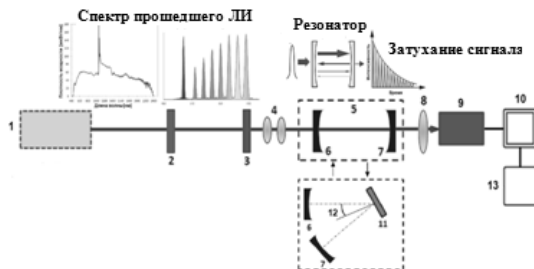


подается на акустооптический перестраиваемый фильтр 2, состоящий из трех наборов кристаллов для спектральных диапазонов от 450 до 700 нм; от 640 до 1100 нм и от 1200 до 2000 нм. Число перестраиваемых полос для каждого спектрального диапазона составляет от 1 до 8 (для спектрального диапазона от 450 до 700 нм представлены полосы во врезке над акустооптическим перестраиваемым фильтром 2). Спектральная ширина полосы может изменяться от 0,5 до 19,8 нм.



1 – суперконтинуумный лазер; 2 – акустооптический перестраиваемый фильтр; 3 – поляризатор; 4 – коллимирующая оптическая система; 5 – исходный резонатор; 6 – входное зеркало; 7 – выходное зеркало; 8 – фокусирующая линза; 9 – фотоприемник; 10 – блок управления и обработки данных; 11 – тестируемый оптический элемент; 12 – угол падения излучения на тестируемый оптический элемент; 13 – компьютер

Рисунок 1 – Блок-схема БИ установки

Установка позволяет проводить измерения как для неполяризованного, так и для линейно поляризованного излучения. С помощью поляризатора 3 неполяризованное излучение, прошедшее через акустооптический перестраиваемый фильтр 2, преобразуется в излучение, линейно поляризованное в плоскости падения либо в ортогональной ей плоскости. С целью согласования мод оптическая система 4 фо-

кусирует пучок излучения в центр оптического резонатора. Излучение многократно проходит внутри резонатора (процесс изображен во врезке над элементом 5), ослабляется, и вышедшее излучение фокусируется с помощью линзы 8 на быстродействующий фотодетектор 9. Сигнал с фотодетектора 9 направляется в блок управления и обработки данных 10. Компьютер 13 производит расчет коэффициентов отражения и оптических потерь, управляет периферийными устройствами (лазером, акустооптическим перестраиваемым фильтром, поляризатором и т. д.) с помощью блока 10, позволяет инициировать и запускать процедуры испытаний, изменять или останавливать их при необходимости. Испытания проводятся в помещении, соответствующем классу чистых помещений 7 согласно ISO 14644-1 [2].

Проведенные исследования показали, что установка позволяет проводить измерения коэффициентов отражения в диапазоне от 98,0000 % до 99,9995 % и оптических потерь от $5 \cdot 10^{-4}$ % до 2 %. Относительная погрешность измерения высоких коэффициентов отражения ($R_s > 99,99$ %) в спектральном диапазоне от 450 до 2 000 нм не превышает 0,0002 %. Измерения можно проводить при углах падения излучения 0° и от 5° до 45° на оптические элементы лазерной и оптоэлектронной техники диаметром от 12 до 55 мм.

Литература

1. СТБ ISO 13142-2025. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Метод внутрирезонаторного затухания для измерений высоких коэффициентов отражения и пропускания. – Введ. 01.01.2025. – Мн.: Госстандарт, 2024. – 24 с.
2. ISO 14644-1:2015. Clean rooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. – 37 p.

УДК 681.782.473;

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

Довжик В. Г., Кузнецик В. О.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье проведен анализ перспективных технологий беспроводного оптического сопровождения (БОС) подвижных объектов. Рассмотрены физические принципы, лежащие в основе данных систем, включая методы формирования и детектирования оптического сигнала, а также проблемы, связанные с распространением излучения в атмосфере. Особое внимание уделено методам компенсации атмосферных помех, таких как турбулентность, затухание и фоновые засветки. Проведено сравнение эффективности различных подходов к построению систем БОС: на основе пассивных и активных меток, а также безмаркерного сопровождения по контрастным признакам объекта. Сформулированы основные направления развития технологий БОС.

Ключевые слова: беспроводное оптическое сопровождение, оптическая связь, оптическое распознавание.

WIRELESS OPTICAL TRACKING SYSTEM

Dovzhik V. G., Kuznechik V. O.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This article analyzes promising technologies for wireless optical tracking (WOS) of moving objects. The physical principles underlying these systems are considered, including methods for generating and detecting optical signals, as well as issues related to atmospheric propagation. Particular attention is paid to methods for compensating for atmospheric interference, such as turbulence, attenuation, and background illumination. The

effectiveness of various approaches to constructing WOS systems is compared: those based on passive and active tags, as well as markerless tracking based on contrasting object features. The main areas of development for WOS technologies are outlined.

Keywords: wireless optical tracking, optical communication, optical recognition.

Адрес для переписки: Довжик В. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dovzhikvlad2000@gmail.com

Прием и передача информации может осуществляться по открытым (воздух, атмосфера, вода) и закрытым каналам (оптическое волокно) связи. Современные задачи в областях робототехники, беспилотной авиации, интеллектуальных транспортных систем и взаимодействия «человек–машина» остро нуждаются в высокоточных, надежных и помехозащищенных системах определения относительного положения и ориентации подвижных объектов. Радиочастотные системы, несмотря на свою распространенность, сталкиваются с проблемами электромагнитной совместимости, ограниченной полосой пропускания и потенциальной уязвимостью для перехвата и подавления.

Альтернативой выступают системы беспроводного оптического сопровождения (БОС), использующие для решения задач навигации и связи электромагнитное излучение оптического диапазона (видимого и ближнего инфракрасного). К их преимуществам относятся:

- Высокая точность и угловое разрешение, обусловленные малой длиной волны.
- Широкая полоса пропускания, позволяющая передавать большие объемы данных телеметрии и видео.
- Безопасность и защищенность от перехвата: оптический луч легко экранировать, а его узкая направленность затрудняет несанкционированный доступ.
- Отсутствие электромагнитных помех и необходимость лицензирования частот.

– Основными проблемами при проектировании систем БОС являются: зависимость от погодных условий (туман, дождь, снег), влияние атмосферной турбулентности, требование точного взаимного наведения приемопередающих апертур на начальном этапе и необходимость обработки больших потоков данных в реальном времени [1].

Применяется беспроводная связь и под водой [2]. Виды подводной связи представлены на рисунке 1.

Наиболее подробно остановимся на атмосферной БОС. БОС делятся на системы с активными метками и пассивные.

Системы с активными метками (beacon-based). На сопровождаемом объекте устанавливается источник оптического излучения (светодиодный или лазерный), положение которого отслеживается высокоскоростной позиционно-чувствительной камерой (PSD) или матричным фотоприемником. Данный подход обеспечивает высокую точность и помехозащищенность, но требует оснащения объекта активным оборудованием.

В системах с активной меткой задача сводится к обнаружению точечного источника на зашумленном фоне. Для решения данной задачи применяются следующие методы:

- Пространственная фильтрация для подавления фона.
- Пороговая обработка с адаптивным выбором порога. Алгоритмы кластеризации (например, k-means) для выделения группы пикселей, соответствующих метке.



Рисунок 1 – Основные виды подводной БОС

В пассивных системах используются более сложные методы компьютерного зрения: выделение признаков (SIFT, SURF, ORB), алгоритмы сегментации и детектирования объектов на основе сверхточных нейронных сетей (CNN).

После обнаружения метки или объекта вычисляются его угловые координаты относительно оптической оси приемника. Для прогнозирования положения в следующий момент времени и компенсации запаздывания системы применяются фильтры оценки состояния, наиболее распространенным из которых является фильтр Калмана [3]. Он позволяет оптимальным образом (в смысле минимума среднеквадратической ошибки) оценить состояние динамической системы (положение, скорость, ускорение) на основе ряда неточных измерений.

БОС может использоваться и в военных целях, например, во втором поколении ПТРК используется беспроводное сопровождение цели, основанное на системе управления, передачи сигналов оператору с помощью которых производится, посредством полуавтоматической системы, наведения по лучу лазера (рисунок 2). Наведение и управление ракеты идет за счет создания лазерного поля управления ракетой. Наводчик устанавливает ракету приблизительно в направлении цели, и совмещает прицельную марку с центром цели. После выстрела

производится автоматический захват ракеты лазерным полем управления и ее выведение на линию визирования. В течение полетного времени траектория ракеты будет совмещена с линией визирования, при необходимости у наводчика есть возможность корректировать полет ракеты при движении цели. С помощью наземной аппаратуры происходит автоматическое сопровождение ракеты, предназначенное для наведения лазерного луча на фотоприемное устройство в течение времени полета ракеты. Работает с помощью видеокамеры, зеркал с сервоприводами, с помощью которых лазерное излучение наводится на ракету [4].

Следует отметить, что перспективным направлением модернизации ПТРК первого поколения является замена катушки с проводом для ее управления на беспроводную систему управления, включающую фотоприемник для принятия лазерного сигнала. Данная модернизация и последующее использование является экономически целесообразнее, чем применение ПТРК третьего поколения с автозахватом цели.

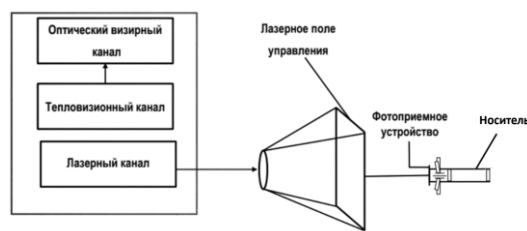


Рисунок 2 – Схема БОС

Литература

1. Кандидов, В. П. Волновые и флуктуационные явления в оптических линиях связи / В. П. Кандидов. – М.: Физматлит, 2018. – 352 с.
2. Обзор ключевых особенностей при построении подводной оптической беспроводной связи / И. И. Павлов [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 14–25.
3. Welch, G. An Introduction to the Kalman Filter / G. Welch, G. Bishop. – UNC-Chapel Hill, 2006. – 16 p.
4. Gappmair, W. Optical Satellite Links: Concepts and Applications / W. Gappmair. – Artech House, 2020. – 285 p.

УДК 535.33, 533.9, 543.423.1

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ И ТОНКИХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Ермалицкая К. Ф., Щерба У. К., Марковская А. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. При проведении элементарного анализа образцов с малыми концентрациями исследуемого вещества, например, покрытий и тонких слоев металлов, наиболее интенсивными в спектре оказываются резонансные линии, для которых характерно явление самопоглощения, выраженного в провале интенсивности спектрального пика. Провал спектрального пика делает невозможным определения точного значения концентрации образца. При уменьшении интенсивности возбуждающего излучения интенсивность резонансного пика падает до уровня шума. Предложена методика управления плотностью мощности лазерного излучения для уменьшения влияния явления самофокусировки. В качестве объекта исследования взят тонкий слой легкоплавкого галлия, нанесенный на тугоплавкую вольфрамовую подложку.

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, лазерная абляция, самопоглощение, управление плотностью мощности.

ELEMENTARY ANALYSIS OF COATINGS AND THIN LAYERS OF METALS BY DOUBLE PULSE LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY

Ermalitskaya K. F., Shcherba U. K., Markovskaya A. V.

Belarussian State University, Minsk, Belarus

Abstract. When conducting an elementary analysis of samples with low concentrations of the studied substance, for example, coatings and thin layers of metals, resonance lines are most intense in the spectrum, which are characterized by the phenomenon of self-ablation, expressed in a dip in the intensity of the spectral peak. The failure of the spectral peak makes it impossible to determine the exact concentration value of the sample. As the intensity of the exciting radiation decreases, the intensity of the resonant peak decreases to the noise level. A technique for controlling the power density of laser radiation is proposed to reduce the effect of the phenomenon of self-focusing. A thin layer of low-melting gallium deposited on a refractory tungsten substrate was taken as the object of the study.

Keywords: laser induced breakdown spectroscopy, laser ablation, self-absorption, power density control.

Адрес для переписки: Ермалицкая К. Ф., ул. Бобруйская, 5, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: ermalka@gmail.com

Цель исследования. Разработать метод проведения прямого микроанализа вещества с сильным влиянием самопоглощения.

Оборудование. Для реализации абляции и снятия спектров излучения использовался

ЛАЭМС спектрометр (рисунок 1). ЛАЭМС спектрометр – японо-белорусский спектрометр, диапазон измеряемых длин волн 190-800 нм, возбуждающий абляцию лазер – Nd:YAG, длина волны лазера 1064 нм.