

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.7.08

DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-5

*А. С. Щевелев, А. В. Савенков, Д. А. Рязанцев*ПРОСТРАНСТВЕННО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ*A. S. Shchevelev, A. V. Savenkov, D. A. Ryazantsev*SPATIAL ORIENTED METHOD OF DETERMINING STRAIN  
FOR THE PREVENTION OF ACCIDENTS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования является метод определения деформации для предупреждения возникновения аварийных ситуаций в изделиях ракетно-космической и авиационной техники. Предметом исследования является метод раннего обнаружения повреждений, реализованный на методах акустического и ультразвукового неразрушающего контроля. В основу метода положены особенности взаимодействия волны Лэмба и волоконных брэгговских решеток. Целью работы является определение путей эффективной реализации пространственно ориентированного метода определения деформации. **Материалы и методы.** Определены обобщенные требования со стороны измерительной системы на основе предложенного метода, влияющие на метрологические и эксплуатационные характеристики чувствительных элементов. Проведен анализ методов опроса и расшифровки результатов измерений деформации. Оценены преимущества и недостатки высокоскоростных методов опроса длин волн. **Выводы.** Даны рекомендации для достижения максимальной эффективности метода путем построения измерительной системы на волоконно-оптических компонентах. В частности, применением оптоволокна с покрытием из графитопластика в качестве источника акустических волн. Данное решение позволяет увеличить чувствительность к измеряемым параметрам деформации и температуры. Обоснован выбор метода опроса датчиков волоконных брэгговских решеток в зависимости от измеряемой частоты. С частотой измерения до 1 кГц целесообразно применение перестраиваемого оптофильтра Фабри – Перо, для частоты 1 МГц и выше – применение лазерного диода или перестраиваемого лазера. В свою очередь перестраиваемый лазер позволит проводить одновременное измерение как статической, так и динамической деформации. Даны рекомендации по применению метода в изделиях ракетно-космической и авиационной техники.

**A b s t r a c t. Background.** The object of the study is a method for determining the deformation to prevent of emergency situations in products of rocket and space and aircraft. The subject of the study is the method of early detection of damage implemented on the methods of acoustic and ultrasonic non-destructive testing. The method is based on the features of the in-

teraction of the Lamb wave and fiber Bragg gratings. The aim of the paper is to determine the ways to effectively implement a spatially-oriented method for determining deformation. **Materials and methods.** The generalized requirements from the measuring system are determined on the basis of the proposed method, affecting the metrological and operational characteristics of the sensitive elements. The analysis of methods of interrogation and decoding of deformation measurements results is carried out. Advantages and disadvantages of high-speed methods of wavelength survey are evaluated. **Conclusions.** Recommendations are given for achieving maximum efficiency of the method, by constructing a measuring system on fiber-optic components. In particular, the use of optical fiber with a coating of graphite plastic, as a source of acoustic waves. This solution increases the sensitivity to the measured strain and temperature parameters. The choice of the method of interrogation of FBD sensors based on the measured frequency is substantiated. With a measurement frequency of up to 1 kHz, it is advisable to use a tunable Fabry-Perot optical filter, for a frequency of 1 MHz or higher, the use of a laser diode or a tunable laser. In turn, a tunable laser will allow simultaneous measurement of both static and dynamic deformation. Recommendations are given on the application of the method in products of rocket and space and aviation equipment.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** волна Лэмба, волоконные брэгговские решетки, решетки на основе массива волноводов, пьезоэлектрический источник, акустическая волна.

**Key words:** Lamb wave, fiber bragg gratings, lattice-based array waveguides, piezoelectric source, acoustic wave.

### *Введение*

Среди волоконно-оптических датчиков наиболее распространены датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ДВБР). Применение таких датчиков описано в работе [1]. Определено, что преимущественно они используются для измерения деформации и температуры. На основе ДВБР могут быть построены системы неразрушающего контроля, позволяющие регистрировать деформацию как от распределенной нагрузки, так и от ударного нагружения. Системы на основе распределенных волоконных брэгговских решеток (ВБР) широко известны и характеристики таких систем подтверждены испытаниями [2, 3]. Учитывая эффективность применения системы на основе ВБР-датчиков, они могут найти применение в изделиях ракетно-космической и авиационной техники.

