

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

G.652

(11/2016)

СЕРИЯ G: СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ,
ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Характеристики среды передачи и оптических систем –
Волоконно-оптические кабели

Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля

Рекомендация МСЭ-Т G.652

РЕКОМЕНДАЦИИ МСЭ-Т СЕРИИ G
СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ, ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ТЕЛЕФОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ЦЕПИ	G.100–G.199
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОБЩИЕ ДЛЯ ВСЕХ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ	G.200–G.299
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ	G.300–G.399
ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ИЛИ СПУТНИКОВЫХ ЛИНИЙ И ИХ СОЕДИНЕНИЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРОВОДНЫМИ ЛИНИЯМИ	G.400–G.449
КООРДИНАЦИЯ РАДИОТЕЛЕФОНИИ И ПРОВОДНОЙ ТЕЛЕФОНИИ	G.450–G.499
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ И ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	G.600–G.699
Общие положения	G.600–G.609
Симметричные кабельные пары	G.610–G.619
Наземные коаксиальные кабельные пары	G.620–G.629
Подводные кабели	G.630–G.639
Оптические системы в свободном пространстве	G.640–G.649
Волоконно-оптические кабели	G.650–G.659
Характеристики оптических компонентов и подсистем	G.660–G.679
Характеристики оптических систем	G.680–G.699
ЦИФРОВОЕ ОКОНЕЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	G.700–G.799
ЦИФРОВЫЕ СЕТИ	G.800–G.899
ЦИФРОВЫЕ УЧАСТКИ И СИСТЕМА ЦИФРОВЫХ ЛИНИЙ	G.900–G.999
КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ СИСТЕМ – ОБЩИЕ И СВЯЗАННЫЕ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ АСПЕКТЫ	G.1000–G.1999
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ	G.6000–G.6999
ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО ТРАНСПОРТНЫМ СЕТЯМ – ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	G.7000–G.7999
АСПЕКТЫ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ ПО ТРАНСПОРТНЫМ СЕТЯМ	G.8000–G.8999
СЕТИ ДОСТУПА	G.9000–G.9999

Для получения более подробной информации просьба обращаться к перечню Рекомендаций МСЭ-Т.

Рекомендация МСЭ-Т G.652

Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля

Резюме

В Рекомендации МСЭ-Т G.652 описываются геометрические, механические атрибуты и атрибуты передачи одномодового волокна и кабеля, который имеет длину волны нулевой дисперсии величиной около 1310 нм. Первоначально описанное в Рекомендации МСЭ-Т G.652 волокно было оптимизировано для использования в области длины волны величиной 1310 нм, однако оно может также использоваться в области 1550 нм. Настоящая Рекомендация является последним вариантом Рекомендации, впервые разработана в 1984 году и содержит ряд относительно незначительных изменений. Настоящая пересмотренная Рекомендация предназначена для поддержания постоянного коммерческого успеха этого волокна в развивающемся мире систем оптической передачи с высокими рабочими показателями.

Таблица 1 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.A" и таблица 3 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.C" издания 2009 года остались без изменений и не были включены в издание 2016 года. Эти таблицы по-прежнему доступны в Рекомендации МСЭ-Т G.652 2009 года издания. Данные оптические волокна и кабели могут использоваться в системах с менее жесткими требованиями к поляризационной модовой дисперсии (PMD), например в системах с линиями связи небольшой длины или высокими допусками по PMD.

Таблица 2 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.B" и таблица 4 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.D" издания 2009 года переработаны и перенумерованы и включены в издание 2016 года как таблица 1 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.B" и таблица 2 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.D".

Хронологическая справка

Издание	Рекомендация	Утверждено	Исследовательская комиссия	Уникальный идентификатор*
1.0	МСЭ-Т G.652	19.10.1984 г.		11.1002/1000/4091
2.0	МСЭ-Т G.652	25.11.1988 г.		11.1002/1000/882
3.0	МСЭ-Т G.652	12.03.1993 г.	XV	11.1002/1000/883
4.0	МСЭ-Т G.652	08.04.1997 г.	15-я	11.1002/1000/4018
5.0	МСЭ-Т G.652	06.10.2000 г.	15-я	В эту пересмотренную Рекомендацию дополнительно включены таблицы для различных уровней поддержки системы. 11.1002/1000/5183
6.0	МСЭ-Т G.652	16.03.2003 г.	15-я	В этой пересмотренной Рекомендации разъясняется номенклатура различных категорий волокна. Кроме того, в соответствии с соглашением об описании полос спектра верхний предел полосы L изменен с 16XX на 1625 нм. Обобщены (G.652.C и G.652.D) характеристики затухания для категорий уменьшенных водных пиков от единичной длины волны на более широкую область. Для всех категорий добавлены требования в отношении PMD, и в двух категориях были

* Для получения доступа к Рекомендации наберите в адресном поле вашего браузера URL <http://handle.itu.int/>, после которого следует уникальный идентификатор Рекомендации. Например, <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.

снижены пределы (по сравнению с $0,5 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$). Для проведения испытания на макроизгиб диаметр сердцевины был уменьшен до 30 мм. Как видно из сказанного выше, настоящая Рекомендация существенно видоизменилась за прошедшие годы; поэтому для определения характеристик уже используемого изделия читателю рекомендуется обращаться к соответствующему изданию с учетом года выпуска изделия. В действительности предполагается, что изделия соответствуют Рекомендации, которая имела силу на момент их изготовления. При этом они могут не полностью соответствовать последующим вариантам Рекомендации.

[11.1002/1000/6261](#)

7.0 МСЭ-Т G.652 29.06.2005 г. 15-я

Отмечается поддержка приложений G.695.

В пункте 5.10 приводится разъяснение метода величин коэффициента аппроксимации хроматической дисперсии и их использование, а также небольшой текст по применению статистики хроматической дисперсии для проектирования систем.

В пункте 6.2 разъясняется взаимосвязь PMD_0 заключенного в кабель и не заключенного в кабель волокна.

В таблицах требований:

из таблиц изъята строка о PMD не заключенного в кабель волокна и изменено примечание, касающееся нормативного значения PMD для не заключенного в кабель волокна;

уменьшен допуск диаметра поля моды (MFD) при 1310 нм;

уменьшен максимальный наклон дисперсионной кривой при длине волны нулевой дисперсии;

уменьшена максимальная погрешность концентричности;

уменьшены максимальные потери на макроизгибе.

В таблицах 3 и 4 изменены формулировки требования для водных пиков в целях отражения ссылки на спецификацию для диапазона по сравнению со спецификацией для 1310 нм.

[11.1002/1000/8522](#)

8.0 МСЭ-Т G.652 13.11.2009 г. 15-я

В пункте 2.2 добавлен документ ИЕС-60794-2-11 в качестве информативной ссылки.

Редакторская правка в начале пункта 6.2 (PMD).

В таблицах 1–4 представлено новое примечание, согласно которому допускается более высокое максимальное затухание ($1,0 \text{ дБ/км}$) в коротких кабелях внутри помещений.

В таблицах 3 и 4 представлены изменения, касающиеся затухания в кабеле при 1383 нм (макс. $0,40 \text{ дБ/км}$).

В таблицах 3 и 4 представлен новый текст, касающийся водородного старения (Примечание 3).

[11.1002/1000/10389](#)

9.0 МСЭ-Т G.652 13.11.2016 г. 15-я

Таблицы 1 и 3 издания 2008 года остались без изменений. Эти таблицы не включены в настоящее издание Рекомендации МСЭ-Т G.652, но сохранены в издании 2009 года. Номера таблиц в настоящем издании изменены. Таблицы 1 и 2 издания 2009 года соответствуют таблицам 2 и 4 издания 2008 года. Добавлен новый пункт 5 "Условные обозначения". Изменена нумерация последующих пунктов. Спецификация хроматической дисперсии для волокон G.652.D заменена на спецификацию граничных кривых. В пункте 6.10 изменен текст, касающийся хроматической дисперсии волокон G.652.D. В пункте 7.2 (PMD) добавлено примечание о возможности применения волокон и кабелей с высокой PMD в системах с менее жесткими требованиями к PMD. В пункте 8 указаны только таблица 1 (G.652.B) и таблица 2 (G.652.D). Кроме того, в этом разделе приведена ссылка на обозначения волокон, принятые МЭК. В Примечании 1 к таблице 1 (G.652.B) и таблице 2 (G.652.D) добавлен текст, касающийся коэффициента затухания при длине волны более 1625 нм. В новом Примечании 3 к таблице 1 (G.652.B) и в новом Примечании 5 к таблице 2 описывается возможность применения волокон и кабелей с высокой PMD в системах с менее жесткими требованиями к PMD. В таблице 2 (G.652.D) уменьшено верхнее предельное значение номинального диаметра модового поля. В таблице 2 (G.652.D) ужесточен допуск на диаметр модового поля. В таблице 2 (G.652.D) ужесточен допуск на диаметр оболочки. В таблице 2 (G.652.D) представлены новые спецификации для хроматической дисперсии. В таблице 2 (G.652.D) добавлен и обновлен текст, касающийся коэффициента затухания при 1383 нм. В таблице 2 (G.652.D) характеристики затухания округлены до двух десятичных знаков. В Дополнение I добавлен новый пункт I.6 "Пример статистического метода". Добавлено новое Дополнение II, в котором описывается процесс сбора данных по максимальной и минимальной хроматической дисперсии в диапазоне волн 1270–1625 нм для спецификации граничных кривых волокон G.652.D.

[11.1002/1000/13076](#)

Ключевые слова

Оптическое волокно с несмещенной дисперсией, оптическое волокно и кабель, одномодовое оптическое волокно.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним с целью стандартизации электросвязи на всемирной основе.

На Всемирной ассамблее по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяются темы для изучения исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые, в свою очередь, вырабатывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соблюдение положений данной Рекомендации осуществляется на добровольной основе. Однако данная Рекомендация может содержать некоторые обязательные положения (например, для обеспечения функциональной совместимости или возможности применения), и в таком случае соблюдение Рекомендации достигается при выполнении всех указанных положений. Для выражения требований используются слова "следует", "должен" ("shall") или некоторые другие обязывающие выражения, такие как "обязан" ("must"), а также их отрицательные формы. Употребление таких слов не означает, что от какой-либо стороны требуется соблюдение положений данной Рекомендации.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на вероятность того, что практическое применение или выполнение настоящей Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, действительности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, доказываются ли такие права членами МСЭ или другими сторонами, не относящимися к процессу разработки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ получил извещение об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для выполнения настоящей Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что вышесказанное может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ по адресу: <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© ITU 2017

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 Сфера применения	1
2 Справочные документы	1
3 Определения	2
3.1 Термины, определенные в других документах	2
3.2 Термины, определенные в настоящей Рекомендации	2
4 Сокращения и акронимы	2
5 Соглашения.....	2
6 Атрибуты волокна.....	2
6.1 Диаметр модового поля.....	2
6.2 Диаметр оболочки.....	3
6.3 Погрешность концентричности сердцевины	3
6.4 Некруглость.....	3
6.5 Длина волны отсечки.....	3
6.6 Потери на макроизгибе	3
6.7 Свойства материала волокна	4
6.8 Профиль коэффициента преломления	4
6.9 Продольная однородность хроматической дисперсии.....	4
6.10 Хроматическая дисперсия.....	4
7 Атрибуты кабеля	5
7.1 Коэффициент затухания.....	5
7.2 Коэффициент поляризационной модовой дисперсии	6
8 Таблицы рекомендованных значений	6
Дополнение I – Информация об атрибутах уложенной в кабеле волоконно-оптической линии связи для проектирования системы.....	10
I.1 Затухание	10
I.2 Хроматическая дисперсия.....	11
I.3 Дифференциальная групповая задержка (ДГЗ)	11
I.4 Таблицы общих типичных значений	11
I.5 Коэффициент нелинейности	12
I.6 Пример методики статистического проектирования	12
Дополнение II – Информация о сборе данных по максимальной и минимальной хроматической дисперсии волокна G.652.D для спецификации граничных кривых	14
Библиография	16

Рекомендация МСЭ-Т G.652

Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля

1 Сфера применения

В настоящей Рекомендации описывается одномодовое оптоволокно и кабель, который имеет длину волны нулевой дисперсии величиной около 1310 нм и может использоваться в областях длин волн 1310 нм и 1550 нм. Это волокно может применяться как для аналоговой, так и для цифровой передачи.

Геометрические, оптические, механические параметры и параметры передачи описаны ниже в трех категориях атрибутов:

- атрибуты волокна, которые сохраняются при монтаже кабеля и установке;
- атрибуты кабеля, рекомендуемые для кабелей в том виде, как они поставляются;
- характеристики линий, которые являются характеристикой последовательно соединенных кабелей; описываются методы оценки параметров системного интерфейса, основанные на измерениях, моделировании и других соображениях.

Информация об атрибутах линий и структуре систем приводится в Дополнении I.

Настоящая Рекомендация и различные категории показателей, сведенные в таблицы в пункте 8, разработаны в качестве дополнения к следующим Рекомендациям, касающимся смежных систем.

Категория	Рекомендации
Характеристики оптических систем	[b-ITU-T G.691], [b-ITU-T G.692], [b-ITU-T G.693], [b-ITU-T G.695], [b-ITU-T G.696.1], [b-ITU-T G.698.1], [b-ITU-T G.698.2], [b-ITU-T G.698.3]
Системы цифровых линий связи	[b-ITU-T G.957], [b-ITU-T G.959.1]
Оптические линейные системы для местных сетей и сетей доступа	[b-ITU-T G.983.1], [b-ITU-T G.984.2], [b-ITU-T G.985], [b-ITU-T G.986], [b-ITU-T G.987.2], [b-ITU-T G.989.2]

ПРИМЕЧАНИЕ. – В зависимости от протяженности линий для некоторых прикладных кодов [b-ITU-T G.691], [b-ITU-T G.692] или [b-ITU-T G.959.1] может понадобиться согласование дисперсии.

Значения терминов, используемых в настоящей Рекомендации, и руководящие указания, которые необходимо соблюдать при проведении измерений для проверки различных характеристик, приведены в [ITU-T G.650.1] и [ITU-T G.650.2]. Характеристики этого волокна, включая определения соответствующих параметров, методы их испытания и соответствующие величины, будут уточнены по мере проведения исследований и накопления опыта.

2 Справочные документы

Указанные ниже Рекомендации МСЭ-Т и другие справочные документы содержат положения, которые путем ссылок на них в данном тексте составляют положения настоящей Рекомендации. На момент публикации указанные издания были действующими. Все Рекомендации и другие справочные документы могут подвергаться пересмотру; поэтому всем пользователям данной Рекомендации предлагается изучить возможность применения последнего издания Рекомендаций и других справочных документов, перечисленных ниже. Перечень действующих на настоящий момент Рекомендаций МСЭ-Т регулярно публикуется. Ссылка на документ, приведенный в настоящей Рекомендации, не придает ему как отдельному документу статус Рекомендации.

[ITU-T G.650.1] Recommendation ITU-T G.650.1 (2010), *Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.*

- [ITU-T G.650.2] Рекомендация МСЭ-Т G.650.2 (2015), *Определения и методы тестирования статистических и нелинейных взаимосвязанных атрибутов одномодового волокна и кабеля.*
- [IEC 60793-2-50] IEC 60793-2-50 Ed. 5.0 (2015), *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single mode fibres.*
- [ISO 80000-1] ISO 80000-1:2009, *Quantities and units – Part 1; General.*

3 Определения

3.1 Термины, определенные в других документах

В целях настоящей Рекомендации применяются определения, приведенные в [ITU-T G.650.1] и [ITU-T G.650.2].

3.2 Термины, определенные в настоящей Рекомендации

Отсутствуют.

4 Сокращения и акронимы

В настоящей Рекомендации используются следующие сокращения и акронимы.

A_{eff}	Effective Area		Эффективная область
DGD	Differential Group Delay	ДГЗ	Дифференциальная групповая задержка
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing		Плотное мультиплексирование с разделением по длине волны
PMD	Polarization Mode Dispersion		Поляризационная модовая дисперсия
PMD_Q	Statistical parameter for link PMD		Статистический параметр для линии с PMD
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	СЦИ	Синхронная цифровая иерархия
WDM	Wavelength Division Multiplexing		Мультиплексирование с разделением по длине волны

5 Соглашения

Значения округляются до количества разрядов, указанных в таблицах рекомендуемых величин, до выполнения оценки соответствия. Применяется стандартное правило округления половины к ближайшему числу, которое дальше от нуля, описанное в Приложении В, Правило В [ISO 80000-1]. При округлении учитывается только первая цифра за пределами значащих цифр.

6 Атрибуты волокна

В этом пункте рекомендуются только те характеристики волокна, которые обеспечивают минимально необходимую при проектировании основу для изготовления волокна. Диапазоны или пределы по величинам представлены в таблицах пункта 8. Из них значительное влияние на длину волны отсечки волокна в кабеле и на PMD может оказывать изготовление кабеля или установка. В остальном рекомендованные характеристики равно применимы к отдельным волокнам, волокнам, которые уложены в кабеле, намотанном на барабан, и волокнам в проложенном кабеле.

6.1 Диаметр модового поля

Номинальное значение и допуск на это номинальное значение должны определяться для длины волны 1310 нм. Указанное номинальное значение должно находиться в пределах диапазона, приведенного в разделе 8. Указанный допуск не должен превышать значения, приведенного в пункте 8. Отклонение от номинального значения не должно превышать указанного допуска.

6.2 Диаметр оболочки

Рекомендованное номинальное значение диаметра оболочки составляет 125 мкм. Определен также и допуск, и он не должен превышать значения, указанного в таблицах 1 и 2 раздела 8. Отклонение диаметра оболочки от номинального значения не должно превышать указанного допуска.

6.3 Погрешность concentричности сердцевины

Погрешность concentричности сердцевины не должна превышать значения, определенного в пункте 8.

6.4 Некруглость

6.4.1 Некруглость модового поля

На практике некруглость модового поля волокон, имеющих номинально круглые модовые поля, достаточно мала и не влияет на распространение и сращивание. Вследствие этого, считается необязательным рекомендовать какое-либо конкретное значение для некруглости модового поля. Как правило, необязательно измерять некруглость модового поля при приемочных испытаниях.

6.4.2 Некруглость оболочки

Некруглость оболочки не должна превышать величины, указанной в пункте 8.

6.5 Длина волны отсечки

На практике применяют два типа длины волны отсечки:

- a) кабельная длина волны отсечки λ_{cc} ;
- b) волоконная длина волны отсечки λ_c .

ПРИМЕЧАНИЕ. – Для ряда конкретных приложений подводных кабелей могут потребоваться другие величины длины волны отсечки.

Взаимосвязь измеренных величин λ_c и λ_{cc} зависит от конкретного конструктивного исполнения волокна и кабеля и условий испытаний. В то время как в общем случае $\lambda_{cc} < \lambda_c$, непросто установить общее количественное соотношение. Наибольшее значение имеет обеспечение одномодовой передачи при минимальной длине кабеля между стыками при минимальной рабочей длине волны. В этих целях можно рекомендовать, чтобы максимальная длина волны отсечки λ_{cc} одномодового волокна в кабеле составляла 1260 нм. При длине и изгибах, относящихся к наихудшему случаю, можно рекомендовать, чтобы максимальная длина волны отсечки волокна λ_c составляла 1260 нм.

Длина волны отсечки кабеля λ_{cc} должна быть ниже максимума, указанного в пункте 8.

6.6 Потери на макроизгибе

Потери на макроизгибе изменяются в зависимости от длины волны, радиуса изгиба и числа витков на стержне конкретного радиуса. Потери на макроизгибе не должны превышать максимума, заданного в пункте 8 для определяемых длин(ы) волн, радиуса изгиба и числа витков.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для обеспечения удовлетворения этого требования может быть достаточно проведение испытания на соответствие техническим условиям.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Рекомендуемое число витков соответствует примерному числу витков, развернутых во всех муфтах для сращивания на типовом ретрансляционном интервале. Рекомендуемый радиус эквивалентен минимальному радиусу изгиба, повсеместно принятому для долговременного развертывания волокон при практической установке систем, с тем чтобы избежать выхода из строя ввиду статической усталости.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Если по практическим соображениям для внедрения выбирается меньшее число витков, то рекомендуется, чтобы оно не снижалось ниже 40 витков и обеспечивался пропорционально сниженный рост потерь.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Рекомендация в отношении потерь на макроизгибе касается развертывания волокон при практических установках одномодового волокна. Влияние радиуса изгиба при скручивании одномодовых волоконных кабелей на характеристики потерь учтено в спецификации потерь волоконного кабеля.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – При необходимости проведения обычных испытаний для точности и удобства измерений может использоваться петля меньшего диаметра с одним или несколькими витками вместо рекомендуемого испытания. В этом случае для испытания с несколькими витками диаметр петли, число витков и максимально возможные потери на изгибе выбираются таким образом, чтобы привести их в соответствие с рекомендуемым испытанием и допустимыми потерями.

6.7 Свойства материала волокна

6.7.1 Материалы волокна

Необходимо указывать материалы, используемые при производстве волокна.

ПРИМЕЧАНИЕ. – При сварке сращиваемых волокон, выполненных из различных материалов, могут потребоваться меры предосторожности. Предварительные результаты показывают, что приемлемые потери и прочность соединений можно получить при сращивании волокон с высоким содержанием кремния.

6.7.2 Защитные материалы

Следует указывать физические и химические свойства материалов, используемых для первичного покрытия волокон, и наилучший способ его удаления (при необходимости). Аналогичные указания даются для одиночного волокна в оболочке.

6.7.3 Уровень предела прочности

Определяемый предел прочности σ_p не должен быть меньше минимального значения, указанного в пункте 8.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Определения механических параметров содержатся в пунктах 3.2 и 5.6 [ITU-T G.650.1].

6.8 Профиль коэффициента преломления

Обычно не требуется знать профиль коэффициента преломления.

6.9 Продольная однородность хроматической дисперсии

На стадии исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ. – При конкретной длине волны местная абсолютная величина коэффициента хроматической дисперсии может отличаться от значения, измеренного на большой протяженности. Если значение снижается до малой величины при длине волны, близкой к рабочей длине волны системы мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM), то смешение четырех волн может привести к распространению мощности на других длинах волн, в том числе на других рабочих длинах волн. Амплитуда мощности четырех смешанных волн является функцией абсолютной величины коэффициента хроматической дисперсии, крутизны кривой хроматической дисперсии, рабочих длин волн, оптической мощности и расстояния, на котором происходит смешение четырех волн.

При работе с плотным мультиплексированием с разделением по длине волны (DWDM) в области 1550 нм хроматическая дисперсия волокон МСЭ-Т G.652 достаточна, чтобы избежать смешивания четырех волн. Поэтому однородность хроматической дисперсии не является функциональной проблемой.

6.10 Хроматическая дисперсия

Измеренное значение групповой задержки или коэффициент хроматической дисперсии как функция длины волны подбираются при помощи подходящих уравнений согласно описанию, приведенному в Приложении А к [ITU-T G.650.1] (руководящие указания по интерполяции значений дисперсии на неизмеренных длинах волн приведены в пункте 5.5 [ITU-T G.650.1]).

Для волокна подкатегории G.652.B коэффициент хроматической дисперсии $D(\lambda)$ определяется путем наложения ограничений на параметры кривой хроматической дисперсии, которая является функцией длины волны в области 1310 нм. Предел коэффициента хроматической дисперсии для любой длины волны λ рассчитывается при минимальной длине волны нулевой дисперсии $\lambda_{0\min}$, максимальной длине волны нулевой дисперсии $\lambda_{0\max}$ и максимальном коэффициенте нулевой дисперсии $S_{0\max}$ в соответствии с

$$D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right]. \quad (6-1)$$

Величины $\lambda_{0\min}$, $\lambda_{0\max}$ и $S_{0\max}$ должны находиться в пределах, обозначенных в таблице 1 (пункт 8).

Для связывания значений хроматической дисперсии в диапазоне 1260–1625 нм в таблице 2 (пункт 8) указаны параметры хроматической дисперсии для волокна подкласса G.652.D. Это позволяет произвести более точный расчет системы, включающий в себя схемы компенсации дисперсии. При определении характеристик коэффициента хроматической дисперсии волокон G.652.D только с помощью трехчленных коэффициентов Зельмейера в области 1310 нм коэффициент дисперсии может быть недостаточно точным при экстраполяции на область 1550 нм. Для связывания минимальных и максимальных коэффициентов хроматической дисперсии волокон G.652.D следует суммировать первую производную аппроксимации трехчленного уравнения Зельмейера для групповой задержки в диапазоне 1260–1460 нм и линейную аппроксимацию для хроматической дисперсии (то есть первую производную квадратичной аппроксимации групповой задержки) в диапазоне 1460–1625 нм.

В диапазоне 1260–1460 нм коэффициент хроматической дисперсии $D(\lambda)$ при длине волны λ связывается при помощи следующих трех неравенств:

$$\frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\min}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (\lambda \leq \lambda_{0\min}); \quad (6-2a)$$

$$\frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (\lambda_{0\min} \leq \lambda \leq \lambda_{0\max}); \quad (6-2b)$$

$$\frac{\lambda S_{0\min}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (\lambda_{0\max} \leq \lambda). \quad (6-2c)$$

Для связывания как минимальных, так и максимальных коэффициентов хроматической дисперсии добавлен минимальный наклон хроматической дисперсии $S_{0\min}$.

В диапазоне 1460–1625 нм коэффициент хроматической дисперсии $D(\lambda)$ при длине волны λ связывается при помощи следующего неравенства:

$$8,625 + 0,052(\lambda - 1460) \leq D(\lambda) \leq 12,472 + 0,068(\lambda - 1460). \quad (6-3)$$

Для определения спецификаций параметров хроматической дисперсии и последствий (огibaющей дисперсии) проведено исследование изделий G.652.D. Результаты кратко изложены в Дополнении II к настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Измерение коэффициента хроматической дисперсии одномодового волокна в рабочем порядке не является обязательным.

7 Атрибуты кабеля

Поскольку геометрические и оптические характеристики волокон, данные в пункте 6, слабо затрагиваются процессом укладки кабеля, в этом пункте даются рекомендации, относящиеся главным образом к характеристикам передачи проложенных строительных длин.

Наиболее важное значение имеют условия окружающей среды и испытаний, которые описываются в руководящих указаниях для методов испытаний.

7.1 Коэффициент затухания

Коэффициент затухания задается максимальной величиной на одной или более длинах волн в областях 1310 нм и 1550 нм. Величины коэффициента затухания волоконно-оптического кабеля не превышают величин, указанных в пункте 8.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Коэффициент затухания может быть рассчитан по спектру длин волн на основе измерений нескольких (трех-четырёх) предсказываемых длин волн. Эта процедура описана в пункте 5.4.4 [ITU-T G.650.1], пример приведен в Дополнении III к [ITU T G.650.1].

7.2 Коэффициент поляризационной модовой дисперсии

Поляризационная модовая дисперсия волокна в кабеле задается на основе статистических данных, а не для каждого волокна в отдельности. Требования относятся только к сигналу линии, рассчитанной на основе информации о кабеле. Метрики статистической спецификации приведены ниже. Методы расчета приведены в документе [b-IEC/TR 61282-3] и кратко изложены в Дополнении IV к [ITU-T G.650.2].

Изготовитель предоставляет расчетное значение PMD для линии PMD_Q , которое является верхней границей для коэффициента PMD последовательно соединенных волоконно-оптических кабелей в пределах заданной линии, состоящей из M кабельных секций. Верхняя граница определяется как уровень малой вероятности Q , являющейся вероятностью того, что величина коэффициента объединенной PMD превышает PMD_Q . Для величин M и Q , данных в пункте 8, величина PMD_Q не превышает максимума коэффициента PMD, заданного в пункте 8.

Измерения и технические характеристики не заключенного в кабель волокна необходимы, но недостаточны для обеспечения спецификации волоконного кабеля. Максимальные расчетные величины линии, заданные для не заключенного в кабель волокна, не превышают величин, заданных для волоконного кабеля. Соотношение величин PMD для не заключенного в кабель волокна и волоконного кабеля зависит от особенностей конструкции кабеля и обработки, а также от условия связи мод не заключенного в кабель волокна. В [ITU-T G.650.2] для измерений PMD не заключенного в кабель волокна рекомендуется применение низкой связи мод, требующей слабого натяжения намотки на катушке большого диаметра.

Ограничения на распределение величин коэффициента PMD могут быть истолкованы как приблизительно эквивалентные ограничения, наложенным на статистическое изменение дифференциальной групповой задержки (ДГЗ), изменяющейся случайно во времени и в зависимости от полосы частот. Если распределение коэффициента PMD задано для волоконно-оптического кабеля, могут быть определены эквивалентные пределы изменения ДГЗ. Метрики и величины для распределения линии с ДГЗ приведены в Дополнении I.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Спецификация PMD_Q может потребоваться только в случае использования кабелей для систем, имеющих спецификацию на максимальное ДГЗ, то есть, например, спецификация на PMD_Q не применяется к системам, рекомендованным в [b-ITU-T G.957].

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – PMD_Q должна быть рассчитана для различных типов кабелей, и они, как правило, должны быть рассчитаны с использованием выборочных значений PMD. В выборку включаются кабели аналогичной конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Спецификация PMD_Q не должна применяться к коротким кабелям, например к перемычкам, кабелям для прокладки в помещениях и отводным кабелям.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Оптические волокна и кабели с высоким коэффициентом PMD могут использоваться в системах с менее жесткими требованиями к PMD (например, в системах с линиями связи небольшой длины или высокими допусками по PMD).

8 Таблицы рекомендованных значений

В следующие таблицы сведены рекомендуемые значения для ряда категорий волокон, которые удовлетворяют целям настоящей Рекомендации. Эти категории в значительной степени различаются в зависимости от нормативного значения затухания при 1383 нм. В Дополнении I к настоящей Рекомендации указана среднестатистическая взаимосвязь между максимальным значением PMD_Q и поддерживаемой скоростью передачи данных.

Таблица 1 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.B" содержит рекомендуемые атрибуты и величины, необходимые для поддержки приложений с высокой скоростью передачи данных, вплоть до STM-64, например, для некоторых приложений, указанных в [b-ITU-T G.691] и [b-ITU-T G.692], STM-256 для некоторых приложений, указанных в [b-ITU-T G.693] и [b-ITU-T G.959.1]. В зависимости от приложения может потребоваться адаптация хроматической дисперсии.

Таблица 2 "Атрибуты МСЭ-Т G.652.D" аналогична Рекомендации МСЭ-Т G.652.B, однако допускает передачу данных в участках расширенного диапазона длин волн от 1260 нм до 1625 нм.

В таблице V.1 Дополнения V к [b-ITU-T G-Sup.40] приводится справочная таблица по классам волокон категории МЭК и волокон МСЭ-Т G.65x.

Таблица 1 – Атрибуты МСЭ-Т G.652.B

Атрибуты волокна			
Атрибут	Подробность	Значение	Единицы
Диаметр модового поля	Длина волны	1 310	нм
	Диапазон номинальных значений	8,6–9,5	мкм
	Допуск	±0,6	мкм
Диаметр оболочки	Номинал	125,0	мкм
	Допуск	±1	мкм
Погрешность concentричности сердцевины	Максимальное значение	0,6	мкм
Некруглость оболочки	Максимальное значение	1,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимальное значение	1 260	нм
Потери на макроизгибе	Радиус	30	мм
	Число витков	100	
	Максимум на 1 625 нм	0,1	дБ
Предел прочности	Минимум	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии	$\lambda_{0 \min}$	1 300	нм
	$\lambda_{0 \max}$	1 324	нм
	$S_{0 \max}$	0,092	пс/(нм ² × км)
Атрибуты кабеля			
Атрибут	Подробность	Значение	Единицы
Коэффициент затухания (Примечание 1)	Максимум на 1 310 нм	0,4	дБ/км
	Максимум на 1 550 нм	0,35	дБ/км
	Максимум на 1 625 нм	0,4	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечания 2 и 3)	M	20	кабель
	Q	0,01	%
	Максимальный PMD _Q	0,20	пс/√км
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в этой таблице, не должны применяться к кабелям небольшой длины, например к кроссировочным кабелям, кабелям для прокладки в помещениях и ответвительным кабелям. Например, согласно [b-IEC 60794-2-11] коэффициент затухания кабеля для прокладки в помещениях при 1310 нм и 1550 нм составляет не более 1,0 дБ/км. Коэффициент затухания при длине волны более 1625 нм (в целях контроля) изучен недостаточно. Как правило, при увеличении длины волны затухание увеличивается, однако из-за потерь как на макро-, так и на макроизгибе может возникать резкая зависимость от длины волны.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В соответствии с пунктом 7.2 определено максимальное значение коэффициента PMD_Q для не заключенного в кабель волокна в целях соблюдения основного требования к кабелю по PMD_Q.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Волоконно-оптические кабели с высоким коэффициентом PMD могут использоваться в системах с менее жесткими требованиями к PMD.</p>			

Таблица 2 – Атрибуты МСЭ-Т G.652.D

Атрибуты волокна			
Атрибут	Подробность	Значение	Единицы
Диаметр модового поля	Длина волны	1 310	нм
	Диапазон номинальных значений	8,6–9,2	мкм
	Допуск	±0,4	мкм
Диаметр оболочки	Номинал	125,0	мкм
	Допуск	±0,7	мкм
Погрешность concentричности сердцевины	Максимум	0,6	мкм
Некруглость оболочки	Максимум	1,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимум	1 260	нм
Потери на макроизгибе	Радиус	30	нм
	Число витков	100	
	Максимум на 1 625 нм	0,1	дБ
Предел прочности	Минимум	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии Аппроксимации трехчленного уравнения Зельмейера (с 1260 нм на 1460 нм)	$\lambda_{0 \min}$	1 300	нм
	$\lambda_{0 \max}$	1 324	нм
	$S_{0 \min}$	0,073	пс/(нм ² × км)
	$S_{0 \max}$	0,092	пс/(нм ² × км)
Линейная аппроксимация (1460–1625 нм)	Минимум на 1 550 нм	13,3	пс/(нм × км)
	Максимум на 1 550 нм	18,6	пс/(нм × км)
	Минимум на 1 625 нм	17,2	пс/(нм × км)
	Максимум на 1 625 нм	23,7	пс/(нм × км)
Атрибуты кабеля			
Атрибут	Подробность	Значение	Единицы
Коэффициент затухания (Примечание 1)	Максимум от 1 310 нм до 1 625 нм (Примечание 2)	0,40	дБ/км
	Максимум на 1 383 нм ± 3 нм после водородного старения (Примечание 3)	0,40	дБ/км
	Максимум на 1 530–1 565 нм	0,30	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечания 4 и 5)	M	20	кабель
	Q	0,01	%
	Максимальный PMD _Q	0,20	пс/√км

Таблица 2 – Атрибуты МСЭ-Т G.652.D (окончание)

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в этой таблице, не должны применяться к кабелям небольшой длины, например к кроссировочным кабелям, кабелям для прокладки в помещениях и ответвительным кабелям. Например, согласно [b-IEC 60794-2-11] коэффициент затухания кабеля для прокладки в помещениях при 1310 нм и 1550 нм составляет не более 1,0 дБ/км. Коэффициент затухания при длине волны более 1625 нм (в целях контроля) изучен недостаточно. Как правило, при увеличении длины волны затухание увеличивается, однако из-за потерь как на макро-, так и на микроизгибе может возникать резкая зависимость от длины волны.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Область этой длины волны может быть расширена до 1260 нм путем добавления наведенных потерь рассеяния Релея, равных 0,07 дБ/км, к значению затухания на 1310 нм.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Водородное старение – это типовые испытания, которые следует проводить для специально отобранных волокон в соответствии с документом [IEC 60793-2-50], касающимся волокна категории В1.3.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – В соответствии с пунктом 7.2 определено максимальное значение коэффициента PMD_Q для не заключенного в кабель волокна в целях соблюдения основного требования к кабелю по PMD_Q .

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Волоконно-оптические кабели с высоким коэффициентом PMD могут использоваться в системах с менее жесткими требованиями к PMD.

Дополнение I

Информация об атрибутах уложенной в кабеле волоконно-оптической линии связи для проектирования системы

(Данное Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

Для расчета ограничений передачи, связанных со свойствами волокна, включая хроматическую дисперсию, PMD, затухание и нелинейность, можно рассмотреть проектирование системы для наихудшего случая и статистическое проектирование, как это указано в пунктах 9 и 10 [b-ITU-T G-Sup.39] соответственно. Проектирование для наихудшего случая – это детерминистский метод, в котором используются минимальное и максимальное значения. Его целесообразно применять для передающих систем, содержащих небольшое количество компонентов и составных волоконно-оптических кабелей строительной длины. С другой стороны, при расчете параметров передачи по составным линиям связи, включающим в себя большое количество сращенных волоконно-оптических кабелей строительной длины, следует учитывать не только характеристики детерминистских атрибутов отдельных участков кабелей, но и статистические данные последовательного соединения. Технические требования к строительным длинам приведены в пунктах 6 и 7.

Характеристики передачи волоконно-оптических кабелей строительной длины обладают некоторым распределением вероятности, которое следует учитывать при необходимости проектирования, наиболее выгодного с экономической точки зрения. При ознакомлении с данным Дополнением следует учитывать статистический характер различных параметров.

На атрибуты линий связи, в частности сквозное затухание, хроматическую дисперсию, PMD и нелинейность, влияют не только волоконно-оптические кабели, но и такие факторы, как сращивание волокон, пассивные компоненты и монтаж. Эти факторы не рассматриваются в настоящей Рекомендации.

В целях статистической оценки значений атрибутов линии для затухания в таблице I.1 пункта I.4 приведены типовые значения хроматической дисперсии волоконно-оптических линий. Методы оценки параметров линий, необходимые для проектирования систем, основаны на результатах измерений, моделировании и других факторах.

I.1 Затухание

Среднее затухание A в линии связи определяется уравнением

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y, \quad (I-1)$$

где:

- α : средний коэффициент затухания волоконных кабелей в линии;
- α_s : средние потери в месте сращивания;
- x : число мест сращивания в линии;
- α_c : средние потери в линейных соединителях;
- y : число линейных соединителей в линии (если они предусмотрены);
- L : длина линии.

Должен быть выделен подходящий запас на будущие изменения конфигураций кабеля (дополнительные места сращивания, добавочные участки кабелей, влияние старения, изменения температуры и т. д.). Приведенное выше уравнение не включает потерь на соединителях оборудования. Типичные значения для коэффициента затухания волоконно-оптических линий приведены в пункте I.4. Используемый при проектировании современной системы ресурс затухания должен учитывать статистические изменения в этих параметрах.

I.2 Хроматическая дисперсия

Хроматическая дисперсия, выражаемая в пикосекундах на нанометр (пс/нм), может быть рассчитана на основе коэффициентов хроматической дисперсии строительных длин, если предположить наличие линейной зависимости от длины, и с надлежащим учетом знаков коэффициентов (см. пункт 6.10).

При использовании этих волокон для передачи в области 1550 нм часто используются некоторые виды компенсации хроматической дисперсии. В этом случае для целей проектирования используется средняя хроматическая дисперсия на линии. Измеряемую дисперсию в окне 1550 нм можно охарактеризовать в пределах этого окна линейным соотношением с длиной волны. Соотношение описывается через коэффициент хроматической дисперсии и коэффициент крутизны дисперсии на 1550 нм.

Типовые значения для коэффициента хроматической дисперсии D_{1550} и наклона кривой хроматической дисперсии S_{1550} при 1550 нм приведены в таблице I.1. Эти величины вместе с длиной линии L_{Link} могут быть использованы для расчета типичной хроматической дисперсии, применяемой при проектировании оптической линии:

$$D_{\text{Link}}(\lambda) = L_{\text{Link}} [D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad [\text{пс/нм}]. \quad (\text{I-2})$$

ПРИМЕЧАНИЕ. – Нормативные требования хроматической дисперсии для волокон G.652.D пересмотрены. Таким образом данное уравнение более не является типовым для данного вида волокна.

I.3 Дифференциальная групповая задержка (ДГЗ)

Дифференциальная групповая задержка – это разница во времени прихода двух поляризационных мод на данной длине волны и в данный момент времени. PMD по сути своей – статистическая величина, а ДГЗ изменяется случайным образом на всем протяжении волоконно-оптического кабеля; следовательно, статистическая методика проектирования линии связи имеет большое значение для определения влияния PMD, если речь идет о линии связи, сформированной из отрезков заданной длины или последовательно соединенных участков волоконно-оптических кабелей. Для линии с конкретным коэффициентом PMD дифференциальная групповая задержка линии изменяется случайным образом в зависимости от времени и длины волны в виде распределения Максвелла, содержащего единственный параметр, являющийся произведением коэффициента PMD линии и квадратного корня из длины линии. Ухудшение системы из-за PMD в конкретное время и на конкретной длине волны зависит от ДГЗ в это время и на этой волне. Таким образом были разработаны средства установления практических пределов распределения ДГЗ, поскольку оно имеет отношение к распределению коэффициента PMD волоконно-оптического кабеля и его пределам, они описаны в [b-IEC/TR 61282-3] и кратко изложены в Дополнении IV к [ITU-T G.650.2]. Метрики ограничений распределения ДГЗ вытекают из:

ПРИМЕЧАНИЕ. – Определение вклада элементов, кроме волоконно-оптического кабеля, не входит в сферу применения настоящей Рекомендации, но обсуждалось в [b-IEC/TR 61282-3].

Эталонной длины линии L_{Ref} – максимальной длины линии, к которой применяется максимальная ДГЗ. Для более протяженных длин следует умножить ДГЗ на квадратный корень из отношения фактической длины к эталонной длине.

Типичной максимальной длины кабеля L_{Cab} – максимумы обеспечиваются, если типичные отдельные кабели в каскадном соединении или длины кабелей, которые измеряются при определении распределения коэффициента PMD, меньше этой величины.

Максимальных ДГЗ (ДГЗ_{max}) – значение ДГЗ, которое используется при рассмотрении проектирования оптической системы.

Максимальной вероятности P_F – вероятности того, что фактическая величина ДГЗ превышает ДГЗ_{max} .

I.4 Таблицы общих типичных значений

Значения в таблицах I.1 и I.2 являются типичными для составных волоконно-оптических линий согласно пунктам I.1–I.3 соответственно. Предполагаемые величины внесенной максимальной ДГЗ волокна, приведенные в таблице I.2, предназначены для сведения в отношении требований к другим оптическим элементам, которые могут находиться на линии. Значения, представленные в этом пункте, применимы ко всем волокнам, совместимым с G.652, включая волокна G.657.A.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Длина кабельной секции составляет 10 км, за исключением случая линии протяженностью $0,10 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}} > 4000 \text{ км}$, для которой длина устанавливается равной 25 км, уровень вероятности ошибки составляет $6,5 \times 10^{-8}$.

Таблица I.1 – Типовые значения для составных волоконно-оптических линий связи

Коэффициент затухания	Область длины волны	Типовое значение линии
(Примечание)	1 260–1 360 нм	0,5 дБ/км
	1 530–1 565 нм	0,275 дБ/км
	1 565–1 625 нм	0,35 дБ/км
Параметр хроматической дисперсии	D_{1550}	17 пс/(нм × км)
	S_{1550}	0,056 пс/(нм ² × км)
ПРИМЕЧАНИЕ. – Типовое значение для линии соответствует коэффициенту затухания на линии, используемому в [b-ITU-T G.957] и [b-ITU-T G.691].		

Таблица I.2 – Дифференциальная групповая задержка

Максимальная PMD _Q [пс/√км]	Протяженность линии [км]	Предполагаемая максимальная ДГЗ, вносимая волокном [пс]	Скорости передачи двоичной информации в канале
Спецификация отсутствует			До 2,5 Гбит/с
0,5	400	25,0	10 Гбит/с
	40	19,0 (Примечание)	10 Гбит/с
	2	7,5	40 Гбит/с
0,20	3 000	19,0	10 Гбит/с
	80	7,0	40 Гбит/с
0,10	> 4 000	12,0	10 Гбит/с
	400	5,0	40 Гбит/с
ПРИМЕЧАНИЕ. – Эта величина применяется также для систем Ethernet со скоростью 10 Гбит/с.			

I.5 Коэффициент нелинейности

Влияние хроматической дисперсии взаимосвязано с коэффициентом нелинейности n_2/A_{eff} относительно ухудшения характеристик системы, вызванного нелинейными оптическими эффектами (см. [b-ITU-T G.663] и [ITU-T G.650.2]). Типовые значения для уже установленных систем могут различаться. Методы измерения коэффициента нелинейности изучаются.

I.6 Пример методики статистического проектирования

Для статистического проектирования линии связи возможно использовать математический метод, если при проектировании линии может быть принята случайность (например, когда для формирования линии связи случайным образом соединяется относительно большое число многоволоконных кабелей), хотя универсальность этого требует дальнейшего изучения. Например, если линия составлена из уложенного в кабеле волокна, созданного из ограниченного числа дискретных волокон, случайность является ограниченной, и для получения приемлемых запасов предпочтительно использовать методику проектирования "по худшему случаю".

Общая методика статистического проектирования систем описана в [b-ITU-T G-Sup.39], а далее приведен один из способов определения верхнего статистического предела для одного из параметров кабеля и волокна. Расчет начинается с получения статистического распределения. Пусть x_i и L_i – это параметр волокна на единицу длины и длина кабеля соответственно для волокна в i -м кабеле в

составной линии из N кабелей. В случае если глобальный параметр волокна всей линии связи x_N пропорционален длине, то x_N равен:

$$x_N = \frac{\sum_{i=1}^N L_i x_i}{\sum_{i=1}^N L_i} = \frac{1}{L_{\text{Link}}} \sum_{i=1}^N L_i x_i. \quad (\text{I-3})$$

Если предположить, что все участки кабеля имеют длину меньше некоторого стандартного значения L_{Cab} и одновременно уменьшить число планируемых участков кабеля до $M = L_{\text{Link}}/L_{\text{Cab}}$, то для линии, состоящей из кабелей равной длины $L_i = L_{\text{Cab}}$, уравнение выше принимает вид

$$x_N \leq x_M = \frac{L_{\text{Cab}}}{L_{\text{Link}}} \sum_{i=1}^M x_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i. \quad (\text{I-4})$$

Отклонения параметра составной линии x_M будет меньше, чем отклонения на отдельных участках кабелей x_i . Это происходит благодаря усреднению параметров последовательно соединенных волокон.

Как только установлено распределение параметра волокна, для определения плотности вероятности параметра волокна составной линии f_{link} (если нет предположений относительно формы) можно использовать метод Монте-Карло. В данном методе моделируется процесс построения линий путем неоднократного отбора множества измеряемых параметров волокна.

Измерение параметра волокна проводится по достаточному большому количеству сегментов, что позволяет определить характеристики базового распределения. Затем на основе полученных результатов производится расчет параметра волокна для отдельно взятой ветви составной линии.

Расчет выполняется путем случайного выбора M значений из измеренных параметров волокна и сложения их в соответствии с уравнением (I-4). Расчетное значение затухания на составной линии заносится в таблицу или гистограмму значений, полученных из других случайных выборок. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет получено достаточное количество значений затухания на составной линии, позволяющее построить плотную гистограмму последовательного распределения параметра волокна. Если гистограмма используется непосредственно, без определения каких-либо дополнительных характеристик, например без гауссова приближения, то количество повторных выборок должно составлять не менее 10^4 .

Согласно центральной предельной теореме гистограмма статистических значений параметра волокна на составной кабельной линии стремится к распределению, которое может быть описано как минимум двумя параметрами. Таким образом гистограмма может быть приближена к параметрическому распределению, позволяющему произвести экстраполяцию до уровней вероятности, меньших, чем предполагает размер выборки. Два параметра неизменно представляют два аспекта распределения – центральное значение и разброс вокруг центрального значения.

Для получения уровней вероятности $Q = 10^{-3}$ при использовании чисто численного метода необходимо выполнить моделирование методом Монте-Карло как минимум для 10^4 выборок. По завершении данной процедуры распределение затухания и хроматической дисперсии может быть интерполировано с использованием соответствующих кумулятивных функций плотности вероятности.

Следует заметить, что применимость методики, описанной в приведенном выше примере, подлежит дальнейшему изучению.

Дополнение II

Информация о сборе данных по максимальной и минимальной хроматической дисперсии волокна G.652.D для спецификации граничных кривых

(Данное Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

В ноябре 2014 года ИК15/Q5 МСЭ-Т приняла решение улучшить спецификацию хроматической дисперсии существующих волокон G.652.D и отразить в этих новых спецификациях максимальные и минимальные граничные кривые в диапазоне длины волны 1270–1625 нм. С этой целью действующие на тот момент члены ИК15/Q5 МСЭ-Т совместно с восемью основными производителями волокна провели исследование хроматической дисперсии. Испытанию были подвергнуты все типы волокон G.652.D, включая волокна G.657.A и волокна G.652.D с сердцевиной из чистого кварцевого стекла. Испытания проводились в анонимном порядке.

Результаты исследования показаны на рисунке II.1.

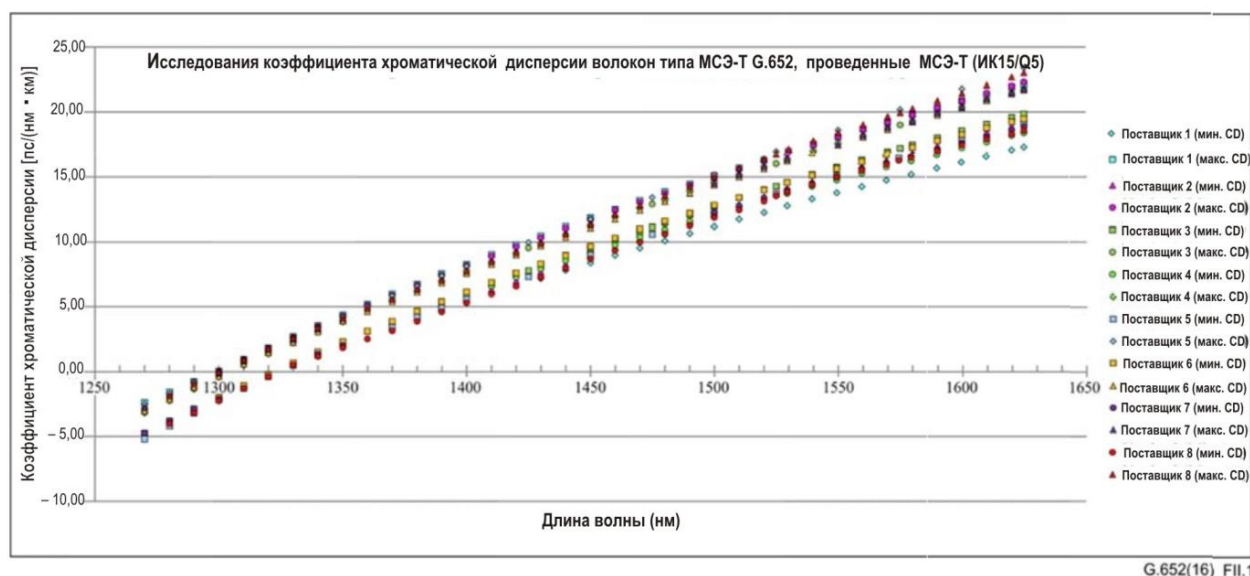


Рисунок II.1 – Исследование максимального и минимального коэффициентов хроматической дисперсии для волокон типа G.652.D в диапазоне длины волны от 1270 до 1625 нм

В таблице II.1 показаны данные по хроматической дисперсии в диапазоне длины волны от 1270 до 1625 нм, полученные от восьми производителей волокна.

На основе этих результатов разработаны спецификации максимальной и минимальной граничных кривых для хроматической дисперсии волокон типа G.652.D (впервые представлены в 9-м издании (2016 г.), см. таблицу 2 в пункте 8).

Таблица П.1 – Исследование максимального и минимального коэффициентов хроматической дисперсии для волокон типа G.652.D в диапазоне длины волны от 1270 до 1625 нм

МСЭ-Т ИК15/Q5: сбор данных по хроматической дисперсии от производителей волокон типа G.652
 Коэффициент хроматической дисперсии [пс/(нм · км)]

Дата: 21.04.2015 г.

Длина волны (нм)	Поставщик 1 (мин. CD) / Поставщик 1 (макс. CD)		Поставщик 2 (мин. CD) / Поставщик 2 (макс. CD)		Поставщик 3 (мин. CD) / Поставщик 3 (макс. CD)		Поставщик 4 (мин. CD) / Поставщик 4 (макс. CD)		Поставщик 5 (мин. CD) / Поставщик 5 (макс. CD)		Поставщик 6 (мин. CD) / Поставщик 6 (макс. CD)		Поставщик 7 (мин. CD) / Поставщик 7 (макс. CD)		Поставщик 8 (мин. CD) / Поставщик 8 (макс. CD)	
1270	-4,96	-2,36	-4,82	-2,83	-4,74	-3,14	-4,83	-3,18	-5,18	-2,54	-4,80	-3,05	-4,70	-2,76		
1280	-3,99	-1,56	-3,87	-1,88	-3,79	-2,18	-3,87	-2,26	-4,18	-1,68	-3,83	-2,12	-3,80	-1,82	-3,99	-1,83
1290	-3,05	-0,77	-2,96	-0,94	-2,86	-1,25	-2,94	-1,34	-3,19	-0,83	-2,89	-1,21	-2,90	-0,91	-3,16	-0,92
1300	-2,12	0,00	-2,06	-0,02	-1,96	-0,33	-2,03	-0,43	-2,17	-0,01	-1,97	-0,32	-2,10	-0,10	-2,25	0,00
1310	-1,23	0,91	-1,18	0,88	-1,08	0,56	-1,14	0,46	-1,28	0,89	-1,07	0,55	-1,20	0,84	-1,28	0,92
1320	-0,35	1,81	-0,33	1,78	-0,22	1,44	-0,28	1,33	-0,35	1,75	-0,20	1,41	-0,40	1,68	-0,32	1,77
1330	0,45	2,68	0,50	2,62	0,61	2,29	0,56	2,19	0,49	2,61	0,65	2,24	0,50	2,50	0,48	2,60
1340	1,19	3,53	1,11	3,47	1,43	3,13	1,38	3,03	1,25	3,41	1,49	3,06	1,30	3,30	1,17	3,42
1350	1,92	4,37	2,10	4,29	2,23	3,94	2,19	3,85	2,01	4,25	2,30	3,86	2,00	4,08	1,84	4,15
1360	2,63	5,19	2,87	5,10	3,01	4,75	2,97	4,65	2,75	5,04	3,10	4,64	2,80	4,90	2,49	4,88
1370	3,32	5,99	3,55	5,90	3,79	5,51	3,73	5,44	3,47	5,83	3,88	5,39			3,13	5,59
1380	4,00	6,78	4,28	6,68	4,55	6,27	4,47	6,21	4,17	6,58	4,65	6,13			3,87	6,33
1390	4,67	7,54	4,98	7,44	5,29	7,02	5,19	6,97	4,88	7,39	5,41	6,86			4,59	7,05
1400	5,32	8,30	5,68	8,19	6,02	7,76	5,91	7,72	5,58	8,14	6,15	7,58			5,29	7,77
1410	5,96	9,04	6,37	8,92	6,74	8,48	6,60	8,45			6,88	8,30			5,96	8,49
1420	6,58	9,76	7,05	9,65	7,44	9,19	7,27	9,18			7,60	9,01			6,61	9,20
1425					7,79	9,55			7,31	9,97						
1430	7,20	10,47	7,72	10,35	8,14	9,89	7,94	9,89			8,31	9,71			7,29	9,91
1440	7,80	11,17	8,31	11,05	8,82	10,58	8,58	10,58			9,00	10,40			7,99	10,64
1450	8,39	11,86	8,99	11,73	9,50	11,26	9,18	11,27	8,98	11,71	9,67	11,08			8,71	11,35
1460	8,97	12,53	9,66	12,41	10,16	11,93	9,79	11,94			10,33	11,76			9,35	12,11
1470	9,54	13,19	10,32	13,07	10,82	12,59	10,40	12,61			10,98	12,42			9,98	12,82
1475			11,15	12,92					10,60	13,40						
1480	10,10	13,84	10,96	13,72	11,45	13,22	10,99	13,26			11,61	13,08			10,63	13,54
1490	10,65	14,48	11,59	14,36	12,10	13,87	11,57	13,90			12,23	13,73			11,26	14,27
1500	11,19	15,10	12,21	14,99	12,74	14,51	12,13	14,53	12,16	15,16	12,83	14,37	12,30	14,50	11,87	14,99
1510	11,72	15,72	12,82	15,61	13,36	15,14	12,68	15,15			13,42	15,00	12,80	15,20	12,45	15,68
1520	12,24	16,33	13,42	16,23	13,98	15,76	13,21	15,76			14,00	15,63	13,40	15,80	13,11	16,40
1525					14,28	16,06			13,66	16,89					13,55	16,79
1530	12,76	16,93	14,01	16,83	14,59	16,37	13,74	16,36			14,56	16,25	14,00	16,40	13,84	17,12
1540	13,26	17,51	14,59	17,43	15,18	16,97	14,27	16,94			15,12	16,85	14,50	17,00	14,40	17,76
1550	13,76	18,09	15,18	18,02	15,76	17,56	14,78	17,52	15,10	18,56	15,66	17,45	15,00	17,50	14,94	18,39
1560	14,25	18,66	15,73	18,60	16,33	18,14	15,28	18,10			16,20	18,05	15,60	18,20	15,50	19,01
1570	14,73	19,22	16,28	19,18	16,89	18,71	15,78	18,66			16,73	18,63	16,10	18,80	15,99	19,63
1575					17,17	18,99			16,48	20,20					16,29	19,93
1580	15,20	19,78	16,82	19,76	17,45	19,27	16,27	19,21			17,24	19,21	16,60	19,30	16,49	20,25
1590	15,67	20,32	17,36	20,33	17,99	19,83	16,75	19,76			17,75	19,77	17,10	19,90	16,95	20,88
1600	16,13	20,86	17,89	20,89	18,53	20,37	17,23	20,30	17,81	21,81	18,25	20,33	17,60	20,40	17,46	21,45
1610	16,59	21,39	18,41	21,45	19,06	20,91	17,70	20,83			18,75	20,89	18,10	21,00	17,89	22,08
1620	17,03	21,91	18,92	22,01	19,58	21,44	18,17	21,36			19,23	21,43	18,60	21,50	18,31	22,69
1625	17,25	22,17	19,17	22,28	19,84	21,71	18,40	21,62	19,09	23,38	19,47	21,70	18,90	21,80	18,60	23,01

Библиография

- [b-ITU-T G.663] Recommendation ITU-T G.663 (2011), *Application-related aspects of optical amplifier devices and subsystems.*
- [b-ITU-T G.691] Рекомендация МСЭ-Т G.691 (2006 г.), *Оптические интерфейсы для одноканальных STM-64 и других систем СЦИ с оптическими усилителями.*
- [b-ITU-T G.692] Recommendation ITU-T G.692 (1998), *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.*
- [b-ITU-T G.693] Recommendation ITU-T G.693 (2009), *Optical interfaces for intra-office systems.*
- [b-ITU-T G.695] Recommendation ITU-T G.695 (2015), *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.*
- [b-ITU-T G.696.1] Recommendation ITU-T G.696.1 (2010), *Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications.*
- [b-ITU-T G.698.1] Рекомендация МСЭ-Т G.698.1 (2009 г.), *Многоканальные приложения, в которых используется DWDM, с одноканальными оптическими интерфейсами.*
- [b-ITU-T G.698.2] Рекомендация МСЭ-Т G.698.2 (2009 г.), *Многоканальные приложения, использующие плотное мультиплексирование с разделением по длине волны, с усилителями и с одноканальными оптическими интерфейсами.*
- [b-ITU-T G.698.3] Рекомендация МСЭ-Т G.698.3 (2012 г.), *Многоканальные приложения, использующие DWDM при помощи затравочного сигнала, с одноканальными оптическими интерфейсами.*
- [b-ITU-T G.957] Рекомендация МСЭ-Т G.957 (2006 г.), *Оптические интерфейсы для оборудования и систем, относящихся к синхронной цифровой иерархии.*
- [b-ITU-T G.959.1] Recommendation ITU-T G.959.1 (2016), *Optical transport network physical layer interfaces.*
- [b-ITU-T G.983.1] Рекомендация МСЭ-Т G.983.1 (2005 г.), *Оптические системы широкополосного доступа, базирующиеся на пассивной оптической сети (PON).*
- [b-ITU-T G.984.2] Рекомендация МСЭ-Т G.984.2 (2003 г.), *Пассивные волоконно-оптические сети с поддержкой гигабитных скоростей передачи (GPON): Спецификация зависимого от физической среды (PMD) уровня.*
- [b-ITU-T G.985] Recommendation ITU-T G.985 (2003), *100 Mbit/s point-to-point Ethernet based optical access system.*
- [b-ITU-T G.986] Recommendation ITU-T G.986 (2010), *1 Gbit/s point-to-point Ethernet-based optical access system.*
- [b-ITU-T G.987.2] Recommendation ITU-T G.987.2 (2016), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification.*
- [b-ITU-T G.989.2] Recommendation ITU-T G.989.2 (2014), *40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification.*
- [b-ITU-T G-Sup.39] Recommendation ITU-T G-Sup.39 (2016), *Optical system design and engineering considerations.*

- [b-ITU-T G-Sup.40] Recommendation ITU-T G-Sup 40 (2010), *Optical fibre and cable Recommendations and standards guideline.*
- [b-IEC 60794-2-11] IEC 60794-2-11 (2012), *Optical fibre cables – Part 2-11: Indoor cables – Detailed specification for simplex and duplex cables for use in premises cabling.*
- [b-IEC/TR 61282-3] IEC/TR 61282-3 (2006), *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion.*

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия D	Принципы тарификации и учета и экономические и стратегические вопросы международной электросвязи/ИКТ
Серия E	Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы
Серия F	Нетелефонные службы электросвязи
Серия G	Системы и среда передачи, цифровые системы и сети
Серия H	Аудиовизуальные и мультимедийные системы
Серия I	Цифровая сеть с интеграцией служб
Серия J	Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов
Серия K	Защита от помех
Серия L	Окружающая среда и ИКТ, изменение климата, электронные отходы, энергоэффективность; конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	Управление электросвязью, включая СУЭ и техническое обслуживание сетей
Серия N	Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ
Серия O	Требования к измерительной аппаратуре
Серия P	Качество телефонной передачи, телефонные установки, сети местных линий
Серия Q	Коммутация и сигнализация, а также соответствующие измерения и испытания
Серия R	Телеграфная передача
Серия S	Оконечное оборудование для телеграфных служб
Серия T	Оконечное оборудование для телематических служб
Серия U	Телеграфная коммутация
Серия V	Передача данных по телефонной сети
Серия X	Сети передачи данных, взаимосвязь открытых систем и безопасность
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура, аспекты протокола Интернет, сети последующих поколений, интернет вещей и "умные" города
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи