

УДК 681.2.08

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-346-352

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И ИЗГИБОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ

Д.А. Егорова, А.В. Куликов, А.Б. Мухтубаев, М.Ю. Плотников

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: dashaegorova18@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.03.20, принята к печати 16.05.20
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Егорова Д.А., Куликов А.В., Мухтубаев А.Б., Плотников М.Ю. Волоконно-оптическая измерительная система для определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 346–352. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-346-352

Аннотация

Предмет исследования. Волоконно-оптические измерительные системы в настоящее время нашли широкое применение в различных отраслях. Большинство из таких систем представляют собой оптоволоконные устройства для детектирования физических величин. Актуальными на данный момент являются разработка и создание измерительной системы для определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве. В работе предложен способ реализации чувствительной части волоконно-оптической измерительной системы на основе семи одномодовых волокон с массивом волоконных брэгговских решеток, скрепленных между собой. **Метод.** Метод определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве основан на нахождении осевой деформации (сжатие, растяжение) волоконных брэгговских решеток при изгибе, что позволяет рассчитать его направление и кривизну. Дальнейшее восстановление кривой в пространстве реализуется посредством решения системы дифференциальных уравнений, содержащих формулы Френе–Серре с заданными начальными условиями. **Основные результаты.** В работе представлены результаты эксперимента по записи массивов волоконных брэгговских решеток в одномодовые оптические волокна с учетом особенностей оптической схемы и спектра источника излучения. Разработана конструкция и создан макет волоконно-оптической измерительной системы. Получены результаты по восстановлению формы на основе экспериментальных данных. **Практическая значимость.** Особенностью данной системы является сформированные в оптическом волокне массивы решеток Брэгга, где каждая из волоконных брэгговских решеток характеризуется своей длиной отражения, обеспечивающей возможность измерять кривизну кабеля длиной до 1 м. Конструкция этого кабеля, основу которого представляет семь волоконно-оптических бронированных микрокабелей, уложенных с заданным шагом скрутки в процессе изготовления, позволяет регистрировать величину и направление скручивания кабеля.

Ключевые слова

оптическое волокно, массив волоконных брэгговских решеток, волоконно-оптическая измерительная система

Благодарности

Выражаются персональные благодарности заведующему лабораторией записи волоконных брэгговских решеток Университета ИТМО С.В. Варжелю и его научной группе за помощь в подготовке образцов для макета.

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-346-352

FIBER OPTIC MEASUREMENT SYSTEM FOR DETERMINATION OF EXTENDED OBJECT POSITION AND BENDS IN 3D SPACE

D.A. Egorova, A.V. Kulikov, A.B. Mukhtubaev, M.Yu. Plotnikov

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: dashaegorova18@gmail.com

Article info

Received 30.03.20, accepted 16.05.20
 Article in Russian

For citation: Egorova D.A., Kulikov A.V., Mukhtubaev A.B., Plotnikov M.Yu. Fiber optic measurement system for determination of extended object position and bends in 3D space. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 346–352 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-346-352

Abstract

Subject of Research. Fiber optic measurement systems are widely used in various industries. Most of these systems are fiber optic devices for detecting physical quantities. The development and creation of a measurement system for determination of the location and bends of extended objects in 3D space are actual at the moment. We propose the implementation of the sensitive part of the fiber optic measurement system based on seven single-mode fibers with an array of fiber Bragg gratings fixed to each other. **Method.** The method for determining the position and bends of extended objects in space is based on finding the level of axial deformation (compression, tension) of the fiber Bragg gratings during bending, and provides the calculation of the curvature direction and magnitude. Further reconstruction of the curve in space is realized by solving a system of differential equations with given initial conditions containing Frenet-Serre formulas. **Main Results.** The paper presents experiment results on writing fiber Bragg grating arrays into single-mode optical fibers, taking into account the features of the optical scheme and the source spectrum. The design and prototype of the fiber optic measurement system are developed. The results on the reconstruction of the shape based on experimental data are obtained. **Practical Relevance.** A special feature of this system is the fiber Bragg grating arrays formed in a wide range of wavelengths. Each Bragg grating corresponds to its own reflection wavelength, providing a sensitive part 1 m long. The geometry of the structure is based on seven fiber-optic armored microcables twisted with a given lay length during manufacturing, and provides the measurement of the kink value and direction.

Keywords

optical fiber, fiber Bragg grating array, fiber optic measurement system

Acknowledgements

Personal thanks are expressed to S.V. Varzhel, Head of fiber Bragg grating inscription laboratory of ITMO University, and his scientific team for their help with preparing samples for the prototype.

Введение

В настоящее время разработка и создание измерительной системы для определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве вызывает большой научный и практический интерес. На данный момент различают три типа таких систем: бесконтактные, контактные (самочувствительные поверхности) и распределенные волоконно-оптические.

