

8. Леонович Г.И., Данилин А.И. и др. Перспективные направления развития беспроводных сенсорных сетей /В сборнике: Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 8-11.

9. Buzov A.L., Buzova M.A., Minkin M.A., Klyuev D.S., Neshcheret A.M. Calculation of characteristics of planar antenna arrays with substrates made of chiral metamaterials taking into account the dispersion of macroscopic parameters/ В сборнике: 15th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2021. 15. 2021. С. 9411393.

10. Ключев Д.С., Нещерет А.М., Соколова П.Ю. Характеристики излучения полосковых излучающих структур с киральными подложками /В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей восьмой Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 2021. С. 203-208.

УДК 621.3

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОФОТОННЫХ МЕТОДОВ ОПРОСА ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ВБР

И.Л. Борисенков¹, К.Е. Воронов², Г.И. Леонович¹, А.М. Телегин²,
М.П. Калаев²

¹Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва;

²«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева», г. Самара

Ключевые слова: ВБР, оптоволоконный датчик, интеррогатор.

Датчики на основе внутриволоконных брэгговских решеток (ВБР) в силу высокой надежности, долговечности, компактности, простоты изготовления и эксплуатации, возможности применения различных способов и средств увеличения чувствительности и динамического диапазона широко применяются в квазираспределенных и точечных системах измерения деформации, температуры, давления, ускорения, магнитного, электрического и акустического полей, а также ряда других физических и химических величин. Существующие алгоритмы опроса массива ВБР-датчиков в целом можно разделить на два типа: мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM) и мультиплексирование с разделением по времени (TDM) [1]. Для WDM максимальное количество ВБР ограничено отношением ширины спектра источника к динамическому диапазону длин волн отдельного ВБР-датчика

(т. е несколькими нанометрами). В TDM используются разные временные задержки между отраженными импульсами, чтобы различать датчики, в том числе с одинаковой длиной волны, и снимать проблему спектральной полосы пропускания оптического волокна. Каждый из алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки. Разработка алгоритмов опроса ВБР-датчиков, совмещающих достоинства WDM и TDM, – одно из актуальных направлений исследований в области создания эффективных, простых в реализации и применении интеррогаторов - аппаратуры опроса массива датчиков.

В основу большинства датчиков на ВБР положена регулярная короткопериодная решетка, чувствительная к температуре T и непосредственным деформирующим воздействиям ε (рисунок 1). Такая ВБР представляет собой участок оптического волокна (ОВ) длиной $L_{BG}=1,0-10,0$ мм, в котором эффективный показатель преломления основной моды n_{eff} промодулирован в продольном направлении с пространственным периодом $\Lambda_0 = 300-600$ нм и глубиной модуляции $\delta n \approx 10^{-4}$.

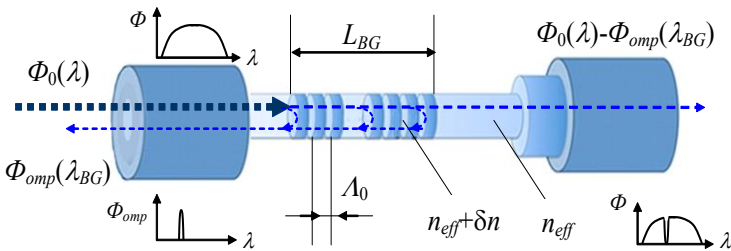


Рисунок 1 - Структура ВБР (с зачищенным сенсорным участком ОВ)

Связь между относительным изменением длины брэгговской волны ($\lambda_{BG} = 2n_{eff} \Lambda$), изменением температуры ΔT , осевой деформацией $\varepsilon = \Delta L_{BG} / L_{BG}$ и изменением показателя преломления определяется как [2-5]

$$\frac{\Delta \lambda_{BG}}{\lambda_{BG}} = \delta \lambda_{BG} = (1 - p_e) \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T, \quad (1)$$

где p_e – редуцированный деформационно-оптический коэффициент первого порядка; α_Λ – коэффициент температурного расширения ОВ; α_n – температурно-оптический коэффициент преломления.

Наиболее широко в настоящий момент времени используются ВБР со следующими формами спектра сигнала – традиционной (гауссовой)

формой и специальными формами – треугольной, вогнутой, с фазовым π -сдвигом [6]. Основное направление разработок - это решение следующих вопросов: реализация высокой чувствительности к воздействию, устойчивость к нестабильности источника сигнала, колебаниям уровня мощности, неравномерному распределению мощности спектра источника.

Для опроса, получения и преобразования информации с ВБР используется широкополосная или перестраиваемая в широком диапазоне оптико-электронная измерительная аппаратура – интеррогаторы. Современные интеррогаторы для волоконно-оптических датчиков построены на основе оптических анализаторов спектра; перестраиваемых лазеров; оптических рефлектометров во временной и частотной области; сканирующих фильтров Фабри-Перо; а также дифракционных решеток с комбинированными пространственными оптическими фильтрами с ПЗС матрицами; оптических узкополосных фильтров и др.

Оптико-электронная аппаратура интеррогации характеризуется рядом ограничений. Первое ограничение – малая скорость опроса, разрешение (1–10 пм) при механическом сканировании определяет скорость опроса (до 1 Гц). При электронном сканировании (разрешение до 1–5 пм), скорость опроса достигает 100 Гц. Применение комбинированных пространственных оптических фильтров обеспечивает скорость сканирования в 1 кГц при разрешении 1–5 пм. Использование оптических узкополосных фильтров позволяет увеличить скорость опроса до 1 МГц, но ограничивает разрешение по длине волны (1–10 пм). Второе ограничение - невозможность измерения нескольких измеряемых величин одновременно при использовании одного датчика с ВБР.

Поэтому, относительно недавно, появился новый подход к измерениям, разрабатываемый [7] и получивший название - радиофотонный. В его основе построение полигармонических систем зондирования волоконно-оптических датчиков, в которых, для опроса ВБР структур, используется формирование излучения с двух-, четырех-, и более частотным симметричным излучением с четным числом составляющих и последующей обработкой полученной совокупности сигналов в радиочастотном диапазоне. Как заявляют разработчики, данный подход позволяет получить разрешающую способность на уровне 1 пм и увеличить частоту опроса до 3 МГц, при использовании внутри датчика структурного оптического кодирования, и, соответственно, 0,1 пм/ 100МГц для адресных ВБР.

На количество используемых ВБР в одной сенсорной сети оказывает влияние вид используемых решеток, тип мультиплексирования и алгоритм обработки. Основным недостатком стандартных оптико-электронных интеррогаторов является значительный уровень шума, низкая

разрешающая способность, малая частота опроса. С целью увеличения чувствительности и частоты опроса при измерении быстрых, но относительно слабых по амплитуде процессов, нами была разработана и экспериментально проверена измерительная система, в которой используется подход, основанный на частотно-временной нелинейной обработке сигналов с датчиков, с использованием следящих фильтров на опорных ВБР с механической (тепловой) перестройкой (рисунок 2).

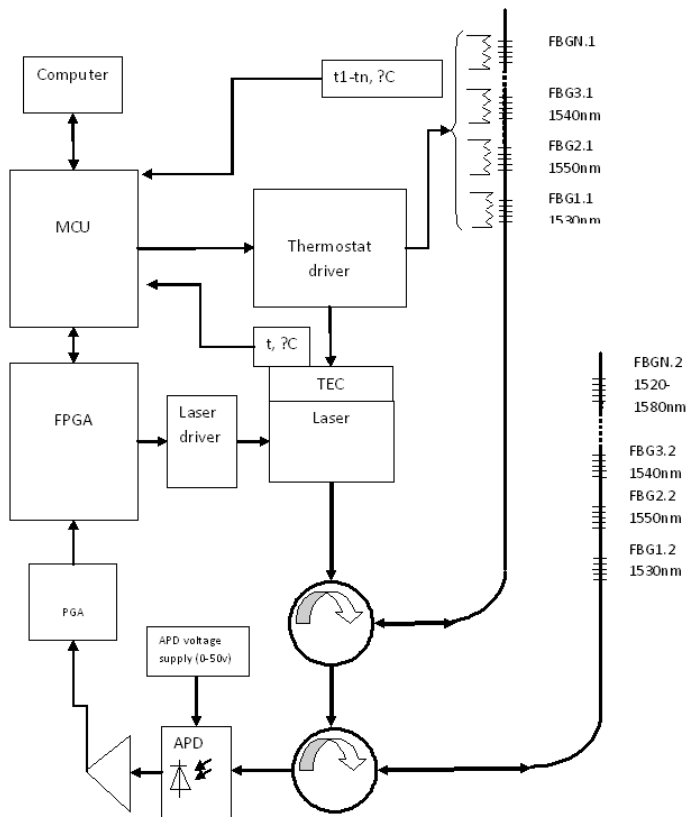


Рисунок 2 – Структурная схема интеррогатора

Структурная схема системы (рисунок 2) включает в себя N выполненных на общем оптическом волокне ВБР-датчиков на расстоянии ≥ 2 м от интеррогатора и друг относительно друга, и занимающих спектральную полосу 1520÷1580 нм. Один ВБР-датчик в зависимости от диапазона измеряемой величины занимает полосу с разделительным интервалом в пределах (5÷10) нм. Оптические сигналы, которые

отражаются от датчиков, через циркуляторы попадают на следящие фильтры. Каждому датчику соответствует следящий фильтр, имеющий такую же, или смещенную на $(0,1 \div 0,5)$ нм центральную частоту. После фильтров оптический сигнал поступает на оптический приемник, выполненный на основе лавинного фотодиода, далее электрический сигнал усиливается и подается на вход АЦП. С помощью АЦП аналоговый сигнал оцифровывается и сохраняется в памяти FPGA, где производится его дальнейшая обработка.

Принципиальной особенностью структуры и алгоритма функционирования системы является спектрально-временное разделение измерительных каналов, ориентированное на назначение и топологию сенсорной сети. Технически реализованный вариант системы на основе ВБР-датчиков температуры позволяет обслуживать до 30 датчиков на один волоконный канал в спектральном диапазоне $1520 \div 1580$ нм, размещенных на расстоянии $2,0 \div 10000$ м друг относительно друга при протяженности сенсорной сети до 20 км. Относительная погрешность измерения амплитуды оптических сигналов $\leq 1\%$. Скорость опроса при длине измерительного участка волокна $L_{изм} = 100$ м составляет до 10000 кадров в секунду. Характеристики и доступность компонентов разработанной системы показывают возможность ее применения в компактных пассивных системах дистанционного контроля [8].

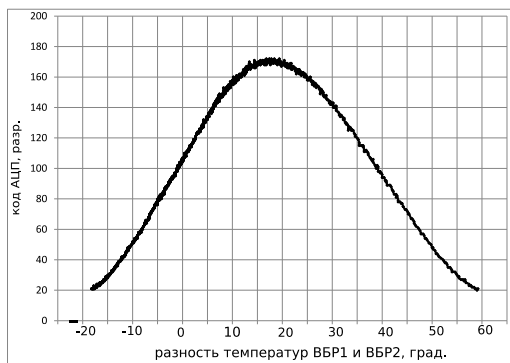


Рисунок 3 - Зависимость уровня сигнала от разности температур ВБР1 и ВБР2

На рисунке 3 представлена зависимость уровня сигнала (цифровой код с выхода АЦП) от разности температур ВБР1 и ВБР2. При проведении эксперимента ВБР1 была размещена на термостате 1, поддерживающем постоянную температуру 25°C . ВБР2 расположена на термостате 2, регулирующем температуру от $+10$ до $+80$ градусов [8].

Список использованных источников

1. Zhihui Luo, Hongqiao Wen, HuiyongGuo, and Minghong Yang A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings/ Optics Express. Vol. 21, Issue 19, pp. 22799-22807 (2013).
2. Леонович Г.И., Олешкевич С.В. Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 18, № 4(7), 2016, с. 1340-1345.
3. Борисенков И.Л., Федечев А.Ф., Леонович Г.И., Куприянов С.В., Крутов А.А., Захаров В.Н. Математическая модель неравномерной микромеханической деформации участка оптического волокна при осесимметричном нагружении, Нано- и микросистемная техника, 2019, т. 21, №6, с. 331- 336.
4. Kuo Li. Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors /Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors Volume 2016, Article ID 1284520, 8 pages. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1284520>.
5. Fiber Bragg gratings /Andreas Othonos/Rev.Sci.Instrum. 68 (12), 1997, p. 4309-4341.
6. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review/Jasjot K. Sahota, Neena Gupta, and Divya Dhawan//Optical Engineering 060901-1 June 2020 Vol. 59(6).
7. Morozov, O.G. Addressed fiber bragg structures in quasi-distributed microwave-phonic sensor systems / O.G. Morozov, A.J. Sakhabutdinov // Computer Optics. - 2019. - Vol. 43. - № 4. - Pp. 535 - 543.
8. Борисенков И.Л., Воронов К.Е., Леонович Г.И., Калаев М.П., Телегин А.М. Сенсорная система на основе внутриволоконных брэгговских решеток и интеррогатора со спектрально-временным разделением каналов // Нано- и микросистемная техника. — 2021. — Т. 23. № 5. — С. 247-254.

УДК 531.781.2 (088.8)

МОНИТОРИНГ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ГТД – КЛЮЧ К ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

А.И. Данилин¹, А.Ж. Чернявский¹, А.Н. Аксёнов²

¹ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара;

² ПАО «Тюменские моторостроители», г. Тюмень

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, диагностика, надежность, мониторинг, эксплуатация по техническому состоянию.

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются основой современных энергетических установок в авиации, энергетическом машиностроении, судостроении и в качестве приводов газоперекачивающих агрегатов на магистральных газопроводах.

В целях повышения экономических показателей добычи и транспортировки газа компрессорные станции магистральных газопроводов оснащаются современными мощными газоперекачивающими агрегатами с