

УДК 681.7.068:621.391.63

Каток В. Б., канд. техн. наук, доц. (Тел.: 0911140300. E-mail: vkatok@ukrtelecom.ua)

(ПАТ «Укртелеком»)

Манько А. А., докт. техн. наук, доц (Тел.: +380 (67) 408 67 80. E-mail: manko_kiev@mail.ru)

Марков С. Е. канд. техн. наук, доц. (Тел.: 068 124 20 65. E-mail: sergemkiev@pochta.ru)

(Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев)

МОДОВОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Каток В. Б., Манько О. О., Марков С. Ю. Модове мультиплексування в волоконно-оптичному зв'язку. У роботі розглянуто перспективний спосіб збільшення пропускної здатності оптичного волокна за рахунок використання технології модового мультиплексування. Розглянуто основні проблеми модового мультиплексування (вибір оптичного волокна, модового конвертера та модового мультиплексора). Приклади конструктивних елементів системи, що наведені в роботі, дозволяють зробити висновок про можливу заміну звичайних одномодових волокон на багатомодові з відповідним збільшенням ефективності.

Ключові слова: модове мультиплексування, маломодове оптичне волокно, модовий конвертер, модовий мультиплексор

Каток В. Б., Манько А. А., Марков С. Е. Модовое мультиплексирование в волоконно-оптической связи. В работе рассмотрен перспективный способ увеличения пропускной способности оптического волокна за счет использования технологии модового мультиплексирования. Рассмотрены основные проблемы модового мультиплексирования (выбор оптического волокна, модового конвертера и модового мультиплексора). Приведенные примеры конструктивных элементов системы позволяют сделать вывод о возможной замене обычных одномодовых волокон на многомодовые с соответствующим увеличением эффективности.

Ключевые слова: модовое мультиплексирование, маломодовое оптическое волокно, модовый конвертер, модовый мультиплексор

Katok V. B., Man'ko O. O., Markov S. Yu. Mod multiplexing in fiber-optic communication. In this article we consider a perspective way to increase the capacity of optical fiber by using the mode multiplexing technology. The main problems of the mode multiplexing are: the choice of the optical fiber, the mode converter and the mode multiplexer. We discussed some examples of structural elements of the multimode multiplexing system. These examples suggest the possible replacement of conventional single-mode fibers on multimode ones with a corresponding increase in efficiency.

Keywords: mod multiplexing, few mod optical fiber, mode converter, mode multiplexer

Введение. Для увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) существует несколько способов. Процесс их реализации, чаще всего, сводится к одному из методов уплотнения (мультиплексирования) нескольких информационных потоков в один групповой, который передается по линии связи. Для дальнейшего наращивания информационной емкости систем передачи широко применяется сочетание одновременно двух или более методов.

Общее значение скорости передачи в оптическом волокне можно описать следующим образом:

$$V_{\text{общ}} = b \cdot N_k \cdot N_m \cdot N_c, \quad (1)$$

где b – битовая скорость в одном спектральном канале (соответствует скоростям синхронной цифровой иерархии);

N_k – количество спектральных каналов в оптическом волокне (соответствует иерархии скоростей DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны или спектральное уплотнение каналов);

N_m – количество мод, которые используются для модового уплотнения волокна (при этом в каждой моде N_k спектральных каналов);

N_c – количество сердцевин в оптическом волокне (при этом в каждой сердцевине используются N_m мод).

Первым методом мультиплексирования, который стал применяться в волоконно-оптических системах связи, явился метод временного мультиплексирования (TDM – Time Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по времени), при котором оптическая несущая модулируется цифровым сигналом с битовой скоростью b . Скорость временного мультиплексирования ограничивается возможностями современной электроники, и в настоящее время подошла к своему пределу (40 Гбит/с; десятки Гбит/с). Эту составляющую общей скорости описывает первый множитель в (1).

Дальнейшее увеличение общей скорости передачи основано на технологии спектрального мультиплексирования (DWDM) [1], которая позволяет увеличивать скорости передачи информации в ВОЛС за счет одновременной передачи по волокну нескольких TDM-каналов на различных длинах волн. Эта составляющая общей скорости передачи описывается множителем N_k в (1). Технология DWDM в настоящее время позволяет организовать более 40 волновых каналов в одном волокне, но и она ограничена шириной окна прозрачности оптического волокна.

