

УДК 621.583

**И.И. Нуреев**

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

**РАДИОФОТОННЫЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
ИНТЕРРОГАЦИИ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ  
НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК.  
ЧАСТЬ 3. ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
ИНТЕРРОГАЦИИ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Рассмотрена проблема построения полигармонических систем интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков. Описана процедура формирования полигармонического зондирующего излучения с высокой равномерностью спектральных составляющих. Предложены способы выделения полигармонических составляющих (додетекторная и последетекторная фильтрация), а также предметы построения волоконно-оптических сенсорных сетей с полигармонической интеррогацией комплексированных волоконно-оптических датчиков: бортовой измерительной сети грузового автомобиля «КамАЗ», бортовой измерительной сети карьерного самосвала «БелАЗ», интеллектуальной скважины одновременно-раздельной добычи. Даны практические рекомендации по использованию способа фильтрации. Описаны требуемые технические характеристики датчиков и приборов опроса.

**Ключевые слова:** волоконно-оптические сенсорные системы, полигармонические способы интеррогации, модулятор Маха–Цендера.

**I.I. Nureev**

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russian Federation

**MICROWAVE PHOTONIC POLYHARMONIC SYSTEMS  
FOR INTERROGATION OF COMPLEX SENSORS, BASED  
ON FIBER BRAGG GRATINGS. PART 3. POLYHARMONIC  
INTERROGATION SYSTEMS FOR COMPLEX FIBER-OPTIC  
SENSORS` PROBING**

The problem of constructing polyharmonic interrogation systems for complex fiber-optic sensors is considered. The procedure for the formation of polyharmonic probing radiation with a high uniformity of the spectral components is considered. Methods for isolating polyharmonic constituents (predetection

and post-detection filtering) are proposed. Practical recommendations on the use of the filtration method are offered. The subjects of construction of fiber-optic sensor networks with polyharmonic interrogation of complex fiber-optic sensors are proposed: the on-board measuring network of the KamAZ truck, the on-board measuring network of the BelAZ mining dump truck, and the intellectual well of simultaneous separate mining. The required technical characteristics of the sensors and interrogation devices are described.

**Keywords:** fiber optic sensor systems, polyharmonic interrogation methods, Mach-Zehnder modulator.

## Введение

Приведенный в первой и второй частях [1, 2] совокупный анализ характеристик волоконно-оптических сенсорных систем (ВОСС), используемых в них комплексированных волоконно-оптических датчиков (КВОД), методов мультиплексирования и интеррогации последних, а также разновидностей зондирующих сигналов и методов их измерительного преобразования позволил предложить новый класс радиофотонных систем интеррогации (РСИ), обладающий улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками, а также расширенными функциональными возможностями по сравнению с существующими, – радиофотонные полигармонические системы интеррогации (РПСИ).

Рассмотрим множество задач анализа и синтеза, которые предстоит решить при разработке теории и техники симметричной двухчастотной рефлектометрии систем контроля (ДРСК) параметров природной и искусственных сред.

Общая абстрактная модель функционирования сложной системы при задании ее входов и выходов в теории систем рассматривается как отношение декартова произведения серии множеств [3]  $S \subseteq X \times Y$ , где множество входов  $X = X_1 X_2 \dots X_n$  состоит из подмножеств  $X_i$ ;  $Y$  – множество выходов системы. Если  $S$  – функция, то РПСИ – функциональная система, представляющая собой отображение абстрактного множества  $X$  в абстрактное множество  $Y$ , т.е.  $S : X \rightarrow Y$ , которое каждому элементу  $x \in X$  ставит в соответствие единственный элемент из  $Y$ .

Обоснование моделей РПСИ, соответствующих различным уровням описания, и выбор исходных множеств, определяемых приведенным выше соотношением, необходимо проводить на основе задач, решаемых системой, с учетом характерных свойств зондирующего симметричного полигармонического излучения и методов обработки рефлектометрической информации в условиях флуктуаций и шумов.

Наиболее отвечающей современным представлениям является модель РПСИ в виде пространственно-временного фильтра, позволяющего контролировать параметры природной и искусственных сред, которые содержатся в параметрах оптического информационного поля, распространяющегося в волокне.

Очевидно, что полная абстрактная модель РПСИ сложна, поэтому использование ее даже для анализа сопряжено с серьезными трудностями. В связи с этим решение задач анализа и синтеза структуры РПСИ и выбора целесообразных стратегий их применений должно производиться с позиций системного подхода. Основой системного подхода служит описание рассматриваемой системы на различных уровнях абстракции, чтобы наиболее простое описание отражало основные аспекты поведения системы. Для синтеза пространственно-временной структуры РПСИ целесообразно задавать общую и частную модели их функционирования. Общая модель должна включать частные модели, характеризующие основные процессы функционирования РПСИ.

Определяющим фактором для синтеза структуры РПСИ является множество параметров формируемого симметричного полигармонического зондирующего лазерного излучения. Анализ современного состояния теории и техники формирования симметричного полигармонического лазерного излучения с заданными характеристиками, измерения его параметров с требуемой точностью и управления параметрами ими во время процесса измерений позволяет представить проблемную область формирования симметричного полигармонического лазерного излучения в виде многоуровневого иерархического классификатора (рис. 1).

Верхний уровень классификатора отображает зондирующие излучатели с заданными амплитудными, частотными, фазовыми, поляризационными и пространственными характеристиками симметричного полигармонического зондирующего излучения, содержащего  $N$  составляющих, которые используются в различных РПСИ.

Второй уровень классификатора соответствует двум основным направлениям использования симметричного полигармонического излучения: переноса спектра информационного сигнала в область с минимальным уровнем шумов фотоприемника (неперестраиваемое) и обеспечение максимальной эффективности взаимодействия с исследуемой брэгговской структурой (перестраиваемое).

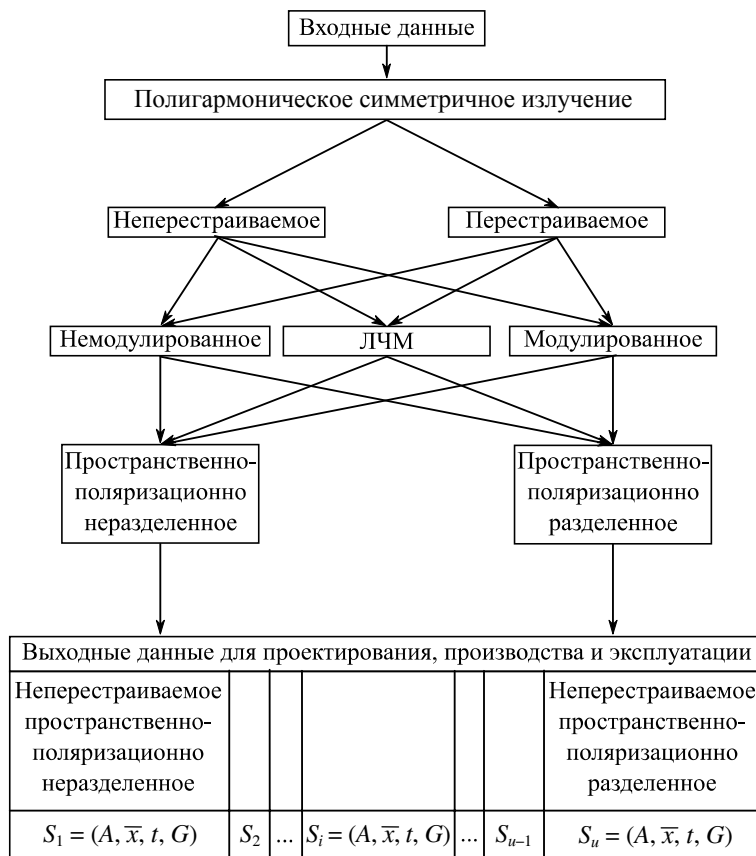


Рис. 1. Многоуровневый иерархический классификатор проблемной области формирования симметричного полигармонического излучения

Третий, четвертый и пятый уровни классификатора отображают частные задачи, для которых характерны тонкие структуры формируемого симметричного полигармонического зондирующего излучения (например, частотно-временные, амплитудно-временные, амплитудно-частотные, пространственно-поляризационные и т.д.).

Нижний уровень содержит изолированные, самостоятельные задачи, решаемые в процессе проектирования, производства и эксплуатации симметричных полигармонических зондирующих излучателей.

Приведенный многоуровневый иерархический классификатор отображает проблемную область как совокупность теоретических и прикладных знаний в области формирования симметричных полигармонических зондирующих излучений, накопленных на данный момент времени.

Решение общей задачи развития РПСИ может быть реализовано по уровням приведенного иерархического классификатора с соответствующими им критериями оценки эффективности и оптимизации формирования параметров симметричного полигармонического зондирующего излучения, вопросы методологии и практической разработки которых нашли отражение в данной статье.

Для уровней классификатора со второго по пятый характерно определение оптимальных параметров формируемого ДЛИ по результатам математического моделирования и экспериментов на стадии создания макетов РПСИ. На данной стадии могут быть определены разностная частота и амплитуда излучения, пространственно-поляризационные параметры, параметры модуляции или сканирования.

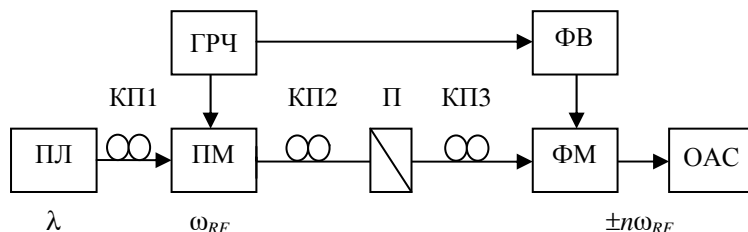
При этом на нижнем уровне могут быть определены факторы, позволяющие при минимизации управляющих воздействий на зондирующие излучатели достичь наибольшего эффекта взаимодействия с опрашиваемым датчиком, хотя предварительно они и рассматриваются на более высоком уровне классификатора. В этом случае встает вопрос о создании эффективных комплексированных датчиков – преобразователей измеряемого параметра в изменение параметров оптического излучения.

