

Модель межмодовых связей оптических волокон строительной длины кабеля на основе разложения по методу Прони

А.В. Бурдин¹, В.А. Бурдин¹, К.А. Волков¹, О.Р. Дельмухаметов¹, Е.Ю. Еремчук¹

¹Поволжский университет телекоммуникаций и информатики, Московское шоссе 77, Самара, Россия, 443090

Аннотация. В работе представлена базирующаяся на разложении по методу Прони модель для расчета коэффициентов связи мод в оптическом волокне на строительной длине кабеля по результатам измерений распределений связей или на основе моделирования распределений нерегулярностей оптического волокна. Приведены примеры расчетов зависимостей нормированных коэффициентов связи мод на строительной длине от расстройки частоты доминирующей компоненты разложения. Представленный анализ позволяет говорить о потенциальных возможностях предложенной модели, хотя, безусловно, она требует экспериментальной проверки.

1. Введение

Перспективы цифровой экономики и все возрастающая роль информационной среды в процессах развития общества ведут к ускорению темпов непрерывный роста потребностей в увеличении объемов передаваемой информации, что в итоге и привело к проблеме «нелинейного предела Шеннона» для современных волоконно-оптических сетей связи [1-5]. В качестве одного из альтернативных решений по преодолению данного предела рассматривают пространственное мультиплексирование с применением многосердцевидных или маломодовых оптических волокон [5]. Уже сегодня достигнуты значительные успехи в разработке волоконно-оптических линий с такими волокнами. Так, еще в марте 2018 года была продемонстрирована передача со скоростью 150 Тбит/с на расстояние 1050 км по кабельной линии с маломодовыми оптическими волокнами на трех модах LP_{0l} , LP_{11a} и LP_{11b} [6]. Разработка линий передачи базирующихся на новых принципах требует совершенствования известных и разработки новых моделей, описывающих процессы передачи данных в оптических каналах волоконно-оптических линий передачи. Наибольшее распространение для моделирования передачи информации в маломодовых линиях связи получили модели, базирующиеся на решении системы связанных нелинейных уравнений Шредингера [7-15]. При этом, для корректного учета межмодовых связей возникает потребность приведения распределенных связей мод к оценкам для шага вычислений.

Как известно [16, 17], связи мод делят на линейные и нелинейные. Нелинейная связь мод определяется конструкцией оптических волокон и уровнями передаваемой по ним мощности [16, 17]. Для регулярного оптического волокна коэффициенты линейной связи моды разного азимутального порядка равны нулю [18, 19]. Линейная связь мод обусловлена их нерегулярностями, которые также, как это принято в теории кабельных линий, могут быть

разделены на внутренние и стыковые. Внутренние нерегулярности оптических волокон, к которым относятся нерегулярности в строительных длинах кабелей, в свою очередь, могут быть разделены на внутриволоконные и кабельные [20]. Внутриволоконные обусловлены изменениями параметров конструкции оптического волокна: диаметра сердцевины, профиля показателя преломления, некруглости и т.п., - вдоль его длины. А кабельные вызваны изменениями параметров передачи оптического волокна, обусловленными конструкцией кабеля. Это, в частности, изгибы оптических волокон из-за избыточной длины, осевое кручение и т.д. В общем случае нерегулярности оптических волокон распределены вдоль кабельной линии случайным образом. Как следствие, распределения связей мод в оптических волокнах линий передачи также носят случайный характер [16-27].

На начальном этапе развития волоконно-оптических линий передачи и практически до начала 2000 годов межмодовые связи в оптических волокнах на нерегулярностях, в частности, макро и микроизгибах, рассматривали в основном с точки зрения вносимых дополнительных потерь в оптическом волокне при передаче оптического излучения [29-31], а также применения в сенсорных системах различного назначения [32-34]. Также межмодовые связи рассматривали при построении модовых мультиплексоров [35-38]. Однако, в при этом, не учитываются конкретные распределения связей мод вдоль линии, ограничиваются положениями о сильной или слабой связи мод, допускается, что функция распределения связей содержит непрерывный набор пространственно-частотных компонент, или же разрабатываются решения, которые должны обеспечить компенсацию искажений при всех возможных распределениях межмодовых связей на кабельной линии. Вместе с тем, перспективы применения на транспортных сетях связи маломодовых оптических волокон потребовали более детального исследования параметров распределений межмодовых связей в оптических волокнах кабельных линий связи, влияния распределений связей мод на качество передачи информации в линиях дальней связи [39]. Как следствие, разрабатываются методы измерений коэффициентов связи мод [26-28], в том числе их распределений на длине кабеля, разрабатываются описывающие эти распределения модели [7-8,15,17-19,40-41]. Как уже было отмечено ранее, для моделирования передачи информации в маломодовых линиях связи широкое распространение получили модели, базирующиеся на решении системы связанных нелинейных уравнений Шредингера [7-17]. Как правило, эту систему уравнений решают методом расщепления по физическим процессам, вычисляя на каждом шаге выполнения линейного оператора оценки коэффициентов связи мод на основе численных или аналитических моделей [7]. Известны модели для частных случаев сильной и слабой связи мод [7-8,39], приближенная модель для общего случая [15]. Основная проблема заключается в том, что в данные модели в качестве исходных данных вводятся параметры, которые достаточно приближенно отражают результаты практических измерений распределений связей мод и которые сложно связать с результатами измерений этих распределений на конкретных участках линии. В отличие от, например, хорошо известной теории взаимных влияний линий связи [42], которая позволяет по результатам измерений параметров взаимных влияний между цепями на отдельных участках линии делать прогноз для линии в целом и нормировать параметры взаимных влияний как для линии в целом, так и ее компонентов.

В данной работе представлена модель, позволяющая описывать межмодовые связи в оптических волокнах кабеля по результатам измерений на строительной длине на основе разложения по методу Прони, которое основано на применении комплексных экспонент или затухающих синусоид [43]. Известно применение разложения Прони для анализа акустических и сейсмических сигналов, обработки результатов измерений [44-49]. Отмечают его перспективность для анализа коротких импульсов и определения нестационарных компонент, анализа отраженных сигналов в кусочно-регулярных структурах [50]. С учетом вышесказанного, кусочно-регулярная структура волоконно-оптического тракта [51] и зависимость линейной связи мод от его нерегулярности позволяют говорить о потенциальных возможностях моделирования межмодовых связей оптических волокон кабельной линии на основе разложения по методу Прони. В предлагаемой работе представлен вывод основных формул и дано описание модели распределения межмодовых связей на основе разложения

Прони, приведен пример ее реализации. Однако здесь авторы ограничились моделированием связи мод в оптических волокнах строительной длины оптического кабеля без учета стыковых нерегулярностей.

2. Модель связи мод в оптическом волокне на строительной длине кабеля

Как уже было указано выше, здесь будем рассматривать связь мод в оптическом волокне в пределах строительной длины оптического кабеля без учета стыковых нерегулярностей. Учтем, что при конструировании оптических волокон и оптических кабелей стремятся минимизировать нерегулярность световодов. Как следствие, доля мощности, которой обмениваются моды из-за межмодовых связей, мала по сравнению с суммарной мощностью передаваемого по оптическому волокну оптического излучения, что позволяет пренебречь обратными переходами энергии между модами. А это, в свою очередь, позволяет воспользоваться известной моделью, описывающей переходную помеху на дальнем конце линии связи [17-19, 42, 52-54], согласно которой на дальнем конце переходная помеха с элементарного участка dy , расположенного на расстоянии y от ближнего конца линии равна:

$$e_{12}(y) = C_{12}(y) \exp(-\gamma_1 y) \exp[-\gamma_2(l-y)] dy. \quad (1)$$

где $E_{12}(y)$ – переходная помеха от моды 1 на моду 2 на дальнем конце линии, наведенная в точке y ; $C_{12}(y)$ – коэффициент связи между модами 1 и 2 в точке y ; γ_1, γ_2 – постоянные распространения моды 1 и 2, соответственно; l – длина линии.

Необходимо учитывать, что постоянные распространения мод – комплексные величины, равные сумме:

$$\gamma_i = \alpha_{gi} + j\beta_{gi} \quad (2)$$

где α_{gi}, β_{gi} – коэффициент затухания и коэффициент фазы i -той моды, соответственно.

Общую формулу для переходной помехи на дальнем конце линии получаем интегрируя (1):

$$E_{12} = E_0 \cdot \int_0^l C_{12}(y) \exp(-\gamma_1 y) \exp[-\gamma_2(l-y)] dy. \quad (3)$$

Для описания распределения коэффициента межмодовой связи вдоль слаборегулярного световода воспользуемся методом разложения Прони [43,44]:

$$C_{12}(y) = \sum_{k=1}^N A_k \exp(\alpha_k y + j2\pi f_k y + j\theta_k). \quad (4)$$

где $A_k, \theta_k, \alpha_k, f_k$ – параметры разложения Прони; N – число компонент разложения Прони. Подставляя (4) в (3) и интегрируя, получаем

$$E_{12} = E_0 \cdot e^{-\gamma_2 l} \cdot \sum_{k=1}^N A_k e^{j\theta_k} \frac{1 - e^{(\gamma_{pk} - \Delta\gamma_{21})l}}{\gamma_{pk} - \Delta\gamma_{21}}, \quad (5)$$

$$\gamma_{pk} = \alpha_k + j2\pi f_k,$$

$$\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1.$$

Переносимый модой 2 полезный сигнал на дальнем конце линии равен

$$E_{2l} = E_0 \cdot e^{-\gamma_2 l}. \quad (6)$$

Соответственно, разделив (5) на (6) получаем формулу для коэффициента связи между исследуемыми модами, приведенного к строительной длине кабеля с длиной оптического волокна l :

$$C_{12}^{(l)} = \sum_{k=1}^N A_k e^{j\theta_k} \frac{1 - e^{(\gamma_{pk} - \Delta\gamma_{21})l}}{\gamma_{pk} - \Delta\gamma_{21}}, \quad (7)$$

Предполагается, что данная модель будет применяться для оценивания коэффициентов связи между модами на строительной длине кабеля по результатам обработки данных измерений с использованием разложения по методу Прони.

3. Результаты моделирования

В данном разделе представлены результаты вычислений нормированных коэффициентов связи по формуле (6) на строительной длине кабеля с оптическим волокном длиной 5 км. Рассматривали маломодовое оптическое волокно для передачи двух линейно-поляризованных направляемых мод LP_{01} и LP_{11} со следующими характеристиками на длине волны 1550 нм – дифференциальная модовая задержка 0.08 пс/м, а коэффициенты затухания мод LP_{01} и LP_{11} 0,198 дБ/км и 0,191 дБ/км, соответственно [55]. Предполагалось, что имеет место одна доминирующая частота разложения Прони, для которой параметры разложения фиксированы. Задавали $A_{km}=0.2; 0.5$ или 0.8 , $\alpha_{km}=0$, $\theta_{km}=0$. Доминирующую частоту задавали как

$$f_{km} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2\pi} (1 + \eta) \quad (8)$$

Параметры остальных компонент разложения полагали случайными величинами с равномерным законом распределения и определяли из условий

$$\sum_{k=1}^N A_k = 1; -2 < \alpha_k < 2; 0 < \theta_k < 2\pi; -10 \cdot (\beta_2 - \beta_1) / 2\pi < f_k < 10 \cdot (\beta_2 - \beta_1) / 2\pi \quad (9)$$

Ограничились разложением из $N=20$ компонент. Поскольку такого числа, как правило, достаточно для описания распределений связи на строительной длине волокна. В результате моделирования были получены зависимости нормированных и приведенных к строительной длине коэффициентов связи между исследуемыми модами от параметра отстройки доминирующей частоты η и амплитуды доминирующей компоненты разложения Прони. Примеры полученных зависимостей представлены на рисунке 1.

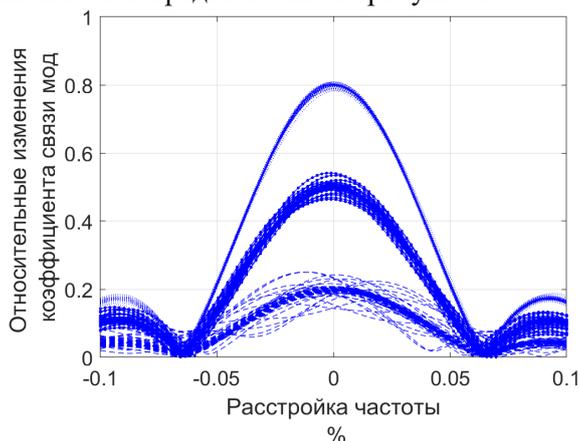


Рисунок 1. Зависимости коэффициента связи от расстройки доминирующей частоты при $A_k=0.2$ (---), $A_k=0.5$ (.-), $A_k=0.8$ (..).

