EDN: JNZUYJ
УДК: 621.383 *2.2.6*

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ФАБРИ–ПЕРО С ИНТЕГРИРОВАННОЙ АДРЕСНОЙ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКОЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

А. Н. Леонтьев[1], И. И. Нуреев[2], Э. В. Белов[2], В. И. Артемьев[2], О. Г. Морозов[2], Н. Д. Смирнов[2]

[1]Казанское приборостроительное конструкторское бюро,
420061, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 1

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

Аннотация. В докладе представлен новый двухпараметрический датчик на основе параллельных интерферометров Фабри-Перо, каждый из которых сформирован на базе двух сверхкоротких волоконных брэгговских решеток с разной измерительной базой, для создания опорного и измерительного каналов контроля давления. В каждый интерферометр дополнительно встроена адресная волоконная брэгговская структура для контроля и компенсации температуры. Уникальность датчика заключается в том, что применение адресных волоконных брэгговских структур дуально: ее функции в обоих каналах - формирование зондирующего излучения с двумя и тремя компонентами для опроса интерферометров, и придание измерениям признака адресных. Предлагаемый датчик характеризуется низкой стоимостью и простотой изготовления интерферометров; имеет конструктивную целостность, поскольку брэгговские решетки и структуры записываются внутриволоконно; работоспособен в диапазоне измерения высокого давления до 5 МПа и высокой температуры до 525 °С, поскольку волокно используется без внешнего полимерного покрытия. Высокую чувствительность измерений обеспечивает спектральная характеристика сенсора, формируемая эффектом Вернье при взаимодействии двух параллельных интерферометров, а также применение радиофотонного опроса огибающей Вернье на частотах биений компонент адресных структур.

Ключевые слова: давление, температура, интерферометр Фабри-Перо, эффект Вернье, адресная волоконная брэгговская структура, радиофотонный опрос.

Введение

С развитием современной аэрокосмической техники тестирование ее узлов и агрегатов в экстремальных условиях, таких как высокая температура и высокое давление, стало сверхважной технической задачей. Волоконно-оптические датчики (ВОД) обеспечивают измерения с высокой производительностью (с точки зрения чувствительности, точности и надежности), с высокой устойчивостью к внешним помехам (например, электромагнитному шуму или электростатическим разрядам) и другим условиям окружающей среды и играют ключевую роль в современных инженерных проектах и исследованиях [1].

Всеми указанными выше преимуществами обладают ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [2], которые подходят для мониторинга многочисленных технических характеристик как в статических, так и в динамических режимах. Они могут заменить различные стандартные датчики в самолетах, включая структурный мониторинг, управление температурой и ее компенсацию при измерении других физических

параметров, например, давления. Они также полезны для космических приложений из-за широкого рабочего температурного диапазона и возможности снижения веса полезной нагрузки.

Вторая широко применяемая конфигурация представляет собой каскадные ВОД температуры и давления на интерферометрах Фабри-Перо (ИФП) [3], при этом один ИФП чувствителен к давлению, а другой – к температуре. Более того, применяются и комбинированные структуры, в которых перед ИФП в волокно встраивается ВБР для компенсации температуры, если оба ИФП измеряют давление, а улучшение их характеристик достигается использованием эффекта Вернье [4].

В этом докладе мы представляем двухпараметрический датчик температуры и давления для сред с высокой температурой и высоким давлением, использующий каскадную конструкцию ИФП и адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС [5]) с эффектом Вернье. ВОД состоит из опорного ИФП с установленной перед ним 2π-АВБС [5] и измерительного с установленной перед ним 3π-АВБС [6]. Давление измеряется путем мониторинга определенного сдвига длины волны, полагаясь на принцип, что показатель преломления газа изменяется линейно с приложенным давлением.

Структурная схема датчика и принцип действия

Система испытаний температуры и давления на базе ИФП была создана для исследования их отклика на изменение давления в зоне контроля (печи) при различных температурах, как показано на рис. 1.

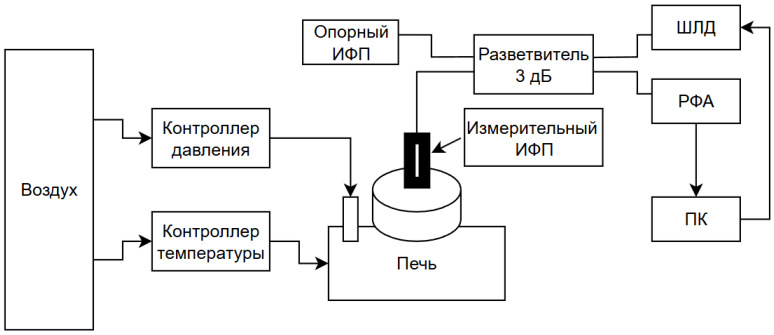
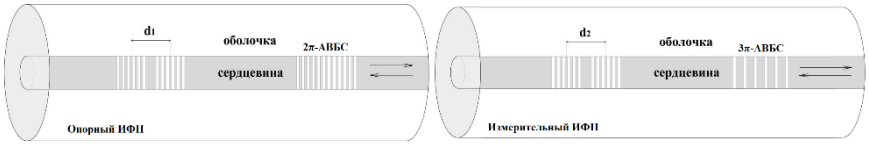


Рис. 1. Структурная схема системы контроля давления и температуры

Температура печи точно контролируется контроллером температуры, в то время как давление газа внутри печи точно регулируется контроллером давления. Подготовленный измерительный ИФП датчик инкапсулируется в корпус из нержавеющей стали и герметизируется в камере печи. Выходной свет широкополосного лазерного диода (ШЛД) разделяется на два канала с помощью разветвителя (3 дБ). Один канал подключен к измерительному, а другой – к опорному ИФП.

Между лазерным диодом и собственно ИФП встроены две АВБС: 2π-АВБС в опорном канале (рис. 2) и 3π-АВБС в измерительном канале (рис. 3).



а *б*

Рис. 2. Иллюстративная схема ИФП с встроенными АВБС

Оба отраженных луча затем передаются в радиофотонный анализатор (РФА) через разветвитель, где РФА захватывает и контролирует спектр каждого ИФП по двум в опорном и по трем составляющим решеток в измерительном канале. Выходные данные поступают на компьютер ПК.

Измеренная отраженная интенсивность порта РФА описывается как [4]:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} - 2AB\left[\cos\left(2\pi\frac{d_1}{\lambda}\right) + \cos\left(2\pi\frac{d_2}{\lambda}\right)\right] + B^2\cos\left(2\pi\frac{\delta}{\lambda}\right), \tag{1}$$

где I_{in} – интенсивность на входе в каждый из ИФП, A и B – обобщенные коэффициенты, связанные с коэффициентами отражения каждой из коротких ВБР-решеток ИФП, λ – длина волны, d_1 и d_2 – длины оптических путей опорного и измерительного ИФП соответственно, расстройка δ между которыми равна $\delta = d_1 - d_2$.

Важной величиной, используемой для характеризации оптического эффекта Вернье для двух ИФП является коэффициент увеличения чувствительности (M-фактор). Эта величина устанавливает сравнение между огибающей Вернье (env) и интерференционным сигналом от измерительного ИФП [4]:

$$M = \frac{FSR_{ENV}}{FSR_2} = \frac{FSR_1}{FSR_2 - FSR_1} = \frac{L_2}{\delta}. \tag{2}$$

При параллельном подключении опорного и сенсорного ИФП и проявлении эффекта Вернье чувствительность датчика к давлению составит:

$$S_P = \frac{\partial\lambda_m}{\partial P} = M\lambda_m\frac{2{,}8783\times10^{-9}P}{1+0{,}00367T}, \tag{3}$$

Чувствительность датчика по температуре S_T будет определяться чувствительностью АВБС.

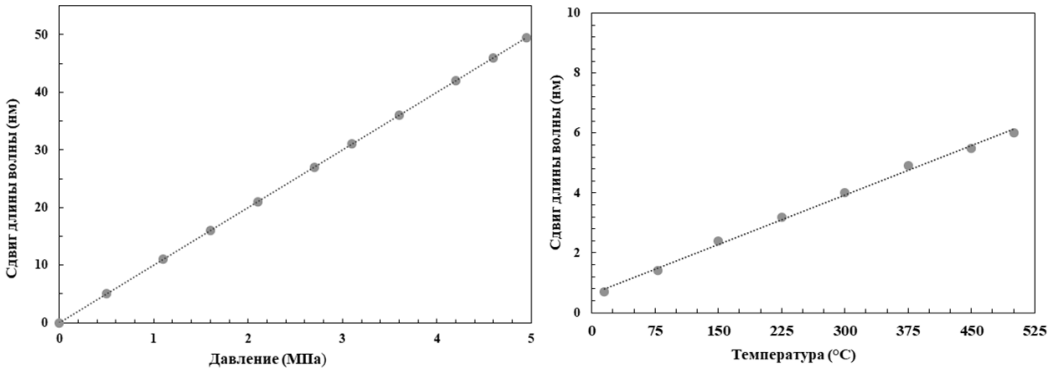
Краткие результаты экспериментальных исследований

После расчетных процедур было проведено исследование датчика в условиях высокой температуры и высокого давления. Температура постепенно повышалась от 0 °C до 525 °C с интервалами в 75 °C с периодом стабилизации в 30 мин при каждом повышении температуры. Одновременно давление повышалось от 0 до 5 МПа с шагом 0,5 МПа. После стабилизации датчика на каждом уровне давления регистрировались данные о длине волны.

Соотношение между сдвигом длины волны огибающей Вернье и изменением давления и сдвигом длины волны от температуры показано на рис. 3,*а* и рис. 3,*б* соответственно.

Основным отличием предложенного датчика является вычисление длины волны сдвига каждого ИФП по разреженным данным, полученным с АВБС, в пределах одного периода огибающей Вернье. Для измерительного ИФП это 3π-АВБС (показано на рис. 4), для опорного – 2π-АВБС, для общей огибающей используются 5 компонент.

Как показано на рис. 3 характер зависимостей линейный. Они получены при определенных адресных частотах Nπ-АВБС, которые в общем случае могут быть реализованы при N>3 [7].



а *б*

Рис. 3. Зависимость сдвига длины волны огибающей Вернье от изменения давления (а) с компенсацией по температуре и сдвиг длины волны АВБС по температуре (б)

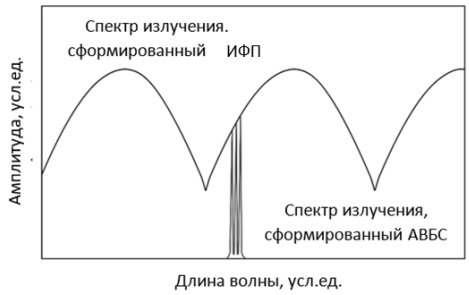


Рис. 4. Радиофотонный опрос огибающей Вернье двух параллельных ИФП излучением, сформированным в 3π-АВБС.

Заключение

Разработан и проверен на макете новый параллельный ИФП с встроенной адресной волоконной брэгговской структурой для контроля высокого давления и высокой температуры газа, что важно при испытании авиационной техники. Датчик объединяет два ИФП, в каждый из которых встроены $N\pi$-АВБС. Высокая чувствительность к давлению достигается за счет эффекта Вернье. Основным отличием предложенного датчика является вычисление длины волны сдвига параллельного ИФП по разреженным данным, полученным с двух $N\pi$-АВБС, в пределах одного периода огибающей Вернье, по огибающей биений ее компонент. Это позволяет заменить в схеме эксперимента оптический анализатор спектра на радиофотонный.

Список литературы

1. 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.
2. Морозов, О. Г. Симметричная двухчастотная рефлектометрия в лазерных системах контроля параметров природной и искусственных сред / О. Г. Морозов. – 2004. – С. 39.
3. Кузнецов, А. А. Методы и средства радиофотонного векторного анализа на основе сверхузкополосного пакета дискретных частот как нового типа зондирующего излучения: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А. А. Кузнецов. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2021. – 330 с.

4. 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.
5. Agliullin T. A. Addressed FBG-structures for tire strain measurement / T. A. Agliullin, R. R. Gubaidullin, V. Ivanov [и др.]. – Текст : электронный // Proc SPIE Int Soc Opt Eng XVI International Conference on Optical Technologies for Telecommunications 2018 / ed. Andreev V.A. [et al.] journalAbbreviation: Proc SPIE Int Soc Opt Eng. – SPIE, 2019. – Т. 11146. – С. 6. – DOI: 10.1117/12.2523849
6. Kuznetsov A. A. Optical Vector Analyzers for Multiplicative Fiber Optic Sensors Probing. Formulation of the Problem / A. A. Kuznetsov // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2021. – С. 1-5.

Благодарности

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

FABRI–PEROT PARALLEL INTERFEROMETERS WITH INTEGRATED ADDRESSABLE FIBER BRAGG GRID FOR MEASURING TEMPERATURE AND PRESSURE

A. N. Leont'ev[1], I. I. Nureev[2], E. V. Belov[2], V. I. Artem'ev[2], O. G. Morozov[2], N. D. Smirnov[2]

[1]Kazan Instrument Engineering Design Bureau,
1, Sibirskiy trakt str., Kazan, 420061

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

Absrtact. The report presents a new two-parameter sensor based on parallel Fabry-Perot interferometers, each of which is formed on the basis of two ultra-short fiber Bragg gratings with different measuring bases, to create a reference and measuring channels for pressure control. Each interferometer has an additional built-in addressable fiber Bragg structure for temperature control and compensation. The uniqueness of the sensor lies in the fact that the use of addressable fiber Bragg structures is dual, its function in both channels is to form probing radiation with two and three components for interrogating interferometers, and to impart an addressable feature to measurements. The proposed sensor is characterized by low cost and ease of manufacture of interferometers, has structural integrity, since the Bragg gratings and structures are recorded in-fiber, allows operation in the range of high pressure measurement up to 5 MPa and high temperature up to 500 °C, since the fiber is used without an external polymer coating. High sensitivity of measurements is ensured by the spectral characteristic of the sensor, formed by the Vernier effect during the interaction of two parallel interferometers, as well as the use of microwave photonic interrogation of the Vernier envelope at the beat frequencies of the address structures' components.

Keywords: pressure; temperature; Fabry-Perot interferometer; Vernier effect; addressable fiber Bragg structure; microwave photonic interrogation.

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.