

Применение методов глубокого обучения для идентификации возмущений матрицей оптических микрорезонаторов

А. В. Саечников^{1,2}, Э. А. Чернявская¹, В. А. Саечников¹, А. Остендорф²

¹Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь;

²Рурский Университет, Бохум, Германия;

e-mail: anton.saetchnikov@gmail.com

В работе демонстрируется реализация сенсора мод шепчущих галерей с применением методов глубокого обучения. Высокая точность обнаружения в сочетании с доступностью прибора и простотой производства ставит представленный детектор в ряд наиболее эффективных реализаций подхода, основанного на применении явления оптического резонанса в кольцевых структурах. Было показано, что подход позволяет определять величину показателя преломления с абсолютной ошибкой на уровне 10^{-6} для динамического диапазона изменения RIU до 10^{-3} .

Ключевые слова: оптический сенсор, микрорезонатор, глубокое обучение, мода шепчущих галерей

Введение

Оптический резонанс в диэлектрических микрорезонаторах, называемый эффектом мод шепчущих галерей (МШГ), получает все более распространение как высокочувствительный и безмаркерный инструмент детектирования. Одним из методов реализации сенсора МШГ является датчик в виде матрицы микрорезонаторов с параллельным опросом в призмной схеме возбуждения [1–3].

Относительная простота изготовления датчика, возможность многократного использования и возможность параллельного опроса множества микрорезонаторов делают эту платформу особенно привлекательной. При этом многомерный характер сигнала в данном случае затрудняет интерпретацию внешних вариаций с помощью аналитических описаний и может быть решен с помощью обучающихся алгоритмов [4, 5]. До сих пор было показано лишь несколько примеров применения подходов машинного обучения совместно с оптическими микрорезонаторами. Среди них – демонстрация классификации различных биохимических растворов на основе спектральных изменений МШГ и недавнее применение нескольких резонансных мод одного микрорезонатора для оценки двух параметров. Оба решения подразумевают предварительный сбор спектра МШГ с последующим извлечением спектральных характеристик, которые выступают в качестве входных переменных для алгоритмов машинного обучения. В данной работе мы сообщаем о методике применения методов глубокого обучения для описания внешних возмущений, измеренных матрицей оптических микрорезонаторов

1. Материалы и методы

Матричный сенсор МШГ представлен в виде многочисленных стеклянных микросфер со средним диаметром 100 мкм. Получаемый сигнал представляет собой набор интенсивностей, которые модулируются спектральными свойствами каждого резонатора относительно спектрального положения и ширины лазерной линии. Сигнал для одной микросферы определяется как сумма интенсивностей для

связанных с полостью пикселей камеры, которые определяются в соответствии с ранее установленной процедурой локализации. Спектры МШГ каждого резонатора имеют уникальную форму, которая обусловлена вариациями формы, качества поверхности и эффективности переноса энергии. Различное распределение относительно профиля освещения и возможность многомодового возбуждения определяют множество степеней свободы для сигнала матричного сенсора. Это позволяет проводить многопараметрический анализ малых возмущений окружающей среды.

2. Результаты

Для интерпретации сигнала матричного сенсора оптических микрорезонаторов был сформирован экспериментальный набор откликов, представляющих различные значения показатели преломления при облучении сенсора на фиксированной частоте. Вариации окружающей среды обеспечиваются различными концентрациями этанола, растворенного в деионизированной воде, что соответствует максимальной разнице показателя преломления в 2×10^{-3} и минимальной в 3×10^{-4} по сравнению с водной средой. Полученный сигнал для оптических микрорезонаторов описывается ступенчатым характером изменения интенсивности излучения отдельных микрорезонаторов при изменении условий окружающей среды. При этом данные характеризуются нелинейным характером изменений интенсивности излучения, где отдельные резонаторы демонстрируют непрерывное усиление или ослабление интенсивности излучения, другие показывают непостоянную динамику, а для остальных сигнал остается неизменным при вариации внешних условий. Последние были исключены из последующего анализа, а ременные изменения для других резонаторов были отнормированы.

Для анализа эффективности предсказания показателя преломления нейронной сетью было проанализировано как влияние метода оптимизации и функции активации сети так и ее архитектуры. Сложность нейронной сети изменялась с количеством нейронов во входном слое варьируемом в диапазоне от 16 до 1024, а количество скрытых слоев между 3 и 6. Для каждой комбинации было выполнено по пять повторений процесса обучения. Для каждого из повторов обучения экспериментальный набор данных был разделен на обучающую (70 %), проверочную (15 %) и тестовую (15 %) части, где значения были выбраны случайным образом, а соотношение между частями поддерживалось постоянным для всех выходных значений. Архитектура ДНС с 16 нейронами во входном слое показывает плохое соответствие предсказанных результатов экспериментальным данным с ошибкой $\approx 1,5 \times 10^{-5}$ RIU, а архитектура сети из 3 скрытых слоев доминирует среди лучших результатов и позволяет достичь медианного значения ошибки ниже 1×10^{-7} RIU. Результаты показали, что линейная функция активации независимо от метода оптимизации дает наибольшее значение ошибки. Среди остальных конфигураций нейронных сетей гиперболический тангенс как функция активации и метод оптимизации Adam обеспечивает как наименьшее значение медианной ошибки, так и минимальное количество выбросов, значение которых не превышает 3×10^{-6} RIU. А наилучшая точность предсказаний была получена для сети с 3 скрытыми слоями и 48

нейронами во входном слое с медианной ошибкой 3×10^{-8} RIU и выбросами, которые могут достигать максимум 1×10^{-6} RIU.

Заключение

Представленные результаты демонстрируют возможность построения интеллектуального сенсора МШГ с доступной инструментальной конфигурацией, пониженной сложностью и размерами устройства. Предложенный датчик, дополненный необходимым набором обучающих данных, которые могут быть собраны автоматически, может быть использован в широком спектре практико-ориентированных задач зондирования, где предварительные данные о модели отклика являются избыточными.

Литература

1. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Skakun V. V., Saetchnikov V. A., Ostendorf A. Reusable Dispersed Resonators-Based Biochemical Sensor for Parallel Probing. *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19, No. 17. P. 7644-7651.
2. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Saetchnikov V. A., Ostendorf A. A Laser Written 4D Optical Microcavity for Advanced Biochemical Sensing in Aqueous Environment. *Journal of Lightwave Technology* 2020. Vol. 38, No. 8. P. 2530-2538.
3. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Saetchnikov V. A., Ostendorf A. Multiresonator Imaging Sensor for the Aerial Parameters Detection. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems* 2021. Vol. 2, No. 2. P. 84 – 91.
4. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Saetchnikov V. A., Ostendorf A. Deep-learning powered whispering gallery mode sensor based on multiplexed imaging at fixed frequency. *Opto-Electronic Advances* 2020. Vol. 3. P. 200048.
5. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Saetchnikov V. A., Ostendorf A. Self-learning-based detection via multiple microresonator imaging. *Proc. SPIE* 2021. Vol 11782. P. 117822E.

Application of deep learning methods for identification of perturbations by the set of optical microresonators

A.V. Saetchnikov^{1,2}, E.A. Tcherniavskaia¹, V.A. Saetchnikov¹, A. Ostendorf²

¹*Belarusian State University, Minsk, Belarus;*

²*Ruhr University, Bochum, Germany;*

e-mail: anton.saetchnikov@gmail.com

This paper reports on deep learning approach for application with whispering gallery mode sensor. The proposed solution is one of the most effective implementations of the technique based on the use of the optical resonance phenomena in ring structures because of its high detection accuracy, low cost, and simplicity of fabrication. It was demonstrated that with this method, the refractive index value may be determined with an absolute error of 10^{-6} over a dynamic range of RIU variations of up to 10^{-3} .

Keywords: optical sensor, microresonator, deep learning, whispering gallery mode.