

EDN: LUYIYB

УДК 621.383

2.2.6, 2.2.7, 2.2.8

РЕШЕНИЕ ЧАСТНЫХ ЗАДАЧ ПРЕДПОЛЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА В РАМКАХ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ «ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ БОРТ»

И.У. Курбиев, Л.Д. Ибрагимов, А.А. Садыков, А.Н. Леонтьев, С.Н. Нигматуллин

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

Аннотация. Системы управления полетом борта в настоящее время строятся на базе двух концепций «Fly-by-wire» и «Fly-by-light». В развитие последней из указанных концепций нами предложена концепция с рабочим названием «Волоконно-оптический борт», отличающаяся дополнительным слоем сенсоров, целевая задача которых - формирование базы данных на стадии предполетной подготовки и в ходе полета, по которым можно определить предполетные установки, структурную целостность и качество работы узлов и агрегатов борта для предотвращения аварийных ситуаций. При этом данная группа сенсоров подключается к бортовой волоконно-оптической сети передачи данных и управления и является источником информации для системы управления полетом. Следует отметить особенности этой группы сенсоров: они не являются волоконно-оптическими сенсорами, встроенными в композитные структуры фюзеляжа, которые являются предметом исследования многих авторов и организаций, а также не являются сенсорами, определяющими законы движения узлов управления полетной траектории в нормальном полете. В частности, в статье рассматриваются адресные волоконные брэгговские структуры для системы контроля веса и балансировки борта; параллельные концевые интерферометры Фабри-Перо для системы контроля обледенения; параллельные интерферометры Фабри-Перо на базе двух ультракоротких волоконных брэгговских решеток с разной измерительной базой для системы контроля аномально высоких давления и температуры узлов и агрегатов; точечный и квазираспределенный сенсор на адресных волоконных брэгговских структурах для системы контроля скорости движения; отсутствие засоров и попадания воздуха для рабочих жидкостей в бортовых трубопроводах. Для опроса сенсорных элементов используются радиофотонные технологии.

Ключевые слова: адресная волоконная брэгговская структура, контроль веса и балансировка борта, интерферометр Фабри-Перо концевой, обледенение, интерферометр Фабри-Перо на двух ультракоротких волоконных брэгговских решетках, давление, температура, квазираспределенные адресные волоконные брэгговские структуры, скорость потока жидкости, радиофотонный опрос.

Введение

Волоконно-оптические датчики, например, волоконные брэгговские решетки (ВБР) [1], отлично приспособлены для интеграции в конструкции шасси для измерения деформаций. Среди многих преимуществ такого решения наиболее важны высокая чувствительность, электромагнитная устойчивость, минимальный вес и отсутствие влияния на характеристики шасси (типичный диаметр около 125 мм), а также возможность мультиплексирования при объединении в единую бортовую систему. ВБР предназначены для измерения деформаций в различных конструкциях [2], используются во многих аэрокосмических приложениях, включая мониторинг внешних воздействий на конструкцию самолета с минимальным весом и простыми техническими решениями аппликаторов для их встраивания, например, в подшипники [3] и продемонстрированы при эксплуатации на орбите [4]. Применение ВБР в шасси является инновационным и исследуется только последние 10 лет. Недостатком применения таких систем является невозможность построения их бортовых реализаций, что вызвано сложным и вибронеустойчивым интеррогационным оборудованием.

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) в основном 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 [5]. 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 [6] 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. С одной стороны техника измерений с помощью ВБР хорошо отработана. Но, с другой стороны, для их реализации необходима сложная и сверхдорогая система опроса, которая, в свою очередь не может работать в условиях борта в силу низкой виброустойчивости.

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) предлагают 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 [7].

Всеми указанными выше преимуществами облают ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [8], 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) [9], 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 [10].

Мониторинг скорости потока жидкости является ключевым моментом во многих отраслях, где используются такие процессы, как транспортировка жидкостей. В большинстве реализаций используется центральный нагревательный элемент, а скорость потока определяется по передаче тепла к двум или более близлежащим термометрам. Несмотря на превосходные характеристики, они сложны в изготовлении, требуют калибровки в зависимости от типа жидкости, несовместимы с экстремальными условиями. В отличие от существующих волоконно-оптические датчики потока обладают рядом преимуществ, таких как электромагнитная и коррозионная устойчивость, химическая стабильность, электрическая пассивность, малые размеры и возможность установки в отдаленных местах. Задачей данной

статьи является определение обоснования преимуществ и выбор вариантов построения волоконно-оптического квазираспределенного контроля температуры для решения задач мониторинга скорости потока жидкости на борту.

Волоконно-оптическое измерение температуры использует рассеяние света для измерения изменений температуры. В отличие от волоконных брэгговских решеток (ВБР), которые предоставляют информацию только из отдельных мест, распределенное оптоволоконное зондирование измеряет распределение температуры по всей длине волокна. Не требуя какого-либо электрического интерфейса, волокно можно просто прикрепить или даже полностью вставить в трубопровод для жидкости. Однако стоимость систем мониторинга распределенных и на базе отдельных ВБР не сравнимы с существенным преимуществом последних. Таким образом, в данной статье ставится задача применения квазираспределенного оптоволоконного измерения температуры, которое обладает преимуществами точечного и распределенного мониторинга, и может дать полную картину теплового потока на основе устранения их недостатков.

Анализ приведенной выше информации можно классифицировать как перечень частных задач, решение которых может лечь в основу разработки концепции «Волоконно-оптический борт». Системы управления полетом борта в настоящее время строятся на базе двух концепций «Fly-by-wire» и «Fly-by-light». В развитие последней из указанных концепций нами предложена концепция «Волоконно-оптический борт», отличающаяся дополнительным слоем сенсоров, целевая задача которых - формирование базы данных на стадии предполетной подготовки и в ходе полета, по которым можно определить структурную целостность и качество работы узлов и агрегатов борта. При этом данная группа сенсоров подключается к бортовой волоконно-оптической сети передачи данных и управления и является источником информации для системы управления полетом. Следует отметить особенности этой группы сенсоров: они не являются волоконно-оптическими сенсорами, встроенными в композитные структуры фюзеляжа, которые являются предметом исследования многих авторов и организаций, а также не являются сенсорами, определяющими законы движения узлов управления полетной траектории.

Общая задача, характерная для всех описанных выше систем, которую необходимо решить в рамках построения концепции «Волоконно-оптический борт», – задача перехода от оптоэлектронных систем интеррогации сенсоров, которая ограничивает их применение на борту, к радиофотонным. Радиофотонный опрос основан на регистрации параметров оптических сигналов от каждого сенсора, полученных в оптическом диапазоне при режимах их работы на отражение и пропускание, и на оценке параметров измерительного преобразования по огибающей их биений в радиодиапазоне, что, кроме функции измерений, позволяет реализовать технологии мультимплексирования сенсоров и адресного характера измерений с их локализацией по месту установки на борту.

1. Система контроля веса и балансировки борта на адресных волоконных брэгговских структурах

В данном разделе представлена система датчиков на адресных волоконных брэгговских структурах (АВБС) для реализации бортовой системы контроля веса и балансировки самолета. Применение АВБС, адаптированных к радиофотонному опросу, позволяет использовать на борту цельноволокнный радиофотонный интеррогатор, устойчивый к критическим нагрузкам и вибрации при взлете и посадке. Для усиления надежности АВБС они выполнены по схеме параллельных волокон. Для минимизации числа датчиков АВБС дополнительно выполнены по схеме на двух волокнах различного типа. Это позволяет отказаться от отдельных сенсоров компенсации температуры и минимизировать структуру системы.

Алгоритм работы системы контроля веса и балансировки показан на рис. 1.

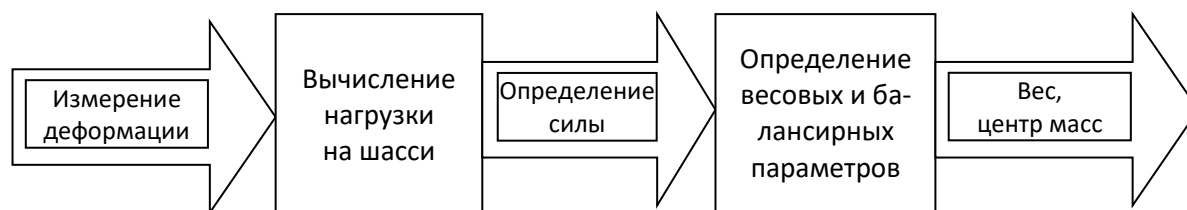


Рис. 1. Алгоритм работы системы контроля веса и балансировки

Измерения деформации на каждой опоре системы шасси представляют собой входные данные для расчета веса и центра масс самолета.

Цельноволокнный бортовой радиофотонный интеррогатор (РФИ) строится по схеме с наклонным фильтром и опорным фотоприемником. При этом наклонный фильтр записывается в волокне как ВБР с квазилинейными склонами, а фотоприемник имеет волоконный вход. Функциональная схема РФИ представлена на рис. 2.

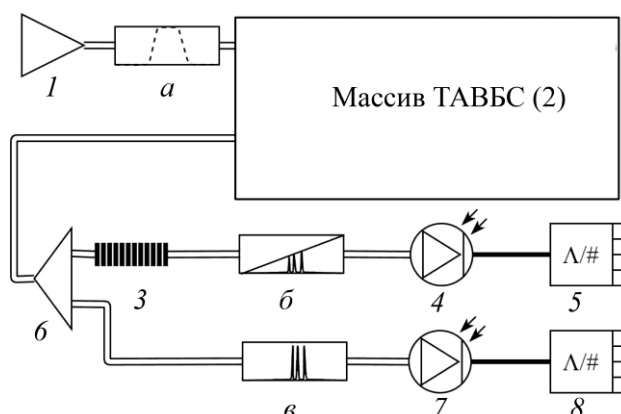


Рис. 2. Функциональная схема радиофотонного интеррогатора:

1 – широкополосный лазерный диод; 2 – массив трехкомпонентных ТАВБС (установлены на шасси); 3 – линейный наклонный фильтр; 4 – измерительный фотоприемник; 5 – измерительный АЦП; 6 – оптический разветвитель; 7 – опорный фотоприемник; 8 – опорный АЦП (*a*, *b* и *в* – спектральные характеристики оптических сигналов после лазера, наклонного фильтра и на выходе массива ТАВБС)

Широкополосный источник 1 формирует излучение (диаграмма *a*), соответствующее диапазону измерений, которое поступает на массив ТАВБС 2 (одноосные и трехосные АВБС типа 3λ -ВБР [11] для измерения деформаций). Каждая из ТАВБС формирует трехчастотное излучение, которое суммируется в одно общее излучение и поступает на оптический разветвитель 6, на выходе которого в опорном канале получаем многочастотное лазерное излучение (диаграмма *в*).

Многочастотное излучение проходит и через верхнюю ветвь оптоволоконного разветвителя 6 и поступает в измерительный канал, где установлен фильтр 3 с наклонной линейной характеристикой, модифицирующий амплитуды многочастотного излучения в асимметричное излучение (диаграмма *б*), после чего сигнал поступает на измерительный фотоприемник 4 и принимается на измерительный АЦП 5. Сигнал с АЦП 5 обрабатывается методом спектральной цифровой фильтрации, по результатам которой определяются положения центральной брэгговской длины волны ТАВБС. В опорном канале сигнал (диаграмма *в*) поступает на опорный фотоприемник контроля мощности входного оптического

сигнала 7 и принимается на опорный АЦП 8. Все дальнейшие вычисления идут с отношением мощностей сигналов, полученных в измерительном и опорном каналах в рабочем диапазоне длин волн 1550 нм с шириной полосы излучения до 3 нм и шириной полосы пропускания фотоприемника 10 – 40 ГГц.

Новая конфигурация АВБС [12] достигается путем получения каждой ее волновой составляющей с помощью ВБР (FBG_1 и FBG_2) с различными центральными длинами волн λ_{B1} и λ_{B2} , вписанных в отдельные оптические волокна. Эти волокна расположены параллельно и соединены между собой через оптический соединитель ОС1 перед областью записи ВБР и оптический соединитель ОС2 после области записи. Каждая ВБР вписана в сегмент одинаковой длины L в своем соответствующем волокне, гарантируя, что общая высота H двух параллельных волоконных массивов (рассчитываемая как $H = d_1 + d_2$, где d_1 и d_2 — диаметры волокон) остается значительно меньше L ($H \ll L$), что позволяет АВБС функционировать как компактный точечный датчик. Схематическая конфигурация АВБС показана на рис. 3,а.

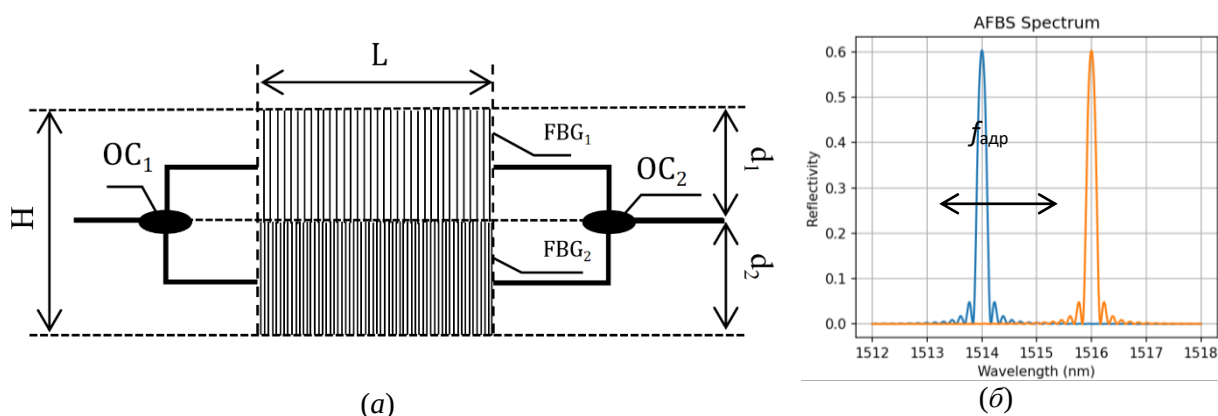


Рис. 3. Двухволоконная схема двухкомпонентной АВБС 2 λ -АВБС:
а) схематическая конфигурация АВБС; б) диаграмма

При воздействии широкополосного лазерного излучения АВБС генерирует отраженный оптический сигнал, состоящий из двух сверхузких частотных компонент, каждая из которых соответствует центральной длине волны, соответствующей FBG (λ_{B1} и λ_{B2}), что представлено на рис. 3,б. Уникальный радиочастотный интервал $f_{адр}$ между длинами волн служит адресом структуры, что позволяет осуществлять точную ее идентификацию в потенциальной многосенсорной системе контроля веса и балансировки. Такая конструкция минимизирует пространственный размер АВБС и обеспечивает точность точки мониторинга за счет совпадающего выравнивания ВБР, что критически важно для локализованных измерений без искажений сигнала. Для построения ТАВБС параллельно указанным устанавливается третье волокно с записанной в нем ВБР с λ_{B3} . Тогда в системе появляется три адресных частоты. При установке третьей компоненты между λ_{B1} и λ_{B2} $f_{адр}$ сохраняется, и появляются $f_{адр1}$ и $f_{адр2}$, которые могут быть как одинаковыми, так и разными. Это повышает уровень идентификации каждой АВБС в системе.

Особенностью метода двух волокон является использование двух волокон с различными коэффициентами теплового расширения α и различными термооптическими коэффициентами ξ , в каждом из которых записано две ВБР ($ВБР_1$ и $ВБР_2$). Если ВБР имеют разные α и ξ , то центральные частоты их спектра отражения имеют разные сдвиги при изменении температуры и одинаковые при изменении деформации. Более того, мощности отражённых световых лучей будут различны, поскольку изменяются в зависимости от периода решётки Λ и длины L . Центральные длины волн ВБР можно определить с помощью бортового РФИ.

Выходные мощности обеих можно просто выразить как функции деформации и температуры:

$$P_{\text{ВБР1}} = M_1(\varepsilon, T), P_{\text{ВБР2}} = M_2(\varepsilon, T), \quad (1)$$

где M_1 и M_2 представляют передаточную функцию ВБР. Найдя обратную функцию ($\overline{M}_1$ и $\overline{M}_2$), можно одновременно определить деформацию и температуру:

$$\varepsilon = \overline{M}_1(P_{\text{ВБР1}}, P_{\text{ВБР2}}), T = \overline{M}_2(P_{\text{ВБР1}}, P_{\text{ВБР2}}). \quad (2)$$

Применение такого метода позволяет минимизировать структуру системы контроля веса и балансировки в целом, исключив установку датчиков температуры для ее компенсации, что характерно для любой волоконно-оптической системы. Для реализации преимуществ метода двух параллельных волокон и метода двух волокон при построении ТАВБС будет использована пара различных по типу волокон, из которых сформированы две адресных структуры на трех параллельных волокнах каждого типа.

2. Параллельные концевые интерферометры Фабри-Перо для контроля обледенения

В данном разделе 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.

Схема ИФП на основе ультракороткой слабоотражающей ВБР и сколотого торца волокна показана на рис. 4.

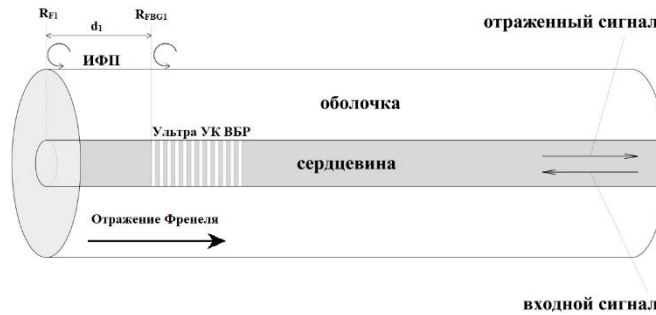


Рис. 4. Схема ИФП на основе сверхкороткой слабоотражающей ВБР и сколотого торца волокна

УК 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 :

$$R_{\text{FPI}} = \frac{R_F + R_{\text{FBG}} + 2\sqrt{R_F R_{\text{FBG}}} \cos \phi}{1 + R_F R_{\text{FBG}} + 2\sqrt{R_F R_{\text{FBG}}} \cos \phi}, \quad \phi = \frac{4\pi n d}{\lambda}, \quad (3)$$

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

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nd}. \quad (4)$$

Для построения ВОДО (рис. 5) будем использовать два ИФП, представленных на рис. 1 с разными базами: опорный с d_1 и измерительный с d_2 .

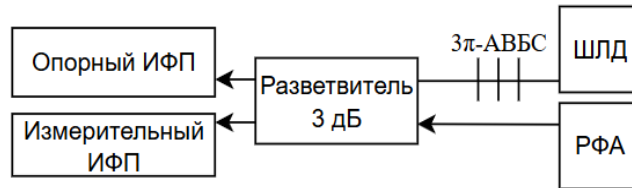


Рис. 5. Структурная схема ВОДО

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. 6.



Рис. 6. Торец волокна, покрытый различными состояниями воды: лед, переходное состояние от инея, иней, снег (слева направо) [5]

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:

$$R_F = \left(\frac{n - n_2}{n + n_2} \right)^2. \quad (5)$$

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 :

$$R_{\text{FBG}} = \left| \frac{-\kappa \sinh(SL)}{\Delta\beta \sinh(SL) + iS \cosh(SL)} \right|^2, \quad S^2 = \kappa^2 - \Delta\beta^2, \quad (6)$$

где $\kappa = (\pi\Delta n)/\lambda$, Δn – средняя глубина модуляции n , коэффициент распространения $\beta = (2\pi n_{\text{eff}})/\lambda$, $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = \beta - \pi/\Lambda$, n_{eff} – эффективный показатель преломления моды сердцевинки 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 (М-фактор). Эта величина устанавливает сравнение между огибающей Вернье (ENV) и интерференционным сигналом от измерительного ИФП [13-14]:

$$M = \frac{\text{FSR}_{\text{ENV}}}{\text{FSR}_2} = \frac{\text{FSR}_1}{\text{FSR}_2 - \text{FSR}_1} = \frac{d_2}{\delta}, \quad (7)$$

где δ – разность размеров кювет двух ИФП.

На рис. 7,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.

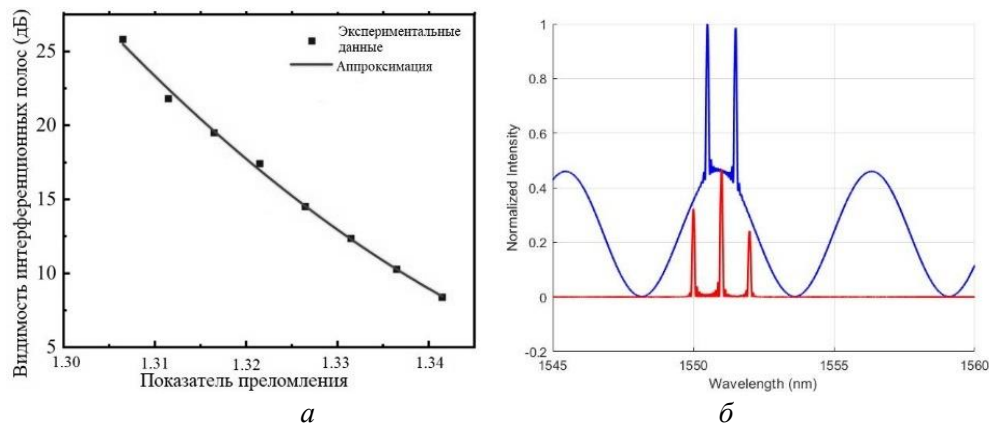


Рис. 7. Зависимость видимости интерференционной картины ИФП₂ от показателя преломления обледенения (а) и ситуационная спектрограмма радиофотонного опроса ВОДО (б)

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. 7,б).

3. Параллельные интерферометры Фабри-Перо на двух ультракоротких волоконных брэгговских решетках и встроенной адресной волоконной брэгговской структурой для контроля температуры и давления

В данном разделе поэтапно представлены: описание структурной схемы нового ВОД, математическая модель формирования отклика отдельных ИФП и объединенного отклика двух параллельных ИФП, основанный на эффекте Вернье, анализ применения АВБС при изменении давления и температуры, краткие результаты экспериментальных исследований.

Система измерений 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. 8.

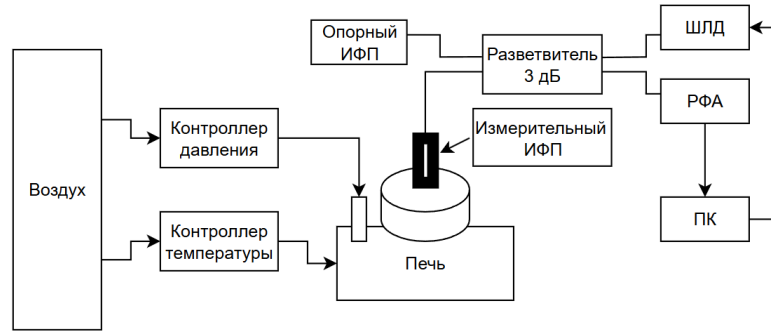


Рис. 8. Структурная схема системы контроля давления и температуры

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. 9,а) и 3π -АВБС в измерительном канале (рис. 9,б).

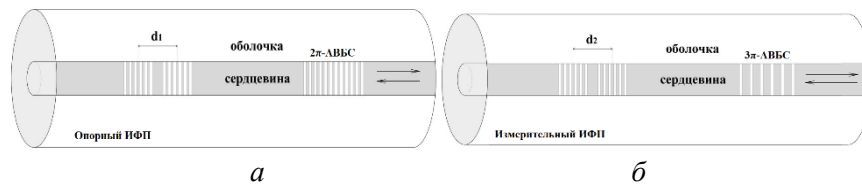


Рис. 9. Иллюстративная схема ИФП с встроенными АВБС

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 [10]:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} - 2AB \left[\cos\left(2\pi \frac{d_1}{\lambda}\right) + \cos\left(2\pi \frac{d_2}{\lambda}\right) \right] + B^2 \cos\left(2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right), \quad (8)$$

где I_{in} – интенсивность на входе в каждый из ИФП, A и B – коэффициенты, связанные с коэффициентами отражениями на 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 характеристики 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 [14]:

$$M = \frac{FSR_{ENV}}{FSR_2} = \frac{FSR_1}{FSR_2 - FSR_1} = \frac{L_2}{\delta}. \quad (9)$$

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

$$S_p = \frac{\partial \lambda_m}{\partial P} = M \lambda_m \frac{2,8783 \times 10^{-9} P}{1 + 0,00367 T}, \quad (10)$$

Чувствительность датчика по температуре S_T будет определяться чувствительностью АВБС.

После расчетных процедур было проведено исследование датчика в условиях высокой температуры и высокого давления. Температура постепенно повышалась от 0 °С до 525 °С с интервалами в 75 °С 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. 10,а и рис. 10,б соответственно.

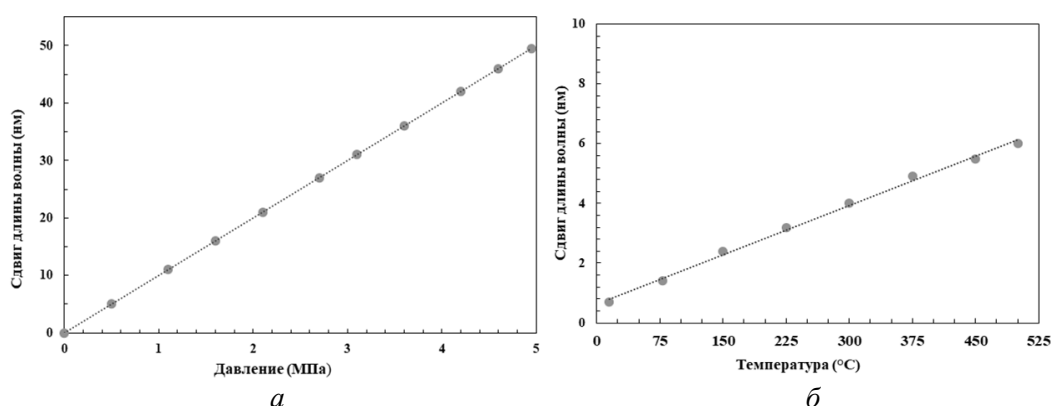


Рис. 10. Зависимость сдвига длины волны огибающей Вернье от изменения давления (а) с компенсацией по температуре и сдвиг длины волны АВБС по температуре (б)

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. 11), для опорного – 2π -АВБС, для общей огибающей используются 5 компонент.

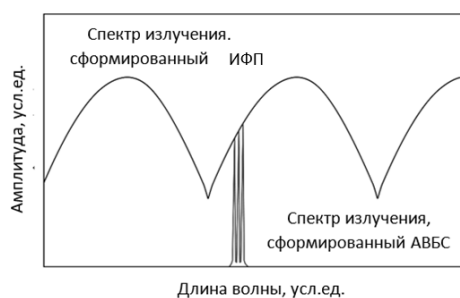


Рис. 11. Радиотонный опрос огибающей Вернье двух параллельных ИФП излучением, сформированным в 3π -АВБС

Как показано на рис. 10 характер зависимостей линейный. Они получены при определенных адресных частотах $N\lambda$ -АВБС, которые в общем случае могут быть реализованы при $N>3$ [11-13].

4. Адресные термоанемометры для мониторинга расхода жидкости на адресных волоконных брэгговских структурах

В данном разделе, исходя из соответствия длин волн нагревательной части и детекторной части и низких потерь, предлагается датчик теплового потока на основе адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС) и интерферометра Фабри-Перо (ИФП) [14-16], в котором используется источник света ASE в С-диапазоне и специальное поглощающее покрытие ИФП, нагреваемое им. Моделирование показывает, что датчик может выполнять все оптические измерения с высокой точностью, а также является взрывозащищенным.

Термоанемометр на основе АВБС. В данном подразделе представлен волоконно-оптический датчик расхода жидкости, работающий путем измерения разности температур. На рис. 12 представлен схематический принцип измерения, при котором в измеряемую трубу встроены два датчика температуры на базе АВБС и модуль нагрева.

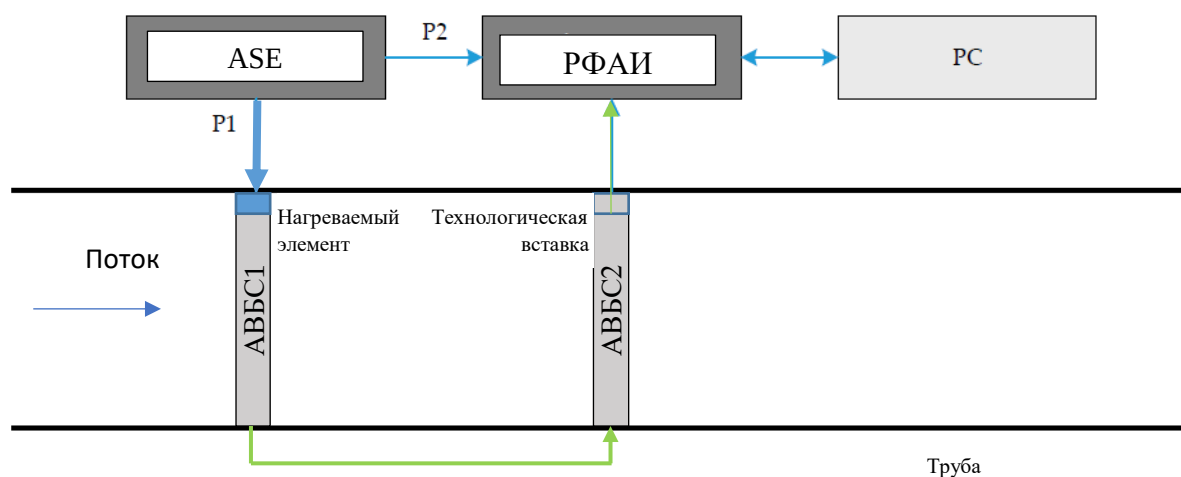


Рис. 12. Схема ТМФ на основе адресных волоконных брэгговских структур

Для удобства работы АВБС1 и нагреваемый элемент сконструированы вместе. В АВБС2 место, занимаемое нагревательным элементом, заменено на технологическую вставку. Источник света ASE выдает постоянную мощность, при этом ее 80% P1 подается на нагреваемый элемент, часть которой проходит на АВБС1 и АВБС2, а мощность P2 подается через радиифотонный адресный интеррогатор РФАИ для формирования опорного канала интеррогатора. Благодаря РФАИ разность температур от двух датчиков можно отслеживать в режиме реального времени. Когда в трубе нет потока жидкости, разница температур между датчиками наибольшая.

Когда в трубе появляется поток, он начинает отбирать тепло от нагреваемого элемента и АВБС1, что приводит к снижению в ней температуры. Через короткое время температура перестает снижаться и становится постоянной, поскольку мощность нагрева и расход стабилизируются. Поэтому разность температур между двумя датчиками температуры достигает стабильного значения, меньшего, чем в случае отсутствия потока. Чем больше расход газа, тем меньше разница. Измерив разницу температур, можно определить расход

в трубе. При использовании АВБС и РФАИ появляется возможность строить многосенсорные ТМФ, снизить стоимость установки за счет замены оптоэлектронного интеррогатора и сужения требуемой полосы излучения ASE.

Для организации двунаправленного измерения необходимо становить АВБС3 с другой стороны от АВБС1.

Термоанемометр на основе АВБС и ИФП. В данном подразделе представлен волоконно-оптический датчик расхода жидкости, также работающий путем измерения разницы температур. На рис. 13 представлен схематический принцип измерения, при котором в измеряемую трубу встроены два датчика температуры на базе АВБС, ИФП и модуль нагрева.

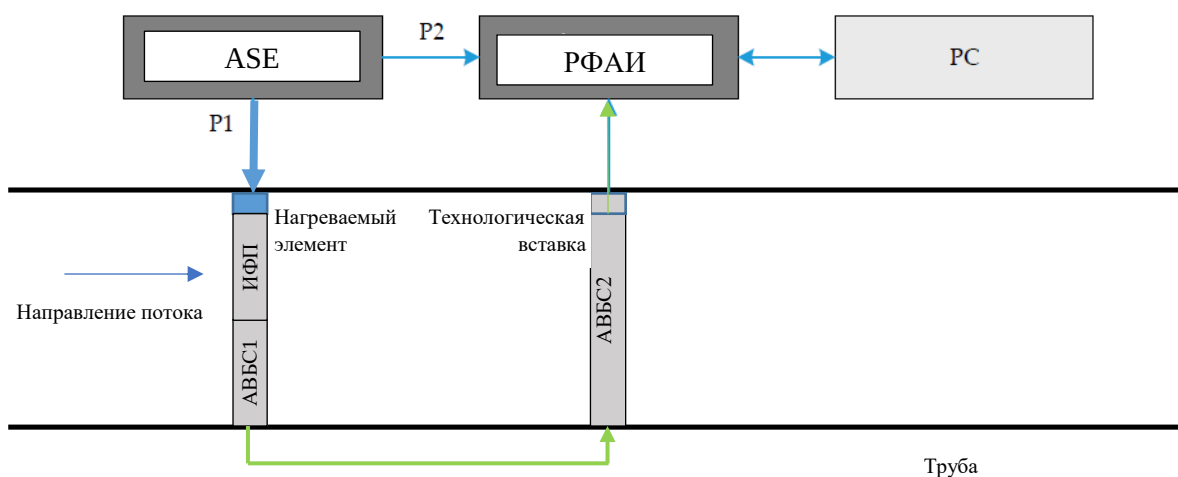


Рис. 13. Схема ТМФ на основе адресных волоконных брэгговских структур и интерферометра Фабри-Перо

В данном варианте АВБС1 выполняет роль опросчика ИФП и выполнена как 3λ -АВБС структура. АВБС2 выполнена как 2λ -АВБС структура. Таким образом анализируемый РФАИ сигнал оптического излучения выглядит аналогично приведенному на рис. 7,б. Разница температур берется между ИФП и АВБС2. Для организации двунаправленного измерения необходимо становить АВБС3 с другой стороны от АВБС1.

5. Предполетное обслуживание и структурное обеспечения безопасности полета в рамках разработки концепции «Волоконно-оптический борт»

Прогнозирование и управление безопасностью полета с точки зрения сенсорной оценки состояния узлов и агрегатов борта стали императивом в аэрокосмической технике, что обусловлено растущей сложностью, стоимостью и требованиями безопасности современных авиационных систем. Основной их целью является точное прогнозирование остаточного ресурса компонентов системы, что способствует проактивному планированию мероприятий по техническому обслуживанию на земле при предполетной подготовке и мгновенной реакции на неисправность на борту во время полета. Это снижает риск непредвиденных аварий, отказов, минимизирует время простоя и улучшает распределение ресурсов.

На основе работ авторов [18-25] была предложена концепция с рабочим названием «Волоконно-оптический борт», отличающаяся дополнительным слоем сенсоров, целевая задача которых - формирование базы данных на стадии предполетной подготовки и в ходе полета, по которым можно определить предполетные установки, структурную целостность и качество работы узлов и агрегатов борта для предотвращения аварийных ситуаций. При

этом данная группа сенсоров подключается к бортовой волоконно-оптической сети передачи данных и управления и является источником информации для системы управления полетом. Следует отметить особенности этой группы сенсоров: они не являются волоконно-оптическими сенсорами, встроенными в композитные структуры фюзеляжа, которые являются предметом исследования многих авторов и организаций, а также не являются сенсорами, определяющими законы движения узлов управления полетной траектории в нормальном полете. Первый этап развития этой концепции, основанной на гибридном прогнозировании безаварийной эксплуатации волоконно-оптического борта представлен на рис. 14.

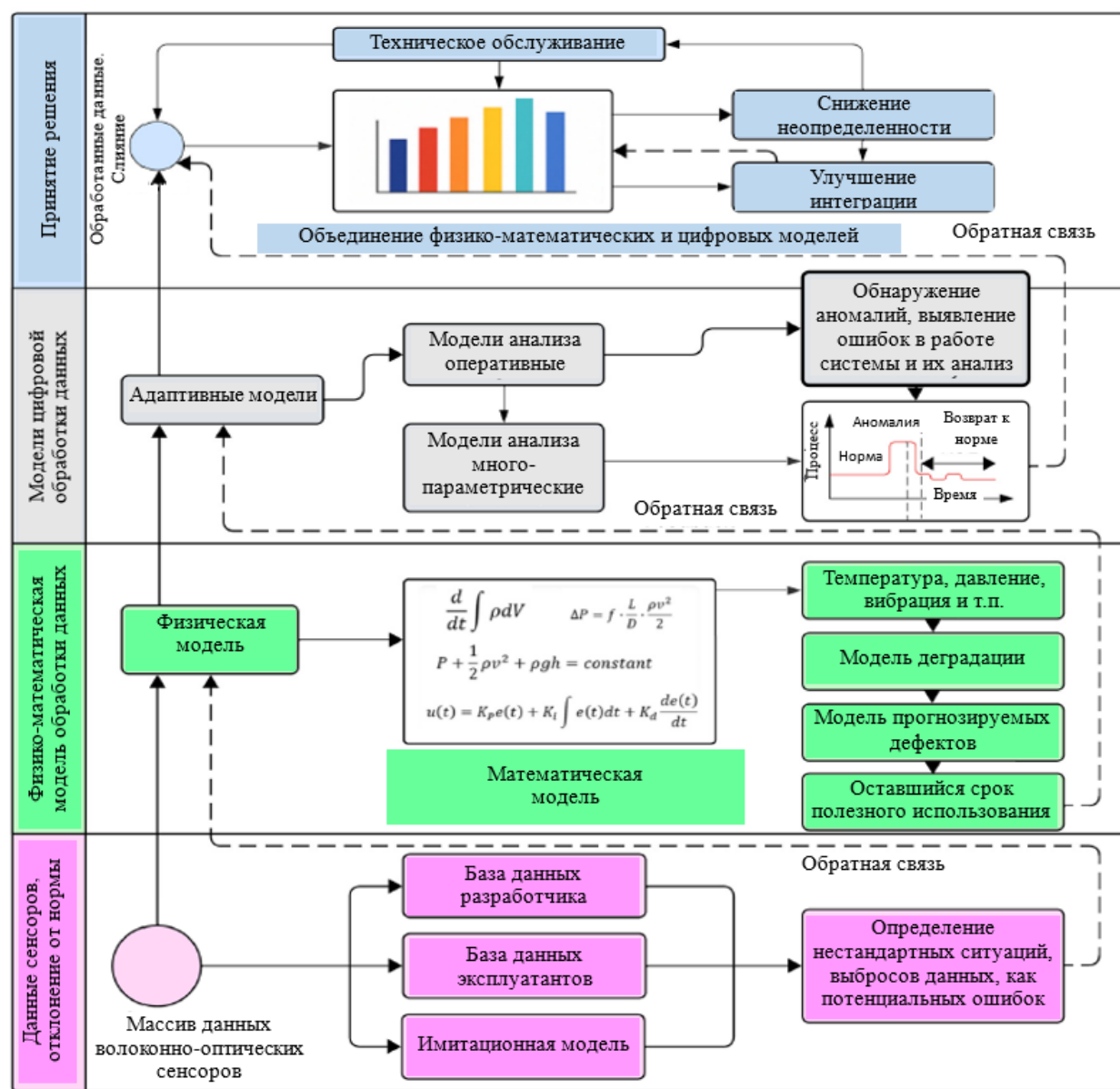


Рис. 14. Гибридная модель прогнозирования безаварийной эксплуатации волоконно-оптического борта

Гибридность модели определяется тремя факторами:

- возможностью использования, кроме волоконно-оптических и самых надежных, доказавших свою безаварийность, или стоимостные преимущества, или временную технологическую невозможность замены электронных сенсоров;

- очевидную пока невозможность применения оптических технологий на стадии цифровой обработки данных;
- применение различных типов моделирования безаварийности полета - на основе решения задач математической физики и на основе цифровой обработки малых (оперативных) и больших (многопараметрических) объемов данных.

Исторически сложилось так, что в прогнозировании безаварийности полета возникли две основные методологии: моделирование на основе решения задач математической физики и моделирование на основе цифровой обработки малых (оперативных) и больших (многопараметрических) объемов данных. Подходы, основанные на физике, основаны на устоявшихся физических принципах и экспертных знаниях в предметной области. Они моделируют поведение системы с помощью дифференциальных уравнений, законов деградации или термодинамических моделей, обеспечивая значительную интерпретируемость и прослеживаемость. Эти стратегии подходят для ситуаций с идентифицированными видами отказов и тщательно охарактеризованными системами. Тем не менее, они часто испытывают трудности с адаптацией к реальной эксплуатационной изменчивости, особенно в условиях непредвиденных или немоделируемых обстоятельств. Более того, они требуют значительных знаний в предметной области и могут повлечь за собой существенные вычислительные затраты для крупномасштабных систем [26].

В отличие от этого, модели, управляемые данными, используют алгоритмы машинного обучения, обученные на данных датчиков, для выявления закономерностей, указывающих на ухудшение состояния или неисправность. Эти подходы обладают внутренней гибкостью и способны моделировать нелинейные взаимодействия, что делает их подходящими для динамических рабочих контекстов. Несмотря на свою адаптивность, модели, управляемые данными, часто подвергаются критике за свою непрозрачность, ограниченную интерпретируемость и необходимость использования значительных объемов высококачественных размеченных данных. Их эффективность может ухудшаться при использовании за пределами области обучения, что называется сдвигом набора данных.

Гибридные прогностические методологии привлекли внимание, поскольку они устраняют ограничения автономных методов. Эти методы направлены на объединение четкого понимания и широкой применимости физических моделей с гибкостью и обучаемостью алгоритмов, управляемых данными. Однако такая интеграция создаёт проблемы при согласовании разрозненных представлений, регулировании распространения неопределённости и обеспечении вычислительной жизнеспособности.

Заключение

В настоящей статье были решены вопросы проектирования бортовой системы контроля веса и балансировки для самолета, предназначенной для предоставления пилоту информации об общем весе и положении центра тяжести всего самолета после загрузки пассажиров и багажа и перед этапом руления. После концептуального проектирования системы была проведена оценка возможности получения данных для бортовой системы при использовании датчиков на основе АВБС при их различных конфигурациях повышенной надежности, установленных на элементах конструкции шасси для одновременного измерения деформации и температуры.

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 РФАИ.

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.

Предложены структуры оптических термоанемометров, которые обладают преимуществом защиты от электромагнитных помех и надежной конструкцией. Специальная конструкция нагреваемого элемента с помощью оптического излучения может гарантировать взрыво- и пожаробезопасность датчика при измерении в среде жидкости, что важно для практического применения. При использовании АВБС и РФАИ появляется возможность строить многосенсорные термоанемометры, снизить стоимость установки за счет замены оптоэлектронного интеррогатора и сужения требуемой полосы излучения ASE. Предложен также метод повышения точности измерений за счет применения внутриволоконного ИФП и система его комбинированного опроса.

Предложена рабочая версия концепции «Волоконно-оптический борт» и надёжный метод прогнозирования в техническом предполетном обслуживании и обеспечения безопасности полета в авиации с кратким обсуждением гибридной модели прогнозирования. Описанные подходы могут быть использованы в других важных отраслях, где требуются точные, понятные и гибкие решения для мониторинга состояния различных объектов.

Список литературы

1. Brindisi A. A multi-scaled demonstrator for aircraft weight and balance measurements based on FBG sensors: Design rationale and experimental characterization / A. Brindisi, S.Ameduria, A. Concilio et al. // *Measurement*. - 2019. - Vol. 141. - P. 113-123.
2. Alhussein A. Fiber Bragg grating sensors: design, applications, and comparison with other sensing technologies / A. Alhussein, M. Qaid, T. Agliullin et al. // *Sensors*. - 2025. - Vol. 25. - P. 2289.
3. Agliullin T. Addressed fiber Bragg structures in load-sensing wheel hub bearings/ T. Agliullin et al. // *Sensors*. - 2020. - Vol. 20(21). - P. 6191.
4. Iele A. Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors / A. Iele, M.Leone, M.Consales et al. // *Sensors and Actuators A: Physical*. - 2018. - Vol. 281. - P. 31-41.
5. Junfeng Ge. Atmospheric icing measurement and online ice type recognition for aircraft utilizing optical fiber sensor and machine learning algorithms / Ge Junfeng et al. // *Measurement*. - 2022. - Vol. 205. - P. 112215.
6. Jun Hua. Fluid flow and thermodynamic analysis of a wing anti-icing system / Jun Hua, Hugh H.T. Liu // *Canadian Aeronautics and Space Journal*. - 2005. - Vol. 51(1). - P. 35-40.
7. Javed Y. A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications / Y. Javed, M. Mansoor, I.A. Shah // *Sensor Rev.* - 2019. - Vol. 39(5). - P. 652–664.
8. Alhussein A. Fiber Bragg grating sensors: design, applications, and comparison with other sensing technologies / A. Alhussein , M. Qaid, T. Agliullin et al. // *Sensors*. - 2025. - Vol. 25. - P. 2289.

9. Morozov O. Addressed combined fiber-optic sensors as key element of multisensor greenhouse gas monitoring systems / O. Morozov, Y. Tunakova, S. Hussein et al. // *Sensors*. - 2022. - Vol. 22. - P. 4827.
10. Шагидуллин А.Р. Постановка задач проектирования волоконно-оптических комбинированных датчиков и многосенсорных систем для регионального мониторинга концентрации парниковых газов / А.Р. Шаги-дуллин, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. - 2021. - № 4 (52). - С. 52-67.
11. 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.
12. Morozov O. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov // *Computer Optics*. - 2019. - Vol. 43(4). - P. 535-543.
13. Agliullin T.A. Overview of addressed fiber Bragg structures' development / T.A. Agliullin, A.Z. Sakhabutdinov, I.I. Nureev et al. // *Photonics*. - 2023. - Vol. 10. - P. 175.
14. Мисбахов Рус.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Рус.Ш. Мисбахов и др. // *Инженерный вестник Дона*. - 2017. - № 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343>.
15. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин и др. // *Труды учебных заведений связи*. - 2020. - Т. 6. - № 1. - С. 6-13.
16. Мисбахов Рус.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Рус.Ш. Мисбахов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. - 2024. - № 2 (62). - С. 77-90.
17. Agliullin T. Comparative analysis of the methods for fiber Bragg structures spectrum modeling / T. Agliullin et al. // *Algorithms*. - 2023. - Vol. 16(2). - 101.
18. Курбиев И.У. Оценка повышения чувствительности ВБР, записанной на дефекте многомодового волокна / И.У. Курбиев и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024. № 7. С. 241-244.
19. Курбиев И.У. Оценка повышения чувствительности ВБР, записанной около дефекта многомодового волокна / И.У. Курбиев и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. - 2024. - № 7. - С. 245-248.
20. Курбиев И.У. Испытательный стенд для определения нагрузки на подшипник с помощью волоконных брэгговских структур / И.У. Курбиев и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. - 2024. - № 7. - С. 249-252.
21. Курбиев И.У. Мониторинг скорости потока жидкости на основе волоконного квази-распределенного контроля температуры. Постановка задачи / И.У. Курбиев и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. - 2024. - № 7. - С. 253-255.
22. Курбиев И.У. Адресные термоанемометры для мониторинга расхода газа на структурах Брэгга и Фабри-Перо с оптическим нагревом / И.У. Курбиев и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. - 2024. - № 7. - С. 256-258.
23. Курбиев И.У. Датчик веса на комбинированных адресных волоконных брэгговских структурах / И.У. Курбиев и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. - 2024. - № 7. - С. 267-270.
24. Курбиев И.У. Microwave photonic approach for optic differential flowmeters on two fiber Bragg gratings / И.У. Курбиев и др. // *2023 Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. - 2023. - Т. 6. - № 1. - С. 395-399.

25. Kurbiev I.U. Interrogator for vibration and shape mode sensing using an address fiber Bragg grating array / I.U. Kurbiev et al. // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. - 2020. - С. 9078576.
26. Kurbiev I.U. Load sensing bearings for automotive applications based on addressed fiber Bragg structures / I.U. Kurbiev et al.// 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO-2019. - 2019. - С. 8814178.
25. Kurbiev I.U. Aero-acoustic Cartography as Nondestructive Method for Turbomachine Rotor Blade Monitoring Based on Fiber Optic Sensors Localized at a Nozzle Cross Selection / I.U. Kurbiev et al. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.- 2019. - С. 111461K.
26. Fu S. Novel Hybrid Prognostics of Aircraft Systems / S. Fu, N.P. Avdelidis, A. Plastropoulos// Electronics. - 2025. - 14. - 2193. <https://doi.org/10.3390/electronics14112193>

SOLUTION OF SPECIFIC PROBLEMS OF PRE-FLIGHT SERVICE AND FLIGHT SAFETY IN THE FRAMEWORK OF "FIBER-OPTIC BOARD" CONCEPT DEVELOPMENT

I.U. Kurbiyev, L.D. Ibragimov, A.A. Sadykov, A.N. Leontyev, S.N. Nigmatullin

Kazan Instrument-Making Design Bureau
1, Sibirsky Trakt st., Kazan, 420061, Republic of Tatarstan

Abstract. Flight control systems of the aircraft are currently built based on two concepts: “Fly-by-wire” and “Fly-by-light”. In development of the latter, we have proposed a concept with the working title “Fiber-optic onboard”, distinguished by an additional layer of sensors, the target task of which is to form a database at the pre-flight preparation stage and during the flight, according to which it is possible to determine the pre-flight settings, structural integrity and quality of operation of the onboard units, so as assemblies in order to prevent emergency situations. In this case, this group of sensors is connected to the onboard fiber-optic data transmission and control network and is a source of information for the flight control system. It is necessary to note the features of this group of sensors: they are not fiber-optic sensors built into the composite structures of the fuselage, which are the subject of research by many authors and organizations, and are not sensors that exclusively determine the laws of motion of the flight trajectory control units in normal flight. In particular, the article considers addressable fiber Bragg structures for the onboard weight and balance control system, parallel end Fabry-Perot interferometers for the icing control system, parallel Fabry-Perot interferometers based on two ultrashort fiber Bragg gratings with different measuring bases for the system of abnormally high pressure and temperature control of units and assemblies, point and quasi-distributed sensor on addressable fiber Bragg structures for the system of movement speed control, absence of blockages and air ingress for working fluids in onboard pipelines. Microwave photonic technologies are used for interrogation of sensor elements..

Keywords: addressable fiber Bragg structure, onboard weight and balance monitoring, end Fabry-Perot interferometer, icing, Fabry-Perot interferometer on two ultrashort fiber Bragg gratings, pressure, temperature, quasi-distributed addressable fiber Bragg structures, liquid flow rate, microwave photonic interrogation.

Статья представлена в редакцию 10 апреля 2025 г.