К бесконтактным системам можно отнести камеры, радиолокационные станции, лидары. Например, в работе [1] авторами описано создание системы контроля прогиба для плавучих сухих доков, состоящей из набора контрольных меток с использованием светодиодов и измерительного блока на основе камеры с двумя противоположно направленными каналами. На производительность и достоверность полученных данных таких измерительных систем оказывают большое влияние температура и затухание зондирующего сигнала в среде, в которой производится контроль формы протяженного объекта [2, 3].

Также существует необходимость определения изгибов и формы динамических объектов удаленно, без визуального контакта и в реальном времени. В работе [4] продемонстрирована контактная система в виде гибкой ленты, изготовленной с применением печатных электронных технологий с вмонтированными оптоэлектронными компонентами. Лента разделена на сегменты, которые чувствительны к изгибам и способны регистрировать свою ориентацию в пространстве, что позволяет определить деформацию всей ленты в целом, и, соответственно, поверхности, к которой прикреплен датчик. Другим примером способа осуществления контроля положения и формы объектов являются датчики, реализованные на основе микроэлектромеханических систем (акселерометров, гироскопов). Этот тип систем находит применение в геотехническом мониторинге (ShapeAccelArray) [5], а также в медицине [6, 7]. К недостаткам описанных

систем можно отнести их большие габариты (сложность обеспечить встраивание непосредственно в объект), ограниченная гибкость, низкое пространственное разрешение, наличие требований к электромагнитной совместимости.

Для определения формы, кривизны или скручивания в некоторых задачах требуются гибкие и малогабаритные чувствительные элементы, непосредственно закрепленные на поверхности или внедренные в объект. Волоконно-оптические измерительные системы (ВОИС) позволяют решить упомянутые выше задачи и находят применение в медицине (контроль положения малоинвазивных хирургических устройств и инструментов, введенных в организм человека) [8, 9], аэрокосмической отрасли (контроль деформации развертываемых конструкций и крыльев) [10], энергетике (измерение формы лопасти ветровых генераторов в режиме реального времени) [11], атомной промышленности [12] и др. В сфере судостроения такие ВОИС могут быть применены для проектирования узлов стыковки линий внутренних коммуникаций судов, в процессе их сборки на стапелях из отдельных секций, а также в качестве трехмерного шаблона, заменяющего кабель или отрезок трубы, форму которого необходимо определить.

Чувствительная часть волоконно-оптических систем определения положения и параметров изгибов протяженных объектов в пространстве реализуется на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), записанных по длине волоконного световода [13]. Анализ смещения центральных длин волн отражения массива ВБР на одном участке волокна позволяет определить относительные уровни деформации чувствительной части ВОИС [14]. Существуют различные варианты исполнения чувствительной части [15]: на основе одномодовых оптических волокон [16] или их комбинации [13]; на многосердцевинных волокнах (от 3 до 7 сердцевин) без скрутки сердцевин [17] или со скрученными сердцевинами [11].

Метод изготовления макета волоконно-оптической измерительной системы

В настоящей работе чувствительная часть ВОИС сформирована на основе семи одномодовых оптических волокон с массивами ВБР, записанных по длине оптического волокна с помощью интерферометра Тальбота [18]. Отличительной особенностью данного интерферометра является возможность изменения периода интерференционной картины посредством поворота зеркал, что позволяет записывать ВБР с перестройкой центральной длины волны Брэгга в широком диапазоне. Для создания массива решеток в волокнах были определены следующие параметры записи. В каждое из семи волокон записывался массив из десяти ВБР (ВБР 1–ВБР 10) для того, чтобы обеспечить чувствительную часть датчика длиной 1 м. Решетки располагались симметрично через каждые 100 мм. Длина самих решеток (L) составила 10 мм. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения для системы был выбран широкополосный источник компании Thorlabs S5FC1005S. Для регистрации спектров отражения использовался оптический спектроанализатор Yokogawa AQ6370C. Исходя из известной зависимости [19] сдвига длины волны Брэгга от радиуса изгиба волокна и ширины спектра излучения оптического источника, используемого при проведении экспериментального исследования, были определены центральные длины волн Брэгга для записи массивов решеток — от 1485 до 1632,5 нм с шагом 2,5 нм. Каждой ВБР у 2–7 волокон соответствовала своя центральная длина волны отражения ($\lambda_{\text{ВБР}1}$ – $\lambda_{\text{ВБР}60}$), что позволило одновременно отслеживать изменения в спектре от всех решеток. Первое волокно, которое являлось центральным, записывалось со спектрами отражения, совпадающими со вторым волокном. В дальнейшем его планируется использовать для компенсации температуры. Решетки формировались с коэффициентом отражения в диапа-

зоне 45–60 %. Спектр отражения от волокон с массивами ВБР, в количестве 70 штук, представлен на рис. 2. Разброс в отраженной оптической мощности от каждой ВБР связан с формой спектра излучения источника (вставка на рис. 2), используемого для экспериментальных исследований.