Как и следовало ожидать, когда расстройка частоты доминирующей компоненты стремится к нулю нормированное значение коэффициента связи приближается к своему максимальному значению, которое приблизительно равно доле вклада доминирующей компоненты в суммарную мощность переходной помехи. При этом, с увеличением доли вклада доминирующей частоты уменьшается разброс значений коэффициента связи, обусловленный наличием других компонент разложения.

4. Заключение

В работе представлена базирующаяся на разложении по методу Прони модель для расчета коэффициентов связи мод в оптическом волокне на строительной длине кабеля по результатам измерений распределений связей или на основе моделирования распределений нерегулярностей оптического волокна. Приведены примеры расчетов зависимостей нормированных коэффициентов связи мод на строительной длине от расстройки частоты доминирующей компоненты разложения. Представленный анализ уже позволяет говорить о

потенциальных возможностях предложенной модели, хотя, безусловно, она требует экспериментальной проверки.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, DST, NSFC и NRF в рамках научного проекта № 19-57-80016 БРИКС_т.

6. Литература

- [1] Mitra, P.P. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications / P.P. Mitra, J.B. Stark // *Nature*. – 2001. – Vol. 441. – P. 1027-1030.
- [2] Essiambre, R.-J. Capacity Limits of Optical Fiber Networks / R.-J. Essiambre, G. Kramer, P.J. Winzer, G.J. Foschini, B. Goebel // *Journal of Lightwave Technology*. – 2010. – Vol. 28(4). – P. 662-701.
- [3] Mecozzi, A. Nonlinear Shannon Limit in Pseudolinear Coherent Systems / A. Mecozzi, R. Essiambre // *J. Lightwave Technol.* – 2012. – Vol. 30. – P. 2011-2024.
- [4] 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.
- [5] Ellis, A.D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres // *Proceedings of SPIE Nonlinear Optics and Applications VI*. – 2012. – Vol. 8434. – P. 84340H.
- [6] Rademacher, G. 159 Tbit/s C+L Band Transmission over 1045 km 3-Mode Graded-Index Few-Mode Fiber / G. Rademacher, R.S. Luís, B.J. Puttnam, T.A. Eriksson, E. Agrell, R. Maruyama, K. Aikawa, H. Furukawa, Y. Awaji, N. Wada // *OSA Technical Digest Postdeadline Papers*. – 2018. – Vol. 4. – P. 4.
- [7] 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.
- [8] Mumtaz, S. Nonlinear propagation in multimode and Multicore fibers: generalization of the Manakov equations / S. Mumtaz, R. Essiambre, G. Agrawal // *J. Lightwave Technol.* – 2013. – Vol. 31. – P. 398-406.
- [9] Fedoruk, M.P. Algorithms for numerical simulation of optical communication links based on multimode fiber / M.P. Fedoruk, O.S. Sidelnikov // *Computational Technologies*. – 2015. – Vol. 20(5). – P. 105-118.
- [10] 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.
- [11] Андреев, В.А. Моделирование межмодовых связей при прогнозах вероятностей ошибок маломодовых линий передачи / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, М.В. Дашков // *Вычислительные технологии*. – 2017. – Т. 22, № 6. – С. 4-11.
- [12] Burdin, V.A. Simulations of a few-mode fiber optic link / V.A. Burdin, A.V. Bourdine // *Proceedings of Progress In Elec-tromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 2017. – P. 1918-1923.
- [13] Burdin, V.A. Simulation of a long-haul fiber optic link with a two-mode optical fiber / V.A. Burdin, A.V. Bourdine // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 489-493. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-489-493.
- [14] Andreev, V.A. Simulation of two-mode fiber optic link with chromatic dispersion compensation at line amplifiers / V.A. Andreev, V.A. Burdin, A.V. Bourdine, M.V. Dashkov // *IEEE Conference Proceedings Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2018. – P. 1-4.
- [15] Bucha, Sh. Averaged nonlinear equations for multimode fibers valid in all regimes of random linear coupling / Sh. Bucha, S. Mumtaz, R.-J. Essiambre, A.M. Tulino, G.P. Agrawal // *Optical Fiber Technology*. – 2019. – Vol. 48. – P. 123-127.
- [16] Agrawal, G.P. *Nonlinear fiber optics* – New York: Academic Press, 2001. – 467 p.
- [17] Agrawal, G.P. *Applications of nonlinear fiber optics* – New York: Academic Press, 2011. – 459 p.

- [18] Снайдер, А. Applications of nonlinear fiber optics / А. Снайдер, Дж. Лав – М.: Р и С, 1987. – 656 с.
- [19] Black, R.J. Optical waveguide modes / R.J. Black, L. Gagnon – NY: The McGraw-Hill Companies, 2010. – 412 p.
- [20] Бурдин, В.А. Факторы и модели линейных межмодовых связей в волоконно-оптической кабельной линии / В.А. Бурдин, А.В. Бурдин // Фотон-экспресс. – 2017. – Т. 6, № 6(142). – С. 77.
- [21] Olshansky, R. Mode Coupling Effects in Graded-Index Optical Fibers // Applied Optics. – 2010. – Vol. 14(4). – P. 935-945.
- [22] Kitayama, K. Mode coupling coefficient measurements in optical fibers / K. Kitayama, M. Ikeda // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(24). – P. 3979-3983.
- [23] Blake, J.N. Analysis of intermodal coupling in a two-mode fiber with periodic microbends / J.N. Blake, B.Y. Kim, H.E. Engan, H.J. Shaw // Optics Letters. – 1987. – Vol. 12(4). – P. 281-283.
- [24] Puente, N.P. Investigation of mode coupling in optical fiber with controlled volume disorder / N.P. Puente, E.I. Chaikina, S. Herath, A. Yamilov // 2nd Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications Proc. of SPIE. – 2010. – Vol. 7839. – P. 78391O-1.
- [25] Kahn, J.M. Mode coupling effects in multi-mode fibers / J.M. Kahn, K.-P. Ho, M. Bagher Shemirani // Optics InfoBase Conference Papers. – 2012. – P. 3D.3.
- [26] Nakazawa, M. Measurement of mode coupling distribution along a few-mode fiber using a synchronous multi-channel OTDR / M. Nakazawa, M. Yoshida, T. Hirooka // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(25). – P. 31299-31309.
- [27] Dong, Y. Characterization of evolution of mode coupling in a graded-index polymer optical fiber by using Brillouin optical time-domain analysis / Y. Dong, P. Xu, H. Zhang, Z. Lu, L. Chen, X. Bao // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(22). – P. 26510-26516.
- [28] Chen, W. Measurement of mode coupling distribution along few mode fiber based on two photonic lanterns / W. Chen, G. Hu, F. Liu, C. Chen, C. Song, J. Chen // Optics Communications. – 2018. – Vol. 428. – P. 136-143.
- [29] Marcuse, D. Coupled Mode Theory of Round Optical Fibers // Bell System Technical Journal. – 1973. – Vol. 52(6). – P. 817-842.
- [30] Marcuse, D. Mode Coupling in an Optical Fiber With Core Distortions / D. Marcuse, H.M. Presby // Bell System Technical Journal. – 1975. – Vol. 54(1). – P. 3-15.
- [31] Probst, C.B. Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes / C.B. Probst, A. Bjarklev, S.B. Andreasen // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7(1). – P. 55-61.
- [32] Pohl, A.A.P. Advances and new applications using the acousto-optic effect in optical fibers / A.A.P. Pohl, R.A. Oliveira, R.E. Da Silva, C.A.F. Marques, P. de T. Neves, K. Cook, J. Canning, R.N. Nogueira // Photonic Sensors. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 1-25.
- [33] Wang, Y. A comprehensive study of optical fiber acoustic sensing / Y. Wang, H. Yuan, X. Liu, Q. Bai, H. Zhang, Y. Gao, B. Jin // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 85821-85837.
- [34] Кривошлыков, С.Г. Функциональные возможности и чувствительность датчиков на основе многомодовых градиентных оптических волноводов / С.Г. Кривошлыков, И.Н. Сисакян // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14, № 3. – С. 481-491.
- [35] Berdagué, S. Mode division multiplexing in optical fibers / S. Berdagué, P. Facq // Applied Optics. – 1982. – Vol. 21(11). – P. 1950-1955.
- [36] Garitchev, V.P. Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters / V.P. Garitchev, M.A. Golub, S.V. Karpeev, S.G. Krivoslykov, N.I. Petrov, I.N. Sissakian, V.A. Soifer, W. Haeberreisser, J-U. Jahn, R. Willsch // Optics Communications. – 1985. – Vol. 55(6). – P. 403-405.
- [37] Аджалов, В.И. О возможностях метода модовой модуляции преобразования аналоговых сигналов в изменения состава мод, возбуждаемых в оптических волокнах // Компьютерная оптика. – 1988. – Т. 3. – С. 112-116.

- [38] Любопытов, В.С. Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смещения мод / В.С. Любопытов, А.З. Тлявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // Компьютерная Оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 352-359.
- [39] Ho, K.-P. Mode Coupling and its Impact on Spatially Multiplexed Systems / K.-P. Ho, J.M. Kahn // Optical Fiber Telecommunications. – 2013. – P. 491-598.
- [40] Savović, S. Method for calculating the coupling coefficient in step-index optical fibers / S. Savović, A. Djordjević // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46(9). – P. 1477-1481.
- [41] Savović, S. New method for calculating the coupling coefficient in graded index optical fibers / S. Savović, A. Djordjević // Optics & Laser Technology. – 2018. – Vol. 101. – P. 223-226.
- [42] Гроднев, И.И. Линейные сооружения связи / И.И. Гроднев, Н.Д. Курбатов – Москва: Связь, 1974. – 544 с.
- [43] De Prony, G.R. Essai expérimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'alkool, à différentes températures // J. de l'École Polytech. – 1795. – Vol. 1(22). – P. 24-76.
- [44] Завьялов, М.Н. Комбинированный вариант гармонического разложения Прони / М.Н. Завьялов, Д.В. Елизаров // Журн. СФУ. Сер. Матем. и физ. – 2008. – Т. 1, № 4. – С. 443-452.
- [45] Мясникова, Н.В. Использование метода Прони для анализа сейсмических сигналов идущего человека / Н.В. Мясникова, В.А. Дудкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 4(12). – С. 111-119.
- [46] Verstakov, E.V. Algorithm of estimation of parameters of approximation for 2-D signals using prony method // 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology." – 2010. – P. 1265-1266.
- [47] Митрофанов, Г. Основы и приложения метода прони-фильтрации / Г. Митрофанов, В. Прийменко // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 3. – С. 93-108.
- [48] Nigmatullin, R.R. General theory of experiment containing reproducible data: The reduction to an ideal experiment / R.R. Nigmatullin, W. Zhang, D. Striccoli // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2015. – Vol. 27(1-3). – P. 175-192.
- [49] Nigmatullin, R.R. The general theory of the Quasi-reproducible experiments: How to describe the measured data of complex systems / R.R. Nigmatullin, G. Maione, P. Lino, F. Saponaro, W. Zhang // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2017. – Vol. 42. – P. 324-341.
- [50] Ribeiro, M. Non-stationary analysis and noise filtering using a technique extended from the original prony method / M. Ribeiro, D. Ewins, D. Robb // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2003. – Vol. 17(3). – P. 533-549.
- [51] Бурдин, В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи / В.А. Бурдин – Москва: Радио и связь, 2002. – 311 с.
- [52] Клейн, В. Теория взаимного влияния в линиях связи – М.: Изд. иностр. литературы. – 1959. – 204 с.
- [53] Шварцман, В.О. Взаимные влияния в кабелях связи – М.: Связь, 1966. – 430 с.
- [54] Андреев, В.А. Теория электромагнитных влияний между цепями связи – М.: Радио и связь. – 1999. – 320 с.
- [55] Gruner-Nielsen, L. Few Mode Transmission Fiber With Low DGD, Low Mode Coupling, and Low Loss / L. Gruner-Nielsen, Y. Sun, J.W. Nicholson, D. Jakobsen, K.G. Jespersen, R. Lingle, B. Palsdottir // Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Vol. 30(23). – P. 3693-3698.

Model based on Prony decomposition for mode coupling of optical fibers of a cable delivery length

A.V. Bourdine¹, V.A. Burdin¹, K.A. Volkov¹, O.R. Delmukhametov¹, E.Y. Eremchuk¹

¹Povolghskiy State University of Telecommunications and Informatics, L. Tolstoy str. 23, Samara, Russia, 443010

Abstract. The paper presents a model based on the Prony decomposition for calculating mode coupling coefficients in optical fiber at the cable delivery length based on measurements of bond distributions or on the basis of modeling irregular optical fiber distributions. Examples are given of calculating the dependences of the normalized coupling coefficients of the modes at the construction length on the frequency detuning of the dominant decomposition component. The presented analysis allows us to talk about the potential possibilities of the proposed model, although, of course, it requires experimental verification.