

Одновременная калибровка механического напряжения и температуры с помощью одной волоконной брэгговской решетки и методов машинного обучения

С. Б. Бушук¹⁾, П. А. Куликовская²⁾, И. Н. Пучковский¹⁾, М. А. Ходасевич²⁾,
С. С. Шавель¹⁾

¹⁾ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²⁾ Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: m.khodasevich@ifanbel.bas-net.by

Представлен метод одновременного измерения температуры и механического напряжения с использованием одиночной волоконной брэгговской решётки и многопараметрического метода частичных наименьших квадратов с выбором спектральных переменных методом поиска комбинации движущихся окон. В диапазоне температур 299–398 К и механического напряжения 0–5 ГПа калибровка характеризуется среднеквадратичным отклонением 1,62 К и 43,5 МПа, соответственно, что подтверждает эффективность предложенного подхода для мониторинга строительных конструкций.

Ключевые слова: оптоволоконные датчики, волоконные брэгговские решетки, метод частичных наименьших квадратов.

Simultaneous calibration of mechanical stress and temperature using a single fiber Bragg grating and machine learning methods

S. B. Bushuk¹⁾, P. A. Kulikovskaya²⁾, I. N. Puchkovsky¹⁾, M. A. Khodasevich²⁾,
S. S. Shavel¹⁾

¹⁾ SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,

²⁾ B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: m.khodasevich@ifanbel.bas-net.by

A method for simultaneous measurement of temperature and mechanical stress using single fiber Bragg grating and the multivariate partial least squares method with spectral variable selection by the searching combination moving window is presented. In the temperature range of 299–398 K and mechanical stress range of 0–5 GPa, the calibration is characterized by root mean square errors of 1.62 K and 43.5 MPa, respectively, confirming the effectiveness of the proposed approach for structural health monitoring.

Keywords: fiber optic sensors, fiber Bragg gratings, partial least squares.

Оптоволоконные датчики (ОД) благодаря высокой чувствительности, возможности распределённого зондирования, компактности и устойчивости к внешним воздействиям находят широкое применение в биомедицине, энергетике, оборонной и аэрокосмической отраслях, а также в промышленной автоматизации. В настоящей работе нас интересует решение задачи мониторинга строительных конструкций мостов, тоннелей, плотин и трубопроводов, где точность и интегрируемость в строительные материалы делают ОД перспективным инструментом для долговременного контроля. Среди современных методов решения этой задачи выделяются применения датчиков на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР)

[1], рефлектометрические подходы, использующие рэлеевское и бриллюэновское рассеяние [2], и интерферометрические схемы (Фабри–Перо [3] и Маха–Цендера [4]). Несомненными преимуществами ВБР являются возможность мультиплексирования и стабильность работы. Недостатком ВБР в применении к мониторингу строительных конструкций, когда требуется одновременное измерение механической деформации и температуры, считается перекрёстная чувствительность. Стандартным решением этой проблемы является использование двух ВБР, одна из которых является ненагруженной и служит для калибровки только температуры [5]. В настоящей работе показана возможность одновременной калибровки и механической деформации и температуры с помощью одного датчика ВБР и применения методов машинного обучения к измеренным спектрам отражения.

Для проведения измерений спектров отражения ВБР использовалось излучение свип-лазера с центральной длиной волны 1060 нм и диапазоном перестройки 100 нм, с частотой импульсов 400 кГц. Излучение регистрировалось спектрометром OceanOptics USB2000 в диапазоне длин волн 670–1325 нм. Всего было измерено 100 усредненных по 25 импульсам спектров в диапазоне температур 299–398 К и случайным значением механического напряжения в диапазоне от 0 до 5 ГПа. Для анализа спектров применяется метод частичных наименьших квадратов PLS (partial least squares) [6]. PLS ищет маломерное пространство латентных переменных (LS), в котором максимальна корреляция между проекциями спектров и зависимыми параметрами – в данном случае температурой и механическим напряжением. Критерием качества многопараметрических калибровочных моделей является среднеквадратичное отклонение оценки в образцах проверочной выборки RMSEP (root mean square error of prediction). Для построения многопараметрических моделей все измерения были разделены на обучающую (60 измерений) и проверочную (40 измерений) выборку случайным образом с обязательным отнесением в обучение по два измерения с минимальными и максимальными значениями зависимых параметров. На рис. 1 и рис. 2 показаны калибровочные зависимости, полученные методом PLS для температуры и механического напряжения, соответственно, в моделях, проводящих оценку сразу двух (а) или одного параметра (б).

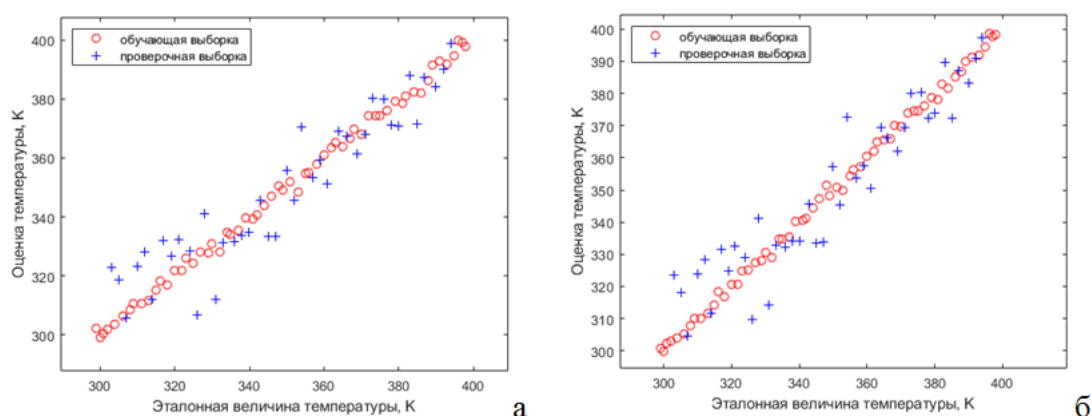


Рис. 1. Зависимость предсказанных значений температуры от измеренных для общей модели PLS для обоих параметров (а) и модели PLS только для температуры (б)

Для улучшения калибровки был применен выбор спектральных переменных с помощью поиска комбинации движущихся окон scmwPLS (searching combination moving window interval PLS) [7]. В нем количество спектральных переменных в непрерывном интервале (окне) должно на единицу превышать количество латентных переменных для модели широкополосной PLS. Глобальный минимум зависимости величины RMSEP от количества окон определяет выбранные спектральные переменные.

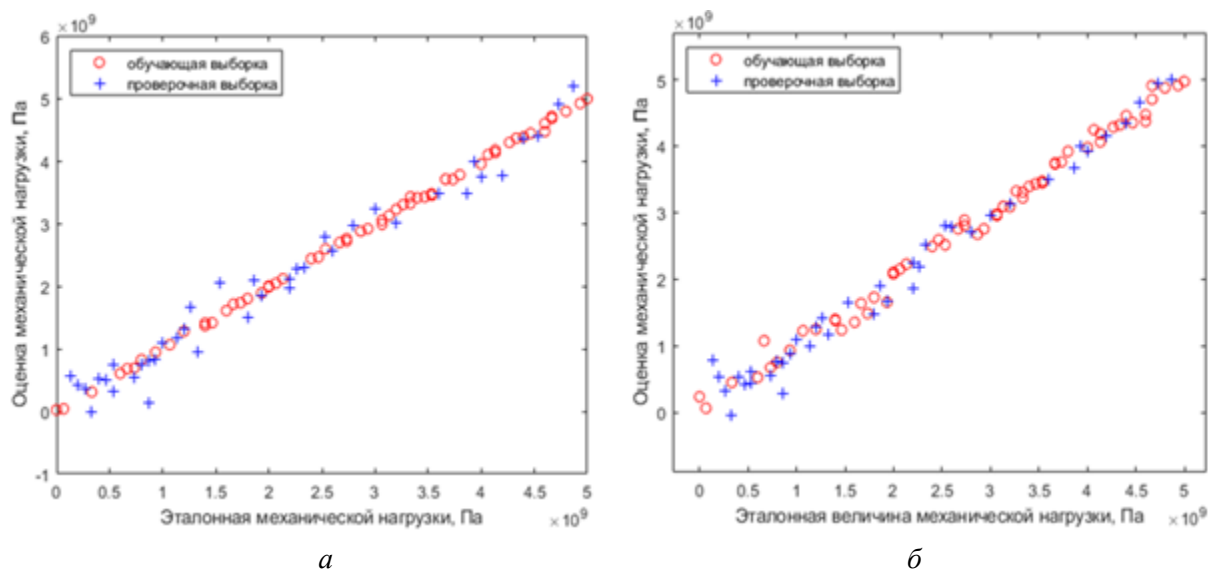


Рис. 2. Зависимость предсказанных значений механического напряжения от измеренных:
а – для общей модели PLS; *б* – для модели PLS только для механического напряжения

Длины волн, выбранные методом scmwPLS, приведены на рис. 3: для калибровки механического напряжения используются 664 спектральных переменных, температуры – 445.