Наконец, для верхнего уровня характерными являются улучшение метрологических характеристик и расширение функциональных возможностей РПСИ, а также ВОСС в целом.

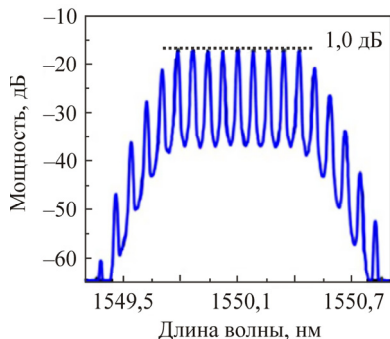
### **1. Генерация полигармонических зондирующих излучений с использованием модуляторов Маха–Цендера**

Рассмотрим ряд существующих решений для генерации плоского спектра, состоящего из множества спектральных гармонических составляющих, на основе работ [4–6]. Основное требование к системам оптической полигармонической генерации (СОПГ) таково: фазы составляющих, генерируемых СОПГ, должны быть строго синхронизированы.

В статье [7] рассмотрено каскадирование поляризационного (ПМ) и фазового (ФМ) модуляторов, при этом общая схема (рис. 2, *а*) не содержит устройств смещения рабочей точки, оптических фильтров, делителей или умножителей частоты. Возможность управления поляризацией в ПМ и простота ФМ позволили получить СОПГ на 9 линий соответственно с неравномерностью амплитуд в 1 дБ (рис. 2, *б*).



а



б

Рис. 2. Структурная схема генератора (а) и его выходной комбинированный спектр (б) [7]: ПЛ – перестраиваемый лазер; КП – контроллер поляризации; ГРЧ – генератор радиочастоты; ФВ – фазовращатель; ОАС – оптический анализатор спектра

При реализации зондирующего излучателя с меньшим числом линий на основе модернизированного способа Ильина–Морозова наиболее простым вариантом является его построение на основе двухпортового модулятора Маха–Цендера (ДПММЦ) [8].

Напряженность поля сигнала на его выходе описывается следующим выражением:

$$E_{\text{out}}(t) = 0,5E_{\text{in}} \left[ \exp(j\Delta\phi_1(t)) + \exp(j\Delta\phi_2(t)) \right] \cdot \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

где  $\Delta\phi_1(t)$  и  $\Delta\phi_2(t)$  – фазовые сдвиги в первом и втором портах (плечах) модулятора;  $E_{\text{in}}$  – амплитуда входного оптического сигнала. Фазовые сдвиги определяются воздействием модулирующих сигналов  $V_i(t)$  и заданными рабочими точками на склоне модуляционной характеристики ДПММЦ ( $i = 1, 2$  – номер порта (плеча) модулятора):

$$\Delta\phi_i(t) = \frac{\pi}{U_{\pi}} (V_i(t) + V_{\text{bias } i}), \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Найдем передаточную функцию ДПММЦ через отношение напряженностей выходного сигнала к входному:

$$\begin{aligned} \Psi(V_1(t), V_2(t)) &= \frac{E_{\text{out}}(t)}{E_{\text{in}}(t)} = \frac{1}{2} \left( \exp\left(\frac{j\pi V_1(t)}{U_\pi}\right) + \exp\left(\frac{j\pi V_2(t)}{U_\pi}\right) \right) = \\ &= \cos\left(\frac{\pi}{2U_\pi}(V_1(t) - V_2(t))\right) \cdot \exp\left(j\frac{\pi}{2U_\pi}(V_1(t) + V_2(t))\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Положив для устранения фазового чирпа модулятора  $V_1(t) = -V_2(t)$ , получим

$$\begin{aligned} \Psi &= \cos\left(\frac{\pi}{2U_\pi}(V_1(t) - V_2(t))\right) = \\ &= \cos\left(\frac{\pi \cdot V}{U_\pi} \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) - \frac{\pi \cdot \Delta V_{\text{bias}}}{2U_\pi}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $V$  – амплитуда модулирующего сигнала.

Учитывая формулу (2), получим следующее выражение:

$$\Psi = \cos\left(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)\right) \cos(Y) + \sin\left(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)\right) \sin Y, \quad (5)$$

где  $X = \pi \cdot V \sin(\Delta\varphi/2)/U_\pi$ ,  $Y = \pi \cdot \Delta V_{\text{bias}}/2U_\pi$ ,  $\Delta V_{\text{bias}} = V_{\text{bias}1} - V_{\text{bias}2}$ .

Приняв в выражении (5)  $\sin Y = 0$ , получим

$$\begin{aligned} \Psi &= \left(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)\right) = \\ &= \mathbf{J}_0(X) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \mathbf{J}_{2k}(X) \cos(2k(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)), \end{aligned} \quad (6)$$

тогда спектральный состав выходного сигнала модулятора будет определяться параметрами функций Бесселя 1-го рода  $2k$ -го порядка:

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= E_{\text{in}} \sin(\omega_0 t) \left[ \mathbf{J}_0(X) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \mathbf{J}_{2k}(X) \cos(2k(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)) \right] = \\ &= \mathbf{J}_0(X) E_{\text{in}} \sin(\omega_0 t) + 2 E_{\text{in}} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \mathbf{J}_{2k}(X) \sin(\omega_0 t) \cos(2k(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)) = \\ &= \mathbf{J}_0(X) E_{\text{in}} \sin(\omega_0 t) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ E_{\text{in}} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \mathbf{J}_{2k}(X) \left\{ \sin \left[ (\omega_0 - 2k\omega_{RF})t + k\Delta\varphi \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \sin \left[ (\omega_0 + 2k\omega_{RF})t + k\Delta\varphi \right] \right\}. \tag{7}
 \end{aligned}$$

При  $\Delta\varphi = \pi$  получим

$$\begin{aligned}
 E_{\text{out}}(t) &= \mathbf{J}_0(X) E_{\text{in}} \sin(\omega_0 t) - \mathbf{J}_2(X) E_{\text{in}} \sin \left[ (\omega_0 - 2\omega_{RF})t \right] - \\
 &- \mathbf{J}_2(X) E_{\text{in}} \sin \left[ (\omega_0 + 2\omega_{RF})t \right] + \mathbf{J}_4(X) E_{\text{in}} \sin \left[ (\omega_0 - 4\omega_{RF})t \right] + \\
 &\quad + \mathbf{J}_4(X) E_{\text{in}} \sin \left[ (\omega_0 + 4\omega_{RF})t \right] - \dots \tag{8}
 \end{aligned}$$

Анализ выражения (8) показывает, что выходной сигнал содержит излучение на частоте несущей  $\omega_0$  и боковые симметричные полосы, состоящие из четных гармонических составляющих радиочастоты,  $(\omega_0 + 2k\omega_{RF})$  и  $(\omega_0 - 2k\omega_{RF})$ .

Приняв в выражении (5)  $\sin Y = 1$ , получим  $\pi \cdot \Delta V_{\text{bias}} / 2U_{\pi} = \pi/2$ , или  $\Delta V_{\text{bias}} = U_{\pi}$ . Тогда  $\Psi = \sin(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\varphi/2)) =$   
 $= -2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_{2k+1}(X) \sin((2k+1)\omega_{RF}t)$ .

Приняв  $\Delta\varphi = \pi$ , получим  $X = (\pi V) / U_{\pi}$ . После элементарных математических преобразований, принимая во внимание соотношение для  $X$ , получим выражение для напряженности выходного оптического излучения, которая будет определяться функциями Бесселя 1-го рода  $(2k+1)$ -порядка:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{out}}(t) &= -2E_{\text{in}} \sin(\omega_0 t) \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{J}_{2k+1}(X) \sin((2k+1)\omega_{RF}t) = \\
 &= E_0 \mathbf{J}_1(X) \left[ \cos(\omega_0 + \omega_{RF})t - \cos(\omega_0 - \omega_{RF})t \right] + \\
 &+ E_0 \mathbf{J}_3(X) \left[ \cos(\omega_0 + 3\omega_{RF})t - \cos(\omega_0 - 3\omega_{RF})t \right] + \\
 &+ E_0 \mathbf{J}_5(X) \left[ \cos(\omega_0 + 5\omega_{RF})t - \cos(\omega_0 - 5\omega_{RF})t \right] + \dots \tag{9}
 \end{aligned}$$

Из выражения (9) видно, что несущая частота  $\omega_0$  подавлена, а излучение состоит из двух симметричных полос с нечетными



гармоническими составляющими радиочастоты:  $(\omega_0 + (2k + 1)\omega_{RF})$  и  $(\omega_0 - (2k + 1)\omega_{RF})$ .

Покажем, что, управляя параметрами модуляции, можно получить полигармонический сигнал с различным спектральным составом.

Для этого используем особенности модуляционных характеристик ММЦ, определяемых функциями Бесселя 1-го рода. Характерные кривые, отражающие функции Бесселя, показаны на рис. 3. Обратим внимание на точки равенства функций Бесселя разного порядка при одном и том же аргументе.

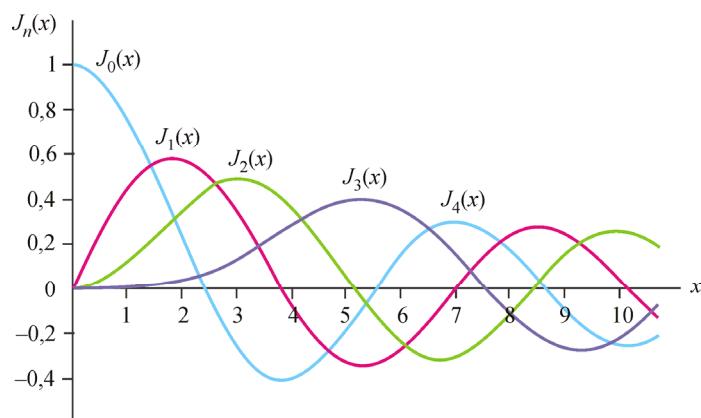


Рис. 3. Функции Бесселя 1-го рода

Для четных гармоник результаты численного моделирования представлены в табл. 1, а результаты моделирования в пакете Optisystem 7.0 – соответственно на рис. 4, а–в.

