

# Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений торцевых поверхностей феррул коннекторов

А.В. Бурдин<sup>1, 2\*</sup>, С.С. Пашин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

<sup>2</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: bourdine@yandex.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию 02.09.2020

Принята к публикации 02.11.2020

**Ссылка для цитирования:** Бурдин А.В., Пашин С.С. Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений торцевых поверхностей феррул коннекторов // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 16–27. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27

**Аннотация:** В работе представлена альтернативная методика оценивания коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений загрязненной торцевой поверхности феррул пары коннекторов исследуемого стыка, полученных штатным полевым комплектом видеодиагностики состояния волоконно-оптических коннекторов. Приведены результаты экспериментальной верификации предложенной методики, которые продемонстрировали потенциальные возможности ее использования в практических приложениях «бесконтактного» определения коэффициента отражения на волоконно-оптическом разъемном соединении.

**Ключевые слова:** феррул, волоконно-оптический коннектор, коэффициент отражения, загрязнение феррула, торец феррула, волоконно-оптическое разъемное соединение, коэффициент связи мод, структурированные кабельные системы.

## Введение

На сегодняшний день ключевым инструментом построения и развития информационного общества РФ, согласно положениям Указа Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 г.», Программе «Цифровая экономика РФ», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р и Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017–2030 гг., утвержденной Указом Президента РФ от 09.05.2017 № 203, являются современные инфокоммуникационные технологии, развитие которых не представляется возможным без обеспечения соответствующей инфо- и телекоммуникационной инфраструктуры, особое место в которой занимают волоконно-оптические подсистемы структурированных кабельных систем (СКС) центров обработки данных, сетей хранения данных, вычислительных центров,

внутрикорпоративных сетей передачи данных различного назначения и др. приложений.

В отличие от «традиционных» сетей широкополосного доступа, соединительные волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) подсистем СКС характеризуются малой протяженностью (буквально десятки–сотни метров). Поэтому весь комплекс приемо-сдаточных измерений, проводимый с помощью оптических рефлектометров обратного рассеяния во временной области – OTDR (аббр. от англ. Optical Time Domain Reflectometer), обязательный, в соответствии с РД 45.156-2000 [1], для ВОЛП сетей связи общего пользования, при этом является опциональным для ВОЛП СКС, согласно ГОСТ Р 53245-2008 [2]. По этой причине подавляющее большинство бригад предприятий, деятельность которых ориентирована в основном на установку подсистем СКС, не укомплектованы OTDR, которые, в общем случае, являются достаточно доро-

гостоящими средствами измерения. При этом контроль качества монтажа оконечных устройств коммутации волоконно-оптических подсистем СКС, как минимум, осуществляется с помощью оптических тестеров для проведения обязательного комплекса измерений вносимых потерь на кабельном участке, выполняемых по окончании всех работ по инсталляции линии. Это, в целом, частично снимает вопрос по выявлению соединений, неудовлетворяющих нормам [2–4] на допустимое значение указанного параметра, в то время как проблема оценивания коэффициента отражения, пороговая величина которого также нормируется не только для ВОЛП сетей связи общего пользования [5, 6], но и для подсистем СКС [2–4], остается открытой.

В свою очередь, для оперативного контроля качества разъемных соединений в патч-панелях и телекоммуникационных розетках непосредственно в процессе монтажа достаточно широко используются полевые комплекты видеодиагностики, например, [7], которые включают в себя видеоскоп, реализующий возможность получения изображения торцевой поверхности феррул коннектора, и соответствующее программное обеспечение для анализа этого изображения на предмет проведения теста чистоты феррул на уровне «Pass/Fail» в соответствии с ратифицированным стандартом IEC 61300-3-35 [8], предполагающим зонирование центра феррул коннектора на 3 области: «А» – сердцевина / граница сердцевины-оболочки / прилегающая область оболочки оптических волокон (ОВ); «В» – оболочка ОВ до границы оболочка-феррул; «С» – контактная зона феррула.

Можно предположить, что соответствующий анализ состояния торцевых поверхностей феррул коннекторов с использованием данных, полученных в ходе проведенной обработки их изображений, позволит реализовать оценку параметров передачи тестируемого волоконно-оптического разъемного соединения. Данная работа непосредственно посвящена решению задачи разработки альтернативной методики оценивания коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых – SM (аббр. от англ. Single Mode) – ОВ на основе описанного подхода и ее экспериментальной верификации.

#### **Разработка методики оценивания коэффициента отражения на стыке одномодовых ОВ на основе анализа перекрытия радиального распределения полей в дискретном представлении**

В настоящее время оценка коэффициентов связи мод на анализируемом соединении пары волоконных световодов является одним из наиболее широко используемых методов исследования процессов взаимодействия и передачи мощности от

модовых компонентов оптического излучения, поступающего из «возбуждающего» или «передающего» (далее – Tx) ОВ, возбуждаемым модовым составляющим оптического сигнала в «принимающем» (далее – Rx) ОВ. Этот подход активно используется для оценивания базовых параметров волоконно-оптического соединения – в первую очередь, вносимых потерь – на стыках однотипных ОВ с некоторым отличием по геометрическим характеристикам – например, радиуса пятна моды – MFR (аббр. от англ. Mode Field Radius), диаметра сердцевины, отклонения профиля показателя преломления [9–13], а также моделировании и исследовании влияния условий подключения источника оптического излучения на процессы возбуждения волоконных световодов [10, 14–17].

В общем случае коэффициент связи моды  $m$ , возбуждающей моду с индексом  $n$ , определяется через интеграл перекрытия полей взаимодействующих мод  $m$  и  $n$ , который в скалярной постановке задачи для цилиндрической системы координат имеет следующий вид [9–17]:

$$\eta_{pq} = \frac{\left| \int_0^\infty \int_0^{2\pi} F_m^{(l_p)} F_m^{(l_q)} r dr d\varphi \right|^2}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left| F_m^{(l_p)} \right|^2 r dr d\varphi \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left| F_m^{(l_q)} \right|^2 r dr d\varphi}, \quad (1)$$

где  $F_m^{(l_p)}$  и  $F_m^{(l_q)}$  – радиальные распределения полей взаимодействующих мод – поступающей с выхода «возбуждающего» ОВ «возбуждающей» моды  $LP_{lm(p)}$  и «возбуждаемой» в «возбуждаемом» ОВ моды  $LP_{lm(q)}$ ;  $l$  и  $m$  – азимутальный и радиальный порядки моды  $LP_{lm}$ , соответственно;  $r$  – радиальная координата;  $\varphi$  – полярный угол в полярной системе координат.

В данной работе для решения задачи анализа прохождения оптического излучения через соединение пары ОВ с загрязненной торцевой поверхностью предлагается осуществить представление интеграла перекрытия полей мод в виде конечных вложенных сумм по компонентам радиального распределения полей этих мод:

$$\eta_{mn} = \frac{\left[ \sum_p \sum_q F_m^{(l_m)}(x_p, y_q) F_n^{(l_n)}(x_p, y_q) \right]^2}{\left\{ \sum_p \sum_q \left[ F_m^{(l_m)}(x_p, y_q) \right]^2 \right\} \left\{ \sum_p \sum_q \left[ F_n^{(l_n)}(x_p, y_q) \right]^2 \right\}}, \quad (2)$$

где  $F_m^{(l_m)}$  и  $F_n^{(l_n)}$  – радиальные распределения полей взаимодействующих мод – поступающей с выхода Tx ОВ Tx-моды  $LP_{lm}$  и в Rx ОВ Rx-моды  $LP_{ln}$ ;  $l$ ,  $m$  и  $n$  – азимутальный и радиальные порядки мод  $LP_{lm}$  и  $LP_{ln}$ , соответственно;  $x$  и  $y$  – координаты Декартовой системы координат.

