

**Универзитет "Св. Кирил и Методиј",
Електротехнички факултет,
Институт за телекомуникации - Скопје**



**Моделирање, планирање и оптимизација на
преживливи WDM мрежи**

магистерски труд

**Ментор:
Борис Спасеновски**

**Кандидат:
Јован Стошиќ**

**Скопје
Јули, 2002**

Содржина

1. Вовед	9
2. Оптички компоненти.....	13
2.1. Оптичко влакно	13
2.1.1. Слабење на оптичкото влакно.....	13
2.1.2. Дисперзија во оптичкото влакно	14
2.1.3. Нелинеарности во оптичкото влакно	15
2.1.3.1. Нелинеарно прекршување	15
2.1.3.2. Стимулирано раманово расејување (SRS - Stimulated Raman Scattering).....	15
2.1.3.3. Стимулирано бернулиево расејување (SBS-Stimulated Brillouin Scattering)	16
2.1.3.4. Мешање на четири брана (FWM-Four Wave Mixing)	17
2.1.4. Спрежник (coupler)	17
2.2. Оптички предаватели	18
2.2.1. Принцип на функционирање на ласер	18
2.2.2. Променливи и фиксни ласери	19
2.2.3. Оптичка модулација	21
2.3. Оптички приемници и филтри	21
2.3.1. Фотодетекција	21
2.3.2. Променливи оптички филтри.....	21
2.3.3. Фиксни оптички филтри.....	23
2.3.3.1. Примена на бреговата решетка.....	23
2.4. Оптички засилувачи	24
2.4.1. Вовед во оптичко засилување	24
2.4.2. Карактеристики на оптичките засилувачи.....	24
2.4.3. Полупроводнички оптички засилувачи (SOA – Semiconductor Optical Amplifiers).....	25
2.4.4. Оптички засилувачи со примеси во оптичко влакно (Doped-Fiber Amplifier).....	25
2.5. Комутациони елементи.....	26
2.5.1. Елементи за преспојување.....	28
2.5.1.1. Механички комутатори.....	28
2.5.1.2. Електро-оптички комутатори	28
2.5.1.3. Термо-оптички комутатори	28
2.5.1.4. SOA комутатори	29
2.5.2. Упатувачи на бранови должини	29
2.5.2.1. Нереконфигурирачки упатувач на бранови должини	29
2.5.2.1.1. Упатувачи со решетка од брановоди.....	29
2.5.2.2. Реконфигурирачки комутатор базиран на упатувач на бранови должини	30
2.6. Претворувачи на бранови должини.....	31
2.6.1. Технологии за претворување на бранови должини	32
2.6.1.1. Оптико-електронски претворувачи на бранови должини	32
2.6.1.2. Конверзија на бранови должини кои користат кохерентен ефект	33
2.6.1.3. Претворувачи на бранови должини кои користат вкрстена модулација	33
3. Оптички телекомуникациски мрежи.....	35
3.1. Технологии за мултиплексирање	35
3.2. WDM еволуција	36
3.2.1. Точка-точка WDM системи.....	36
3.2.2. Мултиплексер за вадење и додавање на бранови должини (WADM – Wavelength Add/Drop Multiplexer)	37
3.2.3. Уреди за преспојување на оптички влакна и бранови должини – пасивна свезда, пасивен упатувач и активен комутатор	37
3.3. Конструкција на WDM мрежи	39
3.3.1. Локални оптички WDM мрежи.....	39
3.3.2. Оптички WDM мрежи со рутирање на бранови должини	39
3.3.2.1. Пример на WDM мрежен проблем.....	40
4. Преживливост на оптичко ниво	43
4.1. Терминологија и дефиниции	43
4.2. Преживливост на оптичкото ниво: сервисна перспектива	43
4.2.1. Причини за користење на преживливост на оптичкото ниво	45
4.2.2. Основни поими за преживливост во WDM мрежите.....	46

4.2.2.1. Ентитети кои се заштитуваат.....	46
4.2.2.2. Заштита и реставрација.....	47
4.2.2.3. Поднивои во оптичкото ниво.....	47
4.2.3. Базични методи за заштита.....	49
4.2.3.1. Заштита на ниво на клиент.....	49
4.2.3.2. Методи за преживливост на нивото на оптичка патека.....	50
4.2.3.2.1 1+1 заштита на патеки.....	50
4.2.3.2.2 Двонасочен прстен со префрлање на ниво на патека.....	50
4.2.3.2.3 Заштита на патеки во меш структура.....	50
4.2.3.2.4 Реставрација на патеки во меш структури.....	50
4.2.3.2.5 1:N заштита на опрема.....	51
4.2.3.3. Методи за преживливост на нивото на оптичка мултиплексна секција.....	51
4.2.3.3.1 1+1 линеарна заштита.....	51
4.2.3.3.2 1:1 линеарна заштита.....	51
4.2.3.3.3 Еднонасочен прстен со префрлување на ниво на линија.....	51
4.2.3.3.4 Бидирекционален прстен со префрлување на ниво на линија.....	52
4.2.3.3.5 Протекција/реставрација на меш структури.....	52
4.2.4. Размислувања за избор на метод за заштита.....	52
4.2.4.1. Сервисни класи.....	52
4.2.4.2. Цена на заштита.....	54
4.3. Нови опции и согледувања за преживливите транспортни мрежи.....	55
4.3.1. Мета-меш мрежи.....	56
4.3.2. Споредба на барањата за капацитет и тополошката зависност на меш методите за заштита и реставрација.....	58
4.3.3. p-Циклуси: Брзина на прстен со ефикасност на меш.....	60
5. Математичко програмирање.....	65
5.1. Оптимални решенија.....	65
5.2. Линеарно програмирање.....	66
5.2.1. Поставување на проблемот.....	66
5.2.2. Проширувања на линеарниот програм.....	67
5.3. Примери за проблеми од линеарно програмирање.....	68
5.3.1. Транспортен проблем.....	68
5.3.2. Проблем за доделување на работни задачи.....	69
5.3.3. Мрежен модел за најкратки патеки.....	70
5.3.4. Мрежен проблем за максимален проток.....	71
5.3.5. Мрежен проблем за минимална цена на протокот.....	73
6. Некои принципи за дизајн на WDM мрежи со рутирање на светлосни патеки.....	75
6.1. Дизајнирање на виртуелна топологија.....	75
6.1.1. Архитектура на мрежата.....	75
6.1.2. Формулација на оптимизациониот проблем.....	77
6.1.3. Резултати.....	80
6.2. Рутирање и доделување на бранови должини – базичен модел.....	82
6.2.1. Математичка формулација на базичниот RWA модел.....	83
6.2.2. Резултати.....	85
7. Димензионирање на преживливи WDM мрежи.....	87
7.1. Модел на цени на компонентите во WDM системот.....	89
7.2. Оптимизациона техника и модели.....	90
7.2.1. Интегрирана објектна околина (ИОО).....	90
7.2.2. Математички модел за наоѓање на k најкратки патеки за рутирање (PreDim).....	96
7.2.3. Модел за рутирање и планирање на капацитетите (Dimensioning).....	99
7.2.4. Математички модели за наоѓање на k најкратки патеки за рерутирање.....	104
7.2.4.1. KSH модел за реставрација на линк (PreResLR).....	105
7.2.4.2. KSH модел за реставрација на патеки (PreResPR).....	107
7.2.4.3. KSH модел за реставрација на патеки со диверзификација (PreResPRd).....	110
7.2.5. Модели за рерутирање и планирање на резервните капацитети.....	113
7.2.5.1. Реставрација на линк (ReroutingLR).....	113
7.2.5.2. Реставрација на патека (ReroutingPR и ReroutingPRd).....	116
7.3. Резултати.....	123
7.3.1. Почетна топологија на мрежата.....	123
7.3.2. Планирање на капацитет и рутирање.....	124
7.3.3. Планирање на резервните капацитети и рерутирање.....	125

7.3.3.1. Зависност на цената на мрежата од бројот на " k " најкратки рути.....	125
7.3.3.2. Зависност на цената на мрежата од употребената реставрациона стратегија.....	127
7.3.3.3. Зависност на цената на мрежата од употребениот линиски систем.....	129
8. Заклучок.....	131
9. Додаток: Имплементација во MPL (Mathematical Programing Language)	133
9.1. Link Rerouting VWP.....	134
9.1.1. PreDim.....	134
9.1.2. Dimensioning VWP.....	134
9.1.3. PreRes LR.....	136
9.1.4. ReroutingLR_VWP.....	136
9.2. Link Rerouting WP.....	137
9.2.1. PreDim.....	137
9.2.2. Dimensioning WP.....	139
9.2.3. PreRes LR.....	140
9.2.4. ReroutingLR_WP.....	141
9.3. Path Rerouting VWP.....	143
9.3.1. PreDim.....	143
9.3.2. Dimensioning VWP.....	143
9.3.3. PreResPR_VWP.....	145
9.3.4. ReroutingPR_vwp.....	145
9.3.5. ReroutingPR_vwpFREE.....	146
9.4. Path Rerouting WP.....	148
9.4.1. PreDim.....	148
9.4.2. DimensioningWP.....	149
9.4.3. PreResPRwp.....	150
9.4.4. ReroutingPR_wpA.....	151
9.4.5. ReroutingPR_wpAfree.....	152
9.4.6. ReroutingPR_wpB.....	153
9.4.7. ReroutingPR_wpBfree.....	154
9.5. Path Rerouting Disjunct VWP.....	156
9.5.1. PreDim.....	156
9.5.2. DimensioningVWP.....	156
9.5.3. PreResPRd_vwp.....	158
9.5.4. ReroutingPRd_vwp.....	159
9.5.5. ReroutingPRd_vwpFREE.....	160
9.6. Path Rerouting Disjunct WP.....	161
9.6.1. PreDim.....	161
9.6.2. DimensionigWP.....	161
9.6.3. PreResPRd_wp.....	163
9.6.4. ReroutingPRd_wpA.....	164
9.6.5. ReroutingPRd_wpAfree.....	165
9.6.6. ReroutingPRd_wpB.....	166
9.6.7. ReroutingPRd_wpBfree.....	167
9.7. Основни мрежни модели.....	168
9.7.1. Модел за минимална цена на протокот.....	168
9.7.2. Мрежен модел за најкратки патеки.....	168
9.7.3. Мрежен модел за максимален проток.....	169
9.8. Некои принципи за дизајн на WDM мрежи со рутирање на бранови должини.....	170
9.8.1. Дизајнирање на виртуелна топологија.....	170
9.8.2. Рутирање и доделување на бранови должини.....	171
10. Библиографија	173

Листа со табели:

табела 2.1 Типови на променливи филтри.....	22
табела 2.2 Апликации за оптичките комутатори и нивните барања во поглед на времето на комутација	27
табела 2.3 Споредба на различни технологии за оптичка комутација.....	27
табела 5.1 Рутирање на најкратките патеки за мрежата од слика 5.3.....	71
табела 5.2 Рутирање на протоците низ мрежа со користење на моделот за максимален проток.....	73
табела 5.3 Рутирање на приливите од s кон d	74
табела 6.1 Рутирање на светлосните патеки во мрежата од слика 6.8.....	85
табела 7.1 Тип на мрежен проблем.....	92
табела 7.2 Сообраќајна матрица на мрежата "XWeb" прикажана на слика 7.23.....	123
табела 7.3 Зависност на цената на работниот капацитет од KSH.....	126
табела 7.4 Зависност на цената за резервниот капацитет на мрежата од бројот на KSH рути	126
табела 7.5 Однос резервни/работни оптички влакна за различни реставрациони стратегии: WPa, WPb, и VWP128	
табела 7.6 Цена на мрежата и вкупен број на потребни работни и резервни оптички влакна и канали	128
табела 7.7 Барања за резервен капацитет (редундантност) за мрежата од слика 7.23 за различни линиски системи: 4, 8 и 16	129
табела 7.8 Цена на мрежата и вкупен број на потребни работни и резервни оптички влакна и канали	129

Листа со слики:

слика 1.1 Пораст на податочниот и говорниот сообраќај	10
слика 2.1 Региони со мало слабеење во оптичкото влакно	13
слика 2.2 Трансмисиони прозорци; Горните две криви ги покажуваат апсорпционите карактеристики на оптичките влакна во 1970 год. Долната крива се однесува на модерните оптички влакна	13
слика 2.3 Дисперзија на стандардно моноодно оптичко влакно	14
слика 2.4 Оптичко влакно со поместена дисперзија (dispersion-shifted fibre)	14
слика 2.5 Стимулирано раманово расејување.....	16
слика 2.6 Варијација на SBS прагот со промена на брановата должина. Вредноста на прагот претставува снага над која SBS предизвикува значителни ефекти.....	16
слика 2.7 Мешање на четири брана.....	17
слика 2.8 Раздвојувач, здружувач и спрежник	17
слика 2.9 Спрежник изработен во планарна брановодна технологија	17
слика 2.10 Општа структура на ласер	18
слика 2.11 Полупроводнички диоден ласер	19
слика 2.12 Fabry-Perot филтер; Светлината влегува во празнината преку делумно посребреното огледало на лево и излегува низ делумно посребреното огледало на десно. Само брановите должини кои се во резонанција со празнината се во состојба да поминат. Другите бранови должини ќе бидат силно осабнати.....	20
слика 2.13 DFB ласер.....	20
слика 2.14 Променлив DBR ласер	20
слика 2.15 Ласерско поле.....	21
слика 2.16 Слободен спекрален опсег (FSR – Free Spectral Range).....	22
слика 2.17 Fabry-Perot филтер.....	22
слика 2.18 Структура на мак-зендеров интерферометар	22
слика 2.19 Брегова решетка во оптичко влакно.....	23
слика 2.20 Два пристапи за демултиплексирање со користења на FBG.....	23
слика 2.21 Полупроводнички оптички засилувач (SOA) во споредба со ласер	25
слика 2.22 Оптички засилувач со примеси од Ербиум (EDFA).....	26
слика 2.23 Преносна карактеристика на EDFA оптички засилувач.....	26
слика 2.24 2x2 кросконект	28
слика 2.25 Електро-оптички комутатор	28
слика 2.26 Нереконфигурирачки упатувач на бранови должини	29
слика 2.27 Решетка со поле од брановоди – AWG.....	30
слика 2.28 Сè-оптичка мрежа со рутирање на бранови должини.....	31
слика 2.29 Ограничување за континуитет на брановите должини во мрежа со рутирање на бранови должини.....	31
слика 2.30 Функционирање на претворувач на бранови должини	32
слика 2.31 Оптико-електронски претворувач на бранови должини.....	32
слика 2.32 Претворувач на бранови должини базиран на нелинеарниот ефект на мешање на бранови.....	33
слика 2.33 Претворувач на бранови должини кој користи ко-простирање базиран на XGM во SOA.....	33
слика 2.34 Карактеристика на засилувањето на SOA и принцип на вкрстена модулација кај SOA-XGM претворувачот на бранови должини.....	34

слика 2.35 Интерферометарски SOA претворувач; Гор: MZI; Доле: Michelson интерферометар	34
слика 3.1 мултиплексни технологии (а) временска распределба на канали; (б) мултиплексирање на бранови должини	36
слика 3.2 Четириканален точка-точка WDM трасмисионен систем со засилувачи	36
слика 3.3 Wavelength Add/Drop multiplexer (WADM)	37
слика 3.4 4x4 пасивна ѕвезда	37
слика 3.5 4x4 пасивен упатувач (рутер)	38
слика 3.6 4x4 активен комутатор	38
слика 3.7 Локална оптичка WDM мрежа базирана на пасивна ѕвезда	39
слика 3.8 WDM мрежа со рутирање на бранови должини (wide area)	39
слика 4.1 Нивовска архитектура кај различни типови на мрежни оператори	44
слика 4.2 Оптичко мрежно ниво	45
слика 4.3 Заштитени ресурси: а) клиент; б) оптички влакна во објектот с) транспондер; д) опрема надвор од објектот е) целата комуникациска станица	46
слика 4.4 Споредба помеѓу заштита на линија и заштита на патека	47
слика 4.5 Споредба помеѓу различните методи за заштита на ниво на линија	48
слика 4.6 Споредба помеѓу различните методи за заштита на ниво на патека	48
слика 4.7 Заштита на линија визави заштита на патека	49
слика 4.8 Базичен дијаграм за избор на метода за заштита (под претпоставка дека е потребна и заштита на опремата и заштита на линијата)	52
слика 4.9 Можно вреднување на услугите во споредба со сигурноста по тип на услуга како функција од дефект на Р-от линк во мрежа со вкупно N линкови	53
слика 4.10 Пример како можат да се употребат различните класи на услуги за различни апликации	54
слика 4.11 Цена на опремата за решението за фиксен број на канали и мешан заштитен и незаштитен сообраќај	54
слика 4.12 Максимален број на работни канали во прстен со фиксен вкупен број на канали за мешан заштитен и незаштитен сообраќај	55
слика 4.13 Илустрација на степенот на поврзаност на физичкото ниво на транспортните мрежи	56
слика 4.14 Мета-меш реставрација	57
слика 4.15 Зависност на работниот и резервниот капацитет од средниот степен на поврзаност на јазлите во мрежата	59
слика 4.16 Редундантност на различни методи за меш заштита и протекција во функција од средниот степен на поврзаност на мрежата	60
слика 4.17 р-циклус кој заштитува од дефект на спан во циклусот и дефект на пресечен спан	61
слика 4.18 Илустрација на покривањето на прстен и р-циклус за ист резервен капацитет	62
слика 5.1 Илустрација на транспортен проблем	69
слика 5.2 Илустрација на моделот за доделување на работни задачи	69
слика 5.3 Илустрација на моделот а најкратки патеки	70
слика 5.4 Илустрација на моделот за максимален проток	72
слика 5.5 Илустрација на модел за минимална цена на протокот	74
слика 6.1 Физичка архитектура на NSFNET	75
слика 6.2 Виртуелна топологија на хипер-коцка вградена во NSFNET физичката топологија	76
слика 6.3 Можна архитектура на јазлите во мрежата (на пример јазолот UT)	76
слика 6.4 Физичка топологија на разгледуваната мрежа.	80
слика 6.5 Искористување на физичката топологија	81
слика 6.6 Искористување на виртуелната топологија	81
слика 6.7 Матрица за рутирање на сообраќајот	82
слика 6.8 Мрежа користена за тестирање на базичниот RWA модел	85
слика 7.1 Реставрациони стратегии. (а) Реставрација на линк (LR). (б) Реставрација на патеки (PR). (с) Реставрација на патеки по рути со различни линкови од работните	87
слика 7.2 Архитектура на корсконектите во проектите PHOTON и OPEN	89
слика 7.3 VB додатока за мрежана оптимизација	91
слика 7.4 Околина за графичко моделирање на мрежата	91
слика 7.5 Прозорец со својства за контролите (а) Мрежа, (б) Јазол, (в) Линк	92
слика 7.6 Страна со својства за димензионирање на мрежата	92
слика 7.7 Трака со алатки во VB додатокот за мрежна оптимизација	93
слика 7.8 Сообраќајна матрица на разгледуваната мрежа	93
слика 7.9 MPL for Windows; Математичко моделирање на проблемите и нивно решавање	94
слика 7.10 Форма за избор на програм за сортирање на податоци	94
слика 7.11 Форма за приказ на влезно-излезните податоци	95
слика 7.12 Исечок од табелите: (а) TrafficRouting и (б) SortedTraffic	96
слика 7.13 Табели "outUsedLinks" и "qdfLinkInRoute" за VWP мрежа	104
слика 7.14 Исечок од (а) SortedRestorationRouting и (б) outUsedLinks табелата	107

слика 7.15 Исекок од табелите (а) RestorationRouting и (б) SortedRestorationRouting	109
слика 7.16 Исекок од табелите (а) qdfPRdSortResWithM за PRd и (б) qdfSortedResRoutingWithM за PR модел .	112
слика 7.17 Редуцирана мрежа	113
слика 7.18 "dataNodes" табела за LR WP случај	116
слика 7.19 InputDm табела на VWP мрежа и исечок од InputDm табелата за WP мрежа.....	119
слика 7.20 Исекок од qdfEndRerouting табелата за VWP мрежа.....	120
слика 7.21 Исекок од qdfEndRerouting табелата за WPa и WPb мрежа	121
слика 7.22 "outUsedLinks" табелата после моделот за реставрација: (а) VWP мрежа (б) WPb мрежа	121
слика 7.23 Графички приказ на мрежата која е математички моделирана и оптимизирана	123
слика 7.24 Влијание на β врз цената на мрежата за сообраќајната матрица дадена во табела 7.2	124
слика 7.25 Зависност на цената на мрежата од бројот на KSH рути.....	127
слика 7.26 Однос резервни/работни оптички влакна за различни реставрациони стратегии.....	128
слика 7.27 Барања за резервен капацитет за мрежата од слика 7.23 со капацитет на линковите од 4, 8 и 16129	
слика 9.1 Модели за оптимизација на рутирањето на работните и резервните капацитети.....	133

1. Вовед

Ние се движиме кон општество кое инсистира на тоа да имаме пристап до информациите во секој момент кога тие ќе ни затребаат, било каде да ни затребаат, и во било кој формат да ни требаат. Информациите ни се обезбедуваат преку глобална меш мрежа од комуникациски мрежи, чии имплементации, денешните Интернет и асинхронен трансфер мод (АТМ) мрежи немаат капацитет за да ги поддржат овие предвидливи барања.

