

Моделирование протяженной волоконно-оптической линии передачи с двумодовыми оптическими волокнами

В.А. Бурдин^а, А.В. Бурдин^а

^а Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 443010, ул. Л. Толстого, 23, Самара, Россия

Аннотация

Представлены результаты моделирования волоконно-оптической линии передачи протяженностью 6000 км с двумодовыми оптическими волокнами и эрбиевыми оптическими усилителями, расположенными периодически через 100 км. Рассматривалась передача с канальной скоростью 100 Гбит/с и форматом модуляции DP-DQPSK для нескольких вариантов организации оптического канала связи. В том числе, при использовании отдельных линейно-поляризованных мод, оптических вихревых мод. Результаты моделирования сопоставлены с полученными для тех же условий результатами моделирования волоконно-оптической линии передачи с одномодовыми оптическими волокнами.

Ключевые слова: система связанных нелинейных уравнений Шредингера; маломодовое оптическое волокно; волоконно-оптическая линия связи; метод приближения Гаусса; метод расщепления по физическим процессам; линейно-поляризованные моды; оптический вихрь.

1. Введение

С приближением пропускной способности современных транспортных сетей связи к так называемому «нелинейному пределу Шеннона» возрастает интерес к маломодовым оптическим волокнам, которые рассматриваются в качестве одной из альтернатив одномодовым оптическим волокнам [1-4]. Разработаны конструкции маломодовых оптических волокон [5-8]. Известны примеры экспериментальной демонстрации возможностей их применения на линиях дальней связи [9-12]. Разрабатываются модели протяженных волоконно-оптических линий с маломодовыми оптическими волокнами, методами математического моделирования исследуются потенциальные возможности применения таких волокон на транспортных сетях. Так, в работе [5] представлены результаты моделирования протяженной волоконно-оптической линии связи с двумодовыми оптическими волокнами, в которой для создания оптического канала использовалась только одна из поддерживаемых в данном оптическом волокне направляемых линейно-поляризованных мод LP_{01} или LP_{11} . Показаны преимущества передачи на отдельных линейно-поляризованных модах двумодового оптического волокна по сравнению с типовыми одномодовыми волокнами. Вместе с тем, в маломодовых оптических волокнах возможно применение комбинаций мод, распространяются оптические вихревые моды [13,14]. В ряде исследований [8,16,17] отмечается, что оптические вихревые моды более устойчивы к возмущениям и их применение предпочтительнее для формирования оптических каналов связи. Учитывая это, интересно сравнить различные варианты использования мод в маломодовых оптических волокнах для образования каналов связи протяженных волоконно-оптических линий передачи. В данной работе эта задача рассмотрена для примера линии дальней связи протяженностью 6000 км с двумодовыми оптическими волокнами и периодически установленными эрбиевыми оптическими усилителями. Представлены результаты моделирования передачи сигналов с форматом модуляции DQPSK и канальной скоростью 100 Гбит/с.

2. Модель волоконно-оптической линии передачи с маломодовыми оптическими волокнами

Для моделирования распространения оптических импульсов в маломодовом оптическом волокне используем систему связанных нелинейных уравнений Шредингера в виде [5,18-23]:

$$j \frac{\partial A_{l,m}}{\partial z} + j\beta_{1l,m} \frac{\partial A_{l,m}}{\partial t} + \beta_{2l,m} \frac{\partial^2 A_{l,m}}{\partial t^2} + j\alpha_{l,m} A_{l,m} + \gamma \cdot \sum \frac{C_{l,m;p,q}}{2 \cdot R_{l,m}^2} |A_{p,q}|^2 A_{l,m} = 0, \quad (1)$$

$$C_{l,m;p,q} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{l,m}|^2 \cdot |E_{p,q}|^2 dx dy}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{l,m}|^2 dx dy \right) \cdot \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{p,q}|^2 dx dy \right)}, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{n_2}{\lambda \cdot a^2}.$$

