EDN: VVAQER
УДК: 621.383 *2.2.8*

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕФЕРЕНСНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ-ПЕРО

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

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
420111, г. Казань, Карла Маркса, 10

Аннотация. В докладе определены конструктивные особенности для построения параллельных и последовательных референсных комбинированных волоконно-оптических датчиков (РКВОД) и построены их математические модели с оценкой характеристик чувствительности по каждому из измеряемых параметров с учетом их взаимной связи уравнениями Эдлена и проявлением эффекта Вернье в структурах с двумя резонаторами Фабри-Перо (РФП). Оценки показали, что такая конструкция РКВОД позволит измерять температуру окружающей среды в диапазоне –60…+60 °С с чувствительностью ~13 пм/°С по АВБС, а также в диапазоне +10…+60 °С с чувствительностью ~ −500 пм/◦С по последовательной схеме РФП. При этом относительная влажность (RH) по указанной схеме РФП может измеряться с чувствительностью ~400 пм/%RH в диапазоне 20…90%RH, а давление воздуха по параллельной схеме РФП ~400 пм/МПа в диапазоне до 0,15 МПа.

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

Введение

В части РКВОД с двумя параллельными или последовательными РФП [1-3] может быть использован оптический аналог эффекта Вернье [4], примененный к ним. Эффект Вернье, является инструментом повышения чувствительности и разрешения измерений. Он основан на перекрытии сигналов двух интерферометров со слегка расстроенными частотами интерференции. Огибающая Вернье, формируемая в выходном спектре обоих РФП, обеспечивает увеличенный сдвиг длины волны по сравнению с таковыми у каждого из отдельных интерферометров РКВОД, что приводит к созданию нового поколения высокочувствительных референсных датчиков. Это особенно важно при контроле малых величин изменений показателя преломления воздуха, определенных уравнениями Эдлена [5] в зависимости от изменения температуры, давления и относительной влажности. При этом использование эффекта Вернье и уравнений Эдлена позволяет обеспечить многопараметрический характер измерений на базе одного РКВОД.

Таким образом, целью настоящей работы является постановка задач проектирования и оценка возможности реализации многопараметрического РКВОД качественного и количественного мониторинга параметров воздуха, включая его температуру, давление и относительную влажность, с улучшенными метрологическими и функциональными характеристиками на основе применения эффекта Вернье и уравнений Эдлена.

Чувствительность РКВОД на основе эффекта Вернье к контролируемым параметрам воздуха

Для измерения давления воздуха выберем параллельную схему включения РФП1 и РФП2. При этом опорный РФП представляет собой заваренную кювету, наполненную воздухом, а сенсорный – кювету с технологическим отверстием для доступа воздуха окружающей среды (рис. 1).

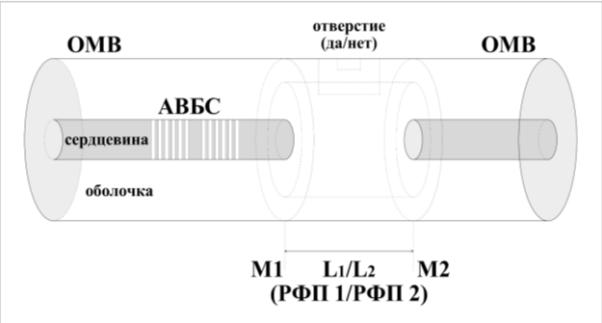

Рис. 1. Структурная схема двух параллельных РФП1 и РФП2 для РКВОД, отличающихся наличием или отсутствием отверстия для доступа воздуха в резонатор

Для каждого из РФП интенсивность отраженного выходного излучения будет определяться как:

$$I_{\mathrm{out}i} = I_{1i} + I_{2i} + 2\sqrt{I_{1i} I_{2i}} \cos\left(\frac{4\pi n_{\mathrm{air}i} L_i}{\lambda}\right), \tag{1}$$

где i=1,2 – номер опорного и сенсорного РФП; $I_{1,2i}$ – интенсивность отражения от границ резонаторов; L_i — длины резонаторов РФП; $n_{\mathrm{air}i}$ — показатель преломления воздуха в полости резонатора, а λ — длина волны света в свободном пространстве.

Предполагая, что фазовые условия в РФП выполнены, минимум m-й резонансной длины волны в (1) для каждого из них равен:

$$\lambda_{mi} = \frac{2 n_{\mathrm{air}i} L_i}{m}, \tag{2}$$

Тогда чувствительность каждого из РФП к давлению газа выглядит следующим образом:

$$S_P = \frac{\partial \lambda_m}{\partial P} = \lambda_m \frac{\partial n_{\mathrm{air}}}{\partial P}. \tag{3}$$

Согласно обновленным уравнениям Эдлена [6], n_{air} является функцией давления P (Па) и температуры T (°C) воздуха:

$$n_{air} = 1 + \frac{2{,}8783 \times 10^{-9} P}{1 + 0{,}00367 T}. \tag{4}$$

В уравнении (4), когда температура постоянна, n_{air} пропорционален давлению воздуха P. Экспериментальные результаты [6] показывают, что чувствительность датчика к давлению воздуха немного снижается с повышением температуры. Однако, ее необходимо учитывать при параллельном подключении опорного и сенсорного РФП и проявлении эффекта Вернье, тогда:

$$S_P = \frac{\partial \lambda_m}{\partial P} = M\lambda_m \frac{2,8783\times10^{-9}P}{1+0,00367T}, \tag{5}$$

где M – коэффициент увеличения.

Кроме того, по основным уравнениям Эдлена [5]:

$$\frac{\partial n_{\text{air}}}{\partial T} = -0,93\times10^{-6}\left[1/\,^{\circ}\text{C}\right];\ \frac{\partial n_{\text{air}}}{\partial P} = +0,27\times10^{-6}\left[1/\text{гПа}\right];\ \frac{\partial n_{\text{air}}}{\partial H} = -0,96\times10^{-8}\left[1/\%\right], \tag{6}$$

где H=50% – влажность воздуха, T=20 °C, P=1000 гПа, температура оказывает самое большое влияние на изменение n_{air}.

Таким образом, если давление воздуха можно определить системой параллельных РФП с рабочей полостью заполненной воздухом, то при измерении температуры ее тепловое расширение очень мало. Мал и термооптический коэффициент воздуха. Таким образом, при изменении температуры чувствительность РФП к температуре очень мала и может быть измерена с помощью ВБР или АВБС.

Перед тем, как перейти к их рассмотрению, рассмотрим последовательную схему включения РФП для одновременного контроля температуры и относительной влажности воздуха с использованием двух слоев полимеров с высокой избирательной чувствительностью каждого по одному из параметров.

Структурная схема двух последовательных РФП последовательного РКВОД, приведена на рис. 2.

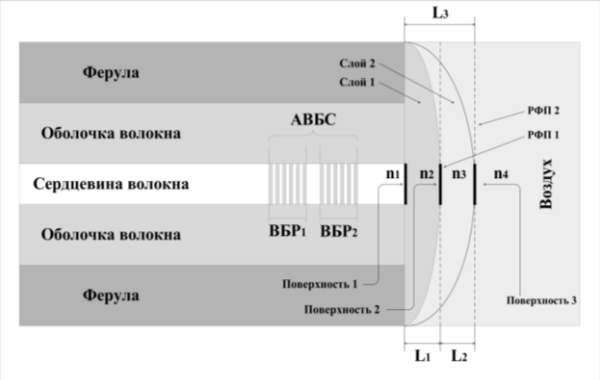

Рис. 2. Структурная схема двух последовательных РФП1(L_1) и РФП2(L_2) для РКВОД

РКВОД, разрабатываемый нами, в части РФП можно представить в виде многослойной структуры, состоящей из трех различных участков, по которым распространяется широкополосное излучение лазерного диода: сердцевина волокна и РФП (РФП$_1$ и РФП$_2$). На торец оптического волокна нанесена тонкая пленка прозрачного органического полимерного материала, толщиной L_1 – прозрачный УФ-отверждаемый клей – РФП1, например, поликарбонат или ПММА, сверху на него нанесена вторая тонкая пленка прозрачного органического полимерного материала, толщиной L_2 – например, ПВА – РФП2. Показатели преломления пленок и их толщины изменяются при изменении температуры и/или относительной влажности воздуха соответственно.

Для условного РФП3(L_3) минимум m-й резонансной длины волны можно выразить как:

$$\lambda_m = \frac{4\left(n_2L_1 + n_3L_2\right)}{2m+1}, \tag{7}$$

Поскольку РФП1 нечувствителен к относительной влажности, то изменения спектра отраженного сигнала происходит за счет изменения n_3 и L_3. Чувствительность к относительной влажности можно выразить следующим образом:

$$S_H = M\lambda_m\left(\frac{\Delta n_3 L_2 + n_3\Delta L_2}{n_2 L_1 + n_3 L_2}\right), \tag{8}$$

Чувствительность к относительной влажности представляет собой комбинированный эффект изменения коэффициента преломления и длины РФП2 после того, как пленка поглотила молекулы воды.

Чувствительность к температуре воздуха можно получить аналогичным образом, но с учетом того, что обе пленки чувствительны к температуре:

$$S_{\text{ТВ}} = M\lambda_m\left(\Delta n_2 L_1 + n_2\Delta L_1 + \Delta n_3 L_2 + n_3\Delta L_2\right)/\left(n_2 L_1 + n_3\Delta L_2\right). \tag{9}$$

Температурная чувствительность обусловлена тепловым расширением и термооптическим эффектом полимерных пленок.

Смещение брэгговской длины волны адресной волоконной брэгговской структуры АВБС (Рис. 2) происходит также из-за температурного расширения кварца, вызывающего изменение периода решётки, а также изменения показателя преломления волокна. Смещение центральной длины АВБС [7, 8] при изменении ΔT может быть записано как:

$$\Delta\lambda_{\text{АВБС}} = \lambda_{\text{АВБС}}\left(\alpha + \xi\right)\Delta T, \tag{10}$$

где $\alpha = (1/\Lambda)(\delta\Lambda/\delta T)$ – коэффициент термического расширения (для кварца $\alpha = 0{,}55 \times 10^{-6}$), $\xi = (1/n)(\delta n/\delta T)$ – термооптический коэффициент (для волокон с добавками германия примерно равный $8{,}6\times10^{-6}$) [9]. Видно, что изменение показателя преломления является доминирующим эффектом. Из уравнения (10) можно рассчитать, что температурный сдвиг АВБС в одномодовом оптическом волокне составляет ~ 13,7 пм/°С.

Оценки, проведенные нами по (5), (8) - (10) показали, что такая конструкция РКВОД позволит измерять температуру окружающей среды в диапазоне –60…+60 °С с чувствительностью ~13 пм/°С по АВБС, а также в диапазоне +10…+60 °С с чувствительностью ~ −500 пм/◦С по последовательной схеме РФП. При этом относительная влажность по указанной схеме РФП может измеряться с чувствительностью ~400 пм/%RH в диапазоне 20…90%RH, а давление воздуха по параллельной схеме РФП ~400 пм/МПа в диапазоне до 0,15 Мпа.

Заключение

Для создания подсети РКВОД, отличающихся с одной стороны универсальностью, а с другой стороны адресной уникальностью, решены следующие задачи по созданию работоспособных по температуре, давлению и относительной влажности датчиков:

– РКВОД на основе АВБС и двух параллельных РФП, способных измерять давление воздуха или двух последовательных РФП, способных измерять температуру и относительную влажность воздуха, при этом можно использовать АВБС не только для обеспечения адресности, но и для общей калибровки РКВОД по температуре;

– построены математические модели измерительного преобразования в парах РФП и получены аналитические выражения, описывающие проявления эффекта Вернье в части огибающей и коэффициента увеличения чувствительности измерения, а также связывающие параметры РФП собственно с чувствительностью измерений.

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. Chen, Y. Advanced fiber sensors based on the Vernier effect / Y. Chen, L. Zhao, S. Hao, et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 2694.
5. Edlén B. The refractive index of air // Metrologia.1966. Vol. 2, Iss. 2. Pp. 71-80.
6. Birch K.P. & Downs M.J. An updated Edlén equation for the refractive index of air // Metrologia.1993. Vol. 30, Iss. 3. P. 155.
7. Morozov, O. G. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems / O. G. Morozov, A. J. Sakhabutdinov // Computer Optics. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.
8. 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.
9. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics, 6th Ed. Elsevier: Academic Press. 2019. 707 p.
Sensitivity Assessment of a Reference Combined.

FIBER-OPTIC AIR PARAMETERS SENSOR BASED ON FABRY-PEROT INTERFEROMETERS

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

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

Absrtact. The report defines design features for constructing parallel and sequential reference combined fiber-optic sensors (RCFOS) and constructs their mathematical models with an assessment of sensitivity characteristics for each of the measured parameters, taking into account their mutual relationship by the Edlen equations and the manifestation of the Vernier effect in structures with two Fabry-Perot resonators (FPR). Estimates have shown that such a RCFOS design will allow measuring the ambient temperature in the range of -60…+60 °C with a sensitivity of ~13 pm/°C according to the AFBS, as well as in the range of +10…+60 °C with a sensitivity of ~ -500 pm/°C according to the sequential RFP scheme. In this case, relative humidity (RH) according to the specified RFP scheme can be measured

with a sensitivity of ~400 pm/%RH in the range of 20…90%RH, and air pressure according to the parallel RFP scheme ~400 pm/MPa in the range of up to 0.15 MPa.

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.