Геометрические параметры конструкции макета представлены на рис. 3, а. Основой для создания макета были выбраны семь микрокабелей кабельного завода «НПП Старлинк» с одним оптическим волокном в каждом из них. Симметричное расположение микрокабелей относительно центрального волокна обусловлено необходимостью определения положения ВОИС в трехмерном пространстве. Регистрация сдвига центральной длины волны Брэгга в каждом отдельном волокне на одном участке в зависимости от сжатия или растяжения при изгибе позволит однозначно определить радиус и направление изгиба в пространстве.

Подготовленные оптические волокна с записанными массивами ВБР приваривались к оптическим волокнам в микрокабелях и затем протягивались. Далее производилась разметка решеток и скрутка шести микрокабелей вокруг центрального, причем ВБР располагались строго симметрично относительно друг друга по длине макета, таким образом было сформировано 10 групп решеток (рис. 1). Шаг скрутки составил около 110 мм с абсолютной погрешностью 2,5 мм, что позволило измерить величину и направление внешнего скручивания. Для фиксации микрокабелей между собой использовалась термоусадочная прозрачная клеевая трубка. Созданный макет ВОИС для определения формы представлен на рис. 3, б.

Экспериментальное исследование макета волоконно-оптической измерительной системы

Как уже было отмечено ранее, чувствительная часть волоконно-оптической измерительной системы реализована на основе семи одномодовых оптических воло-

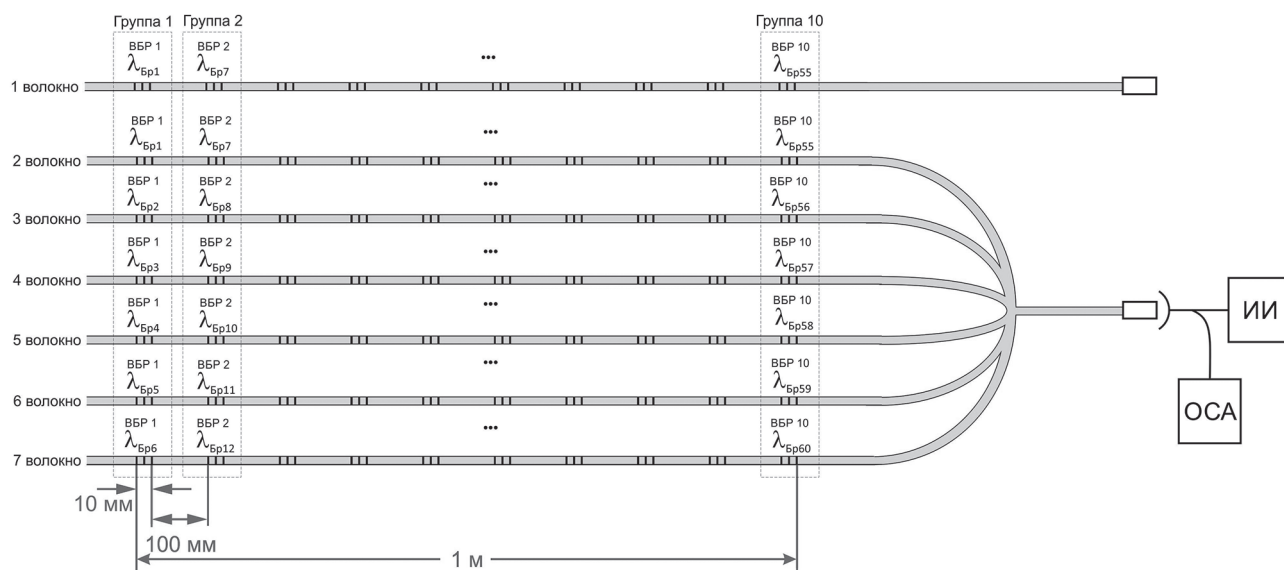


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента (ИИ – источника излучения; ОСА – оптический спектроанализатор)

