

## ПЕРЕДАЧА СИГНАЛА «RADIO-OVER-FIBER» ПО ВОЛП В РЕЖИМЕ ПЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИСПЕРСИЕЙ

Арбузова Е.Ю., Волкова К.А., Волков К.А., Дашков М.В., Кокурина О.Е.

В работе рассмотрено использование волоконно-оптической линии передачи в режиме плотного режима управления дисперсией на сетях «Radio-Over-Fiber» (RoF). Исследовано влияние параметров дисперсионных карт на качество передачи RoF сигнала.

**Ключевые слова:** радиосигнал, оптическое волокно, управляемый дисперсией солитон, дисперсионная карта, Q-фактор.

### Введение

Технология Radio over Fiber (RoF) представляет собой способ передачи радиосигналов миллиметрового диапазона по оптическому волокну (ОВ) и в настоящее время находит применение в мобильных сетях 3 и 4 поколений, беспроводных сетях доступа WiFi, WiMax, а также оптических сетях доступа [1-3]. На рис. 1 приведена структура сегмента сети RoF. На центральной станции оптическая несущая модулируется на поднесущих СВЧ-диапазона цифровыми информационными сигналами со скоростями от 1 до 10 Гбит/с и передается по волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) на базовые станции. На базовой станции производится оптико-электрическое преобразование, и радиосигнал передается в эфир в пределах зоны радиусом от единиц до десятков метров. Абонентские терминалы принимают и демодулируют сигнал [1-3].

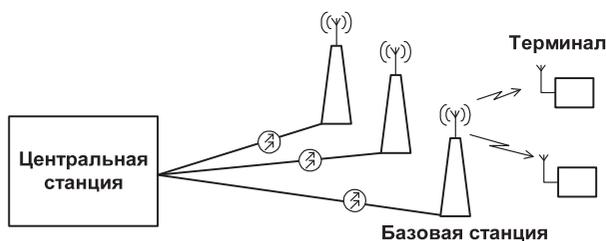


Рис. 1. Обобщенная структура сегмента сети RoF

Основные достоинства технологии RoF заключаются в увеличении пропускной способности, упрощении абонентского оборудования и снижении затрат при инсталляции и эксплуатации, что в конечном итоге приводит к увеличению экономической эффективности сети [1-4].

Модуляция оптического сигнала может осуществляться различными способами. Спектр модулированного сигнала может содержать две боковые полосы и несущую (Double-Sideband – DSB), одну боковую полосу и несущую (Single-Sideband – SSB) или две боковые полосы с подавленной несущей (Optical Carrier Suppression – OCS). В настоящее время наиболее широко применяются форматы SSB и OCS [1-4].

Для существующих систем RoF актуальна задача передачи информационного сигнала со скоростью 10 Гбит/с на расстояния порядка 50 км с эффективными коммерческими показателями. Так, в [5] была продемонстрирована возможность передачи информационного RoF сигнала со скоростью 10 Гбит/с для стандартного одномодового оптического волокна на расстояние 7 км при DSB модуляции ( $BER = 10^{-9}$ ) и на расстояние до 50 км ( $BER = 10^{-9}$ ) при SSB модуляции. Этой же группой авторов в работе [6] удалось реализовать схему SSB модуляции с использованием двух лазеров, разнесенных между собой на частоту 33 ГГц, и получить аналогичные результаты. Однако данные достижения получены с использованием кодера упреждающей коррекции ошибок (forward error correction – FEC) и эрбиевого волоконно-оптического предусилителя (Erbium Doped Fiber Amplifiers – EDFA), что приводит к увеличению стоимости передатчика, приемника и снижению экономического эффекта.

В [7] для увеличения протяженности RoF сети и компенсации влияния хроматической дисперсии (ХД) было предложено использовать дисперсионно-управляемые оптические солитоны, формируемые на одном периоде дисперсионной карты (Dispersion Managed Soliton – DMS). Параметры карты рассчитывались с использованием методики, изложенной в [8]. В результате авторам удалось обеспечить передачу информационного сигнала со скоростью 10 Гб/с на расстояние 59,6 км, при этом протяженность телекоммуникационного ОВ составляла 30,2 км.

Более эффективным методом формирования оптических солитонов является плотный режим управления дисперсией (Dense Dispersion Managed Solitons – DDMS). Режим DDMS поз-

воляет уменьшить требуемый уровень вводимой мощности, увеличить протяженность и скорость передачи [9]. Таким образом, представляет интерес исследование характеристик передачи сигнала RoF в режиме DDMS для различных дисперсионных карт (ДК). Статья посвящена исследованию ДК, адаптированных для передачи информации со скоростью 10 Гбит/с в RoF сетях на основе DDMS с учетом параметров телекоммуникационных ОВ, а также параметров коммерчески доступных элементов компенсации ХД.

### Методы реализации плотного режима управления дисперсией на ВОЛП

С практической точки зрения режим DDMS оптимально организовывать на этапе строительства, используя строительные длины оптического кабеля (ОК) с различными типами ОВ в соответствии с выбранной схемой компенсации дисперсии или ОК с уже заложенной в него ДК [10]. Для существующих ВОЛП требуется другой вариант организации DDMS, позволяющий уменьшить объем земляных работ при реконструкции. С точки зрения практической реализуемости авторами [11] был предложен вариант организации DDMS при модернизации ВОЛП путем включения DCF в местах соединения строительных длин оптического кабеля. При этом реконструкция может быть сведена к повторному монтажу или замене оптических муфт.

Особенностью ВОЛП с управлением дисперсией является существование оптимальной точки приема, расположение которой зависит от величины накопленной дисперсии [12]. Как известно, помимо вариации протяженности строительных длин ОК при производстве, наблюдается дополнительный разброс длин при прокладке и монтаже муфт, связанный с привязкой к конкретной местности. По этой причине использование компенсаторов с фиксированными значениями накопленной отрицательной дисперсии в приложении к реальным условиям приводит к разбросу параметров ДК, который может нарушить устойчивость режима DDMS. Решением указанной проблемы может служить применение оптических кабельных вставок с DCF. Длина вставки подбирается таким образом, чтобы обеспечивалась заданная величина остаточной дисперсии на одном периоде ДК. В случае реконструкции монтаж кабельной вставки может производиться в существующей оптической муфте при наличии свободных портов, или с установкой новой многопортовой муфты.

Использование кабельных вставок с DCF формирует асимметричную ДК. Как показывают исследования [14], в подобных ДК наблюдается существенная межсимвольная интерференция (МСИ) оптических импульсов, оказывающая существенное влияние на качество и дальность передачи.

Существуют различные подходы к формированию ДК [15-16]. Например, в [16-17] методика подбора ДК заключается в минимизации взаимодействия между соседними импульсами. Используя данную методику для двухсегментной ДК, состоящей из оптических волокон двух типов: SMF и DCF (см. таблицу 1), при протяженности оптического тракта 50 км оптимальное число периодов ДК будет составлять 10 ... 30. Таким образом, периодичность включения DCF составит от 1,67 км до 5 км при условии соблюдения кратности числа периодов ДК на длине ВОЛП. С практической точки зрения целесообразно рассмотреть привязку длины сегмента SMF к среднему расстоянию между оптическими муфтами, учитывая, что типовая протяженность строительных длин ОК составляет от 2 до 6 км.

Таблица 1. Параметры ОВ (длина волны 1550 нм)

Параметр	SMF	DCF
$\alpha$ , дБ/км	0.22	0.42
$D$ , пс/нм/км	17	-100
$S$ , пс/нм <sup>2</sup> /км	0,092	-0.23
$n_2$ , м/Вт	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$
$A_{eff}$ , мкм <sup>2</sup>	80	30

### Распространение RoF сигнала в оптическом тракте с управлением дисперсией

В данной работе рассматривается сигнал RoF формата SSB, спектр которого содержит несущую и одну боковую полосу. Распространение RoF сигнала в ОВ может быть описано системой двух нелинейных уравнений Шредингера (НЛУШ). Первое уравнение описывает распространение несущей. Второе уравнение описывает распространение боковой полосой. Так как для RoF максимальный разнос между несущей и боковой составляет 60 ГГц (что существенно меньше 13 ТГц), явлением вынужденного комбинационного рассеяния можно пренебречь. Также, поскольку

значения локальной дисперсии достаточно большие, явление четырех волнового смешения не учитывается. В итоге получаем систему вида:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_c}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{2c}(z) \frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} + \frac{\alpha(z)}{2} A_c &= \\ = i\gamma(z) \left( |A_c|^2 + 2|A_s|^2 \right) A_c; \\ \frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{\Delta v_g(z)} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s}(z) \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + \frac{\alpha(z)}{2} A_s &= \\ = i\gamma(z) \left( |A_s|^2 + 2|A_c|^2 \right) A_s, \end{aligned}$$

где  $A_c$ ,  $A_s$  – огибающие несущей и боковой;  $\Delta v_g$  – разница групповых скоростей распространения несущей и боковой;  $\beta_{2c}(z)$ ,  $\beta_{2s}(z)$  – дисперсия групповых скоростей (ДГС) несущей и боковой;  $\alpha(z)$  – коэффициент затухания,  $\gamma(z)$  – коэффициент нелинейности.

Коэффициент нелинейности определяется выражением:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{эфф}},$$

где  $n_2$  – нелинейный показатель преломления;  $c$  – скорость света в вакууме;  $A_{эфф}$  – эффективная площадь моды. Форма солитона в режиме с управлением дисперсией близка к гауссовой и может быть представлена уравнением:

$$A(z, t) = A_0 \exp\left(-\frac{(1+iC)t^2}{2T_0^2} + i\phi\right),$$

где  $A_0$  – амплитуда;  $T_0$  – длительность импульса (половина ширины по уровню 1/e);  $C$  – чирп.

Пиковая мощность, необходимая для формирования солитонного режима, определялась выражением:

$$P_0 = A_0^2 = \frac{\langle \beta_2 \rangle}{\gamma T_0^2},$$

где  $\langle \beta_2 \rangle$  – среднее значение дисперсии групповых скоростей дисперсионной карты.

Среднее значение ДГС для ВОЛП с управлением дисперсией определялось как:

$$\langle \beta_2 \rangle = \frac{\beta_{2SMF} L_{SMF} + \beta_{2DCF} L_{DCF}}{L_{SMF} + L_{DCF}},$$

где  $\beta_{2SMF}$ ;  $\beta_{2DCF}$ ;  $L_{SMF}$ ;  $L_{DCF}$  – дисперсии групповых скоростей и длины сегментов стандартного и компенсирующего волокон, соответственно.

Расчет длины сегмента волокна компенсации производился по формуле

$$L_{DCF} = \frac{(\beta_{2SMF} - \beta_{2res}) L_{SMF}}{(\beta_{2avg} - \beta_{2res})},$$

где  $\beta_{2res}$  – коэффициент остаточной дисперсии на одном периоде дисперсионной карты.

### Результаты моделирования

Решение системы НЛУШ производилось численно с использованием Фурье-метода расщепления по физическим параметрам. Выбор шага метода производился таким образом, чтобы нелинейный набег фазы не превышал 0,01 рад и был много меньше дисперсионной длины и длины нелинейности.

Сигнал RoF был смоделирован в виде непрерывного излучения лазера с частотой 193,4 ТГц (длина волны 1550,12 нм) и оптического излучения, центральная частота которого смещена на 60 ГГц и промодулирована информационным сигналом 10 Гбит/с. Оценка качества передачи производилась через Q-фактор, определяемый по глаз-диаграмме.

Для исследования влияния параметров дисперсионной карты на качество передачи было выполнено моделирование распространения RoF сигнала в оптическом тракте протяженностью 48 км для различных длин сегментов SMF (от 4 до 8 км) и для различных величин остаточной дисперсии.

Пример эволюции солитона на одном периоде дисперсионной карты с параметрами  $L_{SMF} = 8$  км и  $\beta_{2res} = -0,3$  пс<sup>2</sup>/км приведен на рис. 2.

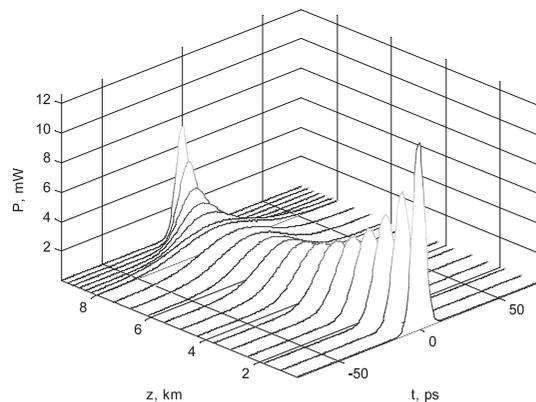


Рис. 2. Эволюция солитона на одном периоде ДК

На рис. 3. приведены вариации длительности солитона при распространении сигнала в оптическом тракте с вышеприведенными параметрами ДК.

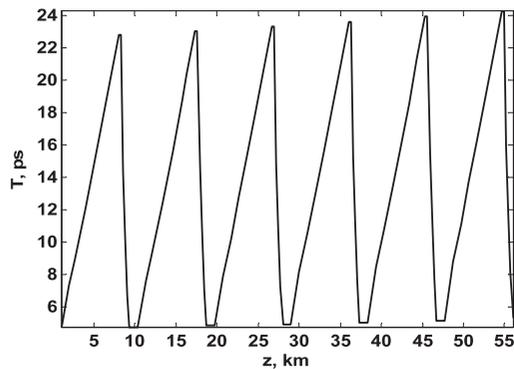


Рис. 3. Вариации длительности солитона в оптическом тракте с DDMS

На рис. 4-5 приведены зависимости Q-фактора и требуемой пиковой мощности солитона в зависимости от длины сегмента  $L_{SMF}$  и средней остаточной дисперсии  $\beta_{2,avg}$ .

Таким образом, при увеличении остаточной дисперсии требуется увеличение мощности импульса, однако при этом увеличивается Q-фактор. При величине остаточной дисперсии от  $-0,25$  до  $-0,35$  Q-фактор лежит в пределах  $15 \dots 25$  дБ, при этом требуемая пиковая мощность импульса должна составлять 2-3 мВт.

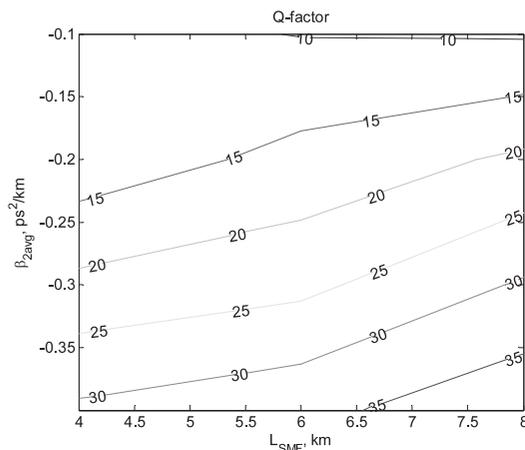


Рис. 4. Зависимость Q-фактора от параметров ДК

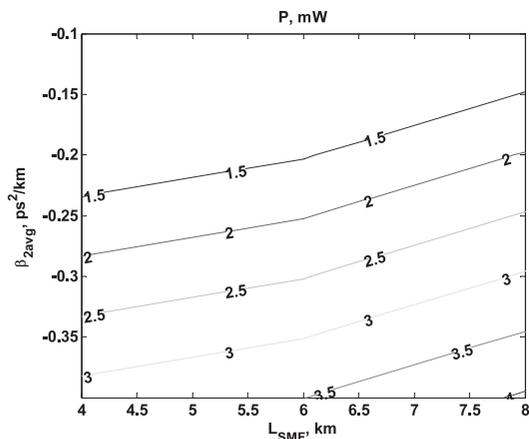


Рис. 5. Зависимость пиковой мощности солитона от параметров ДК

В заключение можно сделать вывод о перспективах применения технологии DDMS на RoF сетях при соответствующем подборе параметров ДК.

### Литература

- Zhensheng J., Jianjun Y. e.a. Key Enabling Technologies for Optical-Wireless Networks: Optical Millimeter-Wave Generation, Wavelength Reuse, and Architecture // JLT. Vol. 25, No. 11, 2007. – P. 3452-3471.
- Stöhr A., Akrouf A., Buß R. e.a. 60 GHz radio-over-fiber technologies for broadband wireless services // Journal of Optical Networking. Vol. 8, No. 5, 2009. – P. 471-487.
- Yu J., Huang M-F., Jia Z. e.a. Cost-Effective Optical Millimeter Technologies and Field Demonstrations for Very High Throughput Wireless-Over-Fiber Access Systems // JLT. Vol. 28, No. 16, 2010. – P. 2376-2397.
- Berceli T., Herczfeld P. Microwave Photonics – A Historical Perspective // Microwave Theory and Techniques. Vol. 58, No. 11, 2010. – P. 2992-3000.
- Insua I.G., Schaeffer C.G. Experimental Comparison of 10 Gbit in Radio over Fiber Systems // Microwave Symposium Digest, 2009. – P. 205-208.
- Insua I.G., Plettemeier D., Schaeffer C.G. Simple Remote Heterodyne RoF System for Gigabit Per Second Wireless Access // JLT. Vol. 28, No. 16, 2010. – P. 2289-2295.
- Asderah D.A., Abobaker A.M., Negrat A.M., Nakkeeran K. Generation and dispersion compensation techniques for 10 Gb/s radio-over-long haul fiber span // ICCCE, 2010. – P. 1-3.
- Abobaker A., Nakkeeran K. e.a. Design of dispersion-managed fiber systems for transmitting chirp-free Gaussian pulses // Journal of Modern Optics. Vol. 55, No. 11, 2008. – P. 1811-1833.
- Richardson, L.J., Mezentsev, V.K. Turitsyn, S.K., Limitations of 40 Gbit/s based dispersion managed WDM transmission: solitons versus quasi-linear propagation regime // OFC. 2001. Vol. 1, 2001. – MF5/1-MF5/3.
- Патент RU 2173940 C2. Волоконно-оптический кабель с регулируемой дисперсией и оптическая система передачи / Уайлдмен Дж.Ф., 20.09.2001.
- Волков К.А. Реконструкция ВОЛП с включением компенсирующих волокон в муфтах оптического кабеля // ИКТ. Т.8, №1, 2010. – С. 58-61.
- Mezentsev V.K., Turitsyn S.K., Doran N.J. System optimization of 80 Gbit/s single channel

- transmission over 1000 km of standard fiber // Electronics Letters. V. 36, No. 23, 2000. – P. 1949-1951.
13. Патент RU 2435183 C1. Способ реконструкции и увеличения пропускной способности волоконно-оптической линии передачи / Бурдин В.А., Волков К.А., 11.05.2010.
14. Mishra M., Konar S. Interaction of Solitons in a Dispersion Managed Optical Communication System with Asymmetric Dispersion Map // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. Vol. 21, No. 14, 2007. – P. 2049-2058.
15. Hasegawa A. Massive WDM and TDM Soliton Transmission Systems. Springer, 2000, – 452 p.
16. Fatome J., Fortier C. e.a. Practical design rules for single-channel ultra high-speed dense dispersion management telecommunication systems // Optics Communications. V. 282, No. 7, 2009. – P. 1427-1434.
17. Mamyshev P.V., Mamysheva N.A. Pulse-overlapped dispersion-managed data transmission and intrachannel four-wave mixing // Optics Letters. Vol. 24, No. 21, 1999. – P. 1454-1456.

## TRANSMISSION OF RADIO-OVER-FIBER SIGNAL OVER FIBER OPTICAL LINE IN DENSE DISPERSION MANAGEMENT REGIME

Arbuzova E.Y., Volkova K.A., Volkov K.A., Dashkov M.V., Kokurina O.E.

**In this paper the application of dense dispersion management regime for Radio-over-Fiber (RoF) systems was proposed. The influence of the dispersion map parameters on RoF signal quality was investigated.**

**Keywords:** radio over fiber, dense dispersion managed solitons, dispersion map, Q-factor.

Арбузова Евгения Юрьевна, магистр Кафедры «Телевидение и мультимедийные системы» (ТВМС) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ). Тел. 8-952-044-38-11. E-mail: evgeniya.arbuzova.91@mail.ru

Волкова Ксения Александровна, аспирант Кафедры «Линии связи и измерения в технике связи» (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. 8 (846) 228-00-66. E-mail: ksan\_4ik@mail.ru

Волков Кирилл Александрович, ассистент Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-66. E-mail: volkov\_ka\_lsits@mail.ru

Дашков Михаил Викторович, к.т.н., доцент Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-66. E-mail: mvd.srttc@gmail.com

Кокурина Ольга Евгеньевна, магистр Кафедры ТВМС КАИ. Тел. 8-900-327-04-25. E-mail: olga.kokurina@list.ru

УДК 681.128.56

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ С КВАЗИСОЛИТОНОВЫМ РЕЖИМОМ ПЕРЕДАЧИ

Виноградова И.Л., Кашибиев А.А., Султанов А.Х.

Статья посвящена моделированию конструктивных параметров интерференционного преобразователя. Функционирование устройства основано на применении многолучевого интерферометра, образованного торцами центрального смесительного элемента. Кроме этого, если выполнить смеситель из легированного эрбием материала, устройство обеспечит усиление выходного сигнала. Выполнена оценка коэффициента отражения зеркал интерферометра и его геометрических параметров. Устройство обеспечивает также избирательность для спектральных составляющих входного излучения, что позволяет управлять чирпом оптического излучения.

**Ключевые слова:** оптические системы передачи, многолучевой интерферометр, эрбиевый усилитель, чирпирование, искажение цифрового сигнала.

### Введение

Одно из направлений исследований в области развития телекоммуникационных систем предполагает разработку «умных» средств, обеспечивающих интеллектуализацию волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), или, иными словами, управление информационным сигналом в результате использования оптических устройств ВОЛП. Становится