

Федеральное агентство связи

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
(СибГУТИ)

ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Часть 2,
Практикум по выполнению контрольной работы

Программа дисциплины «Основы оптической связи, Часть 2», контрольное задание

Программа дисциплины

Введение. Общая структура оптической системы передачи

1. Основы физической и квантовой оптики
2. Физические среды оптической связи и их характеристики
3. Пассивные устройства в оптической схемотехнике
4. Модули передачи оптических сигналов
5. Модули приёма оптических сигналов
6. Оптические усилители и регенераторы оптических сигналов
7. Линейные тракты оптических систем передачи
8. Примеры построения оптических систем передачи

Приложения. Характеристики оптических интерфейсов

Введение

Предлагаемые материалы предназначены для студентов, изучающих дисциплину "Основы оптической связи. Часть 2". В эту часть включены: программа дисциплины; контрольные задания и методические указания по всем разделам дисциплины.

Студентам рекомендуется внимательно познакомиться с программой, ответить письменно на контрольные вопросы, используя конспект лекций и указанную литературу, решить задачи по индивидуальным вариантам (цифрам пароля или номера студенческого билета) и обязательно сделать выводы.

На вопросы, приведенные в отдельных разделах, следует отвечать кратко, по существу. При решении контрольных задач следует сопровождать расчеты краткими пояснениями, выводами и оценками. Кроме того, все решения должны четко обозначаться соответствующими единицами измерений. Например, частота – Гц, расстояние – м или км, потери мощности – дБ, уровень мощности – дБм, дисперсия одномодового волокна – пс/(нм•км), дисперсия поляризованной моды пс/√км, полоса пропускания оптического волокна, нормированная по длине линии – МГц•км, длина волны излучения – мкм или нм и т.д.

При ответе на вопросы и решении контрольных задач рекомендуется использовать графические пояснения. Рисунки следует оформлять согласно существующим стандартам. Для ответа на вопросы и решения конкретных задач можно использовать конспект лекций и рекомендованные учебные издания. Также рекомендуется использовать периодические научно-технические издания (журналы "Электросвязь", "Вестник связи", "Технологии и средства связи", «Фотон-Экспресс» и другие) и издания, которые могут выйти в печати после опубликования этих учебных материалов.

1. Основы физической и квантовой оптики

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Почему применяют диапазона волн 0,4 - 1,8 мкм в технике оптической связи?
2. Объяснить связь энергии фотона и длины волны излучения.
3. Объяснить законы, являющиеся основой геометрической оптики.
4. В чём физический смысл показателя преломления?
5. Почему поляризуются электромагнитные волны?
6. Что является результатом интерференции волн?
7. Перечислить оптические приборы техники связи, которые строятся на основе интерференции.
8. Как устроена дифракционная решетка?
9. В чём смысл условия Брэгга-Вульфа?
10. Объяснить смысл «запрещённой зоны» полупроводниковых материалов.
11. Для чего предназначено соединение GaAs в технике ВОСП?
12. Что служит признаком отличия прямозонных и непрямозонных материалов?
13. Что возможно в р-п переходах оптических приборов при прямом и обратном смещении?
14. Какое устройство в ВОСП имеет отражательные дифракционные решетки?
15. Какие компоненты входят в состав ВОСП?
16. Для чего нужен оптический конвертор ВОСП?

2. Физические среды оптической связи и их характеристики

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Привести определение волоконно-оптической системой передачи.
2. Указать диапазон электромагнитных волн (частот) для применения в оптических системах передачи.
3. Что относится к передаточным характеристикам волоконных световодов?
4. Назвать материалы для изготовления волоконных световодов.
5. В чём измеряют потери оптической мощности в стекловолокне?
6. В чём отличие характеристик волоконных световодов стандарта G.652 с различными буквенными индексами (A, B, C, D)?
7. Определить полосу частот рабочего диапазона S для SMF улучшенного типа.
8. Почему образуется дисперсия в оптическом волокне?
9. Чем отличаются конструкции и характеристики волокон SMF, NZDSF и DCF?
10. Почему возможны разные виды дисперсии в волоконных световодах?
11. Что такое ПМД?
12. Как влияет ПМД на скорости и дальности передачи в оптических линиях?
13. Почему появляются нелинейные оптические эффекты в стекловолокне?
14. Чем вызваны потери оптической энергии в атмосфере Земли?
15. Назвать основные конструкции оптических кабелей.

Задача 2 (прочтите внимательно условие задачи!)

Определить затухание, дисперсию, полосу пропускания и максимальную скорость передачи двоичных импульсов в волоконно-оптической системе с длиной секции L (км), километрическим затуханием α (дБ/км) на длине волны излучения передатчика λ_0 (мкм), ширине спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$ (нм) на уровне половины максимальной мощности излучения. Данные для задачи приведены в табл.2.1 и 2.2. Определить мощность оптического излучения в волокне на выходе секции, если на входе подключен оптический генератор с уровнем мощности +10дБм на заданной длине волны λ_0 . Составить схему измерения этой мощности оптическим тестером.

Табл. 2.1. Длина оптической секции

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина оптической секции, км	42	96	60	107	67	85	74	54	109	89
Уровень оптической мощности на передаче P_S , дБм	0	10	8	15	9	11	13	5	16	11

Табл. 2.2. Характеристики волокон

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип волокна	SF	DSF	SMF-LS	SF	DSF	True Wave	LEAF	SMF-LS	True Wave	LEAF
Коэфф. Затухания, α , дБ/км	0,36	0,27	0,25	0,26	0,29	0,28	0,23	0,22	0,21	0,2
Лина волны, λ_0 , нм	1,305	1,524	1,52	1,55	1,3	1,56	1,54	1,58	1,55	1,59
Спектральная линия, $\Delta\lambda_{0,5}$, нм	0,05	0,02	0,15	0,1	0,13	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8
Коэфф. Хроматич. дисперсии, B_{xp} , пс/(нм×км)	3,0	-2,7	14,2	18,5	-4,2	3,5	8,6	12,7	10,3	15,6
Затухание на разъёмных соединениях, I_{rs} , дБ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

SF, Standard Fiber – стандартное одномодовое ступенчатое волокно, коэффициент ПМД $\sigma_{\text{ПМД}}=0,5$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$;

DSF, Dispersion-Shifted (single mode) Fiber – волокно одномодовое со смещенной дисперсией, коэффициент ПМД $\sigma_{\text{ПМД}}=0,1$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$;

SMF-LS, Single Mode Fiber-LS – одномодовое оптическое волокно со смещенной ненулевой дисперсией (Corning), коэффициент ПМД $\sigma_{\text{ПМД}}=0,05$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$;

True Wave, "Истинная волна" – одномодовое оптическое волокно со смещенной ненулевой дисперсией (Lucent Technologies) [8], коэффициент ПМД $\sigma_{\text{ПМД}}=0,1$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$;

LEAF – одномодовое оптическое волокно со смещенной ненулевой дисперсией (Corning), коэффициент ПМД $\sigma_{\text{пмд}} = 0,01$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$.

Методические указания к задаче 2

1) Для решения задачи 1 необходимо внимательно изучить конспект лекций (раздел 2) характеристики кварцевых оптических волокон.

2) Рекомендуются следующий порядок выполнения задания 2:

- определить максимальное затухание секции длиной L ,
- определить совокупную дисперсию секции с учетом ширины спектра излучения,
- определить полосу пропускания оптической линии,
- определить максимальную скорость передачи двоичных импульсов через оптическую линию.

3) Результирующее максимальное затухание секции находится из соотношения:

$$A_M = \alpha \times L + l_s \times N_s + l_{rs} \times N_{rs}, [\text{дБ}], \quad (2.1)$$

где l_s – потери мощности оптического сигнала на стыке волокон строительных длин кабеля ($l_s = 0,05$ дБ); N_s – число стыков, определяемое: $N_s = E [(L/L_s) - 1]$ (целое число), $L_s = 5$ км (для всех вариантов), l_{rs} – потери оптической мощности на разъёмном соединении, N_{rs} – число разъёмных соединений (для всех вариантов 4).

4) Результирующая хроматическая дисперсия секции находится из соотношения:

$$D_{xp} = \frac{\Delta \lambda_{0,5} \sigma_{xp} L}{2}, [\text{с}] \quad (2.2)$$

5) Полоса пропускания оптической линии определяется из соотношения:

$$\Delta F_{oa} = \frac{0,187}{D_{xp}}, [\text{Гц}] \quad (2.3)$$

6) Максимальная скорость передачи двоичных оптических импульсов зависит от ΔF_{OB} и их формы, которую принято считать прямоугольной или гауссовской:

$$V_{\Pi} = 1,01 \Delta F_{OB}, [\text{бит/с}], \quad (2.4)$$

$$V_{\Gamma} = 1,34 \Delta F_{OB}, [\text{бит/с}]. \quad (2.5)$$

Для всех вариантов считать форму импульса гауссовской.

7) Для вычисления мощности на выходе волокна секции необходимо из уровня мощности на входе волокна секции вычесть затухание всей секции A_M и полученное значение перевести в мощность, используя понятие «абсолютный уровень по мощности».

$P_R = P_s - A_M$, дБм – уровень по мощности на выходе секции ОВ;

$P_R = 1 \text{ мВт} \cdot 10^{0.1 P_R} \rightarrow [\text{мВт}]$ - мощность на выходе секции.

8) Рассчитать значение ПМД. Определить в процентном соотношении вклад ПМД в совокупную дисперсию (7.14, 7.15 в конспекте) при ширине спектральной линии передатчика 1 нм.

$$D_{\text{ПМД}} = \sigma_{\text{ПМД}} \times \sqrt{L_{\text{пу}}},$$

$$D_{\Sigma} = \sqrt{D_{\text{хр}}^2 + D_{\text{ПМД}}^2}.$$

Схему составить с применением стандартных обозначений.

При обозначении коэффициентов дисперсии (хроматической и ПМД) в различной литературе могут использоваться различные значки, например:

$\beta_{\text{хр}}$, $\sigma_{\text{ПМД}}$ и $\tau_{\text{хр}}, \tau_{\text{ПМД}}$, но при этом сохраняется одинаковый смысл.

Привести письменно выводы и оценки по результатам расчетов и схему измерения.

3. Пассивные устройства в оптической схемотехнике

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте кратко письменно на следующие вопросы:

1. Что соединяют оптические розетки?
2. Чем отличаются оптические аттенюаторы?
3. Какие устройства входят в состав оптического кросса?
4. Что разделяют оптические разветвители?
5. Что изолирует оптический изолятор?
6. Что объединяют и разделяют оптические мультиплексоры и демультиплексоры?
7. Где применяется компенсатор дисперсии?
8. Как можно изменить маршрут световой волны?
9. Определите назначение OADM.

4. Модули передачи оптических сигналов

4.1. Источники оптического излучения

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте кратко письменно на следующие вопросы:

1. Что различного в конструкции и характеристиках торцевого и поверхностного светодиодов для оптической связи?
2. Перечислить конструкции лазеров для передатчиков техники оптической связи.
3. Представить резонатор Фабри – Перо и его характеристики.
4. Назвать способы достижения одномодового режима генерации в лазерах.
5. Как поддерживается температурный режим работы лазера?
6. Как перестроить длину волны излучения одномодового лазера?
7. Привести и сравнить диаграмму направленности излучения светодиода и лазера.
8. Какими приборами подключаются светодиоды и лазеры к волоконным световодам?

Задача 4.1

Определить характеристики одномодового лазера с распределенной обратной связью (DFB).

Определить частоту и длину волны генерируемой моды в одномодовом лазере DFB для известных значений дифракционной решетки m и длины лазера L . Изобразить конструкцию лазера DFB. Исходные данные приведены в табл. 4.1-4.2.

Табл. 4.1 - Лазер DFB, длина решетки

Параметр лазера DFB	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина решетки резонатора, L , мкм	145	175	195	215	225	325	355	365	395	425

Табл. 4.2 - Лазер DFB, основные показатели

Параметр лазера DFB	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Порядок решетки, m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Шаг решетки, d, мкм	0,08	0,11	0,21	0,31	0,41	0,51	0,61	0,71	0,81	0,91
Показатель преломления, n ₃	3,45	3,47	3,51	3,56	3,59	3,62	3,68	3,7	3,65	3,63

Методические указания к задаче 4.1

Для решения задачи 4.1 рекомендуется внимательно изучить материалы 4 раздела конспекта лекций.

Для определения длины волны и частоты генерации одномодового лазера DFB необходимо воспользоваться соотношениями:

$$\lambda_0 m = 2dn_3, \quad (4.1)$$

$$f_0 = C/\lambda_0, \quad (4.2)$$

$$f = f_0 - (m + 1/r) \frac{C}{nL}. \quad (4.3)$$

Сформулировать выводы по результатам расчёта и представить рисунки.

4.2. Модуляция оптического излучения

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Объяснить принципиальное отличие прямой и внешней модуляций оптического излучения.
2. Назвать ограничения полосы информационного сигнала частот при прямой модуляции для СИД и ППЛ.
3. Причины искажения сигналов при прямой модуляции в СИД и ППЛ.
4. Сравнить модуляционные характеристики схем с ППЛ и СИД.
5. Назвать виды внешней модуляции оптического излучения, которые применяются в системах передачи.
6. Назвать отличия электрооптического внешнего модулятора от электроабсорбционного модулятора на основе эффекта Франца-Келдыша.
7. Какие виды внешней модуляции оптического излучения обеспечиваются модулятором Маха-Зендера?
8. Объяснить форматы модуляции, реализуемые с помощью MZM.
9. Назвать компоненты в составе передающего оптического модуля.
10. Назначение термодатчика и терморегулятора в состав передающего оптического модуля.

Задача 4.2

По данным табл. 4.3 построить зависимость выходной мощности источника оптического излучения от величины электрического тока, протекающего через него. Для заданных (по варианту) тока смещения и амплитуды модулирующих однополярных импульсов (табл. 4.4 и 4.5) определить графически изменение выходной модуляционной мощности $P_{\text{макс}}$ и $P_{\text{мин}}$ и определить глубину модуляции η . Показать на графике модулирующий электрический и модулированный оптический сигналы. Рассчитать коэффициент гашения. По построенной характеристике указать вид источника (светодиод или лазер?).

Таблица 4.3 Значения для построения ВАХ

I, мА	0	5	10	15	18	20	22	24	26	28
P, мкВт	0	15	30	45	60	90	160	230	310	370

Таблица 4.4

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток смещения, мА	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Таблица 4.5

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Амплитуда тока модуляции, мА	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	1	1,7	2,7

Методические указания к задаче 4.2

Для определения глубины модуляции использовать соотношение (4.4):

$$\eta = \frac{P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}}{P_{\text{макс}}} . \quad (4.4)$$

Для расчета коэффициента гашения использовать соотношение (4.5):

$$ER = 10 \lg \frac{P_1}{P_o} = 10 \lg \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{мин}}} , \text{ дБ} \quad (4.5)$$

Задача 4.3

Для модулятора Маха-Зендера рассчитать и построить передаточную (модуляционную) характеристику по варианту согласно табл. 4.6. Выбрать на построенной характеристике напряжение начального смещения с учётом амплитуды и полярности модулирующего сигнала, представленного по

варианту в табл.4.7. Показать на рисунке изменение относительной величины оптической мощности при модуляции (пример на рис.4.51). По рисунку определить глубину модуляции.

Табл. 4.6. Полуволновое напряжение MZM

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
Полуволновое напряжение V_π , В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25

Табл. 4.7. Модулирующий сигнал

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Амплитуда, В	2	4	3	5	1	2	3	4	5	3,5
Форма синусоид. или импульсная										
Полярность	+	-	±	+	-	±	+	-	±	+

Методические указания к задаче 4.2

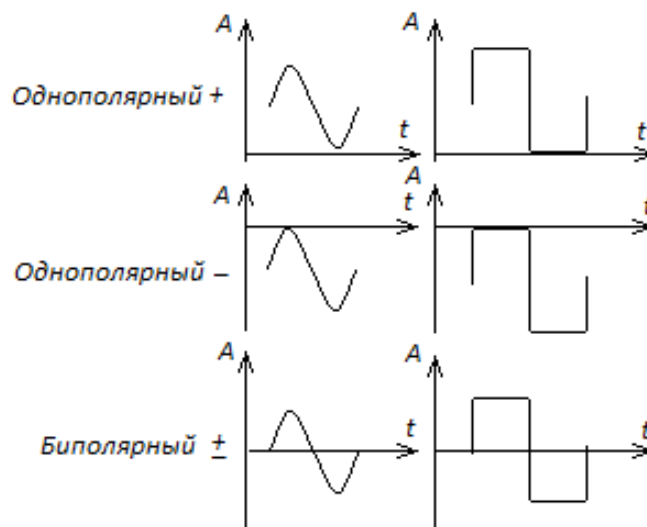
1. Расчёт передаточной (модуляционной) характеристики выполнить по соотношению 4.6:

$$T_{MZM} = 0,5(1 + \cos \pi \frac{V}{V_\pi}) \quad (4.6).$$

Для расчёта выбрать 10 значений V от 0 до V_π и 10 значений V от V_π до $2 V_\pi$. Построить рассчитанный график в масштабе 1В – 5мм. Значение T_{MZM} отражает относительное изменение выходной оптической мощности.

На графике выбрать точку напряжения начального смещения для модуляции без искажений формы модулирующего сигнала с учётом его амплитуды и полярности (рис.4.51 конспекта лекций).

2. Полярность модулирующего сигнала предлагается считать, как обозначено на рис. ниже.



3. Используя построенную форму модулированного сигнала определить глубину внешней модуляции по формуле (4.7):

$$\eta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \quad (4.7)$$

Привести рисунки модуляции, выводы и сравнительные оценки видов модуляции по результатам расчетов и построений.

5. Модули приёма оптических сигналов

5.1. Фотодетекторы

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Назвать виды фотодетекторов для оптических систем передачи.
2. Преимущества применения полупроводниковых фотодиодов в оптических системах передачи.
3. Что ограничивает диапазон оптических частот для фотодетектирования в полупроводниковых приборах?
4. Чем обусловлена длинноволновая граница чувствительности фотодиодов?
5. Что отличает конструкцию лавинного фотодиода (ЛФД) от конструкции фотодиода p-i-n?
6. Какое различие в принципе действия ЛФД и фотодиода p-i-n?
7. В каких конструкциях сокращается время включения фотодиода?
8. От чего зависит коэффициент усиления ЛФД?
9. Причины шума фотодиодов.
10. Назвать шумы фотодиодов, которые принципиально неустранимы.

11. Указать преимущество фотодиодов типа ТАР и ТWPD перед ЛФД и Р-і-N.
12. Указать условия применения селективных фотодетекторов.

5.2. Фотоприёмные устройства

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Назвать отличие прямого фотодетектирования от фотодетектирования с преобразованием.
2. Укажите виды предварительных электрических усилителей для фотоприемных устройств.
3. Назвать элементы входной цепи фотоприемного устройства с прямым детектированием.
4. Устройство входной цепи фотоприемного устройства детектирования с преобразованием. Принципиальное отличие от ФПУ прямого детектирования.
5. Соотношение между электрической и оптической полосами частот пропускания ФПУ.
6. Что определяет величину соотношения сигнал/шум на выходе ФПУ?
7. Чем выполняется противошумовая коррекция в ФПУ?
8. Назвать отличия гомодинного приемника сигнала от гетеродинного в ФПУ с преобразованием.
9. Что применяется для детектирования оптического сигнала с фазовой модуляцией?

Задача 5.2

Рассчитать полосу пропускания входной цепи ФПУ с ИУ (ТИУ). Определить требуемую электрическую полосу пропускания для фотоприемного устройства, содержащего интегрирующий (ИУ) или трансимпедансный (ТИУ) усилитель и фотодетектор (ЛФД или р-і-n). Для ТИУ рассчитайте требуемый коэффициент обратной связи $K_{ос}$. Рассчитать значение фототока и отношение сигнал/шум на выходе ФПУ. При условии оптимального приема рассчитать значение Q-фактора и соответствующее ему значение BER для данного ФПУ.

Исходные данные по вариантам приведены в табл. 5.1, 5.2 и 5.3

Табл. 5.1. Характеристики фотодетектора

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД	p-i-n	ЛФД
Тип усилителя	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ	ИУ	ТИУ
R _э , кОм	1000	100	1100	110	1200	90	1300	80	1400	70
C _э , пФ	1	2	2,5	1,5	3	3,5	0,5	2,3	1,7	0,8
η _{вн}	0,4	0,8	0,45	0,85	0,5	0,9	0,55	0,93	0,6	0,96
M	1	10	1	20	1	30	1	40	1	50
F _ш (М)	1	5	1	6	1	7	1	8	1	9
T	280	290	295	300	310	315	320	330	335	340
D _ш	2	3	2,5	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
B, Мбит/с	100	155	622	1000	2500	1250	10	42	140	125

Табл. 5.2. Характеристики линии

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровень мощности на передаче Р _{пер} , дБм	-3	0	+1	+2	+3	+4	+5	-5	-2	+6
L, км	30	35	40	50	55	60	65	70	75	80
α, дБ/км	0,3	0,33	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,2	0,19

Таблица 5.3 Длина рабочей волны

Параметр	Последняя цифра номера пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина волны, λ, мкм	1,75	1,65	1,55	1,43	1,31	1,29	1,15	0,98	0,91	0,86

Методические указания к задаче 5.2

Для решения задачи 5.2 необходимо внимательно изучить раздел 5 конспекта лекций.

Полоса частот входной цепи ФПУ находится из соотношения (5.1):

$$\Delta F_{\text{иу}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{э}} C_{\text{э}}} \quad (5.1)$$

Полоса частот усиления ФПУ с ТИУ ограничена полосой пропускания усилителя и находится из соотношения (5.6):

$$\Delta F_{\text{тиу}} \leq \frac{K_{\text{ус}}}{2\pi R_{\text{э}} C_{\text{э}}} \quad (5.2)$$

При этом полоса пропускания обоих усилителей должна обеспечить детектирование сигнала с заданной полосой (формула 5.3).

Требуемая электрическая полоса пропускания ФПУ $\Delta F_{\text{эл}}$ рассчитывается из соображения, что на приеме импульсы имеют Гауссову форму и находится из соотношения (5.3):

$$B_{\Gamma} = 1,89 \Delta F_{\text{эл}} = 1,34 \Delta F_{\text{ов}} \quad (5.3)$$

Определив $\Delta F_{\text{эл}}$, из соотношения (5.2) можно определить требуемый Кус для ТИУ.

Фототок детектора создается падающей оптической мощностью и зависит от типа фотодетектора. Величина фототока вычисляется из соотношений (5.4) и (5.5), куда необходимо подставить значение мощности $P_{\text{пер}}$ и $P_{\text{пр}}$. Для этого уровень мощности нужно перевести в мощность пользуясь понятием «абсолютного уровня по мощности».

$$\text{Фототок} \quad I_{\text{ф}} = P_{\text{пр}} \frac{e \eta_{\text{вн}} M}{hf} \quad (5.4)$$

$$\text{Мощность на приеме: } P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} 10^{-0,1\alpha L}, \quad (5.5)$$

где

$P_{\text{пер}}$ – мощность сигнала на передаче,

$$P_{\text{пер}} = 1 \text{ мВт} \cdot 10^{0,1 p_{\text{пер, дБм}}} \rightarrow [\text{мВт}]$$

h – постоянная Планка $6,626 \times 10^{-34}$ Дж*с,

f – линейная частота оптического сигнала (в соответствии с λ таблицы 5.3),

e – заряд электрона ($1,6 \times 10^{-19}$ Кл),

$\eta_{\text{вн}}$ - внутренняя квантовая эффективность,

M – коэффициент умножения ЛФД,

$P_{\text{пр}}$ – мощность сигнала на приеме,

α - километрическое затухание кабеля,

L – длина кабельной линии.

Для вычисления основных шумов ФПУ, а это квантовый и тепловой шум, необходимо воспользоваться соотношениями (5.6) и (5.7):

$$P_{\text{ш.кв.}} = 2eMI_{\text{ф}} \Delta F_{\text{эл}} F_{\text{ш}}(M), \quad (5.6)$$

$$P_{\text{ш.т.}} = \frac{4KT \Delta F_{\text{эл}} D_{\text{ш}}}{R_{\text{с}}}, \quad (5.7)$$

где $K = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

Отношение сигнал/шум вычисляется из соотношения (5.8):

$$SNR = \frac{I_{\phi}^2}{P_{ш.кв.} + P_{ш.т.}} \quad (5.8)$$

Для представления соотношения SNR в логарифмическом масштабе необходимо определить $10\lg SNR$ и представить результат в [дБ].

При условии оптимального приема, Q-фактор рассчитывается из соотношения:

$$Q = \frac{2I_{\phi}}{\sqrt{P_{ш.кв.} + P_{ш.т.}} + \sqrt{P_{ш.т.}}} \quad (5.9)$$

Соответствующий данному Q-фактору битовый коэффициент ошибок можно рассчитать по формуле (5.10):

$$BER \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5.10)$$

Привести письменно выводы и оценки по результатам расчетов.

6. Оптические усилители

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Объяснить физические явления, положенные в основу оптического усиления?
2. Назвать типы усилителей, которые могут применяться в оптических системах передачи.
3. Как устроены и почему усиливают волоконные приборы на основе эффекта рассеяния Рамана?
4. Перечислить характеристики оптических усилителей.
5. Назвать места использования оптических усилителей в составе систем передачи.
6. Виды шумов оптических усилителей и причины возникновения.
7. Назвать реальные величины коэффициентов усиления оптических усилителей (в дБ и в раз по мощности).
8. Назвать преимущества использования рамановских оптических усилителей.

Задача 6

Определить длину взаимодействия L излучения накачки в рамановском усилителе, при которой коэффициент распределенного усиления G (по варианту табл.6.1), при соответствующей мощности накачки P_n , площади модового пятна A и рамановском коэффициенте усиления материала g (табл.6.2). Составить схему включения рамановской накачки встречно усиливаемому сигналу.

Табл. 6.1. Накачка усилителя

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_n , Вт	1,1	1,51	1,91	2,21	2,41	3,21	3,51	4,11	4,61	4,91
A , мкм ²	33	37	43	47	55	57	63	67	75	77
G , дБ	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3

Табл. 6.2. Коэффициент рамановского рассеяния

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$g, \times 10^{-14}$ м/Вт	7,6	7,2	6,3	6	5,4	5	4,4	4	3,3	3

Методические указания к задаче 6

1) Расчёт произвести, используя соотношения для коэффициента усиления G раздела 6.4 конспекта лекций, $G_R \approx \exp\left(\frac{gP_i L}{A}\right)$. (6.1)

2) Значение G_R (в дБ) преобразовать в значение в раз

$$G_R = 10^{0,1G} \quad (6.2)$$

3) Значение A представить в размерности км², например, $A=50\text{мкм}^2$ или $50 \times 10^{-18}\text{км}^2$.

4) Значение g представить в размерности км/Вт, например, $g=7 \times 10^{-17}$ км/Вт.

5) Равенства для G_R получить через логарифмирование $\ln G_R$.

Привести письменно выводы и оценки по результатам расчетов и схему рамановского усилителя с соответствующей накачкой.

7. Линейные тракты оптических систем передачи

Изучите конспект, учебную литературу и ответьте письменно на следующие вопросы:

1. Назвать разновидности линейных трактов оптических систем передачи.
2. Почему ограничены возможности атмосферных оптических линий?

3. Что может входить в состав одноволновых оптических линейных трактов ВОСП?
4. Что может входить в состав многоволновых (многоканальных) оптических линейных трактов ВОСП-WDM?
5. Назвать назначение транспондера ВОСП-DWDM.
6. Назвать сетки частот и волн DWDM и CWDM и их отличие.
7. Перечислить требования к линейным кодам ВОСП.
8. Отличие форматов RZ и NRZ в линейных кодах ВОСП.
9. Отличие кодов 1B2B от кодов mBnB.
10. Назначение скремблированных линейных кодов.
11. В чем сущность коэффициента битовых ошибок BER или $K_{\text{ош}}$?
12. С какой целью нормируют BER?
13. Какие устройства линейного тракта ВОСП способствуют увеличению BER?
14. Чем определяется длина регенерационного участка ВОСП?
15. Чем определяется величина OSNR в оптическом канале ВОСП-WDM?
16. Что подлежит расчёту или оценке при проектировании сложных линейных трактов ВОСП-WDM?
17. С какой целью в ВОСП используется оценка Q-фактора?
18. С какой целью в ВОСП используется FEC?
19. Что представляет собой оптический солитон?
20. Почему в стекловолокне может образоваться оптический солитон?
21. Почему солитон сохраняет свою форму при распространении по оптической линии на большие расстояния?
22. Какую длительность имеет оптический солитон в стекловолокне?
23. Как должны соотноситься длительность солитона и период следования солитонов?
24. Какие устройства должны входить в состав солитонной системы передачи?
25. Каким образом импульсы информационного сигнала преобразуются в солитоны?
26. Какие скорости передачи могут быть реализованы с помощью солитонов?
27. Что представляют собой фотонные кристаллы?
28. Где можно использовать фотонные кристаллы в составе ВОСП?
29. Какие технологии называют нанофотонными?
30. Какие нанофотонные компоненты можно применить в ВОСП?

Задача 7.1

Используя приложения 1 задания и конспект лекций для оптических интерфейсов аппаратуры SDH, определенных рекомендациями МСЭ-Т G.957 и G.691, определить по варианту (табл. 7.1 и 7.2) предельную дальность передачи по двум типам волокон без промежуточных регенераторов, но с возможным использованием оптических усилителей. Также определить минимальное расстояние между оптическим передатчиком и оптическим

приёмником заданного интерфейса для исключения перегрузки приёмника. Привести схему подключения передатчика и приёмника к волоконной линии.

Рассчитать уровень сигнала на приеме, мощность сигнала на входе приемника и совокупную хроматическую дисперсию при условии, что длина участка равна L , проверить, соответствуют ли полученные значения техническим нормативам.

Табл. 7.1. Интерфейсы и длина линии

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Интерфейс	L4.2	V4.2	L16.2	U16.2	S-4.1	L-16.1	S-16.1	L-4.1	S-1.1	L1.3FP
L , км	63	106	71	111	7	29	12	49	18	56

Табл. 7.2. Характеристики линии

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Строительная длина кабеля, $\ell_{стр}$, км	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Число разъемных соединений	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2

Методические указания к задаче 7.1

1) Для решения задачи необходимо внимательно изучить раздел 7.5 конспекта лекций.

Максимальная длина регенерационного участка (РУ) с точки зрения энергетического потенциала и затухания кабеля находится через соотношение:

$$L_{ру\max\alpha} = \frac{P_{s\min} - P_{R\min} - P_D + \alpha_{ст} - N_{pc}\alpha_{pc}}{\alpha_k + \alpha_m + \frac{\alpha_{ст}}{\ell_{стр}}},$$

где $P_{s\min}$ – минимальный уровень мощности передатчика в точке S (в таблице Приложения 1 «средняя вводимая мощность минимальная»);

$P_{R\min}$ – минимально допустимый уровень мощности на входе приемника в точке R при заданном коэффициенте ошибки (обычно $BER=10^{-10}$) (в таблице Приложения 1 «минимальная чувствительность»);

P_D – уровень дисперсионных потерь (1 – 2 дБ);

$\alpha_{ст}$ – потери на неразъемных стыках кабеля (на сварных соединениях).

$\alpha_{ст}=0.08\text{дБ}$.

$N_{рс}$ – число разъемных стыков.

$\alpha_{рс}$ – потери мощности на разъемных стыках;

$\alpha_{рс}=0.3\text{дБ}$.

α_k – километрическое затухание кабеля на заданной длине волны; На $\lambda=1.31\text{мкм}$ затухание волокна G.652 составляет 0.36дБ/км, на $\lambda=1.55\text{мкм}$ затухание волокна G.652 и G.653 составляет 0.22дБ/км.

α_m – строительный запас на повреждение кабеля.(дБ/км).

$\alpha_m=(0.02\div 0.05)\text{дБ/км}$,

$l_{стр}$ – строительная длина кабеля (Таблица 6.2)

Здесь энергетический потенциал оборудования находится как

$A = P_{Smin} - P_{Rmin}$.

Максимальная дальность связи с точки зрения дисперсионных искажений находится как

$$L_D = \frac{D_{max}}{D_{xp}},$$

Где D_{max} – максимально допустимая хроматическая дисперсия на входе приемника (в точке R), пс/нм (Приложение 1);

D_{xp} – удельная хроматическая дисперсия ОВ. На $\lambda=1.31\text{мкм}$ D_{xp} для волокна G.652 составляет 3.5 пс/(нм*км), на $\lambda=1.55\text{мкм}$ D_{xp} волокна G.652 составляет 18 пс/(нм*км). Для ОВ G.653 $D_{xp}=2\text{пс/(нм*км)}$

Если для Вашего интерфейса в Приложении 1 D_{max} не определена, то проверить, соответствуют ли дисперсионные искажения норме, можно по формуле, определяющей полосу пропускания оптического волокна:

$$\Delta F_{ов} = \frac{0,187}{\sigma_{ии} \cdot L_{PY \max \alpha} \cdot D_{xp}}$$

Здесь

$\sigma_{ии}$ – среднеквадратическое значение ширины спектра источника излучения (максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$) в Приложении1);

Если $\sigma_{ии}$ не задана, ее можно рассчитать по формуле:

$\sigma_{ии}=0.212 \cdot \Delta\lambda_{-20}$,

где $\Delta\lambda_{-20}$ – максимальная ширина спектра на уровне -20дБ (Приложение 1).

В этом случае дисперсионные искажения будут в норме, если выполняется соотношение:

$$\Delta F_{ОВ} \geq B,$$

Где B – тактовая частота сигнала, соответствующая Вашему интерфейсу (величина, равнозначная скорости передачи цифрового сигнала, Приложение 1).

Следует определить, чем в основном ограничивается максимальная длина регенерационного участка: затуханием или дисперсией.

Если $L_{\text{руmax}\alpha} < L_D$, то максимально допустимая длина участка регенерации

$$L_{\text{руmax}} = L_{\text{руmax}\alpha}.$$

Если $L_{\text{руmax}\alpha} > L_D$, то максимально допустимая длина участка регенерации

$$L_{\text{руmax}} = L_D.$$

Минимальная длина РУ ограничивается уровнем перегрузки фотоприемника ($P_{R\text{max}}$), данный параметр приведен в характеристиках оптических интерфейсов в Приложении 1 (минимальная перегрузка).

Если уровень перегрузки фотоприемника ($P_{R\text{max}}$), минимальную длину регенерационного участка находят по следующей формуле:

$$L_{\text{руmin}} = \frac{P_{S\text{max}} - P_{R\text{max}} + \alpha_{\text{ст}} - N_{pc} \alpha_{pc}}{\alpha_k + \frac{\alpha_{\text{ст}}}{l_{\text{стр}}}}.$$

$P_{S\text{max}}$ – средняя вводимая мощность максимальная (Приложение 1).

Итоговая длина регенерационного участка должна находиться в пределах:

$$L_{\text{руmin}} < L_{\text{ру}} < L_{\text{руmax}}$$

Уровень сигнала на входе приемника к концу срока эксплуатации можно найти по формуле:

$$P_R = P_{\text{сmin}} - \alpha_k \cdot L - (N-1)\alpha_{\text{ст}} - N_{pc} \alpha_{pc} - \mathcal{E}_л$$

Где N – число строительных длин.

$$N = \frac{L}{l_{\text{стр}}}, \text{ округлить до целого в большую сторону.}$$

$\mathcal{E}_л$ – линейный энергетический запас на старение и ремонт кабеля. $\mathcal{E}_л = 2 \div 4 \text{ дБ}$.

L – длина секции, таблица 6.1

Мощность на входе приемника:

$$P_R = 1 \text{ мВт} \cdot 10^{0.1 P_R} \rightarrow [\text{мВт}]$$

Накопленная хроматическая дисперсия будет равна:

$$D_{\Sigma\text{хр}} = D_{\text{хр}} L \sigma_{\text{ии}}, \text{ пс}$$

Где $\sigma_{\text{ии}}$ – среднеквадратическая ширина спектра источника излучения.

$$\sigma_{\text{ии}} = 0.212 \cdot \Delta\lambda_{-20\text{дБ}}$$

Проведите проверку, соответствует ли полученные значения p_R и $D_{\Sigma_{xp}}$ техническим параметрам заданного интерфейса.

Привести письменно выводы и оценки по результатам расчетов и схему подключения передатчика и приёмника к волоконной линии, указав все разъёмные стыки.

Задача 7.2

Для заданного количества оптических каналов по варианту в ВОСП-DWDM и требуемого OSNR (табл.7.3) каждого канала определить минимальный допустимый уровень передачи одного канала и максимальный допустимый уровень всех каналов в стекловолокне при использовании на промежуточных станциях M_{yc} – эрбиевых усилителей с усилением A и с коэффициентом шума NF (табл.7.4). Для скоростей передачи цифровых данных в формате NRZ 2,5 Гбит/с и 10 Гбит/с считать шум спонтанной эмиссии -58 дБ, нормированным относительно полосы 0,1 нм. Разместить указанное количество спектральных каналов в полосе C или L , или $C+L$ в зависимости предлагаемого интервала между спектральными каналами (0,1 нм; 0,2 нм; 0,4 нм; 0,8 нм).

Табл. 7.3. Оптические каналы

Параметр	Предпоследняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число оптических каналов	8	12	16	32	40	64	80	88	96	120
Скорость передачи в каждом канале, Гбит/с	2,5	10	2,5	10	2,5	10	2,5	10	2,5	10
Межканальный интервал, нм	1,0	0,2	0,4	0,8	0,1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
Требуемый OSNR, дБ	16	18	20	22	24	17	19	21	23	25

Табл. 7.4. Оптические усилители

Параметр	Последняя цифра пароля									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число оптических усилителей, M_{yc}	5	6	7	8	9	10	11	12	14	4
Усиление оптического усилителя,	33	28	27	26	25	24	23	22	21	36

a_s , дБ										
Коэффициент шума, NF, дБ	7,5	7,1	7,0	6,8	6,6	6,3	6,0	5,8	5,5	7,9

Методические указания к задаче 7.2

Для решения задачи необходимо изучить раздел 7.7 конспекта лекций.

Для определения уровня мощности в оптическом канале использовать соотношение (7.18) конспекта лекций. Для определения максимального уровня мощности всех оптических каналов использовать соотношение (7.19) конспекта лекций.

Для определения уровня мощности в оптическом канале использовать соотношение :

$$OSNR = P_{chMPI-S} - \alpha_{пр} - NF - 10 \lg M_{yc} - p_{нфв},$$

где $P_{chMPI-S}$ – минимальный допустимый уровень мощности сигнала в одном канале в интерфейсе MPI-S,

$\alpha_{пр}$ – затухание пролета,

Согласно G.Sup.39, $\alpha_{пр} = \ell_{пр} \cdot 0.275 \text{ дБ/км} \rightarrow [\text{дБ}]$

NF- коэффициент шума усилителя;

$p_{нфв}$ - уровень шумов нулевых флуктуаций вакуума;

$$p_{нфв} = 10 \lg \frac{hf \Delta f}{1 \text{ мВт}}$$

для скорости передачи до 2,5 Гбит/с ($\Delta f = 12,5 \text{ ГГц}$), $p_{нфв} = -58 \text{ дБм}$,

для скорости передачи 10 Гбит/с, $p_{нфв} = -58 \text{ дБм}$, т.к. нормативное значение OSNR обычно приводится для полосы канала 0,1 нм (12,5 ГГц).

Уровень группового сигнала в интерфейсе MPI-S находится по формуле:

$$P_{MPI-S} = P_{chMPI-S} + 10 \lg N, \text{ дБм}$$

где N – число оптических каналов.

Мощность группового сигнала в интерфейсе MPI-S:

$$P_{MPI-S} = 1 \text{ мВт} \cdot 10^{0.1 P_{MPI-S}} \rightarrow [\text{мВт}]$$

Во всех вариантах считать, что используется стекловолокно стандарта G.652, в котором допустимый уровень мощности не должен превышать +17 дБм на полосу C или L (см. табл.1.1 конспекта лекций). При использовании двух полос уровень мощности ограничен величиной +20 дБм. Сравнить это значение с максимальным уровнем мощности, получаемым в расчете.

Считать равными максимальный и минимальный уровни передачи канала.
Привести расчёт и размещение оптических каналов в полосах C, L и C+L.

Привести письменно выводы и сравнительные оценки по результатам расчетов уровней мощности.

Приложения: характеристики оптических интерфейсов SDH

Таблица П1.1. Характеристики STM-1

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-1, 155 520, скремблированный NRZ			
Прикладной код		I-1	S-1.1	S-1.2	
Рабочий диапазон волн	нм	1260-1360	1261-1360	1430-1576	1430-1580
Передатчик в опорной точке S					
Тип источника		FP	LED	FP	DFB
Спектральные характеристики:					
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	40	7,7	2,5	-
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм		80	-	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	-	-	30
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	-8	-8	-8	
– минимальная	дБм	-15	-15	-15	
Мин. коэффициент гашения (EX)	дБ	8,2	8,2	8,2	
Оптический тракт между S и R					
Диапазон ослабления	дБ	0-7	0-12	0-12	
Макс. дисперсия	пс/нм	18	25	96	296
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	H/O	H/O	H/O	H/O
Макс. дискретная отражательная способность между S и R	дБ	H/O	H/O	H/O	H/O
Приемник в опорной точке R					
Минимальная чувствительность	дБм	-23	-28	-28	
Минимальная перегрузка	дБм	-8	-8	-8	
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	H/O	H/O	H/O	

Сокращения: СКЗ, средняя квадратическая зависимость; H/O, не определено; NRZ, non return to zero – без возвращения к нулю; FP, Fabry-Perot – Фабри-Перо (конструкция полупроводникового лазера); LED, light-emitting diode – светодиод; DFB, distributed feedback – распределённая обратная связь. Коэффициент гашения (EX) определяют как: $EX = 10 \log (A/B)$, где A – средний уровень оптической мощности в центре логической "1", а B – средний уровень оптической мощности в центре логического "0". Общеприняты следующие условия для уровней оптической логики:

- излучение света – логическая единица "1";
- отсутствие излучения – логический нуль "0".

Макс. – максимальное. Мин. – минимальное.

Таблица П1.2. Характеристики STM-1

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-1, 155 520, скремблированный NRZ			
Прикладной код		L-1.1	L-1.2	L-1.3	
Рабочий диапазон волн	нм	1263-1360	1480-1580	1534-1566/ 1523-1577	1480-1580
Передатчик в опорной точке S					
Тип источника		FP	DFB	DFB	FP
Спектральные характеристики:		3	-		3/2,5
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм			-	-
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм	-	1	1	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	30	30	-
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм		0	0	0
– минимальная	дБм		-5	-5	-5
Мин. коэффициент гашения (EX)	дБ		10	10	10
Оптический тракт между S и R					
Диапазон ослабления	дБ	10-28	10-28	10-28	
Максим. дисперсия	пс/нм	246	H/O	H/O	246/296
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая соединители	дБ	H/O	20	H/O	
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	H/O	-25	H/O	
Приемник в опорной точке R					
Минимальная чувствительность	дБм	-34	-34	-34	
Минимальная перегрузка	дБм	-10	-10	-10	
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	H/O	-25	H/O	

Таблица П1.3. Характеристики STM-4

Характеристики	Единица	Значение		
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-4, 622 080, скремблированный NRZ		
Прикладной код		I-4	S-4.1	S-4.2
Рабочий диапазон волн	нм	1261-1360	1293-1334/ 1274-1356	1430-1580
Передатчик в опорной точке S				
Тип источника		FP LED	FP	DFB
Спектральные характеристики:				
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	14,5 35	4/2,5	-
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм	-	-	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	-	30
Средняя вводимая мощность:				
– максимальная	дБм	-8	-8	-8
– минимальная	дБм	-15	-15	-15
Мин. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между S и R				
Диапазон ослабления	дБ	0-7	0-12	0-12
Максим. дисперсия	пс/нм	13 14	46/74	H/O
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая соединители	дБ	H/O	H/O	24
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	H/O	H/O	-27
Приемник в опорной точке R				
Минимальная чувствительность	дБм	-23	-28	-28
Минимальная перегрузка	дБм	-8	-8	-8
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	H/O	H/O	-27

Таблица П1.4. Характеристики STM-4

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-4, 622 080, скремблированный NRZ			
Прикладной код		L-4.1		L-4.2	L-4.3
Рабочий диапазон волн	нм	1300- 1325/ 1296-1330	1280- 1335	1480- 1580	1480-1580
Передатчик в опорной точке S		FP	DFB	DFB	DFB
Тип источника					
Спектральные характеристики:					
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	2,0/1,7	-	-	-
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм	-	1	<1	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	30	30	30
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	+2		+2	+2
– минимальная	дБм	-3		-3	-3
Мин. коэффициент гашения	дБ	10		10	10
Оптический тракт между S и R					
Диапазон ослабления	дБ	10-24		10-24	10-24
Максим. дисперсия	пс/нм	92/109	H/O	1600	H/O
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	20		24	20
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	-25		-25	-25
Приемник в опорной точке R					
Минимальная чувствительность	дБм	-28		-28	-28
Минимальная перегрузка	дБм	-8		-8	-8
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1		1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	-14		-27	-14

Таблица П1.5. Характеристики STM-4

Характеристики	Единица	Значение				
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-4, 622 080 , скремблированный NRZ				
Прикладной код		V-4.1	V-4.2	V-4.3	U-4.2	U-4.3
Рабочий диапазон волн	нм	1290- 1330	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565
Передатчик в опорной точке MPI-S						
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:						
– параметр линейной частотной модуляции	Рад	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
- максимальная спектральная плотность мощности	мВт/ 10МГц	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:						
– максимальная	дБм	4	4	4	15	15
– минимальная	дБм	0	0	0	12	12
Мин. коэффициент гашения	дБ	10	10	10	10	10
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R						
Диапазон ослабления	дБ	22-33	22-33	22-33	33-44	33-44
Максимальная дисперсия	пс/нм	200	2400	400	3200	530
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	480	480	480	480	480
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая соединители	дБ	24	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R						
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-34	-34	-34	-34	-33
Минимальная перегрузка	дБм	-18	-18	-18	-18	-18
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27

Сокращения: ОМЛ, одномодовый лазер; Н/О - не определено (смотреть характеристики от производителя); ДГВЗ, дифференциальное групповое время задержки. В интерфейсах U-4.2 и U-4.3 может применяться оптический предусилитель.

Таблица П1.6. Характеристики STM-16

Характеристики	Единица	Значение				
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-16, 2 488 320, скремблированный NRZ				
Прикладной код		I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2/ L-16.3
Рабочий диапазон волн	нм					
Передатчик в опорной точке S		FP	DFB	DFB	DFB	DFB
Тип источника						
Спектральные характеристики:						
– макс. СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	4	-	-	-	-
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм	-	1	<1	1	<1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	30	30	30	30
Средняя вводимая мощность:						
– максимальная	дБм	-3	0	0	+3	+3
– минимальная	дБм	-10	-5	-2	-2	-2
Мин. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между S и R						
Диапазон ослабления	дБ	0-7	0-12	0-12	12-24	12-24
Максимальная дисперсия на верхнем пределе длины волны	пс/нм	12	H/O	800	H/O	1600/ 450
Максимальная дисперсия на нижнем пределе длины волны	пс/нм	12	H/O	420	H/O	1200/ 450
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая соединители						
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	24	24	24	24	24
	дБ	-27	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке R						
Минимальная чувствительность	дБм	-18	-18	-18	-27	-28/-27
Минимальная перегрузка	дБм	-3	0	0	-9	-9
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	1	2/1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27

Таблица П1.7. Характеристики STM-16

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-16, 2 488 320, скремблированный NRZ			
Прикладной код		V-16.2	V-16.3	U-16.2/ P1U1-1A2	U-16.3/ P1U1-1A3
Рабочий диапазон волн	нм	1530- 1565	1530- 1565	1530-1565	1530-1565
Передатчик в опорной точке MPI-S					
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:					
– параметр линейной частотной модуляции	рад	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	30	30
- максимальная спектральная плотность мощности	мВт/ 10МГц	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	+13	+13	+15	+15
– минимальная	дБм	+10	+10	+12	+12
Мин. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R					
Диапазон ослабления	дБ	22-33	22-33	33-44	33-44
Максимальная дисперсия	пс/нм	2400	400	3200	530
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	120	120	120	120
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая соединители	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R					
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-25	-24	-34	-33
Минимальная перегрузка	дБм	-9	-9	-18	-18
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27

Примечание: характеристики ряда одноволновых (одноканальных) оптических интерфейсов (STM-16, 64 и 256) определены в рекомендации G.959.1.

Таблица П1.8. Характеристики STM-64

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-64, 9 953 280, скремблированный NRZ			
Прикладной код		L-64.2a	L-64.2b	L-64.2c	L-64.3
Рабочий диапазон волн	нм	1530-1565	1530-1565	1530-1565	1530-1565
Передатчик в опорной точке MPI-S					
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:					
– параметр линейной частотной модуляции	рад	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	30	30
- максимальная спектральная плотность мощности	мВт/10МГц	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	+2	+13	+2	+13
– минимальная	дБм	-2	+10	-2	+10
Мин. коэффициент гашения	дБ	10	8,2	10	8,2
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R					
Диапазон ослабления	дБ	11-22	16-22	11-22	16-22
Максимальная дисперсия	пс/нм	1600	1600	1600	260
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	30	30	30	30
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая соединители	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R					
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})					
Минимальная перегрузка	дБм	-26	-14	-26	-13
Максимальный штраф оптического тракта	дБм	-9	-3	-9	-3
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	2	2	2	1
	дБ	-27	-27	-27	-27

Примечание: характеристики ряда одноканальных оптических интерфейсов I-64.1r, I-64.1, I-64.2r, I-64.2, I-64.3, I-64.5, S-64.1, S-64.2a, S-64.2b, S-64.3a, S-64.3b, S-64.5a, S-64.5b определены в рекомендации G.959.1.

Таблица П1.9. Характеристики STM-64

Характеристики	Единица	Значение		
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-64, 9 953 280, скремблированный NRZ		
Прикладной код		V-64.2a	V-64.2b	V-64.3
Рабочий диапазон волн	нм	1530-1565	1530-1565	1530-1565
Передатчик в опорной точке MPI-S				
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:				
– параметр линейной частотной модуляции	рад	H/O	H/O	H/O
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	H/O	H/O	H/O
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	H/O	H/O	30
- максимальная спектральная плотность мощности	мВт/ 10МГц	H/O	H/O	H/O
Средняя вводимая мощность:				
– максимальная	дБм	+13	+15	+13
– минимальная	дБм	+10	+12	+10
Мин. коэффициент гашения	дБ	10	8,2	8,2
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R				
Диапазон ослабления	дБ	22-33	22-33	22-33
Максимальная дисперсия	пс/нм	2400	2400	400
Минимальная дисперсия	пс/нм	H/O	H/O	H/O
Максимальная ДГВЗ	пс	30	30	30
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая соединители	дБ	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R				
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})				
Минимальная перегрузка	дБм	-25	-23	-24
Максимальный штраф оптического тракта	дБм	-9	-7	-9
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	2	2	1
	дБ	-27	-27	-27

Примечание: характеристики ряда одноканальных оптических интерфейсов STM-64 (I-64.1r, I-64.1, I-64.2r, I-64.2, I-64.3, I-64.5, S-64.1, S-64.2a, S-64.2b, S-64.3a, S-64.3b, S-64.5a, S-64.5b) и STM-256 определены в рекомендации G.959.1.