Здесь радиальные распределения полей взаимодействующих мод могут быть непосредственно корректно рассчитаны через представление, например, в базисе функций Лагерра – Гаусса [10] либо с помощью строгих численных методов, где в

качестве исходных данных могут использоваться протоколы измерений профиля показателя преломления промышленных образцов ОВ, выполненных с помощью штатных лабораторных комплектов анализаторов волоконных световодов. Подобное «сеточное» представление соединения ОВ позволяет вводить нулевые компоненты радиального распределения поля вводимой и/или возбуждаемой моды в загрязненных локациях сердцевин стыкуемых ОВ и, как результат, учитывать данный фактор в итоговом значении коэффициента связи.

Для оценки потенциальных возможностей применения данного подхода анализа стыка ОВ, в основе которого лежит дискретное представление полей взаимодействующих мод, предлагается рассмотреть процесс прохождения основной (фундаментальной) моды  $LP_{01}$ , характеризуемой наиболее простым распределением поля, через соединение пары SM волоконных световодов, выполненного с некоторым радиальным рассогласованием при разбросе значений MFR взаимодействующих мод. Рассматривается соединение двух SM ОВ с максимальным разбросом значений MFR: MFR вводимой моды составляет  $\rho_{Tx} = 4,2500$  мкм, MFR возбуждаемой моды  $\rho_{Rx} = 4,8500$  мкм (рабочая длина волны  $\lambda = 1310$  нм). Предполагается, что исследуемое соединение выполнено строго центрировано и с некоторым заданным радиальным рассогласованием. Исследуется диапазон вносимого смещения между осями срачиваемых ОВ  $d = 0 \dots 10$  мкм с шагом 0,5 мкм. Действительное значение коэффициента связи вычислялось по известной аналитической формуле для стыка пары ОВ, выполненного с осевым смещением, полученной в рамках приближения Гаусса [9–17]:

$${}_0\eta_{11}(d) = \frac{4\rho_{Tx}^2\rho_{Rx}^2}{(\rho_{Tx}^2 + \rho_{Rx}^2)^2} \exp\left[-\frac{d^2}{\rho_{Tx}^2}\left(1 - \frac{\rho_{Tx}^2}{\rho_{Tx}^2 + \rho_{Rx}^2}\right)\right], \quad (3)$$

где  $\rho_{Tx}$  и  $\rho_{Rx}$  – MFR основных мод  $LP_{01}$  Rx и Tx ОВ, соответственно.

Результаты сопоставления погрешности вычисления коэффициента передачи основной моды  $LP_{01}$ , выполненные на оптической несущей  $\lambda = 1310$  нм, для описанного выше соединения двух SM ОВ в указанном диапазоне значений осевого смещения  $d$  для разного шага дискретизации представления поля моды  $\Delta x = 0,5; 0,25; 0,125$  и  $0,1$  мкм приведены на рисунке 1. Анализ полученных данных показывает, что уже при выборе  $\Delta x = 0,500$  мкм погрешность соответствует экстремально низким – менее  $10^{-10}$  % – значениям.

Как известно, коэффициент отражения на стыке ОВ оценивается как логарифм отношения мощности оптического сигнала, отраженной от анализируемого соединения  $P_{REFL}$ , к мощности оптического сигнала, поступившей на вход этого соединения  $P_{IN}$  [18–20]:

$$R = 10\log\left(\frac{P_{REFL}}{P_{IN}}\right). \quad (4)$$

Известные формулы по оценке данного параметра [10, 21] в основном учитывают такие факторы, как разброс значений показателя преломления соединяемых ОВ (в том числе, и наличие воздушного зазора), числовых апертур, а также наличие угловых/радиальных рассогласований.

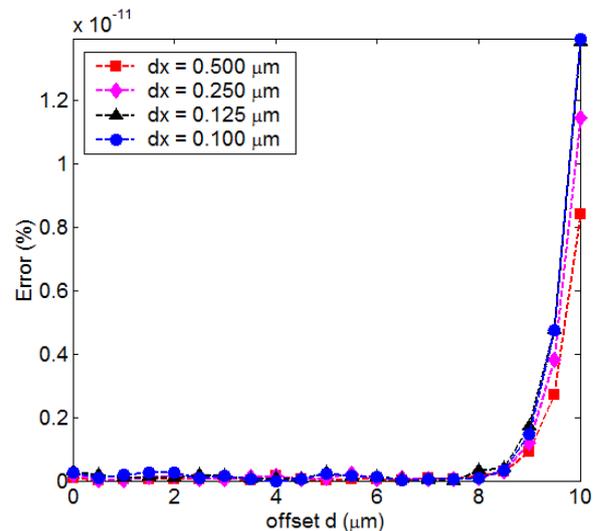


Рис.1. Сравнительная оценка погрешности вычисления коэффициента передачи основной моды  $LP_{01}$  для соединения двух SM ОВ с максимальным разбросом MFR в диапазоне значений осевого смещения  $d = 0 \dots 10$  мкм для заданного шага дискретизации  $\Delta x$

Fig. 1. Comparative Evaluation of the Fundamental Mode  $LP_{01}$  Transition Factor Error, Performed for Two SMFs Connection with Maximal Deviation Between MFRs Over Offset Range  $d = 0 \dots 10$  μm under Particular Discretization Step  $\Delta x$

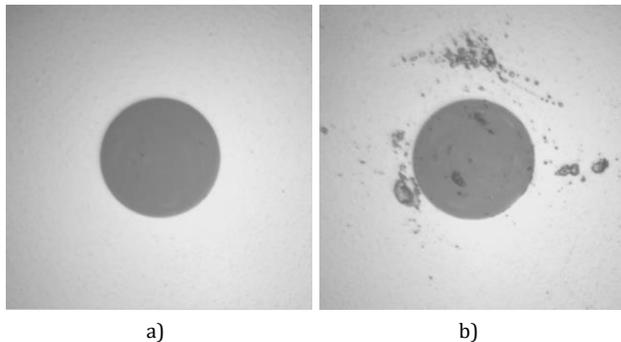
Однако они не учитывают степень и характер загрязнения феррул разъемного соединения ОВ. Поэтому с точки зрения учета влияния фактического состояния торцевой поверхности феррул волоконно-оптических коннекторов, как фактора искажения поля моды в дискретном представлении, для этой цели также предлагается использовать результаты оценки коэффициентов связи мод.

Тогда для стыка SM ОВ в первом приближении формула для оценивания коэффициента отражения через коэффициент связи основной моды  $LP_{01}$  может быть записана в следующем виде:

$$R = 10\log(1 - {}_0\eta_{11}). \quad (5)$$

Для проведения предварительной апробации изложенного подхода оценивания коэффициента отражения разъемного соединения ОВ на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов предлагается рассмотреть следующее соединение пары SM ОВ: рабочая длина волны  $\lambda = 1310$  нм; MFR обоих соединяемых ОВ выбирается а) одинаковым и равным номинальному – 4,6 мкм и б) с максимальным разбросом значений MFR; внесенное радиальное рассогласование варьируется в диапазоне  $d = 0 \dots 10$  мкм.

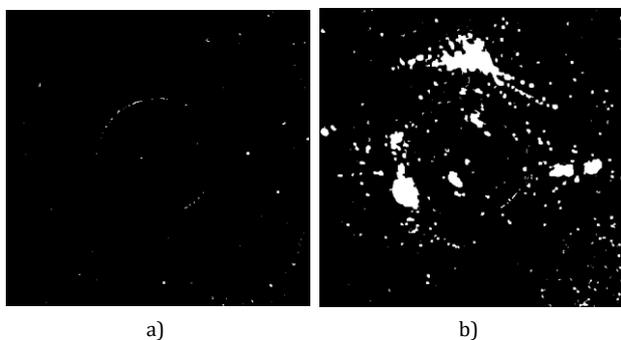
Исходные изображения торцов коннекторов после проведения процедур центрирования и масштабирования относительно центров сердцевин соединяемых Tx и Rx ОВ представлены на рисунке 2. Так, феррул Tx-коннектора тщательным образом очищен и прошел тест по всем трем зонам ABC, в то время как торец феррула Rx-коннектора, напротив, сильно загрязнен и «провалил» тесты по всем трем зонам ABC.



**Рис. 2. Исходное центрированное и масштабированное относительно центра симметрии сердцевины ОВ изображение фрагмента торца феррула коннектора: а) Tx ОВ; б) Rx ОВ**

*Fig. 2. Initial Centered and Scaled Part of Ferrule End Image, Referred to Optical Fiber Core Symmetry Center: a) Tx Optical Fiber; b) Rx Optical Fiber*

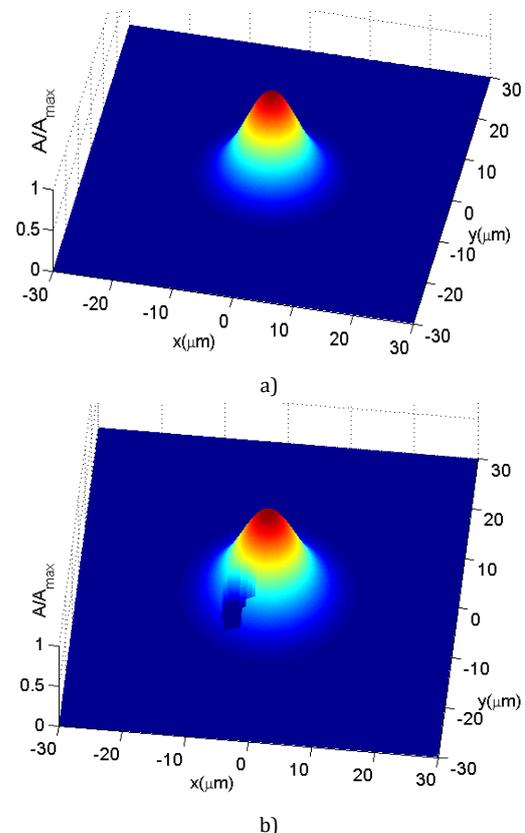
Результирующие бинарные изображения торцов феррул коннекторов Tx и Rx после удаления ореолов границ сердцевины и оболочки и последующей локализации артефактов приведены на рисунке 3. Согласно данным измерений, проведенных методом обратного рассеяния во временной области на рабочей длине волны  $\lambda = 1310$  нм, коэффициент отражения на данном разъёмном соединении достигает значения  $R = -36,861$  дБ. Несмотря на достаточно сильное загрязнение торца Rx-коннектора, это значение формально удовлетворяет нормам по данному параметру для разъёмных соединений подсистем СКС ( $-35$  дБ для SM ОВ [2–4]) и является неприемлемо высоким для сетей связи общего пользования:  $-45$  дБ [5, 6].



**Рис. 3. Результирующее бинарное изображение после удаления ореолов границ сердцевины и оболочки и локализации артефактов: а) Tx ОВ; б) Rx ОВ**

*Fig. 3. Resulting Binary Image After Removal of core/Cladding Boundaries and Localization of Dust Artefacts: a) Tx Optical Fiber; b) Rx Optical Fiber*

На рисунке 4 представлены результаты реконструкции 3D-поверхности эквивалентного радиального распределения поля основной моды  $LP_{01}$  волокон Tx и Rx в центральной зоне сердцевины  $60 \times 60$  мкм с учетом наведенных за счет загрязнения торцевой поверхности феррула искажений. Результаты расчета коэффициента отражения на стыке SM ОВ с учетом введенного радиального рассогласования при сильном загрязнении торцевой поверхности Rx ОВ и чистой поверхности Tx ОВ, проведенные для пары SM ОВ как с максимальным разбросом паспортных значений MFR, так и идентичными номинальными MFR обоих ОВ на длине волны  $\lambda = 1310$  нм, представлены в виде кривых зависимости указанного параметра стыка от величины смещения центральных осей сердцевин соединяемых ОВ (см. рисунок 5а).

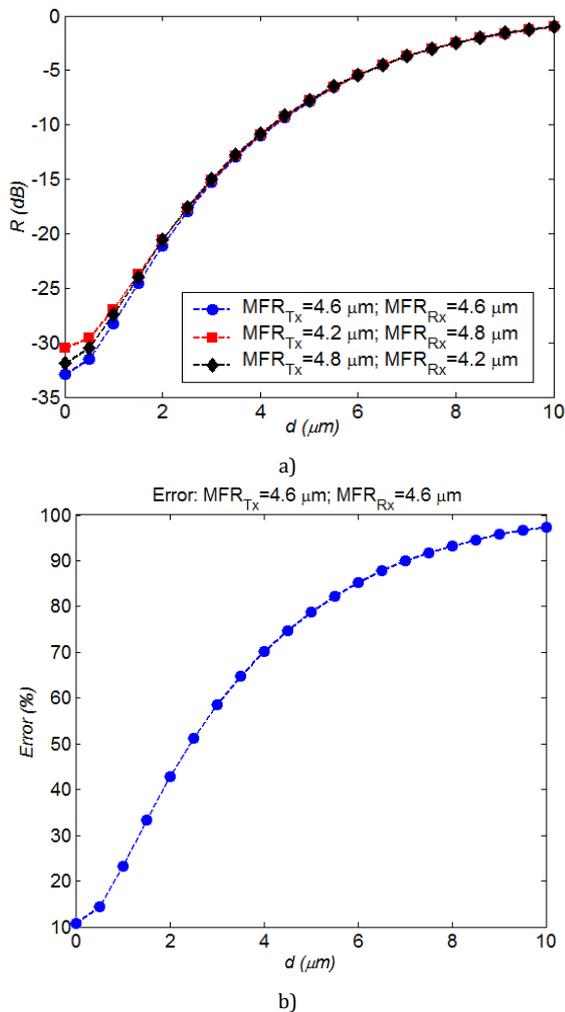


**Рис. 4. Реконструкция 3D-поверхности эквивалентного радиального распределения поля основной моды  $LP_{01}$ : а) Tx ОВ; б) Rx ОВ**

*Fig. 4. Reconstruction of 3D-Surface of the Fundamental Mode  $LP_{01}$  Field Radial Distribution: a) Tx Optical Fiber; b) Rx Optical Fiber*

Хорошо видно, что разброс MFR оказывает некоторое влияние на итоговое значение коэффициента отражения для централизованного стыка и при сравнительно малых радиальных рассогласованиях – фактически до  $d = 2 \dots 3$  мкм. При этом сопоставление с действительным (измеренным) значением  $R = -36,861$  дБ показывает, что теоретический расчет демонстрирует завышенные (ухудшенные) значения. Причем с увеличением введенного радиального рассогласования это отличие только увеличивается.

Анализ построенной кривой относительной погрешности – отклонения расчетного коэффициента отражения от действительного значения (см. рисунок 5а) для случая идентичных номинальных MFR обоих ОВ, показавшего наиболее близкие к измеренным данным результаты расчета, демонстрирует, что минимальное расхождение достигает 10,71 %.



