

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2023_3_3_4

УДК 654.022, 621.372.823

ГРНТИ 49.37.00, 49.44.00

Влияние межмодовой связи при распределительной методике передачи данных в волоконно-оптических системах

Свистунов Д. В.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29*

e-mail: svistunov@mail.ru

Распределительная методика передачи данных базируется на селективном возбуждении мод в многомодовом или маломодовом трактовом оптическом волокне. Принцип этой перспективной методики состоит в делении исходного потока данных на блоки по временным отрезкам и передача этих блоков по отдельным модам трактового волокна. Перед вводом в тракт эти блоки проходят индивидуальные линии задержки, обеспечивающие одновременную передачу блоков по трактовому волокну. Такая методика позволяет существенно повысить степень защищённости передаваемых данных в многомодовых волоконно-оптических системах малой и средней длины линии (локальные сети, внутри- и межобъектовые линии связи и т.д.). При нелегальном считывании информации из тракта известными способами, регистрируется суммарный сигнал разных мод, в котором оказываются дополнительно перемешанными части исходного сигнала, что не позволяет его адекватно расшифровать. В приёмном блоке системы адресата проводятся обратные процедуры, восстанавливающие исходный поток данных. В данной работе обсуждаются допустимые длины оптических линий систем с учётом уровня межмодовой связи в трактовом волокне. Показано, что ограничение длины линии из-за межмодовой связи не сопровождается снижением уровня защиты передаваемых данных.

Ключевые слова: оптическая связь, многомодовые волокна, селективное возбуждение, распределительная методика передачи данных.

Введение

Широкое распространение волоконно-оптических систем и их использование для передачи конфиденциальной информации (в банковской сфере и других областях) делает все более актуальной проблему защиты передаваемых данных. Нелегальный доступ к данным может быть получен как в результате внешнего «хакерского» внедрения в программное обеспечение приемной или передающей систем, так и путём физического внедрения в линию и скрытного считывания информации не только на конечных модулях, но и непосредственно из трактового оптического волокна, для внедрения в которое обычно имеется много возможностей. Несанкционированное скрытное считывание данных может быть произведено путем удаления внешней и частично

внутренних слоёв оболочки магистрального волокна на некотором отрезке с последующей регистрацией проникающих во внутренние оболочечные слои «хвостов» распределения полей мод сердцевины волокна. При этом, отводимая оптическая мощность выдерживается на уровне, позволяющем на пункте приема считать потери в оптическом тракте допустимыми, что позволяет сохранять скрытный характер нелегального считывания информации.

К настоящему времени разработано много методик, позволяющих осуществить передачу данных по оптической волоконной линии с повышенной степенью защиты данных от их несанкционированного считывания. Часть методик использует программные криптологические приёмы, затрудняя дешифровку нелегально полученной информации, другие используют для этого аппаратные подходы, в том числе методы квантовой криптографии (описанные в [1, 2] и др.). Однако, эти высокотехнологические методы, наряду с несомненными достоинствами, обладают и рядом заметных недостатков, к которым можно отнести относительно невысокую скорость передачи данных на реально потребные дистанции, сложность и дороговизну используемых электронно-оптических узлов систем. Поэтому, наряду с подобными, разрабатываются и более практичные, менее сложные и более дешёвые системы, основанные на обычных оптических каналах волоконных систем (например, [3]). Перспективными представляются подходы к передаче данных, основанные на селективном возбуждении мод мало- или многомодового трактового оптического волокна и независимой передачи данных по этим модам [4]. Поскольку селективное возбуждение волокон позволяет существенно повысить коэффициент широкополосности систем, построенных на базе многомодовых волокон, этот способ привлекал в последние пару десятилетий повышенное внимание, и для его реализации разработаны и испытаны оптические узлы, работающие на разных принципах ([5–8] и др.). Среди них есть устройства, которые позволяют одновременно возбуждать несколько волоконных мод совершенно независимо.

