

УДК 535.3; 535.5

В.А. Бурдин, А.В. БурдинПоволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Самара, Россия**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО
МАЛОМОДОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО
ИМПУЛЬСА В ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ**

Представлены результаты моделирования нелинейного маломодового распространения оптических импульсов в оптических волокнах. Результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными. Процесс распространения оптических импульсов в оптических волокнах описывается системой связанных нелинейных уравнений Шредингера, которая решалась модифицированным методом расщепления по физическим процессам. В отличие от традиционных процедур, эта модификация включает в себя коррекцию профиля показателя преломления и расчет параметров мод в дополнение к выполнению линейного и нелинейного операторов.

Ключевые слова: волоконный световод, мода, маломодовый режим передачи, система связанных нелинейных уравнений Шредингера, эффект Керра, профиль показателя преломления, метод приближения Гаусса, эквивалентный радиус пятна моды, метод расщепления по физическим процессам.

V.A. Burdin, A.V. BurdinPovolzhskiy State University of Telecommunications
and Informatics, Samara, Russian Federation**SIMULATION RESULTS OF OPTICAL PULSE
NONLINEAR FEW-MODE PROPAGATION
OVER OPTICAL FIBER**

We present simulation results of optical pulse nonlinear few-mode propagation over optical fibers, which were compared with published experimental data. Optical pulse propagation over optical fiber is described by nonlinear Schrodinger equations that was solved by modified split step method. Proposed solution differs from known approaches by correction of refractive index profile and following computing of mode transmission parameters in addition to linear and nonlinear operators.

Keywords: optical fiber, mode, few-mode propagation, system of couple nonlinear Schrodinger equations, Kerr effect, refractive index profile, Gaussian approximation, equivalent mode field radius, splitstep method.

Известно, что для передачи на волоконно-оптических сетях со скоростью более 1 Гбит/с необходимо использовать когерентные источники оптического излучения – лазеры, а при возбуждении мно-

Статья подготовлена по материалам доклада на Российском семинаре по волоконным лазерам – 2016.

гомодовых волоконных световодов лазерами в световодах распространяется ограниченное число из всех направляемых мод, поддерживаемых световодом [1]. Имеет место так называемое маломодовое распространение оптического излучения в многомодовом световоде. Поскольку наряду с многосердцевинными оптическими волокнами маломодовые и многомодовые оптические волокна для высокоскоростных транспортных сетей связи в перспективе рассматриваются как альтернатива применяемым в настоящее время стандартным ступенчатым одномодовым оптическим волокнам [2], возрастает интерес к моделированию маломодового распространения оптических импульсов в протяженных линиях с учетом факторов нелинейности и дисперсии.

Распространение мод в протяженных волоконных световодах принято описывать системой связанных нелинейных уравнений Шредингера [3–7], уравнения в которой можно привести к виду

$$\frac{\partial A_m}{\partial \eta} + \beta_{m_1} \frac{\partial A_m}{\partial \tau} - j\beta_{m_2} \frac{\partial^2 A_m}{\partial \tau^2} + \alpha_m A_m + \sum jK_{n,m} A_n^2 A_m = 0, \quad (1)$$

где A_m – огибающая сигнала, переносимого m -й модой световода; β_{m_1} – параметр групповой задержки m -й моды световода; β_{m_2} – параметр хроматической дисперсии m -й моды световода; α_m – параметр затухания m -й моды световода; $K_{m, n}$ – коэффициент связи между модами m и n ; η , τ – нормированные расстояние и время.

Формы записи уравнения (1) в литературе отличаются в основном способом описания связей между модами. В работах [8–10] для расчета параметров мод и их взаимосвязей предлагается использовать модифицированный метод приближения Гаусса [11–13], основанный на совместном применении классического метода приближения Гаусса [14] и метода стратификации, что, в отличие от классического метода приближения Гаусса, позволяет получить аналитические решения для параметров моды волоконного световода с произвольным профилем показателя преломления. При этом обеспечивается основное преимущество метода приближения Гаусса – определение параметров для каждой моды отдельно.

Согласно методу приближения Гаусса распределение поля некоторой линейно-поляризованной моды азимутального порядка l и радиального порядка m по сечению круглого волоконного световода описывается функцией Лагерра–Гаусса [14]:

$$F_{l,m}(x) = x^{l/2} L_{m-1}^{(l)}(x) \exp(-x/2). \quad (2)$$

Здесь $x = R^2/R_0^2$; $R = r/a$; $R_0 = r_0/a$, где r_0 – эквивалентный радиус пятна моды; r – радиальная координата; a – радиус сердцевины волоконного световода; $L_m^{(l)}(y)$ – полином Лагерра от аргумента y .

Для круглого волоконного световода с профилем показателя преломления из N слоев в общем виде уравнение для эквивалентного радиуса пятна моды записывается как [13]

$$a^2 \cdot \left\{ \sum_{j=1}^N k^2 \Delta n_j^2 R_j^2 \cdot F_{l,m}^2(x_j) \right\} - C_{l,m} = 0, \quad (3)$$

а формула для постоянной распространения имеет вид

$$\beta^2 = k^2 n_c^2 - \frac{m!}{(l+m-1)!} \left\{ \left[\sum_{j=1}^N k^2 \Delta n_j^2 \Phi(x_j) \right] + \frac{C_{l,m}}{a^2 \cdot R_0^2} \right\}. \quad (4)$$

Здесь

$$C_{l,m} = \frac{m(m+l-1)!}{2(m-1)!} + \frac{(m+l-1)(m+l-2)!}{2(m-2)!} + l^2 \sum_{i=0}^{m-2} \frac{(i+l-1)!}{i!};$$

$$\Phi_m^{(l)}(y) = L_G(m, l, 1; m, l, 1; l, 1, y);$$

$$L_G(m_1, l_1, \eta_1; m_2, l_2, \eta_2; p, b, y) = \sum_{k=0}^{m_1+m_2} g_k E_G(k+p, b, y);$$

$$E_G(p, b, y) = \exp(-by) \sum_{k=0}^p \frac{p!}{(p-k)!} \cdot \frac{y^{p-k}}{b^{k+1}};$$

$$g_k = \sum_{j=\max(0, k-m_1)}^{\min(k, m_2)} q_{j, m_2}^{(l_2)} \cdot q_{k-j, m_1}^{(l_1)}; \quad q_{k, m_i}^{(l_i)} = \frac{(l_i + m_i)!}{k!(m_i - k)!(l_i + k)!} \cdot \eta_i^k;$$

$$\Delta n_j^2 = n_j^2 - n_{j+1}^2; \quad x_j = R_j / R_0.$$

Поскольку осевым и угловым рассогласованиями можно пренебречь, то для коэффициентов связи между модами m и n справедлива формула [12]

$$K_{m,n} = \frac{n_2 \Gamma(m) \Gamma(n) (2r_{0m} r_{0n})^{2l+2}}{\lambda r_{0m}^2 \cdot \Gamma(l+m) \Gamma(l+n)} \left[\frac{(r_{0m} - r_{0n})^{m+n-2}}{(r_{0m} + r_{0n})^{m+n+l-1}} \right]^2 \times$$

$$\times \left[\sum_{k=0}^{\min\left(\begin{smallmatrix} m-1 \\ n-1 \end{smallmatrix}\right)} (-1)^k \frac{\Gamma(m+n+l-k-1)}{\Gamma(m-k) \Gamma(m-k) k!} \left(\frac{r_{0m}^2 + r_{0n}^2}{r_{0m}^2 - r_{0n}^2} \right)^k \right]^2. \quad (5)$$

Одним из наиболее эффективных методов решения нелинейного уравнения Шредингера является метод расщепления по физическим процессам [3]. В работах [9–10] авторами было предложено изменить процедуру вычислений данным методом, вводя на каждом шаге вычислений для элементарного участка линии, помимо линейного и нелинейного операторов, дополнительный оператор коррекции параметров мод и их взаимосвязей. В частности, для симметричной схемы реализации метода расщепления по физическим процессам от традиционной схемы

$$D_{1/2}(A_m) N(A_m) D_{1/2}(A_m)$$

предлагается переход к схеме

$$D_{1/2}(A_m) N(A_m) C(A_m) D_{1/2}(A_m).$$

Здесь $D(A_m)$ – линейный оператор; $N(A_m)$ – нелинейный оператор; $C(A_m)$ – дополнительный оператор, который предусматривает коррекцию профиля показателя преломления световода с учетом факторов нелинейности и параметров мод и их взаимосвязей из формул (3)–(5) для измененного профиля. Профиль показателя преломления, измененный вследствие керровской нелинейности, определяется формулой

$$\bar{n}(r) = n(r) + \frac{n_2}{\pi} \sum \frac{A_m^2}{r_{0m}^2}, \quad (6)$$

где $n(r)$ – показатель преломления световода в линейном режиме; r_{0m} – эквивалентный радиус пятна m -й моды; n_2 – параметр керровской нелинейности.

В целях верификации предложенной модификации метода расщепления по физическим процессам мы воспользовались данными эксперимента, подробно описанного в работах [15–20]. В данном эксперименте титан-сапфировый фемтосекундный лазер с синхронизацией мод и центральной длиной волны 798 нм генерировал импульсы с

длительностью 12 фс и пиковой мощностью 175 кВт. Оптическое излучение на выходе лазера разделяли с помощью оптического делителя. Одну часть оптической мощности с помощью зеркала подавали на спектрометр или интерферометрический автокоррелятор, а другую часть с помощью объектива с рефлектором вводили в оптическое волокно. Применение таких объективов исключило дополнительную хроматическую дисперсию. На выходе оптического волокна оптические импульсы выводили с помощью такого же объектива. С помощью спектрометра измеряли спектральную характеристику оптического сигнала на входе и выходе оптического волокна, а с помощью интерферометрического автокоррелятора – импульсный отклик.

В эксперименте использовали оптическое волокно F-SPV с сохранением поляризации типа бабочка (BowTie) производства Newport, оптимизированное для работы на длине волны 633 нм. Длина оптического волокна составляла 2,5 мм. В таблице представлены основные характеристики данного типа оптического волокна [21–22].

Характеристики оптического волокна F-SPV

№ п/п	Наименование	Значение
1	Профиль показателя преломления	Ступенчатый
2	Рабочий диапазон длин волн	633–688 нм
3	Диаметр оболочки световода	125 ± 1 мкм
4	Диаметр покрытия световода	245 ± 12 мкм
5	Числовая апертура	0,14–0,18
6	Тип волокна	Одномодовое с сохранением поляризации
7	Номинальный диаметр поля моды	3,2 мкм
8	Максимальное затухание	≤15 дБ/км
9	Длина биений	≤2 мм
10	Длина волны отсечки	500–600 нм

В дальнейшем в расчетах конструктивные параметры данного оптического волокна брали из работы [23] согласно рис. 1.

В работах [15–20] вместе с экспериментальными данными представлены результаты вычислений спектральной характеристики и импульсного отклика на выходе световода. В частности, расчеты были выполнены методом FDTD. При этом в исследованиях [15–20] полагали, что режим передачи одномодовый, и пренебрегали структурой световода, определяя хроматическую дисперсию как материальную дисперсию чистого плавленого кварцевого стекла.

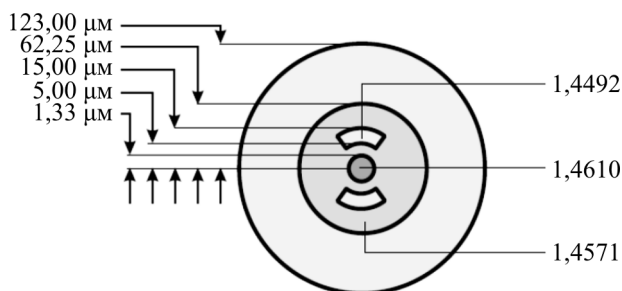


Рис. 1. Конструктивные характеристики оптического волокна F-SPV

На наш взгляд, эти допущения не вполне корректны. Во-первых, в одномодовом волокне с сохранением поляризации распространяются две моды с ортогональной поляризацией. Другими словами, имеет место маломодовый режим передачи. Во-вторых, полагаем, что в данном случае необходимо учитывать и волноводную дисперсию.

Уравнение (1) рекомендуется для описания процессов распространения импульсов длительностью более 5 пс [3]. Для более коротких оптических импульсов это уравнение следует дополнить слагаемыми, учитывающими нелинейные эффекты, обусловленные рамановским рассеянием, и дисперсию более высокого порядка соответственно. При этом, как отмечено в работе [3], дополненное указанными выше слагаемыми нелинейное уравнение Шредингера может быть рекомендовано для моделирования процессов распространения оптических импульсов длительностью от 10 фс и более. Соответственно, применение модели (1) для условий описанного эксперимента может дать лишь некоторое первое приближение. Однако на первом (предварительном) этапе оценивания корректности предлагаемых решений может быть достаточно такого грубого приближения.

С этой целью, решая систему уравнений (1) предложенным модифицированным методом расщепления по физическим процессам, для условий описанного выше эксперимента моделировали отклики на выходе оптического волокна на воздействие оптического импульса. При моделировании полагали, что режим передачи – маломодовый (в оптическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды), моды на входе оптического волокна возбуждаются равномерно, двулучепреломление – величина постоянная, потери пренебрежимо малы, а показатель преломления легированного кварцевого стекла прямо пропорционален концентрации легирующей добавки. Параметры мод определяли сле-

дующим образом. Характеристики «быстрой» моды рассчитывали по формулам (3)–(6) как для осесимметричного световода с профилем показателя преломления, построенным вдоль «быстрой» оси оптического волокна с сохранением поляризации. Характеристики «медленной» моды определяли по характеристикам «быстрой», полагая, что для данного волокна двулучепреломление есть величина постоянная. Погрешности полученных таким способом оценок параметров мод достаточно велики. Однако это считалось приемлемым, поскольку в целом используемая при моделировании система уравнений (1) дает только грубое приближение.

Результаты моделирования спектральной характеристики сигнала и импульсного отклика на выходе волокна представлены на рис. 2 и 3. Там же приведены представленные в исследованиях [15–20] экспериментальные кривые и результаты вычислений методом FDTD, полученные в предположении об одномодовом режиме передачи. Как следует из рис. 1, спектральная характеристика, полученная предложенным способом, в целом согласуется с экспериментальной кривой и даже лучше, чем рассчитанная методом FDTD для одномодового режима. Такое же заключение следует из анализа кривых на рис. 3. Импульсный отклик, полученный в результате моделирования предложенным способом для маломодового режима передачи в целом согласуется с экспериментальной кривой. При этом длительность импульса и особенно его форма в большей мере соответствуют экспериментальным данным, чем представленные в работах [15–20] результаты вычислений методом FDTD для одномодового режима передачи.

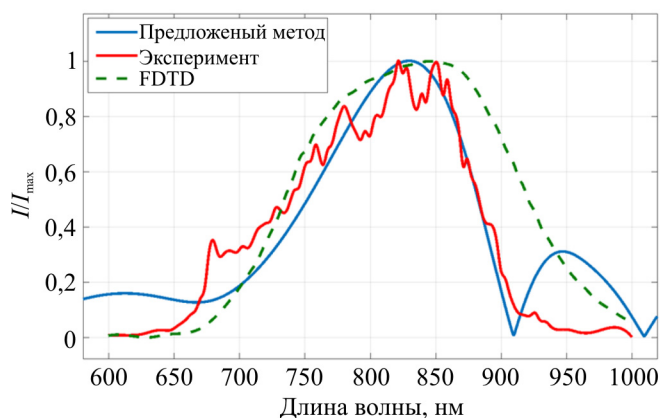


Рис. 2. Спектральные характеристики отклика на выходе оптического волокна

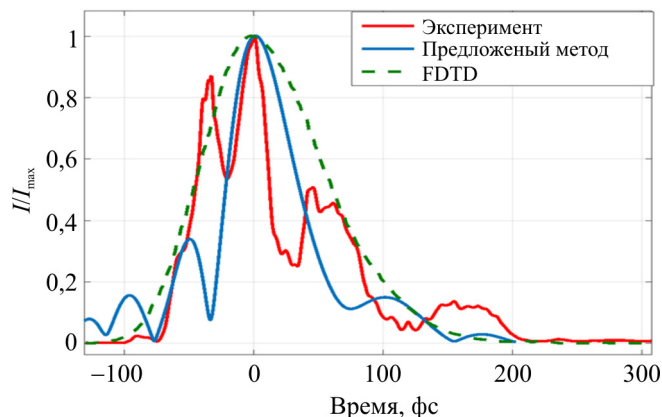


Рис. 3. Кривые импульсного отклика на выходе оптического волокна

На основании полученных результатов моделирования можно сделать следующие выводы. Во-первых, для условий рассматриваемого эксперимента необходимо учитывать маломодовый режим передачи в оптическом волокне с сохранением поляризации. Во-вторых, и спектральная характеристика, и импульсный отклик, полученные в результате моделирования, в целом хорошо согласуются с экспериментальными кривыми, что позволяет сделать заключение о корректности применения предложенной процедуры моделирования. Для уменьшения отклонений теоретических кривых от экспериментальных необходимо использовать более полную систему связанных нелинейных уравнений Шредингера, учитывающую нелинейные эффекты рамановского рассеяния и дисперсию более высокого порядка. Кроме того, для условий рассматриваемого эксперимента это требует вывода, применимого в рамках предлагаемого способа моделирования и обеспечивающего приемлемую погрешность решения для расчета параметров мод оптического волокна с сохранением поляризации типа бабочка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60015 мол а дк.

Список литературы

1. Bottacchi S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre: theory and design methods for 10GbE systems. – Wiley, 2006. – 653 p.
2. Essiambre R.-J., Tkach R.W. Capacity trends and limits of optical communication networks // Proceedings of the IEEE. – 2012. – Vol. 100, № 5. – P. 1035–1055.

3. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optic. – NY: Academic Press, 2013. – 648 p.
4. Сисакян И.Н., Шварцбург А.В. Нелинейная динамика пикосекундных импульсов в волоконно-оптических световодах // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 9. – С. 1703–1721.
5. Широков С.М. Приближенные параметрические модели динамики самовоздействия импульсов в нелинейных оптических средах с модовой дисперсией // Компьютерная оптика. – 1995. – Т. 14-15, ч. 2. – С. 117–124.
6. Nonlinear semi-analytical model for simulation of few-mode fiber transmission / F. Ferreira, S. Jansen, P. Monteiro, H. Silva // IEEE Photonics Technology Letters. – 2012. – Vol. 24, № 4. – P. 240–242.
7. Mumtaz S., Essiambre R-J., Agrawal G.P. Nonlinear propagation in multimode and multicore fibers: generalization of the Manakov equations // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31, № 3. – P. 398–406.
8. Burdin V.A. Approximate solution of coupled NLS equations // SPIE Proceedings. – 2008. – Vol. 7026. – P. 07-1-8.
9. Burdin V.A., Bourdine A.V. Modeling and simulation of a few-mode long-haul fiber optic transmission link // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9533. – P. 07-1-6.
10. Burdin V.A., Bourdine A.V. Model for a few-mode nonlinear propagation of optical pulse in multimode optical fiber // OWTNM 2016 Proceedings. – 2016. – P. 11.
11. Бурдин В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. – М.: Радио и связь, 2002. – 312 с.
12. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. – М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.
13. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Решение для произвольной направляемой моды круглого оптического волокна на основе метода приближения Гаусса // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14 (2). – С. 65–72.
14. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
15. Comparison between theory and experiment of nonlinear propagation for 4,5-cycle optical pulses in a fused-silica fiber / N. Karasawa, S. Nakamura, R. Morita, H. Shigekawa, M. Yamashita // Nonlinear Optics. – 2000. – Vol. 24. – P. 133–138.

