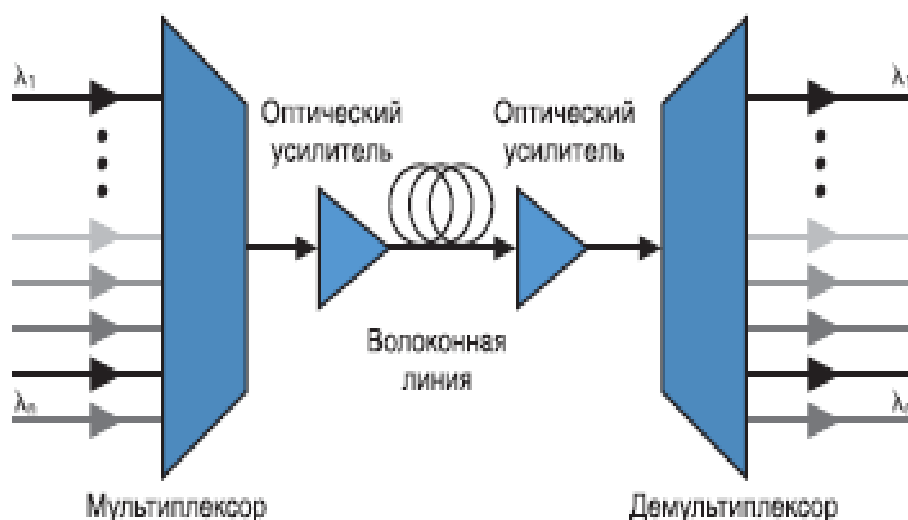


**С.Н. Шарангович**

**МУЛЬТИПЛЕКСОРНОЕ И  
УСИЛИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
МНОГОВОЛНОВЫХ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ**



**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

---

**С.Н. Шарангович**

**МУЛЬТИПЛЕКСОРНОЕ  
И УСИЛИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
МНОГОВОЛНОВЫХ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ**

**Учебное методическое пособие**

**Томск  
ТУСУР  
2011**

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]

*Рецензенты:*

**Горлов Н.И.**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. линий связи  
Сибирского гос. ун-та телекоммуникаций и информатики;

**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф. каф.  
квантовой электроники и оптоинформатики Том. гос. ун-та.

**Шарангович С.Н.**

Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых волоконно-оптических систем передачи: учеб. метод. пособие для студентов заочной формы обучения . – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 92 с.

Излагаются принципы оптического мультиплексирования и усиления в многоволновых волоконно-оптических системах передачи. Рассматриваются основы построения мультиплексоров на интерференционных, дифракционных и волноводных структурах, оптических усилителей. Представлены методические материалы по расчету и компьютерному моделированию оптических мультиплексоров на интерференционных и Фабри-Перо фильтрах. Даны описания руководств по компьютерному моделированию оптических мультиплексоров и примеры выполнения расчетных работ.

Предназначено для студентов заочной формы технических вузов, обучающихся по направлению «Телекоммуникации» специальности «Физика и техника оптической связи» по курсу «Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи».

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]  
ББК

ISBN

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011  
© Шарангович С.Н. 2011

# Оглавление

Введение .....	5
<b>1. Многоволновые волоконно-оптические системы передачи .....</b>	<b>6</b>
1.1. Структура многоволновых ВОСП .....	6
1.2. Частотный план ITU-T .....	8
1.3. Оптические усилители .....	10
1.4. Оптические мультиплексоры .....	26
1.5. Характеристики оборудования ВОСП .....	37
<b>2. Мультиплексоры на интерференционных фильтрах .....</b>	<b>43</b>
2.1. Принцип действия и структура мультиплексора .....	43
2.2. Математическая модель .....	46
2.3. Расчет основных оценочных характеристик .....	48
<b>3. Мультиплексоры на фильтрах Фабри –Перо .....</b>	<b>52</b>
3.1. Принцип действия и структура мультиплексора .....	52
3.2. Математическая модель .....	53
3.3. Расчет основных оценочных характеристик .....	53
<b>4. Рекомендации по выполнению расчетных работ .....</b>	<b>56</b>
4.1. Расчётное задание .....	56
4.2. Компьютерное моделирование .....	57
<b>5. Описание программы компьютерного моделирования .....</b>	<b>61</b>
5.1. Общее описание .....	63
5.2. Работа с программой .....	64
5.3. Моделирование демультимплексора .....	65
5.4. Расчёт переходных помех .....	67
<b>6. Примеры выполнения расчетных работ .....</b>	<b>70</b>
6.1. Расчет демультимплексора на интерференционных фильтрах .....	70
6.3. Расчет демультимплексора на фильтрах Фабри –Перо .....	77
<b>Список литературы.....</b>	<b>84</b>
<b>Приложение А Частотный план ITU-T.....</b>	<b>85</b>
<b>Приложение Б Технические требования 45.286-2002.....</b>	<b>89</b>
<b>Список основных сокращений и обозначений .....</b>	<b>92</b>

## **Введение**

Технология волнового оптического мультиплексирования (WDM/ DWDM) позволяет осуществить передачу информации терабитных объемов со скоростями, достигающими 100 Гбит/сек, и в настоящее время широко внедряется от глобальных до локальных оптических сетей связи. Возможность передачи большого количества информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) связана с использованием технологии спектрального уплотнения, где передача информации по волокну ведется одновременно на разных длинах волн. При этом введение информационных оптических сигналов с различающимися длинами волн в ВОЛС осуществляется с помощью оптических мультиплексоров (MUX) на передаче, а выведение на приеме — при помощи демультиплексоров (DMUX). Необходимым элементом мультиплексорного оборудования WDM-систем являются оптические усилители. В настоящее время телекоммуникационное оборудование WDM-систем включает широкий спектр усилительного и мультиплексорного оборудования, представленного на рынке. Однако в известной технической и учебной литературе [1-5] вопросы, в полной мере охватывающие физические принципы построения, методы расчета и моделирования характеристик WDM-мультиплексоров и многоволновых усилителей, освещены недостаточно.

В данном учебном методическом пособии представлены материалы по самостоятельному изучению и выполнению расчетных заданий студентами заочной формы обучения, которые дополняют материалы теоретической части [7] и лабораторного практикума [8] курса «Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи».

Первый раздел пособия посвящен изложению общих принципов оптического мультиплексирования и усиления в многоволновых волоконно-оптических системах передачи. Во-втором и третьем разделах рассматриваются основы построения и расчета мультиплексоров на интерференционных и Фабри-Перо фильтрах. В четвертом разделе представлены задания и описаны методические рекомендации по выполнению расчетных заданий, основанные на компьютерном моделировании. В пятом разделе изложены методические материалы по компьютерному моделированию оптических мультиплексоров. В шестом разделе представлены примеры выполнения расчетных работ.

Изучение принципов работы оптических AWG мультиплексоров и многоволновых оптических усилителей в рамках учебного плана заочной формы обучения вынесено на компьютерный лабораторный практикум [2].

Пособие предназначено для студентов заочной формы обучения технических вузов старших курсов, обучающихся по специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» направления подготовки 210400 «Телекоммуникации».

# 1. МНОГОВОЛНОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

## 1.1. Структура многоволновых ВОСП

Волоконно-оптической системой передачи (ВОСП) называется совокупность оптических устройств и оптических линий передачи для создания, обработки и передачи оптических сигналов. При этом оптическим сигналом служит модулированное оптическое излучение лазера или светодиода [1-5].

Один из наиболее перспективных методов увеличения коэффициента использования пропускной способности оптического волокна — спектральное уплотнение, или WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть метода состоит в том, что  $m$  информационных цифровых потоков, переносимых каждый на своей оптической несущей на длине волны  $\lambda_m$  и разнесенных в пространстве с помощью специальных устройств — оптических мультиплексоров (MUX) — объединяются в один оптический поток  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ , который вводится в оптическое линейное волокно, входящее в состав оптического кабеля [7]. На приемной стороне производится обратная операция демультиплексирования (DMUX).

Структурная схема ВОСП-WDM, соответствующая рекомендации G.692 МСЭ-Т, приведена на рис. 1.1 [5].

Как видно из рис. 1.1, структурная схема ВОСП-WDM содержит оптический передатчик (TX), оптический приемник (RX) и главный оптический тракт (OP).

Оптический передатчик содержит каналные приемопередатчики (транспондеры)  $Tx_i \div Tx_n$ , которые, в частности, преобразуют длину волны STM-N (или ATM)  $\lambda_0$  в длины волн спектра каналов  $\lambda_i$ . На выходе  $Tx_j$  образуется каналный сигнал, спектр которого соответствует скорости передачи STM-N. Канальные сигналы, а, следовательно, и их спектры объединяются с помощью оптического мультиплексора (OM), на выходе которого образуется групповой сигнал, спектр которого содержит суммарный спектр канальных сигналов:

$$\Delta f_{гс} = \Delta f_{кс} + (n-1) \Delta f_{нчр},$$

где  $\Delta f_{гс}$  — спектр группового сигнала;  $\Delta f_{кс}$  — спектр канального сигнала;  $\Delta f_{нчр}$  — номинальное частотное разнесение каналов (НЧР).

Групповой сигнал усиливается конечным оптическим усилителем ВОА (бустер), с помощью которого в интерфейсе MPI-S устанавливается необходимая общая средняя мощность линейного сигнала  $P_{лс}$ .

Главный оптический тракт (OP) содержит линейные оптические усилители (LOA), компенсирующие затухание, вносимое участками оптических волокон длиной  $l_1 - l_k$ . Вместо любого из усилителей может быть включен мультиплексор ввода/вывода каналов OADM с такими же интерфейсами R' и S', как и у оптического усилителя.

Приемник (RX) содержит предварительный оптический усилитель (POA), усиливающий линейный сигнал, демультиплексор (DM), разделяющий группо-

вой сигнал на каналные сигналы, приемные транспондеры  $Rx_j$ , преобразующие длины волн  $\lambda_i$ , в длину волны  $\lambda_0$ , соответствующую STM-N или ATM.

Оптический служебный канал (OSC) организуется на длине волны, лежащей вне диапазона спектра WDM. OSC вводится и выводится как в оптических передатчике и приемнике, так и линейных усилителях, и мультиплексорах ввода/вывода (OADM) оптического тракта.

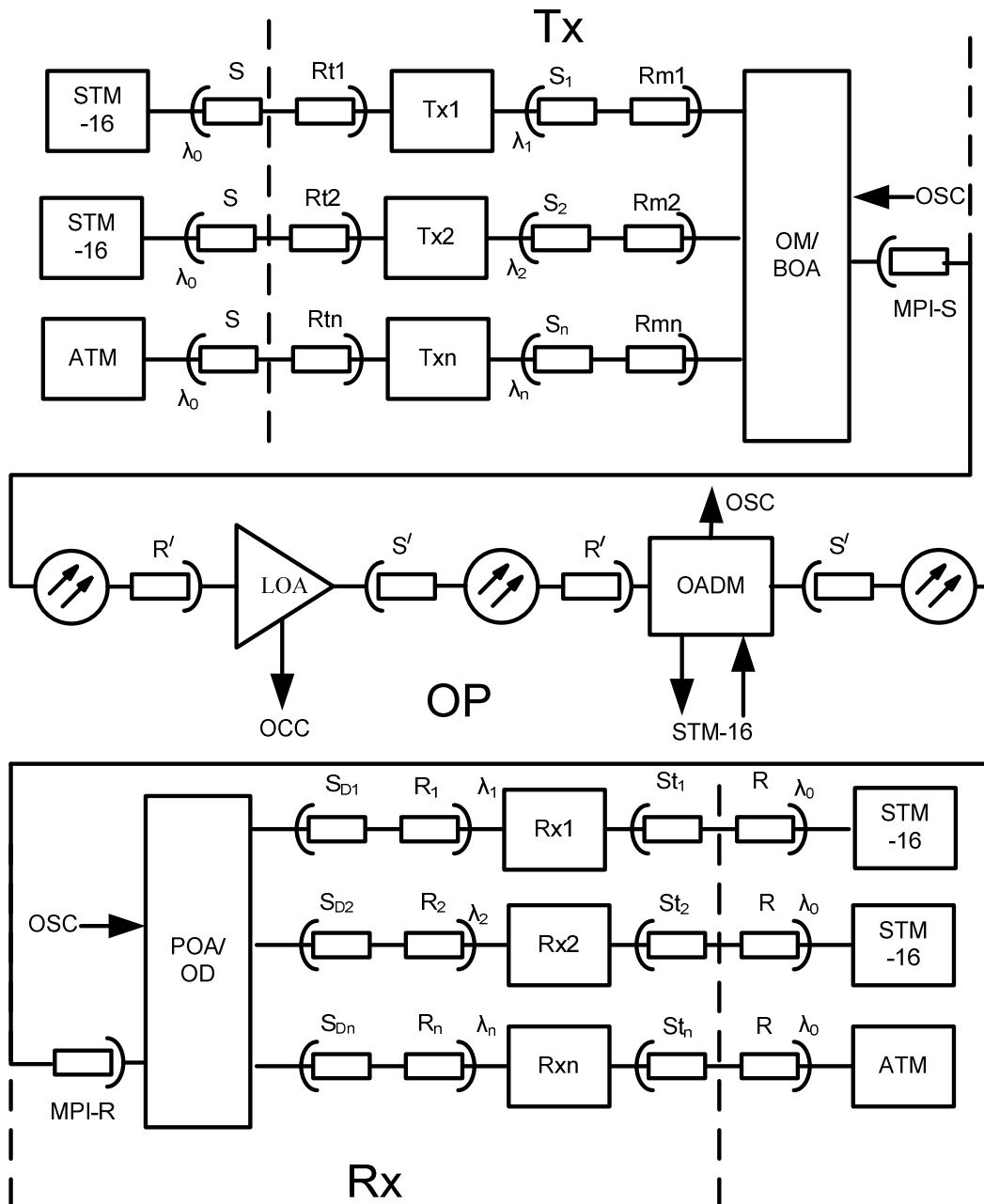


Рис. 1.1 — Структурная схема волоконно-оптической системы связи со спектральным уплотнением каналов [4]:  
 — оптические соединители  
 На рисунке:

$Tx_j$  и  $Rx_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) — передающие и приемные транспондеры (приемопередатчики) каждого канала  $N$ -канальной ВОСП-WDM;  
 OM — оптический мультиплексор;  
 OA — оптический усилитель;  
 OD — оптический демультиплексор;  
 $R_{Ti}$  — контрольные точки (интерфейсы) на входе передающих транспондеров;  
 $S_{Ti}$  — контрольные точки на выходах приемных транспондеров;  
 $S_i$  — контрольные точки на ОВ, на выходах оптических соединителей (ОС) передающих транспондеров, соответственно для каналов  $i$ ;  
 $R_{Mi}$  — контрольные точки на ОВ непосредственно перед блоком OM/BOA, на входе ОС, соответственно для каналов  $i$ ;  
 MPI-S — контрольная точка (интерфейс) на ОВ сразу после блока OM/BOA на выходе ОС;  
 $S'$  — контрольная точка сразу после линейного оптического усилителя LOA на выходе ОС;  
 $R'$  — контрольная точка на ОВ перед линейным оптическим усилителем, на входе ОС;  
 MPI-R — контрольная точка (интерфейс) на ОВ перед оптическим усилителем POA на входе оптического демодулятора (OD), на входе ОС;  
 $S_{Di}$  — контрольные точки на выходе блока OA/OD, на выходе ОС;  
 OSC — точки подключения оптического служебного канала;  
 OADM — мультиплексор ввода-вывода оптических каналов;  
 $S, R$  — интерфейсы на выходе передатчиков и входе приемников аппаратуры STM-N (обычно  $N=16$ , либо 64), или ATM.

## 1.2. Частотный план ITU-T

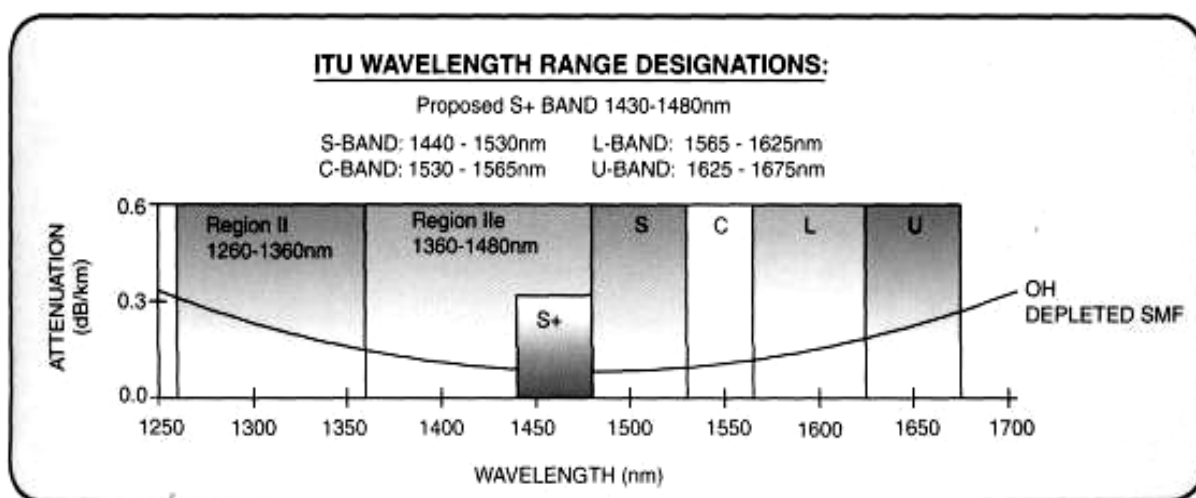
Оптические параметры систем WDM регламентируются рекомендациями G.692, в которых определены длины волн и оптические частоты для каждого канала. Согласно этим рекомендациям, многоволновые системы передачи работают в 3-м окне прозрачности ОВ, т.е. в диапазоне длин волн 1530...1565 нм. Для этого установлен стандарт длин волн, представляющий собой сетку оптических частот, в которой расписаны регламентированные значения оптических частот 196,1 ТГц до 192,1 ТГц с интервалами 100 ГГц и длины волн от 1528,77 до 1560,61 нм с интервалом 0,8 нм. Однако в последнее время установилась четкая тенденция уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50и даже 25 ГГц, что приводит к более плотному расположению спектральных каналов в отведенном диапазоне длин волн (1530...1565 нм). Такое уплотнение получило название плотного волнового уплотнения, или DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Грубое спектральное уплотнение (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) характеризуется тем, что расстояние между со-



седними каналами равно 20 нм (в некоторых случаях 25 нм). Сравнительная характеристика технологий спектрального уплотнения (СУ) представлена ниже.

	<b>CWDM</b> Грубое СУ	<b>DWDM</b> Плотное СУ	<b>HWDM, СУ</b> вы- сокой плотности
Разнос длин волн (частот) каналов	20 нм или 25 нм	< 1,6 нм (200, 100, 50 ГГц)	< 0,4 нм (25, 12,5 ГГц)
Используемые диапазоны	O,E,S,C и L	S,C и L	C и L
Типичное число каналов	18 максимум	Десятки каналов (несколько сотен)	сотни каналов
Стоимость канала	Низкая	Высокая	Высокая

В соответствии с рекомендацией ITU-T G.692.2 здесь использованы обозначения спектральных диапазонов : O – начальный , первичный (Original, 1250-1360 нм); E – расширенный (Extended, 1360-1450 нм); S – коротковолновый (Short wavelength, 146—1530 нм); C – обычный, стандартный (Conventional, 1530-1570 нм); L – длинноволновый (Long wavelength, 1570-1625 нм).



Частотный план стандартизованный ITU-T.

Частотные планы ITU-T WDM ( рек. МСЭ-Т G.692, DWDM (рек. МСЭ-Т G.694.1) и CWDM (рек. МСЭ-Т G.694.2) приведены в табл.1,2 и 3 Приложения А.

### 1.3. Оптические усилители

#### 1.3.1. Классификация по способу применения и физическим принципам работы

В зависимости от области использования оптические усилители делятся на предварительные, линейные и усилители мощности (рис. 1.2) [1-5].

**Предварительные усилители** (предусилители) устанавливаются непосредственно перед приемником регенератора и способствуют увеличению отношения сигнал/шум на выходе электронного каскада усиления в оптоэлектронном приемнике. Оптические предусилители часто используются в качестве замены дорогих когерентных оптических приемников.

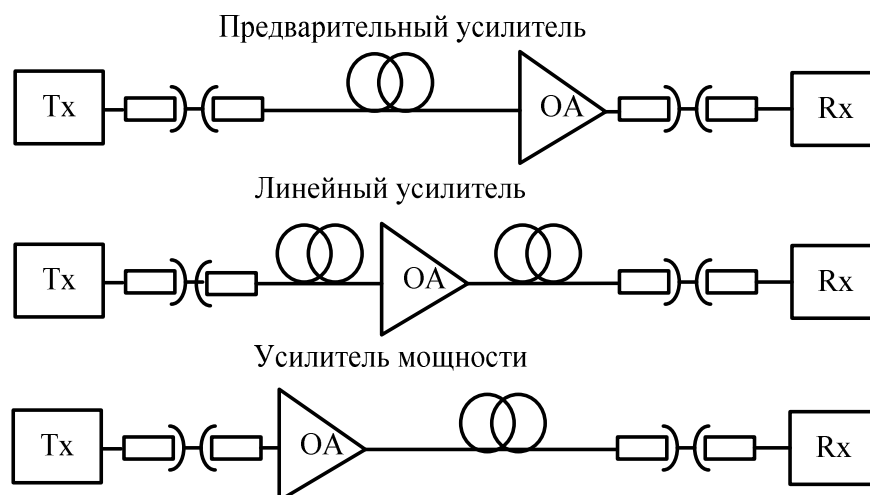


Рис. 1.2 — Применение оптических усилителей

**Линейные усилители** устанавливаются в протяженных линиях связи между регенераторами или на выходе оптических разветвителей с целью компенсации ослабления сигнала, происходящего ввиду затухания в оптическом волокне или в оптических разветвителях, ответвителях и мультиплексорах WDM. Линейные усилители заменяют оптоэлектронные регенераторы, когда нет необходимости в точном восстановлении сигнала.

**Усилители мощности** (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков для дополнительного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода. Бустеры могут также устанавливаться перед оптическим разветвителем, например при передаче нисходящего трафика в гибридных волоконно-коаксиальных сетях кабельного телевидения.

В табл. 1.1 указана степень значимости параметров EDFA в зависимости от типа усилителя.

Усиление света в оптических системах осуществляется за счет энергии внешнего источника. Основой усилителя является активная физическая среда, в которой за счет энергии стороннего источника подкачки происходит увеличение мощности излучения информационного сигнала. В качестве активной среды применяются полупроводниковые среды или волокно, допированное различными примесями. В качестве примесей чаще всего встречаются редкоземельные металлы: эрбий (Er), неодим (Nd), празеодим (Pr) и тулий (Tm). Накачка этих сред осуществляется непрерывно или импульсно. При усилении может происходить преобразование спектра входного сигнала, т.е. выходной сигнал может быть смещен в частотном диапазоне.

К оптическим усилителям предъявляется ряд требований:

- высокий коэффициент усиления в заданном диапазоне оптических частот;
- малые собственные шумы;
- нечувствительность к поляризации;
- хорошее согласование с волокном;
- минимальные нелинейные и линейные искажения оптических сигналов;
- большой динамический диапазон входных сигналов;
- широкая полоса усиления для ВОСП-СР;

Этим требованиям в наибольшей степени отвечают полупроводниковые и волоконные усилители, настроенные на стандартные три окна прозрачности волокна: 0,85; 1,31 и 1,55 мкм..

Таблица 1.1

Сравнительный анализ параметров трех типов ОА

Параметр	Предусилитель	Линейный усилитель	Усилитель мощности
Коэффициент усиления $G$	высокий *	средний	низкий
Коэффициент шума $NF$	низкий	средний *	низкий
Мощность насыщения $P_{out\ sat}$	низкая	средняя	высокая *
Нелинейность **	низкая	низкая	низкая
Полоса усиления	узкая	широкая	широкая

\* — указан наиболее значимый параметр;

\*\* — нелинейность охватывает совокупность характеристик: зависимость  $G$  от  $P_{in}$ , поляризационную чувствительность, поперечные помехи между каналами.

Существуют три основных типа оптического усилителя, используемые в ВОСП-СР: полупроводниковые усилители, усилители на допированном волокне и рамановские усилители (рис. 1.3). В отличие от остальных оптических усилителей полупроводниковые усилители могут быть спроектированы для любой длины волны, где работают лазеры в составе передающих оптических модулей.

### 1.3.2. Полупроводниковые оптические усилители

Полупроводниковые усилители (OSA — Optical Semiconductor Amplifier) работают на основе хорошо известных принципов полупроводниковых лазерных диодов и осуществляются, как правило, по двум схемам:

– резонансные усилители, в которых эффект усиления и отсутствие лазерной генерации обеспечивается за счет того, что уровень постоянного тока накачки в рабочем режиме выбирается ниже порогового значения;

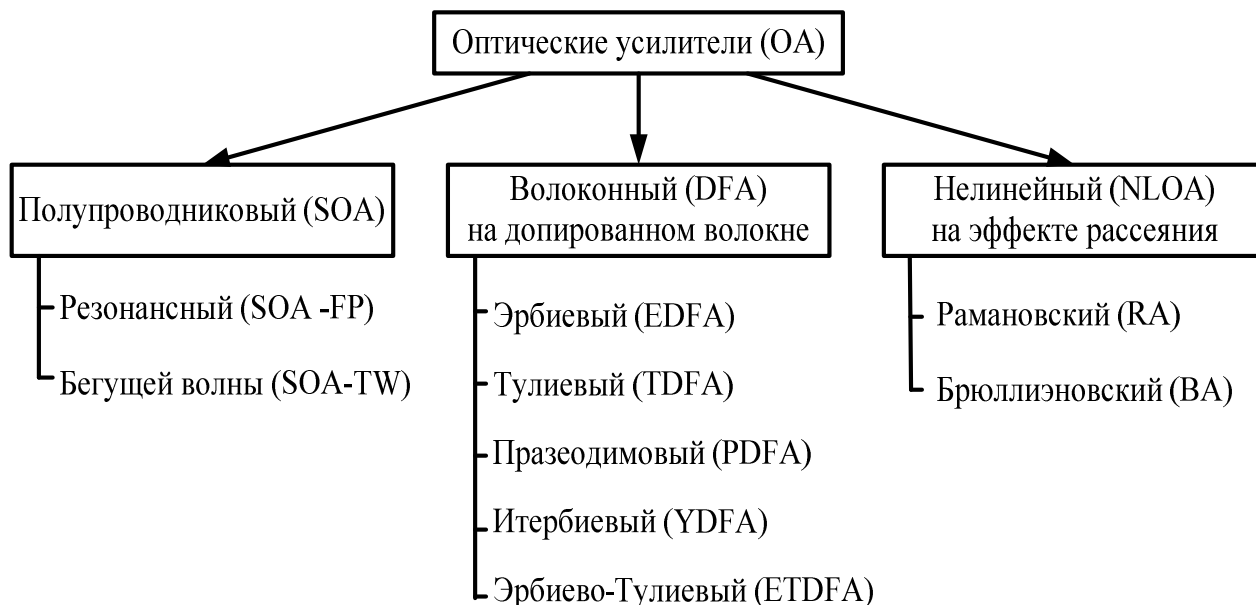


Рис. 1.3 — Классификация оптических усилителей

– усилители бегущей волны, в которых эффект оптического усиления наблюдается при распространении входного излучения в инверсной среде активного слоя с просветленными гранями.

Возбуждение в обоих типах OSA достигается внешней электрической накачкой.

**OSA с резонатором Фабри — Перо (OSA-FP)** являются разновидностью резонансных OSA. OSA-FP состоит из усиливающей среды, заключенной в плоский резонатор с зеркальными полупрозрачными стенками. OSA-FP обеспечивают высокий коэффициент усиления (до 25 дБ) в очень узком (1,5 ГГц), но широко перестраиваемом (800 ГГц) спектральном диапазоне (рис. 1.4,а). Кроме этого, эти устройства не чувствительны к поляризации сигнала и характеризуются сильным подавлением боковых составляющих (ослабление на 20 дБ за пределами интервала в 5 ГГц). В силу своих характеристик, усилители Фабри — Перо идеально подходят для работы в качестве демультимплексоров, поскольку они могут всегда быть перестроены для усиления одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM-сигнала.

**Усилитель бегущей волны (OSA-TW)** — полупроводниковый усилитель, ограничивающие поверхности которого покрыты антиотражающим покрытием (рис. 1.4,б). В последнее время OSA-TW стал доминировать в группе OSA.

OSA-TW состоит из центральной активной секции около 600 и двух пассивных секций по 100 мкм длиной. Центральный слой представляет собой раздельную удерживающую гетероструктуру и состоит из объемного активного слоя толщиной 0,2 мкм, заключенного между двух четвертьволновых слоев по 0,1 мкм. Активный слой сужается на длине 150 мкм, что обеспечивает оптическое согласование с основным пассивным волноводом.

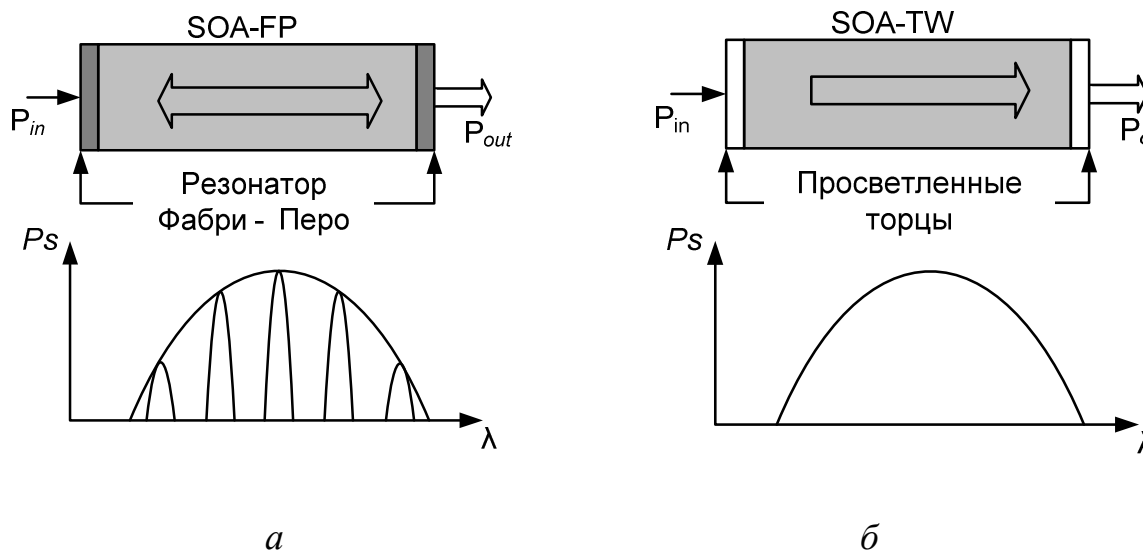


Рис. 1.4 — Схемы построения полупроводниковых усилителей

Такой тип структуры обеспечивает высокий коэффициент локализации вследствие разницы между показателями преломления слоев в широкой области и увеличенный точечный размер на торцах для увеличения коэффициента согласования с волокном.

Усилители бегущей волны могут быть реализованы с достаточно большим коэффициентом усиления (около 30 дБ) и широкой полосой (около 5–10 ТГц). Для этого необходимо подавление возможных отражений фотонов от торцов (отражение менее 0,1 %). Для дополнительного снижения коэффициента отражения используют наклонный активный слой или дополнительные грани.

Полупроводниковые усилители имеют ряд недостатков, которые делают их использование непрактичным в качестве линейного усилителя. Среди этих недостатков можно отметить чувствительность к поляризации, большие потери при вводе в волокно, переходные помехи между каналами.

Первый недостаток является очень существенным, т.к. коэффициент усиления OSA в зависимости от направления поляризации может отличаться на 4–8 дБ для двух ортогональных поляризаций. Так как в стандартном одномодовом волокне поляризация распространяемого светового сигнала не контролируется, поэтому коэффициент усиления OSA зависит от неконтролируемого фактора. Можно уменьшить эту зависимость от поляризации путем установки двух OSA. Возможно как параллельное (требуется пара разветвителей), так и последовательное их подключение, но это приводит к усложнению конструкции и росту стоимости конечного продукта.

Второй недостаток OSA обусловлен тем, что светоизлучающий активный слой имеет поперечный размер несколько микрон, а толщину — в пределах одного микрона, что много меньше, чем диаметр светонесущей части оптического одномодового волокна (8–10 мкм). Вследствие этого большая часть светового потока из входящего волокна не попадает в активную область и

теряется, что уменьшает КПД усилителя. Увеличить КПД можно, поставив между входящим волокном и активной средой линзу, что приводит к усложнению конструкции.

Два приведенных недостатка нивелируются в тех случаях, когда OSA интегрирован с другими оптическими устройствами. Именно так преимущественно и используются OSA. Одна из возможностей интеграции — производство совмещенного светоизлучающего лазерного диода, непосредственно на выходе которого устанавливается OSA.

В табл. 1.2 приведены типовые параметры OSA .

Таблица 1.2

Типовые параметры OSA

Параметры	Окна прозрачности, мкм					
	0,82–0,85		1,28–1,33		1,53–1,56	
	Химическое соединение					
	AlGaAs/GaAs		InGaAsP/InP		AlGaAsPSb/GaSb	
Назначение усилителя	предв-ный	мощ-ности	предв-ный	мощ-ности	предв-ный	мощ-ности
Коэффициент усиления, дБм	35–40	10–15	33	12–16	20–27	10–12
Полоса частот усиления, ТГц	200–250	200–250	60–90	60–90	30–50	30–50
Мощность накачки, мВт	100–150	100–150	45–50	80–150	50–70	80–200
Ток накачки, мА	–	–	80–400	–	80–400	80–400
Потребляемая мощность, Вт	1,5	1,5	1,5	2,5	1,5	

OSA могут использоваться во всех трех схемах применения (см. рис. 1.2). Одним из главных преимуществ OSA перед EDFA является возможность их работы во всех трех окнах прозрачности кварцевого волокна.

Когда OSA используется в качестве предусилителя, выходной уровень сигнала, подаваемый на оптический приемник, оказывается таким большим, что характеристики приемника ограничиваются уровнем дробового шума. Относительно высокий коэффициент шума (порядка 5–7 дБ) типового OSA делает его использование в качестве предусилителя нежелательным. Но даже в этом случае OSA могут значительно улучшить чувствительность приемника.

Если OSA используется в качестве усилителя мощности, его выходная мощность ограничена обычно на уровне 10 мВт. Это объясняется его относительно малой (примерно 5 мВт) выходной мощностью насыщения.

### 1.3.3. Усилители на допированном волокне

История усилителей на допированном волокне (DFA — Doped Fiber Amplifier) восходит к 1960 годам, когда впервые был продемонстриро-

ван оптический усилитель на стеклянном волокне с покрытием из ниодима с рабочей длиной волны 1,06 мкм. По прошествии ряда лет было выполнено объединение физических принципов, положенных в основу работы одномодового стеклянного волокна и полупроводникового лазера, и создавались условия для появления DFA на 1,55 мкм в 1987 г. .

Как видно из названия усилитель на допированном волокне основан, на оптическом волокне с примесью редкоземельного материала, в основном эрбия Er. Длина допированного волокна, как правило, колеблется от 20 до 100 м. DFA получили наибольшее распространение в ВОСП-СП. Это связано с рядом их неоспоримых достоинств по сравнению с остальными ОА:

- простотой конструкции;
- высокой надежностью;
- большими коэффициентами усиления;
- малыми шумами;
- широкой полосой усиления;
- нечувствительностью к поляризации усиливаемого сигнала и т.д.

Принцип действия DFA основан на эффекте возбуждения посредством внешней накачки атомов редкоземельного материала, помещенных в сердцевину обычного одномодового стекловолокна. Редкоземельные металлы выбраны таким образом, чтобы имелись зоны поглощения внешней энергии и создавалась инверсная населенность, которая приводит к спонтанной и вынужденной люминесценции. При этом вынужденное свечение обусловлено входным сигналом и совпадает с ним по длине волны.

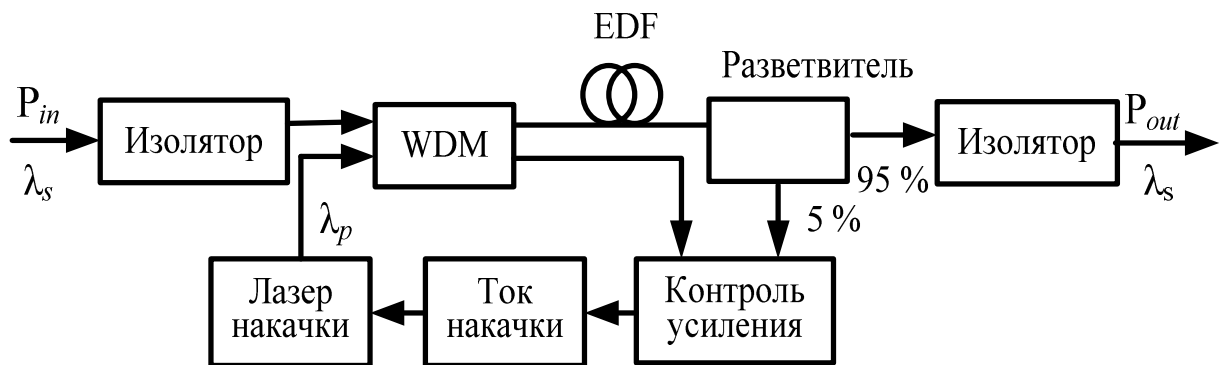


Рис. 1.5 — Функциональная схема DFA

Наиболее подходящими для DFA считаются редкоземельные празеодим Pr, неодим Nd, эрбий Er, тулий Tm, совместно эрбий Er и иттрий Y, а также гольмий, самарий, таллий. Они позволяют создать DFA, работающий на различных длинах волн от 500 до 3500 нм . Наибольшее распространение среди DFA получили эрбиевые усилители EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Функциональная схема DFA приведена на рисунке 1.5.

Для того, чтобы волокно стало усиливающей средой, оно накачивается излучением  $\lambda_p$  от отдельного лазера. При этом возможны как прямая (сонаправленная) и встречная (противонаправленная) накачка от одного лазера, так и дву-

сторонняя накачка (прямая + встречная) от двух лазеров.

Система контроля усиления управляет током накачки лазера благодаря обратной связи, устанавливаемой через делитель мощности. Усиливаемый сигнал  $\lambda_s$  и накачка  $\lambda_p$  объединяются в мультиплексоре и направляются в оптическое волокно с примесью, где происходит увеличение мощности сигнала.

Большая часть мощности усиленного сигнала (95 %) проходит через фильтр на выход. Фильтр отсекает накачку  $\lambda_p$  и шумы вне полосы частот сигнала. Оптический изолятор исключает прохождение отраженных в усилителе сигналов во входящее волокно.

**Усилитель на волокне, легированном эрбием (EDFA)** является одним из наиболее практичных, однако его применение ограничено окном прозрачности 1550 нм. Усиление в EDFA происходит по всей длине волокна, легированного редкоземельным металлом эрбием.

Усилитель EDFA состоит из двух активных элементов: активного волокна, легированного  $\text{Er}^{3+}$ , и полупроводникового лазера накачки с одной или несколькими из следующих длин волн: 1480, 980, 800, 670 и 521 нм. Для подачи сигнала накачки в волокно требуется, по крайней мере, один разветвитель, селективный к длине волны. Реально используются длины волн 1480 и 980 нм. Это обусловлено рядом причин: эффективностью полупроводниковых лазеров большой мощности, малым затуханием оптического волокна, низкими требованиями к точности длины волны накачки. Для накачки предпочтительно использовать GaAs лазерные диоды, которые достигают эффективности накачки порядка 11 дБ/мВт.

На длине волны 980 нм наблюдаются наименьшие шумы усиления, а на длине волны 1480 нм нет жестких требований к точности настройки. Оптический усилитель с накачкой на длине волны 1480 нм называют двухуровневым, а усилитель с накачкой на длине волны 980 нм — трехуровневым (рис. 1.6).

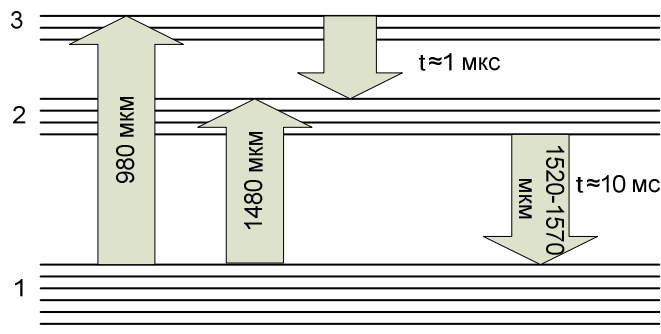


Рис. 1.6 — Диаграмма энергетических уровней оптического усилителя

Ионы эрбия возбуждаются за счет поглощения энергии излучения лазера накачки ( $\lambda_p$ ). Они переходят с основного уровня на более высокие энергетические уровни, а затем — безизлучательно на метастабильный уровень. Одновременно на возбужденные атомы воздействует излучение сигнала  $\lambda_s$ , вызывающее стимулированное излучение на всей длине активного волокна.

В настоящее время на рынке доминируют EDFA, а основные их конкуренты — OSA — до сих пор уступали им дороговизной производства, чувстви-



тельностью к поляризации и высоким уровнем перекрестных помех.

**Другие усилители типа DFA.** Усилитель на кварцевом волокне, легированном эрбием, обеспечивает полосу около 35 нм в окне прозрачности 1550 нм. Однако окно прозрачности волокна с потерями не более 0,25 дБ/км имеет ширину примерно 200 нм. Если же допустить уровень потерь до величины 0,35 дБ/км, то можно рассчитывать на использование системами DWDM-полосы шириной примерно 400 нм. Для использования такой широкой полосы требуются усилители с другими редкоземельными легирующими добавками. Одним из таких усилителей может быть оптический усилитель на теллуритовом волокне, легированном эрбием (EDTFA), который способен расширить полосу усиления до 90 нм .

Полезную полосу пропускания в окне 1550 нм можно еще больше расширить, если использовать оптические усилители на фтористом волокне, легированном тулием (TDFFA) или празеодимом (PDFFA). Используя тулиевый усилитель типа TDFFA, можно получить полосу усилителя с 1470 до 1650 нм. Усилитель на волокне, легированном празеодимом, работает в окне прозрачности 1310 нм.

TDFFA функционируют по принципу сходному с EDFA. Различие между двумя типами усилителей заключается в используемом редкоземельном элементе (тулий или эрбий) для допирования волокна.

В стандартной схеме TDFFA на волокне, допированном высоким содержанием тулия совместно с фторидом или фторзамещенным цирконатом или многокомпонентным силикатом с силикатом сурьмы, показывает усиление вблизи 1460 нм. Ширина полосы усиления на уровне 20 дБ приблизительно равна 35 нм. Максимально достижимая полоса усиления может быть на уровне 31 дБ .

Волокно, используемое в TDFFA, является очень хрупким, что препятствует широкому внедрению тулиевых усилителей. Соединение TDFFA с существующей волоконно-оптической сетью осуществляется только с помощью эпоксидного пигтейла, что представляет собой сложную задачу и является дорогостоящим, кроме того приводит к потерям более чем 0,3 дБ.

Волоконно-оптические усилители, легированные тулием (TDFFA) для  $S^+$ -полосы (1450–1480 нм) и  $S$ -полосы (1480–1530 нм) являются кандидатами для следующего поколения DFA взамен EDFA для  $L$ -полосы.

Специалисты NTT Laboratories (Япония) путем использования специального эквалайзера создали EDTFA с относительно плоской характеристикой в диапазоне 1561–1611 нм, коэффициентом усиления порядка 25 дБ и уровнем шума менее 6 дБ. На основе этого экспериментального образца компания NTT создала впоследствии усилитель типа EDTFA с плоской характеристикой в рабочем диапазоне 1570–1617 нм .

#### **1.3.4. Нелинейные оптические усилители**

Существуют два вида оптических усилителей, в которых усиление

оптических колебаний происходит в результате рассеяния излучения накачки на атомах вещества, из которого состоит волокно. Усилители работают на основе эффектов Рамана и Манделъштамма — Бриллюэна, возникающих в волокне при большой мощности накачки [4].

**Рамановские усилители** (RA — Raman Amplifier) строятся на основе стимулированного рамановского рассеяния, возникающего в результате распространения излучения в длинных волокнах. В рамановском усилителе оптические волны сигнала и накачки вводятся в оптоволокно через направленный разветвитель типа WDM (рис. 1.7). Энергия передается от накачки к сигналу благодаря процессу рассеяния Рамана при одновременном их распространении в волокне.

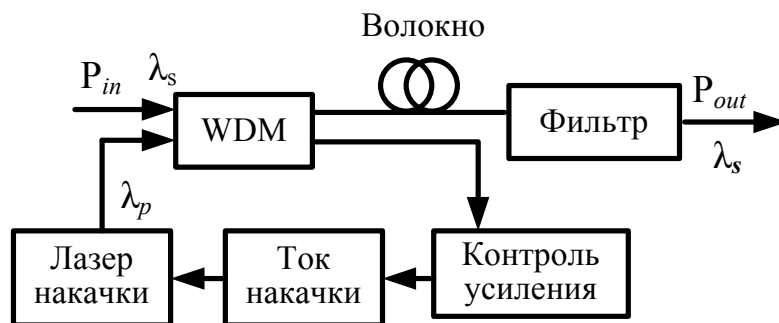


Рис. 1.7 — Схема волоконного рамановского оптического усилителя

С точки зрения рассеяния фотонов в твердом теле, различают рэлеевское, бриллюэновское и рамановское рассеяние. В результате рамановского рассеяния фотоны изменяют свою траекторию и отдают часть своей энергии. Рамановский эффект встречается в каждом оптическом волокне. Использование кварцевого волокна в качестве усиливающей среды в рамановском усилителе позволяет избежать сложностей при стыковке с ВОЛС, в отличие от SOA или TDFA. По существу усиление характеризуется длиной волны накачки в полосе от 300 до 2000 нм. Спектр рамановского усиления кварцевого волокна превышает ширину в 40 ТГц со смещенным пиком вблизи 13,2 ТГц (~100 нм). Способность среды усиливать оптический сигнал характеризуется рамановским коэффициентом  $g_R$ , величина которого зависит от частоты усиливаемого излучения и от свойств материала. Для кварца максимальное значение  $g_R$  сдвинуто относительно частоты излучения накачки на 13 ТГц.

Усиление происходит, если и информационный сигнал, и сигнал накачки имеют одинаковую поляризацию. При ортогональной поляризации обоих световых пучков рамановский эффект дает малое усиление.

На ВОЛС используются рамановские усилители двух конфигураций: распределенный (DRA — Distributed Raman Amplifier) (рис. 1.8,а) и дискретный (LRA — Lumped Raman Amplifier) (рис. 1.8,б).

Сигналы двух ортогонально поляризованных диодов лазерной накачки мультиплексируются и объединяются в WDM для создания встречной накачки в передающем волокне. В результате распространяющийся в прямом направле-

нии сигнал получает рамановское усиление в волокне. Использование встречной накачки уменьшает влияние шума накачки на сигнал.

Выходная характеристика распределенного рамановского усилителя зависит от свойств передающего волокна, таких как поглощение сигнала накачки, эффективная площадь  $A_{eff}$  и рамановский коэффициент усиления  $g_R$ . Мощность накачки  $P_H$  на длине волокна  $L$  определяется затуханием, вносимым этой длиной, с коэффициентом затухания на длине волны накачки. Так для компенсации потерь мощности в ОВ на длине  $L = 40$  км от приемной стороны при  $g_R = 4 \cdot 10^{-14}$  м/Вт,  $A_{eff} = 50$  мкм<sup>2</sup> достаточно подать накачку  $P_p = 0,5$  Вт.

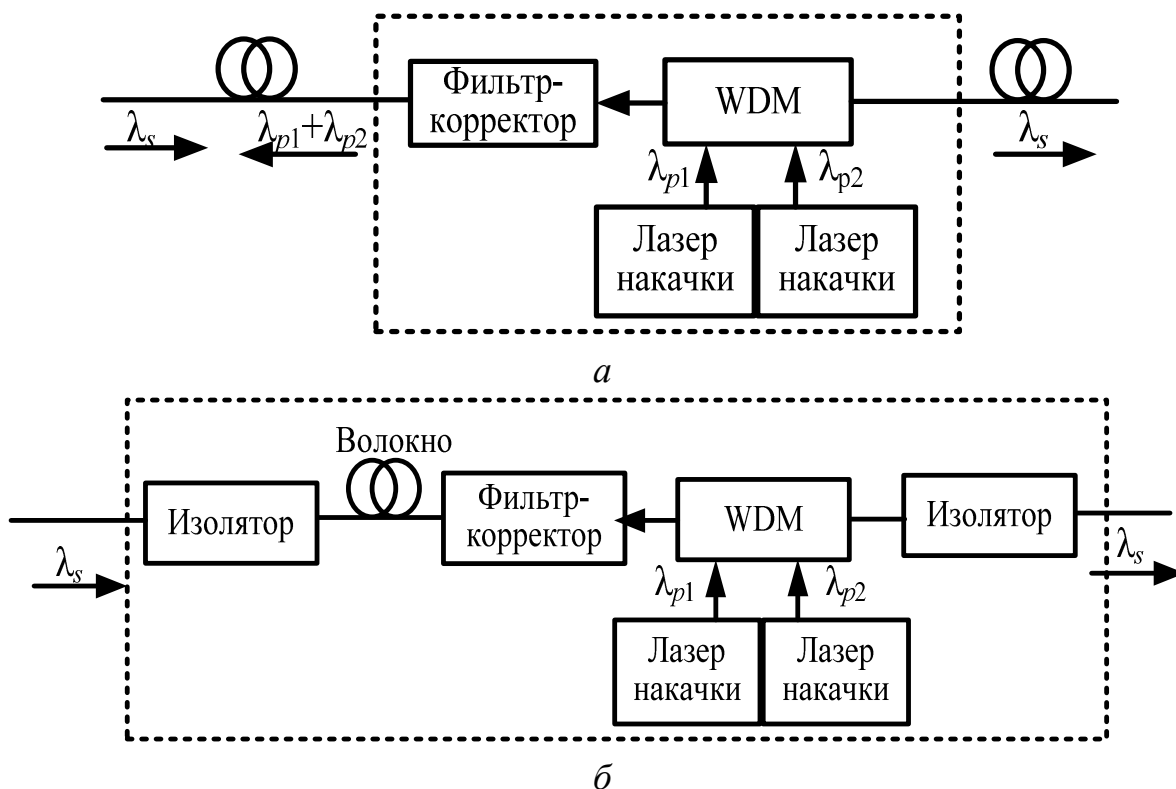


Рис. 1.8 — Блок-схема рамановского усилителя:  
 а — распределенный рамановский усилитель (DRA);  
 б — дискретный рамановский усилитель (LRA)

Неравномерность усиления является одним из важных параметров для ОА, особенно в системах WDM/DWDM. В случае рамановского усилителя усиление для конкретного сигнала зависит от разности частот сигнала и накачки. Различные сигналы получают различное усиление, зависящее от разности их частоты и частоты накачки. Следовательно любой из диапазонов длин волн будет иметь некоторое колебание уровня усиления. Для уровня накачки 200 мВт в диапазоне С (1530–1560) нм, получается максимальное усиление 7,78 дБ с колебаниями уровня  $\sim 3,5$  дБ.

Величина усиления зависит от мощности накачки и может достигать 30 дБ при мощности накачки до 1,5 Вт на длине волны 1,3 мкм. Для работы усилителя в диапазоне длин волн 1,57–1,58 мкм необходимо осуществлять накачку на волне 1,47 мкм.

Для выравнивания АЧХ, а также расширения полосы усиления следует производить накачку не на одной частоте или длине волны, а на двух-трех длинах волн. Для перекрытия всего диапазона 1530–1570 нм накачка осуществляется от двух лазеров с длинами волн соответственно 1445 и 1462 нм ]. В настоящее время полупроводниковых лазеров, способных излучать на перечисленных длинах волн мощность более 0,2 Вт, не существует. Однако для получения достаточно высокого коэффициента усиления, мощность излучения накачки должна составлять 0,5–0,8 Вт. Для получения такой мощности излучения на нужных длинах волн используются многокаскадные схемы преобразования излучения от иттербиевых волоконных лазеров в стоксово излучение на требуемой длине волны.

Для накачки распределенного рамановского усилителя, как и в EDFA, в TDFA используются встречная, сонаправленная и двухсторонняя накачка. Необходимо отметить, что в любом из трех вариантов может применяться несколько источников накачки для обеспечения требуемой полосы усиления. На практике применяется схемы со встречной и двухсторонней накачкой, так как они обеспечивают лучшие характеристики. Насыщение усиления (предельное значение коэффициента усиления) обусловлено уменьшением мощности накачки вдоль линии распространения накачки.

Усилитель Рамана может быть использован для увеличения скорости передачи существующих линий с 2,5 до 10 Гбит/с. Широкополосность усилителя превышает 5 ТГц .

По сравнению с широко используемыми эрбиевыми усилителями (EDFA), рамановские усилители обладают рядом преимуществ:

- широкий спектр усиления (50...100 нм);
- возможность получения усиления в стандартных ОВ;
- реализация лучшего отношения сигнал/шум;
- простая конструкция;
- большая, чем у EDFA, эффективность при больших мощностях накачки;
- увеличение числа каналов в существующих линиях связи без замены уже установленных EDFA.

А также следующими недостатками:

- меньшая, чем у EDFA, эффективность при меньших мощностях накачки (неудобство применения при небольшом числе каналов);
- возникновение перекрестной модуляции между усиливаемыми каналами;
- зависимость от поляризации.

Однако в последнее время в литературе появились сообщения о разработке эффективных рамановских усилителей, в которых используются специальные волокна с большим содержанием германия, обладающие низкими оптическими потерями. Этот факт, а также разработка высокоэффективных рамановских лазеров для накачки усилителя будут играть всё возрастающую роль в волоконно-оптических системах связи .

Разработка схем гибридных усилителей (рис. 1.10), включающих распределенный рамановский усилитель и эрбиевый волоконный усилитель, позволила получить равномерное усиление сигналов в полосе 82,8 нм с отклонением не более 3 дБ в пределах заданной полосы [5].

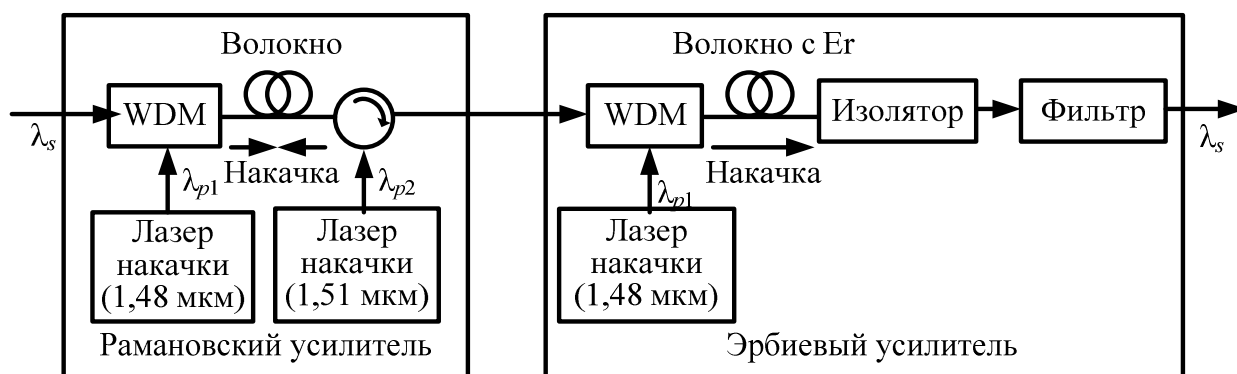


Рис. 1.10 — Структурная схема гибридного оптического усилителя с расширением полосы усиливаемых частот

В табл. 1.3 приведены сравнительные характеристики усилителей мощности на основе трех вышерассмотренных типов.

Таблица 1.3

Сравнительные характеристики усилителей мощности

Характеристики	SOA	EDFA	LRA
Ширина полосы усиления, нм	1470–1610	1530–1590	1470–1610
Мощность насыщения, дБм	~ 13	> 20	> 18
Коэффициент усиления, дБ	> 10	> 15	> 10
Шум-фактор, дБм	< 8	< 6	< 6,5
Поляризационная чувствительность, дБ	0,5	0,3	0,3

**Волоконный усилитель Бриллюэна** работает на том же принципе, что и рамановский усилитель, за исключением того, что оптическое усиление обеспечивается стимулированным рассеянием Бриллюэна. Он также накачивается оптически, и часть накачиваемой мощности передается сигналу через рассеяние. Физически каждый фотон накачки отдает часть энергии на создание фотона с частотой сигнала, а часть — на создание акустического фотона. Другими словами, волны накачки рассеиваются на акустической волне, движущейся через среду со скоростью звука.

Отметим отличия усиления Бриллюэна от рамановского усиления:

- усиление имеет место только при встречной схеме накачки;
- сдвиг частоты сигнала по отношению к частоте накачки меньше 10 ГГц (на три порядка меньше, чем у рамановского усилителя) и зависит от частоты накачки;

- спектр усиления чрезвычайно узкий (полоса усиления менее 100 МГц).

Очень узкий усиливаемый спектр не позволяет применять этот тип усилителя в широкополосных системах передачи. Реальное усиление может достигать 20–30 дБ при величине накачки около 1 мВт.

### **1.3.5. Методы стабилизации коэффициента усиления**

В связи с развитием DWDM-систем в направлении увеличения числа длин волн передачи, возникает необходимость увеличения диапазона длин волн усиления [4]. В настоящее время полоса усиления для EDFA в области 1,55 мкм составляет порядка 35 нм. Однако, имея ввиду, что они имеют плоскую характеристику усиления в области 1,58 и 1,55 мкм, увеличение диапазона может быть достигнуто путем использования обеих полос посредством методов, основанных на использовании:

- EDFA с оптическими фильтрами, выравнивающими усиление;
- двух полос частот усиления EDFA с параллельной конфигурацией;
- каскадного соединения EDFA с частично плоским усилением и усилителя Рамана (см. рис. 1.10).

При выполнении селективного ослабления приходится принимать во внимание то, что энергия на других каналах также перераспределяется. В результате чего оптимизация системы становится сложной итерационной процедурой. Дополнительные сложности возникают, когда битовые скорости добавляемых или удаляемых каналов различны. Например, отношение сигнал / шум для передачи STM-64 (10 Гбит/с) должно быть на 6 дБ больше, чем для передачи STM-16 (2,5 Гбит/с). В последнем случае, дополнительная мощность должна быть добавлена в канал STM-64.

Кроме того, необходимо обеспечить постоянство коэффициента усиления в условиях периодического подключения и отключения части спектральных каналов, что также приводит к изменению суммарной усиливаемой мощности и, в отсутствие стабилизации, к изменению значения коэффициента усиления в результате насыщения. Изменение усиления, а следовательно, и мощности рабочих каналов приводит к увеличению количества ошибок (BER), а может привести и к выходу системы из строя.

Рассмотрим основные методы стабилизации коэффициента усиления эрбиевых оптических усилителей (EDFA) .

**Методы стабилизации коэффициента усиления.** Коэффициент усиления оптического усилителя пропорционален величине инверсной населенности активного элемента, который, в свою очередь, определяется балансом между действием накачки и спонтанных и вынужденных переходов. Поскольку управлять спонтанными переходами не представляется возможным, могут быть реализованы две возможности стабилизации уровня инверсной населенности: путем управления накачкой или насыщением. В первом случае используются электрические методы стабилизации, во втором —

оптические. Возможно также совмещение электрических и оптических методов стабилизации.

**Электрические методы стабилизации** коэффициента усиления заключаются в корректировке мощности лазера накачки для обеспечения постоянства коэффициента усиления. Корректировка может быть упреждающей с использованием цепи обратной связи. Для повышения эффективности стабилизации коэффициента усиления может быть использована их комбинация (рис. 1.11).

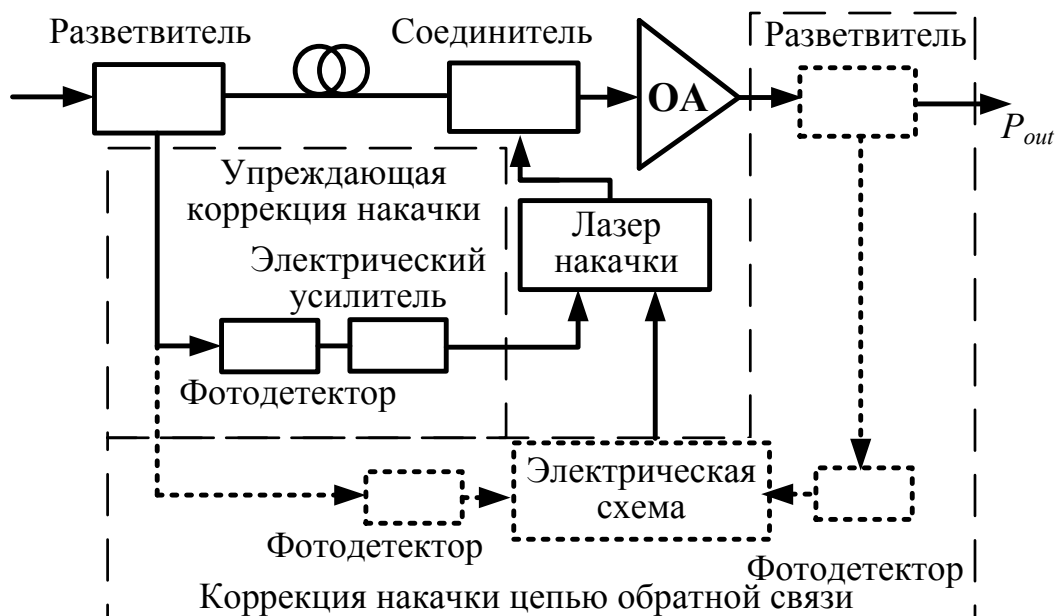


Рис. 1.11 — Электрическая стабилизация коэффициента усиления EDFA

В части комбинированной схемы, отвечающей за упреждающую коррекцию накачки, разветвитель отводит часть мощности входного сигнала на фотодетектор, который выполняет его оптоэлектронное преобразование. Усиленный электрический сигнал, пропорциональный мощности входного оптического сигнала, используется для управления мощностью лазера накачки. В первом приближении необходимое для обеспечения постоянства коэффициента усиления изменение мощности накачки происходит пропорционально изменению мощности усиливаемого оптического излучения.

В части схемы, отвечающей за коррекцию накачки цепью обратной связи, два разветвителя отводят часть мощности входного и выходного сигнала на фотодетекторы, выполняющие их оптоэлектронное преобразование. Затем сигналы подаются на специальную электрическую схему, которая сравнивает реальное значение коэффициента усиления, определяемое по отношению мощностей входного и выходного сигналов, с требуемым коэффициентом усиления и соответствующим образом корректирует мощность лазера накачки.

**Оптическая стабилизация коэффициента усиления.** Принцип оптической стабилизации коэффициента усиления заключается в том, что усиливающая область помещается в резонатор лазера, генерирующего на нерабочей длине волны. Хорошо известное свойство лазера заключается в том, что коэффициент усиления в нем в режиме генерации в точности равен потерям в резонаторе.

Если на активный элемент лазера одновременно подать внешнее излучение на негенерирующей длине волны, то выходная мощность лазера изменится, а коэффициент усиления останется прежним. Лазерное излучение, таким образом, оказывается некоторым балластным излучением, обеспечивающим постоянство коэффициента усиления. Уменьшение общей мощности входящего оптического сигнала автоматически компенсируется увеличением лазерной мощности и наоборот. Оптическая обратная связь может быть осуществлена двумя способами: с помощью кольцевого резонатора и с помощью линейного резонатора.

Кольцевой резонатор для создания оптической обратной связи состоит из отрезка стандартного волокна, соединяющего выходную часть секции оптического усилителя с входной, и узкополосного фильтра, задающего длину волны лазерного излучения.

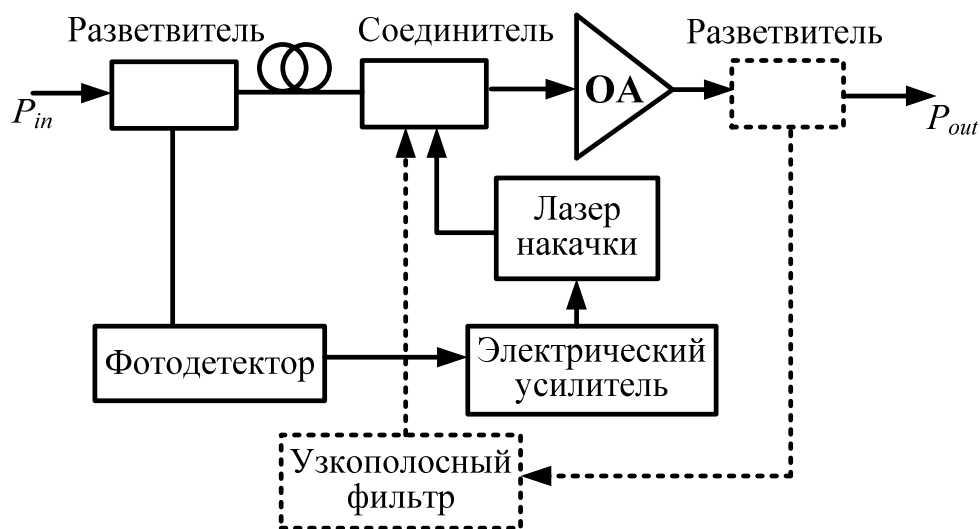


Рис. 1.12 — Совмещенная оптоэлектронная стабилизация коэффициента усиления EDFA

Линейный резонатор для создания оптической обратной связи состоит из двух распределенных дифракционных отражателей, расположенных на входе и выходе усилителя. Максимумы коэффициентов отражения решеток задают длину волны лазерного излучения. Коэффициенты отражения на длинах волн сигнала и накачки должны быть равны нулю.

Совмещение оптических и электрических методов стабилизации коэффициента усиления, с одной стороны, может привести к улучшению характеристик усилителя, с другой — к чрезмерному усложнению схемы стабилизации. Поэтому целесообразность такого совмещения должна быть определена в каждом конкретном случае из сравнения затрат на достижение требуемой степени стабилизации. На рис. 1.12 приведена схема совмещенной оптоэлектронной стабилизации коэффициента усиления EDFA (электрическая упреждающая коррекция накачки и оптический кольцевой резонатор).

Эффективность стабилизации можно охарактеризовать следующими параметрами:

- время стабилизации  $T$  — время восстановления заданного значения коэффициента усиления;



- максимальное отклонение коэффициента усиления  $\Delta_{\max}$  — максимальное его отклонение от заданного значения;
- смещение коэффициента усиления  $\Delta_{\infty}$  — установившееся по прошествии времени стабилизации его отклонение от заданного значения.

Эффективность стабилизации тем выше, чем меньше численные значения всех приведенных параметров

### Сравнительный анализ различных схем стабилизации

В табл. 1.4 приведены результаты численного моделирования параметров, характеризующих эффективность работы вышеописанных схем стабилизации. Параметры стабилизации для рассмотренных методов при коэффициенте усиления 18 дБ, входной мощности сигнала на канал 10 дБм, что соответствует отключению 15 из 16 каналов.

Таблица 1.4

Параметры схем стабилизации

Метод стабилизации	$T$ , мкс	$\Delta_{\max}$ , дБ	$\Delta_{\infty}$ , дБ
Оптическая обратная связь (линейный резонатор)	> 200	2,01	0,1
Оптическая обратная связь (кольцевой резонатор)	> 200	1,72	0,1
Совмещенная оптоэлектронная стабилизация	> 200	1,53	0,1
Коррекция накачки с цепью обратной связи	< 100	0,82	0,02
Упреждающая коррекция накачки	< 5	0,11	0,11
Комбинация упреждающей коррекцией накачки и коррекции накачки с цепью обратной связи	< 35	0,4	0,02

Для EDFA наиболее простыми и надежными методами стабилизации коэффициента усиления являются электрические методы, что обусловлено относительно медленным изменением коэффициента усиления в EDFA без стабилизации, связанным с большим временем релаксации инверсной населенности  $\tau \approx 10$  мс .

Наилучшими параметрами среди этих методов обладает комбинация упреждающей коррекции накачки с коррекцией накачки с использованием обратной связи, так как они отлично дополняют друг друга: упреждающая коррекция обладает малым временем стабилизации, а цепь обратной связи обеспечивает малое значение смещения коэффициента усиления. Однако быстрое действие электрических методов стабилизации может оказаться недостаточным в полупроводниковых усилителях, для которых более оптимальным представляется использование оптических схем стабилизации коэффициента усиления .

## 1.4. Оптические мультиплексоры

Любой оптический мультиплексор может быть классифицирован как по физической структуре и принципу организации спектрального разделения/объединения, так и по функции, выполняемой в ВОСП с СР (см. рис. 1.1). Рассмотрим эти классификации подробнее:

### 1.4.1. Функциональные принципы построения

Оптический мультиплексор/демультиплексор в ВОСП с СР может выполнять функции:

- терминального мультиплексора;
- мультиплексора ввода/вывода;
- двухканального широкополосного мультиплексора.

Рассмотрим первые две функции подробнее.

### Терминальный мультиплексор (ОТМ)

Терминальный мультиплексор располагается на оконечной станции. На передающей стороне ОТМ осуществляет преобразование всех сигналов, затем мультиплексирует их в один сигнал для дальнейшего усиления и передачи. На принимающей стороне ОТМ демультиплексирует сигнал WDM и отправляет сигналы к соответствующему оборудованию.

Рассмотрим для примера ОТМ OptiX BWS 320G (рис. 1.13) .

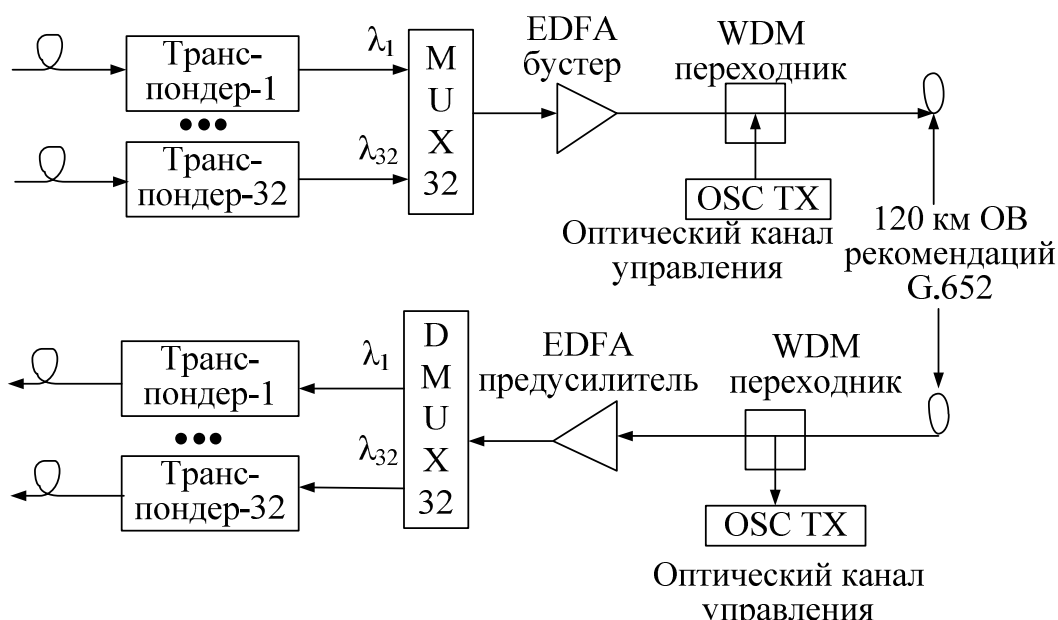


Рис. 1.13 — Структура ОТМ OptiX BWS 320G

Оборудование включает следующие функциональные блоки: преобразования оптической длины волны; оптического мультиплексирования; оптического усиления; оптического демультиплексирования; обработки оптического канала управления; связи и управления и обработки заголовков.

## Мультиплексор ввода/вывода (OADM)

Мультиплексор ввода/вывода устанавливается в тракте передачи, и служит для ответвления или добавления оптических каналов. Рассмотрим для примера OADM OptiX BWS 320G (рис. 1.14).

Он устанавливается в узле OADM, используется для ввода/вывода до 8 каналов, остальные каналы (транзитные) проходят через станцию без изменений. Выполняет функции оптического усиления и функции ввода/вывода, может осуществлять уравнивание мощности для вновь добавленных каналов и других каналов в линии, с целью обеспечения уравнивания мощности разных каналов в основном потоке. Состоит из следующих функциональных блоков: оптического усиления, обработки оптического канала управления, оптического мультиплексирования ввода/вывода, преобразования оптической длины волны (для открытых систем), связи и управления, и обработки заголовков.

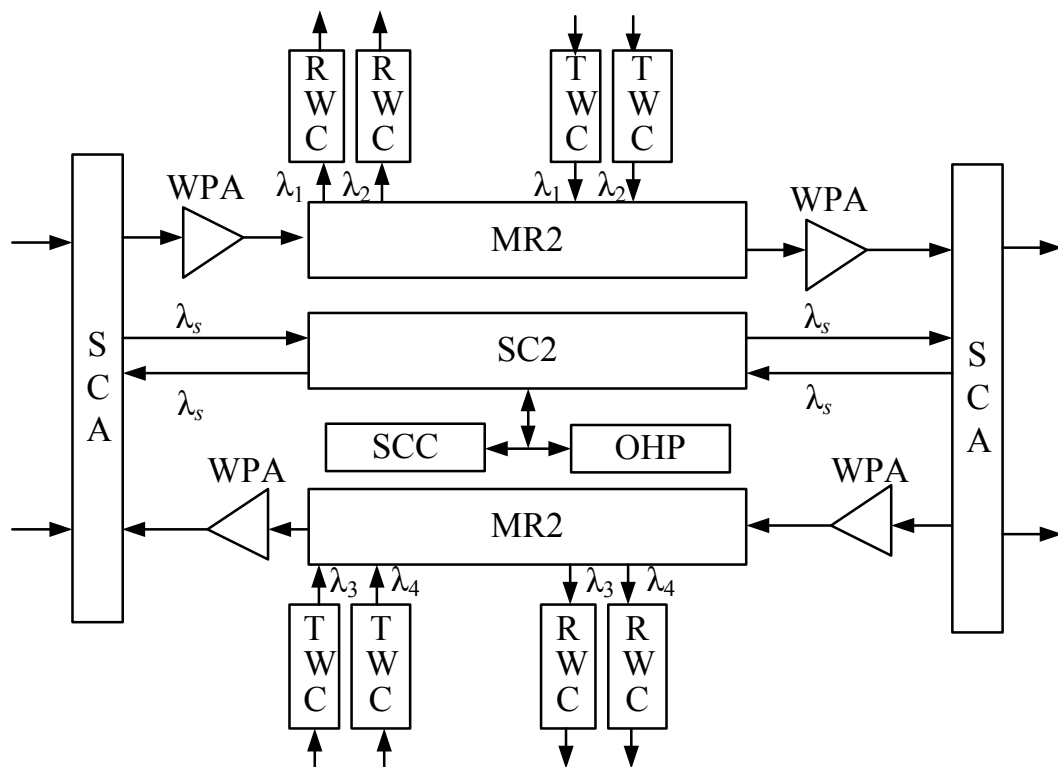


Рис. 1.14 — Структура OADM OptiX BWS 320G:

- MR2 — блок мультиплексирования ввода/вывода 2-х каналов;
- WPA — WDM — блок предварительного усилителя;
- WBA — WDM — блок усилителя-бустера;
- TWC — STM-16 — передающий блок преобразования длины волны;
- RWC — STM-16 — принимающий блок преобразования длины волны

### 1.4.2. Физические принципы построения

Выделяют следующие типы WDM-устройств, обеспечивающих мультип-

лексирование [1-6].

## DEMUX на основе объемных микрооптических устройств

Интерференционные фильтры:

- на основе резонатора Фабри — Перо (FP);
- на многослойных диэлектрических тонких пленках (DTF);
- на отражательных оптоволоконных решетках Брэгга (FBG);

Явление угловой дисперсии:

- в трехгранной призме;
- на дифракционной решетке.

**Резонатор Фабри — Перо** работает следующим образом. Он, как и любой интерференционный фильтр, настраивается на фильтрацию одной длины волны. Он разделяет поток  $\lambda_1 \dots \lambda_n$  на два ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2 \dots \lambda_n$ ), выделяя несущую  $\lambda_1$  из многоволнового потока. Для демультиплексирования  $n$  несущих необходимо установить каскадно  $n$  фильтров. Аналогично резонатору FP работает и фильтр на многослойных диэлектрических *тонких пленках*. И в этом случае для демультиплексирования  $n$  несущих необходимо установить каскадно  $n$  фильтров. Нужно учитывать, что затухание таких фильтров на центральной частоте полосы пропускания достаточно велико, что делает целесообразным их использование в WDM с 8–16 каналами. Другой принцип использован в фильтрах с циркулятором и отражательными ОВ-решетками Брэгга (рис. 1.15).

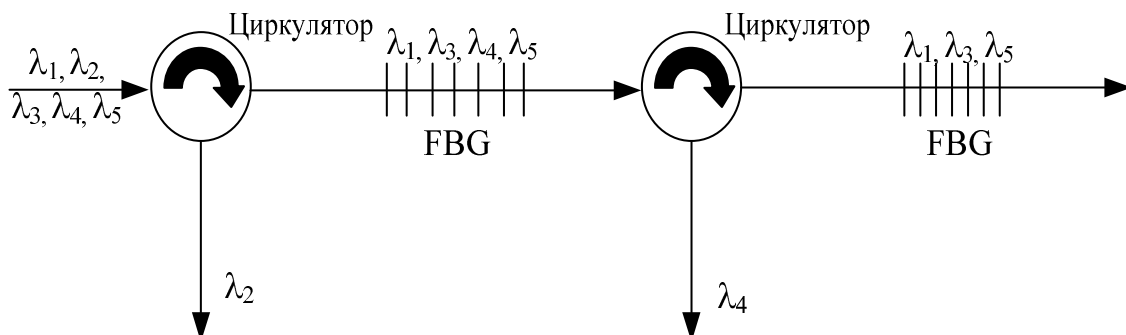


Рис. 1.15 — Схема демультиплексора WDM на основе решетки Брэгга

Здесь отражение волны определенной длины происходит от дифракционной решетки Брэгга соответствующего периода, сформированной в одномодовом ОВ. Отраженная волна транслируется циркулятором. Так как решетка Брэгга рассчитана на фиксированную длину волны, то для демультиплексирования  $n$  несущих необходимо сформировать каскад из  $n$  отражательных решеток Брэгга, настроенных на соответствующие длины волн.

Технология мультиплексирования на основе явления *угловой дисперсии* использует совершенно другие физические принципы. Здесь входной коллимированный пучок падает на диспергирующий элемент и пространственно разделяется им на несколько пучков в зависимости от длины волны несущей. Эти

пучки, расходящиеся под различными углами, фокусируются и собираются отдельными приемными оптическими элементами. На выходе (в фокальной плоскости) этих элементов формируются изображения входного пучка, размеры которых (с помощью микролинзовых систем) юстируются так, чтобы они соответствовали диаметру сердцевины приемного (выходного) ОВ (рис. 1.16).

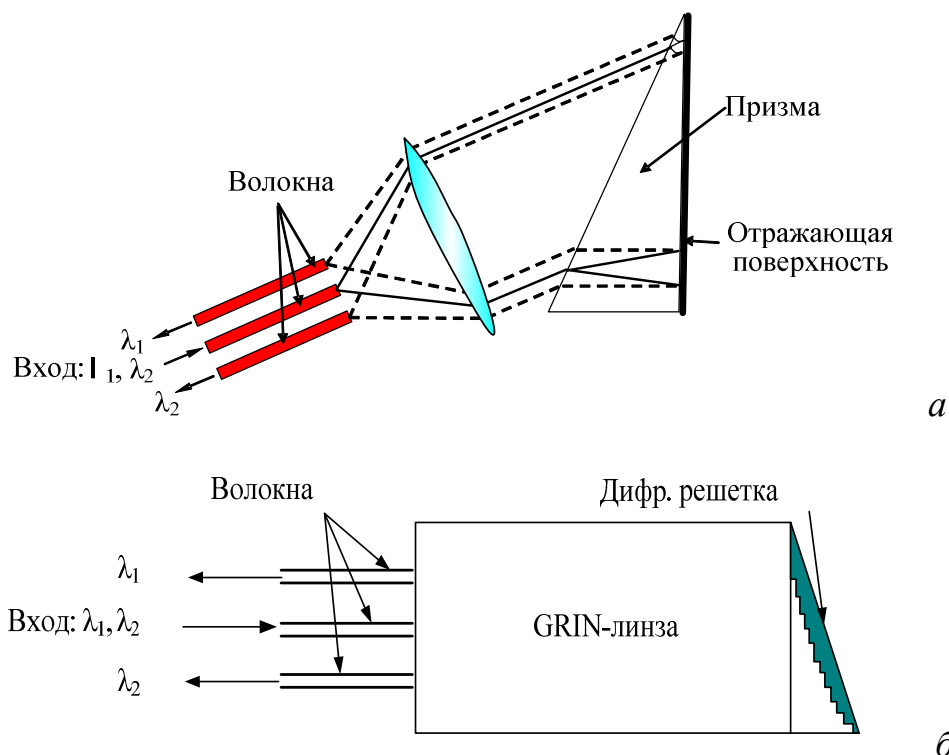


Рис. 1.16. Схема демультимплектора WDM:

а — на отражательной призме; б — на отражательной плоской решетке

## DEMUX на основе планарных интегральных устройств

Типы DEMUX на основе планарных интегральных устройств:

- оптоволоконные направленные разветвители (ОВНР);
- интерферометры Маха — Цендера (MZI);
- дифракционная решетка на массиве волноводов (AWG).

Несмотря на значительные достижения в области технологии мультиплексирования на основе объемных микрооптических устройств, общая тенденция развития волоконно-оптических систем передачи и отдельных ее устройств (в первую очередь мультиплекторов плотных и высокоплотных WDM) состоит в совершенствовании планарных технологий, которые органично сочетались бы с технологиями, используемыми при создании оптических интегральных схем (ОИС).

Наиболее простым и легко реализуемым в области планарных технологий вариантом мультиплектора WDM является мультиплексор на оптоволоконных направленных разветвителях (ОВНР). Такая схема построена путем каскадного

соединения однотипных ячеек разветвителей типа 2:1 (два входа — один выход), дающего в итоге мультиплексор  $n:1$ .

Такой метод построения схемы имеет очевидный недостаток — высокий уровень вносимых потерь (теоретически 3 дБ/каскад). Развитием этого решения является использование интерферометров Маха — Цендера (MZI) для демультиплексоров вместо разветвителей.

Рассмотрим оптические мультиплексоры с использованием планарных волноводов. Существуют различные конфигурации устройств на основе массива планарных волноводов, например, таких как:

- многопортовые разветвители типа «звезда»;
- схемы планарных интегрально-оптических волноводных структур на основе призмы, дифракционной решетки проводящего типа, отражательной дифракционной решетки, эшелона Майкельсона;
- разветвители с плоским отражающим зеркалом;
- Arrayed Waveguide Grating (AWG).

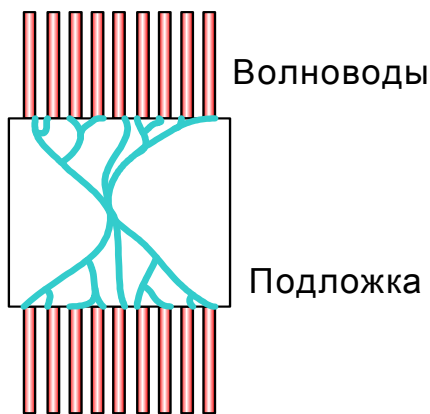


Рис. 1.17 — Многопортовый разветвитель типа «звезда»

В ранних работах по разработке устройств WDM использовались интегральные схемы на стекле. Канальные волноводы оптических объединителей и разделителей в таких схемах формируются путем ионообмена за счет диффузии легирующего материала с поверхности в подповерхностный слой стекла. В качестве легирующих присадок для натрий-кальциевых стекол использовали ионы калия, серебра, свинца и титана. Таким путем получали многопортовые разветвители типа «звезда» (рис. 1.17).

В разработках с излучением на длинах волн в области 0,85 мкм для спектрального разделения каналов использовались разделители каналов, аналогичные мультиплексорам /демультиплексорам, на выходе которых формировались узкополосные интерференционные фильтры, обеспечивающие селекцию сигнала требуемой длины волны. Недостатком такой схемы являлось сильное ослабление интенсивности сигналов на выходе вследствие деления каждого из сигналов на  $n$  каналов.

Для устранения этого недостатка необходимо было разработать планарное устройство разделения спектральных составляющих магистрального световода по отдельным каналам. С этой целью было предложено использовать в интегральных демультиплексорах планарные коллимирующие линзы и различные диспергирующие элементы (рис. 1.18).

Оказалось, что такие устройства имеют большие потери, слабое деление каналов и большие перекрестные помехи, обусловленные взаимодействием спектральных составляющих. Предельное число разделяемых каналов в подобных устройствах не превышало 10 .

Более плодотворной оказалась идея разделения каналов с помощью системы фазированных канальных волноводов, формирующих эшелон Майкельсона (рис. 1.19), которая в зарубежной литературе называется упорядоченной волноводной решеткой (AWG — Arrayed Waveguide Grating).

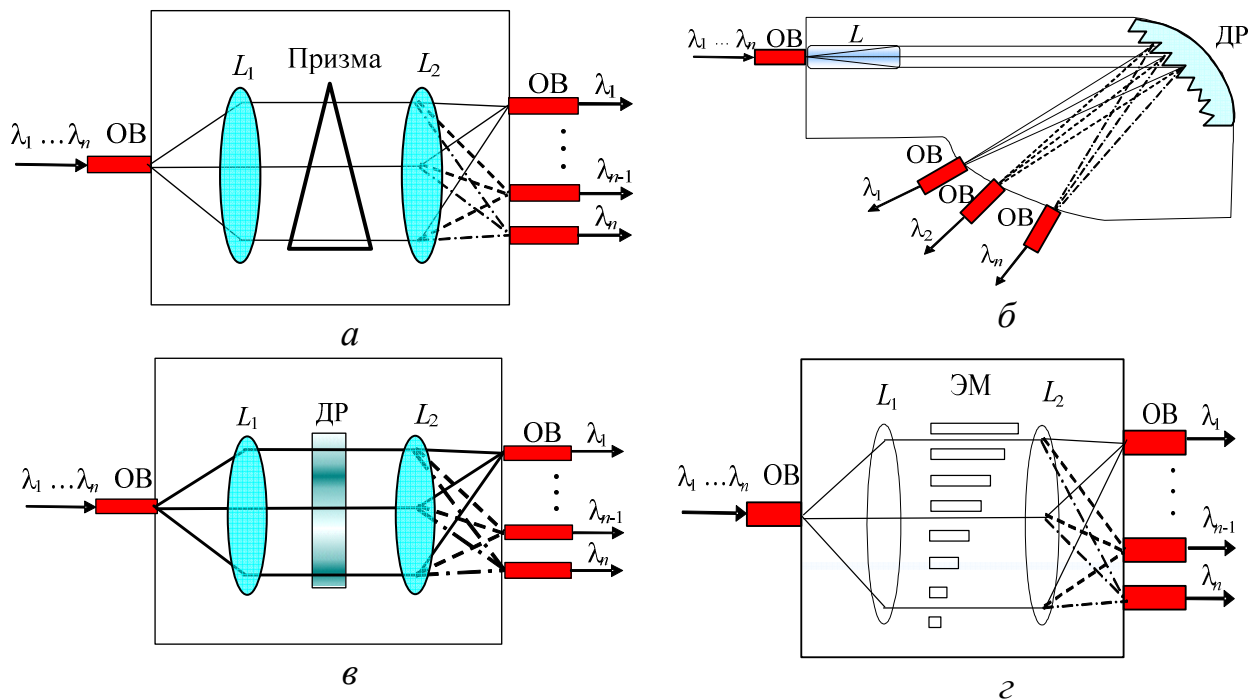


Рис. 1.18 — Схемы планарных интегрально-оптических волноводных структур на основе: *а* — призмы; *б* — отражательной дифракционной решетки; *в* — дифракционной решетки пропускающего типа; *г* — эшелона Майкельсона

Устройство спектрального разделения на основе AWG состоит из следующих составных элементов: входного магистрального световода; входной фокусирующей системы (объединителя каналов); фазированной (упорядоченной) волноводной решетки; выходной фокусирующей системы (пространственного делителя каналов); отводящих волноводов спектрально разделенных каналов; выходных волноводов.

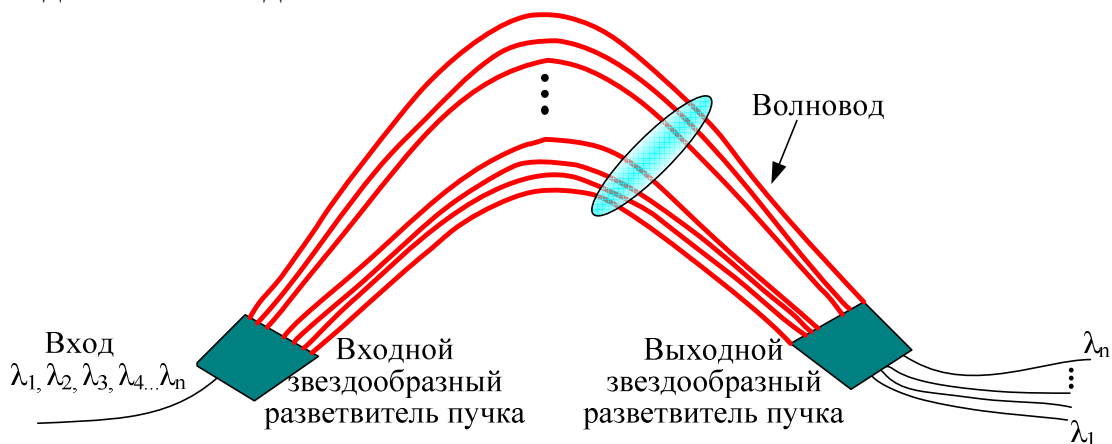


Рис. 1.19 — Структура AWG-демультиплексора  
Все устройство выполнено по планарной интегрально-оптической техноло-

гии на кремниевой подложке и снабжено устройством стыковки с отводящими волоконными световодами или линейкой фотоприемников. Особенностью такого устройства спектрального разуплотнения каналов является его работа в одномодовом режиме, то есть все канальные волноводы должны поддерживать только одну продольную оптическую моду.

### 1.4.3. Технические и функциональные параметры

#### Функциональные параметры компонентов ВОЛС

**Оптический порт.** Портом является вход оптического волокна или оптического разъема, присоединенного к оптическому элементу, используемый для ввода оптической мощности.

**Коэффициент передачи.** Коэффициентом передачи между двумя портами является часть переданной между этими портами мощности.

**Матрица передачи.** Оптические свойства волоконно-оптических устройств ветвления могут быть определены в терминах матрицы коэффициентов  $n \times n$ , где  $n$  — число портов, а коэффициенты представляют часть мощности, передаваемой между назначенными портами. В общем случае матрица передачи  $T$  имеет вид

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & T_{1j} & \cdot & T_{1N} \\ T_{21} & T_{22} & \cdot & T_{2j} & \cdot & T_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{i1} & T_{i2} & \cdot & T_{ij} & \cdot & T_{iN} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{N1} & T_{N2} & \cdot & T_{Nj} & \cdot & T_{NN} \end{bmatrix}$$

В случае оптического усилителя (пример EDFA) матрица передачи вырождается в один коэффициент передачи  $T = [T_{11}]$ .

Работу многопортового  $N \times N$  распределителя можно представить, используя матрицу коэффициентов передачи.

Структурная схема многопортового  $N \times N$  распределителя изображена на рис. 1.20, где  $i = 1, \dots, N$  и  $j = 1, \dots, N$  — номера соответствующих входных и выходных портов;  $[T_{ij}]$  — матрица передачи.

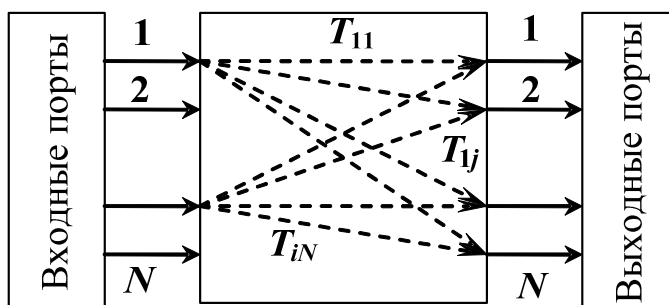


Рис. 1.20 — Структурная схема многопортового  $N \times N$  распределителя



## Технические параметры<sup>1</sup>

Ниже приведены спецификации параметров, которые в настоящее время используются для описания мультиплексора в сетях уплотнения WDM. Определения некоторых из этих параметров также даются Исследовательской лабораторией Bell Communication GR-2883-CORE, Пункт 1.

1. **Полоса пропускания канала ( $BW$ )** — интервал частот, в котором значение амплитудно-частотной характеристики аналогового передающего оптоэлектронного модуля больше или равно половине его максимального значения (рис. 1.21). Типовые полосы пропускания в текущих системах уплотнения WDM варьируются от 1,0 до 8,0 нм.

2. **0,5 дБ полоса частот ( $BW_{0,5}$ )** — это ширина спектра, в пределах которой разница между пиковой переданной мощностью и переданной мощностью в любой точке составляет менее 0,5 дБ (см. рис. 1.21). По соглашению 0,5 дБ полоса частот обычно равна разности максимальной и минимальной длин волн в полосе пропускания каждого канала.

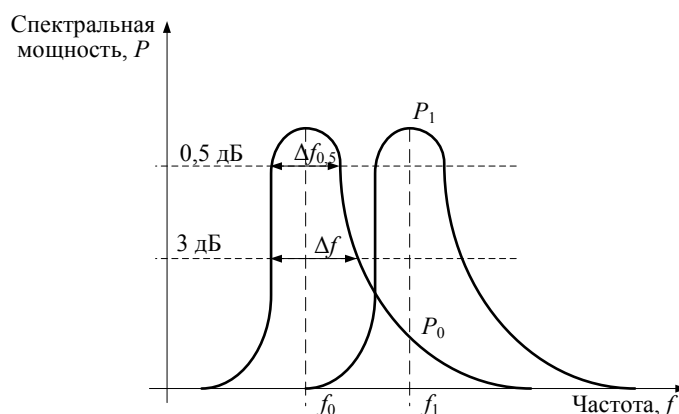


Рис. 1.21 — Частотная зависимость спектральной плотности мощности

3. **Вносимые потери ( $IL$ )** — уменьшение оптической мощности между входным и выходным портами пассивного элемента в децибелах, определяемое как

$$IL = -10 \lg(P_1 / P_0)$$

где  $P_0$  — оптическая мощность, вводимая во входной порт;  $P_1$  — оптическая мощность, полученная из выходного порта.

Максимальные и минимальные вносимые потери являются соответственно верхним и нижним пределами вносимых потерь рассматриваемого устройства и применяются во всем диапазоне длин волн, определенном для данного фильтра или WDM MUX. Под типичными вносимыми потерями понимается ожидаемое значение вносимых потерь, измеренное для определенной центральной длины волны. Обычно максимальные вносимые потери измеряются для всех длин волн в области полосы пропускания канала в 0,5 дБ поло-

<sup>1</sup> За основу взят стандарт ITU-T G.671, п. 3.2.

се частот и в полном диапазоне рабочих температур. Обычно это значение равно вносимым потерям в точке пиковой мощности плюс 0,5 дБ.

4. **Переходные помехи (ПП) ( $P_j$ )** — показывают влияние на  $j$ -й канал остальных каналов ( $i=1, \dots, N, j \neq i$ ) и численно равны отношению суммы мощностей всех каналов (кроме  $j$ -го) к мощности  $j$ -го канала

$$P_j = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^N |T_i|^2}{|T_j|^2},$$

где  $T_j$  — нормированный коэффициент передачи порта.

5. **Изоляция соседнего канала** определяет степень, до которой нежелательные каналы ослабляются на каждом канале добавления/устранения, и напрямую связана с ухудшением отношения сигнал/шум и битовой скорости, обусловленным присутствием многочисленных оптических несущих. Вследствие того, что идеальная форма спектра сходна с гауссовской кривой, каналы или канал, расположенный ближе всего к каналу добавления/устранения, имеют самую плохую изоляцию. Поэтому изоляция соседнего канала представляет наихудший случай и измеряется в пределах всех соседних полос пропускания каналов.

6. **Канальный интервал ( $\Delta f_k$ )** представляет собой расстояние (интервал) между центральными длинами волн соседних каналов и является системным параметром, определяющим параметры компонента.

Помимо указанных параметров следует также учитывать параметры, характеризующие стабильность каждого мультиплексора при воздействии внешних факторов, таких, как температура и состояние поляризации. Это связано с тем, что при достаточно большом влиянии данных факторов полосу пропускания канала мультиплексора необходимо выбирать шире по сравнению с вариацией центральной длины волны лазера, что, в свою очередь, приведет к необходимости увеличения канальных интервалов. В связи с этим учитываются следующие три типа параметров.

7. **Поляризационно-зависимые потери (PDL)** — потери, соответствующие максимальной вариации вносимых потерь, вызванной вариацией состояния поляризации, рассматриваемой на множестве всех возможных состояний поляризации.

Для MUX/DEMUX они представляют собой потери, возникающие вследствие того, что спектральное функционирование каждого порта мультиплексора зависит от входного состояния поляризации, которое неопределимо в лазерных системах передачи. Это значение потерь имеет самую большую вариацию в пределах полосы пропускания каждого порта мультиплексора.

8. **Температурная стабильность длины волны.** Стабильность центральной длины волны определяет ее максимальное изменение применительно к каждому порту в пределах предполагаемого диапазона рабочих температур.

9. **Тепловая стабильность** — это параметр, который представляет собой максимальную вариацию потерь вставки при изменении рабочей температуры в пределах полосы пропускания каждого порта .

Рассмотрим для примера типовые показатели приведенных параметров для различных видов терминальных мультимплексоров/демультиплексоров (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Сравнение технологий WDM-мультиплексирования

Параметр	Интерференционный фильтр	BG фильтр	AWG	Дифракционная решетка
Канальный интервал, ГГц	> 100	> 100	> 25	> 10
Изменение $\lambda$	угловая	Деформационная	температурная	температурная
Потери	неоднородные	низкие, неоднородные	очень низкие	очень низкие
Переходная помеха от соседнего канала, дБ	-25 ÷ -35	-30 ÷ -35	-25 ÷ -35	-25 ÷ -35
Переходная помеха от всех каналов, дБ	очень низкая	очень низкая	-25 ÷ -35	$a < -32$
PDL, дБ	0,25	превосходные	0,5	0,5
Конструкторское оформление	дискретная структура	дискретная структура	интегральная схема	интегральная схема
Размер	большой	большой	маленький	маленький
Надежность	хорошая	плохая	очень хорошая	хорошая
Цена за канал, \$	500	3000	50	30
Примечание	для малого количества каналов	для малого количества каналов	для $\geq 16$ каналов	для $\geq 16$ каналов

Требования к параметрам оптических мультиплексоров представлены в приложении В.

## 1.5. Характеристики мультиплексорного и усилительного оборудования основных производителей WDM ВОСП

Наиболее широко на российском рынке представлено оборудование WDM следующих компаний: Alcatel, Lucent Technologies, Nortel Networks, Siemens, Huawei Technologies, NEC, ECI Telecom [1-5].

Компания **Alcatel** представляет на рынке семейство продуктов OPTINEX для операторов связи. Ряд продуктов DWDM оптимизирован для сетей городского масштаба. В семейство OPTINEX входят три модели оборудования DWDM. Alcatel 1686 WM-система с поддержкой 16 или 32 оптических каналов. Каждый из них способен работать на скоростях от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с. Разновидность данной модели категории metro — Alcatel 1686 WM Metro и Alcatel 1696 Metro Span — оптимизирована для городских сетей. Для высокопроизводительных магистральных сетей подойдет модель Alcatel 1640 WM, обеспечивающая мультиплексирование до 80 оптических каналов.

Компания **Lucent Technologies** выпускает целую гамму оборудования синхронной передачи и оптического уплотнения, объединенных общим названием WaveStar. Оборудование DWDM компании Lucent Technologies включает в себя семейство WaveStar OLS и мультисервисную платформу Metropolis MSX. Наиболее простая система DWDM — WaveStar OLS 80G с поддержкой до 16 оптических каналов в диапазоне 1550 нм. Данная система в модификации WaveStar OLS 400G расширяется до 80 оптических каналов, а в модификации WaveStar OLS 1.6T — до 160 каналов. Каждый из формируемых каналов может передавать информацию со скоростью 10 Гбит/с (STM-64), что соответствует пропускной способности по одному оптическому волокну 1,6 Тбит/с.

Компания **Nortel Networks** выпускает оборудования DWDM серии OPTera Long Haul 1600, обеспечивающее высокую пропускную способность, и OPTera Metro 5000, предназначенное для создания скоростных сетей масштаба города.

Компания **Siemens** выпускает целое семейство мультиплексоров под названием TransXpress. В области DWDM предлагается широкий выбор оборудования для магистральных, региональных и городских сетей. Например, модель MTS2, созданная для магистральных сетей большой емкости и большой пропускной способности, способна передать до 640 каналов по 2,5 Гбит/с на расстояние свыше 1000 км.

Компания **Huawei Technologies** для применения на магистральных сетях разработало семейство OptiX, куда входит оборудование DWDM на 16/32 канала.

Компания **NEC** совместно с подмосковным заводом научного приборостроения РАН разработало систему SpectralWave 40/80, предназначенную для реализации магистрального узла, способного обеспечить гибкую и поэтапную организацию системы DWDM. Система SpectralWave 40/80 обладает пропускной способностью до 400 Гбит/с.

Компания **ECI Telecom** выпустила серию универсальных мультиплексов XDM, в котором на одной платформе интегрированы функции мультиплексирования DWDM, кросс-коммутации, маршрутизатора IP, коммутатора АТМ и мультиплексов SDH.

### 1.5.1. Оборудование «Пуск»

Оборудование DWDM «Пуск» предназначено для организации в одном оптическом волокне типа G.652, G.654 и G.655 до 160 оптических каналов в диапазоне длин волн 1530–1605 нм с возможностью передачи в каждом оптическом канале цифровых сигналов со скоростью от 0,1 до 2,5 Гбит/с (10 Гбит/с), пропускная способность — до 400 Гбит/с в одном оптическом волокне. В оборудовании предусмотрена возможность автоматического тестирования отдельных элементов и узлов для определения функционирования аппаратуры без перерыва связи. Оборудование контролируется и управляется с помощью встроенных микроконтроллеров и специализированного программного обеспечения версии ИП-1.5. Аппаратно-программный комплекс имеет стыки с рабочей станцией и местным терминалом системы технического обслуживания. Возможна реализация участков большой протяженности (до 1500 км) без регенерации цифровых сигналов. Оборудование «Пуск» позволяет осуществлять гибкое конфигурирование оптических сетей, включая сети Ethernet, IP, АТМ, кабельного телевидения. Для контроля и управления, а также для организации служебной связи, используется выделенный оптический канал. Оборудование «Пуск» предназначено для применения на различных участках Взаимоувязанной сети связи России: магистральная первичная сеть, внутризональные первичные сети, местные первичные сети, оптические сети доступа.

В табл. 1.6–1.8 приведены параметры оптических терминальных демультиплексов, мультиплексов ввода/вывода и линейных усилителей оборудования DWDM «Пуск».

Таблица 1.6

Параметры оптических терминальных демультиплексов

Наименование параметров		Значение параметров									
		8		16		40		80		160	
Количество оптических каналов		8		16		40		80		160	
Расстояние между оптическими каналами, ГГц		200	200	100	100	50	50	100	100	50	
Отклонение центральной частоты оптического канала, не более, ГГц		± 5,0			±3,0		± 5,0		± 3,0		
Вносимое затухание, не более, дБ		6,0		7,5		12,0		14,0		16,0	
Ширина полосы опти-	–3 дБ, не менее, ГГц	50,0			25,0		50,0		25,0		

ческого ка- нала на уровне	–20 дБ, не менее, ГГц	80,0	40,0	80,0	40,0
Поляризационно- зависимые потери, не бо- лее, дБ		0,5			
Переходная помеха от смежного оптического ка- нала, не более, дБ		– 30,0			
Кумулятивная переходная помеха при максимальном числе действующих опти- ческих каналов, не более, дБ		–25,0			
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ		–30			
Затухание отражения на выходе, не более, дБ		30,0			

Таблица 1.7

Параметры оптических мультиплексоров ввода/вывода (ОМВВ)

Наименование параметров		Значение параметров				
Количество оптических каналов		8	16	40		
Количество ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более		4	8	16		
Расстояние между оптическими каналами, ГГц		200	200	100	100	50
Отклонение центральной частоты оптического ка- нала, не более, ГГц		± 5,0				± 3,0
Вносимое затухание	для ответвляемых /вводимых оптических каналов, не более, дБ	6,0	7,5	8,0		
Ширина полосы оптического канала на уровне	–3 дБ, не менее, ГГц	50,0		25,0		
	–20 дБ, не менее, ГГц	80,0		40,0		
Поляризационно-зависимые потери, не более, дБ		0,5				
Переходная помеха от смежного оптического канала, не более, дБ		– 30,0				
Кумулятивная переходная помеха при максималь- ном числе действующих оптических каналов, не более, дБ		– 27,0				
Коэффициент отражения от входа,		– 30				

### 1.5.2. Оборудование OptiX BWS 320G

Оптическая система передачи OptiX BWS 320G на основе технологии DWDM, разработанная Huawei Technologies Company., Ltd., является новым поколением систем оптической передачи DWDM с высоким объемом передачи на длинные расстояния. Являясь представителем серии оборудования OptiX, OptiX BWS 320G обладает гибкой конфигурацией, совместимостью. Система BWS 320G способна мультиплексировать 32 длины волны в одном оптоволокне, например, передавать 32 несущие с различными длинами волн которые в свою очередь передают сигнал STM-16 с общей пропускной способностью до 80 Гбит/с. В настоящий момент оборудование способно мультиплексировать до 32 оптических каналов 10 Гбит/с (STM-64), с общей скоростью передачи 320 Гбит/с. В системе BWS 320G применяется односторонняя передача по одному оптическому волокну с возможностью осуществления передачи в обе стороны с использованием надежной технологии мультиплексирования /демультиплексирования длины волны, технологии оптического усиления на волокне, легированном эрбием, технологии стабилизации длины волны, технологии компенсации дисперсии, технологии объединенной системы сетевого управления и технологии независимого канала управления и т.д. Это оборудование может быть построено по различным топологиям, таких как «точка — точка», «цепь», «кольцо», и может применяться для передачи информации как по магистральным каналам, так и в локально-вычислительных сетях (LAN).

В табл. 1.8–1.9 приведены параметры оптического демультиплексора и линейного усилителя оборудования OptiX BWS 320G.

Таблица 1.8

Параметры оптического демультиплексора

Название параметра	32-канальный демультиплексор	16-канальный демультиплексор
Разнесение каналов, ГГц	100	100
Вносимые потери, дБ	< 10	< 7
Коэффициент отражения, дБ	< – 40	< – 40
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	< 0,5
Максимальная разница входных потерь канала, дБ	< 3	< 3
–1дБ полоса пропускания, нм	> 0,2	> 0,2
–20 дБ полоса пропускания, нм	< 1,4	< 1,4
Тип	AWG	Тонкопленочный

Таблица 1.9

Параметры линейного усилителя оптической мощности

Название параметра	32-канальная система		
	8x22 дБ	5x30 дБ	3x33 дБ
Область усиления, нм	1535–1561	1535–1561	1535–1561
Коэффициент шума (NF), дБ	< 5,5	< 5,5	< 5,5
Входная отражательная способность, дБ	< –30	< –30	< –30
Максимальная мощность на выходе, дБм	20	20	20
Время реакции системы усиления при вводе/выводе каналов, мс	< 10	< 10	< 10
Коэффициент усиления, дБ	22 ~ 25	29 ~ 32	32 ~ 35
Неравномерность АЧХ, дБ	< 2	< 2	< 2
Величина поляризационной дисперсии, пс	–	–	–
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	< 0,5	< 0,5

### 1.5.3. Оборудование SpectralWave 40/80 DWDM System (NEC)

Система SpectralWave 40/80 разработана для реализации магистрального узла, способного обеспечить гибкую и поэтапную организацию системы DWDM. Система SpectralWave 40/80 обладает пропускной способностью до 800 Гбит/с. Она поддерживает до 40 длин волн в полосе *C* и обеспечивает открытый интерфейс в любой комбинации сигналов STM-64, STM-16, STM-4, STM-1 и 100 Мбит/с ~ 1,25 Гбит/с. Миграция от 40 до 80 длин волн может легко осуществляться в работающей системе объединением полос *C* и *L*. Эти особенности позволяют организовывать мультисервисные широкополосные сети для предоставления широкого спектра растущих потребностей, таких как более скоростная передача голоса, данных, видео- и других видов информации одновременно. Система SpectralWave 40/80 контролируется системой управления INC-100MS производства NEC, которая является интегрированной системой управления для оборудования WDM и SDH фирмы NEC.

### 1.5.4. Оборудование Alcatel 1640WM (Alcatel)

Мультиплексор с разделением по длинам волн Alcatel 1640WM (WM — Wavelength Multiplexer) представляет собой масштабируемое гибкое решение WDM для создания оптических сетей сверхбольшой пропускной способности и протяженности с организацией до 80, а в перспективе — до 240 оптических каналов. Данная система разработана для удовлетворения растущих потребностей в большем и более гибком диапазоне и является идеальным средством для создания оптических терминальных мультиплексоров, являющихся частью сетей с топологией «точка — точка» и оптических мультиплексоров ввода/вывода



(OADM), предназначенных для использования в сетях с топологией «много точек — много точек»..5.5. Сравнительные характеристики оборудования

В табл. 1.10 представлена сравнительная характеристика оптических мультиплексоров ввода/вывода рассмотренных выше WDM-систем.

Таблица 1.10

Характеристики мультиплексоров ввода/вывода

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei)	Spectral Wave 40/80 DWDM System (NEC)	1640 WM (Alcatel)	Accelink tec.(AWG DWDM Module)	«Пуск» (НТО «Ирэ-Полус»)
Разнесение каналов, ГГц	100	–	50	100	50
Вносимые потери, дБ	< 10	14	–	5,5	8
Коэффициент отражения, дБ	< –40	–	–	– 45	– 30
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	–	–	0,5	0,5
Максимальная разница входных уровней, дБ	< 3	–	–	1	–
–1дБ полоса пропускания, нм	> 0,2	–	–	> 0,4	> 0,2
–20 дБ полоса пропускания, нм	< 1,4	–	–	< 1,2	< 0,32
Число каналов	16/32	16	16	40	40
Тип мультиплексора	тонко-пленочный	AWG	тонко-пленочный	AWG	тонко-пленочный

В табл. 1.11 дана сравнительная характеристика терминальных оптических мультиплексоров.

Таблица 1.11

Характеристики терминальных мультиплексоров

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei)	Spectral Wave 40/80 DWDM System (NEC)	«Пуск» (НТО «Ирэ-Полус»)
Вносимые потери, дБ	< 17	14	12
Коэффициент отражения, дБ	< – 40	–	–30

Поляризационные потери, дБ	< 0,5	–	0,5
Максимальная разница входных уровней, дБ	< 3	–	–
Область прозрачности, нм	1530–1570	1530–1562	
Число каналов	32	16	40
Тип мультиплексора	AWG	AWG	

В табл. 1.12 представлена сравнительная характеристика оптических линейных усилителей рассмотренных выше WDM-систем передачи.

Таблица 1.12

Характеристики оптических линейных усилителей

Фирма	Optix BWS 320G (Huawei Company)	SpectralWave 40/80 DWDM System (NEC)	1640 WM (Alcatel)	«Пуск» (НТО «Ирэ-Полос»)
Число каналов	32	40	80	–
Диапазон мощности на входе, дБм	–30 ÷ –13	–22,5 ÷ 2,5	–	–36 ÷ +10
Коэффициент шума (NF), дБ	< 5,5	6–7	5	7
Максимальная мощность на выходе, дБм	20	8–21	28	3,5–27
Коэффициент усиления, дБ	32–35	30–33	20	15–30
Неравномерность АЧХ, дБ	< 2	< 2	< 1	2
Поляризационные потери, дБ	< 0,5	–	–	–

## 2. МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРАХ

### 2.1. Принцип действия и структура мультиплексора

Принцип действия данного мультиплексора/демультиплексора основан на применении интерференционных (тонкопленочных) фильтров (thin films). Интерференционный фильтр состоит из нескольких чередующихся слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных на прозрачную подложку (рисунок. 2.1). Прозрачный диэлектрик имеет точный показатель преломления, который может изменяться от 1.42 до 2.0 (точность до 6 знаков после запятой), а разность показателей преломления обычно составляет порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$ . Толщина структуры  $L_{TF}$  обычно составляет несколько десятков миллиметров.

Интерференционный фильтр, отражает заданный интервал длин волн и пропускает все остальные. Для определения этого интервала необходимо рассчитать следующие параметры фильтра: показатели преломления ( $n_1, n_2$ ), толщину периодической структуры –  $L$ , период следования слоёв –  $\Delta_{TF}$  и определить угол падения светового пучка на фильтр –  $\theta_{TF}$ .

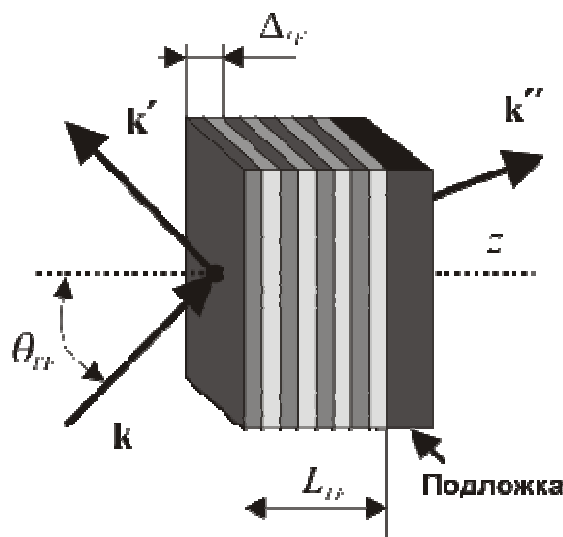


Рисунок 2.1 – Конструкция интерференционного фильтра, где  $\blacksquare$  и  $\square$  – слои с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ ,  $L_{TF}$  – толщина структуры,  $\Delta_{TF}$  – период структуры,  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{k}'$ ,  $\mathbf{k}''$  – волновые вектора падающей, отражённой и прошедшей световых волн,  $\theta_{TF}$  – угол падения волны.

Расчётные формулы для определения параметров фильтра приведены в литературе [1] а техника нанесения слоев хорошо известны в оптической промышленности, что позволяет создавать недорогие фильтры с различными спектральными свойствами.

Тонкопленочные фильтры имеют полосу пропускания достаточную для использования в системах WDM с 16-ю и 32-мя каналами.

На рисунке 2.2 приведена структурная схема оптического мультиплексора/демультиплексора, состоящая из набора тонкопленочных фильтров, каждый

из которых добавляет/выделяет из общего сигнала один информационный. Фильтры расположены под наклоном  $\theta_{TF}=45^\circ$  к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в общий сигнал.

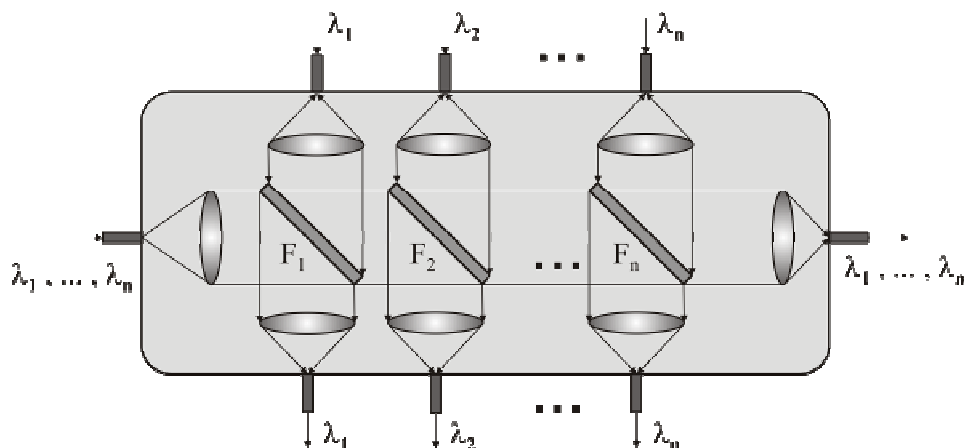


Рисунок 2.2 – Мультиплексор/демультиплексор на основе многоступенчатой системы тонкопленочных фильтров, где  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – набор фильтров, настроенных каждый на свою длину волны.

На рисунке 2.3 представлена структурная схема модуля мультиплексора/демультиплексора для выделения/ответвления одного канала из группового сигнала. Основу модуля составляют два одинаковых интерференционных фильтра находящихся в разных плечах интерферометра Маха-Цендера [2].

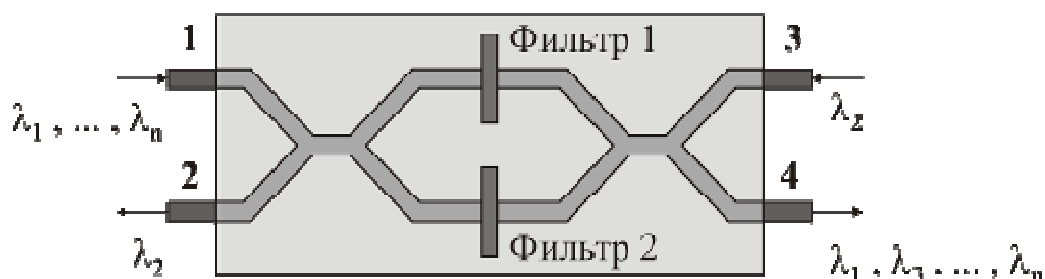


Рисунок 2.3 – Модуль мультиплексирования/демультиплексирования одного канала, на основе интерференционных фильтров и интерферометра Маха-Цендера.

Рассмотрим принцип действия этого устройства на примере выделения второго канала с  $\lambda_2$ . Групповой сигнал подается на вход **1**, делится поровну и попадает на фильтры, для которых условие Брегга выполняется для оптической несущей второго канала. Далее сигнал второго канала отражается от фильтра, вновь попадает на направленный ответвитель, где когерентно складывается и поступает на вход **2**. Этот модуль может так же добавлять сигнал с заданной несущей (в данном случае с  $\lambda_2$ ) в групповой сигнал, через порт **3**. Структурная схема демультиплексора на основе этого модуля, представлена на рисунке 2.4.

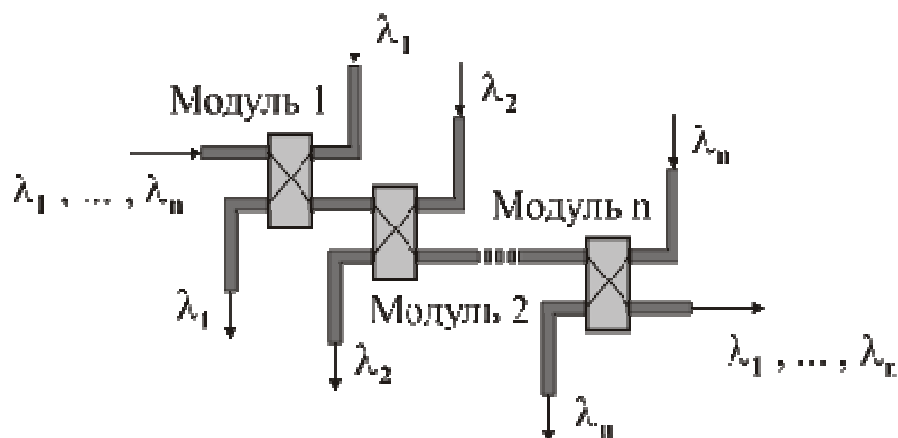


Рисунок 2.4 – Мультиплексор/демультиплексор на основе интерферометров Маха-Цендера.

К недостаткам демультиплексоров на основе этих модулей можно отнести условие точного равенства плеч у интерферометра Маха-Цендера.

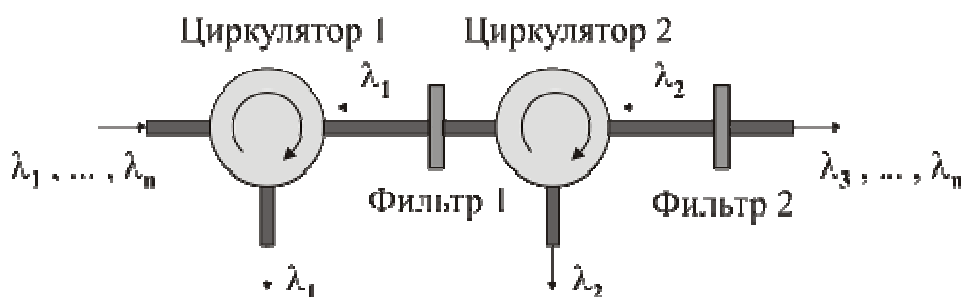


Рисунок 2.5 – Демультиплексор на основе циркулятора.

Часто, при построении демультиплексоров, используется структурная схема изображённая на рисунке 2.5. Из группового сигнала фильтр отражает обратно только один канал, который затем отводится с помощью циркулятора.

Данная схема позволяет изготавливать интерференционный фильтр непосредственно в оптическом (фоточувствительном) волокне, как показано на рисунке 2.6. Такая конструкция называется *волоконная решётка*.

Волокно можно сделать фоточувствительным, если в него добавить примеси германия. Затем это волокно подвергают воздействию ультрафиолетового света, что вызывает изменения показателя преломления в сердцевине волокна. Обычно решётка создаётся с помощью облучения волокна двумя интерферирующими ультрафиолетовыми лучами.

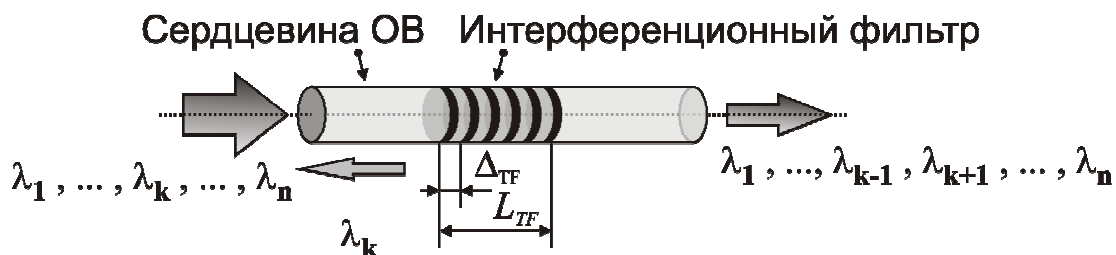


Рисунок 2.6 – Конструкция интерференционного фильтра, выполненного в оптическом волокне (волоконная решётка).

Для производства решеток также может быть использована фазовая маска, которая расщепляет пучок ультрафиолетового света на различные дифракционные порядки, которые, интерферируя, создают решетку внутри

## 2.2. Математическая модель

Расчёт основных характеристик интерференционного фильтра основан на теории Брегговского отражения и представляет собой типичный пример связи между противоположно направленными модами [1].

На каждой границе раздела, часть падающего светового пучка отражается, вследствие различия показателей преломления. Отраженные волны интерферируют с падающей волной и в зависимости от длины оптической волны, усиливаются либо подавляются (рисунок 2.7).

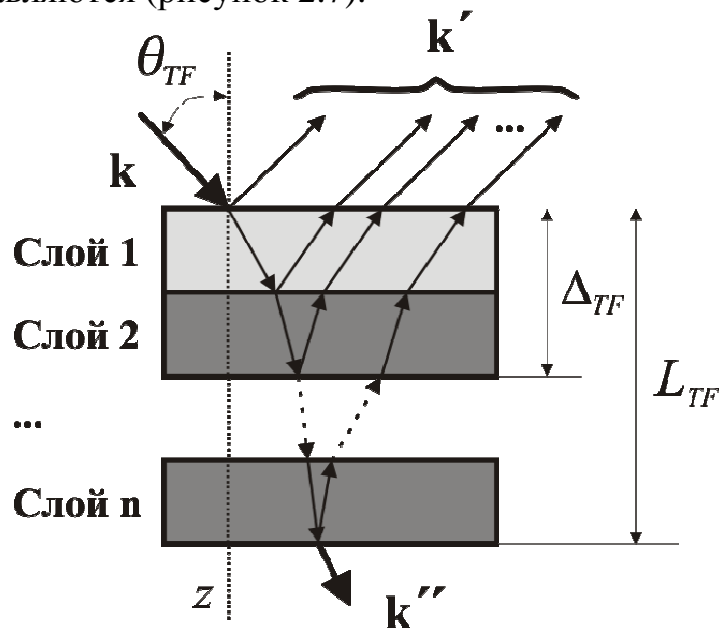


Рисунок 2.7 – Брегговское отражение

В математической модели интерференционного фильтра, предположим, что толщина всех слоев одинакова, а зависимость диэлектрической проницаемости от  $z$  имеет вид:

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} e_0 n_2^2, & 0 < z < \frac{1}{2} \Delta_{TF} \\ e_0 n_1^2, & \frac{1}{2} \Delta_{TF} < z < \Delta_{TF} \end{cases} \quad (2.1)$$

Нормальные моды невозмущенной среды представляют собой плоские волны  $e^{-ikr}$  с волновым числом, определяемым выражением:

$$k(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{n_1^2 + n_2^2}{2}} \quad (2.2)$$

В соответствии с состоянием поляризации эти плоские волны подразделяются на *TE*- и *TM*-волны, между которыми нет связи, поскольку как возмущенная так и невозмущенная диэлектрические проницаемости являются ска-

лярными величинами. Следовательно, связь между волнами может быть, только если они имеют одинаковые состояния поляризации. Это возможно лишь для случая противоположно направленных мод, поскольку для одинаково направленных мод условие фазового синхронизма вообще не выполняется.