Таблица 1

Параметры модуляции и выходного излучения  
для получения четных гармоник

| Параметры модуляции<br>и амплитуда | Количество спектральных составляющих $N$ |        |        |        |
|------------------------------------|--|--------|--------|--------|
|                                    | Две                                      | Четыре | Шесть  | Восемь |
| $x$                                | 1,84                                     | 3,05   | 5,31   | 7,90   |
| $J_1(x)$                           | 0,582                                    | 0,319  | -0,346 | 0,220  |
| $J_3(x)$                           | 0,105                                    | 0,319  | 0,302  | -0,289 |
| $J_5(x)$                           | –  | 0,046  | 0,300  | 0,210  |
| $J_7(x)$                           | –  | –      | 0,073  | 0,314  |

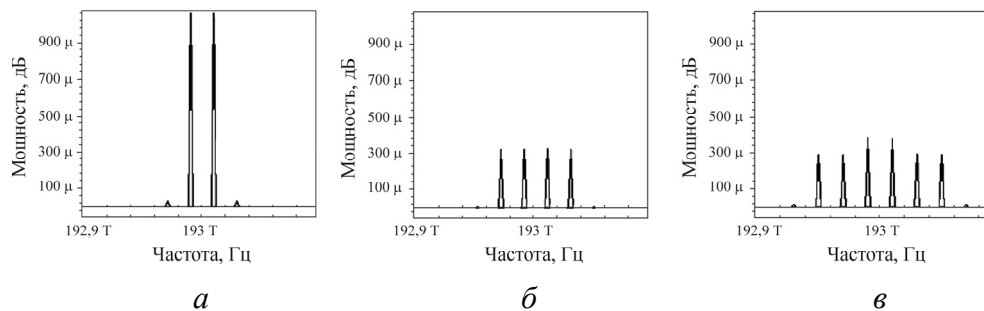


Рис. 4. Излучение на выходе ДПММЦ (четные гармоники):  
*a* – двухчастотное; *б* – четырехчастотное; *в* – шестичастотное

Для нечетных гармоник результаты численного моделирования сведены в табл. 2, а результаты имитационного моделирования в пакете Optisystem 7.0 – соответственно на рис. 5, *a*, *б*.

Таблица 2

Параметры модуляции и выходного излучения  
 для получения нечетных гармоник

| Параметры модуляции и амплитуда | Количество спектральных составляющих <i>N</i> |       |        |       |
|---------------------------------|---|-------|--------|-------|
|                                 | Одна  | Три   | Пять   | Семь  |
| <i>x</i>                        | 0   | 1,828 | 4,22   | 6,59  |
| $J_0(x)$                        | 1   | 0,323 | -0,373 | 0,27  |
| $J_2(x)$                        | 0   | 0,323 | 0,323  | -0,31 |
| $J_4(x)$                        | 0   | 0,025 | 0,323  | 0,27  |
| $J_6(x)$                        | 0   | 0     | 0,06   | 0,31  |

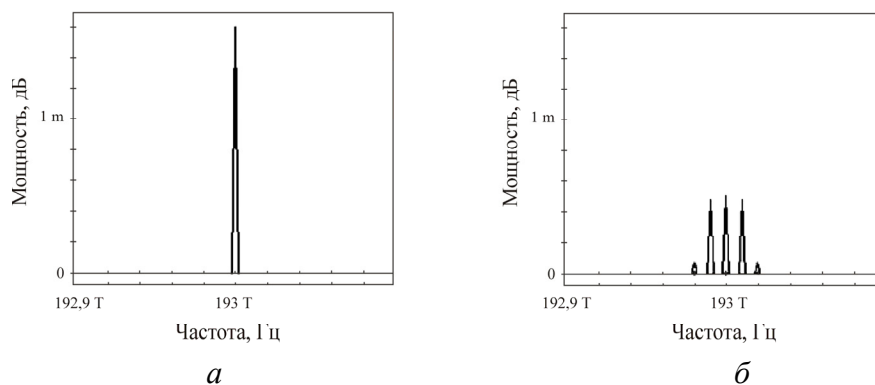


Рис. 5. Излучение на выходе ДПММЦ (нечетные гармоники):  
*a* – одночастотное; *б* – трехчастотное

Полученные полигармонические излучения характеризуются неравномерностью амплитуд и уровнем подавления боковых составляющих. Для  $N \in [2, 4]$  неравномерность равна 0, а уровень подавления – не меньше 15–20 дБ (выделено светлой заливкой ячеек в табл. 1, 2). Для  $N \in [5, 8]$  неравномерность не превышает 2,5 дБ, а уровень подавления – не меньше 20–25 дБ (выделено темной заливкой ячеек в табл. 1, 2). Знак минус определяет начальную фазу  $\pi$  спектральной составляющей.

Управление параметрами выходного излучения осуществляется выбором амплитуд и разности фаз напряжений модуляции, а также напряжений постоянного смещения.

Данный метод подходит для формирования сигнала с одинаковыми разностными частотами между составляющими четырехчастотного сигнала. Применение ДПММЦ для формирования четырехчастотного симметричного сигнала возможно лишь в случае расстройки между несущими равной четверти ширины ВБР, когда  $\Delta\epsilon_1 = \Delta\epsilon_2/2$ .

Рассмотрим получение четырехчастотного симметричного излучения с условием  $\Delta\epsilon_1 = \Delta\epsilon_2/4$  на примере двух последовательно включенных ММЦ.

Излучение волоконного лазера проходит через модулятор. На выходе модулятора формируются две боковые частоты с подавленной несущей. Спектральные составляющие излучения с выхода первого ММЦ служат несущими для формирования последующих двух пар гармоник четырехчастотного сигнала на выходе второго ММЦ.

Схема получения четырехчастотного симметричного сигнала представлена на рис. 6. Спектр сигнала на выходе второго ММЦ представлен на рис. 7.

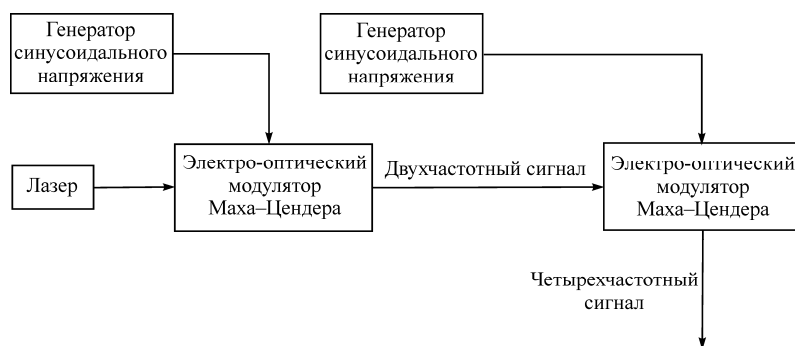


Рис. 6. Схема получения четырехчастотного сигнала

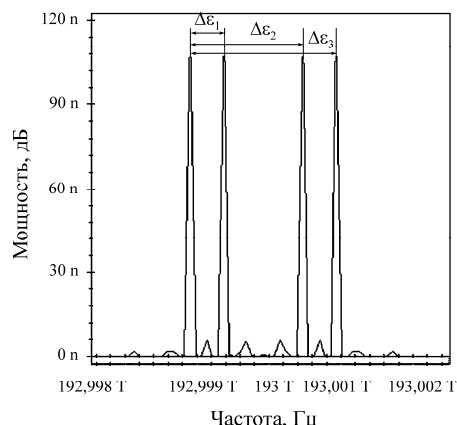


Рис. 7. Спектр полученного четырехчастотного сигнала

Данный вариант спектра зондирующего излучения неэквидистантен в сравнении с предыдущим (рис. 2), но симметричен относительно центральной длины волны ВБР,  $\Delta\varepsilon_2 = 4\Delta\varepsilon_1$ ,  $\Delta\varepsilon_3 = 5\Delta\varepsilon_1$ . В качестве электрооптического модулятора Маха–Цендера был выбран опытный образец модулятора производства «ПНППК» (г. Пермь) с диапазоном рабочих частот до 6 ГГц, обладающий малым весом и габаритами –  $65 \times 12$  мм.

Рабочая длина волны модулятора  $\lambda = 1,550$  мкм, полуволновое напряжение  $V_\pi = 1,97$  В.

На рис. 8 показана структурная схема установки преобразования одночастотного излучения в четырехчастотное.

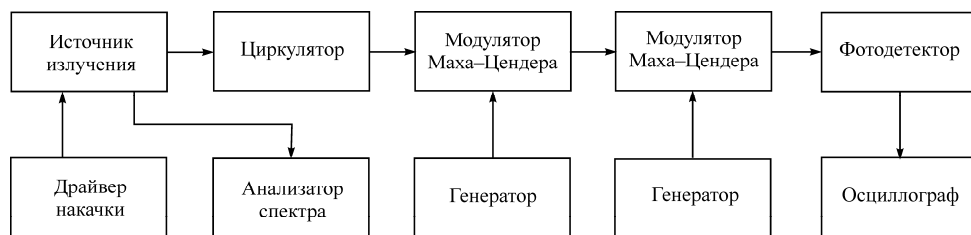


Рис. 8. Структурная схема установки преобразования одночастотного излучения в четырехчастотное

Компоненты экспериментальной установки (рис. 9): драйвер лазерного диода SuperlumPilot-4, лазерный диод LDI-DFB 1550–20/50–T2-SM3-FA-CWP, модулятор Маха–Цендера («ПНППК», Пермь), ге-

нератор Tektronix AFG 3251, генератор высокочастотный Г4–114, стабилизированный источник питания – 2 шт., вольтметр (точность – 0,01 В), фотодетектор, осциллограф Agilent DSO 7104В.

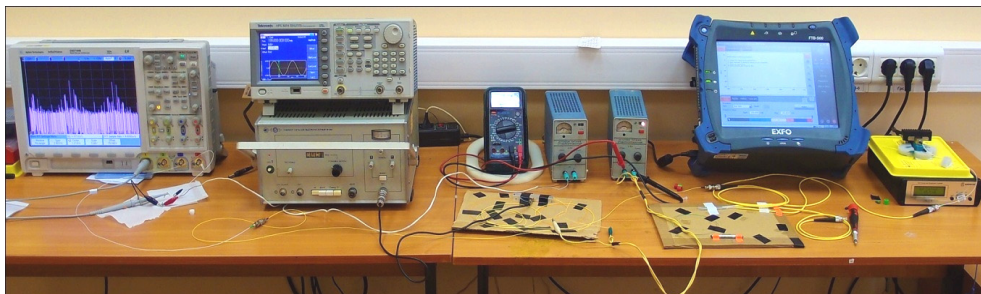


Рис. 9. Экспериментальная установка

Лазерное излучение модулируется ММЦ по интенсивности напряжением генератора. Для подачи модулирующего напряжения и частоты используется генератор Tektronix AFG 3251. Вид и величина модулирующего напряжения задаются на генераторе, а положение рабочей точки – с помощью источника постоянного смещения (см. рис. 9).

Спектрограмма на выходе фотоприемного устройства, полученная на осциллографе, представлена на рис. 10.

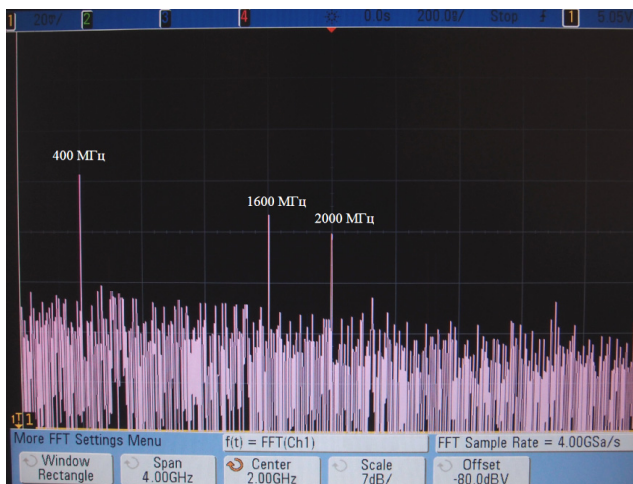


Рис. 10. Спектрограмма сигнала тока фотоприемного устройства

Для частоты генератора 200 МГц полуволновое напряжение составляло  $V_{\pi} = 1,97$  В. Детектирование излучения происходит в фотодетекторе.

текторе FDI (полоса пропускания  $<1,5$  ГГц), выходной сигнал подавался на вход осциллографа и регистрировался на съемном носителе. Регистрировался результат детектирования выходного излучения модуляторов, работающих в нулевой рабочей точке  $V = 1,97$  В. Амплитуда модулирующего напряжения  $U = 4$  В,  $f = 200$  МГц. Выходной ток представляет собой периодическое колебание на удвоенной частоте модуляции  $\Delta\varepsilon_1 = 0,4$  ГГц и комбинированных компонентах биений  $\Delta\varepsilon_2 = 1,6$  ГГц,  $\Delta\varepsilon_3 = 2$  ГГц.

При реализации макетной экспериментальной установки в диапазоне сотен мегагерц для формирования зондирующего излучения использовались однопортовые электрооптические модуляторы Маха–Цендера, аналоги которых на рынке стоят до 1200 долл. Таким образом, при использовании фотодетектирования в низкочастотной области стоимость установки будет определяться стоимостью электрооптического модулятора в канале зондирования. При широкополосном детектировании стоимость фотоприемника возрастет и составит до 6000 долл., что позволяет говорить о выигрыше по стоимости, поскольку при работе на разностной частоте стоимость фотоприемника может составить около 50–100 долл.

## **2. Способы полигармонического зондирования волоконных брэгговских решеток с последетекторной обработкой информации**

В первой части статьи [1] рассмотрена процедура полигармонического зондирования волоконных брэгговских решеток (ВБР). Рассмотрим способы фильтрации компонент.

Методика полигармонического зондирования волоконных брэгговских решеток (ВБР) контура с последетекторной обработкой сигнала заключается в попарном анализе сигналов после процесса фотодетектирования [9–11]. Обобщенная структурная схема аппаратной реализации способов полигармонического зондирования с последетекторной обработкой представлена на рис. 11.

Принцип работы схемы, проиллюстрированной на рис. 11, заключается в следующем: зондирующее излучение от источника полигармонического излучения (с  $N$  зондирующими частотами  $\omega_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  и соответствующими им длинами волн  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ ) поступает на вход циркулятора, а затем на ВБР. Отраженный от ВБР полигармонический

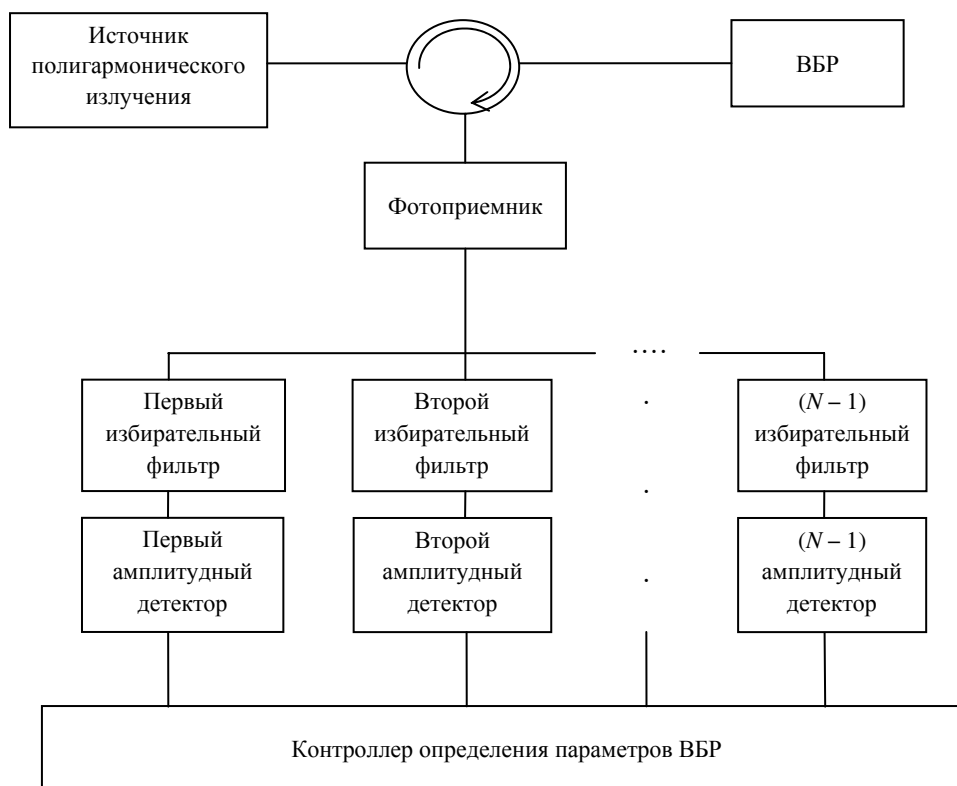


Рис. 11. Обобщенная структурная схема аппаратной реализации способов полигармонического зондирования с последдетекторной обработкой

сигнал через другое плечо циркулятора подается на фотоприемник. На фотоприемнике получаем полигармонический сигнал, который в исходном виде достаточно сложен для прямого анализа. Вместе с тем любая пара зондирующих частот позволяет применить алгоритм двухчастотного анализа по методу Ильина–Морозова. Для того чтобы двухчастотный метод Ильина–Морозова мог быть применим, необходимо обеспечить условие однозначности выбора любой пары частот без примеси в результирующем сигнале сторонних гармоник. Иными словами, должно быть соблюдено требование

$$|\omega_i - \omega_j| \neq |\omega_k - \omega_n|, \forall i, j, k, n \in \overline{1, N} \cup i \neq k \cup k \neq n. \quad (10)$$

Разность любой пары частот по модулю не должна совпадать с разностью любой другой пары частот. Это требование может быть легко удовлетворено, поскольку набор зондирующих частот выбирается исследователем самостоятельно.

Выполнение требования к разностям частот зондирования позволяет применить частотные фильтры для выделения любой пары частот с выводом результата сложения их колебаний на фотодетектор. Для этого на выходе фотодетектора устанавливаются частотно-избирательные цепи в количестве  $(N - 1)$ . Частотно-избирательные цепи настраиваются таким образом, чтобы попарно выделить сигналы от двух соседних частот зондирования, и настраиваются на разность частот зондирования. Для всех пар частот  $(\omega_i, \omega_{i+1}), \forall i = \overline{1, N-1}$  полоса пропускания частотно-избирательного фильтра настраивается на разность частот  $\bar{\omega}_i = |\omega_i - \omega_{i+1}|, \forall i = \overline{1, N-1}$ .

В каждом канале частотной фильтрации производится выделение суммарного сигнала от разности пары частот  $|\omega_i - \omega_{i+1}|$ . Частоты зондирования  $\omega_i, \omega_{i+1}$  близки друг к другу, и разность частот много меньше абсолютных значений частот  $\Delta\omega_i \ll \omega_i, \omega_{i+1}$ .

Результирующим сигналом будет огибающая биений на частотах  $\omega_i, \omega_{i+1}$  для  $\forall i = \overline{1, N-1}$ .

Например, при шестичастотном зондировании в первом канале фильтрации производится выделение огибающей биений на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . После прохождения выделенного сигнала биений через амплитудный детектор происходит выделение амплитуды несущих частот  $A_1^1$  и  $A_2^1$ . Во втором канале фильтрации производится выделение огибающей биений для следующей пары частот  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . После прохождения выделенного сигнала биений через амплитудный детектор второго канала происходит выделение амплитуды несущих частот  $A_2^2$  и  $A_3^2$ . Всего каналов частотной фильтрации в данном случае 5. В последнем канале фильтрации производится выделение огибающей биений на частотах  $\omega_5$  и  $\omega_6$  и с помощью амплитудного детектора амплитуды несущих частот  $A_5^5$  и  $A_6^5$ .

В контроллере определения параметров производятся оцифровка амплитуд несущих частот, поступивших с каждого канала фильтрации, и упорядочивание в соответствии с зондирующими частотами. Обработка ведется по алгоритму, описанному в предыдущем параграфе.



В результате попарной обработки сигнала двухчастотным методом Ильина–Морозова получаем исходный набор длин волн, соответствующих несущим частотам, и амплитуд отраженного сигнала  $\{\lambda_i, A_i\}, i = \overline{1, N}$  для определения параметров ВБР, что является необходимым и достаточным набором данных для восстановления профиля ВБР, определения центральной длины волны ВБР и ее смещения от начального невозмущенного состояния.

На рис. 12 показано ситуационное расположение зондирующих частот относительно контура ВБР, на рис. 13 – измерительные характеристики по коэффициенту модуляции огибающей биений между составляющими анализируемой пары зондирующих частот на выходе ВБР (рис. 13, а), а также разности и знаку разности фаз огибающих между составляющими анализируемой пары зондирующих частот на входе и выходе ВБР (рис. 13, б) как функции расстройки ее контура.

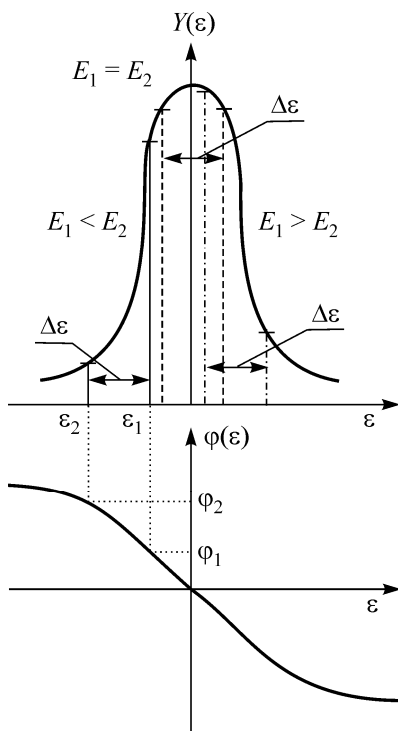


Рис. 12. Ситуационное расположение зондирующих частот относительно контура ВБР

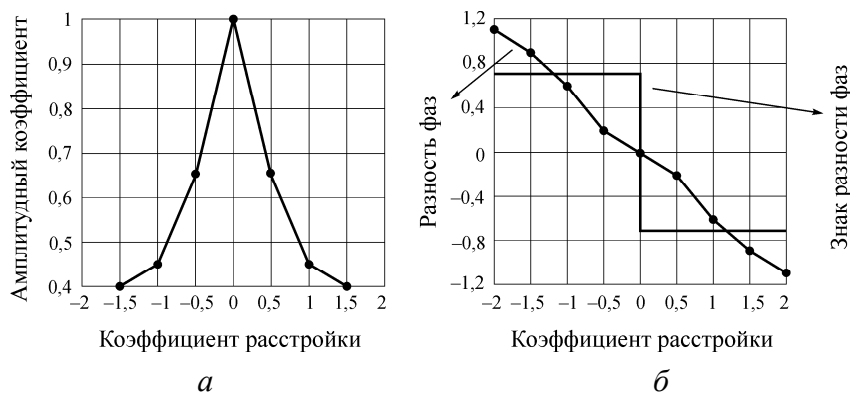


Рис. 13. Измерительные характеристики интеррогаторов с последетекторной обработкой по коэффициенту модуляции огибающей биений между составляющими анализируемой пары зондирующих частот на выходе ВБР (а) и разности и знаку разности фаз огибающих между составляющими анализируемой пары зондирующих частот на входе и выходе ВБР (б) как функции расстройки ее контура

### 3. Способы полигармонического зондирования с додетекторным физическим разделением измерительных каналов

Методика полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторным физическим разделением измерительных каналов заключается в попарном разделении зондирующих частот с применением оптических избирательных фильтров до процесса фотодетектирования [12–14]. Обобщенная структурная схема аппаратной реализации метода полигармонического зондирования с додетекторным физическим разделением измерительных каналов представлена на рис. 14. Принцип работы схемы заключается в следующем. Зондирующее излучение от источника полигармонического излучения (с количеством  $N$  зондирующих частот  $\omega_i, i = \overline{1, N}$  и соответствующих этим частотам длинам волн  $\lambda_i, i = \overline{1, N}$ ) поступает на вход циркулятора, а затем на ВБР. Отраженный от ВБР полигармонический сигнал через другое плечо циркулятора поступает на оптический разветвитель сигнала. Рассмотрим два варианта построения устройств с додетекторным физическим разделением оптико-электронных измерительных каналов.

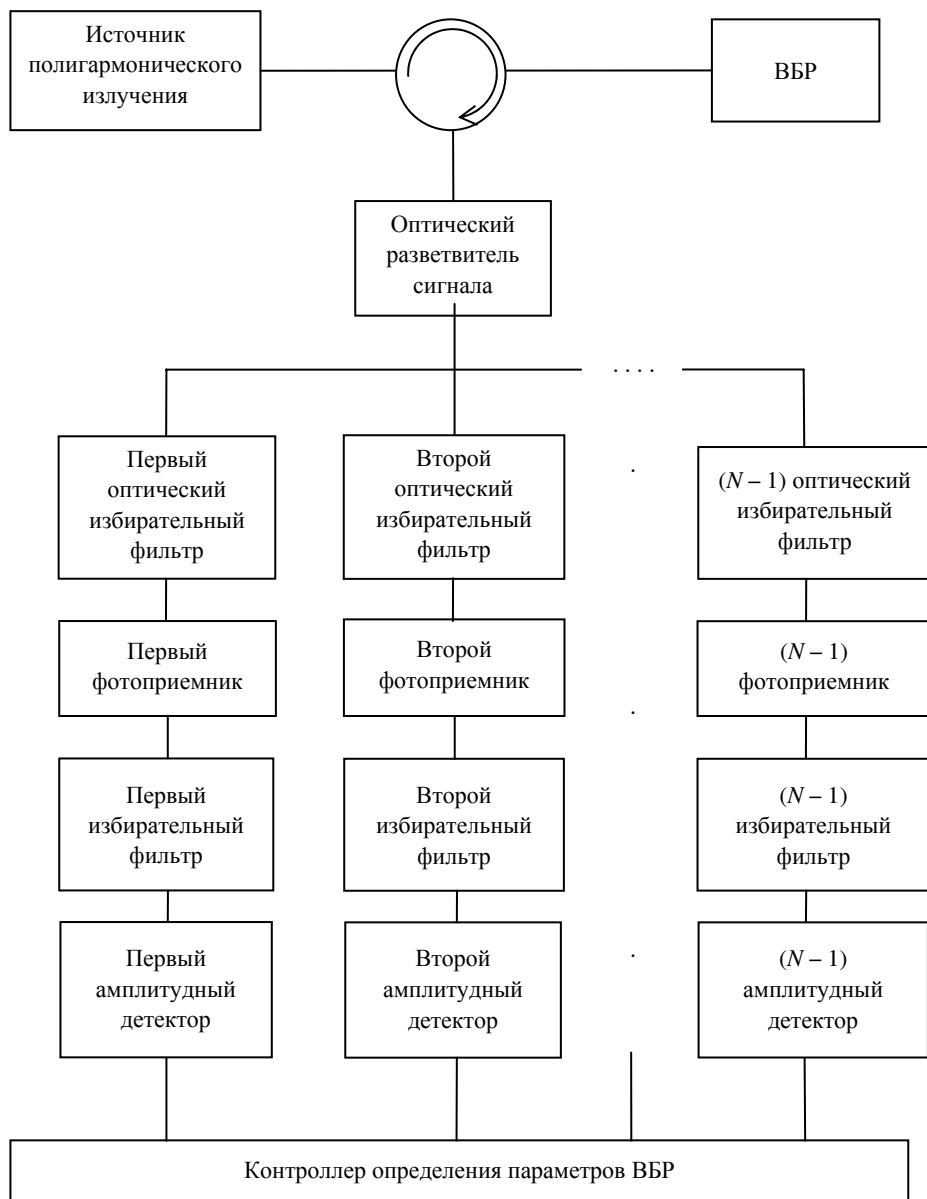


Рис. 14. Обобщенная структурная схема аппаратной реализации способа полигармонического зондирования с додетекторным физическим разделением измерительных каналов

**Вариант 1.** Каждый выход оптического разветвителя сигнала соединяется со своим канальным элементом оптико-электронной обработки, состоящим из оптического избирательного фильтра, фотопри-

емника и амплитудного детектора (избирательный электрический фильтр в данном варианте реализации отсутствует). Количество выходов оптического разветвителя должно строго соответствовать количеству  $N$  несущих зондирующих частот. С помощью оптического избирательного фильтра, каждый из которых настроен четко на несущую зондирующую частоту  $\omega_i, i = \overline{1, N}$ , выделяется отраженное от ВБР зондирующее излучение с длиной волны  $\lambda_i, i = \overline{1, N}$ . Далее оптический сигнал поступает на фотоприемник, затем на амплитудный детектор. В результате с выхода каждого канала обработки на вход контроллера определения параметров ВБР поступает величина амплитуды зондирующего излучения, отраженного от ВБР, причем значения амплитуд отраженных составляющих будут зависеть от своего положения относительно центра ВБР.

Особенностью построения устройства с додетекторным физическим разделением измерительных каналов по данному варианту является использование сверхузкополосных оптических фильтров для выделения несущих зондирующих частот  $\omega_i, i = \overline{1, N}$ , в качестве которых может использоваться, например, ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом. Однако данный тип оптических фильтров сильно подвержен воздействию температуры, что будет оказывать влияние на стабильность работы фильтра, в том числе и долговременную. Необходимо отметить и относительно дорогую оптическую избирательность фильтров, что приводит к удорожанию схемы в целом без существенных преимуществ ее применения.

**Вариант 2.** Каждый выход оптического разветвителя сигнала соединяется со своим канальным элементом оптико-электронной обработки, состоящим из оптического избирательного фильтра, фотоприемника, избирательного электрического фильтра и амплитудного детектора. В этом варианте количество выходов оптического разветвителя на единицу меньше количества зондирующих частот, поскольку они анализируются попарно.

С помощью оптического избирательного фильтра попарно выделяются оптические сигналы двух соседних частот зондирования  $\omega_i, \omega_{i+1}$  для  $\forall i = \overline{1, N-1}$ . Выделенная пара двухчастотного сигнала поступает на канальный фотоприемник. На фотоприемнике результи-

рующим сигналом будет огибающая биений на частотах  $\omega_i, \omega_{i+1}$  для  $\forall i = \overline{1, N-1}$ . Следует отметить, что любая пара зондирующих частот позволяет применить алгоритм двухчастотного анализа по методу Ильина–Морозова. С фотоприемника сигнал поступает на частотно-избирательный фильтр. Фильтр настроен таким образом, чтобы попарно выделить сигналы от двух соседних частот зондирования, и центральная частота фильтра должна соответствовать разности частот зондирования. Для всех пар частот  $(\omega_i, \omega_{i+1}), \forall i = \overline{1, N-1}$  полоса пропускания частотно-избирательного фильтра настраивается на разность частот  $\bar{\omega}_i = |\omega_i - \omega_{i+1}|, \forall i = \overline{1, N-1}$ . В каждом канале частотной фильтрации производится выделение суммарного сигнала от разности пары частот  $|\omega_i - \omega_{i+1}|$ . Частоты зондирования  $\omega_i, \omega_{i+1}$  близки друг к другу, и разность частот много меньше абсолютных значений частот  $\Delta\omega_i \ll \omega_i, \omega_{i+1}$ . Результирующим сигналом будет огибающая биений на частотах  $\omega_i, \omega_{i+1}$  для  $\forall i = \overline{1, N-1}$ . В контроллере определения параметров производятся оцифровка амплитуд несущих частот, поступивших с каждого канала фильтрации, и их систематизация в соответствии с алгоритмом, описанным в работах [1, 2]. В результате попарной обработки огибающей биений двухчастотного сигнала получаем исходный набор длин волн, соответствующих несущим частотам, и амплитуд отраженного сигнала  $\{\lambda_i, A_i\}, i = \overline{1, N}$  для определения параметров ВБР.

В данном варианте реализации способа полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторным физическим разделением измерительных каналов, в отличие от метода полигармонического зондирования ВБР контура с последдетекторной обработкой сигнала, не требуется соблюдения требования (10), так как отраженные от ВБР зондирующие составляющие выделяются в оптической области (до операции фотодетектирования).

В варианте 2, в отличие от варианта 1, требования к оптическим фильтрам немного ослаблены, так как в полосу пропускания каждого канального оптического фильтра должно попасть по два зондирующих излучения, разнесенных на частоту  $\Omega$ . Однако эти фильтры тоже силь-

но подвержены температурным уходам центральной длины волны пропускания и требуют термостатирования.

Техническая реализация способа полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторным физическим разделением измерительных каналов может быть упрощена, если использовать упорядоченную волноводную решетку (УВР) (в англ. аббревиатуре AWG) в качестве устройства, объединяющего в своем составе оптический разветвитель сигнала и оптические избирательные фильтры с количеством до 96.

Проанализировав работу способов полигармонического зондирования ВБР контура с последетекторной и додетекторной обработкой сигнала, сведем их достоинства и недостатки в табл. 3.

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа способов полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторной и последетекторной обработкой

| Способы зондирования   | Недостатки   | Достоинства                                      |
|--|--|--|
| Метод полигармонического зондирования ВБР контура с последетекторной обработкой сигнала                        | Необходимо использование широкополосного фотоприемника   | Для обработки требуется только один фотоприемник |
| Метод полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторным физическим разделением измерительных каналов | 1. Для обработки требуется количество фотоприемников, равное количеству каналов обработки<br>2. Требуется использование узкополосных оптических фильтров, что влечет за собой необходимость термостатирования, и, как следствие, приводит к удорожанию системы в целом | Упрощение структуры при использовании УВР        |

На основании данных табл. 3 можно утверждать, что:

1) способ полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторным физическим разделением измерительных каналов применим в тех случаях, когда в качестве оптического разветвителя сигнала и оптических избирательных фильтров используется УВР;

2) способ полигармонического зондирования ВБР контура с последетекторной обработкой сигнала применим во всех остальных случаях.

#### 4. Примеры построения волоконно-оптических сенсорных сетей с полигармонической интеррогацией комплексированных волоконно-оптических датчиков

*Бортовая измерительная сеть грузового автомобиля «КамАЗ».*  
Структура бортовой измерительной сети грузового автомобиля «КамАЗ» представлена на рис. 15.

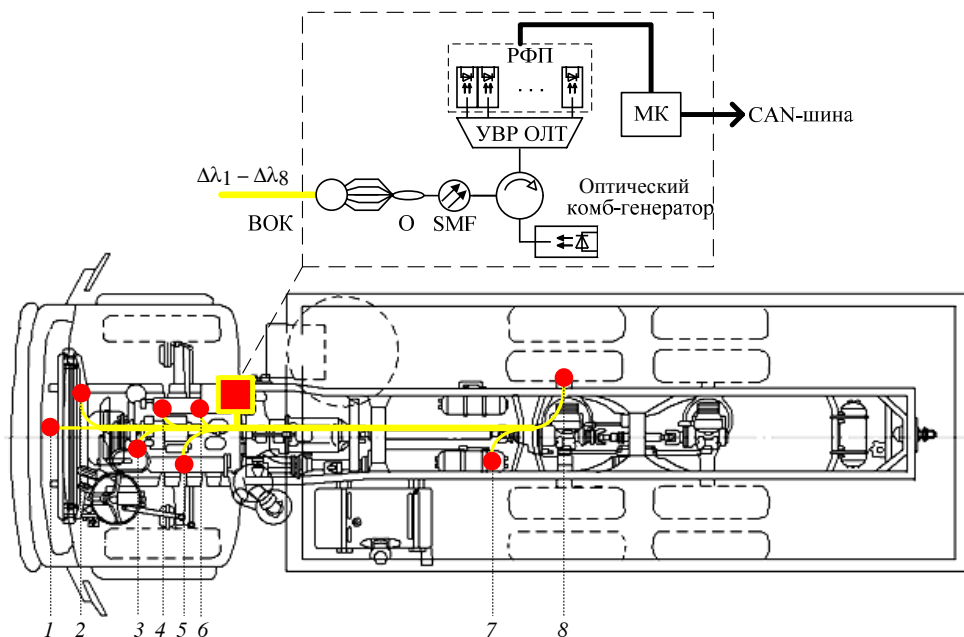


Рис. 15. Измерительная сеть грузового автомобиля «КамАЗ»

На борту грузового автомобиля имеется широкая номенклатура датчиков различного типа, часть из которых может быть заменена аналогичными волоконно-оптическими с улучшенными метрологическими характеристиками, а именно (см. рис. 15): 1 – ВОД температуры воздуха; 2 – ВОД температуры охлаждающей жидкости; 3 – ВОД давления масла; 4 – ВОД температуры масла; 5 – ВОД давления топлива; 6 – совмещенный ВОД давления и температуры наддува; 7 – ВОД давления воздуха в пневмосистеме; 8 – ВОД износа и температуры тормозных колодок (опционально).

В табл. 4 представлены технические требования на указанные датчики.

Таблица 4

Технические требования на ВОД для грузового автомобиля «КамАЗ»

| Тип датчика  | Диапазон измерения                                     | Погрешность измерения |
|--|--|-----------------------|
| ВОД температуры воздуха                                  | -40...+120 °С  | ±1 °С                 |
| ВОД температуры охлаждающей жидкости                     | -40...+130 °С  | ±1 °С                 |
| ВОД давления масла                                       | 0...980 кПа  | ±10 %                 |
| ВОД температуры масла                                    | -40...+120 °С  | ±1 °С                 |
| ВОД давления топлива                                     | 0...100 МПа  | ±10 %                 |
| Совмещенный ВОД давления и температуры наддува           | -50...400 кПа;<br>-40...+120 °С                        | ±10 %<br>±1 °С        |
| ВОД давления воздуха в пневмосистеме                     | 0...900 кПа  | ±10 %                 |
| ВОД износа и температуры тормозных колодок (опционально) | Многоуровневая пороговая сигнализация<br>-40...+300 °С | ±0,1 мм<br>±5 °С      |

Исходя из указанных требований на датчики, можно описать технические требования на прибор для их опроса (табл. 5).

Таблица 5

Технические требования на прибор опроса

| № п/п | Параметр  | Значение |
|-------|---|----------|
| 1     | Число одновременно опрашиваемых датчиков  | 10       |
| 2     | Рабочий спектральный диапазон одного датчика, не более                            | 4 нм     |
| 3     | Рабочий спектральный диапазон прибора опроса, не менее                            | 40 нм    |
| 4     | Абсолютная погрешность определения смещения центральной длины волны ВБР, не более | ±100 пм  |
| 5     | Динамический диапазон входного сигнала, не менее                                  | 20       |

**Бортовая измерительная сеть карьерного самосвала «БелАЗ».**  
Структура бортовой измерительной сети карьерного самосвала «БелАЗ» представлена на рис. 16.



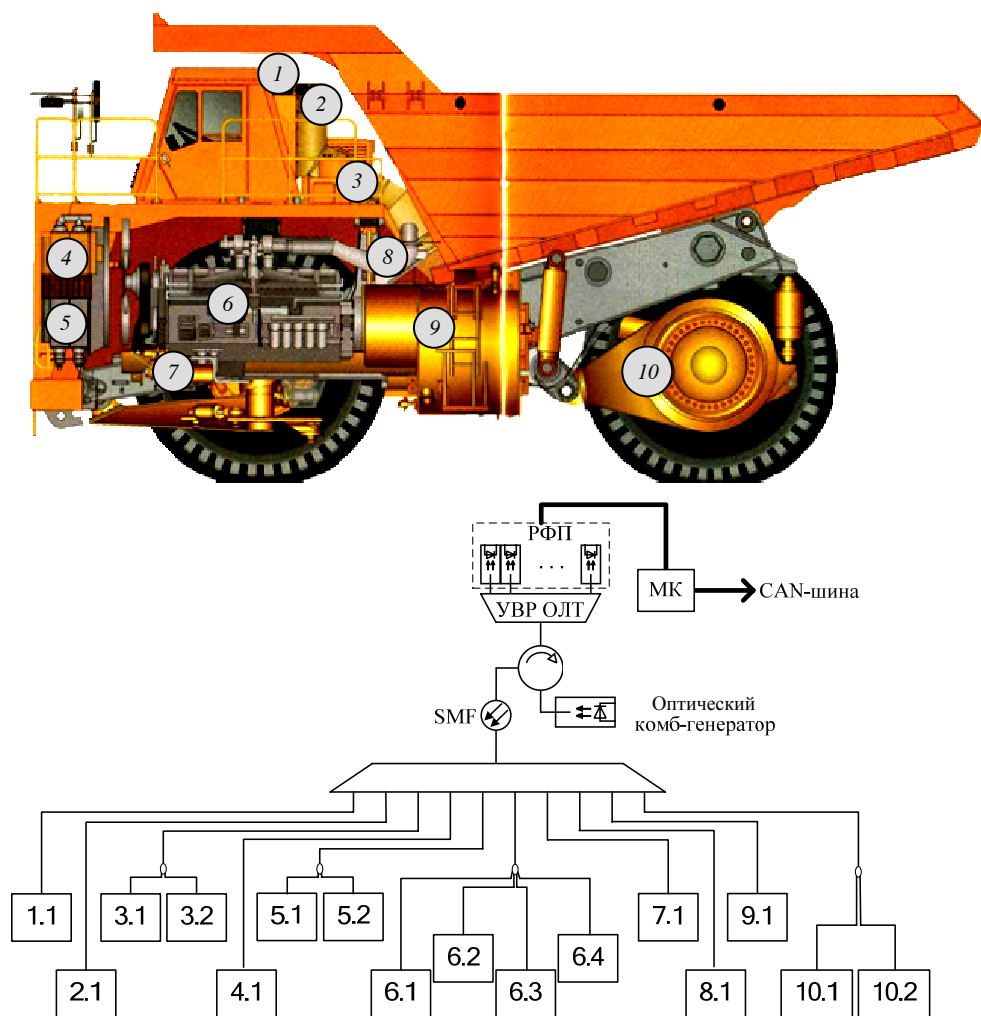


Рис. 16. Бортовая измерительная сеть карьерного самосвала «БелАЗ»

На борту автомобиля имеется широкая номенклатура датчиков различного типа, часть из которых может быть заменена аналогичными волоконно-оптическими с улучшенными метрологическими характеристиками, а также могут быть введены дополнительные ВОД для контроля важных рабочих параметров. Все объекты контроля объединены в узлы, соответствующие конкретному агрегату машины.

Перечень датчиков для бортовой измерительной сети  
карьерного самосвала «БелАЗ»

| Узел                                | Номенклатура датчиков   |
|-------------------------------------|---|
| 1 – блок тормозных резисторов       | 1.1 – ВОД температуры тормозных резисторов  |
| 2 – силовой шкаф управления         | 2.1 – ВОД температуры силовых контактов   |
| 3 – узлы гидросистемы               | 3.1 – ВОД температуры рабочей жидкости<br>3.2 – ВОД давления рабочей жидкости   |
| 4 – узел забора воздуха             | 4.1 – ВОД температуры воздуха   |
| 5 – система охлаждения              | 5.1 – ВОД температуры охлаждающей жидкости<br>5.2 – ВОД давления охлаждающей жидкости   |
| 6 – силовая установка               | 6.1 – ВОД температуры масла<br>6.2 – ВОД давления масла<br>6.3 – совмещенный ВОД давления и температуры наддува<br>6.4 – ВОД температуры генератора   |
| 7 – узлы пневмосистемы              | 7.1 – датчик давления воздуха в пневмосистеме   |
| 8 – узел выпуска отработавших газов | 8.1 – датчик температуры отработавших газов   |
| 9 – топливная система               | 9.1 – датчик давления топлива   |
| 10 – мотор-колеса                   | 10.1 – набор мультипликативных датчиков износа и температуры щеток тяговых электродвигателей левого мотор-колеса<br>10.2 – набор мультипликативных датчиков износа и температуры щеток тяговых электродвигателей правого мотор-колеса |

**Интеллектуальная скважина одновременно-раздельной добычи.** Структура скважины одновременно-раздельной добычи (ОРД) с размещенной в ней волоконно-оптической системой мониторинга представлена на рис. 17.

Внутрискважинные совмещенные датчики давления и температуры должны удовлетворять следующим техническим требованиям (табл. 6).

Обычно в скважине расположены два совмещенных ВОД, однако их число может быть увеличено до 6, тогда технические требования на прибор опроса будут выглядеть следующим образом (табл. 7).

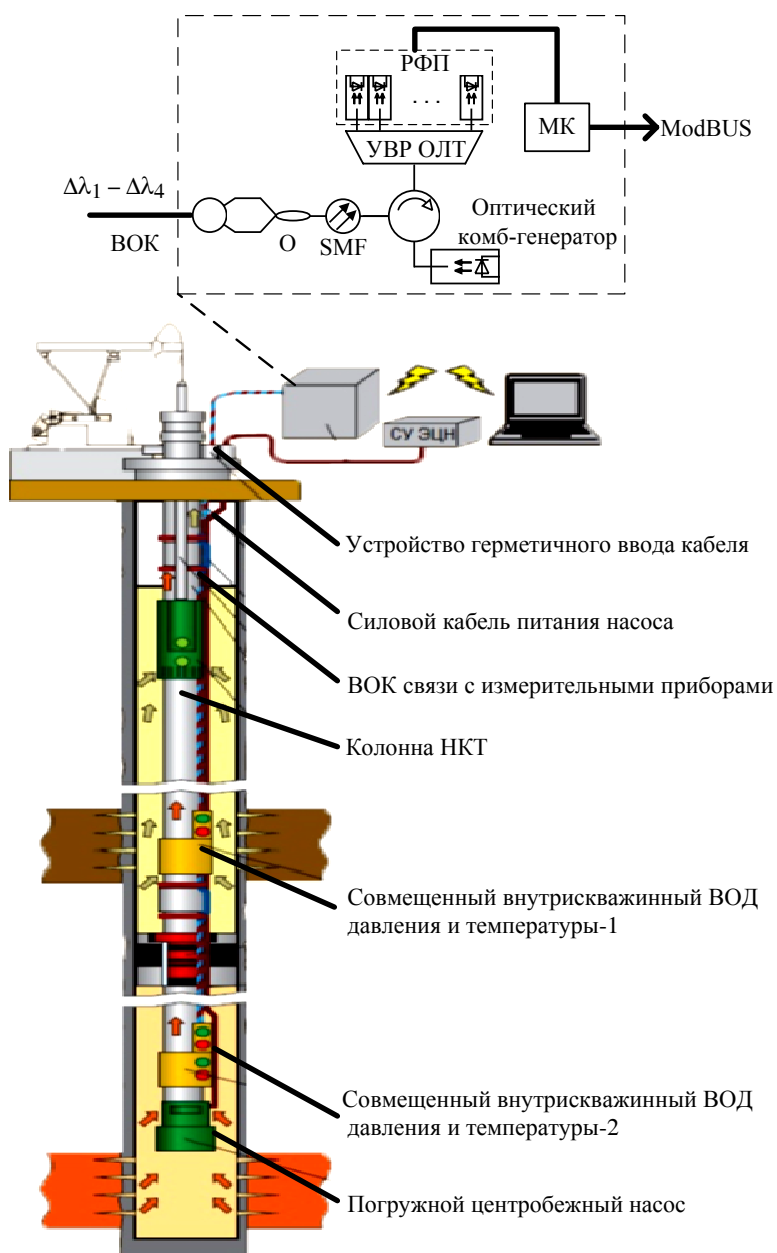


Рис. 17. Скважина ОРД с набором совмещенных ВОД давления и температуры

Таблица 6

Технические характеристики внутрискважинных совмещенных  
ВОД давления и температуры

| № п/п | Параметр  | Значение   |
|-------|---|--|
| 1     | Номенклатура диапазонов измерения давления, бар | 69, 100, 350, 700, 1034, 1379<br>(или по требованию заказчика) |
| 2     | Погрешность измерения давления, не более        | $\pm 0,1$ % от полной шкалы                                    |
| 3     | Диапазон измерения температуры                  | $-20 \dots +200$ °С  |
| 4     | Погрешность измерения температуры, не более     | $\pm 0,1$ °С   |
| 5     | Внешний диаметр корпуса датчика                 | 19 мм  |

Таблица 7

Технические требования на прибор опроса

| № п/п | Параметр  | Значение   |
|-------|---|------------|
| 1     | Число одновременно опрашиваемых совмещенных датчиков                              | 6          |
| 2     | Рабочий спектральный диапазон одного датчика, не более                            | 4 нм       |
| 3     | Рабочий спектральный диапазон прибора опроса, не менее                            | 50 нм      |
| 4     | Абсолютная погрешность определения смещения центральной длины волны ВБР, не более | $\pm 1$ пм |
| 5     | Динамический диапазон входного сигнала, не менее                                  | 20         |

В рассмотренных выше системах в качестве источника полигармонического зондирующего излучения используется комб-генератор устройства додетекторной фильтрации – УВР.

### Заключение

В третьей части статьи рассмотрена проблема построения полигармонических систем интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков. Описана процедура формирования полигармонического зондирующего излучения с высокой равномерностью спектральных составляющих. Компьютерное моделирование показало, что при реализации модернизированного способа Ильина–Морозова с использованием двухпортового ММЦ может быть получено четы-

рехчастотное излучение с неравномерностью спектральных составляющих, близкой к 0, с уровнем подавления боковых составляющих не менее 15–20 дБ (определяется контрастностью модуляционной характеристики используемого ДПММЦ). Полученные результаты подтверждаются данными эксперимента. Предложены способы выделения полигармонических составляющих (додетекторная и последетекторная фильтрация), а также предметы построения волоконно-оптических сенсорных сетей с полигармонической интеррогацией комплексированных волоконно-оптических датчиков: бортовой измерительной сети грузового автомобиля «КамАЗ», бортовой измерительной сети карьерного самосвала «БелАЗ», интеллектуальной скважины одновременно-раздельной добычи. Даны практические рекомендации по использованию способа фильтрации: способ полигармонического зондирования ВБР контура с додетекторным физическим разделением измерительных каналов применим в тех случаях, когда в качестве оптического разветвителя сигнала и оптических избирательных фильтров используется УВР; способ полигармонического зондирования ВБР контура с последетекторной обработкой сигнала – во всех остальных случаях. Описаны требуемые технические характеристики датчиков и приборов опроса.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания на 2012–2016 гг. (программы «Симметрия», «Фотоника», «Радиофотоника», 3.1962.2014/К) и базовой части государственного задания Минобрнауки РФ на выполнение НИР в КНИТУ–КАИ на 2017–2019 гг. (программа «Асимметрия» № 8.6872.2017/БЧ), договора от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0004 и госконтракта № 14.Z50.31.0023 в рамках Постановления Правительства РФ № 220 от 09.04.2010 г.*

### **Список литературы**

1. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 1. Радиофотонные полигармонические методы зондирования // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 193–221.
2. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэг-

говских решеток. Часть 2. Единое поле комплексированных датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 221–252.

3. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

4. Diddams S.A. The evolving optical frequency comb // J. Opt. Soc. Amer. B. – 2010. – Vol. 27, № 11. – P. B51–B62.

5. Flat optical frequency comb generation and its application for optical waveform generation / F.Z. Zhang, J. Wu, Y. Li, J.T. Lin // Opt. Commun. – 2013. – Vol. 290, № 1. – P. 37–42.

6. Ultraflat optical frequency comb generated based on cascaded polarization modulators / C. He, S.L. Pan, R.H. Guo, Y.J. Zhao, M.H. Pan // Opt. Lett. – 2012. – Vol. 37, № 18. – P. 3834–3836.

7. Generation of a flat optical frequency comb based on a cascaded polarization modulator and phase modulator / C. Chen, C. He, D. Zhu, R. Guo, F. Zhang, S. Pan // Opt. Lett. – 2013. – Vol. 38, № 16. – P. 3137–3140.

8. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха–Цендера / А.А. Севастьянов, О.Г. Морозов, А.А. Галипов [и др.] // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 232–236.

9. Устройство для измерения параметров физических полей: пат. 122174 Рос. Федерация, МПК G01K 11/32 / Денисенко П.Е., Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Морозов Г.А., Садеев Т.С., Салихов А.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ». – № 2012124693; заявл. 14.06.2012; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32. – 2 с.

10. Денисенко П.Е. Волоконно-оптические брэгговские датчики со специальной формой спектра для систем климатических испытаний: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. – Казань, 2015. – 171 с.

11. Optical fiber locator by the step frequency method / J. Nakayama [et al.] // Applied Optics. – 1987. – Vol. 26. – P. 440–443.

12. Способ для измерения характеристик резонансных структур и устройство для его реализации: пат. 2550593 Рос. Федерация, МПК G01R 27/00 (2006.01) / Морозов Г.А., Морозов О.Г., Касимова Д.И. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ». – № 2013152599/28; заявл. 26.11.2013; опубл. 10.05.2014. Бюл. № 13. – 2 с.

13. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // *Nat. Photonics*. – 2007. – Vol. 1, № 6. – P. 319–330.

14. Нургазизов М.Р. Оптико-электронные системы измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона на основе амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07. – Казань, 2015. – 166 с.

15. Устройство для измерения параметров физических полей: пат. 2512616 Рос. Федерация, МПК G01 K 11/32 / Морозов О.Г., Морозов Г.А., Садеев Т.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ». – № 2012124698/28; заявл. 20.12.2013; опублик. 10.04.2014. Бюл. № 10. – 3 с.

### References

1. Nureev, I.I. Radiofotonnye poligarmonicheskie sistemy interroгatsii kompleksirovannykh datchikov na osnove volokonnykh breggovskikh reshetok. Chast' 1. Radiofotonnye poligarmonicheskie metody zondirovaniya / I.I. Nureev // *Prikladnaya fotonika*. 2016. T. 3, № 3. S. 193-221.

2. Nureev, I.I. Radiofotonnye poligarmonicheskie sistemy interroгatsii kompleksirovannykh datchikov na osnove volokonnykh breggovskikh reshetok. Chast' 2. Edinoe pole kompleksirovannykh datchikov / I.I. Nureev // *Prikladnaya fotonika*. 2016. T. 3, № 3. S. 221-252.

3. Mesarovich, M. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem / Mesarovich M., Mako D., Takakbara Ya. Per. s angl. M.: Mir, 1973. 344 s.

4. Diddams, S.A. The evolving optical frequency comb / S.A. Diddams // *J. Opt. Soc. Amer. B*. 2010. Vol. 27, No 11. P. B51-B62.

5. Zhang, F.Z. Flat optical frequency comb generation and its application for optical waveform generation / F.Z. Zhang, J. Wu, Y. Li, J.T. Lin // *Opt. Commun.* 2013. Vol. 290, No 1. P. 37-42.

6. He, C. Ultraflat optical frequency comb generated based on cascaded polarization modulators / C. He, S.L. Pan, R.H. Guo, Y.J. Zhao, M.H. Pan // *Opt. Lett.* 2012. Vol. 37, No 18. P. 3834-3836.

7. Chen, C. Generation of a flat optical frequency comb based on a cas-caded polarization modulator and phase modulator / C. Chen, C. He, D. Zhu, R. Guo, F. Zhang, S. Pan // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, No 16. P. 3137-3140.

8. Sevast'yanov, A.A. Formirovanie mnogochastotnogo izlucheniya v dvukhportovom modulyatore Makha–Tsendera / A.A. Sevast'yanov,

O.G. Morozov, A.A. Talipov i dr. // Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya. 2013. № 4. S. 232-236.

9. Pat. 122174 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01K 11/32. Ustroystvo dlya izmereniya parametrov fizicheskikh poley / Denisenko P.E., Kupriyanov V.G., Morozov O.G., Morozov G.A., Sadeev T.S., Salikhov A.M.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Kazanskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskiy universitet im. A.N. Tupoleva–KAI» (RU). № 2012124693; zayavl. 14.06.2012; opubl. 20.11.2012, Byul. № 32. 2 s.; 1 il.

10. Denisenko, P.E. Volokonno-opticheskie breggovskie datchiki so spetsial'noy formoy spektra dlya sistem klimaticheskikh ispytaniy / dis. kand. tekhn. nauk: 05.11.13 / Denisenko Pavel Evgen'evich. Kazan', 2015. 171 s.

11. Nakayama, J. Optical fiber locator by the step frequency method / J. Nakayama et al. // Applied Optics. 1987. V. 26. P. 440-443.

12. Pat. 2 550 593 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01R 27/00 (2006.01) Sposob dlya izmereniya kharakteristik rezonansnykh struktur i ustroystvo dlya ego realizatsii / Morozov G.A., Morozov O.G., Kasimova D.I. i dr.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Kazanskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskiy universitet im. A.N. Tupoleva–KAI» (RU). № 2013152599/28; zayavl. 26.11.2013; opubl. 10.05.2014, Byul. № 13. 2 s.; 1 il.

13. Capmany, J. Microwave photonics combines two worlds / J. Capmany, D. Novak // Nat. Photonics. 2007. Vol. 1, No 6. P. 319-330.

14. Nurgazizov, M.R. Optiko-elektronnye sistemy izmereniya mgnovennoy chastoty radiosignalov SVCh-diapazona na osnove amplitudno-fazovogo modulyatsionnogo preobrazovaniya opticheskoy nesushchey: dis. kand. tekhn. nauk: 05.11.07 / Nurgazizov Marat Rinatovich. Kazan', 2015. 166 s.

15. Pat. 2512616 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01 K 11/32 / Ustroystvo dlya izmereniya parametrov fizicheskikh poley / O.G. Morozov, G.A. Morozov, T.S. Sadeev i dr. zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Kazanskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskiy universitet im. A.N. Tupoleva–KAI» (RU). № 2012124698/28, zayavl. 20.12.2013; opubl.:10.04.2014. Byul. № 10. 3s; 2 il.

Получено 26.06.2017