Светловодните технологии можат да се сметаат како спасител за остварување на горе споменатите потреби поради нивните потенцијално неограничени можности: огромен пропусен опсег (приближно 50Tb/s), мало слабеење на сигналот (0,2 dB/km), мала деградација на сигналот, мала потрошувачка на електрична енергија, мала употреба на материјали, мали просторни барања, и ниска цена. Наш предизвик е да се претвори ветувањето на светловодите технологии во реалност за да се остварат нашите барања во поглед на достап до информациите за наредната декада (и во 21 век!).

Според тоа, базична премиса од темата за мрежите со мултиплексирање со распределба на бранови должини (WDM – Wavelength Division Multiplexing) е дека, како повеќе и повеќе корисници започнуваат да ги користат податочните мрежи, и како нивниот кориснички модел еволуира да вклучува се повеќе и повеќе мрежни апликации интензивни потрошувачи на пропусен опсег на WWW (World Wide Web), java апликации, видео конференции, и др., се јавува силна потреба за мрежна опрема со многу голем пропусен опсег, чии можности се далеку поголеми од оние што моменталните мрежи со големи брзини (на пример, АТМ) можат да ги обезбедат. Денес нема доволно пропусен опсег во нашите мрежи за да го поддржат експоненцијалниот пораст на корисничкиот сообраќај!

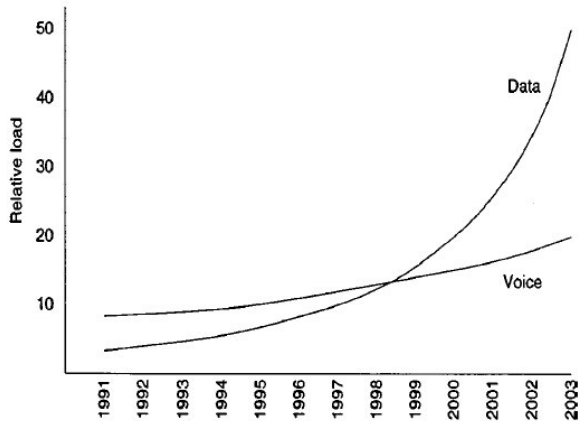
На слика 1.1 е прикажан прирастот на податочниот и говорниот сообраќај изразен од повеќето телекомуникациски оператори (види [2]). Иако говорниот сообраќај продолжува да доживува пристоен пораст од 7% по година (што во повеќето бизнис сектори би се сметал како многу голем пораст), порастот на податочниот сообраќај е она што го привлекува вниманието на луѓето. Повеќето оператори неодамна известува дека податочниот сообраќај го надминал говорниот сообраќај, а останатите дека тоа наскоро ќе се случи.

Со оглед на тоа што потенцијалниот пропусен опсег на мономодното влакно е приближно 50Tb/s, што е приближно четири редни големини поголем од електронските податочни битски брзини од неколку Gb/s, треба да се вложат сите можни напори за да се продере во овој делумно искористен пропусниот опсег. Ако се знае дека максималната брзина со која крајните корисници – кои можат да бидат работни станици или пристапувачи (gateway) за поврзување на подмрежите со помала брзина - можат да пристапат на мрежата е лимитирана од електронската брзина (неколку Gb/s), клучот во дизајнирањето на оптичките комуникациски мрежи со цел да се искористи огромниот пропусен опсег на оптичкото влакно е да се воведат истовременост помеѓу повеќе кориснички трансмисии. Во оптичките комуникациски мрежи, оваа истовременост може да биде остварена преку бранови должини т.е. фреквенции (WDM – Wavelength Division Multiplexing), временски интервали (TDM – Time Division Multiplexing), облик на бранот (spread spectrum, CDM – Code Division Multiplexing).

Оптичките TDM и CDM се донекаде футуристички технологии за денешницата. Во OTDM (Optical TDM), секој краен-корисник треба да биде во состојба да се синхронизира во рамките на еден временски интервал (slot). OTDM битската брзина е здружената брзина на сите TDM канали во системот, додека оптичката CDM брзина на исечоци (chip) може да биде многу повисока од електронската брзина на процесирање, т.е. некои делови од корисничкиот интерфејс со мрежата мора да работат на битски брзини повисоки од електронската брзина. Според тоа, TDM и CDM се релативно помалку атрактивни од WDM, бидејќи WDM за разлика од TDM и CDM нема такви барања.

Посебно WDM е моментално фаворизирана технологија за мултиплексирање за комуникации на големи дистанци во оптичките комуникациски мрежи бидејќи целата опрема на крајниот корисник работи само на битската брзина на WDM каналот, која може да биде произволна, на пример, врвната брзина на електронското процесирање. Оттука, главните оператори посветуваат значителен напор за развој и имплементација на WDM технологиите во нивната телекомуникациска инфраструктура.

Анализата на пазарот покажала дека во Северна Америка пазарот за WDM транспорт (за оптички 'рбетни мрежи) пораснал од \$1,9 милијарди во 1998 до преку \$3 милијарди во 2002.



слика 1.1 Пораст на податочниот и говорниот сообраќај

Во овој труд ќе се посвети внимание на планирањето и оптимизација на WDM мрежите. Сепак мрежното планирање е општа тема која се однесува на сите видови телекомуникациски мрежи. Имено, информациите денес се пренесуваат преку различни типови на мрежи кои всушност претставуваат множество на меѓусебно поврзани комуникациски јазли и линкови. Тие опфаќаат аналогни и дигитални жичани телефонски мрежи, целуларни и персонални комуникациски мрежи, сателитски мрежи, податочни мрежи како Интернет, етернет, АТМ локални, метрополитски, национални и глобални мрежи. Одредена организација може да има инфраструктура која се базира на неколку типа од горе спомнатите мрежи.

Секоја организација која поседува и е поврзана на вакви мрежи би сакала да биде спремна за редовна изградба, користење и надградба на мрежната опрема (и софтвер и хардвер). Тука доаѓа до израз мрежното планирање. Улогата на мрежното планирање (и мрежните планери) е да обезбеди интелигентни средства за организацијата да ги исполни идните потреби, користејќи ја постојната мрежа како почетна точка.

Природно со тек на времето се случува нов развој. Затоа планирањето е континуиран процес кој постојано ги користи последните информации за да изврши ревизија на плановите. Ова временско својство е клучен аспект од полето на мрежното планирање – тоа вклучува редовна еволуција на мрежите со тек на време.

Мрежното планирање е најразвиено во големите телекомуникациски компании, кои имаат посебни оддели за мрежно планирање за различни системи. Големите инвестиции кои се вклучени и денешната конкурентна околина го прават ефикасното планирање неопходно, и го оправдуваат користењето на софистицирани техники за планирање. Организациите со големи мрежни инсталации како приватните компании, академските институции, и владините агенции, веќе имаат констатирано дека некој тип на функција за планирање е неопходност.

Од горе изложеното може да се претпостави што е оптимизациониот проблем при мрежното планирање. Во општ случај, потребно е да се минимизираат трошоците за опрема и одржување, да се максимизира приходот и тоа да се прави континуирано со тек на време како технологијата, корисничките барања и економската околина се менува. Ова претставува голем предизвик.

Во реалноста за релативно големи организации е невозможно да се постави проблемот за мрежно планирање како единечен оптимизационен проблем. За ова постојат многу причини. Една е непостоење на единствен оптимизационен критериум. Цената, доверливоста, капацитетот, и потенцијалите за надградба се важни критериуми, но како мрежниот планер се решава да ги усогласи? Друга причина е големината на проблемот во големите организации, без разлика дали тој се мери во бројот на ограничувања, бројот на вклучени луѓе, и/или бројот на вклучени организациони единици. Трета причина е улогата на неочекуваната слободна конкуренција на пазарот, развојот на нови технологии и новите економски услови.

Затоа во реалноста се случува проблемот да биде поделен во извесен број на помали, полесно решливи потпроблеми. Партиционирање на потпроблемите може да не е оптимално и само некои од потпроблемите може да има оптимално решение. Сепак, секој добар научник или инженер знае дека само со апстракција на суштината на ситуацијата и поставување на проблемот на лесно обработлив начин може да се постигне прогрес.

Бидејќи дефектите на опремата не можат во целост да се избегнат, мрежите треба да се дизајнираат така што ги "преживеат" тие дефекти. Ова се прави со внимателно инсталирање на резервен капацитет во мрежата така што сообраќајот кој е во прекин поради дефект може да се пренасочи да го искористи резервениот капацитет. Ваквото сценарио подразбира големи инвестиции на мрежниот оператор. Дизајнот на вакви преживливи мрежи при што се минимизираат трошоците за резервен капацитет, е главна грижа на мрежните оператори што подразбира решавање на многу сложени комбинаториски проблеми. Со цел да се направи телекомуникациската мрежа преживлива можат да се користат две стратегии: заштита (protection) и обнова т.е. реставрација (restoration).

Методите базирани на заштита однапред доделуваат резервен капацитет за да го заштитат секој елемент од мрежата независно, додека реставрацијата го дистрибуира резервниот капацитет низ целата мрежа и го користи по потреба со цел да го реставрира прекинатиот сообраќај.

Во овој труд ќе бидат прво опишани основните оптички компоненти кои се користат за изградба на WDM мрежите (глава 2), потоа во глава 3 ќе биде даден краток осврт на конструкцијата на локалните и 'рбетните WDM мрежи. Следната глава се однесува на преживливост на оптичкото ниво (глава 4). Во неа се елаборирани стандардните начини на заштита на оптичкото ниво, а исто така и некои напредни кои се во развој. Во трудот е даден краток вовед за математичкото програмирање, основните типови на проблеми од областа на линеарното програмирање и основните мрежни модели (глава 5). Преостанатиот дел од трудот се однесува на моделирање и оптимизација на WDM мрежите. Во главата 6 се изложени два модели за дизајн на виртуелна топологија и доделување на бранови должини. Иако овие модели се базични и се изразени во една формулација (т.е. нема раздвојување на проблемот на повеќе потпроблеми) тие сепак се адаптирани и претставуваат придонес на овој труд. Сепак целта на нивното излагање е подготовка за разбирање на наредната глава (глава 7) во која е изложен главниот придонес.

Во главата 7 е елаборирана и остварена целта на овој труд, а тоа е дизајнирање на преживливи оптички WDM мрежи и соодветното ниво на оптички патеки, при што се минимизира вкупната цена на мрежата, за зададени сообраќајни барања.

Во предвид се земени три стратегии за рерутирање т.е. реставрација доколку дојде до дефект на еден линк:

- Реставрација на линк (LR-Link Restoration)
- Реставрација на патеки (PR-Path Restoration)
- Реставрација на патеки по рути со различни линкови од работните (PRd- Path restoration with link-disjunct route).

Моделирани се два различни типа на WDM мрежи.

- Мрежи кои не користат претворувачи на бранови должини во оптичките уреди за преспојување. Тие се нарекуваат **WP (wavelength path) мрежи**. Кај овие мрежи воспоставената патека во мрежата е карактеризирана со нејзината бранова должина.
- Мрежите кои имаат претворувачи на бранови должини се нарекуваат **VWP (Virtual Wavelength Paths) мрежи**. Во овој случај, дадена патека може да има различни бранови должини во употребените линкови од рутата.

Се разликуваат два типа на WP мрежи со реставрација на патеки зависно од тоа дали ласерските извори и приемници се променливи или фиксни.

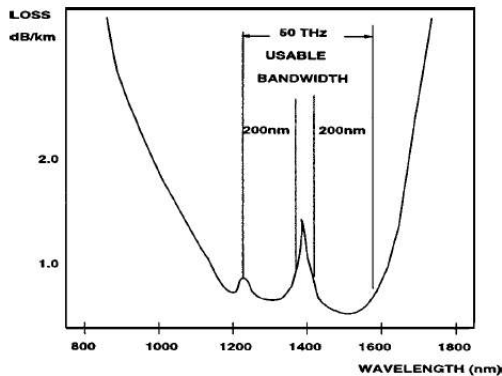
- Доколку ласерските извори и приемници се променливи можно е да се користи реставрациона рута на друга бранова должина. Овие мрежи се нарекуваат **WP_a**.
- Кај моделите со приемници и извори со фиксна бранова должина реставрационата патека мора да биде на истата бранова должина како и работната патека. Тие се нарекуваат **WP_b** мрежи.

За горе изложените типови на WDM мрежи и соодветните методи за реставрација се развиени независни математички модели кои потоа се имплементирани во MPL (Mathematical Programming Language). Всушност проблемот за моделирање на WDM мрежа со соодветен тип на реставрација е многу комплексен и затоа е поделен на повеќе потпроблеми. Имплементираните математички модели се решаваат со CPLEX 7.1 солвер.

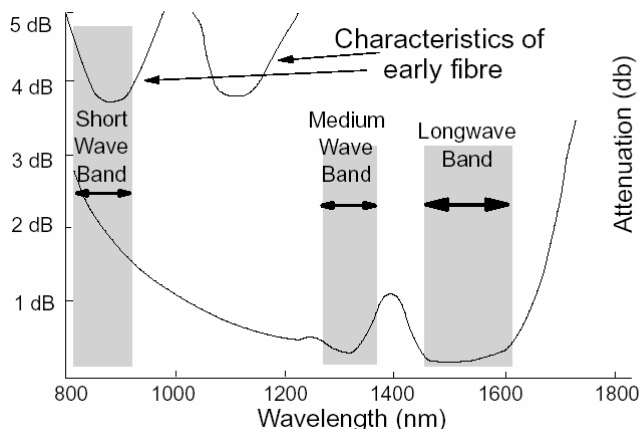
Добиените резултати (глава 7.3) укажуваат на тоа дека нема голема корист од користење на претворувачи на бранови должини, а променливоста на оптичките примопредаватели (ласер/филтер) кога не се користат претворувачи се покажува дека е од голема корист. Сепак ќе биде покажано дека користа од употребата на претворувачи на бранови должини се зголемува со зголемување на бројот на бранови должини по влакно.

2. Оптички компоненти

2.1. Оптичко влакно



слика 2.1 Региони со мало слабеење во оптичкото влакно



слика 2.2 Трансмисиони прозорци; Горните две криви ги покажуваат апсорпционите карактеристики на оптичките влакна во 1970 год. Долната крива се однесува на модерните оптички влакна

пример песок.

Оптичкото влакно поседува многу карактеристики кои го прават одличен физички медиум за телекомуникациските мрежи со големи брзини. На слика 2.1 се прикажани двата региони од оптичкото влакно кои се со мало слабеење. Центриран околу 1300nm се наоѓа опсег од 200nm во кој слабеењето е помало од 0.5 dB/km. Вкупниот пропусен опсег во овој регион е 25THz. Центриран околу 1550nm е регион со слична големина, со слабеење од 0,2 dB/km. Ако се комбинираат овие два региони се добива пропусен опсег¹ со теоретски горен лимит од 50THz. Слабеењето кај добрите оптички влакна во најголем дел потекнува од Рејлиевото расејување (Rayleigh scattering), а најголемото слабеење во регионот околу 1400nm се должи на нечистотии на влакното од OH⁻ јони. Други причини за слабеење се материјалната апсорпција и сл.

