

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ МАЛОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ОТ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ДЕГРАДАЦИЮ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДОВОЙ ЗАДЕРЖКИ

В.А. Андреев¹, А.В. Бурдин^{1*}, В.А. Бурдин¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация

*Адрес для переписки: bourdine@yandex.ru

Информация о статье

УДК 621.391.63; 681.7.068

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А. Исследование влияния отклонения геометрии промышленных образцов малоимодовых оптических волокон от оптимальной формы на деградацию спектральной характеристики дифференциальной модовой задержки // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 18–25.

Аннотация: В работе представлены результаты теоретического исследования влияния отклонения геометрии промышленных образцов малоимодовых оптических волокон от оптимальной формы на деградацию спектральной характеристики дифференциальной модовой задержки. Рассматривались несимметричные некруглые кварцевые 16-модовые оптические волокна 42/125 с уменьшенной за счет предварительно оптимизированной специализированной формы градиентного профиля показателя преломления дифференциальной модовой задержки в "С"-диапазоне длин волн с внесенными локальными флуктуациями показателя преломления. Эллиптичность сердцевин и вариации профиля задавались на основе анализа протоколов измерения профилей показателя преломления промышленных образцов многомодовых оптических волокон 50/125 кат. OM2 и OM2+/OM3.

Ключевые слова: малоимодовые оптические волокна, малоимодовый режим передачи оптического сигнала, дифференциальная модовая задержка, несимметричные оптические волокна, профиль показателя преломления.

На сегодняшний день переход от традиционных одномодовых оптических волокон (ОВ) в линейном тракте волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) к малоимодовым световодам (FMF, от англ. Few Mode Fibers) с экстремально увеличенным, по сравнению с упомянутыми одномодовыми ОВ действующих рекомендаций ITU-T, диаметром сердцевин, благодаря которому достигается практически полное устранение нелинейности ОВ, в сочетании с технологией модового мультиплексирования (MDM, от англ. Mode Division Multiplexing) и MIMO (от англ. Multiple Input Multiple Output – множественные входы/множественные выходы), рассматривается как одно из перспективных решений задачи преодоления нелинейного предела Шеннона для магистральных ВОЛП

транспортных сетей связи нового поколения, ориентированных на сверхвысокие скорости передачи информации [1–7 и др.].

Как показал анализ данных экспериментальных и теоретических исследований, представленных в цикле работ ряда зарубежных авторов, а также анализ результатов проведенного моделирования линейного тракта магистральной ВОЛП, подробно изложенных в ранее опубликованных работах [8, 9], фактическое нивелирование нелинейных искажений достигается при значении эффективной площади сечения $A_{эфф} = 140$ мкм². При этом, согласно результатам выполненных соответствующих теоретических исследований взаимосвязи модовой эффективной площади сечения, диаметра пятна моды и диаметра сердцевин градиентных ОВ на основании

разработанной методики, также описанной в публикациях [8, 9], искомое значение $A_{эфф}$ для моды LP_{11} достигается уже для диаметра сердцевинки 22 мкм, в то время как для основной моды LP_{01} – при диаметре сердцевинки ОВ не менее 42 мкм.

Это позволило далее перейти к разработке методики оптимизации профиля показателя преломления таких FMF 42/125, обеспечивающих минимизацию дифференциальной модовой задержки (ДМЗ), являющейся ключевым негативным линейным фактором искажения оптического сигнала при распространении по ОВ в маломодовом режиме [10], в области оптической несущей $\lambda = 1550$ нм и поддерживающих распространение 16 направляемых LP-мод во всем «С»-диапазоне длин волн. В результате было получено несколько десятков образцов градиентных профилей FMF 42/125 при различных комбинациях параметра градиента профиля первой итерации и опорного значения модовой задержки, относительно которого осуществляется выравнивание диаграммы ДМЗ всех направляемых мод такого ОВ, удовлетворяющих условию отсечки и введенному критерию значения оптического фактора ограничения более 0.5, непосредственно участвующих в переносе оптического сигнала. На следующем этапе был выполнен отбор образцов профилей FMF 42/125, обеспечивающих снижение ДМЗ по основной моде во всем выделенном спектральном «С»-диапазоне до значений менее 200 пс/км. Так, на рисунке 1а приведен образец оптимизированного профиля FMF 42/125 при опорном значении модовой задержки 4925.51 нс/км и параметре градиента профиля первой итерации $\alpha = 1.765$ [9, 11, 12], на рисунке 1б – соответствующая ему диаграмма ДМЗ модового состава, построенная для оптической несущей $\lambda = 1550$ нм. Данный профиль показателя преломления обеспечивает снижение ДМЗ в центре «С»-диапазона до 30 пс/км и менее.

Вместе с тем, очевидно, что в силу особенностей полного цикла технологического процесса изготовления промышленных образцов кварцевых ОВ, включая синтез преформы и процедуру вытяжки строительной длины волокна с последующим наложением первичного защитно-упрочняющего покрытия, неизбежны отклонения конструктивных параметров реальных волоконных световодов от искомых оптимизированных значений, полученных в результате моделирования FMF. Так, анализ протоколов измерения [13] промышленных образцов нового поколения многомодовых градиентных ОВ 50/125 кат. OM2+/OM3, оптимизированных для совместной работы с лазерными источниками (LOMFs, от англ. Laser Optimized Multimode Fibers) трансиверов (мульти)гигабитных сетей передачи данных, отличающиеся более строгими требованиями к воспроизведению искомого градиентного профиля ОВ, позволил выявить два ключевых фактора отклонения геометрии ОВ от оптимальной формы, которые предположительно могут оказать существенное влияние на деградацию пропускной способности FMF:

- локальные флуктуации показателя преломления;
- несимметричность (эллиптичность) сердцевинки оптического волокна.

В результате статического анализа указанных выше протоколов измерений [13] было выявлено, что флуктуации показателя преломления хорошо описываются с помощью нормального закона распределения: здесь локальное математическое ожидание соответствует непосредственно локальному значению показателя преломления, в то время как дисперсия не превышает $5 \cdot 10^{-5}$. Поэтому далее такие флуктуации рассматривались как «нормальные». В свою очередь, для имитации аномально «сильных» искажений профиля дисперсия была увеличена в 3 раза, т.е. до $15 \cdot 10^{-5}$.

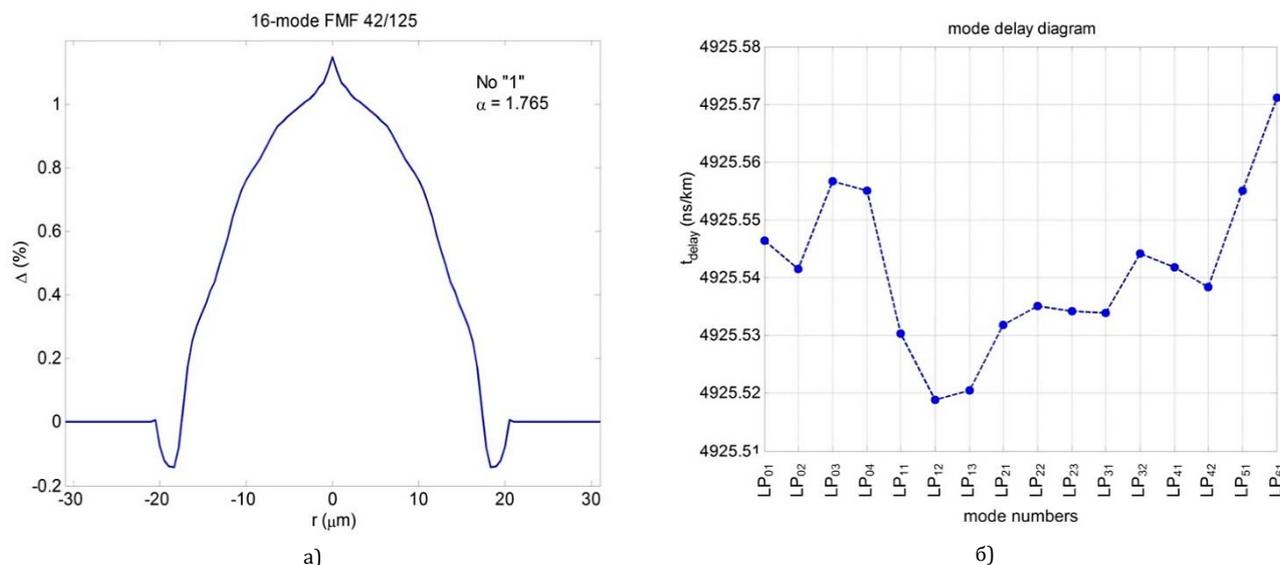


Рис.1. 16-модовое FMF 42/125 с уменьшенной ДМЗ в «С»-диапазоне длин волн: а) оптимизированный градиентный профиль показателя преломления; б) диаграмма ДМЗ модового состава (длина волны $\lambda = 1550$ нм)

Очевидно, что оценка влияния локальных отклонений показателя преломления относительно оптимизированных значений потребует проведения анализа FMF 42/125 со сложным «искаженным» профилем показателя преломления. В данной работе для этой цели предлагается воспользоваться ранее разработанной модификацией приближения Гаусса, обобщенной на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющем волоконном световоде с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления [11, 12, 14]. В отличие от классического приближения Гаусса [15] и его разнообразных модификаций [16–22], использующих для представления градиентного профиля показателя преломления исследуемого ОВ одну или совокупность гладких функций и, как результат, вынужденных для снижения погрешности расчетов при описании радиального распределения поля моды вводить дополнительные вариационные параметры, в предлагаемом обобщении модификации приближения Гаусса (ОМПГ) для этой цели используется метод стратификации [23]. В результате слабонаправляющий волоконный световод с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, рассматривается как слабонаправляющий волоконный световод с многослойным профилем показателя преломления. При этом искомый профиль в области сердцевинки ОВ представляется в виде конечного числа N слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным:

$$n(R) = \begin{cases} n_k, & R_k = \frac{k}{N}, \quad 0 \leq k \leq N-1, \\ n_N, & 1 < R \leq +\infty \end{cases}, \quad (1)$$

а сама функция $f(R)$, описывающая профиль показателя преломления:

$$n^2(R) = n_{\max}^2 [1 - 2\Delta \cdot f(R)], \quad (2)$$

записывается в виде:

$$f(R) = \begin{cases} h_k, & R_k = \frac{k}{N}, \quad 0 \leq k \leq N-1, \\ 1, & 1 < R \leq +\infty \end{cases}, \quad (3)$$

где $h_k = (n_{\max}^2 - n_k^2) / (n_{\max}^2 - n_N^2)$ – локальный параметр профиля; n_k – показатель преломления k -го промежуточного слоя ($k = 0, 1, 2 \dots N-1$); n_{\max} – максимум показателя преломления в области сердцевинки; n_N – показатель преломления внешней сплошной оболочки; $\Delta = (n_{\max}^2 - n_N^2) / 2n_{\max}^2$ – параметр высоты профиля;

$R_k = r_k/a$ – нормированная радиальная координата k -го промежуточного слоя; r_k – радиальная координата k -го промежуточного слоя; a – радиус сердцевинки исследуемого ОВ.

Таким образом, при задании исходных данных расчета обеспечивается детализированное воспроизведение профиля показателя преломления исследуемого ОВ, что существенно снижает погрешность вычислений при решении прямой задачи расчета параметров передачи модового состава волоконного световода с увеличенным, по сравнению с одномодовыми ОВ, диаметром сердцевинки и сложной формой профиля показателя преломления. Кроме того, в отличие от перечисленных выше известных модификаций приближения Гаусса [16–22] такой подход позволяет ограничиться одним вариационным параметром – нормированным эквивалентным радиусом пятна моды R_0 , который в рамках данного приближения является базовым и полностью определяет искомые характеристики моды. Здесь для представления радиального распределения поля моды заданного порядка исследуемого ОВ используется известное аппроксимирующее выражение, соответствующее точному решению скалярного волнового уравнения для слабонаправляющих ОВ с идеальным неограниченным параболическим профилем показателя преломления, записанное в базе функций Лагерра-Гаусса [15]:

$$F_m^{(l)}(R) = \left(\frac{R}{R_0}\right)^l L_{m-1}^{(l)}\left(\frac{R^2}{R_0^2}\right) \exp\left(\frac{-R^2}{2R_0^2}\right) \quad (4)$$

где $R = r/a$ – нормированная радиальная координата; r – радиальная координата; a – радиус сердцевинки;

$R_0 = \rho_0/a$ – нормированный эквивалентный, в рамках приближения Гаусса, радиус пятна моды; ρ_0 – эквивалентный радиус пятна моды;

$L_{m-1}^{(l)}$ – полином Лагерра; l – азимутальный, m – радиальный порядок моды LP_{lm} .

