

# Исследование влияния деградации разъемных соединений линейного тракта внутриобъектовых ВОЛП с криптоволоконными на искажение оптических сигналов мультигигабитных сетей передачи данных

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

<sup>1</sup>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: pashinstanislav@outlook.com, bourdine@yandex.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию 23.08.2021

Поступила после рецензирования 08.10.2021

Принята к публикации 13.10.2021

**Ссылка для цитирования:** Бурдин А.В., Пашин С.С. Исследование влияния деградации разъемных соединений линейного тракта внутриобъектовых ВОЛП с криптоволоконными на искажение оптических сигналов компактных мультигигабитных сетей передачи данных // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 4. С. 18–30. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-18-30

**Аннотация:** Представлены результаты апробации модели кусочно-регулярной волоконно-оптической линии передачи, функционирующей в маломодовом режиме с последовательно соединенной парой специализированных многомодовых оптических криптоволокон, выполняющих функции «шифратор – дешифратор». Модель дополнена возможностью учета влияния на условия ввода сигнала с выхода когерентного источника в оптоволоконной линии характера и степени загрязнения торцевой поверхности феррул волоконно-оптических коннекторов. Приведены результаты сопоставления расчетных огибающих искаженных оптических импульсов, распространяющихся в описанных линиях передачи с криптоволоконными сетями спецификации 10GBase-LX, в зависимости от состояния торца феррула коннектора оптоволоконной линии, подключаемого к источнику излучения трансивера.

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

## Введение

В ранее опубликованных работах [1, 2] было предложено техническое решение организации защищенного на физическом уровне канала передачи конфиденциальной информации кластера/сегмента внутрикорпоративной сети связи «первая/последняя миля». Данный кластер «первой/последней мили» внутрикорпоративных сетей, в целом, отличается малой протяженностью соединительных кабельных линий: от десятков метров – в случае структурированных кабельных систем (СКС) центров обработки данных, до 1–2 км, соответствующих «кампусным» СКС, объединенной группы зданий (производственные цеха, технологические площадки и административные помещения предприятия). Для этого сегмента се-

тей также характерно увеличенное, по сравнению с сетями передачи данных общего пользования, количество информационных портов. В настоящее время, как минимум, вертикальные подсистемы современных СКС реализуются на базе волоконно-оптических кабелей (ОК) с применением технологии FTTE (аббр. от англ. Fiber to the Enclosure – волокно до конструктива). Однако нередко в условиях повышенных требований к пропускной способности соответствующего подкластера сети, объединяющего выделенную группу пользователей, используется технология FTTD (аббр. от англ. Fiber to the Desk – волокно до рабочего места), и в этом случае горизонтальная подсистема СКС также представляет собой совокупность ОК [3].

Предлагаемое решение базируется на применении в соединительных кабельных линиях специализированных кварцевых волоконных световодов, функционирующих в маломодовом режиме передачи оптического сигнала, который достигается за счет совместного использования когерентных источников оптического излучения (лазеров), являющихся основой приемо-передающих модулей (трансиверов) активного оборудования мультигигабитных сетей передачи данных, и предлагаемых специализированных оптических волокон (ОВ) с увеличенным диаметром сердцевин, поддерживающих в маломодовом режиме распространение ограниченного набора модовых составляющих [4] – так называемых многомодовых оптических криповолокон (МОКВ).

Геометрия МОКВ остается традиционной и представляет собой классическую коаксиальную конструкцию в виде легированной соответствующими редкоземельными примесями кварцевой сердцевин, окруженную одной внешней сплошной оболочкой из чистого кварца. Однако при этом специализированная форма профиля показателя преломления таких ОВ обеспечивает усиленное проявление заданного характера эффекта дифференциальной модовой задержки (ДМЗ) [4], уникальное для того или иного световода. В результате такое МОКВ на всем протяжении линии является шифратором, а форма его специализированного профиля показателя преломления выполняет роль ключа [1, 2]. Таким образом, транслируемый сильно искаженный за счет ДМЗ трафик становится невозможно разобрать без соответствующего дешифратора. Роль последнего, в общем случае, может также выполнять второе криповолокно, профиль показателя преломления которого должен обеспечить «зеркальное» или «реверсивное» воспроизведение диаграммы ДМЗ МОКВ-шифратора [1, 2].

В данной работе предложена модель ВОЛП, функционирующей в маломодовом режиме с последовательно соединенной парой описанных специализированных МОКВ. Модель базируется на кусочно-регулярном представлении, при этом, в отличие от ранее разработанной и экспериментально верифицированной версии, позволяющей совместно учитывать исходный модовый состав оптического излучения на выходе когерентного источника, вводимого в ОВ-линии, условия ввода сигнала, проявление ДМЗ, хроматической дисперсии, в том числе на модах высших порядков, вариации геометрических параметров ОВ вдоль длины ВОЛП, а также наличие изгибов и механических воздействий на ОВ, неизбежно возникающих в процессе инсталляции и последующей эксплуатации ОК, дополнена возможностью учета влияния на условия ввода сигнала с выхода когерентного источника в ОВ-линии характера и степени загрязнения торцевой поверхности феррул волоконно-оптических коннекторов. Приведены ре-

зультаты апробации описанной модели на примере линейного тракта ВОЛП с последовательно соединенной парой МОКВ, функции выполняющих роли «шифратор – дешифратор». Представлены некоторые результаты сопоставления расчетных огибающих искаженных оптических импульсов, распространяющихся в описанных ВОЛП с криповолокнами сетей спецификации 10GBase-LX, в зависимости от состояния торца феррула волоконно-оптического коннектора ОВ-линии, подключаемого непосредственно к источнику излучения трансивера.

### **Модель кусочно-регулярной ВОЛП с многомодовыми ОВ, дополненная возможностью учета состояния торцевой поверхности феррул волоконно-оптических коннекторов разъемных соединений**

Маломодовый режим передачи оптического сигнала формируется за счет возбуждения ОВ с увеличенным диаметром сердцевин когерентным источником оптического излучения – лазером (например, типовыми лазерным диодом или VCSEL (спецификации LX или SX, соответственно, серии стандартов IEEE 802.3), которые, в частности, также традиционно используются в оптических приемо-передающих модулях (трансиверах) активного оборудования мультигигабитных сетей [3–6]). Сочетание когерентного источника излучения и ОВ с увеличенным диаметром сердцевин приводит к тому, что сигнал переносится в таком световоде ограниченным числом модовых составляющих, количество которых в первую очередь определяется исходным модовым составом излучения, генерируемого лазером, условиями ввода самого сигнала в торец сердцевин ОВ и геометрией/параметрами последнего. Отличительной особенностью передачи оптического сигнала по ОВ в маломодовом режиме является непосредственно эффект ДМЗ, который проявляется в виде разделения оптического импульса на отдельные компоненты неодинаковой амплитуды и разбросом по времени поступления на приемную сторону [4]. При этом огибающая оптического импульса, традиционно имеющая квазигауссовскую форму, не сохраняется и приобретает форму «перчатки». Степень и характер проявления эффекта ДМЗ для разных сочетаний «лазер – ОВ» может проявляться по-разному. Кроме того, эффект может проявляться и для одной и той же пары «лазер – ОВ» при неконтролируемых, в общих случаях, условиях ввода.

