

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ КАНАЛООБРАЗУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Касимова Д.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия (420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10), e-mail: dilya\_kas@mail.ru

В работе рассмотрены принципы полигармонического зондирования реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода-вывода и чирпированных волоконно-оптических решеток Брэгга как широкополосных оптических структур, используемых соответственно в качестве канальных коммутаторов и каналобразующих элементов в волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением. Цель зондирования – комплексный анализ определения и мониторинг спектральных характеристик указанных элементов, таких как полоса пропускания, центральная длина волны и крутизна склонов. Обоснована необходимость построения системы мониторинга, представлены основные методы внутри- (in-band) и вне- (out-band) канального мониторинга, показаны особенности проведения процедуры полигармонического зондирования для оценки различных характеристик, приведены источники и методы устранения погрешностей измерений. Сформулирована общая задача построения системы мониторинга с учетом дифференциальной поляризационной задержки, возникающей в каналобразующих элементах и характерной для волоконно-оптических систем передачи со спектральным уплотнением.

Ключевые слова: реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода-вывода, чирпированная волоконно-оптическая решетка Брэгга, мониторинг оптических каналов, полоса пропускания, центральная длина волны, полигармоническое зондирующее излучение.

## CHARACTERISTICS ANALYSIS OF OPTICAL STRUCTURES USING FOR BROADBAND CHANNELIZATION BY MEANS OF POLY-HARMONIC PROBING RADIATION

Kasimova D.I.<sup>1</sup>

Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (420111, Kazan, Karl Marx street, 10), e-mail: dilya\_kas@mail.ru

The paper discusses the principles of poly-harmonic probing of reconfigurable optical add-drop multiplexers and chirped fiber Bragg grating as broadband optical structures that are used respectively as the channel switches and channelization elements in optical fiber transmission systems with wavelength-division multiplexing. The purpose of probing - a comprehensive analysis of the definition and monitoring of the spectral characteristics of these elements, such as bandwidth, center wavelength and steepness of slopes. The necessity of the construction of the monitoring system is based, the main methods of in-band and out-band channel monitoring are presented, the features of the procedure of poly-harmonic probing to assess various characteristics are shown, the sources and methods of eliminating measurement errors are given. A general problem of constructing a monitoring system based on differential polarization delay caused in channelization elements and characterized for optical fiber transmission systems with wavelength-division multiplexing is formulated.

Keywords: reconfigurable optical add-drop multiplexers, chirped fiber Bragg grating, optical channels monitoring, bandwidth, center wavelength, poly-harmonic probing radiation.

Лучшая на сегодняшний день система третьего поколения перестраиваемых мультиплексоров ввода-вывода ROADM – это структура, основанная на многопортовых частотно-селективных переключателях WSS. Мультиплексор ROADM-WSS одновременно выполняет четыре функции, которые ранее требовали применения четырех отдельных элементов: демультиплексирование, выравнивание уровней мощности, коммутацию, мультиплексирование. Такими устройствами обеспечивается поддержка сетки частот 50 и

100 ГГц в полосах 191,6–196,3 ТГц (оптическая С-полоса) и 186,9–191,3 ТГц (оптическая L-полоса) с числом каналов от 45 до 90. С этой целью в обязательном порядке также осуществляется функция канального мониторинга, в основе которого непрерывный оптический спектральный мониторинг ширины полосы пропускания, центральной длины волны, дифференциальной поляризационной задержки и крутизны склонов [9–10]. Чирпированные волоконно-оптические решетки Брэгга (ЧВРБ) в настоящее время являются одним из ключевых элементов и составной частью мультиплексоров и демultipлексоров в волоконно-оптических линиях связи как каналообразующие элементы. В данной статье указанные элементы рассматриваются вместе и в силу схожести их спектральных характеристик с шириной полосы пропускания 0,5–1,5 нм названы обобщающим термином широкополосные каналообразующие оптические элементы (ШКОЭ).

### 1. Мониторинг ширины полосы пропускания и крутизны склонов

Полоса пропускания ШКОЭ характеризуется плоской вершиной и плавно спадающими, а затем резко падающими фронтами. На рис. 1 представлены типовые характеристики ШКОЭ для различного порядка  $n$  формирующего фильтра.

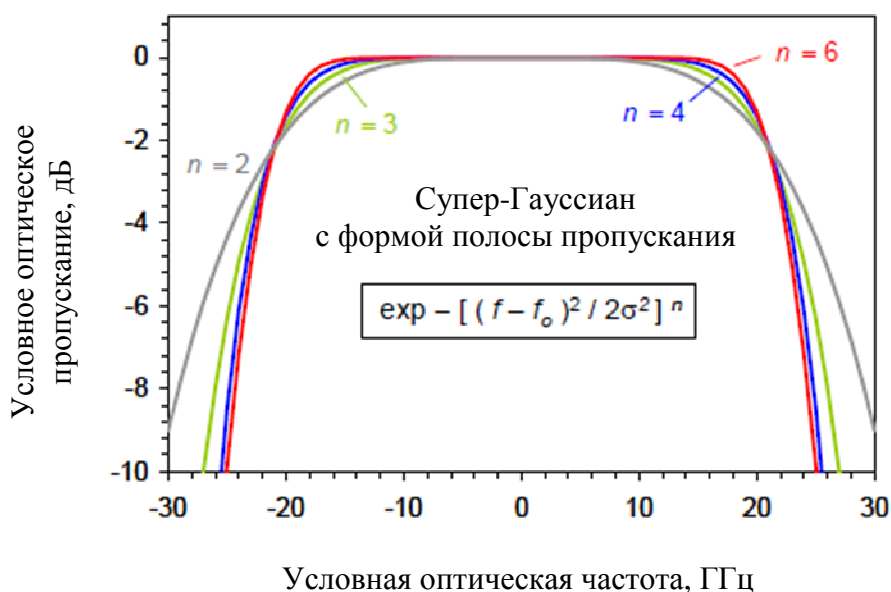


Рис. 1. Спектральные характеристики ШКОЭ

Наилучшими характеристиками по крутизне склонов обладает фильтр с порядком  $n=6$ . При этом контроль полосы пропускания необходим, в связи с тем, что сигнал при транспортировке проходит несколько ROADW-WSS, разбаланс полос которых приводит к сужению «общей» или эквивалентной полосы на выходе – в пункте назначения, приведенной к входу – пункту отправки. Эквивалентная полоса ROADW-WSS будет удовлетворять требованиям ITU при проходе максимум 7-и устройств ввода-вывода при использовании фильтров 3-го порядка, 12-и устройств – при использовании фильтров 4-го порядка и 20-и устройств – при использовании фильтров 6-го порядка [9–10]. Полоса пропускания ЧВРБ

более чувствительна к температурным воздействиям, что вызывает растяжение / сжатие решеток и соответствующее изменение шага chirпирования.

## 2. Мониторинг центральной длины волны

Как правило, тип устройств, используемых на линии передачи со спектральным уплотнением для ввода-вывода каналов одинаков, они имеют близкие характеристики, что незначительно сказывается на общей полосе частот. Влияние же сдвига центральной частоты очень ощутимо, что определяет необходимость ее мониторинга. Причины сдвига частоты – несовершенство оптических узлов, неточность настройки, внешние и внутренние напряжения в конструкции. Дополнительной причиной является изменение внешних климатических условий в шкафах, где расположены ROADM-WSS или ЧВРБ.

При этом следует разделять сдвиг частоты фиксированный, вызванный пиксельной структурой зеркальной системы WSS, и случайный, определяемый дополнительными причинами. Величина первого для LCOS-систем равна 3 ГГц, второго – 1 ГГц, для ЧВРБ – 10 пм/°С. Для гибких ROADM-WSS мониторинг центральной длины волны важен и с точки зрения возможности их перестройки, как по ширине полосы пропускания от 10 до 100 ГГц с шагом 10 ГГц (рис. 2,а), так и по величине перестройке центральной длины волны (расширение полосы пропускания в одну сторону) – 0,2 ГГц (рис. 2,б) [10].

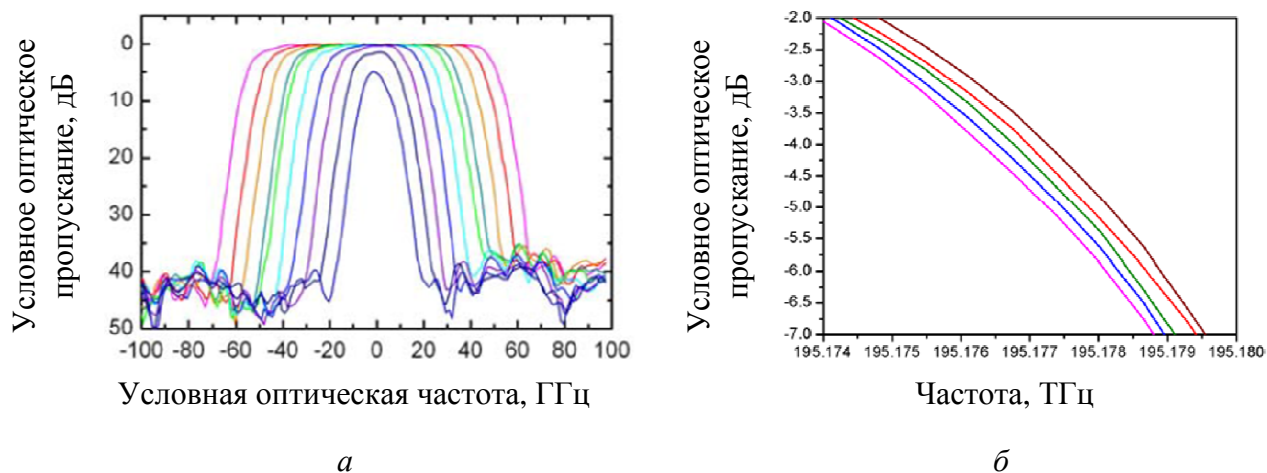


Рис. 2. Примеры перестройки ШКОЭ по полосе пропускания и центральной длине волны

## 3. Методы мониторинга и формирования полигармонических зондирующих излучений

Как правило, мониторинг ШКОЭ осуществляется с помощью оптических анализаторов спектра или векторных анализаторов. Нами предложено ввести оборудование для спектрального мониторинга в структуру встроенной системы канального мониторинга мощности.

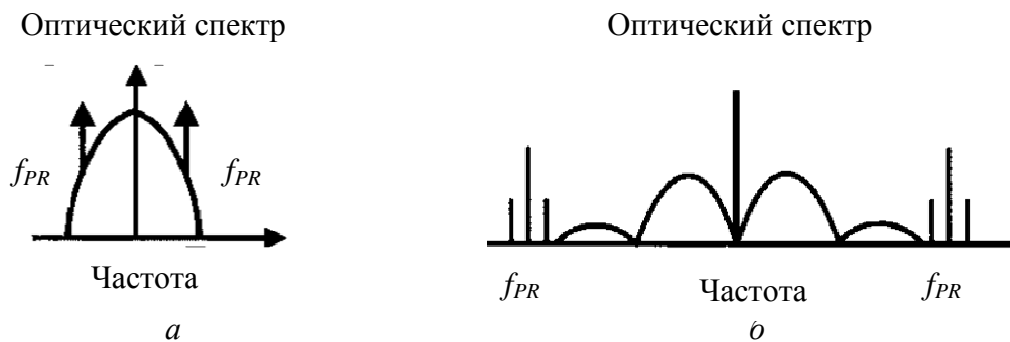


Рис. 3. Принципы расположения зондирующих колебаний:  
внутри спектра (а) и полосы передачи сигнала (б)

При этом формат мониторинга может быть как «out-band», так и «in-band». Во втором случае реализация мониторинга осуществляется с помощью наложения полигармонического зондирующего сигнала на спектр информационного сигнала. Примеры формирования таких каналов [8] приведены на рис. 3 для внутриканального (а) и внеканального (б) размещения зондирующих колебаний  $f_{PR}$ .

Алгоритмическая обработка ведется на частоте огибающей биений составляющих зондирующего сигнала. Недостатком такого мониторинга является невозможность перестройки длины волны несущей канала, которая используется и как центральная длина волны мониторинга, для настройки на центр полосы пропускания (центральную частоту). Данный факт потребовал применения специальных методов формирования полигармонических зондирующих сигналов на основе метода Ильина-Морозова.

Метод основан на формировании в модуляторе Маха-Цендера полигармонического зондирующего излучения из исходного одночастотного (на частоте несущей) с помощью амплитудно-фазовой модуляции [3, 5–6], который заключается в коммутации на  $180^\circ$  фазы амплитудно-модулированного излучения в момент прохождения его огибающей своего минимума. Найденные нами модулирующие колебания позволяют сформировать симметричное двух-полосное излучение, состоящее из нескольких равноудаленных частотных составляющих (гармоник) равной амплитуды, жестко синхронизированных между собой в фазе или в противофазе [1–2, 4].

Для этого в общем случае необходимо решить систему уравнений для коэффициентов ряда Фурье, варьируя не только коэффициент амплитудной модуляции, но и величину коммутации фазы  $\theta$ . С точки зрения наибольшей простоты технической реализации следует искать формирующие колебания, не затрагивая коммутации фазы, а используя синтез модулирующих колебаний со сложным гармоническим составом из  $k$  составляющих. Тогда частная задача формирования будет заключаться в поиске колебания вида

$$S(t) = \sum_{k=1}^{\infty} S_k \cos(2k \Omega t + \pi), \quad (1)$$

при котором

$$E_n = \frac{2E}{\pi} \left[ \frac{1}{n} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{m_k}{2} \left( \frac{1}{n+2k} + \frac{1}{n-2k} \right) \right], \text{ причем } E_n = E_{-n}, \quad (2)$$

где  $n \in [1, 3, 5]$ ,  $S_k$  – парциальные амплитуды,  $E_n$  – выражения для коэффициентов Фурье его спектра, а  $m_k$  – парциальные коэффициенты амплитудной модуляции.

Подобный подход к поиску модулирующих колебаний позволит также учесть влияние нелинейности модуляционных характеристик реальных устройств, используемых для реализации амплитудно-фазового преобразования, на спектральный состав выходного излучения. При этом перестройка разностной частоты между гармоническими составляющими, требуемая при решении ряда задач оптического спектрального мониторинга, достигается простым изменением частоты  $\Omega$ .

#### 4. Постановка общей задачи мониторинга с учетом поляризационной задержки

При решении общей задачи для нахождения центра и полуширины полосы пропускания ШКОЭ необходимо решить систему уравнений с амплитудными и фазовыми коэффициентами частотных составляющих. Процедура полигармонического зондирования заключается в решении системы уравнений вида:

$$[\mathbf{D}] = [\mathbf{H}] \times [\mathbf{E}] \times [\mathbf{E}]^*, \quad (3)$$

где  $[\mathbf{D}]$  – матрица выходных значений токов фотоприемника на частотах  $k\Omega$ ;  $[\mathbf{H}]$  – матрица, описывающая амплитуду фильтра в его полосе  $\Delta\omega$ , которая для ШКОЭ составляет 10-100 ГГц при возможной вариации центральной длины волны 1–3 ГГц;  $[\mathbf{E}]$  – матрица, описывающая спектр зондирующего полигармонического излучения на частотах  $\{\omega_0 \pm k\Omega\} \in \{\Delta\omega\}$ ,  $[\mathbf{E}]^*$  – матрица, комплексно-сопряженная  $[\mathbf{E}]$ .

На рис. 4 показано различие в компонентных характеристиках фильтров ШКОЭ для ТЕ и ТМ мод, что свидетельствует о необходимости мониторинга и поляризационных различий в их характеристиках [7].

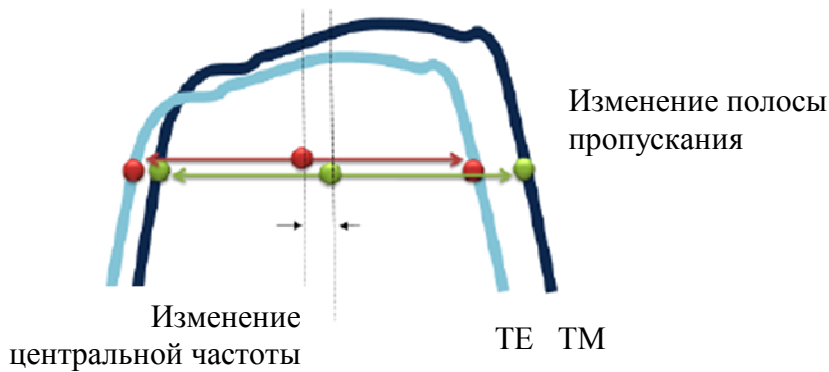


Рис. 4. Поляризационные характеристики ROADMs

Данные различия основаны на поляризационной природе распространения света в оптическом волокне и оптической структуре мультиплексора. Физика появления дифференциальной поляризационной задержки или сдвига центральной частоты по модам ТМ и ТЕ в ШКОЭ объясняется так же, как и появление поляризационно-модовой дисперсии в оптическом волокне. При этом изменяется не только центральная длина волны мультиплексора, но и параметры его полосы пропускания.

Тогда процедура полигармонического зондирования заключается в решении системы уравнений вида (3) с учетом поляризационной задержки:

$$[\mathbf{D}] = \begin{Bmatrix} [\mathbf{H}^\perp] \times [\mathbf{E}^\perp] \times [\mathbf{E}^\perp]^* \\ [\mathbf{H}^\parallel] \times [\mathbf{E}^\parallel] \times [\mathbf{E}^\parallel]^* \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где  $[\mathbf{E}^\perp]$  и  $[\mathbf{E}^\parallel]$  – матрицы ортогональных составляющих, а структура звена системы мониторинга будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

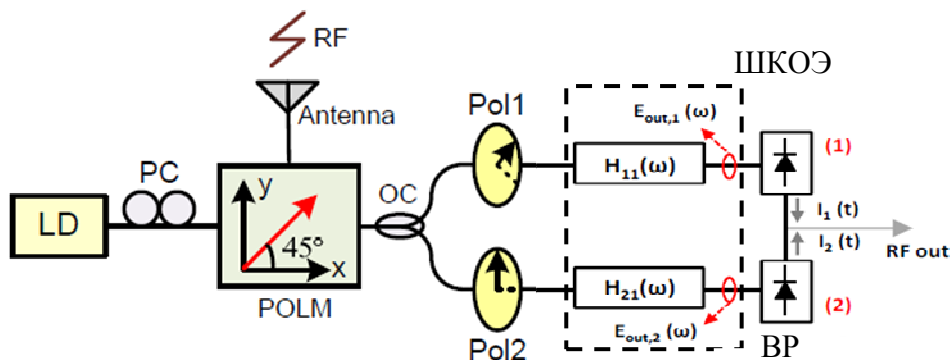


Рис. 5. Звено системы мониторинга ШКОЭ

На рис. 5 изображены: LD – лазерный диод, PC – поляризационный контроллер, POLM – поляризационный модулятор, RF – сигнал, формирующий полигармоническое зондирующее излучение, OC – оптический делитель, Pol1, Pol2 – поляризаторы, ШКОЭ – широкополосный каналообразующий оптический элемент (условно показан штрих-пунктиром и разделенным на две ортогональных составляющих), BP – балансный фотоприемник (1) и (2).

Результаты одного из вариантов практической реализации системы мониторинга ЧВРБ, в варианте измерения ширины полосы пропускания, представлены нами в [2] в приложении сенсорных технологий. Однако рассмотренный вариант с контролем ширины полосы пропускания по ширине фазового  $\pi$ -сдвига ЧВРБ, может быть использован для волоконно-оптических систем передачи со спектральным уплотнением и использованием форматов с подавленной несущей типа CS-RZ.

### **Заключение**

Предложен новый метод мониторинга спектральных характеристик ШКОЭ. Предлагаются встроенные системы «in-band» и «out-band» мониторинга с использованием формирователя полигармонического излучения (например, на базе модулятора Маха-Цендера) из несущего излучения канала, а также структурированных алгоритмов поиска центральной частоты и ширины полосы пропускания для контроля их соответствия параметрам ИТУ и настройкам линии передачи со спектральным уплотнением. Показано, что использование полигармонических методов зондирования ШКОЭ позволяет решить задачу комплексного мониторинга их спектральных характеристик с использованием широкополосной элементной базы самой системы передачи, при обработке огибающей зондирующего полигармонического сигнала по фазе или амплитуде с учетом поляризационной задержки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой и проектной частей государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Фотоника», задание 3.1962.2014К) и договора №9932/17/07-К-12 от 20.11.2012 между КНИТУ-КАИ и ОАО «КАМАЗ».*

### **Список литературы**

1. Айбатов Д.Л., Морозов О.Г., Садеев Т.С. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе // Нелинейный мир. — 2010. — Т. 8. — № 5. — С. 302-309.
2. Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р. и др. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 200-204.
3. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2010. — Т. 13. — № 3. — С. 84-91.

4. Морозов О.Г., Садеев Т.С. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов // Вестник Марийского ГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2010. — № 3. — С. 22-30.
5. Морозов О.Г., Талипов А.А., Ильин Г.И. и др. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа // Вестник Поволжского ГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2012. — № 2. — С. 3-12.
6. Севастьянов А.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. и др. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 232-236.
7. Adams M. ROADM and Wavelength Selective Switches // JDS Uniphase Corporation. — 2007.
8. Dimmick T.E., Rossi G., Blumenthal D.J. Optical Dispersion Monitoring Technique Using Double Sideband Subcarriers // IEEE Photonics technology letters. — 2000. — V. 12. — № 7. — P. 900-903.
9. Heismann F. System Requirements for WSS Filter Shape in Cascaded ROADMs Networks // JDS Uniphase Corporation. — 2010.
10. Sakurai Y., Kawasugi M., Hotta Y. et al. LCOS-Based 4x4 Wavelength Cross-Connect Switch For Flexible Channel Management in ROADMs // JDS Uniphase Corporation. — 2011.

**Рецензенты:**

Морозов О.Г., д.т.н., профессор, директор научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань;

Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.