

Влияние формата модуляции на нелинейные искажения в системах передачи с пространственным мультиплексированием

Р.В. Кутлюяров¹, В.С. Любопыттов^{1,2}, В.Х. Багманов¹, А.Х. Султанов¹

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Карла Маркса, 12, Уфа, Россия, 450000

²Technical University of Denmark (DTU), Ørsteds Plads 343, Kgs. Lyngby, 2800, Denmark

Аннотация. Работа посвящена анализу нелинейного смешения мод в маломодовых волоконно-оптических системах передачи с пространственным мультиплексированием каналов в условиях линейного модового смешения. Посредством численного решения системы обобщенных связанных нелинейных уравнений шредингеровского типа, описывающих одновременное распространение нескольких модовых сигналов, определены нелинейные искажения для различных форматов модуляции полезного сигнала. Показано, что QAM-модулированный сигнал более устойчив к эффекту повышения нелинейных искажений вследствие линейного смешения мод, чем NRZ-сигнал.

1. Введение

Пространственное мультиплексирование сигналов (space division multiplexing - SDM) является объектом пристального внимания исследователей на протяжении уже нескольких лет [1-4] в качестве технологии, которая может быть использована для значительного увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи. Развитие этого направления связано с необходимостью решения ряда фундаментальных и технологических задач. Одной из важнейших задач является выбор волоконного световода, который, с одной стороны, обеспечит низкий уровень искажений передаваемых маломодовых сигналов, а с другой – будет совместим с существующими технологиями создания оптических волокон, что позволит упростить внедрение подобных световодов на практике. Пространственное мультиплексирование сигналов может быть реализовано с использованием многосердцевидных волокон [5] или с использованием волокон с одной сердцевинкой, что соответствует модовому мультиплексированию сигналов. В волокне с одной сердцевинкой одновременно могут распространяться несколько пространственных мод, и значительный интерес представляют маломодовые волокна, поддерживающие распространение конечного, достаточно небольшого их количества. В ряде работ приводятся результаты исследований специальных волокон, подавляющих линейное смешение мод световода [6-8]. Другой подход к созданию маломодовых волокон заключается в использовании ступенчатого профиля показателя преломления и увеличенной сердцевины. Такие волокна хорошо совместимы с традиционной технологией изготовления, но пространственные моды в них подвержены сильному линейному смешению [9]. Компенсация линейного смешения мод – ещё одна важная задача, с которой

приходится сталкиваться при реализации систем с пространственным мультиплексированием. Компенсация может быть выполнена посредством цифровой обработки принятого сигнала с использованием технологии ММО (multiple input – multiple output) [10, 11] или полностью оптическими методами [12]. В обоих случаях компенсатор является линейным, и нелинейные искажения сигнала будут снижать его эффективность. Вообще говоря, нелинейные эффекты – один из основных факторов, ограничивающих пропускную способность систем передачи с пространственным мультиплексированием. Поэтому в последнее время значительное количество работ посвящено исследованию нелинейных эффектов при передаче модовых композиций в одном волокне. Система обобщенных связанных нелинейных уравнений шредингеровского типа была получена в [13]. Используя подход, развитый для одномодовых волокон большой длины, усредненные уравнения типа Манаква были получены для одновременной передачи нескольких мод [14, 15]. Также были существенно развиты методы теоретической и численной оценки межканальной нелинейной помехи в многоканальных системах передачи с мультиплексированием сигналов по длине волны. Как показано в [15], такая помеха в системах с пространственным мультиплексированием существенно зависит от физических механизмов, определяющих линейное смещение. Сильное смещение мод приводит к значительному снижению мощности помех взаимодействия спектральных каналов. Также в [16] было показано, что присутствие модовой дисперсии значительно снижает межмодовые нелинейные искажения. Модовая дисперсия между модами, не являющимися вырожденными, приводит к относительному сдвигу последовательностей бит различных модовых каналов во временной области и снижает их взаимное влияние. Необходимо отметить, что подобный эффект был описан для нелинейного взаимодействия спектральных каналов посредством фазовой кросс-модуляции для одномодовых систем с мультиплексированием по длине волны, где относительное смещение битовых последовательностей различных спектральных каналов определялось хроматической дисперсией волокна [17].

Прежде нами было проведено численное моделирование одновременной передачи нескольких модовых сигналов с линейным кодом NRZ в одном спектральном канале [18, 19]. Было показано, что присутствие линейного смещения, характеризуемого случайным перераспределением мощности между модами, приводит к накоплению нелинейных искажений, обусловленных фазовой кросс-модуляцией и фазовой самомодуляцией сигналов. В данной работе мы развиваем указанный подход для исследования передачи сигналов с квадратурной модуляцией. Следуя подходу, использованному в [18, 19], в качестве несущих сигналов мы рассматриваем вихревые моды волокна, то есть моды со спиральным фазовым фронтом.

2. Описание математической модели

Как было сказано выше, моделирование распространения модовых композиций в оптическом волокне основано на численном решении системы обобщенных связанных нелинейных уравнений шредингеровского типа:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = i(\beta_{0p} - \beta_r)A_p - \left(\beta_{1p} - \frac{1}{v_{gr}} \right) \frac{\partial A_p}{\partial t} - i \frac{\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} - \frac{\alpha}{2} A_p + i \sum_{lmn} f_{lmp} \gamma A_l^* A_m A_n + i \sum_m q_{mp} A_m, \quad (1)$$

где A_p – медленно меняющаяся амплитуда p -й пространственной моды в системе координат, движущейся с групповой скоростью v_{gr} вдоль оси z ,

β_r – произвольная референтная постоянная распространения для всех пространственных мод,

$$\beta_{0p} = \beta_p(\omega_0), \beta_{1p} = \partial \beta_p / \partial \omega \Big|_{\omega_0}, \beta_{2p} = \partial^2 \beta_p / \partial \omega^2 \Big|_{\omega_0} - \quad (2)$$

постоянная распространения на частоте несущей, величина, обратная групповой скорости, и дисперсия групповой скорости p -й пространственной моды соответственно,

γ – параметр нелинейности,

α – коэффициент затухания,

f_{lmp} – коэффициент нелинейного смещения мод,

q_{mp} – коэффициент линейного смещения мод, определяемый изгибом волокна.

Для целей численного моделирования волокно аппроксимируется последовательностью секций с постоянными параметрами. Длины секций, значения кривизны волокна принимаются случайными величинами с нормальным распределением.

С точки зрения развития телекоммуникационных приложений модового мультиплексирования существенный интерес представляют системы, работающие на длинах волн 850 нм и 1550 нм. На длине волны 850 нм стандартное волокно со ступенчатым профилем показателя преломления поддерживает распространение трех пространственных мод. В базе вихревых мод это LP11+, LP11- и фундаментальная мода LP01. Для моделирования сигналов с длиной волны 1550 нм рассматривается волокно с увеличенным сечением сердцевины, которое поддерживает распространение пяти мод: LP21+, LP21-, LP11+, LP11- и фундаментальной моды LP01. Базис ортогональных мод определяет значение коэффициентов нелинейного смешения. Для упомянутых трех мод вычисления дают 18 ненулевых значений коэффициентов [18], а для пяти мод – 83 ненулевых коэффициента, значения которых приводятся в таблице 1.

Таблица 1. Ненулевые коэффициенты нелинейного смешения мод для волокна, поддерживающего распространение пяти пространственных мод (абсолютные значения).