где

$A_{l,m}$ – комплексная огибающая моды азимутального порядка l и радиального порядка m ;

$\alpha_{l,m}$ – коэффициент затухания моды порядка l, m ;

$\beta_{1l,m}, \beta_{2l,m}$ – обратные значения групповой скорости и параметра дисперсия моды порядка l, m ;

$C_{lm;p,q}$ – коэффициент связи моды порядков l, m с модой порядков p, q ;

E_{lm} – распределение электрической напряженности поля моды порядков l, m по сечению световода;

n_2 – коэффициент нелинейности материала оптического волокна;

λ – рабочая длина волны;

a – радиус сердцевины световода;

l, m – азимутальный и радиальный порядок моды, соответственно.

Решение системы (1) при моделировании осуществляли численно методом расщепления по физическим процессам (Split-Step Fourier Method – SSFM) [18,19,24]. В общем случае данный подход позволяет находить решение для кусочно-регулярной линии передачи и учитывать линейную связь между модами. В данной работе линейной полагали, что для телекоммуникационных оптических кабелей и волокон линейной межмодовой связью можно пренебречь. Это допущение позволило более детально сравнить влияние именно факторов нелинейности при передаче на отдельных линейно-поляризованных модах и их комбинациях.

При моделировании волоконно-оптической линии использовали известные модели передатчика и приемника оптических сигналов формата DQPSK и модель эрбиевого оптического усилителя, подробно описанные в работе [25]. При моделировании оптического усилителя учитывали усиленное спонтанное излучение (Amplified Spontaneous Emission – ASE) и полагали, что усилитель полностью компенсирует потери в волокне на усилительном участке.

Дисперсия компенсировалась с помощью эквалайзера, установленного на выходе регенерационного участка, параметры которого определялись предварительно по результатам тестирования. Вероятность ошибок кодовой последовательности после обработки сигнала эквалайзером оценивали по Q-фактору в соответствии с рекомендациями на основе алгоритма, подробно описанного в работе [25].

3. Расчет параметров мод оптического волокна

При определении параметров мод маломодового оптического волокна учитывали, что оно является слабонаправляющим. Это позволило воспользоваться представлением о слабонаправляемых модах [26] и применить простой метод приближения Гаусса [27]. Для оптического волокна со сложным профилем показателя преломления можно использовать модификацию метода приближения Гаусса [28], согласно которой уравнение для эквивалентного радиуса пятна моды имеет вид:

$$\left\{ \sum_{i=1}^N k^2 \Delta n_i^2 r_i^2 [F_m^{(i)}(x_i)]^2 \right\} - C = 0, \quad (3)$$

А ее постоянная распространения рассчитывается по формуле:

$$\beta_{l,m}^2 = k^2 n_0^2 - \frac{m!}{(l+m-1)!} \left\{ \left[\sum_{i=1}^N k^2 \Delta n_i^2 \Phi_m^{(i)}(x_i) \right] + \frac{C}{a^2 \cdot R_{l,m}^2} \right\}, \quad (4)$$

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

Здесь

$$[F_m^{(i)}(x)]^2 = x^l [L_{m-1}^{(i)}(x)]^2 \exp(-x),$$

$$\Phi_m^{(i)}(x) = \exp(-x) \cdot \sum_{q=0}^{2m} g_q \cdot \left[x^q + \sum_{k=1}^{q+l} \frac{(q+l)!}{(q+l-k)!} x^{q+l-k} \right],$$

$$g_q = \sum_{j=0}^q b_j \cdot b_{q-j}; \quad b_q = \frac{(l+m)!}{q!(m-q)!(l+q)!}$$

$$\Delta n_i^2 = n_i^2 - n_{i+1}^2; \quad x = R^2 / R_{l,m}^2; \quad R = r/a$$

где $L_p^{(l)}(x)$ – полиномы Лагерра;

n_i^2 – показатель преломления материала i - того слоя световода;

a – радиус сердцевины;

r – радиальная координата.

