 Princip rada pn fotodiode	7
Slika 2.9 Dvostruka heterostruktura pin diode	7
Slika 2.10 Stimulirana emisija	8
Slika 2.11 Pojačalo s erbijem dopiranim vlaknom (osnovni model).....	9
Slika 2.12 Tri energetska stanja u Er^{3+} ionima	9
Slika 2.13 Pojas pojačanja i ovisnost pojačanja o valnoj duljini za starije EDFA.....	10
Slika 2.14 EDFA s dva stupnja.....	10
Slika 2.15 Blok dijagram poluvodičkog optičkog pojačala	10
(a) Obična leća	11
(b) Leća s promjenjivim indeksom loma	11
Slika 2.16 Demultiplekser s ogibnom rešetkom	11
Slika 2.17 Multiplekser s MZ interferometrom	11
Slika 2.18 Add/drop filtar s MZ interferometrom i Braggovom rešetkom.....	12
Slika 2.19 Opto - električna pretvorba valnih duljina.....	15
Slika 2.20 Pretvorba valnih duljina korištenjem CGM.....	15
Slika 2.21 Pretvorba valnih duljina korištenjem CPM	15
Slika 2.22 Pretvorba valnih duljina korištenjem miješanja valova.....	16
Slika 2.23 Protokolni složajevi za prijenos IP datagrama preko WDM	16
Slika 2.24 Primjer IP preko SDH preko WDM mreže.....	17
Slika 2.25 Primjer prijenosa IP datagrama WDM prstenom korištenjem GbE uokvirivanja	18
Slika 2.26 ATM ili Sonet zasnovani sustavi na WDM linkovima od točke do točke.....	19
Slika 2.27 Evolucija IP protokolnog složaja.....	20
Slika 2.28 Analizirana mreža za mehanizme zaštite i obnavljanja.....	23
Slika 2.29 Korišteni dio mreže u slučaju bez zaštite	23
Slika 2.30 Primarni i zaštitni put u slučaju 1+1 zaštite.....	24
Slika 2.31 Obnavljanje puta.....	24
Slika 2.32 Span obnavljanje.....	25
Slika 2.33 SPAF obnavljanje.....	25
Slika 2.34 Analizirana mreža za strukturu WDM čvorova	26
Slika 2.35 WDM čvor B (bez zaštite).....	27
Slika 2.36 WDM čvor B (1+1 zaštita).....	27
Slika 2.37 WDM čvor B (Path obnavljanje).....	28
Slika 2.38 WDM čvor B (Obnavljanje linka).....	29
Slika 2.39 Arhitektura IP preko WDM mreže od točke do točke	31

Slika 2.40 Povezivanje usmjeritelja u WDM mreži od točke do točke	31
Slika 2.41 Arhitektura IP preko WDM mreže s prospajanjem	32
Slika 2.42 Veze između usmjeritelja u WDM mreži s prospajanjem	32
Slika 2.43 Big - fat router model	33
Slika 2.44 Client - server model (koncept)	33
Slika 2.45 Digital wrapper	33
Slika 2.46 Augmented model.....	34
Slika 2.47 Peer - to - peer model (koncept)	34
Slika 3.1 Struktura Cosmosa.....	38
Slika 3.2 Koraci u opisu mreže u Cosmosu	39
Slika 3.3 Stvaranje predloška konkretnog elementa mreže	39
Slika 3.4 Logičke i fizičke veze.....	40
Slika 3.5 Gniježđenje modula i portovi	40
Slika 3.6 Moduli, slojevi i sustav.....	41
Slika 3.7 Ideja podgrafova	41
Slika 3.8 Poziv inicijalizacije sustava.....	43
Slika 3.9 Pokretanje modula	43
Slika 4.1 Prikaz temeljne strukture sveoptičke mreže	45
Slika 4.2 Dva osnovna tipa WDMPOP čvorova	46
Slika 4.3 Općenita struktura WDMPOP čvora.....	46
(a) Model s ovisnošću pojačanja o valnoj duljini (gain flattened model)	47
(b) Model s konstantnim pojačanjem (idealno)	47
Slika 4.4 Ovisnost pojačanja EDFA o valnoj duljini.....	47
Slika 4.5 Ovisnost šuma o valnoj duljini za EDFA	48
(a) BOA.....	49
(b) LOA.....	49
(c) OPA	49
Slika 4.6 Položaji optičkih pojačala u mreži.....	49
(a) Optički rasprednik.....	50
(b) Optički sprežnik	50
