

РАДИОФОТОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ ВБР ПРИ ПОМОЩИ ГРЕБЕНКИ АДРЕСНЫХ ЧАСТОТ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Р.А. Макаров, Д.С. Грабовецкий, Д.Н. Матвеев,
А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов*

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Представлена комплексная методика радиотонного контроля положения волоконно-оптических брэгговских решёток (ВБР) с использованием гребёнки адресных частот и искусственных нейронных сетей. Разработанная модель объединяет аналитическое описание спектрального отклика ВБР посредством матричных методов передачи с учетом внутренних неоднородностей и шумовых факторов, а также реализацию системы зондирования с использованием неподвижного массива адресных структур. Применение методов нейронной обработки для определения центральной длины волны позволяет существенно снизить погрешности измерений. Полученные результаты демонстрируют высокую точность и перспективность комбинированного подхода для создания надёжных оптических сенсорных систем.

Ключевые слова: ВБР, волоконно-оптические брэгговские решётки, адресная гребёнка, радиотонный контроль, матрицы передачи, спектральный отклик, искусственные нейронные сети, зондирование, оптические сенсоры.

Введение

Ключевая трудность в опросе массивов волоконных брэгговских решеток (ВБР) в сенсорных системах заключается в высокой сложности и высокой стоимости используемого оборудования. Это обусловлено специфическими методами опроса и мультиплексирования датчиков [1, 2]. Реализация таких методов мультиплексирования, как волновое, временное, частотное, поляризационное и пространственное, требует использования высокотехнологичных приборов, включая оптические спектроанализаторы, спектрометры с перестраиваемыми интерферометрами Фабри-Перо, оснащёнными дифракционными решетками, а также системы на базе ПЗС-матриц для регистрации и анализа излучения [3–5]. Дополнительную сложность создаёт отсутствие уникальной адресации датчиков, что приводит к существенным погрешностям измерений при перекрытии их спектров.

С развитием радиотонных технологий [6] параллельно совершенствовались методы нейросетевой обработки сигналов [7]. В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) активно применяются в оптических и электротехнических системах для решения задач обработки и анализа сигналов. Среди различных архитектур наибольшее распространение получила модель ИНС прямого распространения, демонстрирующая высокую эффективность в соответствующих приложениях.

Процесс обучения ИНС требует предварительного формирования обучающего набора данных, объём и структура которого зависят от сложности задачи и особенностей вариативности входных и выходных параметров [8–10]. В рамках проведённого исследования была реализована модель радиотонного зондирования спектрального положения ВБР с использованием неподвижного массива адресных структур. Для построения обучающей выборки были использованы модельные данные, характеризующие смещение ВБР относительно зондирующего массива.

Моделирование спектрального отклика ВБР

Для моделирования спектра отражения ВБР в общем виде хорошо применим математический аппарат матриц рассеяния и передач.

Матрица передачи однородной брэгговской решетки является периодической структурой с меняющимся показателем преломления, зависит от длины волны, периода, эффективного и наведенного показателей преломления [11]:

$$T_{FBG} \begin{bmatrix} \cosh(\gamma H) - j \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma H) & -j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma H) \\ j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma H) & \cosh(\gamma H) + j \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma H) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где H – длина ВБР, k , $\Delta\beta$, и γ можно определить, как:

$$k = \pi \frac{\Delta n_{eff}}{\lambda}, \quad \Delta\beta = \frac{\pi}{\Lambda} - 2\pi \frac{n_{eff}}{\lambda}, \quad \gamma = \sqrt{|k|^2 - \Delta\beta^2}, \quad (2)$$

а Δn_{eff} и n_{eff} :

$$\Delta n_{eff} = \frac{\Delta n}{2}, \quad n_{eff} = (n_0 + \Delta n_{eff}), \quad (3)$$

где Λ – период ВБР, n_{eff} – эффективный показатель преломления, n_0 – показатель преломления, Δn – наведенный показатель преломления, λ – длина волны излучения.

Пример построения спектра отражения ВБР с использованием предложенного метода матриц передач, приведен на рисунке 1.

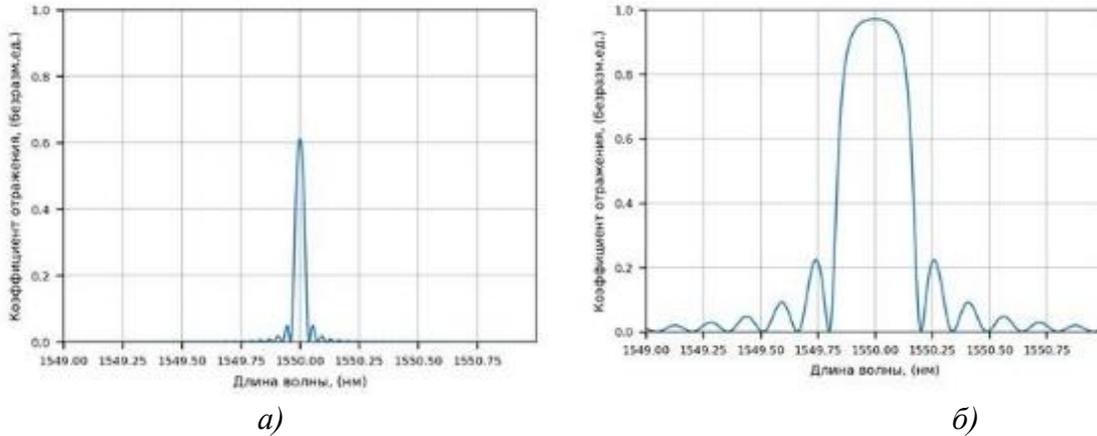


Рис. 1. Спектры отражения однородной ВБР, построенные методом матриц передач: а) высокодобротный, б) низкодобротный

При моделировании спектра ВБР, использование шума является важным инструментом учета реальных флуктуаций спектра, возникающих в процессе изготовления и опроса решетки. Реально отражающим шумовую составляющую в спектре отражения ВБР, учитывающим как шумовые составляющие самой решетки, так и опрашивающей аппаратуры, является так называемый «розовый» шум, который характеризуется спектральной плотностью, обратно пропорциональной частоте $1/f$ шумовой компоненты. «Розовый» шум позволяет воспроизвести как низкочастотные вариации параметров решетки, такие как неоднородности модуляции показателя преломления, термооптические флуктуации, так и механические напряжения в оптоволокне.

Включение шума в моделирование позволяет получить более точное представление о реальных спектральных характеристиках отражения и пропускания ВБР, учитывая реальные возмущения. Это особенно важно при проектировании высокоточных сенсоров и фильтров, где даже незначительные изменения спектра могут существенно повлиять на рабочие характеристики устройства. Следует отметить, что часто используемый «белый» шум, тут не вполне адекватно отражает реальные процессы, поскольку амплитуды высокочастотных шумовых компонент всегда ниже, чем высокочастотный шум. Учет шума способствует повышению достоверности численных расчетов и оптимизации параметров ВБР для конкретных приложений. Пример спектра ВБР с шумом и без шума приведен на рисунке 2.

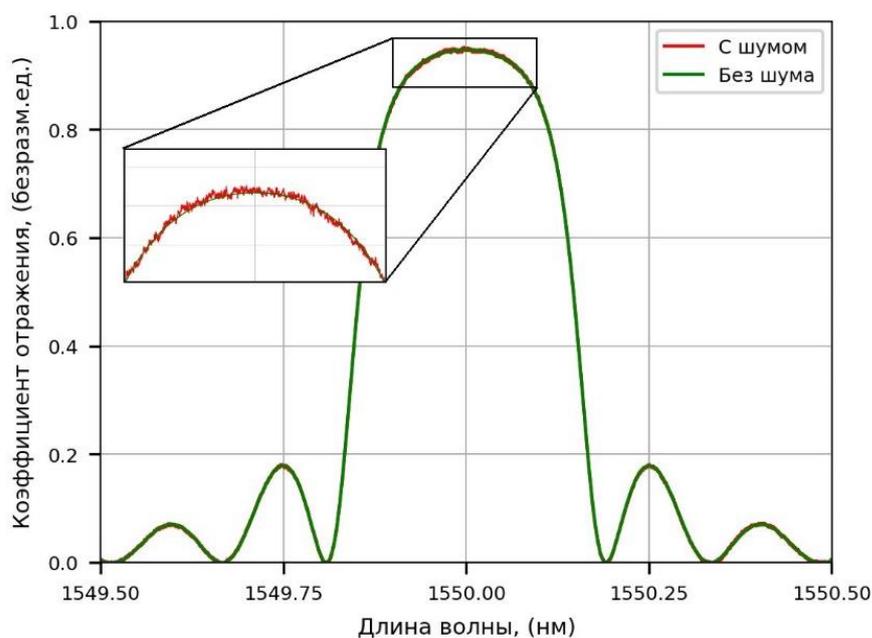


Рис. 2. Спектры отражения однородной ВБР с шумом (красный) и без шума (зеленый)

Моделирование массива адресных структур

Адресная волоконная брэгговская структура (АВБС) представляет собой частный случай комбинации волоконных брэгговских решеток (ВБР) [12,13] (рис. 3).

В классическом варианте спектральный отклик АВБС характеризуется наличием двух узкополосных отражающих компонент. В результате на выходе такой структуры формируется излучение, состоящее из двух узкополосных частот, разность которых, называемая адресной частотой, лежит в микроволновом диапазоне [14].

В дальнейшем АВБС были расширены, за счет использования структур с более чем двумя спектральными компонентами, которые образуют несколько адресных частот [15], впоследствии они стали известны как многоадресные волоконные брэгговские структуры (МАВБС). Повышение количества адресных частот позволило увеличить точность определения центральной длины волны и расширить возможности оптических сенсорных систем.

Пример спектрального отклика МАВБС, состоящий из трех адресных структур, с адресными частотами 10, 8, 12 ГГц, и центральными длинами волн 1549.8 нм, 1550.0 нм, 1550.2 нм, приведен на рисунке 3.

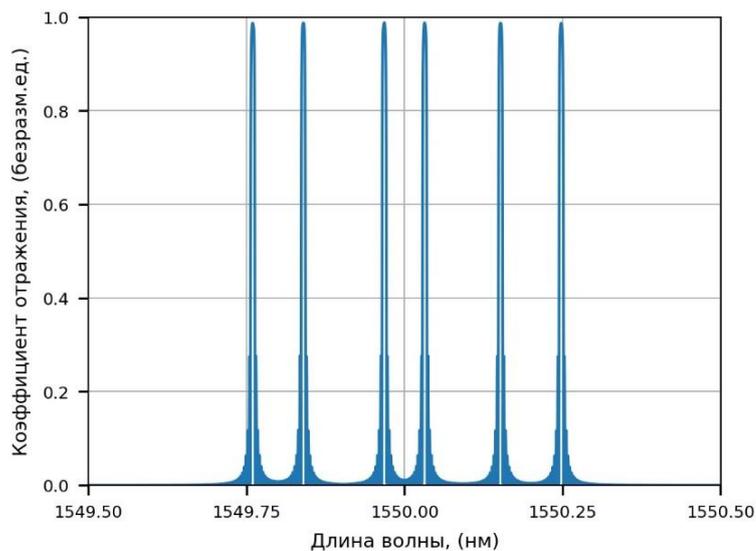


Рис. 3. Форма спектрального отклика для МАВБС

Моделирование зондирования ВБР неподвижным МАВБС

В обычном случае, для выбранных параметров ВБР и МАВБС поступающий на фотоприемник спектр будет иметь форму, изображённую на рисунке 4.

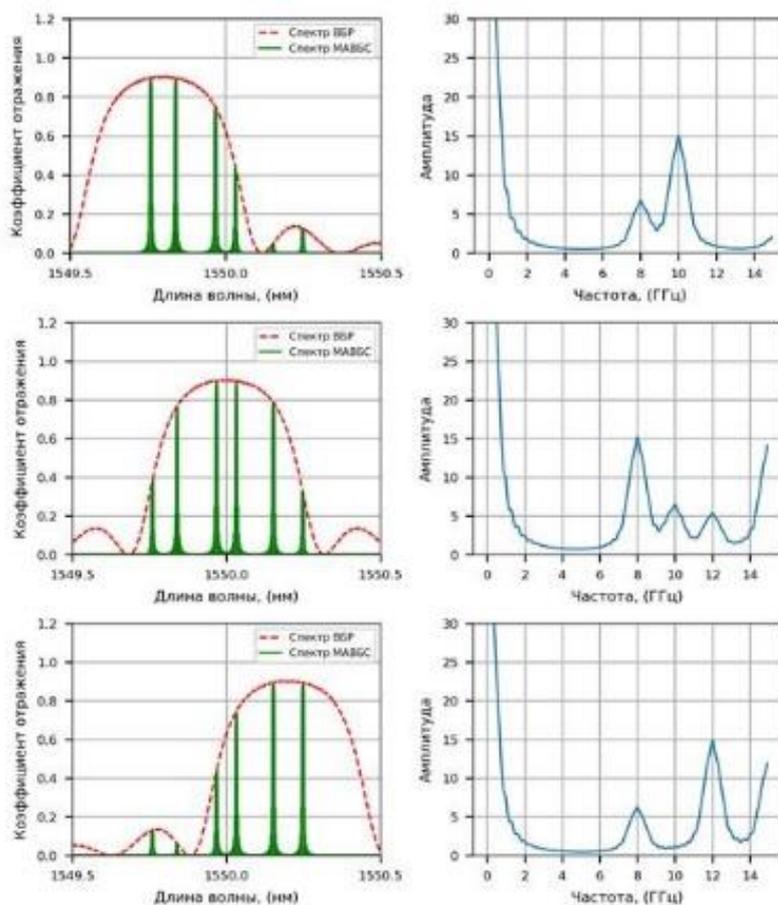


Рис. 4. Ситуационные положения зондирования ВБР с использованием МАВБС и соответствующие им спектральные отклики тока фотоприемника (амплитуда указана в условных единицах)

Процесс зондирования ВБР с использованием неподвижного массива адресных волоконных структур заключается в изменении спектрального отклика сигнала, поступающего на измерительный фотоприемник от пересечения спектра зондирующего излучения с зондируемой ВБР. Зондирование ВБР на разностной частоте в целом повторяет контур зондирования за исключением поведения на концах спектра.

Искусственная нейронная сеть для определения центральной длины волны ВБР

Для обучения модели нейронной сети, использовались данные, полученные при моделировании. Свет от источника МАВБС направляется на тестируемую ВБР через оптоволоконный циркулятор. Свет, отраженный от ВБР, направляется к выходному порту термостата, а затем подается на фотодетектор. Электрический сигнал от фотоприемника через полосовые фильтры настраивается на адресные частоты МАВБС. Отфильтрованные сигналы оцифровываются АЦП и передаются на блок обработки. Для обеспечения точных измерений принимаемые сигналы нормализуются относительно общей мощности, излучаемой источником МАВБС. Сам источник может быть реализован с помощью массива АВБС, предложенного в [16]. Положение ВБР моделировалось смещенным относительно адресной гребенки зондирования. Для каждого значения центральной длины волны ВБР, принимались и обрабатывались значения выходного тока фотоприемника для каждого из трех адресов. Предполагалось, что полоса пропускания фотоприемника не превышает разностных частот между спектральными компонентами адресной гребенки, не формирующими адрес. Обучающая выборка составила 250 значений, после чего все данные были переведены в безразмерный формат и приведены в диапазон от 0 до 1.

Реализация ИНС производилась на Python с использованием фреймворка Tensorflow. Tensorflow позволяет осуществлять дообучения нейронной сети на дополнительных данных, что открывает возможность дополнять и совершенствовать модель. Объем обучающей выборки составлял 5000 записей. Он был разбит на тренировочный и тестовый в соотношении 85/15. Тестовый набор использовался и для валидации, и для финальной оценки точности. В трехслойной модели для второго и третьего слоев была использована функция активации Sigmoid, при этом функцией потерь являлась mean squared error, при стандартном оптимизаторе NAdam.

Для проверки работоспособности метода, было обучено несколько конфигураций ИНС. Каждая конфигурация обучалась на 5000 итерациях, а оценка точности производилась на полном диапазоне значений центральной длины волны ВБР, шаг дискретизации равен 0,0002 нм, а уровень шума для FBG как мультипликативного, так и аддитивного равен 0,01.

С увеличением количества нейронов и скрытых слоев, увеличивается точность работы модели, наиболее заметное повышение точности происходит при использовании 64 нейронов и 2 скрытых слоев. Несмотря на это, среднее абсолютное значение ошибки все еще остается большим. При детальном рассмотрении входных значений и модели, стало понятно, что наибольшая средняя абсолютная ошибка достигается на начальном и конечном диапазоне смещения центральной длины волны ВБР, там, где выходные значения фотоприемника для адресов гребенки, попадающих на край решетки, близки к нулю. Если разделить входной диапазон на несколько интервалов (**a**, **b**, **c**), рисунок 5, то каждого из интервалов получим средние абсолютные ошибки соответственно: 0.142, 0.02, 0.143.

Сужение рассматриваемого диапазона, ведет к повышению точности определения центральной длины волны ВБР. При этом отсутствует существенное увеличение точности, по мере увеличения размера ИНС. В первую очередь это обусловлено объемом и информативностью исходных входных данных. Для повышения точности, необходимо уменьшить шаг дискретизации перемещения спектра ВБР, с целью уменьшения ошибки и повышения стабильности работы ИНС.

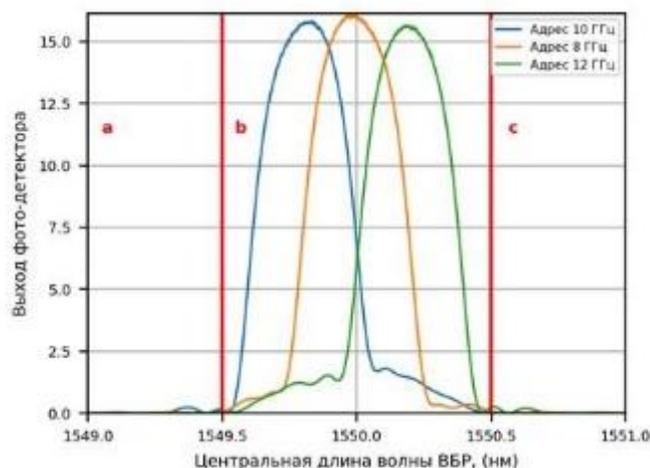


Рис. 5. Разбиение входного диапазона (амплитуда указана в условных единицах)

Для повышения точности функционирования нейронной сети был пересмотрен подход к формированию обучающей выборки, что обусловлено необходимостью повышения точности и стабильности обработки спектральных данных. В частности, диапазон вариации центральной длины волны, зондируемой ВБР, был сужен и ограничен значениями от 1549,5 до 1550,5 нм. Такое ограничение диапазона позволило сконцентрировать обучение нейронной сети на наиболее критическом спектральном интервале, где проявляется максимальная чувствительность к изменениям параметров ВБР.

Кроме того, для увеличения плотности обучающих данных и повышения разрешающей способности модели, было принято решение о сокращении шага изменения центральной длины волны. Это обеспечило расширение объема обучающей выборки до 5000 записей, что способствует лучшему обобщению модели и снижению вероятности переобучения.

Графическое представление полученных входных данных, отражающее структуру и распределение спектральных характеристик, приведено на рисунке 6. Данная визуализация позволяет наглядно оценить равномерность распределения данных и их пригодность для эффективного обучения нейронной сети.

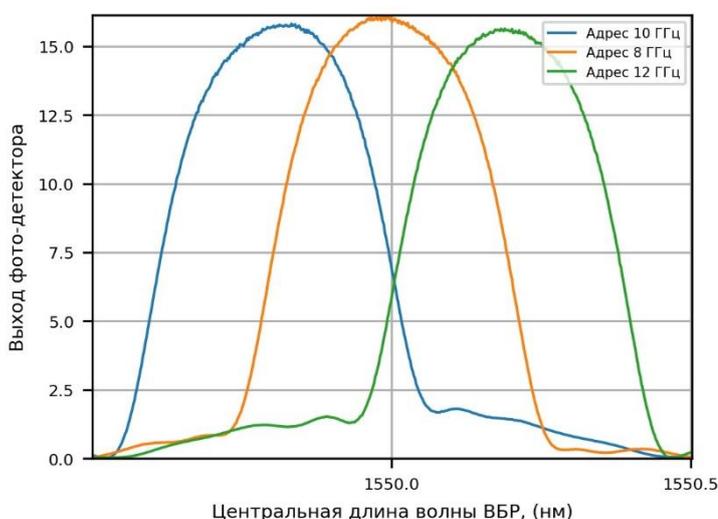


Рис. 6. Входные данные ИНС (амплитуда указана в условных единицах)

Для определения архитектуры нейронной сети, обеспечивающей наибольшую точность, было проведено сравнение, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение конфигураций ИНС

Количество нейронов в слое \ Количество скрытых слоев	12 нейронов	32 нейронов	64 нейронов	128 нейронов
1 слой	0.089	0.072	0.067	0.055
2 слоя	0.07	0.053	0.042	0.022
3 слоя	0.063	0.049	0.027	0.0082

Наибольшую точность обеспечивает модель с тремя скрытыми слоями и 128 нейронами в каждом слое.

Была произведена дополнительная настройка параметров модели. Модель обучалась на 5000 итераций с коэффициентом обучения 0.001 и 10 000 итераций с коэффициентом обучения 0.0001. В результате этого, средняя абсолютная ошибка определения центральной длины волны снизилась и составила 0.001 нм. График функции потерь в процессе обучения модели приведен на рисунке 7.

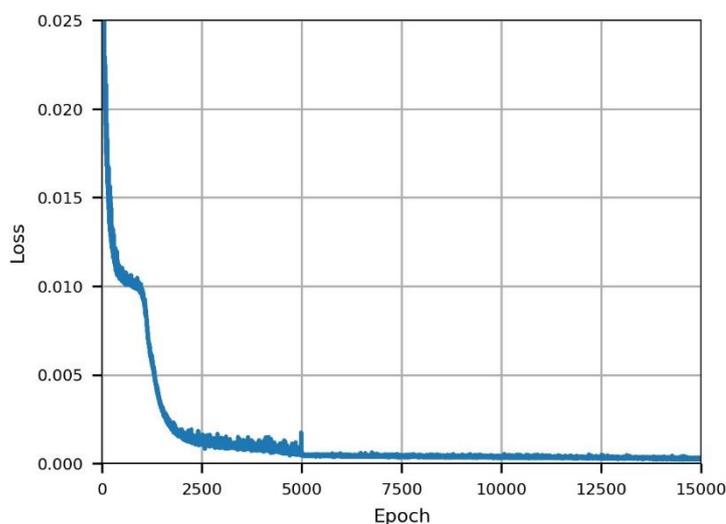


Рис. 7. График изменения функции потерь в процессе обучения

Заключение

В результате проведённого исследования разработана и реализована модель радиофотонного зондирования положения ВБР с использованием неподвижного массива адресных гребёнок. Применение матричных методов передачи позволило детально смоделировать спектральный отклик ВБР, учитывая влияние неоднородностей и шумовых составляющих, характерных для реальных устройств. Интеграция искусственных нейронных сетей для анализа выходных сигналов зондирования обеспечила высокую точность определения центральной длины волны, что подтверждено сравнительным анализом различных архитектур и параметров сети. Оптимизация обучающей выборки и гиперпараметров модели позволила снизить среднюю абсолютную ошибку до минимальных значений (средняя абсолютная ошибка определения положения ВБР составила до 1 пм), что демонстрирует эффектив-

ность предложенного подхода. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшего совершенствования методов радиофотонного контроля и разработки высокоточных оптических сенсорных систем.

Список литературы

1. Breglio G. Fiber optic sensor arrays: a new method to improve multiplexing capability with a low complexity approach / G. Breglio et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. - 2004. - Vol. 100, № 1–2. - P. 147–150.
2. Babin S.A. An interrogator for a fiber Bragg sensor array based on a tunable erbium fiber laser / S.A. Babin et al. // *Laser Physics*. - 2007. - Vol. 17, № 11. - P. 1340–1344.
3. Burgmeier J. Intensity-independent fiber coupled interrogation technique for fiber Bragg gratings by fiber Bragg gratings / J. Burgmeier, J. Koch, W. Schade ; ed. Liao Y. et al. - Beijing, China. - 2012. - P. 84215G-84215G – 4.
4. Chen L.R. A Review of Recent Results on Simultaneous Interrogation of Multiple Fiber Bragg Grating-Based Sensors Using Microwave Photonics / L.R. Chen et al. // *Applied Sciences*. - 2019. - Vol. 9, № 2. - P. 298.
5. Василец А.А. Симметричный векторный анализатор для характеристики спектральных параметров оптических высокочастотных структур / А.А. Василец et al. // *Фотон-Экспресс*. - 2020.- № 7 (167). - P. 15–21.
6. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов// *Инженерный вестник Дона*. - №3. - 2018. [электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarhicheskiy-klassifikator-zadach-postroeniya-radiofotonnyh-sensornyh-sistem-na-osnove-adresnyh-volokonnyh-breggovskih-struktur/viewer>
7. Agliullin T.A. Addressed FBG-structures for tire strain measurement // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* / T.A. Agliullin et al.; ed. Andreev V.A. et al. - SPIE, 2019. - Vol. 11146. - P. 6.
8. Morozov O. Addressed Combined Fiber-Optic Sensors as Key Element of Multisensor Greenhouse Gas Monitoring Systems / O. Morozov et al. // *Sensors*. - 2022. - Vol. 22, № 13. - P. 4827.
9. Barino F.O. LPG Interrogator Based on FBG Array and Artificial Neural Network / F.O. Barino, A.B. dos. Santos // *IEEE Sensors Journal*. - 2020. - Vol. 20, № 23. - P. 14187–14194.
10. Abdelli K. Machine-learning-based anomaly detection in optical fiber monitoring / K. Abdelli et al.// *J. Opt. Commun. Netw.* - 2022. - Vol. 14, № 5. - P. 365.
11. Abdallah Ikhlef. Uniform Fiber Bragg Grating modeling and simulation used matrix transfer method / Ikhlef Abdallah, R.Hedara, M.Chikh-Bled // *IJCSI*. - 2012. -Vol. 9, № 1. - P. 368–374.
12. Аглиуллин Т.А. Математическое моделирование оптического отклика адресной волоконной брэгговской структуры. / Т.А. Аглиуллин, Р.Р. Губайдуллин // III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Казань, 18–22 ноября 2019 года. – Казань: изд-во КНИТУ-КАИ, 2019. – С. 88-90.
13. Morozov O.G. Modelling and record technologies of address fiber Bragg structures based on gratings with two symmetrical pi-phase shifts / O.G. Morozov et al.// *J. Phys.: Conf. Ser.* - 2019. – Vol. 1368, № 2. - P. 022048.
14. Gubaidullin R.R. Application of addressed fiber bragg structures for measuring tire deformation / R.R. Gubaidullin et al.// *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2019. P. 1–7.

15. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин et al. // Труды Учебных Заведений Связи. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 6–13.
16. Morozov O.G. Addressed fiber bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems: 4 / O.G. Morozov, A.J. Sakhabutdinov // Comput. Opt. Institution of Russian Academy of Sciences, 2019. - Vol. 43, № 4. - P. 535–543.

MICROWAVE PHOTONIC FBG INTERROGATION BY THE FIXED ARRAY OF ADDRESSED COMB AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

*R.A. Makarov, D.S. Grabovetskiy, D.N. Matveyev,
A.Zh. Sakhabutdinov, O.G. Morozov*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Absrtact. A method for microwave photonics control of a fibre-optic Bragg grating spectral position using fixed array of addressed comb and artificial neural networks is presented. The model combines an analytical description of the fibre-optic Bragg grating spectral response, using transmission matrix technique taking into account internal inhomogeneities and noise factors, as well as the implementation of an interrogation system using a fixed array of addressed comb structures. It is shown that the artificial neural networks in microwave photonic approaches for the fibre-optic Bragg grating central wavelength interrogation can significantly reduce measurement errors. The results obtained demonstrate the high accuracy and prospects of a combined approach for creating reliable optical sensor systems.

Keywords: FBG, fiber-optic Bragg gratings, addressed comb, fixed array of addressed comb, microwave photonics, transfer matrices, spectral analysis, artificial neural networks, microwave photonics fiber-optic sensor systems.

Статья представлена в редакцию 02 декабря 2024г.