Для рассматриваемого двумодового ступенчатого оптического волокна формулы значительно упрощаются. Для фундаментальной моды LP_{01} из (3)-(4) следуют известные аналитические формулы [27]:

$$\beta_{0,1}^2 = k^2 n_0^2 - \frac{1}{a^2} \left(1 + \frac{1}{R_{0,1}^2} \right), \quad (5)$$

$$R_{0,1}^2 = \frac{1}{2 \ln(V)}, \quad (6)$$

Для второй моды LP_{11} из (3)-(4) получаем уравнение для эквивалентного радиуса пятна моды и формулу для постоянной распространения в виде:

$$\frac{V^2}{R_{1,1}^2} \exp\left(-\frac{1}{R_{1,1}^2}\right) - 2 = 0, \quad (7)$$

$$\beta_{1,1}^2 = k^2 n_0^2 - \frac{2}{a^2} \left(1 + R_{1,1}^2 + \frac{1}{R_{1,1}^2} \right) \quad (8)$$

Как известно [8, 14,15], вихревые моды (vortex) могут быть описаны комбинацией линейно-поляризованных мод. В данной работе будем рассматривать распространение в двумодовом волокне вихревой моды с комплексной амплитудой, описываемой комбинацией составляющих линейно-поляризованной моды LP_{11} вида [29]:

$$U_{1,1}(R, \varphi) = F_1^{(1)}(x_{1,1}) \cdot \begin{cases} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{cases} - F_1^{(1)}(x_{1,1}) \cdot \begin{cases} \cos(\varphi + \pi/2) \\ \sin(\varphi + \pi/2) \end{cases} \cdot \exp\left(j \frac{\pi}{2}\right), \quad (9)$$

$$F_1^{(1)}(x_{1,1}) = x_{1,1}^{1/2} \cdot L_0^{(1)}(x_{1,1}) \cdot \exp(-x_{1,1}/2), \quad x_{1,1} = R^2/R_{1,1}^2. \quad (10)$$

4. Результаты моделирования волоконно-оптической линии передачи

Моделировали волоконно-оптическую линию передачи протяженностью 6000 км с периодически установленными эрбиевыми оптическими усилителями. Длина каждого усилительного участка 100 км. Используется двумодовое ступенчатое слабонаправляющее оптическое волокно, обеспечивающее условия распространения для двух линейно-поляризованных мод LP_{01} и LP_{11} . Оптическое волокно изготовлено из плавленого кварцевого стекла. Оболочка из чистого кварцевого стекла, сердцевина из кварцевого стекла, легированного германием. Оптическое волокно имеет ступенчатый профиль показателя преломления. Радиус сердцевины 4,5 мкм. Относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки $(n_{01}-n_{cl})/n_{cl} = 2,5 \cdot 10^{-3}$. Формат модуляции DP-DQPSK. Скорость передачи в оптическом канале 100 Гбит/с. Были рассмотрены варианты создания оптического канала на одной из линейно-поляризованных мод. В этом случае, как и в работе [5] полагали, что усиливается только одна рабочая мода. В качестве альтернативы моделировали оптический канал на двух линейно-поляризованных модах и на вихревой моде (optical vortex). Для случая передачи на двух линейно-поляризованных модах были рассмотрены два варианта приема, которые отличались лишь схемой включения эквалайзера. Все результаты моделирования сравнивались с данными, полученными для аналогичной волоконно-оптической линии передачи с типовыми одномодовыми оптическими волокнами SMF. В результате моделирования были получены зависимости вероятности ошибок на приеме в зависимости от уровня передаваемой мощности в оптическом канале. Потенциальные возможности оптического канала, как и в работе [5], оценивали по максимальному значению мощности в оптическом канале, при котором за счет использования корректирующих кодов сигнал еще может быть принят с требуемым качеством. Согласно [30] при передаче сигналов с рассматриваемыми форматами модуляции в оптических каналах с дисперсией и нелинейностью граница возможностей применения классических схем коррекции ошибок (FEC Limit) лежит в области вероятностей ошибок 10^{-2} - 10^{-3} . Здесь, как и в работе [5], в качестве предельного было принято значение вероятности ошибок $3,8 \cdot 10^{-3}$.

На рис.1 приведен пример одной из полученных в процессе моделирования глаз-диаграмм. На рис. 2 представлены результаты моделирования для случаев использования для передачи по двумодовому оптическому волокну отдельных линейно-поляризованных мод. Как видим, применение двумодового оптического волокна при использовании моды LP_{01} позволяет увеличить мощность оптического излучения в оптическом канале по сравнению с одномодовым оптическим волокном на 2.37 дБм, а при использовании моды LP_{11} на 3.48 дБ. Данные результаты в целом согласуются с результатами исследований, представленными в работе [5], и экспериментальными данными, приведенными в [9].

На рис. 3 представлены результаты моделирования при организации оптического канала в двумодовом оптическом волокне на двух линейно-поляризованных модах. Здесь выигрыш по сравнению с применением одномодового оптического волокна составляет, соответственно, 5.25 дБм, или 6.19 дБм, в зависимости от выбора способа приема. По сравнению с передачей отдельно по одной из поддерживаемых в волокне направляемых линейно-поляризованных мод выигрыш за счет совместного использования двух направляемых мод составляет от 2.7 дБм до 3.8 дБм.

На рис. 4 представлены результаты моделирования при организации оптического канала в двумодовом оптическом волокне с использованием вихревой моды. Здесь выигрыш по сравнению с применением одномодового оптического волокна составил 5.14 дБм. То есть, почти столько же, что и при работе оптического канала по двум линейно-поляризованным модам. Это позволяет сделать заключение о том, что для снижения влияния факторов нелинейности

для организации оптического канала более предпочтительно использование не отдельных линейно-поляризованных мод, а их комбинаций.

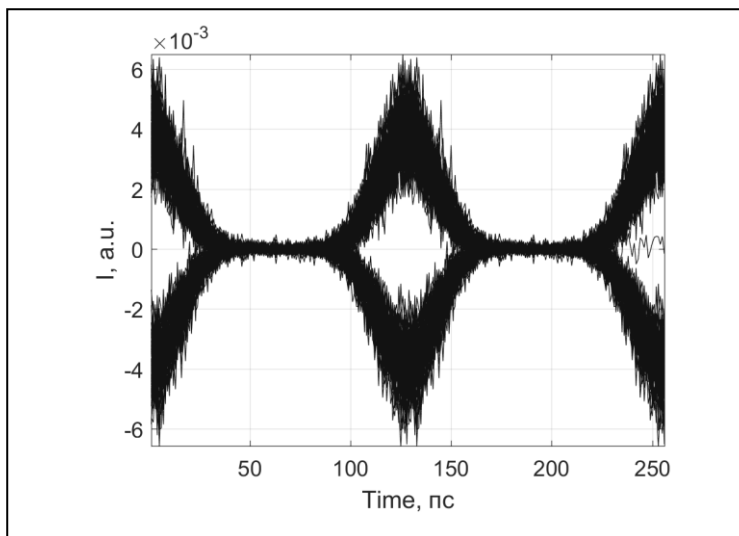


Рис. 1. Пример глаз-диаграммы на приеме.

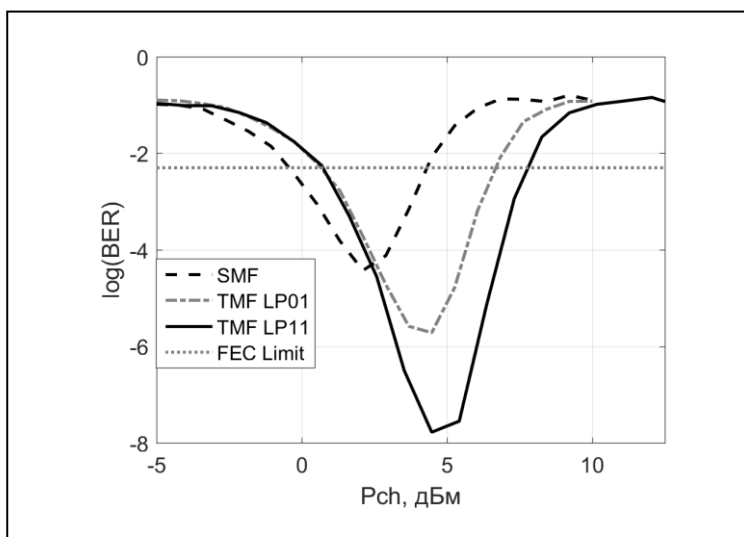


Рис. 2. Результаты моделирования организации оптического канала на одной линейно-поляризованной моде.

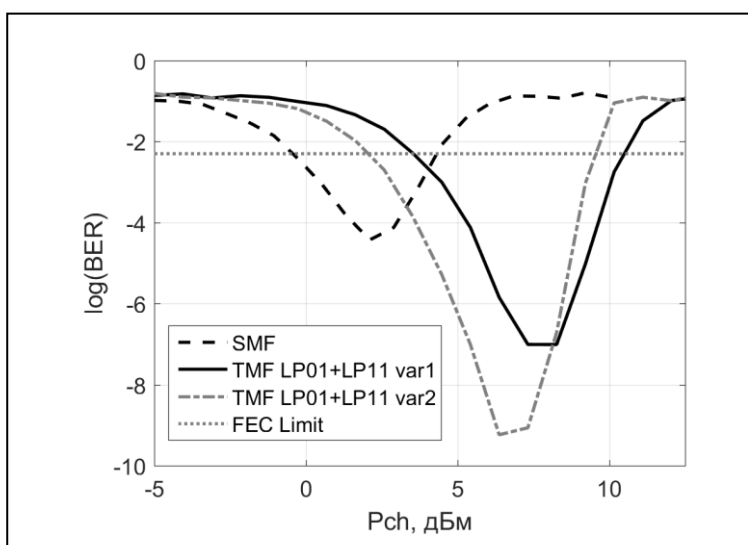


Рис. 3. Результаты моделирования организации оптического канала при совместном использовании мод LP_{01} и LP_{11} .

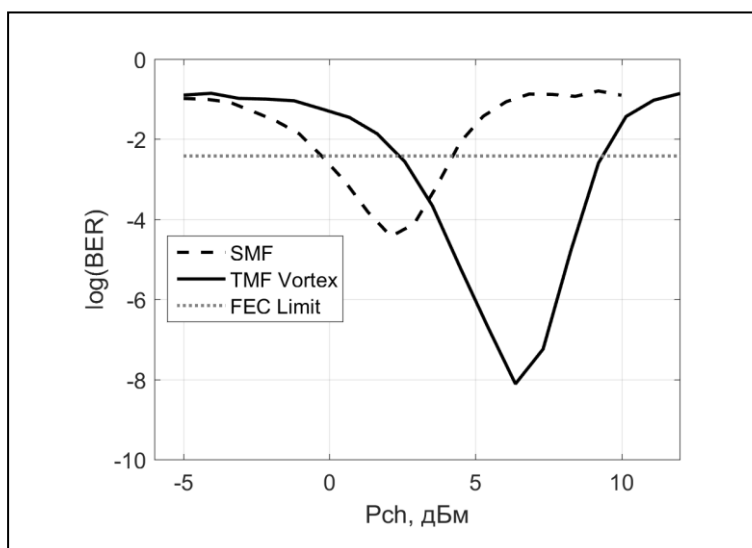


Рис. 4. Результаты моделирования организации оптического канала при совместном использовании мод LP01 и LP11.

5. Заключение

Представленные в работе результаты моделирования наглядно демонстрируют преимущества применения маломодового оптического волокна по сравнению с одномодовым с точки зрения снижения действия факторов нелинейности при передаче на дальние расстояния. Показано, что для передачи по двумодовым оптическим волокнам для снижения влияния факторов нелинейности использование комбинаций линейно-поляризованных мод предпочтительнее по сравнению с передачей по отдельным линейно-поляризованным модам.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-6001515 мол_а_дк и гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8

Литература

- [1] Essiambre, R.-J. Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks/ R.-J. Essiambre, R.W. Tkach// Proc. of the IEEE. – 2012. – Vol. 100(5). – P. 1035-1055. DOI: 10.1109/JLT.2009.2039464.
- [2] Ellis, A.D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres / A.D. Ellis // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8434. – P. 84340H. DOI: 10.1117/12.928093.
- [3] Richardson, D. J. Space-division multiplexing in optical fibres / D. J. Richardson, J. M. Fini, L. E. Nelson // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7. – P. 354–362.
- [4] Андреев, В.А. Маломодовый режим передачи по оптическим волокнам: применение на высокоскоростных ВОЛС / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, А.В. Бурдин // Электросвязь. – 2013. – №12. – С. 27-30.
- [5] Ferreira, F. 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.
- [6] Li, A. Space-Division Multiplexed High-Speed Superchannel Transmission Over Few-Mode Fiber/ A. Li, X. Chen, A. A. Amin, J. Ye, W. Shieh// Journal of Lightwave Technology – 2012. – Vol. 30(24). – P. 3953-3964.
- [7] Grüner-Nielsen, L. Few Mode Transmission Fiber With Low DGD, Low Mode Coupling, and Low Loss / L. Grüner-Nielsen, Y. Sun, J. W. Nicholson, D. Jakobsen, K. G. Jespersen, R. Lingle, B. Pálsdóttir// Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Vol. 30(23). – P. 3693-3698.
- [8] Wang, J. Advances in communications using optical vortices/ J. Wang// Photon. Res.- 2016.- Vol. 4(5).-P. B14-B28
- [9] Yaman, F. Long distance transmission in few-mode fibers / F. Yaman, N. Bai, B. Zhu, T. Wang, G. Li // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 13250–13257.
- [10] Yaman, F. 10 x 112Gb/s PDM-QPSK transmission over 5032 km in few-mode fibers/ F. Yaman, N. Bai, Y. K. Huang, M. F. Huang, B. Zhu, T. Wang, G. Li// Opt. Express. – 2010. – Vol. 18(20). – P. 21342-21349.
- [11] Chen, X. Reception of mode-division multiplexed superchannel via few-mode compatible optical add/drop multiplexer/ X. Chen, A. Li, J. Ye, A. Al Amin, W. Shieh // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20(13). – P. 14302-14307. DOI: 10.1364/OE.20.014302.
- [12] Salsi, M. Transmission at 2x100Gb/s, over Two Modes of 40km-long Prototype Few-Mode Fiber, using LCOS-based Mode Multiplexer and Demultiplexer / M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, P. Brindel, H. Mardoyan, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Astruc, L. Provost, F Cerou, G. Charlet // Opt. Express. – 2012. – Vol. 19(17). – P. 16593-16600. DOI: 10.1364/OFC.2011.PDPB9.
- [13] Волярь, А.В. Вихревая природа мод оптического волокна: 1. Структура собственных мод 2. Распространение оптических вихрей/ А.В. Волярь, Т.А. Фадеева// Письма в ЖТФ.- 1996.- т.22(8).- P.57-67.
- [14] Хонина, С. Н., Фазовый дифракционный фильтр, предназначенный для анализа световых полей на выходе волокна со ступенчатым профилем показателя преломления / С. Н. Хонина, П. В. Скиданов, В. В. Котляр // Компьютерная оптика.- 2003.- Т. 25.- С. 89-94.
- [15] Black, R.J. optical waveguide modes/ R.J. Black, L. Gagnon – New York: The McGraw-Hill Companies, 2010. – 187 p.

- [16] Wang, J. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing/ J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. E. Willner// *Nature Photonics*.- 2012.- Vol. 6.- 488-496.
- [17] Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams/A.E. Willner, Huang H., Yan Y., Ren Y., Ahmed N., Xie G., Bao C., Li L., Cao Y., Zhao Z., Wang J., J. Lavery M. P. , M.Tur, Ramachandran S., Molisch A. F., Ashrafi N., Ashrafi S.// *Advances in Optics and Photonics*.- 2015.- Vol.7.- 66–106. DOI:10.1364/AOP.7.000066
- [18] Agrawal, G.P. *Nonlinear fiber optics* / G.P. Agrawal – New York: Academic Press, 2001. – 467 p.
- [19] Agrawal, G.P. *Applications of nonlinear fiber optics* / G.P. Agrawal – New York: Academic Press, 2011. – 459 p.
- [20] Сисакян, И.Н. Нелинейная динамика пикосекундных импульсов в волоконно-оптических световодах/ И.Н. Сисакян, А.В. Шварцбург // *Квантовая электроника*. –1984. – Т. 11, № 9. – С. 1703-1721.
- [21] Широков, С.М. Приближенные параметрические модели динамики самовоздействия импульсов в нелинейных оптических средах с модовой дисперсией/ С.М. Широков // *Компьютерная оптика*. –1995. – Т. 14-15, № 2. – С. 117-124.
- [22] Mumtaz, S. Nonlinear propagation in multimode and Multicore fibers: generalization of the Manakov equations. / S. Mumtaz, R-J. Essiambre, G. P. Agrawal // *Journal of Lightwave Technology*. – 2013.- Vol. 31(3).- P. 398-406. DOI: 10.1109/JLT.2012.2231401
- [23] Burdin, V. A. Modeling and simulation of a few-mode long-haul fiber optic transmission link. / V. A. Burdin, A.V. Bourdine // *Proc. of SPIE*. – 2015.- Vol. 9533.- P. 953307-1 - 953307-6. DOI: 10.1117/12.2181127
- [24] Zhang, Q. Global Simulation Accuracy Control in the Split-Step Fourier Simulation of Vector Optical Fiber Communication / Q. Zhang, S. Karri, M. Khaliq, L. Xing, M. I. Hayee// *Journal of Communications*. – 2015.- Vol. 10(1).- P. 1-8. DOI: 10.12720/jcm.10.1.1-8
- [25] Binh, L.N. *Optical fiber communications systems. Theory and Practice with MATLAB and Simulink Models*/ L.N. Binh – New York: Taylor&Francis Ltd., 2010. – 534 p.
- [26] Gloge, D. Weakly guided fibers/ D. Gloge// *Appl. Opt.* – 1971.- Vol. 10.- P. 2252-2258.
- [27] Снайдер, А. Теория оптических волноводов/ А. Снайдер, Дж. Лав. – Москва: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- [28] Bourdine, A. Solution for arbitrary order guided mode propagating over optical circle fiber based on Gaussian approximation/ A. Bourdine, V.Burdin// *Proc. of SPIE*.- 2012.- Vol. 8410.- P. 841009-1-841009-1
- [29] Гринь, Л.Е. О генерации лазерных пучков с винтовой структурой волнового фронта/ Л.Е.Гринь, П.В.Короленко, Н.Н.Федотов// *Оптика и спектроскопия*.- 1992.- Т.73, № 5.- С. 1007-1010.
- [30] Шокин, Ю. И. Особенности передачи и обработки информации в сверхскоростных волоконно-оптических линиях связи/ Ю. И. Шокин, А. С. Скидин, М. П. Федорук// *Информационно-управляющие системы*.- 2013.- № 2.- С. 54-59.