Со користење на овие области со мало слабеење за пренос на информации, слабеењето на сигналот за група на бранови должини може да биде многу мало, со тоа се намалува бројот на потребни засилувачи и регенератори. Во експериментите со еден канал, се постигнати растојанија од повеќе стотини километри без засилување. Покрај големиот пропусен опсег и малото слабеење, оптичкото влакно нуди и мали битски грешки. Оптичките системи обично работат со битски грешки (BER-Bit Error Rate) помали од 10^{-11} . Исто така оптичкото влакно е отпорно на електромагнетна интерференција. На крај оптичкото влакно се произведува од најевтини и најраспространети супстанции на земјата, на

2.1.1. Слабеење на оптичкото влакно

Слабеењето во оптичкото влакно води кон намалување на моќта на сигналот. Кога се одредува максималното растојание кое сигналот може да го совлада за дадена снага на предавателот и осетливост на приемникот, треба да се земе во предвид и слабеењето на оптичкото влакно. Осетливоста на приемникот претставува минимална снага потребна за да приемникот го детектира сигналот. Нека $P(l)$ ја претставува снагата на оптичкиот импулс на растојание " l " km од предавателот а α е константата на слабеење на оптичкото влакно (dB/km). Вкупното слабеење се карактеризира со следнава равенка:

¹ Сепак корисниот пропусен опсег е ограничен поради нелинеарностите на оптичкото влакно.

$$P(l) = 10^{\alpha \cdot l / 10} P(0)$$

ф. 2.1

каде $P(0)$ е оптичката снага на предавателот. За должина на линкот од "l" km, $P(l)$ мора да биде поголема или еднаква на осетливоста на приемникот (P_r). Од горната равенката се добива:

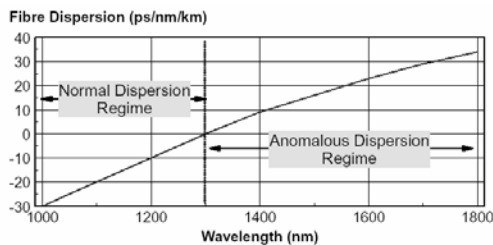
$$L_{\max} = \frac{10}{\alpha} \log \frac{P(0)}{P_r}$$

ф. 2.2

Максималното растојание помеѓу предавателот и приемникот (или растојанието помеѓу засилувачите²) повеќе зависи од подолжното слабеење α отколку од оптичката снага на предавателот. Доколку ја погледнеме слика 2.1 најмало слабеење ($\approx 0,2\text{dB/km}$) оптичкото влакно покажува на 1550nm.

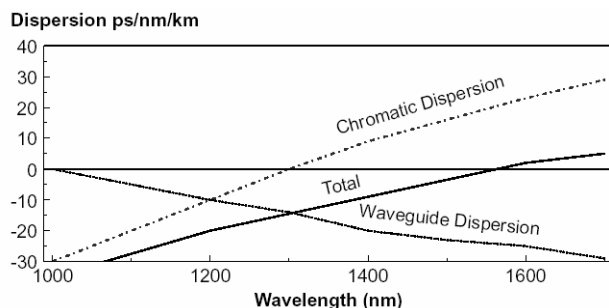
2.1.2. Дисперзија во оптичкото влакно

Дисперзија претставува ефект на проширување на траењето на импулсот како што тој патува низ оптичкото влакно. Како импулсот се проширува, тој може премногу да се прошири така што интерферира со соседните импулси (бити) во влакното, што води до интерсимболна интерференција. Согласно со ова дисперзијата го лимитира растојанието меѓу соседните бити и со тоа максималната брзина на пренос низ оптичкиот канал.



слика 2.3 Дисперзија на стандардно мономодно оптичко влакно

Еден тип на дисперзија е **меѓумодна дисперзија**. Таа настанува кога повеќе модови од истиот сигнал се простираат со различна брзина низ влакното. Во мономодно влакно овој тип на дисперзија не се јавува. Друг тип на дисперзија е материјална т.е. **хроматска дисперзија**. Во дисперзивен медиум, индексот на прекршување е функција од брановата должина. Согласно со тоа, доколку пренесуваниот сигнал содржи повеќе од една бранова должина, одредени бранови должини ќе се простираат побрзо од други. Поради тоа што не постои идеален ласер кој може да генерира



слика 2.4 Оптичко влакно со поместена дисперзија (dispersion-shifted fibre)

сигнал со точна и единствена бранова должина, или попрецизно, бидејќи било кој сигнал кој носи информација има ненулта спектрална ширина, хроматската дисперзија ќе се јавува во повеќето системи³. Третиот тип на дисперзија е **брановодна дисперзија**. Овој тип на дисперзија настанува поради тоа што простирањето на различни бранови должини зависи од карактеристиките на брановодот како што се индексите и обликот на јадрото на оптичкото влакно и неговата обвивка. На 1300nm, материјалната дисперзија во конвенционално мономодно влакно е приближно еднаква на нула. За среќа ова е во еден од прозорите со мало слабеење, иако слабеењето на 1550nm е помало. Со користење на напредна технологија наречена поместување на

² Осетливоста на засилувачот е обично еднаква на осетливоста на приемникот, а излезната снага на засилувачот е еднаква на оптичката снага на предавателот.

³ Дури и кај немодулираниот извор кој се состои од една бранова должина, процесот на модулација ќе предизвика проширување на повеќе бранови должини.

2.1.3. Нелинеарности во оптичкото влакно

Нелинеарните ефекти во оптичкото влакно можат потенцијално да имаат значително влијание на перформансите на WDM оптичките комуникациски системи. Нелинеарностите во оптичкото влакно можат да предизвикаат слабеење, дисторзија, и интерференција помеѓу каналите. Во WDM системите, овие ефекти наметнуваат ограничувања на растојанието помеѓу каналите, ја лимитираат максималната снага на каналот и исто така може да ја лимитираат максималната битска брзина.

2.1.3.1. Нелинеарно прекршување

Во оптичкото влакно, индексот на прекршување зависи од интензитетот на оптичките сигнали кои се простираат низ оптичкото влакно. Според тоа, фазата на светлината во приемникот ќе зависи од фазата на светлината испратена од предавателот, должината на оптичкото влакно, и оптичкиот интензитет. Два типа на нелинеарни ефекти предизвикани од овој феномен се SPM (Self-Phase Modulation) и XPM (Cross-Phase Modulation).

SPM е предизвикана од варијациите на снагата на оптичкиот сигнал и резултира во вариации во фазата на сигналот. Големината на фазното поместување предизвикано поради SPM е дадено со:

$$\phi_{NL} = n_2 \cdot k_0 \cdot L \cdot |E|^2 \quad \text{ф. 2.3}$$

каде што n_2 е нелинеарниот коефициент од индексот на прекршување, $k_0=2\pi/\lambda$, L е должината на оптичкото влакно, и $|E|^2$ е оптичкиот интензитет. Во системите со фазна модулација (PSK-Phase Shift Keying), SPM може да предизвика сериозна деградација на перформансите на системот, бидејќи приемникот одлучува врз основа на информациите во фазата. SPM исто така предизвикува спектрално проширување на импулсите. Моменталните варијации во фазата на сигналот предизвикани од промените на интензитетот на сигналот ќе резултира во моментални варијации во фреквенцијата околу централната фреквенција на сигналот. За многу кратки импулси, дополнителните фреквентни компоненти генерирани од SPM комбинирани со ефектите на материјалната дисперзија исто така ќе предизвикаат проширување или стеснување на импулсите во временски домен, што негативно влијае врз максималната битска брзина и битските грешки.

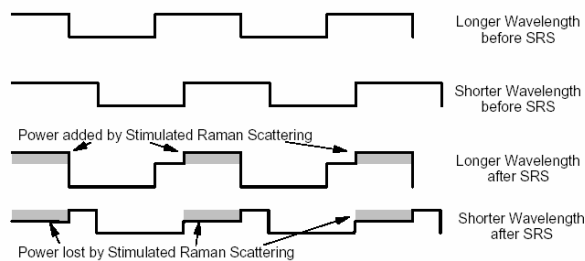
XPM е поместување во фазата на сигналот предизвикана поради промена на интензитетот на сигналот кој се простира на друга бранова должина. XPM може да предизвика асиметрично проширување на спектарот, и комбинирана со SPM и дисперзијата, може да влијае врз обликот на импулсот во временски домен.

Иако XPM може да ги ограничи перформансите на оптичките системи, таа може да има и корисна примена. XPM може да се користи за модулација на сигналот од пумпа на една бранова должина од модулиран сигнал на друга бранова должина. Таа техника може да се користи во претворувачите на бранови должини.

2.1.3.2. Стимулирано раманово расејување (SRS - Stimulated Raman Scattering)

Стимулираното раманово расејување настанува поради интеракција на светлината со молекуларните вибрации. Поради интеракција на инцидентната светлина со молекулите се создава расеана светлина на подолги бранови должини од брановата должина на инцидентната светлина. Расеаната светлина може да се појави и во двете насоки на простирање. Дел од светлината која патува на некоја фреквенција во Раман-активното влакно се пренесува во опсег од пониски фреквенции. Светлината генерирана на пониски фреквенции се нарекува стоен бран (stoke wave). Опсегот на фреквенции зафатен од стојните бранови е определен со Рамановиот спектар на засилување кој опфаќа опсег од околу 40THz под фреквенцијата на влезната светлина. Во силициумското влакно, стојните бранови имаат максимална моќ на фреквенција околу 13,2 THz помала од влезниот сигнал.

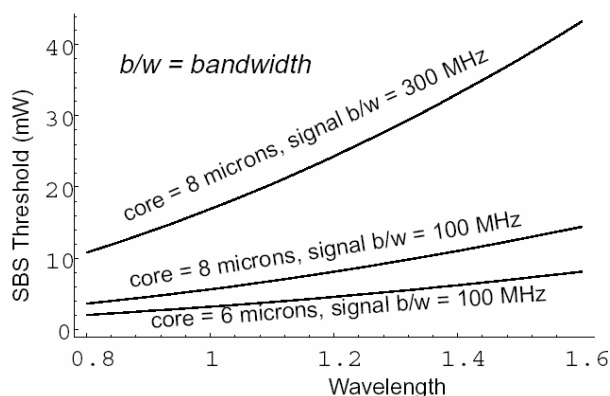
Делот од снагата пренесена на стојните бранови расте нагло со зголемувањето на снагата на влезниот сигнал. Во случај на многу големи влезни снаги, SRS ќе предизвика скоро целата снага на влезниот сигнал да биде пренесена на стојните бранови.



слика 2.5 Стимулирано раманово расејување

Во повеќеканалните WDM системи, каналите со помала бранова должина ќе изгубат дел од снагата и ќе ја предадат на каналите со поголема бранова должина кои се наоѓаат во рамановиот спектар (види слика 2.5). За да се намалат загубите, снагата на секој канал треба да биде под одредено ниво. На пример (види [5]), во 10 канален систем со растојание меѓу каналите од 10nm, снагата на секој канал треба да се држи под 3mW за да се минимизира влијанието на SRS ефектите.

2.1.3.3. Стимулирано бернулиево расејување (SBS-Stimulated Brillouin Scattering)



слика 2.6 Варијација на SBS прагот со промена на брановата должина. Вредноста на прагот претставува снага над која SBS предизвикува значителни ефекти

Стимулираното бернулиево расејување претставува расејување на светлината назад кон предавателот предизвикано поради механички (акустички) вибрации во трансмисиониот медиум т.е. оптичкото влакно. Одбиениот бран се нарекува стоен бран. Ефектот е обично тривијален но може да биде многу важен во ситуациите каде што се користи многу квалитетен ласер со тесна "ширина на линија"⁴ при релативно висока снага. SBS настанува поради присуството на самиот оптички сигнал. Оптичкиот сигнал во реалноста е многу силно електромагнетно поле. Ова поле предизвикува механички вибрации во оптичкото влакно кои предизвикуваат периодично слабо менување на индексот на прекршување. Ефектот на

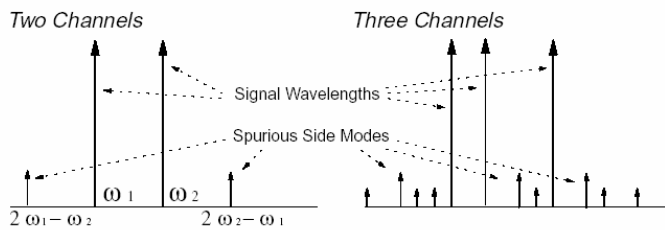
бернулиево расејување е предизвикан од светлината која е одбиена од дифракционата решетка создадена поради овие периодични промени на индексот на прекршување. Рефлектираната светлина се одбива наназат од подвижната решетка. Поради таа причина нејзината фреквенција е променета од доплеровиот ефект. Променетата фреквенцијата на одбиениот бран во стандардно моноодно влакно е за 11.1 GHz пониска од фреквенцијата на директниот бран.

Овој ефект, како и SRS, е нелинеарен и во практичните системи се јавува со сериозни последици доколку снагата на сигналот е поголема од 3mW. Исто така SBS ефектите се поизразени доколку ширината на линијата на ласерот е многу мала. Во пракса ширината на линијата треба да биде помала од 100MHz (околу 0.1nm) за да SBS претставува проблем. Овој ефект во насоката на простирање се изразува како зголемување на слабеењето. Тој исто така додава и шум на сигналот. За сигналите со мала ширини на линија SBS го наметнува горниот лимит на употреблива снага на предавателот (види слика 2.6).

⁴ Linewidth - Наместо да произведуваат континуиран опсег од бранови должини во нивната спектрална ширина, полупроводничките ласери произведуваат серија од "линии" на извесен број од дискретни бранови должини. Дадената линија на ласер се емитува на точно специфицирана бранова должина која одговара на еден мод (светлосна патека) во ласерската празнина. Со тек на време оваа бранова должина варира околу централната бранова должина. Опсегот опфатен со овие варијации ја дефинира ширината на линијата на ласерот.

2.1.3.4. Мешање на четири брана (FWM-Four Wave Mixing)

Ефектот на мешање на четири брана настанува кога две бранови должини, кои работат на две фреквенции ω_1 и ω_2 , се мешаат при што се генерираат сигнали на $2\omega_1 - \omega_2$ и $2\omega_2 - \omega_1$. Овие сигнали



слика 2.7 Мешање на четири брана

наречени лажни странични опсези (spurious sidebands), може да предизвикаат интерференција доколку се преклопат со фреквенциите користени за пренос на податоци. Слично, мешањето може да настане помеѓу комбинации од три или повеќе бранови должини. FWM ефектот во WDM системите може да се редуцира со користење на нееднакво растојание помеѓу каналите.

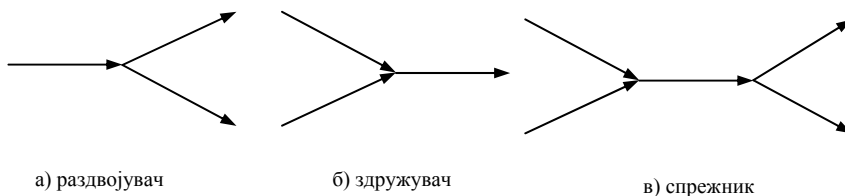
Покрај штетното влијание овој ефект може да има и корисна употреба, а тоа е дизајн на

претворувачи на бранови должини.

Согласно со горе изложеното, нелинеарните ефекти во оптичкото влакно може потенцијално да ги ограничат перформансите на WDM оптичките мрежи. Овие нелинеарности може да ја ограничат оптичката снага на секој канал, максималниот број на канал, максималната брзина на пренос, и да го ограничат растојанието помеѓу каналите. Деталите поврзани со нелинеарните ефекти на оптичкото влакно се комплексни, и надвор од рамките на интерес на овој труд. Сепак, тие претставуваат главен ограничувачки фактор за бројот на канали во WDM системот, особено за системите кои работат на растојанија поголеми од 30km.

2.1.4. Спрежник (coupler)

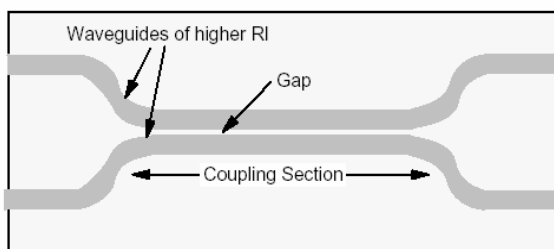
Спрежник (coupler) е генерален термин кој што ги опфаќа сите уреди кои комбинираат светлина или



слика 2.8 Раздвојувач, здружувач и спрежник

ја раздвојуваат светлината во оптичкото влакно. Раздвојувачот (splitter) е спрежник кој што го раздвојува оптичкиот сигнал од едно оптичко влакно на две или повеќе. Најчест вид на раздвојувач е 1x2 раздвојувачот, како што е прикажано на слика 2.8a. Односот на раздвојување - α укажува на тоа колкав дел од

влезната снага се јавува на секој од излезите. За двопортен раздвојувач односот на раздвојување е 50:50, иако можат да се произведат раздвојувачи со било каков однос. Здружувачот (combiner) види слика 2.8б е обратен уред од раздвојувачот и во принцип раздвојувачот може да се користи и како здружувач. Влезниот сигнал во здружувачот на излезот ќе биде ослабнат за 3dB. 2x2 спрежникот (види слика 2.8 в) во суштина претставува 2x1 здружувач поврзан во каскада со 1x2 раздвојувач, кој



слика 2.9 Спрежник изработен во планарна брановодна технологија

врши функција на дифузија на сигналите од двете влезни влакна.

Постојат два основни начини за производство на спрежници. Едниот е со термичко спојување⁵ на две оптички влакна, а другиот е со користење на интегрирана оптичка планарна технологија (види слика 2.9). Кога се зборува за повеќето оптички уреди т.е. компоненти, а особено за спрежниците од интерес се три карактеристики. Тоа се повратен губиток, губиток на вметнување и губиток на пречекорување.

⁵ Понекогаш влакната се впредуваат.

- Повратен губиток (Return Loss); Повеќето оптички уреди одбиваат дел од сигналот назад кон влезното влакно. Ова може да варира од мала вредност па дури до поголем дел од сигналот. Износот на снага што е рефлектиран и на тој начин изгубен се нарекува повратен губиток. Типично кај спрежникот, количеството на рефлектираната снага е 40-50dB под вредноста на влезната снага.
- Губиток на вметнување (Insertion Loss); Губиток на вметнување е губиток предизвикан при насочување на светлината од оптичкото влакно во спрежникот. Во идеален случај оските на јадрото на оптичкото влакно и влезната порта на спрежникот мора да се израмнети. Сепак идеално израмнување во праксата не е можно заради малите димензии.
- Губиток на пречекорување (Excess Loss) е мерка за споредба на практичните со теоретските резултати. Тоа е додатен губиток на уредот во однос на очекуваниот добиен по теоретски пат.

Во предложените WDM LAN мрежни архитектури, се јавува потреба од уред наречен пасивна ѕвезда⁶. Овој уред може да се направи со користење на 2x2 спрежници поврзани во каскада. Сепак оваа изведба е непрактична и има големи губитоци на снага особено за пасивна ѕвезда со повеќе од 100 влезови/излези.

Друга имплементација на пасивната ѕвезда е со користење на интегрирана оптичка планарна технологија каде брановодите и пасивниот ѕвездест спрежник се имплементираат на полупроводнички, стаклен (силициум диоксид) или полимерен субстрат.

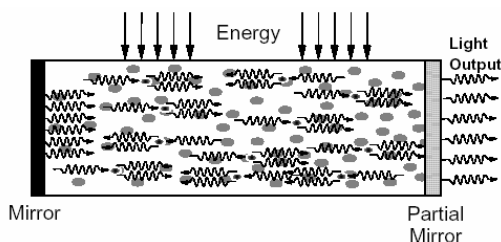
2.2. Оптички предаватели

2.2.1. Принцип на функционирање на ласер

Зборот LASER е акроним за светлосно засилување со стимулирана емисија на радијација (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Клучниот збор е стимулирана емисија, што претставува ефект кој му овозможува на ласерот да произведува силни зраци со голема енергија од кохерентна светлина (светлина која содржи една или повеќе дискретни фреквенции).

