УДК: 621.383 *2.2.8*

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ РЕФЕРЕНСНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ-ПЕРО

Д. С. Грабовецкий[1], Д. Н. Матвеев[1], Г. А. Морозов[1], И. И. Нуреев[1], Э. В. Белов[1]

[1]Казанский национальный исследовательский технический унивеситет им. А.Н. Туполева-КАИ,
420111, г. Казань, Карла Маркса, 10

Аннотация. В докладе рассмотрены физические подходы для проектирования референсного комбинированного волоконно-оптического датчика (РКВОД) параметров воздуха (температуры, давления, относительной влажности) для многосенсорных систем качественного и количественного мониторинга концентрации парниковых газов в нем. Проведен анализ физических основ проектирования датчиков указанного класса и разработаны варианты их перспективной структурной реализации на двух параллельных или последовательных резонаторах Фабри-Перо (РФП) и одной адресной волоконной брэгговской структуре (АВБС).

Ключевые слова: воздух; давление; температура; относительная влажность; интерферометр Фабри-Перо; эффект Вернье; адресная волоконная брэгговская структура

Введение

Для некоторых приложений, таких как качественный и количественный мониторинг воздуха в режиме реального времени при решении экологических задач контроля концентрации парниковых газов [1, 2] или задач контроля эффективности эксплуатации солнечных батарей [3], которая напрямую связана с температурой и относительной влажностью окружающего воздуха, очень востребованы группы точек измерений и квазираспределенный характер их расположения, в том числе дистанционно разнесенных с пунктом сбора и обработки информации. Данные группы, объединенные в информационно-измерительную многосенсорную сеть, требуют многоточечной интеррогации для отслеживания изменения информации со всех датчиков параллельно, включая входящие в структуру сети референсные датчики контроля только параметров воздуха.

Анализируя работу существующих сетей указанного типа, можно отметить сложность изготовления КВОД, адаптированных к параллельному опросу, их безадресность, наличие в структуре сетей, соединяющих КВОД, протяженных и разветвленных участков оптических волокон, подверженных влиянию различных внешних физических факторов, а также необходимость применения референсных КВОД (РКВОД), которые должны находится в строго контролируемых и стабильных условиях и обладать возможностью высокоточных и многопараметрических измерений.

В докладе рассмотрены физические подходы для проектирования референсного комбинированного волоконно-оптического датчика (РКВОД) параметров воздуха (температуры, давления, относительной влажности) для многосенсорных систем качественного и количественного мониторинга концентрации парниковых газов в нем. Проведен анализ физических основ проектирования датчиков указанного класса и разработаны варианты их перспективной структурной реализации на двух параллельных

или последовательных резонаторах Фабри-Перо (РФП) и одной адресной волоконной брэгговской структуре (АВБС). Последняя необходима для обеспечения адресности датчиков [4], применяемых в структуре сети, но может быть использована и для дополнительного измерения, например, температуры.

Анализ физических подходов для проектирования структуры РКВОД

Чтобы полностью пояснить принцип работы РКВОД, в качестве примера возьмем два РФП с параллельным включением (АВБС пока исключим из рассмотрения), характеристики которого зависят от эффекта Вернье [5]. Обобщенная схема такого РКВОД показана на рис. 1.

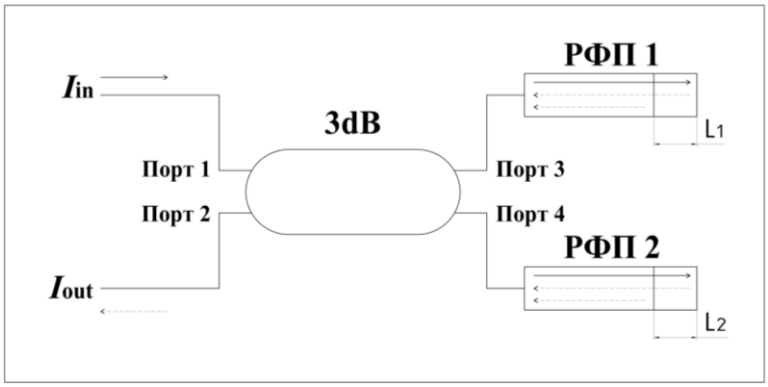

Рис. 1. Обобщенная схема РКВОД на двух параллельных РФП с эффектом Вернье

Для соединения двух РФП с широкополосным лазерным источником (ШЛИ) и оптическим анализатором спектра (ОАС) используется оптический каплер 2×2 с коэффициентом деления 3 дБ (ОК). В случае, показанном на рис. 1, когда два РФП подключены параллельно, свет, излучаемый ШЛИ, поступает в ОК из порта 1. В ОК свет разделяется на два плеча с одинаковыми мощностями, а затем подается на два РФП через порты 3 и 4 соответственно. Свет в РФП распространяется по отличным оптическим путям с определенной разностью, что приводит к интерференции. Интерференционный сигнал, генерируемый двумя РФП, отражается обратно, и через ОК поступает на порт 2 ОАС для измерения.

Измеренная отраженная интенсивность порта 2 описывается как:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} - 2AB\left[\cos\left(2\pi\frac{L_1}{\lambda}\right) + \cos\left(2\pi\frac{L_2}{\lambda}\right)\right] + B^2\cos\left(2\pi\frac{\delta}{\lambda}\right), \tag{1}$$

где I_{in} – интенсивность на входе в РФП, A и B – коэффициенты, связанные с коэффициентами отражениями на каждом из зеркал РФП, λ – длина волны, L_1 и L_2 – длины оптических путей первого измерительного и второго опорного РФП соответственно, расстройка δ между которыми равна $\delta = L_1 - L_2$.

Модуляция огибающей Вернье описывается последним членом (1) и представляет собой косинусоидальное колебание с частотой, зависящей от расстройки между двумя РФП. Параметры модуляции определяются величинами свободного спектрального диапазона и фазы огибающей Вернье, которая задается аргументом косинусной функции:

$$FSR_{EV} = \left|\frac{\lambda_1\lambda_2}{\delta}\right| = \frac{FSR_1 FSR_2}{FSR_1 - FSR_2}, \tag{2}$$

$$\varphi_{EV} = 2\pi\frac{(L_1 - L_2)}{\lambda}, \tag{3}$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн двух последовательных максимумов (или минимумов) огибающей Вернье, FSR_1 и FSR_2 – свободный спектральный диапазон (*от англ.* – FSR, free spectral range) первого и второго РФП соответственно.

Важной величиной, используемой для характеризации оптического эффекта Вернье является коэффициент увеличения чувствительности (*M*-фактор). Эта величина устанавливает сравнение между огибающей Вернье и интерференционным сигналом от измерительного РФП:

$$M = \frac{FSR_{EV}}{FSR_1} = \frac{FSR_2}{FSR_1 - FSR_2} = \frac{L_1}{\delta}. \tag{4}$$

M-фактор стремится к бесконечности по мере приближения расстройки между двумя интерферометрами к нулю. Еще раз стоит отметить, что один из интерферометров, опорный, рассматривается как стабильный эталон или интерферометры должны быть независимыми по измеряемому параметру. Если это условие не проверено, определение *M*-фактора становится более сложным.

Подобная задача может решаться при двухпараметрических параллельных измерениях, например, температуры и относительной влажности воздуха, а также при последовательном включении независимых РФП1 и РФП2 также для контроля каждого из параметров отдельно (рис. 2).

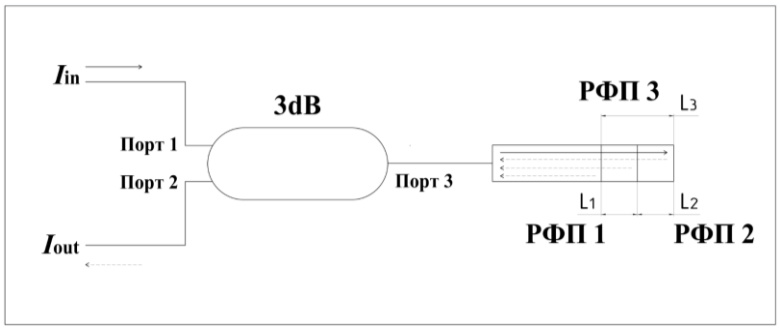

Рис. 2. Обобщенная схема РКВОД на двух последовательных РФП с эффектом Вернье

Для решения задачи при последовательном включении вводится условный интерферометр РФП3 с общей длиной $L_3=L_1+L_2$. Тогда FSR огибающей Вернье будет определяться как:

$$FSR_{EV} = \frac{FSR_1 FSR_3}{|FSR_1 - FSR_2|}, \tag{5}$$

а коэффициент увеличения *M*:

$$M = \frac{FSR_1}{|FSR_1 - FSR_2|} = 1 + \frac{n_2 L_1}{n_3 L_2}, \tag{6}$$

где $n_{2,3}$ – показатели преломления тонких пленок РФП1 и РФП2 соответственно.

Коэффициент увеличения и при параллельном, и при последовательном включениях, как правило, выбирается в пределах 5-10.

Для обеспечения адресности измерений предлагается применение АВБС [6-8]. Для преодоления ограничений квазираспределенных сенсорных систем на классических волоконных брэгговских решетках (высокая стоимость и сложность оптических анализаторов спектра и безадресных оптико-электронных приборов их опроса — интеррогаторов), предложены АВБС, представляющие собой особый тип волоконных брэгговских решеток, спектральный отклик которых имеет две или более узкополосные компоненты в спектре отражения или передачи, разностная частота между которыми лежит в радиочастотном диапазоне спектра (ГГц) и называется адресной. Адресная частота инвариантна к сдвигу центральной длины волны АВБС, вызываемой деформацией или изменением температуры, что позволяет использовать ее как уникальный идентификатор с прямым типом измерений. Постановка задачи позволила сформулировать комплекс требований к данному классу датчиков, включающий необходимость обеспечения возможности недорогого и простого в реализации радиофотонного интеррогатора АВБС во всём диапазоне измерений, при условии, что в область контроля должны попадать исключительно узкополосные компоненты их спектрального отклика [9-10]. Наилучшими характеристиками по узкополосности обладают АВБС, синтезированные по методу Ильина-Морозова, впервые реализованного не во времени, а в пространстве – в области показателя преломления сердцевины оптического одномодового волокна [11].

Заключение

В результате проведенных исследований предложена концепция развития РКВОД для многосенсорных квази-распределенных сетей качественного и количественного мониторинга параметров воздуха, используемых в решении экологических задач контроля концентрации парниковых газов или задач контроля эффективности эксплуатации фотовольтаических панелей (солнечных батарей) и др. в режиме реального времени. Данная концепция основывается на том, что современный уровень развития фотонных и радиофотонных технологий позволяет пересмотреть подходы к развитию и усовершенствованию функций параллельного зондирования множества датчиков как в их внешней топологии, так и во внутренней структуре, например, с применением АВБС. Системы автоматик, контроля и управления рассматриваемыми сетями становятся максимально близкими к внедрению в них технологий искусственного интеллекта, для которых пока не сложились предпосылки для реальных практических применений, несмотря на предложение многими авторами отдельных разработанных методик, к сожалению, невысокого уровня интеллектуальной значимости.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский технического университета имени А.Н. Туполева-КАИ («Приоритет-2030»).

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2–3 октября 2025 года).

Список литературы

1. Morozov, O. Addressed combined fiber-optic sensors as key element of multisensor greenhouse gas monitoring systems / O. Morozov, Y. Tunakova, S. M. R. H. Hussein, et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 13. – P. 4827.
2. Shagvaliev, R. M. Formulation of design tasks for a fiber-optic reference air sensor for qualitative and quantitative monitoring of air parameters / R. M. Shagvaliev, O. G. Morozov, A. Zh. Sakhabutdinov, et al. // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. – 2024. – № 3. – P. 53-66.
3. Morozov, O.G. Microwave photonic sensing for temperature monitoring of on-board photovoltaic panels / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, D.N. Matveev, et al. // Proc. IEEE 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of Onboard Communications. – 2024. – P. 10496795.
4. Nureev, I. I. Passive fiber optic quasi-distributed sensor network for water level monitoring at discrete points in a reservoir with address multiplexing / I. I. Nureev, A. D. Proskurjakov, N. D. Smirnov, et al. // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. – 2024. – № 1. – P. 77-90.
5. Chen, Y. Advanced fiber sensors based on the Vernier effect / Y. Chen, L. Zhao, S. Hao, et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 2694.
6. Morozov, O. G. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems / O. G. Morozov, A. J. Sakhabutdinov // Computer Optics. – 2019. – T. 43. – № 4. – C. 535-543.
7. Morozov, O. Multi-addressed fiber Bragg structures for microwave-photonic sensor systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, R.S. Misbakhov, et al. // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – P. 2693.
8. Agliullin, T. Overview of addressed fiber Bragg structures development / T. A. Agliullin, et al. // Photonics. – 2023. – Vol. 10. – P. 175.
9. Makarov, R. Enhancing microwave photonic interrogation accuracy for fiber-optic temperature sensors via artificial neural network integration / R. Makarov, M.R.T.M. Qaid, B. Valeev, et al. // Optics. – 2024. – Vol. 5. – P. 223-237.
10. Agliullin, T. Comparative analysis of the methods for fiber Bragg structures spectrum modeling / T. Agliullin, V. Anfinogentov, A. Sakhabutdinov, et al. // Algorithms. – 2023. – Vol. 16. – P. 101.
11. Valeev, B. I. Superstructured addressed fiber Bragg structures / B. I. Valeev, R. A. Makarov, T. A. Agliullin, et al. // Computer Optics. – 2025. – Vol. 49(3). – P. 399-405.

ANALYSIS OF PHYSICAL APPROACHES FOR DESIGNING THE STRUCTURE OF A REFERENCE COMBINED FIBER-OPTIC AIR PARAMETERS SENSOR BASED ON FABRY-PEROT INTERFEROMETERS

D. S. Grabovetsky[1], D. N. Matveev[1], G. A. Morozov[1], I. I. Nureev[1], E. V. Belov[1]

[1]Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,

420111, Kazan, Karl Marx, 10

Absrtact. The report considers physical approaches to designing a reference combined fiber-optic sensor of air parameters (temperature, pressure, relative humidity) for multisensor systems for qualitative and quantitative monitoring of greenhouse gas concentrations in it. An analysis of the physical principles of designing sensors of this class is carried out and options for their promising

structural implementation on two parallel or serial Fabry-Perot resonators and one addressable fiber Bragg structure are developed.

Keywords: air; pressure; temperature; relative humidity; Fabry-Perot interferometer; Vernier effect; addressable fiber Bragg structure

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.