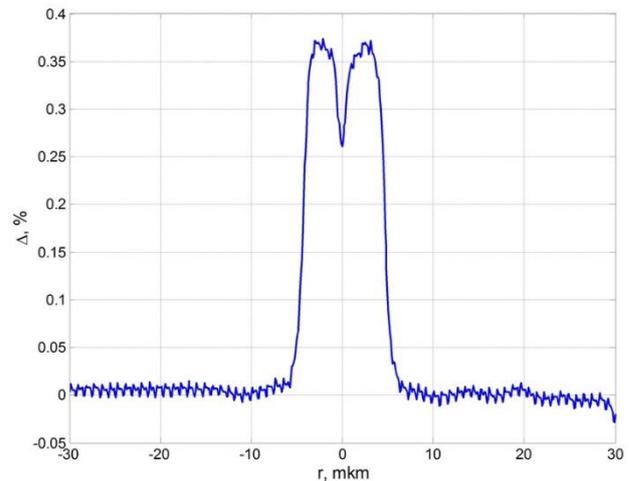
**Рис. 5.** Результаты расчета коэффициента отражения на стыке SM ОВ с учетом введенного радиального рассогласования при сильном загрязнении торцевой поверхности Rx ОВ и чистой поверхности Tx ОВ с максимальным разбросом значений MFR и номинальным значением MFR обоих ОВ (оптическая несущая  $\lambda = 1310$  нм): а) кривые зависимости коэффициента отражения от величины смещения центральных осей сердцевин, соединяемых ОВ; б) погрешность относительно действительного (измеренного) значения

*Fig. 5. Results of Computation of Reflection Coefficient at the Connection of Two SMFs under Taking into Account Inserted Offset and Strong Tx Connector Ferrule End Contamination with the Maximal Deviation of MFRs and Nominal Value of MFR for both Optical Fibers: a) Curves of Reflection Dependence on Offset Between Connected Fiber Cores; b) Error Between Computed and Measured Values*

Это позволяет сделать предположение о завышенном расчетном значении отраженной от стыка мощности оптического излучения и необходимости учета дополнительных факторов передачи/

расхода мощности основной моды  $LP_{01}$ , поступающей из Tx ОВ, компонентам возбуждаемого в Rx ОВ оптического излучения.

Для этой цели был проведен расчет параметров передачи модового состава стандартного SM ОВ (рек. ITU-T G.652). При этом в качестве исходных данных были использованы результаты измерений профиля показателя преломления промышленного образца SM ОВ, которые были проведены в рамках инициативных исследований с помощью анализатора волоконных световодов [5] (рисунок 6).



**Рис. 6.** «Ступенчатый» профиль показателя преломления промышленного образца стандартного одномодового ОВ SSF: протокол измерения

*Fig. 6. "Step-Index" Refractive Index Profile of Sample of Commercially Available Standard SMF: Measurement Report*

Реальный профиль достаточно сильно отличается от идеализированного ступенчатого (см. рисунок 6). Здесь присутствуют не только локальные флуктуации показателя преломления, но и дефект в центре сердцевин в виде провала. При этом сама форма профиля носит, в целом, сглаженный характер. Следует отметить, что радиальная координата половины высоты профиля  $n_{\text{max}}/2$  равна 4,08 мкм, что, в целом, не противоречит спецификациям SM ОВ ведущих производителей [20] и, в общем случае, позиционируется в паспортных данных, как радиус сердцевин. Однако значение радиальной координаты непосредственно границы раздела сердцевин/оболочка (с учетом сглаженного характера формы профиля показателя преломления) достигает уже 6,65 мкм, что непосредственно может рассматриваться как фактический радиус сердцевин рассматриваемого SM ОВ.

Результаты расчета, выполненные с помощью ранее разработанного [22] обобщения модификации приближения Гаусса (ОМПГ) на длине волны  $\lambda = 1310$  нм, позволили выявить, что характеристическое уравнение помимо решения для основной моды  $LP_{01}$  – эквивалентного нормированного MFR  $R_0 = 0,487$ , также имеет корень и еще для одной высшей моды –  $LP_{02}$  –  $R_0 = 1,374$ . При этом если для ос-

новой моды оптический фактор ограничения достигает  $P_{\text{core}} = 0,985$ , то для указанной высшей моды  $LP_{02}$  условие отсечки формально выполняется, но значение этого параметра составляет всего  $P_{\text{core}} = 0,246$ , что свидетельствует о ее принадлежности к группе вытекающих мод. Таким образом, для анализируемого промышленного образца SM OB, с учетом поправок Петерманна в ближнем поле, которые для указанных мод  $LP_{01}$  и  $LP_{02}$  составляют 1,414 и 2,450, и фактического радиуса сердцевины значения MFR составляют  $MFR_{LP_{01}} = 4,579$  мкм и  $MFR_{LP_{02}} = 22,370$  мкм. Сопоставляя с номинальным значением MFR основной моды ( $MFR_{LP_{01}} = 4,600$  мкм), можно предположить, что и номинальный MFR моды  $LP_{02}$  будет условно отличаться от расчетного на аналогичный коэффициент и, как результат, будет составлять  $MFR_{LP_{02}} = 22,473$  мкм.

Таким образом, коэффициент отражения  $R$  на разъёмном соединении пары SM OB с учетом передачи части мощности вводимой основной модой  $LP_{01}$  OB Tx вытекающей модой  $LP_{02}$  OB Rx с использованием результатов расчета коэффициентов связи указанных мод  $\eta_{11}$  (между основными («фундаментальными») модами Tx- $LP_{01}$  и Rx- $LP_{01}$ ) и  $\eta_{12}$  (между основной модой Tx- $LP_{01}$  и вытекающей модой Rx- $LP_{02}$ ) предлагается оценивать по следующей формуле:

$$R = 10 \log(1 - (\eta_{11} + (1 - \eta_{11}) \cdot \eta_{12})) = 10 \log(1 - \eta_{11} - \eta_{12} + \eta_{11} \cdot \eta_{12}). \quad (6)$$

Здесь для устранения неопределенности, связанной с комплексной природой вытекающих мод, полагается, что основная часть вводимой мощности оптического сигнала, фактически сосредоточенной в основной моде  $LP_{01}$ , с выхода SM OB Tx передается непосредственно основной моде  $LP_{01}$  SM OB Rx, и только оставшаяся часть перераспределяется между вытекающей модой Rx- $LP_{02}$  и отраженным от стыковой неоднородности потоком оптического излучения. По этой причине в формуле (6) перед коэффициентом связи  $\eta_{12}$  вводится множитель  $(1 - \eta_{11})$ .

Фактически подлогарифменное выражение формулы (6) определяет нормированную мощность оптического сигнала, непосредственно отраженного от торца SM OB Rx и поступившего на вход SM OB Tx. Этот отраженный поток оптического излучения содержит основную моду  $LP_{01}$ , которая, возвращаясь на торец SM OB Tx, возбуждает в данном световоде также основную моду  $LP_{01}$ , формирующую оптический сигнал, распространяющийся в обратном направлении на передающую сторону линии. Очевидно, что и в этом случае целесообразно учесть наличие загрязнения торца феррула коннектора, а также введенное эквивалентное рассогласование (либо его отсутствие). Иными словами, можно предположить, что в сердцевине SM OB Tx отраженный поток будет возбуждать основную

моду  $LP_{01}$ , мощность которой также будет пропорциональна уже рассчитанному коэффициенту связи  $\eta_{11}$ . Таким образом, выражение (6) представляется целесообразным переписать в виде:

$$R = 10 \log[(1 - \eta_{11} - \eta_{12} + \eta_{11} \cdot \eta_{12}) \cdot \eta_{11}]. \quad (7)$$

Для проверки и апробации сделанных предположений был проведен повторный расчет коэффициента отражения на стыке пары SM OB с учетом загрязнения торцов феррул коннектора, изображения которых и результаты их обработки приведены на рисунках 2 и 3, соответственно. На рисунке 7а представлены результаты расчета кривых зависимости значений коэффициента отражения на рассматриваемом разъёмном соединении пары SM OB от введенного эквивалентного радиального рассогласования. Здесь проводится сопоставление расчетов, реализованных по каждой из трех представленных выше методик в соответствии с формулами (5–7): возбуждение только моды Rx- $LP_{01}$ ; мод Rx- $LP_{01}$  и Rx- $LP_{02}$ ; прямым потоком – мод Rx- $LP_{01}$  и Rx- $LP_{02}$ , отраженным потоком – моды Tx- $LP_{01}$ . На рисунке 7б – отклонение расчетного  $R$  относительно действительного (измеренного) значения.

Анализ полученных результатов вновь показывает, что минимальное отклонение расчетного значения коэффициента отражения от действительного соответствует центрированному эквивалентному стыку SM OB, который используется для представления тестируемого волоконно-оптического соединения. В то время как увеличение радиального рассогласования до 0,5 мкм уже приводит к повышению относительной погрешности на 2,5...5 %. Кроме того, здесь также хорошо видно, что оценка искомого параметра с помощью выражения (5), учитывающего весь «остаток» от мощности вводимой основной моды  $LP_{01}$ , непосредственно связанного с ее коэффициентов передачи, сопровождается неприемлемо высокой погрешностью – значение достигает 12,5 % относительно измеренного коэффициента отражения. В свою очередь, сопоставление полученных расчетных данных показывает, что наиболее корректным, с точки зрения минимальной (менее 0,5 %) погрешности, является подход, учитывающий возбуждение прямым потоком оптического излучения, поступающим из Tx в Rx OB, мод  $LP_{01}$  и  $LP_{02}$  Rx и отраженным потоком моды  $LP_{01}$  в Tx OB – т. е. формула (7). Таким образом, подтверждена потенциальная возможность проведения оценки коэффициента отражения с помощью предложенного подхода, базирующегося на дискретном представлении полей взаимодействующих мод с применением формулы (7): полученные результаты для условий сильного загрязнения торцевой поверхности феррула одного из коннекторов демонстрируют погрешность менее 0,5 % относительно действительного, экспериментально измеренного сертифицированным оборудованием значения коэффициента отражения.

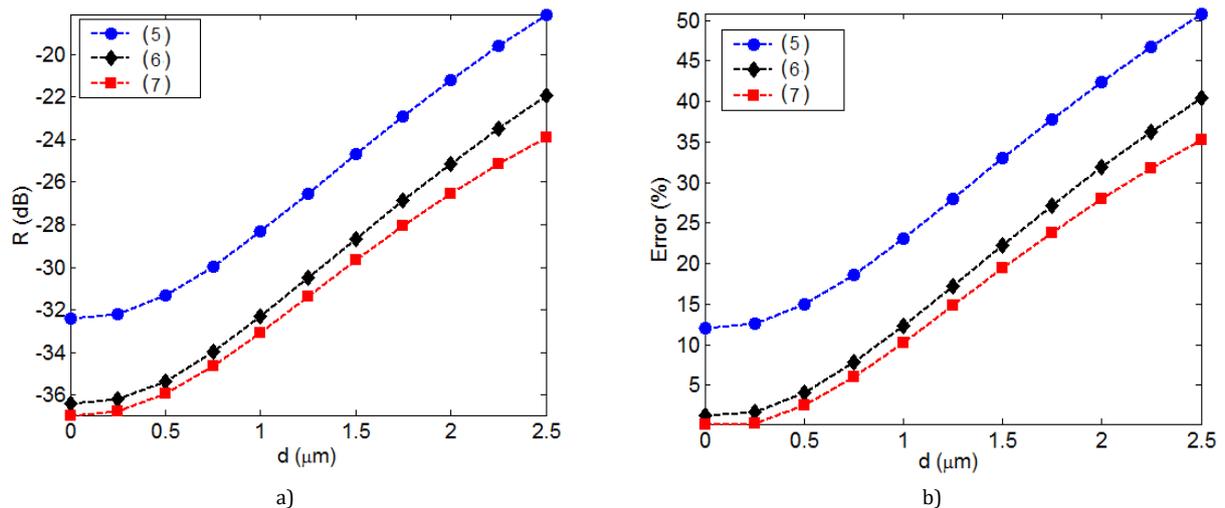


Рис. 7. Сравнительный анализ результатов расчета коэффициента отражения на стыке пары SM ОВ с учетом введенного радиального рассогласования при сильном загрязнении торцевой поверхности Rx ОВ и чистой поверхности Tx ОВ с номинальным значением MFR обоих ОВ (оптическая несущая  $\lambda = 1310$  нм) по формулам (3–1): а) кривые зависимости коэффициента отражения от величины смещения центральных осей сердцевин, соединяемых ОВ; б) погрешность относительно действительного (измеренного) значения

Fig. 7. Comparative Analysis of Computation Results, Performed for Connection of Two SMFs under Taking into Account Inserted Offset and Strong Contamination of Rx Optical Fiber Ferrule End with Clear Tx Optical Fiber Ferrule End, Nominal MFR Value for Both Optical Fibers (Wavelength  $\lambda = 1310$  Nm), Produced by Formulas (3–5): a) Curves of Reflection Dependence on Offset Between Fiber Core Center Axis; b) Computation Error Referred to Measured Value

### Методика оценивания коэффициента отражения разъемного соединения оптических волокон на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов

Расчет коэффициента отражения на волоконно-оптическом разъемном соединении по результатам анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов включает в себя выполнение следующих операций.

1) Осуществляется загрузка предварительно сделанных с помощью штатного комплекта видеодиагностики изображений торцевых поверхностей феррул волоконно-оптических коннекторов, оконцовывающих Tx и Rx ОВ линии. Проводится центрирование (позиционирование по центру сердцевин ОВ) и соответствующее масштабирование, осуществляется удаление ореолов границ сердцевина / оболочка и оболочка / феррул, а также локализация артефактов, включая процедуры уточнения контуров, заполнения «внутренних полостей» и сглаживания изображения с помощью морфологической операции эрозии.

2) Выполняется преобразование результирующего бинарного изображения загрязненного торца коннектора в бинарную матрицу, где «0» соответствует загрязненному («искаженному») фрагменту изображения торца феррула / ОВ, а «1» – соответственно, «неискаженному».

3) Формируются поля мод: основной  $LP_{01}$  ОВ Tx, основной  $LP_{01}$  и вытекающей  $LP_{02}$  ОВ Rx. В общем случае для этой цели можно использовать результаты расчета фактического распределения поля моды, выполненные с помощью строгого сеточного

метода, в том числе, например, реализованного в коммерческом программном обеспечении, также с применением протокольных данных соответствующих измерений (например, профиля показателя преломления) этих образцов ОВ, проведенных штатным сертифицированным лабораторным оборудованием (т. н. анализаторов ОВ [5]). Вместе с тем, выше было показано, что приемлемая погрешность достигается и при использовании номинальных паспортных значений MFR: в данном случае, для длины волны  $\lambda = 1310$  нм рекомендуемое значение MFR и Tx, и Rx основной моды  $LP_{01}$  составляет 4,600 мкм. В свою очередь, на основании проведенных выше расчетов, с учетом введенных соответствующих поправок (Петерманна и корректирующего коэффициента отклонения от паспортного номинального значения MFR) для вытекающей моды  $LP_{02}$  ОВ Rx указанный параметр выбирается равным  $MFR = 22,473$  мкм. Таким образом, далее поля перечисленных мод формируются в базисе функций Лагерра – Гаусса в области, ограниченной рекомендуемой верхней границей дискретного представления, соответствующей  $x_{\max} = \pm 30$  мкм с шагом дискретизации  $\Delta x = 0,25$  мкм.

4) Проводится выравнивание масштабов дискретного представления поля моды и загрязненной поверхности торца феррула коннектора и далее осуществляется выравнивание количества элементов бинарной матрицы представления изображения загрязненной поверхности торца феррула до числа элементов матрицы дискретного представления поля моды.

5) Проводится наложение «загрязненных» участков торца сердцевин ОВ на распределение поля

моды. Данная операция реализуется путем умножения матрицы дискретного представления поля моды на бинарную матрицу представления изображения загрязненной торцевой поверхности феррула. Пример искаженной за счет загрязнения торца ОВ радиальных распределений полей основной моды  $LP_{01}$  приведены на рисунке 4.

