

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

02 2018 г.

**СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ И РАСЧЁТ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ**

Методические указания

по подготовке и проведению практического занятия
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Проектирование оптических систем доступа»

Курск 2018

УДК 004.716

Составители: А. А. Гуламов, Д. И. Подгорный

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
профессор кафедры КПиСС *В.Г. Андронов*

Схема организации связи и расчёт характеристик передачи: методические указания по подготовке и проведению практического занятия / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Гуламов, Д.И. Подгорный. - Курск, 2018. – 28 с.; табл. 8. – Библиогр.: с. 28.

Методические указания по выполнению практической работы содержат теоретические сведения: о методике расчёта характеристик передачи волоконно-оптических линий связи; выборе оборудования и интерфейсов для построения сети доступа, предназначенной для предоставления конкретных видов услуг связи, а также задания для выполнения работы и перечень вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Полученные знания в результате выполнения работы дают возможность сформировать целостную картину информационного взаимодействия в современных телекоммуникационных системах доступа. Данное методическое указание направлено на формирование у студентов следующих профессиональных компетенций: ПК-6, ПК-12.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Проектирование оптических систем доступа», утверждённой методическими комиссиями по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Проектирование оптических систем доступа» очной и заочной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 14.02.18. Формат 60x841/16.

Усл. печ. л.1,63. Уч.-изд. л.1,47. Тираж 100 экз. Заказ. 999. Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Содержание

1 Цели работы.....	4
2 Краткие теоретические сведения	4
3 Расчёт характеристик передачи волоконно-оптических линий.....	6
4 Задание на практическую работу	26
5 Контрольные вопросы	27
6 Список рекомендуемой литературы для подготовки к практическому занятию.....	28

1 Цели работы

- изучение технических требований по оборудованию и интерфейсам сетей доступа;
- освоение методики расчёта характеристик передачи волоконно-оптических линий связи.

2 Краткие теоретические сведения

Актуальной проблемой развития телекоммуникаций на основе новых технологий стала проблема проектирования и расчета СД.

Среди технологий для сетей доступа необходимо произвести выбор, руководствуясь многими позициями, но с учётом приоритетов потребителей ресурсов СД. К таким приоритетам относятся: спектр телекоммуникационных услуг (прежде всего широкополосных); стоимость услуг; возможности их простого добавления или исключения; максимальная информированность потребителя по всем проблемам получения услуг; надёжность функционирования сети; скрытность информации пользователя от несанкционированного считывания и т.д.

Как показывает уже существующий довольно большой опыт создания и использования сетей доступа, наиболее приемлемые решения достигаются выбором технологий GPON, т.е. пассивная оптическая сеть с графиком пакетов Ethernet. Это обусловлено широким проникновением персональных компьютеров во многие сферы деятельности людей, начиная от профессиональной деятельности, учёбы и заканчивая развлечениями. Также

решающим здесь является технико-экономическая целесообразность, т.с. относительно других технологий низкая стоимость и возможности, но совмещению с существующими сетями коммутации каналов через потоки E1, с сетями кабельного телевидения при трансляции всего пакета программ в режиме широкого вещания на отдельной оптической частоте 1550нм, экономичность с точки зрения потребляемой электроэнергии, малые габариты изделий. При этом достаточно просто пользователю доставляется любой трафик, т.с. и узкополосный (телефония) и широкополосный (включая HDTV) на скоростях до 50-70Мбит/с.

Расчёт характеристик передачи является одной из главных задач при построении СД. Он необходим для выбора электрических и оптических интерфейсов (оборудования модемов xDSL, модулей SFP, XFP, транспондеров CWDM/DWDM или интерфейсов STM-N) для известных участков передачи и выбранных для строительства или существующих волоконных, или медных линий.

3 Расчёт характеристик передачи волоконно-оптических линий

Для выполнения расчётов характеристик передачи в волоконно-оптических линиях сетей доступа должны быть уже готовые решения по скоростным режимам передачи на отдельных участках и определены дистанции (или расстояния между оптическими передатчиками и приёмниками. Также должны быть выбраны или назначены типы кабельных линий и волокон. В случае реализации режимов передачи *WDM*, *CWDM* и *DWDM* должны быть предложены соответствующие волны или диапазоны волн. Всё это необходимо для подбора соответствующих модулей оптических *SFP* или *XFP*. Кроме того, режимы передачи *CWDM* или *DWDM* возможны в сети доступа с устройствами ввода вывода отдельных оптических каналов средствами мультиплексоров *OADM* и *ROADM*, что может сделать СД гибкой масштабируемой под соответствующий трафик. Однако при этом потребует проведение специальных расчётов оптических каналов на предмет выполнения оптического соотношения сигнал/шум (*OSNR*). Т.о расчёты в оптической сети доступа могут выполняться по различным методикам с учётом различных ограничивающих факторов: затухания волокна; сварных стыков разъёмных стыков потерь; вносимых оптическими мультиплексорами и демультиплексорами; аттенюаторами компенсаторами дисперсии хроматической дисперсии; поляризационной дисперсии; оптического соотношения *OSNR*; всех указанных факторов на

различных волнах с учётом ограничений по максимальной мощности для исключения нелинейных оптических эффектов.

В этой связи представляют интерес отдельные методики расчёта оптических сетей доступа различных физических конфигураций точка-точка *P2P* пассивное дерево с одним или несколькими разветвителями *PON - P2MP*, с одним или несколькими волновыми маршрутизаторами *PON –WDM*, активное кольцо с *OADM/ROADM* в режимах *CWDM* и *DWDM*) скоростных возможностей (от *10 Мбит/с* до *10 Гбит/с*, а в перспективе до *100 Гбит/с*) и типов волоконных световодов (*G.651 MMF*, *G.652 SMF* и *G.657SMF*).

Возможности оптической передачи в СД определяются возможностями оптических модулей *SFP* и *XFP*, в чём нетрудно убедиться, взглянув на примеры характеристик приведённые в табл. 1-5. Ключевым параметром для оценки дистанции передачи *P2P* в одномодовом волокне на скоростях до *2.5 Гбит/с* является энергетический потенциал или бюджет мощности. При использовании волокон *MMF* во внимание должны приниматься и энергетический потенциал и ограничение по полосе пропускания. Однако в конфигурации *P2MP WWDM* и в случае реализации *CWDM* и *DWDM* уже на скорости *1.25 Гбит/с* должен учитываться в расчёте штраф за дисперсионные потери. И чем протяженнее линия тем больше этот штраф.

При оценке возможностей передачи в СД на скорости около *10 Гбит/с* к выше перечисленным ограничивающим факторам добавляются и увеличение штрафа за дисперсионные потери и

вместе с ним добавляется ограничение по ПМД и оценка OSNR в оптическом канале CWDM/DWDM.

Т.о. методики расчётов различаются. Методики в основном стандартизированы ITU-T и представлены соответствующими рекомендациями. Примеры их использования приведены в учебном пособии, однако для полноты представления о расчётах ниже приведены базовые расчётные формулы с примерами исходных данных для различных конфигураций СД и скоростных режимов

Таблица 1 характеристика модулей SFP на скорости 1000 Мбит/с

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP		
	100Base LX	100Base BX10-U/D	100Base ZX
Макс. электр. мощность, Вт	0,75	1,3	0,75
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Тип волокна	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Дистанция, км	до 10	до 10	до 70-80
Рабочая волна, нм	1310	1310(прямая) 1530(обратная)	1550
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	10	10	27
Характеристики передачи			
Максим. уровень мощности, дБм	-14	-14	-2
Миним. уровень мощности, дБм	-23,5...-20	-23,5...-20	-3
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-33,5	-33,5	-30
Максим. входной уровень на приём, дБм	-	-	-8

Таблица 2 характеристика модулей XFP на скорости 1000 Мбит/с

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP		
	1000Base SX(LC)	1000Base SX(MT-RJ)	1000Base LX
Макс. электрич. мощность, Вт	-	-	1,0
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс MT-RJ	Дуплекс LC
Тип волокна	MMF, 62,5мкм 50мкм	MMF, 62,5мкм 50мкм	MMF, 62,5мкм 50мкм SMF, 9мкм
Дистанция	До 275м До 550м	До 275м До 550м	До 550м MMF До 10км SMF
Рабочая волна, нм	850	850	1310
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	7	7	10,5
Характеристики передачи			
Максим. уровень мощности, дБм	-4	-4	-3
Миним. уровень мощности, дБм	-10	-10	-9,5
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-17	-17	-20
Максим. входной уровень на приём, дБм	0	0	-3