Slika 4.7 Komponenta optičkog sprežnika/rasprednika.....	50
Slika 4.8 Arhitektura NxN neblokirajućeg prostornog prospojnika	51
Slika 4.9 2x2 optički prospojnik.....	51
Slika 4.10 Slojeviti pristup modeliranju WDMPOP čvorova s optičkim prospojnicima.....	52
(a) Povezivanje mux/demux bez korištenja optičkog prospojnika.....	53
(b) Povezivanje mux/demux uz optičkog prospojnika.....	53
Slika 4.11 Načini povezivanja mux/demux	53
(a) Izvori ulaznih signala na WDM mux	53
(b) Odredišta izlaznih signala WDM demux-a	53
Slika 4.12 Povezanost mux/demux s linijskim karticama	53
Slika 4.13 Podjela mreže na podmreže i opto - električna sučelja.....	54
Slika 4.14 Modeliranje optičkog linka.....	56
Slika 4.15 Optički kabel i optički linkovi	56
Slika 4.16 Modeliranje linijske kartice	57
Slika 4.17 Ideja agregacije prometa.....	58
Slika 4.18 Vrste pojedinačnih izvora koje čine agregirani promet.....	59
Slika 4.19 Izlaz iz pojedinačnog izvora	59
Slika 4.20 Izlaz iz generatora prometa (agregirani promet)	61
Slika 4.21 Struktura IPPOP modula	62
Slika 4.22 Veza između IPNode modula i IPRouter modula.....	63
Slika 4.23 Struktura IPNode modula	64
Slika 4.24 Struktura IPRouter modula.....	64
(a) Bez optimizacije	65
(b) Uz optimizaciju	65
Slika 4.25 Dodjeljivanje linijskih kartica	65

(a) IPPoP/WDMoP čvor.....	66
(b) IPPoP čvor odvojen od WDMoP čvora.....	66
Slika 4.26 Mogući odnosi IPPoP i WDMoP čvorova.....	66
Slika 4.27 Prometni zahtjevi između čvorova IPA i IPB.....	67
Slika 4.28 Prijenos IP prometa kroz sveoptičku mrežu.....	68
Slika 4.29 Logički i fizički putovi između čvorova IPA i IPB.....	68
Slika 4.30 Valni kanali u ostvarivanju veze između čvorova IPA i IPB.....	69
(a) Pretvorba valne duljine signala pri ulasku u WDM mrežu.....	69
(b) Pretvorba valne duljine signala nakon demultipleksiranja.....	69
Slika 4.31 Mjesta pretvorbe valnih duljina.....	69
(a) S uporabom valnog pretvarača.....	70
(b) Bez uporabe valnog pretvarača.....	70
Slika 4.32 Strukturiranje WDMoP čvorova.....	70
Slika 4.33 Valni putovi.....	71
Slika 4.34 Valni putovi i logički kanal.....	72
Slika 4.35 Rezervacija fizičkog puta uz primijenjen Span mehanizam obnavljanja.....	72
Slika 4.36 Zaštitna struktura (Span scenarij) nakon dodjele valnih kanala.....	73
(a) Čvor primarnog puta.....	74
(b) Čvor zaštitnog/rezervnog puta.....	74
Slika 4.37 Opći slučajevi čvorova u grafu mehanizma zaštite/obnavljanja.....	74
Slika 4.38 Potpuni opis logičkog kanala i prikaz logičke strukture za Span zaštitu.....	74
Slika 4.39 Zaštitna struktura (1+1 scenarij) nakon dodjele valnih kanala.....	75
Slika 4.40 Logički kanal i prikaz logičke strukture za 1+1 zaštitu.....	75
Slika 4.41 Zaštitna struktura (SPAF scenarij) nakon dodjele valnih kanala.....	75
Slika 4.42 Logički kanal i prikaz logičke strukture za SPAF obnavljanje.....	76
Slika 4.43 Logička veza.....	77
Slika 4.44 Odnos logičke veze i logičkih kanala.....	77
Slika 5.1 Križanje.....	78
Slika 5.2 Mutacija.....	78
Slika 5.3 Varijacija.....	78
Slika 5.4 Mreža iz COST 239 projekta.....	79
Slika 5.5 Jezgrena mreža iz COST 239 projekta.....	80
Slika 5.6 SGA i optimizacija topologije WDM mreže.....	81
Slika 5.7 Pridruživanje fizičkog puta logičkom.....	82
Slika 5.8 Težina grane.....	83
Slika 5.9 Cijena grane.....	83
Slika 5.10 Koraci u proračunu cijene WDM topologije.....	83
Slika 5.11 Topologija WDM sloja dobivena optimizacijskim postupkom.....	84
Slika 5.12 Potpuna povezanost na IP sloju uz matricu prometnih zahtjeva.....	85
(a) Prilagodba logičkih veza na fizičke (potpuna povezanost).....	85
(b) Izgled topologije sloja podatkovne veze (potpuna povezanost).....	85
Slika 5.13 Pridruživanje linijske kartice svakom paru prometnih zahtjeva.....	85
(a) Prilagodba logičkih veza na fizičke (1:1 preslikavanje).....	86
(b) Izgled topologije sloja podatkovne veze (1:1 preslikavanje).....	86
Slika 5.14 Pridruživanje linijskih kartica u slučaju agregacije tokova.....	86
Slika 5.15 Postupak optimizacije cijene linijskih kartica.....	86
Slika 5.16 Jezgra optimizacijskog algoritma.....	87
Slika 5.17 Faktor iskoristivosti multipleksa ER.....	89
Slika 5.18 Proračun faktora RR za valni put.....	89
Slika 5.19 Mogući fizički putovi između čvorova A i C.....	89
Slika 5.20 Mogući valni putovi između čvorova A i C.....	89
Slika 5.21 Algoritam minimizacije cijene WDM opreme.....	91
Slika 6.1 Model raspoloživosti.....	93
Slika 6.2 Proračun puta i rezervacija resursa (SPAF).....	94
Slika 6.3 Problem preklapanja zaštitnih domena.....	95

Slika 6.4 Monte Carlo simulacija raspoloživosti mreže	96
Slika 6.5 Preslušavanje u 2×2 prospojniku	98
Slika 6.6 Preslušavanje u 4×4 prospojniku	98
Slika 6.7 Utjecaji na snagu optičkog signala unutar WDMPOP čvora	101
Slika 6.8 Utjecaj optičkog linka na snagu signala i snage šuma	102
Slika 6.9 Promjena snage signala, šuma spontane emisije i šuma preslušavanja	107
Tablica 2.1 Primjena prospojnika i vrijeme prospajanja	12
Tablica 2.2 Usporedba obilježja prospojnika izvedenih različitim tehnologijama	13
Tablica 2.3 Ovisnost količine WDM opreme o mehanizmu zaštite (bez pretvorbe valnih duljina)	29
Tablica 2.4 Ovisnost količine WDM opreme o mehanizmu zaštite (pretvorba valnih duljina)	29
Tablica 4.1 Troškovi za optičke prospojnike (SAD, milijuni \$)	51
Tablica 4.2 Dopusnene valne duljine u WDM prijenosu	53
Tablica 4.3 Ulazni parametri potrebni za modeliranje IP prometa	59
Tablica 4.4 Parametri pojedinačnih izvora koji se računaju iz ulaznih parametara	60
Tablica 4.5 Veličina snopa kod pojedinačnih izvora	60
Tablica 4.6 Veličina razmaka između snopova (gap) kod pojedinačnih izvora	60
Tablica 4.7 Valni putovi i odgovarajući valni kanali s valnim duljinama	71
Tablica 4.8 Logički kanal i pripadni valni putovi	72
Tablica 5.1 Ovisnost WDM opreme o primijenjenoj minimizaciji	91
Tablica 5.2 Ovisnost iskoristivosti multipleksera i cijene WDM mreže o primijenjenoj minimizaciji	92
Tablica 6.1 Korišteni parametri raspoloživosti	94
Tablica 6.2 Rezultati mjerenja nerasploživosti mreže	97
Tablica 6.3 Interferirajući signali odabranim primarnim signalima	100
Tablica 6.4 Vrijednosti BER-a	105
Tablica 6.5 Ulazna i izlazna snaga signala, šuma spontane emisije i šuma preslušavanja na elementima valnog puta par↔cop	106

9 Reference

- [1] Beran, J., "Statistical Methods for Data with Long - Range Dependence", *Statistical Science*, 7(4), pp. 404-427, 1992.
- [2] Paxton, V., "*Fast Approximation of Self - Similar Network Traffic*", Laurence Berkeley Lab., University of California, Berkeley, LBL - 36750, April 1995.
- [3] Beran, J., "*Estimation, Testing and Prediction for Self - Similar and Related Processes*", Ph.D. dissertation, ETH, Zuerich, 1986.
- [4] Jain, R., S. Routhier, "Packet Trains - Measurements and a New Model for Computer Network Traffic," *IEEE JSAC*, 4(6), pp. 986 - 995, September, 1986.
- [5] Gusella, R., "A Measurement Study of Diskless Workstation Traffic on an Ethernet," *IEEE Transactions on Communications*, 38(9), pp. 1557-1568, September, 1990.
- [6] Fowler, H., W. Leland, "Local Area Network Traffic Characteristics, with Implications for Broadband Network Congestion Management," *IEEE JSAC*, 9(7), pp. 1139-1149, September, 1991.
- [7] Danzig, P., S. Jamin, R. Caceres, D. Mitzel, and D. Estrin, "An Empirical Workload Model for Driving Wide-area TCP/IP Network Simulations," *Internetworking: Research and Experience*, 3(1), pp. 1 - 26, March, 1992.
- [8] Leland, W., M. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, "On the Self - Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2(1), pp. 1-15, February 1994.
- [9] Inkret, R., "*Oblikovanje sveoptičke prijenosne mreže s valnim multipleksom*", magistarski rad, FER, Zagreb, 1998.
- [10] Ljolje, M., "*Oblikovanje optičke transportne mreže s valnim multipleksom za prijenos IP datagrama*", diplomski rad, FER, Zagreb, 2001.
- [11] Sinclair, M.C., "Minimum Cost Topology Optimization of the COST 239 European Optical Network", *Proc. Int. Conf on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*, pp. 26 - 29, Ales, France, 1995.
- [12] Ramamurthy, B., "*Efficient Design of Wavelength Division Multiplexing (WDM) Based Optical Networks*", University of California, Davis, September 1998.
- [13] Borella, M. S. et al., "Optical components for WDM lightwave networks, proceedings of the IEEE, vol. 85, pp. 1274--1307, Aug. 1997.",
- [14] Desurvire, E. "*Erbium-doped fiber amplifiers, principles and applications*", New York, NY. Wiley Interscience, 1994.
- [15] Agrawal, G. P., "*Fiber Optic Communication Systems*", New York, NY. Wiley, 2nd. ed., 1997.
- [16] Inkret, R., M. Lacković, "*The Cosmos framework*", internal publication
- [17] Lacković, M., "*Cosmos user manual*", internal publication
- [18] Dixit, S., Y. Ye, "Streamlining the Internet-Fiber Connection", *IEEE Spectrum*, 38(4), pp. 52-57, April 2001
- [19] *Communication Industry Researched Inc.* (<http://www.cir-inc.com>)
- [20] Batchelor, P. et al., "*Ultra High Capacity Optical Transmission Networks*", Zagreb, FER, 1999.
- [21] Whitley, D., "*A Genetic Algorithm Tutorial*", Technical Report CS-93-103, 1993.

