

Потенциальные возможности применения аксиального рассогласования в устройствах подключения маломодовых рефлектометров к оптическим волокнам

Д.Е. Прапорщиков¹, Д.А. Иванова¹, М.А. Иванова¹, А.В. Бурдин¹, В.А. Бурдин¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Л. Толстого 23, Самара, Россия, 443010

Аннотация. В данной работе представлены результаты эксперимента, демонстрирующие потенциальные возможности селекции групп мод за счет аксиального рассогласования оптических волокон для маломодовой оптической рефлектометрии.

1. Введение

На сегодняшний день широкое применение для различных приложений получили оптические распределенные сенсорные системы, базирующиеся на принципах оптической рефлектометрии. Они включают в себя хорошо известные сенсорные системы, основанные на контроле межмодовых связей в многомодовых оптических волокнах [1, 2]. Потребность в измерениях распределений межмодовых связей оптических волокон кабельных линий привела к формированию направления «маломодовой оптической рефлектометрии», которое стало особенно актуально в последние годы в связи с перспективами применения на транспортных сетях связи маломодовых оптических волокон [3-7]. Эффективность применения маломодовой оптической рефлектометрии во многом связана с эффективностью селекции мод. Известны различные способы модового мультиплексирования, которые в последние годы активно совершенствуются [7-31]. В [32] показано, что задачу можно свести к выделению группы мод простым аксиальным смещением одномодового оптического волокна на торце многомодового волокна. При этом вопросы селекции отдельных мод передаются на уровень алгоритмов измерений и обработки их результатов. Например, как это описано в [33]. В данной работе представлены результаты эксперимента, подтверждающего возможность селекции эффектов действия мод высшего порядка достаточно простыми техническими средствами.

2. Описание эксперимента

В качестве критерия проявления эффекта действия мод высшего порядка при измерениях стандартным оптическим рефлектометром обратного релеевского рассеяния, работающего во временной области, были приняты изменения рефлектограмм при изменении радиуса изгиба оптического волокна. Схема эксперимента представлена на рисунке 1. Исследуемая линия состояла из двух катушек со стандартным многомодовым оптическим волокном 50/125, между которыми была включена бухта такого же волокна, но другой партии. Это было сделано для лучшей визуализации стыков оптических волокон на рефлектограммах. Для селекции мод использовали известную схему, включающую волоконный интерферометр Маха-Зендера на

одномодовом оптическом волокне типа SMF-28 с устройством для сдвига фазы в одном из его плеч [34, 35]. Одномодовый выход интерферометра подключался к многомодовому оптическому волокну исследуемой линии с аксиальным сдвигом, равным 6 мкм. Данное условие обеспечивает тот факт, что в оптическом излучении потока обратного рассеяния, поступающего из многомодового оптического волокна линии в одномодовое волокно интерферометра коэффициенты связей для мод LP_{01} и LP_{11} были примерно одинаковы, а мощность остальных мод высшего порядка не превышала 10-15% от суммарной мощности этих мод [8]. Для сдвига фазы в одном из плеч интерферометра оптическое волокно сворачивали в кольцо, радиус которого выбирали из условия переключения мод LP_{01} и LP_{11} .

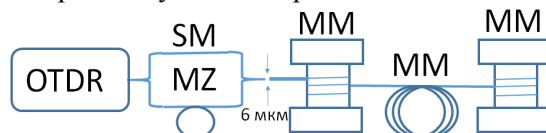


Рисунок 1. Схема эксперимента.

3. Результаты эксперимента

В процессе эксперимента были получены характеристики обратного рассеяния для двух случаев: для бухты оптического волокна с исходным диаметром и для той же бухты, диаметр которой уменьшался примерно в два раза за счет перегиба (рисунок 2 и рисунок 3 соответственно).



Рисунок 2. Бухта многомодового оптического волокна.



Рисунок 3. Бухта многомодового оптического волокна с перегибом.

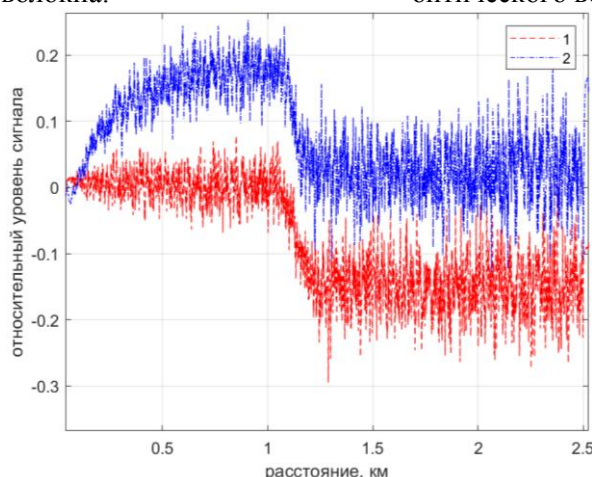


Рисунок 4. Рефлектограммы оптического волокна в зависимости от радиуса изгиба волокна и настройки интерферометра (1 – слабая связь мод, 2 – сильная связь мод).

На рисунке 4 приведены зависимости, отображающие разность между характеристиками, измеренными для бухты без перегиба и бухты с перегибом. Кривая 1 на рисунке 4 (расположена ниже) соответствует случаю слабой связи мод (диаметр кольца оптического волокна в плече интерферометра Маха-Зендера от 6 до 14 см). В этом случае на вход оптического рефлектометра поступает в основном фундаментальная мода LP_{01} . Кривая 2 на рисунке 4 (расположена выше) соответствует сильной связи мод (диаметр кольца оптического

волокна в плече интерферометра Маха-Зендера около 15 см). В этом случае в фундаментальную моду перекачивается мода LP_{11} . Для выделения необходимой информации требуется разработка соответствующего алгоритма. Данный эксперимент наглядно демонстрирует возможность реализации маломодовой рефлектометрии при использовании относительно простых методов селекции групп модового состава.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе представлены результаты эксперимента, демонстрирующие потенциальные возможности селекции групп мод за счет аксиального рассогласования оптических волокон для маломодовой оптической рефлектометрии.

5. Литература

- [1] Lalam, N. Enhanced performance of Brillouin distributed fiber sensor with hybrid amplification / N. Lalam, P. Lu, M.P. Buric, P.R. Ohodnicki // *Fiber Optic Sensors and Applications XVI*. – 2019. – Vol. 11000. – P. 1100003.
- [2] Lu, P. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective / P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. Chorpeneing, M.P. Buric, P.R. Ohodnicki // *Applied Physics Reviews*. – 2019. – Vol. 6(4). – P. 041302.
- [3] Mitra, P.P. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications / P.P. Mitra, J.B. Stark // *Nature*. – 2001. – Vol. 411. – P. 1027-1030.
- [4] 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.
- [5] Mecozzi, A. Nonlinear Shannon Limit in Pseudolinear Coherent Systems / A. Mecozzi, R-J. Essiambre // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Vol. 30(12). – P. 2011-2024.
- [6] Ellis, A.D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres // *Proc. of SPIE*. – 2012. – Vol. 8434. – P. 84340H.
- [7] 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.
- [8] Li, G. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication / G. Li, N. Bai, N. Zhao, C. Xial // *Advances in Optics and Photonics*. – 2014. – Vol. 6(4). – P. 413-487.
- [9] Klaus, W. Advanced Space Division Multiplexing Technologies for Optical Networks / W. Klaus, B.J. Puttnam, R.S. Luís, J. Sakaguchi, J-M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada // *Journal of Optical Communications and Networking*. – 2017. – Vol. 9(4). – P. C1-C11.
- [10] Berdague, S. Mode division multiplexing in optical fibers / S. Berdague, P. Facq // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21(11). – P. 1950-1955.
- [11] Павельев, В.С. Экспериментальное исследование применения Гауссовых мод для уплотнения оптических информационных каналов / В.С. Павельев, В.А. Соيفер, М. Дюпарре, Р. Коваршик, Б. Людге, Б. Клей, С.В. Карпеев // *Компьютерная оптика*. – 1998. – Т. 18. – С. 115-121.
- [12] Карпеев, С.В. Анализ и формирование поперечно-модового состава когерентного излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОЭ / С.В. Карпеев, В.С. Павельев, М. Дюпарре, Б. Людге, К. Рокштул, З. Шротер // *Компьютерная оптика*. – 2002. – Т. 23. – С. 4-9.
- [13] Хонина, С.Н. Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОЭ // *Компьютерная оптика*. – 2002. – Т. 23. – С. 15-22.
- [14] Kadomina, E.A. Generation of high-frequency interference patterns of evanescent electromagnetic waves at Fabry-Perot resonances in dielectric photonic crystals / E.A. Kadomina, E.A. Bezus, L.L. Doskolovich // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(3). – P. 322-329.
- [15] Gavrilov, A.V. Integrated fiber-based transverse mode converter / A.V. Gavrilov, V.S. Pavelyev // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 510-514.

- [16] Leon-Saval, S.G. Multimode fiber devices with single-mode performance / S.G. Leon-Saval, T.A. Birks, J. Bland-Hawthorn, M. Englund // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30(19). – P. 2545-2547.
- [17] Noordegraaf, D. Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port Photonic Lantern / D. Noordegraaf, P.M.W. Skovgaard, M.D. Maack, J. Bland-Hawthorn, R. Haynes, J. Lægsgaard // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(5). – P. 4673-4678.
- [18] Leon-Saval, S.G. Photonic lanterns: a study of light propagation in multimode to single-mode converters / S.G. Leon-Saval, A. Argyros, J. Bland-Hawthorn // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(8). – P. 8430-8439.
- [19] Noordegraaf, D. Nineteen-port photonic lantern with multimode delivery fiber / D. Noordegraaf, P.M.W. Skovgaard, R.H. Sandberg, M.D. Maack, J. Bland-Hawthorn, J.S. Lawrence, J. Lægsgaard // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(4). – P. 452-454.
- [20] Birks, T.A. “Photonic lantern” spectral filters in multi-core fibre / T.A. Birks, B.J. Mangan, A. Díez, J.L. Cruz, D.F. Murphy // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(13). – P. 13996-14008.
- [21] Fontaine, N.K. Geometric requirements for photonic lanterns in space division multiplexing / N.K. Fontaine, R. Ryf, J. Bland-Hawthorn, S.G. Leon-Saval // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(24). – P. 27123-27132.
- [22] Leon-Saval, S.G. Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing / S.G. Leon-Saval, N.K. Fontaine, J.R. Salazar-Gil, B. Ercan, R. Ryf, J. Bland-Hawthorn // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(1). – P. 1036-1044.
- [23] Birks, T.A. The Photonic Lantern / T.A. Birks, I. Gris-Sánchez, S. Yerolatsitis, S.G. Leon-Saval, R.R. Thomson // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7. – P. 107-167.
- [24] Ryf, R. Mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibers / R. Ryf, N.K. Fontaine, H. Chen, B. Guan, B. Huang, M. Esmaelpour, A.H. Gnauck, S. Randel, S.J.B. Yoo, A.M.J. Koonen, R. Shubochkin, Y. Sun, R. Lingle // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(1). – P. 235-246.
- [25] Shin, W. All-fiber wavelength- and mode-selective coupler for optical interconnections / W. Shin, S. Choi, K. Oh // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27(21). – P. 1884-1886.
- [26] Love, J.D. Mode-selective couplers for few-mode optical fiber networks / J.D. Love, N. Riesen // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(19). – P. 3990-3992.
- [27] Jung, Y. Dual mode fused optical fiber couplers suitable for mode division multiplexed transmission / Y. Jung, R. Chen, R. Ismaeel, G. Brambilla, S-U. Alam, I.P. Giles, D.J. Richardson // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(20). – P. 24326-24331.
- [28] Rand, I. All-fiber fused directional coupler for highly efficient spatial mode conversion / I. Rand, R. Ismaeel, T. Lee, B. Oduro, Y. Jung, G. Brambilla // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(10). – P. 11610-11619.
- [29] Chang, S.H. Mode- and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers / S.H. Chang, H.S. Chung, R. Ryf, N.K. Fontaine, Ch. Han, J.P. Kyung, K. Kim, J.Ch. Lee, J.H. Lee, B.Y. Kim, Y.K. Kim // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(6). – P. 7164-7172.
- [30] Kyung, J.P. Broadband mode division multiplexer using all-fiber mode selective couplers / J.P. Kyung, Y.S. Kwang, K.K. Young, J.H. Lee, B.Y. Kim // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24(4). – P. 3543-3549.
- [31] Chang, S.H. All-fiber 6-mode multiplexers based on fiber mode selective couplers / S.H. Chang, S-R. Moon, Ch. Haoshuo, R. Ryf, N.K. Fontaine, J.P. Kyung, K. Kwangjoon, K.L. Joon // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25(5). – P. 5734-5741.
- [32] Burdin, V.A. Fiber-optic device for mode division / V.A. Burdin, A.V. Bourdine, O.G. Morozov, A.A. Kuznetsov, A.M. Yudakov // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2018. – Vol. 1096. – P. 012010
- [33] Goriachkin, O.V. Algorithm for restoring the differential mode delay map from the set of pulse responses at the far end of fiber optic link / O.V. Goriachkin, V.V. Eremina, V.A. Burdin, A.V. Bourdine, D.E. Praporshchikov // *Proceeding of SPIE*. – 2019. – Vol. 11146. – P. 1114618.

- [34] Janz, C. All-active dual-order mode Mach-Zehnder wavelength converter for power-efficient co-propagative operative / C. Janz, F. Poingt, F. Pommereau, F. Gaborit, D. Ottenwlder, I. Guillemot, B. Dagens, M. Renaud // ECOC, 1998. – P. 661-662.
- [35] Igarashi, K. Selective mode multiplexer based on phase plates and Mach-Zehnder interferometer with image inversion function / K. Igarashi, D. Souma, K. Takeshima, T. Tsuritani // Optics Express. – 2015. – Vol. 23(1). – P. 183-194.

Potential opportunities of axial mismatch in input attachment unit of few-mode reflectometers

D.E. Praporshchikov¹, D.A. Ivanova¹, M.A. Ivanova¹, A.V. Bourdine¹, V.A. Burdin¹

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, L. Tolstoy street 23, Samara, Russia, 443010

Abstract. In this paper, we present experimental results demonstrating the potential for mode group selection based on axial mismatch of optical fibers for few-mode optical reflectometry.