

Полигармонический метод зондирования волоконно-оптических датчиков температуры и механического напряжения строительных сооружений

М.М. Гизеев, П.Е. Денисенко, Е.П. Денисенко

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань*

Аннотация: В работе представлен подход к комплексному измерению температуры и механического напряжения. Использование полигармонического сигнала заданной формы позволило опрашивать одновременно два датчика. Датчики температуры и механического напряжения выполнены в виде в волоконных брэгговских решеток со специальными спектральными характеристиками.

Ключевые слова: Волоконная решётка Брэгга, датчик, механическое напряжение, температура, строительство, фотодетектор, полигармонический метод, оптоволокно, специальная форма спектра, свет.

Контроль и диагностика сложных строительных сооружений и конструкций является важным условием для предотвращения катастроф и аварийных ситуаций. Средства измерения выполняют важную задачу определения физического состояния объектов, в частности, наиболее необходимым является определение деформации конструкции или же механического напряжения. В качестве таких средств можно предложить использование волоконно-оптических датчиков, в основе которых лежат волоконные брэгговские решётки (далее ВБР) по причине их преимуществ по сравнению с традиционными датчиками, которым для работы нужно, помимо линии передачи информации, линии электропитания [1, 2]. Кроме того, применение таких датчиков ограничено агрессивными средами и электромагнитными помехами [3].

Для сложных сооружений, таких как, например, плотины была разработана система контроля и мониторинга на основе ВБР для измерения температуры и механических напряжений. Изменения температуры определяется путём постоянного измерения температуры конструкции объекта [4], а контроль деформации необходим для формирования

статистики о состоянии объекта и, как следствие, своевременного вмешательства и предотвращения последствий.

Принцип работы подобной системы заключается в том, что две последовательно соединённые ВБР, обладающими специальными формами спектральных характеристик служат в качестве сенсорных элементов. Отражённое от них излучение регистрируется фотодетектором, а затем обрабатывается блоком обработки информации. На основе сдвига центральных длин волн можно сделать вывод о деформации и температуре [5,6]. Структурная схема системы представлена на рис. 1, где 1 – оптическое волокно, а 2 – защитный металлический колпачок для ВБР1, служащий для исключения деформации от механического напряжения [5]:

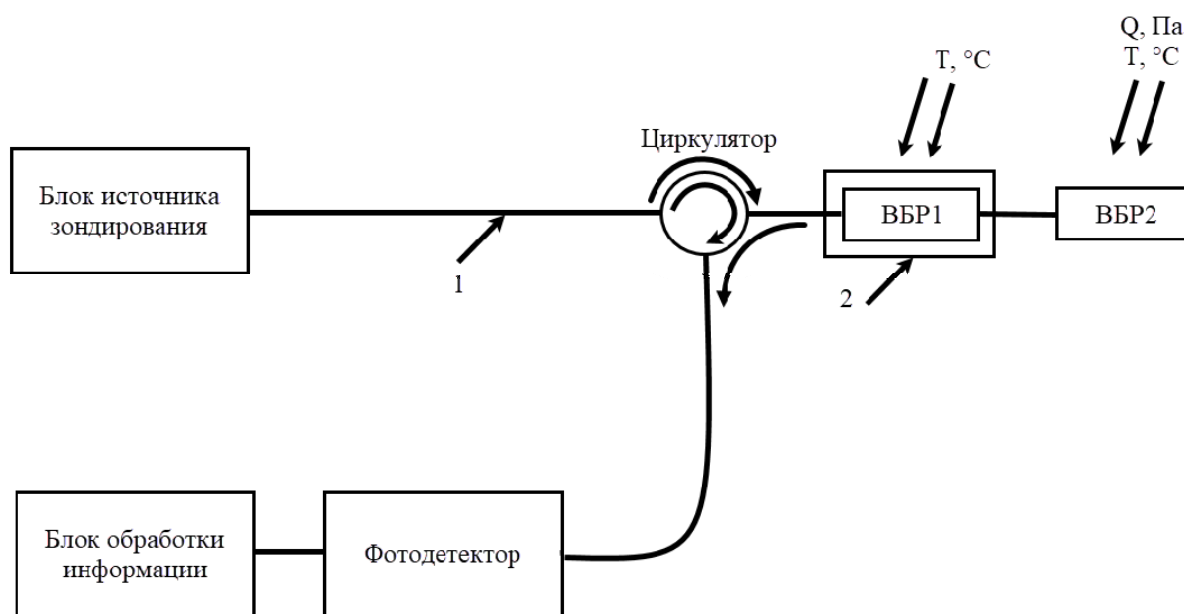


Рис. 1.–Структурная схема комплексированного датчика

Так как большие и малые значения физических полей регистрируются на нелинейных участках ВБР, было принято решение использовать решётки Брэгга специальной формой спектра [6]. В частности, были выбраны ВБР с ассиметричной треугольной формой спектра, которые позволяют получить более линейные спектры

отражения/пропускания. Для зондирования решёток, был использован четырёхчастотный полигармонический сигнал длиной волны 1550 нм. Спектры решёток представлены на рис.2:

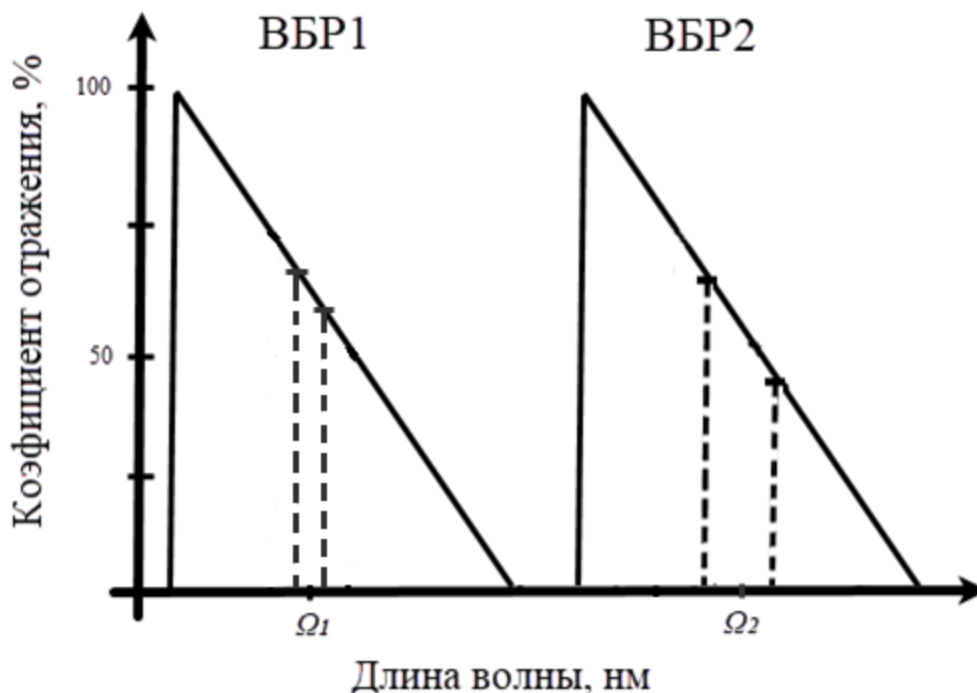


Рис. 2.–Ассиметричные треугольные спектры двух ВБР1 и ВБР2

Зависимость резонансной длины волны волоконной брэгговской решётки λ_{BG} от температуры среды описывается уравнением, исходя из [7]:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n_{eff}^{co}\Lambda_{BG} \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}^{co}} \frac{dn_{eff}^{co}}{dT} \right] \Delta T,$$

где ΔT – изменение температуры;

α – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла.

Это соотношение даёт типичные значения сдвига $\delta\lambda_{BG}$ в зависимости от температуры (~ 0.01 нм/°C).

Зависимость резонансной длины волны ВБР от воздействия механического напряжения описывается уравнением [8]:

$$\Delta\lambda_{BG} = \lambda_{BG} \left(1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} - P_{12})] \right) \varepsilon,$$

где ε – приложенное механическое напряжение;

P_{ij} – коэффициенты Погкельса упруго-оптического тензора;

ν – коэффициент Пуассона;

n – эффективный показатель преломления основной моды.

Это соотношение дает типичные значения сдвига L_{BG} в зависимости относительного удлинения оптического волокна $\approx 10^3 \times \Delta L/L$ (нм).

В результате моделирования сенсорной системы, были получены зависимости мощности от смещения центральной длины волны для ВБР1 и ВБР2. При совмещении двух зависимостей, как показано на рис.3, видно, что температура оказывает практически одинаковое влияние на обе сенсорные ВБР:

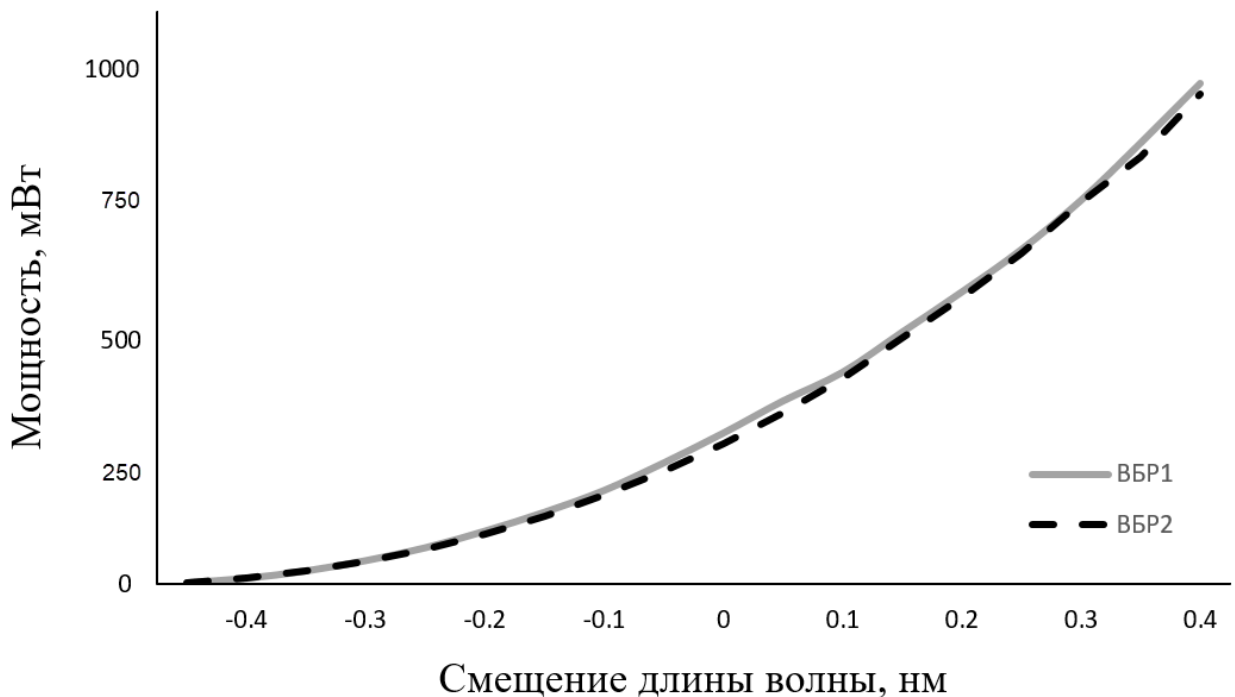


Рис. 3.– Зависимость мощности от смещение центральной длины волны для ВБР1 и ВБР2

Если на ВБР 2 воздействует механическое напряжение, происходит деформация оптического волокна, что вызывает смещение длины волны. По величине деформации, можно судить о силе напряжения, что продемонстрировано в зависимости смещения от изменения напряжения на рис.4. Если учитывать, что обе ВБР находятся на относительно близком расстоянии друг от друга, на них влияет одинаковая температура. Если же, на ВБР2 влияет механическое напряжение, смещения длины волны будет значительно отличаться от ВБР1. Если определить разницу в смещении длин волн, можно определить силу напряжения.

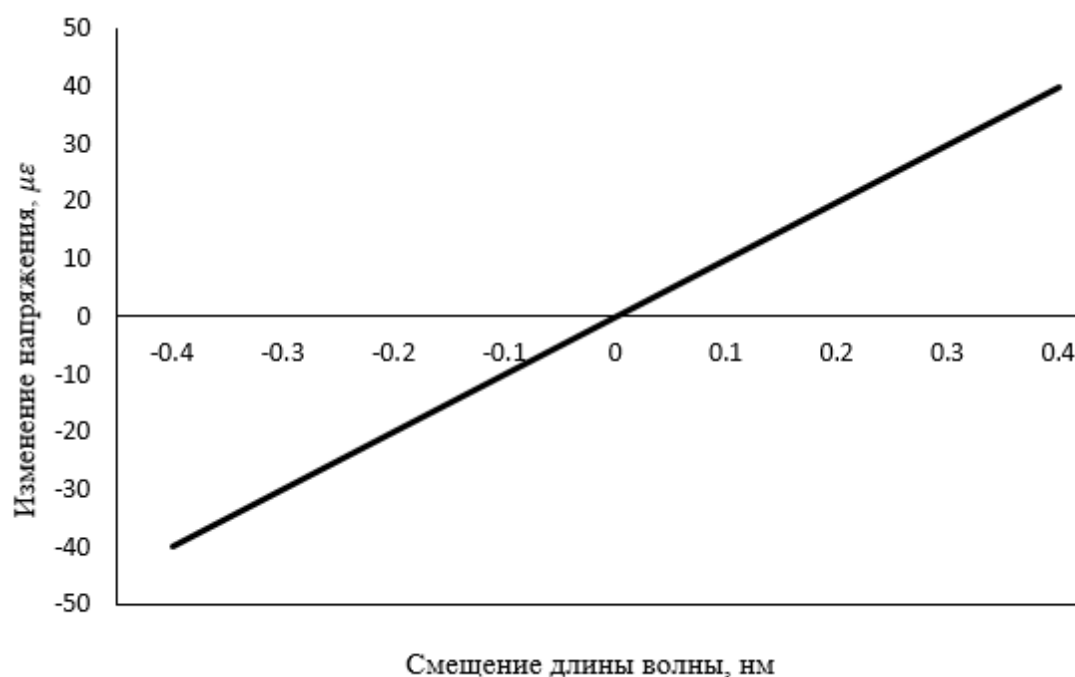


Рис. 4.– Зависимость влажности от смещения центральной длины волны для ВБР2

Регистрация параметров объекта с помощью подобной системы, позволяет осуществить одновременный контроль на несколькими

параметрами одним устройством по сравнению с традиционными решениями.

Литература

1. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. Энергоатомиздат. 1990. 256 с.
2. Нгуен Суан Мань, Попов Г.А. Система сбора данных по параметрам конструкций интеллектуального здания на основе волоконно-оптических датчиков // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3136/.
3. Нуреев И.И. Радиодифракционные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581/.
4. Morozov, O. G., Denisenko P.E., Denisenko E.P., Kuznetsov A.A., Kazarov V.Y., Zastela M.Y. Fiber-optic Bragg sensors with special spectrum shapes for climatic test systems // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10342, pp. 1034217-1 – 1034217-7.
5. Morozov, O. G., Denisenko P.E., Denisenko E.P. Microwave spectroscopy of the fiber Bragg grating // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2015. doi:10.1109/icatt.2015.7136901.
6. Денисенко, П.Е., Морозов О.Г. Определение огибающей спектра волоконных решеток Брэгга методом двухчастотной рефлектометрии // Фотон-Экспресс. 2013. №6. С. 297-298.
7. Zhi Zhou, Jinping Ou. Techniques of temperature compensation for FBG strain sensors used in long-term structural monitoring // Proceedings of SPIE. 2005. V. 5851, pp. 167-172.



8. Денисенко, П.Е., Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Нуреев И.И. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 14. С. 200–204.

9. Васильев, С. А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 12. С. 1085–1103.

10. Tai, H. Simple numerical simulation of strain measurement// Proceedings of SPIE. 2002. V. 4772, pp.131-138.

References

1. Busurin V.I., Nosov Ju.R. Volokonno-opticheskie datchiki: Fizicheskie osnovy, voprosy rascheta i primeneniya. [Fiber Optic Sensors: Physical Basics, Calculation and Application Issues]. Jenergoatomizdat. 1990. 256 p.

2. Nguen Suan Man', Popov G.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3136/.

3. Nureev I.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581/.

4. Morozov, O. G., Denisenko P.E., Denisenko E.P., Kuznetsov A.A., Kazarov V.Y., Zastela M.Y. Proceedings of SPIE. 2017. V. 10342, pp. 1034217-1 – 1034217-7.

5. Morozov, O. G., Denisenko P.E., Denisenko E.P. International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2015. doi:10.1109/icatt.2015.7136901.

6. Morozov, O. G., Denisenko P.E. Foton-Express. 2013. №6. pp. 297-298.

7. Zhi Zhou, Jinping Ou. Proceedings of SPIE. 2005. V. 5851, pp.167-172.

8. Denisenko, P.E., Kuprijanov V.G., Morozov O.G., Nureev I.I. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2013. № 14. pp.200–204.

9. Vasil'ev, S. A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Kvantovajaj elektronika. 2005. V. 35, № 12. pp.1085–1103.



10. Tai, H. Proceedings of SPIE. 2002. V. 4772, pp. 131-138.