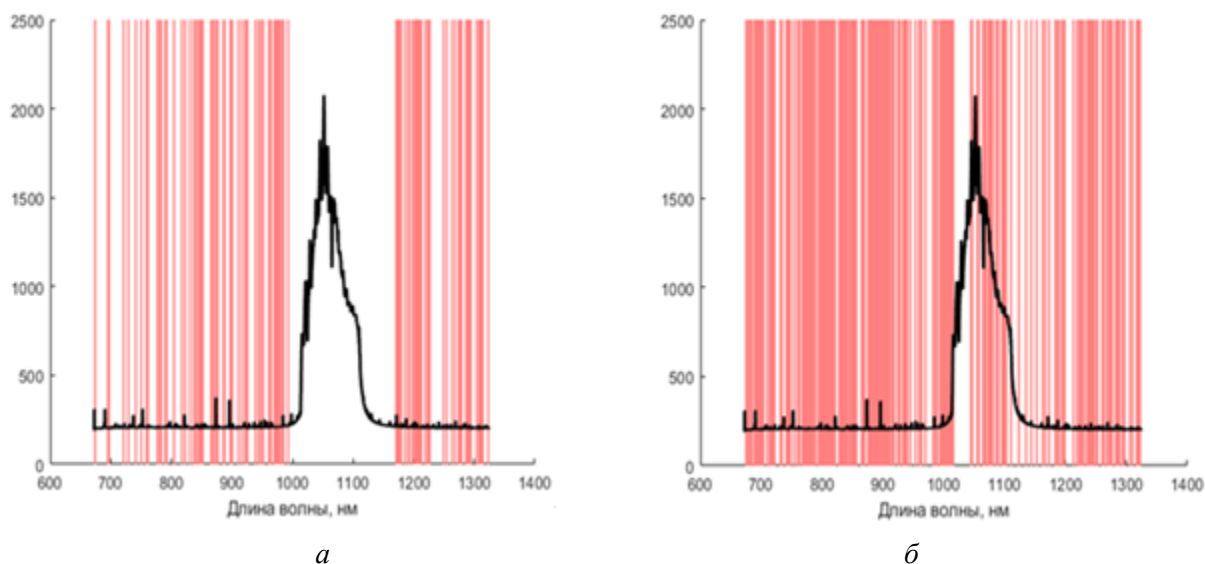


Рис. 3. Спектральные переменные, выбранные моделью scmwPLS:
а – для калибровки температуры; *б* – для механического напряжения

Видно, что модель для калибровки температуры не использует спектральные переменные в диапазоне пика отражения ВБР 994–1170 нм, в котором находится большое количество спектральных переменных, учитываемых в модели для калибровки механического напряжения. Поэтому было предпринято спектральное разделение на два диапазона: 994–1170 нм для калибровки механического напряжения и оставшиеся коротковолновая и длинноволновая часть измеренного спектра – для калибровки температуры. В указанных диапазонах метод *scwPLS* выбрал 288 спектральных переменных для механического напряжения и 330 – для температуры. Соответствующие калибровочные зависимости представлены на рис. 4. В таблице приведены значения RMSEP для всех описанных моделей.

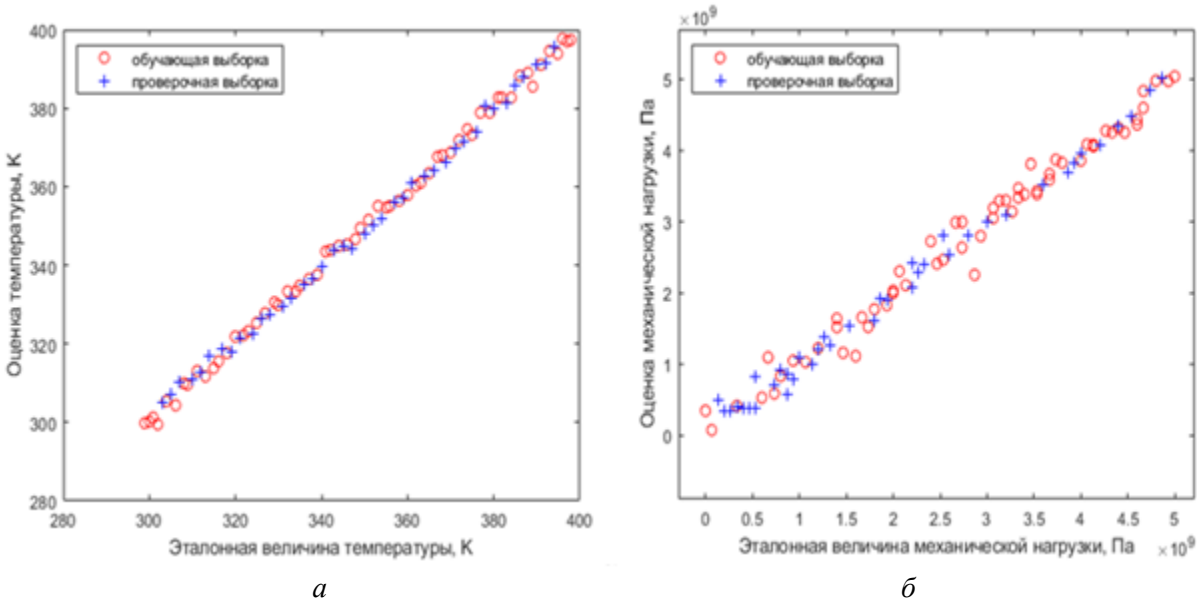


Рис. 4 Зависимость предсказанных значений от измеренных:
а – для калибровки температуры; *б* – для механического напряжения

Среднеквадратичное отклонение RMSEP калибровки механического напряжения и температуры разными многопараметрическими моделями

модель	условия	механическое напряжение, МПа	температура, К
две целевых переменных	11 LS, без выбора спектральных переменных	67,7	9,72
одна целевая переменная	без выбора спектральных переменных	5 LS	4 LS
		67,9	9,65
	с выбором спектральных переменных	38,6	1,83
	с выбором спектральных переменных и разделением спектральных диапазонов	43,5	1,62

Таким образом, предложен и реализован метод одновременного измерения температуры и механической нагрузки на основе одного датчика ВБР с использованием многопараметрического метода *scmwiPLS* с разделением спектральных диапазонов и выбором спектральных переменных. Показано, что модели, калибрующие оба зависимых параметра без выбора спектральных переменных, демонстрируют низкую точность и не позволяют эффективно разделить влияние температуры и механического напряжения на спектры отражения ВРБ. Разделение спектральных диапазонов и выбор переменных обеспечили построение моделей с высоким качеством оценки и температуры, и механического напряжения: отклонение RMSEP составило 1,62 К для температуры и 43,5 МПа для механического напряжения. Полученные результаты уступают точности калибровки механического напряжения ($< 0,5\%$) многопараметрической сенсорной системой, использующей дополнительно поляризационный анализ спектров отражения одиночной ВБР для калибровки осевой деформации, угла скручивания и температуры [8], но превосходят ее по точности калибровки температуры (1,62 К против 2,91 К). Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения ВБР-датчиков с использованием методов машинного обучения для обработки спектральной информации при проведении мониторинга строительных и промышленных объектов в режиме реального времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке задания 1.1 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций».

Библиографические ссылки

1. Albert, J. Tilted fiber Bragg grating sensors / J. Albert, S. L. Y. Shao, C. Caucheteur // *Laser Photonics Reviews*. 2013. Vol. 7, № 1. P. 83–108.
2. Bao, X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors // *Sensors*. 2012. Vol. 12. P. 8601–8639.
3. An ultra-fast fiber optic pressure sensor for blast event measurements / N. Wu [et al.] // *Measurement Science and Technology*. 2012. Vol. 23, № 5. P. 1–7.
4. Li, L. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications / L. Li, L. Xia, Z. Xie, D. Liu // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, № 10. P. 11109–11120.
5. Her, S. C., Lin W. N. Simultaneous Measurement of Temperature and Mechanical Strain Using a Fiber Bragg Grating Sensor // *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 15. Article 4223.
6. Geladi, P. Kowalski B. Partial Least-Squares Regression: A Tutorial // *Analytica Chimica Acta*. 1986. Vol. 186. P. 1–17.
7. Ходасевич, М. А., Саскевич Н. А. Методы построения обучающего набора для калибровки с помощью флуоресцентной спектроскопии небольших выборок // *Весті НАН Беларусі, сер. фіз.-мат. навук*. 2018. № 1. С. 77–83.
8. Polarization-Assisted multiparameter sensing using a single fiber Bragg grating // A. Leal-Junior [et al.]. // *Optical Fiber Technology*. 2024. Vol. 84. Article 103775.