

## СИСТЕМА СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА ЦЕЛОСТНОСТИ БПЛА НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ РАДИОФОТОННЫХ СЕНСОРОВ

*И.Ю. Муравьёв, Н.А. Петров*

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

**Аннотация.** Предложена радиофотонная система структурного мониторинга работоспособности для беспилотных летательных аппаратов. В её основу положен метод двух волокон, модифицированный путём замены волоконных брэгговских решёток на адресные волоконные брэгговские структуры и использования радиофотонного интерропатора. Система позволяет одновременно измерять температуру и деформацию конструкционных элементов с высокой точностью и исключить влияние электромагнитных помех.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, волоконная брэгговская решётка, деформация, температура.

### Введение

Широкое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в гражданской и военной сферах предъявляет высокие требования к их надёжности и безопасности. Воздействие как внешних, так и внутренних факторов может привести к повреждениям конструкционных элементов БПЛА, что снижает их эффективность выполнения задач. Для своевременного выявления дефектов и предотвращения отказов используются системы структурного мониторинга работоспособности (СМР).

Традиционные методы СМР, основанные на пьезоэлектрических датчиках или электромагнитных волнах [1, 2], имеют ряд ограничений, таких как чувствительность к электромагнитным помехам, сложность монтажа и ограниченная возможность мультиплексирования. Поэтому видится целесообразным применение волоконно-оптических датчиков, в частности на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР), которые лишены этих недостатков, обладают малыми габаритами, устойчивостью к коррозии и позволяют создавать распределённые сенсорные сети [3].

В данной работе предложена радиофотонная система СМР для БПЛА, в основе которой лежит модернизированный метод двух волокон с использованием адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) и радиофотонного интерропатора.

### Материалы и методы

На рисунке 1 представлена блок-схема предложенной СМР системы, которая состоит из сети волоконно-оптических датчиков, встроенных в ключевые конструкционные элементы БПЛА (крылья, фюзеляж). За основу системы был взят метод двух волокон [4], суть которого заключается в использовании двух волокон с записанными в них ВБР, которые позволяют одновременно измерять деформацию и температуру материала, в который они встроены. Принцип работы метода основан на двух ключевых положениях: первое – волокна должны обладать кардинально различной чувствительностью к температуре и/или деформации; второе – отклики ВБР, а именно сдвиги их центральных длин волн, в зависимости от изменения температуры и деформации могут быть описаны суммой независимых функций.

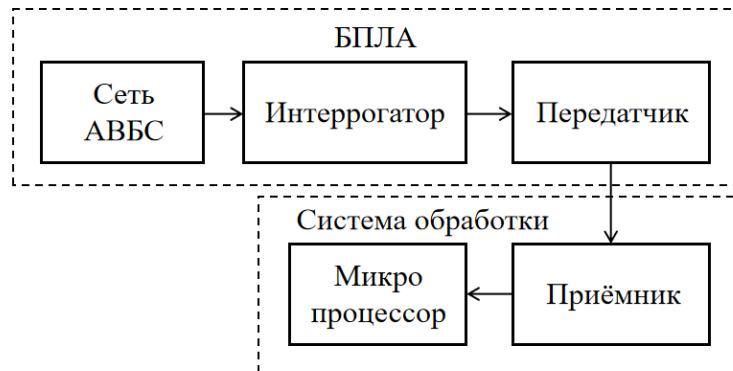


Рис. 1. Блок-схема системы СМР

Далее предлагается переход к комбинированному радиофотонному подходу. В его рамках традиционные ВБР в методе двух волокон заменяются на АВБС параллельной конфигурации [5], а оптико-электронные интерропаторы уступают место радиофотонным. Для обработки результирующих радиочастотных сигналов, которые несут информацию о сдвиге брэгговских длин волн, применяется либо модель измерения коэффициента модуляции, либо быстрое преобразование Фурье всех спектральных компонент биений, возникающих между элементами АВБС.

## Результаты

Разработана архитектура радиофотонной системы СМР, которая позволяет: одновременно измерять деформацию и температуру в различных точках конструкции БПЛА, обеспечивать высокую точность измерений за счёт использования АВБС с узкополосными спектральными характеристиками и исключать влияние электромагнитных помех благодаря применению волоконно-оптических датчиков и радиофотонных методов обработки сигналов.

## Заключение

Предложена радиофотонная система СМР для БПЛА, основанная на модернизированном методе двух волокон с использованием АВБС и радиофотонного интерропатора. Система позволяет проводить высокоточные измерения деформации и температуры в ключевых элементах конструкции, обеспечивая раннее обнаружение повреждений и повышение надёжности БПЛА.

## Благодарность

Авторы выражают благодарность за научное руководство профессору кафедры радиофотоники и микроволновых технологий Морозову О.Г.

## Список литературы

1. Koszewnik, A. Structure analysis in an octocopter using piezoelectric sensors and machine learning / A. Koszewnik, B. Ambrożkiewicz, D. Ołdziej et al. // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 31776.
2. Mälzer, M. Structural Health Monitoring of Aerial Vehicles Using Guided Electromagnetic Waves in K-Band: Initial Damage Detection Results from Drone Flight Testing / M. Mälzer, J. Simon, C. Günner et al. // Applied Science. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 12. – P. 6478.

3. Alvarez-Montoya, J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition / J. Alvarez-Montoya, A. Carvajal-Castrillón, J. Sierra-Perez // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 136. – P. 106526.
4. Артемьев, В. И. Модернизация метода двух волокон для одновременного измерения температуры и деформаций на основе применения радиофотонных технологий / В. И. Артемьев, О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов и др. // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов III Российской научной конференции, Омск. – 2024. – С. 255–257.
5. Муравьёв, И.Ю. Патент РФ № 2841047, МПК G02B 6/34, G01D 5/35316, опубл. 02.06.2025..

## **STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM FOR UAV BASED ON ADDRESS MICROWAVE PHOTONICS SENSORS**

*I.Yu. Muravev, N.A. Petrov*

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

**Abstract.** A microwave photonics structural health monitoring system for unmanned aerial vehicles is proposed. It is based on a two-fiber method modified by replacing fiber Bragg gratings with address fiber Bragg structures and using a microwave photonics interrogator. The system enables simultaneous measurement of temperature and deformation of structural elements with high accuracy and eliminates the influence of electromagnetic interference.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, fiber Bragg grating, deformation, temperature.

Статья представлена в редакцию 23 декабря 2025 г.