В АО «НИИФИ» проведены исследования по разработке микрооптоэлектромеханических распределенных измерительных и функциональных модулей деформации и температуры для построения композитных панелей с внедренными в элементы конструкции ДВБР [4]. Однако система, реализованная на разработанных модулях, не позволяет точно определить место и направление действия вектора деформации. В связи с этим разработка пространственно ориентированного метода определения деформации является актуальной научно-технической задачей. Рассматриваемый метод обнаружения возможных мест повреждений конструкций на основе ДВБР находится на ранней стадии разработки и планируется к реализации на методах акустического и ультразвукового неразрушающего контроля.

### *Пьезоакустические ДВБР*

Применение ДВБР с целью обнаружения возможных мест возникновения аварийных ситуаций является новым методом определения деформации. Экспериментальные исследования проводились на образцах в виде алюминиевого листа с размерами, не превышающими  $1 \times 400 \times 400$  мм, где три пьезоэлектрических преобразователя и ВБР-датчик расположены в четырех углах пластины. Частоты излучения акустического сигнала 260 и 460 кГц выбраны для конфигурирования основных мод акустических волн, которые, в свою очередь, генерировались в формате тональной посылки, являющейся наиболее распространенной формой анализа. Определено, что система на основе рассмотренного метода может регистрировать трещины длиной 1–2,5 мм в листовых элементах конструкции, длиной до 5 мм – в металлическом кар-

касе, длиной до 100 мм и дефекты с размерами 15×15 мм – на больших площадях, а также определять локальную коррозию листа с размером 10 % от его толщины [5].

На основе экспериментальных исследований можно сделать предварительные выводы.

Во-первых, при высокой частоте излучения акустических волн достигается увеличение чувствительности за счет слабой интерференции волн и большого значения коэффициента отношения размера повреждения к длине волны. Причем акустические волны, отраженные от границы алюминиевого листа, формируют колебания, содержащие многократно отраженные волны. Негативный эффект переотражений волн усиливается конструкцией сложной формы.

Во-вторых, в сигнале должны рассматриваться только первые два импульса, поскольку более поздние импульсы неинформативны, так как являются откликом переотражений.

В-третьих, ДВБР могут использоваться для регистрации акустических сигналов, причем результаты показывают, что эффективность таких датчиков не уступает пьезоакустическим преобразователям. Кроме того, отклик на акустические волны зависит от взаимного расположения пьезоэлектрических источников излучения и ДВБР. В этом случае по амплитуде принимаемого сигнала оценивается направление акустических волн.

Для подтверждения третьего предварительного вывода проведены исследования, определяющие особенности взаимодействия волны Лэмба и волоконных брэгговских решеток относительно взаимного расположения излучателей и приемника (рис. 1).

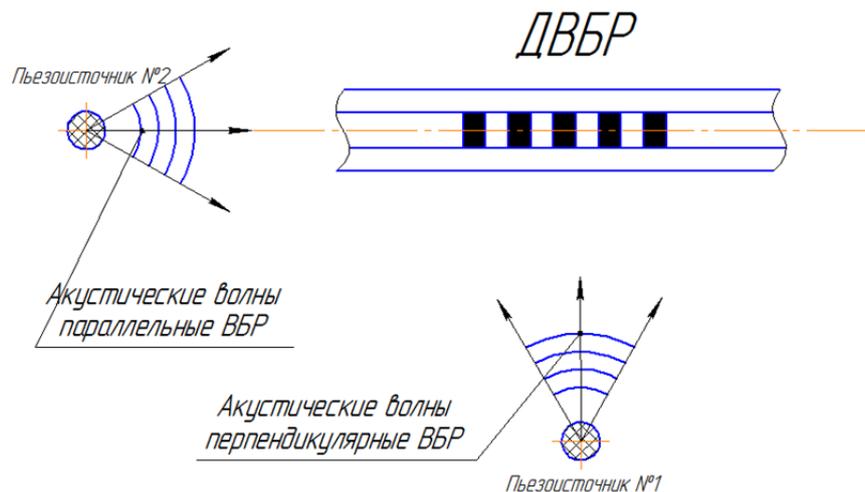


Рис. 1. Взаимное расположение пьезоэлектрических источников излучения и ДВБР

Исследования включали два этапа. Пьезоэлектрический источник № 1 формировал акустические волны, перпендикулярные оптической оси ВБР-датчика. Пьезоэлектрический источник № 2 осуществлял генерацию акустических волн в направлении, совпадающем с оптической осью ДВБР. Результаты исследования показали, что в случае распространения волн Лэмба вдоль оптической оси амплитуда принимаемого сигнала возрастает в 100 раз сильнее, чем при поперечном направлении [5]. Благодаря этой особенности становится возможным пространственно ориентированный метод определения деформации.

Для увеличения чувствительности ДВБР устанавливают в металлическую трубку, которая, в свою очередь, встроена в конструкцию [3, 6]. Поскольку брэгговская решетка изолирована от воздействия акустических волн внутри трубки, ДВБР не чувствителен к их воздействию. Данная проблема может быть решена путем встраивания в структуру (такую как композит) элементов конструкций одного конца волокна. Композиты находят все более широкое применение в ракетно-космической технике и авиастроении как замена металлу для снижения массы и увеличения полезной нагрузки.

Для достижения максимальной эффективности данного метода контроля предпочтительно полностью реализовать измерительную систему на основе волоконно-оптических компонентов. Источником излучения в таком случае может являться оптическое волокно с периодической оболочкой из эпоксидного графитопластика. Этот материал способен поглощать

лазерное импульсное излучение, что приводит к локальному резкому росту температуры, как следствие, к термическому расширению и созданию акустических волн. В данном методе и источник, и приемник излучения будут реализованы с использованием волоконно-оптических технологий.

### Система опроса длин волн

Измерительная система из массива ДВБР может быть использована для обнаружения как статических, так и динамических деформаций, а также возникновения повреждений на ранней стадии разрушения конструкции. Возможная схема реализации этих функций показана на рис. 2.

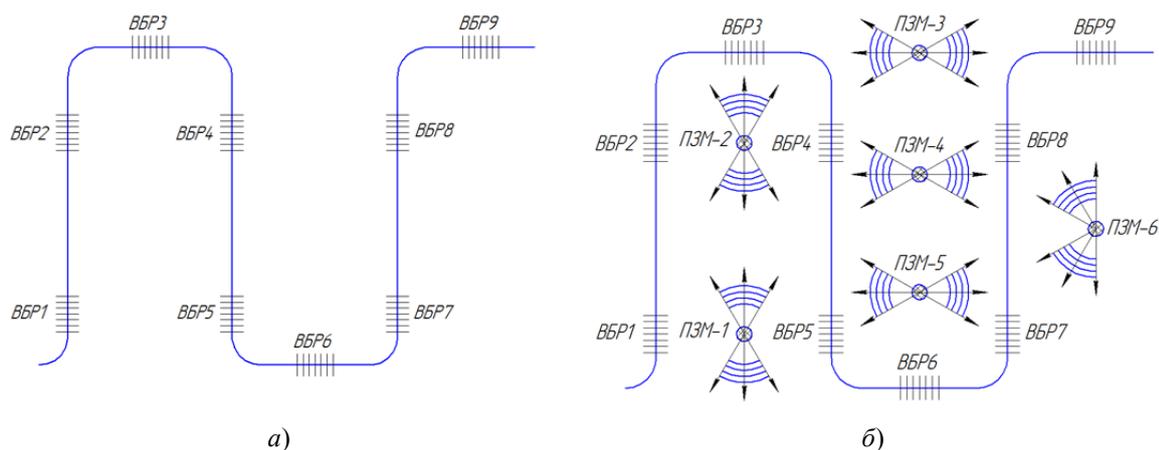


Рис. 2. Двухмерная структура мониторинга:  
*а* – контроль статической деформации; *б* – регистрация ударных и быстропеременных нагрузок с использованием пьезомодулей и ДВБР

Очевидно, что для решения этих задач могут потребоваться десятки ДВБР. В целях обеспечения точного и надежного измерения деформаций с учетом температурной компенсации применяются ВБР-датчики в форме розетки, как показано на рис. 3, с помощью которых можно увеличить количество точек измерения.

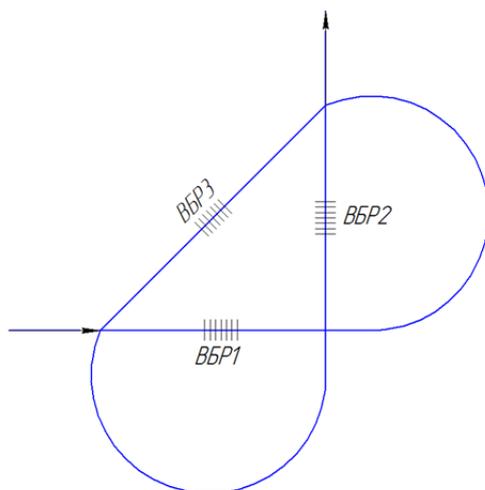


Рис. 3. Розеточная конфигурация ВБР-датчиков

Таким образом, для акустической системы требуются десятки или даже сотни ДВБР, что усложняет процесс измерений. Для обеспечения одновременного опроса десятков или сотен ВБР-датчиков требуется частота опроса от нескольких десятков до сотен кГц для подбора акустических волн. Более того, значение деформации, вызванные акустическими волнами, очень

малы, и их амплитуды находятся на уровне от десятков до нескольких сотен мкм/м, причем чувствительность к деформации традиционного ДВБР с длиной волны 1550 нм составляет 1 пм/(мкм/м), поэтому для измерения акустических волн требуется высокое разрешение.

За последние годы были разработаны высокоскоростные методы опроса длин волн – лазер пространства Фурье с синхронизацией мод, лазер с регулируемой длиной волны и лазер с качающейся длиной волны, основанной на вибрации волокон [7]. Системы на основе этих методов имеют высокую стоимость и сложную конфигурацию. Методы опроса ДВБР могут быть классифицированы по измеряемым процессам и анализу результатов измерений (рис. 4). Метод на основе качающейся длины волны за счет механически подвижных частей, таких как источник перестраиваемого лазера или перестраиваемый оптофильтр Фабри – Перо, применяется для опроса длины волны с одновременным измерением частоты до 1 кГц. Для измерения частоты более 1 кГц сдвиги брэгговских длин волн должны быть преобразованы в оптическую мощность посредством оптического фильтра без введения каких-либо механически подвижных частей.

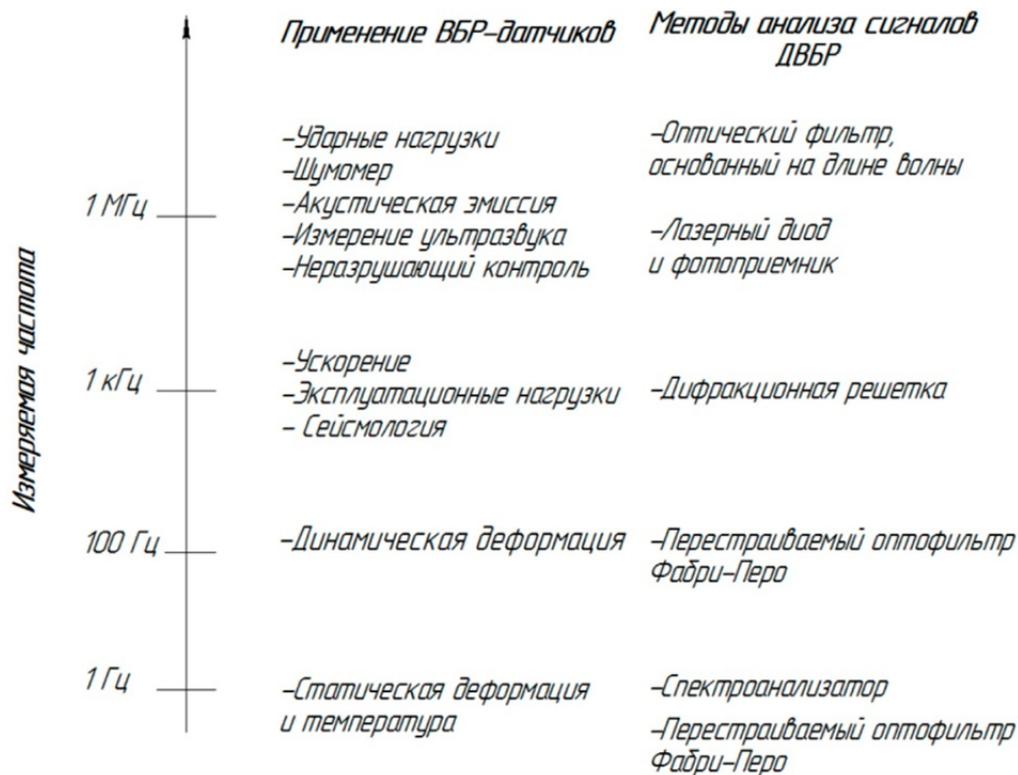


Рис. 4. Методы опроса ВБР-датчиков, классифицированные по измеряемой частоте

Основной принцип определения длины волны с использованием лазерного диода прост. Длина волны диода устанавливается в начальное положение спектра ВБР. Если спектр ВБР сдвигается, то отраженная мощность оптического излучения на фотоприемнике изменяется пропорционально. Следовательно, сдвиги длины волны могут быть зарегистрированы посредством изменения оптической мощности. Лазерный диод может быть заменен на перестраиваемый лазер для одновременного измерения статической и динамической деформации. В этом случае перестраиваемый лазер имеет два режима работы. Один из них – фиксированный выход с заданной длиной волны для измерения акустических волн, подобный использованию лазерного диода. Другой режим работы определяет смещение длины волны. В этом случае на выходе лазер может проанализировать спектр измерения эксплуатационной нагрузки. Преимущество применения перестраиваемого лазера заключается в высокой разрешающей способности и точности из-за его низкого уровня шума и узкой полосы излучения. Однако при измерении акустических волн имеются ограничения из-за большой стоимости и сложности в обеспечении требований при одновременном опросе множества ДВБР.

Некоторые методы анализа сигналов были разработаны с целью определения длин волн для измерений в акустическом диапазоне, включая сравнение ВБР, для опроса длиннопериодных волоконных решеток и решеток на основе массива волноводов (РОМВ) [8, 9]. Метод на основе РОМВ для измерения акустической волны позволяет установить оптический длинноволновый фильтр, обладающий линейной зависимостью. Оптический фильтр включает в себя нарастающий и задний фронт на двух смежных каналах. Брэгговская длина волны устанавливается посередине двух каналов РОМВ. Уровень мощности двух каналов зависит от брэгговской длины волны. Таким образом, анализируя соотношения оптической мощности, можно получить информацию об изменении длины волны ВБР. Поскольку метод на основе РОМВ позволяет одновременно опрашивать множество ВБР-датчиков, этот метод идеально подходит для акустической ВБР-системы. Кроме того, система опроса на основе РОМВ имеет сравнительно малую массу и габариты, что делает ее идеальной для применения в ракетно-космической и авиационной технике.

### *Заключение*

Рассмотренный метод является перспективным для применения в ракетно-космической и авиационной технике с целью обнаружения как статических, так и динамических деформаций, а также возникновения повреждений на ранней стадии разрушения конструкции.

Для внедрения метода в изделия ракетно-космической и авиационной техники необходимо решить вопросы, связанные с прочностью и надежностью конструкции датчика, с определением местоположения датчиков и метода их монтажа в структуре исследуемого изделия.

### *Библиографический список*

1. Moorey, W. W. Applications of fibre grating sensors / W. W. Moorey, G. A. Ball, H. Singh // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 2839, № 2-7.
2. Aldridge, N. Operational load monitoring for aircraft and maritime applications / N. Aldridge, P. D. Foote, I. Read // Strain. – 2000. – Vol. 36. – P. 123–126.
3. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves / A. Minardo, A. Cusano, R. Bernini, L. G. Zeni, M. Giordano // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control. – 2005. – Vol. 52. – P. 304–312.
4. Пат. № 154472 Российская Федерация. Измерительный функциональный модуль деформации / Щевелев А. С., Удалов А. Ю., Кикот В. В. Приоритет от 03.03.2013. Заявл. 03.03.2015 ; опубл. 30.07.2015.
5. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms / Honglei Guo, Gaozhi Xiao, Nezhir Mrad, Jianping Yao // Sensors. – 2011. – Vol. 11.
6. Coppola, G. Analysis of feasibility on the use of fiber Bragg grating sensors as ultrasound detectors / G. Coppola // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4328. – P. 224–232.
7. Culshaw, B. The detection of ultrasound using fiber-optic sensors / B. Culshaw, G. Thursby, D. Betz, B. Sorazu // IEEE Sens. J. – 2008. – Vol. 8. – P. 1360–1367.
8. Betz, D. C. Identification of structural damage using multifunctional Bragg grating sensors: I. Theory and implementation. / D. C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W. J. Staszewski // Smart Mat. Struct. – 2006. – Vol. 75. – P. 1305–1312.
9. Betz, D. C. Acousto-ultrasonics sensing using fiber Bragg grating / D. C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W. J. Staszewski // Smart Mater. Struct. – 2003. – Vol. 12. – P. 122–128.

#### **Щевелев Антон Сергеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: antonfbg@gmail.com

#### **Shchevelev Anton Sergeevich**

candidate of technical sciences, senior staff scientist,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Савенков Александр Валерьевич**

инженер-конструктор,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: nik2@niifi.ru

**Savenkov Aleksandr Valer'evich**

engineer,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Рязанцев Дмитрий Андреевич**

инженер-конструктор,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: nik2@niifi.ru

**Ryazantsev Dmitriy Andreevich**

engineer,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

---

УДК 681.7.08

**Щевелев, А. С.**

**Пространственно ориентированный метод определения деформации для предупреждения возникновения аварийных ситуаций** / А. С. Щевелев, А. В. Савенков, Д. А. Рязанцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 32–38. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-5.