Индексы мод	f_{lmp}
LP01,LP01,LP01,LP01	1,0000
LP11-, LP11-, LP11-, LP11-; LP11+, LP11+, LP11-, LP11-; LP11+, LP11-, LP11+, LP11-; LP11-, LP11+, LP11-, LP11+; LP11-, LP11-, LP11+, LP11+; LP11+, LP11+, LP11+, LP11+	0,6965
LP01, LP01, LP11-, LP11-; LP01, LP11-, LP01, LP11-; LP11+, LP01, LP01, LP11-; LP11-, LP01, LP11-, LP01; LP01, LP11+, LP11-, LP01; LP11-, LP11-, LP01, LP01; LP11+, LP11+, LP01, LP01; LP11-, LP01, LP01, LP11+; LP01, LP11+, LP01, LP11+; LP01, LP01, LP11+, LP11+	0,6589
LP21-, LP21-, LP21-, LP21-; LP21+, LP21+, LP21-, LP21-; LP21+, LP21-, LP21+, LP21-; LP21-, LP21+, LP21-, LP21+; LP21-, LP21-, LP21+, LP21+; LP21+, LP21+, LP21+, LP21+	0,6096
LP11-, LP11-, LP21-, LP21-; LP11+, LP11+, LP21-, LP21-; LP11-, LP21-, LP11-, LP21-; LP21+, LP11+, LP11-, LP21-; LP11+, LP21-, LP11+, LP21-; LP21+, LP11-, LP11+, LP21-; LP21-, LP11-, LP21-, LP11-; LP11+, LP21+, LP21-, LP11-; LP21-, LP21-, LP11-, LP11-; LP21+, LP21+, LP11-, LP11-; LP11+, LP21-, LP21+, LP11-; LP21+, LP11-, LP21+, LP11-; LP11+, LP21-, LP21-, LP11+; LP11-, LP21+, LP21-, LP11+; LP21-, LP21-, LP11+, LP11+; LP21+, LP21+, LP11+, LP11+; LP11-, LP21-, LP21+, LP11+; LP21+, LP11+, LP21+, LP11+; LP21-, LP11+, LP11-, LP21+; LP11-, LP21+, LP11-, LP21+; LP21-, LP11-, LP11+, LP21+; LP11+, LP21+, LP11+, LP21+; LP11-, LP11-, LP21+, LP21+; LP11+, LP11+, LP21+, LP21+	0,6035
LP01, LP11-, LP11-, LP21-; LP11+, LP01, LP11-, LP21-; LP11+, LP11-, LP01, LP21-; LP11-, LP01, LP21-, LP11-; LP01, LP11+, LP21-, LP11-; LP11-, LP21-, LP01, LP11-; LP21+, LP11+, LP01, LP11-; LP01, LP21-, LP11+, LP11-; LP21+, LP01, LP11+, LP11-; LP11-, LP11+, LP21-, LP01; LP21-, LP11-, LP11-, LP01; LP11+, LP21+, LP11-, LP01; LP11-, LP21-, LP11+, LP01; LP21+, LP11+, LP11+, LP01; LP11+, LP11-, LP21+, LP01; LP21-, LP01, LP11-, LP11+; LP01, LP21+, LP11-, LP11+; LP11-, LP21-, LP01, LP11+; LP11+, LP21+, LP01, LP11+; LP01, LP11-, LP21+, LP11+; LP11+, LP01, LP21+, LP11+; LP11-, LP11+, LP01, LP21+; LP11-, LP01, LP11+, LP21+; LP01, LP11+, LP11+, LP21+	0,5567
LP01, LP01, LP21-, LP21-; LP01, LP21-, LP01, LP21-; LP21+, LP01, LP01, LP21-; LP21-, LP01, LP21-, LP01; LP01, LP21+, LP21-, LP01; LP21-, LP21-, LP01, LP01; LP21+, LP21+, LP01, LP01; LP21-, LP01, LP21+, LP01; LP21+, LP01, LP21+, LP01; LP21-, LP01, LP01, LP21+; LP01, LP21+, LP01, LP21+; LP01, LP01, LP21+, LP21+	0,4514

Для оценки нелинейных искажений система уравнений (1) решалась численно дважды для одного и того же набора случайных параметров, определяющих линейное смешение мод. В первом случае уравнения решались с учетом нелинейных членов, во втором – без них. Затем было вычислено среднеквадратичное отклонение амплитуды сигнала, полученного в результате воздействия дисперсионных и нелинейных членов уравнения, от амплитуды сигнала, полученного в результате воздействия только дисперсионных членов.

3. Результаты численного моделирования

В первой серии экспериментов были определены нелинейные искажения модовых сигналов с линейным кодом NRZ при передаче на длине волны 1550 нм в волокне, поддерживающем распространение пяти пространственных мод. Длительность одного импульса принималась равной 100 пс, длина линии – 2500 м. Сильное линейное смещение моделировалось посредством разбиения волокна на секции со средней длиной 25 см; слабое – на секции со средней длиной 5 м. Зависимости СКО нелинейных искажений от исходной мощности сигнала приведены на рисунке 1.

