

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ДИАМЕТРОМ СЕРДЦЕВИНЫ 42 МКМ И УМЕНЬШЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДОВОЙ ЗАДЕРЖКОЙ

*Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дмитриев Е.В., Евтушенко А.С., Севрук Н.Л., Халиков Р.Х.  
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: bourdine@yandex.ru*

В работе представлены метод и результаты проведенного на его основе моделирования градиентного профиля показателя преломления, специализированная форма которого обеспечивает уменьшение дифференциальной модовой задержки в центральной области «С»-диапазона длин волн, соответствующей  $\lambda=1550$  нм, кварцевых маломодовых оптических волокон (FMMF) с увеличенным, по сравнению с известными коммерческими FMMF, диаметром сердцевины до 42 мкм.

**Ключевые слова:** маломодовый режим передачи сигнала, дифференциальная модовая задержка, маломодовые оптические волокна, эффективная площадь сечения, транспортные сети связи нового поколения, нелинейность оптических волокон.

### Введение

Ежегодный мировой рост объема интернет-трафика, который, по данным статистики, в зависимости от региона составляет от 20% до 44% [1, 2], широкое внедрение облачных технологий, Интернета вещей, появление беспроводных технологий 5G, активная разработка направления тактильного Интернета создают все предпосылки для непрерывного роста требований к повышению пропускной способности современных транспортных сетей связи, которые, по данным экспертов, к 2020 г. должны будут обеспечивать поддержку передачи данных на скоростях сотни Тбит/с и даже десятки Пбит/с [3-4]. Ключевым фактором, сдерживающим практическую реализацию решения данной проблемы, являются искажения, вносимые кварцевыми оптическими волокнами (ОВ) – базовой средой распространения информационных сигналов современных высокоскоростных систем передачи. При этом с появлением коммерческих сверхбыстродействующих оптоэлектронных устройств цифровой обработки сигналов появилась, в том числе, возможность реализации сложных алгоритмов и тем самым в целом повысилась эффективность электронной компенсации дисперсии. Однако с точки зрения снижения нелинейных факторов искажений, особенно для традиционных кварцевых телекоммуникационных одномодовых ОВ протяженных магистральных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), данная проблема, получившая название «нелинейный предел Шеннона», по-прежнему остается актуальной [3 – 7].

### Маломодовые оптические волокна: методика моделирования профиля показателя преломления

Очевидным кардинальным способом подавления нелинейных эффектов в оптическом тракте является уменьшение нелинейности самого волоконного световода. С точки зрения ОВ традиционной конструкции это может достигаться путем увеличения диаметра сердцевины световода [7], что непосредственно приводит к увеличению площади эффективного сечения и тем самым снижению нелинейности самого ОВ. Поэтому переход на маломодовые ОВ (FMMF – Few Mode Fibers) с сильно увеличенным диаметром сердцевины, по сравнению с коммерческими аналогами [8], позволяющим практически полностью нивелировать нелинейность ОВ, полагается одним из перспективных подходов для решения задачи реализации преодоления нелинейного предела Шеннона [7, 9 – 10]. Вместе с тем увеличение диаметра сердцевины FMMF неизбежно приводит к появлению еще большего числа новых модовых составляющих высших порядков, удовлетворяющих условию отсечки рассматриваемого ОВ. В результате требуется проведение дополнительных мероприятий по уменьшению дифференциальной модовой задержки (ДМЗ) – основного фактора линейных искажений оптического сигнала при распространении по ОВ в маломодовом режиме [11]. Неслучайно при разработке конструкций FMMF ключевой проблемой является поиск компромисса между площадью эффективного сечения ОВ, непосредственно связанной с диаметром сердцевины, который, в том числе,

определяет модовый состав волоконного световода, и минимизацией ДМЗ на заданной оптической несущей или в определенном диапазоне длин волн [7, 9, 10, 12 – 14].