Таблица 3 - Характеристика модулей *SFP* на скорости *1000* Мбит/с
CWDM

Характеристики	Спецификация оптических модулей <i>SFP</i>	
	1000Base XD CWDM	1000Base ZX CWDM
Макс. электр. мощность, Вт	1,0	1,0
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Тип волокна	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Скорость передачи данных, Гбит/с	1,0	1,0
Линейная скорость, Гбит/с	1,25	1,25
Диапазон рабочих температур	0-60град	0-60град
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	17	24
Рабочие волны (центр), нм	1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611	1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611
Максим. штраф за дисперсию, дБ	1дБ на 40 км	2дБ на 70 км
Характеристики передачи		
Максим. уровень мощности, дБм	+1	+5
Миним. уровень мощности, дБм	-4	0
Характеристики приёма		
Чувствительность приёмника, дБм	-21	-24
Максим. входной уровень на приём, дБм	-3,0	-3,0

Таблица 4 - Характеристика модулей *SFP* на скорости *1000 Мбит/с*
IEEE

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP		
	IEEE 802.3ah 1000Base BX10	IEEE 802.3ah 1000Base BX40	1000Base EX
Макс. электрич. мощность, Вт	1,0	1,0	1,2
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Тип волокна	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Дистанция	До 10км	До 40км	До 120км
Рабочая волна, нм	1310, 1490	1310, 1490	1550
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	10,5	20,0	30,0
Максим. штраф за дисперсию, дБ	3,3	3,3	До 2дБ на 120км
Характеристики передачи			
Максим. уровень мощности, дБм	-3	+3,0	+5
Миним. уровень мощности, дБм	-9	-3,0	0
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-19,5	-23	-30
Максим. входной уровень на приём, дБм	-3,0	-3,0	-9,0

Таблица 5 - Характеристика модулей XFP на скорости 1000 Мбит/с
IEEE 802.3ae

Характеристики	Спецификация оптических модулей XFP		
	IEEE 802.3ae 10GBase-SR	IEEE 802.3ae 10GBase-LR	IEEE 802.3ae 10GBase- ER/EW
Скорость передачи данных, Гбит/с	10	10	10
Линейная скорость, Гбит/с	10,3125±100 ppm	10,3125±100 ppm/ 9,963±20ppm	10,3125±100 ppm / 9,963±20ppm
Срок службы, часов	675000	675000	675000
Рабочие волны, нм	840-860	1260-1365	1530-1565
Тип волокна и дистанция на MMF	MMF, 62,5мкм от 2 до 26м 160МГц/км От 2 до 33м 200МГц/км 50мкм от 2 до 300м с полосой от 400 до 2000МГц	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Дистанция		До 10км	До 40км
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	7,3	9,4	15,0
Максим. штраф за дисперсию, дБ	3,9 на 300м	3,2 на 10км	3дБ на 40км
Характеристики передачи			
Уровень мощности, дБм	От -7,3 до -1,0	От -8,2 до +0,5	От -4,7 до +4
Подавление боковых мод, дБ	30	30	30
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-11,1	-12,6	-11,3
Максим. входной уровень на приём, дБм	0	+1,5	+4

Таблица 6 - Характеристика модулей XFP на скорости 1000 Мбит/с с DWDM

Характеристика	Спецификация 10GBase DWDM XFP
Линейная скорость	10,3125 Гбит/с ±100ppm 9,95328 Гбит/с ±100ppm
Максимальный срок службы	4×10 ⁶ часов
Волновой интервал DWDM	1530,33нм до 1545,32нм
Стабильность волны	±100пм
Дистанция	До 80 км
Энергетический потенциал или бюджет мощности	23 дБ
Дисперсионный штраф и сигнал/шум	3дБ, 1600пс/нм (OSNR>30дБ)
Характеристики передачи	
Подавление боковых мод в одномодовом лазере	40дБ
Диапазон уровней мощности передачи	От -1 дБм до +3дБм
Характеристики приёма	
Номинальные скорости	10,3125 Гбит/с ±100ppm 9,95328 Гбит/с ±100ppm
Максимальная чувствительность приёмника	-24,5 дБ (при OSNR>30дБ)
Порог перегрузки приёмника	+1дБм
Максимальный коэффициент отражения приёмника	-27дБ
Допустимая поляризационная модовая дисперсия (ПМД)	15пс (при штрафе в 1дБ для OSNR)
Стандартные волны (20) для DWDM XFP модулей с частотным интервалом 100ГГц	1530,33нм; 1531,12нм; 1531,9нм; 1532,68нм; 1533,47нм; 1534,25нм; 1535,04нм; 1535,82нм; 1536,61нм; 1537,4нм; 1538,19нм; 1539,77нм; 1540,56нм; 1541,36нм; 1542,14нм; 1542,94нм; 1543,73нм; 1544,53нм; 1545,32нм

Расчёт по бюджету мощности и дисперсии для одноканальной и многоканальной передачи на заданной длине волны при скорости от 10 Мбит/с до 1250 Мбит/с и более.

Расчёт производится для одномодовых и многомодовых линий. В расчёт показатели для энергетического потенциала бюджета мощности обозначаемого в дальнейшем A и полосы

пропускания волоконной (допустимой дисперсии прежде всего межмодовой для многомодовых но с учётом и хроматической дисперсии и для одномодовых волокон хроматической дисперсии), обозначаемой в дальнейшем ΔF или знаком дисперсии τ .

Значение A приведено в таблицах 1-6. Оно получено путём вычитания

$$P_{\text{пер.миним}} - P_{\text{пр.миним}} = A, \quad (1)$$

Например, по таблице 1 $A = 10 \text{ дБ} = -23 \text{ дБм} - (-33,5 \text{ дБм})$. Обозначение дБм указывает на то, что эта величина оценивается относительно мощности мВт т.е уровень по мощности.

Величина A должна быть больше или крайнем случае равна совокупным потерям оптической мощности на рассчитываемом участке СД,

$$A \geq \sum \text{совокупных потерь} = \alpha \times L + \alpha_{\text{pc}} \times n + \alpha_{\text{cc}} \times t, \quad (2)$$

где α - километрическое или погонное затухание волокна на заданной длине волны ($\text{дБ} / \text{км}$), L - длина линии (км), α_{pc} - затухание на разъёмном стыке волокна (дБ) обычно не более $0,5 \text{ дБ}$, n - число разъёмных стыков между передатчиком и приёмником α_{cc} затухание на сварном стыке волокон (дБ) обычно не более $0,2 \text{ дБ}$, t - число сварных стыков (зависит от числа строительных длин на участке между передатчиком и приёмником). При использовании одной длины волны для передачи и приёма оптических сигналов в двух волоконной схеме расчёт производится

единожды, например, для интерфейса *100Base LX*. Однако если используется одно волоконная схема и две волны передачи, например, для интерфейса *100Base BX*, необходим расчёт на волнах *1310нм* и *1530нм* и также необходимо учесть потери которые будут в направленном разветвителе или в пространственном оптическом фильтре, служащим для объединения и разделения волн передачи и приёма. В этом случае типовые потери составят до *3.1дБ* на каждой из двух сторон одноволоконной линии и соотношение получит добавление α_{HO} :

$$A \geq \sum = \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} \quad (3)$$

Для протяженных оптических линий как правило свыше *10 км (40,80,120км)* и на скоростях передачи цифровых данных свыше *1000Мбит/с (до 10-40-100Гбит/с)* принято согласно международной стандартизации оптических интерфейсов учитывать штраф оптической мощности за поляризационные потери и за нелинейные эффекты, и за ухудшение характеристик волокна (таблица 3-6). В этом случае дополнительные потери могут составить от *1* до *3-4дБ* и более, и соотношение (3) получит добавление $\alpha_{Ш}$:

$$A \geq \sum = \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} \quad (4)$$