Все это позволяет перейти к аналитической форме записи вариационного выражения для квадрата волнового параметра моды в сердцевинке U^2 в виде конечных вложенных сумм вида (5), где $b_p^{(l,m)}$ – соответствующие коэффициенты степенного ряда формулы явного выражения полинома Лагерра $L_m^{(l)}(x)$:

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

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

$V = k_0 a n_{\max} \sqrt{2\Delta}$ – нормированная частота (волноводный параметр), определяемая первичными параметрами ОВ;

$k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число для оптической волны в вакууме;

λ – рабочая длина волны.

$$\begin{aligned}
 U^2 &= \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \left\{ \frac{M}{R_0^2} + V^2 \left[X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] \right\}, \\
 X_j &= \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}}, & j = 0; \\ \exp\left(-\frac{(k+j-1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! (k+j-1)^{2p}}{p! R_0^{2p} N^{2p}}, & j = 1, 2; \end{cases} \\
 M &= \frac{(l+m-1)! (3l+2m-1)}{(m-1)!} + 2l^2 \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (q+l-1)! - 4l \sum_{q=0}^{2m-2} C_q (q+l)!; \\
 D_q &= \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l, m-1)}; \\
 C_q &= \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l+1, m-1)}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Характеристическое уравнение для эквивалентного нормированного радиуса пятна моды $\partial U^2 / \partial R_0$, получаемое, согласно общему алгоритму приближения Гаусса [15], в результате дифференцирования (5) по R_0 , также приводится к аналитическому виду (6).

Результатом численного решения уравнения (6), записанного для геометрических параметров исследуемого ОБ и дискретных значений азимутального и радиального порядков заданной моды LP_{lm} , является эквивалентный нормированный радиус пятна искомой моды R_0 .

Последующая подстановка R_0 в вариационное выражение (5) позволяет выполнить оценку параметра моды в сердцевине U , который непосредственно связан с постоянной распространения известным выражением (7) [10, 15, 23].

Полученное решение характеристического уравнения (6) с учетом последующей подстановки в (5) и далее в (7) должно удовлетворять условию отсечки направляемых мод $kn_N < \beta \leq kn_0$, а также неравенству для оптического фактора ограничения $P_{co}^{(lm)} \geq 0.5$, для которого, в рамках приближения слабонаправляющего оптического волновода, с учетом приближения Гаусса, также было получено аналитическое выражение вида (8).

$$\begin{aligned}
 -M + V^2 \left[S_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1 - S_2) \right] &= 0, \\
 S_j &= \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} (1 - pR_0^2), & j = 0; \\ \exp\left(-\frac{(k+j-1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! (k+j-1)^{2p}}{p! R_0^{2p} N^{2p}} \left(\frac{(k+j-1)^2}{N^2} - pR_0^2 \right), & j = 1, 2. \end{cases} \\
 \beta^2 &= k_0^2 n_0^2 - \frac{U^2}{a^2}. \\
 P_{co}^{(lm)} &= \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (l+q)! \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{p=0}^{l+q} \frac{1}{p! R_0^{2p}} \right].
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\tag{7}$$

$$\tag{8}$$

В свою очередь, переход к аналитическому выражению для задержки моды, обратно пропорциональной ее групповой скорости, потребует вывода

формул для производных параметра моды в сердцевине $\partial U^2 / \partial \lambda$:

$$\frac{\partial U^2}{\partial \lambda} = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \left\{ -\frac{2Q}{R_0^3} \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} \left[X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] + 2V^2 X_0^{(1)} \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} + V^2 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\partial h_k}{\partial \lambda} (X_1 - X_2) + 2V^2 \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1^{(1)} - X_2^{(1)}) \right\}, \quad (9)$$

где

$$X_j^{(1)} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p+3}} (1 - pR_0^2), & j = 0; \\ \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p+3}} \frac{(k+1)^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{(k+j-1)^2}{N^2} - pR_0^2 \right), & j = 1, 2. \end{cases}$$

и эквивалентного нормированного радиуса пятна моды:

$$\frac{\partial R_0}{\partial \lambda} = \frac{S_0 \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} + \sum_{k=0}^{N-1} [(S_0 - S_1) (h_k \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} + V^2 \frac{\partial h_k}{\partial \lambda})]}{-2V^2 \cdot [S_0^{(1)} + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1^{(1)} - S_2^{(1)})]}, \quad (10)$$

где

$$S_j^{(1)} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p+3}} [(1 - pR_0^2)^2 - pR_0^4], & j = 0; \\ \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! N^{2p} R_0^{2p+3}} \left[\left(\frac{(k+j-1)^2}{N^2} - pR_0^2 \right)^2 - pR_0^4 \right], & j = 1, 2. \end{cases}$$

Затем, соответственно, появляется возможность перейти к уже непосредственно к производной постоянной распространения $\partial \beta / \partial \lambda$:

$$\frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda} = -\frac{2k_0^2 n_{\max}^2}{\lambda} + k_0^2 \frac{\partial n_{\max}^2}{\partial \lambda} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial U^2}{\partial \lambda}, \quad (11)$$

и далее получить конечное аналитическое выражение для модовой задержки t_d , обратно пропорциональной групповой скорости v_g , направляемой моды LP_{lm} заданного порядка в виде [10, 15, 23]:

$$t_d = \frac{1}{v_g} = -\frac{\lambda^2}{4\pi\beta c} \frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda} = -\frac{\pi}{k_0^2 \beta c} \frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda}. \quad (12)$$

Материальная дисперсия, обусловленная спектральной зависимости показателя преломления, учитывается с помощью хорошо известно уравнения Селлмейера [23]. В свою очередь, поиск коэффициентов Селлмейера для нетабулированных значений концентрации примеси осуществляется с помощью метода, представленного в ранее опубликованной работе [24].