Характер модовой связи как для  $TE$ -, так и для  $TM$ -волн аналогичен. Отличие состоит только в том, что они имеют разные значения постоянной связи, которая вычисляется согласно выражениям:

$$\mathbf{K}(\lambda) = \begin{cases} \frac{i}{m\lambda \cos \theta_{TF}} \sqrt{\frac{2}{n_2^2 + n_1^2} (n_2^2 - n_1^2)} & (TE - \text{волна}) \\ \frac{i}{m\lambda \cos \theta_{TF}} \sqrt{\frac{2}{n_2^2 + n_1^2} (n_2^2 - n_1^2)} \cos \theta_{TF} & (TM - \text{волна}) \end{cases} \quad (2.3)$$

Постоянные связи отличаются лишь направляющим множителем  $\cos(2\theta_{TF})$ , который равен косинусу угла между векторами поляризации  $TM$ -волн. Для  $TM$ -волн при  $\theta_{TF} = 45^\circ$ , постоянная связи обращается в нуль. Это соответствует нулевому отражению  $TM$ -волн при угле Брюстера.

Величина фазового рассогласования  $\Delta\beta(\lambda)$  (определяет, при каком  $\lambda$  будет выполняться условие Брегга), определяется выражением:

$$\Delta\beta(\lambda) = 2k(\lambda) \cos \theta_{TF} - m \left( \frac{2\pi}{\Delta_{TF}} \right) \quad (2.4)$$

В соответствии с этим выражением, брегговское отражение четных порядков отсутствует, поскольку при  $m=2,4,6$ , и т.д.,  $k=0$ . Это соответствует случаю, когда толщина каждого слоя составляет целое число длин волн, что приводит к нулевому отражению.

Для того чтобы получить выражение для коэффициента отражения интерференционного фильтра, предположим, что для света, падающего при  $z=0$ , выполняются следующие граничные условия:  $A_1(0)=1$ ,  $A_2(L)=0$ , где  $A_1$  и  $A_2$  – нормированные амплитуды падающей и отражённой волн.

Коэффициент матрицы передачи для  $i$ -ого канала демультиплексора (коэффициент отражения, аппаратная функция или спектр отражения) определяется следующим образом:

$$T_i = \left| \frac{A_2(0)}{A_1(0)} \right|^2, \quad (2.5)$$

где  $A_1(0)$  и  $A_2(0)$  – амплитуды падающей и отражённой волн. Решая уравнения связанных мод, получим:

$$T_i(\lambda) = \frac{K(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot sh^2 s(\lambda) L_{TF}}{s(\lambda)^2 ch^2 s(\lambda) L_{TF} + \left( \frac{\Delta\beta(\lambda)}{2} \right)^2 sh^2 s(\lambda) L_{TF}}, \quad (2.6)$$

где  $s(\lambda)$  дается выражением  $s(\lambda)^2 = K(\lambda) \cdot K(\lambda) - (\Delta\beta(\lambda)/2)^2$ .

Таким образом, аппаратная функция (коэффициент отражения) интерференционного фильтра рассчитывается по формуле (2.6). Она состоит из основного пика с отчетливым максимумом и ряда побочных пиков.

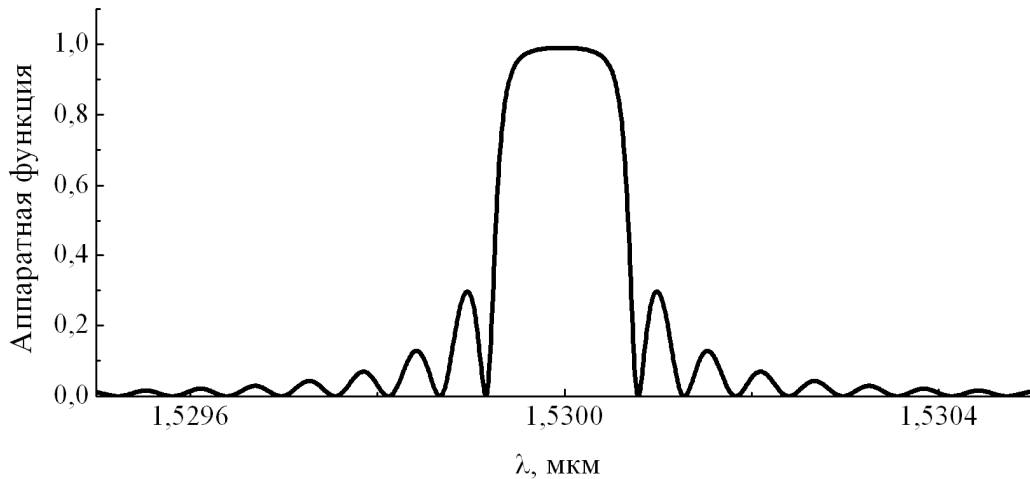


Рисунок 2.8 – Типичный вид аппаратной функции интерференционного фильтра.

На рисунке 2.8, изображена аппаратная функция интерференционного фильтра, рассчитанного согласно выражению 2.6 со следующими параметрами:  $n_1=3.47$ ,  $n_2=3.4704$ ,  $L_{TF}=5.725$ мм,  $\theta_{TF}=0^\circ$ ,  $\Delta_{TF}=0.220448$ мкм. По приведенному графику можно определить полосу пропускания канала ( $\Delta\lambda$ ) – 0.14нм.

### 2.3. Расчет основных оценочных характеристик

Для того чтобы построить демультиплексор на основе интерференционных фильтров, по какой либо из структурных схем, изображённых на рисунках 2.2, 2.4, либо 2.6, необходимо рассчитать некоторые конструкционные параметры этих фильтров, в соответствии с заданными требованиями к разрабатываемому демультиплексору. Определим эти параметры.

#### Центральная длина отражённой оптической волны $\lambda_i$

(где,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – число каналов демультиплексора)

Прежде всего, каждый фильтр должен быть настроен на свою длину волны  $\lambda_i$ , для выделения из группового сигнала одного информационного канала. Это означает, что на заданной длине волны, коэффициент  $T_i$  должен быть максимальным, что достигается при  $\Delta\beta(\lambda_i)=0$ , т.е. когда выполняется условие Брэгга:

$$T(\lambda_i)_{\max} = th^2(|K(\lambda_i)|L_{TF}) \quad (2.7)$$

Т.к. речь идёт о фильтре настроенном на отражение центральной длины волны  $\lambda_i$ , то индекс  $i$  у коэффициента передачи опускаем. Из этого выражения найдём  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = \sqrt{2} \cdot \Delta_{TF,i} \cdot \sqrt{n_{1i}^2 + n_{2i}^2} \cdot \cos \theta_{TF,i} \quad (2.8)$$

Видно, что на центральную длину отражённой волны влияют все конструкционные параметры фильтра, кроме толщины структуры  $L_{TF}$ . Для приведённых структурных схем демультиплексоров, угол  $\theta_{TF,i}$  фиксированный (либо  $0^\circ$ , либо  $45^\circ$ ). Показатели преломления, кроме величины фазовой расстройки входят и в выражение постоянной связи, следовательно, оказывают влияние и на



полосу пропускания фильтра. Таким образом, у показателей преломления и у угла наклона фильтра индекс  $i$  можно опустить, а для настройки  $i$ -ого фильтра на отражения спектра с заданной центральной длиной волны  $\lambda_i$ , (согласно частотному плану ITU-T), необходимо подобрать для него только период структуры  $\Delta_{TF,i}$ , который однозначно определяется выражением 2.8. Согласно этому выражению, фильтр, построенный на основе параметров, соответствующих аппаратной функции, изображенной на рис.2.8, отражает спектр с центральной длиной волны равной 1.53мкм.

### **Ширина полосы пропускания ( $\Delta\lambda$ )**

Ширина полосы пропускания фильтра определяет переходные помехи в демультимплексоре. Чем она уже, тем большее число каналов можно разместить в одном и том же частотном диапазоне. На ширину полосы пропускания интерференционного фильтра оказывает влияние значение постоянной связи, в которую входит разностью показателей преломления  $\Delta n$  и толщина структуры  $L_{TF}$ .

Важно подобрать такие значения этих параметров, чтобы коэффициент отражения для  $\lambda_i$  был максимальным (т.е. близок к единице), а ширина полосы пропускания фильтров такая, что переходные помехи  $P_i$  у демультимплексора будут не более заданных (приложение Б).

Таким образом, чтобы найти максимальное отражение, при заданной центральной длине волны  $\lambda_i$  необходимо решить уравнение:

$$T_{\max}(\lambda_i) = 0.999 \quad (2.9)$$

Как было сказано выше, на максимальное отражение и ширину полосы пропускания существенное влияние оказывает длина периодической структуры  $L_{TF}$  и разность показателей преломления  $\Delta n = |n_2 - n_1|$ . Чем уже должна быть ширина полосы пропускания, тем больше должно быть  $L_{TF}$  и меньше  $\Delta n$ . Следовательно, уравнение 2.9 можно переписать в виде:

$$T_{\max}(\lambda_i, L_i, \Delta n) = 0.999 \quad (2.10)$$

Из этого уравнения можно выразить только толщину структуры  $L_{TF,i}$ , при заданном  $\Delta n$ :

$$L_{TF,i} = \frac{\operatorname{ath}(\sqrt{0.99})}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda_i \cdot \cos(\lambda_i) \cdot \sqrt{n_2^2 + n_1^2}}{|n_2^2 - n_1^2|} \quad (2.11)$$

Таким образом, для достижения у демультимплексора заданных переходных помех, необходимо у фильтров варьировать величину  $\Delta n$ , а толщина структуры для  $i$ -ого фильтра будет определяется выражением 2.11.

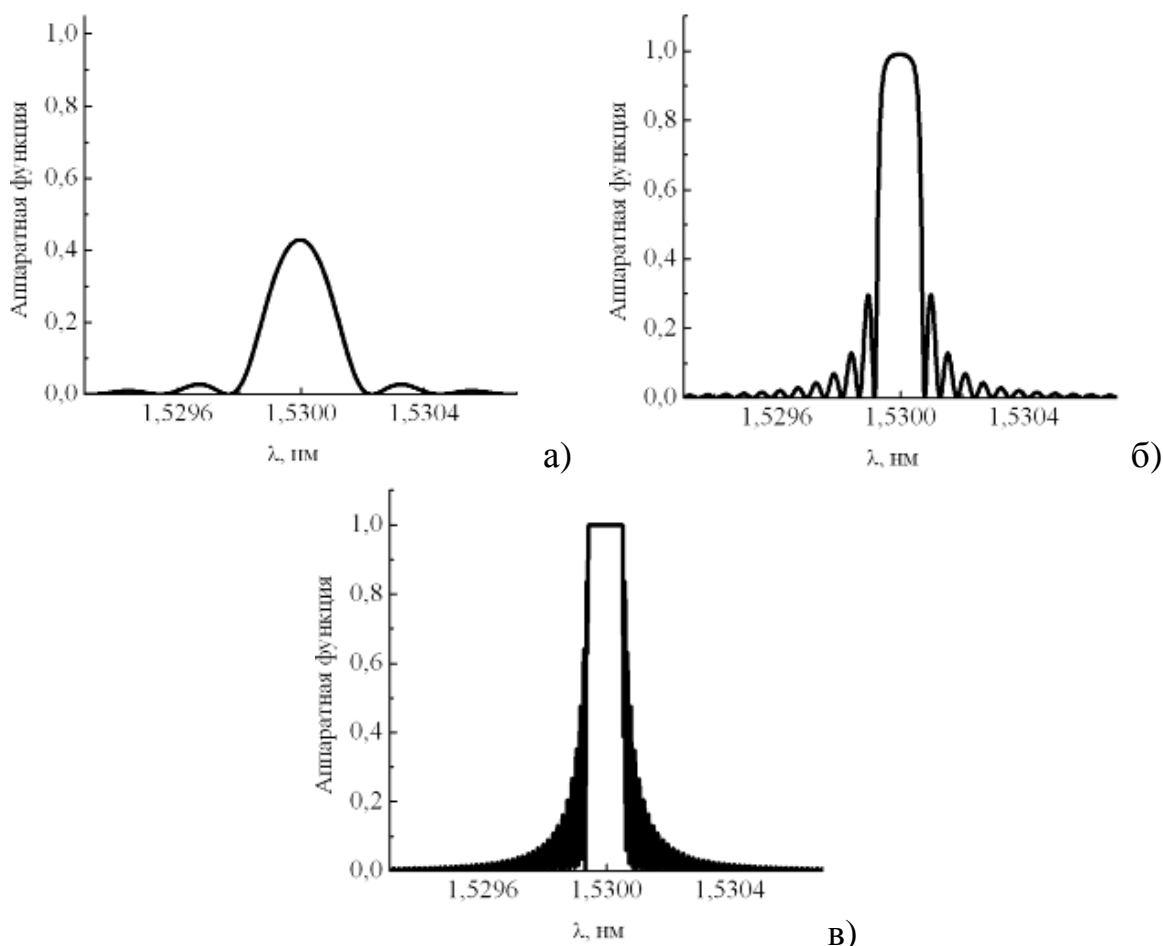


Рисунок 2.9 – Аппаратные функции тонкоплёночных фильтров, рассчитанных при различных значениях  $L_{TF}$  (мкм): а) 1.5, б) 5.725, в) 20.

На рисунке 2.9, изображены аппаратные функции фильтров ( $n_1=3.47$ ,  $n_2=3.4704$ ,  $\theta_{TF}=0^\circ$ ,  $\Delta_{TF}=0.220448$  мкм.), настроенных на центральную длину волны 1.53 мкм, при различных значениях  $L_{TF}$ .

У зависимости изображённой на рисунке 2.9а, толщина структуры рассчитана по формуле (2.27) ( $L_{TF}=5.725$  мкм). Эта толщина является оптимальной. На рисунке 2.9б, зависимость рассчитана при меньших значениях толщины, что сказывается на коэффициенте отражения, а на 2.9в при больших, что приводит к насыщению.

### Вывод

Таким образом, для того чтобы рассчитать технические и конструкционные параметры демультиплексор на основе интерференционных фильтров необходимо:

1. Определить угол падения светового пучка на фильтры  $\theta_{TF}$ , исходя из схемы построения демультиплексора (рисунки 2.2, 2.4, 2.6);

2. Исходя из частотного плана ИТУ-Т, выбрать центральные частоты информационных каналов ( $\lambda_i$ ) и число каналов ( $\mathbf{n}$ ).
3. Рассчитать для каждого  $i$ -ого фильтра значения  $\Delta_{TF,i}$  по формуле (2.8).
4. Рассчитать значение  $L_{TF,i}$  по формул (2.11).
5. Определить для фильтров значения полосы пропускания  $\Delta\lambda$ .
6. Задать для фильтров оценочные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$ , исходя из стандартных границ для показателей преломления и величины  $\Delta n$ .
7. Варьируя значение  $\Delta n$  добиться, чтобы максимальная переходная погрешность  $P_{max}$ , была не больше чем заданная в техническом задании ( $P_0$ ).

Данную последовательность действий поясняет блок-схема на рисунке 2.10.

На рисунке 2.11 изображена аппаратная функция демультиплексора на четыре канала, для частотного плана 100 ГГц, рассчитанная по вышеприведённой схеме. Максимальная переходная погрешность для него составляет -23 Дб.

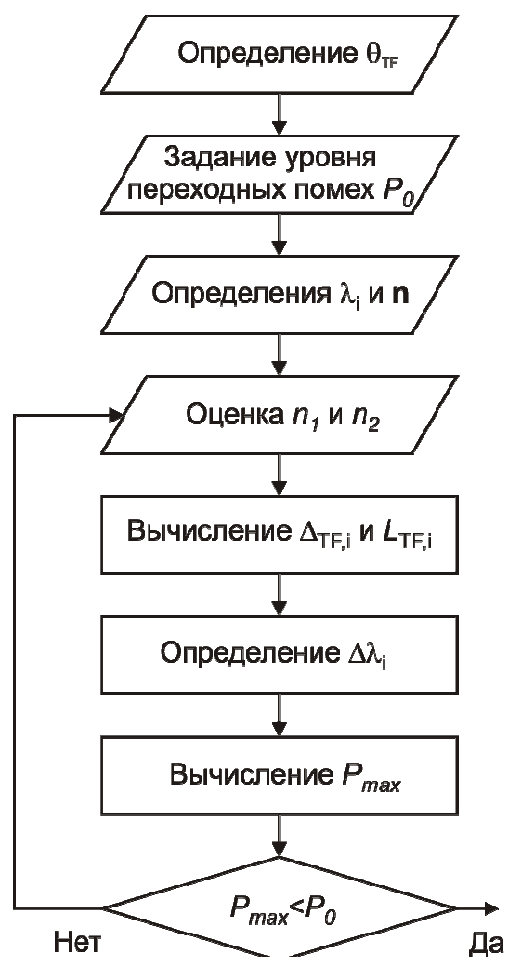


Рисунок 2.10 – Блок-схема расчета демультиплексора на основе интерференционных фильтров.

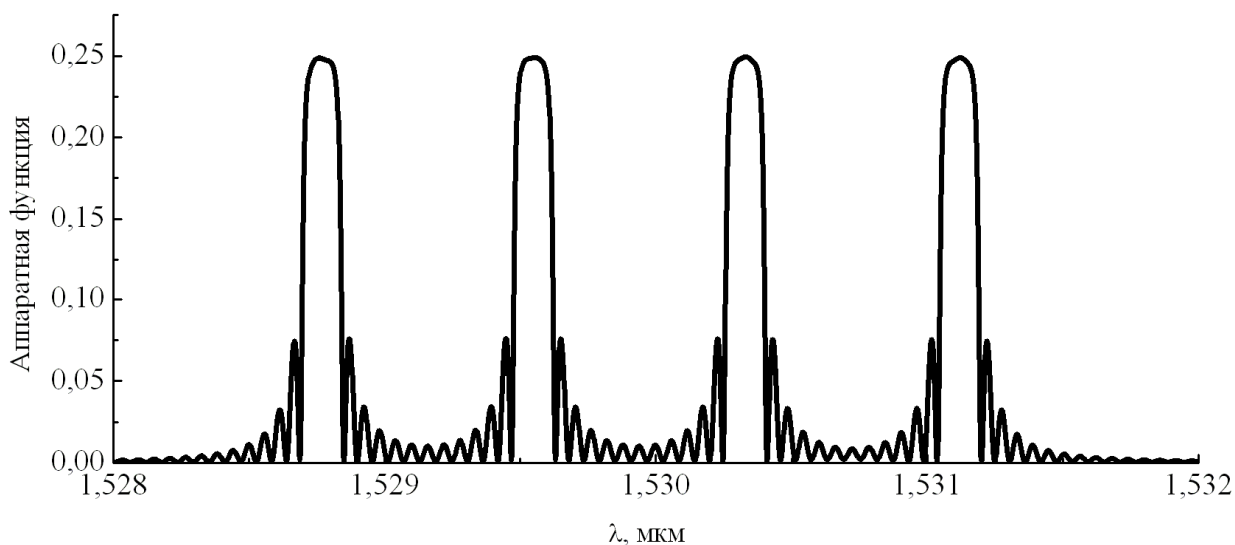


Рисунок 2.11 – Аппаратная функция демультиплексора на основе интерференционных фильтров.

### 3. МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ НА ФИЛЬТРАХ ФАБРИ – ПЕРО

#### 3.1. Принцип действия и структура мультиплексора

Два полупрозрачных зеркала, расположенных на некотором расстоянии друг от друга образуют резонатор Фабри–Перро (рисунок 3.1).

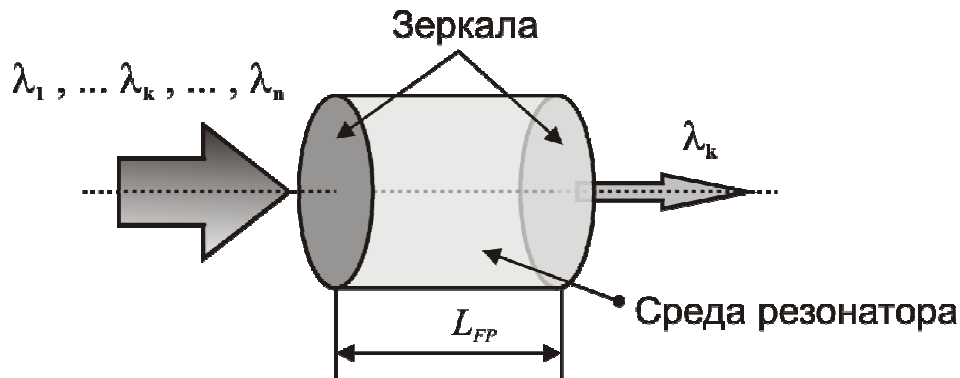


Рисунок 3.1 – Конструкция фильтра на основе резонатора Фабри–Перро, где  $L_{FR}$  – длина резонатора.

Отраженный луч внутри резонатора многократно отражается от зеркал и если  $L_{FR}$  кратно  $\lambda_k/2$ , то все лучи, проходящие через правое зеркало, оказываются в фазе. Длины оптических волн  $\lambda_k$  называются резонансными.

Данная конструкция очень чувствительна к погрешностям изготовления. Наличие очень узких максимумов приводит к тому, что при незначительном отклонении длины резонатора от заданной, пик пропускания существенно смещается. Особенно критичны к погрешности длины резонатора фильтры с более высокими коэффициентами отражения зеркал.

Полоса пропускания таких фильтров достаточно широкая по сравнению с фильтрами на плёнках, а аппаратная функция имеет периодический характер, что делает их применение в WDM системах с большой плотностью размещения каналов, практически невозможным.

Для фильтров Фабри–Перро можно предложить схему, показанную на рисунке 3.2. С оптического волокна сигнал поступает на набор фильтров, настроенные каждый на «свою» оптическую несущую.

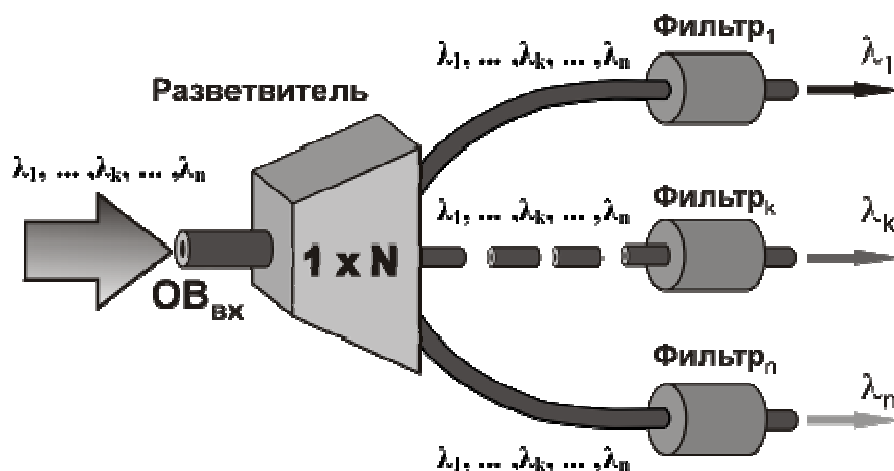


Рисунок 3.2 – Схема оптического демультиплексора многоволнового сигнала.

Интересной особенностью фильтра Фабри-Перро является возможность его динамической настройки на заданную длину волны путём изменения расстояния между зеркалами. Но высокую разрешающую способность можно реализовать только в том случае, когда коэффициент отражения зеркал близок к единице.

### 3.2. Математическая модель

Коэффициент матрицы передачи для  $i$ -ого канала демультиплексора построенного на фильтрах Фабри-Перро, определяется следующим выражением :

$$T_i(\lambda) = \frac{(1 - R_{FP})^2}{(1 - R_{FP})^2 + 4R_{FP} \left[ \sin\left(2\pi \frac{L_{FP} \cdot n}{\lambda}\right) \right]^2} \quad (3.1)$$

где,  $R_{FP}$  – коэффициент отражения зеркал,  $n$  – показатель преломления среды резонатора. Также в выражении предполагается, что свет падает нормально на резонатор. Из формулы видно, что спектр пропускания фильтра имеет периодический характер.

Таким образом, коэффициент пропускания фильтра на основе резонатора Фабри-Перро (аппаратная функция или спектр пропускания) рассчитывается по формуле (3.1).

На рисунке 3.3, изображена аппаратная функция фильтра на основе резонатора Фабри-Перро, рассчитанного по формуле (3.1) со следующими параметрами:  $n=1.53$ ,  $L_{FP}=100\text{мкм}$ ,  $R_{FP}=0.9$ .

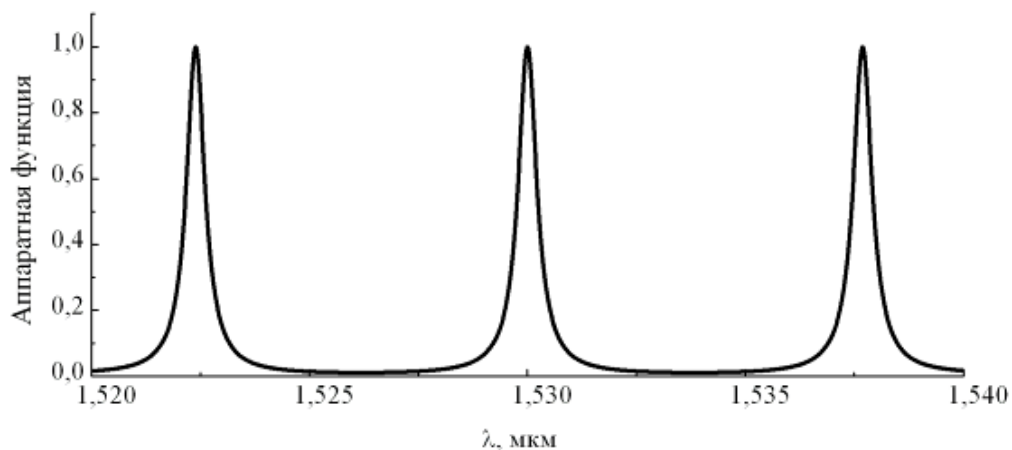


Рисунок 3.3 – Типичный вид аппаратной функции фильтра на основе резонатора Фабри-Перро.

По приведенному графику можно определить полосу пропускания канала – 0.5нм.

### 3.3. Расчет основных оценочных характеристик

Для того чтобы построить демультиплексор по схеме изображённой на рисунке 3.2, необходимо рассчитать некоторые конструкционные параметры

фильтров, в соответствии с заданными требованиями к разрабатываемому демультиплексору. Определим эти параметры.

### Центральная длина отражённой оптической волны $\lambda_i$

Для того чтобы на заданной длине волны  $\lambda_i$  (согласно частотному плану ИТУ-Т) пропускание фильтра было максимально необходимо, чтобы выражение, стоящее под знаком синуса равнялось  $m\pi$ , где  $m=1,2,3, \dots$ , т.е. при длине резонатора выраженной целым числом, для пропускания оптической волны с центром на  $\lambda_i$ , должно выполняться следующее отношение:

$$\frac{n_i}{\lambda_i} = m \quad (3.2)$$

где  $n_i$  – показатель преломления для  $i$ -ого фильтра, а  $\lambda_i$  в берётся в микрометрах.

Согласно этому отношению, фильтр, построенный на основе параметров, соответствующих аппаратной функции, изображенной на рисунке 3.3, пропускает спектр со следующими центральными длинами волн: 1.52239мкм, 1.53мкм, 1.53769мкм (в пределах изменения  $\lambda$  от 1.52 до 1.54 мкм).

### Ширина полосы пропускания

На ширину полосы пропускания фильтра на основе интерферометра Фабри-Перро оказывает влияние коэффициент отражения зеркал  $R_{FP}$  и длина резонатора  $L_{FP}$ . Чем выше коэффициент отражения зеркал и чем больше значение  $L_{FP}$  тем уже будет ширина полосы пропускания.

Из-за периодичности аппаратной функции фильтра, следующий максимум первого канала может попасть в спектр последнего информационного канала (рисунок 3.4). По этому, необходимо рассчитать такую длину резонатора  $L_{FP}$ , чтобы период аппаратной функции был больше свободного спектрального диапазона демультиплексора  $\Delta\lambda_{FSR}$  ( $\Delta\lambda_{FSR} = \lambda_n - \lambda_1$ ). На рисунке 3.4, этот период обозначен как  $\Delta\lambda'_{FSR}$ .

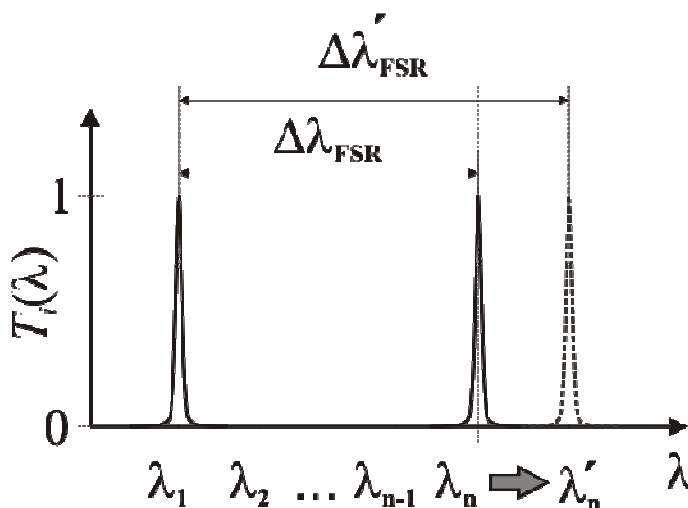


Рисунок 3.4

Длина резонатора, при известном периоде аппаратной функции  $\Delta\lambda'_{FSR}$ , и центральной длине волны  $\lambda_i$  находится из выражения 3.1 и равна:

$$L_{FP,i} = \text{int} \left( \lambda_i \cdot \frac{\Delta\lambda'_{FSR} + \lambda_i}{2 \cdot \Delta\lambda'_{FSR} \cdot n} \right) \quad (3.3)$$

где значения  $\lambda_i$ , и  $\Delta\lambda'_{FSR}$  берутся в микрометрах. Из формулы видно, что наибольшая длина резонатора будет у фильтра настроенного на пропускание последнего канала. Величину  $\Delta\lambda'_{FSR}$  можно оценить по формуле:

$$\Delta\lambda'_{FSR} = \Delta\lambda_{FSR} + \Delta\lambda_k \quad (3.4)$$

где  $\Delta\lambda_k$  – канальный интервал демультиплексора в микрометрах. Данная формула является эмпирической, полученной при условии, что последний канал демультиплексора будет вносить переходную помеху в первый канал не больше чем -25 Дб.

Значение  $R$  обычно лежит в диапазоне от 0.9 до 0.99 и для его оценки можно воспользоваться формулой ( $\Delta\lambda_k$  в микрометрах):

$$R_{FP} = 1 - \sqrt{\Delta\lambda_k} \quad (3.5)$$

Так как канальный интервал для всех фильтров единый, то полученный коэффициент отражения будет справедлив для всех фильтров входящих в демультиплексор.

Формула (3.5) также эмпирическая и получена при условии, что  $i$ -ый канал демультиплексора будет вносить переходную помеху в соседний канал не больше чем -25 Дб.

### Вывод

Таким образом, для того чтобы программно рассчитать демультиплексор на основе фильтров Фабри-Перро необходимо:

1. Исходя из частотного плана ИТУ-Т, выбрать центральные частоты информационных каналов ( $\lambda_i$ ) и число каналов ( $n$ ).
2. Вычислить для каждого фильтра показатель преломления резонатора ( $n_i$ ).
3. Вычислить для каждого фильтра длину резонатора  $L_{FP,i}$ .
4. Оценить коэффициент отражения зеркал резонаторов  $R_{FP}$  по формуле (3.5).
5. Определить для фильтров значения полосы пропускания  $\Delta\lambda$ .
6. Варьируя значения  $R_{FP}$  и  $L_{FP,i}$ , добиться, чтобы максимальная переходная помеха  $P_{max}$ , была не больше чем заданная в техническом задании ( $P_0$ ).

Данную последовательность расчетных этапов поясняет блок-схема на рисунке 3.5.

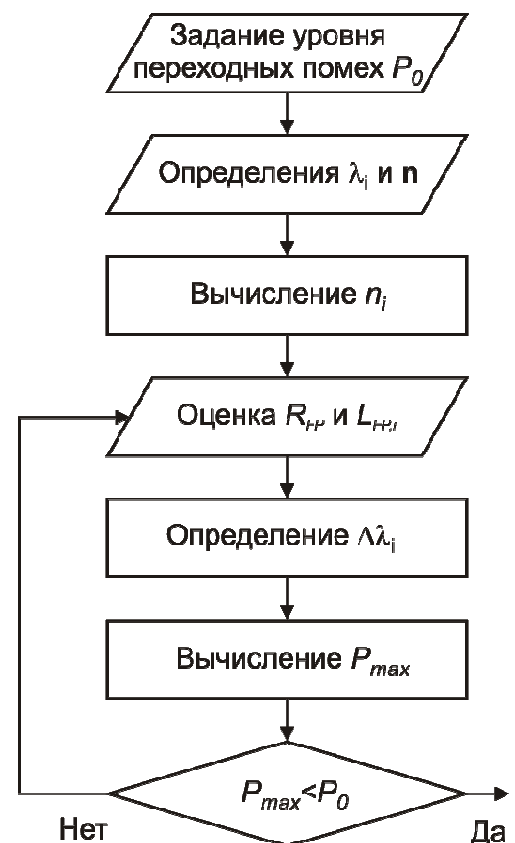


Рисунок 3.5 – Блок-схема расчета демультиплексора на основе фильтров Фабри-Перро.

## 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ РАБОТ

### 4.1. Расчётное задание

1. Исходные данные для выполнения расчетной работы «Моделирование оптического мультиплексора» находятся из таблицы 4.1 по номеру варианту задания, выданного преподавателем..
2. По таблицам ITU-T (Приложение А) найти число каналов  $n$  и центральные частоты  $\lambda_i$ .

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения расчетной работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон длин волн*, нм	1528,77 – 1532,68	1528,77 – 1536,61	1546,12 – 1554,13	1539,77 – 1549,32	1535,82 – 1538,98
$\Delta f_k$ , ГГц	200	200	400	200	100
$P_0$ (Дб)**	20	22	25	26	22
Тип [И.Ф]***	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.
$n_l$ [И.Ф]****	1.458	1.56	1.55	1.458	1.51
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон длин волн*, нм	1549,32– 1553,33	1533,47– 1542,94	1546,12– 1554,13	1535,04– 1557,36	1530,33– 1536,61
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	500	200
$P_0$ (Дб)**	21	19	25	18	24
Тип [И.Ф]***	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.
$n_l$ [И.Ф]****	1.5	1.458	1.59	1.52	1.458
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон длин волн*, нм	1550,92– 1554,13	1550,92– 1560,61	1533,47– 1557,36	1533,47– 1557,36	1541,35– 1550,92
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	600	1000	200
$P_0$ (Дб)**	23	20	18	19	24
Тип [И.Ф]***	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]****	1.557	1.533	1.458	1.55	1.565

\* – центральные максимумы первого и последнего канала;

\*\* – уровень переходных помех, который должен обеспечивать демультиплексор.



- \*\*\* – тип демультиплексора, построенного на интерференционных фильтрах: **И.М-Ц** – Интерферометр Маха-Цендера, **Р.Ф-П.** – резонатор Фабри-Перро, **В.Р.** – волоконная решётка;
- \*\*\* – значение показателя преломления  $n_i$  для демультиплексора построенного на интерференционных фильтрах.
- \* – значение показателя преломления  $n_i$  для демультиплексора построенного на интерференционных фильтрах.

### Исследование оптического демультиплексора на основе интерференционного фильтра.

1. Определить угол падения светового пучка на фильтр, исходя из данной в задании схемы построения демультиплексора.
2. Рассчитать период структуры для всех тонкоплёночных фильтров, входящих в демультиплексор и толщину фильтров для  $\Delta n=10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$ . Толщину всех фильтров считать постоянной, равной толщине центрального фильтра. Результаты расчёта для всех  $\Delta n$  занести в таблицу:

Параметр/№ фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$\Delta_{TF,i}$				
$L_{TF}$				

### Исследование оптического демультиплексора на основе фильтров Фабри-Перро.

1. Найти показатели преломления среды резонатора для каждого фильтра.
2. Оценить значение коэффициента отражения зеркал.
3. Оценить значение длины резонатора для центрального фильтра демультиплексора настроенного на отражение спектра с максимальной центральной длиной волны. Это значение будем считать постоянным для всех фильтров демультиплексора. Оно равно длине последнего фильтра. Все результаты расчёта занести в таблицу:

Параметр/№ фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$n$				
$R_{FP}$				
$L_{FP}$				

## 4.2. Компьютерное моделирование

Осуществляется по программе компьютерного моделирования **WDMEncore** «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри — Перо» [8], предназначенной для расчета и оптимизации характеристик оптических демультиплексоров в учебных целях и описанной в разделе 5.

Исходными данные, заносимыми в программу, являются

- 1) число оптических каналов (1-150);
- 2) центральные длины волн каналов (1400нм - 1600нм);
- 3) для интерференционных фильтров: показатели преломления периодической структуры, толщина и период структуры, угол падения света из торца оптического волокна на мультиплексор, полоса пропускания;
- 4) для фильтров Фабри-Перро: показатель преломления, коэффициент отражения зеркал, толщина структуры, полоса пропускания.

Занести в расчётную программу количество каналов демультиплексора и центральные частоты, отражаемые фильтрами

### Исследование оптического демультиплексора, на основе интерференционного фильтра.

1. Исследовать зависимость максимальных переходных помех ( $P_{max}$ ) от  $\Delta n$ . Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора, при различных значениях  $\Delta n$ , вычисленных в расчётном задании (перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ ). Результаты занести в таблицу:

Параметр / $\Delta n$	$10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
$\Delta\lambda$ (нм)				
$P_{max}$				

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(\Delta n)$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров и рассчитанные графики **переходных** помех, при различных значениях  $\Delta n$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах.

2. Найти оптимальную разницу показателей преломления, при которой максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$ дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации зависимости  $P_{max}(\Delta n)$  найдите такой  $\Delta n$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{max}(\Delta n) = P_0 \pm 1$ дБ. Обозначим его как  $\Delta n_{opt}$ .
3. Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при  $\Delta n_{opt}$ . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультиплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр / № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$\Delta n_{opt i}$				
$\Delta_{TF}$				
$L_{TF, int(n/2)}$				
$\Delta\lambda$ (нм)				
$P_i$				

В отчёте отобразите смоделированный график аппаратной функции демультиплексора и рассчитанный график переходных помех. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

- Для демультиплексора с оптимальными параметрами, пронаблюдать влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

### Исследование оптического демультиплексора, на основе фильтров Фабри-Перро.

- Исследовать зависимость переходных помех от коэффициента отражения зеркал. Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора для двух центральных соседних каналов (каналы с номерами  $\text{int}(\mathbf{n}/2)$  и  $\text{int}(\mathbf{n}/2)+1$ ) при  $R_{FP} = 0.9, 0.95$  и  $0.99$ . Для каждого коэффициента отражения рассчитать длину резонатора. Значение  $\Delta\lambda'_{FSR}$  при этом будет равно:  $\Delta\lambda'_{FSR} = \Delta\lambda_{FSR} + (1-R)^2$ , где  $\Delta\lambda_{FSR}$  в микрометрах. Перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ . Результаты занести в таблицу:

Параметр / $R_{FP}$	0.90	0.95	0.99
$\Delta\lambda$ (нм)			
$L_{FP}$ (мкм)			
$P_{max}$			

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(R_{FP})$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров (только для двух исследуемых каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $R$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах и почему были взяты каналы с номерами  $\text{int}(\mathbf{n}/2)$  и  $\text{int}(\mathbf{n}/2)+1$ .

- Найти оптимальный коэффициент отражения зеркал, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации (либо экстраполяции) зависимости  $P_{max}(R_{FP})$  найдите такой  $R_{FP}$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{max}(R_{FP}) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим его как  $R_{FP, opt}$ .
- Исследовать зависимость переходных помех от длины резонатора. Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора для первого и последнего канала при  $L_{FP} = L_{FP, расчётное}, L_{FP, расчётное} - 10\%$  и  $L_{FP, расчётное} + 10\%$  (перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ ). Коэффициент отражения зеркал для всех  $L_{FP}$  будет  $R_{FP, opt}$ . Результаты занести в таблицу:

Параметр / $L_{FP}$	$L_{FP, расчётное}$	$L_{FP, расчётное} - 10\%$	$L_{FP, расчётное} + 10\%$
$\Delta\lambda$ (нм)			
$P_{max}$			

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(L_{FP})$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров (только для первого и последнего каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $L_{FP}$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах и почему были взяты каналы с первым и последним номерами.

4. Найти оптимальную длину резонатора для последнего фильтра, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации (либо экстраполяции) зависимости  $P_{max}(L_{FP})$  найдите такую  $L_{FP}$ , которая удовлетворяла бы уравнению  $P_{max}(L_{FP}) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим её как  $L_{FP, opt}$ .
5. Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при  $R_{FP, opt}$  и  $L_{FP, opt}$ . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультиплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр/№ фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$n$				
$R_{FP, opt}$				
$L_{FP, opt}$				

В отчёте отобразите смоделированный график аппаратной функции демультиплексора и рассчитанный график переходных помех. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

6. Для демультиплексора с оптимальными параметрами, пронаблюдать влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

### Заключительная часть

Сравнить переходные помехи обоих демультиплексоров. Сделать выводы о возможности построения демультиплексора на интерференционных фильтрах и фильтрах Фабри-Перро.

### Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Краткая теория.
3. Результаты работы – расчеты и графики с пояснениями полученных зависимостей.
4. Выводы по проделанной работе.

## **5. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **5.1. Общее описание**

#### **5.1.1. Функциональное назначение системы, область применения и ограничения**

Программа компьютерного моделирования **WDMEncore** «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри — Перо» предназначена для расчета и оптимизации характеристик оптических демультиплексоров в учебных целях [7]. Данная разработка может быть использована при обучении студентов технических вузов по направлению «Телекоммуникации» как в качестве лабораторной работы, так и в качестве инструмента для расчета и оптимизации данных демультиплексоров при курсовом проектировании волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением (ВОСП-СП), использующих демультиплексоры на основе интерференционных фильтров или фильтров Фабри — Перо в качестве одного из основных элементов.


Программное обеспечение представляет собой пакет программ генерации форм для задания параметров обоих демультиплексоров, отображения результатов расчета и вывода методических рекомендации по работе с гипертекстовой навигацией. Пакет включает 15 вариантов заданий для проведения лабораторных работ, а также прикладные программы по проведению необходимых вычислений, предусматривающих численный расчет преобразований, описывающих волновые процессы в интерференционных фильтрах и фильтрах Фабри — Перо. Ограничения для модели, описывающей работу интерференционного фильтра, является одинаковая толщина всех слоев и отсутствие обратного отражения, а для модели описывающей работу фильтра Фабри -Перо — нормальное падение света из торца оптического волокна на фильтр и отсутствие обратного отражения от фильтра. В пп. 3.2, 3.3 приведены математические модели, положенные в основу программного обеспечения.

#### **5.1.2. Краткое описание системы и ее технические характеристики**

Программа моделирования **WDMEncore** (далее программа) представляет собой компьютерную программу, которая также содержит методическое пособие и руководство пользователя, входного теста и оболочки моделирования. Программа может функционировать под управлением операционных систем Windows всех поколений, начиная с Windows 95. Для нормального функционирования программы компьютер должен быть оснащен не менее чем 16 Мб оперативной памяти и не менее чем 8 Мб свободного места на жестком диске. Сама программа занимает около 20 Мб дисковой памяти и не требует установки.

Оболочка моделирования построена по модульному принципу и предусматривает последовательное компьютерное моделирование каждого типа демультимплексора с возможностью сравнения их работы по результатам вычисления перекрестных помех. В оболочке моделирования предусмотрен тестовый контроль, выполняемый в отдельном окне.

### **5.1.3. Запуск программы и выход из программы**

Запуск программы осуществляется выполнением файла WDMEncore.exe, расположенного в папке WDMEncore. После запуска на экране компьютера появляется главное окно программы. Оно содержит главное меню, панель инструментов, панели для ввода исходных данных, расчетные таблицы и графики. Выход из программы осуществляется нажатием кнопки  в верхнем правом углу главного окна.

## **5.2. Работа с программой**

В дальнейшем предполагается, что пользователь имеет определенные навыки работы в операционной системе Windows 95 или Windows 98.

При работе с программой для перемещения между полями ввода, и нажатий на кнопки удобней всего использовать манипулятор "мышь".

Для осуществления допуска к оболочке моделирования предусмотрен автоматический тестовый контроль, выполняемый в отдельном окне. При этом предусмотрена возможность ввода Ф.И.О. студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Также можно выбрать вариант и номер стартового пункта работы. Всего работа содержит 15 вариантов заданий по 8 пунктов.

В соответствии с выполняемым пунктом задания, текст которого загружается при выборе варианта и номера пункта автоматически, исполнителю необходимо ввести исходные параметры расчета:

Для моделирования демультимплексоров исполнителю необходимо ввести исходные параметры:

- 5) число оптических каналов (1-150);
- 6) центральные длины волн каналов (1400нм - 1600нм);
- 7) для интерференционных фильтров: показатели преломления периодической структуры, толщина и период структуры, угол падения света из торца оптического волокна на мультимплексор, полоса пропускания;
- 8) для фильтров Фабри-Перро: показатель преломления, коэффициент отражения зеркал, толщина структуры, полоса пропускания.

Для заданных параметров производится расчет следующих характеристик для каждого демультимплексора:

1) график аппаратной функции (для интерференционного фильтра - зависимость коэффициента отражения от длины оптической волны, для фильтра Фабри-Перро - зависимость коэффициента прохождения от длины оптической волны);

2) график и таблица перекрестных помех (зависимость перекрестных помех от номера канала).

Настройка фильтра на заданную длину волны производится визуально по графику аппаратной функции, путём изменения внутренних параметров.

Пакет программ также позволяет осуществить оптимизацию внутренних параметров любого из исследуемых демультиплексоров для достижения заданного уровня перекрестных помех.

По результатам расчета заполняются таблицы с информацией, требуемой в задании к выполняемому пункту. После выполнения пункта программа строит необходимые графики в отдельном окне, где также есть возможность для записи выводов по проделанному пункту и перехода к выполнению следующего пункта.

После выполнения последнего пункта задания или по желанию исполнителя в любой момент выполнения работы происходит генерация отчета по форме, принятой в вузе-разработчике программы, включающей информацию об исполнителе работы, требуемые в задании графики (полученные в результате выполнения работы), а также выводы, написанные исполнителем по каждому пункту.

После генерации отчета работа заканчивается. Для выполнения новой работы (другого варианта) необходимо выйти из программы и запустить ее заново.

Далее более подробно остановимся на программных окнах.

### 5.2.1. Главное окно

В главном окне (рисунок 5.1) осуществляется ввод данных и расчёт параметров каждого демультиплексора..

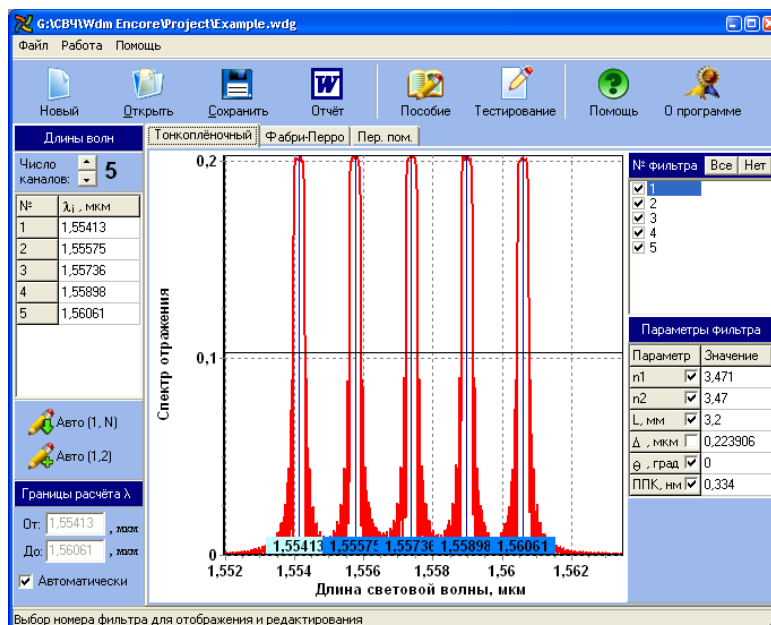


Рисунок 5.1 – Главное окно программы.






Оно состоит из:

- файлового меню, где отображаются все функции программы;

- панели инструментов, где дублируются некоторые важные элементы файлового меню;
- закладок вида моделирования;
- панелей ввода основных параметров демультиплексора;
- области построения графиков.






Так же, при загрузке приложения, появляется окно помощи, где отображаются подсказки по выполняемому пункту лабораторной работы. Главное меню состоит из двух разделов: **Файл**, **Работа** и **Помощь**. Рассмотрим пункты каждого раздела.

### **Файл**



 <i>Новый</i>	Замена исходных данных, данными по умолчанию.
 <i>Открыть файл</i>	Открыть файл с исходными данными. *
 <i>Сохранить файл</i>	Сохранить исходные данные в файл. *
 <i>Отчёт в MSWord</i>	Импортировать результаты моделирования в приложение MSWord.
 <i>Параметры графиков</i>	Параметры, отвечающие за внешний вид отображаемых графиков.

\* Файл с данными имеет расширение .wdg.

### **Работа**

 <i>Пособие</i>	Электронный вариант учебного пособия.
 <i>Тестирование</i>	Прохождение теста.
 <i>Обновить весь диапазон</i>	Пересчитать текущий график по всему диапазону.
 <i>Обновить выбранный диапазон</i>	Пересчитать текущий график по диапазону, выбранному пользователем.
 <i>Копировать график в буфер</i>	Копировать текущий график в буфер обмена в виде битового изображения.

### **Помощь:**

 <i>Помощь</i>	Руководство пользования программой.
 <i>О программе</i>	Информация о разработчиках программы.

## **5.2.2. Панель редактирования центральных частот**

Для ввода числа каналов (**n**) и центральных длин волн ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ), предназначена панель, находящаяся в левой части главного окна (рисунок 5.2). Эти данные являются общими для моделирования демультиплексоров на основе интерференционного и Фабри-Перо фильтров. В верхней части панели, через



счётчик задаётся число каналов демультиплексора, а ниже в таблицу, вводятся центральны длины волн (в микрометрах) исходя из ITU-T плана.

По завершению заполнения таблицы необходимо нажать клавишу *Enter*, либо выбрать пункт файлового меню «*Работа* → *Обновить весь диапазон*». Если пользователь в таблицу ввёл неверные данные, то панель заголовка станет красного цвета.

Ниже таблицы расположены кнопки автоматического заполнения таблицы центральных длин волн:

- *Авто (1,N)* – распределяет равномерно длины волн между первым и последним каналами;
- *Авто (1,2)* – заполняет таблицу длин волн с шагом  $(\lambda_2 - \lambda_1)$ .



Рисунок 5.2

### 5.2.3. Закладки вида моделирования

Для моделирования параметров демультиплексоров, предназначены закладки, расположенные снизу инструментальной панели (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4

Первые две закладки отображают аппаратные функции и параметры демультиплексора на интерференционных (тонкоплёночных) фильтрах и фильтрах Фабри-Перо, а третья – рассчитывает переходные помехи в каждом демультиплексоре и отображает их в табличном и графическом видах.

### 5.3. Моделирование демультиплексора

Первые две закладки моделирования демультиплексора состоят из трёх областей: график аппаратной функции, панель выбора фильтров и панель параметров выбранного фильтра. Рассмотрим эти области более подробно.

**График аппаратной функции демультиплексора (рисунок 5.5).** График отображает саму аппаратную функцию и центральные частоты, занесенные в таблицу, в виде вертикальных линий и числовых подписей снизу. Активный канал (параметры фильтра которого в данный момент можно редактировать) выделяется цветом.

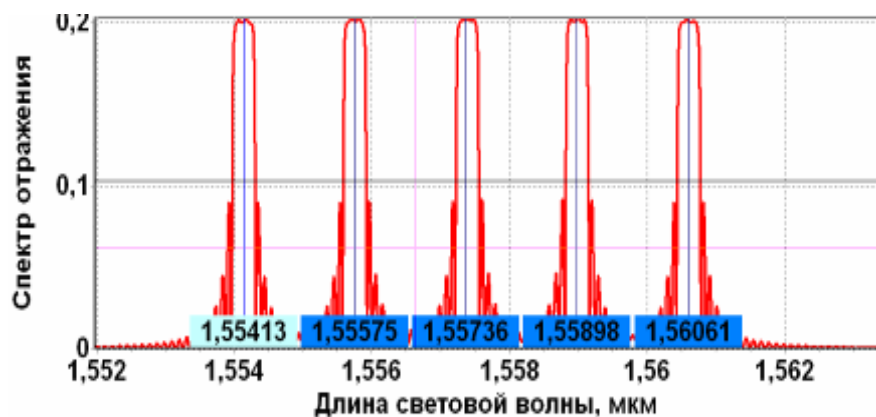


Рисунок 5.5

Границы просмотра длин волн можно изменять (увеличивать часть аппаратной функции), если левой кнопкой мыши, слева на право, выделить необходимый участок на графике (рисунок 5.6).

Границы отображения графика всей аппаратной функции определяются автоматически. Для ручного задания границ отображения необходимо воспользоваться панелью «*Границы расчёта  $\lambda$* » (рисунок 5.7). В однострочные редакторы, при отключенном переключателе «*Автоматически*», заносятся частоты, в пределах которых будет произведён расчёт аппаратной функции. Для перехода обратно в режим автоматических границ, необходимо включить переключатель «*Автоматически*».

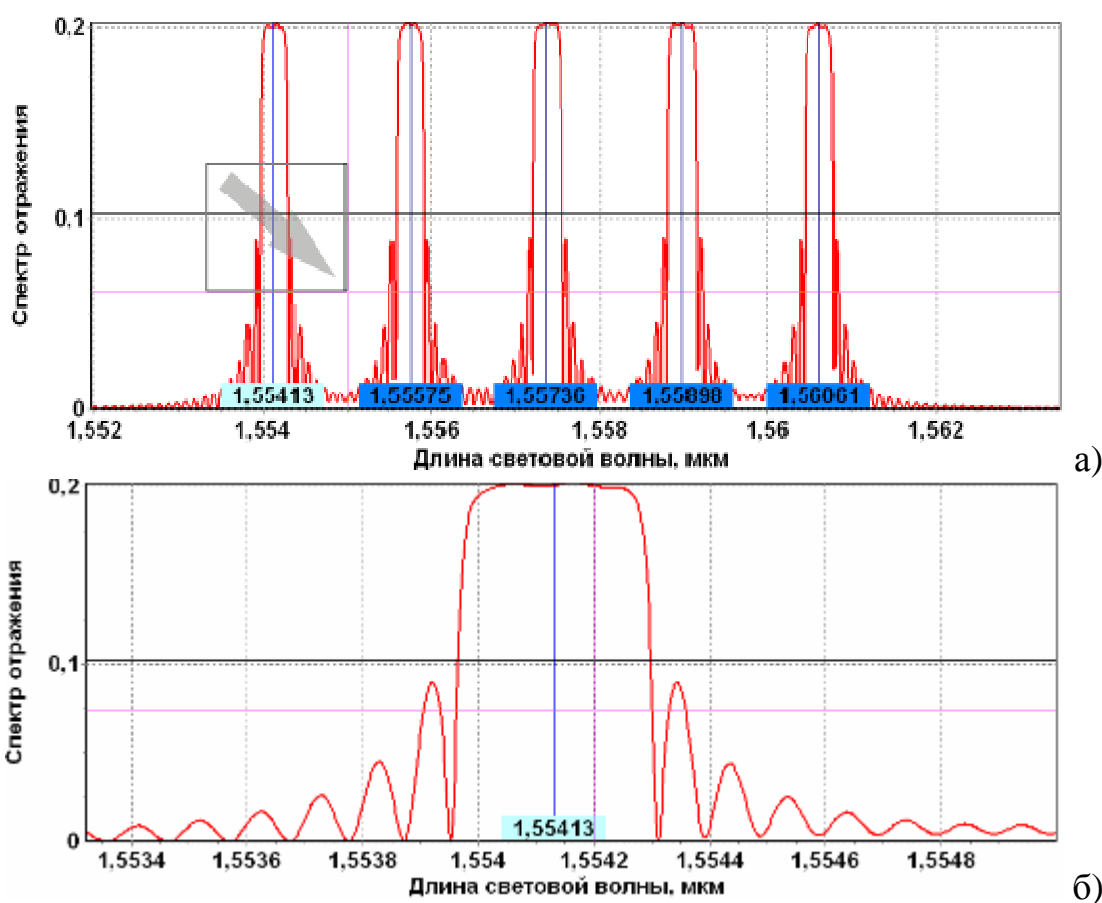


Рисунок 5.6 – Исходный вид аппаратной функции (а) и вид после увеличения (б).

Значение координат по осям X и Y, выводятся автоматически в строку статуса, при перемещении над графиком мышью. При этом на графике, положение курсора будет указано розовым перекрестьем на всю область

Параметры отображения графиков можно изменить в разделе: *Файл* → *Параметры графиков*.

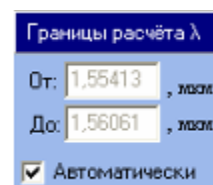


Рисунок 5.7

**Панель выбора фильтров (рисунок 5.8).** Панель служит для выбора из списка, соответствующего фильтра, параметры которого можно модифицировать (выбранный фильтр подсвечивается на панели и на графике аппаратной функции демультимплексора).

Панель позволяет отключать/включать фильтры с помощью независимых переключателей, слева от номера фильтра. Для отображения одного фильтра, необходимо дважды на нём щёлкнуть мышью.

Кнопки «*Все*» и «*Нет*» предназначены для выбора либо для исключения из расчёта всех фильтров.

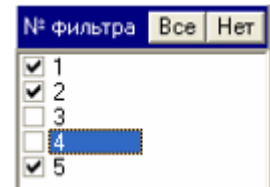


Рисунок 5.8

**Панель параметров выбранного фильтра (рисунок 5.9).** Панель состоит из таблицы, где отображаются параметры выбранного фильтра. Для интерференционных и Фабри-Перо фильтров, набор параметров будет различен.

Напротив каждого параметра расположен независимый переключатель, с помощью которого можно выбирать, какие из параметров будут едиными для всех фильтров. При включенном переключателе, модификация параметра в любом из фильтров, автоматически повлечёт изменение того же параметра и у всех других фильтров.

По завершению модификации параметров необходимо нажать клавишу *Enter*, либо выбрать пункт файлового меню «*Работа* → *Обновить весь диапазон*» или «*Работа* → *Обновить выбранный диапазон*». Если пользователь в таблицу ввёл неверные данные, то панель заголовка станет красного цвета.

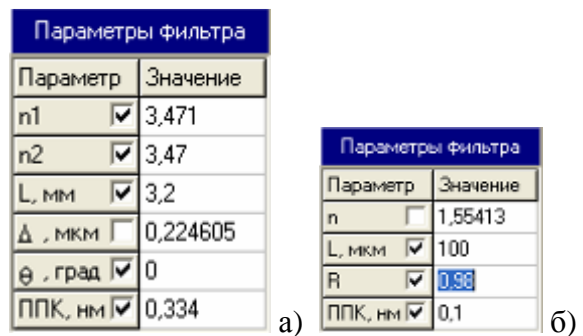


Рисунок 5.9 – набор параметров для интерференционных (а) и Фабри-Перро фильтров (б)

#### 5.4. Расчёт переходных помех

Для расчёта уровня переходных помех ( $P$ ), необходимо определить полосу пропускания ( $\Delta\lambda$ ) каждого фильтра (в панели параметров фильтра обозначена как «*ППК, нм*»). Для этого нужно исключить из расчёта все фильтры кроме выбранного, увеличить аппаратную функцию и удерживая клавишу **Ctrl**, **Shift** или **Alt**, мышью выделить область по уровню 0.5 (рисунок 5.7).

Далее необходимо перейти на третью вкладку программы «**Пер. пом.**» (рисунок 5.8). В ней будут отображены переходные помехи

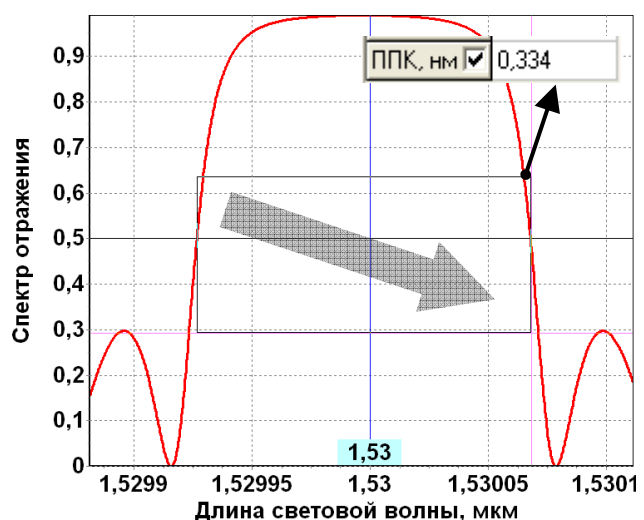


Рисунок 5.7

для того демультимплектора, с какой вкладки перешёл пользователь. Справа (панель «**Каналы**») будет отображён список выбор каналов для расчёта переходных помех (в Дб):

«**Все**» - Расчёт суммарных переходных помех от всех соседних каналов, для всех фильтров

«**1..N**» - Расчёт переходных помех от каждого соседнего канала в отдельности, для выбранного канала. (Суммарная переходная помеха, для текущего канала, отображается в таблице в пункте «**Sum**»).

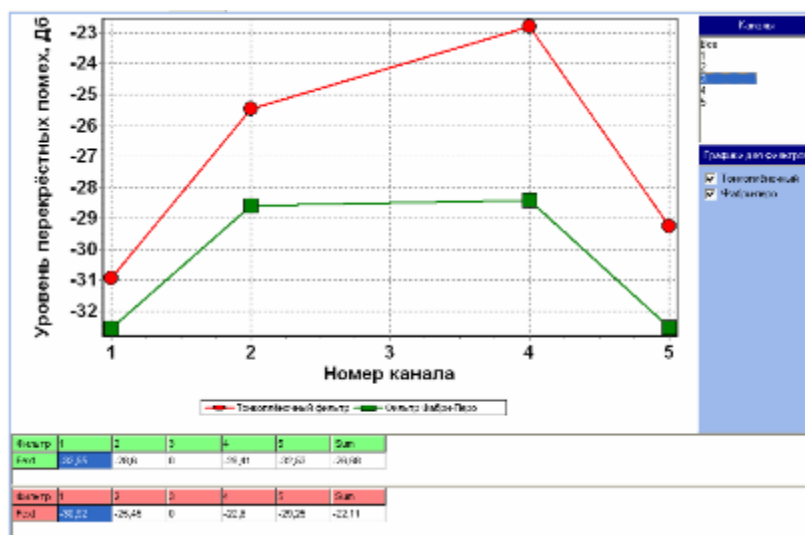


Рисунок 5.8 – Расчёт уровня переходных помех

Рассчитанные переходные помехи отображаются в табличном и графическом видах. Для включения/отключения отображения переходных помех для какого-либо типа демультимплектора, можно воспользоваться панелью «**График для фильтров**».

## 6. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ РАБОТ

### 6.1 Демультимплексор на основе интерференционных фильтров

#### 6.1.1. Начальные данные

Параметры	Вариант №12
Диапазон длин волн	1550,92–1560,61
$\Delta f_k$ , ГГц	200
$P_0$ (Дб)	20
Тип [И.Ф]	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]	1.533

Число каналов вычислим исходя из частотного плана *ITU-T*. Для диапазона длин оптических волн с 1550,92 нм до 1560,61 нм с частотным интервалом 200 ГГц, число каналов  $n=7$ .

Таблица 1.1 – Вариант №12

Частота, ТГц	Длина волны, нм
193,3	1550,92
193,1	1552,52
192,9	1554,13
192,7	1555,75
192,5	1557,36
192,3	1558,98
192,1	1560,61

#### 6.1.2. Расчёт основных параметров

Рассчитаем период структуры для всех тонкоплёночных фильтров, входящих в демультимплексор, и толщину фильтров для  $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$ . Толщину всех фильтров будем считать постоянной. Расчет проведен в среде MathCad.

$$\lambda := \begin{pmatrix} 1550.92 \cdot 10^{-9} \\ 1552.52 \cdot 10^{-9} \\ 1554.13 \cdot 10^{-9} \\ 1555.75 \cdot 10^{-9} \\ 1557.36 \cdot 10^{-9} \\ 1558.98 \cdot 10^{-9} \\ 1560.61 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \quad f := \begin{pmatrix} 193.3 \cdot 10^{-12} \\ 193.1 \cdot 10^{-12} \\ 192.9 \cdot 10^{-12} \\ 192.7 \cdot 10^{-12} \\ 192.5 \cdot 10^{-12} \\ 192.3 \cdot 10^{-12} \\ 192.1 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix} \quad \Delta n := \begin{pmatrix} 10^{-4} \\ 3 \cdot 10^{-4} \\ 7 \cdot 10^{-4} \\ 10^{-3} \end{pmatrix} \quad n1 := 1.533 \quad \theta := 0$$

$$n2_j := n1 + \Delta n_j \quad n2 = \begin{pmatrix} 1.5331 \\ 1.5333 \\ 1.5337 \\ 1.534 \end{pmatrix} \quad \Delta n = \begin{pmatrix} 0.0001 \\ 0.0003 \\ 0.0007 \\ 0.001 \end{pmatrix} \quad i := 0..6 \quad j := 0..3$$

$$\Delta_{i,j} := \frac{\lambda_i}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{n1^2 + (n2_j)^2 \cdot \cos(\theta)} \cdot 10^{-6}}$$

	0	1	2	3
0	0.505828	0.505795	0.505729	0.50568
1	0.50635	0.506317	0.506251	0.506201
2	0.506875	0.506842	0.506776	0.506726
3	0.507404	0.50737	0.507304	0.507255
4	0.507929	0.507896	0.507829	0.50778
5	0.508457	0.508424	0.508358	0.508308
6	0.508989	0.508955	0.508889	0.508839

$$L_{\lambda_i,j} := \frac{\operatorname{atanh}(\sqrt{0.999}) \cdot \lambda_i \cdot \cos(\lambda_i) \cdot \sqrt{(n2_j)^2 + n1^2}}{\sqrt{2} \cdot \left| (n2_j)^2 - n1^2 \right| \cdot 10^{-3}} \quad L =$$

	0	1	2	3
0	32.156579	10.71886	4.593797	3.215658
1	32.189754	10.729918	4.598536	3.218976
2	32.223135	10.741045	4.603305	3.222314
3	32.256724	10.752241	4.608104	3.225673
4	32.290105	10.763369	4.612872	3.229011
5	32.323694	10.774565	4.617671	3.23237
6	32.357491	10.78583	4.622499	3.235749

Результаты расчёта для всех  $\Delta n$  занесём в таблицы 1.2, 1.3, 1.4 и 1.5.

Таблица 1.2 – Результаты расчёта демультиплексора на тонкоплёночных фильтрах для  $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta_i$ , мкм	0,505828	0,50635	0,506875	0,507404	0,507929	0,508457	0,508989
$L_{\text{int}(n/2)}$ , мм	32,256724						

Таблица 1.3 – Результаты расчёта демультиплексора на тонкоплёночных фильтрах для  $\Delta n = 3 \cdot 10^{-4}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta_i$ , мкм	0,505795	0,506317	0,506842	0,50737	0,507896	0,508424	0,508955
$L_{\text{int}(n/2)}$ , мм	10,752241						

Таблица 1.4 – Результаты расчёта демультиплексора на тонкоплёночных фильтрах для  $\Delta n = 7 \cdot 10^{-4}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta_i$ , мкм	0,505729	0,506251	0,506776	0,507304	0,507829	0,508358	0,508889
$L_{\text{int}(n/2)}$ , мм	4,608104						

Таблица 1.5 – Результаты расчёта демультиплексора на тонкоплёночных фильтрах для  $\Delta n = 10^{-3}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta_i$ , мкм	0,50568	0,506201	0,506726	0,507255	0,50778	0,508308	0,508839
$L_{int(n/2)}$ , мм	3,225673						

### 6.1.3. Компьютерное моделирование

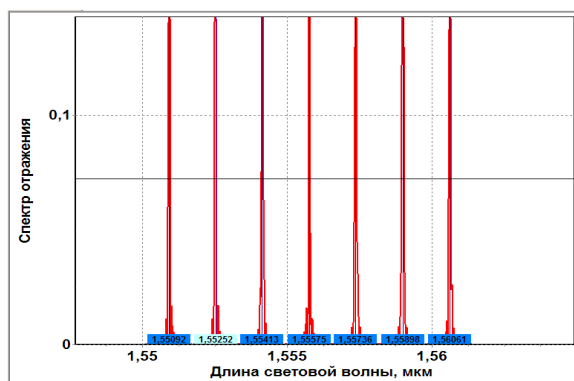
#### 6.1.3.1 Исследование зависимости максимальных переходных помех ( $P_{max}$ ) от $\Delta n$ .

Определим переходные помехи демультиплексора при различных значениях  $\Delta n$ , вычисленных в расчётном задании. Результаты занесём в таблицу 1.6.

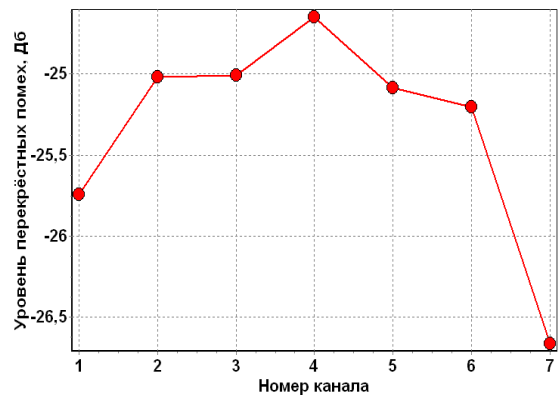
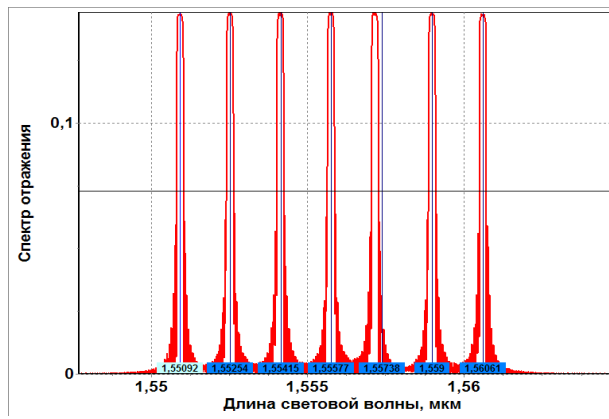
Таблица 1.6 – Зависимость максимальных переходных помех от  $\Delta n$ .

Параметр / $\Delta n$	$10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
$\Delta\lambda$ , нм	0,074	0,246	0,533	0,745
$P_{max}$ , дБ	-28,9	-24,81	-19,97	-17,54

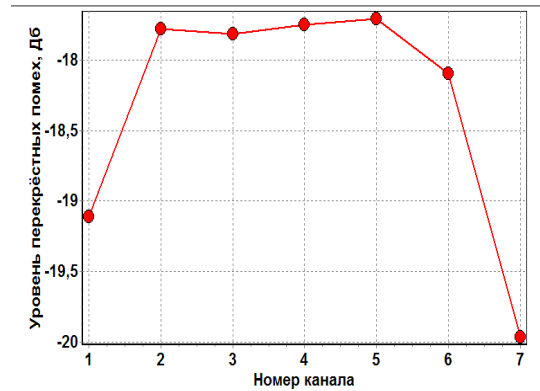
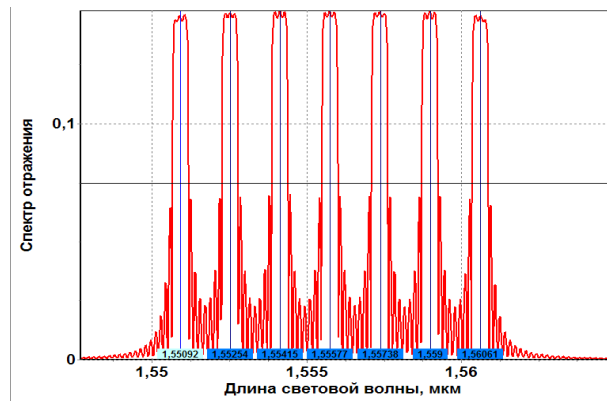
Полученные графики аппаратных функции демультиплексоров и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $\Delta n$ , приведены на рисунке 1.1 а, б, в, г. Далее, пользуясь данными таблицы 1.6, построим зависимость  $P_{max}(\Delta n)$ , она представлена на рисунке 1.2.



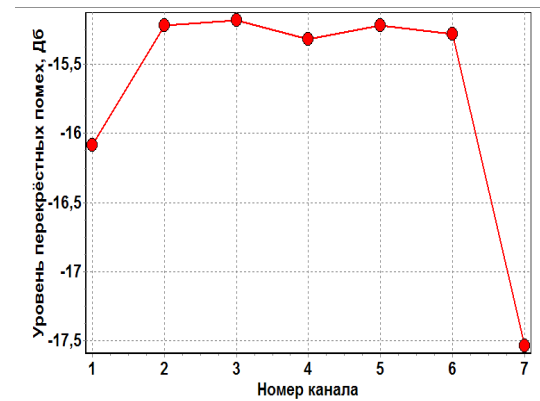
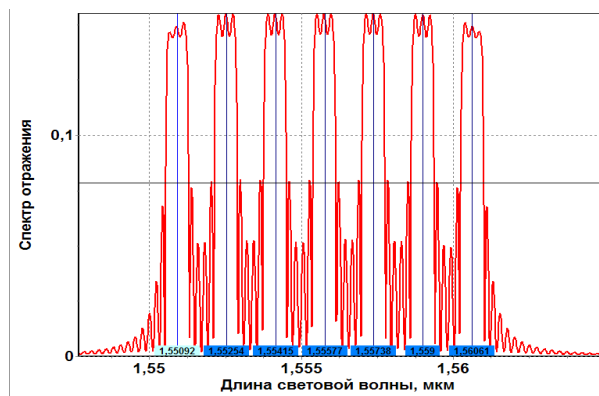
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.1 – Графики аппаратных функции демультиплексоров (слева) и рассчитанные графики переходных помех (справа), при  $\Delta n = 10^{-4}$  (кривая а),  $\Delta n = 3 \cdot 10^{-4}$  (кривая б),  $\Delta n = 7 \cdot 10^{-4}$  (кривая в),  $\Delta n = 10^{-3}$  (кривая г).



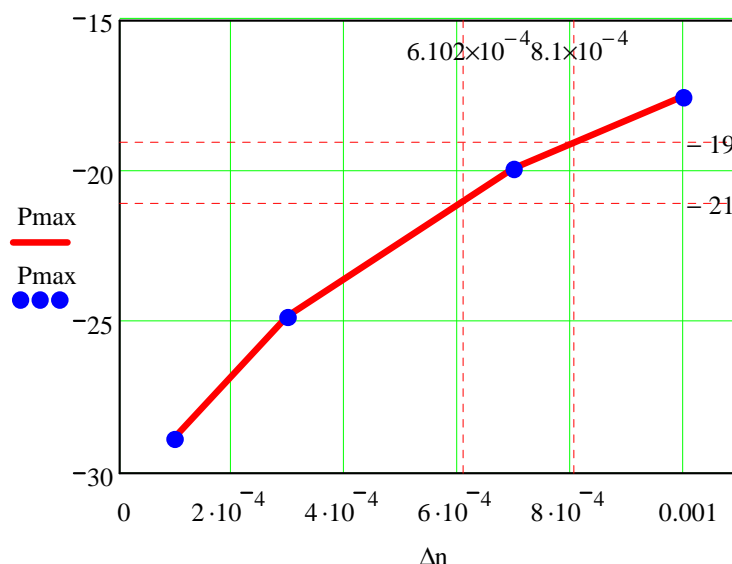


Рисунок 1.2 – График зависимости  $P_{\max}(\Delta n)$ .

По рисунку 1.1 и таблице 1.6 видно, что с увеличением величины  $\Delta n$  увеличивается полоса пропускания фильтров, тем самым в полосу пропускания попадают боковые лепестки сигнала соседних каналов, что в свою очередь приводит к увеличению переходных помех, что очень хорошо продемонстрировано на рисунке 1.2.

### 6.1.3.2. Нахождение оптимальной разницы показателей преломления

Найдём оптимальную разницу показателей преломления, при которой максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$ дБ. Для этого на основе аппроксимации зависимости  $P_{\max}(\Delta n)$  найдём такой  $\Delta n$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{\max}(\Delta n) = P_0 \pm 1$ дБ. По рисунку 1.2 видно, что оптимальный диапазон находится в диапазоне от  $6,102 \cdot 10^{-4}$  до  $8,1 \cdot 10^{-4}$ , а оптимальное значение будет:  $\Delta n_{\text{opt}} = 7 \cdot 10^{-4}$ .

### 6.1.3.3 Расчёт конструкционных параметров фильтров при $\Delta n_{\text{opt}}$

Рассчитаем конструкционные параметры фильтров при  $\Delta n_{\text{opt}}$ , а затем на основе полученных параметров смоделируем аппаратную функцию демультиплексора (рисунок 1.3 слева) и рассчитаем переходные помехи (рисунок 1.3 справа). Полученные результаты занесём в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 – Результаты расчёта и моделирования при  $\Delta n_{\text{opt}}$

Параметр/ № фильт- ра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta n_{\text{opt}}$	$7 \cdot 10^{-4}$						
$\Delta$ , мкм	0,505729	0,506251	0,506776	0,507304	0,507829	0,508358	0,508889
$L_{\text{int}(n/2)}$ , мм	4,608104						

$\Delta\lambda$ (нм)	0,533						
$P_i$ , дБ	-19,67	-19,26	-19,14	-19,3	-22,02		

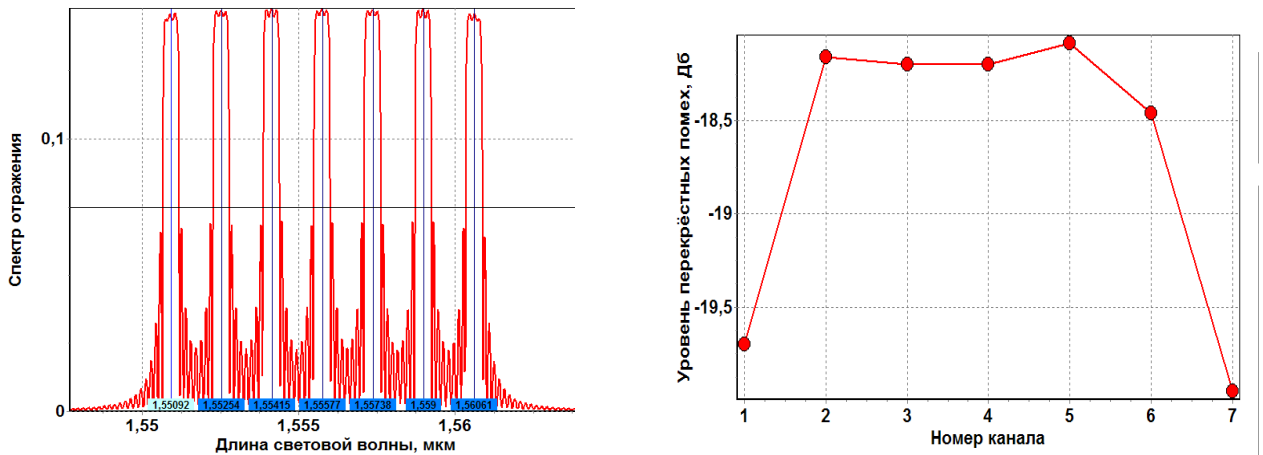
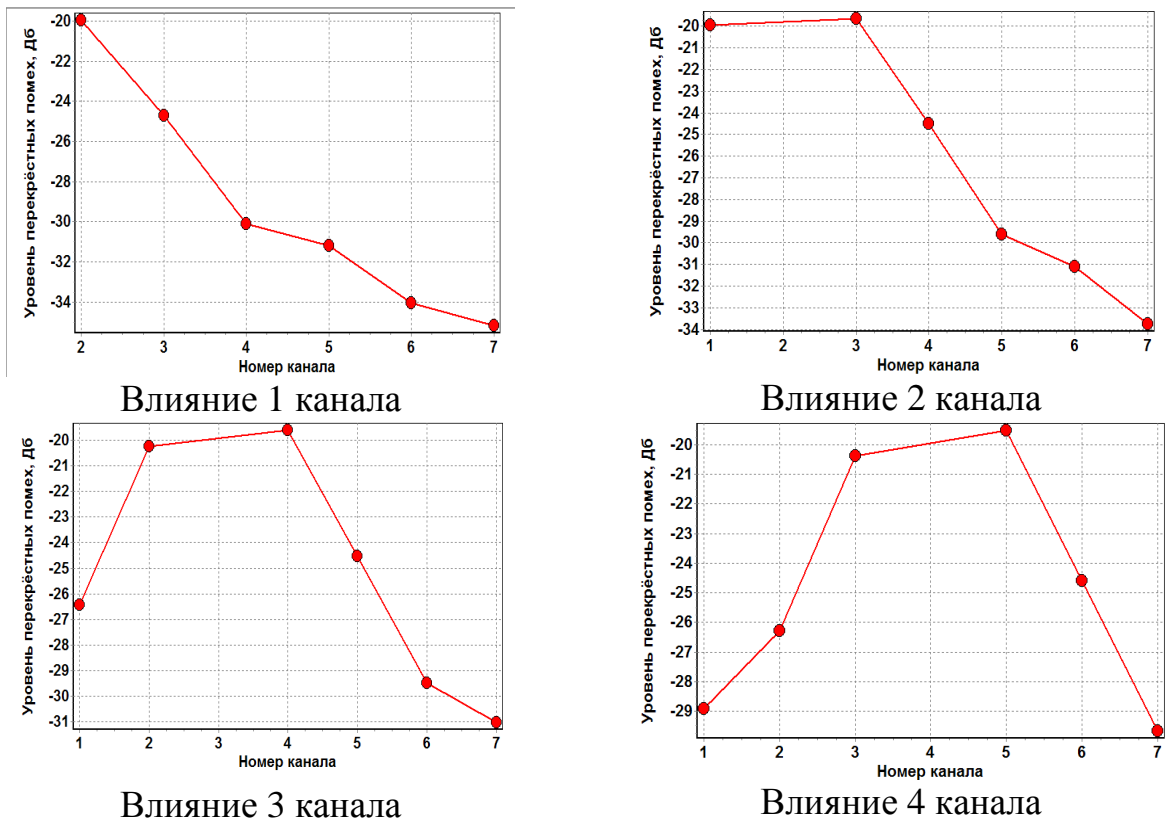
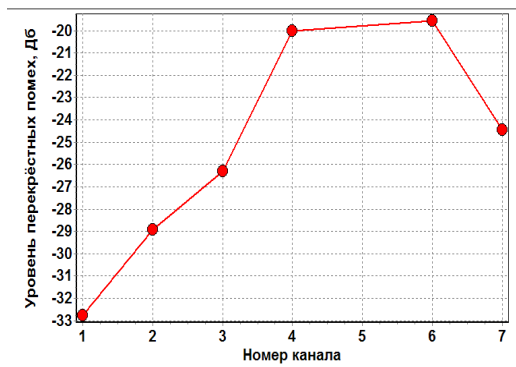


Рисунок 1.3 – График аппаратной функции демультиплекторов (слева) и рассчитанный график переходных помех (справа), при  $\Delta n_{opt} = 7 \cdot 10^{-4}$ .

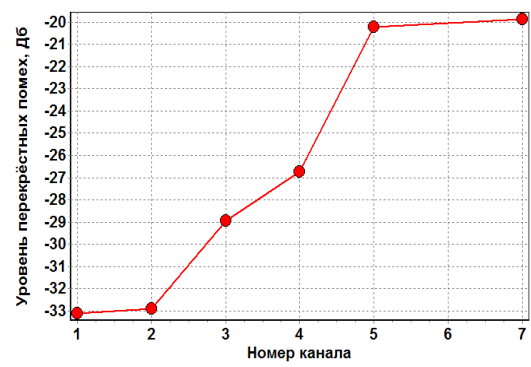
### 6.1.3.4 Исследование переходных помех демультиплектора с оптимальными параметрами

Для демультиплектора с оптимальными параметрами, наблюдаем влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Полученные зависимости переходных помех представлены на рисунке 1.4.

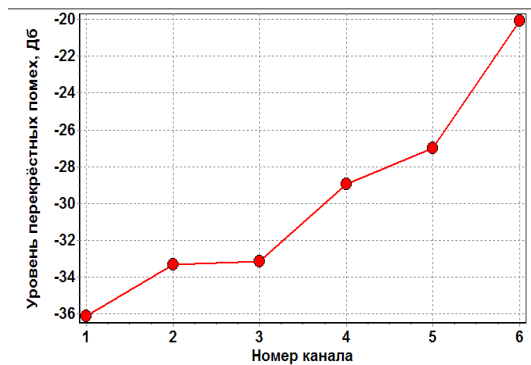




Влияние 5 канала



Влияние 6 канала



Влияние 7 канала

Рисунок 1.4 – Зависимость переходных помех от номера канала.

Анализируя зависимости, представленные на рисунке 1.4, видим, что переходная помеха исследуемого канала на соседний тем меньше, чем дальше расположен этот соседний канал. Другими словами, чем дальше канал отстоит от соседнего, тем меньше он вносит помех. Физическая суть этого заключается в следующем: амплитуда боковых лепестков сигнала, передаваемого в исследуемом канале уменьшается с удалением от центральной частоты канала, и тем самым их влияние, в виде переходной помехи, уменьшается, что хорошо заметно на графиках, представленных на рисунке 1.4.

## 6.2 Демультимплексор на основе фильтров Фабри-Перо

### 6.2.1. Начальные данные

Параметры	Вариант №12
Диапазон длин волн	1550,92–1560,61
$\Delta f_k$ , ГГц	200
$P_0$ (Дб)	20
Тип [Ф.П]	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]	1.533

Число каналов вычислим исходя из частотного плана *ITU-T*. Для диапазона длин оптических волн с 1550,92 нм до 1560,61 нм с частотным интервалом 200 ГГц, число каналов  $n=7$ .

Таблица 2.1 – Вариант №12

Частота, ТГц	Длина волны, нм
193,3	1550,92
193,1	1552,52
192,9	1554,13
192,7	1555,75
192,5	1557,36
192,3	1558,98
192,1	1560,61

### 6.2.2. Расчёт основных параметров

Рассчитаем показатели преломления среды резонатора (для каждого фильтра), значение коэффициента отражения зеркал, значение длины резонатора (для фильтра настроенного на отражение спектра с максимальной центральной длиной волны). Это значение будем считать постоянным для всех фильтров демультиплексора. Полученные результаты расчёта занесём в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчёта демультиплексора на основе фильтров Фабри-Перо

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$n$	1,55092	1,55252	1,55413	1,55575	1,55736	1,55898	1,56061
R	0,99996						
L, мкм	55						

Расчет проводился в среде MathCad:

$$\lambda := \begin{pmatrix} 1550.92 \cdot 10^{-9} \\ 1552.52 \cdot 10^{-9} \\ 1554.13 \cdot 10^{-9} \\ 1555.75 \cdot 10^{-9} \\ 1557.36 \cdot 10^{-9} \\ 1558.98 \cdot 10^{-9} \\ 1560.61 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \quad f := \begin{pmatrix} 193.3 \cdot 10^{-12} \\ 193.1 \cdot 10^{-12} \\ 192.9 \cdot 10^{-12} \\ 192.7 \cdot 10^{-12} \\ 192.5 \cdot 10^{-12} \\ 192.3 \cdot 10^{-12} \\ 192.1 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix} \quad \Delta n := \begin{pmatrix} 10^{-4} \\ 3 \cdot 10^{-4} \\ 7 \cdot 10^{-4} \\ 10^{-3} \end{pmatrix} \quad n1 := 1.533 \quad \theta := 0$$

$$i := 0..6 \quad j := 0..3 \quad n2_j := n1 + \Delta n_j \quad n2 = \begin{pmatrix} 1.5331 \\ 1.5333 \\ 1.5337 \\ 1.534 \end{pmatrix} \quad \Delta n = \begin{pmatrix} 0.0001 \\ 0.0003 \\ 0.0007 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{i,j} := \frac{\lambda_i}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{n1^2 + (n2_j)^2} \cdot \cos(\theta) \cdot 10^{-6}}$$

	0	1	2	3
0	0.505828	0.505795	0.505729	0.50568
1	0.50635	0.506317	0.506251	0.506201
2	0.506875	0.506842	0.506776	0.506726
3	0.507404	0.50737	0.507304	0.507255
4	0.507929	0.507896	0.507829	0.50778
5	0.508457	0.508424	0.508358	0.508308
6	0.508989	0.508955	0.508889	0.508839

$$L_{i,j} := \frac{\operatorname{atanh}(\sqrt{0.999})}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda_i \cdot \cos(\lambda_i) \cdot \sqrt{(n2_j)^2 + n1^2}}{\left| (n2_j)^2 - n1^2 \right| \cdot 10^{-3}} \quad L =$$

	0	1	2	3
0	32.156579	10.71886	4.593797	3.215658
1	32.189754	10.729918	4.598536	3.218976
2	32.223135	10.741045	4.603305	3.222314
3	32.256724	10.752241	4.608104	3.225673
4	32.290105	10.763369	4.612872	3.229011
5	32.323694	10.774565	4.617671	3.23237
6	32.357491	10.78583	4.622499	3.235749

### 6.2.3. Компьютерное моделирование

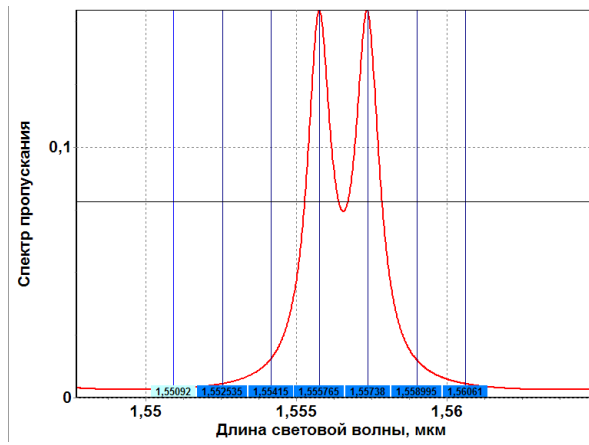
#### 6.2.3.1 Исследование зависимости переходных помех от коэффициента отражения зеркал

Исследуем зависимость переходных помех от коэффициента отражения зеркал. Для этого необходимо определим переходные помехи демультиплексора для двух центральных соседних каналов (каналы с номерами 3 и 4) при  $R_{FP} = 0,9; 0,95$  и  $0,99$ . Полученные результаты занесём в таблицу 2.3.

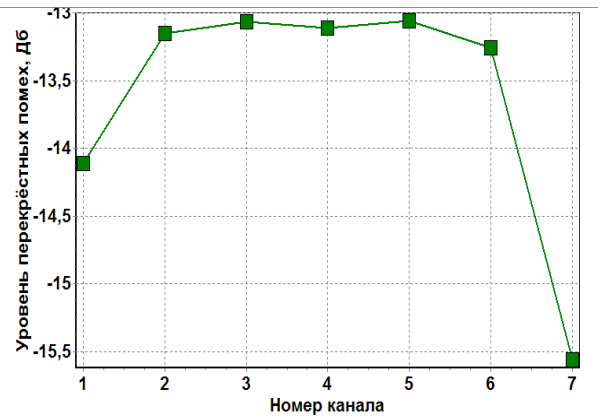
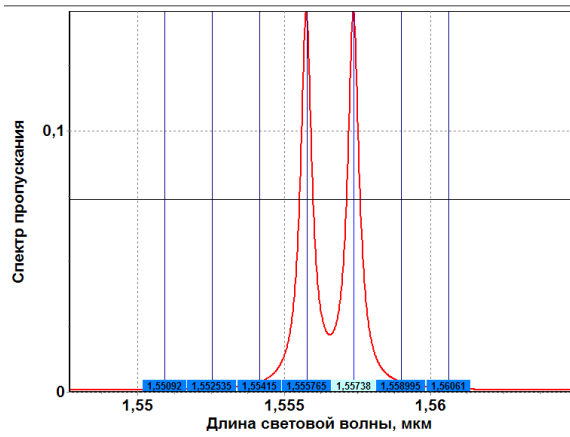
Таблица 2.3 – Зависимость переходных помех от коэффициента отражения зеркал

Параметр / $R_{FP}$	0.90	0.95	0.99
$\Delta\lambda$ , нм	1,03	0,45	0,09
$P_{\max}$ , дБ	-10,87	-15,94	-29,64

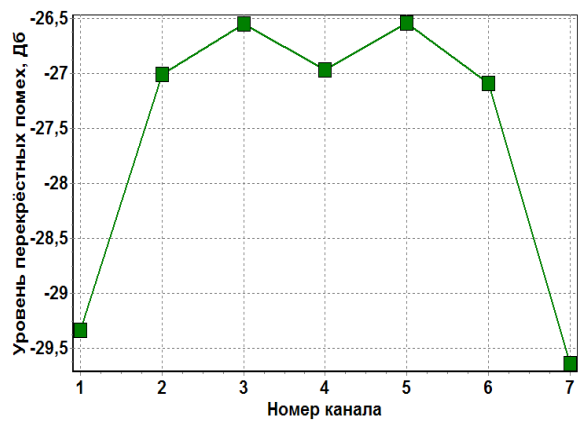
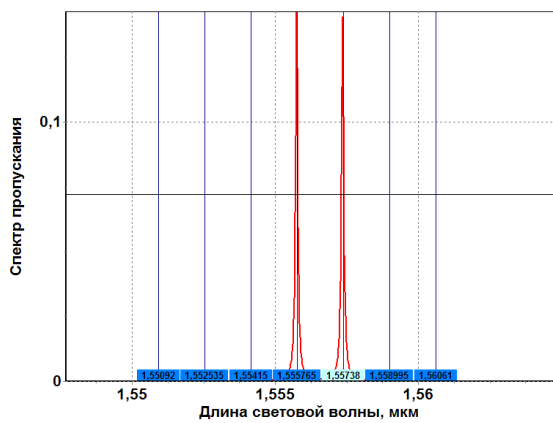
Построим графики аппаратных функции демультиплексоров (только для двух исследуемых каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $R$  (рисунок 2.1). Затем, пользуясь данными таблицы 2.3 построим график зависимости  $P_{\max}(R_{FP})$ , она приведена на рисунке 2.2.



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 – Графики аппаратных функции демультиплекторов (слева) и рассчитанные графики переходных помех (справа) для  $R = 0,9$  (кривая а),  $R = 0,95$  (кривая б),  $R = 0,99$  (кривая в).

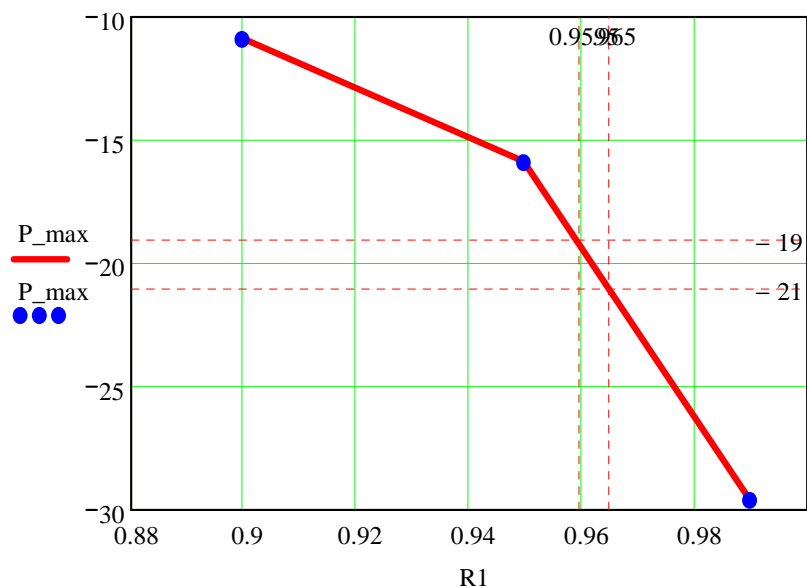


Рисунок 2.2 – График зависимости  $P_{\max}(R_{FP})$ .

Из зависимости, представленной на рисунке 2.2, а также из таблицы 2.3 видно, что с увеличением коэффициента отражения зеркал полоса пропускания фильтров сужается, а, следовательно, уменьшается уровень переходной помехи.

### 6.2.3.2 Нахождение оптимального коэффициента отражения зеркал

Найдём оптимальный коэффициент отражения зеркал, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого проведём аппроксимацию зависимости  $P_{\max}(R_{FP})$  (рисунок 2.2) и найдём такой  $R_{FP}$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{\max}(R_{FP}) = P_0 \pm 1$  дБ. Как видно из рисунка диапазон оптимальных значений от 0,958 до 0,965. Пусть  $R_{opt} = 0,962$ .

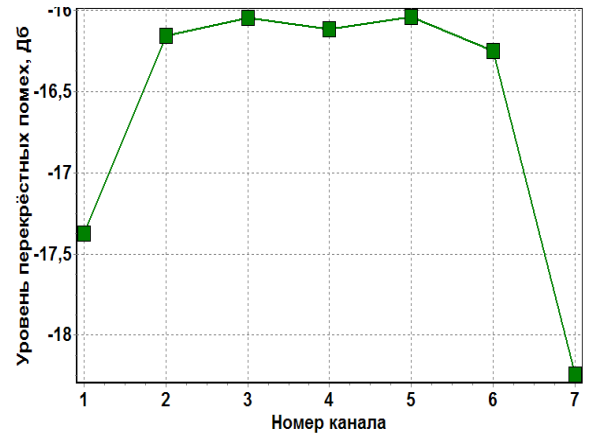
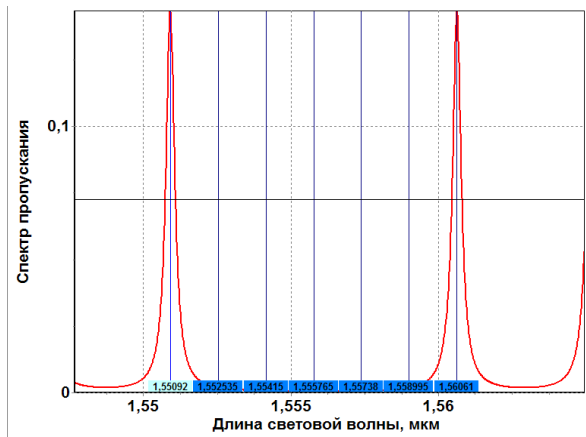
### 6.2.3.3 Зависимость переходных помех от длины резонатора

Исследуем зависимость переходных помех от длины резонатора. Для этого определить переходные помехи демультиплексора для первого и последнего канала при  $L_{FP} = L_{FP, \text{расчётное}} = 55$  мкм,  $L_{FP, \text{расчётное}} - 10\% = 49,5$  мкм и  $L_{FP, \text{расчётное}} + 10\% = 60,5$  мкм. Коэффициент отражения зеркал для всех  $L_{FP}$  будем использовать  $R_{FP, \text{opt}}$ . Полученные результаты занесём в таблицу 2.4.

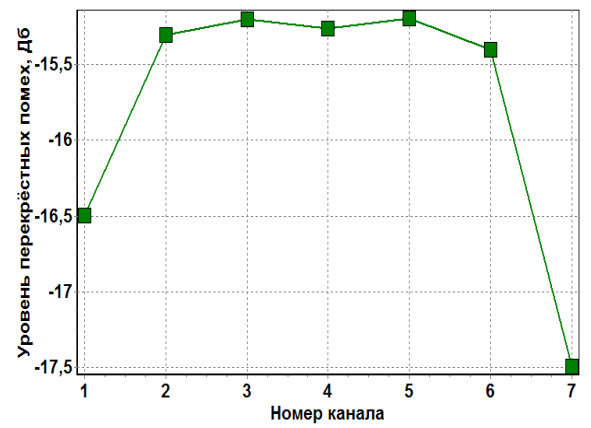
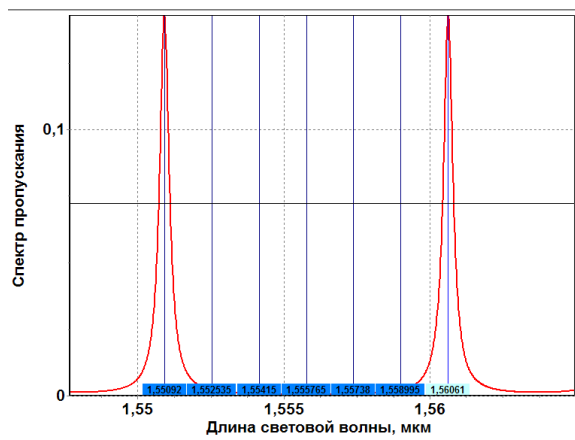
Таблица 2.4 – Зависимость переходных помех от длины резонатора.

Параметр / $L_{FP}$	$L_{FP, \text{расчётное}}$	$L_{FP, \text{расчётное}} - 10\%$	$L_{FP, \text{расчётное}} + 10\%$
$\Delta\lambda$ , нм	0,34	0,38	0,31,5
$P_{\max}$ , дБ	-17,38	-17,4	-18,77

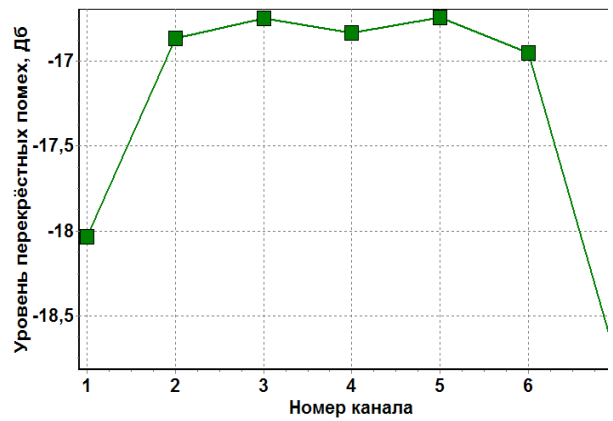
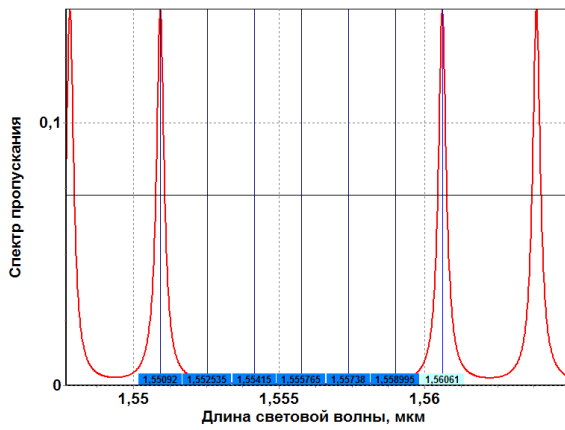
Графики аппаратных функции демультиплексоров (только для первого и последнего каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $L_{FP}$ , представлены на рисунке 2.3. Зависимость  $P_{\max}(L_{FP})$  представлена на рисунке 2.4.



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Графики аппаратных функции демультиплекторов (слева) и рассчитанные графики переходных помех (справа) при  $L_{FP} = L_{FP, \text{расчётное}}$  (кривая а),  $L_{FP, \text{расчётное}} - 10\%$  (кривая б) и  $L_{FP, \text{расчётное}} + 10\%$  (кривая в).



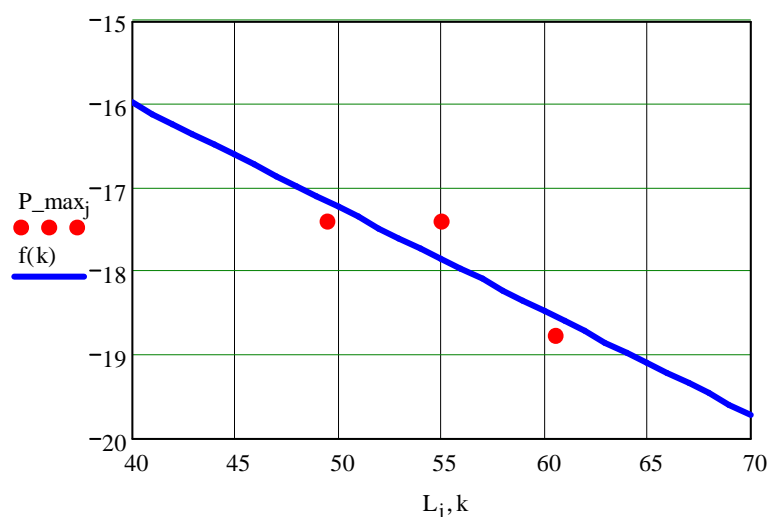


Рисунок 2.4 – График зависимости  $P_{\max}(L_{FP})$ .

По графику, представленному на рисунке 2.4, видно, что с увеличением длины резонатора переходные помехи уменьшаются незначительно.

#### 6.2.3.4 Нахождение оптимальной длины резонатора фильтра

Найдём оптимальную длину резонатора для последнего фильтра, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$ дБ. Для этого на основе аппроксимации зависимости  $P_{\max}(L_{FP})$  (рисунок 2.4) найдём такую  $L_{FP}$ , которая удовлетворяла бы уравнению  $P_{\max}(L_{FP}) = P_0 \pm 1$ дБ. Расчёты показали, что  $L_{FP, opt} = 73$  мкм.

#### 6.2.3.5 Расчёт конструктивных параметров фильтров

Рассчитаем конструктивные параметры фильтров при  $R_{FP, opt}$  и  $L_{FP, opt}$ . Далее смоделируем аппаратную функцию демультимплексора и рассчитаем переходные помехи (рисунок 2.5). Полученные результаты занесем в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Расчёт конструктивных параметров фильтров при  $R_{FP, opt}$  и  $L_{FP, opt}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
n	1,55092	1,55252	1,55413	1,55575	1,55736	1,55898	1,56061
$R_{FP, opt}$	0,962						
$L_{FP, opt}$ , мкм	73						

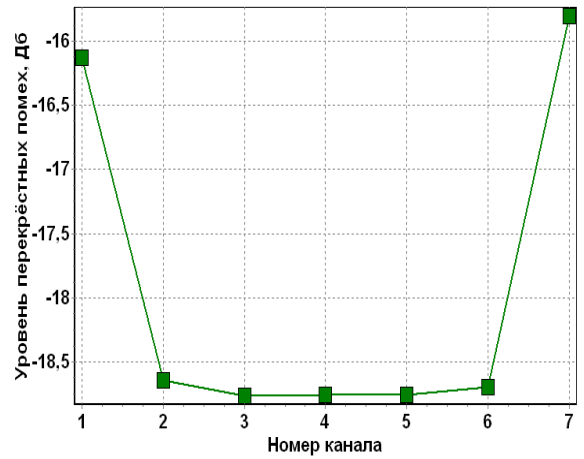
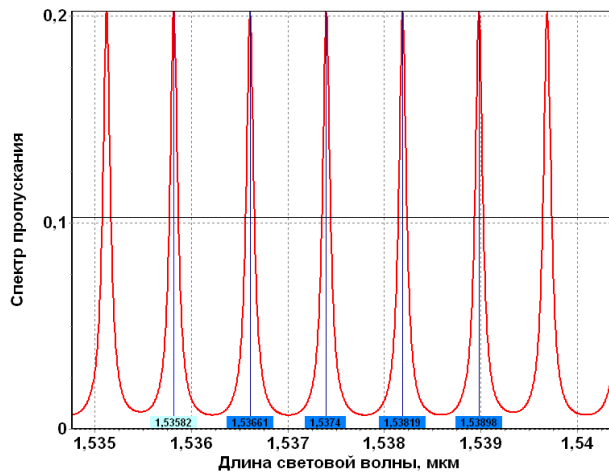
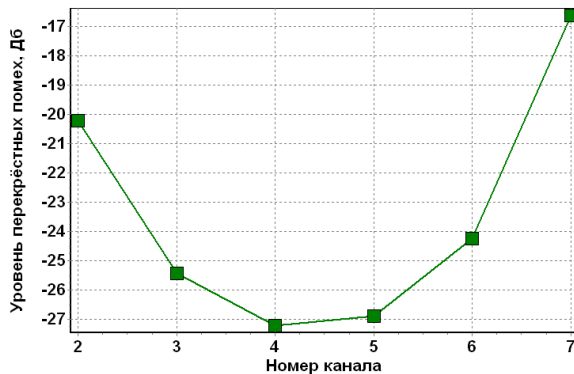


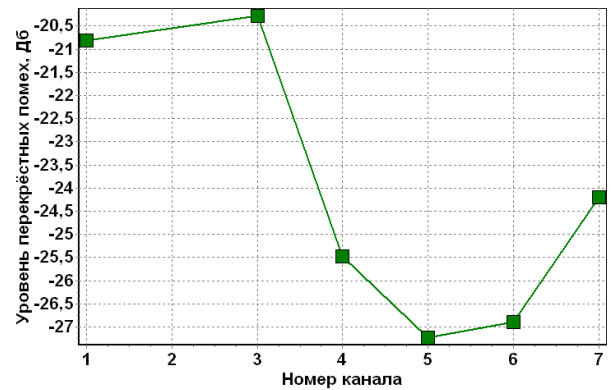
Рисунок 2.5 – Аппаратная функция демультиплектора (слева) и рассчитанная переходная помеха (справа).

### 6.2.3.6 Влияние соседних каналов

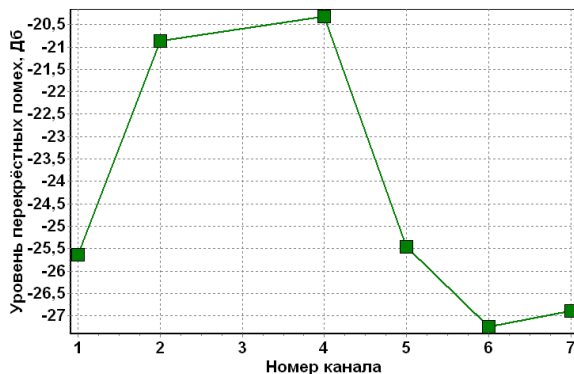
Для демультиплектора с оптимальными параметрами, наблюдаем влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Полученные зависимости представлены на рисунке 2.6.



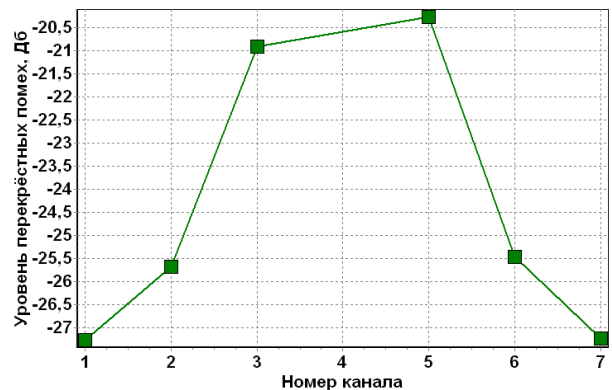
Влияние 1 канала



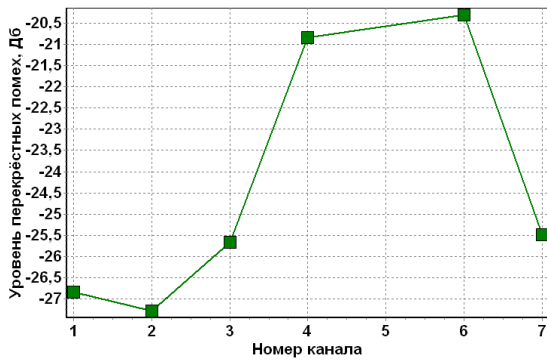
Влияние 2 канала



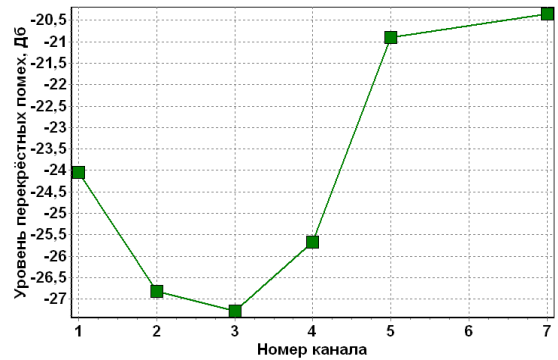
Влияние 3 канала



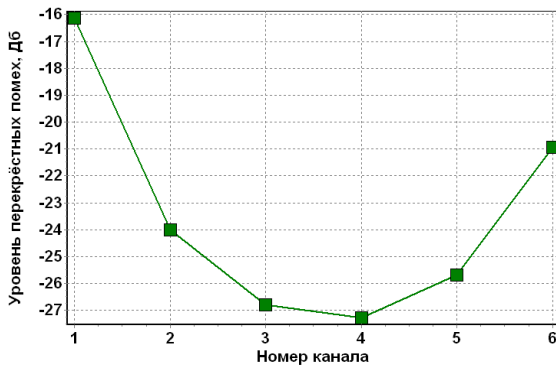
Влияние 4 канала



Влияние 5 канала



Влияние 6 канала



Влияние 7 канала

Рисунок 2.6 – Графики влияния на соседние каналы.

Видно, что взаимное влияние пятого и первого каналов минимальны, так как эти каналы находятся на максимальном расстоянии друг от друга.

Сравнительная характеристика результирующих переходных помех рассмотренных демультиплекторов, представлена на рисунке 2.7.

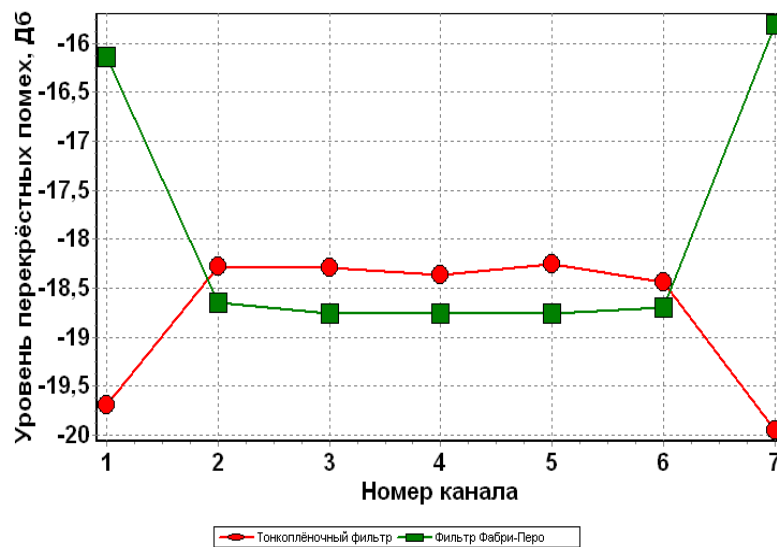


Рисунок 2.7 – Сравнительная характеристика по переходным помехам демультиплекторов.на основе интерференционных и Фабри-Перо фильтрах

## Список литературы

1. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM / Н.Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2003. – 468 с.
2. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Складов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 272 с.
3. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Цифровые телекоммуникационные системы: учебник для вузов – М.: Горячая линия – Телеком – 2005. – 428 с
4. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман ; пер. с англ.; под ред. Н.Н. Слепова. – 3-е изд., доп. – М. : Техносфера, 2006. – 495 с.
5. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением : учеб. пособие для вузов / К.Е. Заславский. – Новосибирск : СибГУТИ, 2005. – 136 с.
6. РД 45.286-2002. Руководящий документ отрасли связи: Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.
7. Довольнов Е.А., Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н.. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи : учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 157 с.
8. Мультиплексорное оборудование многоволновых оптических систем передачи. Компьютерный лабораторный практикум: учеб. метод. пособие/ Под ред. С.Н. Шаранговича. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. -75 с.
9. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро» .- М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501792.

## Приложение А

### Частотный план ИТУ-Т

Таблица 1

Частотный план WDM по рекомендации МСЭ-Т G.692

Частота, ТГц	Интервал, ГГц						Длина волны, нм
	100	200	400	500	600	1000	
196,1	●	●	●		●		1528,77
196,0	●						1529,55
195,9	●	●					1530,33
195,8	●			●			1531,12
195,7	●	●	●				1531,90
195,6	●						1532,68
195,5	●	●			●	●	1533,47
195,4	●						1534,25
195,3	●	●	●	●			1535,04
195,2	●						1535,82
195,1	●	●					1536,61
195,0	●						1537,40
194,9	●	●	●		●		1538,19
194,8	●			●			1538,98
194,7	●	●					1539,77
194,6	●						1540,56
194,5	●	●	●			●	1541,35
194,4	●						1542,14
194,3	●	●		●	●		1542,94
194,2	●						1543,73
194,1	●	●	●				1544,53
194,0	●						1545,32
193,9	●	●		●			1546,12
193,8	●						1546,92
193,7	●	●	●		●		1547,72
193,6	●						1548,51
193,5	●	●				●	1549,32
193,4	●			●			1550,12
193,3	●	●	●				1550,92
193,2	●						1551,72
193,1	●	●			●		1552,52
193,0	●			●			1553,33
192,9	●	●	●				1554,13

192,8	●						1554,94
192,7	●	●					1555,75
192,6	●						1556,55
192,5	●	●	●	●	●	●	1557,36
194,4	●						1558,17
192,3	●	●					1558,98
192,2	●						1559,79
192,1	●	●	●	●			1560,61

Таблица 2

Частотный план DWDM по рекомендации МСЭ-Т G.694.1

Номинальная центральная частота, ТГц Частотный интервал между каналами, ГГц				Номинальное значение длины волны, нм
12,5	25	50	100	(5)
(1)	(2)	(3)	(4)	
195.9375	–	–	–	1530.04
195.9250	195.925	–	–	1530.14
195.9125	–	–	–	1530.24
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.33
195.8875	–	–	–	1530.43
195.8750	195.875	–	–	1530.53
195.8625	–	–	–	1530.63
195.8500	195.850	195.85	–	1530.72
195.8375	–	–	–	1530.82
195.8250	195.825	–	–	1530.92
195.8125	–	–	–	1531.02
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.12
195.7875	–	–	–	1531.21
195.7750	195.775	–	–	1531.31
195.7625	–	–	–	1531.41
195.7500	195.750	195.75	–	1531.51
195.7375	–	–	–	1531.60
195.7250	195.725	–	–	1531.70
195.7125	–	–	–	1531.80
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.90
195.6875	–	–	–	1532.00

Номинальная центральная частота, ТГц Частотный интервал между каналами, ГГц				Номинальное значение длины волны, нм
12,5	25	50	100	(5)
(1)	(2)	(3)	(4)	
195.6750	195.675	–	–	1532.09
195.6625	–	–	–	1532.19
□	□	□	□	□
193.1375	–	–	–	1552.22
193.1250	193.125	–	–	1552.32
193.1125	–	–	–	1552.42
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.52
193.0875	–	–	–	1552.62
193.0750	193.075	–	–	1552.73
193.0625	–	–	–	1552.83
193.0500	193.050	193.05	–	1552.93
193.0375	–	–	–	1553.03
193.0250	193.025	–	–	1553.13
193.0125	–	–	–	1553.23
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.33
192.9875	–	–	–	1553.43
192.9750	192.975	–	–	1553.53
192.9625	–	–	–	1553.63
□	□	□	□	□
184.7750	184.775	–	–	1622.47
184.7625	–	–	–	1622.58
184.7500	184.750	184.75	–	1622.69

## Частотный план CWDM по рекомендации МСЭ-Т G.694.2

Номинальное значение длины волны, нм Интервал между каналами 20 нм	Номинальная центральная частота, ТГц
1270	236.057
1290	232.397
1310	228.849
1330	225.407
1350	222.068
1370	218.826
1390	215.678
1410	212.618
1430	209.645
1450	206.753
1470	203.940
1490	201.202
1510	198.538
1530	195.942
1550	193.414
1570	190.950
1590	188.548
1610	186.206



## Приложение Б

### РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования [6]

Таблица 1.

Параметры оптических терминальных мультиплексоров

Количество оптических каналов	8	16		40		80		160	
Расстояние между оптическими каналами, ГГц	200	200	100	100	50	50	100	100	50
Наименование параметров	Значение параметров								
1 Отклонение центральной частоты оптического канала, не более, ГГц	±5			±3		±5		±3	
2 Вносимое затухание, не более, дБ	6	7,5		12		14		16	
3 Ширина полосы оптического канала на уровне: -3 дБ, не менее, ГГц -20 дБ, не менее, ГГц	50 80			25 40		50 80		25 40	
4 ЛР №1 потери, не более, дБ	0,5								
5 Переходная помеха от смежного оптического канала, не более, дБ	-30								
6 Кумулятивная переходная помеха, не более, дБ	-25								
7 Коэффициент отражения на входе и выходе, не более, дБ	-30								

Таблица 2

Параметры двухканальных широкополосных оптических мультиплексо-  
ров/демультиплексоров

Наименование параметров	Значение параметров
Вносимое затухание, не более, дБ	0,7
Вносимое затухание, не более, дБ	25,0
Коэффициент отражения от входа, не менее, дБ	-40,0
Затухание отражения на выходе, не более, дБ	40,0

Таблица 3

Параметры оптических мультиплексоров ввода/вывода (ОМВВ) в зависимости  
от числа оптических каналов и расстояния между ними, а также числа вводи-  
мых/выводимых оптических каналов

Наименование параметров		Значение параметров				
Количество оптических каналов		8	16	40		
Количество ответвляемых/вводимых оп- тических каналов, не более		4	8	16		
Расстояние между оптическими каналами, ГГц		200	200	100	100	50
Отклонение центральной частоты оптиче- ского канала, не более, ГГц		+/-5,0				+/-3,0
Вносимое затухание	для ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более, дБ'	6,0	7,5	8,0		
	для ответвляемых/вводимых оптических каналов, не более, дБ:	12,0	15,0	16,0		
Ширина	-3 дБ, не менее, ГГц	50,0				25,0
	-20 дБ, не менее, ГГц	80,0				40,0
Подполяризационно-зависимые потери, не более, дБ		0,5				
Переходная помеха от смежного оптиче- ского канала, не более, дБ		-30,0				
Кумулятивная переходная помеха при максимальном числе действующих опти- ческих каналов, не более, дБ		-27,0				
Коэффициент отражения от входа, не ме- нее, дБ		-30				
Затухание отражения на выходе, не более, ГГц		30,0				

## Список основных сокращений и обозначений

AWG	— массив фазирующих волноводов
DRA	— распределенный рамановский усилитель
DWDM	— уплотненное спектральное мультиплексирование
EDFA	— усилитель на волокне, легированном эрбием
EDTFA	— усилитель на теллуритовом волокне, легированном эрбием
FP	— резонатор Фабри — Перо
LOA	— линейный оптический усилитель
LRA	— дискретный рамановский усилитель
MZI	— интерферометр Маха-Цендера
OADM	— оптический мультиплексор ввода/вывода
OD	— оптический демультиплексор
OM	— оптический мультиплексор
OTM	— оптический терминальный мультиплексор
OP	— оптический тракт
WDM	— спектральное мультиплексирование
ВОСП	— волоконно-оптическая система передачи

$L$	— толщина периодической структуры
$\Delta$	— период следования слоев
$\theta$	— наклон фильтров
$\lambda$	— длина волны
$\epsilon$	— диэлектрическая проницаемость
$k$	— волновой вектор
$K(\lambda)$	— постоянная связи мод
$\Delta\beta(\lambda)$	— фазовое рассогласование
$I_{\max}$	— максимальное отражение от тонкопленочного фильтра
$\Delta n$	— разность показателей преломления
$P_{\max}$	— максимальная переходная помеха
$I(\lambda)$	— аппаратная функция фильтра Фабри-Перо
$\Delta\lambda_{FSR}$	— свободный спектральный диапазон демультиплексора
$L_i$	— длина резонатора
$T_f$	— период аппаратной функции
$R$	— коэффициент отражения
$\Delta\lambda_k$	— канальный интервал демультиплексора
$\eta_{\partial \max}$	— максимально достижимая дифракционная эффективность
$T_i$	— входные/выходные порты мультиплексора
$f_{in}$	— входной сигнал
$f_j^{out}$	— выходной сигнал
$[T_{ij}]$	— матрица передачи

**Учебное издание**

**Шарангович Сергей Николаевич**

**«МУЛЬТИПЛЕКСОРНОЕ И УСИЛИТЕЛЬНОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ СВЯЗИ»**

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие для студентов заочной формы обучения  
по дисциплине «Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.