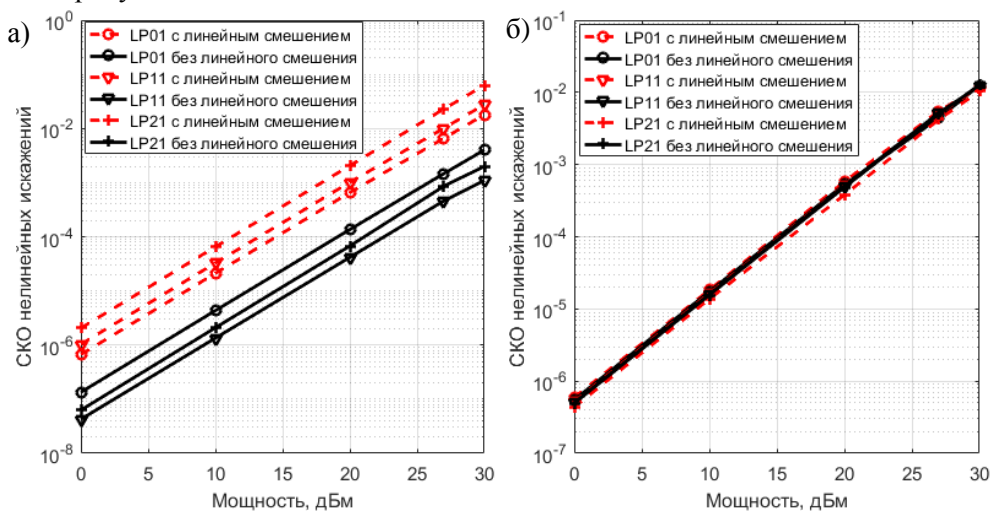


Рисунок 1. Нелинейные искажения в модовых каналах в волокне с увеличенной сердцевиной при передаче NRZ-сигнала на длине волны 1550 нм. а) в случае сильного линейного смещения; б) в случае слабого линейного смещения.

Во второй серии экспериментов определялись нелинейные искажения модовых сигналов с модуляцией QAM-16 и QAM-64 при передаче по тому же волокну. Длительность символа также принималась равной 100 пс. В качестве электрооптического преобразователя на передающей стороне был принят симметричный IQ-модулятор. Управляющими электрическими сигналами приняты псевдослучайные последовательности бит с NRZ-кодированием, обработанные фильтром с амплитудно-частотной характеристикой, имеющей форму приподнятого косинуса. Полоса пропускания фильтра принята равной 15 ГГц. Результаты моделирования приводятся на рисунках 2 и 3.

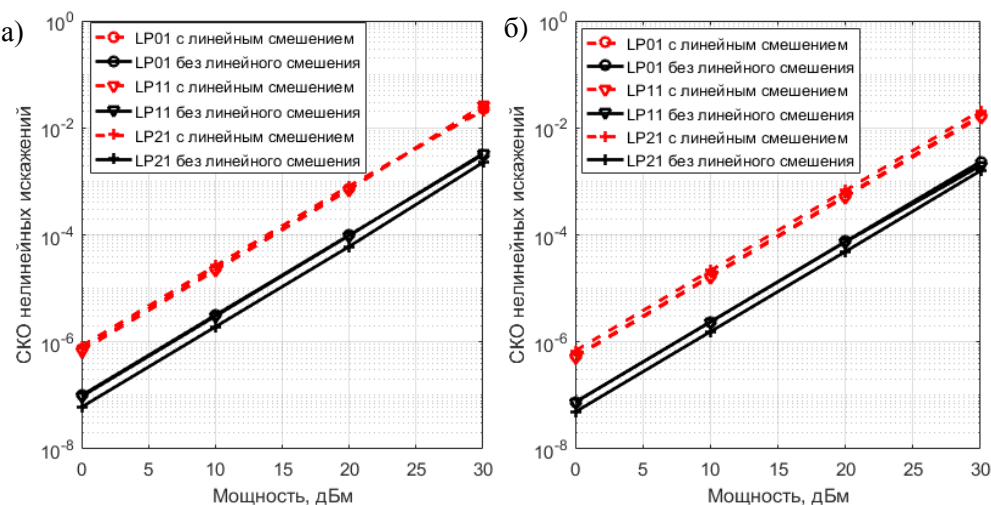


Рисунок 2. Нелинейные искажения в модовых каналах в волокне с увеличенной сердцевиной в режиме сильного смещения со средней длиной секции смещения 25 см на длине волны 1550 нм. а) Модуляция QAM-16; б) модуляция QAM-64.

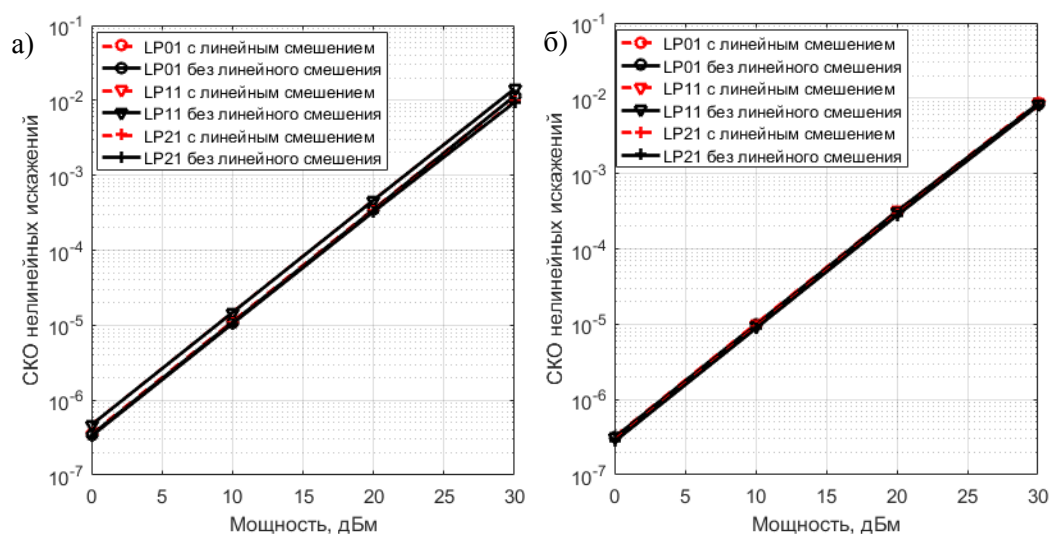


Рисунок 3. Нелинейные искажения в модовых каналах в волокне с увеличенной сердцевиной в режиме слабого смешения со средней длиной секции смешения 5 м на длине волны 1550 нм. а) Модуляция QAM-16; б) модуляция QAM-64.

Из приведенных результатов очевидно, что сильное линейное смешение приводит к увеличению нелинейных искажений и для NRZ-модулированного, и для QAM-модулированного сигналов. При слабом смешении для различных мод может наблюдаться как незначительное повышение, так и незначительное снижение нелинейных искажений.

Сравнивая результаты, приведенные на рисунках 1 – 3, можно сделать вывод о том, что для случая QAM-сигналов разница между уровнем нелинейных искажений разных модовых каналов существенно меньше, чем для случая NRZ-сигнала. Для мод первого и более высоких порядков это означает повышение устойчивости к увеличению нелинейных искажений под воздействием линейного смешения мод. Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение QAM-модуляции при передаче маломодовых сигналов позволяет получить более высокую устойчивость к росту нелинейных искажений вследствие линейного смешения мод, чем применение NRZ-кодирования с той же длительностью символов.

4. Литература

- [1] Sakaguchi, J. Space division multiplexed transmission of 109-Tb/s Data Signals Using Homogeneous Seven-Core Fiber / J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, M. Watanabe // *J. of Light w. Technol.* – 2012. – Vol. 30(4). – P. 658-665.
- [2] Wang, J. Multimode communications using orbital angular momentum / J. Wang, M.J. Padgett, S. Ramachandran, M.P.J. Lavery, H. Huang, Y. Yue, Y. Yan, N. Bozinovic, S.E. Golowich, A.E. Willner // *Optical Fiber Telecommunications VIB: Systems and Networks.* – Oxford: Elsevier, 2013.
- [3] Llorente, R. Spatial division multiplexing in the short and medium range: From the datacenter to the fronthaul / R. Llorente, M. Morant, D. Garcia-Rodriguez, J.L. Corral // *19th International Conference on Transparent Optical Networks.* – 2017. – P. 1-4.
- [4] Fiorani, M. Spatial division multiplexing for high capacity optical interconnects in modular data centers / M. Fiorani, M. Tornatore, J. Chen, L. Wosinska, B. Mukherjee // *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking.* – 2017. – Vol. 9(2). – P. A143-A153.
- [5] Nakajima, K. Multi-Core Fiber Technology: Next Generation Optical Communication Strategy / K. Nakajima, T. Matsui, K. Saito, T. Sakamoto, N. Araki // *IEEE Communications Standards Magazine.* – 2017. – Vol. 1(3). – P. 38-45.

- [6] Bozinovic, N. Are orbital angular momentum (OAM/vortex) states of light long-lived in fibers? / N. Bozinovic, P. Kristensen, S. Ramachandran // *Frontiers Optics OSA Tech. Dig. (CD)*. – 2011. – P. LWL3.
- [7] Bozinovic, N. Orbital angular momentum (OAM) based mode division multiplexing (MDM) over a Km-length fiber / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, A.E. Willner, S. Ramachandran // *European Conference and Exhibition on Optical Communication, OSA Technical Digest (online)*. – 2012. – P. Th.3.C.6.
- [8] Bozinovic, N. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner // *Science*. – 2013. – Vol. 340. – P. 1545-1548.
- [9] Ho, K.-P. Mode coupling and its Impact on spatially multiplexed systems / K.-P. Ho, J.M. Kahn // *Optical Fiber Telecommunications VIB: Systems and Networks*. – Oxford: Elsevier, 2013.
- [10] Winzer, P.J. Spatial multiplexing using multiple-input multiple-output signal processing / P.J. Winzer, R. Ryf, S. Randel // *Optical Fiber Telecommunications VIB: Systems and Networks*. – Oxford: Elsevier, 2013.
- [11] Van Uden, R.G.H. MIMO equalization with adaptive step size for few-mode fiber transmission systems / R.G.H. van Uden, C.M. Okonkwo, V.A.J.M. Sleiffer, H. Waardt, A.M.J. Koonen // *Opt. Express*. – 2014. – Vol. 22(1). – P. 119-126.
- [12] Lyubopytov, V.S. Optical-domain Compensation for Coupling between Optical Fiber Conjugate Vortex Modes / V.S. Lyubopytov, A. Tatarczak, X. Lu, R.V. Kutluyarov, S. Rommel, A.Kh. Sultanov, I.T. Monroy // *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*. – 2015. – P. PDP_T12_1001.
- [13] Poletti, F. Description of ultrashort pulse propagation in multimode optical fibers / F. Poletti, P. Horak // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2008. – Vol. 25(10). – P. 1645-1654.
- [14] Mumtaz, S. Nonlinear Propagation in Multimode and Multicore Fibers: Generalization of the Manakov Equations / S. Mumtaz, R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal // *J Lightwave Technol.* – 2013. – Vol. 31(3). – P. 398-406.
- [15] Antonelli, C. Modeling of Nonlinear Propagation in Space-Division Multiplexed Fiber-Optic Transmission / C. Antonelli, M. Shtaif, A. Mecozzi // *J. Lightwave Technol.* – 2016. – Vol. 34(1). – P. 36-54.
- [16] Antonelli, C. Nonlinear interference noise in space-division multiplexed transmission through optical fibers / C. Antonelli, O. Golani, M. Shtaif, A. Mecozzi // *Opt. Express*. – 2017. – Vol. 25(12). – P. 13055-13078.
- [17] Khosravani, R. Bit-pattern-dependent polarization rotation in first-order PMD-compensated WDM systems / R. Khosravani, Y.W. Song, Y. Xie, L.-S. Yan, A.E. Willner, C.R. Menyuk // *Optics Communications*. – 2006. – Vol. 257(1). – P. 191-196.
- [18] Kutluyarov, R.V. Influence of the linear mode coupling on the nonlinear impairments in few-mode fibers / R.V. Kutluyarov, V.S. Lyubopytov, V.Kh. Bagmanov, A.Kh. Sultanov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 201C. – P. 148-154.
- [19] Kutluyarov, R.V. Increase of nonlinear signal distortions due to linear mode coupling in space division multiplexed systems / R.V. Kutluyarov, V.S. Lyubopytov, V.Kh. Bagmanov, A.Kh. Sultanov // *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. – 2017. – P. 282-286.

Influence of the modulation format on the nonlinear impairments in space division multiplexed systems

R.V. Kutluyarov¹, V.S. Lyubopytov^{1,2}, V.Kh. Bagmanov¹, A.Kh. Sultanov¹

¹Ufa State Aviation Technical University, K. Marx street 12, Ufa, Russia, 450000

²Technical University of Denmark (DTU), Ørsteds Plads 343, Kgs. Lyngby, 2800, Denmark

Abstract. This paper is focused on the analysis of nonlinear mode coupling in space division multiplexed communication systems with linear mode coupling. Simultaneous propagation of modulated mode channels is simulated by numerical solving of the system of generalized coupled nonlinear Schroedinger equations. Different types of modulation format are simulated and corresponding nonlinear impairments are presented. It is shown that QAM-modulated signal is more robust for increasing of nonlinear impairments due to linear mode coupling than NRZ-coded signal.

Keywords: vortex modes, few-mode fibers, Kerr-nonlinearities, space division multiplexing.