В последние годы ведутся работы по использованию многомодовых волокон MMF (MultiMode Fiber – многомодовое волокно) [2, 3], а также волокон, которые содержат несколько сердцевин [4, 5], для увеличения общей скорости передачи. Эти факторы увеличения скорости передачи описываются множителями N_m и N_c соответственно.

Уплотнение потоков информации может производиться с помощью оптических несущих, имеющих линейную поляризацию (метод уплотнения по поляризации). При этом плоскость поляризации каждой несущей должна быть расположена под своим углом. Мультиплексирование осуществляется с помощью специальных оптических призм. Однако, поляризационное уплотнение может работать только тогда, когда в среде передачи отсутствует оптическая анизотропия (волокно не должно иметь локальных неоднородностей и изгибов).

Модовое мультиплексирование. В настоящей работе проводится анализ метода модового мультиплексирования. Стандартное многомодовое волокно поддерживает более ста мод, что создает большие трудности для получения и обработки оптического сигнала. Маломодовое волокно (FMF – Few Mode Fiber – маломодовое волокно) поддерживает небольшое количество мод, поэтому по сравнению со стандартным оно имеет потенциал для значительного уменьшения сложности системы [6]. FMF имеет преимущество лучшей селективности и легкого управления модовыми искажениями.

При использовании режима мультиплексирования мод (MDM – Mode Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по модам) и техники цифровой обработки сигнала множественного ввода-вывода (MIMO – Multiple Input Multiple Output – множественный ввод, множественный вывод), N_m пространственных мод в маломодовом волокне смогут поддерживать в N_m раз большую пропускную способность, чем в одномодовом. Возможность использования MDM и MIMO в передаче по FMF показана в ряде работ [2, 3]. В этих экспериментах, MDM достигается в двухмодовом волокне с различными комбинациями поддерживаемых мод, например, LP₀₁ и LP₁₁ мод (LP – Linearly Polarized mode – линейно поляризованная мода), двух вырожденных LP₁₁ мод (LP_{11a} + LP_{11b}) [7], и даже в трехмодовом (моды LP₀₁ + LP_{11a} + LP_{11b}).

Структура системы передачи $N \times N$ MDM представляет собой N передатчиков, которые генерируют каналные сигналы. Мультиплексирование N сигналов достигается с помощью модового мультиплексора. Сигналы, передаваемые различными пространственными модами, объединяются в маломодовом волокне. Во время передачи, все моды на одной и той же длине волны должны быть обработаны как единое целое в виде MDM суперканала, а именно, они усиливаются, выводятся или вводятся одновременно без индивидуальной обработки

мод. После передачи по волокну, принятые сигналы демультимплексируются модовым демультимплексором.

Демультимплексированные сигналы затем детектируются N когерентными приемниками и преобразуются из оптической в электрическую форму. Электрические сигналы преобразуются в цифровые и обрабатываются с помощью модуля цифровой обработки. Алгоритм ММО используется для компенсации модовой связи и/или перекрестных помех в канале, которые могут быть внесены мультиплексором/демультимплексором (MUX/DEMUX) или волокном. Ожидается, что если MUX/DEMUX имеет унитарную функцию передачи с рангом N , равным числу мод, поддерживаемых FMF волокном, то пропускная способность канала может быть в N раз больше, чем одномодовой системе.

В такой системе передачи имеются три основные проблемы создание или выбор:

- подходящего оптического волокна;
- конвертора мод из моды LP_{01} в моды более высокого порядка и наоборот;
- модового мультиплексора/демультимплексора.

Волокна для систем модового мультиплексирования. Рассмотрим первую проблему на примере двухмодового оптического волокна (TMF – Two Mode Fiber – двухмодовое волокно). Самый простой способ сделать TMF заключается в разработке профиля показателя преломления волокна со значением нормированной частоты (V) выше, чем для условия одномодового режима ($V > 2,4$), но ниже, чем для условия трехмодового режима ($V < 3,8$). TMF, которое использовано в эксперименте [8], является специально изготовленным волокном, легированным германием. Диаметр сердцевины 11,9 мкм, номинальное изменение показателя преломления (Δn) $5,4 \times 10^{-3}$; длина волны отсечки моды LP_{11} - 2323 нм и потери 0,26 дБ/км. Волокно имеет нормированную частоту $V=3,62$.

На Рис. 1 показана зависимость индекса моды от длины волны для этого волокна. В нижней части рисунка показаны измеренные модальные профили для LP_{01} моды и двух вырожденных LP_{11} мод. В верхней части рисунка показан ступенчатый профиль показателя преломления волокна. Предполагается, что дифференциальная модовая задержка (DMD – Differential Mode Delay – дифференциальная задержка мод) и затухание этого волокна может быть дополнительно уменьшено путем оптимизации изготовления.

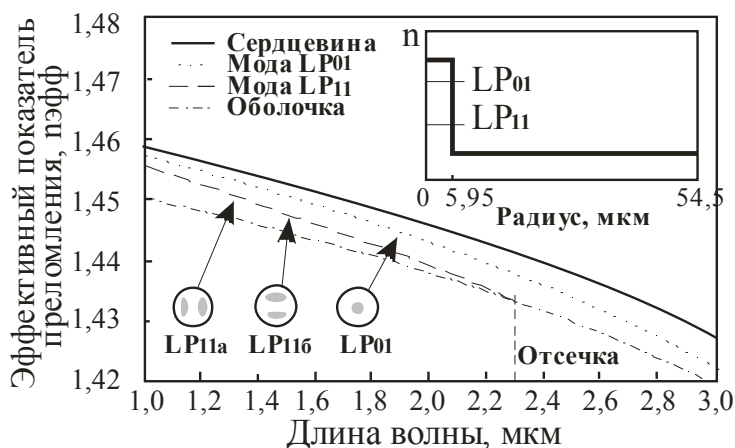


Рис. 1. Дисперсионные зависимости для мод LP_{01} и LP_{11} двухмодового волокна.

Известны и другие результаты по разработке маломодовых волокон с улучшенными характеристиками [3]. Недавно разработана конструкция TMF с низким DMD, низким уровнем связи мод и малыми потерями. В этом волокне использована сердцевина с градиентным профилем показателя преломления и двойной оболочкой [9], как показано на Рис. 2. Сердцевина с градиентным профилем показателя преломления способствует

снижению DMD, а траншейная структура оболочки обеспечивает низкие потери для LP₁₁ мод. DMD в худшем случае для мод LP₀₁ и LP₁₁ измеряется такой малой величиной как 0,076 пс/м, а потери для обеих мод LP₀₁ и LP₁₁ ниже, чем 0,2 дБ/км.

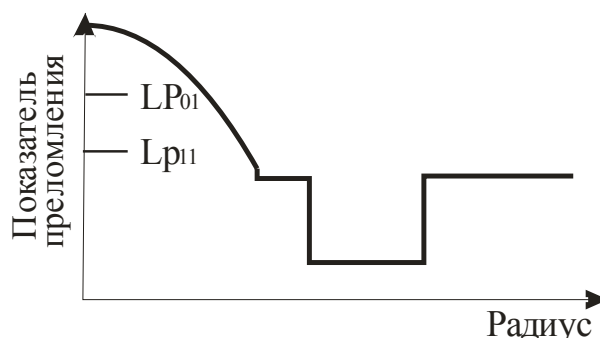


Рис. 2. Профиль показателя преломления градиентного двухмодового оптического волокна с низкой DMD, низкой связью мод и низкими потерями.

Модовый конвертор. Основная задача модового конвертора заключается в преобразовании оптических сигналов от моды LP₀₁ к моде более высокого порядка (например, к моде LP₁₁) и наоборот. Осуществить преобразование мод можно с помощью длиннопериодной волоконной решетки (ДПВР) [10].

ДПВР представляет собой волоконно-оптическую структуру с периодическим изменением свойств вдоль волокна. В этой структуре создаются условия резонанса для взаимодействия нескольких мод, распространяющихся в одном направлении. Период структуры составляет величину порядка доли миллиметра, поэтому их изготовление достаточно простое, например, можно изготовить решетку путем механического давления на двухмодовое волокно. В зависимости от симметрии возмущения, с помощью которого создается решетка, связь может быть создана между модами различной симметрии.

В волокне, в котором поддерживаются только две моды (LP₀₁ и LP₁₁), резонансная связь возникает в том случае, когда шаг решетки Λ равен длине биения $L_B = 2\pi/(\beta_{01} - \beta_{11})$, где β_{01} , β_{11} постоянные распространения мод LP₀₁ и LP₁₁. На Рис. 3 показана физическая конструкция модового конвертора на основе ДПВР. Двухмодовое волокно, используемое в конверторе, такое же, как передающее волокно с длиной волны колебаний моды $L_B = 524$ мкм.