При использовании в СД мультиплексоров *OADM/ROADM* актуальным становится учёт потерь оптической мощности при

выделении/вводе оптических каналов которое возможно при одноволоконной и двухволоконной организации связи. То при скоростях 1250Мбит/с и $2,5\text{Гбит/с}$ актуально учитывать все выше рассмотренные потери мощности каждого оптического канала и добавлять к ним потери в оптическом мультиплексоре при выделении и вводе α_{AD} типовые значения которых могут составить от $0,5\text{дБ}$ до $4,5\text{дБ}$ на выделение или ввод:

$$A \geq \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} + \alpha_{AD} \quad (5)$$

Для протяженных волоконно-оптических линий могут предусматриваться оптические усилители, которые увеличивают бюджет мощности и тогда соотношение (5) может быть дополнено величиной оптического усиления S (типовые значения от 5 дБ до $20\text{-}30\text{ дБ}$). При этом усилители могут совмещаться с передатчиками приёмниками и располагаться в качестве самостоятельных сетевых элементов в виде промежуточных станций, повышающих энергетический потенциал:

$$A + S \geq \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} + \alpha_{AD} \quad (6)$$

На протяженных линиях как правило свыше 40 км и со скоростями передачи цифровых сигналов от $2,5\text{ Гбит/с}$ и выше применяются компенсаторы хроматической дисперсии одномодовых световодов. Если эти компенсаторы представляют собой катушки со специальными волокнами противоположно

дисперсии (на волне 1550 нм хроматическая дисперсия $+18 \text{ пс/нм} \times \text{км}$, а у компенсатора она $-100 \text{ пс/нм} \times \text{км}$), то они имеют внушительное затухание от 3 дБ и более, что обязательно должно учитываться при оценке энергетического потенциала в виде добавки $\alpha_{\text{кд}}$

$$A \geq \alpha \times L + \alpha_{\text{PC}} \times n + \alpha_{\text{CC}} \times m + 2 \times \alpha_{\text{НО}} + \alpha_{\text{Ш}} + \alpha_{\text{AD}} + \alpha_{\text{кд}} \quad (7)$$

Соотношение для оценки бюджета мощности оптической линии или оптического канала (7) наиболее полно учитывает все проблемы потерь мощности при этом нужно учесть, что возможны повреждения линии ухудшение характеристик передачи отдельных активных и пассивных компонентов учтены в запасе мощности как разности между максимальной мощностью передатчика и его минимальной мощностью, например, для интерфейса *1000Base EX* он составляет 5 дБ . Также необходимо отметить что в некоторых интерфейсах, работающих на скорости 10 Гбит/с могут использоваться средства упреждающей коррекции ошибок *FEC*, которые позволяют увеличить энергетический потенциал без дополнительных усилителей на $3-8 \text{ дБ}$. Сведения о таких решениях необходимо проверять по конкретным характеристикам оборудования.

Учёт энергетических возможностей *PON* может отличаться от рассмотренной цепочки вычислений $1-7$ различным положением разветвителей и коэффициентами ветвления [30], что обусловлено различным пространственным положением терминалов *ONT* или

ONU. Примеры характеристик ветвления в *PON* представлены в таблице 7. Расчёт потерь при ветвлении производится простыми вычислениями потерь ветвления и собственных потерь (возвратных поляризационно-зависимых и от неравномерности деления):

$$\alpha_{PON} \geq 10 \lg \left(\frac{P_{BX}}{P_{ВЫХ}} \right) + \alpha_C \quad (8)$$

Где величина α_C не превышает 0,3 дБ. При равномерном делении мощности соотношение можно записать:

$$\alpha_{PON} \geq 10 \lg N + \alpha_C \quad (9)$$

При неравномерном делении в (8) подставляется коэффициент процентного деления, т.е. $P_{BX} = 100\%$, $P_{ВЫХ} = X\%$ (10%, 20%, 70%.....).

Таблица 7 Характеристики разветвителей *PON*

Разветвитель 1×N, равномерное деление			Разветвитель 1×2, неравномерное деление		Разветвитель 1×3 неравномерное деление	
N	% ветвления	Потери мощности, дБ	% ветвления	Потери мощности, дБ	% ветвления	Потери мощности, дБ
2	50	2.9-3.3	50/50	3.1/3.1	10/45/45	10.5/4.0/4.0
3	33	4.8-5.2	45/55	3.6/2.7	20/40/40	7.3/4.5/4.5
4	25	5.5-6.7	40/60	4.1/2.3	30/35/35	5.4/4.8/4.8
5	20	6.9-7.8	35/65	4.7/2.0	40/30/30	4.1/5.4/5.4
6	16.7	8-8.5	30/70	5.4/1.7	50/25/25	3.1/6.2/6.2
7	14.3	9.1-9.6	25/75	6.2/1.4	60/20/20	2.3/7.2/7.2
8	12.5	9.8-10.1	20/80	7.5/1.2	70/15/15	1.7/8.5/8.5
10	10	10.8-11.1	15/85	8.4/0.8	80/10/10	1.0/10.5/10.5
12	8.3	11.9-12.0	10/90	10.2/0.6		
16	6.3	13-13.5	5/95	13.2/0.4		
32	1.6	16.2-17.0	1/99	20.5/0.3		

Для наглядности расчётов изменения уровня мощности оптического сигнала в цепочке передачи рекомендуется построить диаграмму уровней [30].

Также важной составляющей к расчёту бюджета мощности необходимо отнести расчёт возможной перегрузки приёмника на короткой линии, когда ослабления оптической мощности в линии недостаточно по техническим характеристикам. Если в результате расчёта по формулам 1-7 уровень мощности на входе приёмника превысит порог перегрузки или максимальный уровень на входе (см табл. 3), то необходимо подобрать компенсирующий избыточную мощность аттенюатор.

Дисперсия оптических импульсов в волоконных световодах СД может накладывать ограничения по дистанции передачи не только в волокнах *MMF*, но и в волокнах *SMF*. По этой причине необходимы оценочные проверки по допустимой дисперсии или полосе пропускания расчётов дистанции по бюджету мощности.

В реальных многомодовых волокнах полоса частот с увеличением длины волокна L уменьшается и может быть приближенно определена из выражения:

$$\Delta F(L) = \frac{\Delta F}{L^\gamma} \quad (10)$$

где ΔF - ширина полосы частот приведенная к единице длины волокна, удельная полоса [$МГц \times км$]; $\gamma = 0,5 \div 0,8$ - коэффициент учитывающий влияние реального профиля показателя преломления сердцевины волокна и закон изменения полосы частот с увеличением длины волокна (для градиентного волокна 0,5 для ступенчатого волокна 0,8).

Величина удельной полосы определяется дисперсией волокна:

$$\Delta F = \frac{0,44}{\tau} \quad (11)$$

где

$$\tau = \sqrt{\tau_{mm}^2 + [\Delta\lambda \times \tau_x(\lambda)]^2} \quad (12)$$

τ_{mm} - межмодовая дисперсия; $\Delta\lambda \times \tau_x(\lambda)$ - хроматическая дисперсия многомодового волокна.

Ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ [нм] определяется для передатчика на уровне мощности равной половине максимальной.

$\tau_x(\lambda)$ [нс / (нм×км)] - коэффициент удельной хроматической дисперсии.

Для многомодовых волокон величина ΔF приводится в их характеристиках и составляет от 500 до 1200 МГц*км.

При оценке ширины полосы частот $\Delta F(L)$ одномодового волокна длиной L известны различные подходы изложенные в вышеуказанных изданиях. Дисперсия оценивается по среднеквадратическому уширению импульса τ_{CKV} , по уширению импульса на уровне половины максимальной мощности $\tau_{0,5}$, по времени нарастания импульса от 0,1 до 0,9 τ_H его максимального значения мощности. Все эти способы оценки связаны между собой соотношением (13):

$$\Delta F \times L = \frac{0,187}{\tau_{CKV}} = \frac{0,44}{\tau_{0,5}} = \frac{0,312}{\tau_H} \quad (13)$$

Полоса частот оптического одномодового волокна также уменьшается с увеличением длины волокна L как и у многомодового (9), однако коэффициент $\gamma = 1$.

Скорость передачи линейного сигнала V и полоса пропускания волокна связаны приблизительным неравенством численных значений т.е. $\Delta F \geq V$. При этом форматы кодирования линейного импульсного сигнала (NRZ и RZ) влияют на ширину спектра сигнала и отличие в требуемой полосе ΔF может составить около 2х раз в формате RZ. Значение дисперсии, приводимое в характеристиках волокон, это $\tau_{СКУ}$. Необходимо обращать внимание при расчётах протяженных линий на скорости 10Гбит/с на технические характеристики ширины спектра одномодовых лазеров $\Delta\lambda$, которая указывается для уровня -20дБм от максимума излучаемой мощности и пересчитывать на уровень 0,5 от максимальной мощности.

Другим приёмом расчёта дисперсии в линии СД можно воспользоваться, если известно допустимое значение совокупной дисперсии меж передатчиком и приёмником оптического сигнала которое указывается в пс/нм.

Например, допустимая хроматическая дисперсия интерфейса SDH S1.1 составляет 9пс/нм . Линия с волокном G.652 длиной 10км на волне 1310нм при удельной дисперсии $3.5\text{пс/нм}\times\text{км}$ будет иметь дисперсию 35пс/нм т.е меньше допустимой. При этом в расчёт не принимается ширина спектральной линии передатчика, но если она меньше или равна 1нм . Если она более 1нм , то обязательно полученное значение дисперсии должно быть умножено на ширину спектра.

В том случае, когда характеристики дисперсии редуцированы или вообще отсутствуют в данных на интерфейсы, тогда следует

руководствоваться ограничениями, обозначенными по бюджету мощности производителем.

2. Расчёт для многоканальных волоконных линий СД с применением повышенной мощности передачи, в частности линий с каналом для телевизионного вещания на волне 1550 нм , актуален по причине возможных эффектов рассеяния, которые могут приводить к помехам в соседних оптических каналах. Кроме того, перспективы развития оптических СД связываются с широким внедрением DWDM благодаря выпуску относительно дешёвых модулей SFP, XFP, оптических усилителей оптических маршрутизаторов волн (OADM/ROADM).

Задачей проектирования является оценка соотношения сигнал/помеха в каждом волновом канале. Величина этого соотношения зависит от выбранного режима мощности передатчика совокупного числа волновых каналов, длин волн, типа стекловолокна и его протяженности. Оптические помехи в канале могут накапливаться и возрастать на выходе каждого усилителя, мультиплексора OADM/ROADM. Это требует установки через определенное расстояние регенераторов, которые исключают дисперсионные искажения и накопленные помехи в каждом отдельном канале. Расчет отношения сигнал/помеха на входе приемника многоволновой системы передачи для одного из N каналов при использовании только оптических усилителей производится через формулу (14):

$$OSNR = P_{ch} - a_s - NF - 10 \lg M_{yc} + 58 \text{ дБ} \quad (14)$$

где P_{ch} - минимальный допустимый уровень мощности сигнала в одном канале, a_s - усиление оптического усилителя, например эрбиевого *EDFA*, NF -коэффициент шума усилителя (для *EDFA* 5-6 дБ), значение 58 дБ представляет собой оптический квантовый шум в полосе канала на входе усилителя для скорости передачи до 2.5 Гбит/с ($\Delta f = 2.5 ГГц$) т.е

$$-58\text{дБ} = 10\lg(h \times f \times \Delta f) \quad (15)$$

Минимальный уровень мощности на входе усилителя для одного канала определяется формулой 16:

$$P_{ch \min} = OSNR + a_s + NF + 10\lg M_{yc} - 58\text{дБ} \quad (16)$$

Если скорость передачи данных в оптическом канале возрастает, например, до 10 Гбит/с, то необходимо пересчитать оптический квантовый шум. Для 10 Гбит/с шум составит уже -58 дБ при формате модуляции NRZ. Максимальный уровень мощности на выходе усилителя многоволновой системы передачи для одного из каналов N определяется соотношением 17:

$$P_{ch \max} = P_{\max} - 10\lg N \quad (17)$$

где P_{max} - максимальный допустимый уровень передачи в стекловолокне (например в волокне *G.652* эта величина $+17\text{дБ}$) ограниченный нелинейными эффектам, N - число оптических каналов. При вычислении уровней передачи рекомендуется строить диаграмму уровней оптического канала по всем промежуточным станциям (усилителям). Это позволит оценить величину в каждом канале по формуле 18:

$$OSNR_{out} = 10 \lg(10^{0.1 P_{in1} - NF_1 - 10 \lg(hf \Delta f)} + 10^{0.1 P_{in2} - NF_2 - 10 \lg(hf \Delta f)} + \dots + 10^{0.1 P_{inN} - NF_N - 10 \lg(hf \Delta f)}) \quad (18)$$

где $OSNR_{out}$ отношение оптический сигнал/шум на выходе канала (задаётся в оптическом интерфейсе, см. пример в табл. б); $P_{in1}, P_{in2}, \dots, P_{inN}$ уровни мощности оптического канала на входах различных оптических сетевых элементов, через которые проходит оптический канал; NF_1, NF_2, \dots, NF_N коэффициенты шума оптических сетевых элементов, через которые проходит оптический канал; h постоянная Планка, согласованная с уровнем мощности ($\text{мДж} \times \text{с}$); f центральная частота оптического канала ($\Gamma\text{ц}$); Δf полоса частот оптического канала ($\Gamma\text{ц}$) аналогично (15).

4 Задание на практическую работу

В соответствии с таблицей 8 по вышеприведенной методике осуществить расчёт энергетического потенциала (бюджета мощности) обозначаемого A . Величина A должна быть больше или крайнем случае равна совокупным потерям оптической мощности на рассчитываемом участке СД. Если используется одно волоконная схема и две волны передачи, например, вариант 2,5,9 и 10, необходим расчёт на двух волнах. Километрическое затухание обозначено для этих вариантов через тире для разных длин волн. Затухание от мультиплексоров *OADM/ROADM* и компенсаторов хроматической дисперсии не учитывать.

Таблица 8 – Варианты заданий на практическую работу

Номер варианта	Количество Волн передачи	L км	α дБ / км	α_{PC} дБ	n	α_{CC} дБ	m	α_{HO} дБ	α_{SH} дБ
1	1	5	0,33	0,5	2	0,2	2	3,1	1
2	2	18	0,33-0,22	0,4	4	0,2	4	3,1	2
3	1	8	0,22	0,5	2	0,3	3	3,1	1
4	1	40	0,33	0,45	2	0,2	2	3,1	4
5	2	7	0,33-0,22	0,6	4	0,1	1	3,1	3
6	1	50	0,33	0,4	2	0,25	2	3,1	4
7	1	45	0,22	0,3	4	0,3	3	3,1	4
8	1	35	0,22	0,4	2	0,2	4	3,1	3
9	2	6	0,33-0,22	0,3	2	0,1	3	3,1	1
10	2	8	0,33-0,22	0,2	2	0,3	2	3,1	1
11	1	5	0,22	0,4	4	0,1	2	3,1	1
12	1	82	0,33	0,3	2	0,2	1	3,1	4

5 Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте понятие Сеть Доступа.
2. Дайте описание технологии GERON.
3. Перечислите основные задачи проектирования сети NGN.
4. Перечислите необходимые исходные данные для расчета характеристик передачи волоконно-оптических линий связи.
5. Поясните методику расчетов характеристик передачи волоконно-оптических линий связи.

6 Список рекомендуемой литературы для подготовки к практическому занятию

1) Оптические телекоммуникационные системы [Текст] : учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, Р.М. Шарафутдинов. - М: Горячая линия-Телеком, 2011.- 368 с.: ил. ISBN 978-5-9912-0146-9.

2) Скляр, Олег Константинович. Волоконно-оптические сети и системы связи [Текст] : учебное пособие / О. К. Скляр. - 2-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2010. - 272 с.

4) Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст] : монография / Р. Фриман ; Пер. с англ. Н. Н. Слепова. - 2-е изд. ; доп. - М. : Техносфера, 2004. - 496 с. - (Мир связи). - ISBN 5-94836

5) Фокин, В.Г. Проектирование оптической сети доступа [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Г. Фокин. - Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2012. - 311 с. // Режим доступа - <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=431523>