Атомите кои се во стабилна состојба имаат електрони кои се наоѓаат во најниските можни енергетски нивои. Во секој атом, постојат одреден број на дискретни енергетски нивои или состојби во кои електронот може да се најде. Со цел да електронот ја промени својата стабилна состојба тој треба да апсорбира енергија. Кога атомот ќе апсорбира енергија тој преоѓа во возбудена состојба, и се преоѓа во повисоко енергетско ниво. Оваа состојба на електронот е нестабилна, и обично брзо се враќа назад во стабилна состојба со ослободување на фотон.

Сепак, постојат материјали кај кои атомите се во квазистабилна состојба, што значи дека тие остануваат во возбудена состојба подолг период на време, без постојана надворешна возбуда. Со вметнување на надворешна енергија во доволно долг период на време (или во форма на оптичка пумпа или во форма на електрична струја) во субстанцијата со квазистабилна состојба, настанува **инверзија на популација**, што значи дека поголем број на електрони се во возбудена состојба отколку во стабилна. Ваквиот ефект и овозможува на субстанцијата да емитира повеќе светлина отколку што апсорбира.



слика 2.10 Општа структура на ласер

На слика 2.10 е прикажана општа претстава на структурата на ласер. Тој се состои од две огледала кои формираат празнина (простор помеѓу огледалата), емисионен медиум (lasing medium) кој ја исполнува празнината, и уред за возбудување. Уредот за возбудување генерира електрична струја или светлина која се вметнува во емисиониот медиум, кој е направен од квазистабилна супстанција. Вметнатата енергија ги возбудува електроните во емисиониот медиум, и кога електронот се враќа во стабилна состојба тој емитира

⁶ Тоа е уред кој прифаќа многу влезни сигнали, ги меша, и потоа го дифузира комбинираниот сигнал на сите излези.

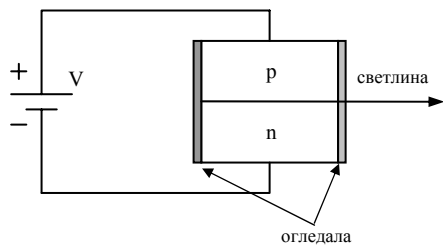
фотон. Фотонот ќе се одбие од огледалата сместени на краевите од празнината, и ќе помине низ медиумот повторно.

Стимулирана емисија настанува кога фотонот минува блиску до возбуден електрон. Фотонот може да го поттикне електронот да ја ослободи неговата енергија и да се врати во стабилна состојба. Во тој процес, електронот ослободува друг фотон кој ќе има иста насока и кохерентност како и поттикнувачкиот фотон. Фотоните кои имаат фреквенција која е продукт од должината на празнината ќе се комбинираат кохерентно за да натрупаат светлина на дадена фреквенција во внатрешноста на празнината. Помеѓу "нормална" и стимулирана емисија, светлината на дадената фреквенција го зголемува интензитетот се додека енергијата се извади од медиумот. Огледалата ги одбиваат фотоните напред назад, така што е можно да се случи понатамошна стимулирана емисија и да бидат произведени поголеми интензитети на светлина. Едно од огледалата е делумно транспарентно, па дел од фотоните ќе излезат од празнината во форма на тесен фокусиран зрак од светлина. Со промена на должината на празнината, се менува фреквенцијата на емитираната светлина. Фреквенцијата на емитираниот фотон зависи од промената на енергетските нивоа, и е дадена со следната равенка:

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} \quad \text{ф. 2.4}$$

каде што f е фреквенцијата на фотонот, E_i е иницијалната (квазистабилна) состојба на електронот, E_f е крајната (стабилна) состојба на електронот, и h е планковата константа.

Најупотребуван тип на ласер за оптичките комуникации е полупроводничкиот диоден ласер. Наједноставна имплементација на полупроводничкиот ласер е со диода чиј PN спој од двете страни



слика 2.11 Полупроводнички диоден ласер

има огледални рабови. За да се поттикне стимулирана емисија се пушта електрична струја, така што ќе дојде до преоѓање на електроните од N регионот во P каде што се комбинираат со празнините, што резултира во генерирање на светлосна енергија која има фреквенција што претставува продукт од ширината на потенцијалната бариера на PN спојот. Со користење на различни типови на полупроводнички материјали може да се генерира светлина со различни фреквенции. Вистинската фреквенција емитирана од ласерот е одредена од ширината на празнината формирана од огледалните страни нормални на PN спојот.

2.2.2. Променливи и фиксни ласери

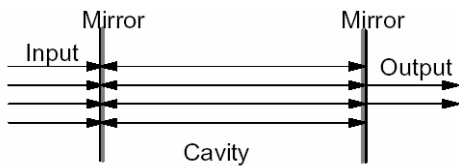
Во предходната глава беше објаснето функционирањето на основниот модел на ласер, но во WDM мрежите често е потребно предавателите да имаат можност за промена на брановата должина. Во оваа глава ќе бидат накратко опишани неколку типа на променливи и фиксни ласери.

Дел од физичките карактеристики на ласерот кои можат да влијаат врз перформансите на системот се ширина на линијата (linewidth) и фреквентната стабилност.

Ширината на линијата на ласерот е спектралната ширина на светлината генерирана од ласерот. Таа влијае на растојанието меѓу каналите и исто така влијае врз големината на дисперзијата што се јавува при простирањето на светлината низ оптичкото влакно. Како што беше спомнато во глава 2.1.2 проширувањето на импулсот поради дисперзијата ја ограничува максималната битска брзина.

Фреквентната нестабилност во ласерот претставува варијација на фреквенцијата на ласерот. Постојат три примери на овој ефект и тоа, скокање на мод, поместување на мод, и цвркот на бранова должина. Скокање на мод настанува во ласерите со вбригување на струја (injection current) и е случаен скок на фреквенцијата на ласерот настанат поради промена на струјата на вбригување над одреден праг. Поместување на мод претставува промена на фреквенција поради промени на температурата. Цвркот на бранова должина (wavelength chirp) е промена на фреквенцијата поради варијација на струјата на вбригување. Во WDM системите, нестабилноста на фреквенцијата може да го ограничи растојанието помеѓу каналите. Со цел да се избегнат големи промени на фреквенцијата, мора да се користат методи за компензација на промените на температурата и струјата на вбригување.

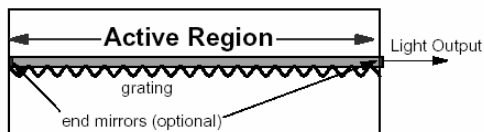
Дел од примарните карактеристики кои се од интерес за променливите ласери се опсег на промени, време на промена, и дали ласерот е со континуирана променливост низ целиот променлив опсег или дискретна променливост (само на одредени бранови должини). Опсегот на промени се однесува на опсегот на бранови должини во кој ласерот може да функционира, а времето на промена го специфицира времето потребно за ласерот да премине од една на друга работна бранова должина.



слика 2.12 Fabry-Perot филтер; Светлината влегува во празнината преку делумно посребреното огледало на лево и излегува низ делумно посребреното огледало на десно. Само брановите должини кои се во резонанција со празнината се во состојба да поминат. Другите бранови должини ќе бидат силно ослабнати.

Промената на индексот на прекршување резултира во пренос на светлина на различни фреквенции. Времето на промена е од ред на микросекунди.

• **Променливи ласери со струја на вбризгување;** Ласерите со струја на вбризгување формираат фамилија на предаватели кои овозможуваат селектирање на брановата должина со користење на дифракциона решетка. Ласерот со дистрибуирана повратна спрега (DFB – Distributed Feedback) користи дифракциона решетка сместена во емисиониот медиум. Во суштина решетката се состои од брановод во кој индексот на прекршување се менува периодично помеѓу две вредности. Само брановите должини кои имаат ист период и индекси како решетката конструктивно ќе



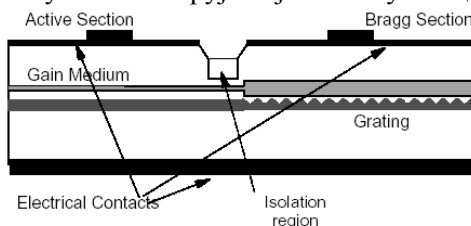
слика 2.13 DFB ласер

интерферираат, а сите други деструктивно и нема да се простираат низ брановодот. Присуството на решетка предизвикува настанување на мали рефлексии при секоја промена на индексот на прекршување. Кога периодот на решетката е целоброен производ од брановата должина на инцидентната светлина, се случува конструктивна интерференција помеѓу рефлексииите. Другите бранови должини деструктивно интерферираат и затоа не можат да бидат одбиени. Ефектот е најсилен кога периодот на бреговата решетка (Bragg Grating види глава 2.3.3) е еднаква на брановата должина на користената светлина (решетка од прв ред). Сепак уредот ќе работи кога периодот на решетката е било кој (мал) целоброен производ од брановата должина. На овој начин само еден мод (оној кој е во согласност со периодот на решетката) може да се емитува. Условот за пропагација е зададен со следнава равенка:

$$D = \frac{\lambda}{2n}$$

ф. 2.5

каде D е периодот на бреговата решетка. Брановата должина на емисија на ласерот се менува со вбризгување на струја која го менува индексот на рефлексija на решетката.



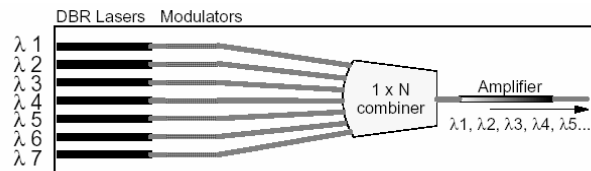
слика 2.14 Променлив DBR ласер

• **Механички - променливи ласери;** Повеќето механички -променливи ласери користат Fabry-Perot празнина (филтер) која се поставува непосредно во продолжение на емисиониот медиум на ласерот (види слика 2.12) за да ги филтрира несаканите бранови должини. Менувањето на брановата должина се прави со физичко менување на растојанието помеѓу двете огледала. Времето на промена за овој ласер е од ред на милисекунди.

• **Акустичко-оптички и електро-оптички променливи ласери;** И овие ласери функционираат со употреба на надворешен променлив филтер т.е. празнина. Индексот на прекршување на надворешната празнина се менува со користење на звучни бранови или електрична струја.

Доколку решетката се помести надвор од емисиониот медиум, предавателот се нарекува ласер со дистрибуиран брегов рефlector (DBR-Distributed Bragg Reflector). Промената на брановата должина на DBR ласерот е дискретна, времето на промена на бранова должина изнесува околу 10ns. Бидејќи индексот на прекршување на DBR ласерот е ограничен, DBR ласерот има мал опсег на менување (околу 10nm), што може да покрие околу 25 канали.

- Алтернатива на променливите ласери е поле од ласери, кое содржи множество од фиксни ласери. Ласерското поле се состои од извесен број на ласери кои се интегрирани во една компонента заедно со 1xN здружувач, со тоа што секој ласер работи на различна бранова должина.



слика 2.15 Ласерско поле

2.2.3. Оптичка модулација

Најчест метод на модулација во оптичките системи е бинарна амплитудна модулација (OOK - On-Of keying). Во системите кои користат OOK, модулацијата на сигналот може да се оствари со едноставно вклучување и исклучување на ласерот (директна модулација). Сепак ова може да доведе до цвркот, или варијација на амплитудата и фреквенцијата на сигналот што го генерира ласерот. Затоа, за поголеми битски брзини се користи екстерен модулатор, кој ја блокира или пропушта светлината зависно од струјата што се пропушта низ него.

Мак-Зендеровиот (Mach-Zehnder види глава 2.3.2) интерферометар може да се користи како уред за модулација. Струјата што се подвргнува врз еден од брановодите предизвикува сигналот што минува низ него да биде во фаза со сигналот во другиот брановод или со фазна разлика од 180° , што резултира во тоа да светлината од ласерот да биде пропуштена или блокирана.

2.3. Оптички приемници и филтри

Променливите оптички филтри т.е. приемници се клучни елементи за изградба на WDM мрежите.

2.3.1. Фотодетекција

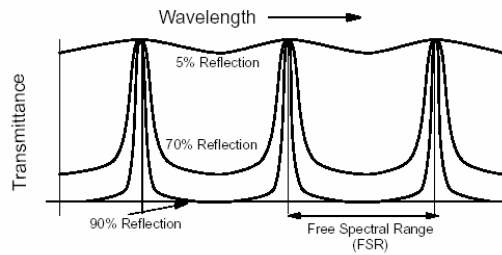
Во приемниците со директна детекција, фотодетекторот ја претвора дојдовната фотонска поворка во поворка од електрони. Електронската поворка потоа се засилува и се пропушта низ одлучувач т.е. детектор на логичка единица и нула.

Основни уреди за директна детекција во оптичките мрежи се PN фотодиода и PIN фотодиода. Преку фотоелектричниот ефект, светлината инцидентна на PN спојот ќе креира електрон-празнина парови во P и N регионите од фотодиодата. Електроните ослободени во P регионот ќе поминат во N регионот, а празнините обратно. Тоа резултира во електрична струја.

Алтернатива на директната детекција е кохерентната детекција во која се користи информацијата во фазата за кодирање и детекција на сигналот. Сепак поради нелинеарностите на оптичкото влакно оваа детекција не е погодна за оптичките системи.

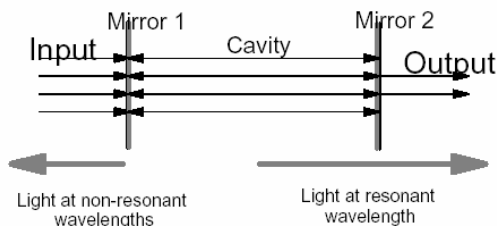
2.3.2. Променливи оптички филтри

Променливите оптички филтри се карактеризираат примарно по нивниот опсег и времето на промена од една на друга бранова должина.



слика 2.16 Слободен спекрален опсег (FSR – Free Spectral Range)

цел број. Финоста на филтерот е однос помеѓу FSR и спектралната ширина на каналот. Бројот на канали во оптичкиот филтер е ограничен од FSR и финоста на филтерот. Сите канали мора да ги собере во FSR. Доколку финоста е голема тоа резултира во поголем број на канали кои можат да се сместат во FSR.

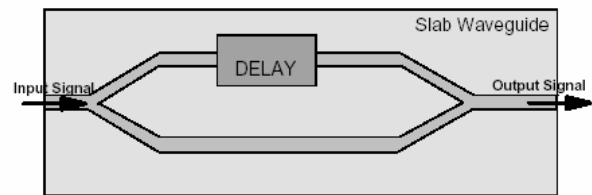


слика 2.17 Fabry-Perot филтер

- **Еталон (Fabry-Perot филтер)** ; Овој филтер се состои од една празнина формирана од две паралелни огледала. Светлината од влезното влакно влегува во празнината и се рефлектира извесен број пати од огледалата. Со промена на растојанието помеѓу огледалата, една бранова должина може да биде избрана да се простира низ празнината, додека останатите бранови должини деструктивно да интерферираат. Растојанието помеѓу огледалата може да се менува механички, или со промена на индексот на прекршување

ње во празнината.

- **Мак-Зендеров синцир (Mach-Zender);** Кај мак-зендеровиот интерферометар, раздвојувачот го раздвојува влезниот зрак во два брановоди, а потоа здружувачот ги комбинира сигналите на излез од брановодите (види слика 2.18). Променлив елемент за доцнење ја контролира должината на оптичката патека на еден од брановодите, што резултира во фазна разлика помеѓу двата сигнала кога ќе се соберат. Брановите должини чија фазна разлика е 180° ќе бидат исклучени во излезниот сигнал. Со спојување на вакви филтри во каскада, може да се селектира една единствена бранова должина.



слика 2.18 Структура на мак-зендеров интерферометар

- **Акустичко-оптички филтри;** RF бранови се пропуштаат низ претворувач (transducer). Претворувачот е пиезоелектричен кристал кој ги претвора звучните бранови во механичко движење. Звучните бранови го менуваат индексот на прекршување на кристалот, што овозможува кристалот да се однесува како решетка. Светлината инцидентна на претворувачот ќе дифрактира зависно од влезниот агол и од брановата должина на светлината. Со промена на RF брановите, може да се избере една бранова должина да поминува низ материјалот додека другите деструктивно да интерферираат. Времето на промена (промена од една на друга бранова должина) изнесува околу $10\mu s$ и е ограничено од брзината на звукот. Опсегот на менување е голем 1300-1560nm.

За да се постигне подобро време на промена се користат **електро-оптички филтри** кај кои индексот на прекршување се менува во зависност од електричната струја вметната во кристалот. Сепак овие филтри имаат мал опсег на менување. Подобрена варијанта на електрооптичките филтри се филтрите со течен кристал (LC-Liquid Crystal).

табела 2.1 Типови на променливи филтри

Променлив филтер	Опсег на менување	Време на нагудување
Fabry-Perot	500	1-10ms
Акустичко-оптички	250	$10\mu s$
Електро-оптички	16	1-10ns
LC – Fabry Perot	30	$0,5-10\mu s$

2.3.3. Фиксни оптички филтри

Алтернатива на променливите филтри е користење на фиксни филтри или уреди со решетка. Уредите со решетка обично филтрираат една или повеќе различни бранови должини во едно оптичко влакно. Таквите уреди може да се користат за имплементација на оптички мултиплексери, демултиплексери и приемни полиња.

- **Филтри со решетка;** Една имплементација на фиксен филтер е со дифракциона решетка. Таа претставува тенок ниво од транспарентен материјал (на пример, стакло или пластика) со ред од паралелни бразди засечени во него. Решетката ја раздвојува светлината во компоненти со одбивање на светлината која е инцидентна на браздите во сите агли. На одредени агли, само една бранова должина се сумира конструктивно, а сите други деструктивно интерферираат.

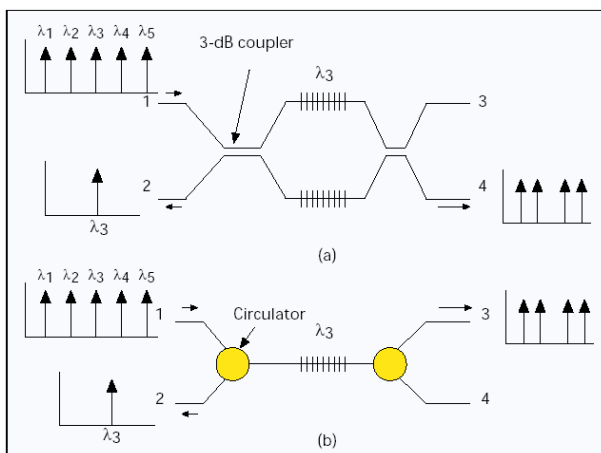


слика 2.19 Брегова решетка во оптичко влакно

- **Брегова решетка во оптичко влакно (FBG - Fiber Brag Grating) ;** Пронајдокот на брегова решетка бил номиниран како една од клучните случки во историјата на оптичките комуникации од ранг на пронајдокот на ласерот. Брегова решетка во оптичко влакно е едноставен уред кој се состои од обично мономодно влакно долго неколку сантиметри. Решетката е конструирана со промена на индексот на рефлексија на јадрото по должината на оптичкото влакно. Бреговата решетка ќе ја одбие дадената бранова должина назад кон изворот, а ќе ги пропушти сите други. Брановите должини кои не се селектирани поминуваат со многу мало слабеење. Две примарни карактеристики на бреговата решетка се пропусниот опсег и степенот на рефлексија. Типична вредност за пропусниот опсег е 0,1nm, а степенот на рефлексија е поголем од 99%. Со вметнување на решетката директно во јадрото на оптичкото влакно се постигнуваат многу мали губитоци на вметнување (insertion loss). Недостаток на бреговата решетка е тоа што индексот на прекршување на решетката се менува со промена на температурата, а тоа предизвикува да со пораст на температурата бидат одбиени подолги бранови должини од саканата.

2.3.3.1. Примена на бреговата решетка

Брегова решетка во оптичко влакно е многу едноставен и ефтин, филтер на бранови должини. Тој има широк опсег на употреба што го подобрува квалитетот и ја намалува цената на оптичките мрежи. FBG е разноврсен уред и има многу апликации во оптичките мрежи, особено во комбинација со други оптички електронски компоненти. FBG може да се користи за имплементација на мултиплексери, демултиплексери и променливи филтри. Исто така



слика 2.20 Два пристапи за демултиплексирање со користења на FBG

може да се користи за компензација на дисперзијата во оптичкото влакно, порамнување на опсегот на засилување на EDFA⁷ (види глава 2.4.4), надзор и контрола, додавање и одземање на канали (ADM), и тн.

Базичната форма на демултиплексирање со користење на FBG е прикажана на слика 2.20a и слика 2.20b. Демултиплексерот прикажан на слика 2.20a се состои од мак-зендеров интерферометар со идентични FBG во гранките. FBG решетките со централна бранова должина λ_i предизвикуваат дојдовниот канал со бранова должина λ_i да излезе на влакното 2. Останатите N-1 канали се јавуваат на влакното 4, додека влакното 3 или се користи за додавање на канал со бранова должина λ_i или се остава неупотребено. За демултиплексирање на

⁷ Erbium Doped Fiber Amplifiers

сите N влезни канали, потребно е да се поврзат во каскада N вакви степени, при што излезот 4 од претходниот степен се поврзува на влезот 1 од наредниот степен.

За добро функционирање на ваквиот уред потребно е да се употреби идеален 3dB спрежник, и разликата на патеките во двете гранки од интерферометарот да биде еднаква на нула. Додека идеален 3dB спрежник е практично можеен, разликата во патеки еднаква на нула инсистира на фино подесување (со користење на UV зраци) на индексот на прекршување во гранките на интерферометарот. На слика 2.20b е прикажана друга едностепенна демултиплексерска шема за дизајн, со FBG решетка во сендвич помеѓу два циркулатори. Слично како и за претходната шема оптичкото влакно 1 е влез, влакното 2 е за извадениот канал, влакното 4 е за додавање на канал, а остантите канали излегуваат на влакното 3.

2.4. Оптички засилувачи

2.4.1. Вовед во оптичко засилување

И покрај тоа што оптичкиот сигнал може да се простира на големи растојанија пред да биде потребно засилување, употребата на оптички засилувачи во 'рбетните и во локалните оптички мрежи е од голема корист. Сè-оптичкото засилување се разликува од оптичко-електричното засилување во тоа што тоа има улога на зголемување на снагата на сигналот, а не да го обнови обликот на сигналот. Овој тип на засилување е познат како 1R (regeneration), и обезбедува тотална транспарентност на пренесуваните податоци (процесот на засилување е независен од форматот на модулација на сигналот). 1R засилувањето е избор за идните транспарентни сè-оптички мрежи. Сепак во денешните дигитални мрежи (на пример, SDH – Synchronous Digital Hierarchy), кои го користат оптичкото влакно само како трансмисионен медиум, оптичките сигнали се засилуваат со тоа што прво се претвора информацијата поворка во електричен сигнал, а потоа повторно се испраќа тој сигнал оптички. Ваквото засилување се нарекува 3R (Regeneration, Reshaping, Reclocking). Со реобликувањето (reshaping) на сигналот се репородуцира оригиналниот облик на импулсот, со што се елиминира и шумот. Ресинхронизација (reclocking) на сигналот го синхронизира сигналот на неговата оригинална бинарна брзина. Ресинхронизацијата се користи само за дигитално модулирани сигнали. Друг начин на засилување е 2R (regeneration and reshaping), каде оптичкиот сигнал се претвора во електричен, кој потоа се користи за директна модулација на ласерот. 3R и 2R техниките имаат помала транспарентност од 1R техниката, и во идните оптички мрежи, здружената битска брзина од неколку канали може да ги направи 3R и 2R техниките помалку практични.

Исто така, во WDM системите со електронско засилување, секоја бранова должина ќе треба да биде издвоена пред да се засили електронски, а потоа да се вметне повторно во оптичкиот сигнал и да биде пренесена. Согласно со ова, со цел да се елиминира потребата од оптички мултиплексери и демултиплексери во засилувачите, оптичките засилувачи мора да ја зголемат снагата на оптичките сигнали без претходно да ги претвораат во електрични сигнали. Недостаток е што оптичкиот шум ќе биде засилен заедно со корисниот сигнал. Исто така, засилувачот внесува и шум поради стимулираната емисија во него. Имено, оптичките засилувачи го користат принципот на стимулирана емисија, слично на пристапот кој се користи кај ласерот. Постојат два основни типови на оптички засилувачи, а тоа се: полупроводнички оптички засилувачи (SOA-Semiconductor Optical Amplifiers) и оптички засилувачи кои користат збогатување со ретко застапени елементи (на пример, EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier).

2.4.2. Карактеристики на оптичките засилувачи

Некои основни параметри кои се од интерес кај оптичките засилувачи се засилување, опсег на засилување, заситување на засилување, осетливост на поларизација, и шум на засилувачот.

Засилувањето е однос помеѓу излезната снага и неговата влезна снага. Понекогаш оптичките засилувачи се карактеризираат со параметарот наречен ефикасност на засилување, кој ја дава снагата во функција од снагата на оптичката пумпа во dB/mW.

Опсегот на засилување на засилувачот се однесува на опсегот на бранови должини во кои засилувачот успешно работи. Во WDM мрежите опсегот на засилување го ограничува бројот на бранови должини за дадено растојание помеѓу каналите.

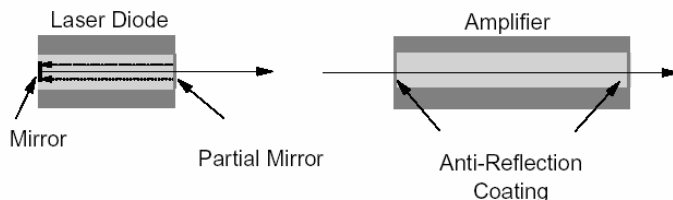
Точката на заситување на засилувачот претставува вредност на излезната снага по која излезната снага повеќе не се зголемува со зголемување на влезната снага. Кога влезната снага се зголеми над дадена вредност, носителите (електроните) во засилувачот не се во состојба да емитуваат дополнителна светлосна енергија.

Осетливоста на поларизација се однесува на зависноста на засилувањето од поларизацијата на сигналот.

Во оптичките засилувачи доминантен извор на шум е засилената спонтанна емисија (ASE – Amplified Spontaneous Emission), која настанува од спонтаната емисија на фотони во активниот регион на засилувачот (види слика 2.21)

2.4.3. Полупроводнички оптички засилувачи (SOA – Semiconductor Optical Amplifiers)

Полупроводничките оптички засилувачи⁸ се состојат од модифициран полупроводнички ласер. Слабот сигнал се испраќа низ активниот регион од полупроводникот, кој преку стимулирана емисија резултира во појак сигнал емитиран од полупроводникот.



слика 2.21 Полупроводнички оптички засилувач (SOA) во споредба со ласер

Постојат два основни типа на полупроводнички оптички засилувачи, Fabry-Perot засилувач кој во суштина претставува полупроводнички ласер, и засилувач со патувачки бран (TWA - Traveling Wave Amplifier). Главна разлика помеѓу двата засилувачи е рефлективноста на двете огледала. Fabry-Perot засилувачите имаат рефлективност од 30% додека TWA имаат рефлективност од околу 0,01%. За да се избегне емисија во Fabry-Perot засилувач претструјата (bias current) се држи под вредноста на емисиониот праг. Поголемата рефлексивност во Fabry-Perot засилувачот предизвикува резонанција во засилувачот, што резултира во тесен пропусен опсег од 5GHz. Овој феномен не е пожелен во WDM системите, па затоа со намалување на рефлективноста на огледалата, засилувањето се остварува во едно поминување низ засилувачот без да се дозволи појава на резонанција. Согласно со ова, TWA засилувачите се посоодветни од Fabry-Perot за WDM мрежи.

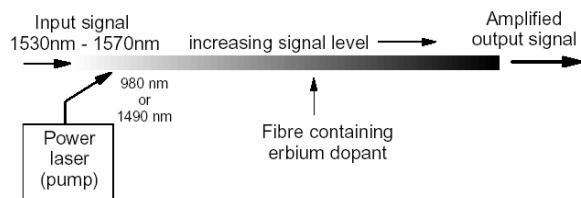
Денешните SOA можат да постигнат засилување од 25dB со заситување од 10dBm, поларизациона осетливост од 1dB и пропусен опсег од 40nm.

Предност на полупроводничките засилувачи е тоа што можат да се интегрираат со други компоненти. На пример, тие може да се користат како порти во комутаторите. Со исклучување на струјата и нејзино вклучување, засилувачот може да се однесува како порта и да го блокира или да го засилува сигналот.

2.4.4. Оптички засилувачи со примеси во оптичко влакно (Doped-Fiber Amplifier)

Оптичките засилувачи со примеси во оптичко влакно се состојат од оптичко влакно кое има примеси на некој од ретките земјени елементи. Најчест елемент кој се користи како примеса е ербиумот, кој што овозможува засилување на брановите должини помеѓу 1525nm и 1560nm.

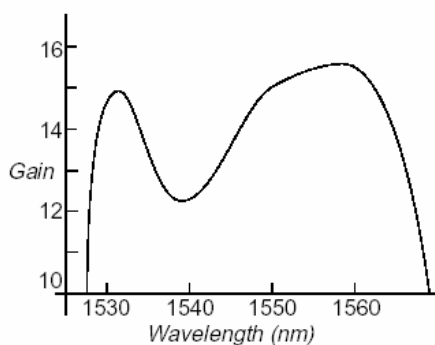
⁸ Често се нарекуваат и полупроводнички ласерски засилувачи (SLA-Semiconductor Laser Amplifier)



слика 2.22 Оптички засилувач со примеси од Ербиум (EDFA)

На едниот крај од оптичкиот засилувач - влакно, лазер емитува силен сигнал на пониска бранова должина (бранова должина на оптичката пумпа) и го вметнува во оптичкото влакно. Овој сигнал на пумпа ги возбужда атомите на ербиумот во повисоко енергетско ниво. Со тоа се овозможува податочниот сигнал да ги стимулира возбуждените атоми да емитуваат фотони. Повеќето EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) користат lasersка пумпа со бранова должина на 980nm или на 1480nm. Првиот тип на пумпа има ефикасност на засилување од 10dB/mW, а вториот 5dB/mW. Типичното засилување на EDFA е 25dB. Пропусниот опсег изнесува 35nm, а снагата на засилување изнесува 10dBm.

За 1300nm регионот, се користи прасеодимиум флуорид како примеса за оптичкиот засилувач (PDFFA - Praseodymium-Doped Fluoride Fiber Amplifier). Овие засилувачи имаат мало преслушување и мал шум, а постигнуваат големи засилувања. Засилувачот работи во опсег од 50nm (1280-1330nm).



слика 2.23 Преносна карактеристика на EDFA оптички засилувач

Ограничување на оптичките засилувачи е нееднаквата преносна карактеристика на засилување (види слика 2.23). Иако оптичкиот засилувач може да обезбеди засилување низ целиот пропусен опсег на бранови должини, тој нема да ги засили сите бранови должини подеднакво. Оваа карактеристика, вклучувајќи го фактот дека оптичкиот засилувач го засилува не само сигналот туку и шумот, како и фактот дека активниот регион на засилувачот може спонтано да емитува фотони што исто така претставува шум, ги ограничува перформансите на оптичкиот засилувач. Поради ова, ако сигнал со повеќе бранови должини помине низ серија од засилувачи, тогаш резултантниот сигнал ќе биде со бранови должини кои имаат нееднакви снаги. Постојат повеќе методи за еквиализација на преносната карактеристика на EDFA засилувачот. Може да се користи филтер непропусник на опсег (notch филтер) со централна фреквенција од 1530nm, со што се потиснува врвот во преносната карактеристика на 1530nm. Сепак, ако сигналот мине низ каскада од EDFA засилувачи, се јавува нов врв во вкупната преносна карактеристика на 1560nm. За ваков случај дополнително треба да се користи филтер непропусник на опсег со централна фреквенција на 1560. Друга метода е прилагодување на излезната снага на предавателите така што на излез од засилувачот сите бранови должини се со приближно иста снага.

2.5. Комутациони елементи

Досегашните мрежи користеаа електронско процесирање и употреба на оптичкото влакно само како трасмисионен медиум. Комутацијата и процесирањето на податоците се вршеше со конвертирање на оптичкиот сигнал во неговата електронска форма. Ваквите мрежи се базираат на електронски комутатори. Овие комутатори обезбедуваат голема флексибилност во поглед на комутационите и рутирачките функции. Сепак, брзината на електрониката не е во можност да обработува брзини кои можат да се остварат поради големиот пропусен опсег на оптичкото влакно. Исто така, електронската конверзија во јазлите во мрежата внесува дополнително доцнење. Овие фактори мотивираат интензивен развој на сè-оптичките мрежи (all-optical networks) во кои комутирачките елементи комутираат оптички поворки на податоци без електронска конверзија. Во денешните оптички комутатори, контролата на комутирачките функции се извршуваа електронски, а оптичката поворка транспарентно се рутира од даден влез на комутаторот кон даден излез. Таквата транспарентна комутација овозможува комутаторот да биде независен од брзината на податоци и форматот на оптичкиот сигнал. За WDM системите се развиени комутатори кои комутираат врз основа на брановата должина.

Оптичките комутатори се користат во оптичките мрежи за разни апликации. Главен фактор кој укажува на тоа за која апликација може да се користи кој комутационен елемент е потребното време за комутација, кое може да варира од неколку ms до неколку ps, како што е прикажано во табела 2.2.

табела 2.2 Апликации за оптичките комутатори и нивните барања во поглед на времето на комутација

Апликација	Потребно време за комутација
Воспоставување на светлосни патеки	1-10ms
Заштитно префрлување	1-10 μ s
Пакетска комутација	1ns
Надворешна модулација	10ps

Една апликација на оптичките комутатори е воспоставување на светлосни патеки. Во оваа апликација оптичките комутатори се користат во внатрешноста на оптичките кросконементи за реконфигурација и поддршка на нови светлосни патеки. Во оваа апликација, комутаторите претставуваат замена за мануелните оптички разделници (patch panels). Затоа за оваа апликација прифатливи се комутатори со време на комутација од неколку ms.

Друга важна апликација е заштитно префрлување (protection switching). Во оваа апликација комутаторот се користи за префрлување на сообраќајната поворка од работното на резервното влакно, доколку работното влакно е во дефект. Оваа апликација типично бара време на комутација од ред на микросекунди. Малечки 2x2 комутатори се доволни за оваа намена. Комутаторите се исто така важни компоненти во брзите мрежи со пакетска комутација⁹. Во овие мрежи комутаторот се користи за комутација на сигналите пакет по пакет. За овие апликации, времето на комутација треба да биде помало од должината на пакетот. На пример, за 53 бајтен пакет на линиска брзина од 10Gb/s има должина од 42ns, па затоа потребното време за комутација е од ред на неколку ns. Уште една апликација за комутаторите е надворешната модулација за вклучување и исклучување на ласерски извор во зависност од податочната поворка. Затоа надворешен модулатор за 10Gb/s линиски сигнал (со времетраење на импулсот од 100ps) мора да има време на комутација од околу 10ps.

Покрај времето на комутација други важни параметри кои ја карактеризираат погодноста на комутаторот за конкретна апликација во оптичките мрежи се:

- **Степен на пригушување (extinction ratio)** на on-off комутатор претставува однос на излезната снага во on-состојба и излезната снага во off-состојба. Овој параметар треба да биде што е можно поголем, и е посебно важен во апликациите за надворешна модулација.
- **Губиток на вметнување (insertion loss)** претставува дел од снагата која е изгубена поради присуството на комутаторот и мора да биде што е можно помал. Некои комутатори имаат различни губитоци за различни влез-излез комбинации. Ова е непожелна карактеристика, бидејќи го зголемува динамичкиот опсег на сигналите во мрежата. Во случај на вакви комутатори, потребно е да се користат променливи оптички атенуатори за да се изедначи слабеењето на комутаторот.
- **Преслушување на комутаторот (crosstalk)** претставува однос помеѓу снагата на излезот која потекнува од соодветниот влез и снагата на истиот излез која потекнува од сите други влезови.
- Како и другите оптички компоненти, комутаторите треба да имаат мали губитоци поради зависност од поларизација (PDL-Polarization Dependent Loss).

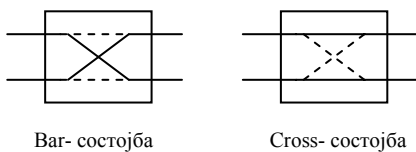
Постојат многу различни технологии за реализација на оптичките комутатори. Некои од нив се споредени во табела 2.3.

табела 2.3 Споредба на различни технологии за оптичка комутација

Тип	Големина	Губитоци (dB)	Преслушување	PDL (dB)	Време на комутација
Механички	8x8	3	55	0.2	10ms
Термо-оптички	SiO ₂	8x8	15	Мали	2ms
	Полимер	8x8	30	Мали	2ms
Електро-оптички	LiNbO ₃	4x4	35	1	10ps
	SOA	4x4	40	Мали	1ns

⁹ Ваквите комутатори нема да бидат разгледувани во овој труд. Трудот се концентрира WDM мрежите. OTDM (optical time division multiplexing) мрежите се надвор од рамките на интерес на овој труд.

2.5.1. Елементи за преспојување



слика 2.24 2x2 кросконемент

Елементите за преспојување на оптичко влакно го комутираат оптичкиот сигнал од една влезна порта на друга. Овој тип на елементи обично се сметаат за независни од бранова должина, т.е. не се способни да извршат демултиплексирање на различни бранови должини на дадено влезно влакно. Основен елемент за преспојување е 2x2 кросконементот кој има две состојби: bar и cross.

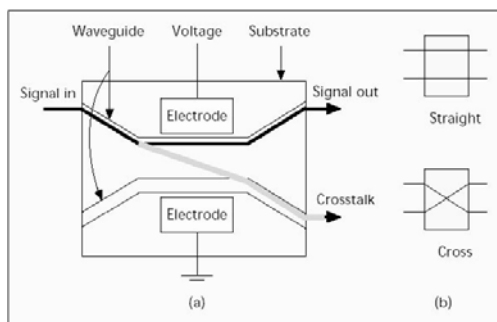
2.5.1.1. Механички комутатори

Во механичките комутатори, функцијата на комутација се извршува со механички средства. Некои од ваквите комутатори користат огледало, со чија помош се контролира состојбата на комутаторот со придвижување на огледалото во и надвор од светлосната патека. Друг тип на механички комутатор користи насочен спрежник. Со свиткување и оптегнување на оптичкото влакно во регионот на спрега се менува односот на спрега на спрежничот и може да се користи за комутација на светлината од една влезна порта на различни излезни порти.

Механичките комутатори имаат мали губитоци на вметнување, мали PDL губитоци, мало преслушување, и се релативно ефтини уреди. Сепак, нивното време на комутација е од ред на неколку ms. Поради овие причини, тие се посебно погодни за користење во оптичките кросконементи за апликацијата за воспоставување на оптички патеки. Како и со повеќето механички компоненти, долгорочната сигурност на овие комутатори е загрижувачка.

2.5.1.2. Електро-оптички комутатори

Електро-оптичкиот комутатор (2x2) користи насочен спрежник чиј степен на спрега се менува не со промена на должината на регионот на спрега, туку со промена на индексот на прекршување на материјалот во регионот на спрега. Најчесто користен материјал е LiNbO_3 (Lithium Niobate). Комутатор базиран на LiNbO_3 субстрат е прикажана на слика 2.25. Комутацијата се остварува со донесување на соодветен напон на електродите.



слика 2.25 Електро-оптички комутатор

Електро-оптичкиот комутатор може да ја менува својата состојба многу брзо, типично во интервал помал од 1 ns. Ова време на комутација е ограничено со капацитивноста на електродите. Поради оваа карактеристика комутаторот е погоден за апликацијата на надворешен модулатор. Меѓу предностите на LiNbO_3 комутаторот е средниот степен на интеграција, во споредба со механичките комутатори. Поголеми комутатори може да се реализираат со интеграција на повеќе 2x2 комутатори на ист субстрат. Недостаток на овие комутатори е што имаат релативно големи губитоци и PDL, и се поскапи од механичките комутатори.

2.5.1.3. Термо-оптички комутатори

Овие комутатори во суштина претставуваат 2x2 интегриран оптички мак-зендеров интерферометар, конструиран на брановоден материјал чиј индекс на прекршување е функција од температурата. Со промена на индексот на прекршување во една од гранките на интерферометарот (види слика 2.20), може да се менува релативна фазана разлика помеѓу двете гранки, што резултира во комутација на влезниот сигнал од една на друга излезна порта. Овие комутациони елементи се прават на SiO_2 како и на полимерен субстрат. Тие имаат релативно лош степен на преслушување, и исто така термо-оптичкиот ефект е релативно спор, па затоа брзината на комутација е од ред на ms.

2.5.1.4. SOA комутатори

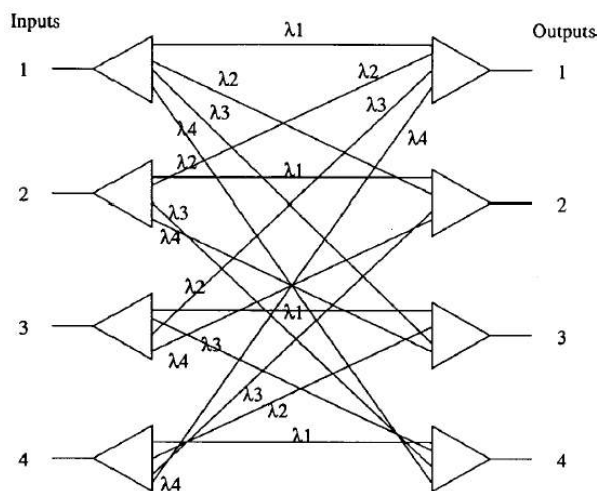
Полупроводничките оптички засилувачи опишани во глава 2.4.3 можат да се користат како on-off комутатор (т.е. прекинувач) со промена на преднапонот (bias voltage) на елементот. Доколку преднапонот се намали, не се постигнува инверзија на популацијата, и уредот го апсорбира влезниот сигнал. Доколку преднапонот се зголеми, тогаш елементот го засилува влезниот сигнал. Комбинацијата од засилување во on-состојбата и апсорпција во off-состојбата го прави овој комутационен елемент да има голем степен на пригушување (extinction ratio). Брзината на комутација е од ред на ns. Сепак оваа компонента е скапа и тешко е остварливо да се направи независна од поларизација.

2.5.2. Упатувачи на бранови должини

2.5.2.1. Нереконфигурирачки упатувач на бранови должини

Уредот за рутирање на бранови должини може да рутира сигнали кои доаѓаат на различни влезни влакна (порти) кон различни излезни влакна (порти) врз основа на брановата должина на сигналот. Рутирањето на бранови должини се остварува со демултиплексирање на различните бранови должини од секоја влезна порта, рутирајќи ја секоја бранова должина независно, и потоа мултиплексирајќи ги сигналите на секоја излезна порта. Уредот може да биде или нереконфигурирачки, во кој случај нема комутирачки степен помеѓу демултиплексерите и мултиплексерите, а рутите за различни сигнали кои доаѓаат на секоја порта се фиксни (овие уреди се нарекуваат упатувачи, а не комутатори), или реконфигурирачки, во кој случај рутирачката функција на упатувачот може да се контролира електронски.

Нереконфигурирачкиот упатувач на бранови должини може да се конструира со степен на демултиплексери кои ги раздвојуваат брановите должини на влезното влакно, следен со степен на мултиплексери кои ги рекомбинираат брановите должини од различните влезови на едно излезно влакно. Излезите на демултиплексерите директно се врзуваат на влезовите од мултиплексерите. Нека на пример, упатувачот има P влезни оптички влакна и P излезни влакна. На секое влезно влакно, има M канали. На слика 2.26 е прикажан 4×4 упатувач со $M=4$.



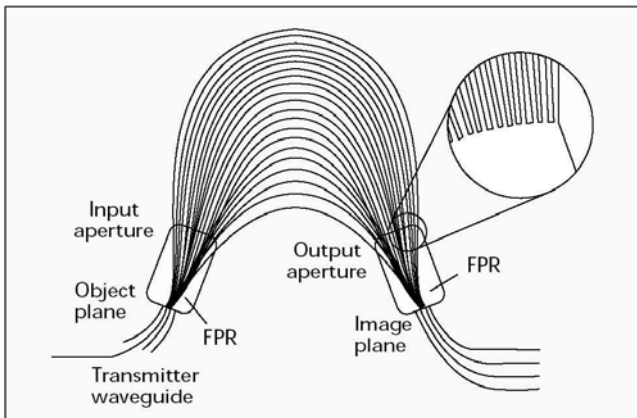
слика 2.26 Нереконфигурирачки упатувач на бранови должини

Упатувачот е нереконфигурирачки затоа што патеката за даден канал (бранова должина), откако тој ќе влезе во упатувачот на дадено влезно влакно, е фиксна. Брановите должини на секое влезно оптичко влакно се раздвојуваат со демултиплексер со решетка (grating demultiplexer; види слика 2.27). На крај, информацијата од повеќето WDM канали се мултиплексираат пред да се испратат на излезното влакно. Помеѓу демултиплексерите и мултиплексерите постои директна врска помеѓу излезите на секој демултиплексер со влезовите на секој мултиплексер. Која бранова должина од која влезна порта ќе биде рутирана на која излезна порта зависи од рутирачката матрица која го карактеризира упатувачот. Оваа матрица е определена со внатрешните "врски" помеѓу мултиплексерите и демултиплексерите.

2.5.2.1.1 Упатувачи со решетка од брановоди

Упатувачот со решетка од брановоди (WGR – Waveguide Grating Router) т.е. со решетка од поле на брановоди (AWG – Array Waveguide Grating), прикажан на слика 2.27 може да се користи како нереконфигурирачки упатувач на бранови должини, или може да се користи за имплементација на

променливи оптички предаватели или променливи оптички приемници. AWG е моќен уред не затоа што нуди функција за демултиплексирање, туку рутирачката можност дозволува сортирање и додавање/вадење на бранови должини, функција која е фундаментална во мрежите со рутирање на бранови должини. Како што се гледа на слика 2.27 AWG се состои од влезни и излезни брановоди, влезна и излезна плоча (т.е. FPR-Free Propagation Region) поврзани помеѓу себе со поле од брановоди.



слика 2.27 Решетка со поле од брановоди – AWG

Принципот на функционирање на AWG вклучува фазни доцнења наметнати од секоја бранова должина во полето на брановоди. Почнувајќи од влезниот брановод, светлината која се состои од различни бранови должини се спрегнува во влезната плоча, каде таа слободно дифрактира во рамнината на плочата. Дивергиралиниот зрак се заробува на крајот од влезната плоча од страна на полето на брановоди, најчесто со инки за да се зголеми ефектот на спрега. Полето од брановоди внесува фазно доцнење во зависност од брановата должина. Тоа се состои од N брановоди, со должини $l_1, l_2, \dots, l_N$ каде $l_1 < l_2 < \dots < l_N$. Разликата во должината помеѓу било кои два соседни

брановоди е константна - Δl . На влезот од втората плоча, фазната разлика во сигналот ќе биде таква што сигналот конструктивно ќе се рекомбинира само на една излезна порта. Треба да се нагласи дека настанува до пермутација на брановите должини во излезните брановоди доколку се користи друг влезен брановод. На пример, доколку демултиплексираниот канал λ_1 се јавува на излезот 1, λ_2 на брановодот 2, и т.н., користењето на друг влезен брановод ќе предизвика $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ да се јават на излезните брановоди 2, 3, 4, ..., N , 1. Два сигнали со иста бранова должина кои доаѓаат од две различни влезни порти нема да интерферираат еден со друг во решетката, бидејќи постои дополнителна фазна разлика која се јавува поради растојанието помеѓу двете влезни порти.

2.5.2.2. Реконфигурирачки комутатор базиран на упатувач на бранови должини

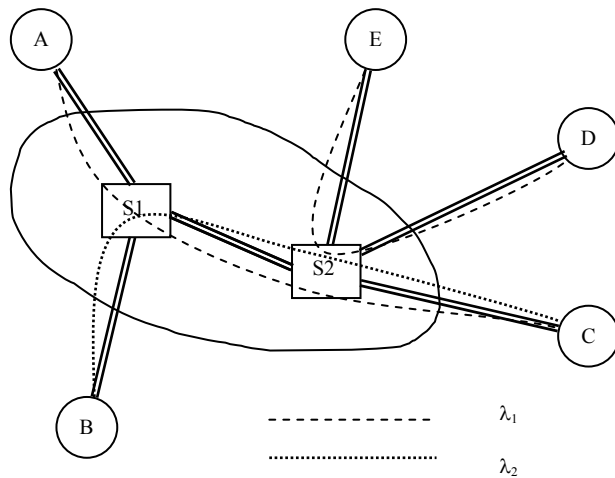
Реконфигурирачкиот комутатор базиран на упатувач на бранови должини (WRS-Wavelength Routing Switch), кој уште се нарекува селективен преспојувач на бранови должини (WSXC-Wavelength Selective Cross-connect), користи фотонски т.е. оптички комутатори внатре во упатувачкиот елемент. Функционирањето на реконфигурирачкиот WRS, илустриран на слика 3.6 е како што следи. WRS има P влезни и P излезни оптички влакна. На секое влезно влакно, има M канали со различни бранови должини. Слично на нереконфигурирачкиот упатувач, брановите должини на секое влезно влакно се раздвојуваат со демултиплексер со решетка.

Излезите од демултиплексерите се насочуваат кон поле од $M \times P$ оптички комутатори кои се сместени помеѓу степенот на демултиплексери и степенот на мултиплексери. Сите сигнали со дадена бранова должина се упатуваат кон ист комутатор. Комутираниите сигнали потоа се насочуваат кон мултиплексерите кои се придружени со дадена излезна порта. Конечно, информациите поворки од повеќето WDM канали се мултиплексираат пред да се испратат на излезното влакно.

Оптичките комутатори со просторна-комутација можат да се изградат од 2×2 оптички кросконекти организирани во банијан-базирана комутациона структура. Комутаторите со просторна комутација можат да го рутираат сигналот од било кој влез на било кој излез на дадена бранова должина. 2×2 кросконектите кои се користат за изградба на комутаторот со просторна-комутација можат да бидат со спора реконфигурација така што можат да се користат при промена на сообраќајните барања. Комутаторите од овој тип можат да се изградат од оптички елементи кои се на располагање на пазарот веќе подолго време.

Мрежите изградени со реконфигурирачки комутатори (упатувачи) се пофлексибилни од пасивните, нереконфигурирачки, мрежи со рутирање на бранови должини, бидејќи тие обезбедуваат дополнителна контрола при воспоставувањето на врските. Рутирањето е функција и од брановата должина избрана во изворишниот јазол, како и конфигурацијата на комутаторите во средишните мрежни јазли.

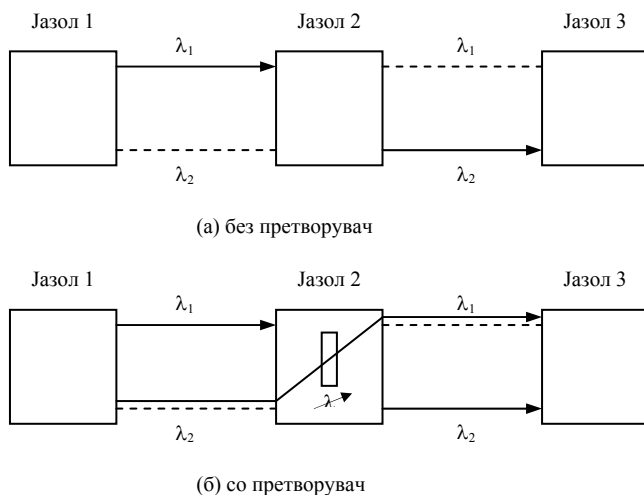
2.6. Претворувачи на бранови должини



слика 2.28 Сè-оптичка мрежа со рутирање на бранови должини

блокираат кога нема доволно капацитет на некој од линковите од патеката која и е доделена на врската.

На слика 2.29а, две светлосни патеки се воспоставени во мрежата, помеѓу јазелот 1 и јазелот 2 на бранова должина λ_1 и помеѓу јазелот 2 и јазелот 3 на бранова должина λ_2 . Да претпоставиме сега дека потребно е да се воспостави патека помеѓу јазелот 1 и јазелот 3. Воспоставувањето на оваа патека е невозможно и покрај тоа што има слободна бранова должина на секој од линковите во патеката од јазелот 1 до јазелот 3. Ова е поради тоа што брановите должини на каналите кои се на



слика 2.29 Ограничување за континуитет на брановите должини во мрежа со рутирање на бранови должини

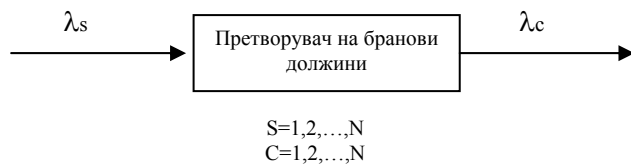
се воспостави нова патека помеѓу јазелот 1 и јазелот 3 со користење на брановата должина λ_2 на линкот 1-2, и потоа со користење на брановата должина λ_1 на линкот 2-3. Треба да се забележи дека една светлосна патека во ваква мрежа со претворување на бранови должини може да користи различна бранова должина на секој од линковите по кои минува. На овој начин, претворувањето на бранови должини може да ја зголеми ефикасноста во мрежата со избегнување на конфликтни бранови должини на светлосните патеки.

Да ја разгледуваме мрежата на слика 2.28. На неа е прикажана мрежа со рутирање на бранови должини која содржи два WDM кросконекти (S1 и S2) и пет оптички линиски терминали (OLT – Optical Line Terminal). Воспоставени се три светлосни патеки (A-C на бранова должина λ_1 , B-C на бранова должина λ_2 и D-E на бранова должина λ_1). За да се воспостави светлосната патека се бара истата бранова должина да биде алоцирана во сите линкови од патеката. Ова барање се нарекува ограничување за континуитет на брановата должина (wavelength continuity constraint). Ова ограничување ја дава основната разлика помеѓу мрежите со рутирање на бранови должини и мрежите со комутација на кола во кои повиците се

располагање во двата линка се различни. Поради ова мрежата со рутирање на бранови должини може да има поголема веројатност на блокада од мрежата со комутација на кола.

Би било лесно да се елиминира ограничувањето за континуитет на бранови должини, доколку сме во состојба да ги претвориме податоците кои доаѓаат на една бранова должина на едниот линк во друга бранова должина во средишниот јазол и да ги проследиме потоа на другиот линк. Ваквата техника е всушност остварлива и се нарекува претворување на бранови должини (wavelength conversion).

На слика 2.29б имплементиран е претворувач на бранови должини во јазолот 2 кој врши претворување од бранова должина λ_2 на бранова должина λ_1 . На овој начин може да



слика 2.30 Функционирање на претворувач на бранови должини

Функцијата на претворувачот на бранови должини е да изврши конверзија на податоците на дадена влезна бранова должина на друга излезна бранова должина од N -те бранови должини кои се користат во линискиот систем (види слика 2.30). На оваа слика и во понатамошното излагање во оваа глава, λ_s ја претставува

брановата должина на влезниот сигнал, λ_c е претворената бранова должина, λ_p е брановата должина на пумпата, f_s фреквенцијата на влезниот сигнал, f_c фреквенцијата на конвертираниот сигнал, f_p фреквенцијата на пумпата и CW е ознака за континуирираниот бран на пумпата (немодулиран носител).

Идеален претворувач на бранови должини треба да ги поседува следниве карактеристики:

- транспарентност на битската брзина и форматот на сигнал,
- брзо воспоставување на излезната бранова должина,
- конверзија на пократки и подолги бранови должини,
- осетливост на средни вредности на снага на влезните сигнали,
- можност за иста влезна и излезна бранова должина (т.е. да нема конверзија),
- неосетливост на поларизацијата на влезниот сигнал,
- голем степен на пригушување (extinction ratio) и голем однос сигнал/шум,
- едноставна имплементација.

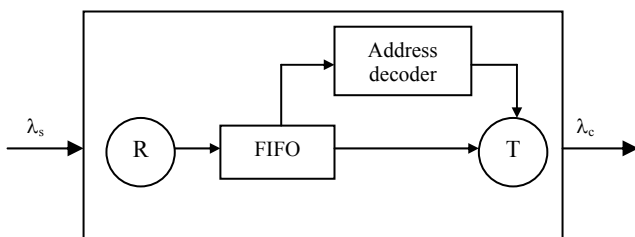
2.6.1. Технологии за претворување на бранови должини

Основна поделба на претворувачите на бранови должини е:

- претворувачи со опто-електрично претворување во кои оптичкиот сигнал мора прво да се претвори во електричен, и
 - сè-оптички претворувачи на бранови должини, кај кои сигналот останува во оптички домен.
- Сè-оптичките претворувачи можат да се поделат на претворувачи кои користат **кохерентен ефект** и претворувачи со **вкрстена модулација (cross-modulation)**.

2.6.1.1. Опто-електронски претворувачи на бранови должини

Во опто-електронските претворувачи на бранови должини, оптичкиот сигнал кој треба да се претвори прво се претвора во електронски домен со користење на фотодетектор (означен со R на слика 2.31).

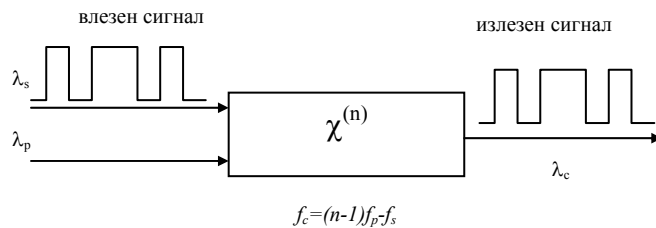


слика 2.31 Опто-електронски претворувач на бранови должини

Електронската бинарна поворка се складира во бафер (FIFO – First In First Out). Таа поворка потоа се користи да го управува влезот на променливиот ласер (означен со T) кој е наместен на саканата бранова должина на излезот. Овој метод на претворување е погоден за бинарни брзини до 10Gb/s. Сепак, овој метод е многу сложен и троши многу повеќе снага од другите методи кои ќе бидат опишани подоцна. Освен тоа, процесот на опто-електронско (О/Е) претворување штетно влијае врз транспарент-

носта на сигналот, бидејќи инсистира оптичките податоци да бидат во точно специфициран формат на модулација и бинарна брзина. Сите информации складираани во фазата, фреквенцијата, и аналогната амплитуда на оптичкиот сигнал се губат во текот на процесот на претворување.

2.6.1.2. Конверзија на бранови должини кои користат кохерентен ефект



слика 2.32 Претворувач на бранови должини базиран на нелинеарниот ефект на мешање на бранови

Методите за конверзија на бранови должини кои користат кохерентни ефекти се типично базирани на ефектот на мешање на бранови (wave-mixing види слика 2.32). Мешањето на бранови настанува од нелинеарниот одзив на оптичкиот медиум кога се присутни повеќе од два брана. Тоа резултира во генерирање на друг бран чиј интензитет е пропорционален на интензитетите на брановите кои се мешаат.

Мешањето на бранови ги задржува информациите за фазата и амплитудата и нуди строга транспарентност. Тоа е исто така единствен пристап кој овозможува истовремена конверзија на множество од влезни бранови должини на друго множество од излезни бранови должини и може да прифати сигнали со битски брзини поголеми од 100Gb/s. На слика 2.32 доколку се избере $n=3$ нелинеарниот ефект се нарекува мешање на четири брана (FWM-Four Wave Mixing), а доколку се избере $n=2$ нелинеарниот ефект се нарекува генерирање на различни фреквенции (DFG- Difference Frequency Generation). Технологиите на претворување на бранови должини базирани на овие два типа на нелинеарни ефекти се опишани подолу.

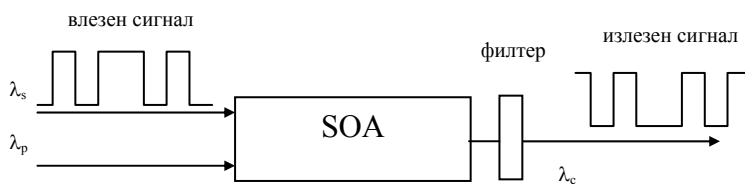
- FWM е нелинеарност од трет ред во SiO_2 оптичките влакна, кој што предизвикува оптички бранови со фреквенции f_i , f_j , и f_k ($k \neq i, j$) да влијаат меѓу себе при што се генерира четврт бран со фреквенција:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$$

Покрај тоа, FWM е остварлив во другите пасивни брановоди како на пример полупроводничките брановоди и во активен медиум како полупроводничките оптички засилувачи – SOA. Оваа техника обезбедува независност од форматот на модулација и од бинарниот проток на влезниот сигнал. Сепак, ефикасноста на конверзија т.е. односот на снагата на сигналот и снагата на пумпата не е многу голема и се намалува нагло со зголемување на интервалот на конверзија (растојанието помеѓу брановата должина на пумпата и излезниот сигнал).

- DFG е последица на нелинеарно влијание на брановите од втор ред во медиум со два оптички брана: бранот на пумпата и бранот на сигналот. DFG нема други пропратни сигнали кои се јавуваат во FWM-базираната техника. Оваа техника нуди целосна транспарентност без додавање на преголем шум на сигналот. Таа е двонасочна и брза, но страда од мала ефикасност и голема чувствителност на поларизација. Главна тешкотија при имплементацијата на оваа техника лежи во синхронизација на фазата на двата брана кои се мешаат и во производството на брановоди со мали губитоци за висока ефикасност на претворување.

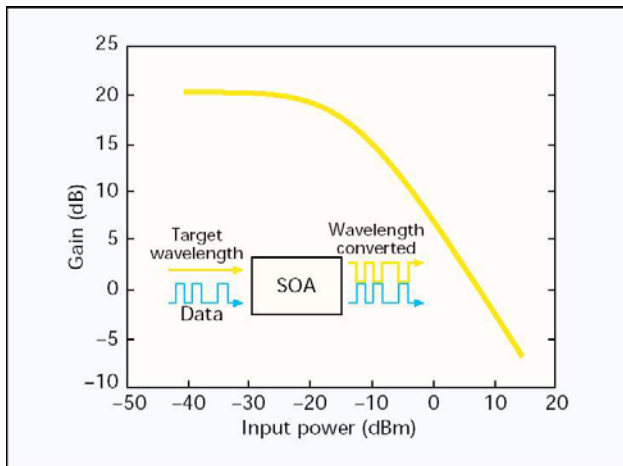
2.6.1.3. Претворувачи на бранови должини кои користат вкрстена модулација



слика 2.33 Претворувач на бранови должини кој користи ко-простирање базиран на XGM во SOA

Конверзијата на бранови должини со вкрстена модулација користи активни полупроводнички оптички уреди како на пример полупроводничките оптички засилувачи (SOA).

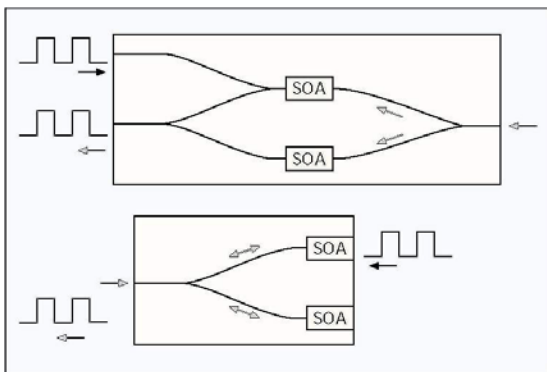
- SOA во мод со вкрстена модулација на засилувањето (XGM – Cross Gain Modulation). Овој принцип на претворување на бранови должини е прикажан на слика 2.33.



слика 2.34 Карактеристика на засилувањето на SOA и принцип на вкрстена модулација кај SOA-XGM претворувачот на бранови должини

модулирано во синхронизам со надминувањето на снагата. Кога сигналот е со високо ниво (бинарна 1), засилувањето се намалува, и обратно. На овој начин излезниот сигнал ќе биде инвертиран во однос на влезниот но на саканата излезна бранова должина т.е. брановата должина на континуирираниот сигнал (CW). CW сигналот може да се вметне во SOA во иста насока како влезниот сигнал (codirectional), или во спротивна насока од влезниот сигнал (counterdirectional). Иако XGM техниката е едноставна за реализација и нуди конверзија на сигнали со бинарен проток од 80Gb/s (од [8]), има недостаток поради инвертираниот излезен сигнал и се јавува деградација на односот на пригушување (extinction ratio) на конвертираниот сигнал.

- Функционирањето на претворувачот на бранови должини кој користи SOA во мод на вкрстена-фазна модулација (XPM) се базира на фактот дека индексот на прекршување на SOA зависи од густината на носители во активниот регион. Влезниот сигнал кој ја смалува густината на носители ќе го модулира индексот на прекршување и на тој начин ќе резултира со фазна модулација на CW сигналот кој е впрегнат во претворувачот. XPM може да се употреби во интерферометарските уреди за да се добијат претворвачи на бранови должини со значителни предности во однос на оние кои се базираат на XGM. Во еден таков уред (види слика 2.35) CW бранот се разгранува низ двете гранки од интерферометарот кои содржат SOA, а релативното фазно поместување се предизвикува од оптичкиот влезен сигнал (со бранова должина λ_s), кој се вметнува во еден од засилувачите, и истиот го заситува. Кога светлината се рекомбинира во излезниот спрежник, настанува конструктивна или деструктивна интерференција зависно од фазната разлика меѓу сигналите од двете гранки. Примери на интерферометарски уреди кои користат XPM ефекти во SOA се прикажани на слика 2.35. Кај овие претворувачи излезниот сигнал може да биде инвертиран или



слика 2.35 Интерферометарски SOA претворувач; Горѐ: MZI; Доле: Michelson интерферометар

неинвертиран. Претворувачите со XPM SOA исто така се многу ефикасни од аспект на мали губитоци на снага во однос претворувачите со XGM технологија.

3. Оптички телекомуникациски мрежи

Во информативната ера се соочуваме со немилосрдно барање на мрежи со големи капацитети, за пониска цена. Ваквите барања се поттикнати од многу различни фактори. Огромниот развој на Интернет донесе се поголем број на online корисници, кои трошат огромно количество на пропусен опсег што се должи на преносот на податоци кој вклучува видео и слики. Освен тоа телефонскиот повик од корисник кој е приклучен на Интернет трае многу подолго од класичен говорен повик, кој резултира во значително зголемување на оптоварувањето кое телефонската мрежа мора да го поддржи. Во исто време бизнисот на модерните компании сè повеќе се базира на зголемено користење на интранет и екстранет кои во суштина претставуваат мрежи со голема брзина. Освен тоа, крајната визија за информативната ера е дека информацијата може да биде лоцирана било каде но да биде пристапна од секаде исто како таа да е сместена локално. За реализација на оваа визија ќе бидат потребни мрежи со огромен капацитет. Сите овие фактори ја зголемуваат потребата за повеќе пропусен опсег во мрежите како и за нови мрежни услуги.

За да ги исполнат барањата за пропусен опсег и да имплементираат нови услуги, мрежните оператори мора да користат нови технологии, а оптичките мрежи се една од клучните технологии. Новите технологии секогаш резултираат во намалување на цената на пропусниот опсег. Ова намалување на цената на пропусниот опсег од друга страна поттикнува развој на нови апликации кои користат сè повеќе пропусен опсег, а со тоа повторно се зголемува барањето за пропусен опсег во мрежата. Ваквиот циклус со позитивна повратна спрега не покажува знаци на намалување во блиска иднина.

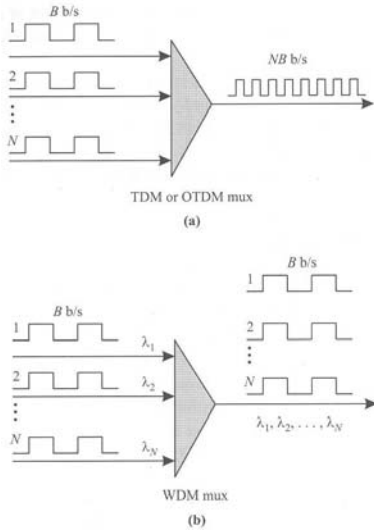
Во исто време додека сме сведоци на огромниот пораст на сообраќај и барања за нови услуги, телекомуникацискиот пазар во светот се дерегулира. Големите телефонски монополи кои во минатото имаа на претек време за планирање на надградбата на мрежата сега се соочуваат со зголемена конкуренција во обезбедувањето на локални, национални и интернационални услуги. Новите оператори активно и брзо градат нови мрежи. Старите оператори мораа брзо да ги имплементираат новите технологии за да останат во конкуренција. Притисокот на конкуренцијата веројатно ќе резултира во значително намалување на цената на пропусниот опсег кон крајните корисници, и во исто време, **ќе ги принуди мрежните оператори да ги користат нивните мрежи поефикасно.**

Се смета дека во САД има положено повеќе од милион километри оптички кабел со различен број на оптички влакна. Во просек повеќе од пола од оптичките влакна се "светли" т.е. влакната се користат, а останатите се "темни" т.е. влакната во моментот не се користат. Конвенционалните технологии (без користење на WDM) зависат од тоа дали постојат темни влакна на саканата рута. Полагање на нови влакна е скапо решение освен ако постои простор во постојната кабелска канализација, во кој случај, е релативно лесно да се повлече дополнителен оптички кабел. Сепак и во случај да постојат темни влакна, значителна економска корист може да се добие со реализирање на поголеми капацитети преку едно оптичко влакно отколку користење на повеќе оптички влакна кои пренесуваат помал капацитет, особено кога се во прашање поголеми растојанија.

3.1. Технологии за мултиплексирање

Зголемените барања за пропусен опсег, како и фактот дека е релативно скапо да се полага ново оптичко влакно т.е кабел, подразбира дека мора да се најде начин да се зголеми капацитетот на постојното влакно. Во суштина постојат два начини за зголемување на трансмисиониот капацитет на оптичкото влакно, како што е прикажано на слика 3.1. Прво е да се зголеми битската брзина, а тоа наметнува користење на електронски компоненти со поголема брзина. Во овој случај повеќе податочни поворки со помала брзина се мултиплексираат во поворка со поголема брзина со користење на електронски компоненти со кои се остварува мултиплексирање со временска

распределба на канали (TDM-Time Division Multiplexing). Денес, највисоката трансмисиона брзина на комерцијално расположивите системи изнесува 40Gb/s (STM-256).



слика 3.1 мултиплексни технологии (а) временска распределба на канали; (б) мултиплексирање на бранови должини

влијаат една на друга доколку тие се доволно далеку една од друга. WDM трасмисиони системи кои користат 32 бранови должини на 2.5 Gb/s преку едно оптичко влакно денес се комерцијално расположиви, а системи со помал број на бранови должини на 10Gb/s се исто така на располагање.

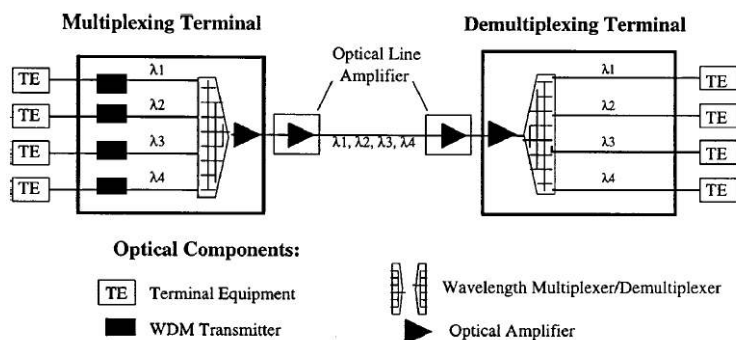
WDM обезбедува начин за зголемување на трасмисиониот капацитет со користење на повеќе канали на различни бранови должини, а TDM обезбедува начин за зголемување на битската брзина на секој канал. Така TDM и WDM се комплементарни пристапи. Прашањето која комбинација на TDM и WDM да се користи во системите е особено важно за денешните мрежни оператори при планирање на нивната мрежа.

За да се помести TDM технологијата над овие брзини, се вршат истражувања за мултиплексирање и демултиплексирање во оптички домен. Овој пристап се нарекува оптичко мултиплексирање со временска распределба на канали (OTDM – Optical Time Division Multiplexing). Иако вакви системи постојат лабораториски, комерцијалната имплементација на OTDM сеуште е неколку години далеку. Сепак, мултиплексирањето и демултиплексирањето на поворки со голема брзина не е единствена пречка за имплементација на практична мрежа. Самото оптичко влакно како медиум не е идеален за пренос и се јавуваат низа штетни влијанија врз сигналот што се пренесува. Тие штетни влијанија се поизразени доколку податочната поворка што се пренесува е со поголема брзина.

Друг начин за зголемување на капацитетот е со користење на техниката наречена мултиплексирање на бранови должини (WDM – Wavelength Division Multiplexing). WDM е во суштина исто како и мултиплексирањето со фреквентна распределба на канали (FDM-Frequency Division Multiplexing), кое се користи во радио системите повеќе од едно столетие. Идејата е да се пренесуваат податоците истовремено на повеќе носители со различни бранови должини (т.е фреквенции) преку едно оптичко влакно. Овие бранови должини не

3.2. WDM еволуција

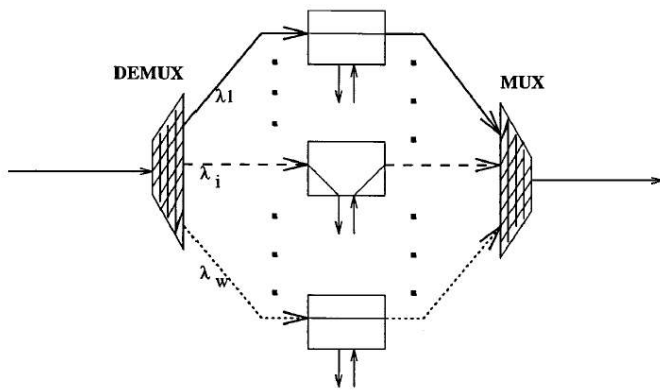
3.2.1. Точка-точка WDM системи



слика 3.2 Четириканален точка-точка WDM трасмисионен систем со засилувачи

негова надградба:

WDM технологијата се имплементира многу често од мрежните оператори за точка-точка комуникации. Оваа имплементација е поттикната од зголемените барања за пропусен опсег. Кога барањата го надминуваат капацитетот на постојните оптички влакна, WDM се покажува како поефтина алтернатива во споредба со полагање на нови оптички влакна. На пример, доколку дојде до исцрпување на капацитетот на некој линк со капацитет од STM-16 (2,5 Gb/s) во мрежата постојат три алтернативи за



слика 3.3 Wavelength Add/Drop multiplexer (WADM)

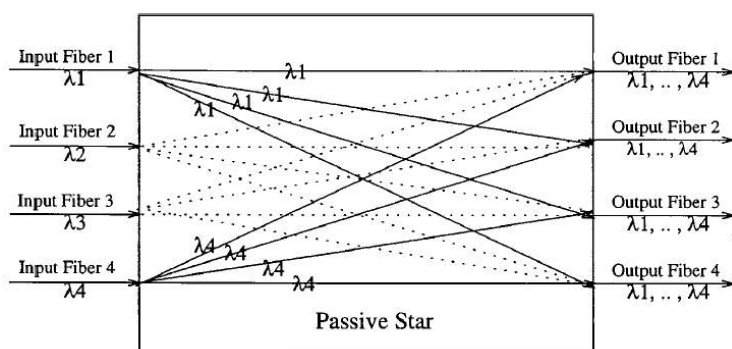
- 1) инсталација/вкопување на дополнителни оптички влакна и терминирачка опрема,
- 2) инсталација на четири¹⁰ канален WDM систем (види слика 3.2),
- 3) надградба на STM-64 (10Gb/s) систем со поголема "електронска брзина".

