

# МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

# G.654

(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 со смещенной отсечкой**

Рекомендация МСЭ-Т G.654

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 ТЕЛЕФОННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ	G.300–G.399
ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ ПО РАДИОРЕЛЕЙНЫМ ИЛИ СПУТНИКОВЫМ ЛИНИЯМ И СОЕДИНЕНИЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ 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
<b>Волоконно-оптические кабели</b>	<b>G.650–G.659</b>
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 – ОБЩИЕ АСПЕКТЫ И АСПЕКТЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ	G.1000–G.1999
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ	G.6000–G.6999
ЦИФРОВОЕ ОКОНЕЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	G.7000–G.7999
ЦИФРОВЫЕ СЕТИ	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.654

### Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной отсечкой

#### Резюме

В Рекомендации МСЭ-Т G.654 приведено описание геометрических и механических атрибутов, а также атрибутов передачи одномодового оптического волокна и кабеля с длиной волны нулевой дисперсии около 1310 нм, в котором минимизированы потери и длина волны отсечки смещена в область длин волн около 1550 нм. Настоящая Рекомендация является актуальным пересмотром данной Рекомендации, впервые разработанной в 1988 году.

В версии 10.0 введена категория E волокна МСЭ-Т G.654 в целях существенного улучшения характеристик отношения оптического сигнала к шуму (OSNR) для поддержки цифровых когерентных систем передачи наземного развертывания, обеспечивающих скорость 100 Гбит/с и выше 100 Гбит/с. Настоящий пересмотр направлен на поддержание прочного коммерческого успеха этого волокна в развивающемся мире высокопроизводительных оптических систем передачи.

#### Хронологическая справка

Издание	Рекомендация	Утверждение	Исследовательская комиссия	Уникальный ID*
1.0	МСЭ-Т G.654	25.11.1988 г.	XV	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/886">11.1002/1000/886</a>
2.0	МСЭ-Т G.654	12.03.1993 г.	XV	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/887">11.1002/1000/887</a>
3.0	МСЭ-Т G.654	08.04.1997 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/4020">11.1002/1000/4020</a>
4.0	МСЭ-Т G.654	06.10.2000 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/5185">11.1002/1000/5185</a>
5.0	МСЭ-Т G.654	29.06.2002 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/6074">11.1002/1000/6074</a>
6.0	МСЭ-Т G.654	13.06.2004 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/7320">11.1002/1000/7320</a>
7.0	МСЭ-Т G.654	14.12.2006 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/8974">11.1002/1000/8974</a>
8.0	МСЭ-Т G.654	29.07.2010 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/10870">11.1002/1000/10870</a>
9.0	МСЭ-Т G.654	29.10.2012 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/11768">11.1002/1000/11768</a>
10.0	МСЭ-Т G.654	13.11.2016 г.	15-я	<a href="http://handle.itu.int/11.1002/1000/13077">11.1002/1000/13077</a>

#### Ключевые слова

Оптическое волокно и кабель, одномодовое оптическое волокно и кабель со смещенной отсечкой, волокно с большим диаметром модового поля, передача на большие расстояния.

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

## 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, определенный 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 .....	2
6.3 Погрешность концентричности сердцевины .....	2
6.4 Некруглость .....	3
6.5 Длина волны отсечки .....	3
6.6 Потери на макроизгибе .....	4
6.7 Свойства материала волокна .....	4
6.8 Профиль показателя преломления .....	4
6.9 Продольная однородность хроматической дисперсии .....	4
6.10 Хроматическая дисперсия .....	5
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 .....	12
I.1 Затухание .....	12
I.2 Хроматическая дисперсия .....	12
I.3 Дифференциальная групповая задержка .....	13
I.4 Таблицы общих типичных значений .....	13
I.5 Коэффициент нелинейности .....	14
I.6 Пример методики статистического проектирования .....	15
Библиография .....	16



### Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной отсечкой

#### 1 Сфера применения

В настоящей Рекомендации приведено описание одномодового оптического волокна и кабеля с длиной волны нулевой дисперсии около 1300 нм, в котором минимизированы потери и длина волны отсечки смещена в область длин волн около 1550 нм и которое оптимизировано для использования в диапазоне длин волн 1530–1625 нм.

Это волокно, имеющее очень малые потери и смещенную отсечку (CSF), может использоваться в приложениях для цифровой передачи на большие расстояния, таких как наземные проводные системы дальней связи и подводные кабельные системы с оптическими усилителями. Приведено описание геометрических и оптических характеристик (затухание, длина волны отсечки, хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия (PMD) и т. д.), характеристик передачи и механических характеристик этого CSF.

Для поддержки передачи при больших длинах волны – до 1625 нм – вводится ряд положений. Геометрические и оптические параметры, параметры передачи и механические параметры описаны в характеристиках трех категорий атрибутов:

- атрибуты волокна, которые сохраняются при прокладке кабелей и монтаже;
- атрибуты кабеля, которые рекомендуются для кабелей при поставке;
- атрибуты линии, являющиеся характеристиками составных кабелей, которые описывают методы оценки параметров системного интерфейса, основанные на измерениях, моделировании или других соображениях. Информация об атрибутах линии и проектном решении системы приведена в Дополнении I.

Настоящая Рекомендация и различные категории показателей работы, представленные в таблицах 1–5 раздела 8, предназначены для поддержки следующих связанных с ними системных Рекомендаций:

- [b-ITU-T G.696.1];
- [b-ITU-T G.957].

Значения терминов, используемых в настоящей Рекомендации, и руководящие указания, которым необходимо следовать при проведении измерений для проверки различных характеристик, приведены в [ITU-T G.650.1] и [ITU-T G.650.2]. Характеристики данного волокна, включая определения относящихся к ним параметров, методы их тестирования и соответствующие значения будут уточняться 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 г.), *Определения и методы тестирования статистических и нелинейных взаимосвязанных атрибутов одномодового волокна и кабеля.*
- [ISO 80000-1] ISO 80000-1 (2009), *Quantities and units – Part 1: General.*

### 3 Определения

#### 3.1 Термины, определенные в других документах

В настоящей Рекомендации используются термины, определенные в [ITU-T G.650.1] и [ITU-T G.650.2].

#### 3.2 Термины, определенный в настоящей Рекомендации

Отсутствуют.

### 4 Сокращения и акронимы

В настоящей Рекомендации используются следующие сокращения и акронимы:

CSF	Cut-off Shifted Fibre		Оптическое волокно со смещенной отсечкой
DGD	Differential Group Delay	ДГЗ	Дифференциальная групповая задержка
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing		Плотное мультиплексирование с разделением по длине волны
MFD	Mode Field Diameter		Диаметр модового поля
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio		Отношение оптического сигнала к шуму
PMD	Polarization Mode Dispersion		Поляризационная модовая дисперсия
WDM	Wavelength Division Multiplexing		Мультиплексирование с разделением по длине волны

### 5 Соглашения

Значения округляются до количества разрядов, указанных в таблицах 1–5 рекомендованных величин, до выполнения оценки соответствия. Используется обычное правило "половина округляется к ближайшему числу, которое дальше от нуля", описанное в правиле В Приложения В [ISO 80000-1]. При определении округления используется только первая цифра после числа значащих цифр.

### 6 Атрибуты волокна

В настоящем разделе рекомендуются только те характеристики волокна, которые обеспечивают минимально необходимую при проектировании основу для изготовителей волокна. Диапазоны или пределы значений приведены в таблицах 1–5 раздела 8. Из них значительное влияние на длину волны отсечки волокна в кабеле и его поляризационную модовую дисперсию (PMD) может оказывать изготовление или укладка кабеля. 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 номинальное значение диаметра модового поля (MFD) должны определяться для длины волны 1550 нм. Указанное номинальное значение должно находиться в пределах диапазонов, приведенных в разделе 8. Указанный допуск на MFD не должен превышать значения, приведенного в разделе 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 разделе 8. Отклонение диаметра оболочки от номинального значения не должно превышать указанного допуска.

#### 6.3 Погрешность концентричности сердцевин

Погрешность концентричности сердцевин не должна превышать значения, определенного в разделе 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 эту некруглость при приемочных испытаниях.

### 6.4.2 Некруглость оболочки

Некруглость оболочки не должна превышать значения, указанного в разделе 8.

## 6.5 Длина волны отсечки

Различают два имеющих практическое значение типа длины волны отсечки:

- a) кабельная длина волны отсечки  $\lambda_{cc}$ ;
- b) волоконная длина волны отсечки  $\lambda_c$ .

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для некоторых конкретных применений подводного кабеля могут потребоваться другие значения кабельной длины волны отсечки.

Корреляция измеренных величин  $\lambda_c$  и  $\lambda_{cc}$  зависит от конкретного конструктивного исполнения волокна и кабеля и условий тестирования. Как правило,  $\lambda_{cc} < \lambda_c$ , однако установить общее количественное соотношение непросто.

Чрезвычайно важно обеспечить одномодовую передачу при минимальной длине кабеля между стыками и при минимальной рабочей длине волны. Этого можно добиться двумя альтернативными методами:

- 1) рекомендовать использовать  $\lambda_c$  менее 1600 нм: если используется нижний предел,  $\lambda_c$  должна быть больше 1350 нм;
- 2) рекомендовать использовать максимальное значение  $\lambda_{cc}$  1530 нм.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Указанные выше значения гарантируют одномодовую передачу при длине волны около 1550 нм. В случае применения мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM), когда требуется работа при длине волны (1550 нм –  $x$ ), приведенные выше значения должны быть уменьшены на  $x$  нм.

Не требуется реализовывать обе эти спецификации. Наиболее прямой способ гарантии одномодовой работы кабеля заключается в спецификации  $\lambda_{cc}$ , поэтому он является предпочтительным вариантом. Когда обстоятельства не позволяют легко специфицировать  $\lambda_{cc}$  (например, в одномодовых волоконно-оптических кабелях, таких как кабельные перемычки или кабели, способ использования которых значительно отличается от случая  $\lambda_{cc}$ ), тогда целесообразно использовать спецификацию  $\lambda_c$ .

Если пользователь выбирает спецификацию  $\lambda_{cc}$  согласно пункту 2), то следует понимать, что  $\lambda_c$  может превышать 1600 нм.

Если пользователь выбирает спецификацию  $\lambda_c$  согласно пункту 1), то нет необходимости определять  $\lambda_{cc}$ .

Если пользователь выбирает спецификацию  $\lambda_{cc}$ , можно разрешить, чтобы  $\lambda_c$  превышала минимальную рабочую длину волны, полагая, что влияние изготовления и монтажа кабеля дадут значения  $\lambda_{cc}$  ниже минимальной рабочей длины волны для самой малой длины кабеля между двумя соединениями.

Если пользователь выбирает спецификацию  $\lambda_{cc}$ , то для проверки выполнения требования к  $\lambda_{cc}$  достаточным может быть тестирование на соответствие техническим условиям.

Значение  $\lambda_{cc}$  не должно превышать максимального значения, определенного в разделе 8.

## **6.6 Потери на макроизгибе**

Потери на макроизгибе изменяются в зависимости от длины волны, радиуса изгиба и числа витков вокруг сердечника определенного радиуса. Потери на макроизгибе не должны превышать максимального значения, определенного в разделе 8 для конкретных значений длины волны, радиуса изгиба и числа витков.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для гарантии выполнения данного требования достаточным может быть тестирование на соответствие техническим условиям.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Рекомендованное количество витков соответствует приблизительному количеству витков, используемому во всех муфтах для типичного интервала между ретрансляторами. Рекомендованный радиус эквивалентен минимальному радиусу изгиба, принятому при долгосрочном использовании волокон в реальных установках систем, для того чтобы избежать отказа в результате статической усталости.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В случае выбора по практическим соображениям меньшего, чем рекомендованное, числа витков, предлагается, что потребуются не менее 40 витков и повышение уровня потерь будет пропорционально меньшим.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Рекомендация по потерям на макроизгибе относится к разворачиванию волокон в реальных монтажах одномодовых волокон. Влияние радиусов изгиба, обусловленных скручиванием в кабеле, уложенных в кабеле одномодовых волокон на показатели потерь включено в спецификации потерь уложенных в кабеле волокон.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – В случае если необходимо проведение планового тестирования, вместо рекомендованного тестирования можно использовать петлю меньшего диаметра с одним или несколькими витками для обеспечения точности и простоты измерений. В этом случае диаметр петли, число витков и максимально допустимые потери вследствие изгиба при выполнении тестирования с несколькими витками должны выбираться таким образом, чтобы соответствовать рекомендованному тестированию и допустимым потерям.

## **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 снятия (в случае необходимости). Аналогичную информацию следует приводить и в случае однослойного покрытия волокон.

### **6.7.3 Уровень предела прочности**

Определяемый предел прочности  $\sigma_p$  не должен быть меньше минимального значения, указанного в разделе 8.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Определения механических параметров приведены в пп. 3.2 и 5.7 [ITU-T G.650.1].

## **6.8 Профиль показателя преломления**

Как правило, не требуется знать профиль коэффициента преломления волокна.

## **6.9 Продольная однородность хроматической дисперсии**

Вопрос изучается.

ПРИМЕЧАНИЕ. – На определенной длине волны локальное абсолютное значение коэффициента хроматической дисперсии может отличаться от величины, полученной при измерении на большой длине. Если это значение уменьшается до малой величины при длине волны, близкой к рабочей длине волны системы с плотным мультиплексированием с разделением по длине волны (DWDM), то четырехволновое смешение может привести к распространению мощности на волнах другой длины, включая, в том числе, другие рабочие длины волн. Величина мощности при четырехволновом смешении является функцией абсолютного значения коэффициента хроматической дисперсии, наклона хроматической дисперсии, рабочих длин волн, оптической мощности и расстояния, на котором происходит четырехволновое смешение.

Для работы DWDM в области 1550 нм хроматическая дисперсия в волокнах G.654 достаточно велика, чтобы исключить четырехволновое смешение. Вследствие этого, однородность хроматической дисперсии не является вопросом функционирования.

## 6.10 Хроматическая дисперсия

Измеренная групповая задержка или хроматическая дисперсия в волокне единичной длины как функция длины волны может быть аппроксимирована с помощью квадратного уравнения, которое приведено в Приложении А [ITU-T G.650.1]. (Руководство по интерполяции значений дисперсии на длины волн, для которых измерения не производились, см. в п. 5.5 [ITU-T G.650.1]). Как указано в разделе 8, при длине волны 1550 нм значение хроматической дисперсии не должно превышать максимального значения  $D_{1550\max}$  или должно находиться в интервале между минимальным значением  $D_{1550\min}$  и максимальным значением  $D_{1550\max}$ . Кроме того, при длине волны 1550 нм значение наклона дисперсии не должно превышать максимального значения  $S_{1550\max}$  или должно находиться в интервале между минимальным значением  $S_{1550\min}$  и максимальным значением  $S_{1550\max}$ .

В зависимости от требуемой точности для диапазона длин волны шириной до 35 нм допускается использование квадратного уравнения в области 1550 нм. Для работы в диапазоне С и L рекомендуется использовать либо пятичленную модель Зельмейера, либо полиномиальную модель 4-го порядка. Квадратное уравнение не предназначено для использования в области 1310 нм.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Не требуется измерять коэффициент хроматической дисперсии на регулярной основе.

Для волокон подкатегории G.654.E параметры хроматической дисперсии, приведенные в таблице 5 раздела 8, определяются в целях связывания минимального/максимального коэффициента хроматической дисперсии  $D(\lambda)$  при длине волны  $\lambda$ , то есть значений для 1530 нм со значениями для 1625 нм. Это обеспечивает возможность более точного проектирования системы, в которой используются схемы компенсации дисперсии. Применяется квадратичная аппроксимация для групповой задержки согласно таблице А.1 [ITU-T G.650.1], и связь  $D(\lambda)$  выполняется с помощью следующего неравенства:

$$D_{1550\min} + S_{1550\min}(\lambda - 1550) \leq D(\lambda) \leq D_{1550\max} + S_{1550\max}(\lambda - 1550), \quad (6-1)$$

где  $D_{1550\min}$ ,  $D_{1550\max}$ ,  $S_{1550\min}$  и  $S_{1550\max}$  перечислены в таблице 5 раздела 8.

## 7 Атрибуты кабеля

Геометрические и оптические характеристики волокон, приведенные в разделе 6, практически не изменяются в зависимости от процесса укладки кабеля, поэтому в данном разделе приведены рекомендации, относящиеся, главным образом, к характеристикам передачи проложенных строительных длин.

Очень важны условия окружающей среды и условия тестирования; их описание приведено в руководящих указаниях по методам тестирования.

### 7.1 Коэффициент затухания

Коэффициент затухания задается максимальной величиной для волны одной или более длины в диапазоне 1530–1625 нм. Величина коэффициента затухания волоконно-оптического кабеля не должна превышать величин, приведенных в разделе 8.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Наименьшие значения зависят от процесса изготовления, состава и конструкции волокна и конструкции кабеля.

В области 1550 нм были получены значения 0,15–0,19 дБ/км.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Коэффициент затухания может быть рассчитан по спектру длин волн на основе измерений на нескольких (трех-четырёх) прогнозируемых длинах волны. Эта процедура описана в п. 5.4.4. [ITU-T G.650.1], в Дополнении III [ITU-T G.650.1] приведен пример для волокна МСЭ-Т G.652.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Для применения в подводных системах с оптическими усилителями с дистанционной накачкой, которые описаны в [b-ITU-T G.973], могут потребоваться другие коэффициенты затухания в области длины волны накачки.

## 7.2 Коэффициент поляризационной модовой дисперсии

PMD волокна в кабеле определяется статистически, а не для каждого отдельного волокна. Это требование относится только к параметрам линии, рассчитанным по информации о кабеле. Метрики статистической спецификации приведены ниже. Методы расчетов представлены в [b-IEC/TR 61282-3] и кратко изложены в Дополнении IV [ITU-T G.650.2].

Производитель должен указывать  $PMD_Q$  – проектное значение PMD линии, которое является верхней статистической границей коэффициента PMD составных волоконно-оптических кабелей в пределах определенной возможной линии из  $M$  кабельных секций. Верхняя граница определяется в значениях уровня малой вероятности  $Q$ , которая представляет собой вероятность того, что значение коэффициента PMD составного кабеля превысит величину  $PMD_Q$ . Для значений  $M$  и  $Q$ , приведенных в разделе 8, величина  $PMD_Q$  не должна превышать максимального значения коэффициента PMD, определенного в разделе 8.

Измерения и спецификации свободных волокон необходимы, но недостаточны для обеспечения спецификации волокна, уложенного в кабеле. Максимальное проектное значение линии, указанное для свободного волокна, должно быть меньше или равно значению, определенному для волокон в кабеле. Отношение значений PMD свободных волокон к значениям для волокон в кабеле зависит от особенностей конструкции и обработки кабеля, а также условий связи мод в свободных волокнах. В [ITU-T G.650.2] рекомендуется при проведении измерений PMD свободных волокон обеспечивать расположение волокон при слабой связи мод, что требует намотки с небольшим натяжением на катушке большого диаметра.

Пределы распределения значений коэффициента PMD можно считать почти равными пределам статистического изменения дифференциальной групповой задержки (ДГЗ), которая изменяется случайным образом с изменением времени и длины волны. В случае если для волоконно-оптического кабеля определено распределение значений коэффициента PMD, можно определить эквивалентные пределы изменения ДГЗ. Метрики и значения пределов распределения ДГЗ в линии приводятся в Дополнении I.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения  $PMD_Q$  должны рассчитываться для различных типов кабелей, и обычно они вычисляются с использованием выборочных значений PMD. Выборки осуществляются по данным для кабелей аналогичной конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Спецификация  $PMD_Q$  не должна применяться к коротким кабелям, таким как кабельные перемычки, кабели в помещениях и абонентские отводы.

## 8 Таблицы рекомендованных значений

В таблицах 1–5 сведены рекомендованные значения для волокон нескольких категорий, которые отвечают целям настоящей Рекомендации. Эти категории в значительной степени отличаются по требованиям к MFD, коэффициенту хроматической дисперсии и PMD. Информация о расстояниях передачи и скоростях передачи данных, соответствующих требованиям к PMD, приведена в Дополнении I.

Таблица 1 "Атрибуты MCЭ-Т G.654 категории А" определяет базовую категорию одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной отсечкой. Эта категория пригодна для систем, определенных в [b-ITU-T G.691], [b-ITU-T G.692], [b-ITU-T G.957] и [b-ITU-T G.977] в области длины волн 1550 нм.

Таблица 2 "Атрибуты MCЭ-Т G.654 категории В" пригодна для систем, описанных в [b-ITU-T G.691], [b-ITU-T G.692], [b-ITU-T G.957], [b-ITU-T G.977] и [b-ITU-T G.959.1], для приложений передачи на большие расстояния в области длины волн 1550 нм. Эта категория может применяться к системам передачи WDM на большие расстояния и с большей пропускной способностью, например к подводным системам без повторителей, в которых используются оптические усилители с дистанционной накачкой, описанные в [b-ITU-T G.973], и к подводным системам с оптическими усилителями, описанными в [b-ITU-T G.977].

Таблица 3 "Атрибуты MCЭ-Т G.654 категории С" аналогична таблице "Атрибуты MCЭ-Т G.654 категории А", но содержит сниженное требование к PMD для поддержки приложений по передаче данных с более высокой скоростью и на большие расстояния согласно [b-ITU-T G.959.1].

Таблица 4 "Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории D" аналогична таблице "Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории В", но содержит измененную спецификацию потерь на макроизгибе, а также меньшую величину затухания и увеличенный MFD в целях улучшения характеристик отношения оптического сигнала к шуму (OSNR). Эта категория рекомендуется для подводных систем с более высокой скоростью передачи данных, которые описаны в [b-ITU-T G.973], [b-ITU-T G.973.1], [b-ITU-T G.973.2] и [b-ITU-T G.977].