В ранее опубликованной работе [15] на основе полученных в результате проведенного моделирования ВОЛП, функционирующей в одномодовом режиме, со стандартными одномодовыми ОВ рек. ITU-T G.652 и 100% компенсацией затухания и дисперсии было показано, что при передаче 10 каналов 40 Гбит/с в «С»-диапазон длин волн с интервалом 0,4 нм на расстояние 4000 км, приемлемое значение Q-фактора достигается уже при значении площади эффективного сечения  $A_{эфф}=140 \text{ мкм}^2$ . В этой же работе для кварцевых ОВ традиционной конструкции с градиентным профилем показателя преломления, соответствующим типовым промышленным образцам многомодовых ОВ категории OM2+/OM3 [16], масштабированным до геометрии исследуемого ОВ, были получены зависимости, связывающие искомое значение площади эффективного сечения как основной, так и мод высших порядков от диаметра сердцевин FМF. Указанные характеристики, построенные на основе данных [15], представлены на рис. 1.

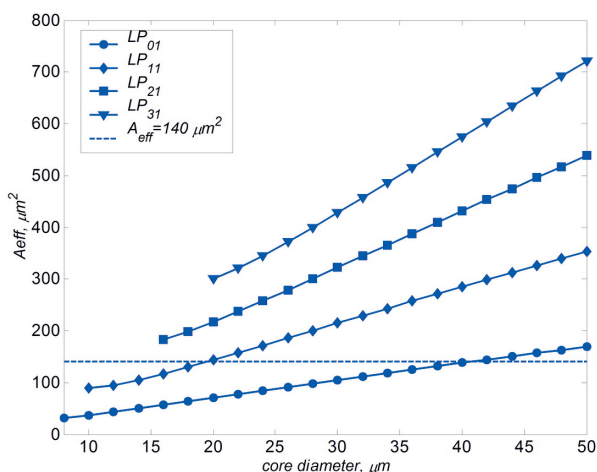


Рис. 1. Кривые зависимости площади эффективного сечения направляемых мод от диаметра сердцевин ОВ

Анализ построенных зависимостей модовой площади эффективного сечения  $A_{эфф}(d)$  показывает, что если искомая  $A_{эфф} = 140 \text{ мкм}^2$  для моды  $LP_{11}$  достигается уже для FМF с  $d = 22 \text{ мкм}$ , то для устранения нелинейности основной  $LP_{01}$  диаметр сердцевин волокна должен составлять не менее 42 мкм.

Для моделирования FМF 42/125 с уменьшенной ДМЗ предлагается воспользоваться разработанным ранее подходом [17], который был

успешно апробирован на многомодовых ОВ 50/125 для функционирующих в маломодовом режиме ВОЛП мультигигабитных компактных инфокоммуникационных сетей [18].

Предлагаемое решение заключается в подборе специализированной формы профиля показателя преломления для FМF 42/125, которая бы позволила обеспечить искомое выравнивание задержек модового состава этого ОВ относительно некоторого опорного значения  $t_{BASE}$ . Сама конструкция предлагаемого ОВ, которое в общем случае удовлетворяет условиям приближения слабонаправляющего оптического волновода, является традиционной и представляет собой кварцевую сердцевину диаметром 42 мкм, легированную германием ( $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ ), окруженную одной внешней сплошной оболочкой из чистого кварца  $\text{SiO}_2$  диаметром 125 мкм. Для описания искомого профиля используется общий подход метода стратификации [19]. Таким образом, моделируемый 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 данный профиль в области сердцевин ОВ представляется в виде конечного числа  $N$  слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным. В результате искомая форма профиля показателя преломления в пределах области сердцевин ОВ выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась минимизация некоторой величины  $F$ , которая описывается выражением вида:

$$F = \sum_{j=1}^M (t_{d(j)} - t_{BASE})^2, \quad (1)$$

где  $t_{d(j)}$  – искомое значение задержки  $j$ -ой направляемой моды азимутального  $l$  и радиального  $m$  порядка  $LP_{lm}^{(j)}$  диаграммы ДМЗ, соответствующей синтезируемому профилю показателя преломления FМF 42/125;  $M$  – число направляемых мод заданного порядка, для которых осуществляется выравнивание диаграммы ДМЗ относительно опорного значения  $t_{BASE}$ . В общем случае на первом этапе предлагается рассмотреть весь модовый состав исследуемого ОВ.