Досегашните анализи покажуваат дека, за релативно мали растојанија првата варијанта е најевтина, но за поголеми растојанија WDM варијантата е најевтина. Секојдневно цените на WDM мултиплексерите и демултиплексерите опаѓаат па денес може да се смета дека WDM солуцијата е дефинитивно најевтина и најприфатлива.

3.2.2. Мултиплексер за вадење и додавање на бранови должини (WADM – Wavelength Add/Drop Multiplexer)

Еден пример на WADM е прикажан на слика 3.3. Тој се состои од демултиплексер, група од 2x2 оптички комутатори¹¹ и еден мултиплексер. WADM може да биде вметнат во било кој физички оптички линк. Доколку сите 2x2 комутатори се во "bar" состојба, тогаш сите бранови должини минуваат низ WADM мултиплексерот непречено. Ако еден од 2x2 комутаторите е конфигуриран во "cross" состојба¹², тогаш сигналот од соодветната бранова должина ќе биде изваден локално, и нова податочна поворка може да се додаде на истата бранова должина. Повеќе од една бранова должина може да биде извадена и додадена доколку повеќе од 2x2 комутаторите се конфигурирани во "cross" состојба.

3.2.3. Уреди за преспојување на оптички влакна и бранови должини – пасивна свезда, пасивен упатувач и активен комутатор



слика 3.4 4x4 пасивна свезда

Со цел да имаме мрежа со линкови кои имаат повеќе бранови должини, потребно е да се користат соодветни уреди за преспојување на оптички влакна и бранови должини. Овие уреди можат да се поделат во три основни категории:

- пасивна свезда (види слика 3.4),
- пасивен упатувач (види слика 3.5),
- пасивен комутатор (види слика 3.6).

Пасивната свезда претставува уред за дифузија, така што моќта на сигналот кој влегува на дадена бранова должина од влезниот оптички интерфејс ќе биде

еднакво поделена на сите излезни оптички интерфејси. При тоа сигналот ја задржува својата бранова должина.

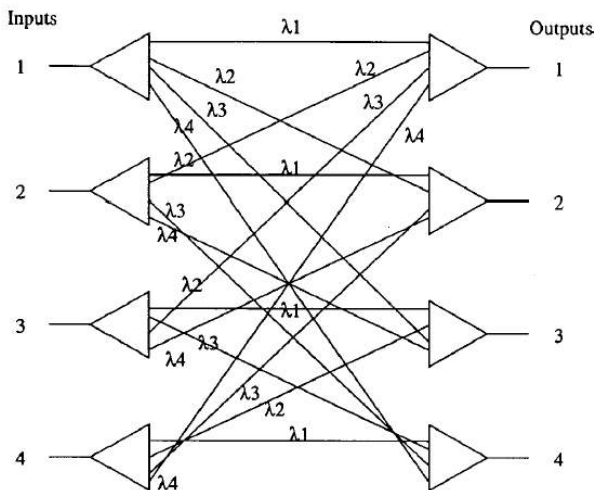
На пример, на слика 3.4 сигналот на бранова должина λ_1 од влезниот интерфејс 1 и брановата должина λ_4 од влезниот интерфејс 4 се дифузираат до сите излезни порти. Доколку два или повеќе

¹⁰ Избрана е најевтината варијанта

¹¹ Еден комутатор по бранова должина.

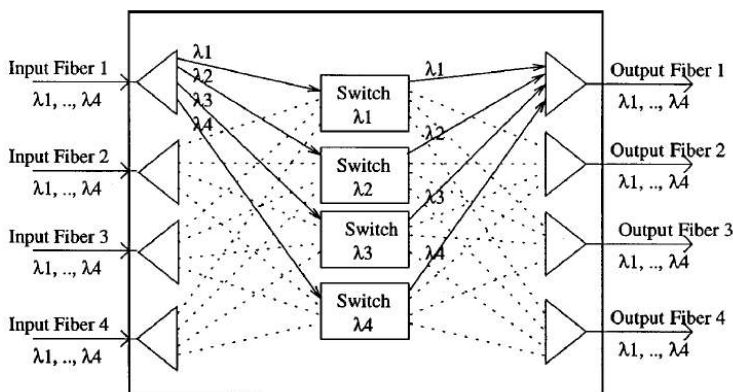
¹² Тоа обично се остварува преку електронска контрола.

сигнали од влезните интерфејси се на иста бранова должина ќе дојде до колизија. Ако се претпостават ист број на бранови должини како бројот на влезни интерфејси, $N \times N$ пасивна свезда може да рутира N истовремени врски.



слика 3.5 4x4 пасивен упатувач (рутер)

Ако се претпостави дека бројот на бранови должини е идентичен со бројот на влезни интерфејси, $N \times N$ пасивен упатувач може да рутира N^2 симултани врски (во споредба со N врски кај пасивната свезда). Сепак на пасивниот упатувач му недостасува својството на дифузија кое го поседува пасивната свезда.



слика 3.6 4x4 активен комутатор

потребно дополнително напојување. Активниот комутатор уште во литературата се среќава под следниве имиња: комутатор за рутирање на бранови должини (WRS-Wavelength Routing Switch), селективен преспојувач на бранови должини (WSXC-Wavelength Selective Cross-connect) или само преспојувач (cross-connect).

Активниот комутатор може да се надгради со дополнителна можност т.е. влезната бранова должина да се претвори во друга бранова должина непосредно пред таа да влезе во мултиплексерот (види слика 3.6) пред излезниот интерфејс. Ваквиот комутатор екипиран со претворувачи на бранови должини е помокен од WRS, и се нарекува комутатор со конверзија на бранови должини (WCS-Wavelength Convertible Switch), преспојувач со разменливи бранови должини (WIXC-Wavelength Interchanging Cross-connect), и др.

Пасивната свезда се користи за изградба на локални WDM мрежи, а активниот комутатор се користи за изградба на 'рбетни национални и глобални мрежи со рутирање на бранови должини. Пасивниот упатувач главно наоѓа примена како уред за мултиплексирање/демултиплексирање. WADM уредот и неговите варијанти се користи за изградба на оптички WDM прстени кои се очекува да се користат во метрополитските региони.

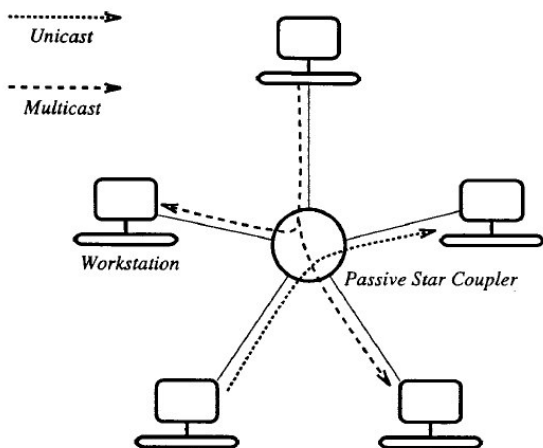
Пасивниот упатувач може независно да ја рутира секоја од неколкуте бранови должини инцидентни на даден влезен интерфејс на иста бранова должина на друг излезен интерфејс, на пример, брановите должини $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ инцидентни на првиот влезен интерфејс се рутираат на истите бранови должини на излезните интерфејси 1, 2, 3, и 4, респективно (види слика 3.5). Треба да се забележи дека овој уред дозволува повеќекратна употреба на бранови должини, т.е. иста бранова должина може просторно да се ре-употреби за пренос на повеќе врски низ упатувачот. Рутирачката матрица е фиксна и не може да се менува. Ваквите упатувачи се расположиви на пазарот веќе извесно време, и се уште познати како упатувачи со решетка од брановоди (WGR-Waveguide Grating Router), упатувачи на бранови должини, и сл.

Активниот комутатор (види слика 3.6) исто така дозволува повеќекратна употреба на бранови должини и тој овозможува N^2 симултани врски низ комутационата матрица. Сепак активниот комутатор поседува дополнително својство во однос на пасивниот упатувач, а тоа е што неговата комутациона матрица може да се реконфигурира на барање, со електронска контрола. Недостаток на активниот комутатор е тоа што е потребно дополнително електрично напојување што го прави поосетлив на дефекти во однос на пасивната свезда и пасивниот упатувач за кои не е

3.3. Конструкција на WDM мрежи

3.3.1. Локални оптички WDM мрежи

Локалните WDM оптички мрежи може да се конструираат со поврзување на мрежните јазли преку две оптички влакна со пасивна свезда, како што е прикажано на слика 3.7. Јазолот испраќа кон свездата на една расположива бранова должина, со користење на ласер кој произведува оптичка информациона поворка. Информационите поворки од повеќе извори оптички се комбинираат од свездата и снагата на сигналот од секоја поворка подеднакво се дели и насочува кон сите јазли на нивните приемни влакна. Приемникот на јазолот, со користење на оптички приемник (филтер), е наместен на само една бранова должина, па затоа тој може да ја прими информационата поворка.

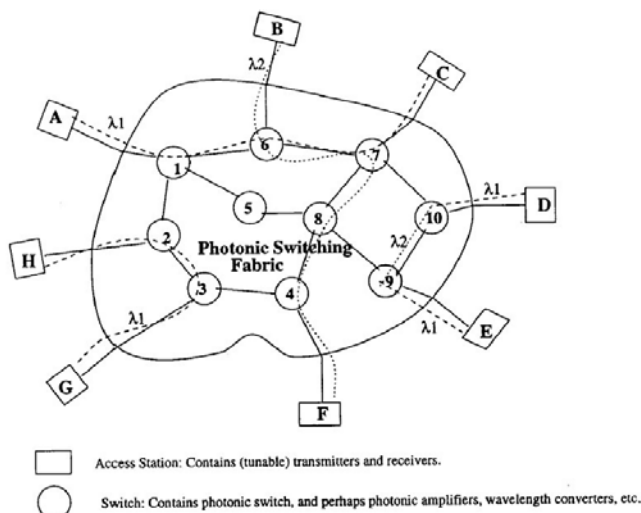


слика 3.7 Локална оптичка WDM мрежа базирана на пасивна свезда

Комуникацијата помеѓу изворите и приемниците може да следи еден од следниве методи: еден скок или повеќе скока (single-hop or multihop види [17]). Исто така, треба да се забележи дека, кога изворот испраќа на дадена брановија должина λ_1 , повеќе од еден приемник може да бидат наместени на таа бранова должина, и сите тие приемници може да ја примат информациската поворка. Според тоа, пасивната свезда може да поддржува точка-повеќе точки (multicast) услуги.

Детална анализа на овие мрежи може да се најде во [17]. Локалните WDM мрежни архитектури нема да бидат дискутирани повеќе во овој труд, туку ќе се концентрираме главно на 'рбетни (wide-area) оптички мрежи со рутирање на бранови должини.

3.3.2. Оптички WDM мрежи со рутирање на бранови должини



слика 3.8 WDM мрежа со рутирање на бранови должини (wide area)

Една оптичка WDM мрежа со рутирање на бранови должини (wavelength-routed wide area optical WDM network) е прикажана на слика 3.8. Мрежата се состои од активни комутатори поврзани преку оптички линкови за да формираат произволна физичка топологија. Секој краен корисник е поврзан на активниот комутатор преку оптичко влакно. Комбинацијата од краен корисник и неговиот придружен комутатор се нарекува мрежен јазол. Секој јазол е екипиран со множество од оптички приемници и предаватели, при што тие можат да бидат променливи.

Базичниот механизам за комуникација во мрежата со рутирање на бранови должини е светлосна патека (lightpath). Светлосна патека е оптички комуникационен канал помеѓу два јазли во мрежата, и тој

може да поминува низ повеќе оптички линкови. Транзитните јазли ја рутираат светлосната патека во оптички домен со користење на активни комутатори. Крајните јазли од светлосната патека пристапуваат до неа преку предаватели и приемници кои се наместени на брановата должина на која

светлосната патека работи. На пример на слика 3.8, воспоставени се светлосни патеки помеѓу А и С на бранова должина λ_1 , помеѓу В и F на бранова должина λ_2 , и помеѓу Н и G на бранова должина λ_1 . Светлосната патека помеѓу А и С е рутирана преку активните комутатори 1,6, и 7. (Треба да се забележи повеќекратната употреба на брановата должина λ_1 .)

Во отсуство на претворувач на бранови должини, од светлосната патека се инсистира да биде на иста бранова должина низ целата рута во мрежата. Ова барање се нарекува континуитет на брановата должина за светлосната патека. Ова барање може да не е потребно доколку имаме претворувачи на бранови должини во мрежата. На пример, на слика 3.8 светлосната патека помеѓу јазлите D и E го минува линкот од D до комутаторот 10 на бранова должина λ_1 , се претвора на бранова должина λ_2 во комутаторот 10, го минува линкот помеѓу комутаторот 10 и 9 на бранова должина λ_2 , се претвора назад во λ_1 во комутаторот 9, и го минува линкот од комутаторот 9 до јазолот E на бранова должина λ_1 .

Мрежите кај кои не користат претворувачи на бранови должини во оптичките уреди за преспојување се нарекуваат **WP (wavelength path) мрежи**. Кај овие мрежи воспоставената патека во мрежата е карактеризирана со нејзината бранова должина.

Мрежите кои имаат претворувачи на бранови должини се нарекуваат **VWP (Virtual Wavelength Paths) мрежи**. Во овој случај, дадена патека може да има различни бранови должини во употребените линкови од рутата.

Фундаментално барање во оптичките мрежи со рутирање на бранови должини е да две или повеќе светлосни патеки кои минуваат низ исто оптичко влакно мора да бидат на различна бранова должина така што тие не интерферираат еден со друг.

3.3.2.1. Пример на WDM мрежен проблем

Како што беше опишано во 3.3.2, крајните корисници во WDM 'рбетна мрежа можат да комуницираат еден со друг преку сè-оптички (WDM) канали, кои се нарекуваат светлосни патеки. Светлосните патеки може да минуваат повеќе оптички линкови, за да се обезбедат интерконекации "со комутација на канали" помеѓу двата јазли кои може да имаат голем сообраќаен проток помеѓу нив и кои може да бидат лоцирани "далеку" еден од друг во физичката мрежна топологија. Секој транзитен јазол во светлосната патека во суштина обезбедува сè-оптичко средство за заобиколување за да се поддржи светлосната патека.

Во мрежа со N јазли, доколку секој јазол е екипиран со N-1 оптички примопредаватели и доколку има доволно бранови должини во секој оптички линк, тогаш секој пар јазли може да се поврзе со сè-оптичка светлосна патека, и тогаш нема мрежен проблем за решавање. Сепак, треба да се забележи дека мрежата треба да е лесно проширлива (додавање на нови јазли), дека примопредавателите се скапи па секој јазол може да биде екипиран со само неколку, и дека технолошките ограничувања диктираат бројот на WDM канали кои можат да се поддржат во оптичкото влакно бидејќи ограничени на W (чија вредност денес изнесува неколку десетици, но се очекува да се подобри со тек на време и со технолошкиот прогрес). Според тоа, само ограничен број на бранови должини можат да се воспостават во мрежата.

Во ваква мрежна околина, предизвикувачки мрежен проблем е за зададено множество на светлосни патеки кои треба да се воспостават во мрежата, и при дадени ограничувања на бројот на бранови должини по линк, да се одредат рутите преку кои овие светлосни патеки треба да се воспостават и исто да се одредат брановите должини кои треба да се доделат на овие светлосни патеки тако што во мрежата може да се воспостави максимален број на светлосни патеки. Додека рутите со најкраток-пат може да бидат најпогодни, треба да се забележи дека овој избор понекогаш мора да се прекрши, со цел да се дозволи воспоставување на поголем број на светлосни патеки. Според тоа, може да се дозволат неколку алтернативни рути за воспоставување на светлосните патеки. Светлосните патеки кои неможат да се воспостават поради ограничувањата на рутите и брановите должини се вели дека се блокирани, па затоа соодветниот проблем за мрежна оптимизација е да се минимизира веројатноста на блокирање.

Во овој поглед, треба да се забележи дека најчесто светлосната патека работи на иста бранова должина низ сите оптички влакна по кои минува (WP мрежа), во кој случај се вели дека светлосната патека го задоволува ограничувањето за континуитет на бранова должина (wavelength-continuity constraint). Со оглед на ова, на две светлосни патеки кои делат заедничко оптичко влакно не треба да им се доделат исти бранови должини. Сепак доколку јазлите се екипирани со претворувач на бранови

должини, тогаш ограничувањето за континуитет на бранова должина не важи, и светлосните патеки може да зафаќаат различни бранови должини во линковите содржани во нивната рута (VWP мрежа). Овој мрежен проблем се нарекува проблем за рутирање и доделување на бранови должини (RWA - Routing and Wavelength Assignment) и ќе биде детално анализиран во наредните глави (види глава 7 и 6.2).

Дизајнерите на оптичките мрежи од новата генерација мора да се свесни за својствата и ограничувањата на оптичкото влакно и оптичките компоненти со цел соодветните протоколи и алгоритми да ги искористат сите потенцијали на WDM мрежата. Често мрежниот дизајнер може да пристапи на WDM архитектурата и протоколи од премногу едноставна, идеална, или традиционална мрежна гледна точка. За жал, ова може да го доведе дизајнерот во ситуација да направи нереалистички претпоставки за својствата на оптичкото влакно и оптичките компоненти, и тоа може да резултира во неосвојлив или непрактичен дизајн.