Таблица 5 "Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории E" аналогична таблице "Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории В", но содержит спецификацию более низких потерь на макроизгибе, эквивалентную волокнам МСЭ-Т G.652.D, более строгий диапазон номинального MFD и минимальной/максимальной хроматической дисперсии для диапазона длин волн 1530–1625 нм для развертывания в качестве наземных кабелей с улучшенными характеристиками OSNR в целях поддержки когерентных систем с более высокой скоростью передачи, например 100 Гбит/с.

**Таблица 1 – Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории А**

<b>Атрибуты волокна</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Элемент</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Диаметр модового поля	Длина волны	1 550	нм
	Диапазон номинальных значений	9,5–10,5	мкм
	Допуск	±0,7	мкм
Диаметр оболочки	Номинальное значение	125	мкм
	Допуск	±1	мкм
Погрешность концентричности сердцевины	Максимальное значение	0,8	мкм
Некруглость оболочки	Максимальное значение	2,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимальное значение	1 530	нм
Потери на макроизгибе	Радиус	30	мм
	Число витков	100	
	Максимальное значение при 1625 нм	0,50	дБ
Предел прочности	Минимальное значение	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии	$D_{1550\max}$	20	пс(нм·м)
	$S_{1550\max}$	0,070	пс(нм <sup>2</sup> ·км)
Коэффициент PMD свободного волокна	Максимальное значение	(Примечание 2)	
<b>Атрибуты кабеля</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Элемент</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Коэффициент затухания (Примечание 1)	Максимальное значение при 1550 нм	0,22	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечание 2)	$M$	20	кабели
	$Q$	0,01	%
	Максимальное значение PMD <sub>Q</sub>	0,5	пс/√км
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в настоящей таблице, не должны применяться к коротким кабелям, таким как кабельные перемычки. Например, в [b-IEC 60794-2-11] определен коэффициент затухания кабеля в помещении, равный 1,0 дБ/км или менее.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В соответствии с п. 7.2 указывается максимальное значение PMD<sub>Q</sub> свободного волокна в целях поддержки основного требования к PMD<sub>Q</sub> кабеля.</p>			

**Таблица 2 – Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории В**

<b>Атрибуты волокна</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Диаметр модового поля	Длина волны	1 550	нм
	Диапазон номинальных значений	9,5–13,0	мкм
	Допуск	±0,7	мкм
Диаметр оболочки	Номинальное значение	125	мкм
	Допуск	±1	мкм
Погрешность концентричности сердцевин	Максимальное значение	0,8	мкм
Некруглость оболочки	Максимальное значение	2,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимальное значение	1 530	нм
Потери на макроизгибе	Радиус	30	мм
	Число витков	100	
	Максимальное значение при 1625 нм	0,50	дБ
Предел прочности	Минимальное значение	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии	$D_{1550\max}$	22	пс(нм·м)
	$S_{1550\max}$	0,070	пс(нм <sup>2</sup> ·км)
Коэффициент PMD свободного волокна	Максимальное значение	(Примечание 2)	
<b>Атрибуты кабеля</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Коэффициент затухания (Примечание 1)	Максимальное значение при 1550 нм	0,22	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечание 2)	$M$	20	кабели
	$Q$	0,01	%
	Максимальное значение $PMD_Q$	0,20	пс/√км
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в настоящей таблице, не должны применяться к коротким кабелям, таким как кабельные перемычки. Например, в [b-IEC 60794-2-11] определен коэффициент затухания кабеля в помещении, равный 1,0 дБ/км или менее.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В соответствии с п. 7.2 указывается максимальное значение <math>PMD_Q</math> свободного волокна в целях поддержки основного требования к <math>PMD_Q</math> кабеля.</p>			

**Таблица 3 – Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории С**

<b>Атрибуты волокна</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Диаметр модового поля	Длина волны	1 550	нм
	Диапазон номинальных значений	9,5–10,5	мкм
	Допуск	±0,7	мкм
Диаметр оболочки	Номинальное значение	125	мкм
	Допуск	±1	мкм
Погрешность concentричности сердцевин	Максимальное значение	0,8	мкм
Некруглость оболочки	Максимальное значение	2,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимальное значение	1 530	нм
Потери на макроизгибе	Радиус	30	мм
	Число витков	100	
	Максимальное значение при 1625 нм	0,50	дБ
Предел прочности	Минимальное значение	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии	$D_{1550\max}$	22	пс(нм·м)
	$S_{1550\max}$	0,070	пс(нм <sup>2</sup> ·км)
Коэффициент PMD свободного волокна	Максимальное значение	(Примечание 2)	
<b>Атрибуты кабеля</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Коэффициент затухания (Примечание 1)	Максимальное значение при 1550 нм	0,22	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечание 2)	$M$	20	кабели
	$Q$	0,01	%
	Максимальное значение $PMD_Q$	0,20	пс/√км
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в настоящей таблице, не должны применяться к коротким кабелям, таким как кабельные переключки. Например, в [b-IEC 60794-2-11] определен коэффициент затухания кабеля в помещении, равный 1,0 дБ/км или менее.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В соответствии с п. 7.2 указывается максимальное значение <math>PMD_Q</math> свободного волокна в целях поддержки основного требования к <math>PMD_Q</math> кабеля.</p>			

**Таблица 4 – Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории D**

<b>Атрибуты волокна</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Диаметр модового поля	Длина волны	1 550	нм
	Диапазон номинальных значений	11,5–15,0	мкм
	Допуск	±0,7	мкм
Диаметр оболочки	Номинальное значение	125	мкм
	Допуск	±1	мкм
Погрешность concentричности сердцевин	Максимальное значение	0,8	мкм
Некруглость оболочки	Максимальное значение	2,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимальное значение	1 530	нм
Потери на макроизгибе (Примечание 4)	Радиус	Подлежит определению	мм
	Число витков	Подлежит определению	
	Максимальное значение при 1550 нм	Подлежит определению	дБ
	Радиус	30	мм
	Число витков	100	
	Максимальное значение при 1625 нм	2,0	дБ
Предел прочности (Примечание 2)	Минимальное значение	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии	$D_{1550\max}$	23	пс(нм·м)
	$S_{1550\max}$	0,070	пс(нм <sup>2</sup> ·км)
Коэффициент PMD свободного волокна	Максимальное значение	(Примечание 3)	
<b>Атрибуты кабеля</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Коэффициент затухания (Примечание 1)	Максимальное значение при 1550 нм	0,22	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечание 3)	$M$	20	кабели
	$Q$	0,01	%
	Максимальное значение $PMD_Q$	0,20	пс/√км
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в настоящей таблице, не должны применяться к коротким кабелям, таким как кабельные перемычки. Например, в [b-IEC 60794-2-11] определен коэффициент затухания кабеля в помещении, равный 1,0 дБ/км или менее.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2 – В зависимости от применимых требований к системе может рассматриваться более высокий предел прочности.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В соответствии с п. 7.2 указывается максимальное значение <math>PMD_Q</math> свободного волокна в целях поддержки основного требования к <math>PMD_Q</math> кабеля.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 4 – В некоторых системах полезной может быть спецификация потерь на макроизгибе при длине волны 1550 нм. Значения спецификации подлежат определению, включая радиус изгиба и число витков.</p>			



**Таблица 5 – Атрибуты МСЭ-Т G.654 категории E**

<b>Атрибуты волокна</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Диаметр модового поля	Длина волны	1 550	нм
	Диапазон номинальных значений	11,5–12,5	мкм
	Допуск	±0,7	мкм
Диаметр оболочки	Номинальное значение	125	мкм
	Допуск	±1	мкм
Погрешность concentричности сердцевин	Максимальное значение	0,8	мкм
Некруглость оболочки	Максимальное значение	2,0	%
Кабельная длина волны отсечки	Максимальное значение	1 530	нм
Потери на макроизгибе	Радиус	30	мм
	Число витков	100	
	Максимальное значение при 1625 нм	0,1	дБ
Предел прочности	Минимальное значение	0,69	ГПа
Параметр хроматической дисперсии (Примечание 1)	$D_{1\ 550\max}$	23	пс(нм·м)
	$D_{1\ 550\min}$	17	пс(нм·м)
	$S_{1\ 550\max}$	0,070	пс(нм <sup>2</sup> ·км)
	$S_{1\ 550\min}$	0,050	пс(нм <sup>2</sup> ·км)
Коэффициент PMD свободного волокна	Максимальное значение	(Примечание 3)	
<b>Атрибуты кабеля</b>			
<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>	<b>Значение</b>	<b>Единица</b>
Коэффициент затухания (Примечание 2)	Максимальное значение при 1550 нм	0,23	дБ/км
Коэффициент PMD (Примечание 3)	$M$	20	кабели
	$Q$	0,01	%
	Максимальное значение $PMD_Q$	0,20	пс/√км
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для связывания значений при 1530 нм со значениями при 1625 нм коэффициент хроматической дисперсии <math>D(\lambda)</math> при заданной длине волны <math>\lambda</math> может быть определен с помощью уравнения (6-1).</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Значения коэффициента затухания, перечисленные в настоящей таблице, не должны применяться к коротким кабелям, таким как кабельные перемычки. Например, в [b-IEC 60794-2-11] определен коэффициент затухания кабеля в помещении, равный 1,0 дБ/км или менее.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В соответствии с п. 7.2 указывается максимальное значение <math>PMD_Q</math> свободного волокна в целях поддержки основного требования к <math>PMD_Q</math> кабеля.</p>			

## Дополнение I

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

(Данное Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

Для оценки ограничений передачи, порождаемых свойствами волокна, включая хроматическую дисперсию, PMD, затухание и некруглость, можно рассматривать проектирование системы по "худшему случаю" и "статистическое" проектирование системы, которые описаны в разделах 9 и 10 [b-ITU-T G-Sup.39], соответственно. Проектирование по "худшему случаю" – это детерминированная методика, при которой используются минимальные и максимальные значения, и ее применение целесообразно в случае системы передачи с небольшим числом компонентов и составными волоконно-оптическими кабелями строительной длины. С другой стороны, в случае составной линии связи, объединяющей большое число сращенных волоконно-оптических кабелей строительной длины, в параметрах передачи составной линии связи должны учитываться не только характеристики детерминированных атрибутов отдельных длин кабеля, но и статистические данные объединения. Требования к строительным длинам приведены в разделах 6 и 7.

Характеристики передачи волоконно-оптических кабелей строительной длины будут иметь определенное распределение вероятности, которое может быть принято во внимание, если необходимо получить наиболее экономичные проекты. Настоящее Дополнение следует изучать, помня о статистической природе различных параметров.

На значения атрибутов линии связи, такие как сквозное затухание, хроматическая дисперсия, PMD или нелинейность, влияют факторы, не связанные с параметрами волоконно-оптических кабелей, например сращения, пассивные компоненты и монтаж. В настоящей Рекомендации эти факторы не определяются. Для оценки статистических значений атрибутов линии связи, относящихся к затуханию и хроматической дисперсии, в п. I.4 приведены типичные значения волоконно-оптических линий. Методы оценки параметров линии связи, необходимых для проектирования системы, основаны на измерениях, моделировании или других соображениях.

#### I.1 Затухание

Среднее затухание  $A$  в линии связи определяется уравнением:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_{\text{con}} y, \quad (\text{I-1})$$

где:

- $\alpha$  : средний коэффициент затухания оптических кабелей в линии;
- $\alpha_s$  : средние потери в сращке;
- $x$  : число сращков в линии;
- $\alpha_{\text{con}}$  : средние потери в линейных соединителях;
- $y$  : число линейных соединителей в линии (если они имеются);
- $L$  : длина линии.

Следует назначить подходящий запас для изменения конфигураций кабеля в будущем (дополнительные сращения, дополнительные длины кабеля, явления старения, колебания температуры и т. д.). Уравнение I-1 не включает потери в соединителях оборудования. Типичные значения, приведенные в п. I.5, относятся к коэффициенту затухания волоконно-оптической линии связи. В запасе по затуханию, используемом при проектировании фактической системы, должны учитываться статистические изменения этих параметров.

#### I.2 Хроматическая дисперсия

Хроматическая дисперсия, выраженная в пикосекундах на нанометр (пс/нм), может быть рассчитана по коэффициентам хроматической дисперсии строительных длин, предполагая линейную зависимость от длины и корректно учитывая знаки коэффициентов (см. п. 6.10).

При использовании этих оптических волокон для передачи при длине волны в области 1550 нм часто используются некоторые формы компенсации хроматической дисперсии. В этом случае для целей проектирования используется средняя хроматическая дисперсия линии. Измеренную дисперсию в окне 1550 нм можно описать как линейную функцию длины волны внутри окна 1550 нм. Эта функция описывается как типичный коэффициент хроматической дисперсии и коэффициент наклона дисперсии при длине волны 1550 нм.

Типичные значения коэффициента хроматической дисперсии  $D_{1550}$  и коэффициента наклона хроматической дисперсии  $S_{1550}$  при длине волны 1550 нм приведены в п. I.5. Эти значения вместе с длиной линии  $L_{Link}$  могут использоваться для вычисления типичной хроматической дисперсии с целью применения при проектировании оптической линии.

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

### I.3 Дифференциальная групповая задержка

ДГЗ – это разница во времени прибытия двух режимов поляризации при конкретной длине волны и времени. PMD по сути имеет статистическую природу, а ДГЗ колеблется с произвольной динамикой в любых продольных позициях волоконных кабелей и, следовательно, методика статистического проектирования линии связи имеет важное значение для определения влияния PMD при рассмотрении линии связи, которая имеет конкретную длину (или составлена из секций) волоконно-оптического кабеля. Для линии с определенным коэффициентом PMD распределение ДГЗ линии изменяется случайным образом в зависимости от времени и длины волны аналогично распределению Максвелла с единственным параметром, который равен произведению коэффициента PMD линии и квадратного корня из длины этой линии. Ухудшение характеристик системы, вызванное PMD в определенное время и на конкретной длине волны, зависит от ДГЗ для этого времени и длины волны. Вследствие этого, были разработаны средства установления практических пределов распределения ДГЗ, поскольку это распределение связано с распределением коэффициента PMD волоконного кабеля, пределы для которого были разработаны и описаны в стандарте [b-IEC/TR 61282-3], а также кратко изложены в Дополнении IV [ITU-T G.650.2]. Ниже приведены метрики ограничений распределения ДГЗ.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Определение вкладов других компонентов, кроме волоконно-оптического кабеля, выходит за рамки настоящей Рекомендации, но рассматривается в стандарте IEC 61282-3.

Эталонная длина линии  $L_{Ref}$ : максимальная длина линии, к которой применяются максимальная ДГЗ и вероятность. Для более длинных линий максимальное значение ДГЗ умножается на квадратный корень из отношения фактической длины к эталонной длине.

Типичная максимальная длина кабеля  $L_{Cab}$ : максимальные значения обеспечиваются, когда типичные длины отдельных составных кабелей или длины кабелей, которые измерены при определении распределения коэффициента PMD, меньше этого значения.

Максимальное значение ДГЗ,  $DGD_{max}$ : значение ДГЗ, которое может использоваться при проектировании оптической системы.

Максимальная вероятность  $P_F$ : вероятность того, что фактическое значение ДГЗ превышает  $DGD_{max}$ .

### I.4 Таблицы общих типичных значений

Значения в таблицах I.1 и I.2 являются репрезентативными для составных волоконно-оптических линий для подводных и наземных применений согласно пп. I.1 и I.3, соответственно. Значения предполагаемой максимальной ДГЗ, вносимой волокном, приведенные в таблице I.3, которые связаны с описанием в п. I.3, предназначены только для руководства в отношении требований к другим оптическим элементам, которые могут присутствовать в линии.

**Таблица I.1 – Репрезентативные значения составной волоконно-оптической линии для подводного применения**

Атрибут	Элемент	Значение
Коэффициент затухания	Длина волны	Типичное значение для линии (Примечание)
	1550 нм	0,25 дБ/км
	1625 нм	Подлежит определению
Типичные параметры хроматической дисперсии	$D_{1550}$ $S_{1550}$	Подлежит определению Подлежит определению
ПРИМЕЧАНИЕ. – Типичное значение для линии соответствует коэффициенту затухания линии, используемому в [b-ITU-T G.957] и [b-ITU-T G.691].		

**Таблица I.2 – Репрезентативные значения составной волоконно-оптической линии для наземного применения**

Атрибут	Элемент	Значение
Коэффициент затухания	Длина волны	Типичное значение для линии (Примечание)
	1550 нм	Подлежит определению
	1625 нм	Подлежит определению
Типичные параметры хроматической дисперсии	$D_{1550}$ $S_{1550}$	Подлежит определению Подлежит определению
ПРИМЕЧАНИЕ. – Типичное значение для линии соответствует коэффициенту затухания линии, используемому в [b-ITU-T G.957] и [b-ITU-T G.691].		

**Таблица I.3 – Дифференциальная групповая задержка**

Максимальная PMD <sub>Q</sub> (пс/√км)	Длина линии (км)	Предполагаемая максимальная ДГЗ, вносимая волокном (пс)	Скорость передачи 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	3000	19,0	10 Гбит/с
	80	7,0	40 Гбит/с
0,10	>4000	12,0	10 Гбит/с
	400	5,0	40 Гбит/с
ПРИМЕЧАНИЕ. – Это значение также применимо к системам 10-гигабитного Ethernet.			

ПРИМЕЧАНИЕ. – Длина кабельной секции составляет 10 км, кроме линии с 0,10 пс/√км/>4000 км, где, если она равна 25 км, уровень вероятности равен  $6,5 \times 10^{-8}$ .

### I.5 Коэффициент нелинейности

Хроматическая дисперсия связана с коэффициентом нелинейности  $n_2/A_{\text{eff}}$ , где  $A_{\text{eff}}$  обозначает эффективную зону, в отношении ухудшения характеристик системы, вносимого нелинейными оптическими эффектами (см. [b-ITU-T G.663] и [ITU-T G.650.2]). Типичные значения зависят от реализации. Методы измерения коэффициента нелинейности изучаются.

## 1.6 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, ограниченного числа намотанных волокон и кабелей, случайность является ограниченной, и для получения приемлемых запасов предпочтительно использовать методику проектирования "по худшему случаю".

Общая методика статистического проектирования системы описана в [b-ITU-T G-Sup.39], а ниже приводится один из способов определения статистического верхнего предела для одного из параметров волокна или кабеля.

Расчет начинается с установления статистического распределения. Пусть  $x_i$  и  $L_i$  – параметр волокна на единицу длины и длину кабеля, соответственно, волокна в  $i$ -том кабеле в линии связи, составленной из  $N$  кабелей. В случае, если глобальный параметр волокна всей линии связи  $x_N$  пропорционален длине,  $x_N$  составляет:

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

Если предполагается, что длины всех кабельных секций меньше некоторого общего значения  $L_{\text{Cab}}$ , и одновременно с этим уменьшается число предполагаемых кабельных секций до значения  $M = L_{\text{Link}}/L_c$ , то для линии, состоящей из кабелей равной длины  $L_i = L_c$ , уравнение (I-3) принимает следующий вид:

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

Отклонения параметра составной линии  $x_M$  будут меньше, чем отклонения в отдельных кабельных секциях  $x_i$ , в силу усреднения сращенных волокон.

После установления статистического распределения параметра волокна может быть использован метод Монте-Карло для определения плотности вероятности  $f_{\text{Link}}$  параметра волокна составной линии, не делая допущений о его форме. Этот метод моделирует процесс построения линий связи путем повторяющейся выборки совокупности измеренных значений параметров волокна.

Параметр волокна измеряется на достаточно большом числе сегментов, с тем чтобы определить основное распределение. Эти данные используются далее в расчетах параметра волокна для одного пролета составной линии.

Расчет выполняется путем случайного выбора  $M$  значений из измеренных значений параметра волокна и их дальнейшего суммирования согласно уравнению (I-4). Рассчитанное затухание составной линии включается в таблицу или гистограмму значений, полученных из других случайных выборок. Этот процесс повторяется, до тех пор пока не будет рассчитано достаточное число значений составного затухания для построения гистограммы высокой плотности составного распределения параметра волокна. Если диаграмма используется напрямую без какого-либо дополнительного определения характеристик, например гауссовой аппроксимации, число выборок должно быть не менее  $10^4$ .

Согласно центральной предельной теореме гистограмма статистических значений параметра волокна в составной линии в кабеле будет стремиться принять форму распределений, которые могут быть описаны минимально двумя параметрами. Следовательно, возможно аппроксимировать эту гистограмму до параметрического распределения, которое может быть экстраполировано до уровней вероятности, лежащих ниже уровней, предполагаемых размером выборки. Два аспекта распределения будут неизменно представляться двумя параметрами – центральным значением и колебаниями относительно этого центрального значения.

Для получения уровней вероятности  $Q = 10^{-3}$  с использованием полностью численного метода потребуется моделирование по методу Монте-Карло не менее  $10^4$  выборок. После того как это будет выполнено, возможна интерполяция затухания и хроматической дисперсии из связанной интегральной функции плотности вероятности.

Следует заметить, что применимость использованной в данном примере методики подлежит дальнейшему изучению.

## 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.696.1] Рекомендация МСЭ-Т G.696.1 (2010 г.), *Внутридоменные приложения плотного волнового уплотнения (DWDM), совместимые в продольном направлении*.
- [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.973] Recommendation ITU-T G.973 (2016), *Characteristics of repeaterless optical fibre submarine cable systems*.
- [b-ITU-T G.973.1] Recommendation ITU-T G.973.1 (2009), *Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fibre submarine cable systems*.
- [b-ITU-T G.973.2] Recommendation ITU-T G.973.2 (2011), *Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces for repeaterless optical fibre submarine cable systems*.
- [b-ITU-T G.977] Recommendation ITU-T G.977 (2015), *Characteristics of optically amplified optical fibre submarine cable systems*.
- [b-ITU-T G-Sup.39] Supplement ITU-T G-Sup.39 (2016), *Optical system design and engineering considerations*.
- [b-IEC 60794-2-11] IEC 60794-2-11:2012, *Optical fibre cables – Part 2-11: Indoor optical fibre 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 link 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
<b>Серия G</b>	<b>Системы и среда передачи, цифровые системы и сети</b>
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 межсетевых протоколов, сети последующих поколений, интернет вещей и "умные" города
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи