

7. Blaze M., Bleumer G., Strauss M. Divertible protocols and atomic proxy cryptography. *International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*, Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 127-144.
8. Mambo M., Okamoto E. Proxy cryptosystems: Delegation of the power to decrypt cipher-texts. *IEICE transactions on fundamentals of electronics, Communications and computer sciences*, 1997, vol. 80, no. 1, pp. 54-63.
9. Gomathisankaran M., Tyagi A., Namuduri K. HORNS: A homomorphic encryption scheme for Cloud Computing using Residue Number System. *CISS*, 2011, pp. 1-5.
10. Paillier P. Public-key cryptosystems based on composite degree residuosity classes. *International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*, Springer Berlin Heidelberg, 1999, pp. 223-238.
11. Montgomery P.L. Modular multiplication without trial division. *Mathematics of computation*, 1985, vol. 44, no. 170, pp. 519-521.
12. Rivest R.L., Shamir A., Adleman L. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 1978, vol. 21, no. 2, pp. 120-126.
13. Rivest R.L., Adleman L., Dertouzos M.L. On data banks and privacy homomorphisms. *Foundations of secure computation*, 1978, vol. 4, no. 11, pp. 169-180.
14. ElGamal T. A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. *Workshop on the Theory and Application of Cryptographic Techniques*, Springer Berlin Heidelberg, 1984, pp. 10-18.

Received 21.11.2016

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.391.63; 681.7.068

АНАЛИЗ ВВОДА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА «О»-ДИАПАЗОНА ЧЕРЕЗ СОГЛАСУЮЩЕЕ СТАНДАРТНОЕ ОДНОМОДОВОЕ ВОЛОКНО В ГРАДИЕНТНЫЙ МНОГОМОДОВЫЙ СВЕТОВОД С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ГАБАРИТНЫМ ДЕФЕКТОМ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

*Бурдин А.В.¹, Бурдин В.А.¹, Дмитриев Е.В.¹, Демидов В.В.², Дукельский К.В.³,
Жуков А.Е.¹, Минаева А.Ю.¹, Прапорщикова Д.Е.¹, Тер-Нерсесянц Е.В.²*

¹*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ*

²*АО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения
ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, РФ*

³*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ*

E-mail: bourdine@yandex.ru

В работе представлены результаты теоретического анализа перераспределения мощности оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником излучения в «О»-диапазоне длин волн, пигтелированного стандартным одномодовым оптическим волокном рек. ITU-T G.652, между направляемыми модами кварцевых градиентных многомодовых волоконных световодов с габаритным технологическим дефектом профиля показателя преломления в центре сердцевины.

Ключевые слова: маломодовый режим передачи сигнала, дифференциальная модовая задержка, многомодовые оптические волокна, градиентный профиль показателя преломления, технологический дефект профиля, MCVD, возбуждение мод высших порядков, радиальное смещение, угловое рассогласование

Общие положения

На сегодняшний день многомодовые оптические волокна (ММ ОВ) фактически являются основой компактных многопортовых инфокоммуникационных сетей, соединительные волоконно-оптические линии которых отличаются малой

протяженностью (формально до 2 км, на практике – буквально сотни, а в ряде случаев – даже десятки метров) при одновременно высоких скоростях передачи информации [1-3].

Переход на мультигигабитные скорости требует применения в оптических модулях активного

оборудования таких сетей когерентных источников оптического излучения [1, 3-7]. Использование последних в сочетании с ММ ОВ формирует маломодовый режим, при котором оптический сигнал переносится ограниченным модовым составом. Ключевым фактором искажений оптических импульсов в маломодовом режиме является дифференциальная модовая задержка (ДМЗ) [1, 3-7], обусловленная, с одной стороны, условиями ввода сигнала с выхода лазера в ММ ОВ и отклонениями профиля показателя преломления световода от оптимальной градиентной формы, с другой.

Именно по этой причине кварцевые ММ ОВ первого поколения с технологическими дефектами профиля показателя преломления в виде габаритного провала или, напротив, пика в центре сердцевины, для которых характерно сильное проявление эффекта ДМЗ и, соответственно, неприемлемо низкое значение полосы пропускания в маломодовом режиме, были заменены на мультигигабитных сетях передачи данных новым поколением кварцевых градиентных ММ ОВ категории ОМ3...ОМ4, оптимизированных для работы с лазерными источниками [4-5, 7]. В результате данный тип градиентных ММ ОВ с габаритным технологическим дефектом профиля показателя преломления в центре сердцевины, с точки зрения приложения на инфокоммуникационных сетях, на сегодняшний день не востребован и практически не поставляется на предприятия кабельной промышленности.

Вместе с тем в ранее опубликованных работах [8-13] были продемонстрированы потенциальные возможности разработанного альтернативного способа регистрации внешних воздействий. Последний, в отличие от классических подходов, реализуемых как в коммерческих системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей, так и подавляющем большинстве проприетарных решений [14-17], базируется на маломодовых эффектах, возникающих в процессе передачи оптического сигнала, генерируемого когерентным источником излучения, по ММ ОВ.

Возбуждение достаточно коротких отрезков ОВ, от нескольких сантиметров и даже менее до метровых и более длин, с увеличенным по сравнению с традиционными одномодовыми (SM) ОВ диаметром сердцевины с помощью лазера, в том числе через SM согласующий световод, достаточно широко используется, например, при реализации разнообразных интерферометрических схем [15, 18-24]. Целый ряд публикаций посвящен приложению волоконных решеток Брэгга, запи-

санных на отрезках ММ ОВ, и проявляющихся в них эффектах для различных схем волоконно-оптических датчиков – вибраций, температуры, деформаций и пр. – например [25-29] и др.

Здесь необходимо отметить, что подавляющее большинство схем, представленных в перечисленных работах, ориентированы исключительно на анализ спектрального отклика той или иной волоконно-оптической структуры с включением отрезка ММ ОВ при возбуждении когерентным источником, что, как было отмечено выше, при таких условиях соответствует непосредственно маломодовому режиму. В этом смысле представляется целесообразным выделить в отдельную группу публикации, ориентированные на регистрацию и обработку зондирующего сигнала и/или его отклика при прохождении протяженных длин ММ ОВ методами оптической рефлектометрии во временной области (фактически, на сегодняшний день для этих приложений ММ ОВ вытеснены SM ОВ [30-31]) и анализа спеклструктур [30, 32-34].

В отличие от известных решений, предлагаемый подход регистрации внешних воздействий базируется на анализе изменения отклика маломодового оптического сигнала малой длительности, возбуждаемого в сенсоре – протяженном ММ ОВ – когерентным источником излучения. В процессе мониторинга выполняется сравнение «опорной» и «текущей» формы импульса, детектируемой на выходе тестируемого ММ ОВ. Благодаря приложенному внешнему локальному или распределенному воздействию (например, механическому или температурному) на ММ ОВ сенсора появляются новые микро- и макроизгибы, что неизбежно меняет процессы взаимодействия и смещения модовых компонентов сигнала.

В свою очередь, это существенно влияет на изменение искаженной за счет ДМЗ формы импульсного отклика. Поэтому для данного решения в качестве чувствительного элемента предлагается использовать ММ ОВ с сильным проявлением ДМЗ в маломодовом режиме.

Анализ результатов, полученных в ходе предварительно проведенной серии теоретических и экспериментальных исследований, показал, что наиболее сильное проявления ДМЗ соответствует ММ ОВ первого поколения категорий ОМ1 и ОМ2 [10, 35-36]. При этом градиентный профиль показателя преломления таких волокон отличается наличием характерного технологического дефекта в центре сердцевины в виде габаритного провала или, наоборот, пика, а также присутствием сильных флуктуаций показателя преломления [36].

Это позволило выполнить в результате проведенного на базе лаборатории АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова» анализа и сопоставления протоколов измерения отбор, группирование и подготовку изготовленных по технологии MCVD преформ световодов с описанным габаритным технологическим дефектом градиентного профиля показателя преломления, один из примеров которого (заготовка №А4, расстояние 250 мм) с провалом в центре сердцевины представлен на рис. 1.

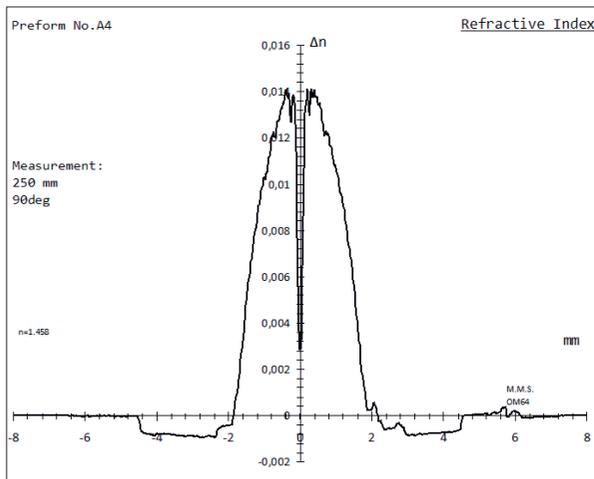


Рис. 1. Градиентный профиль показателя преломления кварцевой преформы ОВ (образец №А4, расстояние 250 мм от начала стержня) с центральным дефектом в виде провала

Затем из этих отобранных заготовок была реализована вытяжка строительных длин кварцевых ММ ОВ 50/125 с указанными провалом либо пиком профиля в центре сердцевины протяженностью примерно по 2 км с последующей перемоткой на катушки по 500 м каждая. Далее проведены повторные измерения профилей показателя преломления полученных промышленных образцов ММ ОВ. Протокол данной характеристики волокна №А4 на расстоянии 1000 м приведен на рис. 2.

Как было отмечено выше, помимо параметров самого ММ ОВ вторым фактором, определяющим характер и степень проявления ДМЗ, являются условия ввода сигнала с выхода лазера в сердцевину световода [1, 3-7, 10, 37-38]. Это также подтверждается действующими стандартами измерения эффективной модовой полосы пропускания ММ ОВ в маломодовом режиме – в частности, Т1А-455-220-А/ФОТР-220 и IEC 60793-2-10, базирующихся на анализе так называемой «карты» или «профиля» ДМЗ. «Карта», или «профиль», ДМЗ представляет собой полигон

импульсных откликов маломодового оптического сигнала, регистрируемого на выходе тестируемого ММ ОВ, построенный в результате прецизионного сканирования входного торца ММ ОВ когерентным источником излучения с помощью согласующего SM ОВ.

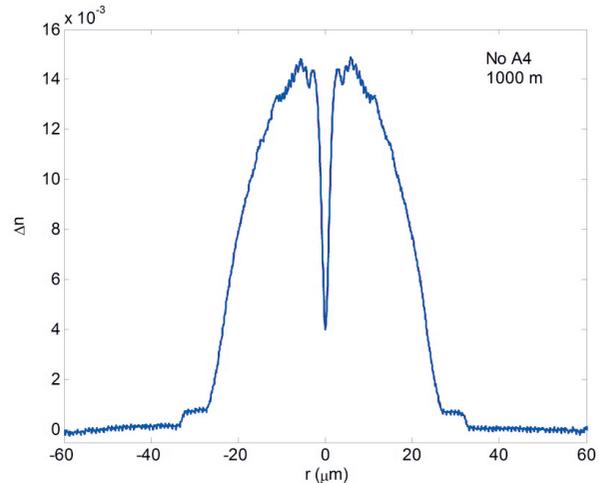


Рис. 2. Градиентный профиль показателя преломления ММ ОВ 50/125 (образец №А4, расстояние 1000 м от начала) с центральным дефектом в виде провала

Таким образом, предполагается, что, исходя из особенностей профиля показателя преломления градиентного, можно подобрать такие условия ввода оптического излучения с выхода лазера в ММ ОВ, при которых будет наблюдаться максимально сильное проявление ДМЗ. При этом, в отличие от передачи информационного сигнала по ММ ОВ, с точки зрения предлагаемого альтернативного подхода регистрации внешних воздействий на базе маломодовых эффектов, напротив, данный режим с усиленным проявлением ДМЗ является оптимальным.

В данной работе представлены результаты теоретического анализа перераспределения мощности оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником излучения в «О»-диапазоне длин волн, пигтелированного стандартным SM ОВ рек. ITU-T G.652, между направляемыми модами кварцевых градиентных ММ ОВ с габаритным технологическим дефектом профиля показателя преломления в центре сердцевины. Тип источника – SM лазерный диод Фабри-Перо (рабочая длина волны – центральная область «О»-диапазона длин волн $\lambda=1310$) и согласующий световод – стандартное SM ОВ рек. ITU-T G.652 выбирались исходя из элементной базы анализатора ДМЗ R2D2 лаборатории маломодовых технологий волоконной оптики и фотоники

кафедры линий связи и измерений в технике связи ПГУТИ [8-13, 35], который непосредственно используется для сравнения «опорной» и «текущей» формы импульса при регистрации внешних локальных или распределенных воздействий на ММ ОВ сенсора.

Методика анализа ввода оптического сигнала с выхода лазера через SM согласующий световод в градиентное ММ ОВ

В общем случае математическое описание возбуждения ММ ОВ некоторым источником оптического излучения можно свести к анализу стыка «согласующий световод – ММ ОВ линии». Такой подход, в частности, позволяет моделировать типовые схемы ввода оптического излучения в ОВ соединительных линий кабельных систем разного назначения при подключении источников коммерческих оптических модулей волоконно-оптических линий передачи. Например, достаточно большое число современных трансиверов, в том числе и SFP модули (Small Form-factor Pluggable – компактные трансиверы), предполагают ввод сигнала с выхода светоизлучающей поверхности лазера непосредственно в ОВ патчкорда, вклеенное в оптический коннектор соответствующего типа, через юстировочную втулку. Далее второй конец оптического патчкорда через проходную оптическую розетку коммутационного устройства (патч-панели, кросса) подключается к заданному волокну кабеля, оконцованному в данном оконечном устройстве коммутации с применением соответствующей технологии.

Нередко используется следующая схема ввода: неармированный конец световода пигтейла через некоторое согласующее устройство (например линзу) вклеивается на излучающую поверхность лазера. Другой, соответственно, оконцован оптическим коннектором, выведенным с внутренней стороны на проходную оптическую розетку лицевой панели трансивера. В результате к приемо-передающему модулю через указанную оптическую розетку с внешней стороны подключается либо непосредственно само волокно линии, либо для последующей коммутации на оптический кросс – оптический патчкорд. Такая схема применяется и в измерительной технике. В частности, упомянутый анализатор ДМЗ R2D2 оснащен в том числе SM лазерным диодом, пигтированным стандартным SM ОВ (SSF) рек. ITU-T G.652, выведенным с внутренней стороны на проходную оптическую розетку лицевой панели прибора [35].

Таким образом, условно неконтролируемый ввод сигнала осуществляется простым подключением ММ пигтейла, подваренного к тестируемому ММ ОВ, к источнику через указанную розетку на лицевой панели. В то время как специализированные условия ввода (центрированный или, напротив, ввод с радиальным смещением) оптического излучения лазера можно реализовать, подваривая с помощью соответствующей программы неармированный конец SM пигтейла, подключенного к проходной розетке с внешней стороны лицевой панели R2D2, к тестируемому ММ ОВ.

В данной работе анализ перераспределения мощности вводимого через согласующий световод SSF с выхода SM ЛД излучения «О»-диапазона длин волн в градиентное ММ ОВ предлагается реализовать путем расчета коэффициентов связи мод на стыке указанных волокон. Данный подход на сегодняшний день по-прежнему остается одним из наиболее известных и простых методов анализа перехода оптического излучения от одной моды к другой. Этот метод широко применяется при оценке вносимых потерь и коэффициента отражения на соединении ОВ одинаковой конфигурации с разбросом отдельных технологических параметров – например [39-42] и др., моделировании и исследовании влияния условий ввода оптического излучения на возбуждение оптических волноводов – см. [43-46] и др., в том числе и при моделировании распространения оптических сигналов по ОВ в маломодовом режиме [6; 37-38; 47-48] и др.

В общем случае коэффициент связи моды p , возбуждающей моду q , определяется через интеграл перекрытия полей, который в скалярной постановке задачи для цилиндрической системы координат имеет следующий вид [3-48]:

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

где F_p и F_q – радиальные распределения полей взаимодействующих мод LP_{lm} – поступающей с выхода источника моды p и возбуждаемой в ОВ моды q .

Для перехода к модам высших порядков, структура поля которых, в отличие от основной моды LP_{01} , носит более сложный характер, предлагается воспользоваться известным аппроксимирующим выражением, соответствующим точ-

ному решению скалярного волнового уравнения для ОВ с идеальным неограниченным параболическим профилем показателя преломления, которое в рамках приближения Гаусса имеет следующий вид [46]:

$$F_m^{(l)}(R) = \left(\frac{R}{R_0}\right)^l L_{m-1}^{(l)}\left(\frac{R^2}{R_0^2}\right) \exp\left(\frac{-R^2}{2R_0^2}\right), \quad (2)$$

где l и m – азимутальный и радиальные порядки моды LP_{lm} , соответственно; $R = r/a$ – нормированная радиальная координата; r – радиальная координата; a – радиус сердцевины; $R_0 = \rho_0/a$ – нормированный радиус пятна моды; ρ_0 – радиус пятна моды; $L_{m-1}^{(l)}$ – полином Лагерра.

В данной работе, в отличие от известных решений, базирующихся на классическом приближении Гаусса [46] и его различных модификациях [49-55], предполагающих представление профиля показателя преломления исследуемого ОВ с помощью только одной или совокупности простых гладких степенных функций, что в подавляющем большинстве случаев не соответствует реальным промышленным образцам градиентных ОВ [36, 56-57], предлагается воспользоваться предложенным ранее обобщением модификации приближения Гаусса (ОМПГ) [58-59] на случай расчета спектральных характеристик дисперсионных параметров направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления.

Данный метод базируется на сочетании приближения Гаусса [46], модифицированного для расчета многомодовых ОВ [58], и метода стратификации [56]. Здесь слабонаправляющий волоконный световод с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, рассматривается как слабонаправляющий волоконный световод с многослойным профилем показателя преломления, представляемый в области сердцевины ОВ в виде конечного числа N слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным.

В результате при задании исходных данных обеспечивается детализированное воспроизведение профиля показателя преломления исследуемого ОВ, что существенно снижает погрешность расчетов [60]. Более того, описанный подход обеспечивает возможность перехода к достаточно громоздким, но аналитическим выражениям записи интеграла перекрытия полей мод (1) с

учетом (2) в виде конечных вложенных сумм, которые приведены в ранее опубликованной работе [59].

Для перехода от эквивалентных, полученных в результате расчета на основании ОМПГ значений радиусов пятна моды к фактическим и наоборот предлагается воспользоваться интегральной формой записи формулы поправки Петерманна-1 для радиуса пятна моды в ближнем поле [61], которое в результате соответствующих преобразований после подстановки аппроксимирующего выражения для радиального распределения поля моды (2) приводится к аналитической формуле, вывод которой подробно изложен в [62]:

$$\text{MFR}_{\text{NF}} = 2R_0\sqrt{2} \cdot \left[\frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (l+q+1)! \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где

$$D_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l, m-1)},$$

$b_p^{(l, m)}$ – соответствующие коэффициенты степенного ряда формулы явного выражения полинома Лагерра $L_m^{(l)}(x)$ [63-64]:

$$L_m^{(l)}(x) = \sum_{q=0}^m b_q^{(l, m)} x^q;$$

$$b_q^{(l, m)} = (-1)^q \frac{(l+m)!}{(l+q)!(m-q)!q!}.$$

Таким образом, методика расчета коэффициентов связи мод оптического излучения, поступающих с выхода согласующего волоконного световода в исследуемое ММ ОВ сенсора, включает в себя следующие этапы. Предварительно задаются профиль показателя преломления и базовые геометрические параметры исследуемого ММ ОВ. Далее с помощью ОМПГ осуществляется расчет эквивалентных, в рамках приближения Гаусса, значений радиусов пятна мод модового состава. Затем выполняется переход от эквивалентных к фактическим значениям радиусов пятна мод с использованием выражения для поправки Петерманна-1 (3).

После этого для оценки коэффициента связи в формулу (1), записанную в аналитическом виде для строго соосного стыка или, напротив, соеди-

нения с введенным прецизионным радиальным, угловым и (или) продольным рассогласованием, приведенным в [59], осуществляется подстановка полученных значений радиусов пятна мод согласующего световода и ОВ сенсора соответствующего порядка.

Результаты анализа стыка стандартного SM ОВ и градиентного MM ОВ с габаритным дефектом профиля показателя преломления в центре сердцевины

Как было отмечено выше, в данной работе предлагается рассматривать ввод оптического сигнала в исследуемое MM ОВ, профиль показателя преломления которого представлен на рис. 2, с выхода SM ЛД, генерирующего оптический сигнал в центральной области «О»-диапазона длин волн ($\lambda = 1310$ нм) через SM согласующий световод, представляющий собой стандартное SM ОВ рек. ITU-T G.652 (SSF) [1].

В [36; 57], посвященных исследованию дефектов градиентных профилей показателя преломления промышленных образцов MM ОВ, были также дополнительно проведены измерения ряда образцов SM ОВ разных рекомендаций ITU-T, в том числе и G.652 Corning® SMF-28e™, датированных второй половиной 2000-ых гг., которые были использованы в качестве согласующих световодов при исследовании ДМЗ MM ОВ, изложенных в работе [35].

Так, на рис. 3 представлен профиль одного из волокон SSF, который далее был воспроизведен на основе данных протокола измерения. Массив данных, описывающий профиль на интервале от центра сердцевины световода до границы раздела сердцевина/оболочка $r \in [0; a]$, содержит 76 значений показателя преломления n .

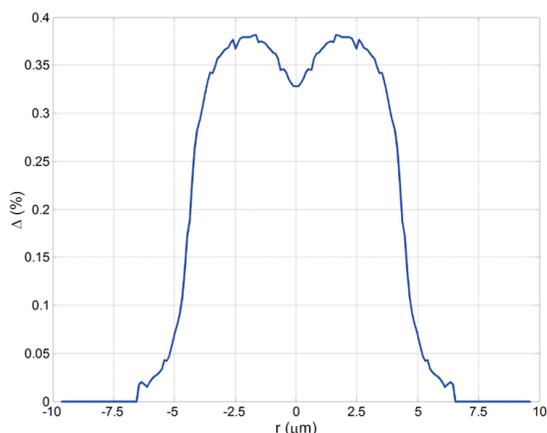


Рис. 3. «Ступенчатый» профиль показателя преломления промышленного образца SM ОВ рек. ITU-T G.652

Как это видно из рис. 3, реальный профиль достаточно сильно отличается от идеализированного ступенчатого. Здесь присутствуют не только локальные флуктуации показателя преломления, но и дефект в центре сердцевины в виде провала. При этом сама форма профиля носит в целом сглаженный характер. Радиальная координата половины высоты профиля $n_{max}/2$ составляет 4,08 мкм, что не противоречит спецификации ОВ [1] и в общем случае позиционируется в паспортных данных как радиус сердцевины. Однако значение радиальной координаты непосредственно границы раздела сердцевины/оболочка достигает уже 6,65 мкм, что и предлагается рассматривать как фактическое значение радиуса сердцевины рассматриваемого ОВ SSF.

Далее с помощью строгого численного метода смешанных конечных элементов (МСКЭ) [60] и ранее разработанного приближенного метода ОМПГ [58] был проведен расчет параметров передачи модового состава, рассматриваемого SSF в диапазоне длин волн $\lambda = 800 \dots 1350$ нм. Анализ и сопоставление полученных результатов показали, что в области второго окна прозрачности, в частности $\lambda = 1300 \pm 10$ нм, условию отсечки [46; 56] удовлетворяет не только основная мода LP_{01} , но и мода LP_{11} , которая становится вытекающей при $\lambda > 1325$ нм. Последующий расчет набора промышленных образцов ОВ SSF также для большинства случаев продемонстрировал аналогичные результаты. На рис. 4 приведены спектральные характеристики нормированной постоянной распространения направляемых мод LP_{01} и LP_{11} , полученные с помощью МСКЭ и ОМПГ для ОВ SSF рис. 3.

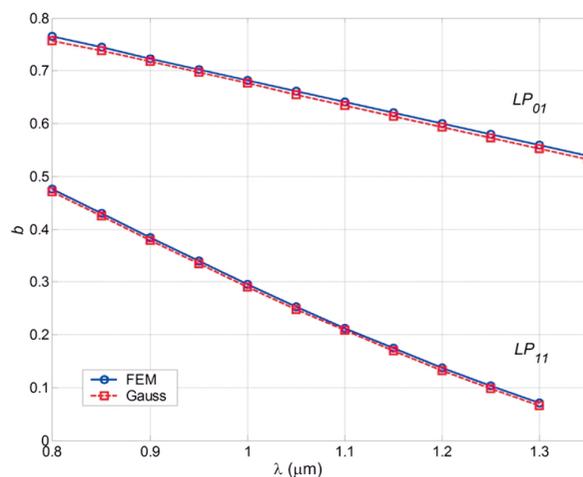


Рис. 4. Спектральные зависимости нормированной постоянной распространения b направляемых мод LP_{01} и LP_{11} SM ОВ SSF рис. 3, полученные с помощью МСКЭ и ОМПГ

Несмотря на малый радиус сердцевины и, соответственно, достаточно малое значение нормированной частоты $V = 5,2 \dots 5,3$, погрешность оценки нормированной постоянной распространения b не превысила 1,5% для основной моды LP_{01} и 5% для моды LP_{11} , а погрешность оценки постоянной распространения β – 0,003% и 0,014%, соответственно, во всем исследуемом диапазоне длин волн. Таким образом, при моделировании стыка SSF и ММ ОБ или возбуждении ММ ОБ одномодовым ЛД через согласующий световод SSF помимо основной моды LP_{01} целесообразно учитывать возможность ввода моды LP_{11} .

Далее с помощью ОМПГ был проведен расчет параметров передачи модового состава ММ ОБ 50/125 рис. 2. Так, на длине волны $\lambda = 1310$ нм условию отсечки при одновременном значении оптического фактора ограничения $P_{co} \geq 0,5$ удовлетворяет 46 направляемых мод до $l = 12$ азимутального и $m = 6$ радиального порядков включительно. На первом этапе предлагается рассмотреть процесс ввода оптического сигнала с выхода SM ЛД, генерирующего оптическое излучение на длине волны $\lambda = 1310$ нм, через согласующий световод SSF, поддерживающий распространение основной LP_{01} и высшей LP_{11} мод в торец исследуемого ММ ОБ с внесенным заданным прецизионным радиальным смещением.

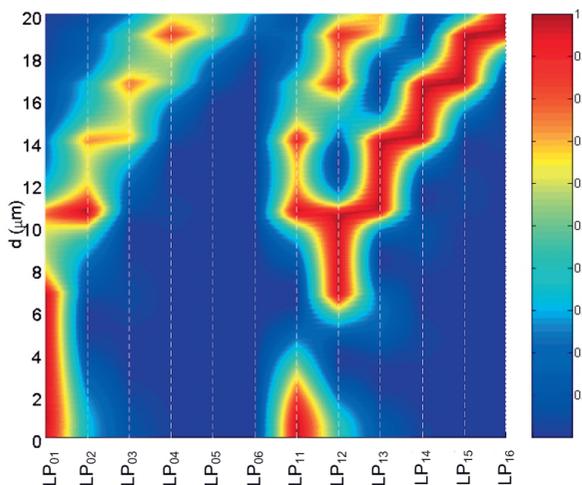


Рис. 5. Диаграмма распределения нормированных амплитуд возбуждаемых мод исследуемого ММ ОБ при вводе основной LP_{01} и высшей LP_{11} мод одинаковой мощности с выхода SM ЛД ($\lambda = 1310$ нм) через SSF с заданным прецизионным радиальным смещением

На рис. 5 приведены результаты расчета перераспределения мощности между направляемыми модами ММ ОБ, представленные в виде диаграммы нормированных амплитуд модового состава.

Исследовался диапазон значений радиального смещения $d = 0 \dots 20$ мкм. Предполагалось, что с выхода согласующего SM ОБ SSF вводятся указанные моды LP_{01} и LP_{11} с одинаковыми амплитудами. Рассматривались направляемые моды возбуждаемого ММ ОБ $l = 0$ и $l = 1$ азимутальных порядков, так как согласно работе [39] и монографии [46] при центрированном вводе ($d = 0$) и радиальном смещении мощность вводимых мод практически полностью передается модам идентичных азимутальных порядков, а связь между компонентами с близкими l пренебрежимо мала: в этом случае значения коэффициентов связи составляют менее 10^{-10} .

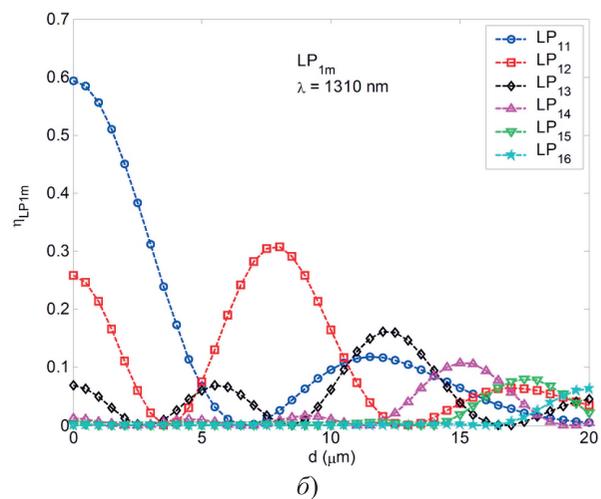
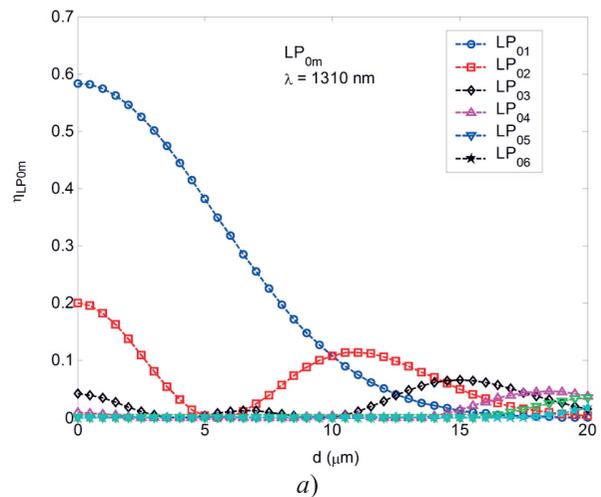


Рис. 6. Коэффициенты связи мод на стыке согласующего SM ОБ SSF и возбуждаемого ММ в зависимости от радиального смещения d : а) вводимой основной моды LP_{01} и возбуждаемых мод LP_{0m} ; б) вводимой высшей моды LP_{11} и возбуждаемых мод LP_{1m}

На рис. 6 представлены кривые зависимости коэффициентов связи основной моды LP_{01} и мод LP_{0m} (см. рис. 6а) и, соответственно, моды LP_{11} и мод LP_{1m} (см. рис. 6б) на стыке исследуемых

стандартного SM OB SSF и MM OB в зависимости от осевого смещения d .

При центрированном вводе основная мощность сигнала, состоящего из двух мод LP_{01} и LP_{11} , передается модам этого же порядка, а также частично направляемым модам ближайших радиальных порядков – LP_{02} , LP_{12} и LP_{03} , LP_{13} , соответственно. Здесь разброс амплитуд между указанными компонентами достигает значений 50...60%.

Для рассматриваемых образцов согласующего OB SSF и многомодовых OB отдельный интерес представляют окрестности локального значения радиального рассогласования $d = 5$ мкм для мод LP_{0m} и $d = 3,5$ мкм для мод LP_{1m} . В указанных областях, несмотря на общее снижение коэффициентов передачи вводимых мод LP_{0m} и LP_{1m} почти в два раза, наблюдается практически полное подавление мод высших радиальных порядков.

На рис. 7 представлены результаты расчета спектральных зависимостей коэффициентов связи мод $LP_{01} - LP_{0m}$ для рассматриваемого соединения SM и MM OB в «О»-диапазоне длин волн для центрированного ввода (см. рис. 7а) и при сильном введенном прецизионном радиальном смещении $d = 7,5$ мкм (см. рис. 7б) и $d = 15$ мкм (см. рис. 7в). Анализ полученных результатов показывает, что при центрированном вводе и малых значениях радиального рассогласования существенный разброс значений амплитуд возбуждаемого модового состава сохраняется во всем исследуемом спектральном диапазоне длин волн «О». Анализ также показывает, что для данных образцов OB относительно равномерное возбуждение модовых компонентов LP_{0m} и LP_{1m} достигается при осевом смещении $d > 14$ мкм. Это в целом согласуется с рекомендациями спецификации 1000Base-LX стандарта IEEE 802.3z, которая регламентирует ввод сигнала с выхода SM ЛД ($\lambda = 1310$ нм) через согласующий патчкорд MCP, обеспечивающий осевое смещение 10...16 мкм [1-3, 6].

На рис. 8 приведены результаты расчета перераспределения мощности между направляемыми модами MM OB, представленные в виде диаграммы нормированных амплитуд модового состава. Исследовался диапазон значений малого углового рассогласования $\theta = 0...5,5^\circ$, соответствующего типовым волоконно-оптическим разъёмным соединениям [37-38]. Здесь также предполагалось, что с выхода согласующего SM OB SSF указанные моды LP_{01} и LP_{11} поступают в MM OB с одинаковыми амплитудами. Согласно полученным результатам для подобных соедине-

ний характерно взаимодействие мод, в том числе и неодинаковых азимутальных порядков.

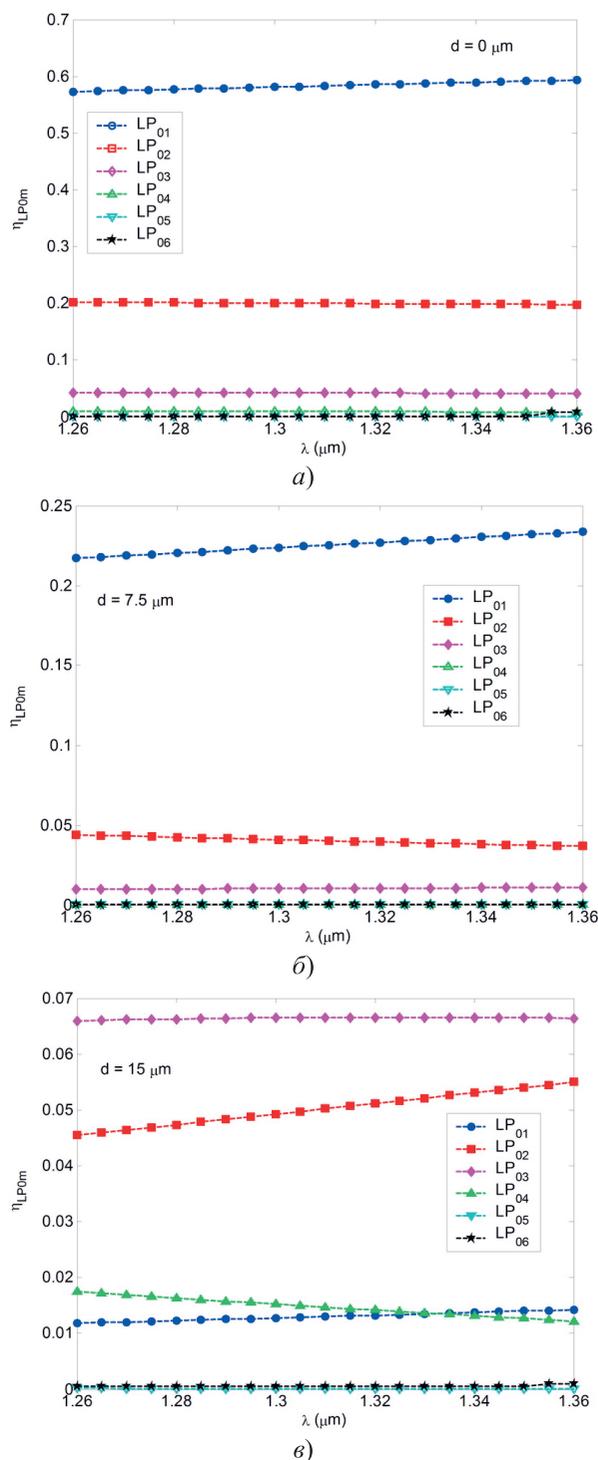


Рис. 7. Спектральные зависимости коэффициентов связи вводимой основной моды LP_{01} и возбуждаемых мод LP_{0m} на стыке SM OB SSF и MM OB: для центрированного ввода (а) и при введенном радиальном смещении (б) $d = 7,5$ мкм; (в) $d = 15$ мкм

При относительно малых угловых рассогласованиях $0 \leq \theta < 2^\circ$ основная часть мощности вводимых мод LP_{01} и LP_{11} передается модам этих же порядков, а остаток перераспределяется между модами

также нулевого и первого азимутального порядков. С увеличением θ усиливается связь между модами не только ближайших, но и более высоких азимутальных порядков: так, при $\theta = 5,5^\circ$ в составе оптического сигнала появляются модовые компоненты, нормированная амплитуда которых составляет более 0,1; вплоть до $l = 4$ азимутального порядка включительно.

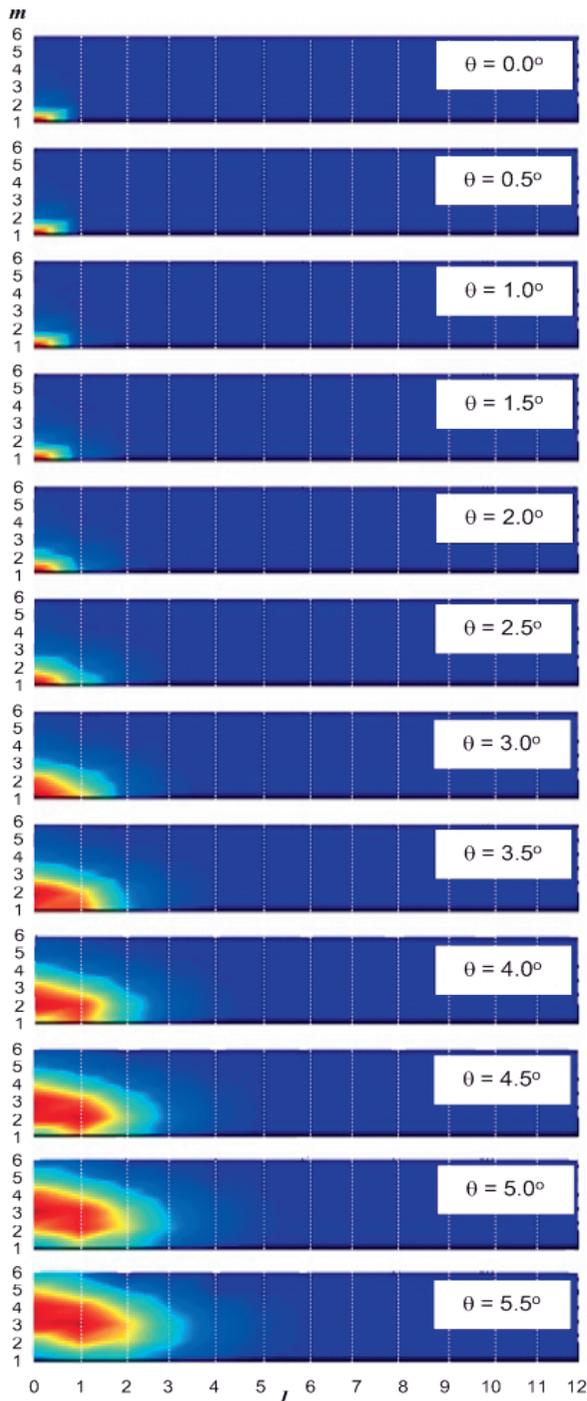


Рис. 8. Диаграмма распределения нормированных амплитуд возбуждаемых мод исследуемого ММ ОВ при вводе основной LP_{01} и высшей LP_{11} мод одинаковой мощности с выхода SM ЛД ($\lambda = 1310$ нм) через SSF с заданным прецизионным угловым рассогласованием θ

На рис. 9 представлена сводная диаграмма распределения нормированных амплитуд возбуждаемых мод исследуемого ММ ОВ при вводе основной LP_{01} и высшей LP_{11} мод одинаковой мощности с выхода SM ЛД через SSF при фиксированном угловом рассогласовании $\theta = 5^\circ$ и заданной оптической несущей λ «О»-диапазона длин волн: 1260 нм, 1285 нм, 1310 нм, 1330 нм и 1360 нм.

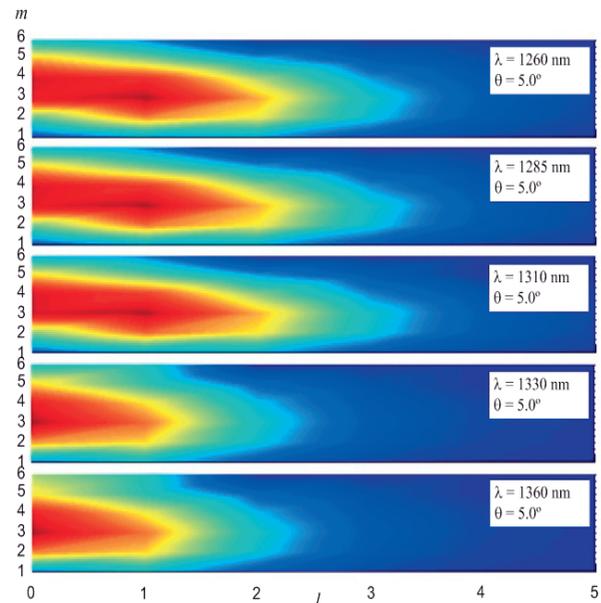


Рис. 9. Диаграмма распределения нормированных амплитуд возбуждаемых мод исследуемого ММ ОВ при вводе основной LP_{01} и высшей LP_{11} мод одинаковой мощности с выхода SM ЛД через SSF при фиксированном угловом рассогласовании $\theta = 5^\circ$ и заданной оптической несущей λ

Согласно полученным результатам расчета при переходе к верхней границе «О»-диапазона вводимая через согласующий световод SSF мода LP_{11} перестает удовлетворять условиям отсечки, что для заданного углового рассогласования $\theta = 5^\circ$ ограничивает возбуждаемый состав направляемых мод, для которых нормированная амплитуда составляет не менее 0,1, до 1...3 азимутального порядка включительно.

Заклучение

Представлено математическое описание возбуждения слабонаправляющих градиентных ММ ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, позволяющее учесть особенности ввода сигнала в торец ОВ, в частности модовый состав сигнала источника излучения, а также наличие (или отсутствие) осевого или углового рассогласования. Предложенный подход базируется на расчете коэффициентов

связи мод компонентов вводимого сигнала с модовым составом возбуждаемого ОВ, который реализуется путем совместного применения ранее разработанного приближенного метода ОМПП и метода интеграла перекрытия полей.

Разработана методика расчета коэффициентов связи описанного соединения ОВ, на основании которой проведен анализ перераспределения мощности оптического сигнала, возбуждаемого когерентным источником излучения в «О»-диапазоне длин волн, пигтелированного стандартным SM ОВ SSF рек. ITU-T G.652, между направляемыми модами кварцевых градиентных MM ОВ с габаритным технологическим дефектом профиля показателя преломления в центре сердцевинки в виде провала.

Выявлено, что при вводе сигнала с выхода SM ЛД на длине волны $\lambda = 1310$ нм через SSF в условиях центрированного ввода или ввода с осевым смещением в MM ОВ возбуждаются не только моды нулевого LP_{0m} , но и первого LP_{1m} азимутальных порядков. Это, с одной стороны, связано с тем, что ряд промышленных образцов ОВ SSF не блокирует распространение моды LP_{1l} , так как последняя удовлетворяет условию отсечки вплоть до оптической несущей $\lambda = 1325$ нм включительно, а оптическое излучение, генерируемое типовым ЛД на этой же рабочей длине волны помимо основной моды LP_{0l} , может содержать паразитные поперечные моды высших порядков.

С другой стороны, анализ возможных схем подключения волокон MM ОВ к типовым пигтелированным SM ЛД показал наличие разъемного соединения «ЛД – согласующий световод SSF», для которого характерно присутствие некоторого углового рассогласования. В этом случае также в ОВ SSF помимо основной будет введена мода LP_{1l} , а значит, далее в MM ОВ появятся компоненты LP_{1m} , даже в случае дальнейшей реализации соосного соединения указанных согласующего световода и волокна многомодовой ВОЛП. В свою очередь, при угловом рассогласовании на стыке «SSF – MM ОВ» возможно добавление модовых компонентов еще более высоких азимутальных порядков.

Построены диаграммы нормированных амплитуд, возбуждаемых в исследуемом MM ОВ для заданных условий ввода сигнала с выхода ЛД, проведен расчет спектральных характеристик коэффициентов связи на стыке «согласующий одномодовый световод SSF – градиентное MM ОВ с центральным провалом профиля показателя преломления». Полученные результаты

позволили локализовать значения осевого смещения и углового рассогласования, при которых достигается возбуждение как можно большего числа направляемых мод с наименьшим разбросом амплитуд, благодаря чему усиливается проявление эффекта ДМЗ.

При этом, если с точки зрения ограничения пропускной способности волоконно-оптических линий передачи, функционирующих в маломодовом режиме, ДМЗ является ключевым негативным фактором искажения оптического сигнала, то для MM ОВ сенсорных сетей волоконно-оптических датчиков на маломодовых эффектах такое сильное проявление ДМЗ, напротив, является искомым. Построены спектральные характеристики коэффициентов связи мод на описанном стыке ОВ в «О»-диапазоне длин волн для заданных значений прецизионных радиального или углового рассогласований. Показано, что в центральной области «О»-диапазона, соответствующей окрестностям оптической несущей $\lambda = 1310 \pm 10$ нм, характер распределения мощности вводимого с выхода ЛД через SSF оптического сигнала между направляемыми модами возбуждаемого MM ОВ в целом сохраняется.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8 и гранта РФФИ в рамках научного проекта 16-37-50089 мол_нр.

Литература

1. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.
2. Смирнов И.Г. Структурированные кабельные системы: проектирование, монтаж и сертификация. М.: Экон-Иноформ, 2005. – 360 с.
3. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
4. Roberts C., Ellis R. Fiber selection and standards guide for premises networks // Corning White Paper, 2013. – 8 p.
5. Irujo T. OM4 fiber – the next generation of multimode fiber. FOLS Webconference materials, 2010 // URL: http://www.fols.org/fols_library/archived_webconferences/index.cfm
6. 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.
7. Бурдин А.В. Маломодовый режим передачи оптических сигналов по многомодовым во-

- локнам: приложения в современных инфокоммуникациях. Самара: Изд. ПГУТИ, 2011. – 274 с.
8. Бурдин А.В., Федоров А.А., Кафарова А.М., Минаева А.Ю., Серегина Ю.А. Результаты экспериментальной апробации интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на многомодовое оптическое волокно, функционирующее в маломодовом режиме // *Материалы XIII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы конференции.* Казань, 2015. – С. 195-197.
 9. Kafarova A.M., Faskhutdinov L.M., Kuznetsov A.A., Minaeva A.Yu., Sevruk N.L., Nureev I.I., Vasilets A.A., Bourdine A.V., Morozov O.G., Burdin V.A. Quasi-interferometric scheme improved by fiber Bragg grating for detection of outer mechanical stress influence on distributed sensor being silica multimode optical fiber operating in a few-mode regime // *Proceedings of SPIE.* Vol. 9807, 2016. – P. 98070K-1 – 98070K-13. doi: 10.1117/12.2234567
 10. Бурдин А.В., Дмитриев Е.В., Прапорщик Д.Е., Севрук Н.Л. Применение кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом профиля показателя преломления в распределенных сенсорах волоконно-оптических датчиков на базе маломодовых эффектов // *Прикладная Фотоника.* Т.3, №3, 2016. – С. 252-279.
 11. Шереметева А.Ю., Кафарова А.М., Севрук Н.Л., Евтушенко А.С., Царев А.А. Исследование влияния типа центрального дефекта профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон при внешнем механическом воздействии на импульсный отклик маломодового сигнала, регистрируемого на выходе квазиинтерферометрической схемы // *Материалы МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (ПРЖЭФС – 2016).* Казань, 2016. – С. 224-226.
 12. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, дополненных волоконной решеткой Брэгга, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала // *Фотон-Экспресс.* №6(134), 2016. – С. 12-13.
 13. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Василец А.А., Морозов О.Г., Кафарова А.М., Кузнецов А.А., Нуреви И.И., Севрук Н.Л., Фасхутдинов Л.И., Шереметева А.Ю. Исследование спектральных откликов кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом градиентного профиля показателя преломления, дополненных волоконной решеткой Брэгга // *Материалы XIV МНТК «Оптические технологии в телекоммуникациях» (ОТТ-2016).* Самара, 2016. – С. 241-243.
 14. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
 15. Grattan L.S., Meggitt B.T. *Optical Fiber Sensor Technology. Fundamentals.* New York, NY, USA: Springer Science, 2000. – 325 p.
 16. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
 17. Rajan G. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems).* Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis, 2015. – 575 p.
 18. Liu Yu, Wei Li Lowcost high sensitivity strain and temperature sensing using graded index multimode fibers // *Applied Optics.* Vol. 46(13), 2007. – 2516-2519. doi: 10.1364/AO.46.002516.
 19. Pinet E., Cibula E., Donlagic D. Ultra-miniature all-glass Fabry-Pérot pressure sensor manufactured at the tip of a multimode optical fiber // *Proceedings of SPIE.* Vol. 6770, 2007. – P. 67700U-1-67700U-8. doi: 10.1117/12.734888.
 20. Liu L., Gong Yu., Wu Yu, Zhao T., Wu H.-J., Rao Y.-J. Spatial frequency multiplexing of fiber-optic interferometric refractive index sensors based on graded-index multimode fibers // *Sensors.* N 12, 2012. – P. 12377-12385. doi: 10.3390/s120912377
 21. Luo Yi., Xia Li, Yu C., Li W., Sun Q., Wang Yu., Liu D. Multi-parameter optical fiber sensor based on enhanced multimode interference // *Optics Communications.* Vol. 344(1), 2015. – P. 120-124. doi: 10.1016/j.optcom.2015.01.025
 22. Xue H., Meng H., Wang W., Xiong R., Yao Q., Huang B. Single-mode-multimode fiber structure based sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature // *IEEE Sensors Journal.* Vol. 13(11), 2013. – P. 4220-4223. doi: 10.1109/JSEN.2013.2264460.
 23. Li A., Wang Yi., Hu Q., Shieh W. Few-mode fiber based optical sensors // *Optics Express.* Vol. 23(2), 2015. – P. 1139-1150. doi: 10.1364/OE.23.001139.
 24. Del Villar I., Socorro A.B., Hernaiz M., Corres J.M., Zamarréño C.R., Sanchez P., Arregui F.J., Matias I.R. Removed multimode optical fiber and single-mode multimode single-mode fiber: a comparative study // *Journal of Sensors.* Vol. 2015, 2015. – P. 763762-1-763762-7.

25. Li D., Gong Yu., Wu Yu. Tilted fiber Bragg grating in graded-index multimode fiber and its sensing characteristics // *Photonic Sensors*. Vol. 3, No. 2, 2013. – P. 112-117. doi: 10.1007/s13320-013-0107-6.
26. Song D., Fang S., Li B., Zh. J., Sun W. Multi-parameter sensing based on graded-index multimode fiber // *Proceedings of Imaging and Applied Optics*. 2013. – P. JTu4A.29-1-JTu4A.29-3. doi: 10.1364/AOPT.2013.JTu4A.29.
27. Fang Sh., Li B., Song D., Zhang J., Sun W., Yuan L. A smart graded-index multimode fiber based sensor unit for multi-parameter sensing applications // *Optics and Photonics Journal*. No. 3, 2013. – P. 265-267. doi: 10.4236/opj.2013.32B062.
28. Guo T., Guan B.-O., Albert J. Polarimetric multi-mode tilted fiber grating sensors // *Optics Express*. Vol. 22, No. 6, 2014. – P. 7330-7336. doi: 10.1364/OE.22.007330.
29. Schmid M.J., Muller M.S. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers // *Optics Express*. Vol. 23, No. 6, 2015. – P. 8087-8094. doi: 10.1364/OE.23.008087
30. Куликов А., Игнатъев А. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // *Алгоритмы Безопасности*. №4, 2010. – С. 56-61.
31. Liokumovich L. B., Ushakov N.A., Kotov O.I., Bisyarin M.A., Hartog A.H. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 33(17), 2015. – P. 3660-3671.
32. Горбачев О. Интерференционные исследования спеклструктур в оптическом кабеле // *Фотоника*. №6 (36), 2012. – С. 20-24.
33. Lujo I., Klokoc P., Komljenovic T., Bosiljevac M., Sipus Z. Fiberoptic vibration sensor based on multimode fiber // *Radioengineering*. Vol. 17(2), 2008. – P. 93-97.
34. Rodriguez-Cobo L., Lomer M., Galindez C., Lopez-Higuera J.M. Speckle characterization in multimode fibers for sensing applications // *Proceedings of SPIE*. Vol. 8413, 2012. – P. 84131R-1-84131R-6. doi: 10.1117/12.978217.
35. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // *Фотон-Экспресс*. №5-6(69-70), 2008. – С. 20-22.
36. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // *Инфокоммуникационные технологии*. Т.8, №2, 2010. – С. 22-27.
37. Raddatz L., White I.H., Cunningham D.G., Nowell M.C. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 16(3), 1998. – P. 324-331. doi: 10.1109/50.661357.
38. Webster M., Raddatz I., White I.H., Cunningham D.G. A statistical analysis of conditioned launch for Gigabit Ethernet links using multimode fiber // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 17(9), 1999. – P. 1532-1541.
39. Срапионов В.А. Связь мод в стыках оптических волокон с разбросом параметров // *Электросвязь*. №10, 1985. – С. 10-12.
40. Гурджи С.П., Каток В.Б. Расчет потерь в соединениях одномодовых световодов со сложным профилем показателя преломления // *Электросвязь*. №10, 1990. – С. 25-27.
41. Meunier J.P., Hosain S.I. An accurate splice loss analysis for single-mode graded-index fibers with mismatched parameters // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 10(11), 1992. – P. 1521-1526. doi: 10.1109/50.184887
42. 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*. Vol. 11(8), 1993. – P. 1270-1273. doi: 10.1109/50.254084
43. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers // *Applied Optics*. Vol. 17(17), 1978. – P. 2842-2847. doi: 10.1364/AO.17.002842
44. Авруцкий И.А., Сычугов В.А., Тищенко А.В. Исследование процессов возбуждения, излучения и отражения света в гофрированных волноводах // *Труды ИОФАН*. Т. 34, 1991. – С. 3-98.
45. 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 Light-wave Technology*. Vol. 14(5), 1996. – P. 901-907. doi: 10.1109/50.495175.
46. Snyder A.W., Love J. *Optical waveguide theory*. Chapman & Hall. – 738 p.
47. Gholami A., Molin D., Sillard P. Physical modeling of 10 GbE optical communication systems // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 29(1), 2011. – P. 115-123.
48. Pepeljugoski P., Golowich S.E., Ritger A.J., Kolesar P., Ristetski A. Modeling and simulation

- of next-generation multimode fiber links // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 21(5), 2003. – P. 1242-1255.
49. Meher H., Hosain S.I. Variational approximations for single-mode graded-index fibers: some interesting applications // Journal of Optical Communications. Vol. 24(1), 2003. – P. 25-30. doi: 10.1515/JOC.2003.24.1.25.
50. Sharma A., Hosain S.I., Ghatak A.K. The fundamental mode of graded-index fibres: simple and accurate variational methods // Optical and Quantum Electronics. Vol. 14(1), 1982. – P. 7-15. doi: 10.1007/BF00620905.
51. Tewari R., Hosain S.I., Thyagarajan K. Scalar variational analysis of single mode fibers with Gaussian and smoothed-out profiles // Optics Communications. Vol. 48(3), 1983. – P. 176-180. doi: 10.1016/0030-4018(83)90080-9.
52. Oksanen M.I., Lindell I.V. Variational analysis of anisotropic graded-index optical fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 7(1), 1989. – P. 87-91. doi: 10.1109/50.17737.
53. Ankiewicz A., Peng G.-D. Generalized Gaussian approximation for single-mode fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 10(1), 1992. – P. 22-27. doi: 10.1109/50.108731.
54. Holmes M.J., Spirit D.M., Payne F.P. New Gaussian-based approximation for modeling non-linear effects in optical fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 12(2), 1994. – P. 193-201. doi: 10.1109/50.350604.
55. Wu M.-Sh., Lee M.-H., Tsai W.-H. Variational analysis of single-mode graded-core W-fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 14(1), 1996. – P. 121-125. doi: 10.1109/50.476145
56. Adams M.J. An introduction to optical waveguides. New York: John Wiley and Sons, 1981. – 401 p.
57. Bourdine A.V., Praporshchikov D.E., Yablochkin K.A. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers // Proceedings of SPIE. Vol. 7992, 2011. – P. 799206-1-799206-6. doi:10.1117/12.887258.
58. Bourdine A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. Vol. 2013, 2013. – P. 469389-1-469389-18.
59. Bourdine A.V., Zhukov A.E. Fast approximate method for VCSEL-MMF transverse mode coupling analysis // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 7(11), 2016. – P. 979-999. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i11.30.
60. Bourdine A.V., Delmukhametov O.R. Calculation of transmission parameters of the launched higher-order modes based on the combination of a modified Gaussian approximation and a finite element method // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 72(2), 2013. – P. 111-123. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30
61. Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres, ITU COM 15-273-E, 1996.
62. Bourdine A.V., Delmukhametov O.R., Zhukov A.E., Chekalov A.S. Fast and simple method for calculation of the mode field diameter of arbitrary order guided mode in weakly-guiding optical fibers // Proceedings of SPIE. Vol. 9533, 2015. – P. 95330F-1-95330F-8. doi: 10.1117/12.2180790.
63. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов. М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
64. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. – 830 с.

Получено 21.11.2016

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., профессор Кафедры линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846)3322161; E-mail: bourdine@psuti.ru

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор, проректор по науке и инновациям ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: burdin@psati.ru

Дмитриев Евгений Владимирович, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: nio@psati.ru

Демидов Владимир Витальевич, научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова». Тел. (8-812) 560-20-44. E-mail: vovecc@mail.ru

Дукельский Константин Владимирович, к.т.н., доцент, проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Тел. (8-812)3263164. E-mail: vicerector.sc@sut.ru

Жуков Александр Евгеньевич, аспирант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: aadron@bk.ru

Минаева Алина Юрьевна, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: minaeva1993@mail.ru

Прапорщиков Денис Евгеньевич, ассистент Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: dep82@mail.ru

Тер-Нерсесянц Егише Вавикович, старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова». Тел. (8-812) 560-20-44. E-mail: ter@goi.ru

ANALYSIS OF «O»-BAND OPTICAL SIGNAL LAUNCHING TO GRADED MULTI-MODE OPTICAL FIBER WITH GREAT CENTRAL DEFECT OF REFRACTIVE INDEX PROFILE VIA STANDARD SINGLEMODE OPTICAL FIBER

*Bourdine A.V.¹, Burdin V.A.¹, Dmitriev E.V.¹, Demidov V.V.², Dukelskii K.V.³,
Zhukov A.E.¹, Minaeva A.Yu.¹, Praporshchikov D.E.¹, Ter-Nersesyants E.V.²*

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

*²Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center
«S.I. Vavilov State Optical Institute», St. Petersburg, Russian Federation*

³Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: bourdine@yandex.ru

We present mathematical description for excitation of weakly guiding silica graded multimode optical fibers with arbitrary axial symmetric refractive index profile providing to take into account launching conditions, including transversal mode staff of emission generating by laser, radial or angular misalignments. Proposed solution is based on mode coupling coefficients estimation by combination of earlier on developed modified Gaussian approximation and well known overlap integral method. We developed method for mode coupling computing and performed calculation of mode coupling coefficients at the splice of standard singlemode and mentioned multimode optical fibers. Mode power redistribution was researched during optical signal launching to excited multi-mode optical fiber via standard singlemode fiber pigtail jointed to laser source operating over central region of «O»-band that corresponds to 1310 nm. Some research results in the form of diagrams of excited mode normalized amplitudes depending on precision misalignment at 1310 nm as well as mode coupling coefficients spectral curves are presented.

Keywords: few-mode optical transmission, differential mode delay, multimode optical fibers, graded refractive index profile, refractive index profile defect, MCVD, higher-order mode excitation, radial offset, angular misalignment

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.4.02

The reported study was funded by Grant of the President of Russian Federation according to research project No. MD-9418.2016.8 and by RFBR according to research project 16-37-50089 mol_nr.

Bourdine Anton Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science; Associated Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: bourdine@psuti.ru.

Buridin Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23 L. Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; vice-rector on science activity and innovation; Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: burdin@psati.ru

Dmitriev Eugeny Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23 L. Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; the Head of Science and Re-search Department, PhD in Technical Science. Tel.: +79463331109. E-mail: nio@psati.ru

Demidov Vladimir Vitalievich, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russian Scientific Center «S.I. Vavilov State Optical Institute», 5 Kadetskaya liniya V.O., St. Petersburg 199053, Russian Federation; researcher. Tel.: +78125602044. E-mail: vovecc@mail.ru

Dukelskii Konstantin Vladimirovich, Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 61 Moika, St. Petersburg 191186, Russian Federation; vice-rector on science activity, PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel.: +78123263164. E-mail: vicerec-tor.sc@sut.ru

Zhukov Aleksandr Evgenievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; PhD student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78463322161. E-mail: aadron@bk.ru

Minaeva Alina Yurievna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Master Student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78463322161. E-mail: minaeva1993@mail.ru

Praporshchikov Denis Evgenievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; assistant of the Department of Communication Lines. Tel.: +78463322161. E-mail: dep82@mail.ru

Ter-Nersesyants Egishe Vavikovich, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russian Scientific Center «S.I. Vavilov State Optical Institute», 5 Kadetskaya liniya V.O., St. Petersburg 199053, Russian Federation; senior science master. Tel.: +78125602044. E-mail: ter@goi.ru

References

1. Listvin A., Listvin V., Shvirkov D. *Opticheskie volokna dlya linij svyazi* [Optical fibers for telecommunication lines]. Moscow, LESARart Publ. 2003.
2. Smirnov I.G. *Strukturirovannye kabel'nye sistemy: proektirovanie, montazh i sertifikacija* [Structured cabling systems: design, installation and certification]. Moscow, 2005. 360 p.
3. Semenov A.B. *Volokonno-opticheskie podsistemy sovremennykh SKS* [Fiber-optic subsystem of modern SCS]. Moscow, Akademiya AyTi, DMK Press, 2007. 632 p.
4. Roberts C., Ellis R. Fiber selection and standards guide for premises networks. *Corning White Paper*, 2013. 8 p.
5. Irujo T. OM4 fiber – the next generation of multimode fiber. *FOLS Webconference materials*, 2010. Available at: http://www.fols.org/fols_library/archived_webvonferences/index.cfm (accessed: 15.11.2016).
6. 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.
7. Bourdine A.V. *Malomodovyy rezhim peredachi opticheskikh signalov po mnogomodovym voloknam: prilozheniya v sovremennykh infokommunikacijah* [Few-mode optical transmission over multimod fibers: applications in modern infocommunications]. Samara, PSUTI Publ., 2011. 274 p.
8. Bourdine A.V., Fedorov A.A., Kafarova A.M., Minaeva A.Yu., Seregina Yu.A. Rezul'taty jeksperimental'noj aprobacii interferometricheskoy shemy registracii vneshnih mehanicheskikh vozdeystvij na mnogomodovoe opticheskoe volokno, funkcionirujushhee v malomodovom rezhime [Results of the experimental approbation of the interferometric scheme for recording external mechanical effects on the multimode optical fiber operating in a few-mode regime]. *Materialy XIII MNTK «Fizika i tehnicheckie prilozheniya volnovykh processov»*, Kazan, 2015, pp 195-197.
9. Kafarova A.M., Faskhutdinov L.M., Kuznetsov A.A., Minaeva A.Yu., Sevruk N.L., Nureev I.I., Vasilets A.A., Bourdine A.V., Morozov O.G., Burdin V.A. Quasi-interferometric scheme improved by fiber Bragg grating for detection of outer mechanical stress influence on distributed sensor being silica multimode optical fiber operating in a few-mode regime. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9807, 98070K. doi: 10.1117/12.2234567.

10. Burdin A.V., Dmitriev E.V., Praporshchikov D.E., Sevruc N.L. Primenenie kvarcevykh mnogomodovykh volokonnykh svetovodov s gabaritnym central'nym defektom profilja pokazatelja prelomlenija v raspredelennykh sensorakh volokonno-opticheskikh datchikov na baze malomodovykh jeffektov [Application of silica multimode optical fibers with large-size central defect of refractive index profile for fiber optic sensors based on a few-mode effects]. *Prikladnaya fotonika*, 2016, vol. 3, no. 3, pp 252-279.
11. Sheremeteva A.Ju., Kafarova A.M., Sevruc N.L., Evtushenko A.S., Carev A.A. Issledovanie vlijanija tipa central'nogo defekta profilja pokazatelja prelomlenija mnogomodovykh opticheskikh volokon pri vneshnem mehanicheskom vozdejstvii na impul'snyj otklik malomodovogo signala, registriruemogo na vyhode kvazi-interferometricheskoj shemy [Research of the influence of the central defect type of the refractive index profile of multimode optical fibers under external mechanical action on the impulse response of a low-mode signal recorded at the output of a quasi-interferometric scheme]. *Materialy MNTK «Prikladnaja jelektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy»*, Kazan, 2016, pp. 224-226.
12. Bourdine A.V., Vasilets A.A., Burdin V.A., Morozov O.G. Raspredelennyj sensor na mnogomodovykh opticheskikh voloknah, dopolnennykh volokonnoj reshetkoj Brjeggga, funkcionirujushhih v malomodovom rezhime peredachi signala [Distributed sensor on multimode optical fibers operating in few-mode signal transmission supplemented with Bragg fiber grating]. *Foton-Express*, 2016, no. 6, pp. 12-13.
13. Bourdine A.V., Burdin V.A., Vasilets A.A., Morozov O.G., Kafarova A.M., Kuznetsov A.A., Nureev I.I., Sevruc N.L., Faskhutdinov L.M., Sheremeteva A.Yu. Issledovanie spektral'nykh otklikov kvarcevykh mnogomodovykh volokonnykh svetovodov s gabaritnym central'nym defektom gradientnogo profilja pokazatelja prelomlenija, dopolnennykh volokonnoj reshetkoj Bregga [Research of the spectral responses of quartz multimode optical fibers with a dimensional central defect of the refractive index gradient profile supplemented with a Bragg fiber grating]. *Materialy XIV MNTK «Opticheskie tehnologii v telecommunicaciiyah»*, Samara, 2016, pp. 241-243.
14. Okosi T. *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber-optics sensors]. Leningrad, Energisamizdat, 1990. 256 p.
15. Grattan L.S., Meggitt B.T. *Optical Fiber Sensor Technology. Fundamentals*. New York, NY, USA: Springer Science, 2000. 325 p.
16. Kul'chin Yu.N. *Raspredelennye volokonno-opticheskie izmeritel'nye sistemy* [Distributed fiber optic measuring system]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 272 p.
17. Rajan G. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems)*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis, 2015. 575 p.
18. Liu Yu, Wei Li. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 13, pp. 2516-2519. doi: 10.1364/AO.46.002516
19. Pinet E., Cibula E., Donlagic D. Ultraminiature all-glass Fabry-Pérot pressure sensor manufactured at the tip of a multimode optical fiber. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6770, 67700U. doi: 10.1117/12.734888.
20. Liu L., Gong Yu., Wu Yu, Zhao T., Wu H.-J., Rao Y.-J. Spatial frequency multiplexing of fiber-optic interferometric refractive index sensors based on graded-index multimode fibers. *Sensors*, 2012, no. 12, pp. 12377-12385. doi: 10.3390/s120912377.
21. Luo Yi., Xia Li, Yu C., Li W., Sun Q., Wang Yu., Liu D. Multi-parameter optical fiber sensor based on enhanced multimode interference. *Optics Communications*, 2015, vol. 344, no. 1, pp. 120-124. doi: 10.1016/j.optcom.2015.01.025.
22. Xue H., Meng H., Wang W., Xiong R., Yao Q., Huang B. Single-mode-multimode fiber structure based sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, no. 11, pp. 4220-4223. doi: 10.1109/JSEN.2013.2264460.
23. Li A., Wang Yi., Hu Q., Shieh W. Few-mode fiber based optical sensors. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 1139-1150. doi: 10.1364/OE.23.001139.
24. Del Villar I., Socorro A.B., Hernaez M., Corres J.M., Zamarreño C.R., Sanchez P., Arregui F.J., Matias I.R. Removed multimode optical fiber and single-mode multimode single-mode fiber: a comparative study. *Journal of Sensors*, 2015, vol. 2015, 763762.
25. Li D., Gong Yu., Wu Yu. Tilted fiber Bragg grating in graded-index multimode fiber and its sensing characteristics. *Photonic Sensors*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 112-117. doi: 10.1007/s13320-013-0107-6.
26. Song D., Fang S., Li B., Zh. J., Sun W. Multi-parameter sensing based on graded-index multi-mode fiber. *Proceedings of Imaging and Applied Optics*, 2013, JTU4A.29. doi: 10.1364/AOPT.2013.JTU4A.29

27. Fang Sh., Li B., Song D., Zhang J., Sun W., Yuan L. A smart graded-index multimode fiber based sensor unit for multi-parameter sensing applications. *Optics and Photonics Journal*, 2013, no. 3, pp. 265-267. doi: 10.4236/opj.2013.32B062.
28. Guo T., Guan B.-O., Albert J. Polarimetric multi-mode tilted fiber grating sensors. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 6, pp. 7330-7336. doi: 10.1364/OE.22.007330.
29. Schmid M.J., Muller M.S. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 6, pp. 8087-8094. doi: 10.1364/OE.23.008087
30. Kulikov A., Ignatiev A. Obzor volokonno-opticheskikh sistem ohrany perimetra [Overview of Fiber-Optic Perimeter Security Systems]. *Algoritmy Bezopasnosti*, 2010, no. 4, pp. 56-61.
31. Liokumovich L. B., Ushakov N.A., Kotov O.I., Bisyarin M.A., Hartog A.H. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 17, pp. 3660-3671.
32. Gorbachev O. Interferencionnye issledovaniya spekl-struktur v opticheskom kabele [Optical Cables Speckle Interferometric Examination]. *Fotonika*, 2012, no. 6, pp. 20-24.
33. Lujo I., Klokoc P., Komljenovic T., Bosiljevac M., Sipus Z. Fiber-optic vibration sensor based on multimode fiber. *Radioengineering*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 93-97.
34. Rodriguez-Cobo L., Lomer M., Galindez C., Lopez-Higuera J.M. Speckle characterization in multimode fibers for sensing applications. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8413, 84131R. doi: 10.1117/12.978217.
35. Bourdine A.V. Diferentsial'naya modovaya zaderzhka kvartsevykh mnogomodovykh opticheskikh volokon raznykh pokoleniy [Differential mode delay of quartz multimode optical fibers of different generations]. *Foton-Ekspress*, 2008, no. 5-6, pp. 20-22.
36. Bourdine A.V., Yablochkin K.A. Issledovanie defektov profilya pokazatelya prelomleniya mnogomodovykh opticheskikh volokon kabeley svyazi [Investigations of refractive index profile defects of silica graded-index multimode fibers of telecommunication cables]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2010, no. 2, pp. 22 – 27.
37. Raddatz L., White I.H., Cunningham D.G., Nowell M.C. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1998, vol. 16, pp. 324–331. doi: 10.1109/50.661357.
38. Webster M., Raddatz L., White I.H., Cunningham D.G. A statistical analysis of conditioned launch for Gigabit Ethernet links using multimode fiber. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1999, vol. 17, pp. 1532–1541.
39. Srapionov V.A. Svyaz mod v stykah opticheskikh volokon s razbrosom parametrov [Mode coupling at the splices of optical fibers with parameters deviation]. *Electrosvyaz*, 1985, no. 10, pp 10–12.
40. Gurdzhi S.P., Katok V.B. Raschet poter v soedineniyah odnomodovykh svetovodov so slozhnym profilom pokazatelya prelomleniya [Computing of insertion loss at splices of singlemode optical fibers with complicated refractive index profile]. *Elektrosvyaz*, 1990, no. 10, pp. 25–27.
41. Meunier J.P., Hosain S.I. An accurate splice loss analysis for single-mode graded-index fibers with mismatched parameters. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1992, vol. 10, pp. 1521-1526. doi: 10.1109/50.184887
42. 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, pp. 1270–1273. doi: 10.1109/50.254084.
43. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers. *Applied Optics*, 1978, vol. 17, pp. 2842–2847. doi: 10.1364/AO.17.002842.
44. Avruckij I.A., Sychugov V.A., Tishchenko A.V. Issledovanie processov vzbuzhdeniya izlucheniya i otrazheniya sveta v gofirovannykh volnovodakh [Researches of the emission excitation and refraction processes in corrugated optical waveguides]. *Trudy IOFAN*, 1991, vol. 34, pp. 3–98.
45. 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, pp. 901–907. doi: 10.1109/50.495175.
46. Snyder A.W., Love J. *Optical waveguide theory*, Chapman & Hall, 738 p.
47. Gholami A., Molin D., Sillard P. Physical modeling of 10 GbE optical communication systems. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, pp. 115–123.
48. Pepeljugoski P., Golowich S.E., Ritger A.J., Kolesar P., Ristetski A. Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2003, vol. 21, pp. 1242–1255.

49. Meher H., Hosain S.I. Variational approximations for single-mode graded-index fibers: some interesting applications. *Journal of Optical Communications*, 2003, vol. 24, pp. 25–30. doi: 10.1515/JOC.2003.24.1.25
50. Sharma A., Hosain S.I., Ghatak A.K. The fundamental mode of graded-index fibres: simple and accurate variational methods. *Optical and Quantum Electronics*, 1982, vol. 14, pp. 7–15. doi: 10.1007/BF00620905.
51. Tewari R., Hosain S.I., Thyagarajan K. Scalar variational analysis of single mode fibers with Gaussian and smoothed-out profiles. *Optics Communications*, 1983, vol. 48, pp. 176–180. doi: 10.1016/0030-4018(83)90080-9.
52. Oksanen M.I., Lindell I.V. Variational analysis of anisotropic graded-index optical fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1989, vol. 7, pp. 87–91. doi: 10.1109/50.17737.
53. Ankiwicz A., Peng G.-D. Generalized Gaussian approximation for single-mode fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1992, vol. 10, pp. 22–27. doi: 10.1109/50.108731
54. Holmes M.J., Spirit D.M., Payne F.P. New Gaussian-based approximation for modeling non-linear effects in optical fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1994, vol. 12, pp. 193–201. doi: 10.1109/50.350604.
55. Wu M.-Sh., Lee M.-H., Tsai W.-H. Variational analysis of single-mode graded-core W-fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1996, vol. 14, pp. 121–125. doi: 10.1109/50.476145
56. Adams M.J. *An introduction to optical waveguides*. New York: John Wiley and Sons, 1981. 401 p.
57. Bourdine A.V., Praporshchikov D.E., Yablochkin K.A. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers. *Proc. SPIE 7992*, 2011, 799206. doi: 10.1117/12.887258.
58. Bourdine A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // *Advances in Optical Technologies*. Vol. 2013, 2013. – P. 469389-1-469389-18.
59. Bourdine A.V., Zhukov A.E. Fast approximate method for VCSEL-MMF transverse mode coupling analysis. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, vol. 7, no. 11, pp. 979-999. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i11.30.
60. Bourdine A.V., Delmukhametov O.R. Calculation of transmission parameters of the launched higher-order modes based on the combination of a modified Gaussian approximation and a finite element method. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, vol. 72, pp. 111–123. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30.
61. Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres, ITU COM 15-273-E, 1996.
62. Bourdine A.V., Delmukhametov O.R., Zhukov A.E., Chekalov A.S. Fast and simple method for calculation of the mode field diameter of arbitrary order guided mode in weakly-guiding optical fibers. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9533, 95330F. doi: 10.1117/12.2180790.
63. Gradstein I.S., Ryjik I.M. *Tablicy integralov* [Tables of integrals]. Moscow, GIFML Publ., 1962. 1100 p.
64. Abramovic M., Stigan I. *Spravochnik po special'nyh funkciyam* [Special Function Manual]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 830 p.

Received 21.11.2016

УДК 519.872

АНАЛИЗ СМО ОБЩЕГО ВИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЛЕКТИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ

Буранова М.А., Карташевский В.Г., Куреева Н.В., Чупахина Л.Р.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: kartashevskiy-vg@psuti.ru

В работе представлен метод спектрального решения уравнения Линдли, основанный на использовании селективных функций для аппроксимации распределений. Суть метода заключается в том, что «восходящие» участки распределений аппроксимируются полиномами малого порядка, а «спадающие» участки – суммой затухающих экспонент с малым числом слагаемых в сумме. Оценка времени ожидания заявки в очереди может быть получена численным решением линейного алгебраического уравнения. Эффективность метода продемонстрирована на примере исследования системы $W/P/I$, где W – распределение Вейбулла, P – распределение Парето. Метод селективных функций позволил заменить распределение Вейбулла распределением, состоящим из двух участков – «восходящего» и «нисходящего», аппроксимации которых осуществляются согласно описанному методу. В работе показано, что такая аппроксимация обладает существенно