

**СЕТЕВЫЕ АСПЕКТЫ МНОГОКАНАЛЬНЫХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ:  
ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЁТ**

Москва 2005

# СЕТЕВЫЕ АСПЕКТЫ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ: ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЁТ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию  
в области телекоммуникаций в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальностям  
071700 – Физика и техника оптической связи,  
200900 – Сети связи и системы коммутации,  
и 201000 – Многоканальные телекоммуникационные системы*



Москва  
Издательство МАИ  
2005

УДК 621.396.674.3(07)

ББК 32.845(я7)

С89

**Султанов А.Х., Акульшин В.Н., Виноградова И.Л., Лощенков А.А.,  
Шарафутдинов Р.М., Снегов А.Д.**

- С89 Сетевые аспекты многоканальных телекоммуникационных систем: принцип построения и расчёт. / А.Х. Султанов, В.Н. Акульшин, И.Л. Виноградова, А.А. Лощенков, Р.М. Шарафутдинов, А.Д. Снегов; – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 200 с.  
ISBN 5-7035-1583-1

Учебное пособие содержит теоретические сведения и практические рекомендации, необходимые для освоения принципов и методов расчёта многоканальных волоконно-оптических систем передач, рассматриваемых в разделе, посвящённом волновому уплотнению. Рассмотрены широко используемые сетевые протоколы систем с волновым уплотнением и приведены методы расчёта их конструктивных параметров.

Предназначено для студентов 3 – 5 курсов факультета АП специальностей 201000 – Многоканальные телекоммуникационные системы, 200900 – Сети связи и системы коммутации, 071700 – Физика и техника оптической связи, изучающих дисциплину «Оптические системы передачи».

Табл. 20. Ил. 78. Библиогр.: 25 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. А.Х. Султанов

Рецензенты: директор филиала «Энергосвязь» ОАО «Башкирэнерго»  
канд. техн. наук Усманов Р.Г.;  
кафедра статистической радиофизики и связи БГУ  
канд. физ.-мат. наук, проф. Акманов А.П.

ББК 32.845(я7)

ISBN 5-7035-1583-1

©Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2005  
©А.Х. Султанов, В.Н. Акульшин, И.Л. Виноградова,  
А.А. Лощенков, Р.М. Шарафутдинов, А.Д. Снегов, 2005

## Содержание

Используемые сокращения.....	6
Введение.....	8
1. Общие сведения о волоконно-оптических системах передачи со спектральным разделением (ВОСП-СР) .....	9
1.1. Характеристики волоконно-оптических систем.....	9
1.2. Структурная схема ВОСП-СР.....	12
2. Функциональные узлы аппаратуры ВОСП-СР.....	15
2.1. Источники и приёмники оптического излучения.....	15
2.2. Устройства объединения и разделения оптических каналов.....	17
2.3. Пассивные оптические компоненты.....	19
2.4. Оптические усилители.....	19
3. Характеристики функциональных узлов аппаратуры и методы их измерений.....	23
3.1. Средства измерений для ВОСП-СР.....	35
3.2. Резюме.....	38
4. Аппаратная реализация ВОСП-СР .....	44
4.1. Технология <i>WDM</i> в сетях связи.....	44
4.2. Критерии качества передачи цифровых сигналов.....	46
4.3. Отношение сигнал/шум в оптоволоконном тракте.....	49
4.4. Расчёт числа оптических усилителей на регенерационном участке.....	51
4.5. Зависимость между скоростью передачи по оптическому каналу и длиной регенерационного участка по дисперсии.....	54
4.6. Функциональные возможности аппаратуры ВОСП-СР на сети связи.....	56
4.7. Управление и резервирование на сетях с аппаратурой ВОСП-СР.....	59
5. Технический подход к проектированию ВОСП-СР.....	62
5.1. Базовые положения в проектировании систем связи со спектральным разделением каналов.....	62
5.2. Особенности проектирования глобальных сетей <i>WDM</i> .....	66
5.3. Экспериментальный опыт по построению и отладке сетей <i>WDM</i> .....	68

6. Модель односегментной локальной сети с протоколом <i>IBM Rainbow</i> .....	76
6.1. Подход к математическому моделированию односегментных сетей со спектральным разделением.....	76
6.2. Марковская модель взаимодействия станций.....	81
6.3. Расчёт параметров взаимодействия станций по представленной математической модели.....	85
6.4. Резюме.....	93
7. Построение многосегментных ВОСП-СР. Сети <i>GEMNET</i> .....	94
7.1. Общие вопросы построения многосегментных ВОСП-СР..	94
7.2. Схема взаимосвязей и маршрутизации в архитектуре сети типа <i>GEMNET</i> .....	97
7.3. Оценка среднего расстояния пролёта и адаптация размеров сети.....	100
7.4. Резюме.....	103
8. Технические подходы к построению глобальных ВОСП-СР.....	104
8.1. Концепция создания виртуальной топологии.....	104
8.2. Частные случаи применения технологии <i>WDM</i> при модернизации глобальных ВОСП.....	108
8.3. Постановка задачи оптимизации виртуальной топологии ВОСП-СР при наложении её на физическую топологию.....	111
8.4. Подход к решению задачи оптимизации виртуальной топологии.....	116
8.5. Результаты моделирования.....	119
8.6. Влияние степени узла на параметры системы передачи...	127
8.7. Резюме.....	128
9. Задача маршрутизации и присвоения значений длин волн оборудованию ВОСП-СР.....	130
9.1. Концепция присвоения значений длины волны.....	130
9.2. Постановка задачи и подход к решению.....	134
9.3. Метод «случайного округления». ....	135
9.4. Задача раскрашивания графа.....	138
9.5. Задача статического установления световых трактов ( <i>Static Lightpath Establishment</i> ).....	139
9.6. Задача динамического установления световых трактов ( <i>Dynamic Lightpath Establishment</i> ) .....	143

9.7. Резюме.....	146
10. Особенности построения ВОСП-СР с кольцевой топологией....	147
10.1. Подход к организации многих логических колец.....	147
10.2. Архитектура системы и положения/допущения модели..	151
10.3. Критерии и подходы к оптимизации виртуальной топологии.....	157
10.4. Алгоритм, основанный на минимизации задержек.....	158
10.5. Результаты вычислительного эксперимента для двухсекционной сети.....	161
10.6. Результаты вычислительного эксперимента для сети, содержащей более двух секций.....	167
10.7. Резюме.....	170
11. Расчёт характеристик сетевого сегмента регенерации локальной ВОСП-СР.....	172
11.1. Исходные данные к проведению расчёта.....	172
11.2. Основные сетевые решения.....	172
11.3. Пример расчёта параметров качества передачи на регенерационном участке.....	173
11.4. Размещение усилителей с компенсаторами дисперсии...	177
11.5. Разработка схемы организации связи и построение диаграммы уровней оптического канала.....	178
11.6. Резюме.....	180
12. Полностью оптические сети <i>TDM</i> .....	181
12.1. Принцип построения оптической сети <i>TDM</i> .....	181
12.2. Источники оптического излучения для сетей <i>OTDM</i> ....	185
12.3. Модуляция и мультиплексирование в сетях <i>OTDM</i> .....	187
12.4. Передача высокоскоростных сигналов <i>OTDM</i> при помощи солитонов.....	189
12.5. Демультимплексирование и установление синхрониза- ции после сбоя.....	191
12.6. Подходы к построению архитектуры оптических сетей <i>TDM</i> .....	194
12.7. Резюме.....	197
Список литературы.....	198

## Используемые сокращения на русском языке

АРУ	–	автоматическая регулировка уровня
АСП- ЧРК	–	аналоговая система передачи с частотным разделением каналов
АСУМ	–	автоматизированная система управления и мониторинга
АЧХ	–	амплитудно-частотная характеристика
ВОК	–	волоконно-оптический кабель
ВОСП	–	волоконно-оптическая система передачи
ВОСП- СР	–	ВОСП со спектральным разделением оптических каналов
ГЛС	–	городская локальная сеть
МВВ	–	мультиплексор ввода/вывода
МСЭ-Т	–	Международный союз электросвязи, сектор стандартизации в области телекоммуникаций
ООСШ	–	оптическое отношение сигнал/шум
ОП	–	оконечный пункт линии передачи
ОСШ	–	отношение сигнал/шум (помехозащищённость)
ПВВ	–	пункт ввода/вывода оптических каналов линии передачи
ПЦИ	–	плезиохронная цифровая иерархия
СМП	–	сеть магистральная первичная
СТМ- <i>n</i>	–	синхронные транспортные модули СЦИ, $n = 1, 4, 16, 64, 256$
СЦИ	–	синхронная цифровая иерархия
ТРР	–	точка решения регенератора
УП	–	усилительный пункт линии передачи
ЧЦСТ	–	четверичный цифровой сетевой тракт

## Используемые сокращения на английском языке

ASE	–	усиленная спонтанная эмиссия (Amplified Spontaneous Emission)
-----	---	---

ATM	–	асинхронный способ переноса (Asynchronous Transfer Mode)
BA	–	(оптический) усилитель мощности (Booster Amplifier)
BER	–	коэффициент битовых ошибок, $K_{\text{ош}}$ (Bit Error Rate)
CWDM	–	спектральное разделение с увеличенным шагом сетки частот (Coarse WDM), «грубая WDM»
DCF	–	волокно, компенсирующее дисперсию (Dispersion Compensating Fiber)
DWDM	–	плотное спектральное уплотнение каналов (Dense WDM)
EDFA	–	усилитель на оптическом волокне, легированном эрбием (Erbium Doped Fiber Amplifier)
FEC	–	упреждающая коррекция ошибок (Forward Error Correction)
IP	–	интернет протокол (Internet Protocol)
LA	–	линейный оптический усилитель (Line Amplifier)
NF	–	коэффициент шума (шум-фактор) оптического усилителя (Noise Factor)
NRZ	–	код в линии "без возвращения к нулю" (Non Return to Zero)
OA	–	оптический усилитель (Optical Amplifier)
OTN	–	оптическая транспортная сеть (Optical Transport Network)
PA	–	(оптический) предусилитель (PreAmplifier)
PDL	–	потери, зависящие от поляризации (Polarization Dependent Loss)
RZ	–	код в линии "с возвращением к нулю" (Return to Zero)
SPM	–	фазовая самомодуляция оптического импульса в волокне (Self-Phase Modulation)
SSMF	–	стандартное одномодовое волокно, изготовленное согласно Рекомендации МСЭ-Т G.652 (Standard Single Mode Fiber)
STM	–	синхронный способ передачи, например, СЦИ (Synchronous Transfer Mode)
WDM	–	спектральное уплотнение каналов (Wavelength Division Multiplexing)

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения принципов построения телекоммуникационных систем со спектральным разделением оптических каналов и WDM аппаратуры для ВОСП. Приведены характеристики волоконно-оптических кабелей, пояснены принципы построения аппаратуры, показаны физические основы действия её отдельных компонентов, рассмотрены вопросы нормирования и измерения основных параметров аппаратуры и её функциональных узлов.

Преимущества технологии  $xWDM$ , где  $x = D$  для магистральных и  $x = C$  для региональных (внутризоновых и городских), а также корпоративных сетей связи заключаются в возможности прозрачной передачи по оптическому каналу сигналов разнообразных технологий, сохранении инвестиций компаний-операторов при постепенной интенсификации использования проложенного волокна, большей гибкости при проектировании и эксплуатации современных мультисервисных сетей связи. По сравнению с системами уплотнений сигналов во времени технология  $xWDM$  имеет выраженную специфику, связанную с применением на уровне комплектующих компонентов и функциональных узлов аппаратуры тонких физических эффектов, краткое описание которых приведено в [1, 2]. Эта специфика должна быть учтена при проектировании сетей связи с применением аппаратуры ВОСП-СР.

В пособии изложены особенности применения аппаратуры ВОСП-СР на новых и модернизируемых сетях связи различного назначения и уровня. Уделено внимание новым возможностям организации взаимодействия сетей, управлению ими и резервированию оптических каналов и цифровых трактов. Системы, основанные на технологии  $DWDM$  относятся к гибридным системам передачи, содержащим, помимо регенераторов, аналоговые оптические усилители. В учебном пособии приведён порядок проектирования и дан пример расчёта регенерационного участка линейного тракта аппаратуры ВОСП-СР с усилителями оптического многоканального сигнала. Описаны сетевые протоколы, применяемые при построении  $xWDM$ -систем.

При написании учебного пособия использованы авторские материалы А.Д. Снегова, Р.М. Шарафутдинова, В.А. Бурдина

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ (ВОСП-СП)

## 1.1. Характеристики волоконно-оптических систем

Волоконно-оптические системы передачи со спектральным разделением (ВОСП-СП) работают по волоконно-оптическим кабелям (ВОК) с кварцевыми одномодовыми оптическими волокнами (ОВ), соответствующими Рекомендациям МСЭ-Т G.652 и G.655. Основными характеристиками ОВ как линейной системы являются частотные характеристики потерь передачи и дисперсии. Используют оптические диапазоны *S*, *C* и *L* с наименьшими значениями потерь передачи в "окне прозрачности" с длиной волны  $\lambda \approx 1,55$  мкм, показанные на рис. 1.

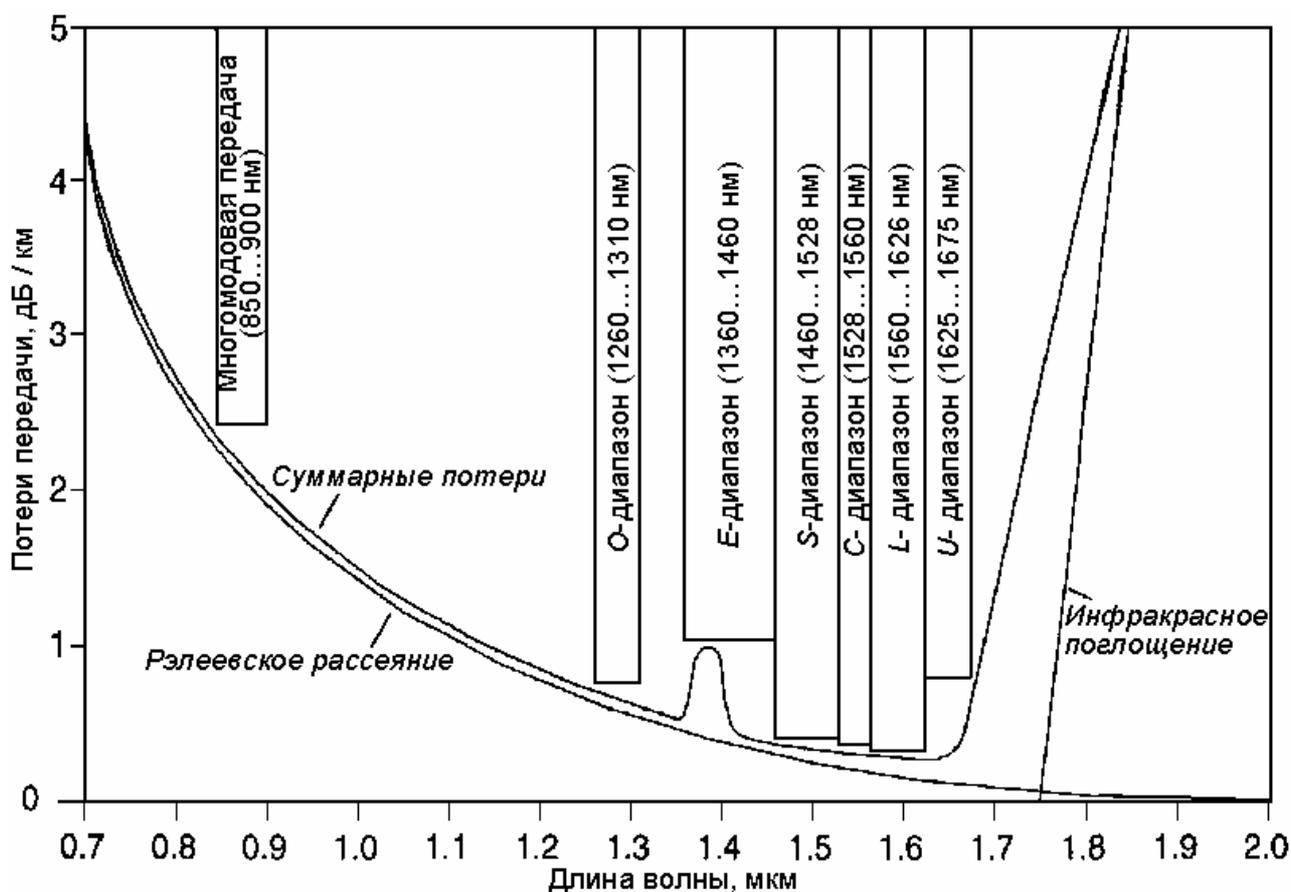


Рис. 1. «Окна прозрачности» и диапазоны передачи по оптическому волокну

В современных ВОК реализованные значения потерь передачи близки к теоретически минимальным, определяемым рэлеевским

рассеянием. Поскольку потери в волокне возможно компенсировать с помощью широкополосных оптических усилителей, протяжённость регенерационного участка ВОСП в настоящее время ограничена уширением оптического импульса  $\tau$ , определяемого характеристиками дисперсии ОВ.

В одномодовом оптическом волокне имеет место хроматическая и поляризационно-модовая дисперсия, причём последняя при используемых в настоящее время скоростях передачи сказывается несущественно.

Хроматическая дисперсия имеет две составляющие: материальную  $\tau_{\text{мат}}$  и волноводную  $\tau_{\text{вв}}$ , уширение оптического импульса из-за которых может быть рассчитано по формулам [3]:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot M(\lambda) \quad \text{и} \quad \tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot B(\lambda), \quad (1)$$

где  $\Delta\lambda$ , нм, – ширина спектральной линии источника излучения;  $l$ , км, – длина линии;  $M(\lambda)$  и  $B(\lambda)$ , пс/(км·нм) – удельные материальная и волноводная дисперсии оптического волокна соответственно.

Для кварцевого стекла с увеличением длины волны  $\tau_{\text{мат}}$  уменьшается и проходит через ноль, а  $\tau_{\text{вв}}$  несколько растёт, вблизи  $\lambda \approx 1,35$  мкм происходит их взаимная компенсация. Результирующая дисперсия стандартного волокна с несмещённой дисперсией *NDSF* (*non dispersion shifted fiber*, G.652) и ступенчатым профилем приближается к нулевому значению в *O*-диапазоне.

В целях сдвига минимума дисперсии в *C*- и *L*-диапазоны варьируют профилем показателя преломления и диаметром сердцевины. В трёхслойном световоде сложного профиля со сдвигом нуля дисперсии *ZDSF* (*zero dispersion shifted fiber*, G.653) минимум хроматической дисперсии получают на волне 1,55 мкм. ВОК G.653 предназначен для использования в одноканальных линиях связи с оптическими усилителями.

Как и частотное разделение, спектральное разделение подразумевает строго линейную среду распространения. Оптические усилители позволяют увеличивать мощность излучения в ОВ, однако, при большой мощности в сердечнике с диаметром 8...10 мкм возникают нелинейные явления. При наличии в ОВ небольшой дисперсии происходит распределение мощности импульса во

времени, что позволяет сохранить линейность среды до значения суммарной оптической мощности 0,5 Вт (уровень +27 дБм). В ОВ со смещенной ненулевой дисперсией *NZDSF* (*non-zero dispersion shifted fiber*, G.655) введена номинальная степень дисперсии, позволяющая реализовать многоканальные ВОСП со спектральным разделением оптических каналов и оптическими усилителями.

Типичные зависимости дисперсии от длины волны (*а*) и профили коэффициента преломления (*б*) для различных типов ОВ приведены на рис.2 [3].

Основные характеристики ОВ, выполненных по Рек. МСЭ-Т G.652 и G.655 [1], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип ОВ	Коэффициент затухания, дБ/км, в диапазоне			Дисперсия, пс/нм·км, в диапазоне		
	1310 нм	1550 нм	1600 нм	1310 нм	1550 нм	1600 нм
G.652	0,35...0,40	0,21...0,23	—	3,5	18	—
G.655	—	0,22	—	—	2,6...6,0	4,0...8,6

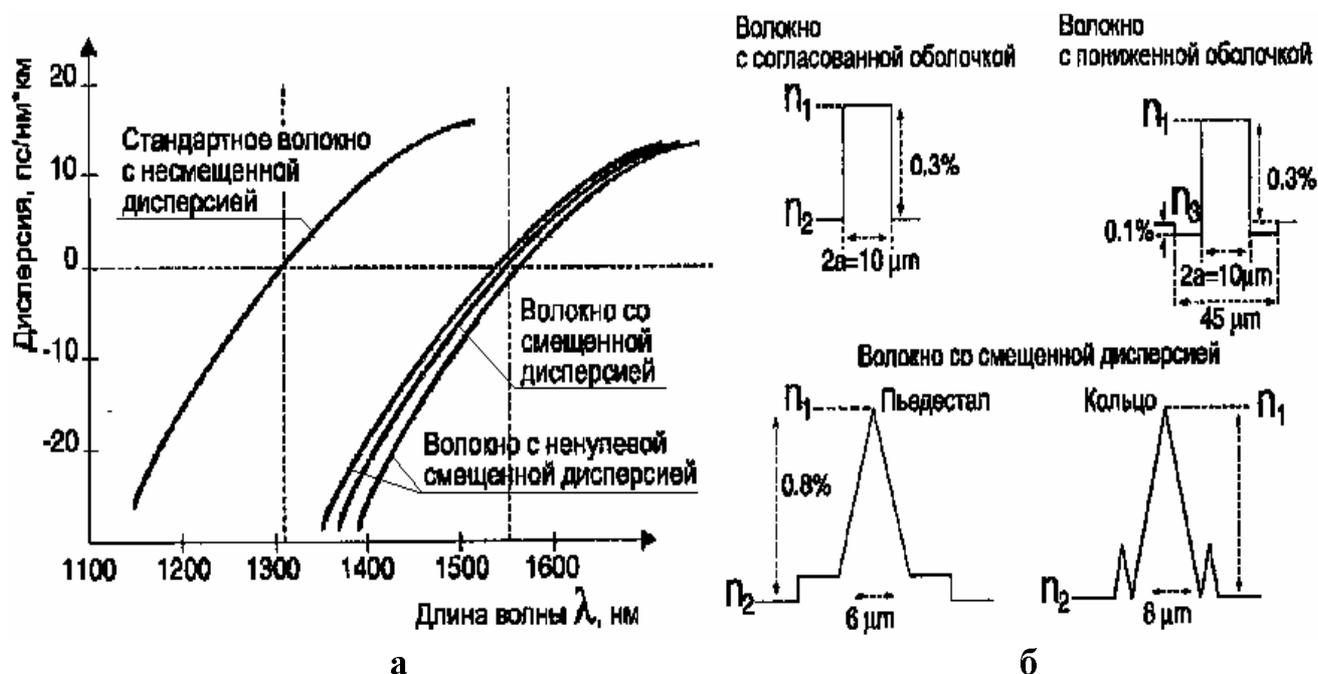


Рис. 2. Характеристики дисперсии (*а*) и профили коэффициента преломления (*б*) ОВ [4]

Дисперсия ОВ G.652 в *C*- и *L*-диапазонах может быть снижена применением специальных компенсаторов дисперсии, что позволяет применять ВОСП-СР для уплотнения уже проложенных ВОК. Для ОВ по G.655 применяют компенсаторы дисперсии для снижения величины её наклона с частотой.

## 1.2. Структурная схема ВОСП-СР

В одном окне прозрачности организуют большое количество высокоскоростных оптических каналов, каждый из которых имеет собственную оптическую поднесущую частоту, рис.3. Иногда, по аналогии с радиорелейными системами, говорят о «стволах» и частотном плане аппаратуры, т.е. о распределении номинальных частот, величине шага и т.д.

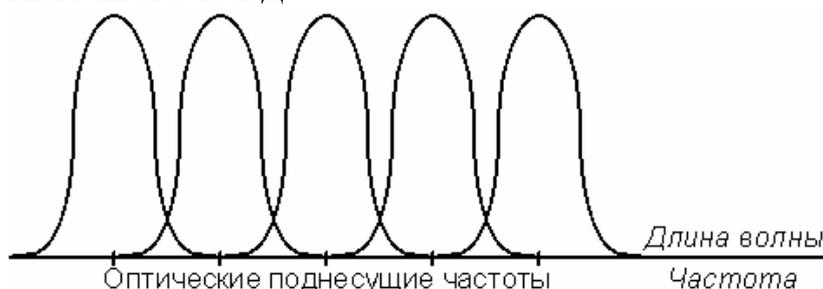


Рис. 3. Спектральное разделение оптических каналов

Структурная схема аппаратуры ВОСП-СР [4], реализующей технологию *DWDM*, представлена на рис. 4.

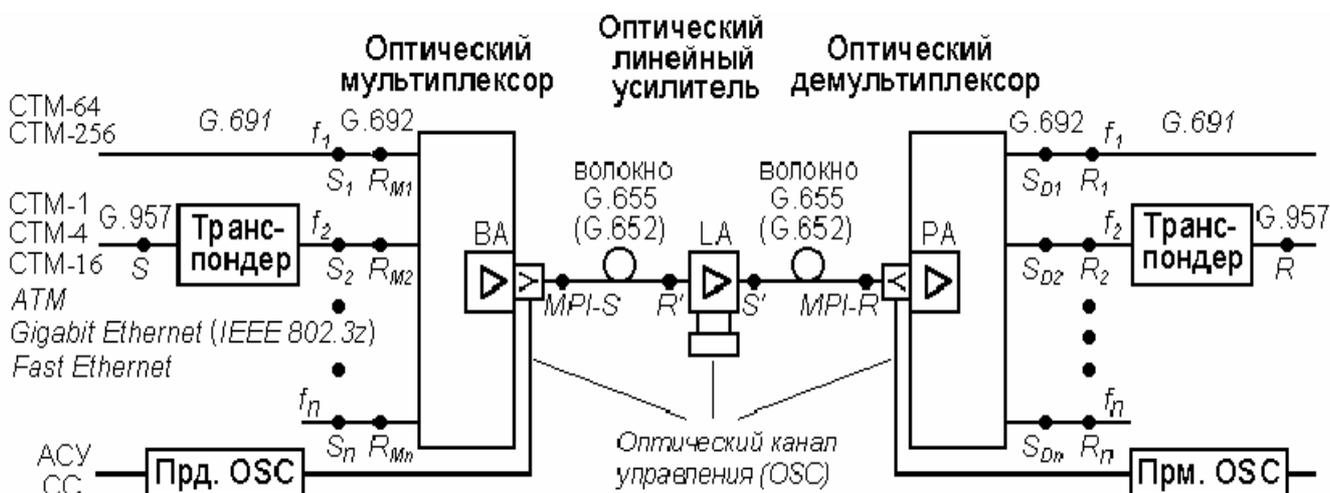


Рис. 4. Структурная схема аппаратуры ВОСП-СР

Аппаратура ВОСП-СР предназначена для передачи в одном или двух противоположных направлениях нескольких сигналов по одному волокну оптического кабеля с использованием источников излучения с различными длинами волн для передачи каждого сигнала [5].

Основными функциональными узлами аппаратуры являются оптические мультиплексоры и демультимплексоры, обеспечивающие объединение и разделение оптических каналов на передаче и приёме соответственно.

Повышение уровня группового сигнала осуществляется оптическими усилителями: на передаче – мощности (*booster amplifier, BA*), на приёме – предварительного усиления (*preamplifier, PA*) и в транзитных пунктах – промежуточными или линейными (*line amplifier, LA*). Отметим, что без применения оптических усилителей установка ВОСП-СР на сетях связи была бы экономически нецелесообразной.

В оконечном пункте на входы оптического мультиплексора  $R_{mi}$  могут быть направлены оптические сигналы, отвечающие требованиям технологии *DWDM* Рек. G.692 [6], в частности, цифровые потоки СТМ-64 и СТМ-256 СЦИ (*SDH*), соответствующие [7]. Оптические сигналы аппаратуры СЦИ, выполненной по [8], а также аппаратуры передачи данных, как правило, не отвечают требованиям Рек. G.692. В транспондере осуществляется преобразование длины волны оптического сигнала с переводом его в электрическую форму, регенерацией и излучением на требуемой по [6] длине волны с заданными характеристиками.

Важным свойством оптических каналов ВОСП-СР является их прозрачность для сигналов различных служб связи, то есть независимость от структуры и даже скорости цифровых потоков. Для этого регенераторы транспондеров иногда выполняются без восстановления временных позиций ( $2R$ ), тактовая синхронизация в этом случае не требуется.

По месту размещения в оптическом тракте различают оконечные, усилительные и транзитные пункты. Аппаратура усилительного пункта может включать оптические промежуточные усилители и компенсаторы дисперсии. Аппаратура транзитного

пункта может быть выполнена в виде установленных «спина к спине» оконечных пунктов или оптических мультиплексоров ввода/вывода для выделения сигналов оптических каналов [5].

Особенностью ВОСП-СР является наличие вынесенного за рабочий диапазон частот служебного оптического канала (*OSC*), что позволяет сохранять управляемость системой при выходе из строя элементов главного тракта. Техническая эксплуатация осуществляется с применением автоматизированных систем управления (АСУ) аппаратурой электросвязи. Аппаратура контролируется и управляется с помощью местного служебного терминала (через стык *F* в формате *RS232C*) и/или с помощью рабочей станции сетевой системы управления и контроля оператора (через стык *Q*).

Система автоматизированного контроля и управления с соответствующим программным обеспечением обеспечивает следующие режимы управления и контроля: конфигурирование; обслуживание аварийных событий; контроль рабочих характеристик; выполнение функций автоматического выключения выходной оптической мощности при отсутствии входного оптического сигнала.

Функции контроля и управления должны осуществляться с помощью контроллера сетевого элемента и контроллеров блоков сетевых элементов, которые обрабатывают информацию об авариях с указанием степени срочности устранения аварии и статусе каждого блока. Контроллер каждого блока должен быть снабжен встроенным программным обеспечением, загрузка которого обеспечивается рабочей станцией или местным служебным терминалом. Процесс загрузки программного обеспечения не должен влиять на процесс передачи цифровых сигналов в оптических каналах. Должно быть обеспечено автоматическое опознавание версии программного обеспечения, а также типа и серийного номера каждого блока. Максимальное время между появлением неисправности и отображением информации об этой неисправности должно быть не более 3,0 с.

В аппаратуре предусматривают организацию служебной связи (СС) и телеобслуживания с использованием оптического служебного канала (*OSC*).

## 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ АППАРАТУРЫ ВОСП-СР

### 2.1. Источники и приёмники оптического излучения

В качестве источника оптического излучения используются полупроводниковые лазеры, отвечающие повышенным требованиям ВОСП-СР:

- частота излучения  $f_i$  от 184,4 ТГц до 205,4 ТГц с шагом  $\Delta f_{OK} = 100$  ГГц (допускаются расстояния между поднесущими частотами  $\Delta f_{OK} = 50$  и 25 ГГц);
- ширина спектра излучения  $\Delta f_{изл}$  – не более 1 ГГц;
- точность и стабильность установки частоты излучения  $f_i$  – не хуже  $10^{-6}$ .

Столь жёсткие требования обеспечиваются за счёт введения в традиционные лазерные диоды поперечного типа (*edge emitter*) на основе резонатора Фабри-Перо дополнительных частотно-селективных элементов, а также использованием лазеров поверхностного излучения с вертикальным объёмным резонатором *VCSEL* (*vertical cavity surface-emitting laser*).

В лазерах поперечного типа с распределённой обратной связью *DFB* (*Distributed Feed Back*) непосредственно в активной зоне кристалла – резонатора с повышенной добротностью формируется распределённая брегговская решётка, рис. 5, а [10].

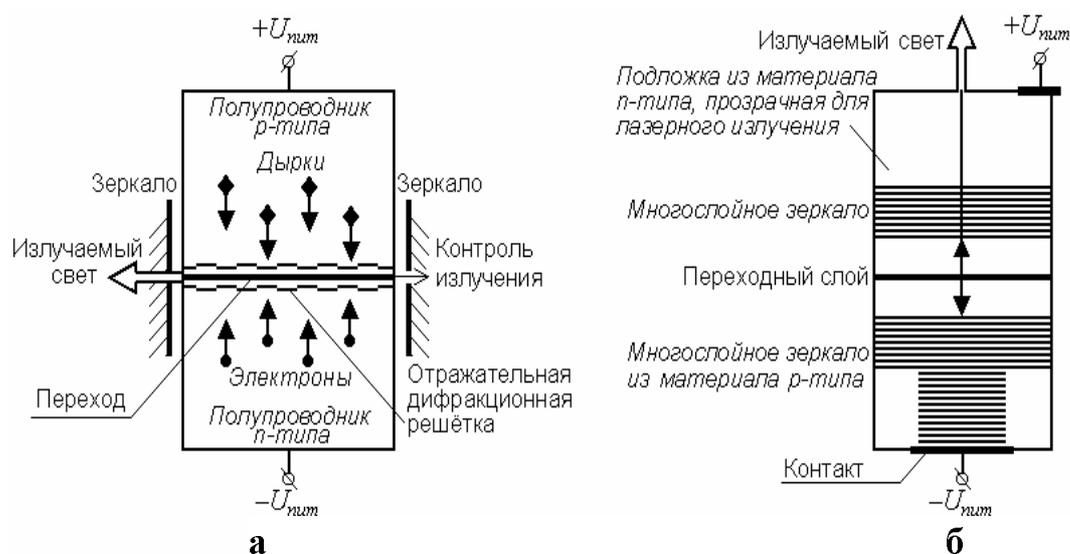


Рис. 5. Структуры лазерных диодов для ВОСП-СР: а) *DFB*; б) *VCSEL*

*DFB*-лазеры имеют  $\Delta f_{\text{изл}} < 10$  ГГц, но чувствительны к изменениям температуры, тока накачки, и обратным отражениям сигнала, что требует дополнительного усложнения прибора.

В лазерах поперечного типа с распределённой брегговской решёткой *DBR* (*Distributed Bragg Reflector*) последняя расположена вне активной зоны лазера (в предусилителе многосекционного лазера либо в оптическом волокне). За счёт повышения эффективной длины резонатора  $\Delta f_{\text{изл}}$  может быть сделана значительно меньше (до 1 МГц у лазера с брегговской решёткой в ОВ).

В лазерах для ВОСП-СР стабилизация параметров во время работы обеспечивается за счёт поддержания постоянных значений температуры и тока накачки лазера.

В лазерах *VCSEL* дополнительная селективность обеспечивается за счёт выполнения зеркал резонатора из многих слоёв, число, толщина и состав которых определяют длину волны излучения. Их важнейшие преимущества – высокая технологичность при изготовлении и удобство в эксплуатации (большой КПД, облегчённый теплоотвод, повышенный срок службы). В настоящее время длины излучаемых волн составляют 750...1000 нм.

Для автоматизированного управления сетями с аппаратурой ВОСП-СР желательно иметь лазеры с перестраиваемой частотой. Одно из решений – применение внешнего резонатора на основе механически поворачиваемой дифракционной решетки, высокая селективность которой обеспечивает узкий спектр излучения лазера. Более привлекательным решением является использование эффекта изменения коэффициента преломления оптической среды под действием электрического поля. В настоящее время лазеры с перестраиваемой частотой в серийной аппаратуре ВОСП-СР не применяются.

На высоких скоростях передачи целесообразно применять простейший тип модуляции – амплитудную, причём управление излучением может быть непосредственным, путём изменения тока накачки, или внешним. Изменение тока накачки приводит к изменению коэффициента преломления вещества активной зоны высокочастотного резонатора, в результате во время светового импульса происходит паразитная частотная модуляция (*chirp*), и спектр излучения расширяется. В высокоскоростных системах

применяют внешнюю модуляцию, основанную на сложении или компенсации расщеплённого луча лазера при изменении коэффициента преломления оптической среды под действием электрического поля.

Приёмники оптического излучения выполняются на *pin*-фотодиодах и в ВОСП-СП особенностей не имеют. Необходимая селективность по частоте обеспечивается оптическими демультиплексорами.

## 2.2. Устройства объединения и разделения оптических каналов

Основным элементом ВОСП-СП является оптический мультиплексор, представляющий собой линейное устройство объединения/разделения оптических каналов. В силу линейности устройства возможна двусторонняя передача оптических сигналов по одному волокну, а также ввод и вывод отдельных оптических каналов из группового сигнала.

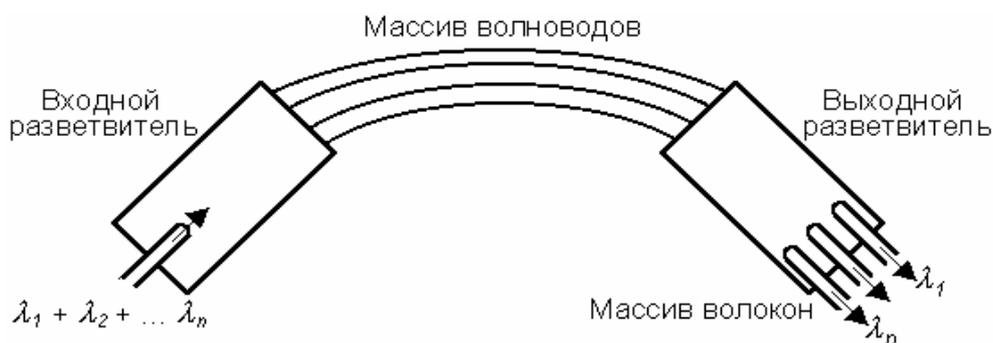


Рис. 6. Принцип действия AWG-мультиплексора

Простейшая реализация оптического мультиплексора может быть основана на действии призмы. Для повышения избирательной способности по частоте применяют дифракционные решётки, по пространственным координатам – линзы.

Наибольшее распространение получила конструкция оптического мультиплексора в виде дифракционной решётки на массиве волноводов (*AWG*). Это устройство состоит из изогнутых волноводов по числу оптических каналов с постоянным шагом разности длин, как показано на рис.6. Волноводы соединены с разветвителями на входе и выходе. Когда свет поступает во входной

разветвитель, он подвергается дифракции и попадает в волноводы. Там разность оптических длин каждого из волноводов порождает фазовое запаздывание в выходном разветвителе, где волноводы объединяются. В результате возникает пространственно-частотное разнесение, которое и требуется на выходе. *AWG*-мультиплексоры имеют плоскую частотную характеристику передачи при низких потерях, но могут быть чувствительны к изменениям температуры окружающей среды.

Другое распространённое техническое решение оптического мультиплексора – с помощью многослойных интерференционных фильтров или фильтров на тонких плёнках, рис. 7. Его действие основано на свойстве фильтров пропускать только одну длину волны, отражая все остальные. Фильтры включаются в каскадное соединение, число каскадов равно числу оптических каналов. Такие мультиплексоры вносят заметное затухание на основной частоте, поэтому их применяют при небольшом числе каналов.

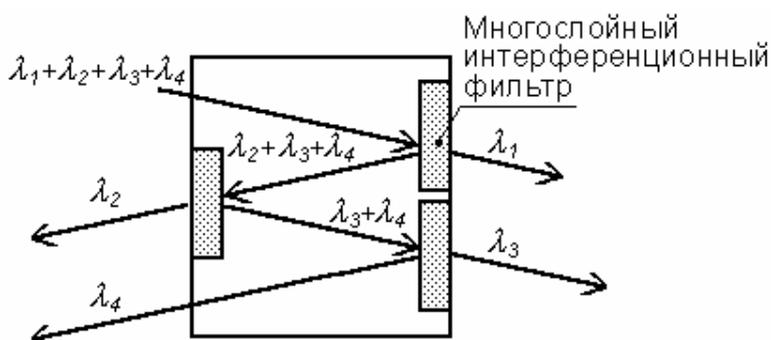


Рис. 7. Оптический демультиплексор на базе интерференционных фильтров

Перспективной является технология трёхмерного оптического мультиплексирования, основанная на использовании вогнутого зеркала и плоской дифракционной решётки. Многоканальный световой поток имеет коническую расходимость и падает на вогнутое зеркало. Затем отражается от него, попадает в разные точки дифракционной решётки, где происходит частотная селекция. Отражённые от решётки лучи, снова отражаясь от вогнутого зеркала, собираются в определённых точках – выходах демультиплексора.

### 2.3. Пассивные оптические компоненты

К основным пассивным оптическим компонентам ВОСП относятся оптические соединители, разветвители, аттенюаторы, изоляторы.

Наиболее распространённые типы соединителей могут содержать также разветвители и аттенюаторы [11]:

*ST* – выполнен в виде коаксиальной (*Bayonet*) конструкции с ключом; в целях недопущения попадания воздуха между торцами совмещаемых ОВ, им придают сферическую форму и шлифуют, что позволяет создать плотный физический контакт (*Physic Contact, PC*); в настоящее время считается устаревшим;

*FC/PC (Fiber Connector/PC)* – имеет металлический корпус и резьбовое соединение, рекомендуется для одномодовых волокон ВОЛС;

*SC (Square Connector)* – имеет пластмассовый корпус прямоугольной формы, удобен при формировании группы оптических соединителей, дешев и наиболее перспективен;

*LC (Lucent Connector)* – на два ОВ (передача и приём), имеет пластмассовый прямоугольный корпус, разработан для аппаратуры ВОСП компанией *Lucent Technologies*, применяется также и другими изготовителями.

Оптические изоляторы применяют в высокоскоростных ВОСП для защиты лазерных диодов от паразитных отражений со стороны кабеля: в направлении пропускания они вносят незначительные потери (1...2 дБ), в обратном – существенное затухание (> 20 дБ). Действие оптического изолятора основано на невзаимном электрооптическом эффекте Фарадея, при котором поворот плоскости поляризации излучения, проходящего через магнитооптический материал (например, железиттриевый гранат  $Y_3Fe_5O_{12}$ ), зависит не от направления распространения излучения, а от направления намагниченности среды. Устройство состоит из поляризатора и анализатора поляризации, установленных по обе стороны ячейки Фарадея.

### 2.4. Оптические усилители

Широкополосные оптические усилители повышают уровень линейного оптического сигнала ВОСП-СР без разделения на

оптические каналы. Это позволяет увеличить расстояния между весьма дорогостоящими регенераторами, где производится демультиплексирование оптических каналов, преобразование сигнала из оптической формы в электрическую, собственно регенерация и обратные преобразования.

Компенсация затухания группового оптического сигнала в волокне и элементах аппаратуры в настоящее время производится с помощью усилителей на базе волокна, легированного эрбием (*EDFA*). Принцип действия оптического усилителя иллюстрируется на рис. 8.

Атомы редкоземельного элемента эрбия, будучи возбужденными благодаря накачки внешнего лазера, излучают свет в *S*-диапазоне с длиной волны 1,54 мкм. Ослабленный оптический сигнал, распространяясь по легированному эрбием волокну, стимулирует освобождение запасенной энергии атомов эрбия, что приводит к повышению уровня сигнала. Поскольку излучение является спонтанным, в сигнал добавляется шум, характеризуемый коэффициентом шума усилителя.

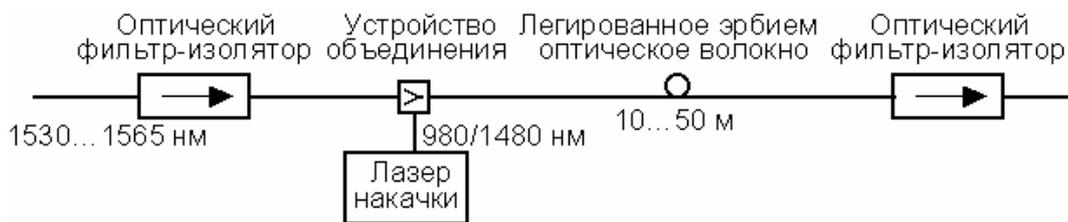


Рис. 8. Принцип действия оптического усилителя на базе волокна, легированного эрбием

Усиление  $g$  оптического усилителя типа *EDFA* может быть вычислено по заданным средней входной мощности  $P_{вх}$  и средней выходной мощности  $P_{вых}$

$$g = 10 \cdot \lg \{ [P_{вых}(\lambda) - P_{ASE}(\lambda)] / P_{вх}(\lambda) \}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $P_{ASE}$  – мощность усиленного спонтанного излучения.

Для типовых значений оптического отношения сигнал/шум (ООСШ) справедливо следующее:  $P_{вых} \gg P_{ASE}$ , и  $g = P_{вых} - P_{вх}$ , дБ.

Усиление оптического усилителя существенно зависит от уровня входного сигнала, как показано на рис. 9 [11]. С повышением уровня  $P_{вх}$  усиление снижается.

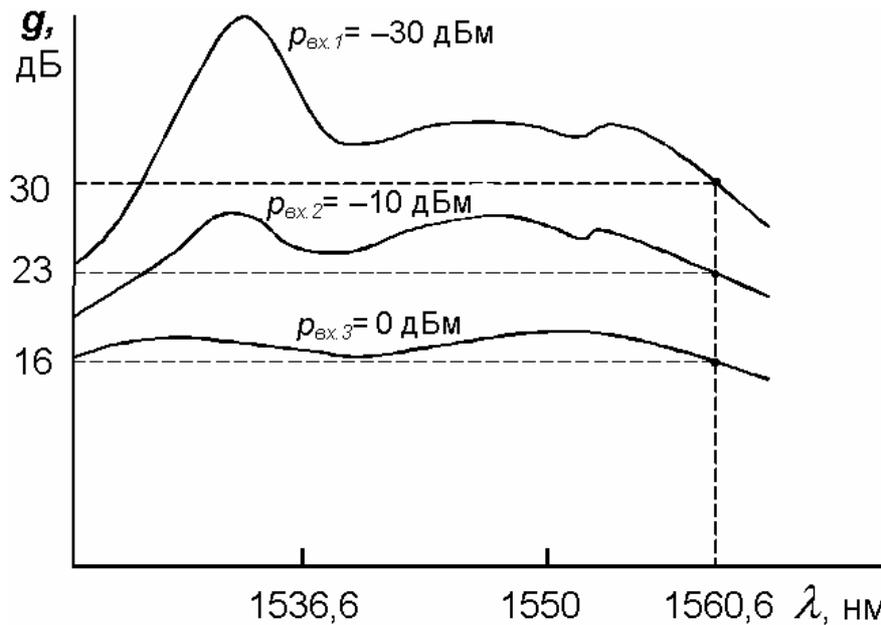


Рис. 9. Частотная зависимость усиления *EDFA* при различных уровнях входного сигнала

Этот эффект приводит к изменению уровней сигналов в линии при добавлении или исключении отдельных оптических каналов, что вызывает необходимость наличия системы АРУ. В связи с этим вводят термин "*перекрёстное насыщение усиления*" – изменение усиления конкретного канала, когда входной уровень другого канала (или нескольких каналов) изменяется на некоторую величину [13].

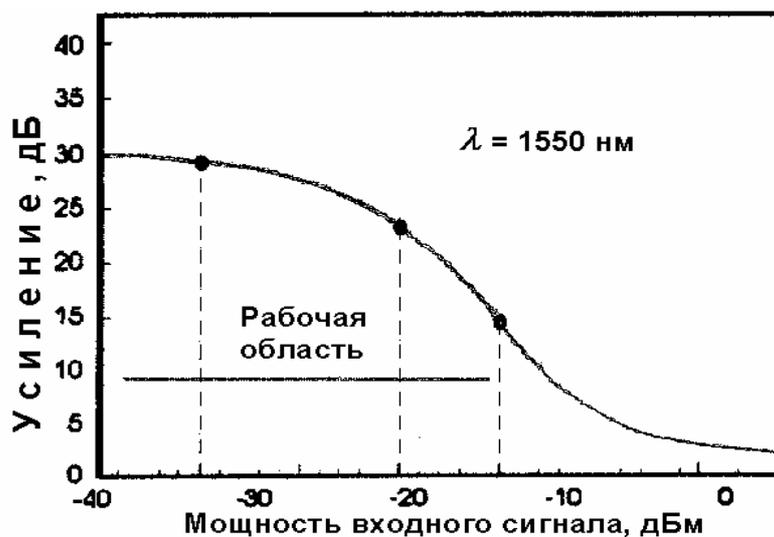


Рис. 10. Энергетическая зависимость усиления *EDFA*

Зависимость усиления *EDFA* от уровня мощности входного сигнала на длине волны 1550 нм приведена на рис. 10 [11]. Вводят

параметр «мощность насыщения»  $P_{\text{нас}}$ , определяемый как значение мощности сигнала на выходе усилителя, при которой коэффициент усиления  $G$  в два раза (усиление  $g$  на 3 дБ) меньше максимального значения коэффициента усиления  $G_{\text{max}}$ , достигаемого при малом входном сигнале.

В 1928 г. было открыто явление комбинационного рассеяния света на кристаллах (Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам, СССР) и в жидкостях (Ч.В. Раман и К.С. Кришнан, Индия), заключающееся в изменении наблюдаемой частоты света при его рассеянии в прозрачном материале. При прохождении света через прозрачное вещество фотоны в результате упругих столкновений с его молекулами теряют или получают энергию. Следствием этого является возникновение линий дополнительных цветов, называемых рамановским спектром. Поскольку рамановский спектр не привязан к фиксированным энергетическим уровням, как в случае эрбия, он может быть получен на любой длине волны в инфракрасной области, если имеется источник возбуждающего излучения достаточно высокой мощности. Эта особенность позволяет применять рамановские усилители во всём диапазоне передачи кремниевых волоконно-оптических кабелей. У оптических усилителей, основанных на эффекте комбинационного рассеяния света, направления распространения информационного сигнала и энергии накачки противоположны, и коэффициент шума меньше, чем у *EDFA*.

Рамановское усиление возникает, когда фотоны накачки высокой энергии (коротких длин волн) рассеивают колебательные моды матричной решётки материала (оптические фононы) и когерентно добавляют их к сигнальным фотонам низкой энергии (больших длин волн) [13].

Мощность накачки вводится непосредственно в рабочее волокно ВОК в направлении, противоположном направлению распространения сигнала. При этом рамановский усилитель работает как малошумящий предусилитель, не вносящий в волокно дополнительных нелинейностей.

Форма АЧХ усиления имеет вид пика, причём максимальное усиление соответствует частоте, на 13,2 ТГц выше частоты накачки. Например, при длине волны накачки 1,443 нм и мощности 200 мВт в

C-диапазоне (1530-1560 нм) вносится усиление 7... 8 дБ.

Применение рамановских усилителей на линиях с *EDFA* позволяет повысить оптическое ОСШ и удлинить усилительный участок до 200 км. Известно также совместное использование рамановских усилителей с *EDFA* для расширения результирующей полосы частот усиления.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ АППАРАТУРЫ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Функциональные характеристики ВОСП-СР должны соответствовать [5].

Уровень оптической мощности при числе каналов, менее 16 измеряют по методике, приведённой в [9]. При числе каналов более 16 используют оптический коммутатор и измерительный комплекс для ВОСП-СР. Схема измерений приведена на рис. 11. При обработке результатов к показаниям измерителя уровня мощности прибавляют потери, вносимые оптическим кабелем  $A_{ок}$  и оптическими соединителями  $A_{ос}$  (по паспортным данным).

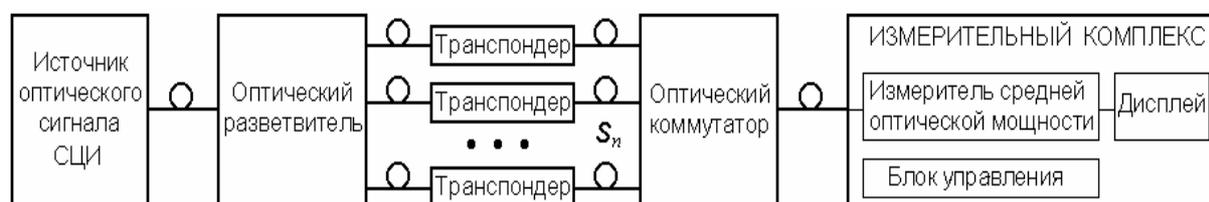


Рис. 11. Схема измерений уровня оптической мощности при числе каналов более 16

Результаты измерений должны соответствовать табл. 2.

*Спектральные характеристики* – центральные частоты (длины волн) оптических каналов, отклонения центральных частот оптических каналов от номинальных значений, ширину спектра оптических каналов и коэффициент подавления боковой моды измеряют с помощью оптического спектроанализатора или измерителя длины волны с точностью измерения по длине волны не хуже 0,003 нм. При числе каналов более 16 применяют схему измерений, аналогичную

приведённой на рис. 8, причём в измерительном комплексе задействуют оптический спектроанализатор.

Таблица 2

Уровень мощности, дБм	Точки нормирования тракта				Оптические усилители					
	Пд <sub>i</sub>	ГПд, Пд'	ГПр	Пр'	передачи		промежуточные		приёма	
					вх.	вых.	вх.	вых.	вх.	вых.
Минимальный	-5	≤ +27,0	≤ +1,0	≤ +10,0	-17,5	+3,5	-36,0	+3,5	-36,0	-10,0
Максимальный	+3				+16,6	+27,0	+10,0	+27,0	+1,0	+17,0

Номинальные значения центральных частот сетки с шагом 100 ГГц для диапазонов *S*, *C* и *L* можно вычислить по формуле:

$$f_n = A + n \cdot 0,1, \text{ ТГц при } n = 1 \dots B. \quad (3)$$

Как правило, результаты измерений представляются в значениях длин волн  $\lambda$ , нм. Частота  $f$  и длина волны  $\lambda$  связаны соотношением  $f = c/\lambda$ , где  $c = 2,9979 \times 10^{17}$  нм/с. Пересчёт отклонений значений центральных частот удобно производить по формуле:

$$\Delta f_n = C \cdot \Delta \lambda, \quad (4)$$

при этом погрешность пересчёта не превышает  $\pm D, \%$ . Значения констант  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оптический диапазон			Константы :			
обозначение	частоты, ТГц	длины волн, нм	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>S</i>	205,4...196,2	1459,56...1528,00	196,1	93	134	5
<i>C</i>	196,1...192,1	1528,77...1560,61	192,0	41	125	2,5
<i>L</i>	192,0...184,4	1561,42...1625,78	184,3	77	117	4

Допустимые отклонения центральных частот оптических каналов (в ГГц) от их номинальных значений приведены в табл. 4.

*Ширину спектра* (полосу оптического канала) определяют как разность длин волн в нм, измеренных по заданным уровням мощности (на 3 дБ и 20 дБ ниже уровня мощности на центральной частоте оптического канала) и пересчитанных по формуле (4). Нормируемые значения параметров сведены в табл.5. Схема измерений спектральных характеристик приведена на рис. 12.

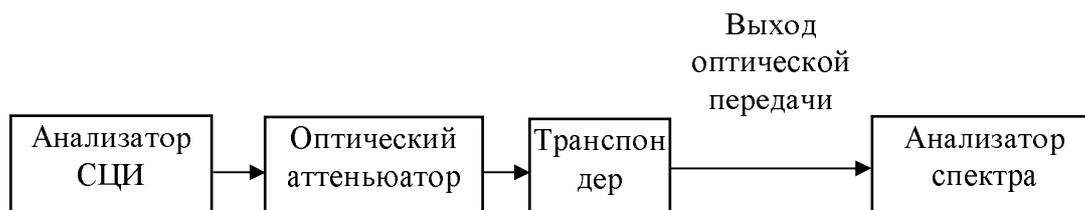


Рис. 12. Схема измерений центральной частоты и её отклонения

Из точного значения центральной частоты, рассчитанного по (1), вычитают показания анализатора спектра. Результаты измерений должны лежать в пределах, указанных в табл. 4.

Таблица 4

Расстояние между ОК, ГГц	Точки Пд <sub>i</sub> , скорость передачи, Гбит/с			Мультиплексоры								
				оконечные, при количестве оптических каналов					ввода/вывода, при общем количестве ОК / ответвляемых-вводимых ОК			
	≤0,622	2,5	10,0	8	16	40	80	160	8/4	16/8	40/16	
200	±20,0			±5,0		---			±5,0		---	
100	±10,0			-	±5,0				---	±5,0		
50	±10,0	±5,0		---		±3,0			---		±3,0	

Сокращение: ОК – оптический канал

Таблица 5

Ширина спектра (полосы) ОК, по уровню	Точки Пд <sub>i</sub> , скорость передачи, Гбит/с			Мультиплексоры									
				оконечные, при количестве ОК					ввода/вывода, при общем количестве ОК / ответвляемых-вводимых ОК				
	≤0,622	2,5	10,0	8	16	40	80	160	8/4	16/8	40/16		
–3 дБ, не менее, при шаге, ГГц	—			---									
200				50,0		---			50,0		---		
100				–	50,0			50,0		---			
50				—		25,0			---		25,0		
–20 дБ, не более, при шаге, ГГц	—			---									
200				80,0		–	–	–	80,0		–		
100				14,0	20,0	40,0	–	80,0			80,0		–
50				–		–	40,0			–	–	40,0	

Сокращение: ОК – оптический канал

Пример показаний спектроанализатора при измерении спектральных характеристик для оптического канала со средней частотой 192,1 ГГц ( $\lambda_1 = 1560,61$  нм) приведён на рис. 13. Как следует из рис. 13, центральная длина волны излучения составляет  $\lambda_2 = 1560,62$  нм. Отклонение длины волны излучения от номинальной составляет  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 1560,62 - 1560,61 = 0,01$  нм. Отклонение центральной частоты от номинальной для диапазона 1550 нм можно определить по (4):  $\Delta f = 125 \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) = 125 \cdot (-0,01) = -1,25$  ГГц.

Характеристики формы сигнала (глазковую диаграмму и коэффициент гашения) измеряют по методике, приведённой в [9].

Значение коэффициента гашения в точках П<sub>д</sub> при скорости передачи до 10,0 Гбит/с должно быть не менее 8,2 дБ.

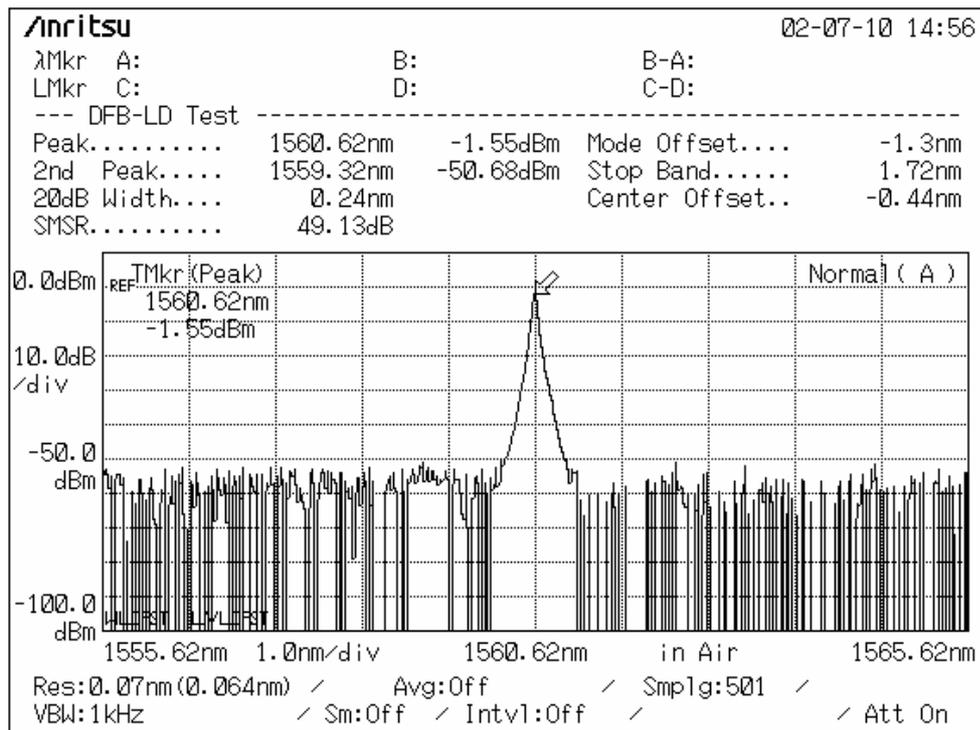


Рис. 13. Результат измерения спектральных характеристик в точке S<sub>n</sub>

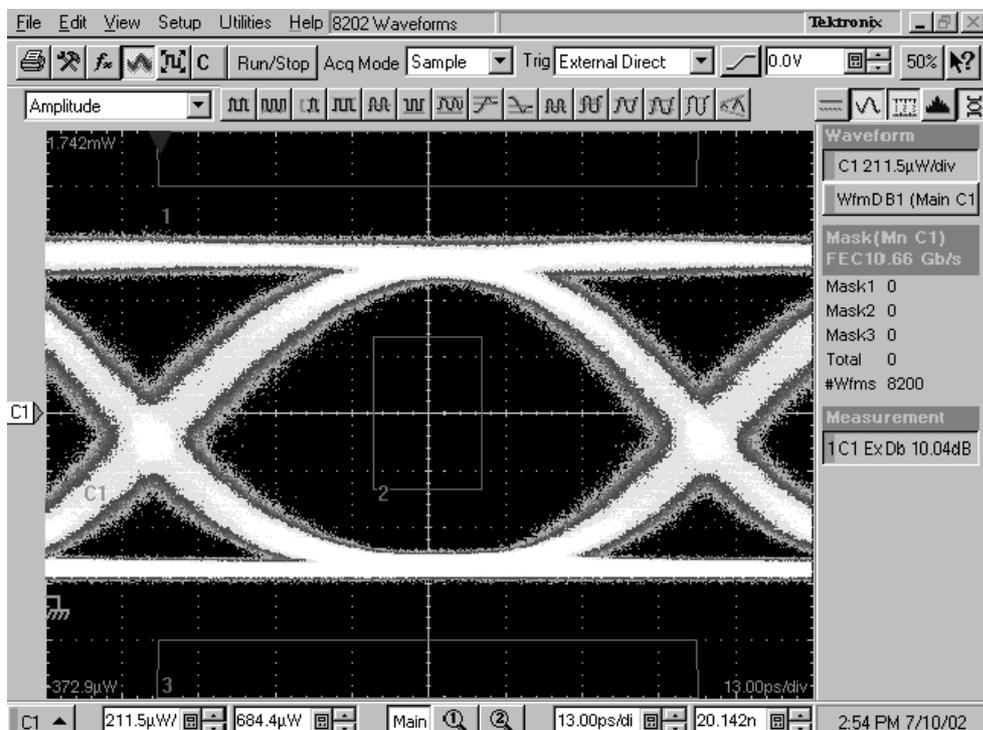


Рис. 14. Результаты измерения глазковой диаграммы потока STM-64

Результат измерений *глазковой диаграммы* представлен на рис. 12 и находится в пределах шаблона (элементы 1, 2 и 3 рисунка).

*Коэффициент гашения* ( $1C1 Ex Db$  на рис. 14), равный 10,04 дБ, удовлетворяет норме (более 10 дБ).

*Затухание отражения* в точках нормирования  $P_{дi}$  ( $S_i$ ) измеряют либо с помощью специального измерителя коэффициента отражения, либо согласно п. 7.2.3.1 [10] по схеме рис. 14. В этом случае для измерений используются измеритель оптической мощности с пределами измерений +20 дБм...–60 дБм и калиброванный отражатель, обеспечивающий –24 дБ.

Перед измерениями производят калибровку измерительной установки. Для этого сначала измеряют уровень оптической мощности  $P_{пд}$  на выходе транспондера. Затем выход транспондера через оптический соединительный кабель подключают к выходу 3 оптического разветвителя и измеряют уровень мощности  $P_{32}$  на выходе 2 оптического разветвителя, рис.15, а.

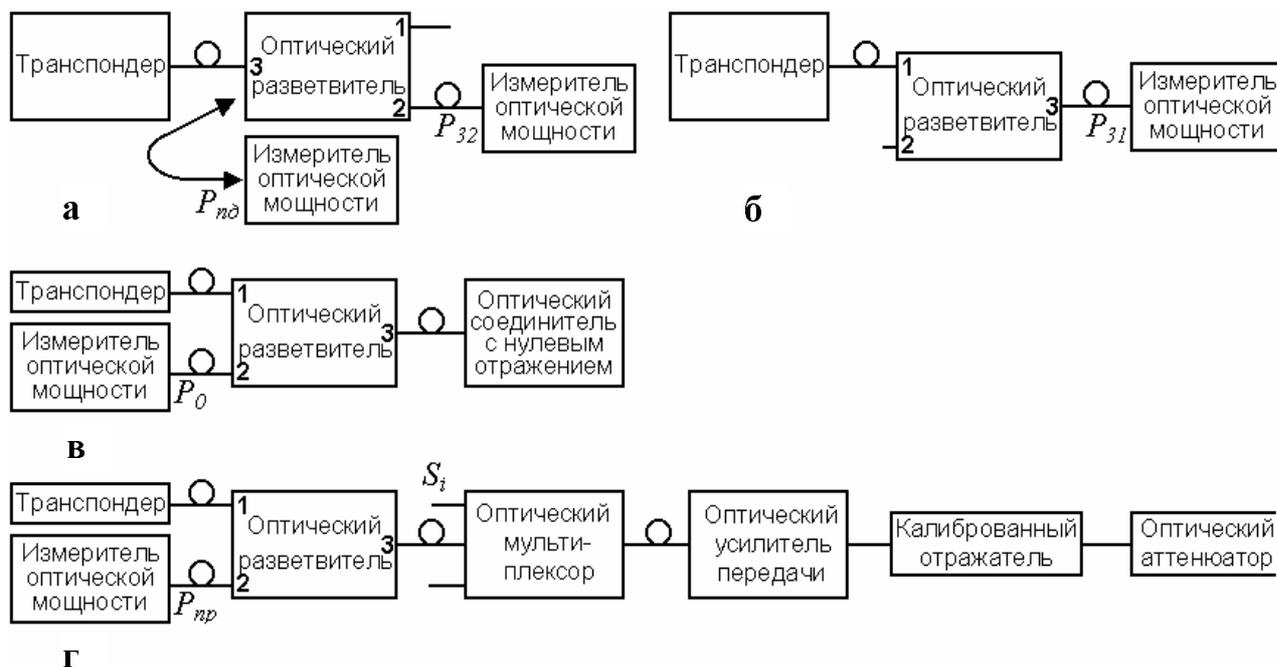


Рис. 15. Схемы измерения затухания отражения согласно п. 7.2.3.1 ОСТ 45.131-99

Затем выход транспондера подключают ко входу 1 оптического разветвителя и измеряют уровень оптической мощности  $P_{13}$  на выходе 3, рис.15, б. Далее к выходу 3 оптического разветвителя

подключают оптический соединитель (нагрузку) с нулевым отражением и измеряют уровень мощности  $P_0$  на выходе 2, рис.15, в. В качестве нагрузки можно использовать оптический соединитель, помещённый в кювету с гелем, показатель преломления которого приблизительно равен показателю преломления сердечника волокна, например, обезвоженный глицерин.

После калибровки нагрузку отключают, тщательно очищают торец соединителя кабеля, после чего выход 3 оптического разветвителя подключают к точке Пд<sub>і</sub> и измеряют мощность  $P_{пр}$  на выходе 2 оптического разветвителя, рис.15, г. Значение затухания отражения  $K_{30}$  по результатам измерений определяют по формуле:

$$K_{пр} = 10 \lg [P_{пд} (P_{пр} - P_0) / P_{13} \cdot P_{32}], \text{ дБ}; \quad K_{30} = -K_{пр} . \quad (5)$$

Полученное значение затухания отражения должно быть не менее 24 дБ.

*Уровень чувствительности и уровень перегрузки* в точке Пр<sub>і</sub> оптического канала измеряют по методикам, приведённым в [9]. Полученные значения должны быть не хуже приведённых в табл. 6.

Таблица 6

Наименование характеристики	Скорость передачи цифрового сигнала		
	≤ 0,622 Мбит/с	2,5 Гбит/с	10,0 Гбит/с
Уровень чувствительности при коэффициенте ошибок $10^{-12}$ , не более, дБм	-23	-15	-12
Уровень перегрузки при коэффициенте ошибок $10^{-12}$ , не менее, дБм	-8	0	

*Коэффициент отражения* приёмника в точке Пр<sub>і</sub> оптического канала измеряют либо с помощью оптического рефлектометра непрерывного излучения по методике, изложенной в п. 7.2.3.1 [10]

при подключении выхода 3 оптического разветвителя к точке  $Pr_i$ , либо согласно п. 7.2.3.2 [10].

В последнем случае измерения производят с помощью оптического рефлектометра во временной области с источником оптического импульсного сигнала большой скважности ( $>10^4$ ) и высокочувствительным оптическим приёмником. Схема измерений приведена на рис.16, а.

При проведении измерений применяют оптический соединительный кабель длиной, превышающей величину "мёртвой зоны" рефлектометра, оптический соединитель с известным коэффициентом отражения  $K_0$  и регулируемый калиброванный оптический attenuator со следующими характеристиками:

- диапазон рабочих длин волн: 1200...1600 нм;
- максимальное затухание: 60 дБ;
- точность установки затухания:  $\pm 0,05$  дБ;
- вносимые потери:  $\leq 3$  дБ;
- затухание отражения: не менее 33 дБ.

Перед измерениями проводят калибровку измерительной установки, для чего выход attenuатора подключают к оптическому соединителю и увеличивают затухание, вносимое attenuатором, до момента начала уменьшения амплитуды отражённого сигнала на экране рефлектометра и измеряют величину амплитуды отражённого сигнала  $A_0$ , рис.16, б. Полученные значения должны соответствовать приведённым в табл. 7.

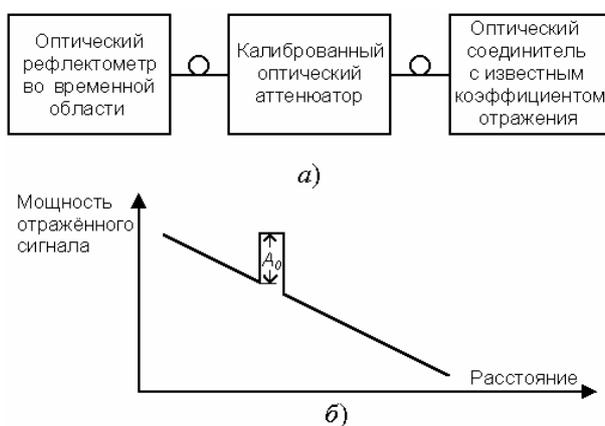


Рис. 16. К методике измерений коэффициента отражения по п. 7.2.3.2  
ОСТ 45.131-99

Таблица 7

Нормируемый параметр: коэффициент отражения, не более, дБ	Точка Пр <sub>i</sub>	Оптические усилители	Оптические мультиплексоры	
			оконечные	ввода/вывода
	-27	-30	-40	-30

Уровень оптического излучения в одном канале в точках нормирования ГПд, Пд', ГПр и Пр' измеряют с помощью спектроанализатора, причём при измерениях в точках ГПд, Пд' используются соединительные кабели специального типа и калиброванные оптические аттенюаторы, выдерживающие повышенные уровни оптического излучения. К уровням мощности каждого оптического канала, индицируемым спектроанализатором, следует прибавить затухание калиброванного оптического аттенюатора. Полученные значения должны соответствовать приведённым в табл. 8.

Таблица 8

Уровень мощности на один оптический канал, дБм:	Точки нормирования оптического тракта:	
	ГПд , Пд'	ГПр , Пр'
минимальный	≤ +20	-36,0
максимальный		-15,0

Максимум различия уровней оптической мощности в оптических каналах определяют как разность максимального и минимального измеренных уровней. Это различие не должно превышать 2 дБ.

Оптическая переходная помеха между оптическими каналами в точках нормирования ГПд, Пд', ГПр и Пр', а также для оптических мультиплексоров измеряется с помощью спектроанализатора в двух режимах:

- переходная помеха по смежным каналам (измеряемый канал незагружен, соседние по спектру каналы – загружены сигналом);
- переходная (кумулятивная) помеха от дальних каналов (измеряемый и соседние с ним по спектру оптические каналы не

загружены; остальные – загружены).

Измеренный уровень помехи должен быть не менее чем на 30 дБ ниже уровня сигнала в измеряемом канале при его загрузке в каждом случае, за исключением кумулятивной помехи для оконечных мультиплексоров (–25 дБ) и для мультиплексоров ввода-вывода (–27 дБ).

*Отношение мощности оптического сигнала к мощности оптического шума (ООСШ)* измеряют с помощью оптического спектроанализатора, подключаемого через оптический ответвитель с коэффициентом деления 1:10 к выходу оптического усилителя передачи. При этом измеряют уровень оптической мощности шумов в диапазоне рабочих длин волн за пределами полосы пропускания оптических каналов и суммарный уровень оптической мощности сигнала и шума в индивидуальном канале в пределах его полосы (или ширины спектра сигнала) по максимальному значению. Разность между уровнями суммарной мощности оптических сигнала и шума и уровнем мощности оптического шума даёт значение ООСШ в оптическом канале, которое не должно быть менее 20 дБ для точек ГПд, Пд' и 18 дБ для точек ГПр, Пр'.

*Диапазон рабочих длин волн оптического усилителя* измеряют по схеме рис. 17 поочередно для трёх (минимального, среднего и максимального) значений входных уровней сигнала, указанных в табл. 2. Диапазон рабочих длин волн, определяемый по уровню -3 дБ амплитудно-частотной характеристики на экране спектроанализатора, должен соответствовать номинальной сетке частот, см. формулу (1) и табл. 3. Измеряют уровни оптического сигнала на входе и выходе оптического усилителя для трёх значений (минимального, среднего и максимального) длины волны из рабочего диапазона.

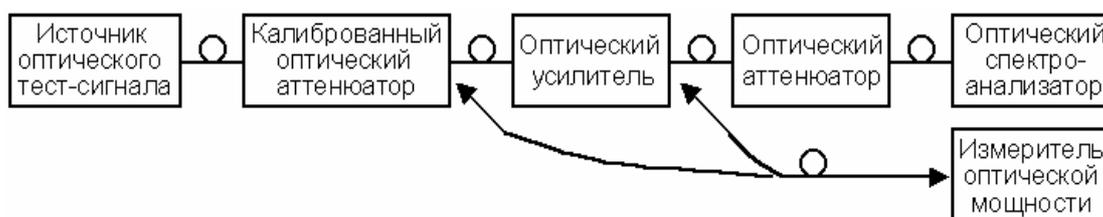


Рис. 17. Схема измерений диапазона рабочих длин волн и шум-фактора оптического усилителя

*Коэффициент усиления оптического усилителя* рассчитывают как разность уровней оптического сигнала на его выходе и входе для трёх значений уровней входного сигнала и трёх значений длины волны. Полученные значения должны соответствовать приведённым в табл. 9.

*Неравномерность коэффициента усиления оптического усилителя* рассчитывают как разность между наибольшим и наименьшим в рабочем диапазоне коэффициентами усиления для трёх значений уровней входного сигнала. Полученные значения должны соответствовать приведённым в табл. 9.

*Шум-фактор оптического усилителя* измеряют при минимальном уровне входного сигнала по схеме рис. 17. Источник оптического излучения с перестраиваемой длиной волны должен иметь точность установки длины волны не хуже 0,005 нм.

Таблица 9

Наименование параметра	Тип оптического усилителя		
	переда чи	промежуточн ый	приёма
Коэффициент усиления, дБ:			
– минимальный	14,0	15,0	10,0 33,0
– максимальный	28,0	41,0	
Неравномерность коэффициента усиления в заданном диапазоне рабочих длин волн, не более, дБ	2,0		3,0
Шум-фактор в заданном диапазоне рабочих длин волн, не более, дБ	7,0		6,0

Измерения производятся в следующей последовательности.

1. С помощью оптического соединительного кабеля выход оптического источника с перестраиваемой длиной волны подключают ко входу калиброванного оптического аттенюатора, на выходе которого устанавливают минимальный уровень входной оптической мощности, после чего соединяют со входом усилителя.

2. Устанавливают уровень оптической мощности на входе оптического спектроанализатора в пределах диапазона его допустимых входных уровней.

3. По спектрограмме на центральной длине волны сигнала  $\lambda_c$  определяют разрешение прибора на уровне спонтанного усиленного излучения (ASE) –  $\Delta\lambda_c$ .

4. По спектрограмме определяют уровень ASE,  $P_{ASE}$ , дБм.

5. Вычисляют уровень спонтанного излучения в полосе  $\Delta\lambda_c$  для идеального ОУ,  $P_{ASE\text{ид}}$  по формуле:

$$P_{ASE\text{ид}} = \frac{h \cdot c^2 \cdot \Delta\lambda_c}{\lambda_c^3}, \quad \text{мВт}, \quad (6)$$

где  $h = 6,6252 \times 10^{-34}$  Дж·с =  $6,6252 \times 10^{-31}$  мВт·с<sup>2</sup> – постоянная Планка;  $c = 2,9979 \times 10^{17}$  нм/с – скорость света;  $\Delta\lambda_c$  – разрешение (полоса прибора, ширина спектрального окна), нм;  $\lambda_c$  – центральная длина волны сигнала, нм.

6. Значение шум-фактора вычисляют по формуле:

$$NF = P_{ASE} - 10 \cdot \lg P_{ASE\text{ид}} - A_{\text{КОАТ}} - G, \quad \text{дБ}, \quad (7)$$

где  $A_{\text{КОАТ}}$  – затухание калиброванного оптического аттенюатора, дБ;  $G$  – усиление, дБ. Полученное значение должно соответствовать указанному в табл. 9.

*Вносимое затухание* определяют как разность уровней оптического сигнала при непосредственном подключении источника оптического излучения к измерителю его средней мощности и при подключении через измеряемый объект. Из полученного результата вычитают удвоенные потери в оптических разъемах на входе и выходе объекта (не более 0,2 дБ). При измерении затухания, вносимого одним оптическим каналом мультиплексора, частоту оптического источника устанавливают равной одной из центральных частот принятой сетки, см. формулу (2). Полученные значения должны соответствовать указанным в табл. 10.

*Поляризационно-зависимые потери* измеряют по схеме рис. 18. Для проведения измерений устанавливают длину волны излучения оптического источника в соответствии с одной из длин в сетке частот согласно (1). Поляризатор настраивают на максимальное значение

показаний измерителя мощности  $P_{\max}$ . После этого путем перестройки поляризатора устанавливают минимальное значение мощности  $P_{\min}$ .



Рис. 18. Схема измерения поляризационно-зависимых потерь

Поляризационно зависимые потери будут равны:  $A_p = P_{\max} - P_{\min}$ , дБ. Полученное значение должно быть не более 0,5 дБ.

Таблица 10

Вносимое затухание, дБ, не более, при шаге сетки частот, ГГц	Мультиплексоры							
	оконечные, при количестве оптических каналов (ОК)					ввода/вывода, при общем количестве ОК / ответвляемых-вводимых ОК		
	8	16	40	80	160	8/4	16/8	40/16
200	6,0	7,5	---	---	---	6,0/12,0 *)	7,5/15,0 *)	---
100	---	---	12,	14,	16,	---	---	8,0/16,0 *)
50	---	---	0	0	0	---	---	---

\*) в числителе указано значение для ответвляемых/вводимых оптических каналов, в знаменателе – для транзитных оптических каналов.

### 3.1. Средства измерений для ВОСП-СР

При измерениях аппаратуры систем передачи со спектральным разделением в ходе сертификационных испытаний используются как стандартные средства измерений для систем передачи с ПЦИ и СЦИ, так и специально разработанные.

К средствам измерений для ВОСП ПЦИ и СЦИ относятся [9]:

- измерители мощности оптического излучения;
- оптические аттенюаторы;
- источники оптического излучения;
- оптические рефлектометры;
- анализаторы СЦИ;

– осциллографы.

Для исследовательских целей и измерений в процессе производства элементов ВОСП выпускаются высокоточные приборы для анализа спектра и измерения других параметров.

При сертификационных испытаниях целесообразно использовать приборы фирмы *Anritsu* (Япония) MS 9710, MS9715, MS9720. Новый прибор MN9320A имеет точность установки длины волны  $\pm 10$  пм при сетках частот МСЭ-Т 100 ГГц и 50 ГГц или задаваемой пользователем. Оптический анализатор спектра корпорации *ANDO* типа AQ6317B обладает точностью установки длины волны  $\pm 20$  пм в диапазоне 1520-1580 нм при разрешающей способности лучше 15 пм. Эта же корпорация предлагает модульную измерительную и испытательную систему AQ8201, содержащую все необходимые элементы в виде плат полки для помещения в стойку.

С внедрением ВОСП со спектральным уплотнением появилась необходимость в приборах для эксплуатации этих систем передачи. В [13] содержится развернутая сравнительная характеристика средств измерения при эксплуатации ВОСП-СР: OSA-155 фирмы Wavetek Wandel Goltermann и 750 OSA фирмы GN Nettest. Тестеры MS9715 обладают высокой стабильностью и позволяют измерять длину волны, уровни, ОСШ, центральные частоты оптических каналов, форму частотной характеристики усиления и т.д. Встроен драйвер LabVIEW. Фиксация результатов возможна на диске. Измерениям ВОСП-СР посвящена работа [14] и значительная часть книги [11].

При проведении испытаний аппаратуры рекомендуется использовать измерительные приборы, представленные в табл. 11.

Таблица 11

Наименование прибора	Требуемые технические характеристики	Рекомендуемый тип прибора, предприятие-изготовитель, (страна)
1	2	3
Измеритель средней оптической мощности (не селективный по длине волны)	Диапазон измерений -40 дБм...+30 дБм; погрешн. измер.: $\leq 0,1$ дБм	FOT-920 EXFO (Канада)

1	2	3
Оптический спектроанализатор (ОСА)	Погрешность измерения $\pm 0,01$ нм	EXFO (Канада)
Высокочувствительный измеритель средней оптической мощности (ИОМ)	Диапазон измерений: -60дБм ÷ 20дБм погр. изм. $\pm 0,5$ дБ	FOD 1204 (Россия)
Источник оптического сигнала СЦИ (ОИ)	СТМ-16, СТМ-4, СТМ-1. Параметры выходных и входных сигналов по Рек. МСЭ-T G.957	ANT-20, АСТЕРНА (Австрия)
Оптическая измерительная система (ОИС)	Состав устройств: – высокоскоростной измеритель средней оптической мощности; – источник с перестраиваемой длиной волны; – источник с непрерывным спектром излучения; – оптический спектроанализатор; – измеритель оптических длин волн; – оптический ответвитель; – перестраиваемый поляризатор	EXFO Electro-Optical Engineering (Канада)
Оптический рефлектометр во временной области (ОРВО)	Пределы измерения затухания отражения 0...60 дБ, погрешность измерений: $\pm 0,5$ дБ	FTB-100 EXFO (Канада)
Оптический рефлектометр непрерывного излучения (ОРНИ)	Пределы измерения затухания отражения 0...60 дБ, погрешность измерений: $\pm 0,5$ дБ	AQ7250 ANDO (Япония)
Оптический аттенюатор (ОАТ)	3 дБ, 6 дБ, 10 дБ	FAIOPHP5 SEIKOGIKEN (Япония)

1	2	3
Регулируемый калиброванный оптический аттенюатор (КОАТ)	диапазон рабочих длин волн: 1200-1600 нм; максимальное затухание: 60 дБ; точность установки затухания: $\pm 0,05$ дБ; вносимые потери: $\leq 3$ дБ; затухание отражения: не менее 33 дБ	EXFO (Канада), AQ-3105 ANDO (Япония), DB2900 GNIIVETEST (США)

### 3.2. Резюме

В настоящее время волоконно-оптические системы со спектральным разделением широко используются на сетях связи. Они обеспечивают пропускную способность, намного превышающую существующие потребности. Эта технология станет основой для дальнейшего развития сетей и услуг связи.

Прежде всего, необходимо отметить активное совершенствование функциональных узлов аппаратуры ВОСП-СР: лазеров, оптических модуляторов и демодуляторов, оптических усилителей, компенсаторов дисперсии.

Лазеры *DFB* будут совершенствоваться и еще какое-то время использоваться в качестве передатчиков в системах со спектральным разделением. Однако в ближайшем будущем их вытеснят многоэлектродные лазеры, рабочая длина волны которых управляется непосредственно сигналом, приложенным к микросхеме лазера.

Принципиально новый метод – одновременная генерация всех требуемых длин волн от одного лазерного передатчика за счет использования эффекта изменения частоты лазера при изменении тока накачки (*чирпирования* или *chirp-эффект*). Сообщается о разработке подобного устройства на 206 каналов.

Развитие интегральной оптики позволяет существенно снизить стоимость как набора лазерных генераторов, так и мультиплексоров. На одной полупроводниковой подложке создается линейка лазерных резонаторов, каждый из которых настроен на свою длину волны и имеет отдельное электронное управление. В лабораторных условиях созданы микросхемы на 40 каналов.

Расширяющееся применение малошумящих оптических усилителей на эффекте комбинационного рассеяния света (эффект Рамана) позволяет увеличить длину усилительного участка, используя в качестве активного элемента непосредственно среду распространения – оптическое волокно кабеля.

Устройства компенсации дисперсии *DCD* (*Dispersion Compensation Devices*) придают сигналу равную по величине, но противоположную по знаку дисперсию и восстанавливают первоначальную форму импульсов. Наиболее распространены два типа устройств *DCD* – волокна, компенсирующие дисперсию *DCF* (*Dispersion Compensating Fibers*) и решетки, компенсирующие дисперсию *DCG* (*Dispersion Compensating Gratings*) [11]. Важно, что применение устройств компенсации дисперсии позволяет использовать для ВОСП-СП стандартные кабели, выполненные по Рек. G.652, причём такое использование является экономически более выгодным, чем переход на волокна других, стандартизированных позднее, типов [15].

Транспондеры ВОСП-СП выполняют функции аппаратуры сопряжения существующих оптических технологий с технологией *DWDM*. Прежде всего, в сетях СЦИ, *Fast Ethernet*, *Gigabit Ethernet*, *FDDI* и им подобных используются широкополосные лазеры. В транспондере выполняется приём с переводом в электронную форму, регенерация и передача информационного сигнала с переводом его в оптическую форму с параметрами излучения, соответствующими требованиям Рек. G.692 к центральной частоте (номинальное значение и стабильность) и форме спектра. Такие интерфейсы, называемые «цветными», часто предусматриваются в качестве опций для одноканальных систем; в этом случае транспондеры не требуются.

Регенерация в транспондерах может быть реализована как полное восстановление амплитуды, формы и временных соотношений сигнала (*3R*). Последняя функция требует выделения тактовой частоты, поэтому для обеспечения прозрачности по частоте предусматривают регенераторы на различные тактовые частоты, а для относительно коротких оптических каналов используют транспондеры без этой функции (*2R*) [16].

Ещё одной функцией транспондера, обеспечивающей

увеличение длины участка регенерации, является опция *FEC* (*Forward Error Correction*). До передачи в линию в цифровой сигнал вносится избыточность, например путём использования кодов Рида-Соломона. При этом несколько повышается скорость передачи (полоса частот сигнала) в оптическом канале (на 7...25 %), но появляется возможность коррекции битовых ошибок. Поскольку деградация сигнала при передаче по ВОК несущественно зависит от скорости передачи, а битовые ошибки носят непакетированный характер, то коррекция позволяет обеспечить заданное значение коэффициента ошибок при снижении ООСШ на 5...6 дБ.

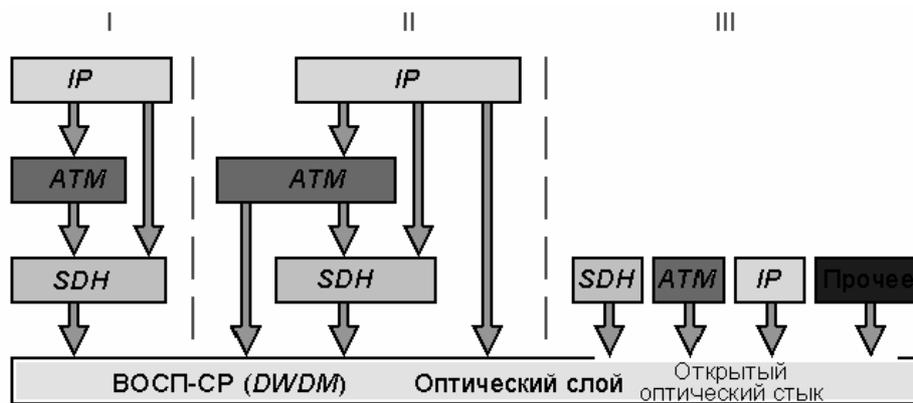


Рис. 19. Эволюция доступа к оптической среде передачи [2]

Рис. 19 иллюстрирует изменение подхода к доступу к оптической среде передачи [2]. В настоящее время в пакетных сетях, работающих по технологиям *ATM* и *IP*, на магистральном участке используется аппаратура технологии *SDH* (СЦИ), для сопряжения которой с ВОСП-СР необходимо применять транспондеры СЦИ (этап I). В новой аппаратуре ВОСП-СР предусматривают транспондеры для всех трёх технологий (этап II). В то же время аппаратуру указанных технологий начинают оснащать платами "цветных" интерфейсов для подключения в аппаратуре ВОСП-СР без транспондеров (этап III).

Технология *DWDM* разрабатывалась в первую очередь для транспортных (магистральных) сетей, на которых высокая стоимость аппаратуры оправдывается повышением использования протяжённых линий связи. Реализована система с 64 оптическими каналами при скорости передачи 40 Гбит/с в каждом.

Скорость передачи 40 Гбит/с находится на пределе возмож-

ностей электронных компонентов аппаратуры, в то же время пропускная способность канала превышает имеющийся в настоящее время спрос. Поэтому компании-изготовители перешли к каналам на 10 ГГц, увеличив их число, например, до 160.

В настоящее время появились принципиально новые, солитоновые ВОСП-СР, которые позволяют существенно увеличить пропускную способность каналов и дальность передачи. Солитон – это модулированный по интенсивности оптический импульс, который за счёт нелинейного взаимодействия между спектральными составляющими поддерживает неизменной форму оптического сигнала по мере его распространения в волокне. В линейных средах спектральные составляющие оптического импульса не взаимодействуют между собой, что приводит к дисперсионному расплыванию сигнала. Этого можно избежать за счёт учёта нелинейного эффекта перераспределения энергии между спектральными составляющими импульса, распространяющегося вдоль волокна. Данная технология является наиболее перспективной для передачи сигнала со скоростью 40 Гбит/с на большие расстояния. Отметим, что солитоновые технологии накладывают определённые требования на оптические кабели, что может повлечь необходимость их полной замены на существующих сетях.

Известно, что большая часть нагрузки замыкается в местных сетях. Поэтому начался массовый выпуск аппаратуры ВОСП-СР (*Metro DWDM*) для городских сетей. Эти сети предъявляют к аппаратуре специфические требования, что накладывает отпечаток на её построение.

Уменьшение стоимости аппаратуры ВОСП-СР на региональных (местных и внутризональных) сетях достигается за счёт упрощения её элементов ввиду относительно коротких расстояний между узлами сети. Требования к селективности демультиплексоров облегчают, переходя к сетке частот с большим, чем 100 ГГц (0,8 нм) шагом, равным 20 нм – так называемая «грубая» (*Coarse*) *WDM*. На коротких расстояниях число каскадно включаемых оптических промежуточных усилителей невелико, поэтому их можно выполнять с меньшей выходной мощностью и без встроенных корректоров амплитудно-частотных характеристик. Мультиплексоры

ввода/вывода могут не содержать матрицу переключений и не выполнять функции регенерации. Транспондеры снабжают регенераторами  $2R$  без восстановления временных соотношений в сигнале.

В то же время к аппаратуре предъявляются более жёсткие требования по надёжности и гибкости управления сетью, многообразию видов нагрузки. Разработан универсальный транспондер, пригодный для передачи сигналов различных технологий и с различными битовыми скоростями. Многие транспондеры выполняют в двух вариантах: с упаковкой сигнала в оптический канал, передающийся в одном направлении, и с упаковкой в оптический канал, передающийся в кольце в двух противоположных направлениях с целью реализации защитного переключения в кольце для каждой отдельно взятой длины волны.

Спектральное разделение оптических каналов добавляет ещё одну размерность в систему координат, характеризующую функционирование оптических систем передачи. На рис. 20 приведены факторы, ограничивающие качество ВОСП-СР.

Удалённая плоскость относится к ВОСП с временным разделением. По оси мощности отложены такие параметры как мощность лазера, потери в волокне и потери, вносимые компонентами. Вдоль другой оси отложены параметры, связанные со временем. Это – поляризационная модовая дисперсия волокна, хроматическая дисперсия, а также нестабильность сигнала и скорость передачи. На пересечении осей появляются новые параметры, требующие учета: глубина модуляции лазера, нелинейность волокна, относительная интенсивность шума и коэффициент битовых ошибок. Разделение по длине волны добавляет в пространство параметров новое измерение – длину волны – и намного усложняет представление основных параметров ВОСП-СР. Вдоль оси длин волн отложены следующие параметры: стабильность спектра, спектральный диапазон усилителя *EDFA*, центральная длина волны и ширина полосы пропускания. На пересечении параметров времени и длины волны располагаются: девиация частоты (*чирпирование*) лазера, хроматическая дисперсия, стабильность оптической частоты и фазовые шумы (фазовая автомодуляция и перекрестная фазовая модуляция). Совместное же влияние длины волны и

мощности проявляется в таких явлениях, как: усиленное спонтанное излучение *ASE*, усиление *EDFA*, перекрестные помехи, четырехволновое смещение и вынужденное комбинационное рассеяние (Рамана). И, наконец, вынужденное рассеяние Бриллюэна-Мандельштама определяется всей совокупностью переменных.

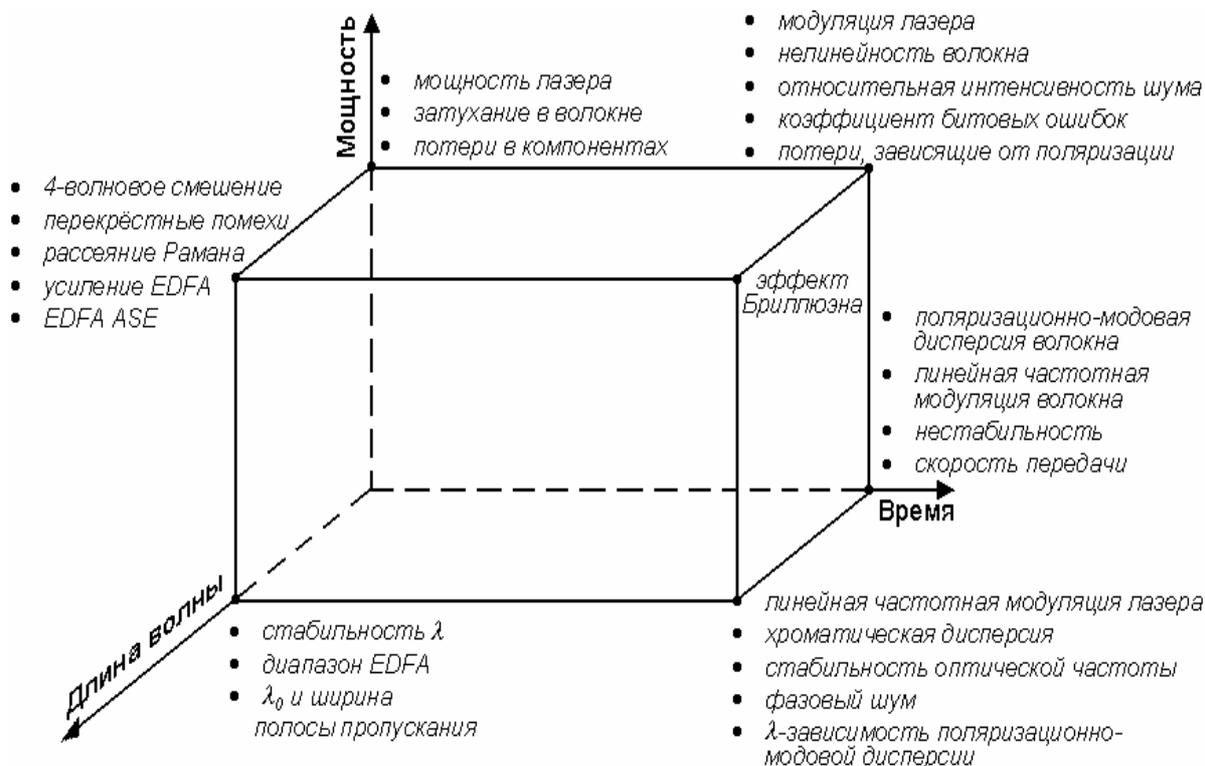


Рис. 20. Основные факторы, ограничивающие качество ВОСП-ВР и ВОСП-СР [4]

Подводя итоги рассмотрению волоконно-оптических систем со спектральным разделением, можно сделать следующие выводы:

- несмотря на начавшееся распространение ВОСП-СР на сетях связи, технология *DWDM* находится ещё в стадии становления: активно совершенствуются компоненты аппаратуры на базе новых физических эффектов с применением интегральной оптики, повышается надёжность узлов и аппаратуры в целом;
- аппаратура ВОСП-СР позволяет постепенно реализовывать огромную пропускную способность проложенного оптического кабеля по Рек. G.652, способствуя сохранению инвестиций операторов связи;
- благодаря прозрачности оптических спектральных каналов обеспечивается транспортирование сигналов разнообразных технологий