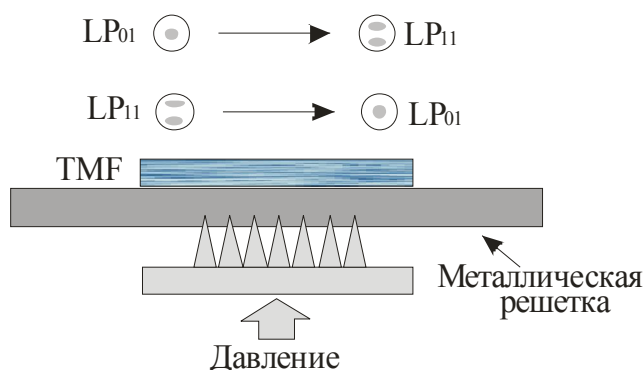


Рис. 3. Принципиальная схема LP₀₁/LP₁₁ модового конвертора на основе ДПВР.

Интенсивность преобразованной моды описывается выражением:

$$S = \text{Sin}^2(kL),$$

где $k = Dn_{\text{мод}} \cdot h / l_{\text{бр}}$, коэффициент связи; $Dn_{\text{мод}}$ – амплитуда синусоидальной модуляции показателя преломления; h – часть мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине световода; $l_{\text{бр}} = 2 n_{\text{эфф}} L$ – брегговская длина волны; $n_{\text{эфф}}$ – эффективный показатель преломления моды; L – длина решетки.

Настроить шаг решетки можно путем изменения угла наклона волокна относительно решетки. В работе [2] используются металлические решетки с низкой точностью расстояния между канавками (примерно $\sim 0,5$ мм) с последующей настройкой шага решетки путем регулировки угла волокна. Создан конвертор с номинальным 100% коэффициентом конверсии. Модовый коэффициент затухания конвертора является приемлемым с результатом 17 дБ и 22 дБ для моды LP_{11} для худших и лучших поляризаций, соответственно (на длине волны 1550 нм). Модовый коэффициент затухания определяется как отношение мощности моды LP_{11} и мощности моды LP_{01} . Вносимые потери составляют около 2 ~ 3 дБ ($LP_{01} + LP_{11}$).

Эти и другие результаты показывают, что модовые коэффициенты затухания моды LP_{11} могут поддерживаться на уровне 20 дБ с малой поляризационной зависимостью и низкими вносимыми потерями 1,5 ~ 2,5 дБ для диапазона длин волн шириной 13 нм с центром в 1551 нм. Теоретически модовый конвертор на основе ДПВР также может осуществить преобразование энергии основной моды в моды LP_{11a} и LP_{11b} , если эффективные показатели преломления двух вырожденных LP_{11} мод хорошо разделены. Возможным решением является использование эллиптической сердцевины двухмодового волокна.

Мультиплексор/демультиплексор мод свободного пространства. Это устройство выполняет решающую функцию модового мультиплексирования и демультиплексирования. На Рис. 4 показан модовый мультиплексор с малыми потерями, выполненный путем освещения торцевой грани двухмодового волокна тремя соответствующим образом размещенными пятнами от SMF (Single Mode Fiber – одномодовое волокно) [11]. Каждое пятно в основном возбуждает сложные моды. До тех пор пока три пятна расположены симметрично вокруг центра и величина мощности передаваемой от одного пятна в LP_{01} и альтернативно в $LP_{11a} + LP_{11b}$ точно такая же, матрица связи между тремя пятнами и FMF модами является унитарной, что гарантирует отсутствие возможности потерь после MIMO цифровой обработки сигналов. На практике, как сообщается в [11], вносимые потери составляют 3,95, 3,85 и 3,7 дБ для трех портов мультиплексора.

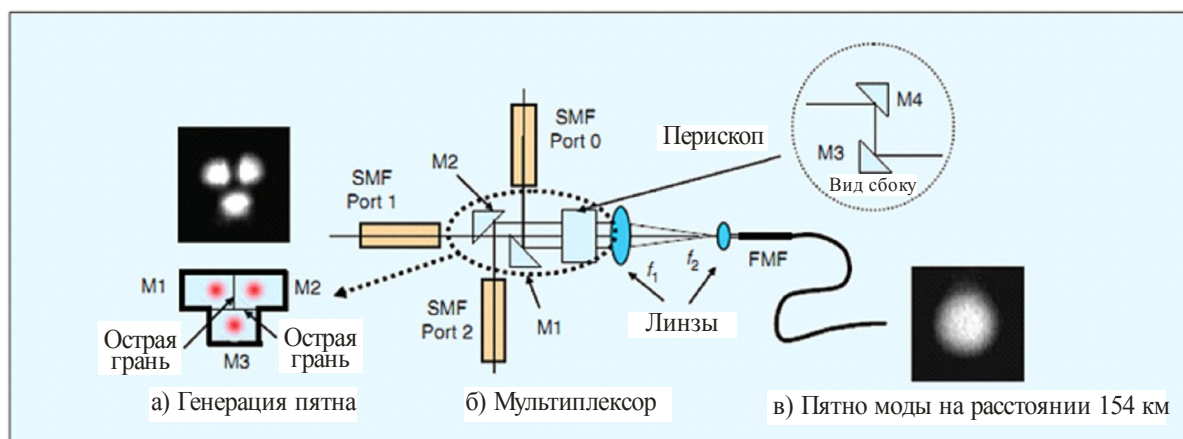


Рис. 4. а) Генерация пятна с использованием зеркала с острыми гранями;
 б) Экспериментальная установка устройства модовой связи с низкими потерями;
 в) Модовый профиль на конечном торце гибридного FMF на расстоянии 154 км.

Такой модовый мультиплексор может быть расширен, чтобы поддерживать больше мод путем использования большего количества соответствующим образом размещенных пятен, но связь от каждого пятна к каждой моде должна быть тщательно разработана, чтобы гарантировать, что матрица связи по-прежнему является унитарной и имеет низкие модовозависимые потери.

Мультиплексор ввода/вывода в системах с модовым мультиплексированием. В протяженных системах передачи с маломодовыми волокнами, подобно тенденциям в оптических сетях с одномодовыми волокнами, увеличение емкости будет достигнуто за счет спектрального уплотнения (DWDM). В таких системах, реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода/вывода, которые поддерживают все распространяющиеся моды, будут ключевым элементом для реализации гибких сетей. В качестве первого шага на пути к таким мультиплексорам, предложен маломодовый оптический мультиплексор ввода/вывода (OADM – Optical Add/Drop Multiplexer – оптический мультиплексор ввода-вывода) и продемонстрирована его работа ввода/вывода совместно с MDM передачей [12]. Архитектура маломодового волокна совместимого OADM может быть похожа на его одномодовые прототипы, так как модовая зависимость угла расходимости луча в маломодовом волокне небольшая, что обеспечивает практическую реализацию OADM, используя компоненты свободного пространства. Такие OADM могут быть уменьшены, а число портов ввода/вывода могут быть увеличено с помощью устоявшихся технологий, таких как MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems – микро-электромеханические системы) и LCOS (Liquid Crystal on Silicon – технология жидких кристаллов на кремниевой основе) [13]. В работе [12] приведен пример двухмодового OADM совместимого с компонентами свободного пространства спроектированного и построенного с помощью коллиматоров и пары тонкопленочных фильтров.

На Рис. 5 показана архитектура OADM. Тонкопленочная структура выступает в качестве полосового фильтра в передаче моды и в качестве режекторного фильтра для отраженной моды. Использовано двукратное отражение, для того чтобы значительно подавить канал вывода на выходе, который в противном случае служит в качестве внутриволновой перекрестной помехи для канала ввода. Тонкопленочная структура наклоняется на угол 5° для достижения вторичного разделения портов in/add (вход/ввод) и drop/through (вывод/проход) в конфигурации двойного отражения. Наклон 5° также предотвращает любое паразитное отражение накопленных многократных отражений от портов вывода или ввода.

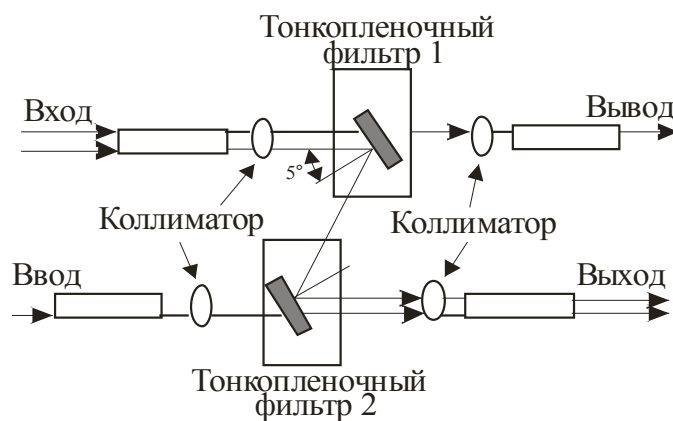


Рис. 5. Схематическое изображение двухмодового OADM

Заключение. Рассмотрена общая архитектура системы, критически важные компоненты, и суб-модули системы для реализации передачи сигнала с модовым уплотнением по маломодовым волокнам. Интерес к маломодовым волокнам закрепился в исследованиях оптических сетей с высокой пропускной способностью в течение последних трех десятилетий. В поисках более высокой информационной емкости, научное сообщество делает большие успехи в освоении новых волоконных технологий, основанных как на волокнах с большим количеством сердцевин, так и на многомодовых волокнах. Многие проблемы от компонентного до системного уровня должны быть преодолены, прежде чем эти новые волокна могут быть в конечном итоге внедрены в практику. Какие системы связи (с многомодовыми или с многосердцевинными волокнами или их комбинация) могут

заменить обычные SMF будет определяться тем, смогут ли они существенно снизить общую стоимость будущих высокоскоростных оптических сетей.

Литература

1. Richardson D. J. Space Division Multiplexing in Optical Fibers. *Nature Photonics* / D. J. Richardson, J. M. Fini, L. E. Nelson. – 2013. – V 7. – 354-362 p.
2. Li A. Reception of Mode and Polarization Multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM Signal over a Two-Mode Fiber / Li A., Amin A. Al, Chen X., Shieh W. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012)*, paper PDPB8.
3. Salsi M. Transmission at 2x100Gb/s, over Two Modes of 40km-long Prototype Few-Mode Fiber, using LCOS based Mode Multiplexer and Demultiplexer / Salsi M., Koebele C., Sperti D., Tran P., Brindel P., Mardoyan H., Bigo S., Boutin A., Verluise F., Sillard P., Bigot-Astruc M., Provost L., Cerou F., Charlet G. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011)*, paper PDPB9.
4. Hayashi T. Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber Feasible to Ultra-Long-Haul Transmission / Hayashi T., Taru T., Shimakawa O., Sasaki T., Sasaoka E. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011)*, paper PDPC2, .
5. Sakaguchi J. 109-Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber / Sakaguchi J., Awaji Y., Wada N., Kanno A., Kawanishi T., Hayashi T., Taru T., Kobayashi T., Watanabe M. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011)*, paper PDPB6.
6. Shieh W. High spectral efficiency coherent optical OFDM for 1 Tb/s Ethernet transport / Shieh W. // *Optical Fibre Communication Conference National Fibre Optic Engineers Conference OFC-NFOEC'2009. – Paper OWW1, San Diego, USA, 2009.*
7. Fontaine N. K. Space-division multiplexing and all-optical MIMO demultiplexing using a photonic integrated circuit / Fontaine N. K., Doerr C. R., Mestre M.A., Ryf R., Winzer P., Buhl L., Sun Y., Jiang X., Lingle R. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012)*, paper PDP5B.1.
8. Shieh W. Space-Division Multiplexing for Optical Communications / Shieh W., Li A., Amin A. Al, Chen X // *IEEE Photonics Society News. – Oct. 2012. – V26, № 5.*
9. Gruner-Nielsen L. Few Mode Transmission Fiber with low DGD, low Mode Coupling and low Loss / Gruner-Nielsen L., Sun Y., Nicholson J. W., Jakobsen D., Lingle R., Palsdottir B. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012)*, paper PDP5A.1.
10. Иванов О. В. Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки / О. В. Иванов, С. А. Никитов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012.
11. Ryf R. Low-Loss Mode Coupler for Mode-Multiplexed transmission in Few-Mode Fiber / Ryf R., Mestre M. A., Gnauck A., Randel S., Schmidt C., Essiambre R., Winzer P., Delbue R., Pupalais P., Sureka A., Sun Y., Liang X., Peckham D., McCurdy A.H., Lingle R. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012)*, paper PDP5B.5.
12. Chen X. Reception of Dual-LP11-Mode CO-OFDM Signals through Few-mode Compatible Optical Add/Drop Multiplexer / Chen X., Li A., Ye J., Amin A. Al, Shieh W. // *Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012)*, paper PDP5B.4.
13. Tibuleac S. Transmission Impairments in DWDM Networks With Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers. / Tibuleac S. // *Lightwave Technol. – 2010. – №28. – 557–568*

Дата надходження в редакцію: 27.10.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В. С. Смирнов