6) По формуле (2) выполняется расчет коэффициента передачи  $\alpha_{11}$  основной моды  $LP_{01}$  на стыке SM ОВ с учетом загрязнения участков торцевой поверхности центральной области сердцевин, соответствующей наибольшей концентрации поля моды, и коэффициента связи основной моды  $LP_{01}$  Tx с вытекающей модой  $LP_{02}$  Rx  $\alpha_{12}$ .

7) Полученные в результате расчета значения коэффициентов связи мод подставляются в формулу (7), с помощью которой проводится оценка коэффициента отражения на анализируемом стыке.

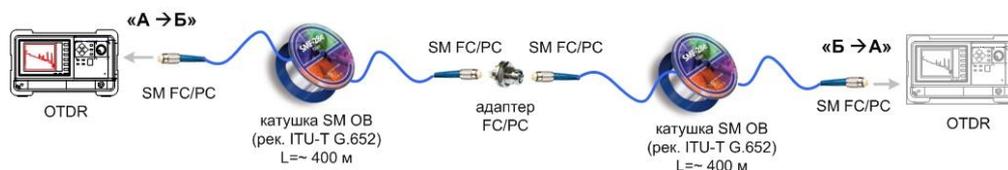


Рис. 8. Обобщенная структурная схема измерения вносимых потерь на разъёмном соединении пары «протяженных» SM ОВ

Fig. 8. Generalized Block-Diagram for Measurement of Reflection at the Connection of Two "Long" SMFs

Характеристика обратного рассеяния (рефлектограмма) макетной линии с разъёмным соединением представлена на рисунке 9. Получение изображений торцов феррул коннекторов, а также тестирование чистоты торца на уровне «Pass/Fail» в соответствии с ратифицированным стандартом IEC 61300-3-35 реализовывалась с помощью комплекта видеодиагностики Westover, в состав которого входят видеочип FBP P-5000 и программное обеспечение FiberCheck2™ [7].



Рис. 9. Рефлектограмма макетной линии

Fig. 9. Trace of Lab Link

Как было отмечено выше, измерение коэффициента отражения выполнялось с помощью OTDR при следующих установленных параметрах измерения: рабочая длина волны  $\lambda = 1310$  нм, длительность зондирующего импульса 50 нс, время усреднения

### Верификация методики оценивания коэффициента отражения разъёмного соединения ОВ на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов

Для экспериментальной верификации разработанной и представленной в предыдущем разделе методики оценивания коэффициента отражения было предложено сопоставлять расчетные значения данного параметра с действительными (измеренными) на волоконно-оптических разъёмных соединениях пары стандартных SM ОВ (ITU-T Rec. G.652). Обобщенная структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 8. Тестировались две катушки Corning® SMF-28e™ (ITU-T Rec. G.652), оконцованные SM пигтейлами с коннекторами FC/PC длиной порядка 400 м, а сами измерения выполнялись штатным комплектом полевого OTDR.

30 с – при этом соблюдается требование по оптическому отношению сигнал/шум – OSNR (аббр. от англ. Optical Signal-to-Noise-Ratio) – на дальнем конце линии более 6,5 дБ [18–20].

Всего было исследовано 42 разъёмных соединения, при этом один из коннекторов намеренно загрязнялся, а второй, наоборот, – очищался таким образом, чтобы его торцевая поверхность проходила тест на чистоту по всем трем зонам ABC. При этом первое соединение и соединение через следующие 20 тестов выполнялись для обоих чистых коннекторов (рассматривались как эталон/опорные). Изображения торцов феррул коннекторов разной степени и характера загрязнения и соответствующие им бинарные изображения представлены на рисунке 10. Сводная диаграмма значений коэффициентов отражения, распределенная по номерам тестов, и наложенная поверх нее диаграмма отсортированных значений – на рисунке 11.

Анализ полученных данных показывает, что разброс значений коэффициента отражения полученной в ходе проведения тестов выборки из 42 измерений затухания на волоконно-оптическом разъёмном соединении пары SM ОВ с разной степенью и характером загрязнения торца феррула находится в диапазоне от  $-57,03$  до  $-24,40$  дБ. Гистограмма статистики распределения коэффициента отражения приведена на рисунке 14. Наибольшее число попаданий (11 тестов) зарегистрировано для интервала значений коэффициента отражения  $R = -36...-35$  дБ. 7 тестов показали результаты выше допустимого

для СКС значения коэффициента отражения разъемного соединения  $R = -35$  дБ [2-4], 21 – больше нормы  $-45$  дБ, регламентируемой для телекоммуникационных сетей [5, 6]. Из 40 проведенных испытаний, предполагающих намеренное загрязнение торца феррула одного из пары коннекторов, 11 не прошли тест по всем трем зонам *ABC*, что составляет 27,5 %. Успешное прохождение теста одной зоны из трех: *A* и *C* – соответствуют по одному случаю, *B* – 6 испытаниям. При проведении 31 испытания из декларируемых 42, как минимум, 2 зоны феррула не прошли тест на загрязнение.

Как и предполагалось, основным фактором, наиболее существенно влияющим на увеличение отражения, является наличие загрязнений в зоне *A*, что формально подтверждают результаты экспериментальных исследований. Сопоставление статистики распределения полученных в ходе проведенных измерений значений коэффициента отражения по характеру загрязнений, с точки зрения их

расположения в выделенных зонах *ABC*, показывает, что во всех случаях неудовлетворительные относительно допускаемых стандартами СКС норм показатели относятся к случаям не прохождения теста зоной *A*.

Таким образом, для каждого из 42 реализованных разъемных соединений с разной степенью и характером загрязнения торцевой поверхности феррула одного из коннекторов было проведено вычисление коэффициента отражения на эквивалентном стыке представления по предложенной методике с последующим сопоставлением расчетного и действительного (непосредственно измеренного с помощью OTDR) значений данного параметра. Результирующая сводная диаграмма сопоставления расчетных значений коэффициента отражения на эквивалентном центрированном стыке и коэффициента отражения на разъемном соединении, измеренных с помощью OTDR, приведена на рисунке 13, гистограмма статистики распределения относительной погрешности – на рисунке 14.

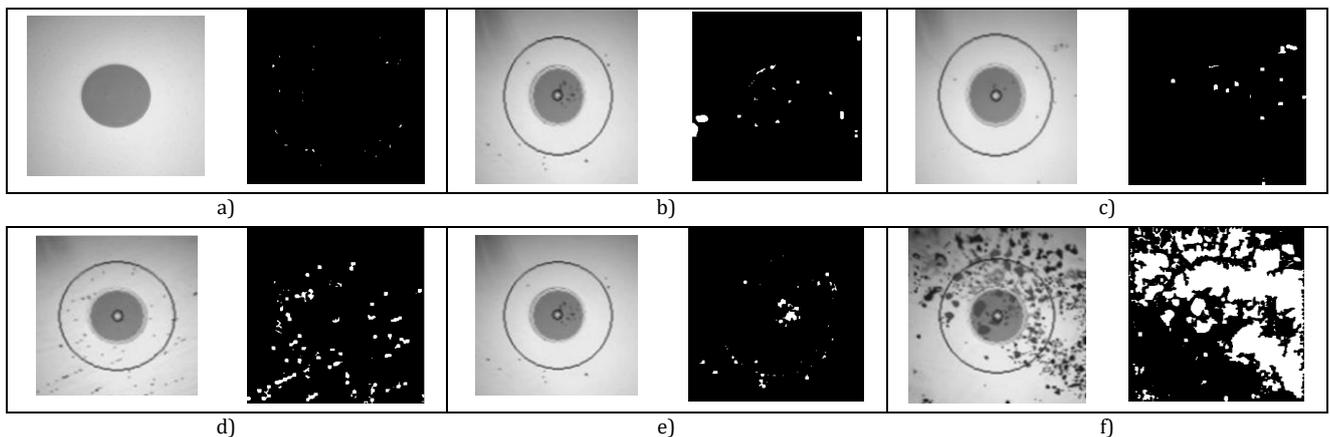


Рис. 10. Изображение торца феррула коннектора разъемного соединения с разной степенью и характером загрязнения: а) ABC-PASS; б) AB-PASS, C-FAIL; в) AC-PASS, B-FAIL; д) BC-PASS, A-FAIL; е) A-PASS, BC-FAIL; ф) ABC-FAIL

Fig. 10. Optical Fiber Connector Ferrule End Image under Various Order of Contamination: а) ABC-PASS; б) AB-PASS, C-FAIL; в) AC-PASS, B-FAIL; д) BC-PASS, A-FAIL; е) A-PASS, BC-FAIL; ф) ABC-FAIL

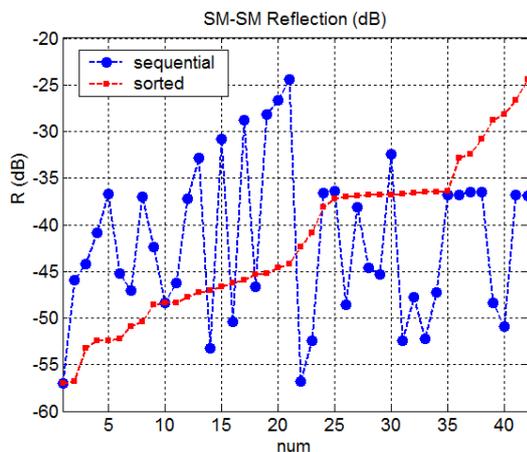


Рис. 11. Сводная диаграмма результатов измерения коэффициента отражения

Fig. 11. Cumulative Diagram of Measurement Results

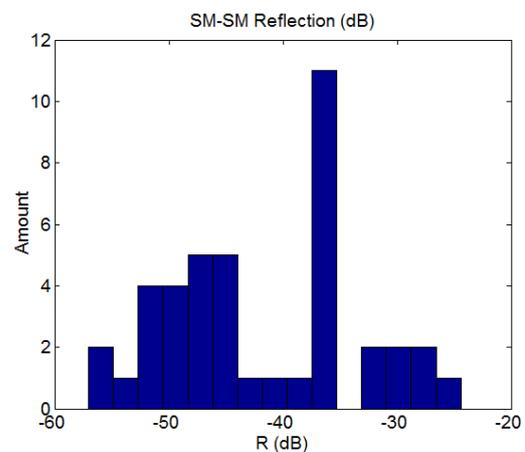


Рис. 12. Гистограмма распределения результатов измерения коэффициента отражения на стыке

Fig. 12. Histogram of Reflection Distribution, Measured at the Connection

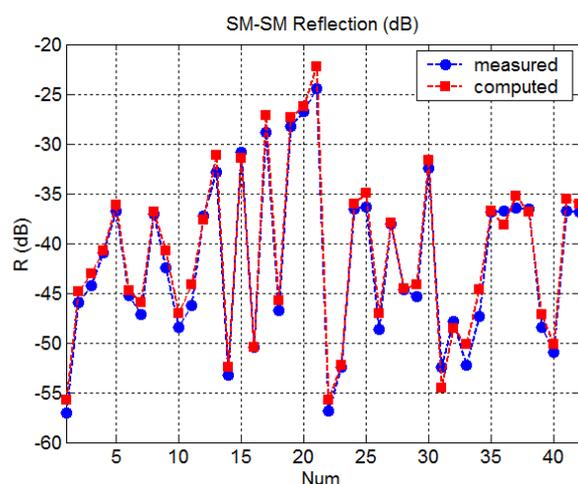


Рис. 13. Сводная диаграмма результатов сопоставления расчетных значений коэффициента отражения на эквивалентном центрированном стыке и измеренных OTDR значений коэффициента отражения на анализируемом разъёмном соединении

Fig. 13. Cumulative Diagram of Comparison Between Computation Results of Reflection at Centralized Connection and Measured by OTDR Value

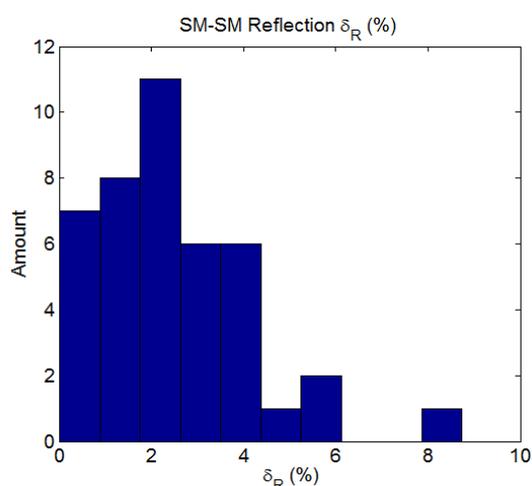


Рис. 14. Гистограмма статистики распределения относительной погрешности

Fig. 14. Error Statistics Distribution Histogram

Анализ полученных данных, за исключением отдельных случаев, показывает в целом хорошее сов-

падение расчетных и экспериментальных значений  $R$ . Для всех 42 испытаний относительная погрешность не превышает 10 %, и только для 3 из 42 отклонение составляет более 5 %. Как результат, среднее значение относительной погрешности по всем 42 стыкам составило 2,47 %.

### Заключение

Разработана и представлена методика оценивания коэффициента отражения волоконно-оптического разъёмного соединения пары SM ОВ на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов с использованием дискретного представления полей взаимодействующих мод и расчета коэффициентов связи между ними, продемонстрирована ее работоспособность. Выявлена необходимость учета передачи части мощности прямого потока оптического излучения, поступающего с выхода ОВ Tx, вытекающим модам ОВ Rx, а также коэффициента связи компонентов обратного (отраженного) потока оптического излучения, поступающего на вход ОВ Tx с модами этого ОВ. Сформулированы практические рекомендации по выбору параметров эквивалентного стыка представления тестируемого волоконно-оптического разъёмного соединения: MFR мод обоих ОВ выбираются идентичными и соответствующими номинальным паспортным значениям, эквивалентный стык является центрированным. Проведена экспериментальная верификация разработанной методики на 42 разъёмных соединениях пар SM ОВ, для каждого из которых были получены изображения торцевых поверхностей феррул коннекторов разной степени и характера загрязнения, проведен расчет теоретического значения коэффициента отражения и последующее сопоставление с показаниями OTDR и протоколом тестирования на чистоту зон торца феррул ABC. Анализ полученных данных показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений указанного параметра  $R$ : для всех 42 относительная погрешность не превышает 10 %, и только для 3 из 42 отклонение составляет более 5 %.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90150 «Аспиранты».

### Список используемых источников

1. РД 45.156–2000. Состав исполнительной документации на законченные строительством линейные сооружения магистральных и внутризоновых ВОЛП.
2. ГОСТ Р 53245-2008 Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Монтаж основных узлов системы. Методы испытания. М.: Стандартинформ, 2018.
3. ISO/IEC 11801:2002(E). Information technologies. Generic cabling for customer premises. 2002-09.
4. TIA/EIA-568-B.1. Commercial Building. Telecommunications Cabling Standard (Revision of EIA/TIA-568-A). Part 1. General Requirements. 2001.
5. Нормы приёмо-сдаточных измерений элементарных кабельных участков магистральных и внутризоновых подземных волоконно-оптических линий передачи сети общего пользования. М., 1997.
6. ITU-T Rec. G.671 (11/96). Transmission characteristics of passive optical components.
7. Westover FBP P-5000 FiberCheck2™. Руководство пользователя / пер. с англ. 2008.

8. IEC 61300-3-35. Fibre optic interconnecting devices and passive components. Basic test and measurement procedures. Part 3-35: Examinations and measurements. Visual inspection of fibre optic connectors and fibre-stub transceivers. 06-2015.
9. Срапионов В.А. Связь мод в стыках оптических волокон с разбросом параметров // Электросвязь. 1985. № 10. С. 10–12.
10. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
11. Гурджи С.П., Каток В.Б. Расчет потерь в соединениях одномодовых световодов со сложным профилем показателя преломления // Электросвязь. 1990. № 10. С. 25–27.
12. Meunier J.P., Wang Z.H., Hosain S.I. Evaluation of splice loss between two nonidentical single-mode graded-index fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 1994. Vol. 6. Iss. 8. PP. 998–1000. DOI:10.1109/68.313075
13. Yu Q., Zongo P.-H., Facq P. Refractive index profile influences on mode coupling effects at optical fiber splices and connectors // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1993. Vol. 11. Iss. 8. PP. 1270–1273. DOI:10.1109/50.254084
14. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers // Applied Optics. 1978. Vol. 17. Iss. 17. PP. 2842–2847. DOI:10.1364/AO.17.002842
15. Авруцкий И.А., Сычугов В.А., Тищенко А.В. Исследование процессов возбуждения, излучения и отражения света в гофрированных волноводах // Труды ИОФАН. 1991. Т. 34. С. 3–98.
16. Meunier J.P., Wang Z.H. Evaluation of Tilt or Offset Loss between Two Single-mode Graded-index Optical Waveguides. Proceedings of the International China Fibercom (Shanghai, China, 15–18 May 1994). 1994. PP. 356–362.
17. Hosain S.I., Meunier J.P., Wang Z.H. Coupling efficiency of butt-joined planar waveguides with simultaneous tilt and transverse offset // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14. Iss. 5. PP. 901–907. DOI:10.1109/50.495175
18. Understanding OTDRs. GN Nettest, 2000. 70 p.
19. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. Troubleshooting Optical Fibre Networks: Understanding and Using Optical Time-Domain Reflectometers. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.
20. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРПарт, 2005. 208 с.
21. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 512 с.
22. Bourdine A. Modeling and Simulation of Piecewise Regular Multimode Fiber Links Operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. 2013. Vol. 2013. DOI:10.1155/2013/469389

\* \* \*

## Method for Estimation of Reflection on Fiber Optic Connection Based on Analysis of Images of End Surfaces of Ferrule Connectors

A. Bourdine<sup>1, 2</sup> , S. Pashin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Production Association State Optical Institute Named after S.I. Vavilov, St. Petersburg, 192171, Russian Federation

<sup>2</sup>Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation

### Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27

Received 2nd September 2020

Accepted 2nd November 2020

**For citation:** Bourdine A., Pashin S. Method for Estimation of Reflection on Fiber Optic Connection Based on Analysis of Images of End Surfaces of Ferrule Connectors. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):16–27. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27

**Abstract:** *This work presents an alternative method for evaluating the reflection coefficient at a detachable connection of single-mode optical fibers based on the results of the analysis of images of the contaminated end surface of the ferrule of a pair of connectors of the studied joint, obtained with a standard field set of video diagnostics of the state of fiber-optic connectors. The results of experimental verification of the proposed method are presented, which have demonstrated the potential of its use in practical applications of "contactless" determination of the reflection coefficient on a fiber-optic connector.*

**Keywords:** few-mode optical fibers, few-mode regime of optical signal transmission, differential mode delay, non-symmetrical optical fibers, refractive index profile.

## References

1. Industry Guidance Document 45.156–2000. *The Composition of the Executive Documentation for the Completed Construction of Linear Structures of Trunk and Intra-Zone Fiber-Optic Lines*. (in Russ.)
2. National Standard of the Russian Federation R 53245-2008. *Information Technologies. Structured Cabling Systems. Main System Elements Installation. Test Methods*. Moscow: Standardinform Publ.; 2008. (in Russ.)
3. ISO/IEC 11801:2002(E). *Information technologies. Generic cabling for customer premises*. 2002-09.
4. TIA/EIA-568-B.1. *Commercial Building. Telecommunications Cabling Standard (Revision of EIA/TIA-568-A). Part 1. General Requirements*. 2001.
5. *Norms of Acceptance Measurements of Elementary Cable Sections of Trunk and Intra-Zone Underground Fiber-Optic Transmission Lines of a Public Network*. Moscow; 1997 (in Russ.)
6. ITU-T Rec. G.671. *Transmission characteristics of passive optical components*. November 1996.
7. *Westover FB P-5000 FiberCheck2™*. User guide. 2008. (in Russ.)
8. IEC 61300-3-35:2015 RLV. *Fibre optic interconnecting devices and passive components. Basic test and measurement procedures. Part. 3-35. Examinations and measurements. Visual inspection of fibre optic connectors and fibre-stub transceivers*. June 2015.
9. Srapionov V.A. Mode Coupling at Optical Fiber Junctions with Parameter Scatter. *Elektrosviaz*. 1985;10:10–12. (in Russ.)
10. Snyder A., Love J. *Theory of Optical Waveguides*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1987. 656 p. (in Russ.)
11. Gurdzhi S.P., Skating V.B. Calculation of losses in the connections of single-mode optical fibers with a complex refractive index profile. *Electrosvyaz*. 1990;10:25–27.
12. Meunier J.P., Wang Z.H., Hosain S.I. Evaluation of splice loss between two nonidentical single-mode graded-index fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1994;6(8):998–1000. DOI:10.1109/68.313075
13. Yu Q., Zongo P.-H., Facq P. Refractive index profile influences on mode coupling effects at optical fiber splices and connectors. *IEEE Journal of Lightwave Technology*. 1993;11(8):1270–1273. DOI:10.1109/50.254084
14. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers. *Applied Optics*. 1978;17(17):2842–2847. DOI:10.1364/AO.17.002842
15. Avrutskiy I.A., Sychugov V.A., Tishchenko A.V. Investigation of the Processes of Excitation, Emission and Reflection of Light in Corrugated Waveguides. *Trudy IOFAN*. 1991;34:3–98. (in Russ.)
16. Meunier J.P., Wang Z.H. Evaluation of Tilt or Offset Loss between Two Single-mode Graded-index Optical Waveguides. *Proceedings of the International China Fibercom, 15–18 May 1994, Shanghai, China*. 1994. p.356–362.
17. Hosain S.I., Meunier J.P., Wang Z.H. Coupling efficiency of butt-joined planar waveguides with simultaneous tilt and transverse offset. *IEEE Journal of Lightwave Technology*. 1996;14(5):901–907. DOI:10.1109/50.495175
18. *Understanding OTDRs*. GN Nettest; 2000. 70 p.
19. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. *Troubleshooting Optical Fibre Networks: Understanding and Using Optical Time-Domain Reflectometers*. San Diego: Elsevier Academic Press; 2004.
20. Listvin A.V., Listvin I.N. *Reflectometry of Optical Fibers*. Moscow: LESARart Publ.; 2005. 208 p. (in Russ.)
21. Adams M. *Introduction to the Theory of Optical Waveguides*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 512 p. (in Russ.)
22. Bourdine, A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime. *Advances in Optical Technologies*. 2013;2013 DOI:10.1155/2013/469389

## Сведения об авторах:

**БУРДИН**  
Антон Владимирович

доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе и развитию АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики,  
[bourdine@yandex.ru](mailto:bourdine@yandex.ru)  
 <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>

**ПАШИН**  
Станислав Сергеевич

аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, заместитель директора центра стратегических инициатив Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики,  
[pashinstanislav@outlook.com](mailto:pashinstanislav@outlook.com)