16. Measurements of third-order dispersion effects for generation of high-repetition-rate, sub-three-cycle transform-limited pulses from a glass fiber / S. Nakamura, L. Li, N. Karasawa, R. Morita, H. Shigekawa, M. Yamashita // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 41, № 3A. – P. 1369–1373.

17. Finite-difference time-domain calculation with all parameters of Sellmeier's fitting equation for 12-fs laser pulse propagation in a silica fiber / S. Nakamura, Y. Koyamada, N. Yoshida, N. Karasawa, H. Sone, M. Ohtani, Y. Mizuta, R. Morita, H. Shigekawa, M. Yamashita // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2002. – Vol. 14, № 4. – P. 480–482.

18. Nakamura S., Takasawa N., Koyamada Y. Comparison between finite-difference time-domain calculation with all parameters of sellmeier's fitting equation and experimental results for slightly chirped 12 fs laser pulse propagation in silica fiber // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2005. – Vol. 23, № 2. – P. 855–863.

19. Extended finite difference time domain analysis of induced phase modulation and four-wave mixing between two-color femtosecond laser pulses in a silica fiber with different initial delays / S. Nakamura, N. Takasawa, Y. Koyamada, H. Sone, L. Xu, R. Morita, M. Yamashita // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2005. – Vol. 44, № 10. – P. 7453–7459.

20. Nakamura S. Comparison between finite-difference time-domain method and experimental results for femtosecond laser pulse propagation, coherence and ultrashort pulse laser emission // *Intech*. – 2010. – P. 449–442.

21. Discription of F-SPV polarization maintaining fiber. – URL: <https://www.newport.com/p/F-SPV> (дата обращения: 17.06.2016).

22. Standard polarization maintaining fibers. – URL: <https://www.newport.com/f/standard-polarization-maintaining-fibers?q=:familyRelevance:suppress:false:npCategory:polarization-maintaining-optical-fibers> (дата обращения: 14.06.2016).

23. Krieg M.L. Absolute heterodyne interferometer for strongly aspherical mirrors. – 2004. – 177 p.

References

1. Bottacchi S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre: theory and design methods for 10GbE systems. Wiley, 2006. 653 p.

2. Essiambre R.-J., Tkach R.W. Capacity trends and limits of optical communication networks. *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, no. 5, pp. 1035-1055.

3. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optic. New York: Academic Press, 2013. 648 p.

4. Sisakian I.N., Shvartsburg A.V. Nelineinaia dinamika pikosekundnykh impul'sov v volokonno-opticheskikh svetovodakh [Nonlinear dynamics of picosecond pulses in optical fibers]. *Kvantovaya elektronika*, 1984, vol. 11, no. 9, pp. 1703-1721.

5. Shirokov S.M. Priblizhennye parametricheskie modeli dinamiki samovozdeistviia impul'sov v nelineinykh opticheskikh sredakh s modovoi dispersiei [Approximate parametric models of the dynamics of self-action of pulses in nonlinear optical media with modal dispersion]. *Komp'iuternaia optika*, 1995, vol. 14-15, part 2, pp. 117-124.

6. Ferreira F., Jansen S., Monteiro P., Silva H. Nonlinear semi-analytical model for simulation of few-mode fiber transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, vol. 24, no. 4, pp. 240-242.

7. Mumtaz S., Essiambre R-J., Agrawal G.P. Nonlinear propagation in multimode and multicore fibers: generalization of the Manakov equations. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 398-406.

8. Burdin V.A. Approximate solution of coupled NLS equations. *SPIE Proceedings*, 2008, vol. 7026, pp. 07-1-8.

9. Burdin V.A., Bourdine A.V. Modeling and simulation of a few-mode long-haul fiber optic transmission link. *SPIE Proceedings*. 2015, vol. 9533, pp. 07-1-6.

10. Burdin V.A., Bourdine A.V. Model for a few-mode nonlinear propagation of optical pulse in multimode optical fiber. *OWTNM 2016 Proceedings*, 2016, p. 11.

11. Burdin V.A. Osnovy modelirovaniia kusochno-reguliarnykh volokonno-opticheskikh linii peredachi setei sviazi [Fundamentals of modeling of piecewise-regular fiber-optic transmission networks]. Moscow: Radio i sviaz', 2002. 312 p.

12. Andreev V.A., Burdin A.V. Mnogomodovye opticheskie volokna. Teoriia i prilozheniia na vysokoskorostnykh setiakh sviazi [Multimode optical fibers. Theory and applications in high-speed communication networks]. Moscow: Radio i sviaz', 2004. 248 p.

13. Burdin V.A., Burdin A.V. Reshenie dlia proizvol'noi napravliaemoi mody kruglogo opticheskogo volokna na osnove metoda priblizheniia Gaussa [The solution for an arbitrary directed mode of round optical fiber based on the Gaussian approximation method]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2011, vol. 14 (2), pp. 65-72.

14. Snaider A., Lav Dzh. Teoriia opticheskikh volnovodov [The theory of optical waveguides]. Moscow: Radio i sviaz', 1987. 656 p.

15. Karasawa N., Nakamura S., Morita R., Shigekawa H., Yamashita M. Comparison between theory and experiment of nonlinear propagation for 4,5-cycle optical pulses in a fused-silica fiber. *Nonlinear Optics*, 2000, vol. 24, pp. 133-138.

16. Nakamura S., Li L., Karasawa N., Morita R., Shigekawa H., Yamashita M. Measurements of third-order dispersion effects for generation of high-repetition-rate, sub-three-cycle transform-limited pulses from a glass fiber. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 41, no. 3A, pp. 1369-1373.

17. Nakamura S., Koyamada Y., Yoshida N., Karasawa N., Sone H., Ohtani M., Mizuta Y., Morita R., Shigekawa H., Yamashita M. Finite-difference time-domain calculation with all parameters of sellmeier's fitting equation for 12-fs laser pulse propagation in a silica fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, vol. 14, no. 4, pp. 480-482.

18. Nakamura S., Takasawa N., Koyamada Y. Comparison between finite-difference time-domain calculation with all parameters of sellmeier's fitting equation and experimental results for slightly chirped 12 fs laser pulse propagation in silica fiber. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, no. 2, pp. 855-863.

19. Nakamura S., Takasawa N., Koyamada Y., Sone H., Xu L., Morita R., Yamashita M. extended finite difference time domain analysis of induced phase modulation and four-wave mixing between two-color femtosecond laser pulses in a silica fiber with different initial delays. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 44, no. 10, pp. 7453-7459.

20. Nakamura S. Comparison between finite-difference time-domain method and experimental results for femtosecond laser pulse propagation, coherence and ultrashort pulse laser emission. *InTech*, 2010, p. 449-442.

21. Description of F-SPV polarization maintaining fiber, available at: <https://www.newport.com/p/F-SPV> (accessed 17 June 2016).

24. Standard polarization maintaining fibers, available at: <https://www.newport.com/f/standard-polarization-maintaining-fibers?q=:familyRelevance:suppress:false:npCategory:polarization-maintaining-optical-fibers> (accessed 14 June 2016).

22. Krieg M.L. Absolute heterodyne interferometer for strongly aspherical mirrors. 2004. 177 p.