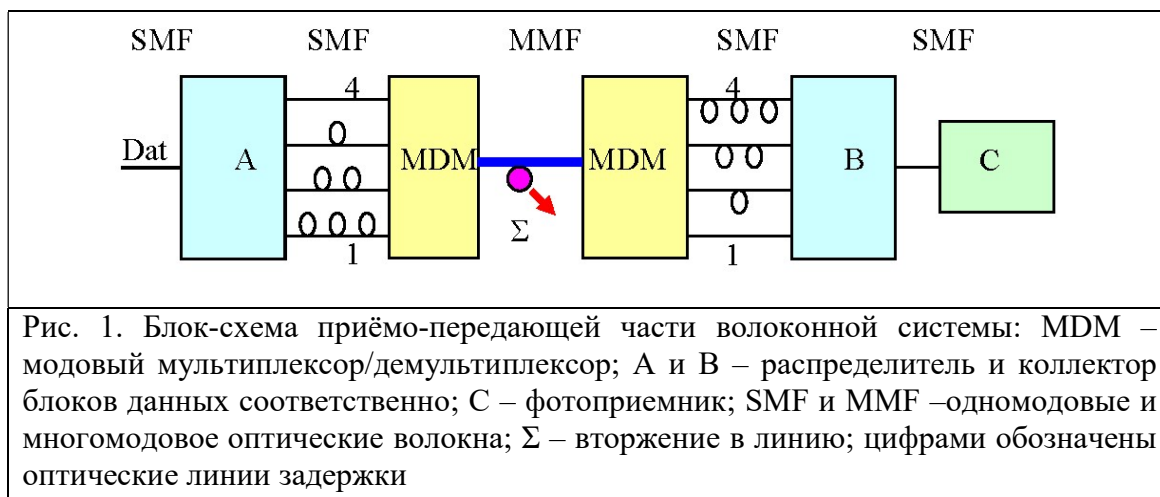
В данной работе рассматриваются вопросы применения одной из защищённых методик на базе селективного возбуждения мод трактового волокна – распределительной методики передачи данных.

Распределительная методика передачи данных

Эта перспективная методика организации передачи информации позволяет дополнительно повысить защищённость данных в передающем тракте волоконно-оптической системы. Этот метод, который можно назвать распределительной методикой (РМ), базируется на селективном возбуждении волноводных мод в мало- и многомодовых оптических волокнах [4]. Суть РМ состоит в трансформации исходной последовательности передаваемых данных путём разделения по временным отрезкам на блоки с последующей одновременной передачей по разным модам этих блоков данных, которые в исходной последовательности следуют друг за другом. При нелегальном считывании данных из трактовой линии известными приёмами продольной связи с модами волокна, регистрируемые оптические пучки перекрываются при использовании для передачи мод близких порядков. Результатом такого считывания будут перемешанные данные исходного массива без возможности реконструировать их правильную последовательность. При этом, на приёмном конце линии исходные данные восстанавливаются применением процедуры, обратной использованной в передающей части системы.

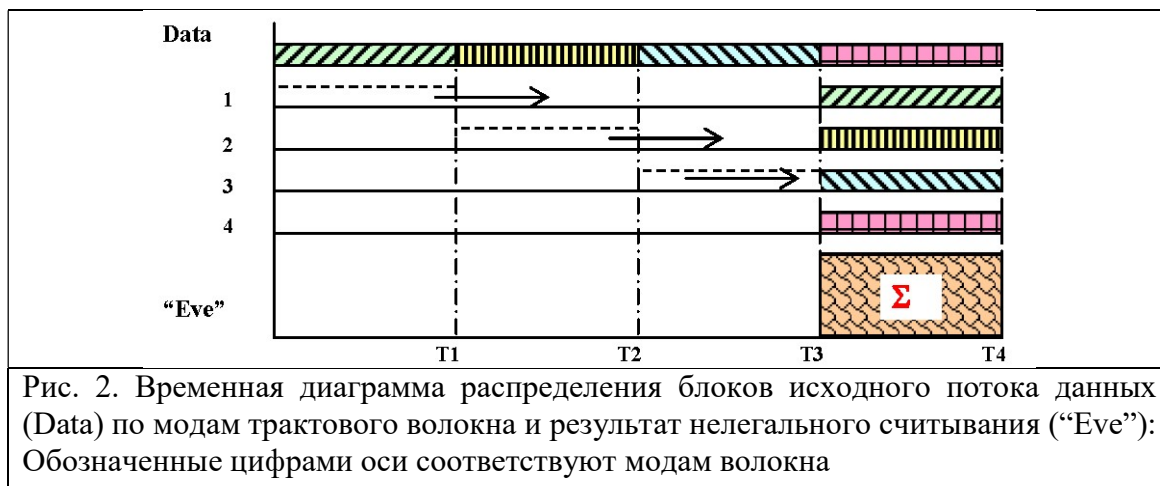
Исходный поток данных разделяется на временные периоды, каждый из которых содержит несколько блоков данных, причем количество блоков в одном периоде равно

числу используемых мод трактового волокна. Блоки определенного периода направляются на индивидуальные линии задержки для их синхронизации на входе модового мультиплексора, который производит ввод этих блоков импульсов в разные моды трактового волокна, обеспечивая при этом одновременность передачи этих блоков. Линии задержки могут быть пассивными структурами и представлять собой, например, небольшие отрезки оптического волокна кратной (друг относительно друга) длины. На рис. 1 показана блок-схема приёмно-передающей части такой системы для случая использования четырех мод.



Модовый демультиплексор построен так же, как мультиплексор, и работает в реверсивном режиме, обеспечивая детектирование мод трактового волокна и разведение отселектированных потоков данных по разным выходным линиям задержки. Эти линии производят процедуру, обратную произведенной на входе системы, обеспечивая последовательное следование переданных по разным модам блоков данных и восстанавливая тем самым исходный поток данных.

На рис. 2 представлены эпюры сигналов в передающей части системы. Пунктиром обозначены блоки данных, выделенных из исходной последовательности и готовые к введению в линии задержки. Задержанные блоки показаны здесь же, на осях своих линий задержки. Они синхронизированы и одновременно вводятся каждый в свою моду.



Тогда, при попытке нелегального считывания данных из трактового волокна продольными элементами связи с волноводными модами, считанный сигнал будет представлять собой сумму сигналов блоков, что видно на диаграмме. Понятно, что нет возможности восстановить из такого сигнала правильную исходную последовательность импульсов. В то же время, в приёмной части производится обработка сигналов в обратной последовательности процедур, и на выходе получается исходный массив данных.

Влияние межмодовой связи

Следует учесть, что и в многомодовом, и в маломодовом волокне присутствует явление межмодовой связи, когда по мере распространения сигнала по волокну происходит постепенная откачка оптической мощности сигнала в другую моду волокна. Более интенсивно проявляется связь мод соседних порядков. При использовании отдельных мод как независимых информационных каналов, перекачанная из других мод оптическая мощность будет являться оптическим шумом, наложенным на передаваемый сигнал. Это обстоятельство ограничивает допустимую длину линии передачи. Оценим эту величину. Допустим, что на входе в трактовое волокно в моды соседних порядков введены разные оптические сигналы равной амплитуды. Рассмотрим распространение сигнала A_s по одному информационному каналу. Результатом межмодовой связи будет появление в нём шумового сигнала амплитуды A_n . Отношение сигнал/шум при этом

$$\eta = 20 \cdot \log_{10}(A_s / A_n).$$

Проведём уточнение приблизительной оценки, считая, что исходные уровни мощности сигналов, введенных в каждую моду, равны P_0 . Запишем отношение сигнал/шум

$$\eta = 10 \cdot \log_{10}(P_s / P_n),$$

где P_s – мощность сигнала в m -й моде, P_n – мощность паразитного сигнала, перекачанного в m -ую моду из соседней задействованной ($m \pm 1$) моды. Тогда, согласно [9],

$$P_n = P_0 \cdot \sin^2 \{K \cdot L \cdot [1 + (\delta / K)^2]^{1/2}\} / [1 + (\delta / K)^2]$$

где K – коэффициент связи мод, $\delta = (\beta_m - \beta_{m \pm 1}) / 2$ – расстройка фаз мод. Сигнал P_s учитывает как составляющую m -й моды, убывающую из-за откачки оптической мощности из неё, так и возвратную перекачку в m -ую моду из соседней ($m \pm 1$)-й моды части откачанной туда мощности [9]:

$$P_s = P_0 \cdot \cos^2 \{K \cdot L \cdot [1 + (\delta / K)^2]^{1/2}\} + \\ + P_0 \cdot (\delta / K)^2 \cdot \sin^2 \{K \cdot L \cdot [1 + (\delta / K)^2]^{1/2}\} / [1 + (\delta / K)^2]$$

В случае фазового синхронизма, при $\delta \rightarrow 0$, на длине $L_0 = \pi / (2K)$ происходит полный обмен мощности между модами, и тогда мощности сигнала и шума в m -й моде могут быть записаны как:

$$P_n = P_0 \cdot \sin^2(K \cdot L), \quad P_s = P_0 \cdot \cos^2(K \cdot L)$$

Полный обмен мощностью – самый неблагоприятный в нашем случае вариант с точки зрения уровня шума. Однако, всё же рассмотрим именно его для оценки минимальной длины линии, задающей возможные области применения РМ. Отношение сигнал/шум принимает вид

$$\eta = 10 \cdot \log_{10}[\cos^2(K \cdot L) / \sin^2(K \cdot L)] = 20 \cdot \log_{10}[\text{ctg}(K \cdot L)].$$

Отсюда $\operatorname{ctg}(K \cdot L) = 10^{(\eta/20)}$, или $\operatorname{tg}(K \cdot L) = 10^{(-\eta/20)}$. Получаем:

$$L = (1/K) \cdot \operatorname{arctg}[10^{(-\eta/20)}]$$

Задаваясь отношением η сигнал/шум, можно для конкретного волокна с известным коэффициентом межмодовой связи K определить допустимую длину оптического тракта волоконной системы.

Когда используется более двух модовых каналов, надо учесть, что паразитная перекачка мощности в моду идет как из моды с меньшим главным модовым числом, так и из моды с большим числом. Поскольку преобладает связь мод с соседними номерами, для нашей приблизительной оценки будем учитывать только связь соседних мод, полагая равными их показатели потерь α (что вполне допустимо для мод с близкими параметрами), и считать малым вклад перекачки оптической мощности из других мод. Тогда шумовой сигнал в m -й моде складывается из перекачек из двух соседних мод (с номерами $m+1$ и $m-1$), и отношение сигнал/шум примет вид

$$\eta = 20 \cdot \log_{10}[(1/2) \cdot \operatorname{ctg}(K \cdot L)],$$

что приводит к выражению для длины линии в виде

$$L = (1/K) \cdot \operatorname{arctg}[(1/2) \cdot 10^{(-\eta/20)}]$$

Коэффициент межмодовой связи K может быть записан как [10]

$$K = \{1/[2n_{c0} \cdot (\beta_m - \beta_{m\pm 1})]\} \cdot \int_0^\infty (\partial n^2 / \partial z) \cdot \Psi_m \cdot \Psi_{m\pm 1} \cdot dS$$

где z – продольная координата, n_{c0} – показатель преломления на оси сердцевины волокна, S – площадь поперечного сечения, Ψ_m и $\Psi_{m\pm 1}$ – скалярные поля локальных m -й и $m \pm 1$ мод. При отсутствии внешнего воздействия этот коэффициент зависит от качества конкретного волокна (вариации диаметра, микроизгибы, включения примесей и т.д.) и определяется экспериментально.

Выберем параметры сильно связанных мод: $K = 10^{(-3)} 1/\text{м}$ и отношение сигнал/шум $\eta = 20$ дБ (т.е. ситуацию частичной перекачки мощности при $L < L_0$), что приводит к длине линии 100 м, что уже сравнимо с короткими внутриобъектовыми отрезками. Отметим, что это – случай сильной связи при полном фазовом согласовании мод. Однако, в реальных многомодовых волокнах и в пригодных для такой методики передачи сигнала маломодовых волокнах, постоянные распространения соседних мод отличаются по величине, хотя и близки. Это существенно, на порядки, снижает коэффициент межмодовой связи, вплоть до величин порядка $10^{(-7)} 1/\text{м}$ в некоторых экспериментальных маломодовых волокнах [11]. Тогда, для величин $K = 10^{(-5)} 1/\text{м}$ и отношении $\eta = 30$ дБ получаем допустимую длину линии около 1580 м. Снижение требований к отношению сигнал/шум до $\eta = 20$ дБ приводит к длине линии около 5 км, что вполне подходит для организации не только внутриобъектовой, но и местной линии, и локальных сетей.

Всё это, конечно, касается межмодовой связи на прямолинейных волокнах без учета изгибов, а на практике они могут внести заметный вклад в перекачку мощности мод. Однако, при прокладке линии можно задаться минимальным радиусом изгиба волокна, который обеспечивает небольшой уровень перекачки. Проведённые исследования (например, [12]) показывают, что даже в случае полимерных многомодовых волокон, для которых вообще характерен повышенный уровень потерь мощности моды, экспериментальные потери мод во всех образцах для всех созданных 7 вариантов конфигураций изгибов волокон не превысили 0,5 дБ при десяти изгибах на 90° с радиусами кривизны 2,5 см, а в варианте простой намотки на цилиндр с этим радиусом составили не выше 0,25 дБ. Такие радиусы кривизны, принятые в качестве минимальных,

вполне подходят для создания закруглений при прокладке волоконных линий. Увеличение радиусов закруглений при монтаже линий будет способствовать дальнейшему существенному уменьшению потерь мощности мод и, как следствие, обеспечит низкий уровень взаимной перекачки мощности мод на изгибах волокна.

Что касается защиты данных, передаваемых с использованием РМ, то можно определённо сказать, что уровень защиты не снизится при наличии межмодовой связи. Перекачка просто добавляет шумовую компоненту в модовый канал, но при применении РМ нелегальное считывание данных из трактового волокна приводит к регистрации суммарного сигнала сразу всех модовых каналов. Межмодовая перекачка в этом случае фактически означает перенос части оптической мощности из одного канала в другой, что не влияет на регистрируемый суммарный результат, который остаётся недоступным для адекватной расшифровки.

Заключение

Межмодовая связь ожидаемо ограничивает допустимую длину линии тракта волоконной системы, использующей распределительную методику передачи данных. Однако, в работе показано, что для такой методики остаются вполне доступными применения в качестве базового метода передачи в местных линиях длиной несколько километров, включая внутриобъектовые системы и локальные сети. При этом, возникающие оптические шумы в сигнальном канале являются частью нелегально считываемого из тракта сигнала, не снижая неопределенность при попытке его дешифровки. Таким образом, межмодовая связь не приводит к понижению уровня защиты передаваемых данных в оптическом тракте системы.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Pirandola S., Andersen U.L., Banchi L., Berta M., Bunandar D., Colbeck R. [et al.] Advances in quantum cryptography // *Advances in Optics and Photonics*. 2020. V. 12. № 4. P. 1012-1236 <https://doi.org/10.1364/AOP.361502>
2. Otte E., Nape I., Rosales-Guzman C., Denz C., Forbes A., Ndagano B. High-dimensional cryptography with spatial modes of light: tutorial // *Journal of the Optical Society of America B*. 2020. V. 37. № 11. P. A309-A323 <https://doi.org/10.1364/JOSAB.39929>
3. [Di Falco A.](#), [Mazzone V.](#), [Cruz A.](#), [Fratelocchi A.](#) Perfect secrecy cryptography via mixing of chaotic waves in irreversible time-varying silicon chips // *Nature Communications*. 2019. V. 20. № 1.5827 <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13740-y>
4. Svistunov D.V. Selective Mode Excitation: A Technique for Advanced Fiber Systems // *Optical Fiber and Wireless Communications/ R. Roka (Ed.)*. Rijeka: InTech, 2017, P. 105-122 <https://doi.org/10.5772/intechopen.68409>
5. Fazea Y., Mezhujev V. Selective mode excitation techniques for mode-division multiplexing: A critical review // *Optical Fiber Technology*. 2018. V. 45. № 8. P. 280-288 <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.08.004>

6. Yikai Su, Yu He, Haoshuo Chen, Xiaoying Li, Guifang Li. Perspective on mode-division multiplexing // Applied Physics Letters. 2021. V. 118. 200502 <https://doi.org/10.1063/5.0046071>
7. Liang Zhang, Jinbiao Xiao. Compact and broadband mode demultiplexer using a subwavelength grating engineered MMI coupler // Journal of the Optical Society of America B. 2021. V. 38. № 10. P. 2830-2836 <https://doi.org/10.1364/JOSAB.436158>
8. Yu Yang Zhuang, He Ming Chen, Yu Chen Hu, Wan Le Pan, Xiu Li Bai. Hybrid demultiplexer for mode and dense wavelength division multiplexing based on photonic crystal and nanowire waveguides // Journal of Modern Optics. 2020. V. 67. № 18. P. 1417-1423 <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1862328>
9. Семенов А.С., Семенов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. – 224с. ISBN 5-256-00738-6
10. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов /пер. с англ. М.: Радиоисвязь, 1987. – 656с.
11. Maruyama R., Kuwaki N., Matsuo S., Ohashi M. Relationship Between Mode Coupling and Fiber Characteristics in Few-Mode Fibers Analyzed Using Impulse Response Measurements Technique // Journal of Lightwave Technology. 2017. V. 35. №. 4. P. 650-657 <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2609002>
12. Losada M.A., Garces I., Mateo J., Salinas I., Lou J., Zubia J. Mode Coupling Contribution to Radiation Losses in Curvature for High and Low Numerical Aperture Plastic Optical Fibers // Journal of Lightwave Technology. 2002. V. 20. № 7. P. 1160-1164 <https://doi.org/10.1109/JLT.2002.800377>.

Affect of intermodal coupling on distributive technique of data transmission in fiber optic systems

Svistunov D. V.

*Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic university
195251, Russia, St.-Petersburg. Politekhnikeskaya str. 29*

Distributive technique of data transmission bases on selective mode excitation into few- or multimode trunk optical fiber. Content of this perspective technique includes division of initial data stream on time blocks followed by transmission of these blocks via different modes of the trunk fiber. The blocks pass individual delay lines before transmission, and therefore they are transmitted via fiber line simultaneously. The technique enables increasing the level of data protection in multimode fiber systems of short and middle line lengths (LANs, intra- and interobject communication lines, etc.). If illegal data reading occurs from the optical trunk, known methods of intrusion register summarized signal from different modes which contains mixed parts of the initial signal. This circumstance does not allow adequate decoding of the illegally read signal. Reverse procedures in the receiving part of the addressee system recover the initial data stream. Available lengths of trunk fiber lines are discussed in this article considering the level of intermodal coupling into the trunk fiber. It is shown that limitation of line lengths due to this reason does not lead to decrease of the level of data protection in the system.

Key words: optics communications, multimode fiber, selective excitation, distributive technique of data transmission.

References

1. Pirandola S., Andersen U.L., Banchi L., Berta M., Bunandar D., Colbeck R. [et al.] Advances in quantum cryptography // *Advances in Optics and Photonics*. 2020. V. 12. No. 4. P. 1012-1236 <https://doi.org/10.1364/AOP.361502>
2. Otte E., Nape I., Rosales-Guzman C., Denz C., Forbes A., Ndagano B. High-dimensional cryptography with spatial modes of light: tutorial // *Journal of the Optical Society of America B*. 2020 V. 37. No. 11. P. A309-A323 <https://doi.org/10.1364/JOSAB.39929>
3. Di Falco A., Mazzone V., Cruz A., Fratalocchi A. Perfect secrecy cryptography via mixing of chaotic waves in irreversible time-varying silicon chips // *Nature Communications*. 2019. V. 20. No. 1.5827 <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13740-y>
4. Svistunov D.V. Selective Mode Excitation: A Technique for Advanced Fiber Systems // *Optical Fiber and Wireless Communications* / R. Roka (Ed.). Rijeka: InTech, 2017, P. 105-122 <https://doi.org/10.5772/intechopen.68409>
5. Fazea Y., Mezhyuev V. Selective mode excitation techniques for mode-division multiplexing: A critical review // *Optical Fiber Technology*. 2018. V. 45. No. 8. P. 280-288 <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.08.004>
6. Yikai Su, Yu He, Haoshuo Chen, Xiaoying Li, Guifang Li. Perspective on mode-division multiplexing // *Applied Physics Letters*. 2021. V. 118. 200502 <https://doi.org/10.1063/5.0046071>
7. Liang Zhang, Jinbiao Xiao. Compact and broadband mode demultiplexer using a subwavelength grating engineered MMI coupler // *Journal of the Optical Society of America B*. 2021. V. 38. No. 10. P. 2830-2836 <https://doi.org/10.1364/JOSAB.436158>
8. Yu Yang Zhuang, He Ming Chen, Yu Chen Hu, Wan Le Pan, Xiu Li Bai. Hybrid demultiplexer for mode and dense wavelength division multiplexing based on photonic crystal and nanowire waveguides // *Journal of Modern Optics*. 2020. V. 67. No. 18. P. 1417-1423 <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1862328>
9. Semenov A.S., Semenov V.L., Shmalko A.V. *Integrated optics for information transmission and processing systems*. M.: Radio and communication, 1990. – 224 p. ISBN 5-256-00738-6
10. Snyder A., Love J. *Theory of optical waveguides* / trans. from English M.: Radio communications, 1987. – 656 p.
11. Maruyama R., Kuwaki N., Matsuo S., Ohashi M. Relationship Between Mode Coupling and Fiber Characteristics in Few-Mode Fibers Analyzed Using Impulse Response Measurements Technique // *Journal of Lightwave Technology*. 2017. V. 35. No. 4. P. 650-657 <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2609002>
12. Losada M.A., Garces I., Mateo J., Salinas I., Lou J., Zubia J. Mode Coupling Contribution to Radiation Losses in Curvature for High and Low Numerical Aperture Plastic Optical Fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2002. V. 20. No. 7. P. 1160-1164 <https://doi.org/10.1109/JLT.2002.800377>.