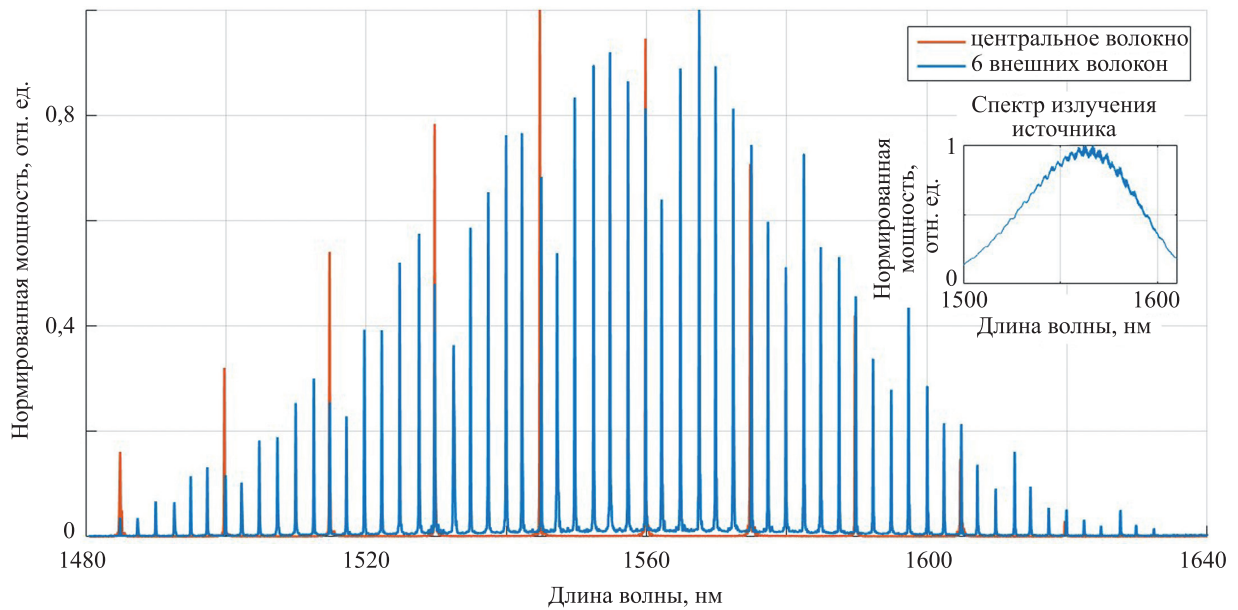


Рис. 2. Спектры отражения от массивов волоконных брэгговских решеток

кон с массивами ВБР, распределенных по длине волокон. ВБР представляет собой периодическую структуру изменения показателя преломления, сформированную в световедущей сердцевине оптического волокна. Такая структура отражает определенную длину волны — центральную длину волны Брэгга ($\lambda_{\text{Бр}}$), которая зависит от периода решетки (Λ) [19]. Принцип работы ВБР продемонстрирован на рис. 4, а.

За счет механического, или температурного воздействия на волокно происходит изменение периода решетки, и, соответственно, возникает сдвиг центральной длины волны Брэгга ($\Delta\lambda_{\text{Бр}}$) [20]. Метод определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве основан на нахождении осевой деформации (сжатие, растяжение) ВБР при изгибе [21]:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{Бр}}}{\lambda_{\text{Бр}}} = (1 - p_e)\varepsilon,$$

где p_e — эффективная упругооптическая постоянная; ε — осевая деформация (сжатие, растяжение).

Величина осевой деформации для каждой решетки в группе будет различна, таким образом возможно рассчитать направление и величину вектора кривизны (\mathbf{k}), перпендикулярного к нейтральной плоскости, для каждой группы решеток, учитывая геометрию конструкции и симметричное расположение оптических волокон относительно центрального (рис. 4, б). Общий вектор кривизны определяется с помощью следующего выражения [14, 21, 22]:

$$\mathbf{k} = -\sum_i^N \frac{\varepsilon_i}{d_i} \cos\beta_i \mathbf{j} - \sum_i^N \frac{\varepsilon_i}{d_i} \sin\beta_i \mathbf{k},$$

где i — номер волокна; N — количество волокон; ε_i — величина деформации для каждой сердцевины волокон; β_i — угол для каждой сердцевины волокон относительно оси y ; d — расстояние от центра внешнего волокна до центра центрального волокна; \mathbf{j} и \mathbf{k} — единичные вектора. Далее определяется угол направления вектора кривизны ($\theta = \text{angle}(\mathbf{k})$). Для каждой группы решеток, с учетом расположения их по длине макета (s), вычисляются значения векторов кривизны,

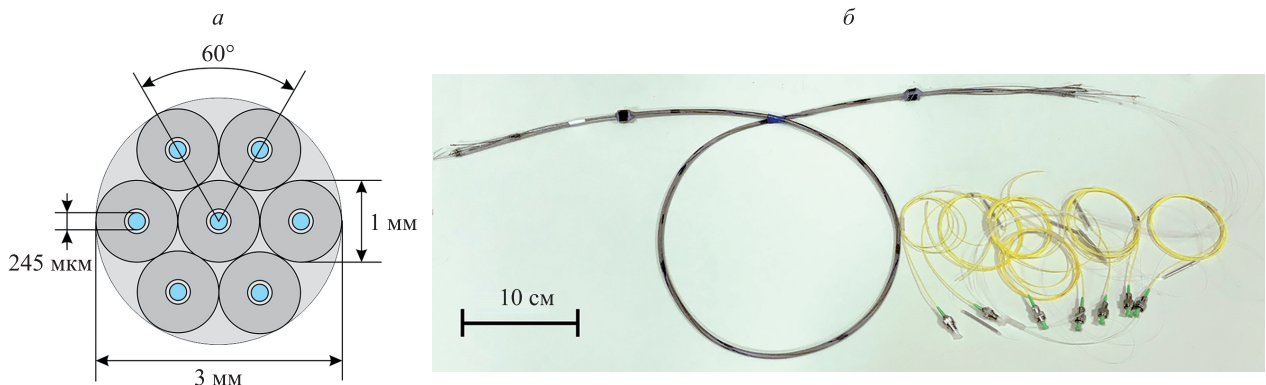


Рис. 3. Макет волоконно-оптической измерительной системы: геометрические параметры конструкции макета (а); макет волоконно-оптической измерительной системы (б)

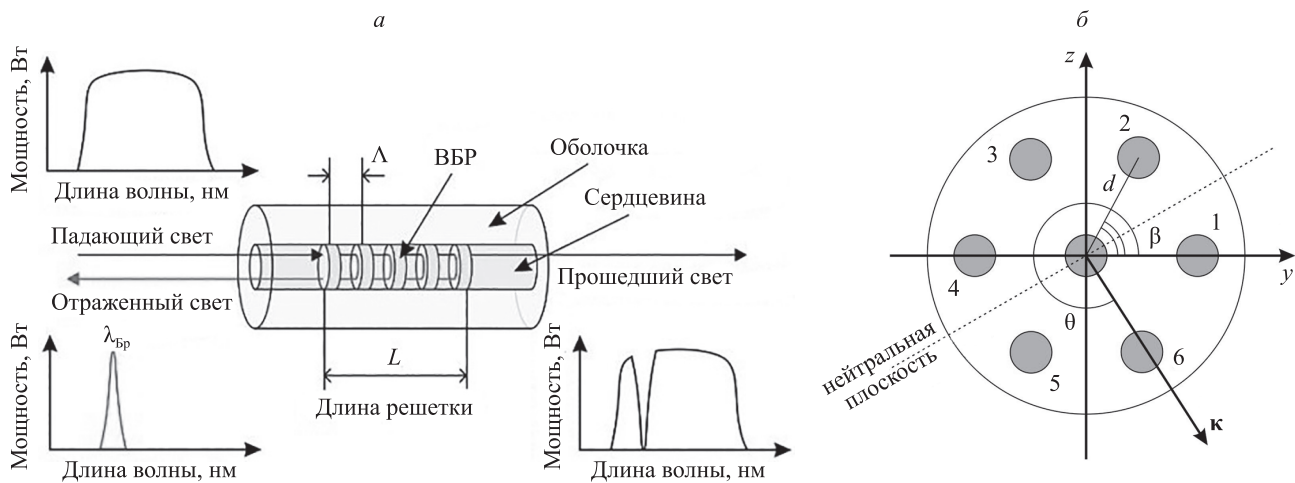


Рис. 4. Принцип работы волоконной брэгговской решетки с постоянным периодом решетки (а); параметры для определения вектора кривизны с учетом конструкции (б), где β — угол для каждой сердцевинки волокон относительно оси z

что дает набор дискретных данных, так называемых функций кривизны ($\kappa(s)$) и угла ($\theta(s)$).

Алгоритм восстановления кривой в пространстве реализуется на основе решения системы дифференциальных уравнений, описывающих формулы Френе–Серре [14, 22]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}'(s) &= \mathbf{T}(s), \\ \mathbf{T}'(s) &= \kappa(s)\mathbf{N}(s), \\ \mathbf{N}'(s) &= \tau(s)\mathbf{B}(s) - \kappa(s)\mathbf{T}(s), \\ \mathbf{B}'(s) &= -\tau(s)\mathbf{N}(s), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\kappa(s)$ — функция кривизны по длине чувствительной части макета; $\tau(s)$ — функция кручения по длине

чувствительной части макета ($\tau(s) = \theta'(s)$). Вектора $\mathbf{T}(s)$, $\mathbf{N}(s)$, $\mathbf{B}(s)$ формируют ортонормированный репер в трехмерном пространстве, так называемый трехгранник Френе, где $\mathbf{T}(s)$ — единичный касательный вектор; $\mathbf{N}(s)$ — единичный вектор главной нормали; $\mathbf{B}(s)$ — единичный вектор бинормали к кривой в данной точке; $\mathbf{r}(s)$ — вектор, определяющий восстановленную кривую в пространстве. Начальные условия для решения системы уравнений и ход решения описан в работах [14, 22].

Методика проведения экспериментальных исследований разработанной системы заключалась в следующем: макет укладывался по заданной траектории, фиксировались спектры отражения от массивов ВБР

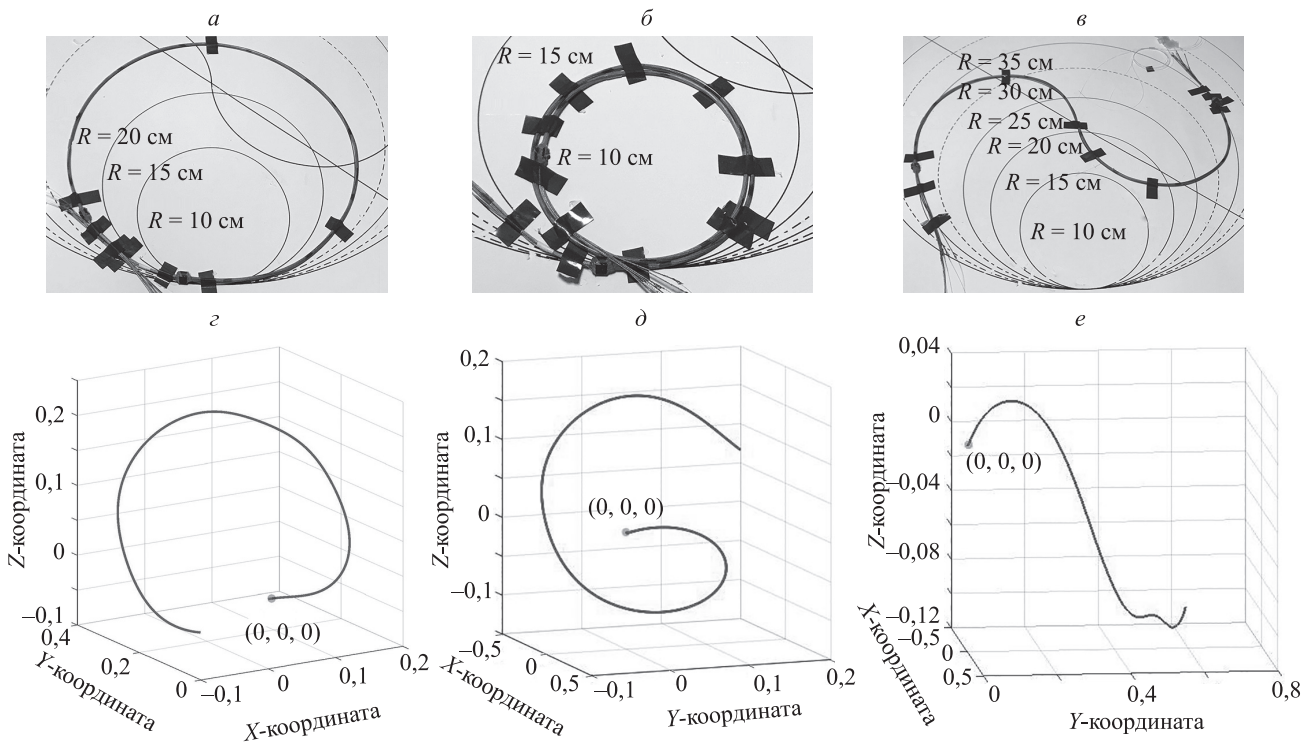


Рис. 5. Результаты эксперимента и восстановление формы кривой в пространстве: радиус изгиба 20 см (а, д); радиус изгиба 10 см (б, е); произвольная кривая (в, е)

начального положения (прямая) и спектры при деформации. Далее рассчитывались значения сдвигов центральных длин волн Брэгга, и определялись функции кривизны и кручения для решения системы уравнений (1). Для проведения необходимых расчетов и реализации алгоритма по восстановлению формы использовалась программная среда MATLAB. Результаты обработки данных эксперимента и восстановленные кривые представлены на рис. 5.

Заключение

Результаты эксперимента показали, что по восстановленной форме можно судить о характере деформации волоконно-оптического кабеля. При этом на восстановление формы существенно влияет шаг скрутки и жесткость соединения световедущих частей

между собой. По мнению авторов настоящей статьи для повышения точности восстановления формы кабеля необходимо выдерживать постоянный шаг скрутки микрокабелей по всей длине, либо применять скрученное в процессе вытяжки многосердцевидное оптическое волокно. Значимым результатом, полученным в ходе настоящей работы, является подтверждение возможности решения актуальной задачи для современной отрасли в части создания малогабаритного трехмерного шаблона, используемого при проведении стыковки линий внутренних коммуникаций судов в процессе их сборки на стапелях из отдельных секций на основе простых и надежных волоконных элементов, таких как брэгговские решетки, и спектрального измерительного оборудования, широко используемого для исследования волоконно-оптической компонентной базы.

Литература

1. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks // *Ocean Engineering*, 2016. V. 117. P. 39–44. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
2. Phillips T., Guenther N., McAree P.R. When the Dust Settles: the four behaviors of LiDAR in the Presence of Fine Airborne Particulates // *Journal of Field Robotics*, 2017. V. 34. N 5. P. 985–1009. doi: 10.1002/rob.21701
3. Phillips T., Hahn M., McAree R. An evaluation of ranging sensor performance for mining automation applications // *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing (AIM 2013)*, 2013. P. 1284–1289. doi: 10.1109/AIM.2013.6584271
4. Dementyev A., Kao H.L.C., Paradiso J.A. SensorTape: modular and programmable 3D-aware dense sensor network on a tape // *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Charlotte, NC, USA, 2015. P. 649–658. doi: 10.1145/2807442.2807507
5. Danisch L., Chrzanowski A., Bond J., Bazanowski M. Fusion of geodetic and MEMS sensors for integrated monitoring and analysis of deformations // *Proc. 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis*. Lisbon, Portugal, 2008. P. 12–15.
6. Митрофанова Т.А., Вуйко В.В., Здражевский Р.А., Потахин С.Н. Аппаратно-программный комплекс для задания пространственного положения инструментов при малоинвазивных хирургических операциях // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. Т. 4. № 2(50). С. 112–115.
7. Plamondon A., Delisle A., Larue C., Brouillette D., McFadden D., Desjardins P., Larivière C. Evaluation of a hybrid system for three-dimensional measurement of trunk posture in motion // *Applied Ergonomics*, 2007. V. 38. N 6. P. 697–712. doi: 10.1016/j.apergo.2006.12.006
8. Parent F., Mandal K.K., Loranger S., Fernandes E.H.W., Kashyap R., Kadoury S. 3D shape tracking of minimally invasive medical instruments using optical frequency domain reflectometry // *Proceedings of SPIE*, 2016. V. 9786. P. 97862J. doi: 10.1117/12.2214998
9. Ledermann Ch., Hergenhan J., Weede O., Woern H. Combining shape sensor and haptic sensors for highly flexible single port system using Fiber Bragg sensor technology // *Proc. 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA 2012)*, 2012. P. 196–201. doi: 10.1109/MESA.2012.6275561
10. Pak C.-G. Wing shape sensing from measured strain // *AIAA Journal*, 2016. V. 54. N 3. P. 1064–1073. doi: 10.2514/1.J053986
11. Lally E., Reaves M., Horrell E., Klute S., Froggatt M.E. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures // *Proceedings of SPIE*, 2012. V. 8345. P. 83452Y. doi: 10.1117/12.917490
12. Бутов О.В., Базакуча А.П., Чаморовский Ю.К., Федоров А.Н., Шевцов И.А. Полностью волоконный высокочувствительный

References

1. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks. *Ocean Engineering*, 2016, vol. 117, pp. 39–44. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
2. Phillips T., Guenther N., McAree P.R. When the Dust Settles: the four behaviors of LiDAR in the Presence of Fine Airborne Particulates. *Journal of Field Robotics*, 2017, vol. 34, no. 5, pp. 985–1009. doi: 10.1002/rob.21701
3. Phillips T., Hahn M., McAree R. An evaluation of ranging sensor performance for mining automation applications. *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing (AIM 2013)*, 2013, pp. 1284–1289. doi: 10.1109/AIM.2013.6584271
4. Dementyev A., Kao H.L.C., Paradiso J.A. SensorTape: modular and programmable 3D-aware dense sensor network on a tape. *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 649–658. doi: 10.1145/2807442.2807507
5. Danisch L., Chrzanowski A., Bond J., Bazanowski M. Fusion of geodetic and MEMS sensors for integrated monitoring and analysis of deformations. *Proc. 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis*, Lisbon, Portugal, 2008, pp. 12–15.
6. Mitrofanova T.A., Vuyko V.V., Zdragevskij R.A., Potahin S.N. Hardware-software complex for the task of spatial position of tools at surgical operations. *Vestnik SSTU*, 2010, vol. 4, no. 2(50), pp. 112–115. (in Russian)
7. Plamondon A., Delisle A., Larue C., Brouillette D., McFadden D., Desjardins P., Larivière C. Evaluation of a hybrid system for three-dimensional measurement of trunk posture in motion. *Applied Ergonomics*, 2007, vol. 38, no. 6, pp. 697–712. doi: 10.1016/j.apergo.2006.12.006
8. Parent F., Mandal K.K., Loranger S., Fernandes E.H.W., Kashyap R., Kadoury S. 3D shape tracking of minimally invasive medical instruments using optical frequency domain reflectometry. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9786, pp. 97862J. doi: 10.1117/12.2214998
9. Ledermann Ch., Hergenhan J., Weede O., Woern H. Combining shape sensor and haptic sensors for highly flexible single port system using Fiber Bragg sensor technology. *Proc. 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA 2012)*, 2012, pp. 196–201. doi: 10.1109/MESA.2012.6275561
10. Pak C.-G. Wing shape sensing from measured strain. *AIAA Journal*, 2016, vol. 54, no. 3, pp. 1064–1073. doi: 10.2514/1.J053986
11. Lally E., Reaves M., Horrell E., Klute S., Froggatt M.E. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8345, pp. 83452Y. doi: 10.1117/12.917490
12. Butov O.V., Bazakutca A.P., Chamorovskii Yu.K., Fedorov A.N., Shevtcov I.A. Wholly fiber-based highly sensitive bending sensor for nuclear industry. *Foton-Express*, 2019, no. 6(158), pp. 26–27. (in Russian). doi: 10.24411/2308-6920-2019-16008

- датчик изгиба для атомной промышленности // Фотон-Экспресс. 2019. № 6(158). С. 26–27. doi: 10.24411/2308-6920-2019-16008
13. Park Y.-L., Elayaperumal S., Daniel B., Ryu S.C., Shin M., Savall J., Black R.J., Moslehi B., Cutkosky M.R. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2010. V. 15. N 6. P. 906–915. doi: 10.1109/TMECH.2010.2080360
 14. Moore J., Rogge M. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions // *Optics Express*. 2012. V. 20. N 3. P. 2967–2973. doi: 10.1364/OE.20.002967
 15. Egorova D.A., Kulikov A.V., Nikitenko A.N., Gribaev A.I., Varzhel S.V. Investigation of bending effects in chirped FBGs array in multicore fiber // *Optical and Quantum Electronics*. 2020. V. 52. N 2. P. 130. doi: 10.1007/s11082-020-2251-8
 16. Nishio M., Mizutani T., Taked N. Shape identification of variously-deformed composite laminates using Brillouin type distributed strain sensing system with embedded optical fibers // *Proceedings of SPIE*. 2008. V. 6932. P. 69322P. doi: 10.1117/12.775671
 17. Duncan R.G., Froggatt M.E., Kreger S.T., Seeley R.J., Gifford D.K., Sang A.K., Wolfe M.S. High-accuracy fiber-optic shape sensing. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6530, pp. 65301S. doi: 10.1117/12.720914
 18. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. P. 540. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
 19. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. 2nd ed. Elsevier, 2010. 632 p. doi: 10.1016/C2009-0-16830-7
 20. Othonos A. *Fiber Bragg gratings* // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. N 12. P. 4309–4341. doi: 10.1063/1.1148392
 21. Roesthuis R.J., Janssen S., Misra S. On using an array of fiber Bragg grating sensors for closed-loop control of flexible minimally invasive surgical instruments // *Proc. 26th IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: New Horizon (IROS 2013)*. 2013. P. 2545–2551. doi: 10.1109/IROS.2013.6696715
 22. Moore J.P. Shape sensing using multi-core fiber // *Proc. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2015. P. 7121578. doi: 10.1364/OFC.2015.Th1C.2
 23. Park Y.-L., Elayaperumal S., Daniel B., Ryu S.C., Shin M., Savall J., Black R.J., Moslehi B., Cutkosky M.R. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, vol. 15, no. 6, pp. 906–915. doi: 10.1109/TMECH.2010.2080360
 24. Moore J., Rogge M. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 2967–2973. doi: 10.1364/OE.20.002967
 25. Egorova D.A., Kulikov A.V., Nikitenko A.N., Gribaev A.I., Varzhel S.V. Investigation of bending effects in chirped FBGs array in multicore fiber. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, vol. 52, no. 2, pp. 130. doi: 10.1007/s11082-020-2251-8
 26. Nishio M., Mizutani T., Taked N. Shape identification of variously-deformed composite laminates using Brillouin type distributed strain sensing system with embedded optical fibers. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6932, pp. 69322P. doi: 10.1117/12.775671
 27. Duncan R.G., Froggatt M.E., Kreger S.T., Seeley R.J., Gifford D.K., Sang A.K., Wolfe M.S. High-accuracy fiber-optic shape sensing. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6530, pp. 65301S. doi: 10.1117/12.720914
 28. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, pp. 540. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
 29. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. 2nd ed. Elsevier, 2010. 632 p. doi: 10.1016/C2009-0-16830-7
 30. Othonos A. *Fiber Bragg gratings*. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341. doi: 10.1063/1.1148392
 31. Roesthuis R.J., Janssen S., Misra S. On using an array of fiber Bragg grating sensors for closed-loop control of flexible minimally invasive surgical instruments. *Proc. 26th IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: New Horizon (IROS 2013)*, 2013, pp. 2545–2551. doi: 10.1109/IROS.2013.6696715
 32. Moore J.P. Shape sensing using multi-core fiber. *Proc. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2015, pp. 7121578. doi: 10.1364/OFC.2015.Th1C.2

Авторы

Егорова Дарья Андреевна — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57200964358, ORCID ID: 0000-0001-5136-1779, dashaegorova18@gmail.com

Куликов Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7103154362, ORCID ID: 0000-0001-8882-7253, a.kulikov86@gmail.com

Мухтубаев Азамат Булатович — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57198779748, ORCID ID: 0000-0002-4848-0483, mukhtubaev.ab@gmail.com

Плотников Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

Authors

Daria A. Egorova — Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57200964358, ORCID ID: 0000-0001-5136-1779, dashaegorova18@gmail.com

Andrey V. Kulikov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7103154362, ORCID ID: 0000-0001-8882-7253, a.kulikov86@gmail.com

Azamat B. Mukhtubaev — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57198779748, ORCID ID: 0000-0002-4848-0483, mukhtubaev.ab@gmail.com

Mikhail Yu. Plotnikov — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru