

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2011 В.Г. Куприянов¹, О.А. Степущенко², В.В. Куревин³, О.Г. Морозов³,
И.Р. Садыков³

¹ Главное ракетно-артиллерийское управление МО РФ

² Министерство внутренних дел РФ по РТ

³ Казанский государственный технический университет им. А.Н.Туполева

Поступила в редакцию 25.10.2011

В статье излагается методический подход к обоснованию применения волоконно-оптических технологий в распределенных сенсорных сетях для инструментального мониторинга районов и объектов дислокации, хранения, переработки и утилизации экологически опасных веществ. Рассмотрены общая и частные постановки задач и предложены методы и методики для ее решения, основанные на двухчастотных методах зондирования волоконно-оптических датчиков на базе решеток Брэгга.

Ключевые слова: АРМ обеспечения экологической безопасности, модуль инструментального контроля, волоконно-оптические датчики температуры, охраны периметра, биосенсоры

В 2008 г. была завершена разработка автоматизированного рабочего места (АРМ) обеспечения экологической безопасности «АРМ-ОЭБ» при хранении, переработке и утилизации экологически опасных веществ (ЭОВ) в интересах Главного ракетно-артиллерийского управления МО РФ. АРМ-ОЭБ как программный комплекс был поставлен на снабжение Вооруженных Сил РФ в 2009 г. и позволял решать экологические задачи информационной, документальной, картографической и расчетной поддержки указанных выше технологических процессов в районах и на объектах дислокации ЭОВ. В настоящей работе представлены результаты разработки и внедрения волоконно-оптических технологий для расширения функциональной наполненности АРМ-ОЭБ и решения в его рамках задач инструментального мониторинга, которые явились развитием исследований, результаты которых были описаны в [1].

Постановка общих и частных задач. Основной задачей инструментального мониторинга районов и объектов дислокации ЭОВ

является обнаружение и регистрация источников экологических нагрузок, находящихся в пределах указанных районов и непосредственной близости от них [2]. Всегда следует рассматривать структурированную экологическую систему, в которой важны как возможное влияние объекта мониторинга на экологическую обстановку региона, так и влияние внешних угроз (террористических, техногенных, природных и т.д.) на экологическую обстановку объекта, который является составным элементом окружающей природной среды (ОПС). В связи с этим физический уровень сетей мониторинга (СМ) должен содержать датчики параметров состояния ОПС, условий хранения ЭПОВ (температура, влажность, давление и т.д.), сигнализации (возгорание, запыленность и т.п.), охраны периметра и т.д.

Последнее десятилетие основные претензии на лидерство в области построения СМ принадлежат беспроводным и волоконно-оптическим технологиям, при этом преимущества последних объясняются возможностями обеспечения высокой помехоустойчивости, низкого уровня перекрестных искажений, работы в условиях предъявления очень высоких требований по электро-, пожаро- и взрывобезопасности, с другой – наличием широкого спектра волоконно-оптических датчиков, среди которых следует выделить волоконные решетки Брэгга (ВРБ), позволяющие измерять все указанные выше физические поля и процессы, а

Куприянов Владимир Геннадьевич, заместитель командира

Степущенко Олег Александрович, заместитель министра

Куревин Валерий Валерьевич, аспирант

Морозов Олег Геннадьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем

Садыков Искандер Рустемович, магистрант. E-mail: microoil@mail.ru

также высокой плотностью мультиплексирования ВРБ с использованием технологии спектрального разделения (WDM). Однако, если беспроводные «mesh»-технологии завоевывают сегодня все новые рынки, волоконно-оптические сенсорные технологии практически не вышли из лабораторий: их применение представлено либо СМ с малым количеством датчиков, либо эксклюзивными многоточечными проектами нефтегазового комплекса. По нашему мнению, это объясняется рядом факторов, среди которых следует выделить следующие:

- применение спектральных методов измерительного преобразования, сложной и дорогостоящей аппаратуры (оптических анализаторов спектра и т.п.) для их реализации;
- ограниченное количество измерительных каналов, которое может быть построено в одном волокне, без предъявления особых требований на стабильность источников зондирующего излучения;
- опасность возникновения существенных перекрестных искажений при использовании в измерительном канале одинаковых или однотипных ВРБ, объединенных в последовательные группы;
- мультипликативность отклика ВРБ на физические поля различной природы.

Предлагается решать указанные выше задачи на основе разработки:

- эффективных методов и средств измерения параметров различных физических полей, включающих использование дорогостоящих средств оптического спектрального анализа;
- методических рекомендаций по выбору решений для одновременной регистрации полей различной физической природы с помощью одной или нескольких ВРБ, в том числе объединенных в группу, сокращающих используемое число измерительных каналов и датчиков.

Волоконно-оптические датчики на основе ВРБ. В данной работе для зондирования датчиков на основе ВРБ будем использовать двухчастотное излучение с амплитудами $R_1=R_2$ и противоположными фазами $\varphi_{R_1} = -\varphi_{R_2}$, полученное по способу Ильина-Морозова в модуляторе Маха-Цандера [3], отличающееся как высокой спектральной чистотой и стабильностью при допустимом изменении параметров формирования, так и возможностью простой перестройки разностной частоты для использования с различными по характеристикам ВРБ. Указанные обобщенные характеристики удовлетворяют требованиям к построению источников зондирующих излучений для волоконно-оптических сенсорных сетей. В качестве

методики измерительного преобразования выберем интегральную методику анализа характеристик огибающей прошедшего через или отраженного от ВРБ двухчастотного излучения.

Волоконно-оптический датчик температуры. Резонансная длина волны ВРБ $\lambda_{ВРБ}$ зависит от температуры волокна и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений. Эта зависимость описывается следующим уравнением:

$$\Delta\lambda_{ВРБ} = 2n_{эфф}\Lambda \times \left\{ \left[1 - \left(\frac{\xi^2}{2} \right) [P_{12} - v(P_{11} + P_{12})] \right] \varepsilon + \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right] \Delta T \right\}, \quad (1)$$

где ΔT – изменение температуры, ε – приложенное напряжение, второе слагаемое в фигурной скобке отражает коэффициент фотоупругости. Это соотношение дает типичные значения смещения $\lambda_{ВРБ}$ в зависимости от температуры $\sim 0,01$ нм/К и от относительного удлинения волокна $\sim 10^3(\Delta L/L)$ (нм).

При смещении контура ВРБ, вызванного приложением физических полей, появляется неравенство $R_1 \neq R_2$ и изменение фазовых соотношений между составляющими двухчастотного излучения. Вид неравенства и знак фазы определяется направлением сдвига контура ВРБ, т.е. увеличением или уменьшением параметра приложенного поля. Амплитуда огибающей U_R определяется как:

$$U_R \approx \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + 2R_1R_2 \cos(k\Delta\delta t)}, \quad (2)$$

а мгновенная фаза:

$$\varphi_R \approx \arctg \left\{ \frac{\sin[(\varphi_{R_2} - \varphi_{R_1}) + k\Delta\delta t]}{R_1/R_2 + \cos[(\varphi_{R_2} - \varphi_{R_1}) + k\Delta\delta t]} \right\}. \quad (3)$$

Для обработки полученных значений по амплитуде введем коэффициент модуляции m :

$$m \approx \sqrt{1 + (\delta_0 + \Delta\delta/2)^2} / \sqrt{1 + (\delta_0 - (\Delta\delta/2))^2}, \quad (4)$$

а по фазе – найдем разность фаз огибающих $\Delta\varphi$ входного и выходного излучений. Пример полученных измерительных характеристик датчика температуры на базе ВРБ по амплитуде и фазе представлен соответственно на рис. 1,а и рис. 1,б. Если амплитудная характеристика измерений (рис. 1,а) имеет симметричный

характер, то фазовая (рис. 1,б) позволяет разрешить знак и величину смещения [4]. Преимущества амплитудной характеристики проявляются при работе в области «нулевого»

параметра, где для фазовой характеристики находится область малых сигналов, поэтому дополнительно используется «анализ знака фазы» (рис. 1,б) [5].

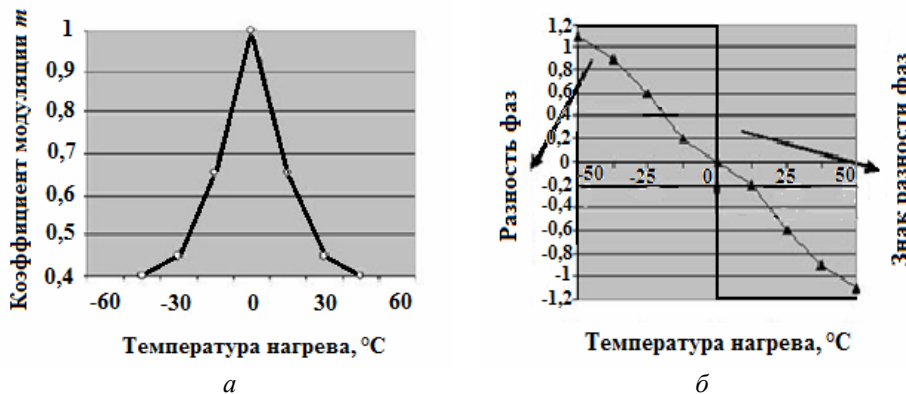


Рис. 1. Измерительная характеристика датчика по температуре: а – амплитудный анализ; б – фазовый анализ

Испытания опытного устройства были проведены на ВРБ, изготовленных в ИЦВО ИОФ РАН (г. Москва), откалиброваны в лаборатории ПГУТИ (г. Самара) и показали, что использование способа двухчастотного зондирования ВРБ позволило достичь погрешности измерения температуры 0,01°C в диапазоне ±50°C. При этом погрешность измерения определялась в основном погрешностью АЦП контроллера определения температуры.

Волоконно-оптический биосенсор на ВРБ. Оптический биосенсор рефрактометрического типа (ОБРТ) на ВРБ параллельной структуры представляет собой две ВРБ, у одной из которых вытравлена оболочка [6]. Центральные длины волн решеток ВРБ₁ и ВРБ₂ при одинаковой температуре отличаются в силу вытравливания в ВРБ₂ оболочки волокна на определенную глубину. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования двух источников двухчастотного излучения, настроенных соответственно на длины волн λ₁ и λ₂, и решения уравнения раздельно для температуры и коэффициента преломления. В этом случае расстройкам, полученным при двухчастотном зондировании на каждой из длин волн, не ставится в соответствие какой-либо из физических параметров, а проводится дополнительная процедура вычислений по следующим алгоритмам. Выходные сигналы U_{R1} и U_{R2} для огибающих на промежуточных частотах описываются следующими выражениями

$$U_{R1} = \delta_{T1}(\lambda_1)T + \delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)n_{eff}, \quad (5)$$

$$U_{R2} = \delta_{T2}(\lambda_2)T + \delta_{n_{eff2}}(\lambda_2)n_{eff}, \quad (6)$$

где δ_{T1}(λ₁), δ_{n_{eff1}}(λ₁), δ_{T2}(λ₂), δ_{n_{eff2}}(λ₂) – известные коэффициенты на измерительных характеристиках, соответствующие зависимостям расстройки решеток, предварительно настроенных на длины волн λ₁ и λ₂ по температуре и эффективному коэффициенту преломления. Отсюда

$$T = \frac{U_{R1}\delta_{n_{eff2}}(\lambda_2) - U_{R2}\delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)}{\delta_{T1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff2}}(\lambda_2) - \delta_{T2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)}, \quad (7)$$

$$n_{eff} = \frac{U_{R2}\delta_{T1}(\lambda_1) - U_{R1}\delta_{T2}(\lambda_2)}{\delta_{T1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff2}}(\lambda_2) - \delta_{T2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)}. \quad (8)$$

Эти математические вычисления выполняются в программном блоке ОБРТ и позволяют одновременно получить значения параметров температуры и эффективного коэффициента преломления в зоне расположения ВРБ₁ и ВРБ₂. Коэффициент преломления исследуемого материала (окружающей ОБРТ среды) n_{amb} может быть определен по полученному n_{eff} и известным коэффициенте преломления сердцевины и радиусе оболочки вытравленного волокна. Пример измерительной характеристики биосенсора для определения октанового числа топлива приведен на рис. 2.

По сравнению с результатами, полученными другими авторами, динамический диапазон сдвига центральной волны решетки меньше, но достаточен для получения требуемого разрешения измерений. С другой стороны, зондирование такого типа ОБРТ может быть реализовано узкополосными лазерами (кГц или МГц) с разностной частотой двухчастотного излучения, формируемого модулятором Маха-Цандера в мега- или гигагерцовом диапазоне.

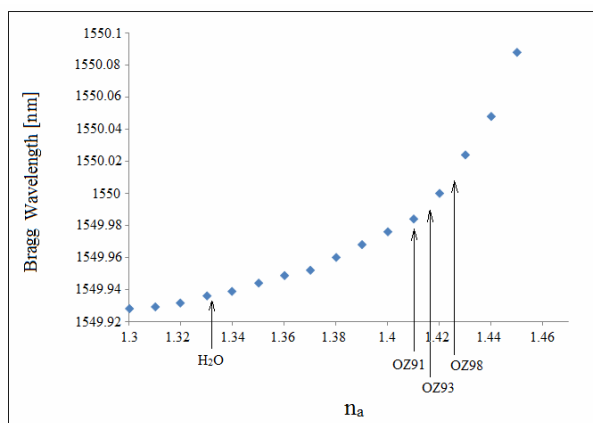


Рис. 2. Зависимость сдвига центральной длины волны ВРБ от показателя преломления вещества, окружающего ОБРТ (вода, бензин с разными октановыми числами)

Таким образом при обработке на промежуточной частоте может быть достигнуто увеличение отношения сигнал/шум измерений в 10-50 раз. Данное утверждение было подтверждено первыми практическими результатами, полученными на ОБРТ, изготовленными на основе волокон фирмы Corning SMF-28 и модуляторов Маха-Цандера, изготовленных в НППК (г. Пермь).

ВРБ в структуре распределенных датчиков охраны периметра. Двухчастотное зондирующее излучение не использовалось ранее для построения систем получения информации с группы однотипных датчиков, однако использование непрерывного лазерного излучения позволяет предположить возможность использования частотного мультиплексирования для реализации системы, даже если все решетки в волокне канала будут одинаковы. В качестве технологии мультиплексирования была предложена частотная рефлектометрия, как наиболее согласованная с предложенной и используемой нами методикой двухчастотного анализа ВРБ. Двухчастотное лазерное излучение через волоконные ответвители поступает в интерферометры опорного и измерительного плеч системы. Опорный интерферометр содержит одну из ветвей, образованную волокном длины L , равной длине ветви измерительного интерферометра, на которой расположена последовательность перекрывающихся ВРБ. Опорный интерферометр имеет разность длин оптических путей $2nL$, где n эффективный коэффициент преломления волокна. Выходной сигнал опорного интерферометра может быть записан в виде:

$$D_{\text{оп}} = \cos(4\pi nL_1/\lambda_1) + \cos(4\pi nL_2/\lambda_2), \quad (9)$$

где $\lambda_1 = \lambda_0 - \Delta\lambda$, $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda$ – компоненты двухчастотного излучения при соответствии центральной длины волны лазера λ_0 разности длин $2nL$, L_1 и L_2 соответствуют λ_1 и λ_2 . Таким образом, частоты сигналов (16) пропорциональны компонентам L , а шаг интерферометра – $\Delta k = \pi/nL$.

Сигнал измерительного интерферометра будем определять по центральной i -ой частоте i -ой ВРБ:

$$D_{\text{изм}} = \sum_i \left[R_{1i} \cos(4\pi nL_{1i}/\lambda_1) + R_{2i} \cos(4\pi nL_{2i}/\lambda_2) \right]. \quad (10)$$

Таким образом, после фильтрации и процедуры БПФ отраженный от каждой решетки двухчастотный сигнал с учетом i -ой амплитуды зондирования и спектрального коэффициента отражения может быть обработан с помощью предложенной методики анализа огибающей. Пожертвовав крутизной измерительного преобразования, которая максимальна при равенстве $\Delta\lambda$ полуширине ВРБ, мы смогли повысить отношение сигнал/шум системы, уменьшив требуемую для обработки полосу пропускания, и увеличить число анализируемых ВРБ, используемых в данном случае как датчики растяжения/сжатия изолированные от влияния температурных изменений (слабоотражающие ВРБ с коэффициентом 1-25%, полуширина ВРБ – 0,2-1 нм, с относительным удлинением волокна $\sim 10^3(\Delta L/L)$.

Выводы: были предложены методы и средства для расширения АРМ обеспечения экологической безопасности в районах дислокации ЭОВ при их хранении, переработке и утилизации. В качестве базовых выбраны волоконно-оптические технологии создания сенсорных сетей с использованием в них датчиков на основе ВРБ и модуляционных методов измерений их спектральных характеристик при зондировании двухчастотным излучением. Представлены результаты теоретического анализа и экспериментов для датчиков температуры складирования ЭОВ, биосенсоров контроля их концентраций и рефрактометрического анализа различных химических веществ, распределенных датчиков охраны периметра складов. Полученные отклики датчиков и биосенсоров по аппроксимированным измерительным характеристикам практически линейны в широком динамическом диапазоне при высоком отношении сигнал/шум измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Куревин, В.В. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга / В.В. Куревин, О.Г. Морозов, В.П. Просвириин и др. // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7, № 3. С. 46-52.
2. Военная экология / под ред. А.И. Юнака и А.В. Тертышниковой. – М.: МО РФ, 2005. 220 с.
3. Morozov, O.G. All-optical microwave photonic filter based on two-frequency optical source / O.G. Morozov, T.S. Sadeev // Optical Technologies for Telecommunications. Proc. SPIE 2010. V. 7992. P. 799211-1-7.
4. Пат. 92180 Российская Федерация МПК7 G01K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, В.В. Куревин и др.; опубл. 10.03.2010. Бюл. № 7. 2 с.
5. Пат. 102256 Российская Федерация МПК G01K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / О.Г. Морозов, Т.С. Садеев, О.А. Степущенко и др.; опубл. 20.02.2011. Бюл. №5. 2 с.

**FIBER-OPTICAL TECHNOLOGIES IN DISTRIBUTED SYSTEMS
OF ECOLOGICAL MONITORING**

© 2011 V.G. Kupriyanov¹, O.A. Stepushchenko², V.V. Kurevin³, O.G. Morozov³,
I.R. Sadykov³

¹ Main Rocket-artillery Department of Ministry of Defense of the Russian Federation

² Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation in Tatarstan Republic

³ Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev

In paper the methodical approach to substantiation of application the fiber-optical technologies in the distributed sensor networks for the instrumental monitoring of regions and objects of dislocation, storage, processing and utilization of ecologically dangerous substances is stated. Are observed the general and private statements of problems and methods and techniques for its solution are offered, based on two-frequency methods of sonding the fiber-optical sensors on the basis of Brege gratings.

Key words: *automated workplace of maintenance the ecological safety, module of the instrumental control, fiber-optical temperature sensors, ambit guardings, biosensors*

Vladimir Kupriyanov, Vice Commander
Oleg Stepushchenko, Vice Minister
Valeriy Kurevin, Post-graduate Student
Oleg Morozov, Doctor of Technical Sciences, Head of the
Television and Multimedia Systems Department
Iskander Sadykov, Magistrate. E-mail: microoil@mail.ru