На рисунке 2 представлен образец профиля показателя преломления 16-модового FMF 42/125 с «наложением» аномально сильных локальных флуктуаций показателя преломления. Для этого образца профиля FMF 42/125 с помощью описанного выше ОМПГ был проведен расчет спектраль-

ных характеристик ДМЗ в «С»-диапазоне длин волн с учетом внесенных «нормальных» и «сильных» искажений в профиль показателя преломления. Указанные спектральные характеристики представлены на рисунке 3.

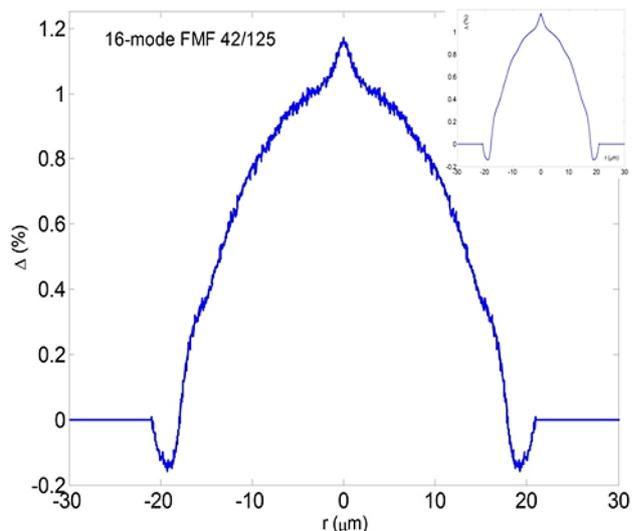


Рис. 2. Оптимизированный градиентный профиль FMF 42/125 с «наложением» аномально сильных локальных флуктуаций показателя преломления

Как и ожидалось, результаты расчетов продемонстрировали общую деградацию ДМЗ. Однако и в случае «нормальных», и в случае «аномально»

сильных искажений геометрии, значение данного параметра не превышало рекомендуемые в [6] 200 пс/км (здесь максимальные значения ДМЗ соответствовали краям указанного волнового диапазона), в то время как в области длины волны 1550 нм это значение не достигало 150 пс/км.

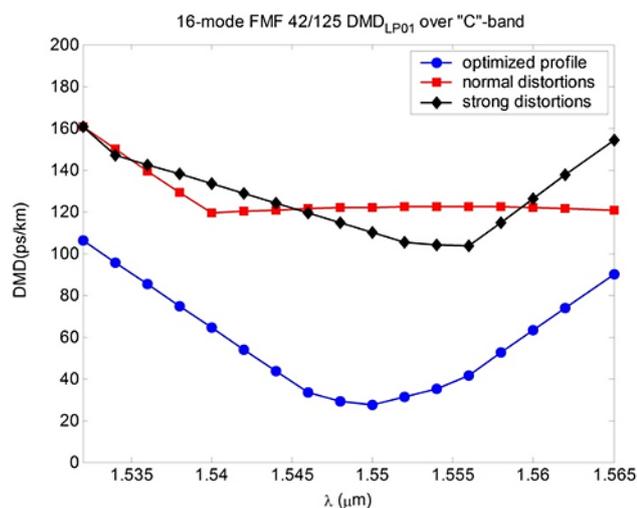


Рис. 3. Спектральные кривые ДМЗ в «С»-диапазоне длин волн для оптимизированной и с учетом разной степени проявления искажений формы профиля FMF 42/125

Также следует отметить, что внесенные в профиль искажения, напротив, приводят к увеличению модовой площади эффективного сечения – примерно на 2.0 ... 2.5 мкм², по сравнению с оптимизированной гладкой формой профиля, результаты расчета спектральных зависимостей которых приведены на рисунке 4.

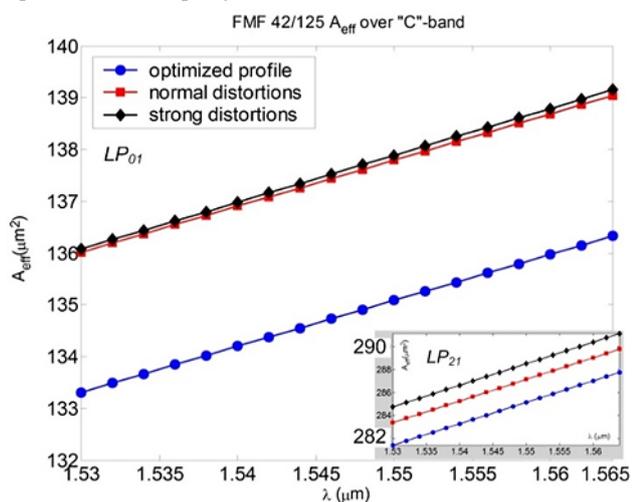


Рис. 4. Спектральные характеристики модовой площади эффективного сечения в «С»-диапазоне длин волн для оптимизированной и с учетом разной степени проявления искажений формы профиля FMF 42/125

На следующем этапе была проведена реконструкция 3D-структуры исследуемого FMF 42/25 для случая описанных выше аномально сильных локальных флуктуаций показателя преломления с учетом эллиптичности геометрии поперечного сечения световода, характерной для реальных

промышленных образцов ОВ. Здесь вариации радиуса сердцевинки относительно значений полярного угла выбирались в соответствии с протоколами измерения профилей промышленных образцов LOMF [13], представленные в виде диаграммы распределения по 40 поперечным сечениям на рисунке 5, были пропорционально масштабированы на усредненный радиус сердцевинки 21 мкм (рисунок 6). Восстановленная 3D-структура исследуемого FMF 42/125 с внесенными сильными искажениями профиля показателя преломления и эллиптичностью геометрии поперечного сечения сердцевинки приведена на рисунке 7.

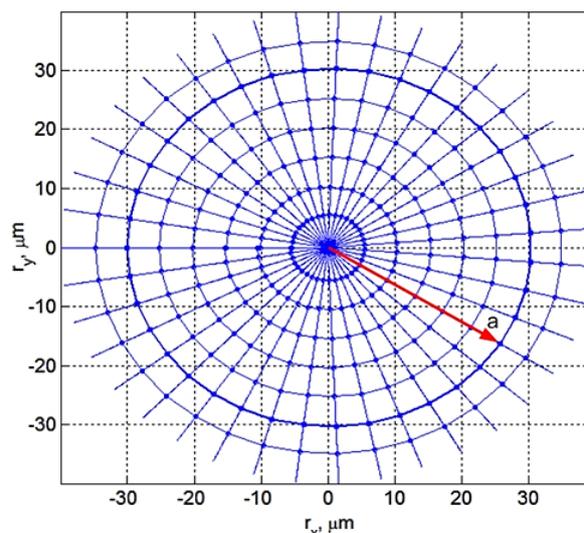


Рис. 5. Диаграмма вариаций радиуса сердцевинки промышленного образца LOMF OM2+/OM3 в полярной системе координат

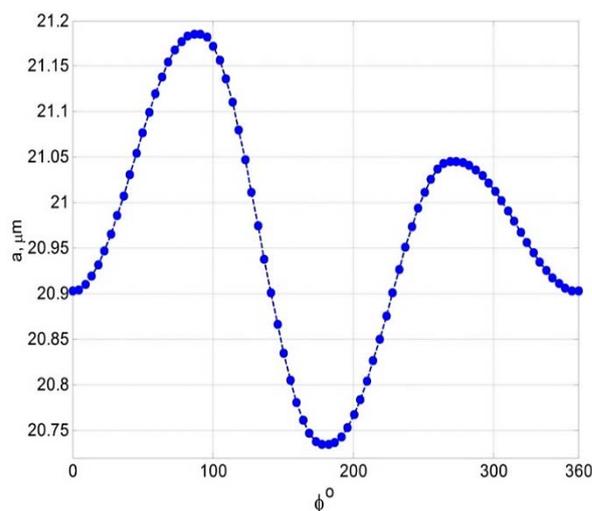


Рис. 6. Распределение значений радиуса сердцевинки FMF 42/125 по поперечному сечению FMF 42/125

Поскольку ОМПГ, как и подавляющее большинство приближенных методов, базируется на предположении о симметричной структуре анализируемого волоконного световода, включая радиальное сечение сердцевинки и профиль показателя преломления, было предложено провести анализ 80 эквивалентных симметричных FMF, для каждо-

го из которых радиус сердцевинки и профиль показателя преломления выбирался на соответствующем полусечении при заданном значении полярного угла из диапазона $\phi = 0^\circ \dots 360^\circ$ (рисунок 6). Таким образом, для каждого условного «полусечения» FMF был проведен расчет спектральных кривых ДМЗ в «С»-диапазоне длин волн.

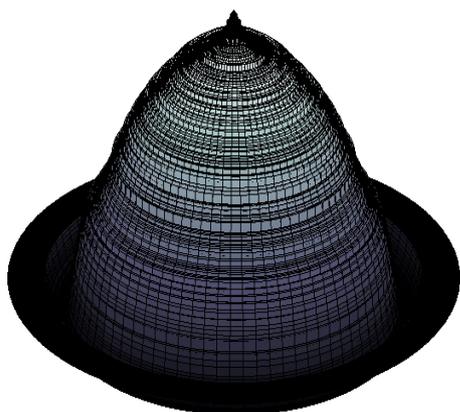


Рис. 7. Восстановленная 3D-структура исследуемого FMF 42/125

Это позволило построить полигон спектральных характеристик ДМЗ в указанной области, а также перейти к эквивалентной кривой, представляющей собой средние геометрические значения ДМЗ на соответствующих оптических несущих, которые представлены на рисунке 8.

Здесь для сравнения приведены спектральные кривые ДМЗ, соответствующие модельному FMF круглого сечения с оптимизированной и аномально сильно «искаженной» формами профиля показателя преломления. Анализ полученных результатов показывает, что, в отличие от предыдущего случая, соответствующего круглому FMF, даже в

условиях аномально сильных локальных флуктуаций показателя преломления, деградация спектральной характеристики ДМЗ проявляется намного сильнее при эллиптичности геометрии ОВ.

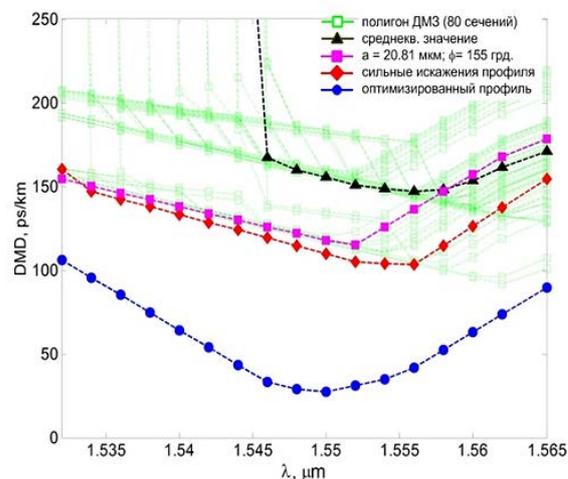


Рис. 8. Спектральные кривые ДМЗ в «С»-диапазоне длин волн для оптимизированной и несимметричной формы профиля FMF

Фактически увеличение диаметра сердцевинки относительно номинального значения 42 мкм даже на 0.5 мкм при одновременном наличии сильных искажений формы пофиля приводит к появлению новых модовых составляющих в области «коротких» длин волн «С»-диапазона, что неизбежно увеличивает ДМЗ до неприемлемо высоких значений – вплоть до 1.3 нс в области нижней границы «С»-диапазона. Этот же фактор может ухудшить спектральную характеристику ДМЗ в области «длинных» волн «С»-диапазона на 50 пс/км и даже более относительно спектральной кривой, учитывающей только сильные искажения профиля без эллиптичности сердцевинки.

Благодарности

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-6001515 мол_а_дк.

Список используемых источников

1. Kubota H., Morioka T. Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing // Optical Fiber Technology. 2011. Vol. 17. Iss. 5. PP. 491–494.
2. Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. Space-division multiplexing in optical fibers // Nature Photonics. 2013. Vol. 7. PP. 354–362.
3. Morioka T. Recent progress in space-division multiplexed transmission technologies // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). 2013.
4. Kasahara M., Saitoh K., Sakamoto T., Hanzawa N., Matsui T., Tsujikawa K., Yamamoto F., Koshiba M. Design of Few-Mode Fibers for Mode-Division Multiplexing Transmission // IEEE Photonics Journal. 2013. Vol. 5. Iss. 6.
5. Ferreira F.M., Fonseca D., da Silva H.J.A. Design of Few-Mode Fibers With M-modes and Low Differential Mode Delay // Journal of Lightwave Technology. 2014. Vol. 32. Iss. 3. PP. 353–360.
6. Mizuno T., Takara H., Sano A., Miyamoto Yu. Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber // Journal of Lightwave Technologies. 2016. Vol. 34. Iss. 2. PP. 582–592.
7. Sillard P., Molin D., Bigot-Astruc M., Amezcua-Correa A., de Jongh K., Achten F. 50 μm Multimode Fibers for Mode Division Multiplexing // Journal of Lightwave Technologies. 2016. Vol. 34. Iss. 8. PP. 1672–1677.
8. Андреев В.А., Бурдин В.А., Бурдин А.В., Дашков М.В. Маломодовые оптические волокна с сильно увеличенным диаметром сердцевинки для транспортных сетей связи нового поколения // Фотон-Экспресс. 2015. № 6 (126). С. 245–246.
9. Andreev V.A., Burdin V.A., Bourdine A.V., Dashkov M.V., Volkov K.A. Research of potentiality of nonlinear effects mitigation by considerable increasing of optical fiber core diameter // Proceedings of SPIE. Optical Technologies for Telecommunications. 2015. Vol. 9533.
10. Bottacchi S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 2006.

11. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дмитриев Е.В., Евтушенко А.С., Севрук Н.Л., Халиков Р.Х. Моделирование градиентного профиля показателя преломления кварцевых оптических волокон с диаметром сердцевины 42 мкм и уменьшенной дифференциальной модовой задержкой // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 3. С. 235–246.
12. Andreev V.A., Bourdine A.V., Burdin V.A., Evtushenko A.S., Khalikov R.H. Design of low DMD few-mode optical fibers with extremely enlarged core diameter providing nonlinearity suppression for operating over "C"-band central region // Proceedings of SPIE. Optical Technologies for Telecommunications. 2017. Vol. 10342.
13. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. 2010. № 2. С. 22–27.
14. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А. Метод расчета параметров схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы MDM на торце сердцевины волоконного световода линии передачи // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 5–11.
15. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
16. 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. Iss. 1. PP. 7–15.
17. 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. Iss. 3. PP. 176–180.
18. Oksanen M.I., Lindell I.V. Variational analysis of anisotropic graded-index optical fibers // Journal of Lightwave Technology. 1989. Vol. 7. Iss. 1. PP. 87–91.
19. Ankiewicz A., Peng G.-D. Generalized Gaussian approximation for single-mode fibers // Journal of Lightwave Technology. 1992. Vol. 10. Iss. 1. PP. 22–27.
20. Holmes M.J., Spirit D.M., Payne F.P. New Gaussian-based approximation for modeling non-linear effects in optical fibers // Journal of Lightwave Technology. 1994. Vol. 12. Iss. 2. PP. 193–201.
21. Wu M.-Sh., Lee M.-H., Tsai W.-H. Variational analysis of single-mode graded-core W-fibers // Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14. Iss. 1. PP. 121–125.
22. Meher H., Hosain S.I. Variational Approximations for Single-mode Graded-index Fibers: Some Interesting Applications // Journal of Optical Communications. 2003. Vol. 24. Iss. 1. PP. 25–30.
23. Adams M.J. An Introduction to Optical Waveguides. New York: John Wiley and Sons, 1981.
24. Бурдин В.А. Методы определения коэффициентов формулы Селлмейера в задачах анализа дисперсионных характеристик кварцевых оптических волокон // Инфокоммуникационные Технологии. 2006. Т. 4. № 2. С. 30–34.

* * *

RESEARCH OF REAL FEW-MODE OPTICAL FIBER GEOMETRY DEVIATION FROM THE OPTIMAL FORM INFLUENCE ON DIFFERENTIAL MODE DELAY SPECTRAL CHARACTERISTICS DEGRADATION

V. Andreev¹, A. Bourdine¹, V. Burdin¹

¹Povolzhskiy State University of Telecommunication & Informatics, Samara, 443010, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Andreev V., Bourdine A., Burdin V. Research of Real Few-Mode Optical Fiber Geometry Deviation from the Optimal Form Influence on Differential Mode Delay Spectral Characteristics Degradation // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 2. PP. 18–25.

Abstract: *This work presents some results of theoretical research of few-mode optical fiber geometry deviation from the optimal form influence on differential mode delay spectral characteristics degradation. We considered non-symmetrical non-circular 16-mode optical fibers 42/125 with reduced differential mode delay over "C"-band provided by special refractive index profile form. Optimized profile form was distorted by local refractive index fluctuations. Core ellipticity and profile distortions were set via parameters been got by reports of real commercially available multimode optical fibers 50/125 Cat. OM2 and OM2+/OM3 refractive index profile measurements.*

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