Аргументы целевой функции  $F$  представляют собой массив значений локального параметра  $h_k$ , полностью описывающий профиль показателя преломления ОВ в области сердцевин. Для минимизации целевой функции (1) предлагается использовать симплексный метод Нелдера-Мида, эффективность которого была

продемонстрирована в известных работах А.Н. Боголюбова и А.Г. Свешникова, посвященных решению задач синтеза волоконных световодов с заданными характеристиками (например [20-21] и др.).

В процессе минимизации указанной величины  $F$  необходимо многократно решать прямую задачу анализа маломодового волоконного световода с направленно изменяемыми параметрами. Аргументы целевой функции  $F$  представляют собой массив параметров  $h_k$ , полностью описывающий профиль показателя преломления ОВ. Для этой цели предлагается использовать разработанную ранее модификацию приближения Гаусса [22-23], обобщенную на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, для представления которого, как было отмечено выше, используется подход метода стратификации [19]: профиль показателя преломления в области сердцевины ОВ представляется в виде конечного числа  $N$  слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным:

$$n(R) = \begin{cases} n_k, & R_k = \frac{k}{N}, \quad 0 \leq k \leq N-1; \\ n_N, & 1 < R \leq +\infty, \end{cases} \quad (2)$$

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

$$n^2(R) = n_{max}^2 [1 - 2\Delta \cdot f(R)] \quad (3)$$

записывается в виде:

$$f(R) = \begin{cases} h_k, & R_k = \frac{k}{N}, \quad 0 \leq k \leq N-1; \\ 1, & 1 < R \leq +\infty. \end{cases} \quad (4)$$

Данный подход позволяет перейти от известной интегральной [24] к аналитической форме записи вариационного выражения для квадрата волноводного параметра моды  $LP_m$  в сердцевине  $U^2$  в виде конечных вложенных сумм вида:

$$U^2 = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \left\{ \frac{Q}{R_0^2} + V^2 \left[ X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] \right\}; \quad (5)$$

где

$$X_0 = \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}};$$

$$X_1 = \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{k^{2p}}{N^{2p}};$$

$$X_2 = \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{(k+1)^{2p}}{N^{2p}},$$

где  $R_0 = \rho_0/a$  – эквивалентный нормированный радиус пятна моды;  $\rho_0$  – эквивалентный радиус пятна моды;

$$Q = \frac{(l+m-1)!(3l+2m-1)}{(m-1)!} + 2l^2 \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (q+l-1)! - 4l \sum_{q=0}^{2m-2} C_q (q+l)!;$$

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

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

$b_p^{(l, m)}$  – соответствующие коэффициенты степенного ряда формулы явного выражения полинома Лагерра  $L_m^{(l)}(x)$  [25]:

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

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

$V = k_0 a n_{max} \sqrt{2\Delta}$  – нормированная частота (волноводный параметр), определяемая первичными параметрами ОВ;  $k_0 = 2\pi/\lambda$  – волновое число для оптической волны в вакууме;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $c$  – скорость света в вакууме.

Характеристическое уравнение для эквивалентного нормированного радиуса пятна моды  $\partial U^2 / \partial R_0 = 0$ , получаемое, согласно общему алгоритму приближения Гаусса [23] в результате дифференцирования (5) по  $R_0$ , также приводится к аналитическому виду:

$$-Q + V^2 \left[ S_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1 - S_2) \right] = 0, \quad (6)$$

где

$$S_0 = \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \left(1 - pR_0^2\right);$$

$$S_1 = \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \times \frac{k^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{k^2}{N^2} - pR_0^2\right);$$

$$S_2 = \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \times \frac{(k+1)^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{(k+1)^2}{N^2} - pR_0^2\right).$$

Результатом численного решения уравнения (6), записанного для геометрических параметров исследуемого ОВ 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 [23]:

$$\beta^2 = k_0^2 n_0^2 - \frac{U^2}{a^2}. \tag{7}$$

Предложенный подход позволяет далее получить аналитическую форму записи производных параметра моды в сердцевине и нормированного эквивалентного радиуса пятна моды по длине волны  $\lambda$ , на основе которых реализуется вывод конечных аналитических выражений непосредственно для задержки  $t_d^{(LP_{lm})}$  моды заданного порядка.

