EDN: NLFXVZ
УДК: 621.383 *2.2.6*

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ТОРЦЕВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ФАБРИ–ПЕРО С РАДИОФОТОННЫМ МЕТОДОМ ОПРОСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Л. Д. Ибрагимов[1], И. И. Нуреев[2], Э. В. Белов[2], В. И. Артемьев[2], О. Г. Морозов[2], Н. А. Петров[2]

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

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

Аннотация. В докладе представлен новый датчик обледенения на основе параллельных концевых интерферометрах Фабри-Перо с радиофотонным опросом, сформированный в двух одномодовых оптических волокнах, в каждом из которых в качестве зеркал используются слабоотражающая ультракороткая волоконная брэгговская решетка и ортогональный скол волокна, характеризуемый отражением Френеля. Предлагаемый датчик снижает стоимость и сложность изготовления сенсора в целом, сохраняет его структурную целостность, поскольку решетки записываются внутри волокна, и позволяет реализовать измерения степени обледенения при изменении структуры покрытия конца волокна: вода, иней, снег, лед. Ключевым элементом для организации радиофотонного опроса интерферометра является применение адресной волоконной брэгговской структуры, формирующей зондирующее его излучение с определенной разностной частотой между компонентами и равными их амплитудами, которая записана после лазерного излучателя. Высокую чувствительность измерений обеспечивает спектральная характеристика сенсора, формируемая эффектом Вернье при взаимодействии двух интерферометров, имеющих различную измерительную базу.

Ключевые слова: обледенение, интерферометр Фабри-Перо, френелевская рефрактометрия, эффект Вернье, радиофотонный опрос, адресная волоконная брэгговская структура.

Введение

Гражданские самолеты в результате определенных эксплуатационных требований, в частности необходимого периода ожидания перед взлетом или во время полета, находятся в условиях, способствующих значительному обледенению. Волоконно-оптические датчики обледенения (ВОДО) преимущественно основаны на эффектах модуляции оптической несущей при изменении коэффициента преломления льда в его различных состояниях, включая модуляцию длины волны, фазы, поляризации и интенсивности света. В настоящее время в ВОДО наиболее широко изучены методы модуляции интенсивности. Было разработано множество различных структур и схем ВОДО для измерения толщины льда, идентификации типа льда, включая состояния, предвещающие его образование на различных поверхностях [1].

Существует много преимуществ использования ВОДО, таких как малая масса, небольшой размер, возможность встраивания в различные материалы, невосприимчивость к электромагнитным помехам. Это делает ВОДО мощным инструментом для обнаружения льда. Кроме того, ВОДО может использоваться в качестве опорных для других типов

датчиков, в которых температура является критическим параметром и требует прецизионного контроля.

В [2] был представлен ВОДО на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), в которых измерения проводятся по учету изменений параметров теплообмена в контролируемой поверхности при возникновении на ней льда разной толщины. Техника измерений с помощью ВБР хорошо отработана, но для их реализации необходима сложная и сверхдорогая система опроса, которая не может работать в условиях борта в силу низкой виброустойчивости.

В этом докладе мы представляем новый ВОДО для контроля обледенения на основе двух параллельных концевых интерферометров Фабри-Перо (ИФП) с радиофотонным опросом, сформированный в двух одномодовых оптических волокнах, в каждом из которых в качестве зеркал используются ультракороткая слабоотражающая ВБР и ортогональный скол волокна, характеризуемый отражением Френеля. Высокую чувствительность измерений обеспечивает спектральная характеристика сенсора, формируемая эффектом Вернье при взаимодействии двух интерферометров, имеющих различную измерительную базу. Ключевым элементом для организации радиофотонного опроса интерферометра является применение адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС [3]), формирующей зондирующее ИФП излучение с определенной разностной частотой между компонентами и равными амплитудами. Регистрируемое отраженное от ИФП излучение содержит измененные по амплитуде компоненты, по которым оценивается сдвиг огибающей Вернье ИФП при изменении степени обледенения или его типа. Предлагаемая структура снижает стоимость и сложность изготовления ВОДО в целом при пространственных размерах, подходящих для точечных измерений степени обледенения, и с возможностью объединения в многосенсорную систему.

В докладе поэтапно представлены: описание структурной схемы нового ВОДО, математическая модель формирования отклика в отдельных ИФП и объединенного отклика двух параллельных ИФП, основанный на эффекте Вернье, анализ изменения френелевского отражения при изменении типа обледенения и толщины льда, результаты первичных экспериментов.

Структурная схема ВОДО

Схема ИФП на основе ультракороткой слабоотражающей ВБР и сколотого торца волокна показана на рис. 1.

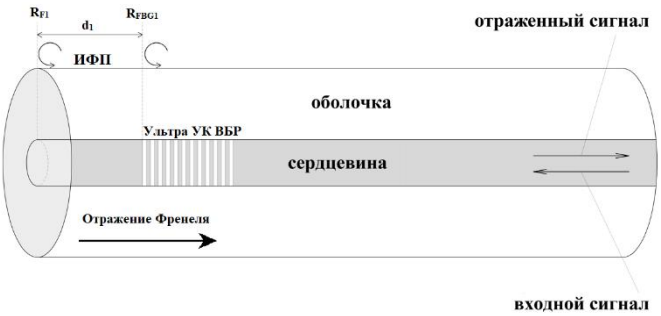


Рис. 1. Схема ИФП на основе сверхкороткой слабоотражающей ВБР и сколотого торца волокна

Ультракороткая ВБР и хорошо сколотый торец волокна являются первой и второй отражающей поверхностью соответственно. Когда расстояние между двумя отражающими поверхностями находится в диапазоне интерференции, будет сформирован ИФП.

Интенсивность отражения ИФП (R_{FPI}) определяется R_{FBG} и R_F, а также расстоянием d между двумя отражающими поверхностями и коэффициентом преломления волокна n:

$$R_{FPI} = \frac{R_F + R_{FBG} + 2\sqrt{R_F R_{FBG}}\cos\phi}{1 + R_F R_{FBG} + 2\sqrt{R_F R_{FBG}}\cos\phi}, \quad \phi = \frac{4\pi n d}{\lambda}, \tag{1}$$

где ϕ – фаза, образованная прохождением света в ИФП. Свободный спектральный диапазон FSR ИФП равен:

$$\mathrm{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nd} \ . \tag{2}$$

Для построения ВОДО (рис. 2) будем использовать два ИФП, представленных на рис.1 с разными базами: опорный с d_1 и измерительный с d_2.

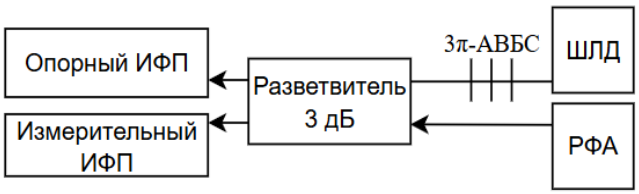


Рис. 2. Структурная схема ВОДО

Для опорного ИФП на торец волокна накладывается заглушка с постоянным коэффициентом преломления n_1. Для измерительного — коэффициент преломления n_2 будет меняться от 1,31 (лед) до 1,333 (вода), а внешний вид торца ИФП будет выглядеть как показано на рис. 3.

Рис. 3. Торец волокна, покрытый различными состояниями воды: лед, переходное состояние от инея, иней, снег (слева направо) [1]

Математическая модель

Согласно закону, отражение Френеля происходит на торце хорошо сколотого волокна из-за разницы показателей преломления сердцевины волокна n и типом обледенения n_2. Коэффициент отражения Френеля (R_F) определяется как:

$$R_F = \left(\frac{n - n_2}{n + n_2}\right)^2. \tag{3}$$

УК ВБР, образованная периодической модуляцией *n* сердцевины оптического волокна, является оптическим отражающим устройством. Она может отражать часть света на определенной длине волны, соответствующей условию Брэгга, попадающей в выходной порт разветвителя (3 дБ). Отражательная способность УК ВБР (R_{FBG}) на разных длинах волн определяется коэффициентом связи мод κ и длиной решетки *L*:

$$R_{\mathrm{FBG}} = \left| \frac{-\kappa \sinh(SL)}{\Delta\beta \sinh(SL) + iS\cosh(SL)} \right|^2, \quad S^2 = \kappa^2 - \Delta\beta^2, \tag{4}$$

где $\kappa = (\pi\Delta n)/\lambda$, Δn – средняя глубина модуляции *n*, коэффициент распространения $\beta = (2\pi n_{\mathrm{eff}})/\lambda$, $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = \beta - \pi/\Lambda$, n_{eff} – эффективный показатель преломления моды сердцевины волокна, Λ – период решетки, а λ – длина волны. Перейдя от (3) и (4) к (1) и (2) получим отклик ВОДО.

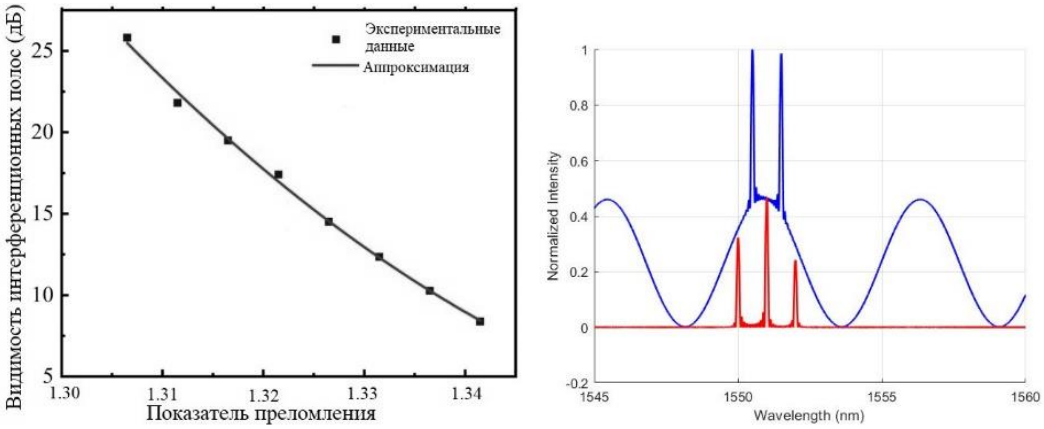
При параллельном соединении обоих ИФП возникает эффект Вернье с коэффициентом увеличения чувствительности по показателю преломления обледенения (M-фактор). Эта величина устанавливает сравнение между огибающей Вернье (ENV) и интерференционным сигналом от измерительного ИФП [4]:

$$M = \frac{\mathrm{FSR}_{\mathrm{ENV}}}{\mathrm{FSR}_2} = \frac{\mathrm{FSR}_1}{\mathrm{FSR}_2\text{-}\mathrm{FSR}_1} = \frac{d_2}{\delta}, \tag{5}$$

где δ – разность размеров кювет двух ИФП.

Результаты первичных экспериментов

На рис. 4, *а* показана связь между видимостью интерференционной полосы вблизи длины волны 1550 нм датчика и показателя преломления обледенения по его типу. Видно, что ВОДО перекрывает все необходимые нам типы обледенения.



а) *б*)

Рис. 4. Зависимость видимости интерференционной картины ИФП$_2$ от показателя преломления обледенения (а) и ситуационная спектрограмма радиофотонного опроса ВОДО (б)

При оценке по коэффициенту Вернье для радиофотонного опроса использовалась адресная волоконная брэгговская структура 3π-АВБС. Для контроля температуры

измерительного ИФП перед ним в волокне может быть записана 2λ-АВБС, что позволит опрашивать ИФП в целом с помощью радиофотонного анализатора (РФА), по ситуационной спектрограмме (рис. 4, *б*).

Заключение

Продемонстрирован высокочувствительный внутриволоконный ВОДО для контроля обледенения по измерению показателя преломления льда в разных состояниях и воды, основанный на параллельных ИФП, сформированных ультракороткой слабоотражающей ВБР и торцом волокна. С помощью моделирования показана работоспособность датчика в диапазоне показателей преломления от 1,3 до 1,34. При оценке по коэффициенту Вернье для радиофотонного опроса использовалась адресная волоконная брэгговская структура 3π-АВБС. Для контроля температуры измерительного ИФП перед ним в волокне может быть записана 2λ-АВБС, что позволит опрашивать ИФП в целом с помощью РФА.

Список литературы

1. Junfeng Ge et al. Atmospheric icing measurement and online ice type recognition for aircraft utilizing optical fiber sensor and machine learning algorithms // Measurement. - 2022. - Vol. 205. - P. 112215.
2. Jun Hua, Hugh H.T. Liu. Fluid flow and thermodynamic analysis of a wing anti-icing system // Canadian Aeronautics and Space Journal. - 2005. - Vol. 51(1). - P. 35-40.
3. Agliullin T.A., Sakhabutdinov A.Z., Nureev I.I. et al. Overview of addressed fiber Bragg structures' development // Photonics. - 2023. - Vol. 10. - P. 175.
4. Шагидуллин А.Р., Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. и др. Постановка задач проектирования волоконно-оптических комбинированных датчиков и многосенсорных систем для регионального мониторинга концентрации парниковых газов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2021. - № 4 (52). - С. 52-67.

Благодарности

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

PARALLEL END-TO-END FABRY–PEROT INTERFEROMETERS WITH A RADIO-PHOTON QUESTIONNAIRE FOR MONITORING ICY

L. D. Ibragimov[1], I. I. Nureev[2], E. V. Belov[2], V. I. Artem'ev[2], O. G. Morozov[2], N. A. Petrov[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 icing sensor based on parallel end Fabry-Perot interferometers with radio-photonic interrogation formed in two single-mode optical fibers, each of which uses an ultrashort low-reflecting fiber Bragg grating and an orthogonal fiber cleavage characterized by Fresnel reflection as mirrors. The proposed sensor reduces the cost and complexity of manufacturing the sensor as a whole, preserves its structural integrity, since the gratings are recorded in-fiber, and allows for measuring the degree of icing when the structure of the fiber end coating changes: water, frost, snow, ice. The key element for organizing the radio-photonic interrogation of the interferometer is the use of an addressable fiber Bragg structure that forms its probing radiation with a certain difference frequency between the components and their equal amplitudes, which is recorded after the laser emitter. High sensitivity of measurements is provided by the spectral characteristic of the sensor, formed by the Vernier effect during the interaction of two interferometers with different measuring bases.

Keywords: icing, Fabry-Perot interferometer, Fresnel refractometer, Vernier effect, microwave photonic interrogation, 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.