Последнее как раз характерно непосредственно для волоконно-оптических разъемных соединений (пара коннекторов, стыкуемые в проходной розетке/адапторе), для которых характерны наличие и углового/радиального рассогласований, и воздушный зазор, обусловленных неидеальностью внутренней поверхности юстировочной втулки розетки, так и торцевой поверхности феррул кон-

некторов, в том числе и загрязнением последних. Таким образом, данный фактор также должен в обязательном порядке учитываться при моделировании указанного класса ВОЛП, поскольку во многом определяет условия ввода и не может не влиять на перераспределение мощности между возбуждаемыми в ОВ линейного тракта модами при подключении к когерентному источнику излучения. Очевидно, что в ряде случаев, определенный характер загрязнения торца феррула коннектора за счет блокирования полей возбуждаемых мод низшего порядка может привести к дополнительным искажениям оптического сигнала при передаче в маломодовом режиме.

Предлагаемое в рамках данной работы решение базируется на ранее разработанной и экспериментально верифицированной модели кусочно-регулярной ВОЛП, функционирующей в маломодовом режиме [7]. В отличие от известных подходов, данная модель, в общем случае, ориентированная на одиночные кварцевые слабнонаправляющие ОВ с увеличенным, относительно стандартных одномодовых ОВ, диаметром сердцевин (нормированная частота  $V \gg 1$ ), совместно учитывает исходный модовый состав оптического излучения на выходе когерентного источника, вводимого в ОВ-линии, условия ввода сигнала, ДМЗ, дифференциальные модовые потери, хроматическую дисперсию основной и высших направляемых мод, а также процессы взаимодействия и смещения модовых компонентов оптического сигнала, обусловленные нерегулярной структурой реальных промышленных ОВ, а также наличием микро- и макроизгибов волокон в ОК, неизбежно возникающих при инсталляции ВОЛП.

Как было отмечено выше, модель базируется на кусочно-регулярном представлении (рисунок 1) и использует общий подход метода расщепления по физическим процессам [8].

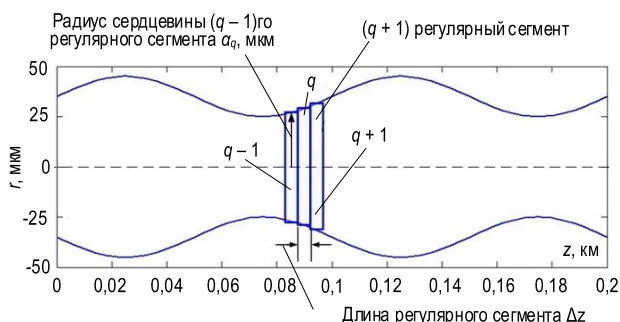


Рис. 1. Кусочно-регулярное представление участка ОВ длиной 200 м

Fig. 1. Piecewise Regular Representation of 200 m Fiber Optic Link Span

Так, в пределах регулярного сегмента заданной длины  $\Delta z$  геометрия световода (например, радиус сердцевин, параметры профиля показателя преломления и пр.) остаются постоянными, связь мод отсутствует, а модовые компоненты сигнала рас-

пространяются независимо друг от друга. Предполагается, что каждая направляемая мода, постоянная распространения которой, изменяясь от сегмента к сегменту, удовлетворяет условию отсечки для всех регулярных световодов, составляющих исследуемое ОВ, переносит одиночный импульс заданной формы, идентичной вводимому сигналу (например, гауссовой). Кроме того, в пределах регулярного сегмента амплитуда импульса уменьшается за счет собственных потерь моды.

Границы регулярных сегментов рассматриваются в виде соосного соединения двух подобных ОВ с разбросом технологических параметров (например, диаметром сердцевин) с некоторым заданным малым угловым рассогласованием, что позволяет непосредственно учесть наличие изгибов ОВ и остаточных механических воздействий, неизбежно возникающих на практике при инсталляции строительных длин ОК. Перераспределение мощности сигнала между амплитудами отдельных составляющих как результат взаимодействия и смещения модового состава определяется путем оценки коэффициентов связи на вышеописанных стыках по известной методике, базирующейся на хорошо известном ([9–11] и др.) методе интеграла перекрытия полей взаимодействующих мод  $m$  и  $n$ , который в скалярной постановке задачи для цилиндрической системы координат имеет следующий вид:

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

где  $F_m^{(lp)}$  и  $F_m^{(lq)}$  – 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 радиальные порядки моды  $LP_{lm}$ , соответственно;  $r$  – радиальная координата,  $\varphi$  – полярный угол в полярной системе координат.

На приемную сторону указанные «одиночные» импульсы, переносимые соответствующими «индивидуальными» направляемыми модами  $LP_{lm}$ , приходят с определенной задержкой относительно друг друга, обусловленной разбросом значений их групповых скоростей или, иными словами, разбросом модовой задержки. В случае появления новой модовой компоненты форма переносимого данной модой сигнала представляет собой результат сложения гауссовых импульсов всех направляемых мод, которые непосредственно передали часть своей мощности указанной составляющей пропорционально соответствующему значению коэффициента связи. На приемной стороне результирующая огибающая импульса рассматривается как суперпозиция всех существующих модо-

вых компонентов сигнала, которая для частотного отклика оптического сигнала, переносимого  $M$  модовыми компонентами  $LP_{lm}$  в регулярном многомодовом ОВ длиной  $z$ , в общем случае, имеет следующий вид выражения (2), где  $F$  – прямое преобразование Фурье;  $h_{\text{вх}}(t)$  – импульс на входе ОВ;  $A_p^{(0)}$  и  $\alpha_p$  – начальная амплитуда и коэффициент затухания  $p$ -й направляемой моды  $LP_{lm}$  ( $p = 1, \dots, M$ );  $\beta_1^{(p)}$  и  $\beta_2^{(p)}$  – дисперсионные параметры  $p$ -й направляемой моды  $LP_{lm}$ , которые являются элементами разложения частотной зависимости постоянной распространения  $\beta(\omega)$  в ряд Тейлора – хорошо известный алгоритм записи основного уравнения распространения, подробно описанный в [8], где первый элемент этого ряда является непосредственно задержкой  $p$ -й направляемой моды  $LP_{lm}$   $\beta_1^{(p)} = \tau_3^{(p)}$ , в то время как второй параметр  $\beta_2^{(p)}$

позволяет учесть вклад хроматической дисперсии [4].

Таким образом, в рамках предложенного кусочно-регулярного представления многомодовой ВОЛП, частотный отклик оптического сигнала, переносимого  $M$  модовыми компонентами  $LP_{lm}$  в нерегулярном многомодовом ОВ общей протяженностью  $z$  при выбранной длине регулярного сегмента  $\Delta z$ , с учетом (2), может быть описан выражением (3), где  $N_z = E(z/\Delta z)$ ;  $E(x)$  – целая часть действительного числа  $x$ ;  $h_{\text{вх}}(t)$  – импульс на входе многомодового ОВ;  $A_q^{(p)}$ ,  $\alpha_q^{(p)}$ ,  $\tau_3^{(p;q)}$  и  $\beta_2^{(p;q)}$  – соответственно, амплитуда, коэффициент затухания, задержка и параметр хроматической дисперсии  $p$ -й направляемой моды  $LP_{lm}$  ( $p = 1, \dots, M$ ) на  $q$ -ом регулярном сегменте [7].

$$H_{\text{вых}}(\omega, z) = F[h_{\text{вх}}(t)] \sum_p^M A_p^{(0)} \exp(-\alpha_p z) \exp[-j(\omega - \omega_0) \beta_1^{(p)} z] \exp\left[-j \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta_2^{(p)} z\right], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{вых}}(\omega, z) = F[h_{\text{вх}}(t)] \sum_p^M A_{(N_z+1)}^{(p)} \exp[-\alpha_{(N_z+1)}^{(p)} (z - N_z \Delta z)] \times \\ \times \exp[-j(\omega - \omega_0) \tau_3^{(p;N_z+1)} (z - N_z \Delta z)] \exp\left[-j \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta_2^{(p;N_z+1)} (z - N_z \Delta z)\right] \times \\ \times \prod_{q=1}^{N_z} A_q^{(p)} \exp(-\alpha_q^{(p)} \Delta z) \exp(-j(\omega - \omega_0) \tau_3^{(p;q)} \Delta z) \exp\left[-j \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta_2^{(p;q)} \Delta z\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Результирующий импульсный отклик сигнала на выходе исследуемого нерегулярного многомодового ОВ  $h_{\text{вх}}(t)$  определяется по общеизвестной формуле [8]:

$$h_{\text{вых}}(t) = F^{-1}(H_{\text{вых}}(\omega)) \cdot [F^{-1}(H_{\text{вх}}(\omega))]^*, \quad (4)$$

где  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье;  $[x]^*$  – комплексно сопряженное число.

Очевидно, что реализация представленной модели линейного тракта кусочно-регулярной ВОЛП, функционирующей в маломодовом режиме, требует многократного проведения расчета параметров передачи модовых компонентов сигнала на отдельных регулярных сегментах. Для этой цели предлагается воспользоваться разработанной ранее модификацией приближения Гаусса (ОМПГ) [7, 12], обобщенной на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления в области сердцевины, ограниченной одной внешней сплошной оболочкой. Данный метод базируется на совместном применении «классического» приближения Гаусса [9], заключающегося в аппроксимации радиального распределения поля моды произвольного порядка исследуемого ОВ полем моды этого

же порядка световода с идеальным неограниченным параболическим профилем показателя преломления, которое описывается известным аналитическим выражением на основе функции Лагерра – Гаусса, и метода стратификации [13], применяемого для представления профиля показателя преломления исследуемого ОВ. Предложенный подход позволяет перейти от известной интегральной [9] к аналитической форме записи вариационного выражения для квадрата волноводного параметра моды в сердцевине  $U^2$  и характеристического уравнения для эквивалентного нормированного радиуса пятна моды  $\partial U^2 / \partial R_0 = 0$ , в виде конечных вложенных сумм.

Далее предлагается получить аналитические формулы для производных постоянной распространения и, как результат, записать достаточно громоздкие, но конечные аналитические выражения для модовой задержки  $\tau_3$  и коэффициента хроматической дисперсии  $D$  направляемой моды заданного порядка, которые приведены в работах [7, 12]. ОМПГ характеризуется малой погрешностью [12] и при этом позволяет выполнять анализ ОВ с профилями достаточно сложной конструкции, в том числе и восстановленных непосредственно по протоколам измерений промышленных образцов ОВ, при одновременно низких тре-



бованиях к вычислительным ресурсам даже в случае перехода к направляемым модам высших порядков.

В свою очередь, для расчета дифференциальных модовых потерь предлагается воспользоваться представленной в работе [14] известной простой эмпирической формулой, записанной для кварцевых ОВ, легированных Германием  $GeO_2$ .

Математическое описание перераспределения мощности модовых составляющих на границах регулярных сегментов реализуется путем совместного применения ОМПГ и указанного выше метода интеграла перекрытия полей. Данный подход сводится к расчету коэффициентов связи мод, аналитические выражения для которых были выведены ранее в [15], а также приведены в [7] как для стыков с угловым рассогласованием, имитирующих в контексте данной модели микро- или макроизгибы ОВ и различные локальные и распределенные механические напряжения на ОК, так

и для строго соосных соединений и стыков с внесенным прецизионным осевым/радиальным рассогласованием.

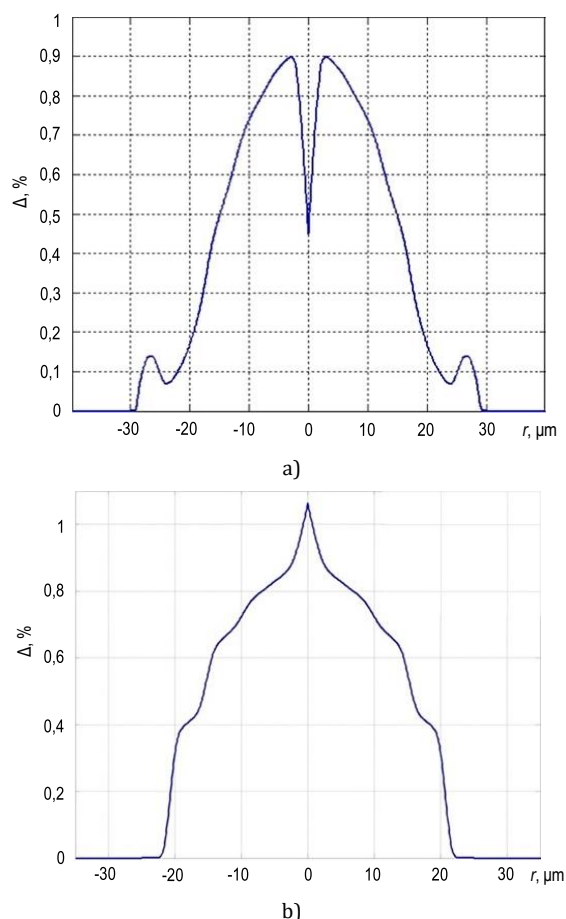
При этом в данной работе математическое описание ввода маломодового оптического сигнала в ОВ с учетом характера и степени загрязнения торца феррула подключаемого к источнику излучения коннектора предлагается воспользоваться ранее разработанным и экспериментально верифицированным методом расчета коэффициентов связи мод [16–18], базирующимся на оригинальном представлении интеграла перекрытия полей в виде конечных вложенных сумм по компонентам радиального распределения полей этих мод (5), где  $F_m^{(lm)}$  и  $F_n^{(ln)}$  – радиальные распределения полей взаимодействующих мод – поступающей/вводимой «Тх»-моды  $LP_{lm}$  и возбуждаемой «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:

$$\eta_{mn} = \frac{\left[ \sum_p \sum_q F_m^{(lm)}(x_p, y_q) F_n^{(ln)}(x_p, y_q) \right]^2}{\left\{ \sum_p \sum_q \left[ F_m^{(lm)}(x_p, y_q) \right]^2 \right\} \cdot \left\{ \sum_p \sum_q \left[ F_n^{(ln)}(x_p, y_q) \right]^2 \right\}}, \quad (5)$$

Формально радиальные распределения полей взаимодействующих мод могут быть непосредственно корректно рассчитаны через представление, например, в базе функций Лагерра – Гаусса [9] 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. Иными словами, предлагаемый подход позволяет использовать в качестве исходных данных непосредственно фотографии торцов феррул коннекторов анализируемого разъёмного соединения, получаемые штатными полевыми комплектами видеодиагностики (например, [19] и др.). В свою очередь, согласно [16–18], используется представление анализируемого разъёмного соединения в виде эквивалентного стыка ОВ с введенным заданным прецизионным радиальным рассогласованием и дискретизацией полей взаимодействующих мод, с учетом искажения последних за счет загрязнения торца ОВ путем наложения соответствующим образом предварительно обработанного в соответствии с ранее разработанной методикой [20] изображения феррула.

#### Расчет динамики огибающей оптического импульса при распространении в ВОЛП с последовательно включенной парой МОКВ-шифратор/дешифратор

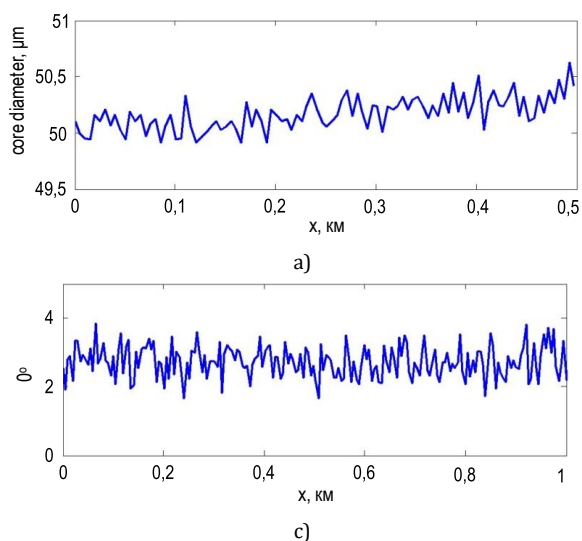
Для апробации предложенного подхода было проведено моделирование ВОЛП с последовательно соединенной парой МОКВ-шифратор/дешифратор для передачи сигналов волоконно-оптической системы 10GBase-LX стандарта IEEE 802.3ae. Коммерческие трансиверы таких систем данной спецификации LX традиционно реализуются на базе одномодовых лазеров с резонатором Фабри – Перо, генерирующих оптический сигнал на длине волны  $\lambda = 1310$  нм. В качестве исходных данных использовались полученные в результате оптимизации градиентные профили показателя преломления указанной пары МОКВ идентичной длины, подробно описанные в [2]: здесь параметры дефекта в центре сердцевины МОКВ-дешифратора подбирались, как было отмечено выше, для обеспечения реверсивного воспроизведения диаграммы ДМЗ МОКВ-шифратора при выборе одинаковой протяженности каждого из данных ОВ. Полученные профили, представленные на рисунках 2а и 2б [2], обеспечивают ДМЗ до 2120 пс/км по основной моде  $LP_{01}$  для базовых 12 модовых составляющих (до 3-го азимутального ( $l = 3$ ) и 3-го радиального ( $m = 3$ ) порядков включительно), осуществляющих перенос оптического сигнала в маломодовом режиме.



**Рис. 2. Полученные в результате оптимизации образцы градиентных профилей показателя преломления МОКВ-: а) шифратора; б) дешифратора**

*Fig. 2. Optimized Graded Refractive Index Profiles of Optical Crypto-Fibers: a) Encryptor; b) Decoder*

Как результат, рассматривалась итоговая комбинированная ВОЛП общей протяженностью 1 км,



**Рис. 3. Статистика распределения значений разброса: а-б) диаметра сердцевины МОКВ-шифратора; с-д) углового рассогласования стыков регулярных участков представления исследуемой ВОЛП**

*Fig. 3. Statistics of Variation Distribution: a-b) of Encryptor Optical Fiber Core Diameter; c-d) of Angular Misalignment at Splices of Link Regular Spans*

составленная из последовательно соединенных МОКВ-шифратора и МОКВ-дешифратора длиной 500 м каждое. Здесь нерегулярная структура ОВ была представлена в виде флуктуаций диаметра сердцевины, при этом распределение значений указанного параметра задавалось на основе серии протоколов датчиков контроля внешнего диаметра ОВ, измеряемого в процессе вытяжки строительной длины световода [21, 22]. Пример статистики распределения значений разброса диаметра сердцевины МОКВ-шифратора приведен на рисунках 3а и 3б. В свою очередь, как было отмечено выше, микро- и макроизгибы ОВ, а также кручение и тяжение световода, которые неизбежно возникают на практике при установке ОК и являются дополнительными факторами взаимодействия и смещения модовых компонентов оптического сигнала, представлены в данной модели в виде стыков регулярных участков линии, выполненные с некоторым малым угловым рассогласованием. В данном случае использовался нормальный закон распределения случайной величины, при этом математическое ожидание было выбрано равным  $3,0^\circ$ , а дисперсии –  $0,5^\circ$ . Распределение значений углового рассогласования стыков регулярных участков представления исследуемого ОВ и гистограмма статистики этого распределения приведены на рисунках 3с и 3д.

Предполагается, что ввод излучения с выхода лазера в многомодовое ОВ-линии осуществляется без применения специализированных устройств согласования непосредственно через типовую проходную оптическую розетку. При этом на первом этапе полагается, что торец феррула коннектора МОКВ-шифратора не загрязнен, не поврежден, полностью удовлетворяет по прохождению тестов на чистоту всех трех зон феррула ABC [23].

Сам источник волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) спецификации 10GBase-LX – лазерный диод (ЛД), излучение, на выходе которого может содержать до 2 поперечных мод ( $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ ) – пигментирован стандартным одномодовым ОВ рек. ITU-T G.652, торец феррула коннектора которого также является идеально чистым. В качестве альтернативы можно рассмотреть ввод излучения в торец коннектора многомодового ОВ-линии через согласующее устройство ЛД или непосредственно в передающий модуль, что также характерно для большинства штатных трансиверов активного оборудования ВОСП [24]. Таким образом, оба варианта подключения ЛД к линии рассматриваются как эквивалентное соединение одномодового ОВ и многомодового МОКВ, выполненное с угловым рассогласованием  $4,2^\circ$  [7]. Результаты расчета динамики оптического импульса гауссовой формы исходной длительности  $\tau_{05} = 90,91$  пс (10 Гбит/с) при распространении по описанной ВОЛП с криптоволокнами без учета влияния состояния торцевой поверхности коннектора на входе МОКВ-шифратора, подключаемого к ЛД через типовое разъемное соединение, в виде диаграммы представлены на рисунке 4.

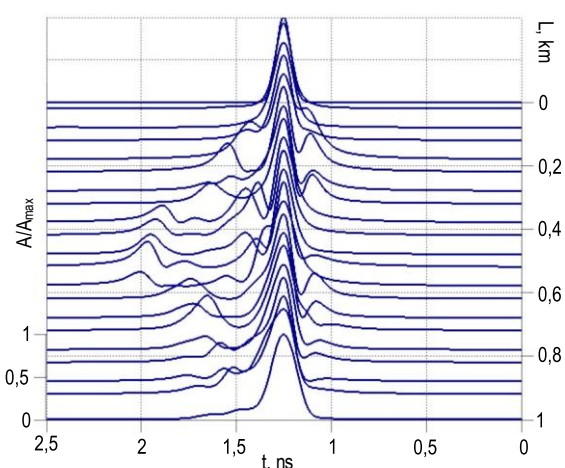


Рис. 4. Результаты расчета динамики оптического импульса системы 10GBase-LX, распространяющегося по 1 км ВОЛП, без учета влияния торцевой поверхности коннектора

Fig. 4. Results of 10GBase-LX Optical Pulse Dynamics Computation under Propagation over 1 km Fiber Optic Link without Taking into Account Connector Ferrule End-Face Condition

Анализ полученных результатов показывает, что при распространении по МОКВ-шифратору сигнал претерпевает сильные искажения за счет проявления эффекта ДМЗ, а также процессов взаимодействия и смешения модовых составляющих, в то время как на выходе МОКВ-дешифратора аналогичной протяженности с реверсивной диаграммой ДМЗ относительно МОКВ-шифратора удается практически полностью восстановить форму огибающей импульса.

На следующем этапе рассматривался более сложный ввод № 2 оптического сигнала с выхода

ЛД в МОКВ-шифратор линии: торец феррула коннектора пигтейла ЛД также выбирался как тщательным образом очищенный и прошедший тест по всем трем зонам ABC, в то время как феррул коннектора МОКВ-шифратора, напротив, был сильно загрязнен и «провалил» тесты также по всем трем зонам ABC. Здесь и далее использовались реальные фотографии торцов коннекторов [16–18, 20], полученные ранее с помощью штатного полевого комплекта видеодиагностики разъемных соединений [19]. Исходные фотографии торцов феррул указанных коннекторов представлены на рисунках 5а и 5b, соответственно. В свою очередь, результирующие бинарные изображения торцов феррул данных коннекторов после удаления ореолов границ сердцевин и оболочки и последующей локализации артефактов, выполненные в соответствии с ранее разработанной методикой [20], представлены на рисунках 5с и 5d. А в качестве примера на рисунке 6 приведено радиальное распределение полей высших мод  $LP_{13}$   $LP_{23}$ , возбуждаемых в МОКВ-шифраторе, искаженных за счет существенного загрязнения торцевой поверхности феррула.

Результаты расчета динамики оптического импульса вышеуказанной ВОСП 10GBase-LX при существенном загрязнении торца феррула коннектора на входе МОКВ-шифратора в процессе распространения по описанной комбинированной ВОЛП с криптоволокнами представлены на рисунке 7. Здесь хорошо видно, что характер искажений огибающей оптического импульса отличается относительно предыдущих условий ввода, а результирующая огибающая сигнала на выходе ВОЛП за счет компенсации ДМЗ в МОКВ-дешифраторе также не совпадает с формой импульсного отклика, регистрируемого на выходе исследуемой ВОЛП при исходных условиях ввода.

Очевидно, что с точки зрения искажения радиального распределения поля возбуждаемых ЛД в МОКВ-шифраторе ВОЛП наибольшее негативное влияние на изменение условий ввода оказывает сильное загрязнение непосредственно в центре торца феррула – фактически в зоне, ограниченной радиусом не более 200 мкм (как показывает сопоставление рисунков 5 и 6) относительно центра сердцевин ОВ. Поэтому на следующем этапе был рассмотрен экстремально сильно загрязненный коннектор, который так же, как и в предыдущем случае не прошел тесты на чистоту всех трех зон ABC, но при этом отличается от ввода № 2 существенно бóльшим загрязнением именно в центральной зоне сердцевин. На рисунке 8 приведены (слева–направо): а) фотография торца феррула такого коннектора, б) бинарное изображение и с) пример искаженного радиального распределения поля одной из высших мод –  $LP_{03}$ .

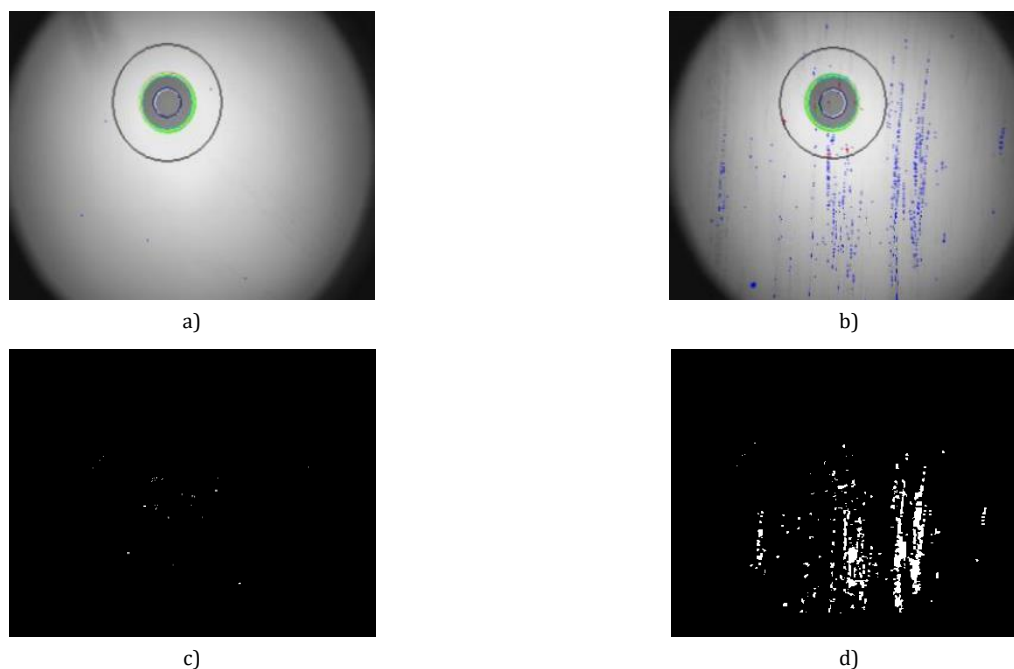


Рис. 5. Исходное и результирующее изображение: а) пигтейл ЛД; б) коннектор на вводе МОКВ-шифратора

Fig. 5. Initial and Processed Image of: a) LD Pigtail; b) Connector at the input of Encryptor Fiber

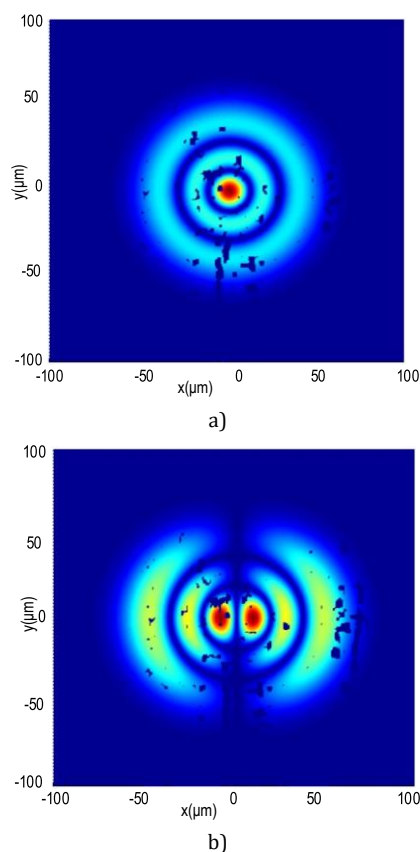


Рис. 6. Искаженные за счет загрязнения торцевой поверхности феррула поля возбуждаемых в МОКВ-шифраторе мод высших порядков: а)  $LP_{03}$ ; б)  $LP_{13}$

Fig. 6. Radial Higher-Order Mode Field Distributions, Distorted by Contaminations over Connector Ferrule End Face: a)  $LP_{03}$ ; b)  $LP_{13}$

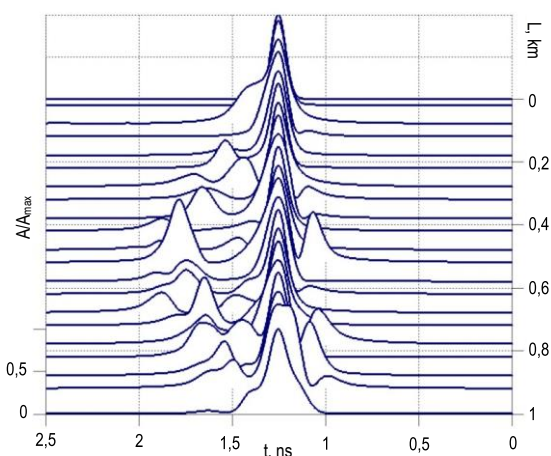


Рис. 7. Результаты расчета динамики оптического импульса системы 10GBase-LX, распространяющегося по 1 км ВОЛП, при существенном загрязнении торцевой поверхности коннектора

Fig. 7. Results of 10GBase-LX Optical Pulse Dynamics Computation during Propagation over 1 km Fiber Optic Link under Strong Contamination of Connector Ferrule End-Face

В качестве дополнения к проведению сравнительного анализа влияния характера и степени загрязнения торцевой поверхности коннектора на изменения условий ввода оптического сигнала в ОВ-линии, также предлагается рассмотреть коннектор, «проваливший» тесты в зонах «А» и «В», но прошедший тест на чистоту в зоне «С» при локальном искажении радиального распределения поле мод в периферийной зоне сердцевины ОВ (ввод № 4) (см. рисунки 8d, 8e и 8f).



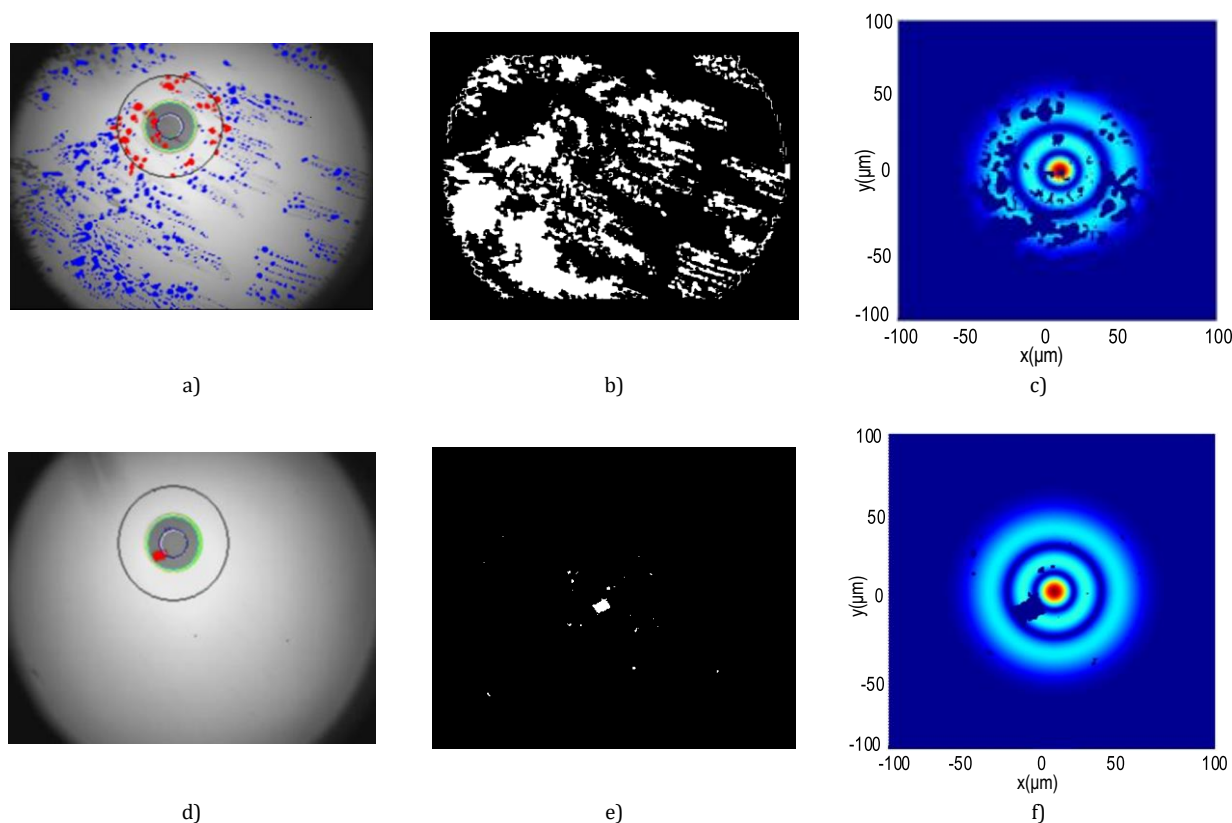


Рис. 8. Экстремально сильно (a, b и c) и умеренно загрязненная (d, e и f) торцевая поверхность феррула коннектора МОКВ-шифратора

*Fig. 8. Extremely Strong (a, b and c) and Weakly Contaminated (d, e and f) Encryptor Fiber Connector Ferrule End-Face*

Результаты расчета огибающей оптического импульса ВОСП 10GBase-LX на выходе исследуемой комбинированной ВОЛП общей протяженностью  $L = 1,000$  км для всех вышеописанных 4 вариантов условий ввода приведены на рисунке 9. Отдельно на рисунке 10 также сведены (слева-направо) расчетные огибающие оптического сигнала в условных «контрольных точках», представляющих интерес: а) ближе к середине МОКВ-шифратора –  $L = 0,220$  км; б) ближе к выходу –  $L = 0,280$  км; с) ближе к середине –  $L = 0,720$  км.

Анализ полученных результатов наглядно демонстрирует необходимость контроля качества подготовки (очистки) торцов феррул волоконно-оптических коннекторов разъемных соединений линейного тракта ВОЛП с многомодовыми ОВ, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигналов мультитабитных ВОСП, трансиверы которых оснащены когерентными источниками оптического излучения. Применительно к рассматриваемому случаю исследуемой модельной комбинированной ВОЛП с криптоволокнами, хорошо видно, что для всех трех сопоставляемых вариантов ввода с загрязненными коннекторами на входе МОКВ-шифратора (причем во всех трех случаях ни один из них не прошел тест на чистоту

в зоне «А») характер и степень проявления искажения оптического импульса проявляется неодинаково и существенно отличается для случая чистого торца феррула.

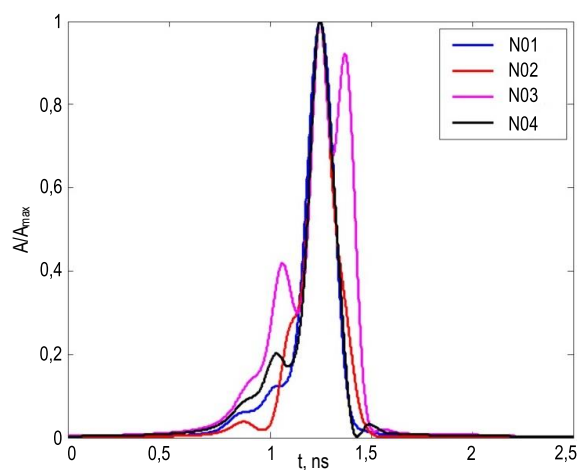


Рис. 9. Результаты расчета огибающей оптического импульса при различных условиях ввода, определяемых характером и степенью загрязнения торцевой поверхности феррула коннектора входа МОКВ-шифратора

*Fig. 9. Results of 10GBase-LX Optical Pulse Envelope Computation under Various Launching Conditions, Depending on Encryptor Fiber input Connector Ferrule End-Face Contamination*

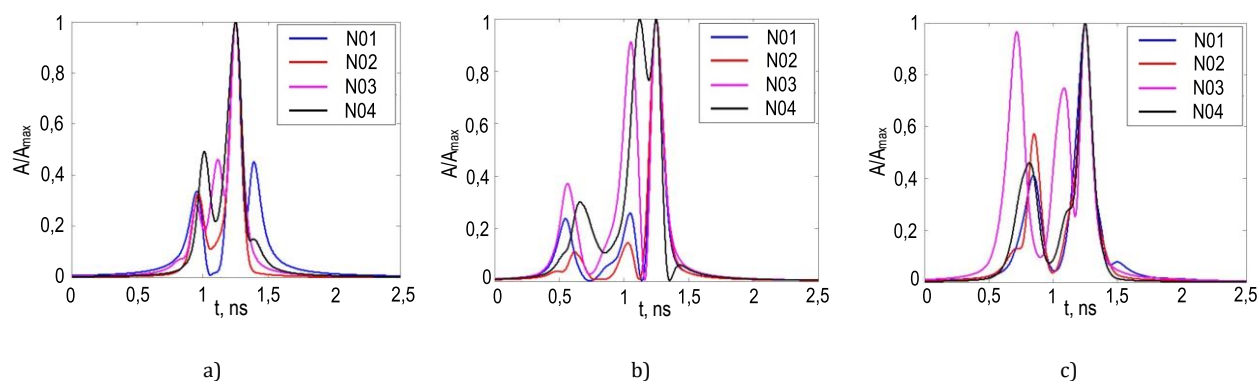


Рис. 10. Результаты расчета огибающей оптического импульса при различных условиях ввода, определяемых характером и степенью загрязнения торцевой поверхности феррула коннектора входа МОКВ-шифратор: а) 0,220 км; б) 0,480 км; в) 0,720 км

Fig. 10. Results of Optical Pulse Envelope Computation under Various Launching Conditions, Depending on Encryptor Fiber input Connector Ferrule End-Face Contamination: a) 0,220 km; b) 0,480 km; c) 0,720 km

Так, для одной и той же «контрольной точки» ВОЛП наблюдается существенно расхождение как по амплитуде (0,5 и более), так и по положению периферийных пиков импульсного отклика (1 нс и более), что объясняется неодинаковым перераспределением мощности возбуждаемых в МОКВ-шифраторе мод ввиду различного искажения их радиального распределения полей, обусловленных наличием загрязненных областей торцевой поверхности феррула для рассматриваемых вариантов подключения ЛД к многомодовой ОВ-линии.

В то же время, сопоставление полученных в результате проведенного моделирования огибающих оптического импульса непосредственно на выходе комбинированной ВОЛП показывает потенциальную возможность проведения процедур «шифрования» и «дешифрования» оптического сигнала канала передачи конфиденциальной информации путем подбора соответствующей комбинации профилей показателя преломления пары МОКВ-шифратор/дешифратор. Безусловно, экстремально сильно загрязненная торцевая поверхность феррула коннектора вблизи положения центра ОВ приводит к существенным искажениям оптического импульса, особенно при распространении в маломодовом режиме: и для ввода № 3, и для ввода № 4 загрязнение центральной зоны было настолько критично, что искаженный при распространении в МОКВ-шифратор сигнал не смог восстановить свою огибающую в МОКВ-дешифратор на приемной стороне ВОЛП при общем тренде компрессии в квазигауссову форму. При этом для ввода № 2, несмотря на также «проваленные» тесты по всем трем зонам АВС, сигнал, формально, характеризуется квазигауссовой формой с увеличением дисперсии до 75,08 пс при значении этого же параметра для ввода № 1 («чистые» коннекторы) 70,80 пс.

## Заключение

Разработана модель кусочно-регулярной ВОЛП с многомодовыми ОВ, функционирующей в маломодовом режиме, дополненная, в отличие от известных решений, возможностью учета влияния на условия ввода сигнала с выхода когерентного источника в ОВ-линии состояния торцевой поверхности феррул коннекторов, и на ее основе – модель канала передачи конфиденциальной информации, защищенного на физическом уровне, реализуемого на базе ВОЛП с МОКВ.

Подтверждена необходимость контроля качества подготовки (очистки) торцов феррул коннекторов разъёмных соединений линейного тракта ВОЛП с многомодовыми ОВ, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигналов мультигигабитных ВОСП, трансиверы которых оснащены когерентными источниками оптического излучения.

Сопоставление полученных в результате проведенного моделирования огибающих оптического импульса непосредственно на выходе комбинированной ВОЛП показывает потенциальную возможность проведения процедур шифрования и дешифрования оптического сигнала канала передачи конфиденциальной информации путем подбора соответствующей комбинации профилей показателя преломления пары МОКВ-шифратор/дешифратор.

Даже для экстремально сильно загрязненной торцевой поверхности феррула коннектора непосредственно вблизи положения центра ОВ отмечается общий тренд компрессии искаженного импульса в квазигауссову форму, несмотря на то, что он не смог восстановить исходную форму огибающей при прохождении МОКВ-дешифратора. При этом даже для достаточно существенно загрязненного ввода с формально «проваленными» тестами по всем трем зонам АВС феррула, сигнал на выходе ВОЛП, формально, характеризуется квазигауссовой формой с увеличением дисперсии до 75,08 пс при значении этого же параметра для ввода с «чистым» коннектором 70,80 пс.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

## Список используемых источников

1. Бурдин А.В., Губарева О.Ю., Пашин С.С., Пугин В.В. Организация защищенного канала передачи конфиденциальной информации с помощью специализированного волоконно-оптического линейного тракта // Инфокоммуникационные технологии. 2017. Т. 15. № 4. С. 337–349. DOI:10.18469/ikt.2017.15.4.04
2. Bourdine A.V., Evtushenko A.S., Gubareva O.Yu., Minaeva A.Yu., Pashin S.S., Praporshchikov D.E. Secure data transmission channel protected by special fiber optic link based on optical crypto-fibers // Proceedings of the XVth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications (Kazan, Russian Federation, 20–23 November 2017). SPIE, 2018. Vol. 10774. DOI:10.1117/12.2318579
3. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: Академия Айти; ДМК Пресс, 2007. 632 с.
4. Bottacchi S. Multi-Gigabit Transmission over Multimode Optical Fibre: Theory and Design Methods for 10GbE Systems. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. 654 p.
5. Смирнов И.Г. Структурированные кабельные системы – проектирование, монтаж, сертификация. М.: AESP, 2007. 348 с.
6. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.П. Структурированные кабельные системы. М.: ДМК Пресс, 2002. 640 с.
7. Bourdine A.V. 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
8. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
9. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
10. Срапионов В.А. Связь мод в стыках оптических волокон с разбросом параметров // Электросвязь. 1985. № 10. С. 10–12.
11. 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.
12. Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков на основе комбинации модифицированного приближения Гаусса и метода конечных элементов // Телекоммуникации. 2010. № 9. С. 33–40.
13. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 512 с.
14. Yabre G. Comprehensive Theory of Dispersion in Graded-Index Optical Fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2000. Vol. 18. Iss. 2. PP. 166–177.
15. Bourdine A.V. Mode coupling at the splice of diverse optical fibers // Proceedings of the Optical Technologies for Telecommunications (Ufa, Russian Federation, 17–18 November 2012). SPIE, 2012. Vol. 8787. DOI:10.1117/12.2018553
16. Бурдин А.В., Пашин С.С. Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа фотографий 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
17. Bourdine A.V., Pashin S.S., Zaitseva E.S., Vasilets A.S., Antonov S.A. Fast and simple method for estimation of the insertion loss at the connection of singlemode optical fibers with contaminated ferrule end faces // Proceedings of the XVIIth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies for Telecommunications (Kazan, Russian Federation, 19–21 November 2019). SPIE, 2020. Vol. 11516. DOI:10.1117/12.2566456
18. Bourdine A.V., Bylina M.V., Pashin S.S., Praporshchikov D.E., Zaitseva E.S. Method for estimation of reflection on fiber optic connection based on ferrule end-face photo-image analysis // Proceedings of the VIIIth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies for Communications (Samara, Russian Federation, 17–20 November 2020). SPIE, 2021. Vol. 11793. DOI:10.1117/12.2597068
19. Westover FBP P-5000 FiberCheck2™. Руководство пользователя. Пер. с англ. 2008.
20. Bourdine A.V., Pashin S.S., Giniatulina A.M., Vasilets A.A., Antonov S.A. Development and approbation of procedure for automated localization of fiber optic connector contaminated ferrule end face image artifacts // Proceedings of the XVIth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications (Ufa, Russian Federation, 20–22 November 2018). SPIE, 2019. Vol. 11146. DOI:10.1117/12.2527547
21. Lyytikainen K.J. Control of complex structural geometry in optical fibre drawing. D.Sc Thesis. Sydney: School of Physics and Optical Fibre Technology Centre University of Sydney, 2004. 273 p.
22. Demidov V.V., Ter-Nersesyants E.V., Bourdine A.V., Burdin V.A., Minaeva A.Yu., Matrosova A.S., et al. Methods and technique of manufacturing silica graded-index fibers with a large central defect of the refractive index profile for fiber-optic sensors based on few-mode effects // Proceedings of the XIVth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications (Samara, Russian Federation, 22–24 November 2016). SPIE, 2017. Vol. 10342. DOI:10.1117/12.2270784
23. Standard 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. Iss. 1.0. 2009. 42 p.

\* \* \*

# Research of Fiber Optic Connector Ferrule End-Face Degradation Influence on Optical Pulse Distortion during Propagation over Indoor Multi-Gigabit Optical Network Links with Crypto-Fibers

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

<sup>1</sup>Research and Production Association S.I. Vavilov State Optical Institute,  
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-2021-7-4-18-30

Received 23rd August 2021

Revised 8th October 2021

Accepted 13th October 2021

**For citation:** Bourdine A., Pashin S. Research of Fiber Optic Connector Ferrule End-Face Degradation Influence on Optical Pulse Distortion during Propagation over Indoor Multi-Gigabit Optical Network Link with Crypto-Fibers. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(4):18–30. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-18-30

**Abstract:** This article presents results of approbation of developed model of piece-wise regular fiber optic link, operating in a few-mode regime, with series-connected couple of special multimode optical crypto-fibers “encryptor-decoder”. Unlike the previously developed solution, the model was modified with an ability to take into account influence of fiber optic connector end-face contamination on laser-excited optical signal launching conditions. We present comparison results of computed optical pulse response envelops, distorted during propagation over 10GBase-LX network fiber optic links, containing optical crypto-fibers, depending on various conditions of transceiver laser source connector ferrule end-face contamination

**Keywords:** ferrule, fiber optic connector, ferrule end-face contamination, fiber optic connection, mode coupling coefficient, structural cable systems, differential mode delay.

## FUNDING

This research was funded by RFBR according to the research project № 19-37-90150 «Post-Graduates».

## References


1. Bourdine A.V., Gubareva O.Yu., Pugin V.V., Pashin S.S. Secure Data Transmission over Specialized Fiber-Optic Link. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2017;15(4):337–349. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2017.15.4.04
2. Bourdine A.V., Evtushenko A.S., Gubareva O.Yu., Minaeva A.Yu., Pashin S.S., Praporshchikov D.E. Secure data transmission channel protected by special fiber optic link based on optical crypto-fibers. *Proceedings of the XVth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications, 20–23 November 2017, Kazan, Russian Federation*. SPIE; 2018. vol.10774. DOI:10.1117/12.2318579
3. Semenov A.B. *Fiber-Optic Subsystems of Modern Structured Cabling Systems*. Moscow: Academy IT Publ.; DMK Press Publ.; 2007. 632 p. (in Russ.)
4. Bottacchi S. *Multi-Gigabit Transmission over Multimode Optical Fibre: Theory and Design Methods for 10GbE Systems*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.; 2006. 654 p.
5. Smirnov I.G. *The Structured Cabling System – Design Work, Jointing, Certification*. Moscow: AESP Press Pub.; 2007. 348 p. (in Russ.)
6. Semenov A.B., Strizhakov S.K., Sunchelej I.R. *The Structured Cabling System*. Moscow: DMK Press Publ.; 2002. 640 p. (in Russ.)
7. Bourdine A. 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
8. Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics*. Moscow: Mir Publ.; 1996. 323 p. (in Russ.)




9. Snyder A., Love J. *Theory of Optical Waveguides*. Translated from English. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1987. 656 p. (in Russ.)
10. Srapionov V.A. Mode Coupling at Optical Fiber Junctions with Parameter Scatter. *Elektrosviaz*. 1985;10:10–12. (in Russ.)
11. 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.
12. Bourdine A.V., Delmukhametov O.R. Calculation of the Transmission Parameters Higher-Order Guided Modes Based on Combination of the Modified Gauss Approximation and the Finite Element Method. *Telekommunikatsii (Telecommunications)*. 2010;9:33–40. (in Russ.)
13. Adams M. *Introduction to the Theory of Optical Waveguides*. Translated from English. Moscow: Mir Publ.; 1984. 512 p. (in Russ.)
14. Yabre G. Comprehensive Theory of Dispersion in Graded-Index Optical Fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*. 2000;18(2):166–177.
15. Bourdine A.V. Mode coupling at the splice of diverse optical fibers. *Proceedings of the Optical Technologies for Telecommunications, 17–18 November 2012, Ufa, Russian Federation*. SPIE; 2012. vol.8787. DOI:10.1117/12.2018553
16. 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
17. Bourdine A.V., Pashin S.S., Zaitseva E.S., Vasilets A.S., Antonov S.A. Fast and simple method for estimation of the insertion loss at the connection of singlemode optical fibers with contaminated ferrule end faces. *Proceedings of the XVIIth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies for Telecommunications, 19–21 November 2019, Kazan, Russian Federation*. SPIE; 2020. vol.11516. DOI:10.1117/12.2566456
18. Bourdine A.V., Bylina M.V., Pashin S.S., Praporshchikov D.E., Zaitseva E.S. Method for estimation of reflection on fiber optic connection based on ferrule end-face photo-image analysis. *Proceedings of the VIIIth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies for Communications, 17–20 November 2020, Samara, Russian Federation*. SPIE; 2021. vol.11793. DOI:10.1117/12.2597068
19. Westover FBP P-5000 FiberCheck2™ User guide. Translated from English. 2008. (in Russ.)
20. Bourdine A.V., Pashin S.S., Giniatulina A.M., Vasilets A.A., Antonov S.A. Development and approbation of procedure for automated localization of fiber optic connector contaminated ferrule end face image artifacts. *Proceedings of the XVIth International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications, 20–22 November 2018, Ufa, Russian Federation*. SPIE; 2019. vol.11146. DOI:10.1117/12.2527547
21. Lyytikainen K.J. *Control of complex structural geometry in optical fibre drawing*. D.Sc Thesis. Sydney: School of Physics and Optical Fibre Technology Centre University of Sydney; 2004. 273 p.
22. Demidov V.V., Ter-Nersesyants E.V., Bourdine A.V., Burdin V.A., Minaeva A.Yu., Matrosova A.S., et al. Methods and technique of manufacturing silica graded-index fibers with a large central defect of the refractive index profile for fiber-optic sensors based on few-mode effects. *Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications, 22–24 November 2016, Samara, Russian Federation*. SPIE; 2017. vol.10342. DOI:10.1117/12.2270784
23. *Standard 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*. Iss. 1.0. 2009. 42 p.

## Сведения об авторах:

**БУРДИН**  
**Антон Владимирович**

доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе и развитию Научно-производственного объединения «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, заместитель директора центра стратегических инициатив Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [pashinstanislav@outlook.com](mailto:pashinstanislav@outlook.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-7898-974X>