

EDN: RQCWLN

УДК: 621.383

2.2.6

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА И ЦЕНТРОВКИ САМОЛЁТА НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР С ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

*А. А. Садыков<sup>1</sup>, И. И. Нуреев<sup>2</sup>, Э. В. Белов<sup>2</sup>,  
В. И. Артемьев<sup>2</sup>, О. Г. Морозов<sup>2</sup>, И. Ю. Муравьев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Казанское приборостроительное конструкторское бюро,  
420061, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 1

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ  
420111, г. Казань, Карла Маркса, 10

**Аннотация.** В докладе представлена система датчиков на адресных волоконных брэгговских структурах для реализации системы контроля веса и балансировки самолета. Применение адресных волоконных брэгговских структур позволяет создать бортовой радиопотонный интеррогатор, устойчивый к критическим нагрузкам и вибрации при взлете и посадке. Конструкция сенсорной части, сосредоточена на осях колес и стойке шасси по схеме, позволяющий рассчитать центр масс самолета. Схема сенсоров одноосная и трехосная. Для минимизации числа датчиков они выполнены по схеме на двух волокнах различного типа, пример которых приведен в докладе для измерения температуры и одновременного измерения деформаций. Это позволяет отказаться от отдельных сенсоров компенсации температуры.

**Ключевые слова:** самолет; вес; балансировка; адресная волоконная брэгговская структура; радиопотонный опрос; метод двух параллельных волокон; метод двух волокон; температура; компенсация.

### Введение

Волоконно-оптические датчики, такие как 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], 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.

### Содержание доклада

В докладе 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 цельноволоконный 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, пример которых приведен в докладе для измерения температуры и одновременного измерения деформаций. Это позволяет отказаться от отдельных сенсоров компенсации температуры и минимизировать структуру системы в целом.

## Алгоритм работы системы контроля веса и балансировки

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.

## Радиопотонный интеррогатор

Цельноволоконный 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.

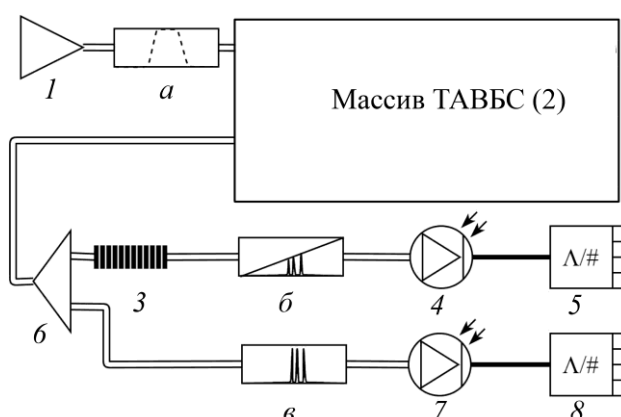


Рис. 2. Функциональная схема радиофотонного интеррогатора:

1 – широкополосный лазерный диод; 2 – массив 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 *а*), соответствующее диапазону измерений, которое поступает на массив ТАВБС *2* (одноосные и трехосные АВБС типа  $3\lambda$ -ВБР [5] для измерения деформаций). Каждая из ТАВБС формирует трехчастотное излучение, которое суммируется в одно общее излучение и поступает на оптический разветвитель *б*, на выходе которого в опорном канале получаем многочастотное лазерное излучение (диаграмма *в*).

Многочастотное излучение проходит и через верхнюю ветвь оптоволоконного разветвителя *б* 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.

### Метод параллельных волокон

Новая конфигурация АВБС [5] достигается путем получения каждой ее волновой составляющей с помощью ВБР ( $FBG_1$  и  $FBG_2$ ) с различными центральными длинами волн  $\lambda_{B1}$  и  $\lambda_{B2}$ , вписанных в отдельные оптические волокна. Эти волокна расположены параллельно и соединены между собой через оптический соединитель  $OC_1$  перед областью записи ВБР и оптический соединитель  $OC_2$  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.

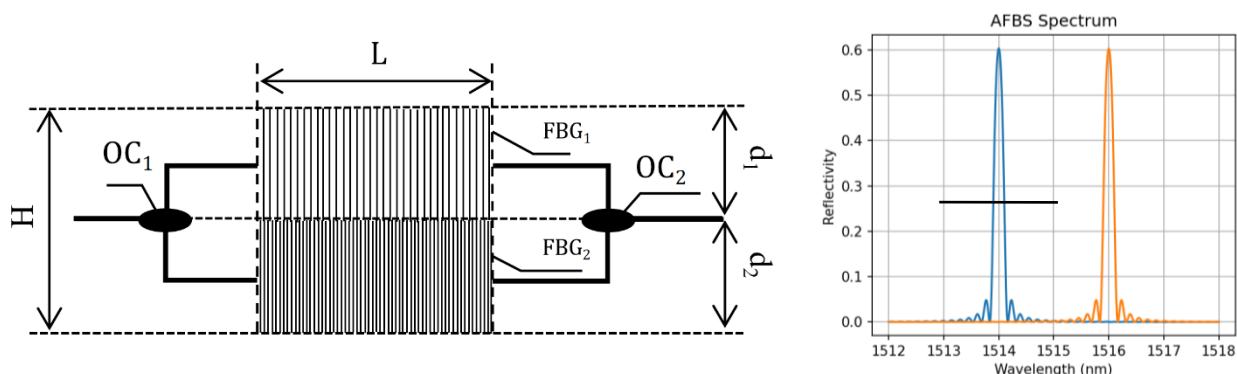


Рис. 3. Двухволоконная схема двухкомпонентной АВБС  $2\lambda$ -АВБС

При воздействии широкополосного лазерного излучения АВБС генерирует отраженный оптический сигнал, состоящий из двух сверхузких частотных компонент, каждая из которых соответствует центральной длине волны соответствующей  $FBG$  ( $\lambda_{B1}$  и  $\lambda_{B2}$ ), что представлено на рис. 3,б. Уникальный радиочастотный интервал  $f_{\text{адр}}$  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  $\lambda_{В3}$ . Тогда в системе появляется три адресных частоты. При установке третьей компоненты между  $\lambda_{В1}$  и  $\lambda_{В2}$   $f_{адр}$  сохраняется, и появляются  $f_{адр1}$  и  $f_{адр2}$ , которые могут быть как одинаковыми, так и разными. Это повышает уровень идентификации каждой АВБС в системе.

### Метод двух волокон

Особенностью метода двух волокон является использование двух волокон с различными коэффициентами теплового расширения  $\alpha$  и различными термооптическими коэффициентами  $\xi$ , в каждом из которых записано две ВБР ( $ВБР_1$  и  $ВБР_2$ ). Если ВБР имеют разные  $\alpha$  и  $\xi$ , 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  $\Lambda$  и длины  $L$ . Центральные длины волн ВБР можно определить с помощью бортового РФИ. Выходные мощности обеих можно просто выразить как функции деформации и температуры:

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

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:

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

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.

### 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 [7, 8], установленных на элементах конструкции шасси для одновременного измерения деформации и температуры.

### 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. 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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Agliullin T. Comparative analysis of the methods for fiber Bragg structures spectrum modeling / T. Agliullin et al. // *Algorithms*. - 2023. – Vol. 16(2). - 101.

## AIRCRAFT WEIGHT AND CENTERING SYSTEM BASED ON ADDRESSED FIBER BRAGG STRUCTURES WITH TEMPERATURE COMPENSATION

*A. A. Sadykov<sup>1</sup>, I. I. Nureev<sup>2</sup>, E. V. Belov<sup>2</sup>, V. I. Artem'ev<sup>2</sup>,  
O. G. Morozov<sup>2</sup>, I. Yu. Murav'ev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kazan Instrument Engineering Design Bureau  
1, Sibirskiy trakt str., Kazan, 420061

<sup>2</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

**Absrtact.** The report presents a system of sensors on addressable fiber Bragg structures for the implementation of the aircraft weight and balance control system. The use of addressable fiber Bragg structures allows creating an onboard radio-photonics interrogator that is resistant to critical loads and vibration during takeoff and landing. The design of the sensor part is concentrated on the wheel axes and the chassis strut according to the scheme, allowing to calculate the center of mass of the aircraft. The sensor scheme is single-axis and three-axis. To minimize the number of sensors, they are made according to the scheme on two fibers of different types, an example of which is given in the report for measuring temperature and simultaneous measurement of deformations. This allows to abandon separate temperature compensation sensors.

**Keywords:** aircraft; weight; balancing; addressable fiber Bragg structure; microwave photonic interrogation; two parallel fiber method; two-fiber method; temperature; compensation.

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.