

Международный союз электросвязи

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

G.650.1

(07/2010)

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

Характеристики среды передачи и оптических
систем – Волоконно-оптические кабели

**Определения и методы тестирования
линейных детерминированных атрибутов
одномодового волокна и кабеля**

Рекомендация МСЭ-Т G.650.1

ITU-T

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 СЕТЕЙ – 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.650.1

Определения и методы тестирования линейных детерминированных атрибутов одномодового волокна и кабеля

Резюме

Рекомендация МСЭ-Т G.650.1 содержит определения линейных детерминированных параметров одномодового оптического волокна и кабелей. В ней содержатся также как эталонные, так и альтернативные методы тестирования для описания этих параметров.

Эти методы тестирования применимы главным образом для заводских измерений линейных детерминированных атрибутов одномодового волокна и кабелей. Некоторые из методов тестирования могут также использоваться для определения дискретных оптических компонентов..

Предыстория

- 1993 год Определения и методы тестирования были исключены из Рекомендаций по одномодовому волокну, таких как Рекомендация МСЭ-Т G.652, и использовались для создания первоначальной версии Рекомендации МСЭ-Т G.650.
- 1997 год Во второй версии Рекомендации МСЭ-Т G.650 добавлены определения и методы тестирования поляризационной модовой дисперсии и Дополнения I, II и III. Также добавлено улучшенное определение длины волны отсечки (теперь это раздел 5.3.1.3.4).
- 2000 год В третьей версии приведены эталонные и альтернативные методы тестирования для поляризационной модовой дисперсии, изменены определения и методы тестирования погрешности концентричности сердцевины (разделы 3.4 и 5.2) и добавлены раздел 5.1.4 и Дополнения IV, V и VI.
- 2002 год В целях облегчения технического обслуживания Рекомендация МСЭ-Т G.650 разделена на Рекомендации меньшего объема. Рекомендация МСЭ-Т G.650.2 содержит определения и методы тестирования статистических и нелинейных характеристик одномодового волокна и кабеля.
- 2004 год Во второй версии Рекомендации МСЭ-Т G.650.1 добавлены третий альтернативный метод тестирования "Моделирование спектрального затухания" (раздел 5.4.4) и новое Дополнение III "Пример матричной модели". Этот материал был перенесен из Рекомендаций по одномодовому волокну в настоящую Рекомендацию G.650.1. Кроме того, добавлены процедуры согласования хроматической дисперсии (Приложение A).
- 2010 год В третьей версии Рекомендации МСЭ-Т G.650.1 добавлен метод тестирования под названием "Методы тестирования в отношении потерь на макроизгибе" (раздел 5.6). Из раздела 5.3 исключена длина волны отсечки кабельной перемычки. В метод проверки длины волны отсечки (раздел 5.3.1.3.2) добавлено дополнительное описание. Внесены поправки в уравнение (5-1). Добавлено подробное описание метода проверочного тестирования (раздел 5.7). Обновлено Дополнение II.

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 в целях 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 возможности взаимодействия или возможности применения), и соблюдение положений данной Рекомендации достигается при выполнении всех этих обязательных 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 предполагает, 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 обоснованности подтверждения или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности независимо от того, отстаиваются ли такие права членами МСЭ или другими сторонами, не относящимися к процессу разработки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещения 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 2019

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	Термины и определения.....	2
3.1	Общие определения.....	2
3.2	Механические характеристики	2
3.3	Характеристики модового поля	3
3.4	Геометрические характеристики стекла	4
3.5	Определения хроматической дисперсии.....	4
3.6	Другие характеристики.....	5
4	Сокращения и акронимы.....	6
5	Методы тестирования.....	7
5.1	Методы тестирования в отношении диаметра модового поля	7
5.2	Методы тестирования в отношении диаметра оболочки, погрешности концентричности сердцевины и некруглости оболочки ...	15
5.3	Методы измерения длины волны отсечки	25
5.4	Методы изменения затухания	33
5.5	Методы тестирования для определения хроматической дисперсии	45
5.6	Методы измерения потерь на макроизгибах	53
5.7	Методы проверочных испытаний	55
Приложение А. Аппроксимация хроматической дисперсии		60
A.1	Общие положения	60
A.2	Определение уравнений и коэффициентов аппроксимации	60
A.3	Процедура аппроксимации.....	61
Дополнение I. Методы интерполяции длины волны отсечки		62
I.1	Метод ограниченной отрицательной погрешности	62
I.2	Метод наименьших квадратов	64
Дополнение II. Метод тестирования для измерения однородности хроматической дисперсии на основе метода обратного рассеяния.....		66
II.1	Общие положения	66
II.2	Испытательная аппаратура	66
II.3	Процедура измерения.....	67
II.4	Представление результатов	70
Дополнение III. Пример матричной модели		71
Библиография.....		73

Рекомендация МСЭ-Т G.650.1

Определения и методы тестирования линейных детерминированных атрибутов одномодового волокна и кабеля

1 Сфера применения

В настоящей Рекомендации содержатся определения и методы тестирования, применимые главным образом для заводских измерений линейных детерминированных атрибутов одномодовых оптических волокон и кабелей, описываемых в Рекомендациях [ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.654], [ITU-T G.655], [ITU-T G.656] и [ITU-T G.657]. Эти определения и методы тестирования в общем случае не подходят для многомодового волокна, такого как описывается в Рекомендации [ITU-T G.651.1]. Некоторые из методов тестирования, когда это указывается, могут также использоваться для определения характеристик таких дискретных оптических компонентов, которые описываются в Рекомендации [ITU-T G.671]. В Рекомендации [ITU-T G.650.2] содержатся определения и методы тестирования для статистических и нелинейных атрибутов.

2 Справочные документы

Нижеследующие 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 рассмотреть 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.650.2] Рекомендация МСЭ-Т G.650.2 (2007 год), *Определения и методы тестирования статистических и нелинейных взаимосвязанных атрибутов одномодового волокна и кабеля.*
- [ITU-T G.651.1] Рекомендация МСЭ-Т G.651.1 (2007 год), *Характеристики многомодового градиентного волоконно-оптического кабеля 50/125 мкм для оптической сети доступа.*
- ITU-T G.652] Рекомендация МСЭ-Т G.652 (2009 год), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.*
- [ITU-T G.653] Рекомендация МСЭ-Т G.653 (2010 год), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией.*
- [ITU-T G.654] Рекомендация МСЭ-Т G.654 (2010 год), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией и отсечкой.*
- [ITU-T G.655] Рекомендация МСЭ-Т G.655 (2009 год), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля с ненулевой смещенной дисперсией.*
- [ITU-T G.656] Рекомендация МСЭ-Т G.656 (2010 год), *Характеристики волокна и кабеля с ненулевой дисперсией для широкополосного оптического транспортирования.*
- [ITU-T G.657] Рекомендация МСЭ-Т G.657 (2009 год), *Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на макроизгибе, для использования в сетях доступа.*

- [ITU-T G.671] Рекомендация МСЭ-Т G.671 (2002 год), *Характеристики передачи оптических компонентов и подсистем.*
- [IEC 60793-1-30] IEC 60793-1-30 (2010), *Optical fibres – Part 1-30: Measurement methods and test procedures – Fibre proof test.*
- [IEC 60793-1-42] IEC 60793-1-42 (2007), *Optical fibres – Part 1-42: Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion. Annex C, Differential phase shift test method.*
- [IEC 60793-1-44] IEC 60793-1-44 (2001), *Optical fibres – Part 1-44: Measurement methods and test procedures – Cut-off wavelength.*
- [IEC 60793-1-45] IEC 60793-1-45 (2001), *Optical fibres – Part 1-45: Measurement methods and test procedures – Mode field diameter.*
- [IEC 60793-1-46] IEC 60793-1-46 (2001), *Optical fibres – Part 1-46: Measurement methods and test procedures – Monitoring of changes in optical transmittance.*
- [IEC 60793-1-47] IEC 60793-1-47 (2009), *Optical fibres – Part 1-47: Measurement methods and test procedures – Macrobending loss.*
- [IEC 61745] IEC 61745 (1998), *End-face image analysis procedure for the calibration of optical fibre geometry test sets.*
- [IEC 61746-1] IEC 61746-1 (2009), *Calibration of optical time-domain reflectometers (OTDR) – Part 1: OTDR for single mode fibres.*

3 Термины и определения

В настоящей Рекомендации определяются следующие термины.

3.1 Общие определения

3.1.1 профиль показателя преломления (refractive index profile): Показатель преломления вдоль диаметра волокна.

3.1.2 эталонный метод тестирования (reference test method (RTM)): Метод тестирования, предусматривающий измерение характеристик заданного класса оптических волокон или волоконно-оптических кабелей в строгом соответствии с определениями этих характеристик и дающий точные, воспроизводимые и пригодные для практического использования результаты.

3.1.3 альтернативный метод тестирования (alternative test method (ATM)): Метод тестирования, предусматривающий измерение характеристик заданного класса оптических волокон или волоконно-оптических кабелей способом, соответствующим определению этих характеристик, и дающий результаты, воспроизводимые, сопоставимые с результатами применения эталонного метода тестирования и пригодные для практического использования.

3.1.4 фильтр вывода мод оболочки (cladding mode stripper): Устройство, используемое для преобразования мод оболочки в моды излучения.

3.1.5 фильтр мод (mode filter): Устройство, предназначенное для приема или отклонения определенной моды или мод.

3.2 Механические характеристики

3.2.1 первичное покрытие (primary coating): Один или несколько слоев защитного покрытия, нанесенного на оболочку волокна во время или после процесса вытяжки для сохранения целостности поверхности оболочки и обеспечения минимально необходимой защиты (например, защитное покрытие толщиной 250 мкм).

3.2.2 вторичное покрытие (secondary coating): Один или несколько слоев покрытия, нанесенного поверх одного или нескольких слоев первичного покрытия волокна для обеспечения дополнительной необходимой защиты или объединения волокон в определенную структуру (например, буферное покрытие толщиной 900 мкм, "плотная рубашка" или ленточное покрытие).

3.2.3 проверочный уровень (prooftest level): Определенное значение растягивающего напряжения или натяжения, которому подвергается волокно по всей длине в течение заданного короткого промежутка времени. Обычно это делается последовательно вдоль длины волокна.

3.2.4 параметр коррозии под напряжением (stress corrosion parameter): Параметр (восприимчивости к) коррозии под напряжением n представляет собой безразмерный коэффициент, эмпирически связанный с зависимостью роста трещины от приложенного напряжения. Он зависит от температуры окружающей среды, влажности и других внешних условий.

Может быть указано как статическое, так и динамическое значение для этого параметра.

Статическое значение n_s представляет собой обратную величину угла наклона кривой статической усталости на графике (в двойном логарифмическом масштабе) зависимости времени наработки до отказа от приложенного напряжения.

Динамическое значение составляет n_d , где $1/(n_d + 1)$ – это наклон кривой динамической усталости на графике (в двойном логарифмическом масштабе) зависимости напряжения, приводящего к отказу, от величины приложенного напряжения.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Значение n не обязательно должно быть целым.

3.3 Характеристики модового поля

3.3.1 модовое поле (mode field): Модовое поле – это распределение одномодового поля моды LP₀₁, образующее пространственное распределение интенсивности поля в волокне.

3.3.2 диаметр модового поля (mode field diameter): Диаметр модового поля (MFD) $2w$ представляет собой меру поперечной области интенсивности электромагнитного поля моды в сечении волокна и определяется по распределению интенсивности дальнего поля $F^2(\theta)$, где θ – угол дальнего поля, с использованием следующего уравнения:

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[\frac{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3-1)$$

3.3.3 центр модового поля (mode field centre): Центр модового поля представляет собой положение центра тяжести пространственного распределения интенсивности поля в волокне.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Центр тяжести расположен в точке r_c и является нормированным интегралом вектора положения r , взвешенного по интенсивности:

$$r_c = \frac{\iint_{Area} r I(r) dA}{\iint_{Area} I(r) dA}. \quad (3-2)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Соответствие между указанным положением центра тяжести и положением максимума пространственного распределения интенсивности требует дальнейшего изучения.

3.3.4 погрешность концентричности модового поля (mode field concentricity error): Расстояние между центром модового поля и центром оболочки.

3.3.5 некруглость модового поля (mode field non-circularity): Так как обычно нет необходимости измерять некруглость модового поля для целей приемки, определение некруглости модового поля в этом контексте не требуется.

3.4 Геометрические характеристики стекла

3.4.1 Оболочка (cladding): Наружная область стекла в поперечном сечении волокна.

3.4.2 центр оболочки (cladding centre): Центр окружности, которая наилучшим образом соответствует границам оболочки.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Необходимо указать метод обеспечения наилучшего соответствия.

3.4.3 диаметр оболочки (cladding diameter): Диаметр окружности, определяющей центр оболочки.

3.4.4 отклонение диаметра оболочки (cladding diameter deviation): Разность между фактическими и номинальными значениями диаметра оболочки.

3.4.5 поле допуска оболочки (cladding tolerance field): Для поперечного сечения оптического волокна это область между окружностью, ограничивающей внешнюю границу оболочки, и наибольшей окружностью, концентрической с первой, которая вписывается во внешнюю границу оболочки. Обе окружности должны иметь тот же центр, что и оболочка.

3.4.6 некруглость оболочки (cladding non-circularity): Разность между диаметрами двух окружностей, определяемых полем допуска оболочки, деленная на диаметр оболочки.

3.4.7 центр сердцевин (core centre): Центр сердцевин представляет собой центр окружности, которая наилучшим образом соответствует точкам с постоянным уровнем интенсивности ближнего поля, излучаемым из центральной области волокна, при использовании длин волн, которые больше и/или меньше волоконной длины волны отсечки.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Вышеуказанный постоянный уровень выбирается в интервале от 5% до 50% от максимальной интенсивности ближнего поля.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Обычно центр сердцевин является хорошим приближением для центра модового поля.

3.4.8 погрешность концентричности сердцевин (core concentricity error): Расстояние между центром сердцевин и центром оболочки.

3.5 Определения хроматической дисперсии

3.5.1 хроматическая дисперсия (chromatic dispersion): Распространение светового импульса в оптическом волокне, вызванное разными групповыми скоростями разных длин волн, составляющих спектр источника.

3.5.2 групповая задержка (group delay): Время, необходимое световому импульсу для распространения по волокну единичной длины. Групповая задержка в функции длины волны обозначается как $\tau(\lambda)$. Обычно она выражается в пс/км.

3.5.3 коэффициент хроматической дисперсии (chromatic dispersion coefficient): Изменение групповой задержки светового импульса в волокне единичной длины, вызванное изменением единичной длины волны. Таким образом, коэффициент хроматической дисперсии равен $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$. Обычно он выражается в пс/нм × км.

3.5.4 наклон хроматической дисперсии (chromatic dispersion slope): Кривая угла наклона хроматической дисперсии в зависимости от длины волны. Наклон дисперсии определяется как $S(\lambda) = dD/d\lambda$.

3.5.5 длина волны с нулевой дисперсией (zero-dispersion wavelength) Длина волны, при которой хроматическая дисперсия исчезает.

3.5.6 наклон нулевой дисперсии (zero-dispersion slope): Угол наклона хроматической дисперсии при длине волны с нулевой дисперсией.

3.6 Другие характеристики

3.6.1 длина волны отсечки (cut-off wavelength): Теоретическая длина волны отсечки – это самая короткая длина волны, при которой одна мода может распространяться в одномодовом волокне. Этот параметр можно вычислить по профилю показателя преломления волокна. На длинах волн ниже теоретической длины волны отсечки распространяется несколько мод и волокно становится уже не одномодовым, а многомодовым.

В оптических волокнах изменение режима с многомодового на одномодовый происходит не на определенной длине волны, а довольно плавно, в некотором диапазоне длин волн. Следовательно, для определения характеристик волокна в сети электросвязи полезна не столько теоретическая длина волны отсечки, сколько фактическая пороговая длина волны для одномодового режима во время функционирования волокна. Поэтому для спецификаций одномодового волокна вводится более эффективный параметр, называемый длиной волны отсечки, который определяется следующим образом.

Длина волны отсечки определяется как длина волны, превышающая значение, при котором уровень излучения в случае перехода от полной мощности, включая направляемые моды более высокого порядка, к мощности основной моды уменьшается до значения менее 0,1 дБ. Согласно этому определению при одинаковом возбуждении мода второго порядка (LP_{11}) претерпевает затухание, которое на 19,3 дБ больше затухания основной моды (LP_{01}).

Поскольку длина волны отсечки зависит от длины и изгибов волокна, а также от условий его натяжения, результирующее значение длины волны отсечки зависит от того, находится ли измеряемое волокно в составе проложенного кабеля или же это короткое волокно вне кабеля. Следовательно, существуют два типа определяемой длины волны отсечки – **кабельная длина волны отсечки** и **волоконная длина волны отсечки**.

кабельная длина волны отсечки (cable cut-off wavelength) λ_{cc} : Кабельная длина волны отсечки измеряется до прокладки на практически прямом 22-метровом отрезке кабеля, подготовленном путем использования отдельного (без кабеля) волокна длиной 1 м с первичным покрытием на обоих концах и создания петли радиусом 40 мм на каждом из этих концов. Иначе, данный параметр может быть измерен на зачищенном от кабеля 22-метровом отрезке волокна с первичным покрытием, причем волокно скручивается в слабо напряженные петли радиусом > 140 мм и с петлями радиусом 40 мм на каждом конце.

Могут использоваться и другие конфигурации, если демонстрируются эмпирические результаты, либо равные значения в пределах 10 нм, либо больше значений, которые достигаются с эталонными конфигурациями. Например, для некоторых конструкций волокон и кабелей этому критерию эквивалентности соответствует волокно длиной 2 м без кабеля с двумя петлями радиусом 40 мм.

волоконная длина волны отсечки (fibre cut-off wavelength) λ_c : Волоконная длина волны отсечки измеряется на волокне (без кабеля) с первичным покрытием в следующей конфигурации: 2-метровый отрезок волокна с одной слабо напряженной петлей радиусом 140 мм (или с ее эквивалентом, например с разрезной оправкой), а остальная часть волокна остается практически прямой.

Во избежание модальных шумов и дисперсионных потерь длина волны отсечки λ_{cc} при наименьшей длине кабеля (включая длину отремонтированных участков при их наличии) должна быть меньше самой короткой ожидаемой длины волны системы λ_s :

$$\lambda_{cc} < \lambda_s. \quad (3-3)$$

Это гарантирует, что каждый отдельный отрезок кабеля будет в достаточной мере одномодовым. Любое неидеальное соединение создает некоторую мощность моды более высокого порядка (LP_{11}), и одномодовые волокна обычно поддерживают эту моду на коротком расстоянии (порядка метров, в зависимости от условий прокладки кабеля). Поэтому должно быть указано минимальное расстояние между соединениями, чтобы длина соответствующего отрезка кабеля была достаточной для обеспечения затухания моды LP_{11} до следующего соединения. Если для самого короткого отрезка кабеля выполняется неравенство (3-3), оно будет автоматически выполняться и для всех более длинных отрезков кабеля, и независимо от длины элементарного отрезка система будет работать как одномодовая.

Для оценки чувствительности волокна к изгибу можно объединить волоконную длину волны отсечки и диаметр модового поля. Чем выше длина волны отсечки и меньше диаметр модового поля волокна, тем больше стойкость волокна к изгибу. Это объясняет, почему зачастую желательно указывать более высокие значения длины волны отсечки λ_c , даже если верхний предел этого параметра превышает рабочую длину волны. Все практические методы прокладки и конструкции кабеля обеспечивают, чтобы кабельная длина волны отсечки была меньше рабочей длины волны.

Поскольку использование показателей кабельной длины волны отсечки λ_{cc} это наиболее прямой способ обеспечить работу одномодового кабеля, лучше указывать данный параметр, чем длину волны отсечки λ_c . Однако когда обстоятельства не позволяют использовать показатели λ_{cc} (например, в одномодовых волоконно-оптических кабелях, таких как гибкие выводы, кабели с разъемами на обоих концах или кабели, которые должны использоваться способом, значительно отличающимся от метода RTM для λ_{cc}), тогда используют показатели λ_c . Эта возможность рассматривается в [ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.654], [ITU-T G.655], [ITU-T G.656] и [ITU-T G.657].

3.6.2 затухание (attenuation): Затухание $A(\lambda)$ между двумя поперечными сечениями 1 и 2, разделенными расстоянием L вдоль волокна, при длине волны λ определяется следующим образом:

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (дБ)}, \quad (3-4)$$

где $P_1(\lambda)$ – это оптическая мощность, пересекающая поперечное сечение 1, а $P_2(\lambda)$ – оптическая мощность, пересекающая поперечное сечение 2 при длине волны λ .

Для однородного волокна можно определить затухание на единицу длины или коэффициент затухания, не зависящий от длины волокна:

$$a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \text{ (дБ/единица длины)}. \quad (3-5)$$

4 Сокращения и акронимы

В настоящей Рекомендации используются следующие сокращения.

ATM	Alternative Test Method	Альтернативный метод тестирования
DGD	Differential Group Delay	Дифференциальная групповая задержка
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Плотное мультиплексирование с разделением по длине волны
ECL	External Cavity Laser	Лазер с внешней резонаторной полостью

FWHM	Full Width at Half Maximum	Полная ширина на уровне половины максимума
Gpa	GigaPascal	Гигапаскаль
LD	Laser Diode	Лазерный диод
LED	Light Emitting Diode	Светодиод
MFCE	Mode Field Concentricity Error	Погрешность концентричности модового поля
MFD	Mode Field Diameter	Диаметр модового поля
NFP	Near-Field Pattern	Характеристика ближнего поля
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	Оптический рефлектометр во временной области
PMD	Polarization Mode Dispersion	Поляризационная модовая дисперсия
PS	Poincaré Sphere	Сфера Пуанкаре
PSP	Principal State of Polarization	Основное состояние поляризации
RTM	Reference Test Method	Эталонный метод тестирования
SOP	State Of Polarization	Состояние поляризации
TBD	To Be Determined	Подлежит определению
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Мультиплексирование с разделением по длине волны

5 Методы тестирования

Обычно для каждого параметра в данном документе указываются как эталонный метод тестирования (RTM), так и альтернативные методы тестирования (АТМ) и подразумевается, что для целей обычной приемки изделий могут быть пригодны оба метода. Однако если при использовании АТМ возникают какие-либо разногласия, рекомендуется использовать RTM в качестве метода для обеспечения окончательных результатов измерений.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Использование данной аппаратуры и процедур охватывает только необходимые базовые характеристики этих методов тестирования. Предполагается, что более полное оснащение техническими средствами измерений будет включать все необходимые меры для обеспечения стабильности, устранения шума, обеспечения требуемого отношения сигнал/шум и т. д.

5.1 Методы тестирования в отношении диаметра модового поля

5.1.1 Эталонный метод тестирования – сканирование дальнего поля

5.1.1.1 Общие положения

Согласно определению, данному в разделе 3.3.2, диаметр модового поля определяется по распределению интенсивности дальнего поля $F^2(\theta)$. Указанными пределами интегрирования являются значения 0 и $\pi/2$, но понятно, что это означает усечение интегралов в пределах области возрастания аргумента. Хотя максимальное физическое значение аргумента θ равно $\pi/2$, подынтегральные функции быстро приближаются к нулю до достижения этого значения. Относительная погрешность при определении диаметра модового поля, вводимая этим усечением, обсуждается в разделе 5.1.1.2.6.

5.1.1.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема испытательной установки показана на рисунке 1.

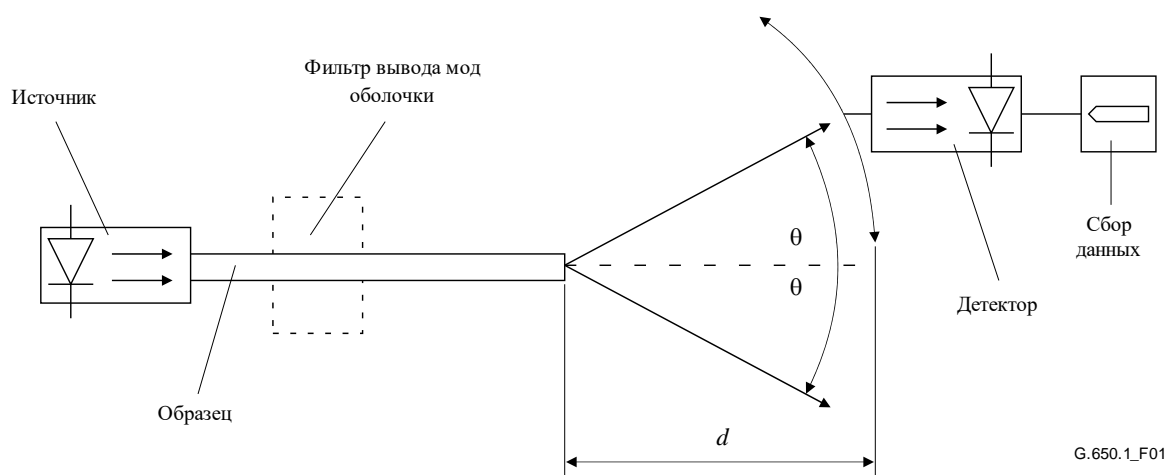


Рисунок 1 – Типичная схема установки сканирования дальнего поля

5.1.1.2.1 Источник света

Источник света должен быть стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для завершения процедуры измерения. Спектральные характеристики источника выбираются так, чтобы исключить работу в многомодовом режиме. Спектральная ширина FWHM не должна превышать 10 нм.

5.1.1.2.2 Модуляция

Чтобы повысить отношение сигнал/шум в приемнике, принято модулировать источник света. Если такая процедура используется, детектор должен быть связан с системой обработки сигналов, синхронизированной с частотой модуляции источника. Система детектирования должна иметь существенно линейные характеристики чувствительности.

5.1.1.2.3 Условия возбуждения волокна

Используемые условия возбуждения должны быть достаточными для возбуждения основной моды (LP_{01}). Например, подходящими методами для этой цели могут быть:

- соединение с волокном;
- возбуждение с помощью подходящей оптической системы.

Необходимо следить за тем, чтобы не распространялись моды более высокого порядка. Для этой цели может потребоваться петля подходящего радиуса или другой фильтр мод, удаляющий такие моды.

5.1.1.2.4 Фильтр вывода мод оболочки

Должны быть приняты меры для предотвращения распространения и детектирования мод оболочки.

5.1.1.2.5 Образец

Образец должен быть коротким отрезком измеряемого оптического волокна. Если в фильтр вывода мод вставлен отрезок волокна, с него должно быть снято первичное покрытие. Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными осям волокна. Рекомендуется, чтобы торцевые поверхности были плоскими и перпендикулярными осям волокна с точностью в пределах 1° .

5.1.1.2.6 Аппаратура сканирования

Должен использоваться механизм сканирования распределения интенсивности дальнего поля (например, сканирующий фотодетектор с точечной диафрагмой или с волоконными выводами). Детектор должен находиться не менее чем в 10 мм от конца волокна, и активная область детектора не должна образовывать слишком большой угол в дальнем поле. Этого можно добиться, разместив детектор на расстоянии более $40wb/\lambda$ от конца волокна, где $2w$ – диаметр ожидаемого модового поля измеряемого волокна, а b – диаметр активной области детектора.

Минимальный динамический диапазон измерения должен составлять 50 дБ. Это соответствует максимальному полууглу сканирования 20° и 25° (или более) для волокон, рассматриваемых соответственно в [ITU-T G.652] и [ITU-T G.653].

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Ослабление этих требований к динамическому диапазону (или максимальному полууглу сканирования) может привести к ошибкам. Например, ограничение этих значений до 30 дБ и $12,5^\circ$ для волокон МСЭ-Т G.652 и до 40 дБ и 20° для волокон МСЭ-Т G.653 может привести к относительной погрешности более 1% при определении MFD.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – К волокну МСЭ-Т G.654 применимы те же соображения, что и к волокну МСЭ-Т G.652.

5.1.1.2.7 Детектор

Должен использоваться подходящий детектор. Детектор должен иметь линейные характеристики чувствительности.

5.1.1.2.8 Усилитель

Для повышения уровня сигнала должен использоваться усилитель.

5.1.1.2.9 Сбор данных

Уровень измеряемого сигнала должен регистрироваться и соответствующим образом обрабатываться.

5.1.1.3 Процедура измерения

Входной конец волокна согласуют с источником света, а выходной конец – с соответствующим выходным устройством.

Должна выполняться следующая процедура: путем сканирования детектора фиксированными шагами, не превышающими $0,5^\circ$, измеряют распределение интенсивности дальнего поля $F^2(\theta)$, а диаметр модового поля вычисляют из уравнения (3-1).

5.1.1.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки, динамический диапазон измерительной системы, алгоритмы обработки данных и описание используемого сканирующего устройства (включая угол сканирования);
- b) условия возбуждения волокна;
- c) длина волны и ширина спектральной линии (FWHM) источника;
- d) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- e) тип фильтра мод оболочки;
- f) тип и размеры детектора;
- g) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо);
- h) указание точности и повторяемости;
- i) диаметр модового поля.

5.1.2 Первый альтернативный метод тестирования – метод переменной апертуры

5.1.2.1 Общие положения

Диаметр модового поля определяется дополнительной апертурной функцией передачи $a(x)$ ($x = D \cdot \tan\theta$ – радиус апертуры, а D – расстояние между апертурой и волокном):

$$2w = (\lambda\pi D) \left[\int_0^{\infty} a(x) \frac{x}{(x^2 + D^2)^2} dx \right]^{-1/2}. \quad (5-1)$$

При аппроксимации малых углов θ уравнения (3-1) и (5-1) математически эквивалентны. В рамках этой процедуры уравнение (5-1) можно получить из уравнения (3-1) путем интегрирования.

5.1.2.2 Испытательная аппаратура

5.1.2.2.1 Источник света (как в разделе 5.1.1.2.1)

5.1.2.2.2 Модуляция (как в разделе 5.1.1.2.2)

5.1.2.2.3 Условия возбуждения волокна (как в разделе 5.1.1.2.3)

5.1.2.2.4 Фильтр мод оболочки (как в разделе 5.1.1.2.4)

5.1.2.2.5 Образец (как в разделе 5.1.1.2.5)

5.1.2.2.6 Апертурный механизм

Должен использоваться механизм, содержащий как минимум двенадцать отверстий, охватывающих диапазон числовых апертур от 0,02 до 0,25 (0,4 для волокон, описываемых в [ITU-T G.653]). Свет, передаваемый через отверстие, собирается и фокусируется в детекторе.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Числовая апертура собирающей оптической системы должна быть достаточно большой, чтобы не влиять на результаты измерений.

5.1.2.2.7 Детектор (как в разделе 5.1.1.2.7)

5.1.2.2.8 Усилитель (как в разделе 5.1.1.2.8)

5.1.2.2.9 Сбор данных (как в разделе 5.1.1.2.9)

5.1.2.3 Процедура измерения

Входной конец волокна согласуют с источником света, а выходной конец – с соответствующим выходным устройством.

Должна выполняться следующая процедура: измеряют мощность $P(x)$, передаваемую каждой апертурой, и определяют дополнительную апертурную функцию передачи $a(x)$ следующим образом:

$$a(x) = 1 - \frac{P(x)}{P_{\max}}, \quad (5-2)$$

где P_{\max} – мощность, передаваемая наибольшей апертурой, а x – радиус апертуры. Диаметр модового поля вычисляют в соответствии с уравнением (5-1).

5.1.2.4 Представление результатов

Должны быть представлены следующие данные:

- а) схема испытательной установки, динамический диапазон измерительной системы, алгоритмы обработки данных и описание используемого апертурного узла (в том числе числовой апертуры);

- b) условия возбуждения волокна;
- c) длина волны и ширина спектральной линии (FWHM) источника;
- d) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- e) тип фильтра мод оболочки;
- f) тип и размеры детектора;
- g) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо);
- h) указание точности и повторяемости;
- i) диаметр модового поля.

5.1.3 Второй альтернативный метод тестирования – сканирование ближнего поля

5.1.3.1 Общие положения

Диаметр модового поля определяется по распределению интенсивности ближнего поля $f^2(r)$ (r – радиальная координата):

$$2w = 2 \left[2 \frac{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr}{\int_0^{\infty} r \left[\frac{df(r)}{dr} \right]^2 dr} \right]^{1/2}. \quad (5-3)$$

При аппроксимации малых углов θ уравнения (3-1) и (5-3) математически эквивалентны. В рамках этой процедуры ближнее поле $f(r)$ и дальнее поле $F(\theta)$ образуют пару Ганкеля. С помощью преобразования Ганкеля можно перейти от уравнения (3-1) к уравнению (5-3) и наоборот.

5.1.3.2 Испытательная аппаратура

5.1.3.2.1 Источник света (как в разделе 5.1.1.2.1)

5.1.3.2.2 Модуляция (как в разделе 5.1.1.2.2)

5.1.3.2.3 Условия возбуждения волокна (как в разделе 5.1.1.2.3)

5.1.3.2.4 Фильтр мод оболочки (как в разделе 5.1.1.2.4)

5.1.3.2.5 Образец (как в разделе 5.1.1.2.5)

5.1.3.2.6 Аппаратура сканирования

Для увеличения и фокусировки изображения ближнего поля волокна на плоскости сканирующего детектора (например, сканирующего фотодетектора с точечной диафрагмой или с волоконными выводами) используют увеличительную оптику (например, объектив микроскопа). Показатели числовой апертуры и увеличения выбираются в соответствии с желаемым пространственным разрешением. Для калибровки коэффициент увеличения оптики измеряют путем сканирования длины образца, размеры которого известны с достаточной точностью по независимым измерениям.

5.1.3.2.7 Детектор (как в разделе 5.1.1.2.7)

5.1.3.2.8 Усилитель (как в разделе 5.1.1.2.8)

5.1.3.2.9 Сбор данных (как в разделе 5.1.1.2.9)

5.1.3.3 Процедура измерения

Входной конец волокна согласуют с источником света, а выходной конец – с соответствующим выходным устройством.

Выполняют следующую процедуру: ближнее поле волокна увеличивают с помощью увеличительной оптики и фокусируют на плоскость детектора. Фокусировка выполняется с максимальной точностью, чтобы уменьшить погрешность измерения размеров из-за сканирования расфокусированного изображения. Сканируют распределение интенсивности ближнего поля $f^2(r)$ и вычисляют диаметр модового поля в соответствии с уравнением (5-3). Иначе, распределение интенсивности ближнего поля $f^2(r)$ можно преобразовать в область дальнего поля с использованием преобразования Ганкеля, а полученное преобразованное дальнее поле $F^2(\theta)$ использовать для вычисления диаметра модового поля в соответствии с уравнением (3-1).

ПРИМЕЧАНИЕ. – Различают радиальную координату r торцевой поверхности волокна и радиальную координату Mr сканирующего детектора в плоскости изображения, где M – коэффициент увеличения.

5.1.3.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки, динамический диапазон измерительной системы, алгоритмы обработки данных и описание устройств отображения и сканирующих устройств;
- b) условия возбуждения волокна;
- c) длина волны и ширина спектральной линии (FWHM) источника;
- d) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- e) тип фильтра мод оболочки;
- f) коэффициент увеличения аппаратуры;
- g) тип и размеры детектора;
- h) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо);
- i) показатели точности и повторяемости;
- j) диаметр модового поля.

5.1.4 Третий альтернативный метод тестирования – разность двунаправленного обратного рассеяния

5.1.4.1 Общие положения

Диаметр модового поля определяют по разности двунаправленного обратного рассеяния на стыке с волокном мертвой зоны с известным диаметром модового поля:

$$w_s = w_d 10^{\frac{g(L_d - L_s) + f}{20}}, \quad (5-4)$$

где:

w_d : диаметр модового поля волокна мертвой зоны;

w_s : диаметр модового поля образца волокна;

L_d : изменение обратного рассеяния (дБ) на стыке при измерении со стороны волокна мертвой зоны;

- L_s : изменение обратного рассеяния (дБ) на стыке при измерении со стороны образца волокна;
- g : поправочный коэффициент, зависящий от длины волны и конструкции волокна;
- f : поправочный коэффициент, зависящий от длины волны и конструкции волокна.

5.1.4.2 Испытательная аппаратура

Как в разделе 5.4.2.2 со следующими дополнительными требованиями.

На рисунке 2 показана блок-схема устройства, в котором применяется оптический переключатель. Использовать такое устройство не обязательно.

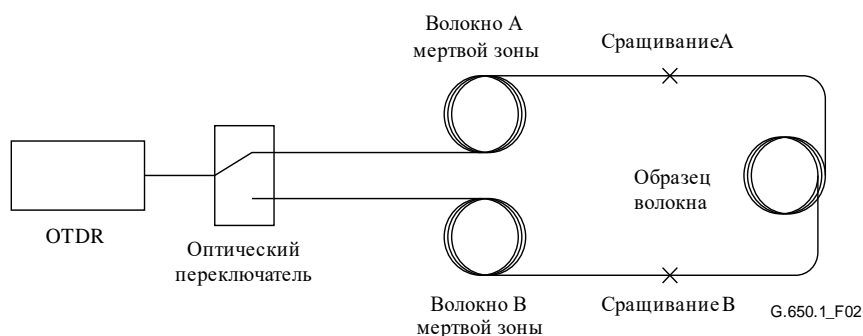


Рисунок 2 – Дополнительное устройство для измерения разности двунаправленного обратного рассеяния

Исходная длина волны оптического рефлектометра во временной области должна, как известно, находиться в пределах 2 нм. При измерениях в диапазоне длин волн от 1310 нм до 1550 нм смещение на 2 нм приводит к ошибке величиной около 0,02 мкм.

Волокно мертвой зоны должно быть достаточно длинным, чтобы область мертвой зоны не включала в себя место сращивания или стыкового соединения с образцом волокна. MFD волокна мертвой зоны измеряется на каждой длине волны, для которой необходимы измерения, с использованием RTM или одного из двух альтернативных методов. Волокно мертвой зоны обычно имеет ту же конструкцию, что и тестируемое волокно.

Сращивание или стыковое соединение должно быть достаточно стабильным во время измерения, чтобы не повлиять на результаты. При использовании стыкового соединения для минимизации отражений рекомендуется применять иммерсионную жидкость для согласования показателей преломления.

5.1.4.3 Процедура измерения

Процедура измерения состоит из двух частей. Сначала выполняется процедура для заданного волокна и длины волны с известными поправочными коэффициентами g и f . Вторая процедура используется для испытаний волокна заданного типа и конструкции при заданной длине волны. Процедура испытания включает в себя точный расчет поправочных коэффициентов g и f , что позволяет скорректировать длину волны OTDR относительно номинальной. Если g и f неизвестны и их точное определение нецелесообразно, можно принять номинальные значения соответственно 1 и 0.

5.1.4.3.1 Измерение характеристик волокна при заданной длине волны

- a) Расположите волокно так, чтобы свет поступал из волокна А мертвой зоны в образец волокна. (Из рефлектометра OTDR через стык А в образец волокна, как показано на рисунке 2.)
- b) Измерьте изменение обратного рассеяния на стыке (стык А, как показано на рисунке 2), избегая любых отражений, и запишите значение как L_d .
- c) Расположите волокно так, чтобы свет поступал из образца волокна в волокно А мертвой зоны. (Из рефлектометра OTDR через стык В в образец волокна, затем через стык А на рисунке 2.)
- d) Измерьте изменение обратного рассеяния на стыке (стык А, как показано на рисунке 2), избегая любых отражений, и запишите значение как L_s .
- e) Вычислите диаметр модового поля согласно уравнению (5-4).

5.1.4.3.2 Получение квалификационных данных для различных типов и конструкций волокна на заданной длине волны

- a) Выберите образец волокна, тип и конструкцию которого нужно определить и для которого диаметр w_s модового поля был измерен на требуемой длине волны с использованием либо эталонного метода, либо одного из альтернативных методов тестирования, так что диапазон значений диаметра модового поля для волокна данного типа и конструкции представлен в образце.
- b) Выполните процедуру раздела 5.1.4.3.1 от шага а) до шага d), чтобы определить изменения обратного рассеяния на стыках L_d и L_s .
- c) Вычислите значение $20 \log_{10} \left(\frac{w_s}{w_d} \right)$ для каждого волокна и выполните его линейную регрессию по отношению к $(L_d - L_s)$, чтобы определить значения g (угол наклона) и f (точку пересечения).
- d) Выберите второй образец волокна независимо от первого, использовавшегося для определения значений g и f , для которого также был измерен диаметр модового поля на требуемой длине волны с использованием эталонного метода или одного из альтернативных методов тестирования.
- e) Выполните процедуру раздела 5.1.4.3.1 с использованием значений g и f , определенных на шаге c), чтобы определить диаметр w_s модового поля. Определите разность значений, измеренных с помощью эталонного метода или одного из альтернативных методов тестирования.
- f) Вычислите среднее значение разности (смещение) и стандартное отклонение разностей (σ_d), чтобы определить, имеет ли место эквивалентность.
- g) Допустимую меру эквивалентности можно получить путем вычисления уровня В эквивалентности, где $B = |\text{смещение}| + 2\sigma_d/\sqrt{n}$, где n – размер выборки. Типичный верхний предел для В равен 0,1 мкм.
- h) Если значение В превышает верхний предел, рекомендуется внести корректировки, такие как повышение качества сращивания или стыкового соединения.

5.1.4.4 Представление результатов

Для каждого измеренного волокна:

- a) номинальная длина волны;
- b) значение диаметра модового поля;
- c) идентифицирующие сведения о волокне.

Информация, которая должна быть доступна:

- a) описание устройства;
- b) квалификационные данные для каждого типа и конструкции волокна на каждой длине волны;
- c) указание точности и повторяемости.

5.2 Методы тестирования в отношении диаметра оболочки, погрешности концентричности сердцевины и некруглости оболочки

5.2.1 Эталонный метод – метод изображения ближнего поля

5.2.1.1 Общие положения

Геометрические характеристики стекла определяются исходя из распределения интенсивности ближнего поля в соответствии с определениями, приведенными в разделах 3.4.3, 3.4.6 и 3.4.8.

5.2.1.2 Испытательная аппаратура

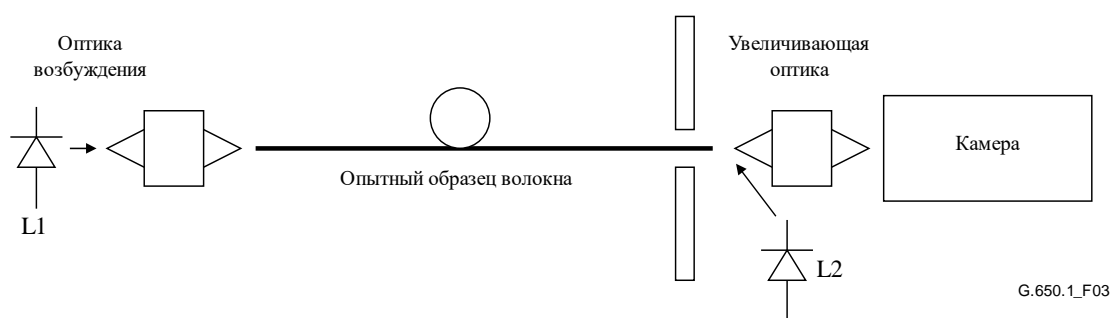


Рисунок 3 – Схема испытательной установки

5.2.1.2.1 Источники света

Источник света L1 для освещения сердцевины выбирается регулируемым по интенсивности и стабильным по положению в течение достаточного периода времени для выполнения процедуры измерения. Можно использовать длины волн выше и/или ниже волоконной длины волны отсечки. Второй источник света L2 с аналогичными характеристиками используется для освещения оболочки.

5.2.1.2.2 Условия возбуждения волокна

Оптика возбуждения устроена так, чтобы источник света равномерно переполнял волокно в угловом и пространственном измерениях. На выходном конце оболочка должна быть освещена равномерно.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Условия возбуждения от источника L1 должны быть такими, чтобы на выходе волокна пространственное распределение поля было кругообразно симметричным.

5.2.1.2.3 Фильтр вывода мод оболочки

Свет моды оболочки снимается с образца вблизи входного конца. Когда тестируемое волокно имеет первичное покрытие с показателем преломления, превышающим показатель преломления стекла, это покрытие действует как фильтр вывода мод оболочки.

5.2.1.2.4 Образец

Образец должен быть коротким отрезком измеряемого оптического волокна. Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными оси волокна.

5.2.1.2.5 Увеличивающая оптика

Увеличивающая оптика – это оптическая система (например, объектив микроскопа), которая увеличивает выходное изображение ближнего поля образца, фокусируя его на плоскость детектора. Числовая апертура и, следовательно, разрешающая способность оптики должны соответствовать требуемой точности измерения и быть не ниже 0,3. Коэффициент увеличения выбирают в соответствии с желаемым разрешением и регистрируют.

5.2.1.2.6 Детектор

Для восприятия увеличенного выходного изображения ближнего поля образца и его передачи на видеомонитор можно использовать CCD-видеокамеры, сканирующие видиконы или другие устройства распознавания структуры и интенсивности света. Видеоцифровой преобразователь выполняет оцифровку изображения для дальнейшего компьютерного анализа. Видеосистема должна быть достаточно линейной, чтобы после калибровки погрешность измерения не превышала требуемое значение.

5.2.1.2.7 Видеомонитор

Для воспроизведения полученного изображения используется видеомонитор. На экране монитора обычно виден некоторый рисунок, например перекрестие, помогающий оператору отцентрировать изображение образца. Можно использовать выравнивание и/или фокусировку под управлением компьютера.

5.2.1.2.8 Система обработки данных

Измерение, сбор данных и расчеты выполняются с использованием компьютера. Принтер выдает печатную копию информации и результатов измерений.

5.2.1.3 Процедура измерения

5.2.1.3.1 Калибровка

Калибровка проводится в соответствии с процедурами, приведенными в [IEC 61745].

5.2.1.3.2 Измерение

Подготовленный образец выравнивают на входном конце для достижения заданных условий возбуждения. Изображение ближнего поля на выходном конце фокусируют и центруют на мониторе. Интенсивность освещения изображения сердцевины на входном конце и интенсивность освещения оболочки на выходном конце регулируют в соответствии с установленным внутренним стандартом для конкретного испытательного оборудования.

Затем регистрируют оцифрованное видеоизображение выходного торца и определяют точки, соответствующие краям изображения оболочки и краям изображения сердцевины, которые заносят в таблицы краев. Уровни определения границ в изображении ближнего поля следующие.

Граница изображения сердцевины – этот уровень выбирают в диапазоне значений от 5% до 50% максимальной интенсивности ближнего поля.

Граница изображения оболочки – можно использовать различные методы определения границы оболочки в зависимости от способа освещения. Используемый на практике метод должен быть таким же, какой использовался при калибровке.

5.2.1.3.3 Вычисления

Необработанные данные по сердцевине и краям оболочки вписывают в гладкие, математически замкнутые формы для определения наилучших оценок фактических краев. Затем эти сглаженные математически замкнутые формы вписывают в круг для определения геометрических характеристик, включая отклонения первого порядка от идеально круглой

формы каждой границы соответствующего края. Эти значения и математическое представление края используют для определения параметров следующим образом:

- X_{co} , Y_{co} (мкм) соответствуют центру сердцевины;
- R_{cl} (мкм) соответствует радиусу оболочки;
- X_{cl} , Y_{cl} (мкм) соответствуют центру оболочки;
- R_{mincl} (мкм) – минимальное расстояние от края оболочки до центра;
- R_{maxcl} (мкм) – максимальное расстояние от края оболочки до центра;
- диаметр оболочки (мкм) = $2R_{cl}$;
- некруглость оболочки (%) = $100 (R_{maxcl} - R_{mincl})/R_{cl}$;
- погрешность концентричности сердцевины (мкм) = $[(X_{cl} - X_{co})^2 + (Y_{cl} - Y_{co})^2]^{1/2}$.

Требуется, чтобы гладкие математически замкнутые формы, используемые для представления краев, допускали изменение кривизны, большее или равное тому, которое свойственно эллипсу. Для неэллиптических форм соответствующие данные можно преобразовать в полярные координаты вблизи ориентировочного центра, прежде чем устанавливать радиус относительно углового положения.

Допускается активная фильтрация или удаление точек необработанных данных, которые значительно отличаются от тех, которые вписываются в математическую форму. Выбор кривой, оборудования, метода определения отклонения и алгоритма фильтрации зависят от вклада этих параметров в качество результатов измерения оболочки.

5.2.1.4 Представление результатов

Для каждого измерения:

- a) идентифицирующие сведения о волокне;
- b) параметры – диаметр оболочки, некруглость оболочки и погрешность концентричности сердцевины.

Информация, которая должна быть доступна:

- a) схема испытательной установки;
- b) условия возбуждения волокна;
- c) спектральные характеристики;
- d) коэффициент увеличения;
- e) тип и размеры детектора;
- f) указание точности и повторяемости, включая данные калибровки.

5.2.2 Первый альтернативный метод тестирования – метод преломления ближнего поля

5.2.2.1 Общие положения

Измерение преломленного ближнего поля дает непосредственное распределение показателя преломления по всему волокну (сердцевине и оболочке). Геометрические характеристики волокна можно получить из распределения показателя преломления с использованием подходящих алгоритмов.

5.2.2.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема метода измерения показана на рисунке 4. Этот метод включает сканирование сфокусированного пятна света на конце волокна. Оптика возбуждения настраивается на перепокрытие числовой апертуры волокна. Конец волокна погружается в жидкость с немного более высоким показателем преломления, чем у оболочки. Часть света направляется

по волокну, а остальная часть воспринимается как полый конус вокруг волокна. На ось сердцевины помещается диск, чтобы в детектор попадал только преломленный свет.

Оптическое разрешение и, следовательно, способность различать детали в геометрии волокна зависят от размера сфокусированного пятна света. Он определяется как числовой апертурой фокусирующей линзы, так и размером диска. Тем не менее положение четких элементов может быть выявлено с гораздо большей точностью в зависимости от размера шага системы шаговых двигателей или точности контроля положения аналоговых приводов.

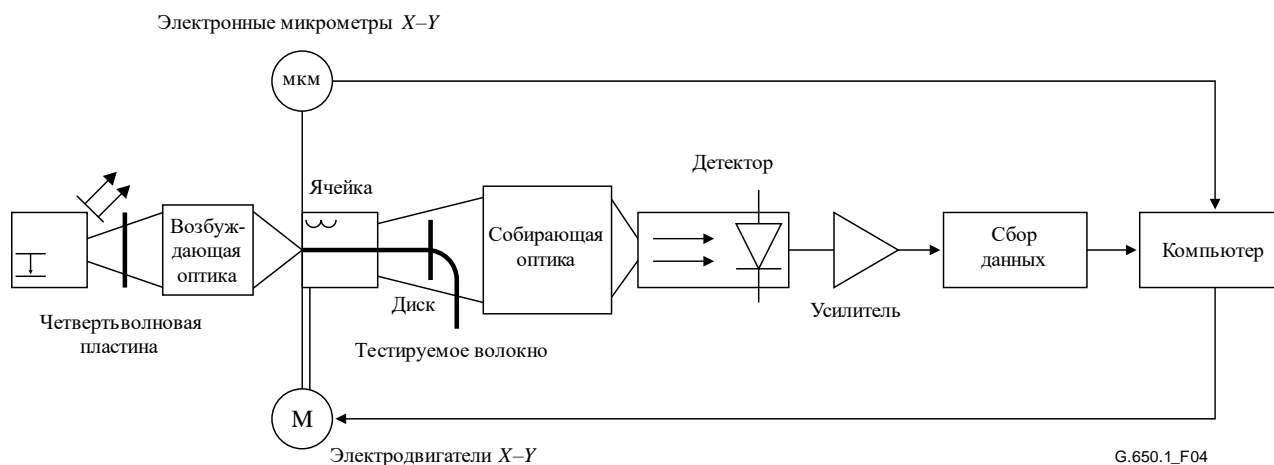


Рисунок 4 – Типовая схема испытательной установки при использовании метода преломления ближнего поля

5.2.2.2.1 Источник

Требуется стабильный лазер, выдающий около 1 мВт мощности в моду TEM_{00} , такой как гелий-неоновый (HeNe) лазер.

Четвертьволновая пластина вводится для изменения линейной поляризации луча на круговую, так как коэффициент отражения света на границе стекло–воздух в большой степени зависит от угла и поляризации.

5.2.2.2.2 Условия возбуждения волокна

Возбуждающая оптика, рассчитанная на переполнение числовой апертуры волокна, фокусирует луч света на плоском конце волокна. Оптическая ось луча света должна находиться в пределах 1° от оси волокна. Разрешение оборудования определяется размером сфокусированного пятна, которое должно быть как можно меньше, чтобы максимизировать разрешение, например, менее 1,0 мкм. Оборудование позволяет сканировать сфокусированное пятно по поперечному сечению волокна.

5.2.2.2.3 Ячейка

Ячейка содержит жидкость с показателем преломления, немного большим, чем у оболочки волокна. Положение ячейки регулируют электродвигатели X-Y, приводимые в действие компьютером, а измеряется оно микрометрами X-Y.

5.2.2.2.4 Детектирование

Преломленный свет собирается подходящей собирающей оптикой и доставляется к детектору любым удобным способом при условии, что собирается весь преломленный свет. Требуемый размер диска и его положение вдоль центральной оси можно рассчитать.

5.2.2.2.5 Сбор данных

Измеренное распределение интенсивности можно записывать, обрабатывать и представлять в подходящей форме в соответствии со способом сканирования и требованиями спецификации. Для управления электродвигателями $X-Y$, записи положения $X-Y$ ячейки и соответствующих уровней мощности, а также для обработки измеренных данных используется компьютер.

5.2.2.3 Процедура

См. блок-схему испытательной установки (рисунок 4).

5.2.2.3.1 Подготовка тестируемого волокна

Требуется иметь волокно длиной менее 2 м.

С участка волокна, помещенного в ячейку с жидкостью, снимают первичное покрытие.

Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными оси волокна.

5.2.2.3.2 Калибровка оборудования

При калибровке оборудования волокно извлекают из ячейки с жидкостью. Во время измерения угол конуса света изменяют в зависимости от показателя преломления в точке входа в волокно (соответственно изменяется и мощность излучения, проходящего через диск). Когда волокно извлечено, при известных значениях показателя преломления жидкости и толщины ячейки это изменение угла можно смоделировать путем перемещения диска вдоль оптической оси. Передвигая диск в несколько заданных положений, можно масштабировать профиль в единицах относительного показателя преломления. Абсолютный показатель преломления можно определить только в том случае, если точно известен показатель преломления оболочки или жидкости при длине волны и температуре измерения.

Более удобные процедуры калибровки можно выполнить с помощью тонкого стержня с известным постоянным показателем преломления или с помощью многомодового многоступенчатого волокна, разные значения показателя преломления которого известны с большой точностью. Этот последний метод также может быть полезен при проверке линейности устройства. С этой целью также полезно контролировать температуру жидкости в жидкостной ячейке.

5.2.2.3.3 Сканирование растра

Входной конец измеряемого волокна погружается в жидкостную камеру, а лазерный луч одновременно центрируется и фокусируется на концевой поверхности волокна.

Диск центрируется относительно выходного конуса. Отраженные моды, проходящие через диск, собираются и фокусируются на детекторе.

Сфокусированное лазерное пятно сканируется по поперечному сечению волокна и получается двумерное распределение показателя преломления волокна. По этому распределению вычисляют геометрические характеристики.

5.2.2.3.4 Геометрические характеристики

При выполнении сканирования растра показателя преломления получается контур сердцевин, охватывающий точки показателя преломления на границе между сердцевиной и оболочкой, совпадающие со средним значением усредненных показателей преломления для соответственно сердцевин и оболочки. Контур оболочки определяется аналогичным образом, но на границе, где показатель преломления оболочки совпадает с показателем преломления жидкости. Выполняют геометрический анализ при условиях, перечисленных в разделе 3, начиная с данных о контурах сердцевин и оболочки. Результат измерения профиля

показателя преломления фактически соответствует погрешности concentричности сердцевины.

5.2.2.4 Представление результатов

- а) Схема испытательной установки с указанием используемого метода сканирования;
- б) идентифицирующие сведения о волокне;
- в) диаметр оболочки;
- г) погрешность concentричности сердцевины;
- д) некруглость оболочки;
- е) диаметр сердцевины (при необходимости);
- ж) сканирование раstra по всему волокну (при необходимости);
- з) указание точности и повторяемости;
- и) температура образца и условия окружающей среды (при необходимости).

5.2.3 Второй альтернативный метод тестирования – метод бокового обзора

5.2.3.1 Общие положения

Метод бокового обзора применяется к одномодовым волокнам для определения геометрических параметров (погрешность concentричности сердцевины, диаметр оболочки и некруглость оболочки) путем измерения распределения интенсивности света, преломленного внутри волокна.

5.2.3.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема испытательной установки показана на рисунке 5.

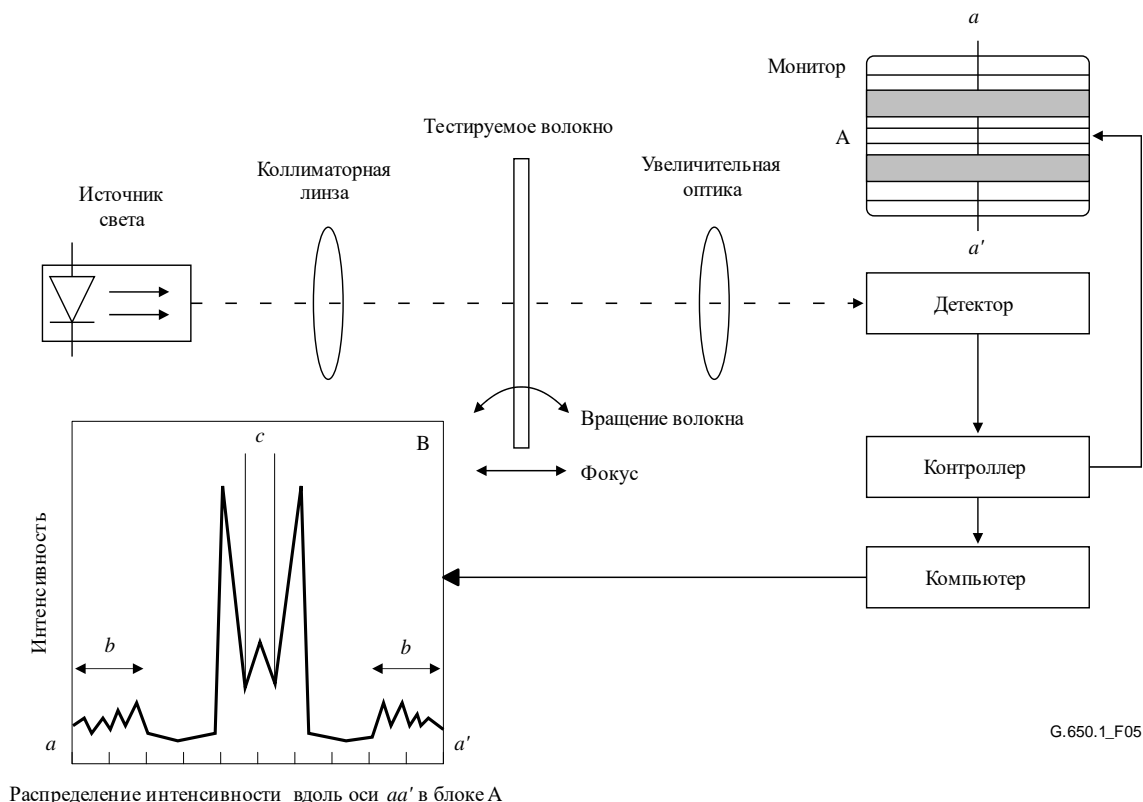


Рисунок 5 – Блок-схема системы измерения методом бокового обзора

5.2.3.2.1 Источник света

Излучаемый свет должен быть коллимированным, регулируемым по интенсивности и стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для выполнения процедуры измерения. Можно использовать стабильный источник света высокой интенсивности, такой как светоизлучающий диод (LED).

5.2.3.2.2 Образец

Измеряемый образец представляет собой короткий отрезок одномодового волокна. С наблюдаемого участка волокна снимают первичное покрытие. Во время измерения поверхность волокна должна оставаться чистой.

5.2.3.2.3 Увеличительная оптика

Увеличительная оптическая система состоит из оптической системы (например, объектива микроскопа), которая увеличивает картину распределения интенсивности преломленного света внутри волокна на плоскости сканирующего детектора. Плоскость наблюдения находится на фиксированном расстоянии перед волокном на его оси. Степень увеличения выбирают в соответствии с желаемым пространственным разрешением и регистрируют.

5.2.3.2.4 Детектор

Для оценки увеличенного изображения распределения интенсивности в плоскости наблюдения по линии, перпендикулярной оси волокна, используют подходящий детектор. Это может быть видикон или прибор с зарядовой связью. Детектор должен иметь линейные характеристики в требуемом диапазоне измерения. Разрешение детектора должно соответствовать желаемому пространственному разрешению.

5.2.3.2.5 Обработка данных

Для анализа распределения интенсивности используется компьютер с соответствующим программным обеспечением.

5.2.3.3 Процедура измерения

5.2.3.3.1 Калибровка оборудования

Для калибровки оборудования измеряют степень увеличения оптической системы путем сканирования длины образца, размеры которого уже известны с приемлемой точностью. Эту степень увеличения регистрируют.

5.2.3.3.2 Измерение

Испытуемое волокно фиксируют в держателе образца и устанавливают в измерительную систему. Положение волокна регулируют так, чтобы его ось была перпендикулярна оптической оси измерительной системы.

Регистрируют распределение интенсивности в плоскости наблюдения вдоль линии, перпендикулярной оси волокна (aa' в блоке А на рисунке 5), (показано в блоке В) для разных направлений наблюдения путем вращения волокна вокруг его оси с сохранением расстояния между осью волокна и постоянной плоскостью наблюдения. Диаметр оболочки и центральное положение волокна определяют путем анализа симметрии радиального распределения интенсивности в увеличенном изображении (показано как область b в блоке В). Центральное положение сердцевинки определяют путем анализа распределения интенсивности собранного света (показано как область c). Расстояние между центральным положением волокна и положением сердцевинки соответствует номинальному наблюдаемому значению погрешности концентричности сердцевинки.

Как показано на рисунке 6, на котором изображена синусоидальная функция экспериментально полученных значений погрешности концентричности модового поля (см. примечание 2 в разделе 3.4.7), построенная как функция угла поворота, фактическая погрешность концентричности сердцевин вычисляется как произведение максимальной амплитуды синусоидальной функции и коэффициента увеличения в результате линзового эффекта, вызванного цилиндрической структурой волокна. Диаметр оболочки оценивается как усредненное значение измеренных диаметров волокна при каждом значении угла поворота, что дает значения максимального и минимального диаметров для определения значений некруглости оболочки в соответствии с определением.

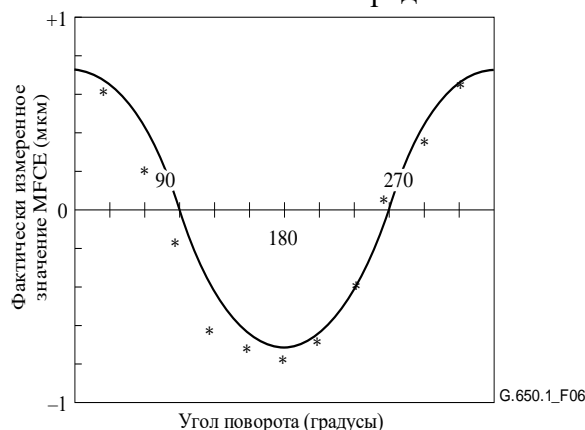


Рисунок 6 – Измеренные значения погрешности концентричности модового поля в зависимости от угла поворота

5.2.3.4 Представление результатов

- a) Схема испытания;
- b) идентифицирующие сведения о волокне;
- c) спектральные характеристики источника;
- d) указание повторяемости и точности;
- e) график зависимости номинальной погрешности концентричности сердцевин от угла поворота;
- f) погрешность концентричности сердцевин, диаметр оболочки и некруглость оболочки;
- g) температура образца и условия окружающей среды (при необходимости).

5.2.4 Третий альтернативный метод тестирования – метод передающей установки ближнего поля

5.2.4.1 Общие положения

Геометрические характеристики волокна обуславливаются распределением интенсивности ближнего поля в соответствии с определениями, приведенными в разделах 3.4.3, 3.4.6 и 3.4.8.

Поскольку концентричность модового поля является хорошим приближением концентричности сердцевин, этот метод можно использовать для оценки погрешности концентричности сердцевин.

5.2.4.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема испытательной установки показана на рисунке 7.

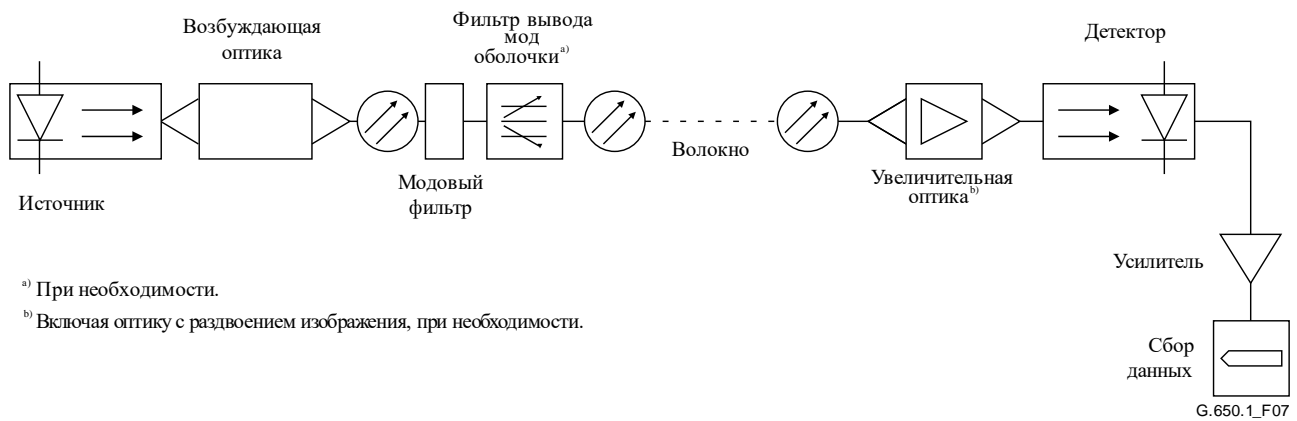


Рисунок 7 – Типичная схема передающей установки ближнего поля

5.2.4.2.1 Источник света

Для освещения сердцевины используется источник света с номинальной длиной волны 1310 нм (для волокон согласно [ITU-T G.652]) или 1550 нм (для волокон согласно [ITU-T G.653] и [ITU-T G.654]). Источник света должен быть регулируемым по интенсивности и стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для завершения процедуры измерения. Спектральные характеристики этого источника выбирают так, чтобы исключить работу в многомодовом режиме. При необходимости можно использовать второй источник света с аналогичными характеристиками для освещения оболочки. Спектральные характеристики второго источника света не должны вызывать расфокусировку изображения.

5.2.4.2.2 Условия возбуждения волокна

Оптика возбуждения, настроенная на переполнение волокна, фокусирует луч света на плоском входном конце волокна.

5.2.4.2.3 Модовый фильтр

При измерении необходимо обеспечить одномодовый режим работы на длине волны измерения. В этих случаях может потребоваться ввести изгиб, чтобы исключить моду LP₁₁.

5.2.4.2.4 Фильтр вывода мод оболочки

Чтобы исключить распространение оптической мощности в оболочке, используется подходящий фильтр вывода мод оболочки. При измерении только геометрических характеристик оболочки фильтр вывода мод оболочки не требуется.

5.2.4.2.5 Образец

В качестве образца используют короткий отрезок измеряемого оптического волокна. Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными оси волокна.

5.2.4.2.6 Увеличительная оптика

Увеличительная оптика состоит из оптической системы (например, объектива микроскопа), которая увеличивает выходное изображение ближнего поля образца, фокусируя его на плоскость сканирующего детектора. Числовая апертура и, следовательно, разрешающая способность оптики должны соответствовать требуемой точности измерения и быть не ниже 0,3. Увеличение выбирают в соответствии с желаемым пространственным разрешением и регистрируют.

5.2.4.2.7 Детектор

Необходимо использовать подходящий детектор, определяющий поточечную интенсивность передаваемого изображения ближнего поля. Например, можно использовать любой из следующих методов:

- a) сканирующий фотодетектор с точечной диафрагмой;
- b) сканирующее зеркало с фиксированной точечной диафрагмой и фотодетектором;
- c) сканирующий видикон, приборы с зарядовой связью или другие устройства распознавания изображения/интенсивности света.

Детектор должен быть линейным (или линеаризованным) в диапазоне встречающихся интенсивностей.

5.2.4.2.8 Усилитель

Для повышения уровня сигнала используют усилитель. Полосу пропускания усилителя выбирают в соответствии с используемым типом сканирования. При сканировании выходного конца волокна с помощью механических или оптических систем принято модулировать источник оптического излучения. Если применяется такая процедура, то усилитель должен быть привязан к частоте модуляции источника.

5.2.4.2.9 Сбор данных

Измеренное распределение интенсивности регистрируют, обрабатывают и представляют в подходящей форме в соответствии со способом сканирования и требованиями спецификации.

5.2.4.3 Процедура измерения

5.2.4.3.1 Калибровка оборудования

Для калибровки оборудования измеряют степень увеличения оптической системы путем сканирования изображения образца, размеры которого уже известны с приемлемой точностью.

Эта степень увеличения регистрируется.

5.2.4.3.2 Измерение

Входной конец волокна выравнивают с возбуждающим лучом, а выходной конец – с оптической осью увеличительной оптики. Для измерения передаваемого изображения ближнего поля сфокусированное изображение выходного конца волокна сканируется детектором в соответствии с требованиями спецификации. Фокусировка выполняется с максимальной точностью, чтобы уменьшить погрешность определения размеров, вызванную сканированием расфокусированного изображения. Затем вычисляют требуемые геометрические параметры в соответствии с определениями.

Алгоритмы определения краев и вычисления геометрических параметров находятся в стадии исследования.

5.2.4.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки с указанием используемого метода сканирования;
- b) условия возбуждения волокна;
- c) спектральные характеристики источника;
- d) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- e) тип фильтра вывода мод (если он применяется);
- f) коэффициент увеличения оптики;

- g) тип и размеры детектора;
- h) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо);
- i) указание точности и повторяемости;
- j) результирующие размерные параметры, такие как диаметры оболочки, некруглость оболочки, погрешность концентричности сердцевины и т. д.

5.3 Методы измерения длины волны отсечки

5.3.1 Эталонный метод измерения длины волны отсечки (λ_c) волокна с первичным покрытием – метод передаваемой мощности

5.3.1.1 Общие положения

Измерение длины волны отсечки одномодового волокна позволяет обеспечить эффективную работу в одномодовом режиме на заданной длине волны.

Метод передаваемой мощности основан на изменении с длиной волны мощности, передаваемой при определенных условиях по короткому образцу волокна, по сравнению с эталонной передаваемой мощностью. Эту эталонную мощность можно получить двумя способами:

- a) на испытуемом волокне с петлей малого радиуса; или
- b) на коротком (1–2 м) отрезке многомодового волокна.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Наличие первичного покрытия на волокне обычно не влияет на длину волны отсечки. Однако наличие вторичного покрытия может привести к тому, что длина волны отсечки будет значительно короче, чем для волокна с первичным покрытием.

Измерение может проводиться на волокне с вторичным покрытием, если исследован тип вторичного покрытия и подтверждено, что правильно нанесенное вторичное покрытие не оказывает существенного влияния на длину волны отсечки.

5.3.1.2 Испытательная аппаратура

5.3.1.2.1 Источник света

Необходим источник света с шириной спектральной линии не более 10 нм (FWHM), стабильный по положению, интенсивности и длине волны в течение периода времени, достаточного для выполнения процедуры измерения, и способный работать в достаточно широком диапазоне длин волн.

5.3.1.2.2 Модуляция

Для повышения отношения сигнал/шум в приемнике принято модулировать источник света. Если такая процедура применяется, детектор должен быть связан с системой обработки сигналов, синхронизированной с частотой модуляции источника. Система детектирования должна быть по сути линейной.

5.3.1.2.3 Условия возбуждения волокна

Условия возбуждения должны быть такими, чтобы обе моды LP₀₁ и LP₁₁ возбуждались практически равномерно. Например, подходящими методами возбуждения могут быть:

- a) соединение с многомодовым волокном; или
- b) возбуждение с помощью соответствующей оптики с большим сфокусированным пятном и большой числовой апертурой (NA).

5.3.1.2.4 Фильтр вывода мод оболочки

Фильтр вывода мод оболочки представляет собой устройство, которое способствует преобразованию мод оболочки в моды излучения, в результате чего моды оболочки выводятся из волокна. Следует соблюдать осторожность, чтобы избежать влияния на распространение моды LP₁₁.

5.3.1.2.5 Оптический детектор

Должен использоваться подходящий детектор, полностью перехватывающий излучение, исходящее из волокна. Его спектральная характеристика должна соответствовать спектральной характеристике источника. Детектор должен быть однородным и иметь линейную чувствительность.

5.3.1.3 Процедура измерения

5.3.1.3.1 Стандартный испытуемый образец

Измерение проводят с отрезком волокна длиной 2 м. Волокно вставляют в испытательное устройство и изгибают так, чтобы образовалась слабо напряженная петля. Петля должна образовывать один полный виток радиусом 140 мм. Оставшаяся часть волокна должна быть практически свободна от внешних напряжений. Хотя отдельные случайные изгибы большего радиуса допустимы, они не должны вносить существенного изменения в результат измерений. Выходная мощность $P_1(\lambda)$ регистрируется относительно λ в достаточно широком диапазоне вокруг ожидаемой длины волны отсечки.

5.3.1.3.2 Передача через эталонный образец

Может использоваться любой способ а) или б).

- а) С использованием тестируемого образца и фиксированных условий возбуждения измеряется выходная мощность $P_2(\lambda)$ в том же диапазоне длин волн по меньшей мере с одной петлей достаточно малого радиуса в тестируемом образце для отфильтровывания моды LP₁₁. Точное значение малого радиуса можно определить до измерения. Такой радиус должен быть достаточно мал, чтобы ослабить моду второго порядка, но не основную моду, и не слишком мал, чтобы избежать эффектов макроизгиба на более длинных волнах. Обычно для большинства волокон МСЭ-Т G.652 – МСЭ-Т-Т G.656 этот радиус составляет от 10 мм до 30 мм. Для некоторых волокон МСЭ-Т G.657 радиус должен быть намного меньше.
- б) С использованием короткого (1–2 м) отрезка многомодового волокна измеряется выходная мощность $P_3(\lambda)$ в том же диапазоне длин волн.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Наличие мод с утечкой может привести к пульсации спектра передачи эталонного многомодового волокна, влияющей на результат. Чтобы решить эту проблему, можно ограничить условия возбуждения света, заполняя только 70% диаметра сердцевины многомодового волокна и числовой апертуры или использовать подходящий модовый фильтр.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Для некоторых волокон МСЭ-Т G.657 ввиду их нечувствительности к потерям на изгибе метод а) может оказаться недостаточным, и в качестве эталонного сканирования этих волокон рекомендуется использовать метод б).

5.3.1.3.3 Вычисление

Спектральное затухание тестируемого образца относительно эталонной мощности составляет

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (5-5)$$

где $i = 2$ или 3 для методов а) или б) соответственно, раздел 5.3.1.3.2.

В предположении линейного представления верхней области длин волн отклонение мод более высокого порядка от основной моды составляет

$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - (A_u + B_u \lambda). \quad (5-6)$$

A_u и B_u определяются так, чтобы выражение $(A_u + B_u \lambda)$ соответствовало части кривой спектрального затухания на длинах волн выше области, в которой затухание мод более высокого порядка ускоряется (переходная область). Для метода а) значения A_u и B_u можно установить равными нулю. См. рисунки 8а и 9а.

ПРИМЕЧАНИЕ. – При использовании метода а) из раздела 5.3.1.3.2 малая петля модового волокна фильтра исключает все моды, кроме основной, для длин волн, которые более чем на несколько десятков нанометров ниже длины волны отсечки λ_c . Для длин волн, которые более чем на несколько сотен нанометров выше λ_c , в петле может сильно затухать даже основная мода. Значение $a(\lambda)$ равно логарифмическому отношению полной мощности, исходящей из образца, включая мощность моды LP₁₁ и основной моды. Когда моды равномерно возбуждаются в соответствии с разделом 5.3.1.2.3, $a(\lambda)$ также дает затухание моды LP₁₁ $a(\lambda)$ в дБ в тестируемом образце:

$$A(\lambda) = 10 \log \left[\left(\frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - 1 \right) / 2 \right]. \quad (5-7)$$

5.3.1.3.4 Определение длины волны отсечки

В переходной области мощность моды более высокого порядка уменьшается с увеличением длины волны. Длина волны отсечки λ_c волокна определяется как длина волны, на которой мощность моды более высокого порядка относительно мощности основной моды $\Delta a(\lambda)$ уменьшается до 0,1 дБ.

На рисунках 8б и 9б показаны горбы, которые иногда появляются вблизи длины волны отсечки. При отсутствии горбов (см. рисунки 8а и 9а) точное определение λ_c может быть достигнуто без специальных алгоритмов. Однако при наличии горбов для повышения точности можно использовать алгоритмы подгонки, основанные на следующих уравнениях. Примеры таких алгоритмов приведены в Дополнении I:

$$\gamma(\lambda) = 10 \log \left[-\frac{10}{A} \log \left(\frac{10^{\Delta a(\lambda)/10} - 1}{\rho} \right) \right]; \quad (5-8)$$

$$A = 10 \log \left[\rho / (10^{0,01} - 1) \right]. \quad (5-9)$$

Если не указано иное, то $\rho = 2$. (5-10)

Если для длин волн в области перехода определяются коэффициенты

$$A_t + B_t \lambda = -Y(\lambda), \quad (5-11)$$

то

$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t}. \quad (5-12)$$

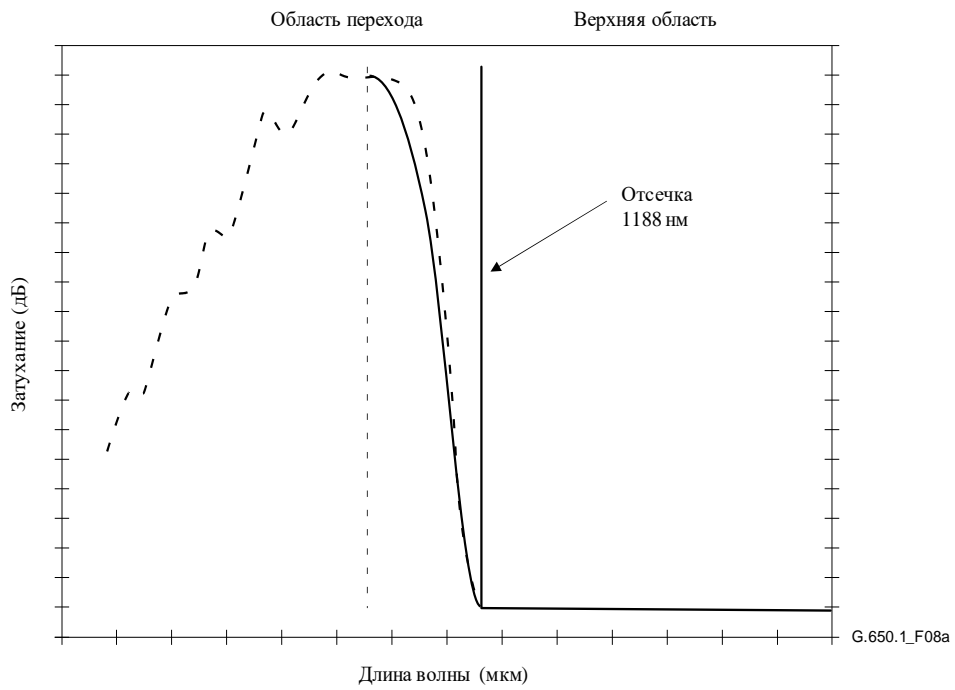


Рисунок 8а – График отсечки эталонного одномодового волокна

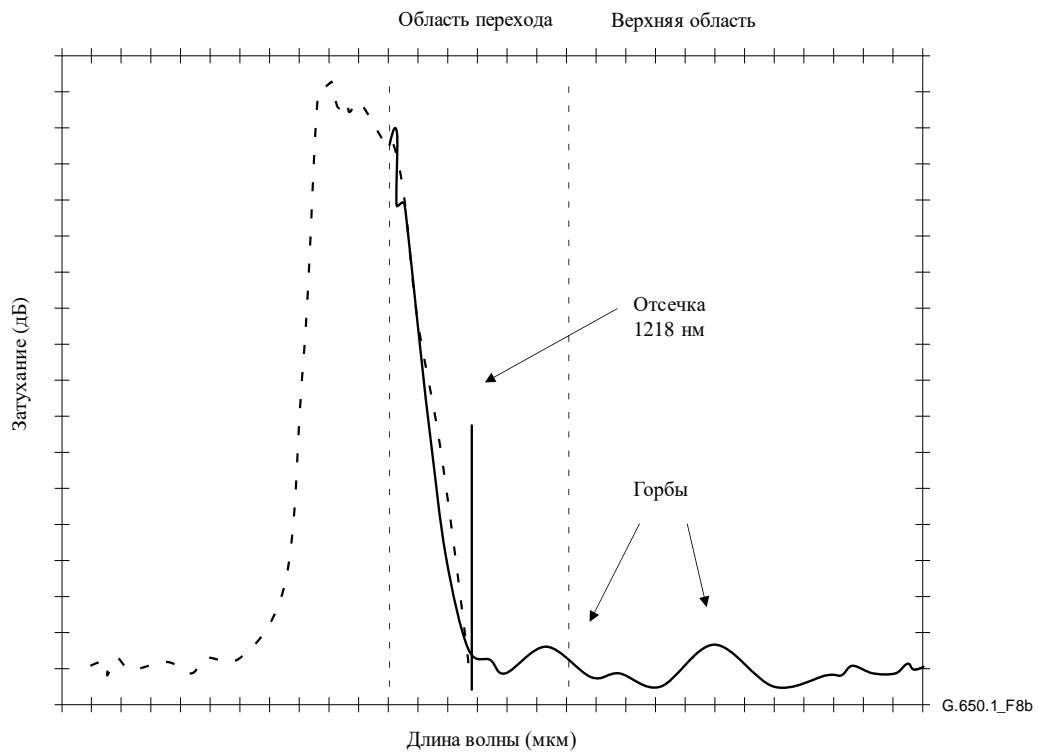


Рисунок 8в – График отсечки эталонного одномодового волокна с горбами

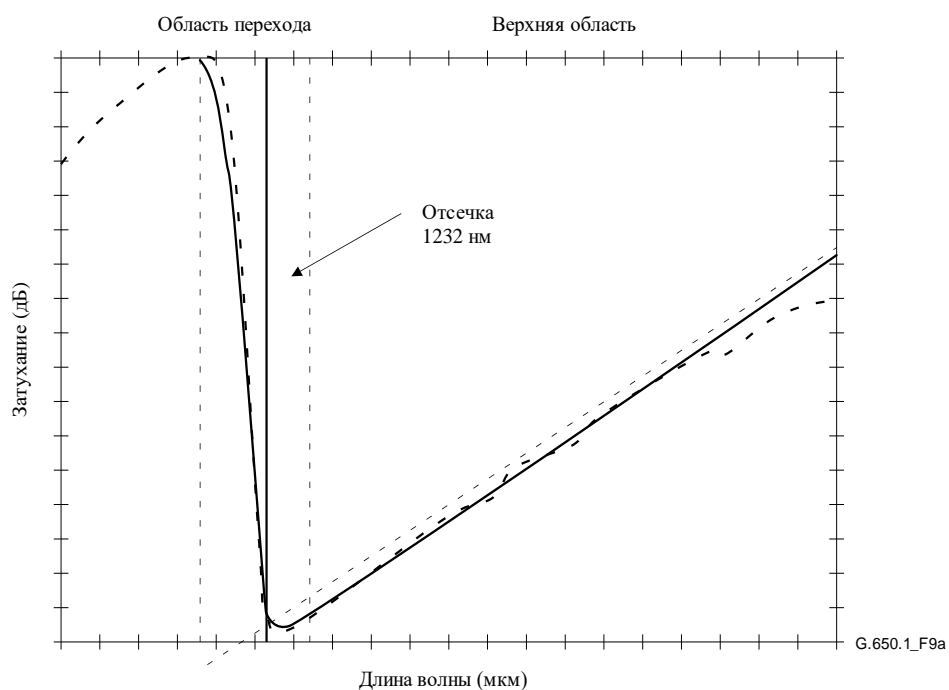


Рисунок 9а – График отсечки эталонного многомодового волокна

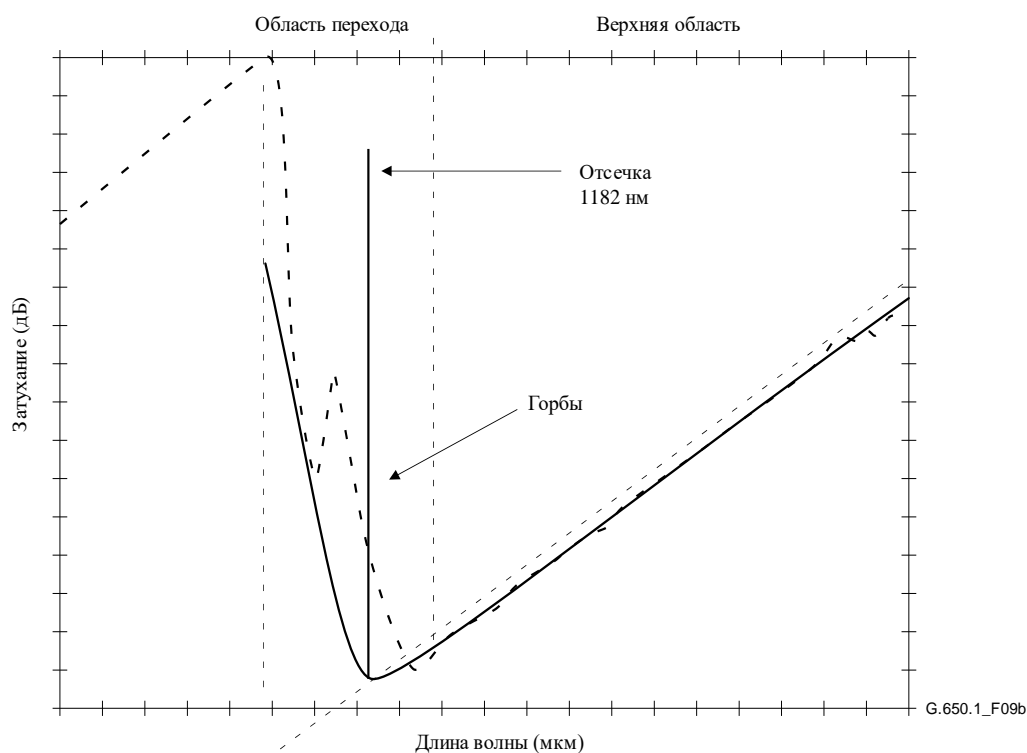


Рисунок 9б – График (с горбом) отсечки эталонного многомодового волокна

ПРИМЕЧАНИЕ. – По определению затухание моды LP_{11} в тестируемом образце на длине волны отсечки составляет 19,3 дБ.

5.3.1.4 Представление результатов

- а) Схема испытательной установки;
- б) условия возбуждения волокна;
- в) тип эталонного образца;
- г) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо);

- e) идентифицирующие сведения о волокне;
- f) диапазон длины волн измерения;
- g) волоконная длина волны отсечки;
- h) график $a(\lambda)$ (если требуется);
- i) метод интерполяции (если используется).

5.3.2 Альтернативный метод тестирования для λ_c – метод с разрезной оправкой

5.3.2.1 Общие положения (как в разделе 5.3.1.1)

5.3.2.2 Испытательная аппаратура

5.3.2.2.1 Источник света (как в разделе 5.3.1.2.1)

5.3.2.2.2 Модуляция (как в разделе 5.3.1.2.2)

5.3.2.2.3 Условия возбуждения волокна (как в разделе 5.3.1.2.3)

5.3.2.2.4 Модовый фильтр оболочки (как в разделе 5.3.1.2.4)

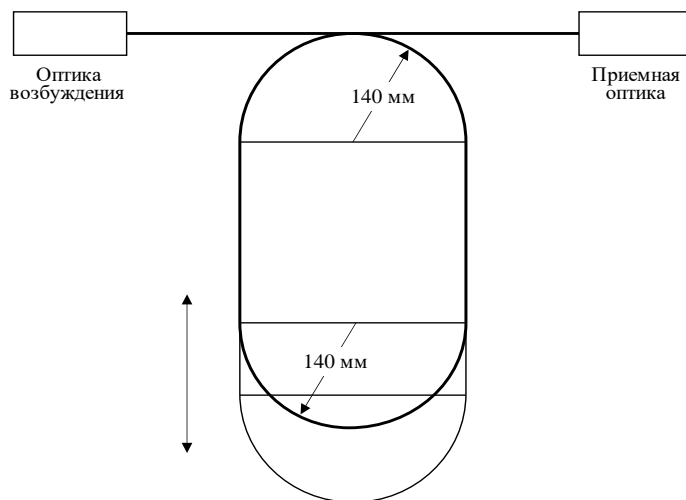
5.3.2.2.5 Оптически детектор (как в разделе 5.3.1.2.5)

5.3.2.3 Процедура измерения

5.3.2.3.1 Стандартный тестируемый образец

Измерение проводят на отрезке волокна длиной 2 м. Волокно вставляют в испытательное устройство и изгибают так, чтобы образовалась слабо напряженная петля. Петля должна содержать полный виток (360°), состоящий из двух дуг (по 180° каждая) радиусом 140 мм, соединенных касательными. Оставшаяся часть волокна должна быть практически свободна от внешних напряжений. Хотя отдельные случайные изгибы большего радиуса допустимы, они не должны вносить существенного изменения в результат измерений. Выходная мощность $P_1(\lambda)$ регистрируется относительно λ в достаточно широком диапазоне вокруг ожидаемой длины волны отсечки.

Как показано на рисунке 10, нижнюю полукруглую оправку перемещают так, чтобы выбрать всю слабины натяжения петли волокна без необходимости перемещения оптики возбуждения или приемной оптики и без какого-либо значительного натяжения образца волокна.



G.650.1_F10

Рисунок 10 – Прокладка волокна – длина волны отсечки по методу с разрезной оправкой

5.3.2.3.2 Передача через эталонный образец (как в разделе 5.3.1.3.2)

5.3.2.3.3 Расчеты (как в разделе 5.3.1.3.3)

5.3.2.3.4 Определение волны отсечки (как в разделе 5.3.1.3.4)

5.3.2.4 Представление результатов (как в разделе 5.3.1.4)

5.3.3 Эталонный метод измерения длины волны отсечки (λ_{cc}) волоконного кабеля – метод передаваемой мощности

5.3.3.1 Общие положения

Это измерение длины волны отсечки, выполняемое с одномодовыми волоконными кабелями в условиях прокладки, когда имитируется минимальная длина кабеля снаружи станции, призвано обеспечить эффективную работу в одномодовом режиме при длинах волн, превышающих заданную длину волны.

Метод передаваемой мощности основан на изменении с длиной волны мощности, передаваемой при определенных условиях по тестируемому волоконному кабелю, по сравнению с эталонной передаваемой мощностью. Эту эталонную мощность можно получить двумя способами:

- a) на тестируемом волоконном кабеле с петлей меньшего радиуса; или
- b) на коротком (1–2 м) отрезке многомодового волокна.

5.3.3.2 Испытательная аппаратура

5.3.3.2.1 Источник света (как в разделе 5.3.1.2.1)

5.3.3.2.2 Модуляция (как в разделе 5.3.1.2.2)

5.3.3.2.3 Условия возбуждения волокна (как в разделе 5.3.1.2.3)

5.3.3.2.4 Фильтр мод оболочки (как в разделе 5.3.1.2.4)

5.3.3.2.5 Оптический детектор (как в разделе 5.3.1.2.5)

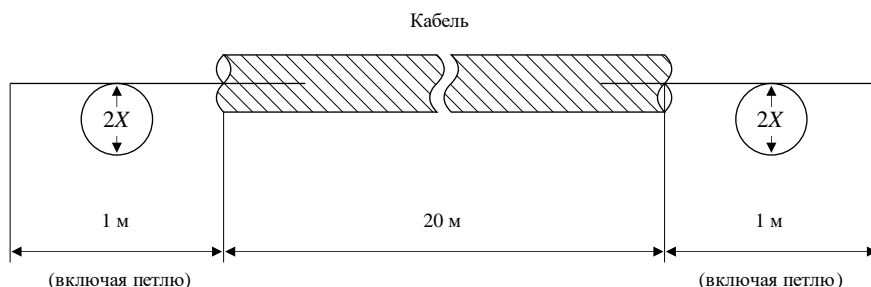
5.3.3.3 Процедура измерения

5.3.3.3.1 Стандартный тестируемый образец

Измерение проводят на длинном отрезке одномодового волоконного кабеля. Кабель длиной 22 м подготавливают путем зачистки участков волоконного кабеля длиной 1 м с каждого конца, а оставшуюся часть длиной 20 м укладывают без каких-либо мелких изгибов, которые могут повлиять на измеряемые значения. Для имитации эффектов, вносимых приспособлением для сращивания кабеля, на каждом зачищенном от кабеля участке волокна создается по одной петле радиусом $X = 40$ мм (см. рисунок 11). Вторичное покрытие (если оно имеется) на зачищенных от кабеля участках волокна остается нетронутым. Отдельные случайные изгибы больших радиусов в волокне или кабеле допустимы, но они не должны вносить существенных изменений в результаты измерения. Выходная мощность $P_1(\lambda)$ регистрируется относительно λ в достаточно широком диапазоне вокруг ожидаемой длины волны отсечки.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Петли предназначены для имитации условий прокладки кабеля.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Две петли радиусом $X = 40$ мм на одном конце можно заменить одной петлей на каждом конце.



G.650.1_F11

Рисунок 11 – Условие прокладки для измерения длины волны отсечки волоконного кабеля

5.3.3.3.2 Передача через эталонный образец (как в разделе 5.3.1.3.2)

5.3.3.3.3 Вычисления

Логарифмическое отношение передаваемой мощности $P_1(\lambda)$ к $P_i(\lambda)$ рассчитывается следующим образом:

$$R(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (5-13)$$

где $i = 2$ или 3 соответственно для методов а) или б) в разделе 5.3.1.3.2.

5.3.3.3.4 Определение длины волны отсечки волоконного кабеля

Расчеты и метод определения кабельной длины волны отсечки λ_{cc} являются теми же, что и для волоконной длины волны отсечки. См. разделы 5.3.1.3.3 и 5.3.1.3.4.

5.3.3.4 Представление результатов

- а) Схема испытательной установки;
- б) условия возбуждения волокна;
- в) тип эталонного образца;
- г) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо);
- д) идентифицирующие сведения о волокне и кабеле;
- е) диапазон длины волн измерения;
- ж) длина волны отсечки волоконного кабеля;
- з) график кривой $R(\lambda)$ (если требуется).

5.3.4 Альтернативный метод тестирования для определения длины волны отсечки (λ_{cc}) волоконного кабеля

5.3.4.1 Общие положения

Измерение длины волны отсечки выполняют на одномодовом волокне, зачищенном от кабеля, в условиях прокладки кабеля, и это гарантирует, что результаты измерения λ_{cc} будут согласованы с результатами измерений, проведенных с волоконными кабелями.

При этом методе используется изменение с длиной волны мощности, передаваемой при определенных условиях по короткому отрезку тестируемого волокна, по сравнению с эталонной передаваемой мощностью. Эту эталонную мощность можно получить двумя способами:

- а) на тестируемом волокне с петлей малого радиуса; или
- б) на коротком (1–2 м) отрезке многомодового волокна.

5.3.4.2 Испытательная аппаратура

5.3.4.2.1 Источник света (как в разделе 5.3.1.2.1)

5.3.4.2.2 Модуляция (как в разделе 5.3.1.2.2)

5.3.4.2.3 Условия возбуждения волокна (как в разделе 5.3.1.2.3)

5.3.4.2.4 Фильтр мод оболочки (как в разделе 5.3.1.2.4)

5.3.4.2.5 Оптический детектор (как в разделе 5.3.1.2.5)

5.3.4.3 Процедура измерения

5.3.4.3.1 Стандартный тестируемый образец

Измерение проводится на длинном отрезке одномодового волокна, зачищенного от кабеля. Вторичное покрытие (если оно имеется) на зачищенных от кабеля участках волокна остается нетронутым. Волокно длиной 22 м помещают в испытательную установку; внутренние 20 м скручены с образованием слабо напряженных петель радиусом $r \geq 140$ мм.

На каждом конце волокна образована петля радиусом $X = 40$ мм (см. рисунок 12). Выходную мощность $P_1(\lambda)$ регистрируют относительно λ в достаточно широком диапазоне вокруг ожидаемой длины волны отсечки λ_{cc} .

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Петли предназначены для имитации условий прокладки.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Две петли радиусом $X = 40$ мм на одном конце можно заменить одной петлей на каждом конце.

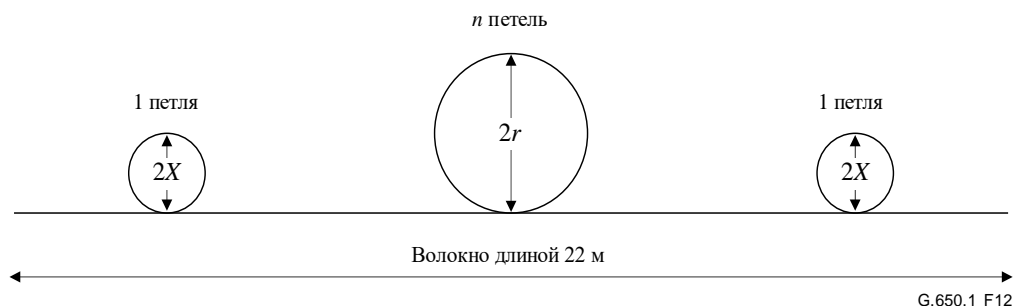


Рисунок 12 – Условие прокладки для измерения λ_{cc} на волокнах, зачищенных от кабеля

5.3.4.3.2 Передача через эталонный образец (как в разделе 5.3.1.3.2)

5.3.4.3.3 Вычисления (как в разделе 5.3.1.3.3)

5.3.4.3.4 Определение длины волны отсечки волоконного кабеля (как в разделе 5.3.3.3.4)

5.3.4.4 Представление результатов

Как в разделе 5.3.3.4 со следующим дополнением:

- значение r .

5.4 Методы изменения затухания

Испытания на предмет затухания предназначены для обеспечения возможности присваивать волокнам той или иной длины определенные значения затухания, так чтобы путем сложения этих отдельных значений затухания можно было получить полное затухание волокна по всей его длине.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Значения затухания, указанные для заводской длины волокна, измеряются при комнатной температуре (то есть одно значение в диапазоне от 10°C до 35°C).

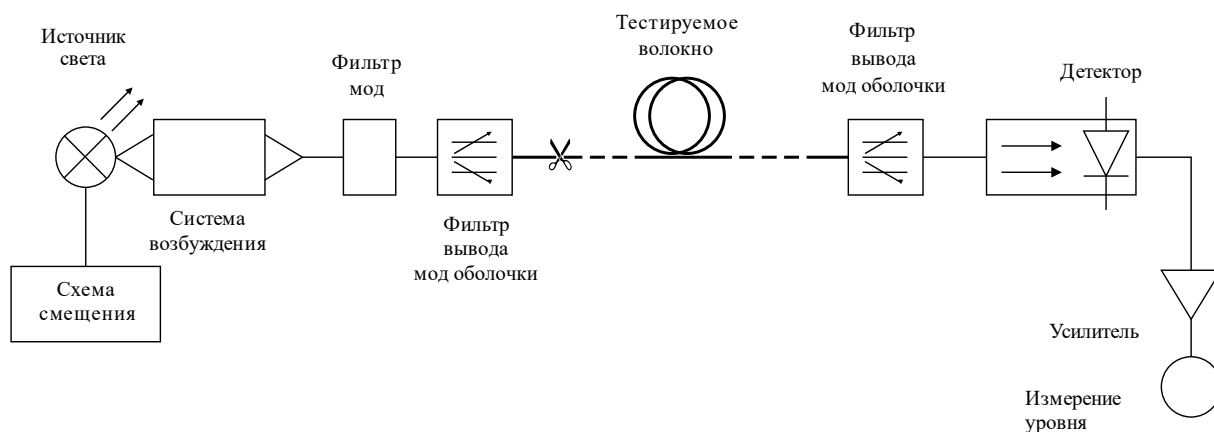
5.4.1 Эталонный метод тестирования – метод обрыва

5.4.1.1 Общие положения

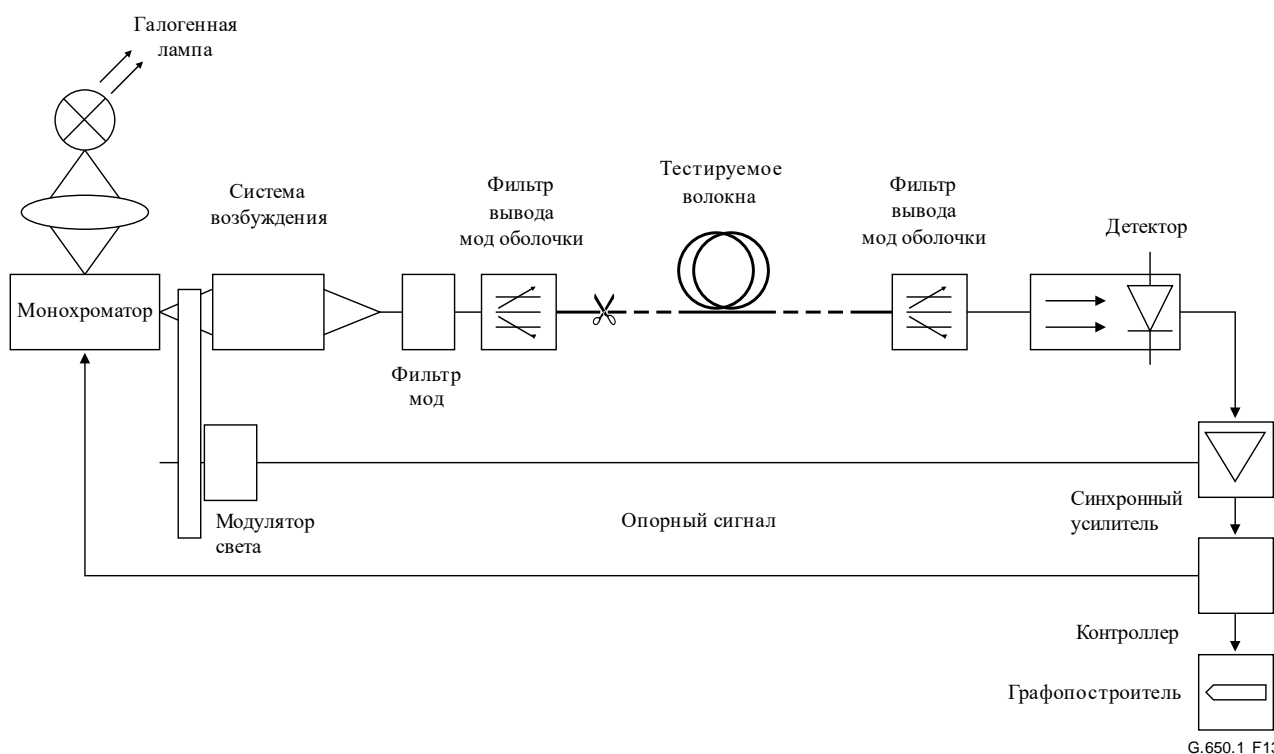
Метод обрыва – это прямое применение определения, когда уровни мощности P_1 и P_2 измеряются в двух точках волокна без изменения входных условий. P_2 – это мощность, выходящая из дальнего конца волокна, а P_1 – мощность, выходящая из точки вблизи входа после обрезания волокна.

5.4.1.2 Испытательная аппаратура

Измерения могут проводиться на одной или более точечных длинах волн или же может потребоваться спектральная характеристика в некотором диапазоне длин волн. В качестве примеров на рисунке 13 показаны схемы подходящего испытательного оборудования для измерения потерь на одной длине волны или в спектре.



а) Испытательная установка для измерения потерь на одной длине волны



б) Испытательная установка для измерения потерь в спектре длин волн

Рисунок 13 – Метод обрыва

5.4.1.2.1 Оптический источник

Следует использовать подходящий источник излучения, такой как лампа, лазер или светоизлучающий диод. Выбор источника зависит от типа измерения. Источник света должен быть стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для завершения процедуры измерения. Ширину спектральной линии (FWHM) выбирают так, чтобы она была узкой по сравнению с любыми характеристиками спектрального затухания волокна.

5.4.1.2.2 Модуляция

Для повышения отношения сигнал/шум в приемнике принято модулировать источник света. Если такая процедура используется, детектор должен быть связан с системой обработки сигналов, синхронизированной с частотой источника модуляции. Чувствительность системы детектора должна быть практически линейной.

5.4.1.2.3 Условия возбуждения волокна

Используемые условия возбуждения должны быть достаточными для возбуждения основной моды. Например, подходящими методами возбуждения могут быть:

- a) соединение с волокном;
- b) возбуждение с помощью подходящей оптической системы.

5.4.1.2.4 Фильтр мод

Необходимо следить за тем, чтобы по длине отрезка не распространялись моды более высокого порядка. В этих случаях может потребоваться ввести изгиб, чтобы исключить такие моды.

5.4.1.2.5 Фильтр вывода мод оболочки

Фильтр вывода мод оболочки способствует преобразованию мод оболочки в моды излучения, в результате чего моды оболочки выводятся из волокна.

5.4.1.2.6 Оптический детектор

Должен использоваться подходящий детектор, перехватывающий полностью все излучение, выходящее из волокна. Его спектральная характеристика должна соответствовать спектральной характеристике источника. Детектор должен быть однородным и иметь линейные характеристики чувствительности.

5.4.1.3 Процедура измерения

5.4.1.3.1 Подготовка тестируемого волокна

Концы волокна должны быть чистыми, гладкими и перпендикулярными оси волокна. Измерения на волоконных кабелях проводятся с волокном, не намотанным на барабан, так чтобы не было влияния микроизгибов, создаваемых поверхностью барабана.

5.4.1.3.2 Процедура

- 1) Тестируемое волокно помещают в измерительную установку. Регистрируют выходную мощность P_2 .
- 2) При сохранении тех же условий возбуждения волокно обрезают до получения требуемой длины отрезка (например, в двух метрах от точки возбуждения). При необходимости фильтр вывода мод оболочки переносят и регистрируют выходную мощность P_1 на длине обрезания.
- 3) Используя P_1 и P_2 , можно рассчитать затухание волокна между точками измерения P_1 и P_2 , исходя из определения уравнений (3-4) и (3-5).

5.4.1.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки, включая тип источника, длину волны источника и ширину спектральной линии (FWHM);
- b) идентифицирующие сведения о волокне;
- c) длина образца;
- d) затухание образца в дБ;
- e) коэффициент затухания в дБ/км;
- f) указание точности и повторяемости;
- g) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо).

5.4.2 Первый альтернативный метод тестирования – метод обратного рассеяния

5.4.2.1 Общие положения

Описывается метод определения коэффициента затухания одномодового оптического волокна на основе измерений двунаправленного обратного рассеяния. Этот метод можно также применять для проверки равномерности затухания, оптической непрерывности, физических разрывов, потерь на сращивание и длины волокна.

В конкретных случаях, например для проверки изменения наклона кривой обратного рассеяния в волоконных кабелях, можно применять измерения обратного рассеяния в одном направлении.

Процедуры калибровки оборудования для измерения обратного рассеяния (для одномодовых волокон) приведены в [IEC 61746-1].

5.4.2.2 Испытательная аппаратура

5.4.2.2.1 Общие положения

Уровень обратно рассеянного оптического сигнала обычно мал и близок к уровню шума. Поэтому для повышения отношения сигнал/шум и динамического диапазона измерения, как правило, используют источник света большой мощности и систему обработки детектируемого сигнала. Кроме того, для достижения компромисса между разрешением и динамическим диапазоном может потребоваться регулировка ширины импульса.

Необходимо следить за тем, чтобы не распространялись моды более высокого порядка.

Пример установки показан на рисунке 14(а).

5.4.2.2.2 Оптический источник

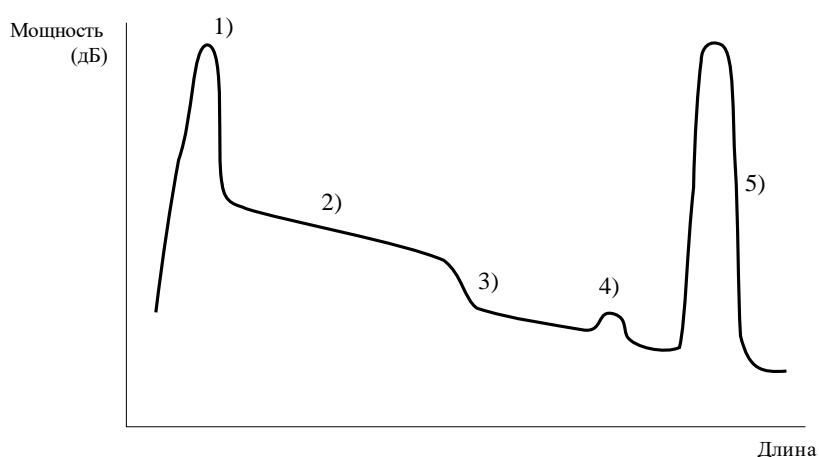
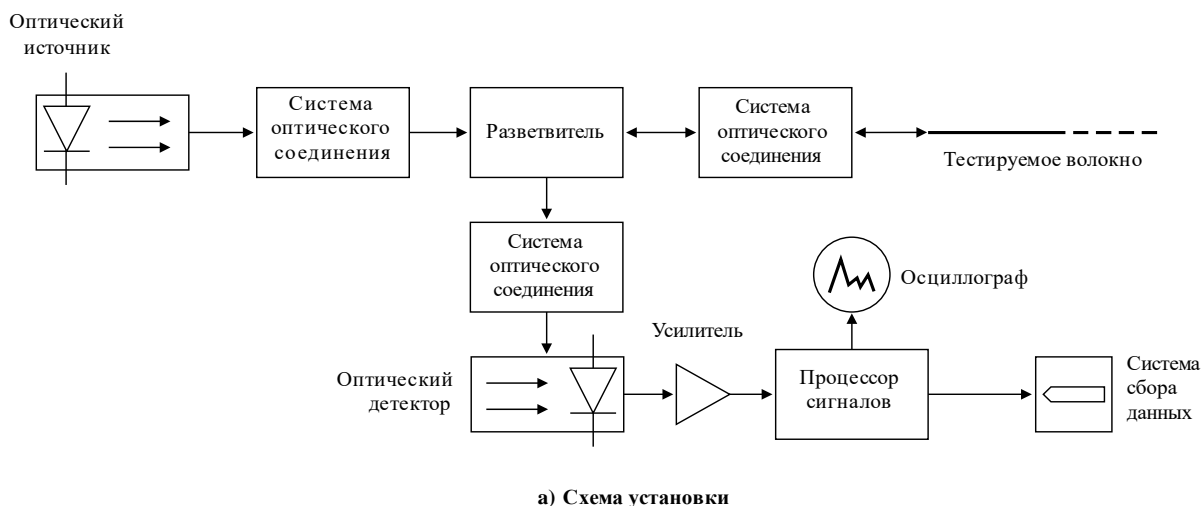
Используется стабильный оптический источник большой мощности на соответствующих длинах волн, которые регистрируются. Ширина и частота повторения импульсов должны соответствовать требуемому разрешению и длине волокна.

5.4.2.2.3 Система оптического соединения

Для эффективного ввода луча в тестируемое волокно, разветвитель или оптический детектор используется оптическая система. Можно добавить различные устройства для уменьшения отражений Френеля, такие как материалы, согласующие показатели преломления.

5.4.2.2.4 Разветвитель

Для ввода излучения источника в волокно и излучения обратного рассеяния в детектор, избегая при этом прямого соединения источника с детектором, требуется разветвитель. Следует избегать использования устройств с поляризационно зависимыми свойствами.



б) Пример кривой потерь из-за однонаправленного обратного рассеяния

Рисунок 14 – Метод обратного рассеяния

5.4.2.2.5 Оптический детектор

Детектор используется таким образом, чтобы перехватывать максимально возможную мощность обратного рассеяния. Характеристика детектора должна быть совместима с уровнями и длинами волн детектируемого сигнала. Для измерений затухания требуется практически линейная характеристика детектора.

5.4.2.2.6 Усилитель

За оптическим детектором должен следовать соответствующий усилитель, чтобы довести уровень сигнала до адекватного значения для его обработки. Полоса пропускания усилителя должна обеспечивать компромисс между временным разрешением и подавлением шума.

5.4.2.2.7 Процессор сигналов

Требуется процессор сигналов, способный увеличить отношение сигнал/шум, вычислить кривую затухания по двум кривым потерь однонаправленного обратного рассеяния и обеспечить логарифмическую характеристику в системе детектирования. К процессору сигналов могут быть подключены осциллограф для прямого просмотра кривой обратного рассеяния и система сбора данных для хранения результатов измерений.

5.4.2.2.8 Фильтр вывода мод оболочки

См. раздел 5.4.1.2.5.

5.4.2.2.9 Конфигурация образца волокна

Измерение может производиться с использованием волокна в разных конфигурациях (например, в виде волоконного кабеля, на соответствующей транспортировочной катушке или согласно требованиям эталонного метода тестирования).

5.4.2.3 Процедура измерения

- a) Выровняйте тестируемое волокно по системе оптического соединения.
- b) Измерьте две кривых потерь однонаправленного обратного рассеяния по одной с каждого конца волокна. Пример такой однонаправленной кривой показан на рисунке 14(b). Каждая кривая потерь обратного рассеяния анализируется процессором сигналов и регистрируется по логарифмической шкале, кроме участков на двух концах кривых – из-за отражений при соединении и от устройств разветвления, а также от концов волокна (см. части кривой 1) и 5) на рисунке 14(b)).
- c) Оцените длину L_f волокна по временному интервалу между двумя концами кривой потерь обратного рассеяния T_f и показателю групповой задержки N волокна: $L_f = c \cdot T_f / N$ (c – скорость света в пустоте).
- d) Получите кривую потерь двунаправленного обратного рассеяния с использованием двух измеренных и записанных кривых, характеризующих потери однонаправленного обратного рассеяния в соответствии с описываемой ниже процедурой.

Пусть $a(x)$ и $b(z)$ – это функции, описывающие две кривые потерь однонаправленного обратного рассеяния, выраженные в децибелах, причем x и z – расстояния от концов волокна, ближайших к соответствующему месту возбуждения. Кривая потерь двунаправленного обратного рассеяния определяется следующим образом:

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2}. \quad (5-14)$$

- e) Получите коэффициент сквозного затухания волокна в соответствии с описываемой ниже процедурой.

Коэффициент затухания $A(x_0, x_1)$ для сегмента волокна, определяемого положениями концов x_0 и x_1 (при $x_0 < x_1$), определяется следующим образом:

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0}. \quad (5-15)$$

Это выражение можно оценить путем подбора линейным методом наименьших квадратов по данным с участка между x_0 и x_1 .

Коэффициент сквозного затухания волокна определяется так же, как в уравнении (5-15), по точкам данных, расположенных как можно ближе к концам. Однако эти точки должны находиться за пределами мертвой зоны и области отражения от концов (см. области 1) и 5) на рисунке 14(b)).

5.4.2.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки;
- b) используемый способ обработки сигналов;
- c) дата тестирования;
- d) идентификационные данные и длина тестируемого образца;

- e) ширина импульса;
- f) длина волн(ы) тестирования;
- g) коэффициент сквозного затухания волокна в дБ/км;
- h) кривая потеря двунаправленного обратного рассеяния.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Измерения однонаправленного обратного рассеяния получены только с одной функцией $a(x)$. Полный анализ записанных кривых, характеризующих потери однонаправленного обратного рассеяния (рисунок 14(b)), показывает, что независимо от измерений затухания с использованием метода обратного рассеяния можно наблюдать многие явления, в том числе:

- 1) отражение от разветвителей и соединительных устройств на входном конце волокна;
- 2) зону наклона инвариантного обратного рассеяния;
- 3) разрыв из-за локального дефекта, сращивания или соединения;
- 4) изменение наклона обратного рассеяния с длиной;
- 5) колебания на выходном конце волокна;
- 6) изменение затухания, например, с температурой.

5.4.3 Второй альтернативный метод тестирования – метод вносимых потерь

5.4.3.1 Общие положения

Метод вносимых потерь состоит из оценки потерь мощности, вызванных вставкой тестируемого волокна между возбуждающей и приемной системами, предварительно взаимосвязанными (исходное условие). Таким образом значения мощности P_1 и P_2 оцениваются менее простым способом, чем при использовании метода обрыва. Поэтому данный метод не предназначен для использования с волокном и кабелями заводской длины.

Метод вносимых потерь менее точен, чем метод обрыва, но имеет то преимущество, что тестируемое волокно не разрушается, и на обоих концах могут быть закреплены соединительные полуразъемы. Поэтому он особенно хорошо подходит для полевых условий и в основном предназначен для использования с отрезками кабеля, снабженными разъемами.

Далее рассматриваются два варианта этого метода (см. рисунок 15); они различаются характером систем возбуждения и приема, как указано ниже. Возможны условия измерения между вариантами а) и б), они обсуждаются в примечании 2 к разделу 5.4.3.3.2.

В варианте а) на результаты влияет качество полуразъемов, которые могут быть закреплены на тестируемом волокне (и качество используемых соединительных устройств в целом); в варианте б) это влияние почти исключено. Как следствие, вариант б) в общем случае демонстрирует более высокую точность и больше подходит, когда требуется измерить фактическое затухание только в волокне. И наоборот, когда тестируемая секция волокна снабжена полуразъемами и должна каскадно включаться с другими элементами, результаты варианта а) более значимы, поскольку они учитывают отклонение от номинальных потерь, вызванное полуразъемами.

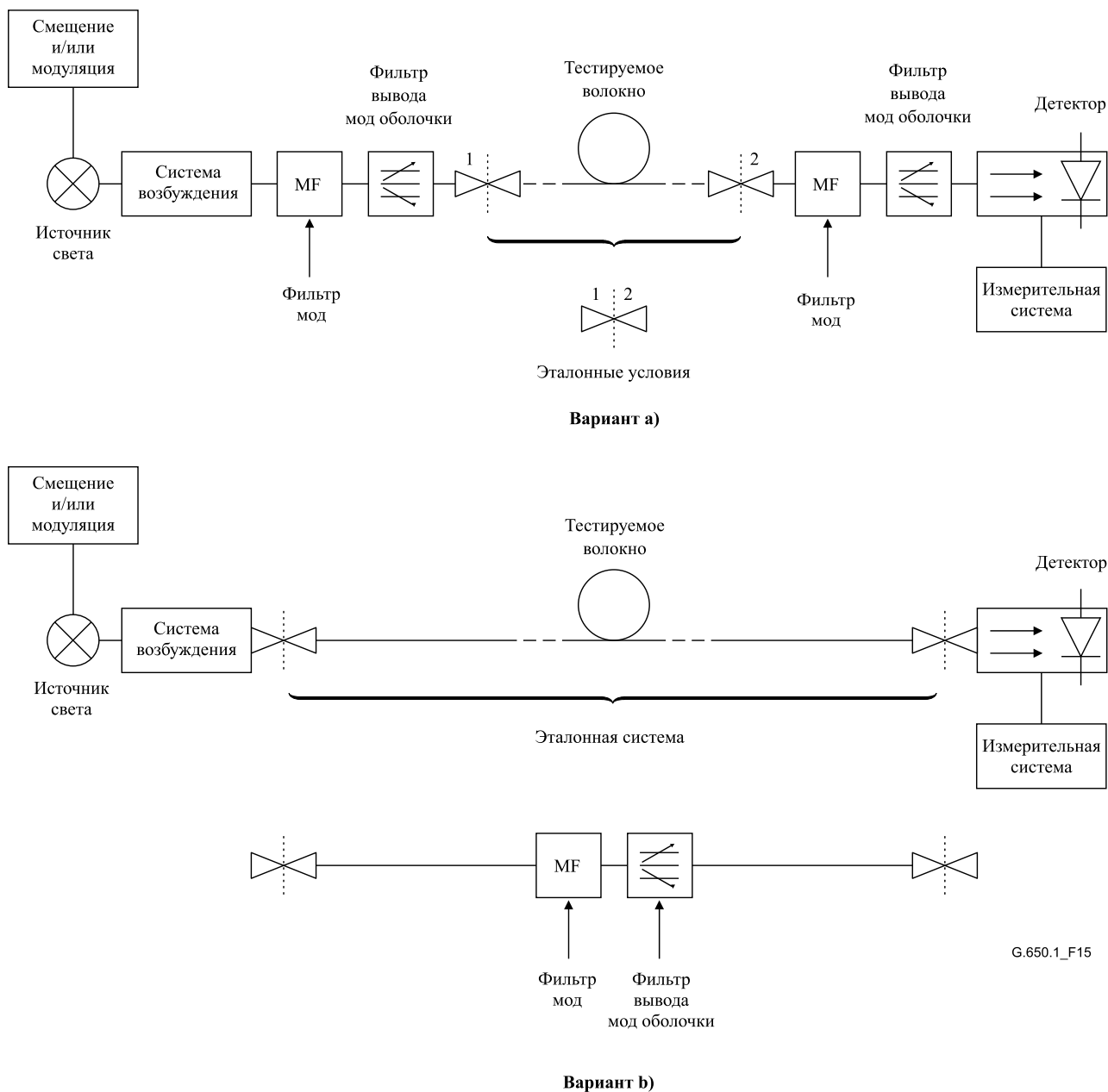


Рисунок 15 – Типичные схемы для измерения методом вносимых потерь

5.4.3.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема испытательной установки показана на рисунке 15. Измерения могут проводиться на одной или более длинах волн или же может потребоваться спектральная характеристика в некотором диапазоне длин волн.

5.4.3.2.1 Оптический источник

Должен использоваться подходящий источник со стабильной интенсивностью излучения, такой как лампа, лазер или светоизлучающий диод. Если используется источник с широким спектром излучения, то за ним устанавливается устройство выбора длины волны (или же это устройство может быть установлено перед детектором). В любом случае должна быть известна номинальная длина волны источника (возможно, с учетом устройства выбора длины волны).

Ширина спектра (FWHM) должна быть узкой по сравнению с любыми характеристиками спектрального затухания в волокне.

5.4.3.2.2 Модуляция

См. раздел 5.4.1.2.2.

5.4.3.2.3 Условия возбуждения волокна

Для варианта а)

Источник соединяется с коротким отрезком одномодового волокна с теми же номинальными характеристиками, что и у тестируемого волокна, и оснащается фильтром мод и фильтром вывода мод оболочки (см. ниже).

Указанное выше одномодовое волокно соединяется с тестируемым волокном с помощью очень точного соединительного устройства для минимизации потерь на соединении и обеспечения значимых результатов. Если тестируемое волокно оснащено полуразъемом, то на возбуждающем волокне должен быть закреплен совместимый высококачественный полуразъем.

Для варианта б)

Источник соединяется через подходящую оптику с тестируемым волокном таким образом, чтобы интенсивность ближнего поля и дальнего поля пятна возбуждения на торцевой поверхности входного конца волокна была почти однородной в пределах диаметра модового поля и интенсивности дальнего поля тестируемого волокна.

В системе могут использоваться линзы и установочное устройство для волокна; иначе свет может вводиться в многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, соединяемое с тестируемым волокном.

Это достигается с помощью любого соединительного устройства или полуразъема, совместимыми с теми устройствами, которыми заканчивается тестируемое волокно.

5.4.3.2.4 Эталонная система (только вариант б))

Эта система состоит из короткого отрезка одномодового волокна с теми же номинальными характеристиками, что и у тестируемого волокна. Волокно оснащается фильтром мод и фильтром вывода мод оболочки; оба устройства не должны вносить никаких потерь в основную моду.

5.4.3.2.5 Фильтр мод

Фильтр мод должен допускать распространение по волокну только основной моды. Например, он может быть реализован с помощью надлежащего изгиба волокна.

5.4.3.2.6 Фильтр вывода мод оболочки

Должен применяться фильтр вывода мод оболочки, способствующий преобразованию мод оболочки в моды излучения. Если само волокно не допускает распространения мод оболочки, то это устройство не требуется.

5.4.3.2.7 Оптическое детектирование

Спектральная характеристика оптического детектора должна быть совместима со спектральной характеристикой источника. Он должен иметь линейные характеристики чувствительности.

Для варианта а)

Детектор подключается к одномодовому волокну с теми же номинальными характеристиками, что и у тестируемого волокна. Волокно должно быть оснащено фильтром мод и фильтром вывода мод оболочки.

При соединении с тестируемым волокном используются те же указания, что и в разделе 5.4.3.2.3 для варианта а).

Для варианта б)

Конец тестируемого волокна располагается перед детектором.

Должен использоваться надлежащий детектор, перехватывающий полностью все излучение, выходящее из волокна. Детектор должен быть пространственно однородным.

В качестве альтернативы детектор может быть подключен к многомодовому волокну со ступенчатым профилем показателя преломления. Это волокно соединяется с тестируемым волокном любым соединительным устройством или полуразъемом, совместимыми с теми устройствами, которыми заканчивается тестируемое волокно.

5.4.3.3 Процедура измерений

5.4.3.3.1 Подготовка тестируемого волокна

См. раздел 5.4.1.3.1.

Если волокно оснащено разъемами, необходима соответствующая процедура зачистки.

5.4.3.3.2 Процедура

- 1) Когда выбрана длина волны измерения, сначала измеряется мощность P_1 следующим образом.

Для варианта а)

Волокно системы возбуждения соединяется с волокном приемной системы. Затем принимаемая мощность P_1 регистрируется.

Для варианта б)

Между системой возбуждения и приемной системой подключается эталонная система. Затем принимаемая мощность P_1 регистрируется.

- 2) Далее между системой возбуждения и приемной системой подключается тестируемое волокно. Затем принимаемая мощность P_2 регистрируется.
- 3) Наконец, затухание A на отрезке волокна рассчитывается следующим образом:

для варианта а)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \text{ (дБ)}, \quad (5-16a)$$

где C_r , C_1 и C_2 – номинальные средние потери (в дБ) в соединениях в эталонных условиях соответственно на входе тестируемого волокна и на его выходе;

для варианта б)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (дБ)}. \quad (5-16b)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Использование варианта б) предполагает, что тестируемое волокно не допускает распространения к приемному концу мод, отличных от основной.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Также возможно измерение затухания в волокне с помощью гибридной испытательной установки при использовании системы возбуждения как в варианте а) и приемной системы как в варианте б), или наоборот.

Процедура измерения P_1 в обоих случаях аналогична указанной выше для варианта а); эталонная система не требуется, а система возбуждения подключается непосредственно к приемной системе.

В обоих случаях затухание на отрезке волокна можно рассчитать следующим образом:

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - C_a \text{ (дБ)}, \quad (5-17)$$

где C_a – номинальный средний уровень потерь (в дБ) на соединении между тестируемым волокном и той частью испытательной установки (возбуждения или приема), которая относится к варианту а).

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Присущая варианту а) способность оценивать поведение полуразъемов не означает использование этого варианта всякий раз, когда требуется такая оценка.

Даже на том конце, где требуется оценка полуразъема, в качестве альтернативы может использоваться установка по варианту б), в которой одномодовый кабель предварительно соединяется с тестируемым волокном. Из измеренного уровня потерь вычитается номинальный уровень потерь в разъеме между кабелем и волокном.

На практике испытательная аппаратура выбирается так, чтобы свести к минимуму количество источников ошибок, с учетом доступных приборов и соединительных устройств. Когда нужно оценить оба полуразъема, наилучшим решением, как правило, является использование гибридной установки (*a*-возбуждение, *b*-прием) плюс кабель на приемном конце.

5.4.3.4 Представление результатов

- а) Схема испытательной установки, включая тип источника, длину волны источника, ширину спектра (FWHM), используемую для измерения, и вариант а) или б);
- б) идентифицирующие сведения о волокне;
- в) длина отрезка волокна и состояние концов (наличие полуразъемов);
- г) затухание на указанном отрезке волокна в дБ;
- д) коэффициент затухания в дБ/км;
- е) указание точности и повторяемости (следует надлежащим образом учитывать повторяемость потерь на соединении);
- ж) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо).

5.4.4 Третий альтернативный метод тестирования – моделирование спектрального затухания

5.4.4.1 Общие положения

Коэффициент затухания в волокне, распределенный по ширине спектра длин волн, можно рассчитать с помощью характеристической матрицы M и вектора v . Этот вектор содержит измеренные коэффициенты затухания небольшого количества (от трех до пяти) длин волн (например, 1310 нм, 1360 нм, 1380 нм, 1410 нм, 1550 нм и/или 1625 нм).

При одном подходе поставщик волокна или кабеля предоставляет матричную характеристику своего продукта, а моделируемое спектральное затухание является вектором w , рассчитываемым как произведение M и v :

$$w = M \cdot v.$$

В качестве альтернативы, если используется общая матрица, то поставщик предоставляет вектор поправочных коэффициентов, так что уравнение прогноза принимает следующий вид:

$$W = w + e,$$

где

W : модифицированный вектор;

w : определяется из формулы $w = M \cdot v$;

e : вектор поправочных коэффициентов.

Общая матрица – это характеристическая матрица, которую можно применять к волокнам разных конструкций от разных поставщиков (предположительно в рамках одного и того же типа волокна) и которая определяется и/или вводится в действие органом по стандартизации, отдельным заказчиком/конечным пользователем или другой отраслевой организацией. Отдельные поставщики могут сравнивать с этой матрицей свои продукты, разрешая вопросы по различиям с помощью корректирующего вектора e .

5.4.4.2 Испытательная аппаратура

Поскольку этот метод включает в себя расчет с использованием ранее определенных значений, никакого специального устройства не требуется. Для получения измеренных значений, с которыми производятся вычисления, можно использовать любой из рекомендованных методов тестирования (метод обрыва согласно разделу 5.4.1, метод обратного рассеяния согласно разделу 5.4.2, метод вносимых потерь согласно разделу 5.4.3).

В случае конфликта прямые измерения затухания имеют приоритет перед этим методом.

5.4.4.3 Процедура расчета

Коэффициент затухания волокна, распределенный по спектру длин волн, можно рассчитать по формуле $w = M \cdot v$. Вектор v содержит измеренные коэффициенты затухания для небольшого количества (от трех до пяти) длин волн прогнозирующего устройства (например, 1310 нм, 1360 нм, 1380 нм, 1410 нм, 1550 нм и/или 1625 нм), измеренные с использованием одного из рассмотренных ранее методов измерения затухания. Умножение матрицы M на вектор v дает другой вектор w , содержащий расчетные коэффициенты затухания на многих длинах волн (например, для ряда длин волн от 1240 до 1600 нм с интервалом 10 нм).

Матрица M задается следующим образом:

$$\begin{array}{ccc} A_{11} & A_{12} \dots\dots\dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} \dots\dots\dots & A_{2n} \\ " & " & \\ " & " & \\ " & " & \\ A_{m1} & A_{m2} \dots\dots\dots & A_{mn}, \end{array}$$

где m – количество длин волн, для которых оцениваются коэффициенты затухания, а n – количество волн прогнозирующего устройства. Пример такой матрицы для иллюстрации приведен в Дополнении III.

Стандартное отклонение разности между фактическими и прогнозируемыми коэффициентами затухания на каждой длине волны в пределах заданного диапазона длин волн должно быть меньше 0,xx дБ/км. Если указан дополнительный диапазон длин волн, может потребоваться другой допуск – 0,yy дБ/км. Значения xx и (yy) и диапазон(ы) длин волн согласовываются между пользователем и производителем.

Если оценка получена с использованием конкретной матрицы поставщика M , то никакой корректирующий вектор e не требуется.

Поскольку элементы как M , так и e определяются на статистической основе, элементы вектора w определяются как статистические. Чтобы указать точность прогнозируемых коэффициентов

затухания, поставщики волокна вместе с матрицей M и/или e предоставляют вектор, содержащий стандартное отклонение разности между фактическими и прогнозируемыми коэффициентами затухания (см. раздел 5.4.4.4).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для облегчения использования этой матрицы волокно следует регулярно измерять на длинах волн прогнозирующего устройства. Должно быть от 3 до 5 длин волн прогнозирующего устройства, причем явное предпочтение отдается меньшему количеству, если достигается достаточная точность.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Эта модель учитывает только затухание волокна, освобожденного от кабеля. Для того чтобы учесть влияние кабеля и окружающей среды, к w нужно добавить дополнительный вектор.

5.4.4.4 Представление результатов

В дополнение к элементам, которые представляются для метода тестирования, используемого при измерении коэффициентов затухания, укажите следующие элементы:

- a) прогнозируемое затухание и соответствующую длину волны;
- b) метод, используемый для получения измеренных значений коэффициента затухания (если требуется);
- c) матрицу, используемую для прогнозирования спектрального затухания, или поправочный вектор, если использовалась стандартная матрица (если требуется);
- d) вектор, содержащий стандартное отклонение значений разности между фактическими и прогнозируемыми коэффициентами затухания, полученными при построении матрицы (если требуется).

5.5 Методы тестирования для определения хроматической дисперсии

Хроматическая дисперсия изменяется с длиной волны. Некоторые методы и реализации основаны на измерении групповой задержки как функции длины волны с последующим выведением хроматической дисперсии и наклона дисперсии из производных (по длине волны) этих данных. Эти производные чаще всего берутся после привязки данных к математической модели. В других реализациях эталонного метода может допускаться прямое измерение на каждой из требуемых длин волн.

Для некоторых категорий волокна атрибуты хроматической дисперсии указываются в параметрах конкретной модели. В этих случаях модель, подходящая для определения указанных параметров, определяется соответствующей Рекомендацией. Для других категорий волокна дисперсия указывается в пределах заданного диапазона для одного или нескольких определенных интервалов длин волн. В последнем случае могут производиться прямые измерения для крайних значений длины волны или может использоваться та или иная модель аппроксимации, чтобы применить методы измерения групповой задержки или сохранить сокращенный набор параметров, которые можно использовать для вычисления дисперсии методом интерполяции для отдельных длин волн, для которых нельзя получить фактические значения посредством прямых измерений.

В Приложении А дается общее описание метода аппроксимации хроматической дисперсии и приводится ряд уравнений для аппроксимации, подходящих для использования с любыми методами измерения или категориями волокна.

5.5.1 Эталонный метод тестирования – метод фазового сдвига

5.5.1.1 Общие положения

Коэффициент хроматической дисперсии волокна получают исходя из результатов измерения относительной групповой задержки волн разной длины при распространении по волокну известной длины.

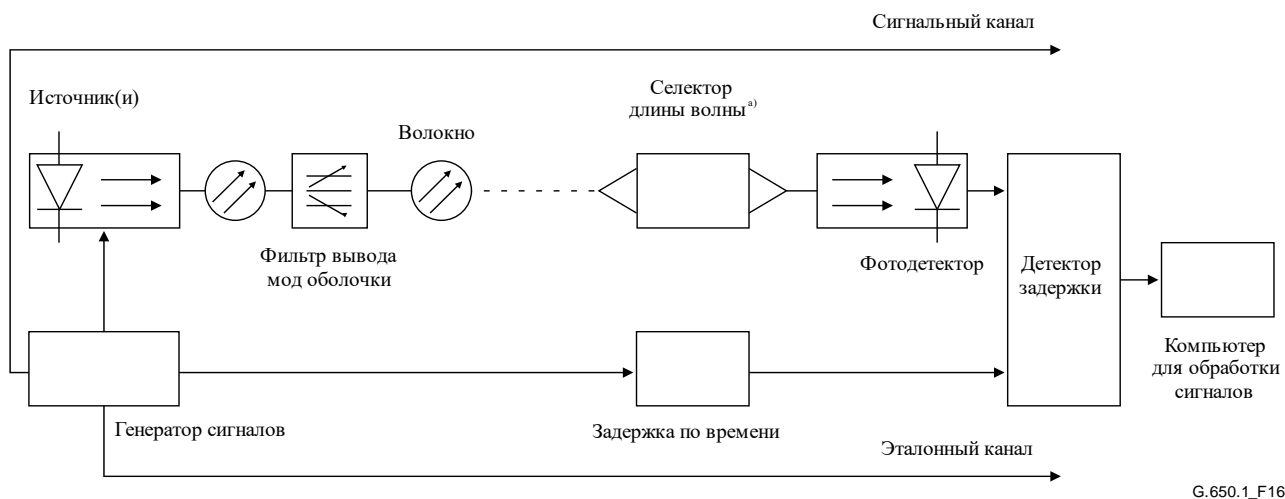
Групповая задержка измеряется в частотной области путем детектирования, регистрации и обработки фазового сдвига синусоидального модулирующего сигнала.

Хроматическую дисперсию можно измерять на фиксированной длине волны или в некотором диапазоне длин волн.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Дифференциальный фазовый сдвиг документирован в [IEC 60793-1-42], Приложение С.

5.5.1.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема испытательной установки показана на рисунке 16.



^{а)} При необходимости

Рисунок 16 – Типовая схема испытательной установки

5.5.1.2.1 Оптический источник

Источник света должен быть стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для выполнения процедуры измерения. В зависимости от диапазона длины волны измерения могут использоваться лазерные диоды (решетка лазерных диодов (LD-решетка)), лазерные диоды с регулируемой длиной волны (WTL) (например, лазер с внешним резонатором (ECL)), светодиоды или широкополосные источники (например, лазер Nd:YAG, использующий волокно с рамановским рассеянием).

В любом случае модулирующий сигнал должен быть таким, чтобы гарантировать достаточное временное разрешение при измерении групповой задержки.

5.5.1.2.2 Выбор длины волны

Для выбора и контроля длины волны, на которой измеряется групповая задержка, используются селектор и индикатор длины волны. В качестве селектора длины волны в зависимости от типа источника света и измерительной установки могут применяться оптический переключатель, монохроматор, рассеивающие устройства, оптические фильтры, оптопары или соединители. Выбор может осуществляться путем переключения электрических сигналов управления для источников света с разной длиной волны.

Контроль длины волны может осуществляться с помощью оптоволоконного соединителя и измерителя длины волны. Селектор и индикатор длины волны можно использовать либо на входе, либо на выходном конце тестируемого волокна.

Если к данным применяется математическая аппроксимация, то по крайней мере одна точка данных должна находиться в пределах 100 нм от λ_0 .

5.5.1.2.3 Детектор

Свет, выходящий из тестируемого волокна, эталонного волокна, оптического делителя и т. д., поступает в фотодетектор с подходящим для измерения отношением сигнал/шум и разрешением по времени. При необходимости за детектором располагается малошумящий усилитель.

5.5.1.2.4 Эталонный канал

Эталонный канал может состоять из электрической или оптической сигнальной линии. В этом канале может располагаться соответствующий генератор временной задержки. В некоторых случаях в качестве линии эталонного канала может использоваться само тестируемое волокно.

5.5.1.2.5 Детектор задержки

Детектор задержки измеряет сдвиг фаз между сигналами в эталонном и измеряемом каналах. Для этого можно использовать векторный вольтметр.

5.5.1.2.6 Процессор сигналов

Для уменьшения шума и/или дрожания измеряемого сигнала можно подключить процессор сигналов. При необходимости для управления оборудованием, сбора данных и их количественной оценки может использоваться цифровой компьютер.

5.5.1.3 Процедура измерения

Тестируемое волокно надлежащим образом соединяется с источником и детектором через селектор длины волны или оптический делитель и т. д. При необходимости может быть выполнена калибровка хроматической задержки источника. Должен быть достигнут подходящий компромисс между разрешением по длине волны и уровнем сигнала. Если тестируемое волокно не используется также в качестве линии эталонного канала, то во время измерения его температура должна быть достаточно стабильной.

Фазовый сдвиг между сигналами в эталонной и измеряемой линиях на рабочей длине волны измеряется детектором задержки. Для получения коэффициента хроматической дисперсии на рабочей длине волны используется способ обработки данных, соответствующий типу модуляции. При необходимости может выполняться спектральное сканирование групповой задержки в зависимости от длины волны; по измеренным значениям можно построить соответствующую сглаженную кривую.

Групповая временная задержка выводится из соответствующего фазового сдвига ϕ по формуле $\tau = \phi / (2\pi f)$, где f – частота модуляции.

5.5.1.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки;
- b) используемый тип модуляции;
- c) характеристики источника;
- d) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- e) характеристики селектора длины волны (если применяется);
- f) тип фотодетектора;
- g) характеристики детектора задержки;
- h) модель, используемая для аппроксимации данных относительной групповой задержки или хроматической дисперсии, и используемый диапазон длин волн аппроксимации;
- i) значения коэффициентов, взятые из аппроксимации для каждого диапазона длин волн аппроксимации;

ж) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо).

5.5.2 Первый альтернативный метод тестирования – интерферометрический метод

5.5.2.1 Общие положения

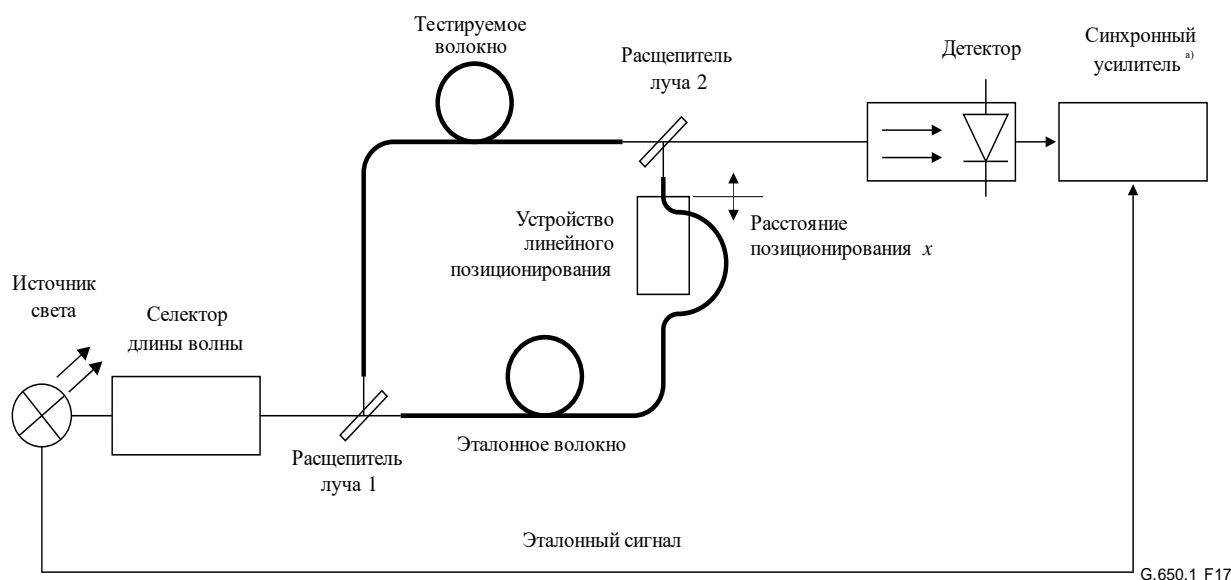
Интерферометрический метод тестирования позволяет измерять хроматическую дисперсию, используя короткий отрезок волокна (несколько метров). Это дает возможность измерять однородность продольной хроматической дисперсии оптических волокон. Кроме того, можно проверить влияние на хроматическую дисперсию общих или локальных воздействий, таких как изменение температуры и потери на макроизгибах.

Согласно интерферометрическому принципу измерения временную задержку между тестируемым образцом и эталонной трассой, зависящую от длины волны, измеряют интерферометром Маха–Цендера. Эталонная трасса может быть воздушной линией или одномодовым волокном с известной групповой спектральной задержкой.

Следует отметить, что экстраполяция на длинные сегменты волокна значений хроматической дисперсии, полученных путем интерферометрического тестирования на волокнах длиной несколько метров, предполагает продольную однородность волокна. Это предположение не всегда справедливо.

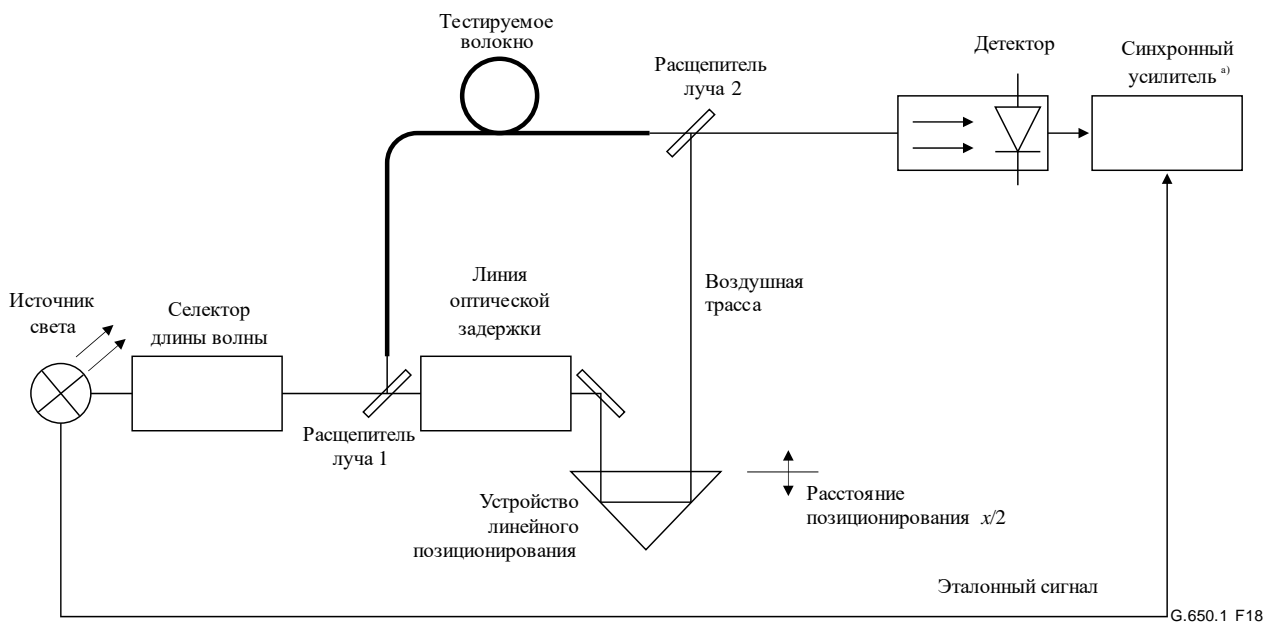
5.5.2.2 Испытательная аппаратура

На рисунках 17 и 18 показаны блок-схемы испытательной установки с использованием соответственно эталонного волокна и воздушной эталонной трассы.



^{а)} При необходимости

Рисунок 17 – Блок-схема измерительной установки с эталонным волокном



^{a)} При необходимости

Рисунок 18 – Блок-схема измерительной установки с воздушной эталонной трассой

5.5.2.2.1 Оптический источник

Источник света должен быть стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для выполнения процедуры измерения. Требуется подходящий источник света, например лазер YAG на волокне с рамановским рассеянием или ламповые и светодиодные оптические источники и т. д. Для применения методов синхронного усиления достаточно источника света с низкочастотной модуляцией (от 50 до 500 Гц).

5.5.2.2.2 Селектор длины волны

Селектор длины волны используется для выбора длины волны, на которой измеряется групповая задержка. В зависимости от типа оптического источника и измерительной системы можно использовать монохроматор, интерференционный светофильтр или другой селектор длины волны. Селектор длины волны можно установить либо на входе, либо на выходном конце тестируемого волокна.

Спектральная ширина оптических источников должна ограничиваться точностью измерения дисперсии и составляет около 2–10 нм.

Если к данным применяется математическая аппроксимация, то по крайней мере одна точка данных должна находиться в пределах 100 нм от λ_0 .

5.5.2.2.3 Оптический детектор

Оптический детектор должен иметь достаточную чувствительность в том диапазоне длин волн, в котором определяется хроматическая дисперсия. При необходимости принятый сигнал можно усилить, например, с помощью трансимпедансной схемы.

5.5.2.2.4 Испытательное оборудование

Для записи интерференционных картин можно использовать синхронный усилитель. Выравнивание оптической длины двух путей интерферометра выполняется с помощью одного линейного позиционирующего устройства в эталонном тракте. Что касается позиционирующего устройства, то следует обратить внимание на точность, однородность и стабильность линейного движения. Изменение длины должно охватывать диапазон от 20 до 100 мм с точностью около 2 мкм.

5.5.2.2.5 Образец

Опытный образец для тестирования может представлять собой одномодовое волокно – отдельное или в составе кабеля. Длина образца должна составлять от 1 м до 10 м. Точность измерения длины должна быть около ± 1 мм. Подготовку торцевых поверхностей волокна следует проводить с разумной осторожностью.

5.5.2.2.6 Обработка данных

Для анализа интерференционных картин должен использоваться компьютер с надлежащим программным обеспечением.

5.5.2.3 Процедура измерения

- 1) Тестируемое волокно помещается в измерительную установку (рисунки 17 и 18). Позиционирование торцевых поверхностей осуществляется с помощью трехмерных микропозиционирующих устройств путем оптимизации оптической мощности, принимаемой детектором. Ошибки, вызванные модами оболочки, невозможны.
- 2) Определение групповой задержки выполняется путем выравнивания оптической длины двух путей интерферометра с помощью одного линейного устройства позиционирования в эталонном тракте для разных длин волн. Разность групповой задержки $\Delta\tau_g(\lambda_i)$ между эталонным каналом и тестируемым каналом определяется по разности между положением x_i максимума интерференционной картины для длины волны λ_i и положением x_0 для длины волны λ_0 (рисунок 19) следующим образом:

$$\Delta\tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0}, \quad (5-18)$$

где c_0 – скорость света в вакууме. Групповая задержка для тестируемого образца рассчитывается путем сложения значения $\Delta\tau_g(\lambda_i)$ с групповой спектральной задержкой эталонного тракта. Разделив эту сумму на длину тестируемого волокна, получим измеренную разность групповой задержки на единицу длины $\tau(\lambda)$ тестируемого волокна.

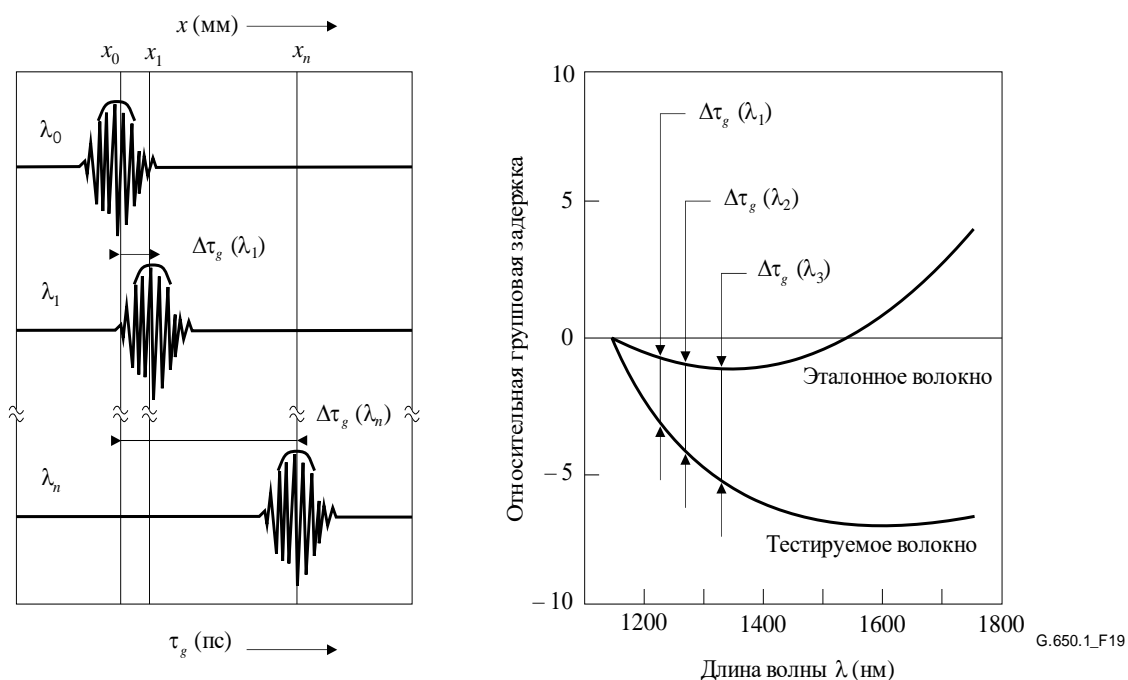


Рисунок 19 – Определение спектральной групповой задержки

5.5.2.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки;
- b) характеристики источника;
- c) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- d) характеристики селектора длины волны (если применяется);
- e) тип фотодетектора;
- f) модель, используемая для аппроксимации данных относительной групповой задержки или хроматической дисперсии, и используемый диапазон длин волн аппроксимации;
- g) значения коэффициентов аппроксимации для каждого диапазона длин волн аппроксимации;
- h) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо).

5.5.3 Второй альтернативный метод тестирования – метод задержки импульса

5.5.3.1 Общие положения

Коэффициент хроматической дисперсии волокна получают посредством измерения относительной групповой задержки волн разной длины при их распространении по волокну известной протяженности.

Групповая задержка измеряется во временной области путем обнаружения, регистрации и обработки значений задержки, вызванной импульсами на разных длинах волн.

Хроматическую дисперсию можно измерять на фиксированной длине волны или в диапазоне длин волн.

5.5.3.2 Испытательная аппаратура

Блок-схема испытательной установки показана на рисунке 16.

5.5.3.2.1 Оптический источник

Источник света должен быть стабильным по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного времени для выполнения процедуры измерения. В зависимости от диапазона длин волн измерения могут использоваться лазерные диоды (решетка лазерных диодов (LD-решетка)), лазерные диоды с регулируемой длиной волны (WTL) (например, лазер с внешним резонатором (ECL)) или широкополосные источники (например, лазер Nd:YAG, использующий волокно с рамановским рассеянием).

В любом случае модулирующий сигнал должен быть таким, чтобы гарантировать достаточное временное разрешение при измерении групповой задержки.

5.5.3.2.2 Выбор длины волны

Для выбора и контроля длины волны, на которой измеряется групповая задержка, используются селектор и индикатор длины волны. В качестве селектора длины волны в зависимости от типа источника света и измерительной установки могут применяться оптический переключатель, монохроматор, рассеивающие устройства, оптические фильтры, оптопары или соединители. Выбор может осуществляться путем переключения электрических сигналов управления для источников света с разной длиной волны.

Контроль длины волны может осуществляться с помощью оптоволоконного соединителя и измерителя длины волны. Селектор и индикатор длины волны можно использовать либо на входном, либо на выходном конце тестируемого волокна.

Если к данным применяется математическая аппроксимация, то по крайней мере одна точка данных должна находиться в пределах 100 нм от длины волны λ_0 нулевой дисперсии.

5.5.3.2.3 Детектор

Свет, выходящий из тестируемого волокна, эталонного волокна, оптического делителя и т. д., поступает в фотодетектор с подходящим для измерения отношением сигнал/шум и разрешением по времени. При необходимости за детектором располагается малошумящий усилитель.

5.5.3.2.4 Эталонный канал

Эталонный канал может состоять из электрической или оптической сигнальной линии. В этом канале может располагаться соответствующий генератор временной задержки. В некоторых случаях в качестве линии эталонного канала может использоваться само тестируемое волокно.

5.5.3.2.5 Детектор задержки

Детектор задержки измеряет время задержки между сигналами в эталонном и измеряемом каналах. Можно использовать высокоскоростной или стробоскопический осциллограф.

5.5.3.2.6 Процессор сигналов

Для уменьшения шума и/или дрожания измеряемого сигнала можно подключить процессор сигналов. При необходимости для управления оборудованием, сбора данных и их количественной оценки может применяться цифровой компьютер.

5.5.3.3 Процедура измерения

Тестируемое волокно надлежащим образом соединяется с источником и детектором через селектор длины волны или оптический делитель и т. д. При необходимости можно выполнить калибровку хроматической задержки источника. Должен быть достигнут подходящий компромисс между разрешением по длине волны и уровнем сигнала. Если тестируемое волокно не используется также в качестве линии эталонного канала, то во время измерения его температура должна быть достаточно стабильной.

Время задержки между сигналами в эталонной и измеряемой линиях на рабочей длине волны измеряется детектором задержки. Для получения коэффициента хроматической дисперсии на рабочей длине волны используется обработка данных, соответствующая типу модуляции. При необходимости может выполняться спектральное сканирование групповой задержки в зависимости от длины волны; по измеренным значениям можно построить соответствующую сглаженную кривую.

5.5.3.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки;
- b) используемый тип модуляции;
- c) характеристики источника;
- d) идентифицирующие сведения о волокне и его длина;
- e) характеристики селектора длины волны (если он применяется);
- f) тип фотодетектора;
- g) характеристики детектора задержки;
- h) модель, используемая для аппроксимации данных относительной групповой задержки или хроматической дисперсии, и используемый диапазон длин волн аппроксимации;
- i) значения коэффициентов, взятые из аппроксимации для каждого диапазона длин волн аппроксимации;
- j) температура образца и условия окружающей среды (если необходимо).

5.6 Методы измерения потерь на макроизгибах

5.6.1 Эталонный метод тестирования – намотка волокна

5.6.1.1 Общие положения

Измерение потерь на макроизгибах обеспечивает возможность получения определенных значений потерь при разных радиусах кривизны для оценки характеристик одномодового волокна под влиянием макроизгибов.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Радиус кривизны определяется как радиус соответствующей круглой опоры, по которой изгибается волокно (например, оправка или направляющая канавка на плоской поверхности).

5.6.1.2 Соображения, касающиеся измерений

5.6.1.2.1 Длина образца

Образец представляет собой волокно известной длины, как указано в подробном описании. В частности, длина образца, испытываемого на потери, определяется измерительной установкой, то есть радиусом кривизны (R) и количеством витков (N); любая дополнительная длина волокна не влияет на результаты измерений при условии, что отношение сигнал/шум (S/N) оптимизировано.

5.6.1.2.2 Количество витков

Количество витков должно соответствовать значениям, указанным в соответствующих Рекомендациях [ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.654], [ITU-T G.655], [ITU-T G.656] и [ITU-T G.657].

Для одномодового волокна затухание увеличивается линейно с количеством витков.

Для каждого радиуса количество витков выбирается таким образом, чтобы:

- a) индуцированные потери были значительно выше предела обнаружения измерительной установки; при необходимости, например для волокна с низким уровнем потерь на изгибах, испытания могут проводиться с большим числом витков, чем требует спецификация, – с последующим линейным приведением к указанному количеству;
- b) индуцированные потери значительно ниже начала нелинейной области измерительной установки; для радиусов изгиба в диапазоне от 5 до 10 мм это может означать, что следует использовать не более 5–10 витков.

5.6.1.2.3 Радиус изгиба

Значение радиуса изгиба должно соответствовать значениям, указанным в соответствующих Рекомендациях [ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.654], [ITU-T G.655], [ITU-T G.656] и [ITU-T G.657]. Следует учитывать, что по мере уменьшения радиуса потери на макроизгибах возрастают по экспоненциальному закону.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Более подробная информация о соотношении между потерями на макроизгибах и их радиусом приведена в Приложении А к [IEC 60793-1-47].

5.6.1.2.4 Длина волны измерения

Длина волны измерения должна составлять 1550 нм или 1625 нм в соответствии с Рекомендациями [ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.654], [ITU-T G.655], [ITU-T G.656] и [ITU-T G.657]. Следует учитывать, что потери на макроизгибах возрастают с длиной волны по экспоненциальному закону.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Поскольку оптические потери на сгибе в одномодовом волокне увеличиваются с увеличением длины волны, достаточно следовать спецификации потерь для максимальной предусмотренной длины волны, то есть либо для 1550 нм, либо для 1625 нм. При необходимости

клиент и поставщик могут согласовать спецификацию более низкого или более высокого значения длины волны.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Более подробная информация о соотношении между потерями на макроизгибах и длиной волны измерения приведена в Приложении А к [IEC 60793-1-47].

5.6.1.3 Испытательная аппаратура

Установка состоит из гибочного инструмента и прибора для измерения потерь.

5.6.1.3.1 Гибочный инструмент

Для удержания образца, изогнутого с радиусом, указанным в спецификации, используется гибочный инструмент. Это может быть оправка или направляющая канавка на плоской поверхности.

Так как фактический радиус кривизны имеет решающее значение, принимается максимальный допуск $\pm 0,1$ мм (для радиусов не более 15 мм) или от $\pm 0,5$ до 1,0 мм (для больших радиусов) (более жесткие допуски на малых радиусах необходимы для повышения чувствительности измерения).

Испытание может проводиться на образцах, образующих один или несколько полных оборотов (360°) на открытом воздухе или вокруг подходящей опоры (оправки) или полуоборотов (180°) на открытом воздухе или вокруг подходящих опор; длина тестируемого образца в разных конфигурациях различна, длина полного оборота вдвое больше длины полуоборота. В дальнейшем термин "виток" относится к одному полному обороту: один виток состоит из двух последовательных полуоборотов. Это следует учитывать при приведении результатов к длине образца (количеству витков).

5.6.1.3.2 Прибор для измерения потерь

В приборе для измерения потерь используется метод контроля передаваемой мощности (метод А из [IEC 60793-1-46]) или метод обрыва (как в разделе 5.4.1) с соблюдением соответствующих условий возбуждения для конкретного типа волокна.

5.6.1.4 Процедура измерения

Подготовьте плоскую торцевую поверхность, ортогональную оси волокна, на входном и выходном концах каждого тестируемого образца.

Свободно наматывайте волокно на инструмент, избегая чрезмерного скручивания волокна. Количество витков, радиус кривизны и длина волны, на которой измеряются потери, обсуждаются в следующих разделах.

Оптическую мощность можно измерять двумя следующими способами:

- a) методом контроля мощности, когда измеряется увеличение затухания в волокне из-за изменения прямолинейного состояния на изогнутое; или
- b) методом обрыва, когда измеряют полное затухание в изогнутом волокне. Чтобы определить затухание, вызванное макроизгибом, это значение нужно скорректировать с учетом внутреннего затухания волокна.

На отрезке волокна вне оправки и эталонном урезанном волокне не должно быть изгибов, способных существенно повлиять на результаты измерения. Рекомендуется собрать избыточное волокно с радиусом изгиба не менее 140 мм.

Также можно перемотать волокно с оправки большего радиуса (вносящего пренебрежимо малые потери на макроизгибе) на оправку требуемого радиуса. В этом случае потери на макроизгибах можно определить напрямую, используя метод контроля мощности (без поправки на внутреннее затухание волокна).

Необходимо соблюдать осторожность, чтобы во время измерений не ввести скручивание в какую-либо часть волокна, так как это повлияет на результат.

5.6.1.5 Расчет

Результаты представляются в децибелах и рассчитываются по формуле

$$\text{Потери(дБ)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{str}}{P_{Bend}} \right), \quad (5-19)$$

где P_{str} – мощность, измеренная без изгиба, а P_{Bend} – мощность, измеренная с данным изгибом.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Мощность, передаваемую по прямому волокну, можно рассчитать исходя из коэффициента затухания волокна, длины тестируемого образца и выходной мощности источника.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Для одномодового волокна потери можно представлять в децибелах на виток.

5.6.1.6 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки;
- b) идентифицирующие сведения о волокне;
- c) длина образца;
- d) радиус макроизгиба;
- e) количество витков;
- f) представляющие интерес значения длины волны;
- g) потеря на макроизгибах (дБ или дБ/виток).

5.7 Методы проверочных испытаний

5.7.1 Эталонный метод тестирования – продольное натяжение

5.7.1.1 Общие положения

- a) Этот метод испытаний содержит процедуры применения кратковременных растягивающих нагрузок ко всей непрерывной длине волокна. Начальную длину можно разбить на несколько более коротких отрезков, каждый из которых считается прошедшим проверочное испытание. Информацию общего характера можно найти в [b-IEC/TR 62048].
- b) Проверочное испытание выполняется во время производства волокна, в режиме онлайн в ходе процесса волочения и нанесения покрытия или отдельно в рамках процедуры тестирования. Интенсивность перебоев (отказов на единицу длины) является статистически ожидаемой.
- c) Для хранения и проверочных испытаний используются стандартные условия окружающей среды: 23 ± 5 °C и относительная влажность $50 \pm 20\%$. Время хранения до проверочных испытаний – предмет дальнейшего изучения.
- d) При измерении можно использовать либо напряжение σ , либо натяжение ε . Они связаны следующим соотношением:

$$\sigma = E_0(1 + c_s \varepsilon)\varepsilon, \quad (5-20)$$

где E_0 – модуль Юнга при нулевом напряжении, а c_s – параметр (обычно от 3 до 6). При необходимости определение параметров E_0 и c_s будет предметом дальнейшего изучения.

- e) Напряжение волокна рассчитывается по применяемому натяжению T следующим образом:

$$\sigma = \frac{(1-F)\Gamma}{\pi a^2}, \quad (5-21)$$

где $2a$ – диаметр стекловолокна, а F – доля натяжения, приходящаяся на покрытие. F задается уравнением

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n E_j A_j}{E_g \pi a^2 + \sum_{j=1}^n E_j A_j}, \quad (5-22)$$

где

n : количество слоев покрытия;

E_j : модуль j -го слоя покрытия;

A_j : номинальная площадь поперечного сечения j -го слоя покрытия;

E_g : модуль стекловолокна.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Модули покрытий обычно указываются производителями.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В случае проведения проверочных испытаний при помощи механизма с контролем натяжения барабаном торможения эта компенсация распределения нагрузки путем покрытия неприменима.

5.7.1.1.1 Параметры проверочных испытаний

- a) Для контроля длины оставшихся участков волокна задается проверочное напряжение σ_p . Кривая напряжения σ_a , прилагаемого во время проверочных испытаний, показана на рисунке 20. Также показаны значения времени нагрузки и разгрузки t_l и t_u , а также время задержки t_d . Нагрузка на растяжение прилагается в течение по возможности короткого времени, но достаточно долго, чтобы стекло испытало проверочное напряжение; это занимает обычно намного меньше одной секунды.
- b) Приложенное напряжение должно все время превышать заданное проверочное напряжение. Время разгрузки контролируется и не должно быть меньше некоторых максимальных значений, которые согласовываются между пользователем и производителем, чтобы контролировать повреждение в результате разгрузки.

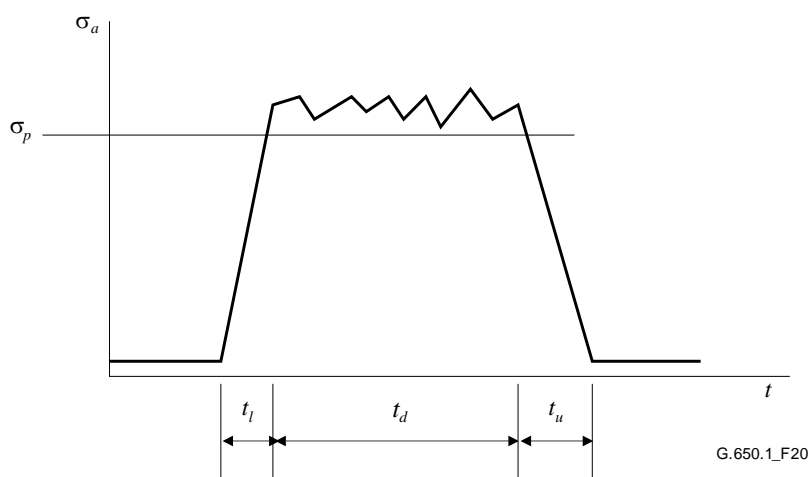


Рисунок 20 – Зависимость напряжения σ от времени t во время проверочного тестирования

5.7.1.2 Испытательная аппаратура

5.7.1.2.1 Требования к рабочей процедуре

- a) В областях разматывания и сматывания волокно поддерживается при низком уровне напряжения, обычно не превышающем 10% от проверочного напряжения (см. рисунок 20).
- b) В области нагрузки напряжение волокна возрастает от низкого уровня до полного проверочного напряжения. Время нагрузки составляет t_l .
- c) В области проверочного тестирования поддерживается приложенное проверочное напряжение σ_a , превышающее указанное значение проверочного напряжения σ_p .
- d) В области разгрузки напряжение волокна падает от приложенного напряжения до низкого значения напряжения. Время разгрузки волокна составляет t_u .
- e) Время разгрузки ограничивается максимальным значением, согласованным между пользователем и производителем. Его можно варьировать, изменяя скорость обработки или конструкцию тягового барабана.
- f) Тяговые барабаны и другие опорные шкивы проектируются и работают таким образом, чтобы не вызывать слишком больших повреждений. Тяговые барабаны должны выдерживать приложенное напряжение, не вызывая дополнительного повреждения из-за скольжения.

5.7.1.2.2 Механизмы для проверочных испытаний

Существует несколько возможных конструкций механизмов, причем каждый из них выполняет основные функции, необходимые для измерения защищенного волокна с указанными общими рабочими требованиями. При конструировании необходимо позаботиться о том, чтобы предотвратить повреждение покрытия.

Используются механизмы двух типов:

- механизм с тормозящим барабаном;
- механизм с противовесом.

Каждый из механизмов можно использовать в процессе волочения волокна (в режиме онлайн – только для волокна с покрытием) или в качестве отдельного этапа производственного процесса (в режиме офлайн).

ПРИМЕЧАНИЕ. – Следует учитывать, что существуют процессы с онлайн-отбраковкой, которые отличаются от процессов с офлайн-отбраковкой.

a) Механизм с тормозящим барабаном (рисунок 21)

Волокно сматывается с постоянным слабым натяжением. Намотка после проверочного тестирования также производится с постоянным натяжением. Уровни натяжения при сматывании и намотке регулируются.

Между тормозящим и приводным барабанами к волокну прикладывается проверочная нагрузка, что приводит к разности скоростей вращения барабанов. Для предотвращения проскальзывания на барабанах используются два ремня. Возможна конструкция, в которой высокоточный тензодатчик измеряет нагрузку на волокно и регулирует разницу скоростей для достижения требуемой проверочной нагрузки. Уровень нагрузки и рабочую скорость оборудования можно задавать независимо. При другой возможной конструкции устанавливается и контролируется непосредственно разность скоростей между двумя барабанами в соответствии с желаемым удлинением (деформацией) волокна без измерения натяжения.

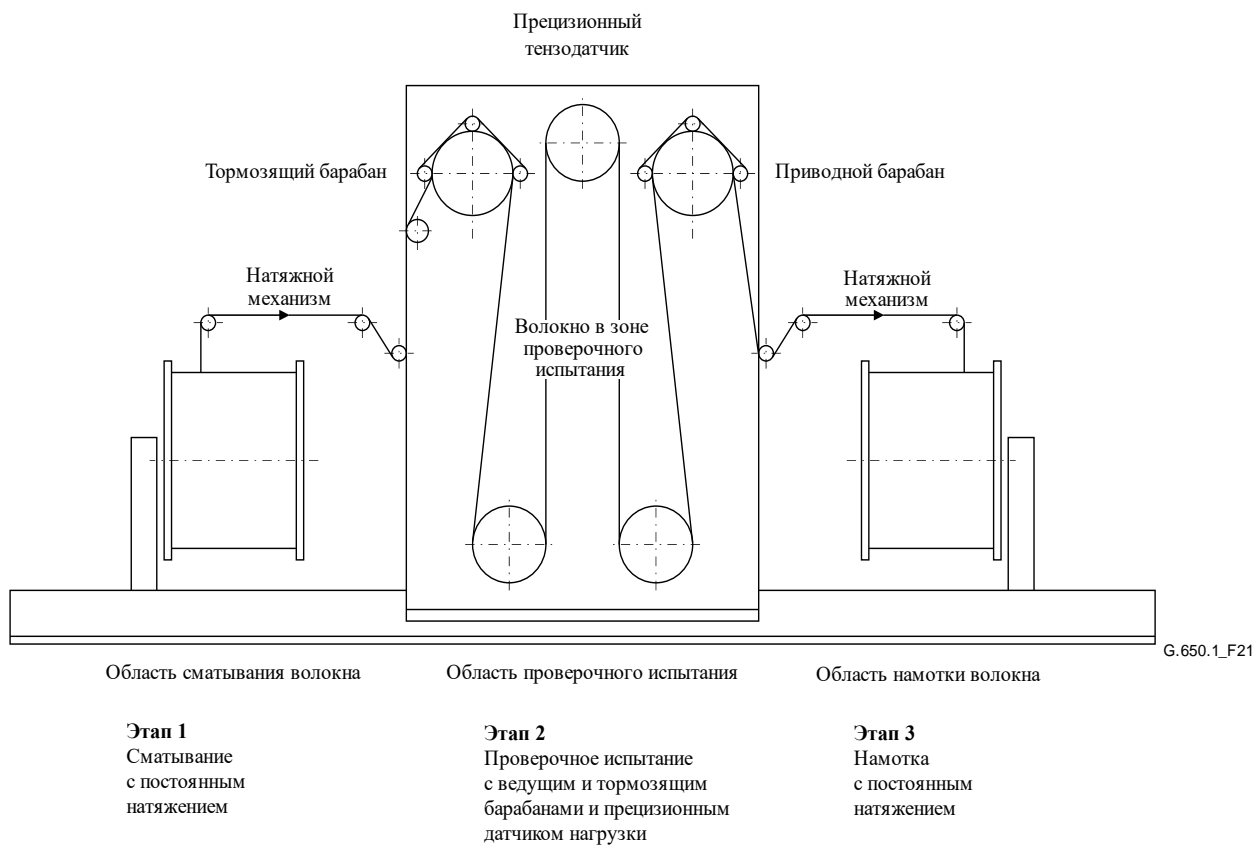


Рисунок 21 – Типичная конструкция механизма для проверочных испытаний с тормозящим барабаном

b) *Механизм с противовесом* (рисунок 22)

В этом механизме шкивы натяжения при сматывании и намотке достаточно легкие, чтобы направлять волокно с минимальным натяжением. Вращение барабанов сматывания и намотки синхронизировано. Прижимные ремни предотвращают проскальзывание на барабанах, но без дополнительного напряжения на волокно или повреждения покрытий волокна. На валу натяжного шкива с противовесом закреплен нагрузочный кронштейн с противовесом, что обеспечивает проверочную нагрузку для волокна. При необходимости дополнительный промежуточный шкив увеличивает длину участка измерения волокна.

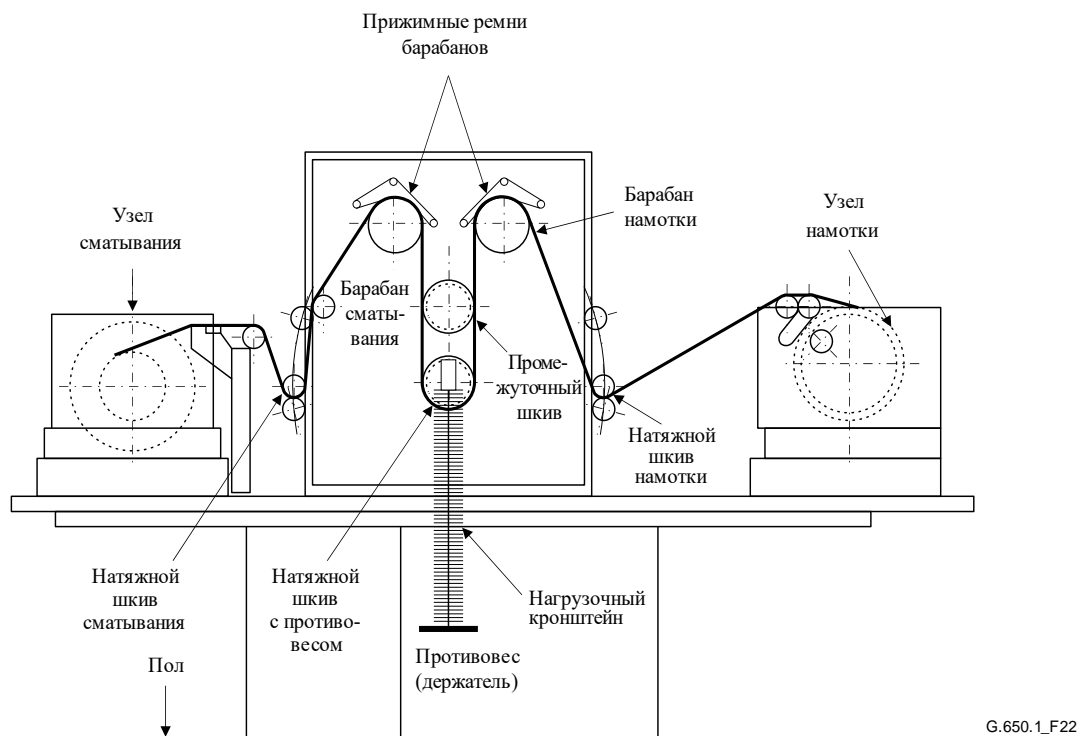


Рисунок 22 – Механизм для проверочных испытаний с противовесом

5.7.1.3 Процедура измерения

5.7.1.3.1 Образец

- a) Тестируемый образец состоит из оптического волокна полной длины за вычетом коротких секций на концах, где может не соблюдаться часть требований, например максимальное время разгрузки. Эта длина концевой секции, обычно от 25 до 50 м, должна указываться.
- b) Выход волокна из строя после проверочных испытаний определяется по полному обрыву. Методы обследования включают визуальный осмотр и измерения с помощью OTDR. После удаления участков с обрывами оставшееся волокно считается прошедшим процедуру проверочных испытаний.

5.7.1.3.2 Расчет

Если механизм откалиброван на натяжение, уровень напряжения рассчитывается по формуле (5-21). Натяжение можно получить из уравнения (5-20).

5.7.1.4 Представление результатов

- a) Общее описание устройства;
- b) идентифицирующие сведения о волокне;
- c) среднее приложенное проверочное напряжение;
- d) максимальное время разгрузки;
- e) время запаздывания;
- f) длина концевого припуска.

Приложение А

Аппроксимация хроматической дисперсии

(Данное Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

А.1 Общие положения

Результатом измерения хроматической дисперсии являются либо непосредственно измеренные значения хроматической дисперсии, либо значения групповой задержки в зависимости от длины волны. Значение хроматической дисперсии и наклон дисперсии можно получить из производных от этих данных. Производные чаще всего берутся после привязки данных к той или иной математической модели.

Настоящее Приложение содержит общее описание процедуры аппроксимации хроматической дисперсии и приводит ряд стандартных уравнений аппроксимации.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Несмотря на то что характеристики наклона дисперсии могут не относиться к нормативным требованиям, производители часто предоставляют типичные значения для упрощения адаптации дисперсии.

А.2 Определение уравнений и коэффициентов аппроксимации

Таблица А.1 содержит общее описание подогнанных математических моделей. Формула многочлена является обобщенной и может распространяться на многочлены более высокого порядка по тем же принципам.

В таблице А.2 приведены соответствующие уравнения для наклона дисперсии.

В таблице А.3 приведены формулы длины волны с нулевой дисперсией и наклона на этой длине волны для трехчленных моделей Зельмейера и моделей с многочленами второго порядка.

Таблица А.1 – Определение типов и коэффициентов согласования

Тип аппроксимации	Уравнение групповой задержки	Уравнение для данных по дисперсии
Трехчлен Зельмейера	$A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2}$	$2 \cdot B \cdot \lambda - 2 \cdot C \cdot \lambda^{-3}$
Пятичлен Зельмейера	$A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2} + D \cdot \lambda^4 + E \cdot \lambda^{-4}$	$2 \cdot B \cdot \lambda - 2 \cdot C \cdot \lambda^{-3} + 4 \cdot D \cdot \lambda^3 - 4 \cdot E \cdot \lambda^{-5}$
Многочлен второго порядка (квадратичный)	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda$
Многочлен третьего порядка (кубический)	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda^3$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda + 3 \cdot D \cdot \lambda^2$
Многочлен четвертого порядка	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda^3 + E \cdot \lambda^4$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda + 3 \cdot D \cdot \lambda^2 + 4 \cdot E \cdot \lambda^3$

Таблица А.2 – Уравнения наклона

Тип аппроксимации	Уравнение для наклона дисперсии
Трехчлен Зельмейера	$2 \cdot B + 6 \cdot C \cdot \lambda^{-4}$
Пятичлен Зельмейера	$2 \cdot B + 6 \cdot C \cdot \lambda^{-4} + 12 \cdot D \cdot \lambda^2 + 20 \cdot E \cdot \lambda^{-6}$
Многочлен второго порядка (квадратичный)	$2 \cdot C$
Многочлен третьего порядка (кубический)	$2 \cdot C + 6 \cdot D \cdot \lambda$
Многочлен четвертого порядка	$2 \cdot C + 6 \cdot D \cdot \lambda + 12 \cdot E \cdot \lambda^2$

Таблица А.3 – Уравнения для длины волны и наклона при нулевой дисперсии

Тип аппроксимации	Длина волны при нулевой дисперсии	Наклон при нулевой дисперсии
Трехчлен Зельмейера	$(C/V)^{1/4}$	8В
Многочлен второго порядка (квадратичный)	$-V/(2C)$	2С

А.3 Процедура аппроксимации

Для надежной численной аппроксимации естественную абсциссу (длину волны) нужно до выполнения регрессии методом наименьших квадратов преобразовать в значения с уменьшенным диапазоном путем изменения координат. После выполнения регрессии до взятия любых производных параметры аппроксимации следует вернуть к исходной шкале длин волн.

Для решения задачи аппроксимации нужно выбрать подходящую реализацию регрессии методом наименьших квадратов. Этот метод должен быть устойчивым к шуму и другим ошибкам, возникающим при измерении групповой задержки или данных дисперсии. (См., например, [b-Press].) В зависимости от источника входных данных используются уравнения групповой задержки или дисперсии производных.

Следует позаботиться о том, чтобы при аппроксимации учитывалось достаточное количество точек. Когда порядок аппроксимации становится сравнимым с количеством точек, аппроксимация не дает точных результатов.

Если аппроксимация производится по данным групповой задержки, то данные хроматической дисперсии можно рассчитать с помощью уравнений дисперсии, приведенных в таблице А.1, используя коэффициенты, полученные при аппроксимации. Экстраполяцию на значения длины волны вне области аппроксимации следует использовать с осторожностью, так как в точках за пределами этой области подогнанные кривые могут демонстрировать нефизическое поведение.

Наклон дисперсии можно рассчитать по уравнениям из таблицы А.2, используя коэффициенты, найденные при аппроксимации.

Дополнение I

Методы интерполяции длины волны отсечки

(Данное Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

В этом Дополнении представлены методы определения коэффициентов A_t и B_t , используемых в разделе 5.3.1.3.4, уравнение (5-11).

I.1 Метод ограниченной отрицательной погрешности

Алгоритм основан на наблюдении, что переходные структуры (горбы) состоят из точек данных с положительным отклонением от ожидаемой идеальной кривой. Процедура интерполяции основана на теоретической модели области перехода LP₁₁ и методе аппроксимации данных с моделью. Процедура состоит из шести шагов.

На первых двух шагах определяют область LP₀₁, или область верхних длин волн. На следующих двух шагах определяют область перехода, где начинает увеличиваться затухание LP₁₁. На пятом шаге определяют характеристику этой области в соответствии с теоретической моделью. На последнем шаге по характеристическим параметрам вычисляют длину волны отсечки λ_c .

Шаг 1: Определение области верхних длин волн

Нижняя длина волны данной области

Для многомодового эталонного волокна:

найдите длину волны максимального наклона, на которой первая разность $a(\lambda) - a(\lambda + 0,01)$ максимальна. Для длин волн, превышающих длину волны максимального наклона, нижняя длина волны данной области – это длина волны, при которой затухание минимально.

Для изогнутого эталона процедуру для многомодового эталона имитирует следующая процедура:

найдите длину волны максимального затухания. Для длин волн, превышающих длину волны максимального затухания, нижняя длина волны данной области – это длина волны, при которой следующая функция принимает минимальное значение:

$$a(\lambda) - 8 + 8\lambda \quad (\lambda \text{ в мкм}).$$

Верхняя длина волны данной области

Нижняя длина волны данной области плюс 0,15 мкм.

Шаг 2: Определение характеристики кривой затухания $a(\lambda)$ области верхних длин волн как линейной функции длины волны λ

$$a(\lambda) \cong A_u + B_u \lambda. \quad (\text{I-1})$$

Предлагаются следующие подходы.

Метод изогнутого эталона

Установите $B_u = 0$.

Установите A_u , равный медианному значению затухания в области верхних длин волн.

Метод многомодового эталона

Найдите такие значения A_u и B_u , чтобы сумма абсолютных значений ошибок в области верхних длин волн была минимальной и все ошибки были неотрицательными. Найдите медиану ошибок в области верхних длин волн и прибавьте ее к A_u .

Определите наибольшую отрицательную ошибку в области верхних длин волн E :

$$E = \min[a(\lambda) - A_u - B_u \lambda] \quad (\text{I-2})$$

Шаг 3: Поиск верхней длины волны переходной области

Начиная с верхней длины волны области верхних длин волн, определенной на шаге 1, определите максимальную длину волны, на которой затухание имеет значение на 0,1 дБ выше линии, построенной на шаге 2. Установите верхнюю длину волны переходной области равной этому значению плюс 10 нм.

Шаг 4: Поиск нижней длины волны переходной области

Существуют разные способы определения этой длины волны. Ниже приведены некоторые примеры.

Пусть
$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - A_u - B_u(\lambda). \quad (\text{I-3})$$

- a) Начиная с верхней длины волны переходной области, полученной на шаге 3, найдите длину волны, на которой $\Delta a(\lambda)$ имеет локальный максимум и таким образом разность между этим максимумом и следующим локальным минимумом (при больших значениях λ) максимальна.
- b) Наибольшая длина волны ниже верхней длины волны переходной области, так что:
 - b1) имеет место локальный максимум для $\Delta a(\lambda)$; или
 - b2) имеет место локальный максимум для $\Delta a(\lambda) - \Delta a(\lambda + 0,01)$.

Шаг 5: Определение характеристики переходной области с помощью модели и ограничений на ошибки

Эта модель представляет собой линейную регрессию преобразования. Ограничения на ошибки регулируют отрицательные ошибки регрессии, так что обратное преобразование подогнанной линии не приводит к отрицательным ошибкам затухания, меньшим значения E , полученного на шаге 2. Аппроксимацию данных с ограничениями на ошибки можно выполнить с помощью методов симплексного линейного программирования.

Найдите A_t и B_t из раздела 5.3.1.3.4, уравнение (5-11), так чтобы сумма абсолютных значений ошибки была минимальной и чтобы не было ошибок, меньших $-v(\lambda)$, где значение $v(\lambda)$ задано функцией E из шага 2:

$$w(\lambda) = 10^{\frac{\Delta a(\lambda) - E}{10}}; \quad (\text{I-4})$$

$$z(\lambda) = 10 \log \left[-\frac{10}{A} \log \left(\frac{w(\lambda) - 1}{\rho} \right) \right]; \quad (\text{I-5})$$

$$v(\lambda) = Y(\lambda) - z(\lambda). \quad (\text{I-6})$$

Шаг 6. Оценка наклона перехода и вычисление длины волны отсечки λ_c

Если B_t больше некоторого малого отрицательного значения, например от -1 до $-0,1$, уменьшите верхнюю длину волны области перехода на 10 нм и повторите шаг 5.

В противном случае вычислите значение λ_c :

$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t}. \quad (\text{I-7})$$

I.2 Метод наименьших квадратов

Этот алгоритм основан на предположении, что структура, иногда наблюдаемая в области перехода, вызвана эффектом интерференции вокруг положения идеальной кривой.

Математическая модель та же, что и при использовании метода ограниченных отрицательных ошибок.

Шаг 1: Как при использовании метода ограниченных отрицательных ошибок.

Шаг 2: Как при использовании метода ограниченных отрицательных ошибок. E в уравнении (I-2) не требуется.

Шаг 3: Как при использовании метода ограниченных отрицательных ошибок.

Шаг 4: Как при использовании метода ограниченных отрицательных ошибок.

Шаг 5: Определение характеристики области перехода.

Эта модель представляет собой наилучшую подгонку преобразования методом наименьших квадратов.

Найдите A_t и B_t из раздела 5.3.1.3.4, уравнение (5-11), так чтобы сумма квадратов ошибок была минимальной, используя уравнения (5-8), (5-9), (5-10) и уравнение

$$W(\lambda) = 10^{\Delta a(\lambda)/10}. \quad (\text{I-8})$$

Шаг 6. Как при использовании метода ограниченных отрицательных ошибок.

Дополнение II

Метод тестирования для измерения однородности хроматической дисперсии на основе метода обратного рассеяния

(Данное Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

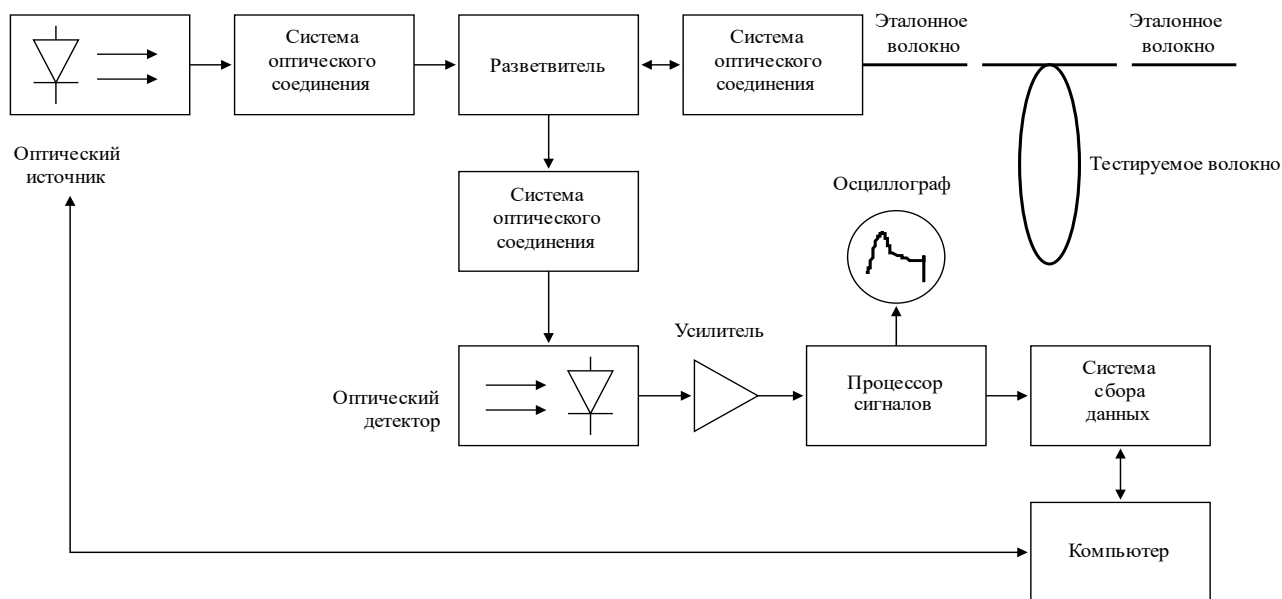
II.1 Общие положения

Описывается метод тестирования для определения однородности хроматической дисперсии одномодового оптического волокна на основе измерений двунаправленного обратного рассеяния. Этот метод позволяет оценить однородность волновода и дисперсию материала по отдельности. Более того, этот метод можно использовать для измерения диаметра модового поля. Процедуры калибровки оборудования для измерения обратного рассеяния приведены в [IEC 61746-1].

II.2 Испытательная аппаратура

II.2.1 Общие положения (как в разделе 5.4.2.2.1)

Пример оборудования показан на рисунке II.1.



G.650.1_FII.1

Рисунок II.1 – Схема оборудования для измерения однородности хроматической дисперсии

- П.2.2 Оптический источник** (как в разделе 5.4.2.2.2)
- П.2.3 Система оптического соединения** (как в разделе 5.4.2.2.3)
- П.2.4 Разветвитель** (как в разделе 5.4.2.2.4)
- П.2.5 Оптический детектор** (как в разделе 5.4.2.2.5)
- П.2.6 Усилитель** (как в разделе 5.4.2.2.6)
- П.2.7 Процессор сигналов** (как в разделе 5.4.2.2.7)
- П.2.8 Фильтр вывода мод оболочки** (как в разделе 5.4.2.2.8)
- П.2.9 Эталонное волокно**

Профиль показателя преломления эталонного волокна должен быть аналогичен профилю тестируемого волокна, а его длина ограничена, чтобы сохранить хорошую продольную однородность, но должна превышать длину мертвой зоны измерений обратного рассеяния на входе. Кроме того, должен измеряться диаметр модового поля эталонного волокна в зависимости от длины волны. Это эталонное волокно можно использовать для оценки абсолютного значения диаметра модового поля и разности относительных показателей преломления по результатам измерений обратного рассеяния.

П.3 Процедура измерения

- a) Подсоедините эталонное волокно к обоим концам тестируемого волокна.
- b) Расположите тестируемое волокно на одной оси с системой оптического соединения.
- c) Как b) в разделе 5.4.2.3.
- d) Как c) в разделе 5.4.2.3.
- e) Получите кривую потерь двунаправленного обратного рассеяния с использованием двух измеренных и записанных кривых потерь однонаправленного обратного рассеяния в соответствии с описываемой ниже процедурой.

Пусть $S_1(x)$ и $S_2(z)$ – функции, описывающие две однонаправленные кривые потерь обратного рассеяния, выраженных в децибелах (дБ), причем x и z – расстояния от концов волокон, ближайших к соответствующим источникам возбуждения, и $L = x + z$. Кривая двунаправленных потерь обратного рассеяния определяется следующим уравнением:

$$I(x, z) = \frac{S_1(x, \lambda) + S_2(L - x, \lambda)}{2}. \quad (\text{II-1})$$

- f) Получите потери, приведенные к потерям в положении x_0 в эталонном волокне в соответствии с процедурой, описываемой следующим уравнением:

$$\begin{aligned} I_n(x, \lambda) &= I(x, \lambda) - I(x_0, \lambda) = \\ &= 20 \log \left\{ \frac{W(x_0, \lambda)}{W(x, \lambda)} \right\} + 10 \log \left[\left\{ \frac{1 + 0,62\Delta(x)}{1 + 0,62\Delta(x_0)} \right\} \left\{ \frac{50 - \Delta(x)}{50 - \Delta(x_0)} \right\} \right] = \\ &= 20 \log \left\{ \frac{W(x_0, \lambda)}{W(x, \lambda)} \right\} + k, \end{aligned} \quad (\text{II-2})$$

где коэффициент k определяется следующим образом:

$$k = 10 \log \left[\left\{ \frac{1 + 0,62\Delta(x)}{1 + 0,62\Delta(x_0)} \right\} \left\{ \frac{50 - \Delta(x)}{50 - \Delta(x_0)} \right\} \right]. \quad (\text{II-3})$$

- g) Получите распределение диаметра модового поля $2W(x, \lambda)$ в соответствии с описываемой ниже процедурой.

Пусть диаметр модового поля в положении x_0 в эталонном волокне равен $2W(x_0, \lambda)$. Распределение диаметра модового поля определяется следующим образом:

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot 10^{\frac{-I_n(x, \lambda) + k}{20}}. \quad (\text{II-4})$$

Если эталонное и тестируемое волокна имеют одинаковые профили показателя преломления и разность относительных показателей преломления, то коэффициент $k = 0$.

Если разности относительных показателей преломления тестируемого и эталонного волокон не совпадают, определите коэффициент k с помощью уравнения (II-3) и полученного ранее значения диаметра модового поля в точке x тестируемого волокна.

Если заданы поправочные коэффициенты f и g , которые определяются согласно описанию в пункте с) раздела 5.1.4.3.2, то распределение диаметра модового поля задается следующим образом:

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot 10^{\frac{-g \cdot I_n(x, \lambda) + f}{20}}. \quad (\text{II-5})$$

Если разность относительных показателей преломления в тестируемом волокне неизвестна, то значение диаметра модового поля в точке x тестируемого волокна получают с помощью уравнения (II-6) с учетом второй позиции x_1 эталонного волокна:

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot \left[\frac{2W(x_1, \lambda)}{2W(x_0, \lambda)} \right]^{\frac{I(x, \lambda) - I(x_0, \lambda)}{I(x_1, \lambda) - I(x_0, \lambda)}}. \quad (\text{II-6})$$

- h) Повторите описываемые выше процедуры для двух или более разных длин волн.
 i) Получите коэффициенты g_0 , g_1 , и g_2 , удовлетворяющие уравнению (II-7), используя приведенные выше радиусы модового поля $W(x, \lambda)$:

$$W(x, \lambda) = g_0(x) + g_1(x)\lambda^{1,5} + g_2(x)\lambda^6 \quad (\text{три или более длины волны}); \quad (\text{II-7})$$

или

$$W(x, \lambda) = g_0(x) + g_1(x)\lambda^{1,5} \quad (\text{две или более длины волны}). \quad (\text{II-8})$$

Это выражение можно оценить методом наименьших квадратов по данным $W(x, \lambda_i)$ ($i = 1, \dots, n$).

- j) Получите распределение дисперсии волновода $D_w(x, \lambda)$ в пс/(нм × км), описываемое следующим образом:

$$D_w(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2\pi^2 cn W(x, \lambda)^2} \left\{ 1 - \frac{2\lambda}{W(x, \lambda)} \left(\frac{3}{2} g_1(x)\lambda^{0,5} + 6g_2(x)\lambda^5 \right) \right\} \quad (\text{II-9})$$

(три или более длины волны);

или

$$D_w(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2\pi^2 cn W(x, \lambda)^2} \left\{ 1 - \frac{3g_1(x)\lambda^{1,5}}{W(x, \lambda)} \right\} \quad (\text{две или более длины волны}), \quad (\text{II-10})$$

где c и n – соответственно скорость света в м/с и максимальный показатель преломления сердцевины.

- k) Получите распределение разности относительных показателей преломления $\Delta(x)$ в % с использованием следующей процедуры.

Если эталонное и тестируемое волокна имеют один и тот же профиль показателя преломления, получите коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 для эталонного волокна, удовлетворяющие следующему уравнению, с использованием диаметра модового поля $2W(x_0, \lambda)$, диаметра сердцевины $2a(x_0)$ и длины волны отсечки $\lambda_c(x_0)$:

$$\frac{W(x_0, \lambda)}{a(x_0)} = c_0 + c_1 \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_c(x_0)} \right\}^{1.5} + c_2 \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_c(x_0)} \right\}^6. \quad (\text{II-11})$$

Вычислите характеристику отношения R_W диаметров модового поля для двух длин волн (λ_1 и λ_2) в зависимости от длины волны отсечки λ_c , используя полученные выше коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 :

$$R_W \equiv \frac{2W(\lambda_1)}{2W(\lambda_2)} = \frac{c_0 + c_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_c} \right)^{1.5} + c_2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_c} \right)^6}{c_0 + c_1 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_c} \right)^{1.5} + c_2 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_c} \right)^6}. \quad (\text{II-12})$$

Определите приблизительную зависимость между отношением R_W диаметров модового поля на двух длинах волн и длине волны отсечки λ_c .

Получите распределение длины волны отсечки $\lambda_c(x)$, применив приведенную выше приближенную зависимость к соотношению измеренных распределений диаметра модового поля.

Получите распределение диаметра сердцевины $2a(x)$, подставив распределение диаметра модового поля $2W(x)$ и распределение длины волны отсечки $\lambda_c(x)$ в уравнение (II-11).

Получите распределение разности относительных показателей преломления $D(x)$ в процентах, используя уравнение (II-13):

$$\Delta(x) = \left\{ \frac{a(x_0)}{a(x)} \right\}^2 \left\{ \frac{\lambda_c(x)}{\lambda_c(x_0)} \right\}^2 \Delta(x_0). \quad (\text{II-13})$$

Иначе разность относительных показателей преломления $\Delta(x)$ в % можно получить из уравнения (II-14) с использованием разности относительных показателей преломления $\Delta(x_0)$ в положении x_0 эталонного волокна:

$$\Delta(x) = \frac{1}{0,62} \left[\left\{ 1 + 0,62 \Delta(x_0) \right\} \cdot 10^{\frac{I_n(x, \lambda) - 20 \log \left\{ \frac{2W(x_0, \lambda)}{2W(x, \lambda)} \right\}}{10}} - 1 \right]. \quad (\text{II-14})$$

- l) Получите распределение дисперсии материала $D_m(x, \lambda)$ в пс/(нм × км), используя полученное выше распределение разности относительных показателей преломления $\Delta(x)$.

Теперь приближенное уравнение дисперсии материала можно получить как функцию длины волны и разности относительных показателей преломления.

Дисперсию материала $D_m(\lambda)$ можно оценить, используя уравнения (II-15) и (II-16):

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2}; \quad (\text{II-15})$$

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^k \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - A_i^2}, \quad (\text{II-16})$$

где A_i и B_i – коэффициенты Зельмейера и оба коэффициента A_i и B_i , зависящие от содержания примесей, соответствующего разности относительных показателей преломления D , приведены в [b-Kobayashi] и [b-Fleming].

Вычислите оценочную функцию $D_m(\lambda)$ дисперсии материала от разности относительных показателей преломления D с помощью уравнений (II-15) и (II-16).

Дисперсия материала от разности относительных показателей преломления D определяется следующим образом:

$$D_m(\lambda) = m_1(\lambda) + h \cdot \Delta \cdot m_2(\lambda), \quad (\text{II-17})$$

где h – константа.

Получите распределение хроматической дисперсии $D(x, \lambda)$ в пс/нм × км, описываемое следующей формулой:

$$D(x, \lambda) = D_m(x, \lambda) + D_w(x, \lambda). \quad (\text{II-18})$$

II.4 Представление результатов

- a) Схема испытательной установки;
- b) используемый способ обработки сигналов;
- c) ширина импульса;
- d) длины волн тестирования;
- e) распределение диаметра модового поля в мм;
- f) распределение хроматической дисперсии в пс/нм × км.

Дополнение III

Пример матричной модели

(Данное Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

Ниже приведен пример матрицы $m \times n = 38 \times 3$, как описывается в разделе 5.4.4.3, для волокон МСЭ-Т G.652. Следует отметить, что этот пример дается исключительно для иллюстрации. Если нужно оценить спектральное затухание в диапазоне от 1240 нм до 1600 нм (с шагом 10 нм), используя в качестве длин волн прогнозирующего устройства значения 1310 нм, 1380 нм и 1550 нм, то, согласно [b-Hanson], для некоторых волокон МСЭ-Т G.652 применим следующий пример матричных элементов.

Выходная длина волны (мкм)	Длины волн прогнозирования		
	1310 нм	1380 нм	1550 нм
1,23	1,46027	-0,04235	-0,20771
1,24	1,35288	-0,01493	-0,13289
1,25	1,31704	-0,00412	-0,14768
1,26	1,26613	-0,00997	-0,13715
1,27	1,20167	-0,00843	-0,10635
1,28	1,14970	-0,01281	-0,06363
1,29	1,11290	-0,01059	-0,06245
1,30	1,03600	-0,00711	0,00711
1,31	0,96276	0,00342	0,05412
1,32	0,90437	0,01435	0,08572
1,33	0,86168	0,02098	0,11776
1,34	0,83194	0,05500	0,05849
1,35	0,73415	0,08336	0,14196
1,36	0,83266	0,11032	-0,10694
1,37	0,69137	0,22596	-0,05961
1,38	0,01006	0,99798	-0,01126
1,39	-0,25502	0,94764	0,48887
1,40	0,00227	0,58463	0,51813
1,41	0,25780	0,33834	0,40811
1,42	0,29085	0,20419	0,49620
1,43	0,29329	0,13569	0,54995
1,44	0,33133	0,09266	0,51936
1,45	0,31608	0,06343	0,55905
1,46	0,24183	0,04483	0,68361
1,47	0,29207	0,03019	0,59222
1,48	0,19214	0,02196	0,75669
1,49	0,18650	0,01132	0,76122
1,50	0,21242	0,00541	0,70722
1,51	0,16884	0,00648	0,75347
1,52	0,11484	-0,00091	0,84972
1,53	0,09334	0,00419	0,85304
1,54	0,07231	-0,00021	0,88512

Выходная длина волны (мкм)	Длины волн прогнозирования		
	1310 нм	1380 нм	1550 нм
1,55	0,03111	-0,00115	0,94957
1,56	0,07054	-0,00321	0,87414
1,57	-0,03723	-0,01127	1,08140
1,58	-0,02543	0,00556	1,01041
1,59	-0,01370	0,00457	0,99389
1,60	-0,06916	-0,00107	1,11623

Библиография

- [b-IEC 60793-1-20] IEC 60793-1-20 (2001), *Optical fibres – Part 1-20: Measurement methods and test procedures – Fibre geometry*
- [b-IEC/TR 62048] IEC/TR 62048 (2002), *Optical fibres – Reliability – Power law theory*
- [b-IEC/TR 62547] IEC/TR 62547 (2009), *Guidelines for the measurement of high-power damage sensitivity of single-mode fibres to bends – Guidance for the interpretation of results*
- [b-Fleming] Fleming, J. W. (1978), *Material dispersion in lightguide glasses*, Electron. Lett., Vol. 14, No. 11, pp. 326-328
- [b-Hanson] Hanson T. A. (1991), *Spectral Attenuation Modelling with Matrix Models*, Conference Digest NPL Optical Fibre Measurement Conference (OFMC'91), pp. 8-11, York, United Kingdom
- [b-Kobayashi] Kobayashi S. *et al* (1977), *Refractive-index dispersion of doped fused silica*, IOOC 1977, pp. 309-312
- [b-Press] Press, William H. (1993), *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 2nd edition

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 межсетевых протоколов, сети последующих поколений, интернет вещей и "умные" города
- Серия Z Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи