



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

О.201

(07/2003)

СЕРИЯ О: ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
АППАРАТУРЕ

Аппаратура для измерения параметров оптических
каналов

**Аппаратура измерения Q-фактора для оценки
качественных показателей передачи
оптических каналов**

Рекомендация МСЭ-Т О.201

РЕКОМЕНДАЦИИ МСЭ-Т СЕРИИ О
ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

Общие положения	О.1–О.9
Доступ для технического обслуживания	О.10–О.19
Автоматические и полуавтоматические измерительные системы	О.20–О.39
Аппаратура для измерения аналоговых параметров	О.40–О.129
Аппаратура для измерения цифровых и аналоговых/цифровых параметров	О.130–О.199
Аппаратура для измерения параметров оптических каналов	О.200–О.209

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

Рекомендация МСЭ-Т О.201

Аппаратура измерения Q-фактора для оценки качественных показателей передачи оптических каналов

Резюме

В настоящей Рекомендации дается описание требований к аппаратуре для измерения Q-фактора (QFME), используемой для оценки качественных показателей передачи цифровых сигналов в оптическом канале.

Источник

Рекомендация МСЭ-Т Q.201 утверждена 22 июля 2003 года 4-й Исследовательской комиссией МСЭ-Т (2001–2004 гг.) в соответствии с процедурой, изложенной в Рекомендации МСЭ-Т А.8.

Ключевые слова

Аппаратура для измерения Q-фактора, коэффициент ошибок по битам, оптическая транспортная сеть, отношение сигнал–шум, порог решения, BER, Q-фактор.

ПРЕДИСЛОВИЕ

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

Всемирная ассамблея по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяет 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.

Соответствие положениям данной Рекомендации является добровольным делом. Однако в Рекомендации могут содержаться определенные обязательные положения (для обеспечения, например, возможности взаимодействия или применимости), и тогда соответствие данной Рекомендации достигается в том случае, если выполняются все эти обязательные положения. Для выражения требований используются слова "shall" ("следует", "обязан") или некоторые другие обязывающие термины, такие как "must" ("должен"), а также их отрицательные эквиваленты. Использование таких слов не предполагает, что соответствие данной Рекомендации требуется от каждой стороны.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на то, что практическое применение или реализация этой Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, обоснованности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, отстаиваются ли они членами МСЭ или другими сторонами вне процесса подготовки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещения об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для реализации этой Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что это может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ.

© ITU 2005

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких-либо средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 Сфера применения	1
2 Ссылки	1
3 Определения	2
4 Сокращения и акронимы	2
5 Введение к Q-фактору	3
6 Требования к аппаратуре для измерения Q-фактора.....	3
6.1 Физические интерфейсы и скорости передачи	3
6.2 Требования к точности и приемочные испытания	7
6.3 Представление результатов	9
7 Другие функции	9
7.1 Порт дистанционного управления	9
7.2 Интерфейс TMN.....	9
8 Условия работы	9
8.1 Окружающие условия	9
8.2 Поведение в случае пропадания питания	9
9 Литература.....	9
10 Дополнительная литература.....	10
Приложение А – Математическая процедура для оценки Q-фактора с помощью метода сдвига порога решения	10
А.1 Предварительные условия	10
А.2 Теоретическая зависимость BER от порога	10
А.3 Отделение BER (0) от BER (1)	10
А.4 Вычисление результатов	11
Добавление I – Теория Q-фактора	12
I.1 Теория Q-фактора	12
I.2 Аппроксимация функции erfc	12
I.3 Инверсная функция $\operatorname{erfc}(x)$, $\operatorname{erfc}^{-1}(x)$	13
Добавление II – Качественные показатели и характеристики оптического канала.....	14
II.1 Качественные показатели оптического канала	14
II.2 Характеристики оптического канала	14
Добавление III – Недостатки, которые должны учитываться при существующих на практике условиях.....	15
III.1 Искажения аналогового сигнала	15
III.2 Зависимость от испытательной последовательности.....	16
III.3 Характеристики приемника	16
III.4 Позиция фазы в точке дискретизации	16
III.5 Влияние на Q-фактор	16

	Стр.
Добавление IV – Предложения по реализации QFME.....	17
IV.1 Блок-схемы.....	17
IV.2 Функциональное описание	17
IV.3 Режимы измерений.....	20
Добавление V – Дополнительные проверочные испытания	21
V.1 Импульсная характеристика приемника	21

Рекомендация МСЭ-Т О.201

Аппаратура измерения Q-фактора для оценки качественных показателей передачи оптических каналов

1 Сфера применения

Измерение Q-фактора является признанным методом для оценки характеристик оптических каналов (см., например, Рекомендации МСЭ-Т G.972 [7] и G.976 [8]). Этот метод является особенно предпочтительным при низких коэффициентах ошибок по битам, так как требует намного меньше времени, чем традиционное измерение BER, когда битовые ошибки необходимо подсчитывать в течение статистически значимого периода.

Q-фактор определяется как отношение (электрического) сигнала к шуму в решающей схеме приемника цифрового сигнала (см. Приложение А, Добавление I и [B1]).

Имеются различные методы измерений Q-фактора, который может быть математически соотнесен с коэффициентом ошибок по битам (см. также методы, упомянутые в Рекомендациях G.972 [7] и G.976 [8] для подводных систем). В настоящей Рекомендации рассматривается метод сдвига уровня, и она относится к использующей его аппаратуре QFME.

Целями настоящей Рекомендации, посвященной аппаратуре для измерения Q-фактора, являются:

- **Совместимость измерительной аппаратуры, выпускаемой различными производителями:**

Измерения качественных показателей передачи оптических каналов, выполняемые с помощью QFME, которая соответствует настоящей Рекомендации, должны обеспечивать получение результатов в пределах заданной точности, определяемой в данной Рекомендации.

- **Оценка действительных качественных показателей системы:**

Цель оценки с помощью аппаратуры QFME коэффициента ошибок по битам (BER), достижимого в данном оптическом канале, состоит в обеспечении минимального BER, который может быть достигнут с помощью оптимально спроектированной единицы сетевого оборудования.

Настоящая Рекомендация не предназначена для определения конкретных применений метода измерений Q-фактора. Некоторые возможные области применения описываются в Добавлениях к настоящей Рекомендации.

Хотя здесь даются требования для QFME, не охватывается реализация схемы аппаратуры, которая подлежит тщательному рассмотрению при разработке и использовании.

2 Ссылки

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

[1] ITU-T Recommendation G.691 (2000), *Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers.*

[2] ITU-T Recommendation G.707/Y.1322 (2000), *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH).*

- [3] ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 (2001), *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*.
- [4] ITU-T Recommendation G.825 (2000), *The control of jitter and wander within digital networks which are based on the synchronous digital hierarchy (SDH)*.
- [5] ITU-T Recommendation G.8251 (2001), *The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN)*.
- [6] ITU-T Recommendation G.957 (1999), *Optical interfaces for equipment and systems relating to the synchronous digital hierarchy*.
- [7] ITU-T Recommendation G.972 (2000), *Definition of terms relevant to optical fibre submarine cable systems*.
- [8] ITU-T Recommendation G.976 (2000), *Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems*.
- [9] ITU-T Recommendation O.3 (1992), *Climatic conditions and relevant tests for measuring equipment*.
- [10] ITU-T Recommendation O.181 (2002), *Equipment to assess error performance on STM-N interfaces*.
- [11] IEC 61300-3-29, *Measurement techniques for characterising the amplitude of the spectral transfer functions of DWDM components*.

3 Определения

В настоящей Рекомендации даются определения следующих терминов:

3.1 Q-фактор: Отношение электрической сигнал–шум (ESNR) на входе решающей схемы приемника (см. Приложение А и Добавление I).

4 Сокращения и акронимы

В настоящей Рекомендации используются следующие сокращения:

AGC	Automatic gain Control	Автоматическая регулировка усиления, АРУ
APD	Avalanche Photo Diode	Лавинный фотодиод
BER	Bit Error Ratio	Коэффициент ошибок по битам
BERT	Bit Error Ratio Tester	Измеритель вероятности ошибок по битам в канале связи
DFB	Distributed feed-back	Распределенная обратная связь
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex	Спектральное уплотнение с большой плотностью
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier	Волоконный усилитель с добавлением эрбия
ER	Extinction ratio	Коэффициент гашения
ESNR	Electrical Signal-to-Noise ratio	Отношение электрической сигнал–шум
FEC	Forward Error Correction	Прямое исправление ошибок
IEC	International Electrotechnical Commission	Международная электротехническая комиссия, МЭК
ISI	Inter-Symbol Interface	Межсимвольная интерференция, МСИ
ISO	International Organization for Standardization	Международная организация по стандартизации, ИСО
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer	Оптический мультиплексор с вводом-выводом

OCh	Optical Channel	Оптический канал
OSA	Optical Spectrum Analyzer	Оптический анализатор спектра
OSNR	Optical Signal-to-Noise ratio	Отношение оптический сигнал–шум
OTM	Optical Transport Multiplexer	Оптический оконечный мультиплексор
OTN	Optical Transport Network	Оптическая транспортная сеть
OTUk	Optical Transport Unit-k	Оптические транспортные блоки-k
OXC	Optical Cross Connect	Оптический кроссовый соединитель
QFME	Q-factor Measurement Equipment	Аппаратура для измерения Q-фактора
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence	Псевдослучайная двоичная последовательность
RX	Receiver	Приемник
SNR	Signal-to-Noise ratio	Отношение сигнал–шум
SPM	Self Phase Modulation	Фазовая автомодуляция
STM-N	Synchronous Transport Module-N	Синхронный транспортный модуль N-го порядка
TIA	Telecommunications Industry Association	Ассоциация промышленности средств связи
WDM	Wavelength Division Multiplex	Спектральное уплотнение; волновое мультиплексирование

5 Введение к Q-фактору

В Приложении А и Добавлении I описывается теория оценки Q-фактора. Предполагается, что при идеальных условиях Q-фактор определяется по логическим уровням μ_0 и μ_1 и гауссову распределению шума вокруг логических уровней, которое выражается стандартной девиацией σ_0 и σ_1 . Область перекрытия хвостов распределения представляет собой вероятность принятия ошибочных решений. В Добавлении IV приводятся некоторые методы измерения распределения шума и определение Q-фактора.

На практике существует ряд факторов, вызывающих искажения, в результате которых огибающая распределения больше не является гауссовой (см. перечень оказывающих влияние факторов в Добавлении IV). Однако можно показать, что эти искажения влияют главным образом на верхние области распределения, в то время как хвосты все еще могут точно соответствовать гауссову распределению.

Применимость аппроксимации по "гауссовым хвостам" должна быть подтверждена путем вычисления коэффициента корреляции согласно Приложению А. Для каждого измерения Q-фактора, которое требует точности, указанной в разделе 6, коэффициент должен быть в пределах от 0,95 до 1,0.

В то время как гауссов закон является основным общепринятым методом для "экстраполяции хвостов", могут существовать более сложные модели распределения, которые также удовлетворяют требованиям по точности, определенным в разделе 6. Эти модели подлежат дальнейшему изучению.

6 Требования к аппаратуре для измерения Q-фактора

6.1 Физические интерфейсы и скорости передачи

6.1.1 Взаимодействие с системами передачи

Аппаратура для измерения Q-фактора должна быть способна работать в контрольных точках оптических усилителей в случае измерений без прекращения связи и, кроме того, в качестве замещения приемников системы в случае измерений с прекращением связи.

В первом случае следует принимать меры к тому, чтобы сигнал в контрольных точках был надлежащим образом защищен от дисперсии.

Далее, в случае систем DWDM необходимо применять оптический канальный фильтр, который бы выделял требуемый канал для измерений Q-фактора, и, кроме того, использовать усиление оптического сигнала до применения фильтра.

Некоторое беспокойство возникло по поводу того, что измерения без прекращения связи в контрольных оптических точках могут не отражать качественных показателей оптического канала из-за использования для достижения надлежащего сквозного качества передачи различных устройств оптимизации, таких как компенсация хроматической дисперсии или линейное выравнивание. Применимость для этих видов измерений без прекращения связи и то, какие условия должны соблюдаться, подлежат дальнейшему изучению.

6.1.2 Скорости передачи и устойчивость к фазовому дрожанию

Аппаратура QFME должна работать на одной или более скоростях передачи, определенных в Рекомендации МСЭ-Т G.707/Y.1322 [2] для сигналов STM-N или G.709/Y.1331 (OTN) для сигналов OTUk.

Максимально допустимое фазовое дрожание на конкретных скоростях передачи, поддерживаемых QFME, должно удовлетворять требованиям соответствующих Рекомендаций МСЭ-Т G.825 [4] или G.8251 [5].

6.1.3 Характеристика приемника QFME

Общая амплитудно-частотная характеристика приемника (RX), включая преобразователь О/Е и, если применяется, фильтр нижних частот, автоматическую регулировку усиления (АРУ) и схемы решения и дискретизации, должна быть выбрана так, чтобы она не выходила за установленные пределы и обеспечивала импульсную характеристику с минимальной межсимвольной интерференцией (МСИ).

В общем случае при разработке следует брать характеристики (или эквивалент) фильтра нижних частот Бесселя–Томпсона 4-го порядка в соответствии с определениями эталонного приемника в Рекомендациях МСЭ-Т G.957 [6] и G.691 [1].

Номинальная шумовая полоса, B_e , для электрического сигнала RX должна быть равна:

$$0,75 \times f_{\text{clk}},$$

где f_{clk} представляет собой тактовую частоту, выраженную в Гц (подробную информацию о процедуре коррекции полосы см. в п. 6.1.7).

Вместо определения маски допусков для частотной характеристики предпочтительно использовать для соответствующей оценки импульсной характеристики приемника маску импульса. Определение и проверка на соответствие маске импульса подлежат дальнейшему изучению.

Возможные альтернативные методы оценки импульсной характеристики приемника можно найти в Добавлении V.

6.1.4 Оптический канальный фильтр

Если для измерения Q-фактора требуется оптический канальный фильтр, он должен удовлетворять следующим требованиям. Оптическая полоса на уровне 3 дБ (B_{ch}) должна быть больше $2 \times f_{\text{clk}}$ с плоской вершиной, имеющей полосу на уровне -1 дБ, не менее $1 \times f_{\text{clk}}$ (f_{clk} представляет собой тактовую частоту, выраженную в Гц).

Общее затухание переходных помех между каналами, измеренное согласно стандарту МЭК 61300-3-29 [11], должно быть более 20 дБ.

6.1.5 Диапазон уровней входного оптического сигнала

В приборах, рассчитанных на несколько скоростей передачи (до 10,7 Гбит/с), диапазон уровней входного оптического сигнала должен составлять по крайней мере от -6 до -13 дБм для приемников с PIN-диодами и от -9 до "TBD" (должно быть определено) дБм для приемников APD.

Для приборов на одну скорость передачи в пределах 9,95–10,7 Гбит/с диапазон уровней должен составлять от -6 до -13 дБм для приемников с PIN-диодами, от -9 до "TBD" дБм для приемников APD и для приборов на скорость 2,5 Гбит/с от -18 до -25 дБм для приемников APD.

Диапазон уровней входного оптического сигнала для 40 Гбит/с подлежит дальнейшему изучению.

Нелинейные эффекты должны быть минимизированы, поскольку метод определения Q-фактора требует работы приемника в линейном режиме.

6.1.6 Учет шума приемника

В общем случае приемник (RX) аппаратуры QFME будет отличаться от приемника системы чувствительностью и полосой частот, что вызовет различия в прогнозировании качественных показателей. Влияние приемника QFME можно удалить из результатов определения Q-фактора путем его вычисления и получить Q-фактор самого оптического сигнала.

Кроме того, можно оценить показатели ошибок этого сигнала в комбинации с приемником системы, если известна зависимость BER приемника от входной мощности.

6.1.6.1 Шумовые параметры приемника

Чтобы облегчить расчет BER из результатов определения Q-фактора, прибор QFME должен отображать напряжение собственного шума приемника для действительной мощности оптического входного сигнала и действительной рабочей скорости передачи. Эти значения напряжения шума должны отображаться в нормализованной форме, представляющей собственные значения Q :

$$Q_{i1} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{i1}}; Q_{i0} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{i0}}; Q_i = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{i1} + \sigma_{i0}} \quad (6-1)$$

Величина собственного Q измеряется с подключенным эталонным передатчиком, как показано на рисунке 1, но со следующими изменениями:

Из тракта сигнала удаляются EDFA и переменный аттенюатор, а также источник переходных помех. В качестве модели модулирующего сигнала должны использоваться сигнал в виде цикла STM-N или OTUk либо чистая последовательность PRBS-23.

Предполагается, что коэффициент гашения сигнала является бесконечно большим для отображаемых значений собственного Q . Если калибровка QFME-RX выполняется с ограниченным ER, значения собственного Q перед отображением должны умножаться на $(ER + 1)/(ER - 1)$.

6.1.6.2 Вычисление значений Q для сигнала (факультативно)

В соответствии с Приложением А наряду с оценкой *измеренного* Q могут использоваться величины μ_0 , μ_1 , σ_0 и σ_1 , и могут быть вычислены следующие величины:

$$Q_0 = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0}, \quad Q_1 = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1}$$

Зная шумовые параметры приемника (уравнение 6-1), можно компенсировать собственный шум QFME, который содержится в σ_0 и σ_1 , и получить значения Q *самого* сигнала.

$$\frac{1}{Q_{sig1}^2} = \frac{1}{Q_1^2} - \frac{k^2}{Q_{i1}^2}; \quad \frac{1}{Q_{sig0}^2} = \frac{1}{Q_0^2} - \frac{k_2}{Q_{i0}^2};$$

где $k = (ER+1)/(ER-1)$, ER = коэффициент гашения сигнала

$$\frac{1}{Q_{sig}} = \frac{1}{Q_{sig0}} + \frac{1}{Q_{sig1}} \quad (6-2)$$

Поскольку ER сигнала во многих практических применениях неизвестен, должна иметься возможность выполнить компенсацию шума при $k = 1$, соответствующем бесконечно большому ER (что дает в практических случаях недостаточную компенсацию шума).

В любом случае при отображении результатов измерения Q-фактора должно быть четко указано, задействована ли компенсация собственного шума; кроме того, должно отображаться принятое для расчетов значение ER , если он не является бесконечно большим.

6.1.6.3 Оценка значений Q системы (факультативно)

Зная Q_{sig} сигнала на входе приемника, можно оценить весь Q -фактор – Q_{syst} , включая свойства приемника системы (например, для худшего случая). Это может поддерживаться факультативной функцией QFME, при которой используются следующие процедуры и равенства:

Прежде всего, приемник (RX) системы характеризуется собственным Q -фактором – Q_{RX} , который является функцией оптической мощности на входе RX и может быть получен из известной характеристики BER в зависимости от входной мощности приемника. Если оценка RX была сделана при ER_{char} , отличным от действительного значения, Q_{RX} должен быть изменен в соответствии с:

$$Q_{RXactual} = \frac{ER_{char} + 1}{ER_{char} - 1} \times \frac{ER_{actual} - 1}{ER_{actual} + 1} \times Q_{RX}$$

Если приемник системы (RX) имеет полосу электрического сигнала B_{RX} , отличную от номинального значения B_e , результаты измерения Q_{sig} должны быть скорректированы с помощью коэффициента:

$$\sqrt{\frac{B_e}{B_{RX}}}$$

При использовании значений Q_{sig0} и Q_{sig1} из (уравнения 6-2) расчетный Q -фактор системы тогда будет равен:

$$\frac{1}{Q_{syst}} = \sqrt{\frac{B_{RX} / B_e + 1}{Q_{sig0}^2 + 4Q_{RX}^2}} + \sqrt{\frac{B_{RX} / B_e + 1}{Q_{sig1}^2 + 4Q_{RX}^2}} \quad (6-3)$$

Соответствующее оценочное значение BER вычисляется по уравнению А.5 из Приложения А.

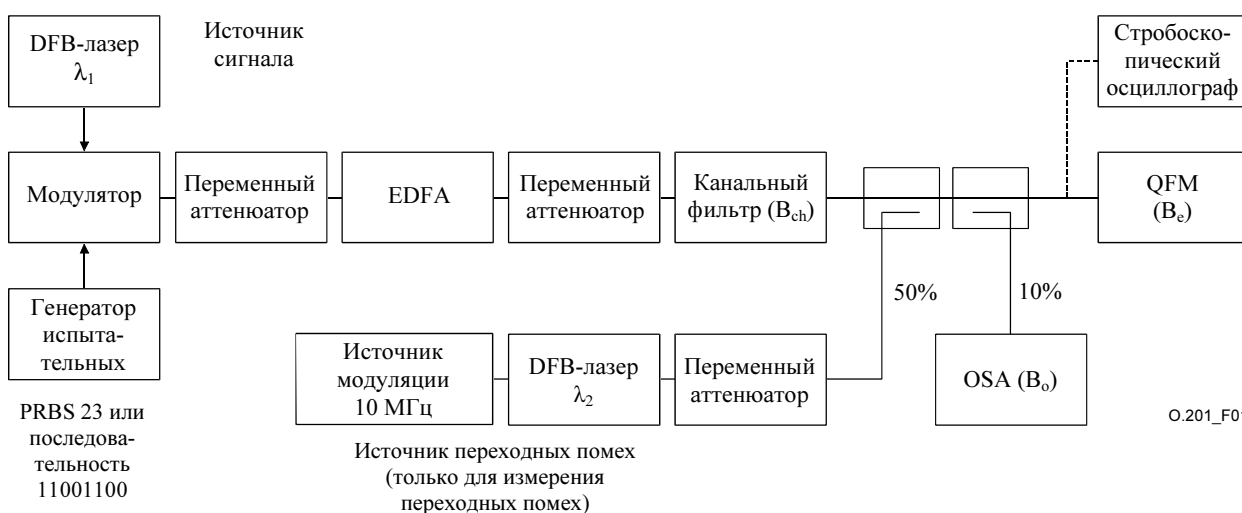
6.1.7 Калибровка приемника

Цель калибровки – исключить влияние отклонений полосы для электрического сигнала от номинальных значений, определенных в подразделе 6.1.3. Калибровка выполняется на максимально допустимой мощности входного оптического сигнала, чтобы гарантировать, что собственным шумом приемника можно пренебречь.

Калибровка выполняется при Q -факторе, равном 7, что соответствует $BER \approx 10^{-12}$, и сигнале в виде цикла STM-N или OTUk либо чистой последовательности PRBS-23, взятых в качестве модулирующего сигнала.

Поскольку B_e различно для разных скоростей передачи, процедуру необходимо проводить на каждой скорости передачи, поддерживаемой аппаратурой QFME.

Установка для калибровки показана на рисунке 1.



О.201_F01

Рисунок 1/О.201 – Установка для калибровки и измерения переходных помех

Основной принцип состоит в том, что генерируется цифровой оптический передающий сигнал, который ухудшается только шумом ASE. В этом случае можно предсказать значение Q для сигнала на основании $OSNR$ (измеренного с помощью OSA) и коэффициента гашения (ER) (измеренного с помощью стробоскопического осциллографа).

Следует отметить, что в калибровочном сигнале должны визуально отсутствовать МСИ, выход за установленные пределы или смыкание глаз-диаграммы из-за недостаточной полосы модуляции.

В случае, когда собственный шум приемника может быть пренебрежимо малым, отношение между Q , $OSNR$ и ER для сигналов NRZ описывается уравнением:

$$OSNR = \frac{(ER + 1)}{(ER - 1)^2} \times \left[Q^2 \times \left(\frac{B_e}{B_o} \right) \times (ER + 1) + Q \times \sqrt{\frac{B_e \times (8ER \times Q^2 \times B_e + (ER - 1)^2 \times (2B_{ch} - B_e))}{2B_o^2}} \right] \quad (6-4)$$

Приняв, что $Q = 7$ и $B_e = 0,75 f_{clk}$, вычисляют $OSNR$ с использованием уравнения 6-4.

Калибровочный сигнал регулируется до этого значения $OSNR$ и затем измеряется с помощью аппаратуры QFME (результат измерения Q-фактора = $Q_{measured}$).

Теперь вычисляется поправочный коэффициент:

$$CF = \frac{7}{Q_{measured}}$$

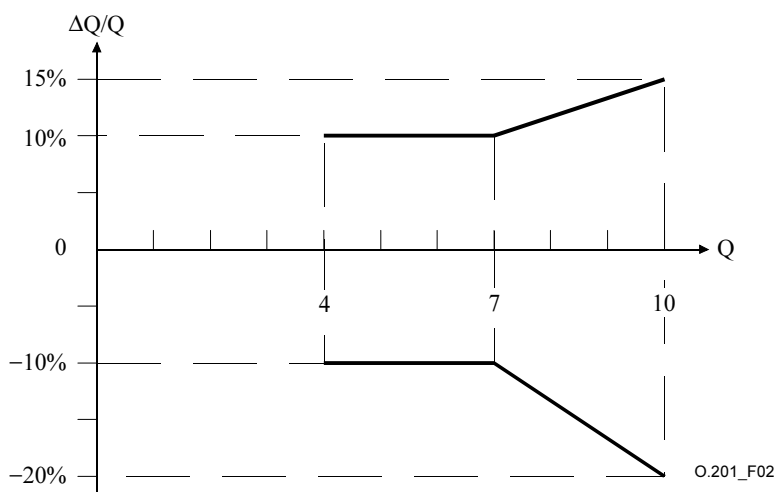
и все последующие результаты измерения Q данной аппаратурой QFME умножаются на него.

Следует отметить, что в случае сигналов RZ требуется модификация уравнения 6-4.

6.2 Требования к точности и приемочные испытания

6.2.1 Точность

Любая аппаратура QFME в соответствии с настоящей Рекомендацией, независимо от применяемого метода измерений, должна обеспечивать погрешность, не выходящую за следующие допустимые пределы эквивалентного значения Q-фактора, полученного математическим путем на основе измерений $OSNR$ и ER (как определено в п. 6.1.7, уравнение 6-4), осуществленных на испытательном сигнале при $ER \geq 8$ дБ.



ПРИМЕЧАНИЕ. – QFME работает на оптимальной мощности входного оптического сигнала.

Рисунок 2/О.201 – Пределы погрешности как функция Q-фактора

Оптимальная мощность входного оптического сигнала должна быть установлена производителем.

Если QFME не работает на оптимальной мощности входного оптического сигнала, дополнительная погрешность должна оставаться в пределах, которые показаны на рисунке 3:

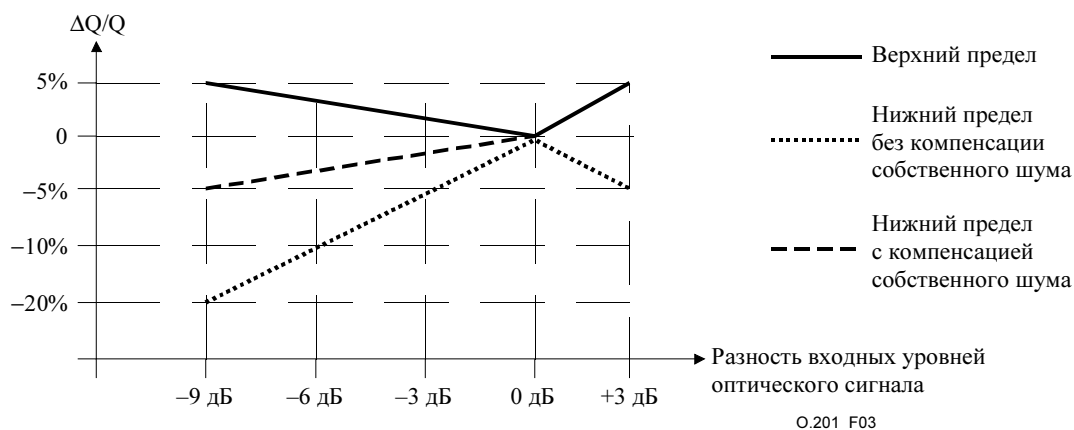


Рисунок 3/О.201– Допустимые пределы для дополнительной зависимой от уровня погрешности

6.2.2 Приемочные испытания

6.2.2.1 Измерение переходных помех

Как описано в Добавлении III, ряд оказывающих влияние факторов (таких, как МСИ, SPM и переходные помехи) могут исказить глаз-диаграмму и приводить к негауссовой аппроксимации из-за дробления логических уровней. Однако даже в этих случаях гауссову аппроксимацию можно применять только для точек измерения, близких к центру глаза, и брать кривые аппроксимации для экстраполяции Q .

Аппаратура QFME согласно настоящей Рекомендации должна быть способна правильно оценить искаженные глаз-диаграммы в условиях следующих измерений переходных помех.

Согласно рисунку 1, к установке для калибровки добавляется источник переходных помех, который обеспечивает включение-выключение сигнала от лазера DFB, модулированного сигналом прямоугольной формы частотой приблизительно 10 МГц/100%, с коэффициентом заполнения $50\% \pm 1\%$. Длина волны лазера должна отличаться от калибровочного сигнала более чем на 1 нм, но находиться в том же диапазоне длин волн.

Принцип измерений состоит в том, чтобы уменьшить раскрыв глаза за счет несинхронной переходной помехи при коэффициенте аппроксимации:

$$1 - \frac{1}{Q}$$

Для этой цели оптическая мощность переходных помех P_{xt} , измеренная с помощью OSA на входе QFME, должна находиться в следующем соотношении с мощностью калибровочного сигнала P_{av} :

$$P_{xt} = \frac{1}{Q} \times P_{av} \times \frac{ER - 1}{ER + 1} \quad (6-5)$$

При выключенном источнике переходных помех калибровочный сигнал регулируется до получения показания прибора QFME $Q_{no\ xt} \approx 7$ таким же образом, как описано в подразделе 6.1.7.

Теперь источник переходных помех регулируется в соответствии с уравнением 6-5 при использовании измеренного значения $Q_{no\ xт}$, и снова измеряется Q-фактор. Принимая во внимание, что раскрыв глаза за счет переходных помех уменьшается, но только в течение 50% времени из-за коэффициента заполнения 50%, результирующее изменение Q-фактора должно быть:

$$\Delta Q_{xt} = Q_{no\ xт} \times \frac{P_{xt}}{P_{av}} \times \frac{ER + 1}{ER - 1} + 0,08 \pm 0,2 \quad (6-6)$$

6.3 Представление результатов

Должно предусматриваться отображение Q-фактора сигнала, так же как полученного на его основании оптимального BER.

Чтобы предоставить пользователю свидетельство достоверности измерений, может быть дано численное или графическое представление качества аппроксимации.

Могут быть предоставлены и другие параметрические данные, относящиеся к Q-фактору и его измерению.

В случае применений FEC нужно учитывать, что BER, рассчитанный на основании Q-фактора, является грубой оценкой, которая наблюдается без работы FEC. Улучшение BER при наличии FEC в сети представляет собой известную функцию и должно учитываться пользователем.

Теоретический принцип, представленный в настоящей Рекомендации, требует, чтобы до оценки Q-фактора не применялась коррекция FEC. Если коррекция FEC применяется по причинам, выходящим за рамки настоящей Рекомендации, это должно быть указано вместе с результатами.

7 Другие функции

Эти функции прямо не влияют на измерение Q-фактора и должны рассматриваться для измерительной аппаратуры как факультативные.

7.1 Порт дистанционного управления

Измерительная аппаратура может дистанционно управляться при помощи стандартизованного интерфейса (например, IEEE 488/IEC625).

7.2 Интерфейс TMN

Измерительная аппаратура может иметь соответствующий интерфейс Q, обеспечивающий функции TMN.

8 Условия работы

8.1 Окружающие условия

Требования к электрическим и функциональным качественным показателям должны удовлетворяться при работе аппаратуры QFME в условиях, определенных в Рекомендации МСЭ-Т О.3 [9].

8.2 Поведение в случае пропадания питания

Пропадание питания во время измерения должно опознаваться аппаратурой QFME.

9 Литература

[B1] HUMBLET (P.A.) and AZIZOGLU (M.): On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-9, 1991, pp. 1576-1582.

10 Дополнительная литература

- BERGANO (N.S.), KERFOOT (F.W.) and DAVIDSON (C.R.): Margin Measurements in Optical Amplifier Systems, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 5, No. 3, March 1993, pp. 304-306.
- OFSTP-4A, *Optical Eye Pattern Measurement Procedure*, TIA/EIA-526-4A, Nov. 1997.
- OFSTP-8, *Accelerated measurements of low BERs in digital fiber optic systems*, TIA/EIA-526-8.
- HP E4543A, *Q factor and eye contour application software*.
- BEVINGTON (P.R.): *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, McGraw Hill, 1969, pg. 92.

Приложение А

Математическая процедура для оценки Q-фактора с помощью метода сдвига порога решения

А.1 Предварительные условия

Представленная здесь математическая процедура справедлива только в том случае, если BER определяется без использования FEC.

А.2 Теоретическая зависимость BER от порога

Теоретическое соотношение следующее:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu - \mu_0}{\sqrt{2} \sigma_0} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \mu}{\sqrt{2} \sigma_1} \right), \quad (\text{A-1})$$

где μ_1 и μ_0 – средние значения уровня напряжения для уровней 1 и 0, σ_1 и σ_0 – стандартная девиация распределения шума для уровней 1 и 0; μ является позицией для порога решения.

Задача состоит в нахождении μ_1 , μ_0 , σ_1 и σ_0 из измеренных значений $BER = f(\mu)$ и вычисления оптимального BER и Q-фактора из этих значений.

А.3 Отделение BER (0) от BER (1)

Поскольку общий коэффициент ошибок является суммой двух членов уравнения, соответствующих половине условного коэффициента ошибок по битам, применяется следующий процесс отделения:

Первый шаг

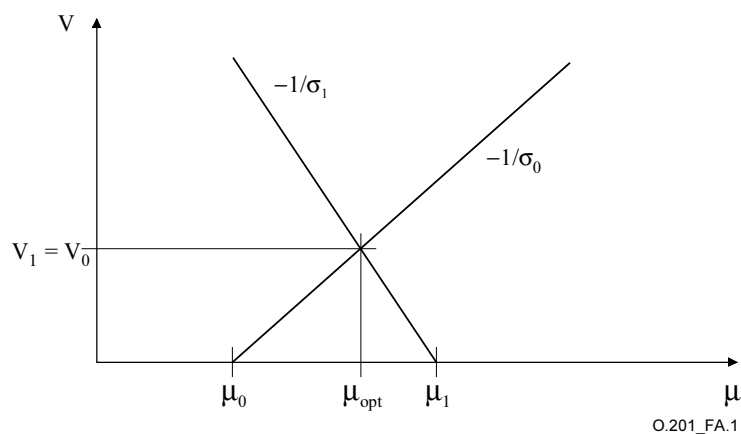
Два распределения обрабатываются отдельно:

$$BER1(\mu) = 1/4 \times \operatorname{erfc}(V_1/\sqrt{2}) \text{ для верхней половины глаз-диаграммы,} \quad (\text{A-2})$$

$$BER0(\mu) = 1/4 \times \operatorname{erfc}(V_0/\sqrt{2}) \text{ для нижней половины глаз-диаграммы,} \quad (\text{A-3})$$

где $V_1(\mu) = (\mu_1 - \mu)/\sigma_1$ и $V_0(\mu) = (\mu - \mu_0)/\sigma_0$.

Решая уравнения А-2 и А-3 для V_0 и V_1 и используя инверсную функцию ошибок, из измеренных значений BER посредством линий регрессии можно вычислить зависимость μ от V_0 и V_1 . Это дает первую совокупность расчетных значений для μ_1 , μ_0 , σ_1 и σ_0 (рисунок А.1).



O.201_FA.1

Рисунок А.1/О.201 – Экстраполяция с помощью регрессивных прямых линий

$V_1(\mu)$ вычисляется из точек измерения уровня "1",

$V_0(\mu)$ вычисляется из точек измерения уровня "0".

Второй шаг

Теперь для дальнейших расчетов используется полное равенство (уравнение А-1). Для уточнения μ_1 и σ_1 в равенство (уравнение А-1) вставляются расчетные значения μ_0 и σ_0 , и снова определяется зависимость V_1 от μ , что приводит к более точной совокупности μ_1 и σ_1 . На основе этой новой совокупности аналогично определяется уточненная совокупность μ_0 и σ_0 .

Второй шаг повторяется несколько раз. Если значение V_{opt} рисунка А-1 изменяется менее чем на 10^{-3} , итерация прекращается.

А.4 Вычисление результатов

Для вычисления результатов для оптимального BER и Q-фактора берется окончательная совокупность μ_1 , μ_0 , σ_1 и σ_0 .

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{А-4})$$

Оптимальную оценку BER получают с использованием уравнения А-1, установив $\mu = \mu_{opt}$ согласно рисунку А.1. Это приводит к:

$$optBER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (\text{А-5})$$

Мерой достоверности результатов является качество аппроксимации регрессивной прямой линии, представленное коэффициентами корреляции двух регрессивных линий. Для удовлетворения требованиям по точности настоящей Рекомендации (раздел 6) эти коэффициенты корреляции должны находиться в пределах 0,95–1,0.

Добавление I

Теория Q-фактора

I.1 Теория Q-фактора

I.1.1 Допущения

Единицы и нули не коррелированы; $P(0) = P(1) = 0,5$

Аддитивный шум статистически не зависит от сигнала.

I.1.2 Q-фактор

Q-фактор определяется для цифрового сигнала передачи как отношение сигнал–шум (SNR) в решающих схемах приемников и выражается как:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{I-1})$$

Q-фактор может быть выражен в децибелах, что предпочтительнее, чем прямое значение:

$$Q \text{ (децибелы)} = 20 \times \log_{10} Q \text{ (прямое значение)}, \quad (\text{I-2})$$

где μ_1 и μ_0 – средний уровень напряжения для уровней 0 и 1, а σ_1 и σ_0 – стандартная девиация распределения шума для уровней 0 и 1.

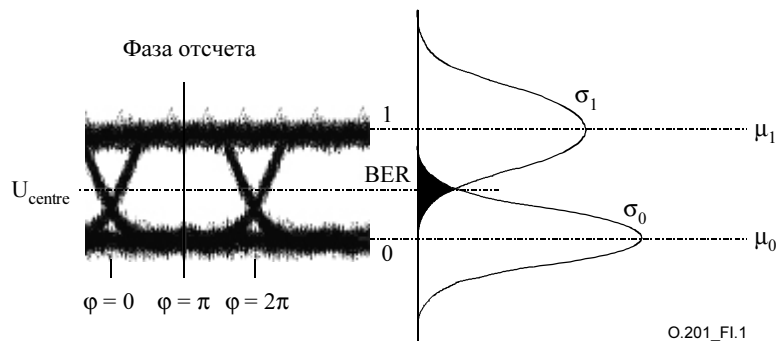


Рисунок I.1/O.201 – Соотношение между функцией плотности вероятности и коэффициентом ошибок по битам

Соотношение между BER и значениями μ и σ описывается в уравнении A-1.

I.2 Аппроксимация функции erfc

Для облегчения вычисления предлагается использовать аппроксимацию erfc в соответствии с уравнением I-3:

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \times \left[2 \times e^{-\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \frac{a0 + a1 \times \frac{Q}{\sqrt{2}} + a2 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[b0 + b1 \times \frac{Q}{\sqrt{2}} + b2 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2 + b3 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^3 \right] \times \sqrt{\pi}} \right], \quad (\text{I-3})$$

где:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,69071595 & b_0 &= 1,90764542 \\ a_1 &= 1,45117156 & b_1 &= 3,79485940 \\ a_2 &= 0,50003230 & b_2 &= 2,90845448 \\ & & b_3 &= 1,00000000 \end{aligned}$$

Как показано на рисунке I.2, точность этой аппроксимации лучше чем 2×10^{-6} при $Q > 1,5$, что более чем достаточно для Q-фактора. Аппроксимация BER3 (Q) приводит к бóльшим погрешностям ниже $Q = 5$ и поэтому не должна использоваться.

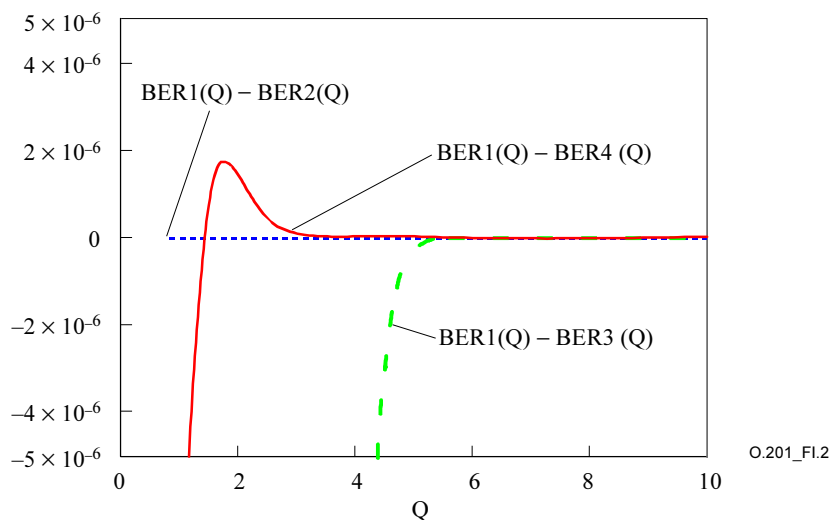


Рисунок I.2/О.201 – Точность различных аппроксимаций erfc

ПРИМЕЧАНИЕ. – На рисунке I.2 показаны отклонения от теоретического значения $BER1(Q)$

$BER2(Q)$, пунктирная линия: точная аппроксимация посредством численного интегрального метода

$BER3(Q)$, прерывистая линия: аппроксимация с помощью уравнения

$$\left(BER3(Q) = \frac{1}{Q \times \sqrt{2}} \times e^{-\frac{Q^2}{2}} \right)$$

$BER4(Q)$, сплошная линия: аппроксимация с помощью уравнения I-3

I.3 Инверсная функция $\text{erfc}(x)$, $\text{erfc}^{-1}(x)$

Вычисление $\mu_1, \mu_0, \sigma_1, \sigma_0$ и Q требует также вычисления инверсной функции erfc . Поскольку точность уравнения I-3 очень хорошая, $\text{erfc}^{-1}(x)$ определяется посредством итерации $\text{erfc}(x)$, начиная со значения из таблицы поиска.

Итерация прерывается, если соответствие лучше 10^{-6} .

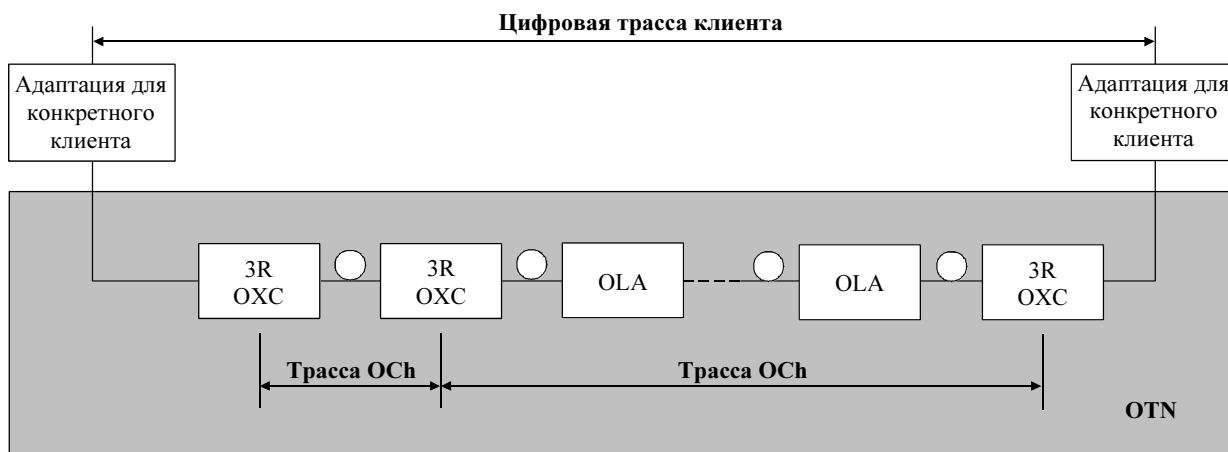
Добавление II

Качественные показатели и характеристики оптического канала

II.1 Качественные показатели оптического канала

II.1.1 Пример измерения Q-фактора

На рисунке II.2 приведен пример измерения Q-фактора. Это измерение позволяет осуществить ускоренное измерение качественных показателей трассы оптического канала (трассы OCh). Такая трасса оптического канала может быть частью более сложной оптической сети, включающей устройства OXC и/или OADM.



O.201_FII.1

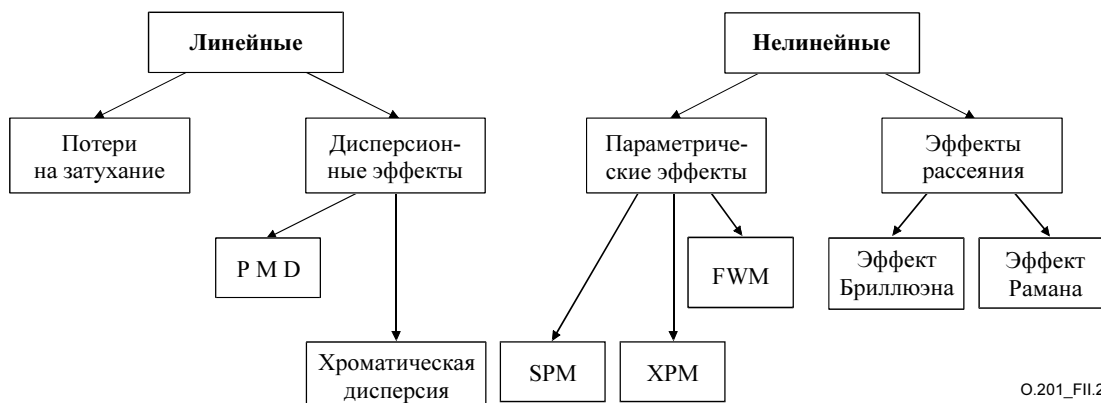
Рисунок II.1/O.201 – Оптическая транспортная сеть (OTN)

II.2 Характеристики оптического канала

II.2.1 Оптические характеристики

Оптические каналы характеризуются следующими первичными атрибутами:

- длина волны;
- мощность;
- отношение оптический сигнал–шум (OSNR);
- поддерживаемая полоса.



O.201_FII.2

Рисунок II.2/O.201 – Источники искажений в передаче DWDM

На рисунке II.2 показано, что OSNR определяется шумом усилителя и суммарным влиянием многочисленных линейных и нелинейных искажений, присутствующих в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи.

Метод измерения Q-фактора может охватывать все эти искажения и поэтому дает дополнительную информацию о качественных показателях, которая не доступна при измерениях оптического спектра и OSNR.

II.2.2 Коэффициент ошибок по битам

С точки зрения клиента цифровой сети коэффициент ошибок по битам (BER) между конечными пунктами является основополагающей мерой качества любой цифровой системы передачи. Из-за множества взаимосвязанных искажений при передаче оптического сигнала нет непосредственной связи между BER и оптическими характеристиками.

Измерения BER представляют собой измерения с прекращением связи, поскольку они основаны на побитовом сравнении принимаемого битового потока с известной испытательной последовательностью.

II.2.3 Коэффициент ошибок по блокам

Измерения показателей BER заменяются измерениями коэффициента ошибок по блокам без прекращения связи, но эта информация доступна только на границах OTN.

II.2.4 Q-фактор

Q-фактор определяется как отношение электрический сигнал–шум (ESNR) на входе решающей схемы приемника. ESNR отражает все создающие искажения оптические и электрические дефекты в исследуемой точке внутри оптической сети. При отсутствии возможности выполнить измерения истинного BER (например, из-за времени измерения, доступа к точкам измерений и т. д.) для обеспечения оценки качественных показателей, которые можно ожидать в процессе эксплуатации, может использоваться метод Q-фактора.

Определение Q-фактора приводится в Добавлении I и в Приложении A, уравнение A-4. Следует отметить, что точность оценки BER в значительной мере зависит от точек измерения, используемых для вычисления Q-фактора. Для получения лучших результатов значения μ и σ уравнения A-4 должны определяться из гауссового распределения вне "хвостов", близко к центру глаз-диаграммы, как описано в подразделе 5.5.

Измерения Q-фактора как таковые будут отражать только качественные показатели сети, поскольку его получают в приемнике QFME. Следовательно, чтобы сделать выводы о качественных показателях приемника системы, должна быть очень точно известна чувствительность и полоса пропускания приемника.

В отличие от BER и контроля ошибок по блокам, измерение Q-фактора требует только преобразования оптического сигнала в электрический и восстановления тактового сигнала, но не требует декодирования цикла и анализа заголовка, поэтому может использоваться также в точках соединения оптического канала между регенераторами 3R (см. рисунок II.1). Подробную информацию по теории Q-фактора можно найти в Добавлении I.

Добавление III

Недостатки, которые должны учитываться при существующих на практике условиях

В Добавлении I рассматривается теория Q-фактора при идеальных условиях, когда в качестве источника помех принимается гауссов шум. На практике необходимо учитывать следующие недостатки.

III.1 Искажения аналогового сигнала

Увеличение плотности длин волн и скорости передачи на каждой длине волны, что характерно для оптических систем передачи, приводит фактически к тому, что шум усилителя не является больше доминирующим источником помех при искажениях сигнала.

В зависимости от типа волокна, длины, плотности длин волн влияние линейных и нелинейных искажений будет приводить к отклонению от идеального гауссова распределения.

III.2 Зависимость от испытательной последовательности

Воздействие принимаемых последовательностей на форму глаз-диаграммы может повлиять на результаты измерения Q-фактора.

При измерениях с прекращением связи испытательная последовательность должна быть сигналом, сформированном в виде цикла согласно соответствующему стандарту, например Рекомендациям МСЭ-Т G.707 [2], O.181 [10], G.709 [3] и т. д.

Для сигналов OTN испытательная последовательность должна быть структурирована согласно подразделу 17.4/G.709 [3].

Для других протоколов должны использоваться наиболее подходящие испытательные последовательности, которые имеют сходство с трафиком в испытываемой сети.

III.3 Характеристики приемника

Из-за разницы между качественными показателями приемника QFME и приемника в сетевом элементе, подключенном к измеряемой линии, могут появиться отклонения фактических качественных показателей от оценочных.

Что касается характеристик приемника, необходимо рассматривать следующее: частотная характеристика, диапазон уровней входного оптического сигнала, нелинейность и ограничение амплитуды, характеристики фильтра DWDM или перестраиваемого оптического канального фильтра, переходные помехи, аспекты предусилителя.

III.4 Позиция фазы в точке дискретизации

Положение по ширине глаз-диаграммы, в котором она подвергается дискретизации, может влиять на повторяемость результатов измерений Q-фактора.

III.5 Влияние на Q-фактор

Из-за практических недостатков, описанных выше, оценка Q-фактора на основе идеальной модели гауссова шума может привести к неверным результатам экстраполяции. Поэтому эту модель нужно применять с некоторой осторожностью.

Поскольку некоторые эффекты (например, межсимвольная интерференция и переходные помехи) вызывают дробление и высокого, и низкого логического уровня на несколько уровней, наибольшие отклонения от гауссовой модели обнаруживаются в окрестности этих логических уровней.

Другие эффекты, такие как влияние перекрестной фазовой модуляции, приводят к появлению дополнительного шума, который может иметь распределение амплитуд, отличное от шума приемника и оптического усилителя, но добавляет в общий шум составляющие, имеющие новое гауссово распределение.

Как следствие, гауссово распределение может быть серьезно нарушено в окрестности логических уровней, но быть очень близким к идеальному вблизи порога решения (гауссовы "хвосты").

Для получения сопоставимых результатов измерения аппаратурой QFME разных производителей предполагается, что оценка Q-фактора должна быть основана только на гауссовых "хвостах" при использовании измеренных значений BER, равных 10^{-4} или ниже, и исключении уровней в непосредственной близости к логическим уровням "1" и "0".

Добавление IV

Предложения по реализации QFME

IV.1 Блок-схемы

Для примера на рисунках IV.1 и IV.2 показаны два потенциальных варианта: один из них дает возможность выполнить измерения без прекращения связи согласно рисунку IV.1 с использованием двойной решающей схемы, а другой – измерения с прекращением связи согласно рисунку IV.2 с использованием одиночной решающей схемы.

Могут быть верны и другие конфигурации, которые также соответствуют требованиям настоящей Рекомендации.

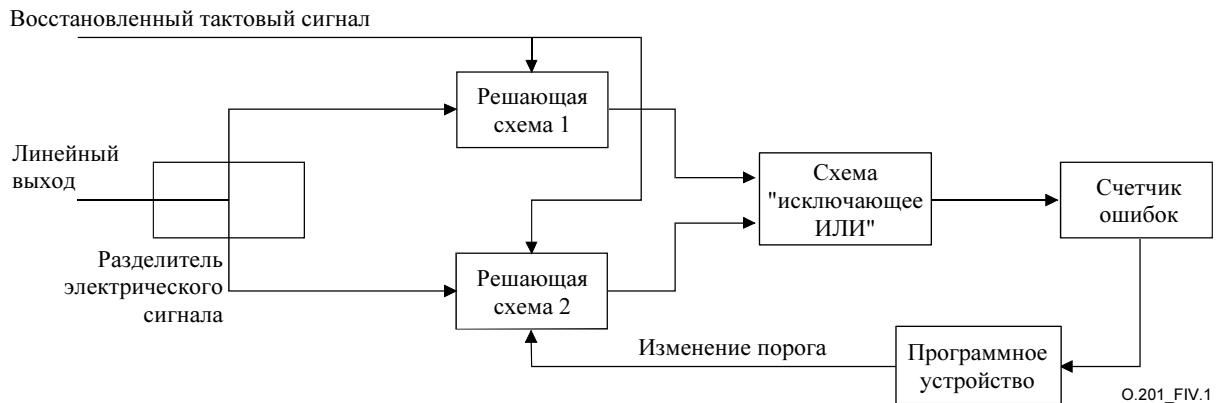


Рисунок IV.1/O.201 – Блок-схема реализации аппаратуры измерения Q-фактора с двойной решающей схемой

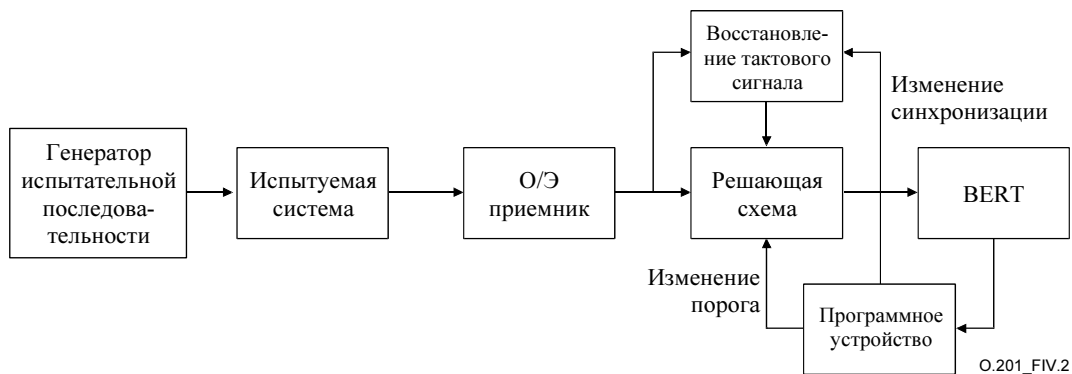


Рисунок IV.2/O.201 – Вариант с одиночной решающей схемой для измерения Q-фактора

IV.2 Функциональное описание

IV.2.1 Двойная решающая схема

Согласно рисунку IV.1 сигнал от оптико-электрического преобразователя подается на две решающие схемы, в которых электрический сигнал подвергается дискретизации с восстановленной тактовой частотой. Решающая схема 1 настраивается на его оптимальное положение в пределах глаз-диаграммы. Она используется как эталонная. Решающая схема 2 может настраиваться на произвольные значения относительно фазы дискретизации и уровней порогов. Разница в выходных сигналах этих двух решающих схем определяется схемой EXOR и подсчитывается как ошибки по битам. Установки решающей схемы 2 изменяются при помощи программного устройства, а результирующие коэффициенты ошибок по битам запоминаются.

Этот тип аппаратуры не требует специальной испытательной последовательности, а может использовать для проведения измерений сигналы реального трафика (см. также п. III.2).

Обеспечивая дискретизацию всей глаз-диаграммы по напряжению и фазе порога, эта измерительная установка представляет собой устройство дискретизации глаз-диаграммы для получения BER. На практике измерения BER выполняются в зависимости от напряжения порога с дискретизацией по фазе в качестве параметра (см. рисунок IV.3).

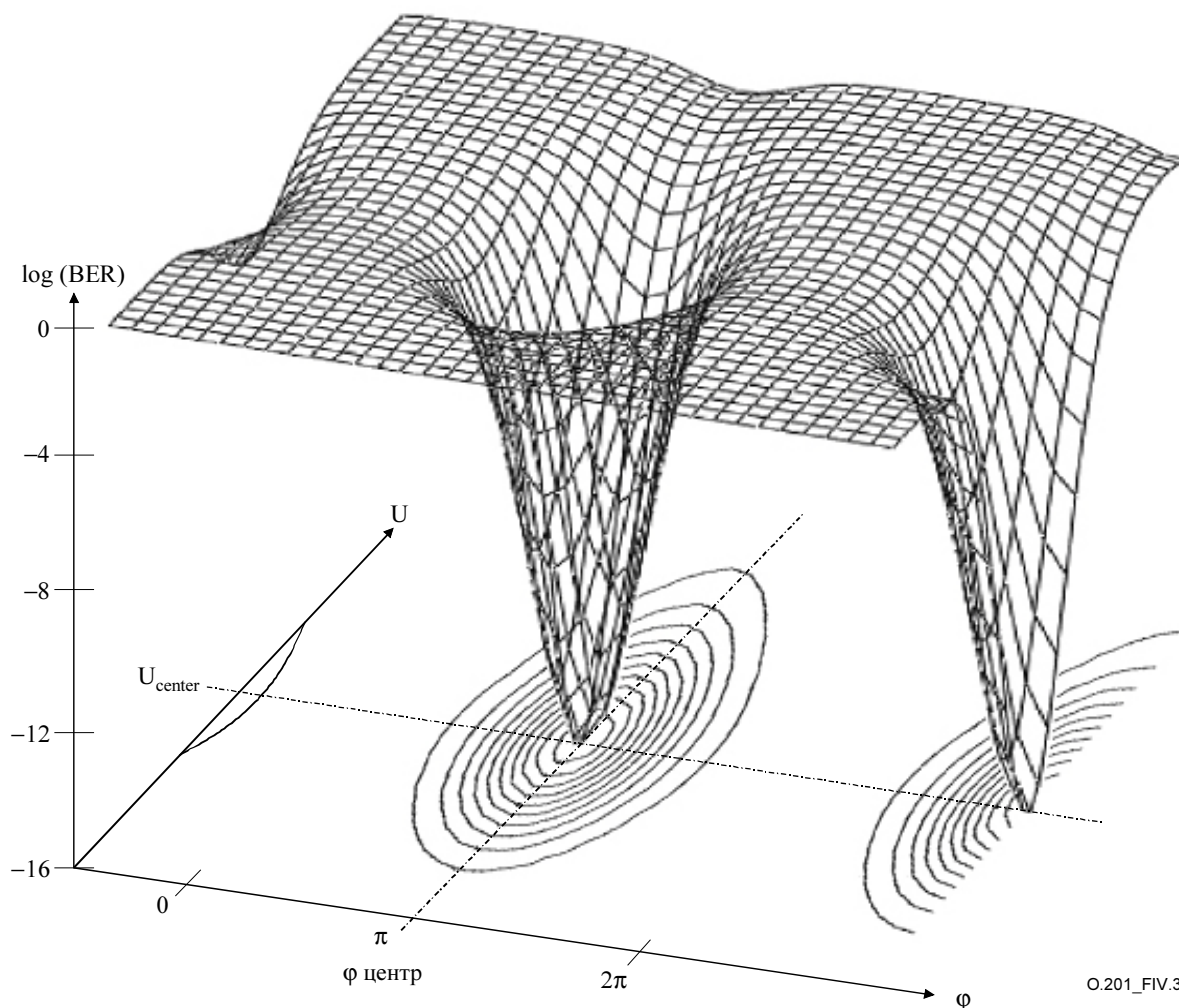


Рисунок IV.3/O.201 – Коэффициент ошибок по битам как функция порога решения и фазы

IV.2.2 Одиночная решающая схема

В отличие от установки, приведенной на рисунке IV.1, здесь необходимо использовать известный поток данных (PRBS от генератора испытательной последовательности). Ошибки по битам, возникающие при изменении напряжения порога, подсчитываются при сравнении выходного сигнала решающей схемы и первоначальной последовательности данных, что осуществляется в модуле BERT. Хотя использование известных испытательных последовательностей может увеличить повторяемость результатов, этот метод может иметь ограничения по использованию, если в приемнике происходит потеря синхронизации последовательности при слишком больших изменениях фазы дискретизации и напряжения порога.

IV.2.3 Математические процедуры и экстраполяция

При обращении к *P.A. Humblet* и *M.Azizoglu* [B1] видно, что имеется зависимость BER от напряжения порога.

Как показано на рисунке IV.4, имеются две совокупности точек измерений, принадлежащих логическому уровню 1 и логическому уровню 0, соответственно. Для обеих совокупностей точек применяется гауссова аппроксимация. Это может быть сделано путем вычисления прямых линий регрессии в области $V = f(\mu)$. При соответствующих значениях μ и σ вычисляется Q сигнала. Подробно процесс поясняется в Приложении А.

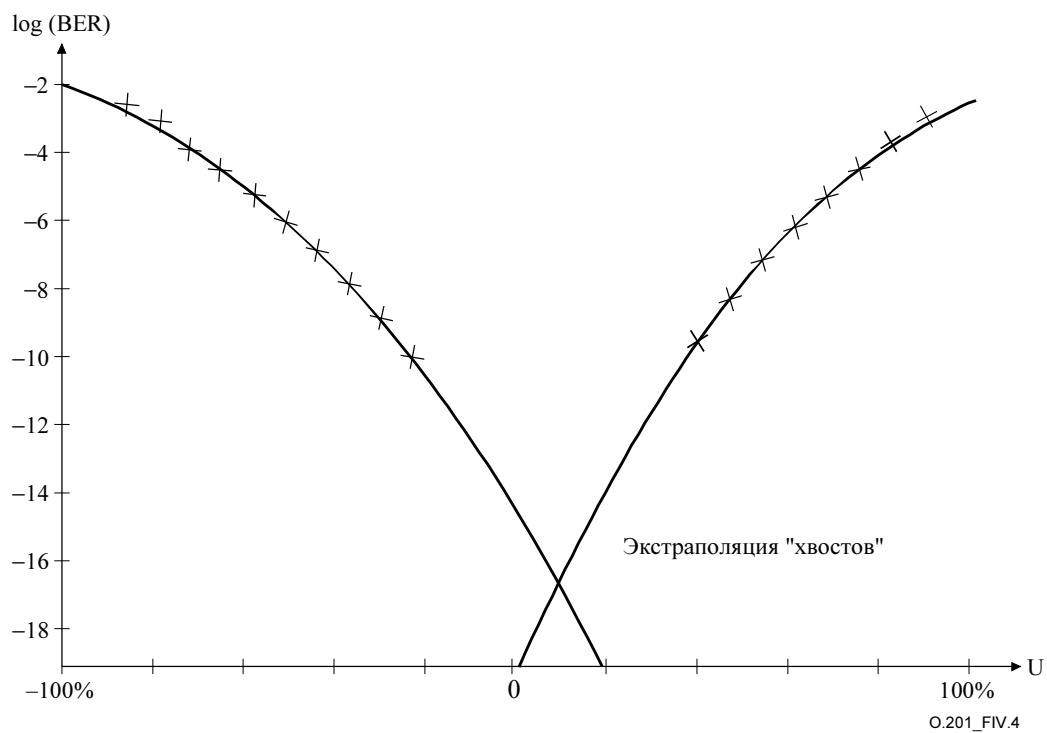


Рисунок IV.4/O.201 – Экстраполяция точек измерений

Отклонение от гауссова распределения:

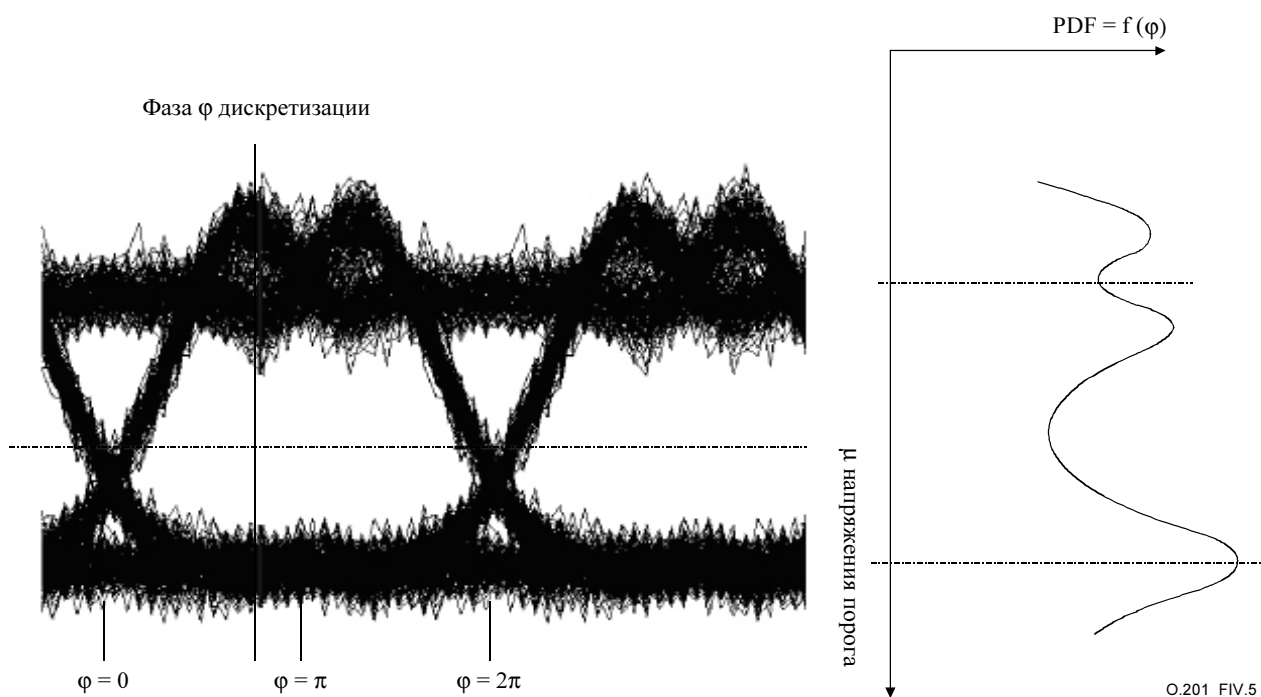


Рисунок IV.5/O.201 – Негауссово распределение

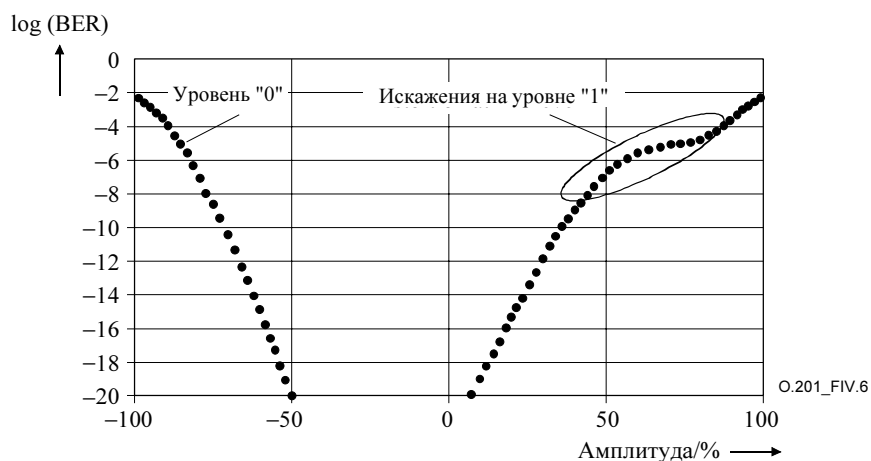


Рисунок IV.6/O.201 – Дискретная линия с искажениями, например с переходными помехами

При дискретизации сигнала с негауссовым распределением (рисунок IV.5) аппроксимацию необходимо осуществлять очень аккуратно. Коэффициенты корреляции (см. Приложение А) имеют значения не более 1, и процесс аппроксимации пожелит модификации. При обращении к примеру на рисунке IV.6 видно, что процесс аппроксимации можно улучшить, только используя данные при BER ниже 10^{-7} .

IV.3 Режимы измерений

IV.3.1 Измерения без прекращения связи

Измерения без прекращения связи могут быть выполнены по измерительной схеме согласно рисунку IV.1, которая соответствует схеме на рисунке 3/G.976 [8].

В этом случае эталонный порог решения и тактовый сигнал сначала устанавливаются в стандартное положение в центре идеального раскрытия глаза. Решающая схема с переменным порогом затем изменяется по отношению к тактовому сигналу и уровню, и регистрируется коэффициент ошибок. На основе этих данных эталонный порог решения и тактовый сигнал автоматически настраиваются на оптимум.

Теперь параметры переменной решающей схемы вновь изменяются, регистрируется коэффициент ошибок, и для дальнейшей оценки берется только комбинация параметров, приводящая к коэффициенту ошибок ниже 10^{-4} . На основе этих данных затем вычисляется Q-фактор.

IV.3.2 Измерения с прекращением связи

Возможны также измерения с прекращением связи по измерительной схеме согласно подразделу 6.3.1. В качестве стимулирующего сигнала может быть взят сигнал как из реального канала, так и выработанный генератором испытательной последовательности. В этом случае в качестве замены приемника системы можно также использовать аппаратуру для измерения Q-фактора.

Как вариант, можно выполнять измерения с прекращением связи по схеме, приведенной на рисунке IV.2.

В этом случае на стороне передачи необходим генератор испытательной последовательности, а на стороне приема – специальная аппаратура для измерения BER с регулируемым порогом решения и тактовым сигналом.

Начиная со стандартного положения порога и тактового сигнала фиксируется зависимость BER от положения порога и тактового сигнала. На основе этих данных вычисляется оптимизированный тактовый сигнал, и измерения BER повторяются с измененным порогом и указанным оптимизированным тактовым сигналом. Из этих результатов для экстраполяции Q-фактора берутся только те, которые приводят к BER ниже 10^{-4} .

Добавление V

Дополнительные проверочные испытания

V.1 Импульсная характеристика приемника

Для проверки импульсной характеристики приемника могут использоваться измерения МСИ и измерения фазы в случае, когда в QFME предусматривается возможность регулировки фазы в точке решения.

V.1.1 Измерения МСИ

Q-фактор измеряется с использованием испытательной установки согласно подразделу 6.1.7, которая включает цифровой эталонный передатчик со встроенным лазером с внешней модуляцией, который генерирует сигнал с формой импульса, соответствующей маскам импульса, приведенным в Рекомендациях МСЭ-Т G.957 [6] и G.691 [1].

В качестве модулирующего сигнала используется либо последовательность 11001100, либо PRBS $2^{23}-1$. Если возможно, измерение выполняется с испытательными последовательностями без цикла. Для последовательности 11001100 не допускается скремблирование модулирующего сигнала. С помощью оптических аттенуаторов, показанных на рисунке 1, OSNR устанавливается так, чтобы Q-фактор ≈ 7 , в то время как мощность входного сигнала, подаваемого на QFME, устанавливается на промежуточное значение в допустимом диапазоне уровней.

При помощи стробоскопического осциллографа для отображения глаз-диаграммы передаваемого сигнала убеждаются, что сигнал с обеими модулирующими последовательностями визуально не имеет МСИ.

Q-факторы, измеренные с использованием последовательности 11001100 и PRBS, должны отличаться менее чем на (TBD)%.

V.1.2 Фазовые измерения

Сигнал PRBS установки для калибровки, показанной на рисунке 1, регулируется согласно подразделу 6.1.7 до получения показания $Q \approx 7$ на QFME.

Фаза дискретизации на QFME изменяется на $\pm 10\%$ (где 0% соответствует центру глаз-диаграммы, а 100% – ширине бита).

Измеренное значение Q не должно отклоняться более чем на 12% (1 дБ) от результата при 0%.

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия В	Средства выражения: определения, символы, классификация
Серия С	Общая статистика электросвязи
Серия D	Общие принципы тарификации
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	Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	TMN и техническое обслуживание сетей: международные системы передачи, телефонные, телеграфные, факсимильные и арендованные каналы
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
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 и взаимосвязь открытых систем
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура и аспекты межсетевого протокола (IP)
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи

