

На правах рукописи



**ЩЕЛОКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
БЕСКОНТАКТНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ДВУЛУЧЕВОГО  
ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ  
ДВИЖЕНИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ**

Специальность: 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Самара – 2023

Работа выполнена на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Научный руководитель:

**Гладышев Анатолий Иванович**

д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационных технологий и естественнонаучных дисциплин АНО ВО «Российский новый университет», Председатель секции по оборонным проблемам Министерства обороны (при Президиуме Российской академии наук)

Официальные оппоненты:

**Ташлинский Александр Григорьевич**

д.т.н. профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника», ФГБОУ ВО "Ульяновский государственный технический университет"

**Львов Алексей Арленович**

д.т.н профессор, профессор кафедры «Инфокоммуникационные системы и программная инженерия», ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»"

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО "Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина"

Защита состоится «14» декабря 2023 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу: <http://d21221707.samgtu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), тел.: (846) 278- 44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.377.04 (Д212.217.07),  
к.т.н., доцент



Е.Е. Ярославкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Космический мусор и другие динамические объекты, число которых непрерывно возрастает по мере увеличения числа действующих, неисправных и разрушенных космических аппаратов (КА) и ракет-носителей, представляют высокую опасность для целостности и работоспособности космических аппаратов, орбитальных станций и слабо защищённых бортовых систем. К наиболее опасному виду космического мусора относятся микрометеороиды (ММ), которые при малых линейных размерах (от 10 до 100 мкм), но высоких скоростях движения (до 30 км/сек), обладают значительной кинетической энергией и способны пронизывать насквозь весь КА. Потоки ММ приводят к ускоренному старению и износу критических элементов агрегатов и устройств, к сокращению срока эксплуатации КА в целом. К сбору статистической информации по орбитам, скорости, плотности потоков и энергии ММ для создания средств защиты КА в нашей стране и за рубежом приступили сравнительно недавно. Существующие информационно-измерительные системы (ИИС) измерения вектора скорости не обеспечивают ряд требуемых функций и параметров (измерение вектора скорости движения микрометеороидов), поэтому тематика исследований в области разработки методов и ИИС определения параметров движения ММ обладает новизной и актуальностью.

**Степень разработанности темы исследования.** В научно-технической литературе описаны различные методы, бортовые системы и устройства регистрации и контроля параметров микрочастиц космического мусора. Измерению параметров движения и других физических характеристик ММ посвящены научные публикации отечественных и зарубежных авторов: Барышева Е.Ю., Миронова В.В., Зубкова Б.В., Королева И.А., Иванова А.Н., Семкина Н.Д., Суркова И.А., Телегина А.М., Еремеева В.В., Cooke B., Moser D., Mu Z., Sasikumar H., Sheppard W., Tang A. J., Teri M., Walser A., Wang W., Weinzierl B., Xue W., Yi J. и других.

В основу построения наиболее распространенных типов ИИС измерения параметров движения микрометеороидов и устройств положены физические мишени с ограниченными геометрическими размерами зоны регистрации ММ (ЗРМ). В таких системах реализуют широкий спектр контактных методов и средств измерения, главный недостаток которых заключается в быстром накоплении механических повреждений мишеней с соответствующей функциональной деградацией ЗРМ в зависимости от плотности потока, размеров и скорости регистрируемых частиц.

В настоящее время одной из развивающихся областей научных исследований является разработка ИИС определения вектора скорости движения микрометеороидов обеспечивающая увеличение времени штатного функционирования ЗРМ за счет исключения контактирующих с ММ

мишеней. Различные типы бесконтактных ИИС отражены в работах Гейнца Ю.Э., Гладышева А.И., Захарченко В.М., Perenzoni D., Sasikumar N., Ye Z.

За ближайший аналог в работе принята бесконтактная оптоэлектронная ИИС (БОЭ ИИС), в которой реализован метод времяпролетного определения вектора скорости при движении объекта через световые завесы из оптических лучей лазерных диодов, сопряженных с соответствующими фотоприемниками. В работе Захарченко В.М. предложена ИИС однолучевого время-пролетного метода измерения скорости потока, однако она имеет следующие недостатки: низкая разрешающая способность и высокая погрешность измерения скорости движения объектов в априорно заданных ограниченных направлениях и пространственно-временных интервалах.

**Цель работы** – обеспечение безопасности космических аппаратов с помощью расширения функциональных возможностей и снижения погрешности ИИС бесконтактного оптоэлектронного времяпролетного измерения вектора скорости микрометеороидов в окрестности орбит.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) обзор и сравнительный анализ альтернативных методов измерения параметров движения микрометеороидов;
- 2) разработка принципа действия и структурной схемы БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ на основе модифицированного времяпролетного метода с увеличенным числом и расширенным диапазоном измеряемых параметров движения высокоскоростных объектов;
- 3) построение математических моделей формирования световых завес и ЗРМ из групп плоских световых завес (ПСЗ) с различной взаимной пространственной ориентацией, созданных двулучевыми встречно-параллельными лазерными лучами,
- 4) разработка моделей взаимодействия зоны регистрации и ММ;
- 5) анализ погрешностей измерения вектора скорости ММ, разработка способов и средств их компенсации;
- 6) разработка алгоритма самоконтроля работоспособности ИИС;
- 7) проведение вычислительного и лабораторного экспериментов с применением действующего макета БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ.

**Объект исследования.** Бесконтактная оптоэлектронная ИИС определения параметров движения микрометеороидов.

**Предмет исследования.** Методы построения бесконтактной оптоэлектронной ИИС определения параметров вектора скорости ММ.

**Диссертационное исследование** по разработке информационно-измерительной системы бесконтактного оптоэлектронного двулучевого времяпролетного определения вектора скорости движения микрометеороидов

соответствует пунктам 2 и 3 паспорта специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы».

**Научная новизна** заключается в получении следующих результатов:

1. Модифицированный метод двулучевого времяпролетного определения параметров движения микрометеороидов и реализующие его структуры бесконтактной оптоэлектронной ИИС, которые, в отличие от известных аналогов, позволяют получать в реальном времени оценки значений всех трех компонент вектора скорости и геометрических размеров микрометеороидов в расширенном диапазоне скоростей и углов влета микрометеороидов в зону регистрации микрометеороидов;
2. Методика формирования зон регистрации микрометеороидов, отличающиеся использованием групп плоских световых завес из спектрально разнесенных парных встречно-параллельных лазерных лучей микронного диаметра, многократно отраженных парными параллельными зеркальными плоскостями, обладающие, в отличие от известных аналогов, возможностью измерять все три координаты мест прерывания плоских световых завес микрометеороидом;
3. Методика измерения параметров вектора скорости микрометеороидов, отличающаяся от известных согласованием геометрических и энергетических параметров плоских световых завес, что существенно снижает погрешность измерений;
4. Математическая модель взаимодействия микрометеороидов и модифицированных зон регистрации микрометеороидов, учитывающая геометрические размеры, скорость микрометеороидов и основные конструктивные параметры зон регистрации микрометеороидов, что позволяет производить рациональный выбор конструкции этих зон и получать достоверные оценки погрешности вариантов исполнения ИИС;
5. Алгоритм самоконтроля работоспособности ИИС, основанный на периодическом тестовом прерывании формирующего плоскую световую завесу лазерного луча, использование которого повышает достоверность измерения и позволяет существенно продлить срок эксплуатации ИИС. Аналоги данного алгоритма в известных системах регистрации микрометеороидов отсутствуют.

**Теоретическая значимость** исследования состоит в том, что предложенная математическая модель зоны регистрации БОЭ ИИС в отличие от аналогов учитывает:

- } закономерности движения ММ в зоне полета КА;
- } закономерности отражения лазерного луча микронного диаметра от ММ и от зеркальных поверхностей световых завес;

- } особенности взаимодействия ММ с однокоординатными двулучевыми встречно-параллельными ПСЗ, позволяющими определять линейные размеры ММ;
- } взаимосвязь пространственно-временных и энергетических параметров устройств и элементов ЗРМ.

За счет этого повышается чувствительность ИИС к минимальным размерам регистрируемых частиц (до 1 мкм), вводится дополнительная функция измерения геометрических параметров ММ, расширяются углы влета ММ в ЗРМ и повышается верхняя граница измеряемой скорости пролета ММ через ЗРМ. Указанные свойства позволяют создать БОЭ ИИС контроля параметров движения ММ, обеспечивающие расширение геометрических границ ЗРМ, увеличение достоверности обнаружения и уменьшение погрешности измерения вектора скорости и геометрических размеров ММ.

**Практическая значимость** заключается в:

- } действующих макетных образцах БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ, построенных на отечественной элементной базе, что позволяет реализовать промышленный образец системы с заданными функциональными и метрологическими характеристиками;
- } стендовом комплексе для проведения исследования и оценки метрологических характеристик БОЭ ИИС;
- } результатах моделирования и экспериментальных исследований БОЭ ИИС на стендовом комплексе.

**Достоверность полученных результатов** проведённого исследования обеспечивается корректностью математической модели, подтвержденной сравнением результатов, полученных экспериментальным и теоретическим путем. Результаты экспериментальных исследований получены с использованием аттестованных средств измерения, которые подтверждают основные теоретические положения работы и не противоречат известным положениям в данной области исследований.

**На защиту выносятся:**

- 1) Модифицированный метод двулучевого времяпролетного определения параметров движения микрометеороидов и реализующие его структуры бесконтактной оптоэлектронной ИИС для получения в реальном времени оценки значений всех трех компонент вектора скорости и геометрических размеров микрометеороидов в расширенном диапазоне скоростей и углов влета микрометеороидов в зону регистрации микрометеороидов.
- 2) Методика формирования зон регистрации микрометеороидов на основе использования групп плоских световых завес из спектрально разнесенных парных встречно-параллельных лазерных лучей микронного диаметра, многократно отраженных парными параллельными зеркальными плоскостями.

- 3) Методика измерения параметров вектора скорости микрометеороидов, использующая согласование геометрических и энергетических параметров плоских световых завес.
- 4) Математическая модель взаимодействия микрометеороидов и модифицированных зон регистрации микрометеороидов, учитывающая геометрические размеры, скорость микрометеороидов и основные конструктивные параметры зон регистрации микрометеороидов.
- 5) Алгоритм самоконтроля работоспособности ИИС, основанный на периодическом тестовом прерывании формирующего плоскую световую завесу лазерного луча.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 международных и всероссийских конференциях, в том числе на IV всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники», IV Козловские чтения, (г. Самара, 2015 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (г. Самара, 2015, 2016, 2017, 2023 г.); III Всероссийском форуме с международным участием «Космическое приборостроение» (г. Томск, 2015 г.); XX Международной научной конференции «Системный анализ, навигация и управление» (г. Алушта, 2015 г.); XII Национальной научно-технической конференции «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2015 г.); XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, (г. Королев, 2017 г.); I Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире» (г. Москва, 2022 г.); LI Международной научно-практической конференции «EurasScience» (г. Москва, 2022 г.).

Работа по теме диссертации отмечена дипломами МАИ в рамках «Конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», Ракетно-космической корпорацией «Энергия» имени С.П. Королева в рамках «XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов.

**Авторский вклад.** Все результаты, определяющие научную новизну диссертационной работы, получены автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты – структурная схема и алгоритм функционирования ОЭБ ИИС, математические модели световой завесы, математические модели взаимодействия микрометеороида и световых завес в ЗРМ при измерении координат и вектора скорости ММ, анализ ошибок пропуска ММ, анализ погрешностей измерения вектора скорости ММ и методов их уменьшения, макет устройства, результаты экспериментальных исследований лабораторного образца ОЭБ ИИС.

**Реализация результатов работы.** Варианты разработанных математических моделей, а также результаты исследования БОЭ ИИС преобразования вектора скорости ММ реализованы в:

- } АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) на стенде для регистрации параметров движения микрометеороидов, с последующей возможностью внедрения в состав оборудования космических аппаратов;
- } учебном процессе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарского научно-исследовательского университета имени академика С.П. Королева» (г. Самара) по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы по дисциплине «Устройства преобразования информации в радиотехнических системах».

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах [1-15], в том числе 3 в российских рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ, 1 в рецензируемых изданиях Scopus, 1 патент.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов и рекомендаций, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 117 наименований. Общий объём диссертации составляет 148 страниц, 56 иллюстраций, 2 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** описан объект исследования, обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения и сведения об апробации работы и публикациях.

**В первой главе** рассматривается состояние теории и практики в области ИИС определения параметров движения объектов, выполнена классификация систем. Предложен вариант модификации структурной схемы и принцип работы БОЭ ИИС определения параметров движения ММ. Определены этапы исследования и ожидаемые результаты.

Показано, что в контактных ИИС, чувствительными элементами которых являются мишени, плотные потоки микрочастиц подвергают их повреждениям и деградации, что отрицательно сказывается на достоверности и погрешности последующих измерений и на времени эксплуатации системы.

Тематика исследований по бесконтактным ИИС, благодаря теоретическим и практическим достижениям в области лазерной техники, волоконной оптики и оптоэлектроники, оценивается как актуальное научное направление.



С учетом поставленной цели и решаемых задач разработана представленная на рис. 1 структурная схема БОЭ ИИС определения компонент  $V_{Mx}, V_{My}, V_{Mz}$  вектора скорости  $\vec{V}_M$  движения ММ.

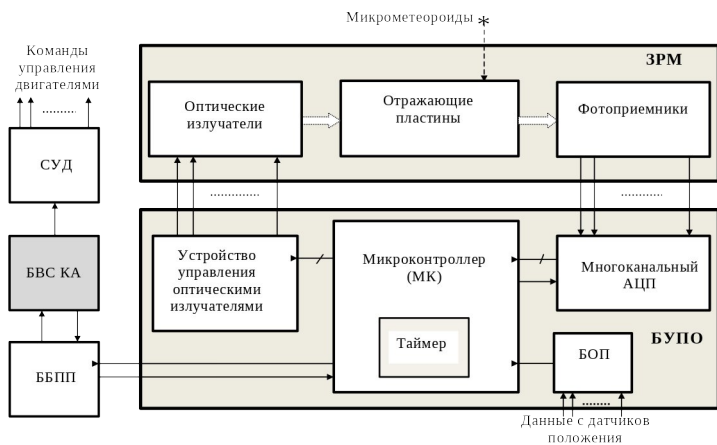


Рисунок 1 – Структурная схема БОЭ ИИС

Структурными элементами, определяющими функциональные возможности ИИС и погрешность измерения параметров движения ММ являются оптические излучатели, фотоприемники, отражающие плоскости и таймер в составе микропроцессора. Выносные блоки зон регистрации метеороидов и сопряженный с ними выносной блок управления и первичной обработки данных (БУПО) размещаются на расстоянии до нескольких километров от КА. БУПО располагается рядом с ЗРМ на удалении до нескольких метров. Связь между БУПО и бортовой вычислительной системой КА (БВС КА) осуществляется по радиоканалу через блок беспроводных передатчиков (ББПП). Микроконтроллер (МК) осуществляет управление следующими режимами работы: подача питания на устройства управления излучателями и фотоприемниками (ФП), ввод в многоканальный АЦП сигналов с ФП; сбор и обработка принятой с АЦП информации; сбор, систематизация и передача измерительной информации и данных о состоянии и пространственном положении выносных блоков с блока определения положения (БОП) в БВС КА для выработки заданий в систему управления движением (СУД) выносных блоков.

Система измеряет координаты и время пролета объекта через ЗРМ из группы координатно-чувствительных плоских световых завес, формируемых источниками излучения, отражающими пластинами и фотоприемниками. Известные типы ЗРМ состоят из ПСЗ двух типов: светодиодных и лазерных. В баллистических измерительных системах типа ФЭД-7М две параллельные

друг другу ПСЗ А и В смещены между собой на расстояние  $l_z$  вдоль оси  $z$  движения объекта и нормальны к этой оси. Измеряется только проекция вектора скорости на ось  $z$ :  $V_z = l_z / (T_z^{B-} - T_z^{A-})$   $-\mathbf{V}_{MM} = \frac{l_z}{(T_{z2} - T_{z1})}$ , где  $T_z^{A-}$  и  $T_z^{B-}$  – начальные значения интервала запирания лазерных лучей в ПСЗ А и В соответственно.

В ИИС с лазерными ЗРМ световая завеса формируется многократным отражением луча от двух параллельных разнесенных между собой на высоту  $l_y$  пластин с зеркальным покрытием длиной  $l_x$  таким образом, чтобы шаг  $b_x$  лучевой сетки был меньше минимально допустимого размера  $D_x$  объекта, а луч после всех отражений от пластин при отсутствии объекта попадал по заданной траектории на ФП (рис. 2а). Высота ПСЗ зависит от цены  $\delta t$  деления шкалы таймера, временные отсчеты которого точно совпадают с пространственными точками отражения лучей от зеркальных пластин. Объект, проходя через световую завесу, прерывает луч на время, которое измеряется таймером. К достоинствам таких ИИС относятся высокая производительность и широкий диапазон измеряемых скоростей. К недостаткам – узкая апертура зоны регистрации, определение только координаты  $z$  и составляющей  $V_z$  вектора скорости  $\vec{V}$  объекта; отсутствие учета и компенсации влияния  $N_{отр}$  отражений лазерного луча, внешних и внутренних фоновых засветок на погрешность измерения.

Задачи расширения функциональных возможностей и снижения погрешности определения вектора скорости ММ возлагаются на блоки ЗРМ, вынесенные на расстояние до нескольких километров от КА, к которому физически и информационно привязана ЗРМ. Поставленные цели и решаемые задачи обуславливают разработку математических моделей ЗРМ, позволяющих вводить и оценивать результаты изменения структуры и функционирования системы.

**Во второй главе** приведены принципы построения координатно-чувствительных ПСЗ и ЗРМ, реализующих модифицированный метод двулучевого встречно-параллельного времяпролетного измерения вектора скорости ММ, и математические модели их функционирования.

При построении моделей ПСЗ и ЗРМ учитывались следующие требования:

- плотность ПСЗ должна обеспечивать исключение пропуска ММ в ЗРМ и минимальную достижимую погрешность измерения;
- количество ПСЗ, их пространственное положение и ориентация должны обеспечивать достаточную апертуру захвата и минимальную достижимую погрешность измерения;
- энергетические параметры световых лучей с учетом объема ЗРМ и диапазона размеров и скоростей ММ должны учитывать фоновое излучение.

На рис. 2 показаны варианты построения однолучевой ПСЗ (а) и двулучевой встречно-параллельной ПСЗ (б). Слепые зоны  $S_m$  обозначены темным цветом. Коэффициент заполнения ПСЗ  $k_{псз} = (S_{сз} - S_m) / S_{сз}$ , где  $S_{сз}$  – площадь световой завесы,  $S_m$  – общая площадь слепых зон.

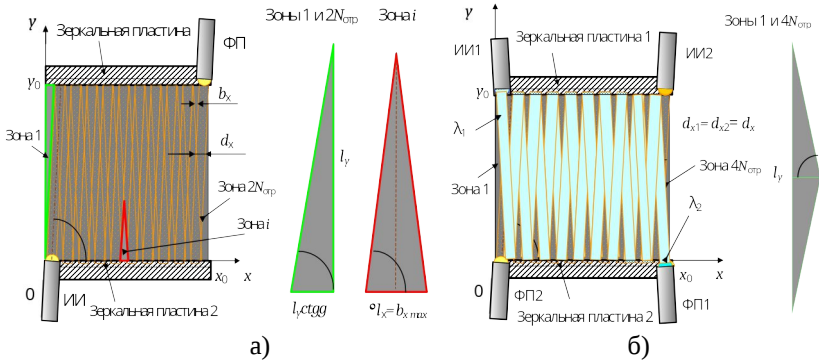


Рисунок 2 – Однолучевая ПСЗ (а) и двулучевая встречно-параллельная ПСЗ (б); ИИ – источник излучения; ФП – фотоприемник;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – значения центральных длин волн ИИ1 и ИИ2 соответственно ( $\lambda_1 \neq \lambda_2$ );  $\Delta l_x = b_{xmax}$  – расстояние между смежными лучами на зеркальной пластине

Коэффициенты заполнения однолучевой и двулучевой встречно-параллельной ПСЗ при  $d_{x1} = d_{x2} = d = b_{xmax} = \Delta l_x$  и  $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$  равны соответственно:

$$k_{з1} = 1 - \frac{2(N_{отр}-1)dctg\vartheta}{l_x} - \frac{d^2tg^2\gamma}{2l_y l_x} \quad (1)$$

$$k_{з2} = 1 - \frac{l_y ctg\gamma}{l_x} \quad (2)$$

где  $N_{отр}$  – количество отражений лазерного луча от зеркальных поверхностей;  $d_x$  – размер луча по оси  $x$ ;  $\vartheta$  – угол луча ИИ относительно оси  $x$ ;  $l_x$  и  $l_y$  – длина и высота ПСЗ соответственно;  $b_x$  – расстояние между смежными лучами по оси  $x$ .

В работе предложен модифицированный метод двулучевого встречно-параллельного времяпролетного определения скорости ММ. Расширение количества и диапазонов определяемых параметров обусловлено измерением интервалов лучепрерывания в ЗРМ из группы  $I$  пространственно смещенных взаимно параллельно и ортогонально ориентированных ПСЗ с большим значением  $S_{сз}$ . В соответствии с математической моделью взаимодействия ММ и ЗРМ в процессе пролета ММ через ЗРМ определяются координаты  $(x_{mi}, y_{mi}, z_{mi}, i=1)$ , размеры  $(D_{mx}, D_{my}, D_{mz})$  и вектор  $\vec{V}_M$  скорости ММ. На рис. 3 на примере ЗРМ из двух пространственно совмещенных  $x$ - и  $y$ -координатных ПСЗ  $A_{xy}$  и  $B_{xy}$ , разнесенных по оси  $z$  на расстояние  $l_z$ , показан принцип

определения и размеров ММ по результатам измерения интервалов времени лучепрерывания на входе (точка  $M^A(x_M=0 \dots l_y; y_M=0 \dots l_y; z_M=0)$ ) и на выходе (точка  $M^B(x_M=0 \dots l_x; y_M=0 \dots l_y; z_M=l_z)$ ) ММ из ЗРМ. На рисунке 4 проиллюстрирована модель взаимосвязи времени и координаты лучепрерывания в  $x$ -координатной ПСЗ  $A_x$ .

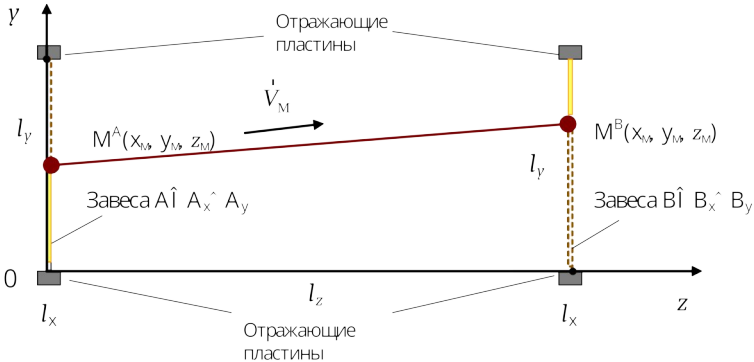


Рисунок 3 – Проекция на координатную плоскость  $Oyz$  траектории полета ММ от ЗРМ А к параллельной ей ЗРМ В, смещенной по оси  $z$  на величину  $l_z$

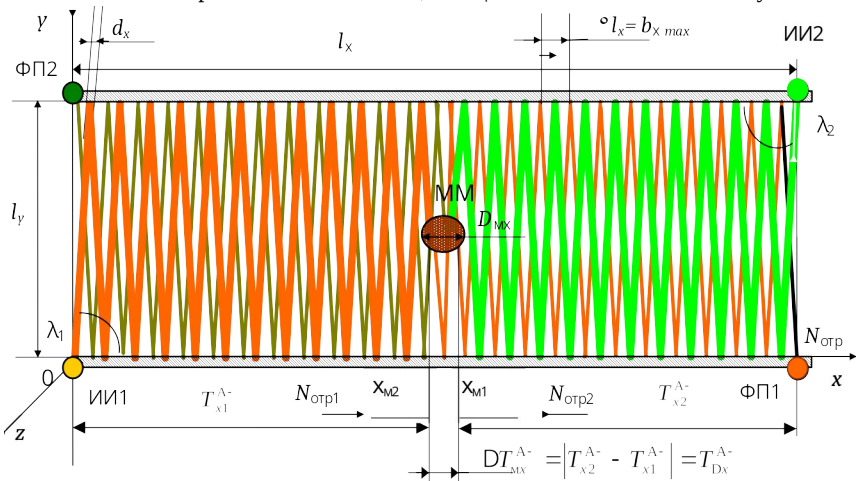


Рисунок 4 – Взаимосвязь времени начала прерывания лучей ИИ1 ( $T_{x1}^{A-}$ ) и ИИ2 ( $T_{x2}^{A-}$ ) с положением ММ в  $x$ -координатной ПСЗ  $A_x$

В диссертации разработан ряд математических соотношений, связывающих параметры ММ и модифицированных зон регистрации ММ, учитывающих геометрические размеры, скорость ММ и основные конструктивные параметры ЗРМ, которые составили математическую модель

ИИС. На рисунке 5 представлен алгоритм работы измерительного канала системы, построенного на базе разработанной математической модели. При запуске ИИС задаются значения констант, определяемые геометрическими и энергетическими параметрами ЗРМ, и шкала времени  $T_{\text{ц}}$  цикла измерения, ориентированная на нижний предел диапазона измеряемых скоростей ММ. Далее система формирует завесы, контролирует синхронность их работы и вводит в режим ожидания ММ. При влете ММ в ЗРМ в момент начала интервала прерывания первого луча запускаются цикл и шкала измерения интервалов прерывания лучей во всех завесах (см. рис. 3 и 4). По этим значениям определяются координаты ММ в ЗРМ, их геометрические параметры и составляющие вектора скорости. Если за время движения в ЗРМ одного ММ в нее не входят другие объекты, то системой определяются его размеры и скорость. После вылета ММ из ЗРМ система возвращается в режим ожидания. Например, при влете ММ в составную завесу А сначала измеряются значения  $T_{x1}^{A-}$  и  $T_{x2}^{A-}$  начала интервала прерывания лучей ИИ1 ИИ2 в завесе  $A_x$  и значения  $T_{y1}^{A-}$  и  $T_{y2}^{A-}$  начала интервала прерывания лучей в ИИ3 и ИИ4 в совмещенной с ней завесе  $A_y$  (рис. 6). Для пространственно-временного и энергетического согласования завесы  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $B_x$ ,  $B_y$  исполняются с идентичными геометрическими и энергетическими параметрами с разными длинами волн ИИ.

Пусть запуск шкалы таймера происходит по лучу от ИИ1 в завесе  $A_x$ . Тогда  $T_{x1}^{A-}=0$  – начало шкалы времени, и в дальнейших расчетах используется значение  $D_{\text{мх}}$ , полученное по результатам измерения времени лучепрерывания в завесе  $B_x$ .

В силу идентичности размеров завес ( $l_x = l_y$ ) тестовое время  $T_{\text{сз}+}$  формирования и  $T_{\text{сз}-}$  отключения завес без ММ равно

$$T_{\text{сз}} = T_{\text{сз}-} = T_{\text{сз}+} = \frac{N_{\text{отр}} l_y}{c \sin(\gamma)} = \frac{N_{\text{отр}} l_x}{c \sin(\gamma)} \quad (3)$$

Тогда по значению  $T_{x2}^{A-}$  можно получить время начала интервала отключения луча ИИ1 относительно условно смещенного назад времени запуска шкалы таймера как

$$T_{x1}^{A-} = T_{\text{сз}} - T_{x2}^{A-} - T_{D\text{мх}}^A = T_{x1}^{B-} + T_{x2}^{B-} - T_{x2}^{A-}, \quad (4)$$

Для определения геометрических размеров  $D_{\text{мх}}^B$  (см. рис. 4) и координаты  $x_{\text{м}0}^B$  центра ММ по оси  $x$  в завесе  $B_x$  используется время начала интервалов прерывания лучей от ИИ1 и ИИ2 (см. рис.6):

$$T_{Dx}^B = T_{\text{сз}} - (T_{x1}^{B-} + T_{x2}^{B-}), \quad (5)$$

$$T_{\text{м}0x}^B = T_{x1}^{B-} - \frac{T_{\text{сз}} - (T_{x1}^{B-} + T_{x2}^{B-})}{2} = \frac{T_{\text{сз}} + T_{x1}^{B-} - T_{x2}^{B-}}{2}. \quad (6)$$

где  $T_{Dx}^B$  – время, пропорциональное размеру  $D_{Mx}^B$ ;  $T_{x0}^B$  – время, пропорциональное координате  $x_{M0}^B$ .

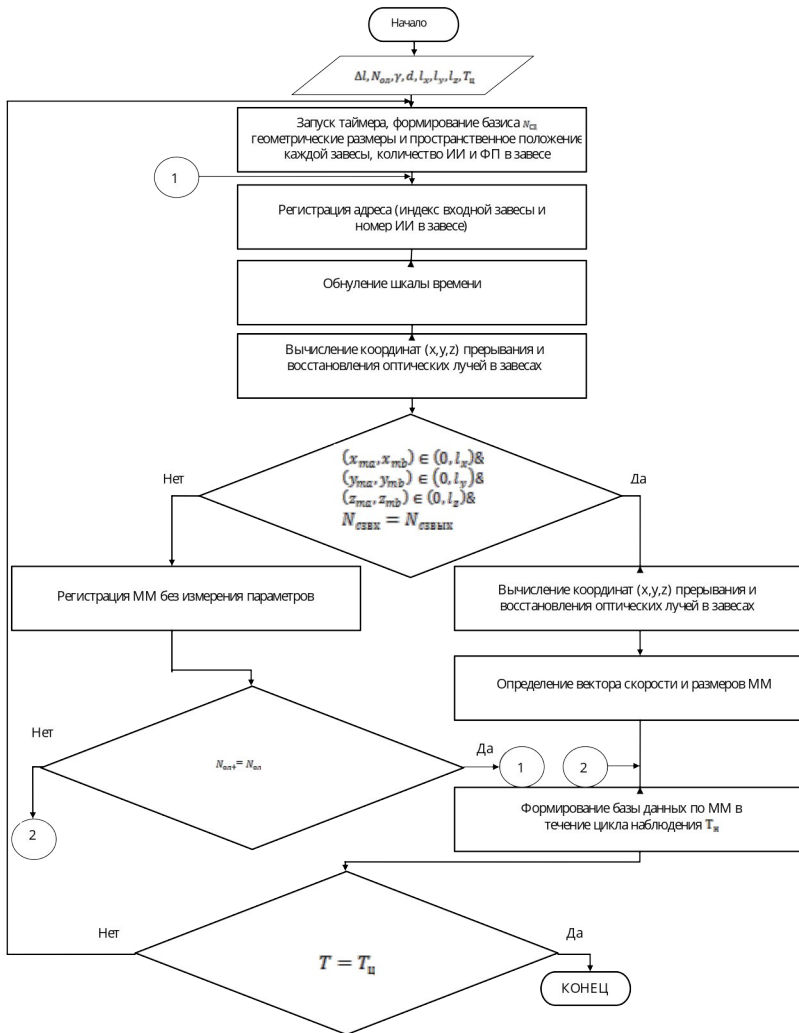


Рисунок 5 – Алгоритм определения параметров ММ

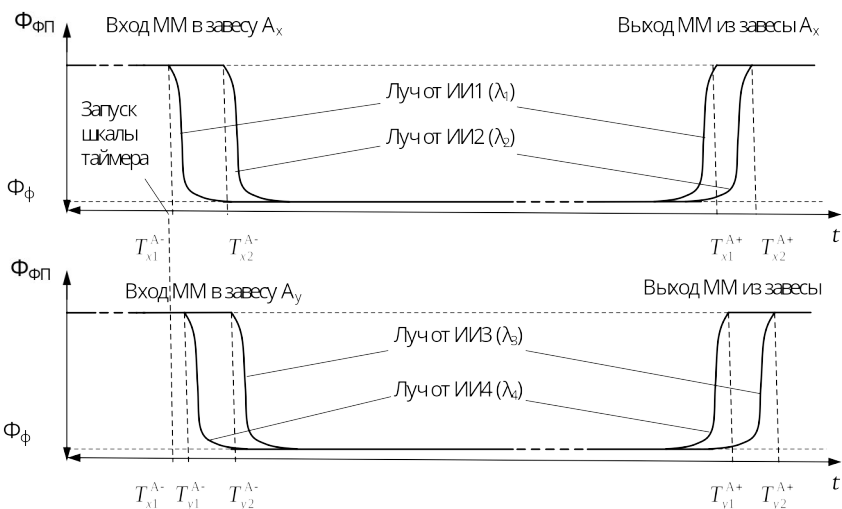


Рисунок 6 – Измерение интервалов лучепрерывания ИИ1-ИИ4 в ПСЗ  $A_x$  и  $A_y$  для определения координат и геометрических размеров ММ

С учетом траектории многократно отраженного луча, задается координатная ось  $x$ , которая при точном пространственно-временном согласовании шкалы цикла работы таймера  $T_{\text{ц}}$  с пространственными шкалами  $l_x$  и  $l_y$  завес дает точное значение координаты центра ММ  $x_{M0}^B$  и размера  $D_{Mx}^B$  ММ по оси  $x$ :

$$x_{M0}^B = cT_{x0}^B \cos(\gamma), \quad D_{Mx}^B = cT_{DMx}^B \cos(\gamma), \quad (7)$$

Аналогичным способом в соответствии с (3-7) определяются значения координат  $x_M^A, y_M^A, y_M^B$  и геометрические размеры  $D_{Mx}^A, D_{My}^A, D_{My}^B$ . Координаты движения центра ММ по оси  $z$  известны априорно:  $z_{M0}^A = 0, z_{M0}^B = l_z$ .

Размер  $D_{Mz}$  определяется после определения компоненты  $V_{Mz}$  вектора скорости ММ измерением интервала прерывания любого луча в любой завесе, например, измерением интервала прерывания луча ИИ2 в завесе  $A_x$  (см. рис. 3 и 4):

$$D_{Mz} = D_{Mz}^A = V_{Mz} \left| T_{x2}^{A+} - T_{x2}^{A-} \right| \cos(\alpha_z), \quad (8)$$

Если считать, что ускорение  $d\vec{V}_M/dt = 0$ , то по полученным значениям координат  $x_M, y_M$  и интервалов лучепрерывания в завесе А ( $T_{Mz}^A = 0$ ) и в завесе В ( $T_{Mz}^B$ ) измеряется промежуток времени  $T_{Mz}^B - T_{Mz}^A = T_{Mz}^B$  между началом пересечения родственных координатно-чувствительных завес плоскостей А и В и далее в соответствии с моделью (3) – (8) взаимодействия ММ и ЗРМ

после получения значений координат лучепрерывания и размеров ММ определяются модуль вектора скорости

$$|\vec{V}_{MM}| = \sqrt{\left(\frac{x_M^B - x_M^A}{T_{Mx}^B - T_{Mx}^A}\right)^2 + \left(\frac{y_M^B - y_M^A}{T_{My}^B - T_{My}^A}\right)^2 + \left(\frac{l_z}{T_{Mz}^B}\right)^2} \quad (9)$$

и углы его направления в пространстве

$$\alpha_x = \arccos\left(\frac{x_M^B - x_M^A}{|\vec{V}_{MM}|(T_{Mx}^B - T_{Mx}^A)}\right); \quad \alpha_y = \arccos\left(\frac{y_M^B - y_M^A}{|\vec{V}_{MM}|(T_{My}^B - T_{My}^A)}\right); \quad (10)$$

$$\alpha_z = \arccos\left(\frac{l_z}{|\vec{V}_{MM}|T_{Mz}^B}\right).$$

При решении задачи согласования пространственно-временных и энергетических параметров ЗРМ получено выражение для максимально возможного количества отражений  $N_{отр}$  луча с учетом априорно известных энергетических параметров оптоэлектронных устройств и коэффициента отражения зеркальных пластин:

$$N_{отрmax} = \log_{k_{отр}}\left(\frac{\Phi_{пор}}{\Phi_0}\right) \quad (11)$$

( )  $E(\lambda, W) \ni E_d(\xi(\lambda)) \beta(\Phi П, \Phi И, K_3)$ , где ( )  
 $\beta(\Phi П, \Phi И, K_3) = K_3^{N_{отр}}$ ;  $\Phi_0$  – световой поток на выходе ИИ;  $\Phi_{пор}$  – порог чувствительности ФП,  $k_{отр}$  – коэффициент отражения зеркальной поверхности.

**В третьей главе** на основе математической модели взаимодействия ММ с ЗРМ разработана методика анализа погрешности определения вектора скорости ММ и пути улучшения метрологических характеристик предложенных методов.

Результирующая погрешность измерительной системы параллельного типа, к которым относится разработанная система, складывается из методической погрешности измерения, цифрового преобразования времени в пространственные показатели и из инструментальной погрешности ЗРМ. При определении полной погрешности БОЭ ИИС учитывается идентичность всех однокоординатных ПСЗ.

Погрешности элементов и каналов измерительной части системы будем считать независимыми друг от друга, тогда полная инструментальная погрешность измерительной части ИИС равна (рис. 7)



$$E_0 = \sqrt[1,4]{\sum_{j=1}^J E_{1,j}^2 + \sum_{j=1}^J E_{2,j}^2 + \sum_{j=1}^J E_{3,j}^2 + \sum_{j=1}^J E_{4,j}^2 + E_5^2} \quad (12)$$

где  $E_{1,1} - E_{1,J}$  – погрешности ИИ;  $E_{2,1} - E_{2,J}$  – погрешности однолучевых световых завес;  $E_{3,1} - E_{3,J}$  – погрешности ФП;  $E_{4,1} - E_{4,J}$  – погрешности усилителей-компараторов, АЦП и прочей ЭКБ;  $E_5$  – погрешность таймера;  $J=8$  – количество измерительных каналов (представленные погрешности имеют нормальный закон распределения).

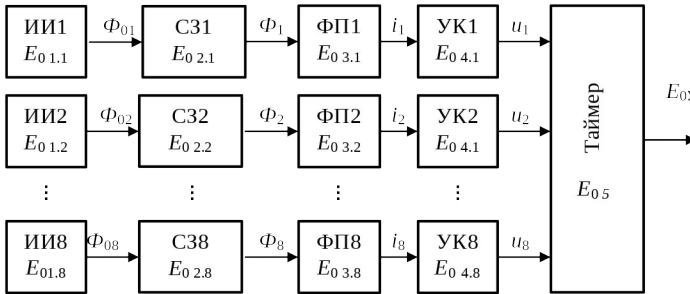


Рисунок 7 – Структурная схема формирования погрешности БОЭ ИИС

Абсолютная погрешность метода при измерении вектора скорости предложенным методом составит не более одной дискреты измерения времени факта пролета частицы по каждой световой завесе, что составляет не более  $\tau_M = l/c$ . Учитывая, что при наихудшем случае ( $|\vec{V}_{MM}| = 30$  км/с) погрешность измеряемого времени предложенным методом меньше соотношений  $(T_{Mx}^B - T_{Mx}^A)$ ,  $(T_{My}^B - T_{My}^A)$  и значения  $T_{Mz}^B$  на шесть порядков – допустимо погрешность метода в расчетах не учитывать.

При отражении луча от ММ фоновый световой поток  $\Phi_\phi$  может частично попасть в зону расположения ФП и превысить пороговый уровень его чувствительности ( $\Phi_\phi > \Phi_{пор}$ ). Предложен способ компенсации влияния фоновой засветки на погрешность преобразования и исключения пропуска ММ посредством размещения в слепой зоне световой завесы рядом с основным дополнительного ФД, сигнал с выхода которого в соответствии с алгоритмом (см. рис. 5) используется для принятия решения о возможности определения параметров ММ с регистрацией только факта нахождения ММ в ЗРМ, а также для уменьшения погрешности измерения с учетом источников и характера составляющих погрешности.

Выявлены основные эксплуатационные факторы, влияющие на результаты измерений и получена зависимость относительного коэффициента пропускания по току:

$$\frac{\Delta K_I}{K_I} = \frac{1}{K_h} \frac{dK_h}{d} + \frac{1}{K_{изг, \Sigma}} \frac{dK_{изг, \Sigma}}{d} + \frac{(1 + \tau_0 K_{y,n} \Phi_n)^{-m}}{K_{I0}} \left( \frac{dK_I}{d\Phi} + \frac{dK_I}{d\Phi_n} \right), \quad (13)$$

где  $K_i$  - коэффициенты передачи тока (при изгибе зеркальных пластин и радиационном фоне соответственно);  $\theta$  - температура;  $\Phi_y, \Phi_n$  - интегральные потоки  $\gamma$ -излучения и протонов соответственно,  $\tau_0$  - время жизни носителей зарядов во время радиационного фона.

Предложены согласование пространственных и энергетических параметров измерительных каналов и допусковый контроль доминирующих погрешностей, направленные на снижение погрешности определения координат лучепрерывания.

Обосновано введение функций самоконтроля работоспособности ИИС на межповерочном интервале времени  $Dt_i = t_{i+1} - t_i, i=0,1,2,\dots$  которая позволяет для определения выхода погрешности за пределы допуска  $E_{0доп}$  и принятия решений о проведении тестов и калибровок использовать финитное распределение погрешности:

$$F_{Ci}(t) = \varkappa \{F(t_{i+1}) - F(t_i)\}, \quad (14)$$

где  $\varkappa$  - нормирующий множитель, определяемый граничными условиями  $E_{0доп}$ , достижение которого означает метрологический отказ ИИС.  $F(t)$  соответствует закону распределения Бернштейна.

**В четвертой главе** приведен макетный образец разработанной системы, показаны результаты экспериментальных исследований.

Разработанный макет содержит две зеркальные пластины с серебряным покрытием; каркас с системой регулировки в 4-х положениях посредством лазерного уровня. Произведена имитация на зеркальной поверхности частиц, соизмеримых по линейному размеру с лазерным лучом.

Полученные результаты исследования лабораторного макета ИИС с двумя ЗРМ сопоставимы с теоретическими. Для изготовления отражающих поверхностей, наиболее критичных к условиям эксплуатации, выбрано серебро ( $k_{отд}=0,991 \dots 0,992$  при  $\lambda=0,5$  мкм и  $\Theta=-120 \dots 150$  °С).

Показана возможность создания промышленного образца БОЭ ИИС, реализующей метод двулучевого встречно-параллельного времяпролетного определения параметров движения ММ. При проведении эксперимента с доступной электронной компонентной базой получена относительная погрешность определения  $\delta_{\vec{V}_M} = 12,5\%$ . При использовании современной компонентной базы достижимая погрешность  $\delta_{\vec{V}_M} = 5 \dots 8\%$  для каждой компоненты вектора скорости. Существующие аналогичные устройства, например, измерители скоростей пули, имеют погрешность до 0,25%, но при

этом все реализованные устройства измеряют только одну проекцию вектора скорости, в отличие от предложенного метода измерения вектора скорости микрометеороида.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Произведен обзор и сравнительный анализ ИИС контроля параметров движения ММ, обоснован выбор типа и структуры БОЭ ИИС.
2. Разработан метод двулучевого встречно-параллельного времяпролетного определения параметров движения ММ и реализующей его структуры БОЭ ИИС, позволяющей, в отличие от известных методов и систем регистрации ММ, получать в реальном времени оценки компонент вектора  $\vec{V}_{\text{ММ}}$  скорости и геометрических размеров микрометеороидов в расширенном диапазоне скоростей и углов пролета ММ в ЗРМ.
3. Разработана методика формирования зоны регистрации ММ в форме группы плоских световых завес из спектрально разнесенных встречно-параллельных лазерных лучей микронного диаметра, многократно отраженных парными параллельными зеркальными плоскостями, которые позволяют измерять координаты прерывания лазерных лучей.
4. Построена математическая модель взаимодействия ММ с ЗРМ, позволившая получить оценки погрешности измерений скорости и геометрических размеров ММ предложенной ИИС.
5. Проведен анализ и разработаны методики уменьшения доминирующих погрешностей за счет согласования геометрических и энергетических параметров световых завес, введения дополнительных ПСЗ и применения тестовых циклов настройки и калибровки ИИС.
6. Предложен алгоритм самоконтроля работоспособности ИИС, основанный на периодическом тестовом прерывании формирующего ЗРМ лазерного луча, использование которого повышает достоверность измерения и позволяет существенно продлить срок службы ИИС.
7. Разработана структурная схема и выполнен лабораторный макет БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ; проведены стендовые экспериментальные исследования, по результатам которых получена относительная погрешность определения  $\delta_{\vec{V}_{\text{ММ}}} = 12,5\%$  с возможностью снижения до  $5,8\%$  при использовании современной компонентной базы.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

#### **Публикации, входящие в перечень ВАК РФ**

1. Гладышев, А.И., математическая модель оптической системы для измерения параметров высокоскоростных микрочастиц /А.И. Гладышев, А.М. Телегин, Е.А. Щелоков // цифровая обработка сигналов. – 2023. -№1. – С. 39-42

2. Щелоков, Е.А. Метод и устройство для оценивания параметров движения микрометеороидов на основе оптических систем / Е.А. Щелоков // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 56. – С.131-135.

3. Гладышев, А.И. Регистрация и оценка параметров микрометеороидов с использованием прерывания микрометеороидами световой завесы из многократного переотраженных оптических лучей / А.И. Гладышев, Е.А. Щелоков, А.М. Телегин // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. - 2022. - Т. 30. - № 3, с. 6-14

#### **Публикации, входящие в Scopus**

4. Schelokov, E., A discrete phase problem in reconstruction of signals in space-rocket hardware / E. Schelokov, A. Kuleshova // Conference: Information Technology and Nanotechnology. - 2017. - № 3, p. 14-22

#### **Патенты**

5. Патент №2 699 575 С1 Российская федерация, МПК Н04W48/20 Способ создания беспроводной сети, содержащей множество устройств, заявл. 06.11.2018; опубл. 06.09.2019 / Е.А. Щелоков, Д.В. Кунтушев, М.Е. Климанов, А.Н. Овсянников. – 10 с.

#### **Прочие публикации**

6. Щелоков, Е.А. Бесконтактное определение параметров движения микрометеороидов на основе лазерных систем/Е.А. Щелоков, А.А. Кулешова // Журнал «наукоемкие технологии» – №6. – 2017. – с. 28-31.

7. Гладышев, А.И. Теория «МИ» в отношении регистраторов параметров движения микрометеороидов и частиц космического мусора / А.И. Гладышев, Е.А. Щелоков, А.М. Телегин // «Российская наука в современном мире» LI Международная научно-практическая конференция. Научно-издательский центр «Актуальность РФ». - Сборник статей. – Москва, 2022, - С. 52-53.

8. Гладышев, А.И. Модель устройства для измерения параметров движения микрометеороидов и частиц космического мусора / А.И. Гладышев, Е.А. Щелоков, А.М. Телегин // «EurasiaScience» L международная научно-практическая конференция. Научно-издательский центр «Актуальность РФ». - Сборник статей. – Москва, 2022. – С. 99–100.

9. Щелоков, Е.А., Конструктивное решение для устройства сбора данных о параметрах движения микрометеороидных тел /Е.А. Щелоков, А.В. Рузанов // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («IV Козловские чтения»), – Самара, 2015. – С. 121–124.

10. Щелоков, Е.А. Оценка погрешности метода измерений оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов / Е.А. Щелоков, А.И. Данилин, Д.А. Щелоков // Конференция «Актуальные

проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», – Самара, 2017, – материалы Всероссийской научно-технической конференции, – С. 59-60.

11. Щелоков, Е.А. Преобразователь параметров движения микрометеороидов на основе лазерных систем / Е.А. Щелоков, А.И. Данилин, У.В. Бояркина, Е.С. Калинин // Конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», – Самара, 2015. – С. 47–49.

12. Щелоков, Е.А. Фотозлектронный преобразователь параметров движения микрометеороидных тел в околоземном пространстве / Е.А. Щелоков, Е.С. Калинин // III Всероссийский Форум с международным участием «Космическое приборостроение», сборник научных трудов, - Томск, 2015. – С. 145–146.

13. Щелоков, Е.А. Лазерные системы регистрации параметров движения, задача многократного переотражения / Е.А. Щелоков, Д.А. Щелоков // Конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», – Самара, 2016, материалы Всероссийской научно-технической конференции, – С. 59-60.

14. Щелоков, Е.А. Аналитический метод преобразования параметров движения микрометеороидных тел / Е.А. Щелоков, А.Н. Овсянников // Конференция, «Системный анализ, навигация и управление», – сборник трудов конференции, Евпатория, 2015. – С. 69-71.

15. Щелоков, Е.А. Применение лазерных технологий в космической технике / Е.А. Щелоков, С.А. Бадюков // VIII конференция «Будущее машиностроения России», сборник трудов конференции, – Москва, 2015. – С.790-791.

Формат 60x84 1/16. Уч.изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.  
e-mail: polygraph@samgtu.ru.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол №6 от 10.10.2023 г.)