

СИСТЕМА СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА ЦЕЛОСТНОСТИ БПЛА НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ РАДИОФОТОННЫХ СЕНСОРОВ

И.Ю. Муравьев, Н.А. Петров

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

Аннотация. Предложена радиотонная система структурного мониторинга работоспособности для беспилотных летательных аппаратов. В её основу положен метод двух волокон, модифицированный путём замены волоконных брегговских решёток на адресные волоконные брегговские структуры и использования радиотонного интеррогатора. Система позволяет одновременно измерять температуру и деформацию конструктивных элементов с высокой точностью и исключить влияние электромагнитных помех.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, волоконная брегговская 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 конструктивных 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 брегговских решёток (ВБР), которые лишены этих недостатков, обладают малыми габаритами, устойчивостью к коррозии и позволяют создавать распределённые сенсорные сети [3].

В данной работе предложена радиотонная система СМР для БПЛА, в основе которой лежит модернизированный метод двух волокон с использованием адресных волоконных брегговских структур (АВБС) и радиотонного интеррогатора.

Материалы и методы

На рисунке 1 представлена блок-схема предложенной СМР системы, которая состоит из сети волоконно-оптических датчиков, встроенных в ключевые конструктивные 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.

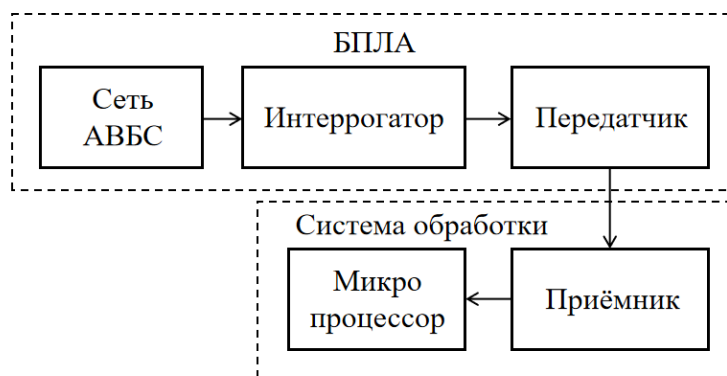


Рис. 1. Блок-схема системы СМР

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 интеррогаторы 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 интеррогатора. 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. Муравьев, 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.