Таким образом, моделирование профиля показателя преломления волокон FMF 42/125 включает в себя предварительный выбор опорного значения модовой задержки  $t_{BASE}$ , последующее задание профиля показателя преломления первой итерации и далее минимизацию целевой функции  $F(1)$ , на каждом этапе которой оценка параметров передачи модового состава и расчет диаграммы ДМЗ этого ОВ данной итерации осуществляется на основе представленного обобщения модификации приближения Гаусса.

### Результаты моделирования профиля показателя преломления FMF 42/125

В рамках данной работы опорного значения модовой задержки  $t_{BASE}$  предлагается реализовать по результатам анализа диаграммы ДМЗ, построенной для направляемых модового состава ОВ 42/125 с градиентным профилем показателя преломления промышленных образцов многомодовых ОВ 50/125 кат. OM2+/OM3 [16], оптимизированных для совместной работы с лазерными источниками, который был предварительно масштабирован под искомый диаметр сердцевины 42 мкм и представлен на рис. 2.

ОВ 42/125 с данным профилем показателя преломления поддерживает распространение до 20 направляемых мод  $LP_{lm}$  – до 7-го азимутального  $l = 0 \dots 7$  и 4-го радиального  $m = 1 \dots 4$  порядков включительно в «С»-диапазоне длин волн. Для модового состава рассматриваемого ОВ была построена диаграмма ДМЗ. На длине волны 1550 нм модовые задержки  $t_d^{(LP_{lm})}$  варьируются от 4924,65 нс/км (мода  $LP_{04}$ ) до 4926,37 нс/км (мода  $LP_{11}$ ). При этом само значение ДМЗ по основной моде  $LP_{01}$ , которое оценивается в соответствии с простым выражением вида

$$DMD_{LP_{01}} = \max\left|t_d^{(LP_{01})} - t_d^{(LP_{lm})}\right|, \tag{8}$$

достигает 981,52 пс/км на оптической несущей 1550 нм и составляет не менее 974,35 пс/км во всей указанной спектральной области. На первом этапе в качестве опорной модовой задержки  $t_{BASE}$  рассматривалось среднее значение из указанного диапазона  $t_d^{(LP_{lm})}$ , которое составило для длины волны 1550 нм 4925,5 нс/км.

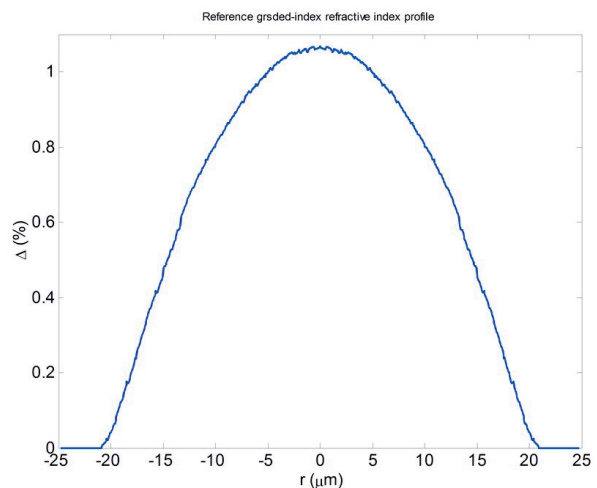


Рис. 2. Опорный градиентный профиль показателя преломления ОВ 42/125



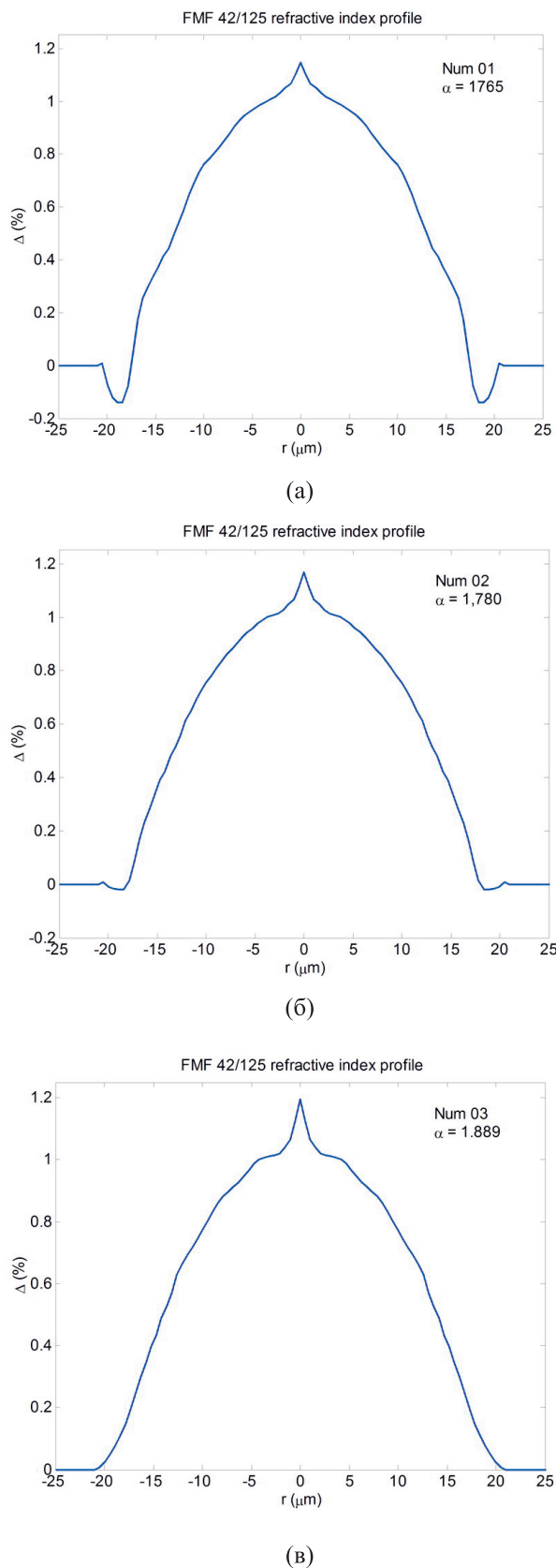


Рис. 3. Градиентный профиль показателя преломления FMF 42/125 с уменьшенной ДМЗ, полученный для комбинаций опорного значения модовой задержки  $t_{BASE} = 4925,5$  нс/км и параметра градиента профиля первой итерации  $\alpha$ : (а) 1,765; (б) 1,780; (в) 1,889

В качестве профиля первой итерации было предложено рассмотреть простые, так называемые  $\alpha$ -профили, которые описываются простой гладкой степенной функцией, полностью определяемой параметром градиента, который рассматривался в диапазоне  $\alpha_{(1)} = 0,5 \dots 3,0$ . Всего было проведено свыше 80 процедур синтеза профиля показателя преломления FMF 42/125 для различных комбинаций значений опорной модовой задержки  $t_{BASE}$  и параметра профиля первой итерации  $\alpha_{(1)}$ .

На рис. 3 представлены отобранные, с точки зрения минимального значения ДМЗ по основной моде  $LP_{01}$  на оптической несущей 1550 нм, профили показателя преломления FMF 42/125. Это, в частности, результаты, полученные для следующих значений параметра градиента профиля первой итерации  $\alpha = 1,765$  (рис. 3а); 1,780 (рис. 3б) и 1,889 (рис. 3в). Соответствующие им спектральные характеристики ДМЗ в «С»-диапазоне длин волн сведены на рис. 4. Все три приведенных образца обеспечивают снижение ДМЗ по основной моде до 50 пс/км и менее в центральной области «С»-диапазона.

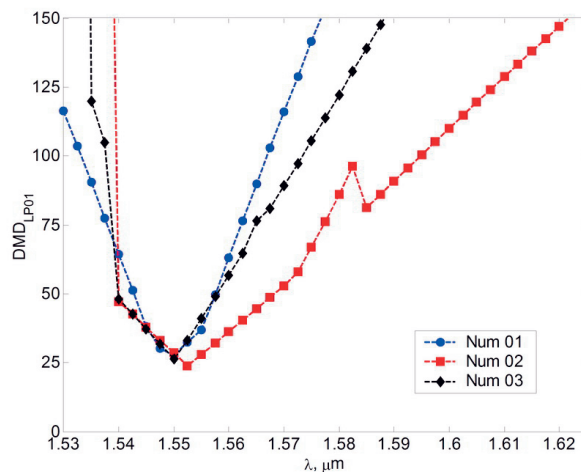


Рис. 4. Спектральные зависимости ДМЗ по основной моде FMF 42/125 в пределах волнового «С»-диапазона трех отобранных образцов градиентного профиля показателя преломления (рис. 3)

При этом на длине волны 1550 нм значение данного параметра для все трех представленных профилей составляет не более 28,49 пс/км (образец №02) вплоть до 26,27 пс/км (образец №03).

### Заключение

Представлена альтернативная методика моделирования профиля показателя преломления кварцевых FMF с сильно увеличенным до 42 мкм диаметром сердцевины и при этом уменьшенной

ДМЗ, оптимизированных для передачи сигналов в центральной области телекоммуникационного «С»-диапазона длин волн. На основании предложенного подхода проведено моделирование искомых градиентных профилей показателя преломления. Показано, что при соответствующей комбинации опорного значения модовой задержки  $t_{BASE}$  и параметра градиента профиля первой итерации  $\alpha$  удается добиться снижения ДМЗ по основной моде до 50 пс/км в указанной центральной области «С»-диапазона при одновременном нивелировании нелинейности модового состава таких FMF 42/125.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8

### Литература

1. Cisco Service providers forecasts and trends. Cisco Systems Inc. Complete Forecast, 2016. // <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html#cloud-forecast>
2. Мякин Д. Глобальный интернет-трафик почти достиг Зеттабайта. 3D-News. Daily Digital Digest, 2016 // <http://www.3dnews.ru/927990>
3. Essiambre R.-J., Tkach R.W. Capacity trends and limits of optical communication networks // *Proceedings of IEEE*. – 2012. – V. 100, No 5. – P. 1035 – 1055. doi: 10.1109/JPROC.2012.2182970
4. Дианов Е.М. На пороге Пета-эры // *Успехи физических наук*. – 2013. – Т.183(5). – С. 511 – 518. doi: 10.3367/UFNr.0183.201305f.0511
5. Hirano M. Future of transmission fiber // *IEEE Photonics Journal*. – 2011. – V.3, No 2. – P. 316 – 319.
6. Ellis D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – V. 8434. – P. 84340H-1 – 84340H-11. doi: 10.1117/12.928093.
7. Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. Space-division multiplexing in optical fibers // *Nature Photonics*. – 2013. – V. 7, No 5. – P. 354 – 362.
8. OFS. Few mode optical fiber series. OFS Fitel LLC. Product catalog, 2016 // <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/viewitems/few-mode-optical-fiber-series/few-mode-optical-fiber-series1?>
9. Mizuno T., Takara H., Sano A., Miyamoto Yu. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber // *IEEE Journal of Lightwave Technologies*. – 2016. – vol. 34(2). – P. 582 – 592.
10. Stillard P., Molin D., Bigot-Astruc M., Amezcua-Correa A., de Jongh K., Achten F. 50  $\mu\text{m}$  multimode fibers for mode division multiplexing // *IEEE Journal of Lightwave Technologies*. – 2016. – vol. 34(8). – P. 1672 – 1677.
11. 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.
12. Mori T., Sakamoto T., Wada M., Yamamoto T. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – 32(14). – P. 2468 – 2479
13. Ferreira F.M., Fonseca D., da Silva H.J.A. Design of few-mode fibers with M-modes and low differential mode delay // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – 32(3). – P. 353 – 360.
14. Stillard P. Next-generation fibers for space-division-multiplexed transmission // *IEEE Journal of Lightwave Technologies*. – 2015. – vol. 33(5). – P. 1092 – 1099.
15. 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* vol. 9533. – 2015. – vol. 9533 – P. 953306-1 – 953306-8.
16. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2010. – №2. – С. 22 – 27.
17. Патент 2458370 Российская Федерация, МПК G02B 6/14. Способ уменьшения дифференциальной модовой задержки многомодового оптического волокна / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов (Россия). – №2010139745/28, заявл. 27.09.2010; опубл. 10.08.2012. Бюл. №22. – 10 с
18. Bourdine A.V. Design of refractive index profile for multimode optical fibers with low differential mode delay // *Journal of Optoelectronics Engineering*. – 2013. – vol. 1(1). – P. 5 – 13. doi: 10.12691/joe-1-1-2
19. Adams M.J. An introduction to optical waveguides. New York: John Wiley and Sons, 1981. – 401 p.
20. Боголюбов А.Н., Красильникова А.В., Минаяев Д.В., Свешников А.Г. Метод конечных

- разностей для решения задач синтеза волноведущих систем // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12, №1. – С. 13 – 24
21. Боголюбов А.Н., Буткарев И.А., Свешников А.Г. Синтез волоконных световодов// Радиотехника. 2004. №12. С. 4 – 12.
22. Bourdine A. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. – 2013. – vol. 2013. – P. 469389-1 – 469389-18. doi: 10.1155/2013/469389
23. 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(2). – P. 111 – 123. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30
24. Snyder A.W., Love J. Optical waveguide theory, Chapman & Hall, 738 p.
25. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.

Получено 20.08.2016

**Андреев Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой линий связи и измерений в технике связи ЛС и ИТС Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), Президент ПГУТИ, директор СРТТЦ ПГУТИ (г. Самара). Тел. (846)3322161; E-mail:

**Бурдин Антон Владимирович**, д.т.н., доцент, помощник ректора по инновациям, профессор Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (846)3322161; E-mail: bourdine@psuti.ru

**Бурдин Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, проректор по науке и инновациям ПГУТИ. Тел. (846)3322161; E-mail: burdin@psati.ru

**Дмитриев Евгений Владимирович**, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела ПГУТИ. Тел. (846)3322161; E-mail: nio@psati.ru

**Евтушенко Александр**, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (846)3322161; E-mail: alex-2194ru@yandex.com

**Севрук Никита Львович**, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (846)3322161; E-mail: nikasevruk@mail.ru

**Халиков Рашид Хасанович**, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (846)3322161; E-mail: rashid-halikov@mail.ru

## DESIGN OF GRADED REFRACTIVE INDEX PROFILE FOR SILICA OPTICAL FIBERS WITH CORE DIAMETER 42 $\mu\text{m}$ AND REDUCED DIFFERENTIAL MODE DELAY

*Andreev V.A., Bourdine A.V., Burdin V.A., Evtushenko A.S.,  
Sevruk N.L., Khalikov R.Kh.*

*Dept. of Communications Lines, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 77, Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation  
E-mail: bourdine@yandex.ru*

We present method for design of refractive index profile for silica  $\text{GeO}_2$ -doped graded-index few-mode optical fibers with reduced differential mode delay and suppressed mode nonlinearity due to enhanced core diameter up to 42  $\mu\text{m}$ . Proposed solution is based on combination of well-known overlap integral method and earlier on developed modified Gaussian approximation generalized for analysis of silica weakly guiding optical fibers with single solid outer cladding and arbitrary axially-symmetric refractive index profile. This approach provides ability to derive analytical expressions for guided mode delays. Therefore, the objective function is represented as a sum of squares of deviations between mode staff delays and reference value corresponding to refractive index profile

of current iteration. Based on developed method we performed computation for various combination of the reference mode delay and first iteration profile parameter. Some results of desired graded-index profile for a few-mode optical fibers 42/125 providing differential mode delay less than 50 ps/km over central region of «C»-range are represented.

**Keywords:** few-mode optical transmission, differential mode delay, few-mode optical fibers, mode effective area, new generation transport networks, optical fiber nonlinearity

**DOI:** 10.18469/ikt.2016.14.3.03

**The reported study was funded by Grant of the President of Russian Federation, research project No. MD-9418.2016.8.**

**Andreev Vladimir Alexandrovich**, 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. +78462280077. E-mail: andreev@psuti.ru.

**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.

**Burdin 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

**Evtushenko Alexander S.** 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. +78462280066. E-mail: alex2194ru@yandex.com

**Sevruk Nikita Lvovich**, 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. +78462280066. E-mail: nikasevruk@mail.ru

**Khalikov Rashid Khasanovich**, 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. +78462280066. E-mail: rashid-halikov@mail.ru.

## References

1. Cisco Service providers forecasts and trends. Cisco Systems Inc. Complete Forecast, 2016. Available at: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html#cloud-forecast> (accessed: 20.08.2016).
2. Mjakin D. Global'nyj Internet-trafik pochtu dostig Zettabajta [Global Internet traffic has almost reached zettabyte]. 3D-News. Daily Digital Digest, 2016 Available at: <http://www.3dnews.ru/927990> (accessed: 20.08.2016).
3. Essiambre R.-J., Tkach R.W. Capacity trends and limits of optical communication networks // *Proceedings of IEEE*, 2012, vol. 100, no. 5, pp. 1035–1055. doi: 10.1109/JPROC.2012.2182970
4. Dianov E.M. Na poroge Peta-jery [At the threshold of Peta-era]. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2013, vol. 183, no. 5, pp. 511–518. doi: 10.3367/UFNr.0183.201305f.0511
5. Hirano M. Future of transmission fiber. *IEEE Photonics Journal*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 316–319. doi: 10.1109/JPHOT.2011.2130519
6. Ellis D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres. *Proc. SPIE 8434*, 2012, pp. 84340H-1–84340H-11. doi: 10.1117/12.928093



7. Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. Space-division multiplexing in optical fibers. *Nature Photonics*, 2013, vol. 7, no. 5, pp. 354–362. doi: 10.1038/nphoton.2013.94
8. OFS. Few mode optical fiber series. OFS Fitel LLC. Product catalog, 2016. Available at: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/viewitems/few-mode-optical-fiber-series/few-mode-optical-fiber-series1> (accessed: 20.08.2016).
9. Mizuno T., Takara H., Sano A., Miyamoto Yu. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber. *IEEE Journal of Lightwave Technologies*, 2016, vol. 34, pp. 582–592.
10. Stillard P., Molin D., Bigot-Astruc M., Amezcua-Correa A., de Jongh K., Achten F. 50  $\mu\text{m}$  multimode fibers for mode division multiplexing. *IEEE Journal of Lightwave Technologies*, 2016, vol. 34, pp. 1672–1677.
11. 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.
12. Mori T., Sakamoto T., Wada M., Yamamoto T. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, pp. 2468–2479.
13. Ferreira F.M., Fonseca D., da Silva H.J.A. Design of few-mode fibers with M-modes and low differential mode delay. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, pp. 353–360.
14. Stillard P. Next-generation fibers for space-division-multiplexed transmission. *IEEE Journal of Lightwave Technologies*, 2015, vol. 33, pp. 1092–1099.
15. 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. *Proc. SPIE 9533*, 2015, pp. 953306-1 – 953306-8. doi:10.1117/12.2181085
16. 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.
17. Bourdine A.V., Burdin V.A., Delmukhametov O.R. *Sposob umen'sheniya differencial'noj modovoj zaderzhki mnogomodovogo opticheskogo volokna* [Method of reducing of differential-mode delay of multimode optical fiber]. Patent RF, no. 2458370, 2012.
18. Bourdine A.V. Design of refractive index profile for multimode optical fibers with low differential mode delay. *Journal of Optoelectronics Engineering*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 5–13. doi: 10.12691/joe-1-1-2
19. Adams M.J. *An introduction to optical waveguides*. New York: John Wiley and Sons, 1981. 401 p.
20. Bogoljubov A.N., Krasil'nikova A.V., Minaev D.V., Sveshnikov A.G. Metod konechnyh raznostej dlja reshenija zadach sinteza volnovodushhih sistem [finite difference method for solving problems of synthesis of waveguide systems]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2000, vol. 12, no. 1, pp. 13–24.
21. Bogoljubov A.N., Butkarev I.A., Sveshnikov A.G. Sintez volokonnykh svetovodov [Synthesis of optical fibers]. *Radiotekhnika*, 2004, vol. 12, pp. 4–12.
22. Bourdine A. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime. *Advances in Optical Technologies*, 2013, vol. 2013, pp. 469389-1–469389-18. doi: 10.1155/2013/469389
23. 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
24. Snyder A.W., Love J. *Optical waveguide theory*, Chapman & Hall, 738 p.
25. Gradstein I.S., Ryjik I.M. *Tablicy integralov* [Tables of integrals]. Moscow, GIFML Publ., 1962. 1100 p.

Received 20.08.2016